

國家環境研究院

溫室氣體通量檢測技術開發驗證
及方法制定(2/4)

成果報告

案號: 113FB007

執行單位:中央研究院

執行期間:自 113 年 2 月 27 日起至 12 月 31 日止

印製年月:中華民國 113 年 12 月

國家環境研究院委託研究

國家環境研究院

溫室氣體通量檢測技術開發驗證
及方法制定(2/4)

成果報告

案號: 113FB007

計畫經費: 新臺幣 1040 萬元整

執行單位: 中央研究院

執行人員: 周崇光、陳奕穎、張頊瑞、洪緯、周冠霖、施郁庭、王瑋宏、陳彥宸、蔡朝陽

執行期間: 自 113 年 2 月 27 日起至 12 月 31 日止

印製年月: 中華民國 113 年 12 月

國家環境研究院委託研究

溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定計畫(2/4)

基本資料表

委辦單位	國家環境研究院		
執行單位	中央研究院		
參與計畫人員姓名	周崇光、陳奕穎、張頊瑞、洪緯、周冠霖、施郁庭、王瑋宏、陳彥宸、蔡朝陽		
年 度	113	計畫案號	113FB007
研究性質	<input type="checkbox"/> 基礎研究 <input type="checkbox"/> 應用研究 <input checked="" type="checkbox"/> 技術發展		
研究領域	環境科學		
計畫屬性	<input checked="" type="checkbox"/> 科技類 <input type="checkbox"/> 非科技類		
全程期間	112 年 4月 ~ 115 年 12 月		
本期期間	113 年 2月 ~ 113 年 12 月		
本期經費	億 10400 千元		
	資本支出		經常支出
	土地建築_____千元		人事費 2161.7 千元
	儀器設備_____千元		業務費 5778.3 千元
	其 他_____千元		材料費 0 千元
			其 他 2460 千元
摘要關鍵詞（中英文各三則）			
溫室氣體 (Greenhouse Gases)			
渦流相關法(Eddy Covariance Method)			
開放式農地(Open Farmland)			

計畫成果中英文摘要（簡要版）

一、 中文計畫名稱：

溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)

二、 英文計畫名稱：

Formulation of Measurement guidelines for Development and Validation of Greenhouse Gas Flux Observation Technology (2/4)

三、 案號：113FB007

四、 執行單位：

中央研究院

五、 計畫主持人（包括共同主持人）：

周崇光、陳奕穎、張頊瑞

六、 執行開始時間：

113/02/27

七、 執行結束時間：

113/12/31

八、 報告完成日期：

113/12/10

九、 報告總頁數：

359

十、 使用語文：

中文，英文

十一、 報告電子檔名稱：

溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4).DOC

十二、 報告電子檔格式：

pdf

十三、中文摘要關鍵詞：

溫室氣體，渦流相關法，開放式農地。

十四、英文摘要關鍵詞：

Greenhouse Gases, Eddy Covariance Method, Open Farmland

十五、中文摘要

為落實 2050 淨零排放目標，我國於民國 112 年 2 月 15 日公布施行「氣候變遷因應法」，透過強化法規政策方式，來面對全球嚴峻的氣候變遷現象。有別於獨立的排放點源可藉由碳盤查建立排放資料，開放式場域的溫室氣體收支變化必須藉由精確的監測調查加以掌握，有鑑於此，本計畫以開放式農業系統做為溫室氣體通量檢測技術開發驗證的目標場域，並設立下列四點目標：(1) 建立開放式農地(open farmland)場域溫室氣體通量檢測系統及方法。(2) 制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範。(3) 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引。(4) 完成 1 份開放式農地碳匯策略驗證與評估報告。

本計畫已完成以下工作：

- 1.) 彙整全世界主要通量網絡如全球通量觀測網(Fluxnet)、橡樹嶺國家實驗室生物地球化學動態檔案中心(ORNL DAAC)、以及區域通量網絡(如 AmeriFlux、ICOS、OzFlux、AsiaFlux 及 ChinaFLUX)的資訊，並對其通量網絡設立宗旨、現況及未來應用進行介紹。
- 2.) 溫室氣體通量檢測文獻之蒐集已彙整近 20 篇重要的溫室氣體研究進行摘述，包含亞洲地區(韓國、日本以及新加坡)都市場域通量檢測研究、農業場域氮肥施用及田間作業對二氧化碳(CO_2)及氧化亞氮(N_2O)的貢獻、森林的 N_2O 通量檢測等；技術資料的研析則包括探討渦流相關法和密閉罩法檢測 N_2O 以及甲烷 (CH_4) 通量的差異、衛星遙測與飛

機航測技術的應用等。

- 3.) 彙整國內外農業場域碳驗證標準方法，本報告摘要介紹我國碳驗證標準發展現況以及清潔發展機制方法學(CDM Methodology)和黃金標準(Gold standard, GS)以及 Verra 碳驗證標準(Verified Carbon Standard Program, VCS)方法學。
- 4.) 完成開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引草案的編撰，參考 ICOS 及其他通量測站架設規範，完成指引架構以及相關內容，主要章節包括典型通量檢測計畫工作流程、溫室氣體通量檢測系統架設、適用範圍、場域選擇、場域通量塔設置、溫室氣體通量檢測系統維護方法以及數據品質校驗方法、結果處理及基礎設備材料與人力需求配置等。
- 5.) 於農業部農業試驗所開放式農地場域建立三種溫室氣體通量(CO_2 、 CH_4 及 N_2O)的監測系統，並以「移除稻稈及間歇性灌溉」做為農地減碳情境測試，完成開放式農地碳匯策略驗證與評估報告。
- 6.) 完成兩場次的技術擴散暨教育訓練工作坊。

十六、 英文摘要

To achieve the goal of net-zero emissions by 2050, Taiwan enacted the ‘Climate Change Response Act’ on February 15, 2023. The act aims to address the severe global climate change phenomenon through strengthened regulations and policies. Unlike independent emission sources that can establish emission data through carbon audits, the changes in greenhouse gas balance in open fields must be monitored and investigated accurately. Therefore, this project targets open farmland systems for the development and verification of greenhouse gas flux detection technology, with the following four objectives: (1) Establish a greenhouse gas flux observation technology for open farmland. (2) Formulate procedures for the use, maintenance, and calibration of the greenhouse gas flux

detection system in open farmland. (3) Compile guidelines for greenhouse gas flux observation technology in open farmland. (4) Complete a verification and evaluation report on carbon sequestration strategies for open farmland.

The project has completed the following tasks:

1. Collected information on major flux networks worldwide, such as Fluxnet, ORNL DAAC, and regional flux networks (AmeriFlux, ICOS, OzFlux, AsiaFlux, and ChinaFLUX), and introduced their objectives, current status, and future applications.
2. Summarized nearly 20 important greenhouse gas research papers, including studies on urban flux detection in Asia (South Korea, Japan, and Singapore), the contribution of nitrogen fertilizer application and field operations to CO₂ and N₂O in agricultural fields, and N₂O flux observation in forests. Technical data analysis includes the differences between eddy covariance and closed chamber methods for detecting N₂O and CH₄ fluxes, and the application of satellite remote sensing and aerial survey technologies.
3. Summarized the carbon verification standard methods for agricultural fields domestically and internationally, introducing the current status of our country's carbon verification standards and methodologies such as CDM Methodology, Gold Standard (GS), and Verified Carbon Standard Program (VCS).
4. Drafted guidelines for greenhouse gas flux observation in open farmland, referencing ICOS and other flux station setup standards. The guidelines include typical flux observation project workflows, greenhouse gas flux observation system setup, applicable scope, site selection, flux tower setup, system maintenance methods, data quality verification methods, result processing, and basic equipment and manpower requirements.

5. Established monitoring systems for three types of greenhouse gas fluxes (CO₂, CH₄, and N₂O) in open farmland at the Agricultural Research Institute of the Ministry of Agriculture, and completed a verification and evaluation report on carbon sequestration strategies for open farmland using “removing rice straw and Alternate wetting-drying irrigation” as a carbon reduction scenario.
6. Conducted two technical dissemination and training workshops.

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	V
表目錄.....	IX
計畫成果中英文摘要（詳細版）.....	I
1 第一章 研究背景說明.....	1
1.1 引言	1
1.2 全球與台灣溫室氣體排放現況	1
2 第二章 計畫執行目標及內容	11
3 第三章 計畫執行方法.....	15
3.1 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引.....	18
3.2 開放式農地場域碳匯驗證評估報告.....	19
3.2.1 開放式農地場域溫室氣體減碳管理方式	20
3.2.2 開放式農地場域田間規劃	22
3.3 通量檢測系統技術擴散教育訓練工作坊	27
第四章、成果報告	29
4.1 建立開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統及方法	29
4.1.1 彙整國內外通量技術發展趨勢	29
4.1.2 通量檢測相關文獻及報告等實際應用現況彙整	47
4.1.3 彙整國內外農業場域碳驗證標準方法	73
4.1.4 彙整台灣溫室氣體相關法規和政策.....	111
4.2 制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範	115
4.2.1 開放式農地場域架設.....	115
4.2.2 溫室氣體通量檢測系統維護方法.....	123
4.2.3 數據品質校驗方法.....	141
(1) 原始資料蒐集&檢索(Data collection and retrieval).....	143
(2) 單位轉換(Unit conversion)	144

(3) 消除資料異常值(Despike)	144
(4) 消除資料趨勢性(Detrend)	145
(5) WPL 校正 (Webb-Pearman-Leuning calibration).....	145
(6) 時間延遲校正(Time delay calibration)	146
(7) 座標軸旋轉(Double rotation)	147
4.3 溫室氣體通量檢測指引	156
(一) 前言	156
(二) 渦流相關法通量監測工作流程	157
(三) 開放式及閉路式通量監測系統	158
(四) 開放式農地場域微氣象(microclimate)背景條件篩選.....	162
(五) 開放式農地場域溫室氣體通量足跡評估方法	162
(六) 監測場域之基礎設施與人力資源之配置需求	165
4.4 開放式農地場域碳匯驗證評估報告.....	166
4.4.1 開放式農地場域溫室氣體減排管理策略規劃.....	167
4.4.2 溫室氣體通量觀測.....	167
4.4.3 開放式農地場域微氣象觀測資料.....	170
4.4.4 運用通量足跡模式評估所測得溫室氣體通量之空間代表性	172
4.4.5 溫室氣體通量估算.....	173
4.5 通量檢測系統技術擴散教育訓練工作坊	176
第五章、結論與建議.....	179
5.1 成果摘要	179
5.2 建議	180
第六章 參考文獻	183
國家環境研究院「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)」案採購評選委員會第一次會議(評選會議)會議紀錄	189
評選會議委員意見及回覆	193
「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)」啟動會議會議紀錄.....	203

「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)」第一次工作進度報告會議 紀錄	205
第一次工作進度報告會議委員意見及回覆	207
溫室氣體通量檢測技術開發驗證與方法制定(2/4)」	第一次工作會議紀錄
.....	211
113 年度「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)」計畫期中報告審查 會議紀錄	213
期中工作進度報告會議委員意見及回覆	217
113 年「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)」計畫成果報告驗收審 查會議紀錄	224
成果報告會議委員意見及回覆	228
溫室氣體通量監測指引草案	I

圖目錄

圖 1-1 1850-2019 全球三種主要溫室氣體大氣濃度趨勢	2
圖 1-2 全球人為溫室氣體之二氧化碳暖化當量占比	3
圖 1-3 1990 至 2022 年溫室氣體排放量趨勢	3
圖 1-4 2022 台灣各類溫室氣體排放量占比	4
圖 1-5 綜合比較台灣(紅色)以及全球(藍色)水田甲烷排放	6
圖 1-6 糧食系統緩解碳排潛力(UN, 2022)	7
圖 3-1 本計畫流程圖	15
圖 3-2 開放式農地場域碳匯驗證評估流程	19
圖 3-3 霧峰氣象風場分析圖:資料範圍 2014~2017 年	23
圖 3-4 開放式農地碳匯驗證場域-霧峰農試所	24
圖 3-5 溫室氣體通量系統於霧峰農試所實地架設的照片	24
圖 3-6 水稻生長階段	25
圖 4-1 全球通量觀測網 (Fluxnet) 所涵蓋不同區域生態系統通量測站數量統計	30
圖 4-2 全球通量觀測網絡	31
圖 4-3 FLUXNET-CH ₄ Version 1.0 站點位置的全球地圖	31
圖 4-4 澳洲通量觀測系統(OzFlux)	33
圖 4-5 亞洲通量觀測系統 (AsiaFlux) 測站點位	34
圖 4-6 歐洲綜合碳觀測系統(ICOS)通量測站網絡	35
圖 4-7 ICOS 系統架構網絡(大氣、陸地生態系統和海洋系統)	36
圖 4-8 ICOS 通量測站申請、評估以及認證程序	37
圖 4-9 ICOS 通量測站數據資料品質處理程序	38
圖 4-10 ICOS Cities 溫室氣體觀測發展目標	39
圖 4-11 ICOS Cities 計畫中選擇的 15 個城市示意圖	40

圖 4-12 美洲通量觀測系統(Ameriflux)測站點位.....	42
圖 4-13 AmeriFlux 管理計畫組織架構	43
圖 4-14 AmeriFlux 資料品質處理程序圖	44
圖 4-15 ChinaFLUX 站點分佈圖	45
圖 4-16 南韓首爾首都圈 CO ₂ 通量觀測點位置以及每個觀測點的影像	50
圖 4-17 觀測期間（2017 年 1 月至 2018 年 12 月）的平均通量足跡範圍.....	51
圖 4-18 Hong et al. (2019)之通量檢測站點通量檢測和通量足跡	52
圖 4-19 Hong et al. (2019)報告之場域二氧化碳通量相關性比較	52
圖 4-20 日本東京市中心二氧化碳（CO ₂ ）的排放通量研究區域.....	53
圖 4-21 CO ₂ 平均日夜通量變化.....	53
圖 4-22 平日以及假日 CO ₂ 通量變化	53
圖 4-23 新加坡都會區二氧化碳通量調查研究之排放通量	54
圖 4-24 新加坡都會區二氧化碳通量調查研究 EC 站.....	54
圖 4-25 農業試驗所溫室氣體通量觀測場域	56
圖 4-26 Molodovskaya et al. (2012)研究中心地圖	57
圖 4-27 Chaichana et al. (2018)稻田實驗場地示意圖	58
圖 4-28 金寧德拉甲烷(CH ₄)釋放控制實驗場域	62
圖 4-29 美國東南部垃圾掩埋場現場測量方案。	63
圖 4-30 丹麥小波格斯科夫山毛櫸樹林的場地地圖。	64
圖 4-31 印度上空 CO ₂ 的 SCIAMACHY 和 GOSAT 資料與 Mauna Loa (MLO)和 Assekrem (ASK)的 NOAA 地面站資料以及採樣罐資料比較	66
圖 4-32 印度上空 CH ₄ 的 SCIAMACHY 和 GOSAT 資料與 Mauna Loa (MLO)和 Assekrem (ASK)的 NOAA 地面站資料以及採樣罐資料比較。	66
圖 4-33 JAL 飛機上配置之自動空氣採樣系統圖示。	67
圖 4-34 波音 747-400 飛機機艙地板下的設備和風流管道的三維示意圖。	68

圖 4-35 2006 年 4 月 22 日日本航空公司 (JAL) 從雪梨飛往成田的航班期間， ASE 和 CME 測得的 CO ₂ 濃度與經緯度分佈。	68
圖 4-36 美國 NASA 的 OCO-2 衛星和 NOAA 的全球溫室氣體監測網架構摘要..	70
圖 4-37 NOAA 的 Carbon Tracker 模式中主要的機制模組。	71
圖 4-38 Carbon Tracker 推估全球陸域生態系 2020 年 1°*1° 之 CO ₂ 通量	71
圖 4-39 Carbon Tracker 推估 2000-2020 年美國全國的化石 CO ₂ 排放量以及主要生 態系 CO ₂ 通量	72
圖 4-40 土壤有機碳(SOC)基本方法學框架.....	90
圖 4-41 通量儀器理想設置高度	116
圖 4-42 水稻觀測田儀器架設高度.....	116
圖 4-43 通量足跡示意圖(a)通量足跡分布	118
圖 4-44 開放式二氣化碳/水氣分析儀.....	124
圖 4-45 三維音波風速計感測器上的吸水纖維正確安裝的方式.....	125
圖 4-46 IRGASON 氣體分析儀鏡面上的吸水纖維正確安裝的方式	126
圖 4-47 IRGASON 校正套管安裝示意圖.....	127
圖 4-48 開放式甲烷 (CH ₄)氣體分析儀.....	131
圖 4-49 LI-7700 乾燥劑位置示意圖.....	132
圖 4-50 閉路式氧化亞氮氣體分析儀.....	134
圖 4-51 氣體分析儀器 Tildas 對於兩種不同溫室氣體 N ₂ O / CH ₄ 的濃度校正結果	138
圖 4-52 Aeris_Ultra 精密度結果	140
圖 4-53 生態系統中渦流示意圖	141
圖 4-54 雷諾分解(Reynolds decomposition)理論示意圖	142
圖 4-55 數據資料處理流程	143
圖 4-56 消除資料異常值示意圖 (Despiking)	145

圖 4-57 WPL 通量校正前後示意圖	146
圖 4-58 時間延遲校正示意圖(Time delay correction)	147
圖 4-59 地表能量平衡示意圖	152
圖 4-60 資料頻譜分析示意圖	154
圖 4-61 涡流相關法典型通量監測工作流程	158
圖 4-62 通量足跡概念	163
圖 4-63 不同架設高度蒸發散(ET)通量貢獻與迎風距離關係	164
圖 4-64 不同架設高度通量潛在貢獻	165
圖 4-65 霧峰農試所 49 號和 53 號試驗田	169
圖 4-66 微水文氣象資料架設地點示意圖	171
圖 4-67 一期稻作的土壤 10 公分深度溫度及土壤水分時序圖	171
圖 4-68 一期稻作 49 號和 53 號試驗田的日夜風場圖以及風塊圖	172
圖 4-69 一期稻作之 CO ₂ 累積碳匯量估算。上方 x 軸為插秧後天數	174
圖 4-70 一期稻作之 CH ₄ 的累積排量估算。上方 x 軸為插秧後天數	175
圖 4-71 一期稻作之 N ₂ O 的累積排量估算，淺綠色圓點是施肥時間	175
圖 4-72 技術擴散暨教育訓練工作坊之簽到表及活動照片	177

表目錄

表 1-1 1990-2019 全球主要人為溫室氣體排放當量 (GtCO ₂ -eq) (IPCC, 2022)	4
表 1-2 各國對於農業溫室氣體減排策略及現況.....	8
表 3-1 預定工作進度.....	16
表 3-2 查核點說明	17
表 3-3 開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引.....	18
表 3-4 減輕農業生態系統中的溫室氣體排放措施.....	21
表 3-5 本計畫減碳情境說明	26
表 3-6 常見溫室氣體通量監測設備廠牌及型號及規格	27
表 4-1 首爾都會區 CO ₂ 通量觀測點位	49
表 4-2 義大利及台灣地區水稻田甲烷排放通量比較.....	59
表 4-3 台灣各地區水稻田甲烷排放量調查結果.....	60
表 4-4 水稻田場域在不同國家調查結果	61
表 4-5 碳庫計算項目	74
表 4-6 「調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量」方法的關鍵要素	75
表 4-7 CDM methodologies 名詞定義.....	77
表 4-8 耕作模式參數定義	78
表 4-9 IPCC 栽培期間水文情況調整因子	82
表 4-10 IPCC 栽培期前水文調整因子	82
表 4-11 IPCC 預設栽培期前用於考量有機改良劑調整因子	83
表 4-12 基線和計畫排放係數於不同情境之調整因子.....	84
表 4-13 數據/參數	85
表 4-14 對於箱體設計之技術選項	87
表 4-15 現地氣體採樣.....	88
表 4-16 實驗室氣體分析.....	88

表 4-17 土壤有機碳方法框架名詞定義.....	92
表 4-18 基線和計畫情境中選擇的碳庫.....	103
表 4-19 基線和計畫情境中包含或不包含在計畫邊界內的溫室氣體源	104
表 4-20 基線情境中 ALM 實務操作的最低規範.....	107
表 4-21 國外認證機構方法學比較	1121
表 4-22 溫室氣體相關法規	112
表 4-23 ICOS 通量網絡以及亞洲 Asia Flux 區域通量網絡規範說明	121
表 4-24 水氣(H ₂ O)、二氧化碳(CO ₂)及三維音波風速計分析儀維護	130
表 4-25 三種不同溫室氣體的校正曲線實際濃度配製點	137
表 4-26 氣體分析儀器精密度測試結果.....	139
表 4-27 通量觀測站儀器維護人力(時間)需求表.....	166
表 4-28 田間管理紀錄.....	169
表 4-29 微氣象水文資料.....	171
表 4-30 水稻種植各期作甲烷排放係數.....	174
表 4-31 第二場次通量檢測系統技術擴散教育訓練工作坊議程	176

報告大綱

本報告共分為六個主要章節，包括：建立開放式農地(open farmland)場域溫室氣體通量檢測系統及方法、研擬開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範、編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引、開放式農地碳匯策略驗證與評估報告等之執行成果。

第一章說明計畫背景以及全球與台灣溫室氣體排放現況。

第二章說明計畫目標以及計畫的工作內容，包括：建立開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統及方法、研擬開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範、編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引、開放式農地碳匯驗證評估報告、辦理技術擴散暨教育訓練工作坊等。

第三章說明計畫執行方法，主要內容包括：編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引、開放式農地碳匯驗證策略評估報告、以及技術擴散暨教育訓練工作坊的實際執行方法。

第四章為細部成果報告，內容包括：參考 ICOS 生態測站規範建立開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統及方法、參考國外通量測站架設方法及歐洲綜合碳觀測系統(Integrated Carbon Observation System, ICOS)測站認證標準草擬開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引草案、於霧峰農試所進行開放式農地碳匯驗證策略評估並撰寫報告、以及技術擴散暨教育訓練工作坊等工項的執行進度。

第五章說明結論與建議，以及計畫的查核重點與成果摘要。

第六章為參考文獻，詳列本報告內容中引用的參考文獻。

計畫成果中英文摘要（詳細版）

計畫名稱：溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)

計畫執行單位：中央研究院

計畫主持人(包括協同主持人)：周崇光、陳奕穎、張頊瑞

計畫期程：113 年 02 月 27 日起至 113 年 12 月 31 日止

計畫經費：10,400 千元

中文摘要

為落實 2050 淨零排放目標，我國於民國 112 年 2 月 15 日公布施行「氣候變遷因應法」，透過強化法規政策方式，來面對全球嚴峻的氣候變遷現象。有別於獨立的排放點源可藉由碳盤查建立排放資料，開放式場域的溫室氣體收支變化必須藉由精確的監測調查加以掌握，有鑑於此，本計畫以開放式農業系統做為溫室氣體通量檢測技術開發驗證的目標場域，並設立下列四點目標：(1) 建立開放式農地(open farmland)場域溫室氣體通量檢測系統及方法。(2) 制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範。(3) 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引。(4) 完成 1 份開放式農地碳匯策略驗證與評估報告。本計畫是實現淨零碳排放目標的重要一步。所提出的方法可用於評估農業實踐對溫室氣體排放的短期和中期影響，從而為實施合理的政策提供重要參考。

本計畫已完成以下工作：

1. 彙整全世界主要通量網絡如全球通量觀測網(Fluxnet)、橡樹嶺國家實驗室生物地球化學動態檔案中心(ORNL DAAC)、以及區域通量網絡(如 AmeriFlux、ICOS、OzFlux、AsiaFlux 及 ChinaFLUX)的資訊，並對其通量網絡設立宗旨、現況及未來應用進行介紹。
2. 溫室氣體通量檢測文獻之蒐集已彙整近 20 篇重要的溫室氣體研究進行摘述，包含亞洲地區(韓國、日本以及新加坡)都市場域通量檢測研究、農業場域氮肥施用及田間作業對二氧化碳(CO_2)及氧化亞氮(N_2O)的貢獻、森林的 N_2O 通量檢測等；技術資料的研析則包括探討渦流相關法和密閉罩法檢測 N_2O 以及甲烷(CH_4)通量的差異、衛星遙測與飛機航測技術的應用等。
3. 彙整國內外農業場域碳驗證標準方法的項目中，本報告摘要介紹我國碳驗證標準發展現況以及清潔發展機制方法學(CDM Methodology)和黃金標準(Gold standard, GS) 以及 Verra 碳驗證標準(Verified Carbon Standard Program, VCS)方

法學。

4. 完成開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引草案的編撰，主要參考 ICOS 及國外通量測站架設規範，初步完成指引架構以及相關內容，主要章節包括典型通量檢測計畫工作流程、溫室氣體通量檢測系統架設、適用範圍、場域選擇、場域通量塔設置、溫室氣體通量檢測系統維護方法以及數據品質校驗方法、結果處理及基礎設備材料與人力需求配置等。
5. 於農業部農業試驗所開放式農地場域建立三種溫室氣體通量(CO_2 、 CH_4 及 N_2O)的監測系統，並以「移除稻稈及間歇性灌溉」做為農地減碳情境測試，完成開放式農地碳匯策略驗證與評估報告。
6. 完成兩場次的技術擴散暨教育訓練工作坊。

英文摘要

To achieve the goal of net-zero emissions by 2050, Taiwan enacted the ‘Climate Change Response Act’ on February 15, 2023. The act aims to address the severe global climate change phenomenon through strengthened regulations and policies. Unlike independent emission sources that can establish emission data through carbon audits, the changes in greenhouse gas balance in open fields must be monitored and investigated accurately. Therefore, this project targets open farmland systems for the development and verification of greenhouse gas flux detection technology, with the following four objectives: (1) Establish a greenhouse gas flux observation technology for open farmland. (2) Formulate regulations for the use, maintenance, and calibration of the greenhouse gas flux detection system in open farmland. (3) Compile guidelines for greenhouse gas flux observation technology in open farmland. (4) Complete a verification and evaluation report on carbon sequestration strategies for open farmland. This project is a significant step towards achieving the net-zero carbon emission goal. The proposed approach can be applied to assess the short and medium-term impacts of agricultural practices on greenhouse gas emissions, thereby providing an important reference for the implementation of sound policies.

The project has completed the following tasks:

1. Collected information on major flux networks worldwide, such as Fluxnet, ORNL DAAC, and regional flux networks (AmeriFlux, ICOS, OzFlux, AsiaFlux, and ChinaFLUX), and introduced their objectives, current status, and future applications.

-
2. Summarized nearly 20 important greenhouse gas research papers, including studies on urban flux detection in Asia (South Korea, Japan, and Singapore), the contribution of nitrogen fertilizer application and field operations to CO₂ and N₂O in agricultural fields, and N₂O flux observation in forests. Technical data analysis includes the differences between eddy covariance and closed chamber methods for detecting N₂O and CH₄ fluxes, and the application of satellite remote sensing and aerial survey technologies.
 3. Summarized the carbon verification standard methods for agricultural fields domestically and internationally, introducing the current status of our country's carbon verification standards and methodologies such as CDM Methodology, Gold Standard (GS), and Verified Carbon Standard Program (VCS).
 4. Drafted guidelines for greenhouse gas flux observation in open farmland, referencing ICOS and other flux station setup standards. The guidelines include typical flux observation project workflows, greenhouse gas flux observation system setup, applicable scope, site selection, flux tower setup, system maintenance methods, data quality verification methods, result processing, and basic equipment and manpower requirements.
 5. A monitoring system for three types of greenhouse gas fluxes (CO₂, CH₄, and N₂O) was established in the open farmland of the Agricultural Research Institute of the Ministry of Agriculture. The scenario of “removing rice straw and alternate wetting -drying irrigation” was used as a carbon reduction test for farmland. The verification and evaluation report of the open farmland carbon sequestration strategy was completed.
 6. Conducted two technical dissemination and training workshops.

前言

為落實「2050 淨零排放」政策目標及《氣候變遷因應法》之相關規範，政府各部門正透過強化法規政策方式，來面對全球嚴峻的氣候變遷現象。大氣溫室氣體生命期非常長，現在監測到的濃度是長期累積的結果，採行減量措施所產生區域(碳源、碳匯)變化，無法透過濃度資料來呈現績效。然目前還沒有簡單、完整且可靠的技術來準確地監測各種溫室氣體 (例如：CO₂、CH₄ 及 N₂O)的排放量。本計畫之目的為發展開放式場域溫室氣體通量檢測技術，透過本計畫之技術開發、驗證及方法研擬，將可應用於評估農業施作對溫室氣體短、中期的影響，進而提

供更為準確的環境調查資料供政策擬定之參考。本計畫已於 112 年進行國內外溫室氣體排放現況及通量測量技術發展趨勢資訊蒐集，並彙整不同場域之溫室氣體通量檢測文獻與實際應用現況，同時參酌國內外通量網絡(ICOS、AmeriFlux 及 AsiaFlux 等)測站驗證規範，建立溫室氣體通量檢測儀器精密度及再現性測試程序，初步訂定在開放場域中檢測三種溫室氣體(CO_2 、 CH_4 及 N_2O) 通量的方法。為進一步完善溫室氣體通量檢測技術及落實於開放場域驗證，本年度計畫 (113 年)以開放式農地(open farmland)場域為標的，建立該場域溫室氣體通量相關檢測技術、檢測系統方法、使用、維護、校驗規範，並編撰溫室氣體通量監測指引，透過台中霧峰農地減碳情境測試，提供相關部門後續執行開放式農地碳匯驗證評估之參考。

研究方法

本團隊先進行資料蒐集，包括國內外溫室氣體排放現況以及通量技術發展趨勢，以及彙整不同通量場域，如：都市區域、農業系統等的相關文獻及報告等實際應用現況，以及關於技術方面如探討渦流相關法和密閉罩法檢測 N_2O 以及甲烷 (CH_4) 通量的差異、衛星遙測與飛機航測技術的應用等。並參考國外通量網絡 (ICOS、及 LI-COR Biosciences 通量測站)的測站架設規範，初步研擬開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引架構以及相關內容，主要章節包括典型通量檢測計畫工作流程、溫室氣體通量檢測系統架設、適用範圍、場域選擇、場域通量塔設置、溫室氣體通量檢測系統維護方法以及數據品質校驗方法、結果處理及基礎設備材料與人力需求配置等。另為建立上述指引應用於開放式農地場域碳匯驗證的實場操作經驗，本團隊已於農業部農業試驗所開放式農地場域建立三種溫室氣體通量(CO_2 、 CH_4 及 N_2O) 的監測系統，並以「移除稻稈及間歇性灌溉」做為農地減碳情境測試，進行實際的案例研究。此外，並辦理 2 場次的通量檢測技術工作坊，進行技術擴散。

結果

1. 彙整全世界主要通量網絡如全球通量觀測網(Fluxnet)、橡樹嶺國家實驗室生物地球化學動態檔案中心(ORNL DAAC)、以及區域通量網絡(如 AmeriFlux、ICOS、OzFlux、AsiaFlux 及 ChinaFLUX)的資訊，並對其通量網絡設立宗旨、現況及未來應用進行介紹。
2. 溫室氣體通量檢測文獻之蒐集已彙整近 20 篇重要的溫室氣體研究進行摘述，包含亞洲地區(韓國、日本以及新加坡)都市場域通量檢測研究、農業場域氮肥

施用及田間作業對二氧化碳(CO_2)及氧化亞氮(N_2O)的貢獻、森林的 N_2O 通量檢測等；技術資料的研析則包括探討渦流相關法和密閉罩法檢測 N_2O 以及甲烷(CH_4)通量的差異、衛星遙測與飛機航測技術的應用等。

3. 彙整國外農業場域碳驗證標準方法，本報告摘要介紹我國碳驗證標準發展現況以及國際清潔發展機制方法學(CDM Methodology)和黃金標準(Gold standard, GS)方法學以及 Verra 碳驗證標準(Verified Carbon Standard Program, VCS)方法學。
4. 完成開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引草案的編撰，參考 ICOS 及 LI-COR Biosciences 通量測站架設規範，初步研擬指引架構以及相關內容，主要章節包括典型通量檢測計畫工作流程、溫室氣體通量檢測系統架設、適用範圍、場域選擇、場域通量塔設置、溫室氣體通量檢測系統維護方法以及數據品質校驗方法、結果處理及基礎設備材料與人力需求配置等。
5. 於農業部農業試驗所開放式農地場域建立三種溫室氣體通量(CO_2 、 CH_4 及 N_2O)的監測系統，並以「移除稻稈及間歇性灌溉」做為農地減碳情境測試，完成開放式農地碳匯策略驗證與評估報告。113 年一期稻作溫室氣體監測資料顯示：作物生長產生的 CO_2 碳匯約 8.6 噸 $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ， CH_4 以及 N_2O 的累積通量分別是 $33 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ 以及 $0.5 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$ 。其中 CH_4 累積排放量較國家清冊參數降低 10.6%，不過本計畫於霧峰農地進行之移除稻稈及間歇性灌溉試驗因為屬單一測試，目的為呈現技術之可應用性，對於確實的減量效益尚非定論，仍需更多的測試資料加以確認。
6. 完成兩場次的技術擴散暨教育訓練工作坊。

結論

本計畫參考 ICOS 的測站架設規範，草擬了開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範，並同步研擬開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引草案，提供後續推動碳排放監測及碳匯效益驗證作業之參考。

依本計畫採用的量測儀器(規範如表 3-6)及通量塔建置規格(請參考附錄溫室氣體通量檢測指引草案的 3.5~3.5.3 章節)，本計畫採用的 2 公尺高度通量塔在目標場域(100m x 100m 平坦地形)可以涵蓋的通量足跡範圍為 80%，所得到的通量數值具有足夠的代表性。

本計畫採用所建置之設備及方法，實際進行一次開放式農地場域碳匯驗證評估，

計畫案例為霧峰一期稻作採行「移除稻稈及間歇性灌溉」降低 CH₄ 排放，計畫之實測通量為 33 kg CH₄ ha⁻¹，相對於我國國家溫室氣體排放清冊報告所採用的中彰投地區一期稻作甲烷排放係數減少 10.6% 甲烷排放量。本計畫報告的案例屬單一測試，目的為呈現技術之可應用性，對於確實的減量效益尚非定論，仍需更多的測試資料加以確認。

建議事項

本計畫在 112 年初步建立溫室氣體通量檢測之設施與相關程序，並於 113 年計畫期間在開放式農業場域進行了方法測試，確認相關方法與程序的可行性。為了將成果能夠延續或放大，建議後期接續計畫可接續進行以下的工作內容：

1. 以本計畫之技術資料為基礎，將開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引擴大推廣(如辦理相關的技術擴散教育訓練工作坊)，或是將資料分享給相關單位做為開放式場域通量檢測技術之參考。
2. 持續精進相關技術並應用在其他場域，例如掩埋場或是都會區域，提供更廣泛的溫室氣體排放量實測資料。

第一章 研究背景說明

1.1 引言

為落實「2050 淨零排放」政策目標及《氣候變遷因應法》之相關規範，政府各部門正透過強化法規政策方式，來面對全球嚴峻的氣候變遷現象。大氣溫室氣體生命期非常長，現在監測到的濃度是長期累積的結果，採行減量措施所產生區域(碳源、碳匯)變化，無法透過濃度資料來呈現績效。然目前還沒有簡單、完整且可靠的技術來準確地監測各種溫室氣體 (例如： CO_2 、 CH_4 及 N_2O) 的排放量。本計畫之目的即為發展開放式場域溫室氣體通量檢測技術，透過本計畫之技術開發、驗證及方法研擬，將可精進農業施作對溫室氣體短、中期影響的評估，進而提供更準確的環境調查資料以為政策擬定之參考。

本計畫已於 112 年進行國內外溫室氣體排放現況及通量測量技術發展趨勢資訊之蒐集，並彙整不同場域之溫室氣體通量檢測文獻與實際應用現況，同時參酌國內外通量網絡(ICOS、AmeriFlux 及 AsiaFlux 等)測站驗證規範，建立溫室氣體通量檢測儀器精密度及再現性測試程序，初步訂定在開放場域中檢測三種溫室氣體(CO_2 、 CH_4 及 N_2O) 通量的方法。

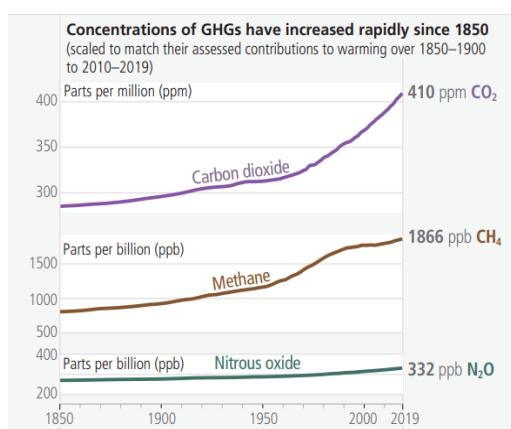
為進一步完善溫室氣體通量檢測技術及落實於開放場域驗證，本年度計畫(113 年)以開放式農地(open farmland)場域為標的，建立該場域溫室氣體通量相關檢測技術、檢測系統方法、使用、維護、校驗規範，以利編撰溫室氣體通量檢測指引，並透過農地減碳情境測試，提供相關部門後續執行開放式農地碳匯驗證評估之參考。

1.2 全球與台灣溫室氣體排放現況

科學研究指出氣候暖化主要是由人類活動產生之臭氧(O_3)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亞氮(N_2O) 和其他鹵化氣體等溫室氣體(Greenhouse Gases)引起的。農業部門所產生的溫室氣體約占全球人類活動 1/5 (約占全球 20%)，也因每

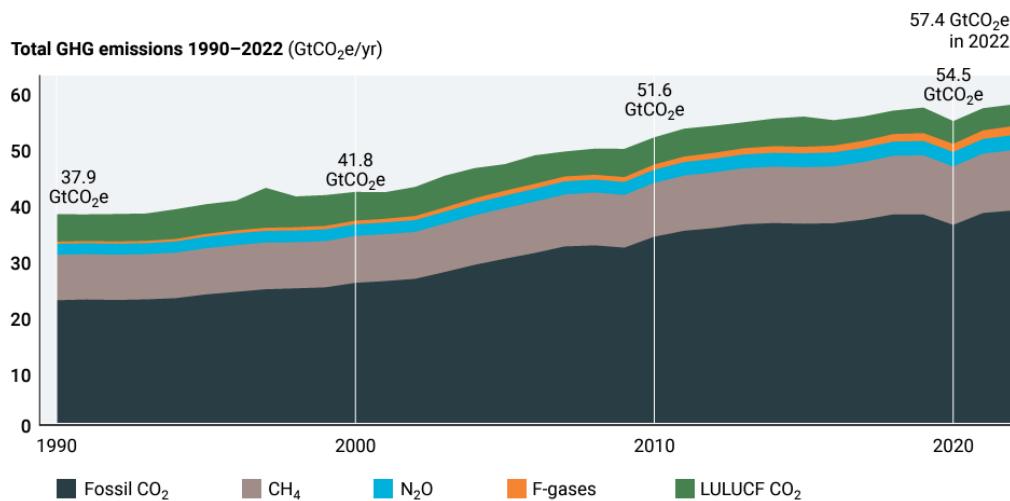
年土地利用、生質燃燒以及土壤裂解等因素，皆會影響並增加氣候變遷的驅動力 (Dorich et al., 2020)。根據 2023 年 IPCC 報告統計，從 1850 年到 2019 年累積淨二氧化碳排放量來看，有一半以上是發生在 1850-1989 年間。而 2019 年大氣中二氧化氮濃度 (410 ppm) 是過去兩百萬年來最高，甲烷 (1866 ppb)、氧化亞氮 (332 ppb) 則為八十萬年來最高 (圖 1-1) (IPCC, 2023)。2019 年全球約 79% 的溫室氣體排放來自能源、工業、交通、和建築部門；22% 來自農業、林業和其他土地利用 (圖 1-2) (IPCC, 2023)。表 1-1 分類統計全球人為溫室氣體排放，其中二氧化碳 (CO_2) 排放最為大宗且主要來自化石燃料、能源以及工業部門，其次為農業以及土地利用所產生的甲烷 (CH_4) 及氧化亞氮 (N_2O) 等 (IPCC, 2022)。

2021 至 2022 年，全球溫室氣體排放量增加了 1.2%，達到 57.4 Gt CO_2e 的新紀錄 (圖 1-2)。除交通運輸外，所有行業均已從 COVID-19 大流行導致的排放下降中全面反彈，目前已超過 2019 年的水平。化石燃料燃燒和工業過程產生的二氧化氮排放量是整體成長的主要貢獻者，約佔目前溫室氣體排放量的三分之二。甲烷 (CH_4)、氧化亞氮 (N_2O) 和氟化氣體 (F-gases) 的排放量正在迅速增加，這些氣體具有較高的全球暖化潛力，約佔當前溫室氣體排放量的四分之一 (UNEP, 2023)。



*資料來源:IPCC (2023)

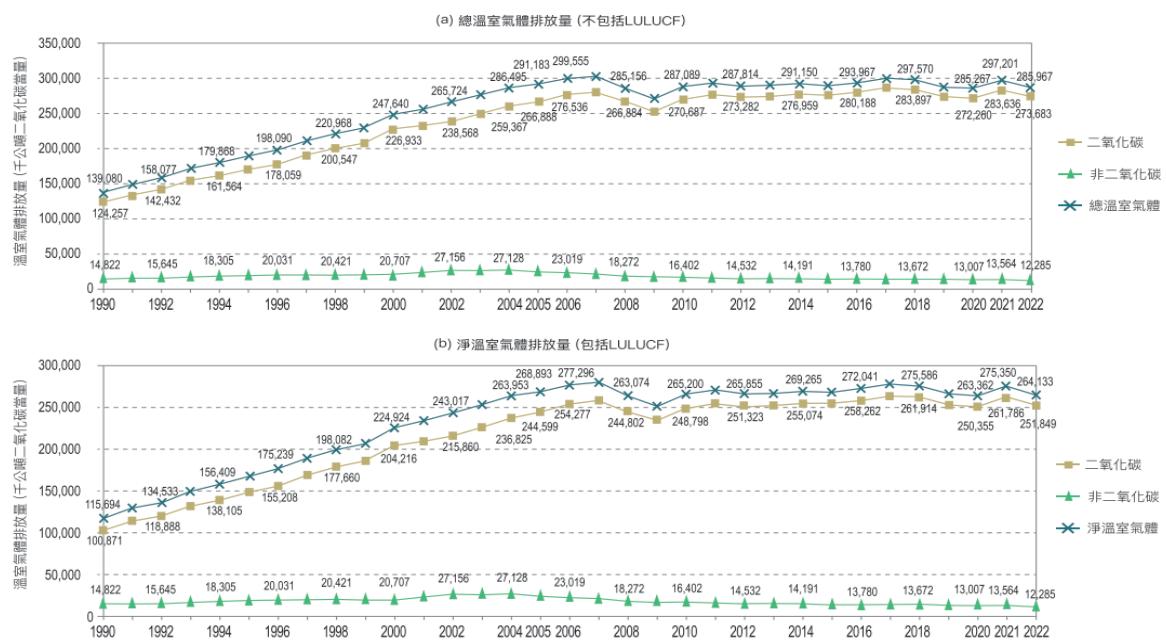
圖 1-1 1850-2019 全球三種主要溫室氣體大氣濃度趨勢



*資料來源: UNEP (2023)

圖 1-2 全球人為溫室氣體之二氧化碳暖化當量占比

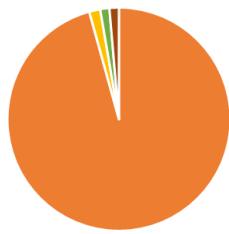
另參考 2024 年台灣溫室氣體排放清冊資料，我國 2022 年不包含土地利用、土地利用變化及林業(LULUCF) 之溫室氣體排放仍以二氧化碳占比最大(95.70%)，其次為甲烷(1.60%)，再其次為含氟溫室氣體(1.37%)及氧化亞氮(1.33%)。此外，各部門溫室氣體排放量占比以能源部門最大(90.87%)，其次為工業製程及產品使用部門 (7.08%)、農業部門(1.11%)以及廢棄物部門(0.94%)(MOENV, 2024)。



*資料來源: MOENV (2024)

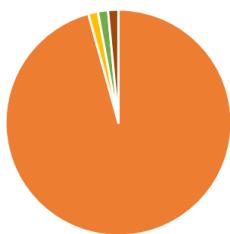
圖 1-3 1990 至 2022 年溫室氣體排放量趨勢(a)不包括(LULUCF)溫室氣體排放量；(b)包括(LULUCF)溫室氣體排放量

2022年(不包括LULUCF)



■ 二氧化碳 95.3% ■ 甲烷 1.5%
■ 氧化亞氮 1.82% ■ 含氟氣體 1.38%

2022年(包括LULUCF)



■ 二氧化碳 94.95% ■ 甲烷 1.62%
■ 氧化亞氮 1.97% ■ 含氟氣體 1.46%

*資料來源: MOENV (2024)

圖 1- 4 2022 台灣各類溫室氣體排放量占比(a) 不包括(LULUCF) ; (b) 包括(LULUCF)

農業部門總溫室氣體排放量為 3,178 kton CO₂e，農業溫室氣體種類包含甲烷、氧化亞氮及少量二氧化碳，其中氧化亞氮(N₂O)總排放量以「農耕土壤」排放占 30.6%為最高，甲烷(CH₄)排放以「水稻種植」占總農業溫室氣體之 18.1%(MOENV, 2024)。

表 1- 1 1990-2019 全球主要人為溫室氣體排放當量 (GtCO₂-eq) (IPCC, 2022)

Items	2019 emissions (GtCO ₂ -eq)	1990-2019 increase (GtCO ₂ -eq)	Emissions in 2019 relative to 1990(%)
CO ₂ -FFI	38 ± 3	15	167
CO ₂ -LULUCF	6.6 ± 4.6	1.6	133
CH ₄	11 ± 3.2	2.4	129
N ₂ O	2.7 ± 1.6	0.65	133
F-gases	1.4 ± 0.14	0.97	354
Total	59 ± 6.6	21	154

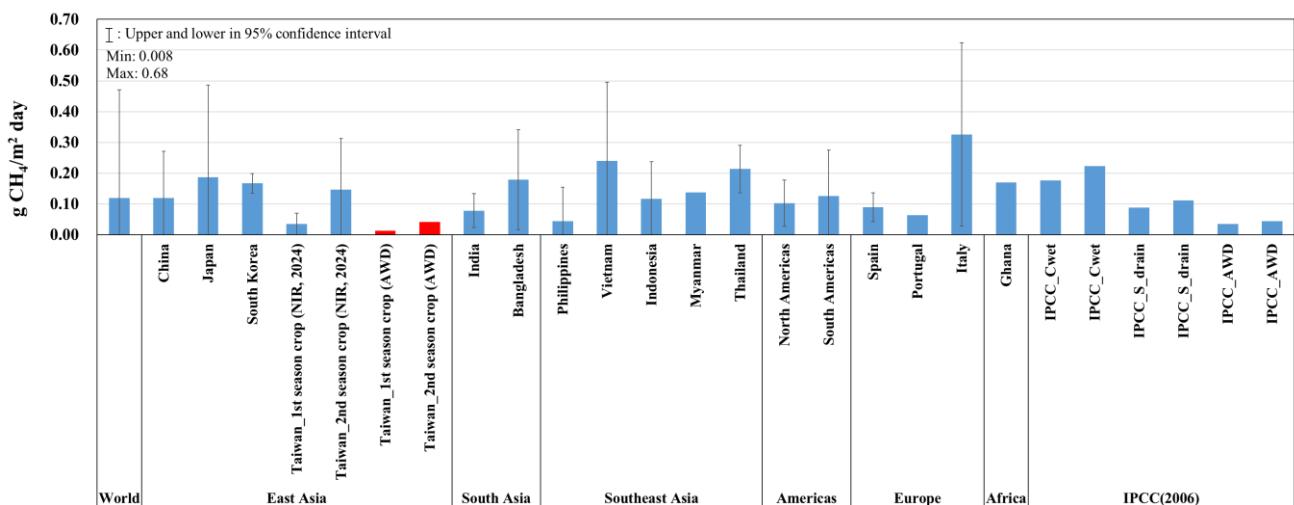
CO₂是最廣泛關注的溫室氣體之一，主要來自燃燒化石燃料和森林伐木等人類活動以及生物呼吸作用。它的增加導致全球氣溫上升，海平面上升並對生態系統和農業產生重大影響。我國 2022 年二氧化碳排放量占總溫室氣體排放量 95.70%，以能源部門占 94.25%、工業製程及產品使用部門占 5.40%、農業部門與廢棄物部門分別占 0.01%與 0.34%(MOENV, 2024)。

N₂O 是導致氣候變化的最重要的溫室氣體之一，它是繼二氧化碳和甲烷之後的第三大溫室氣體，其滯留時間長達 121 年，全球暖化潛力是 CO₂的 265 倍。N₂O

除了造成約 7% 的人為溫室效應外，預計還將成為 21 世紀主要的平流層臭氧消耗物質，它將間接產生有害影響，如紫外線透射率增加且影響生物體及人類活動。我國 2022 年氧化亞氮排放量占總溫室氣體排放量 1.33%，其中，以工業製程及產品使用部門占最高(40.15%)，其餘依次為農業部門占 29.04%、能源部門占 27.81%，廢棄物部門占 2.99%(MOENV, 2024)。大部分人為農業 N₂O 排放是由於施肥等環境因素透過土壤硝化和脫硝反應過程產生的，因此土壤和作物管理可能影響 N₂O 排放量的變化。農耕土壤的 N₂O 排放是由微生物過程所驅動，其中包括硝化作用和脫硝作用。調節硝化和脫硝活性的因素主要與硝化細菌和脫硝菌所需的礦物氮 (N)、氧氣和可降解碳 (C) 來源有關。間接控制包括土壤溫度、濕度、pH 值和土壤質地有關(Zhang et al., 2022)。硝化作用主要發生在通氣良好、含水量適中的土壤中，反之脫硝作用是微生物在厭氧條件下發生的過程。在硝化過程中，當氨 (NH₃，與銨鹽 NH₄⁺) 被氧化為硝酸鹽 (NO₃⁻) 時，一小部分氮(N)可能會以 N₂O 的形式損失。土壤碳基質(C)是脫硝作用的電子提供者，在脫硝過程中，微生物利用土壤碳化作為能量和電子來源，促進硝酸鹽還原為氣態氮化合物。在這個過程中也因微生物在有機物分解過程中活動和呼吸消耗氧氣，使得土壤中的氧氣含量會下降，形成缺氧或厭氧環境。硝化細菌和脫硝細菌在氮相對豐富的環境中最為活躍，這通常出現在土壤添加化肥、糞肥或農作物殘渣後(Bhattacharyya and Barman, 2018)。

CH₄是另一個重要的溫室氣體，來自天然和人類活動，如：沼氣釋放、牲畜排放和能源生產以及掩埋場的逸散和水稻種植。儘管 CH₄ 在大氣中的濃度比 CO₂ 低，但因為它的全球暖化潛勢 GWP 為 CO₂ 的二十多倍，所以它的增加對全球暖化有更強烈的影響。我國 2022 年甲烷排放量占總溫室氣體排放量 1.60%，其中，以農業部門占 44.97%，以「水稻種植」占總農業溫室氣體之 18.1%。其餘依次為廢棄物部門占 36.23%、能源部門占 18.27%、及工業製程及產品使用部門占 0.53%(MOENV, 2024)。

全球約 90% 的水稻種植位於亞洲，其中 23% 位於東亞(南韓、日本以及中國等)，45% 位於南亞以印度地區為主要栽種區域，21.5% 位於東南亞以菲律賓、越南以及印尼為主要栽種區域。美州地區又以南美洲如巴西種植水稻占比最高，其次為北美洲。歐洲地區則以西班牙以及義大利水稻種植占比最高。相關文獻指出，水稻田甲烷排放因不同田間管理、栽作期作與氣候區會有明顯差異。因此本團隊彙整國際相關文獻觀測資料可以得知，水稻田對全球 CH_4 排放係數平均值為 $0.12 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ，但各個研究所獲得的結果差異相當大，可達到平均值的四倍之多為 $0.48 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ，可見不同的水稻品種、田間管理與氣候區在生長過程中對甲烷排放的差異性。歐洲地區尤其是義大利因水稻連續淹田所產生平均甲烷排放最高($0.325 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)，其次為非洲($0.17 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、南亞($0.12 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、南美洲($0.13 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、東亞($0.11 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)、北美洲($0.10 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)以及東南亞($0.10 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)最低(圖 1-5)。



*資料來源: Alberto et al., 2014; Chaichana et al., 2018; Ge et al., 2018; MOENV(NIR), 2024; Nikolaisen et al., 2023; Reba et al., 2020; Yang et al., 2003

圖 1-5 綜合比較台灣以及全球(藍色)水田甲烷排放，AWD (Alternative Wet & Dry) 為間歇性乾、溼灌溉操作，紅色代表台中霧峰實驗田 AWD 之實測數據。

碳中和或是淨零碳排已是國際共識，聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change) 第 21 次締約方大會 (COP21) 通過巴黎協定 (Paris Agreement)，各國同意進行人為溫室氣體排放與移除的管制。

COP28 會議並警告，2022 年全球甲烷、氧化亞氮和氟化氣體等 CO₂以外的溫室氣體排放量正迅速增加。多數國家訂定在 2050 年達到淨零排放，中國及印度則訂定於在 2060 年及 2070 年達到淨零排放目標 (Taiwan EPA, 2021)。此外超過 150 國簽署同意的「永續農業、糧食系統韌性及氣候行動宣言」涵蓋巴西、中國、歐盟和美國等全球糧食系統七成以上的生產國家(UN, 2022)。

根據聯合國「2022 年排放差距報告 Emissions Gap Report」指出，透過以下措施及轉型可達成減緩碳排潛力。農業糧食系統可以在這些部分扮演重要減緩排放角色，包含(1)需求方的角色轉變，以可永續和營養均衡的飲食方向轉型，以及減少糧食損失和浪費；(2)保護自然生態系統，包括減少農業砍伐森林和農地退化；(3)農場一級糧食生產的改善，包括動物飼料成分的變化、更好的稻米管理、更好的土壤有機碳管理以及作物養分管理的改進，以及(4)食品供應鏈脫碳，包括零售、運輸、燃料使用、工業流程、廢棄物管理和包裝(UN, 2022)。表 1-2 提供國際對於農業系統減排策略及現況。

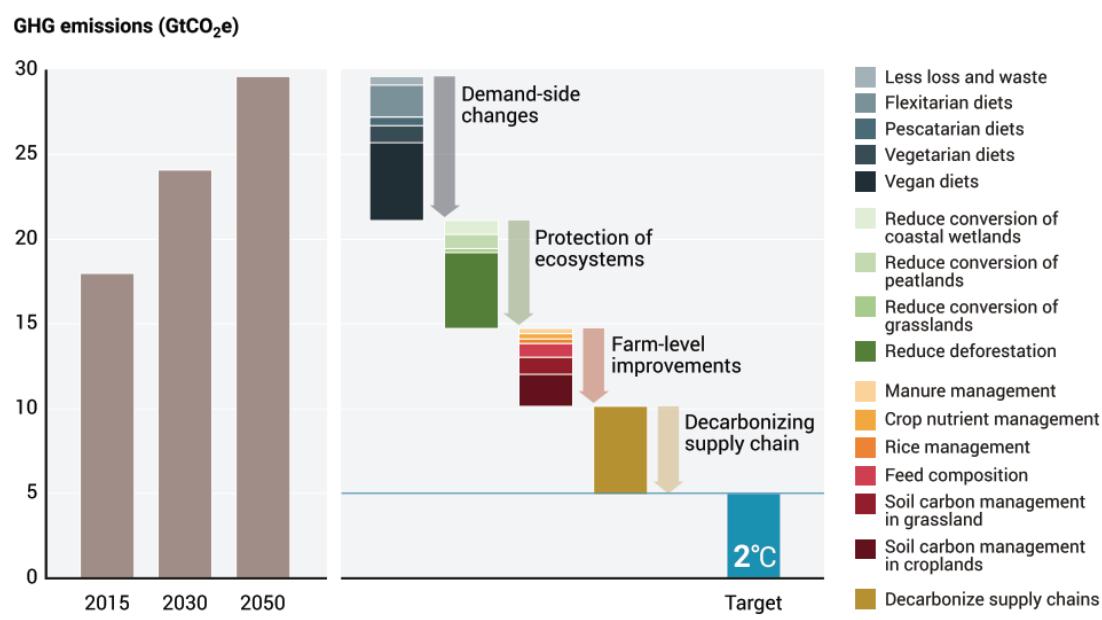


圖 1-6 糧食系統緩解碳排潛力(UN, 2022)

我國也宣示以 2050 淨零排放為目標，並在 2020 年通過了「氣候變遷因應法」，納入實施碳定價，並加強氣候變遷人才培育與技術發展，並同時獎勵執行溫室氣體減量工作事項、研究及開發溫室氣體減量技術等用途，擬透過強化法規政策方式，來面對全球嚴峻的氣候變遷現象，展現我國淨零減碳對區域永續發展的貢獻。

表 1- 2 各國對於農業溫室氣體減排策略及現況

地區	說明
中國	針對化學肥料，合成肥料和牲畜糞便的使用減量，氮排放量在過去三年中有所減少。自 2005 年以來，推出了化肥使用量零增長的政策，並執行了一項測試土壤和根據實際需要使用化肥的計畫，中國政府投資 12 億美元。該計畫已在 100 Mha 土地上實施，使化肥使用效率提高了 5%，同時糧食收成增加了 6-10%。2017 年，中國政府啟動「五位一體」推動綠色農業發展。這包括用水果、蔬菜和茶葉製成的有機堆肥代替化肥。
日本	日本的農牧業及其相關產業在辦理削減溫室氣體效應所採取的對策措施頗多，其中之主要為：(1)將容易產生 CO ₂ 碳排的園藝設施，更新為不會產生溫室效應氣體的太陽能設施。(2)由地方政府針對地方農作物訂定施肥時的「農業操作規範」，並予以積極推廣，以期能達到促進環境保護的政策目標。(3) 強化農業生產資材廢棄物的管理，以「園藝使用塑膠類產品妥適管理」等規範為基礎，達到降低溫室氣體排放量的政策目的。(4)積極辦理削減畜產相關的氣體排放量相關事宜。
歐洲	N ₂ O 排放量較 1990 年水準有所下降，2000 年至 2009 年間，用於農業用地的剩餘氮減少了 18%，這主要歸功於公共監管。歐盟硝酸鹽指令 (91/676/EEC) 於 1991 年制定，旨在平衡施肥需求並禁止在某些時期施用氮肥（歐洲環境署 2020）。關於改善水質和制定國家減排承諾。
丹麥	從 1980 年代開始，推出了一系列氮肥用量減少策略，1990 年至 2011 年間氮肥用量減少了近兩倍，而農業產量並未減少。主要關鍵因素是制定了明確目標的行動計劃，並根據監測到的資料逐步進行調整。
印度	豆類、豌豆和扁豆等豆類會增加固定土壤銨態氮。當豆類輪作或做為覆蓋作物或間作作物時，土壤中氮的利用率更高，可以減少其他作物對氮肥的需求。

北美	精準農業技術越常被採用。其中包括著現地觀察、測量和應對作物、田地和動物變化的管理方法。然而，它尚未轉化為較低的氮排放。目前尚不清楚即使是最有前途的減少養分使用的技術是否可以顯著減少氮投入使用並增加經濟效益。
越南	實現稻米耕作減排策略的國家包括控制水管理、減少秸稈燃燒以及將低效率稻田轉作其他用途。湄公河三角洲的稻米主產省安江已成功實現低碳排做法，每年減少超過 2 兆噸二氧化碳排放，小農每公頃的淨收入提高了。透過使用交替潤濕和乾燥，可以提高 7% – 25%。在湄公河地區，可在另外 90 萬公頃土地上實施交替乾濕法，從而減少 10.97 MtCO ₂ 的排放。
全球	各大洲的有機農業面積都在增加，到 2020 年，全球有機農業面積將接近 7,500 萬公頃（佔全球農地的 1.6%），而 1999 年為 11 Mha。有機農業對溫室氣體排放量整體減少的貢獻存在爭議，因為與合成肥料相比，產量較低，且糞便肥料所造成排放量增加，因此對土地利用產生間接影響。

資料來源:(UN, 2022; 林文傑, 2017)

第二章 計畫執行目標及內容

計畫目標：

- 一、 建立開放式農地(open farmland)場域溫室氣體通量檢測系統及方法。
- 二、 制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範。
- 三、 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引。
- 四、 完成1份開放式農地碳匯驗證策略評估報告。

計畫工作內容：

本計畫之工作內容，分項說明如下：

- 一、 建立開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統及方法：
 - (一) 彙整國內外通量技術發展趨勢，全球通量觀測網(Fluxnet)以及區域通量網絡(如 AmeriFlux、ICOS、OzFlux、AsiaFlux 及 KoFlux) 等技術發展現況及未來趨勢。
 - (二) 評估國內外不同通量場域實際應用現況：整體規劃執行內容及未來應用性，彙整相關文獻及報告等實際應用現況。評估包含如都市區域、農業系統等不同通量場域，作為未來應用之參考。
 - (三) 彙整國內外農業場域碳驗證標準方法，內容包括：
 1. 蒐集我國碳驗證標準發展現況。
 2. 彙整國際碳驗證相關機構及標準，如美國 Indigo 農業技術公司 (Indigo Agriculture)、Verra 碳驗證標準(Verified Carbon Standard Program, VCS)、黃金標準(Gold Standard, GS)、美國碳註冊標準 (American Carbon Registry Standard, ACR) 及氣候行動標準(Climate Action Reserve, CAR) 等農業碳驗證方法學。
 3. 國內外農業碳驗證標準方法比較。
- 二、 制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範：

- (一) 溫室氣體通量檢測系統架設方法。
- (二) 溫室氣體通量檢測系統維護方法。
- (三) 數據品質校驗方法(包括如:原始資料傳輸、資料格式、儲存、前處理、通量計算、資料取樣週期、通量足跡分析及資料品質檢定)。

三、 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引，內容包括:

- (一) 開放式農地場域溫室氣體檢測空間與限制。
- (二) 開放式農地場域微氣象(microclimate)背景條件篩選。
- (三) 開放式農地場域溫室氣體通量足跡評估方法。
- (四) 觀測場域之基礎設施與人力資源之配置需求。

四、 完成1份開放式農地碳匯驗證評估報告，內容包括:

- (一) 執行1項開放式農地減碳情境測試(如施肥、節水或農廢操作)。
- (二) 依四、(一)減碳情境撰寫碳匯驗證場域報告，內容包含:
 - 1. 開放式農地場域溫室氣體減排管理策略規劃。
 - 2. 配合開放式農地場域執行需求進行之溫室氣體通量觀測資料。
 - 3. 開放式農地場域微氣象觀測資料。
 - 4. 運用通量足跡模式評估所測得溫室氣體通量之空間代表性。
 - 5. 計算受測場域之溫室氣體通量，並與國家溫室氣體排放清冊、IPCC 指引、或其他適當參考文獻之排放參數比較，評估受測試減排管理策略之碳匯效益。

五、 辦理1場次技術擴散暨教育訓練工作坊:

邀請國內外專家學者針對通量檢測系統建置、儀器架設規範、數據資料處理並結合碳驗證標準等進一步介紹，內容可為:

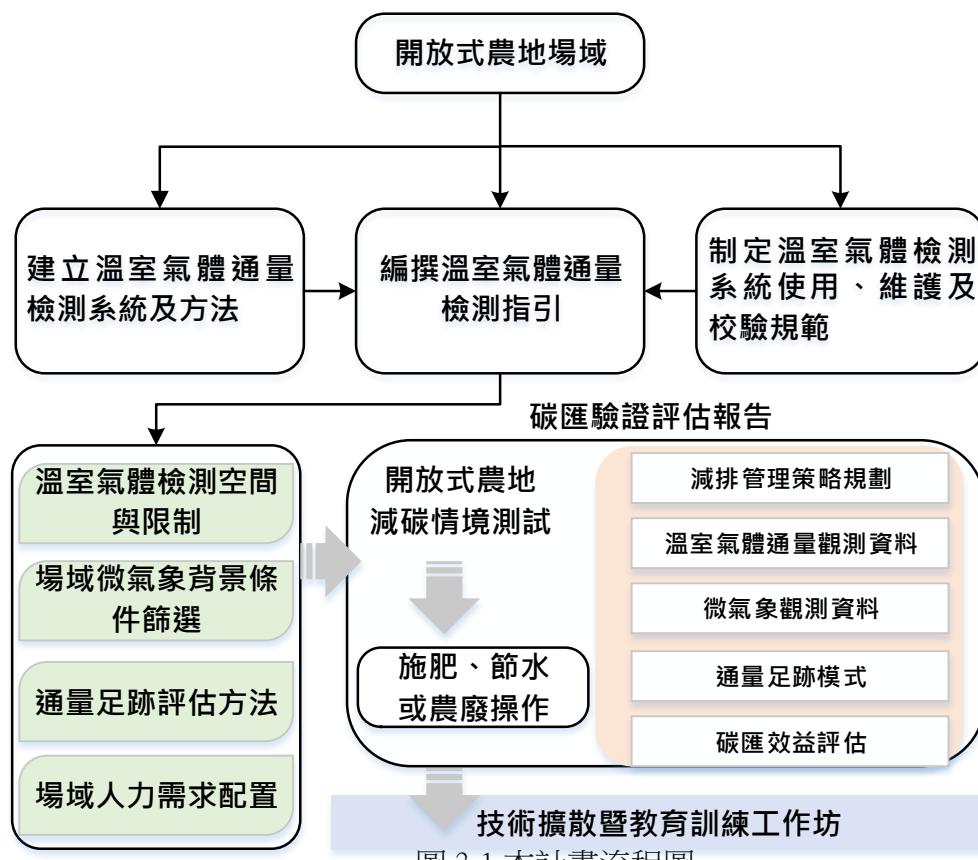
- (一) 國內外碳驗證標準介紹。
- (二) 國內外溫室氣體通量觀測技術及未來應用評估。
- (三) 通量場域選址規範及通量塔儀器架設原則。

- (四) 通量檢測數據的解析。
- (五) 農業場域教育訓練及現地訪查。

第三章 計畫執行方法

本計畫進行國內外溫室氣體排放現況以及通量技術發展趨勢資料蒐集，彙整不同通量場域相關文獻、報告及實際應用現況，並參酌國外通量網絡測站驗證規範以及檢測步驟，初步草擬 3 種溫室氣體通量檢測儀器精密度及再現性的系統檢測方法。

為逐步精進溫室氣體通量檢測技術應用及落實開放場域驗證，本年度以開放式農地(open farmland)場域為標的，草擬該場域溫室氣體通量相關檢測技術、檢測系統方法、使用、維護、校驗規範及編撰溫室氣體通量檢測指引，並透過農地減碳情境測試，供相關部門執行開放式農地碳匯驗證評估之參考(圖 3-1)。



本計畫 113 年之工作進度與原規劃相符，詳如表 3-1。

表 3-1 工作進度表

計畫項目 期程	113 年計畫期程											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
彙整國內外通量技術發展趨勢				(1)								
評估國內外不同通量場域實際應用現況				(2)								
彙整國內外農業場域碳驗證標準方法												
制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範										(4)		
編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引								(5)				
完成 1 份開放式農地碳匯驗證評估報告												(6)
辦理 1 場次技術擴散暨教育訓練工作坊						(7)						
期中報告												
期末報告												
累積進度(%)	5	10	20	30	35	40	45	50	70	90	95	100

一、第一次進度報告

於 113 年 3 月 4 日完成，報告計畫之細部執行規劃內容，並取得同意

後據以施行。

二、期中報告

於民國 113 年 9 月 2 日進行期中進度報告，報告計畫之細部執行規劃內容，並於取得貴所同意後據以執行相關工作。會中委員建議事項及回覆如附件期中進度報告會議審查意見及回覆。

三、期末報告

於民國 113 年 11 月 15 日提出期末報告初稿 10 份，於 113 年 11 月 28 日出席審查會議進行簡報，並參酌審查意見於 113 年 12 月 10 日提出修訂報告與相關資料，會中委員建議事項及回覆如附件“期末審查會議審查意見及回覆”。

本計畫各工作進度之查核點及達成日期如表 3-2。

表 3-2 查核點說明

查核點	查核內容
(1)~(7)	<ul style="list-style-type: none"> (1) 113 年 4 月 30 日前完成至少 20 篇國內外通量技術發展趨勢文獻資料蒐集。(達成日期：113/4/30) (2) 113 年 7 月 30 日前完成評估國內外至少 3 種類型通量場域實際應用現況(達成日期：113/5/13) (3) 113 年 9 月 30 日前彙整國內外農業場域碳驗證標準方法(達成日期：113/9/3) (4) 113 年 9 月 30 日前完成制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範初稿(達成日期：113/9/3) (5) 113 年 11 月 30 日前完成編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引初稿(達成日期：113/11/28) (6) 113 年 11 月 30 日前完成 1 份開放式農地碳匯驗證評估報告初稿(達成日期：113/11/28) (7) 113 年 7 月 31 日前辦理 1 場次技術擴散暨教育訓練工作坊(達成日期：113/5/16)

3.1 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引

為協助溫室氣體通量檢驗測定，以建立檢測機構之管理制度。本計畫編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引，以使開放式農地場域溫室氣體檢測系統之操作有所依循。指引內容將分別針對現有通量系統如水氣(H_2O)、二氧化碳(CO_2)及三維音波風速計、甲烷(CH_4)以及氧化亞氮(N_2O)分析儀進一步彙整。主要內容架構以及說明如下表 3-3 所示：

表 3-3 開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引

章節	內容說明
1. 前言	簡要說明該溫室氣體檢測系統(高頻音波風速計、 CO_2/H_2O 、 N_2O 、 CH_4)使用目的，全球溫室氣體背景現況
2. 本指引名詞定義	此章節說明溫室氣體通量檢測系統相關名詞解釋包含：溫室氣體、通量、渦流相關法、碳源以及碳匯等
3. 渦流相關法通量檢測	說明該溫室氣體檢測系統 (高頻音波風速計、 CO_2/H_2O 、 N_2O 、 CH_4)架設需遵守之要點、軟硬體設備、簡要說明該溫室氣體檢測系統空間限制要求、及通量足跡等
4. 溫室氣體通量檢測系統維護方法	(1) 彙整開放式農業場域通量觀測站儀器維護人力(時間)需求，針對不同的通量觀測場域所需實際的維護人力(時間)需求會需要做調整 (2) 說明該溫室氣體檢測系統使用維護需注意之事項與定期保養週期
5. 數據資料處理	說明原始監測資料如何透過計算、檢定來符合渦流相關法基本假設。以確保該資料是否合乎觀測標的以及場域要求。
6. 參考文獻	指引參考 LI-COR Biosciences 通量測站架設方法、歐洲綜合碳觀測系統(Integrated Carbon Observation System, ICOS)測站認證標準及國際上各個通量觀測網絡等資料來源彙整。

3.2 開放式農地場域碳匯驗證評估報告

本計畫將於「農業部農業試驗所」田間試驗場域執行開放式農地場域碳匯驗證評估，開放式農地碳匯驗證評估執行方式以及流程如下圖 3-2 所示。

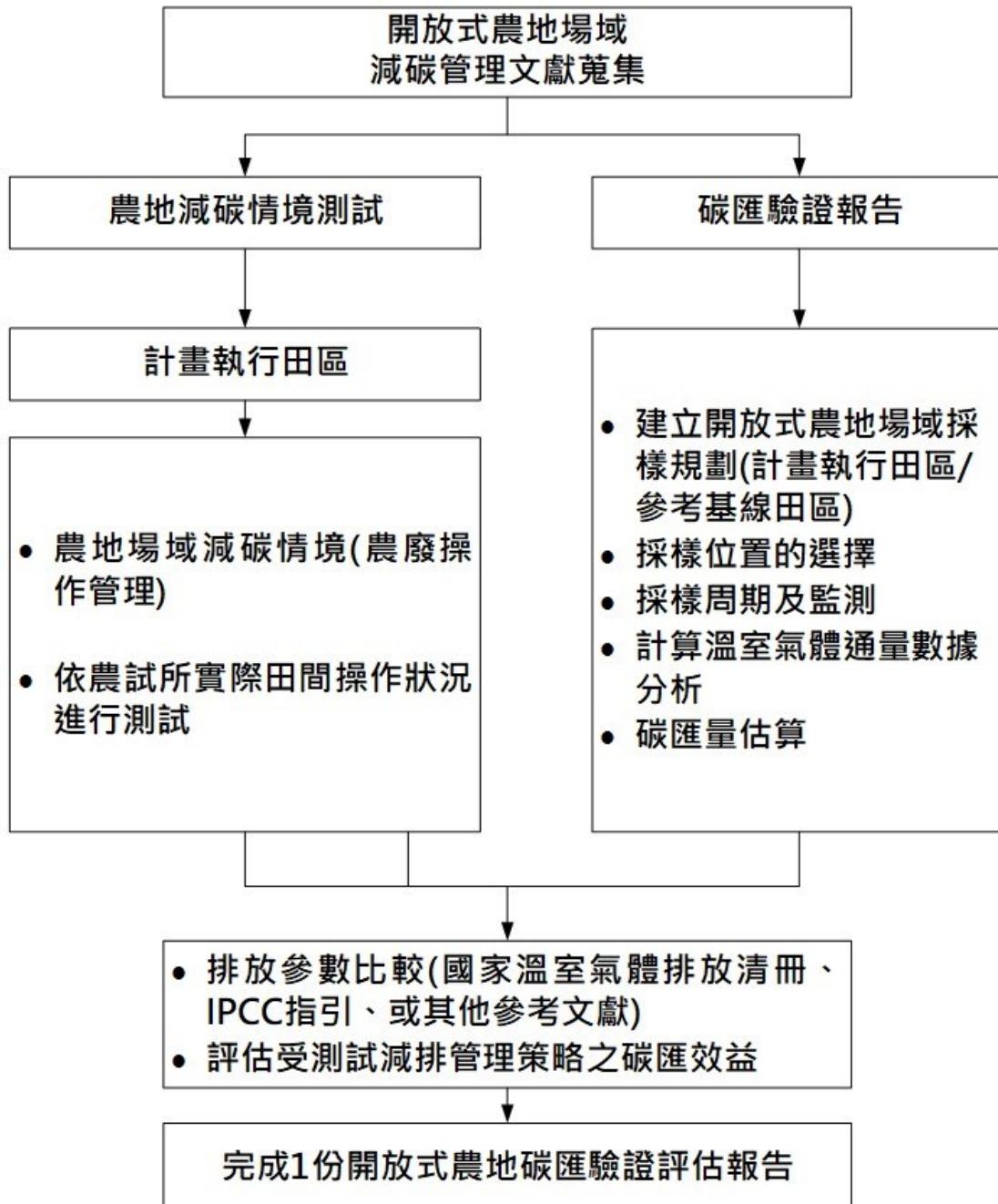


圖 3-2 開放式農地場域碳匯驗證評估流程

3.2.1 開放式農地場域溫室氣體減碳管理方式

農作生產過程中，二氧化碳 (CO_2)、甲烷(CH_4)與氧化亞氮(N_2O)是農田主要排放的溫室氣體，二氧化碳淨排放或吸收量來自於光合作用固碳與呼吸作用及殘株分解排放之差值，而甲烷排放主要來自水田稻作栽培，氧化亞氮排放則為主要來自土壤肥料施用的逸散、淋洗及逕流等過程，因此作物栽培過程中既固碳也排碳。不同作物、不同地區、不同栽培模式以及土壤環境變異也會造成溫室氣體排放量變動。因此農業的生產基於這一過程，可通過結合減排技術和增進土壤碳儲存的手段，使得農業部門能夠保持高生產力，同時也能實現淨負碳排放(Northrup et al., 2021; 許龍欣, 2022)。然而，目前的農業活動在美國和歐盟產生約 5% 的溫室氣體排放，台灣農業部門 2020 溫室氣體排放量約占全國總排放量約 2.22%，隨著氣候變遷導致的極端氣候已對農業造成重大的影響(Northrup et al., 2021; 行政院農業委員會, 2021)。因此亟需在確保糧食安全前提下研擬因應措施與減排策略，發展並推動低碳農業，持續落實各項行動方案並開發新的減碳及增匯方法，以達到農業淨零排放目標。盤點農業部門為採取減少溫室氣體排放可採取之操作方式彙整如下表 3-4 所示(Smith, 2007)。

表 3-4 減輕農業生態系統中的溫室氣體排放措施

項目	做法	減排影響 ^a			淨減排量 ^b	
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	一致性	顯著性
作物管理	農業操作管理	+		+/-	***	**
	養分管理	+		+	***	**
	耕犁/農作殘餘物管理	+		+/-	**	**
	水分管理(灌溉、排水)	+/-		+	*	*
	水稻管理	+/-	+	+/-	**	**
	土地利用改變	+	+	+	***	***
放牧農場 管理/牧場 改良	放牧強度	+/-	+/-	+/-	*	*
	提高生產力(如施肥)	+		+/-	**	*
	養分管理	+		+/-	**	**
	消防管理	+	+	+/-	*	*
	品種導入(如豆科類)	+		+/-	*	**
土壤管理	避免濕地排水	+	-	+/-	**	**
恢復退化 土地	土壤侵蝕防治， 有機改良以及營養改良劑使用	+		+/-	***	**

Note:

a: +表示減少排放或增強移除(正面減量效果); -表示排放量增加或移除量受到限(負面減量效果); +/- 代表不確定性以及可能有所變動。b: 對描述所提出的做法作為溫室氣體減量淨排放方式的定性估計,以 CO_{2e} 當量表示:一致性:指的是文獻中的相對共識程度(星號越多,一致性越高);顯著性:指的是所提出的減量效果相對數據量(星號越多,顯著性越高)(Smith, 2007)。

3.2.2 開放式農地場域田間規劃

開放式農地場域田間規劃農作物生產過程中，二氧化碳 (CO_2)、甲烷(CH_4)與氧化亞氮(N_2O)是農田主要排放的溫室氣體，為了能精準量測作物栽種期間的土壤氣體交換以及其環境等變化，本計畫依照以下步驟於開放式農地場域進行測試：

1. 建立開放式農地場域採樣規劃

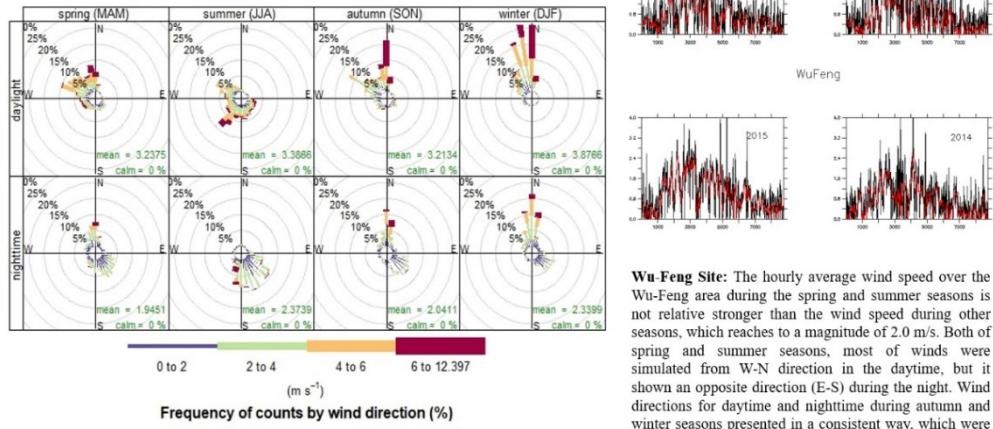
由於與開放式農地場域溫室氣體通量(例如農地土壤與大氣之間的二氧化碳、甲烷以及氧化亞氮交換通量、土壤有機碳含量等)的測量結果通常具有明顯的空間與時間變化，因此規劃適當的採樣位置及採樣時間，以能涵蓋被調查作物生長季及廣泛空間範圍及時間範圍。

2. 溫室氣體通量採樣位置的選擇

113 年開放式農地場域採用渦流相關法原理來進行通量觀測。通量觀測儀器架設場域遵守渦流相關法理論假設：(1)符合地表均質且地形平坦等理想條件，使滿足渦流相關法的基本假設。(2)需確保儀器放置在合適的高度，以充分代表欲觀測通量足跡範圍。

當採樣位置決定後，依計畫所需進行樣本(植物生物體、氣體、土壤、水)採集、氣象參數(如溫度、濕度及輻射熱等)的現場紀錄，並將土壤樣本帶回實驗室進行分析，進而獲得結果。

氣象風場分析



Wu-Feng Site: The hourly average wind speed over the Wu-Feng area during the spring and summer seasons is not relative stronger than the wind speed during other seasons, which reaches to a magnitude of 2.0 m/s. Both of spring and summer seasons, most of winds were simulated from W-N direction in the daytime, but it shown an opposite direction (E-S) during the night. Wind directions for daytime and nighttime during autumn and winter seasons presented in a consistent way, which were coming from the north (N).

圖 3-3 霧峰氣象風場分析圖:資料範圍 2014~2017 年

根據先期風場資料(圖 3-3) 和 GOOGLE 衛星地圖以及通量足跡研究資料(圖 3-4) , 試驗田邊緣周圍 30~50 公尺之內都是平坦的田地，經由通量足跡貢獻模式計算出的通量足跡為 36.7%(footprint: 50m)和 60.6%(footprint: 100m)。

$$\text{CNF} (\%) = - \int_0^{X_L} \frac{u(z-d)}{u^* k x^2} e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k x}} dx = e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k X_L}} \quad (1)$$

通量足跡貢獻模式(Cumulative Normalized Contribution to Flux measurement, CNF)所需的參數包含:

- 儀器量測高度 $z = 2$ (m)
- 平均風速資料 $u = 2$ (m s^{-1})
- 通量足跡貢獻與通量塔的距離 X_L (m) = 50 / 100
- 地面修正高度(zero plane displacement height, d)(m) = 0
- 摩擦風速(friction velocity, u^*)(m s^{-1}) = 0.2

Von Karman 糸數($k=0.4$)

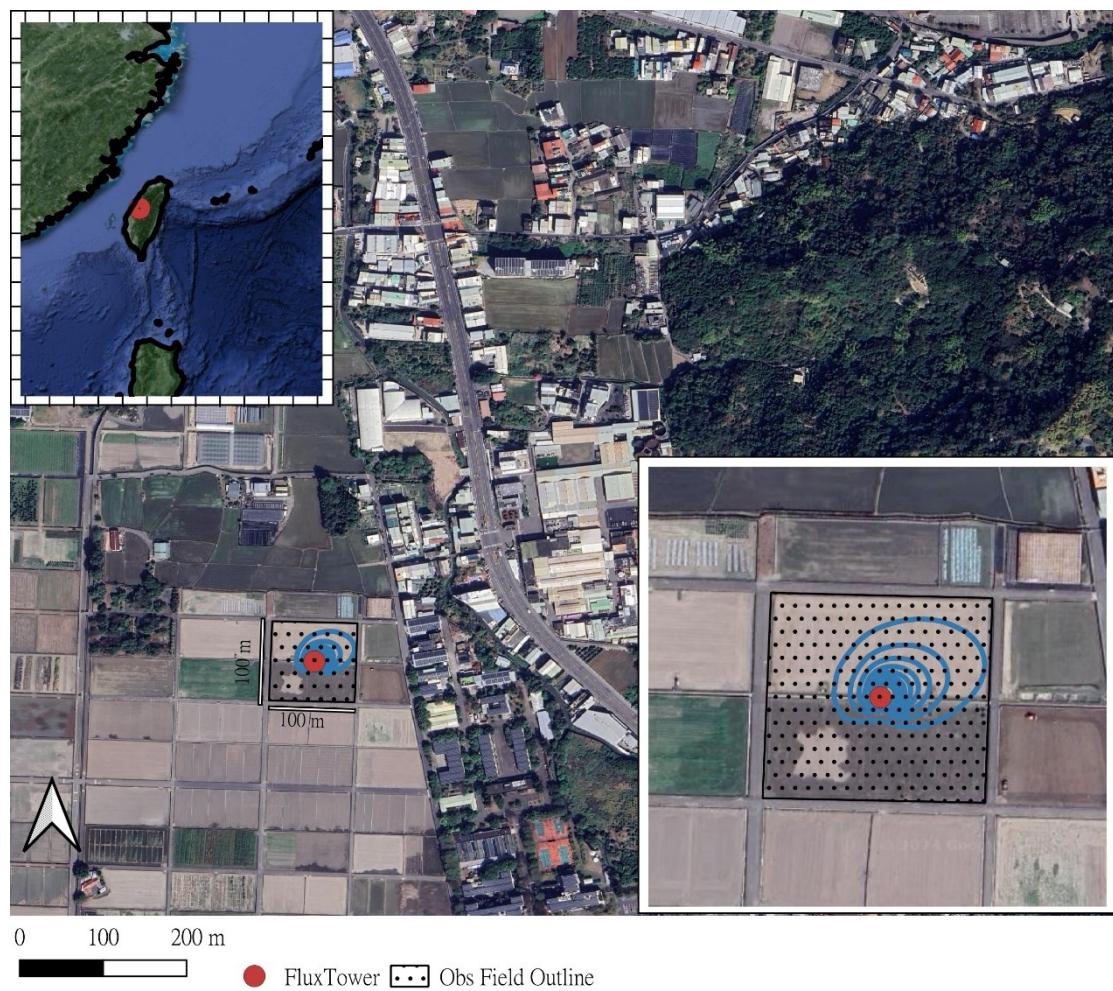
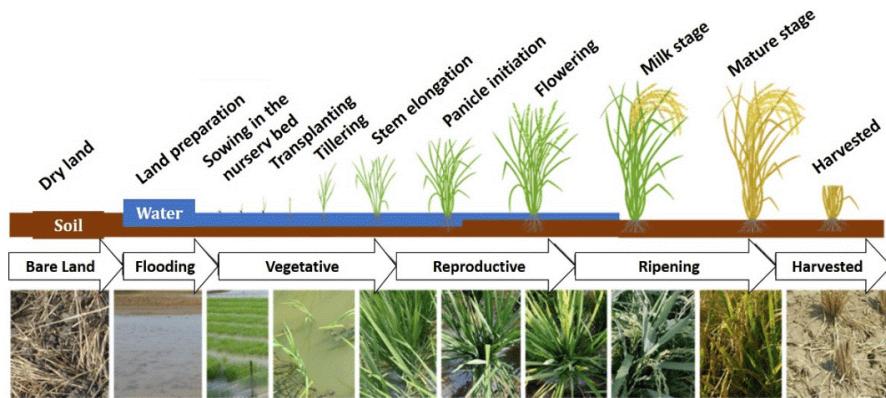


圖 3-4 開放式農地碳匯驗證場域-霧峰農試所試驗田(黑色框框範圍之內)，藍色區域內部為實際計算出來的通量足跡圖，間距為 10%貢獻量。



圖 3-5 溫室氣體通量系統於霧峰農試所實地架設的照片

為了進行開放式農地場域碳匯驗證，本計畫於農業部農業試驗所位於霧峰的 49 號(0.5 公頃)以及 53 號(0.5 公頃)共計 1 公頃試驗田為測試場域如(圖 3-4) ，實際通量觀測系統架設照片如(圖 3-5) ，以稻米為參考作物。作物生長週期包含(休耕期、幼苗期、分蘖期、結穗期、成熟期及收割期(如圖 3-6 所示)。實際田間管理模式配合台中霧峰農試所作物栽培管理計畫執行。本計畫農業溫室氣體檢測以及減碳情境提供於表 3-5，溫室氣體通量檢測設備廠牌、型號以及採樣週期提供於表 3-6 所示。



*資料來源 : Sheng et al. (2022)

圖 3-6 水稻生長階段

表 3-5 本計畫減碳情境說明

栽種作物	減碳情境規劃	田間管理模式		栽種週期	檢測項目 ^a
		基線情境 (排放清冊)	計畫試驗田 (#49 & #53)		
水稻	節水管理	常規給水方式	1. 稻田在耕作期間將水管理從連續的淹田灌溉模式改為間歇性(Alternate wetting and drying, AWD)灌溉模式。 2. 以滴灌方式取代大面積淹田。	113 年 2-6 月	CO_2 、 CH_4 以及 N_2O 之生態系氣體交換通量
	農廢操作	前一期收割後廢稻稈保留	前一期收割後廢稻稈移除		

^a輔助檢測項目包含：風速、風向、熱輻射、環境溫度及濕度；土壤檢測部分包含土壤溫度、濕度及土壤有機碳

表 3-6 常見溫室氣體通量監測設備廠牌及型號及規格

儀器需求	參考廠牌/型號	偵測 極限	時間 解析 度	採樣 週期
3 維音波風速、風向儀器	<ul style="list-style-type: none"> IRGASON, Campbell Scientific Inc. WindMaster Pro, Gill-50 / 100 	0.5mms ⁻¹ <1.0% RMS	1-60 Hz 1-50 Hz	
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> IRGASON, Campbell Scientific Inc. ^(註) LI-7200(S), LI-COR LI-7500DS, LI-COR MIRA-Ultra-CO₂, Aeris. 	150 ppb 110 ppb 110 ppb 250 ppb	1-60 Hz 1-20 Hz 1-20 Hz 1-10 Hz	本計畫採不分期連續檢測。
CH ₄	<ul style="list-style-type: none"> LI-7700, LI-COR ^(註); MIRA-Ultra-LDS, Aeris. TILDAS-CS, Aerodyne Research Inc. 	5 ppb@0.1s 2 ppb@0.1s 0.3 ppb@1s	1-20 Hz 1-10 Hz 1-10 Hz	
N ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> TILDAS-CS, Aerodyne Research Inc. ^(註) MIRA-Ultra-N₂O, Aeris 	0.06 ppb@1s 0.4 ppb@0.1s	1-10 Hz 1-10 Hz	

• 註：本計畫採行的機種分別為 IRGASON, Campbell Scientific Inc. (風速、CO₂)；LI-7700, LI-COR (CH₄)；TILDAS-CS, Aerodyne Research Inc. (N₂O)

3.3 通量檢測系統技術擴散教育訓練工作坊

本計畫於 113 年 5 月 16 日在霧峰農試所完成第一場次的工作坊，工作坊內容是溫室氣體通量示範場勘以及通量設備介紹，工作坊的參與對象是國環院同仁；113 年 8 月 15 日於國環院辦理第二場次技術擴散暨教育訓練工作坊，工作坊內容包括：通量塔儀器架設原則與實際架設操作，及通量場域選址規範(含頻譜分析/源匯分析以及資料處理實機操作)，工作坊參與對象是國環院同仁。

第四章、成果報告

4.1 建立開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統及方法

4.1.1 彙整國內外通量技術發展趨勢

(一) 全球通量觀測網絡(Fluxnet)

大氣中溫室氣體濃度的影響以及差異可歸因於地域性、季節、生物、非生物以及環境因素調節，也因為干擾日趨嚴重，全球碳平衡產生很大變化。為因應全球暖化議題，瞭解都市區域、環境生態系統和大氣之間的交互作用至關重要。大氣中溫室氣體濃度變化趨勢以及水氣、能量收支因而成為目前全球關注的焦點。

為了更深入探討大氣組成受到環境擾動而變遷的議題（例如：碳、氮及氧循環），唯有整合跨領域以及不同區域尺度的研究才能更清楚了解其變化。渦流相關法 (Eddy Covariance Method)為眾多方法中可以直接且長期量測區域尺度溫室氣體通量的方法。

「通量」為單位時間內通過特定空間(面積)之物理量，可進一步描述地表生態系與大氣間的交互作用(謝明軒, 2017)。為了減少溫室氣體通量觀測在不同區域、自然環境和人為影響的生態系統上的不確定性，世界各地紛紛開始建立以渦流相關法為基礎的長期溫室氣體通量觀測站。全球通量觀測網絡 (Fluxnet) 為整合數個區域通量觀測系統資料，採用渦流相關法對於不同區域生態系統、碳循環及大氣圈進行長期且連續通量觀測，以支持科學研究、模式建立及探討地表與大氣溫室氣體、水氣及能量的交換行為 (圖 4-1)(Baldocchi et al., 2001)。目前全球已超過 900 個觀測站(圖 4-2)，分布於北美及中美和南美、歐洲、亞洲、非洲及澳洲。

FLUXNET 與 AmeriFlux 和 EuroFlux 一起合作提出一個計畫-FLUXNET-CH₄，目的是編制一個全球性的渦流相關(EC)甲烷通量測量數據庫。數據經過標準化、

後處理(即分割和填補缺失值),並發布為FLUXNET-CH₄。FLUXNET-CH₄版本1.0包括來自81個站點的數據(圖4-3),代表淡水、沿海、高地、自然和管理生態系統。EC測量的近連續、高頻率特性顯示出改善我們對生態系統尺度的CH₄通量動態的巨大潛力。FLUXNET-CH₄的資金支持來自戈登和貝蒂摩爾基金會以及美國地質調查局鮑威爾中心。

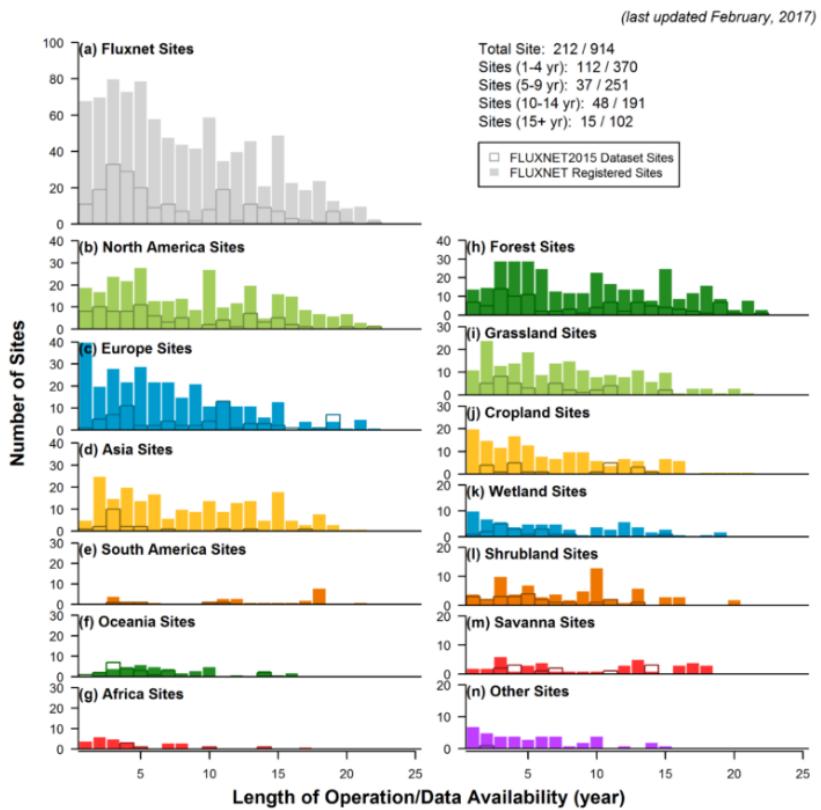


圖4-1 全球通量觀測網(Fluxnet)所涵蓋不同區域生態系統通量測站數量統計(資料來源: <https://fluxnet.org/sites/site-summary/>)

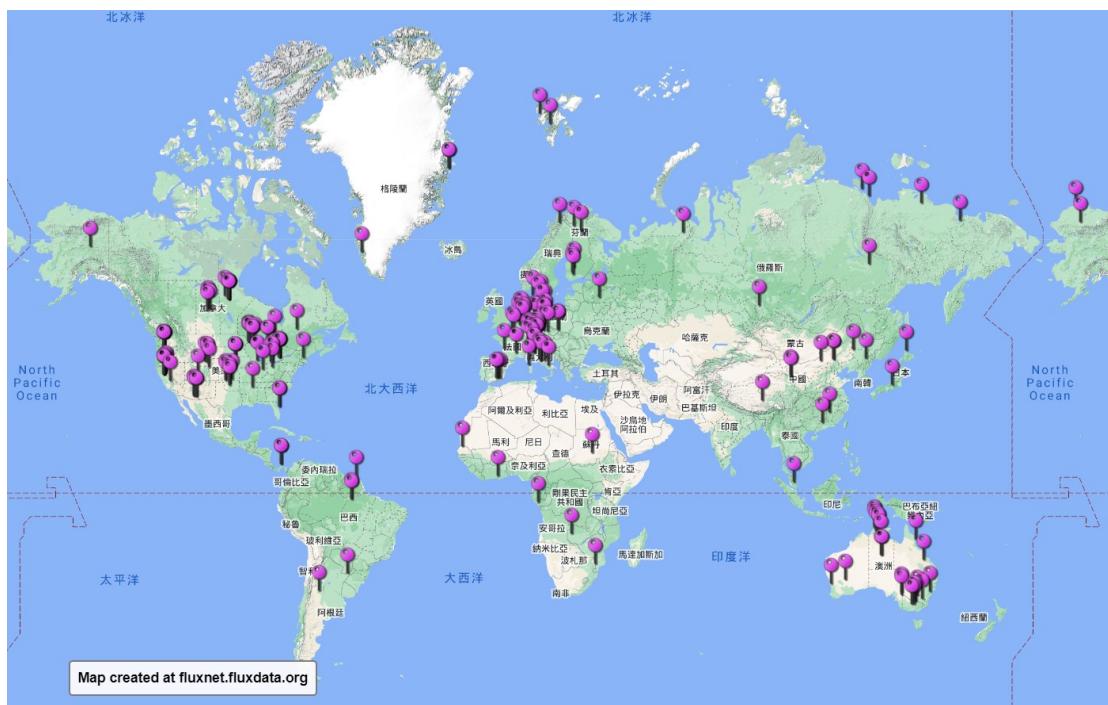


圖 4-2 全球通量觀測網絡(資料來源: <https://fluxnet.org/custom-map/cartographer.html>)

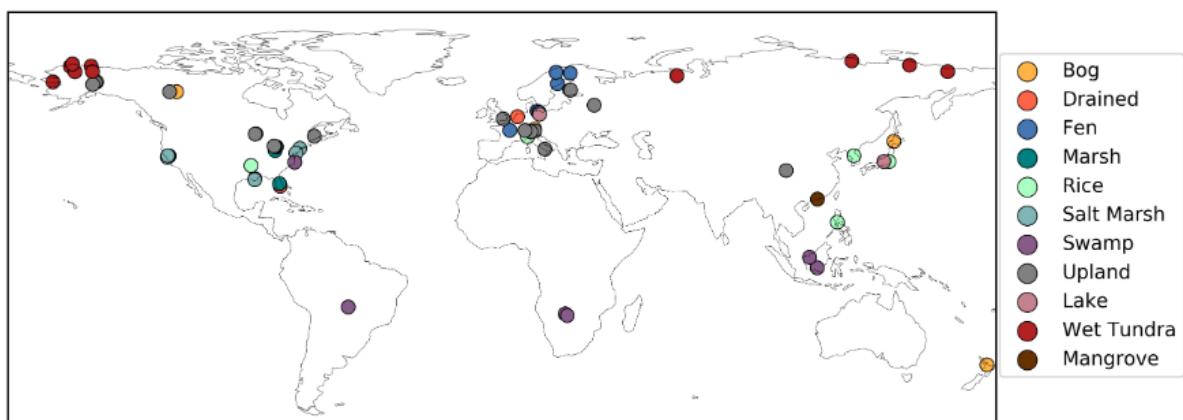


圖 4-3 FLUXNET-CH₄ Version 1.0 站點位置的全球地圖，按站點類型著色。

加拿大西北地區的沼澤和高地站點稍微偏移，以便兩者都可見。(資料來源:

<https://fluxnet.org/data/fluxnet-ch4-community-product/>

(二) 澳洲通量觀測系統(OzFlux)

澳洲通量觀測系統(OzFlux)是全球通量觀測網絡(FluxNet)的一部分，是一個生態系統研究網路，主要關注澳大利亞、紐西蘭之生態系統，涉及生態系統之間的能量、碳和水交換並提供模式模擬通量網絡提供一致的觀測資料。OzFlux 由一組研究人員和 TERN 生態系統處理中心（EPCN）管理。該團隊確定了測量、數據處理和質量控制的協議，提供了一個數據庫來存檔每個站點的數據，根據需要為站點操作人員提供培訓，並協助協調科學整合和出版物。EPCN 管理數據和數據入口網站，OzFlux 網絡由國家協同研究基礎策略機構(NCRIS)來提供資金。OzFlux 在澳洲和紐西蘭境內多個地點的微氣象通量站網路如圖 4-4。OzFlux 的目的包括：

- 瞭解在不同時間和空間尺度下，陸地生態系統與大氣之間的碳、水蒸氣和能量交換的控制機制。
- 為模型測試提供關鍵生態系統的碳和水平衡的基礎資料。
- 可提供資訊以驗證利用遙測資料估算的淨初級生產力、蒸發和能量吸收。
- 提供資料以驗證微氣象理論在複雜地形中的通量和空氣流動方面的新發展。

OzFlux 是澳大利亞陸地生態系統研究網絡（Terrestrial Ecosystem Research Network, TERN）的一部分。OzFlux 網絡包括澳大利亞和紐西蘭近 30 個通量塔，其中許多也是澳大利亞超級測站（Australian Super Site, ASN）的一部分。OzFlux 也是全球 FluxNet 網絡的成員。OzFlux 通量塔網絡的資料也可通過 FluxNet 獲取。



圖 4-4 澳洲通量觀測系統(OzFlux) 圖表內容更新到 2022-11-01 (資料來源:

<https://ozflux.org.au/monitoringsites/index.html>)

(三) 亞洲通量觀測系統(AsiaFlux)

亞洲區域通量監測網 AsiaFlux 成立於 1999 年，屬於全球通量觀測網 (Fluxnet) 的亞洲分支，AsiaFlux 已涵蓋 28 個成員國並組成區域通量網絡，截至目前(2024/6) 亞洲地區已建立了 119 個長期通量觀測塔，主要分成五大類型(森林/水果農場/水稻田/草地/都市)，其中大約有 50 餘個係日本興建，這些通量塔有一半是長期觀測設施，其餘則是進行短期研究。主要致力於觀測亞洲區域各種生態系統中碳和水循環通量資料 (圖 4-5) (賴彥任, 2012)

台灣目前參與 AsiaFlux 觀測網絡共有 4 座通量觀測站，主要是探討森林及草原生態系統二氧化矽、水循環為主。分別為淡水關渡自然公園通量觀測站、宜蘭棲蘭山通量觀測站、南投惠蓀林場通量觀測站以及南投蓮華池水文氣象觀測站。這些測站的設置目的均以了解森林或草地生態系統碳水平衡收支為主，然而近年來農部門所產生溫室氣體也逐漸受到重視，因此設置農業測站有其必要性。例如農業部門因糧食作物生產所產生的溫室氣體 (AsiaFlux, 2022)。農業系統所產生的溫室氣體約占全球人類活動 1/5，由於農業相較於森林系統有較多人為因素的介入，包含農作物種的選擇、水分的管理、田間耕作的管理及施肥等，對於溫室氣

體通量的碳源與碳匯較具有控制的潛力(姚銘輝&陳俊仁, 2013)。

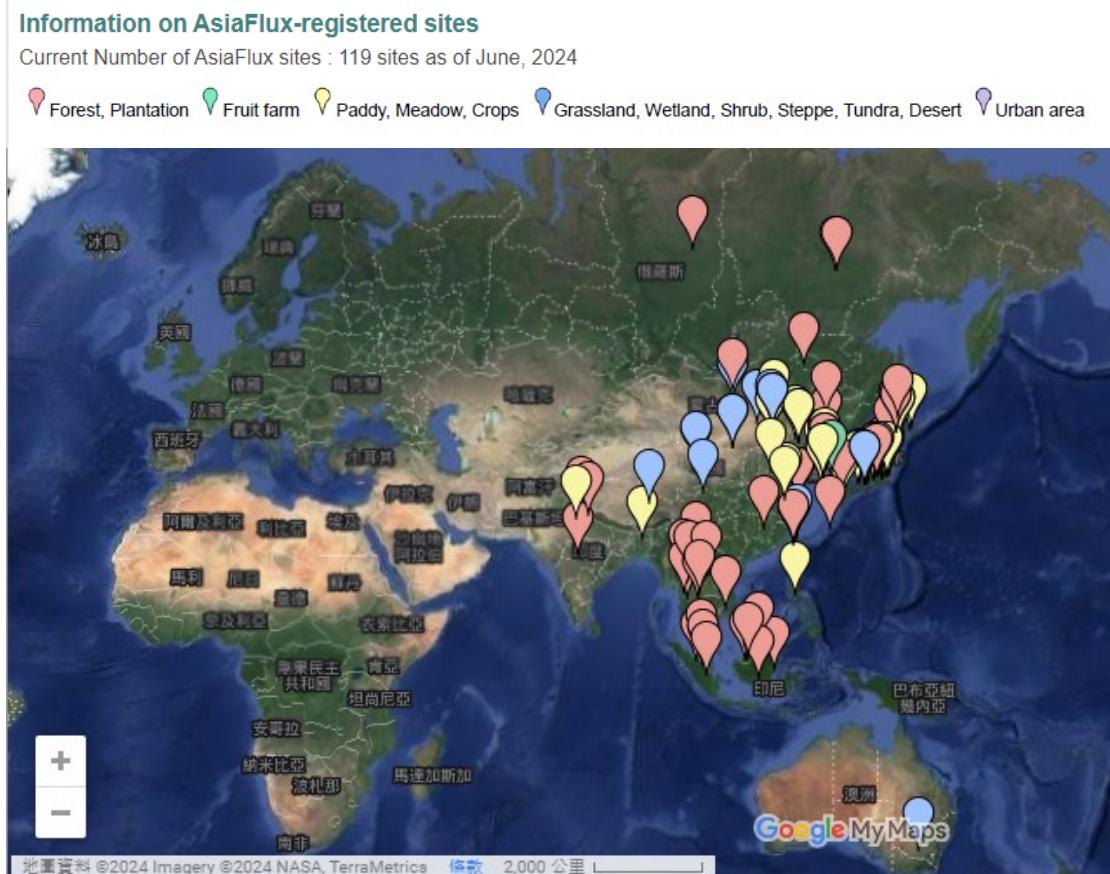


圖 4-5 亞洲通量觀測系統 (AsiaFlux) 測站點位(資料來源:

http://asiaflux.net/?page_id=22)

(四) 歐洲通量觀測系統(ICOS)

1. 歐洲通量觀測系統(ICOS)簡介

歐洲綜合碳觀測系統(Integrated Carbon Observation System, ICOS)為歐洲主要區域溫室氣體通量(Flux)觀測組織，該系統在歐洲扮演一個重要且關鍵性的角色，包含科學研究以及歐洲區域國家的社會效益並致力於減緩氣候變化，該系統與全球溫室氣體的長期觀測研究、大氣和陸地及海洋生態系統中的碳源、碳匯都具有密切的關聯性。

該機構觀測站分布於全歐洲，可稱為歐洲地區完整溫室氣體通量觀測網絡。截至目前為止，ICOS 測站共涵蓋歐洲 16 個國家，達 168 個測站，並整合三大主

要專題，包含大氣(目前有 46 個測站，通常在高塔頂部、山區或偏遠環境中進行。)、陸地生態系統(目前有超過 100 個測站)和海洋系統(分成固定測站以及移動測站，目前共有 29 個測站)的觀測，並提供相關設施以及長期且標準化高精準開放資料來滿足全球環境基礎研究之需求(圖 4-6；圖 4-7)。此外，都市系統溫室氣體通量量測已逐漸受到重視，在 2021 秋季 ICOS 已率先舉辦線上會議(ICOS Cities Talks Webinars)，與會者包含相關領域專家學者、學生，並持續對該議題進行研議(ICOS Handbook, 2024)。

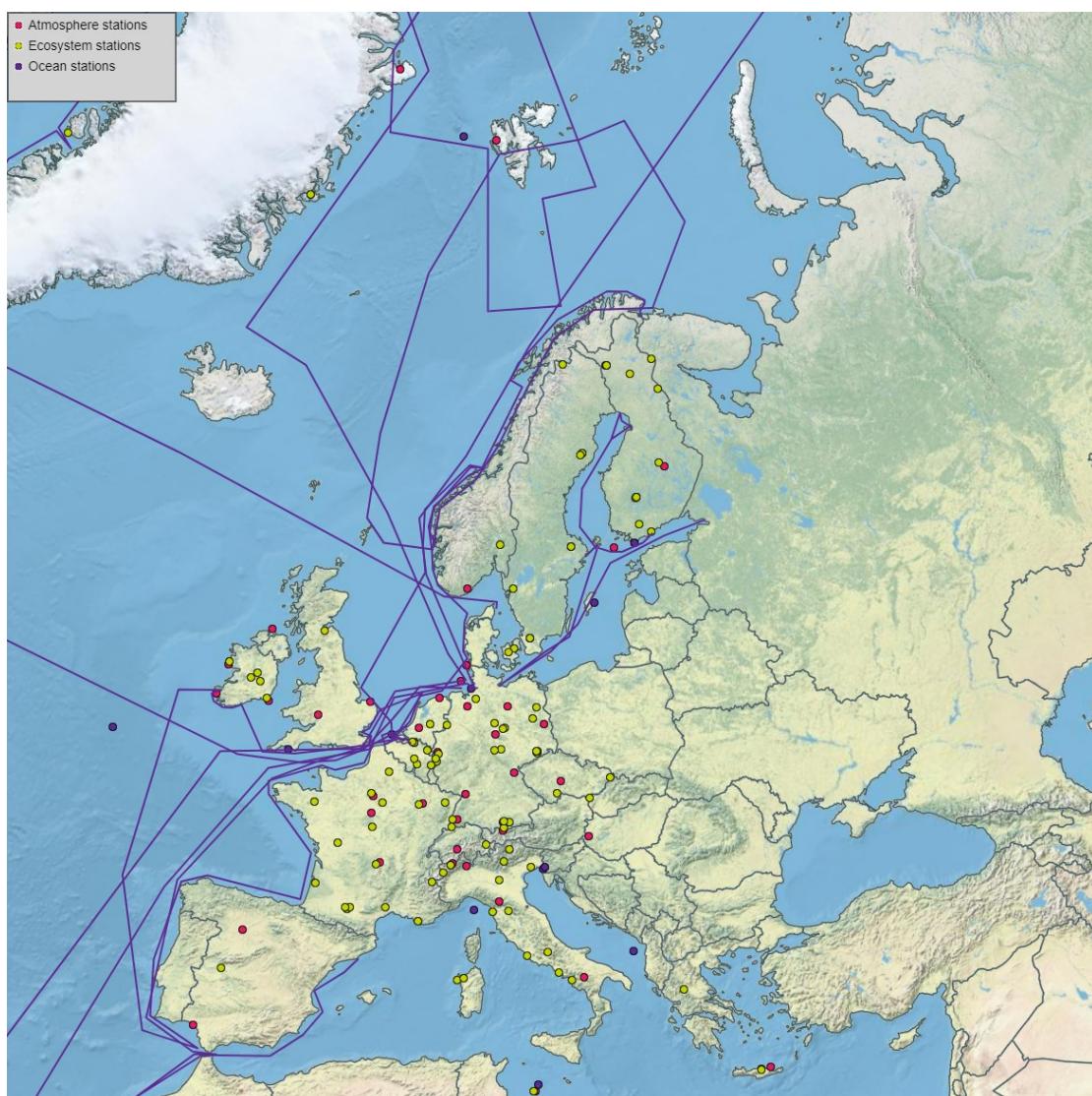


圖 4-6 歐洲綜合碳觀測系統(ICOS)通量測站網絡(資料來源: <https://www.icos-cp.eu/station-map>)

ICOS RESEARCH INFRASTRUCTURE

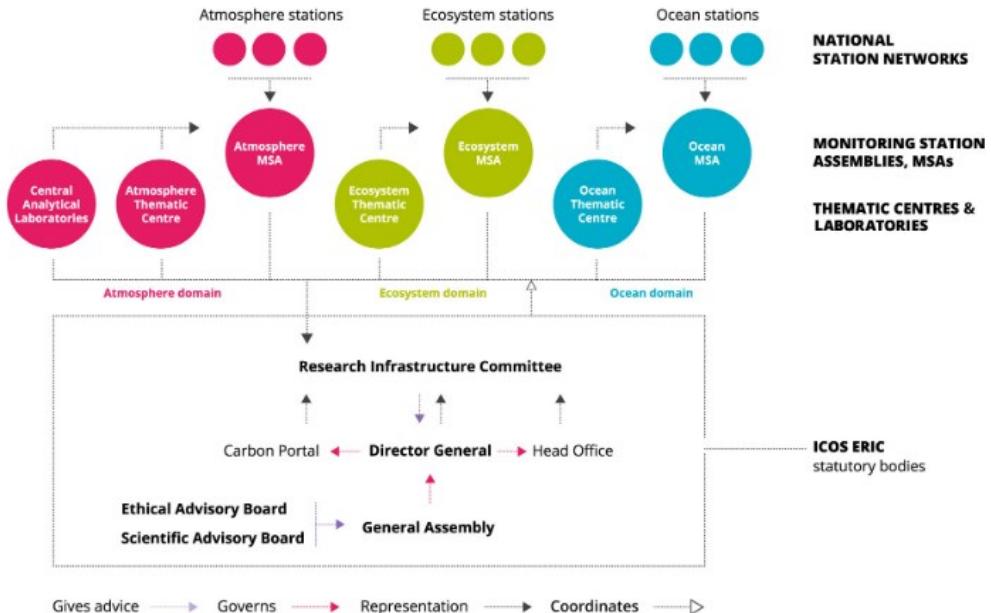


圖 4-7 ICOS 系統架構網絡(大氣、陸地生態系統和海洋系統)(資料來源:

<https://www.icos-cp.eu/about/organisation-governance/structure>)

2. 歐洲綜合碳觀測系統測站認證程序

要成為歐洲綜合碳觀測系統測站需經過一系列嚴格的審核程序，以確保儀器設備、資料處理標準、數據品質的一致性。第一部分是需要透過 ICOS 專題中心 (Thematic Centres)評估該站點位置、測量基礎設施和站點等是否符合設置要求。第二部分需檢視是否遵守設置協議，並進一步分析其量測標準、數據傳輸和數據品質一致性。最後，ICOS 大會會根據專題中心撰寫的評估報告和建議，進一步評估是否批准並納入該通量測站的設置，ICOS 通量測站申請、評估以及認證程序如圖 4-8 所示。



圖 4- 8 ICOS 通量測站申請、評估以及認證程序(資料來源: <https://www.icos-cp.eu/about/join-icos/process-stations>)

3. 歐洲綜合碳觀測系統數據資料品質處理程序(ICOS)

歐洲綜合碳觀測系統數據資料品質處理涵蓋幾個主要程序，如圖 4-9 所示：

(1)由 ICOS 測站提供原始資料的蒐集。(2)原始數據資料必須於 24 小時內存儲於安全的資料庫中並備份。(3)將原始觀測數據提供給個別的專題中心(大氣、海洋以及生態系統)進行數據品質處理。(4)數據品質處理除了三個主要專題中心以外，中央分析實驗室(Central Analytical Laboratories, CAL)是 ICOS 中心設施的一部分，負責提供各測站實驗室標準氣體分析以及定期儀器校正程序。(5)各個專題中心按照標準化程序進行資料處理，對數據進行檢查，品質控制、資料填補以及通量的計算。最後，將數據資料彙整為每小時或是 30 分鐘資料等。(6)由各個專題中心透過標準化資料處理後，數據資料將進一步提供給 ICOS 碳平台(ICOS Carbon Portal)。(7) ICOS 碳平台負責組織和管理所有 ICOS 數據資料，並免費開放提供給科研人員、政府研究機構人員及利益相關者等。

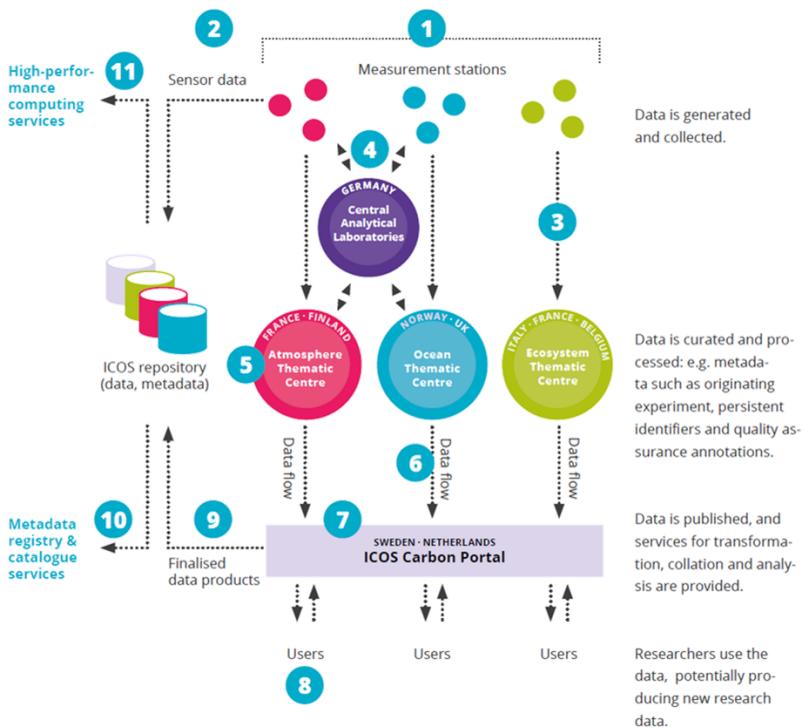


圖 4-9 ICOS 通量測站數據資料品質處理程序(資料來源:<https://www.icos-cp.eu/data-services/data-collection/data-flow>)

透過 ICOS 標準化管理，可進一步確保觀測資料的標準性、一致性及可靠性。

進一步採用該系統長期觀測資料，能使歐洲及其他國家甚至歐盟成員國更好地採用並履行應對聯合國氣候變遷框架公約的義務(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)。

4. 歐洲綜合碳觀測系統城市溫室氣體觀測發展目標(ICOS Cities)

城市地區(Urban)所產生溫室氣體佔全球和歐洲化石燃料排放的很大一部分。因此，歐洲綜合碳觀測系統對於城市溫室氣體減排擬定以下目標：

- (1) 技術發展：發展城市環境溫室氣體觀測技術，以提供可靠的數據。
- (2) 先期測試：在大、中及小城市進先期測試，隨後在歐洲多個城市實施相同的量測方法。
- (3) 服務和工具：根據城市的需求開發服務和工具，用於處理和分析觀測數據，同時促進公民參與。同時提高意識並吸引公民參與。

(4) 支持歐洲的氣候行動為目標:為歐洲城市溫室氣體監測系統提供未來的支持，並為歐洲氣候策略做出實質貢獻，以實現《巴黎協定》之目標。

(5) 城市研究的支持:升級研究相關基礎設施，以支持城市實施氣候行動計劃。

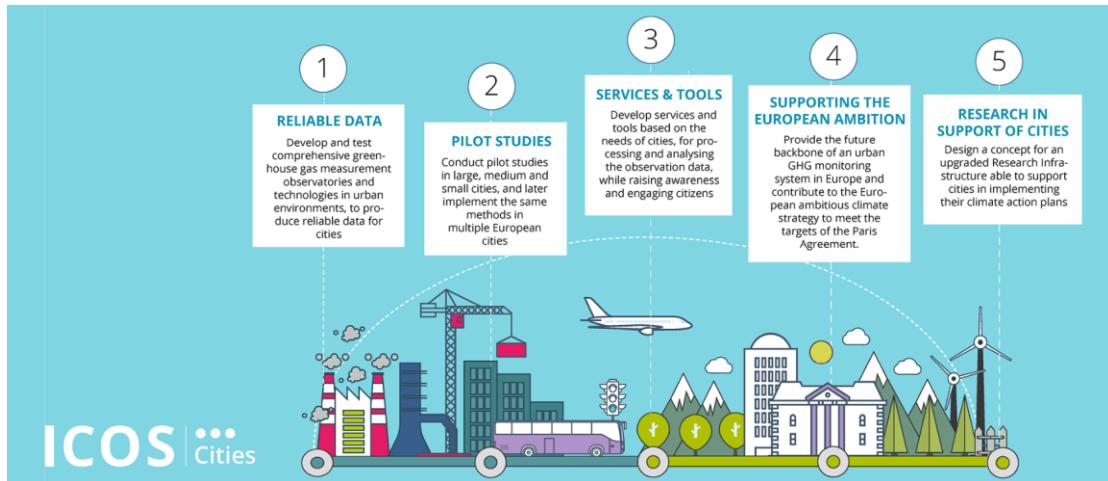


圖 4-10 ICOS Cities 溫室氣體觀測發展目標(資料來源:<https://www.icos-cp.eu/projects/icos-cities/key-objectives>)

ICOS Cities Horizon 2020 計畫對城市地區溫室氣體排放進行系統性觀測，目前國際科學平台已選擇巴黎(大)、慕尼黑(中)和蘇黎世(小)這三個不同尺寸的城市作為該計畫先期測試。歐洲國家中 12 個城市也正在對此計畫展開行動，包含安特衛普、巴塞隆納、巴塞爾、布爾諾、雅典、哥本哈根、海德堡、赫爾辛基、克拉科夫、羅馬、鹿特丹和波爾圖。這些城市在地理、人口和經濟活動方面呈現出多樣化的特徵。他們在整個計畫中提供回饋並分享相關經驗，同時回應城市在歐盟氣候行動(Climate action)方面的需求。



圖 4-11 ICOS Cities 計畫中選擇的 15 個城市示意圖(資料來源:<https://www.icos-cp.eu/projects/icos-cities/cities>)

5. 歐洲綜合碳觀測系統通量技術發展歷程

歐洲綜合碳觀測系統最早於 2016/11/16 發佈生態測站使用 EC 技術來觀測 CO₂ 通量的第一版指引，該指引中提到關於 CO₂ 通量觀測的相關規範，此後幾乎每 1~2 年都會發佈修正版的指引，截至 2024/9/18 之前發佈的最新版為 2024/1/19 發佈的 ICOS Ecosystem Instructions : TURBULENT FLUX CO₂ & energy, Version: 20240119。關於 CH₄ 和 N₂O 的通量觀測，因為技術和相關的觀測設備在最近才慢慢發展成熟，於 2024/3/25 才發佈使用 EC 技術來觀測 CH₄ 和 N₂O 通量的第一版指引: ICOS Ecosystem Instructions : TURBULENT FLUXES CH₄ & N₂O, Version: 20240325，這兩個指引的相關內容可以參考 4.2.2 章節中的第(五)點的第四項 (ICOS 生態測站的設備規範)。

(五) 美洲通量觀測系統(Ameriflux)

AmeriFlux 在 1996 年成立，是一個由研究機構科學家或是研究員管理的通量網絡，用於觀測北美、中美洲和南美洲的二氧化碳、水和能量通量，涵蓋的氣候以及生態系統包含苔原、草原、熱帶草原、農作物、針葉林、落葉林和熱帶叢林。該通量網絡來自許多機構的支持，包括美國能源部的陸地碳計劃(U.S. Department of Energy's Terrestrial Carbon Program)、美國能源部氣候變遷研究所 (DOE's National Institute of Global Environmental Change, NIGEC)、NASA、NOAA 和美國林務局，並從原本的 15 測站成長至 669 個通量觀測站(圖 4-12)。

AmeriFlux 想解決的科學問題如下：

1. 陸地系統中碳儲存和能量、CO₂和水蒸氣的交換的大小是多少？
2. CO₂的空間和時間變異性如何？
3. 這種變異性受到植被類型、物候學、土地利用變化、管理和干擾史的影響，這些因素的相對影響是什麼？
4. 氣候與能量、CO₂和水蒸氣交換之間的因果關係是什麼，季節性和年際氣候變化和異常如何影響通量？
5. 邊界層 CO₂濃度的空間和時間變異性如何，這與地形、氣候帶和植被有何不同？



圖 4-12 美洲通量觀測系統(Ameriflux)測站點位(資料來源:<https://ameriflux.lbl.gov/sites/site-search/?mapping-tool>)

為了確保每個獨立通量觀測網絡的數據達標準化且具品質一致性，美國能源部在 2012 年勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)建立了 AmeriFlux 管理計畫(AmeriFlux Management Project, AMP)(圖 4-13) (AmeriFlux, 2022)。透過該系統於每年夏天指派專業通量檢測技術人員以及移動式通量儀器技術團隊，進行每個通量觀測站查核，主要的工作重點目標如下：

- (1) 透過定期的測站查核、校準和數據質量檢查確保各個測站長期通量資料的品質。並提供使用者(研究人員)一致性、標準化、可靠性的開放資料，未來有效建立生態系統模型供全球通量基礎研究。
- (2) 建立該查核管理系統，使研究人員、科學家能夠即時透過準確的數據來判斷並量化相關的環境衝擊的影響(例如:森林野火等)。
- (3) 透過舉辦研討會或是通量數據會議，定期提供實驗室研究人員(技術人員)相關訓練課程，並加強 AmeriFlux 通量觀測網絡聯繫。
- (4) 持續評估新式量測儀器以及開發新的通量測量方法。

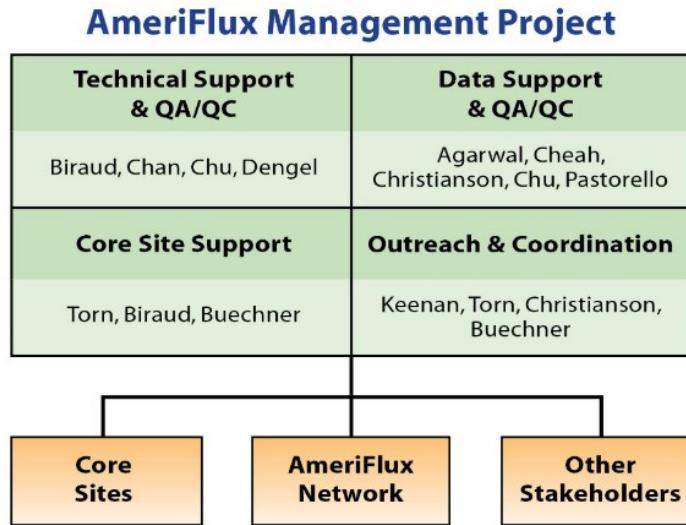


圖 4-13 AmeriFlux 管理計畫組織架構(資料來

源:<https://ameriflux.lbl.gov/about/ameriflux-management-project/>)

AmeriFlux 的數據資料品質處理涵蓋幾個主要程序以生成 AmeriFlux BASE 和 AmeriFlux FLUXNET 數據，如圖 4-14 所示: 數據從各站點團隊以標準化格式提交其通量/氣象數據給 AmeriFlux 管理專案 (AMP)，由 AMP 執行格式以及數據的 QA/QC 之後在 AmeriFlux 網站上公開發佈出 BASE 數據，BASE 數據格式遵循與 ICOS 和歐洲數據庫等其他通量網絡兼容的國際標準。AMP 再利用高質量標準化的 BASE 數據輸入 ONEFlux(由 AMP 與 ICOS 等國際合作夥伴合作開發的開放式網絡化通量程式)，為 AmeriFlux 站點生成 FLUXNET 數據產品。

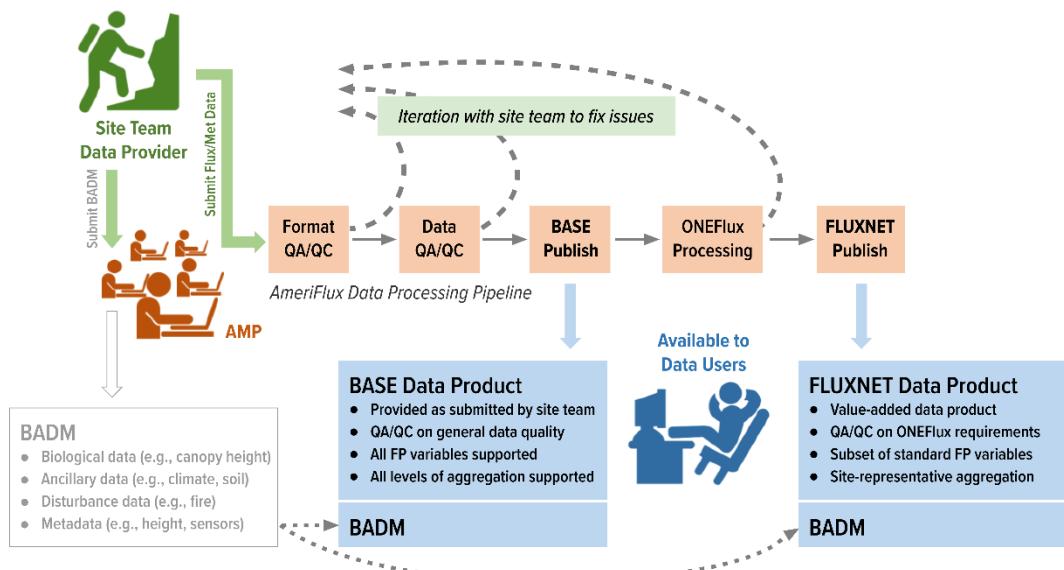


圖 4-14 AmeriFlux 資料品質處理程序圖(資料來源:<https://ameriflux.lbl.gov/data/flux-data-products/>)

(六) 中國通量觀測研究網路(ChinaFLUX)

中國陸地生態系統通量觀測研究網路（簡稱中國通量觀測研究網路，ChinaFLUX）是以中國科學院生態系統研究網路為基礎的研究平台。該網路主要利用微氣象學的渦度相關技術和箱式/氣相色譜法等主要技術手段，對中國典型陸地生態系統與大氣之間的 CO₂、水汽和能量通量的日、季節和年際變化進行長期觀測研究。ChinaFLUX 於 2002 年建成，得到了中國科學院知識創新項目 "中國陸地及近海生態系統碳收支研究"（KZCX1-SW-01）和國家重點基礎研究發展規劃項目（973 項目）"中國陸地生態系統碳循環及其驅動機制研究"（2002CB412500）的支持。目前，China FLUX 擁有 8 個微氣象站和 16 個箱式/氣相色譜法觀測站。此外，在中國科學院知識創新工程重要方向項目"中國陸地生態系統碳通量特徵及其環境控制作用研究"的支持下，還有超過 22 個森林、草地和農田站結合野外植被、土壤生理生態學實驗進行碳、水和能量通量的觀測。截至目前，ChinaFLUX 的觀測研究站點（網絡）已達 80 餘個，其中包括 18 個農田站、18 個草地站、30 個森林站、15 個濕地站、2 個荒漠站、1 個城市站。

和 1 個湖泊站以及 1 個海洋站，其站點分佈圖如圖 4-15。



圖 4-15 ChinaFLUX 站點分佈圖(資料來

源:<http://www.chinaflux.org/engeneral/index.aspx?nodeid=219>

(七) 橡樹嶺國家實驗室生物地球化學動態檔案中心 (Oak Ridge National

Laboratory Distributed Active Archive Center, ORNL DAAC)

橡樹嶺國家實驗室分散式生物地球化學動態存檔中心是美國 NASA 地球觀測系統資料和地球科學資料和資訊系統專案（ESDIS）管理的中心之一。ORNL DAAC 提供 NASA 陸地生態計畫的資料，研究包含涉及生物、地質、化學成分與地球的環境。ORNL DAAC 的目標為陸地生物地球化學和生態動力學觀測和模型的綜合檔案收集、提供數據服務，以促進支持 NASA 地球科學的研究、教育和決策。資料主題涵蓋北極圈生態系統、生物質、碳循環、氣候、火災造成碳排及其他檢測資料、水文學和冰凍圈、所有土地利用和人文維度資訊、土壤以及所有

植被和森林等資料庫。

4.1.2 通量檢測相關文獻及報告等實際應用現況彙整

目前全世界主要的三種溫室氣體包括 CO₂、CH₄ 和 N₂O，其中 CO₂ 因為濃度和其通量較大比較容易進行測量，儀器設備已商業化並且在許多通量觀測網進行了多年的觀測。

區分 CH₄ 和 N₂O 通量與 CO₂ 通量的一個關鍵差異在於 CO₂ 通量在白天和夜晚的表現往往是雙向的，白天有大量的負通量和夜晚有大量的正通量，因此正確量化兩個成分非常重要。N₂O 的通量在大部分時間內往往是正的（吸收率通常很低，會在雜訊範圍內），而對於 CH₄，可以觀察到吸收（氧化）和排放的變化，但變化通常發生在不同的站點或季節，而不是遵循日循環。因此 N₂O 通量可以是非常間歇性，而年度排放量可以完全由幾天內的通量主導，例如與施肥、降雨事件。因此，與密閉罩方法相比，EC 方法非常適合觀測高排放事件，具有良好的空間代表性和時間覆蓋，但在一年的其他時間內可能面臨測量微小通量的挑戰 (Nemitz et al., 2018)。考量場域異質性對未來通量檢測之需求，本計畫持續彙整通量檢測相關文獻及報告等實際應用現況，逐一分述如下。

(一) 都市通量檢測場域

(1) 韓國

2025 年後全世界將有將近三分之二的人口居住在都市區域，都市也將變得更加密集(UN, 2018)。然而，都市化改變了地表的型態以及環境品質(例如增加粗糙度和不透水區域、降低空氣品質以及接收更多人為居住所排放的熱(Coutts et al., 2007; Loridan and Grimmond, 2012; Roth et al., 2017))。這些改變會影響都市地表能量、質量和動量交換以及都市能量的收支，造成獨特的城市氣候特徵，例如城市熱島和增強的熱浪和洪水(Arnfield, 2003)。為了減輕這些都市氣候影響，必須了解都市地表-大氣相互作用，可進一步改善大氣的擴散模擬以及氣象和空氣污染模型的預測(Li and Bou-Zeid, 2013)。城市是大氣中二氧化碳(CO₂)的主要來

源，然而由於城市土地利用的高度異質性，導致評估每個城市淨二氧化碳排放通量及地表二氧化碳交換過程具有很大挑戰。本團隊於 112 年計畫已彙整對香港、瑞士巴塞爾以及英國倫敦市中心城市通量觀測之研究(Cui and Chui, 2021; Helfter et al., 2016; Schmutz et al., 2016)。

Park et al. (2022)利用韓國首爾 9 個城市區域進行通量檢測，研究城市二氧化碳(CO_2)通量的時空變化（包含基線區、住宅區、舊城區住宅、商業和植被區共分為 9 種類型）。此研究由韓國國家氣象科學研究所（National Institute of Meteorological Sciences, NIMS）已運行 9 個 EC 觀測塔來量測。EC 塔觀測系統包含了開放式氣體分析儀（EC150，Campbell Scientific Inc.）和聲波風速計（CSAT3A，Campbell Scientific Inc.）。EC 塔安裝在每個觀測點的屋頂上（表 4-1），以 10Hz 的時間解析度進行觀測。

表 4-1 首爾都會區 CO₂ 通量觀測點位

Site code	Full name	類別	土地覆蓋比例(%)	Annual CO ₂ flux (kg C m ⁻² year ⁻¹)	
				2017	2018
JNG	中浪區 Jungnang	住宅區	Road (36), Residence (29), Commercial, industrial, and public facilities (18), Urban vegetation (8)	6.9	7.85
GJW	加佐站 Gajwa	住宅區	Road (39), Residence (28), Commercial, industrial, and public facilities (12), Urban vegetation (12)	3.27	3.19
SGN	城南市 Seongnam (舊城區)	住宅區	Road (34), Residence (30), Commercial, industrial, and public facilities (23), Urban vegetation (9)	16.49	16.06
GHM	光化門 Gwanghwamun	商業區	Road (45), Commercial, industrial, and public facilities (30), Urban vegetation (12), Residence (4)	5.6	5.30
ANY	安養市 Anyang	商業區	Road (50), Urban vegetation (21), Commercial, industrial, and public facilities (18), Residence (5)	8.33	6.6
NOW	蘆原區 Nowon	商業區	Road (49), Urban vegetation (19), Commercial, industrial, and public facilities (14), Residence (7)	4.72	4.46
GAN	江南區 Gangnam	商業區	Road (42), Commercial, industrial, and public facilities (24), Urban vegetation (15), Residence (13)	5.83	6.52
ILS	一山站 Ilsan	植被區		1.66	1.63
SGD	韓國松島 Songdo	基線區	Road (48), Urban vegetation (32), Commercial, industrial, and public facilities (11), Residence (3)	1.15	1.02

*資料來源: Park et al. (2022)

此研究以韓國松島(Songdo, SGD)作為基線區，該地點位於韓國西海岸的邊界，對首爾首都地區的二氧化碳排放影響最小。除此之外，基線區特徵還包含較少植被和人為活動。其他區域按照三種土地利用類型作為區分：住宅區、商業區和植

被區。主要定義乃針對觀測站點半徑 1 公里內除道路和城市植被之外最主要的土地利用類型。因此，中浪區(Jungnang, JNG)、加佐站(Gajwa, GJW)及城南市(Seongnam, SGN)被定義為住宅區。其中，SGN 屬由低樓層舊城區及住宅區所組成。根據國土交通省(Ministry of Land, Infrastructure and Transport)提供的 GIS 建築綜合資訊，在 SGN 區域的所有建築中，只有 7% 是 2000 年以後所興建。相反的，JNG 及 GJW 區域則有將近 23%。光化門(Gwanghwamun, GHM)、安養市(Anyang, ANY)、蘆原區(Nowon, NOW)及江南區(Gangnam, GAN)被定義為商業區(Park et al., 2022)。一山站(Ilsan, ILS)衛星影像顯示，ILS 半徑 1 公里範圍內 70% 以上是農田，因此將 ILS 定義為植被區(圖 4-16; 4-17)。

該研究結果顯示，二氧化碳排放以大多數城市區域主要來源；其中每年二氧化碳(CO_2)排放通量以 SGN 低樓層舊城區及住宅區所貢獻量為最高，其次為住宅區及商業區(JNG & ANY)。二氧化碳通量特徵也因城市土地利用類型的差異而存在很大差異。因此，對於不同土地利用類型進行多元觀測，對城市二氧化碳減排政策至關重要(Park et al., 2022)。



圖 4-16 南韓首爾首都圈 CO_2 通量觀測點位置以及每個觀測點的影像

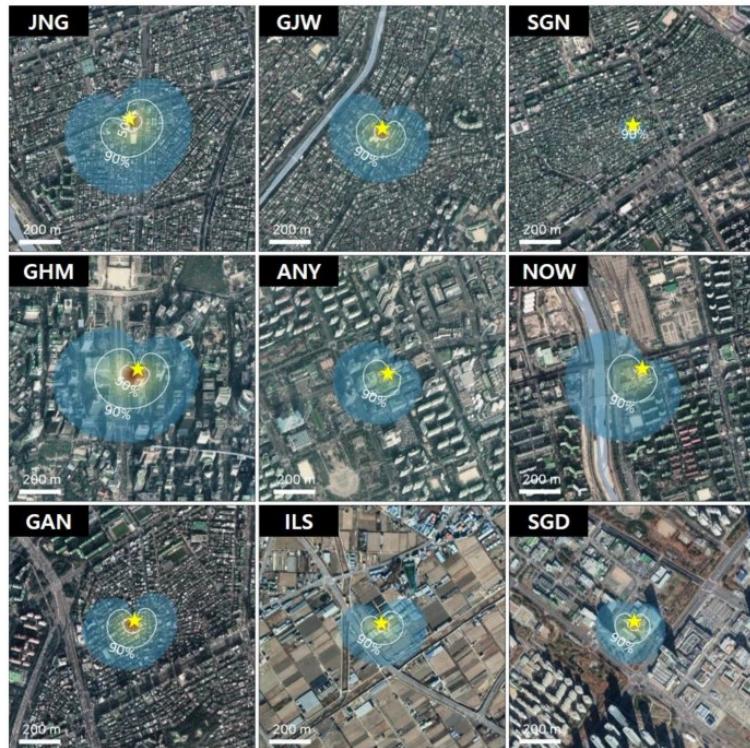


圖 4-17 觀測期間（2017 年 1 月至 2018 年 12 月）的平均通量足跡範圍

Hong et al. (2019) 量化韓國四種土地覆蓋類型二氣化碳淨通量變化，涵蓋高層高密度住宅區、郊區、農田和亞熱帶森林地區之比較(圖 4-18)。研究成果顯示：都市住宅區和郊區是全年持續的二氣化碳源(source)（城市和郊區分別為 2.75 和 $1.02 \text{ kg C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ）。然而，都市和郊區測量的總隨機不確定性比非都市地區大得多，使得獲得準確的城市通量測量變得較為困難。由於研究期間的農業間作和有利的氣候條件，因此農田和林地分別是強大的碳匯（農田和林地分別為 -0.73 和 $-0.60 \text{ kg C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ）。此研究成果也發現，人口密度較高的都市地區($15,000 \text{ person km}^{-2}$)的人均 CO_2 排放率相對較低 ($0.7 \text{ t CO}_2 \text{ year}^{-1} \text{ person}^{-1}$)，特別是在冬季，因為有區域供暖系統且交通量較小。儘管建築比例和人口密度較小 ($770 \text{ person km}^{-2}$)，但由於交通量較高，郊區的人均二氣化碳淨排放量較高 ($4.9 \text{ t CO}_2 \text{ year}^{-1} \text{ person}^{-1}$) (圖 4-19)。

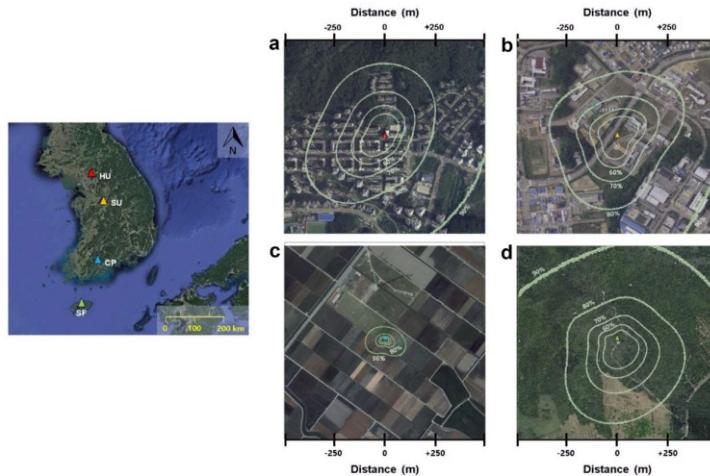


圖 4-18 Hong et al. (2019)之通量檢測站點通量檢測和通量足跡(a)都市高樓住宅區(HU, red) (b)郊區(SU, orange) (c)作物區(CP, blue) (d) 亞熱帶森林區(SF, green)

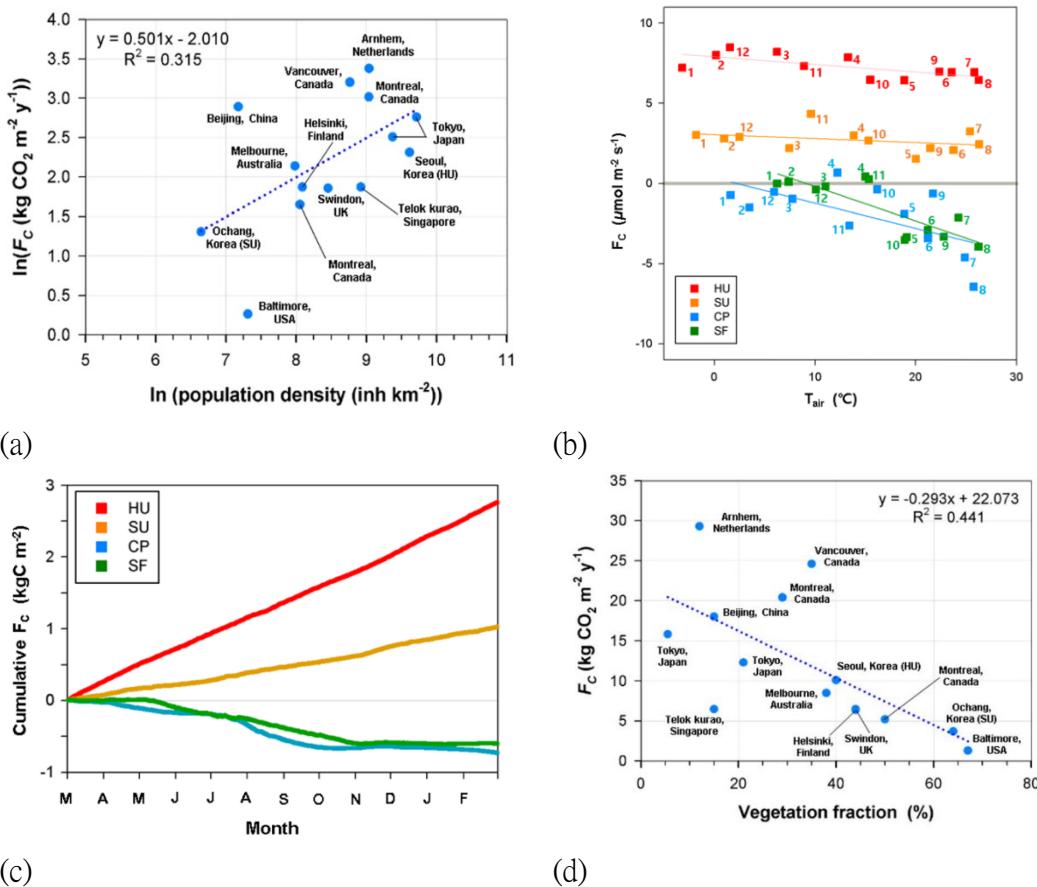


圖 4-19 Hong et al. (2019)報告之場域二氧化碳通量相關性比較(a) 郊區和住宅區的年淨二氧化碳通量和人口密度相關性(b)月平均二氧化碳通量與月平均氣溫 (T_{air})之間的關係(c)二氧化碳累積通量(d)植被覆蓋比例與二氧化碳相關性

(2) 日本

Hirano et al., (2015)於 2012 年 11 月至 2013 年 10 月，採用渦流相關法測量日本東京市中心二氣化碳 (CO_2) 的排放通量。研究區的特徵是擁有低植被的中層住宅和一些主要道路。透過每小時分析評估人為活動對二氣化碳通量的貢獻。研究區域為二氣化碳的淨排放，其年總量為 $4.3 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。由此產生的每日二氣化碳通量在早上及傍晚皆有一個峰值。此日夜變化在日間以及冬季較為顯著。結果發現，日間高峰由交通源和家庭用燃氣所貢獻，而傍晚高峰推測由家庭燃氣所造成，此外工作日和假日早上流量的顯著差異主要歸因於交通源排放 (圖 4-20; 4-21; 4-22)。

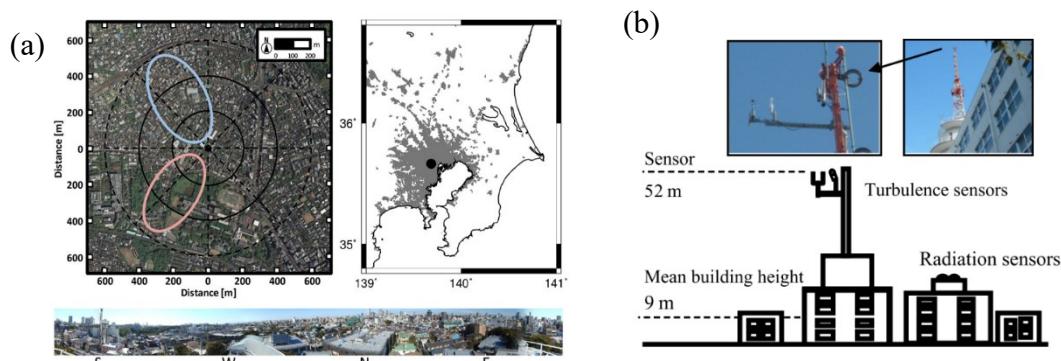


圖 4-20 日本東京市中心二氣化碳 (CO_2) 的排放通量研究區域 (日本地理空間資訊管理局空拍照片)。(a)橢圓形顯示冬季 (藍色：十二月至二月) 和夏季 (紅色：六月至八月) 典型的通量足跡(b)場域通量塔設置

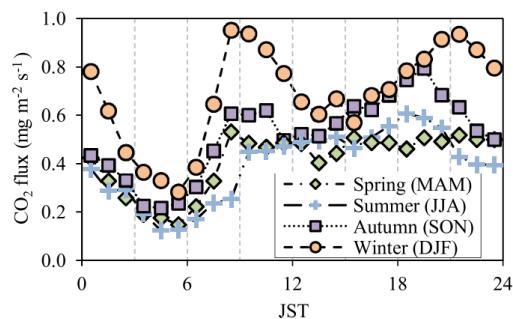


圖 4-21 CO_2 平均日夜通量變化

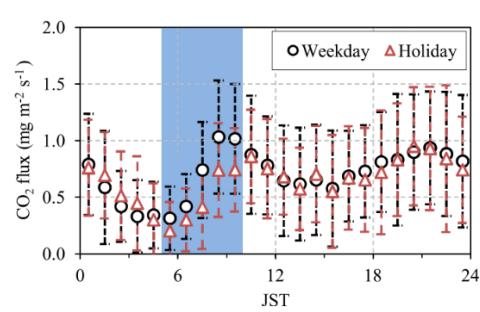


圖 4-22 平日以及假日 CO_2 通量變化

(3) 新加坡

都都市通常是二氧化碳的淨來源。都市內的植被因白天進行光合作用可以在減緩都市二氧化碳排放發揮重要作用，特別是當大面積植被和/或常綠作物存在時。由於都市生態系的特殊性以及樹木分佈和物種的高度變異性，直接而準確地估計都市植被的碳吸收量是很困難的。Roth et al. (2017)使用兩種不同的方法探討城市植被在新加坡住宅區二氧化碳通量中的作用。分別透過渦流相關法直接測量CO₂通量與透過排放係數法結合活動數據推估二氧化碳排放量進行比較，後者包括交通車輛、家庭燃氣、土壤呼吸和人類呼吸的貢獻，結果呈現於圖 4-23 與圖 4-24。

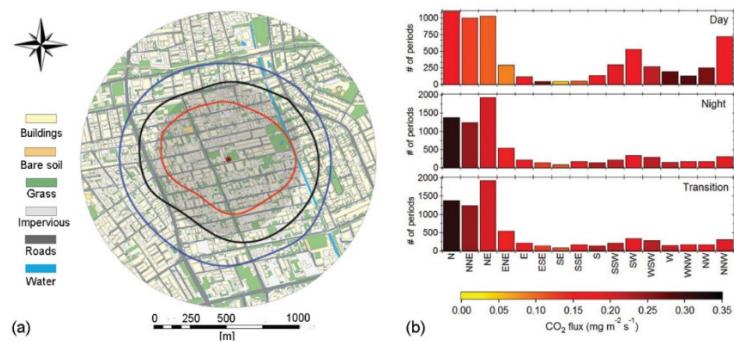


圖 4-23 新加坡都會區二氧化碳通量調查研究之(a) EC 塔為中心(red dot)覆蓋 80% 通量足跡(b) 每個風向區觀測到的平均 CO₂ 排放通量

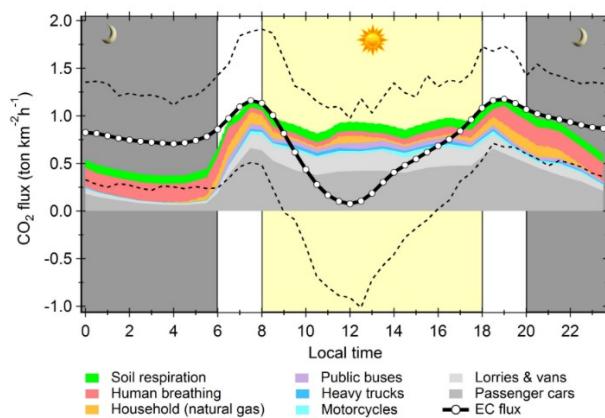


圖 4-24 新加坡都會區二氧化碳通量調查研究以 EC 站點為中心的 500m 圓圈內，EC 直接測量的總 CO₂ 通量以及透過自下而上(bottom up)的方法估算 8 種源類型的

排放總和

自然碳匯的部分，該研究透過樹叢作物調查，利用相對關係生長方程式(allometric equations)和熱帶森林生態代謝理論(metabolic theory of ecology for tropical forests)的替代模型來估算每年的二氧化碳固存量。棕櫚樹、香蕉樹和草坪也包括在調查中，其年度二氧化碳吸收量是根據公佈的增長率獲得的。結果發現，兩種方法的一致性都在 2% 以內，並顯示植被吸收了所研究的住宅區二氧化碳排放總量的 8%。大約 $1.4 \text{ ton km}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ($510 \text{ ton km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) 主要透過的植被吸收，估計為日間光合作用($4.0 \text{ ton km}^{-2} \text{ day}^{-1}$) 扣除白天地生物量呼吸和夜間植物呼吸釋放 ($2.6 \text{ ton km}^{-2} \text{ day}^{-1}$)。

(二) 農業場域通量檢測

相較於工業化之前的時代，全球氧化亞氮(N_2O)的釋出量已增加 1.6 倍，此增量歸因於農業的擴展。氧化亞氮(N_2O)是大氣中的自然成分之一，可存在大氣環境中約 114 年，每年以 0.2-0.3% 速率增加。雖廢水處理廠、化石燃料燃燒和化工製造流程也可能是重要的來源之一，但大氣中 N_2O 主要來源還是以農作物生長，因氮肥的使用、土壤中的有機氮含量提高，促使土壤中微生物進行硝化以及脫硝作用，間接促進 N_2O 生成。我國對農業系統 N_2O 排放的調查資料十分有限，最近已有研究團隊開始探討農業區域是否因含氮化學肥料的施用以及田間作業的影響，導致釋出大量反應性氮化物以及溫室氣體(Jhang et al., 2022)。該實驗以水、旱輪作的方式進行水稻及旱作物種(小白菜)的通量觀測，進一步瞭解土壤與大氣交互作用以及溫室氣體通量時序變化(圖 4-25)。

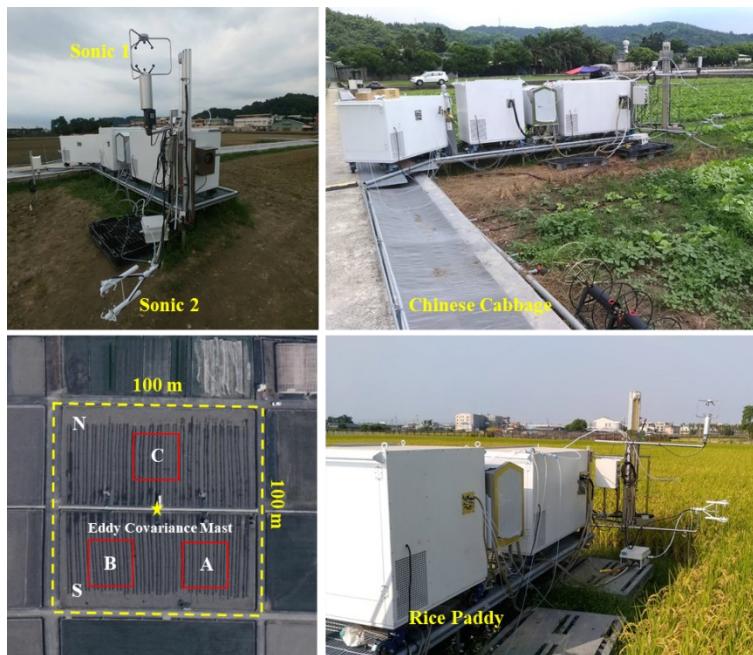


圖 4-25 農業試驗所溫室氣體通量觀測場域

渦流相關法和密閉罩法是檢測不同尺度農業溫室氣體的方法，當它們在異質農業景觀中一起使用時，可以幫助識別通量源和匯，並評估管理措施對不同尺度排放的影響。Molodovskaya et al. (2012)於紐約州康乃爾大學動物科學教學研究中心，一座大型乳牛場，擁有超過 500 公頃的耕地，種植玉米和苜蓿。在 2008/6/30~7/4 之間比較了苜蓿和玉米田這兩個相鄰農業處理區的短期 N_2O 通量。測量活動中透過渦流相關法和密閉罩法獲得的 N_2O 通量數據。兩種方法一致顯示苜蓿田的排放量較高，因為苜蓿田在生長期接受了較多的氮肥。密閉罩法的總量與測得的渦流相關法的總量相比，兩種方法之間存在 7% 到 33% 的差異。在風向變化最小和半小時渦流相關法(Eddy Covariance, EC)通量變化最小的當天觀察到最小差異。結果顯示，風向搭配通量足跡在分析來源變化時是一個有用的工具。密閉罩實驗設置如圖 4-26 (黑色點，距離以公尺為單位) 和田間 EC 設備 (圖的中心)。黑色方塊標示了田間設備的位置，虛線箭頭指示了主要的風向。

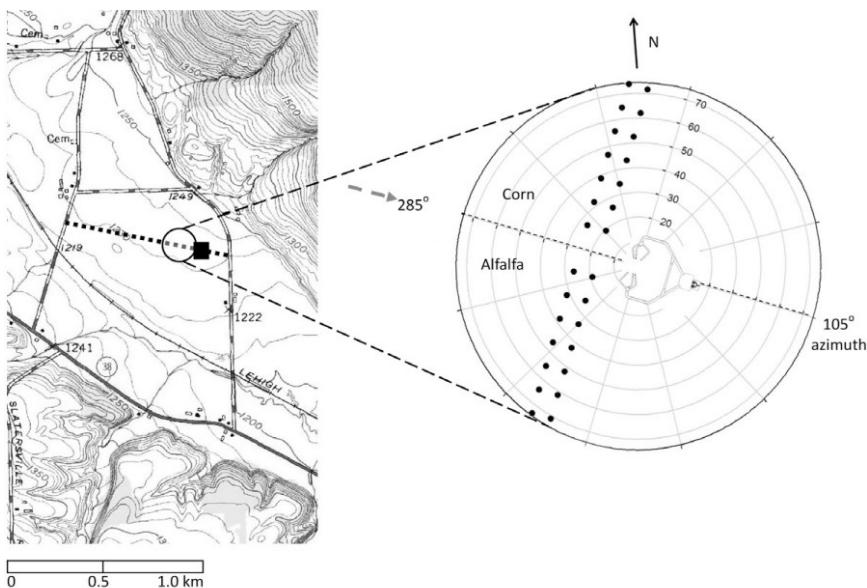


圖 4-26 Molodovskaya et al. (2012)研究中心地圖（來源：美國地質調查局 USGS）

Chaichana et al. (2018)使用密閉罩(Closed Chamber, CC)和渦流相關法(EC)這兩種方法測量水稻田中甲烷(CH_4)的通量。圖 4-27 稻田實驗場地示意圖:包含 13 個單獨灌溉的田地。黑色星星表示通量塔的位置，圈起的數字表示密閉罩法取樣點。空心箭頭和黑色箭頭分別顯示了進水和排水的灌溉系統。在插秧後的 30、60 和 90 天以及收割後，使用密閉罩法進行了密集監測。實驗地點位於東京農工大學福生校區的田野博物館本町田野科學中心 ($35^{\circ}39'56.2''\text{N}$, $139^{\circ}28'17.7''\text{E}$)。兩種方法的 CH_4 通量的日常變化在所有生長階段都表現出相似的排放模式，並顯示出顯著的相關性，密閉罩法在插秧後的 30、60、90 天以及收割後(After Harvest, AHV)這些時期得到的 CH_4 通量平均值分別比 EC 方法測得的值高出 58%、81%、94% 和 57%。足跡分析顯示，本研究中 EC 方法覆蓋的區域包括非均勻的土地使用類型。密閉罩法和渦流相關法不同優勢和劣勢可以相互補充，使用這兩種方法可以更好地了解稻田的 CH_4 排放。

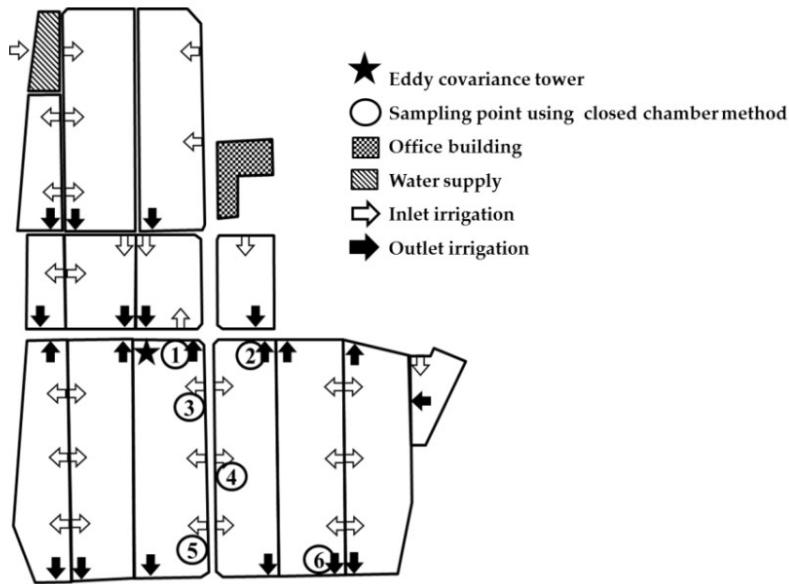


圖 4-27 Chaichana et al. (2018)稻田實驗場地示意圖

此外，馮浦捷(2015)在 2012~2013 年期間於台中霧峰農試所 85 號試驗田以渦流相關法 (Eddy Covariance system, EC) 搭配微氣象系統進行甲烷通量觀測，研究中水稻田的甲烷產生的機制和途徑如下：水稻田由於長期處於湛水條件，鮮少與氧氣接觸，形成厭氧狀態，利於產甲烷菌透過以下兩個途徑產生甲烷：

- (1) 有機物在發酵過程中，以氫氣為電子供應者，減少二氧化碳，生成甲烷
- (2) 以有機質發酵所形成之醋酸作為能量來源，分解成甲烷和二氧化碳。

水稻田中的產甲烷菌會藉由三種途徑將甲烷氣體排放至大氣，分別為擴散、氣泡方式、水稻植株。此研究的結果發現水稻田甲烷通量高峰值皆出現在各期稻作之水稻分蘖期，主要是因為此時水稻田環境會維持在湛水並施加肥料的型態，利於微生物產生甲烷。

表 4-2 彙整此研究水稻田甲烷通量和台灣其他地區以及義大利之結果，以相同觀測方法(EC)來看，台灣的水稻田甲烷通量排放量約為義大利的 20~30%。

表 4-2 義大利及台灣地區水稻田甲烷排放通量比較

地區	地貌	觀測方法	甲烷排放量(Kg CH ₄ ha ⁻¹)	文獻
Po Valley(義大利)	paddy	EC	317 [*]	Meijide et al., 2011
台北(台灣)	wetland	chamber	159 [#]	Chang et al., 2013 (楊盛行教授)
新竹(台灣)	wetland	chamber	12.3 [#]	Chang et al., 2013 (楊盛行教授)
台北(台灣)	landfill	chamber	2630~12738 [#]	Hegde et al., 2003 (楊盛行教授)
台北(台灣)	paddy	chamber	17.3~117,105.4~395 [*]	Yang et al., 2001 (楊盛行教授)
台中(台灣)	paddy	chamber	78,1025 [*]	Liu et al., 2004 (劉震維教授)
台中(台灣)	paddy	EC	84.3 [*] (first, 2012)	馮浦捷, 2015
台中(台灣)	paddy	EC	51.4 [*] (second, 2012)	
台中(台灣)	paddy	EC	70.2 [*] (first, 2012)	

註: #: 年排放量, *: 期作排放量

Yang et al. (2001) 為了研究環境條件對台灣稻田甲烷(CH₄)排放的影響，本研究使用密閉罩方法在四個地點進行，涵蓋了兩個作物生長季節及兩種灌溉系統。第一作物季節中，CH₄排放在有效分蘖期和孕穗期較高，而在移栽期和成熟期的間歇性灌溉系統下則較低。第二作物季節中，CH₄排放在移栽期較高，並在水稻生長期間逐漸減少。第一作物季節(2月 至 6月)中，日均溫度和光強度逐漸增加，而在第二作物季節(8月 至 12月)中則相反。稻田中季節性的CH₄排放量在第一作物季節範圍為1.73至11.70 gm⁻²，而在第二作物季節則為10.54至39.50 gm⁻²。所有試驗田中，第二作物季節的CH₄排放量均高於第一作物季節。總結來說，有機肥的施用和淹水灌溉已被證實會增加稻田中的甲烷(CH₄)排放，而無機肥的施用和間歇性灌溉則顯著減少了CH₄排放。水稻品種對CH₄排放有一定影響，但並非主要因素。簡言之，適當的肥料施用以及稻田灌溉管理可以顯著減少稻田中的CH₄排放。表 4-3 為這個研究做出的台灣各地區水稻田甲烷排放量。

表 4-3 台灣各地區水稻田甲烷排放量調查結果，摘至 Yang et al. (2001)

Table 7 Seasonal CH₄ emission from paddy fields in Taiwan

Location	Latitude, longitude	Annual mean temper- ture (°C)	Annual precipi- tation (mm)	Rainy days (days year ⁻¹)	Sunshine duration (h year ⁻¹)	Seasonal CH ₄ emission (g m ⁻²)		Total CH ₄ emission (t)	
						First cropping season	Second cropping season	First cropping season	Second cropping season
Taipei and Keelung	121°27'~122°6'N, 24°41'~25°38'E	22.5	4,296	196	1,383	2.6~11.7	13.7~28.9	28.1~128.9	68.7~144.3
Taoyuan	120°58'~121°29'N, 24°35'~25°9'E	22.3	3,188	165	1,555	1.7~5.2	10.5~10.6	241.3~729.3	1,708.9~1,712.1
Ilan	121°18'~124°34'N, 24°19'~25°56'E	22.5	4,880	188	1,387	2.9	24.6	348.1	246.4
Hsinchu and Miaoli	120°38'~121°23'N, 24°18'~24°57'E	22.1	2,079	133	1,727	9.8	39.5	1,839.8	7,486.4
Taichung and Nantou ^a	120°29'~121°27'N, 23°28'~24°26'E	23.4	2,157	131	2,006	6.6	6.9	1,450.7	1,484.6
Changhua ^a	120°16'~120°38'N, 23°50'~24°11'E	23.3	2,284	123	1,974	6.6	7.3	1,971.9	2,060.2
Chiayi and Yunlin ^a	120°0'~120°57'N, 23°13'~23°50'E	23.2	2,411	114	1,942	6.5	7.7	2,824.5	3,117.1
Kaoshung,	120°1'~120°57'N, 21°42'~23°28'E	24.7	2,293	111	2,031	8.0	8.3	2,062.3	2,036.2
Pingtung ^a									
Hualian and Taitung ^b	120°44'~121°46°N, 21°56'~24°22'E	23.9	2,984	144	1,496	8.8	18.1	1,114.8	2,372.5
Total	119°18'~124°34'N, 21°42'~25°56'E	23.6	2,867	138	1,753			11,881.5~12,470.3	20,581.0~20,659.8

^a From Wang and Shieh (1997)^b from Perng and Huang (1998)

目前水稻田域在世界各地等地的平均溫室氣體通量輸出，其由於田間管理方式差異甚大，影響最終輸出結果，以下簡介當前於文獻中可查詢到的施作方案：可區分水分管理（連續淹田、非連續淹田），添加有機物（有添加、無添加）、栽種方式（直接種植、插秧轉植）。各種方案可能因為地域、文化差異而有主要的施作方式。因此製表簡述各種施作方案可能的溫室氣體輸出量平均值，以及主要盛行的區域，並盡量歸類盛行的區域。可以發現盛行非連續淹田法區域與盛行連續淹田法區域在年降雨量並沒有差異，而肥料施放則傾向施放較多的肥料，但產出的總產量平均僅增加約 1 成的產量，見表 4-4。這些區域差異往往來自各地方更細節的氣候條件，本段的目標為呈現各地種植水稻在水份、有機物、肥料管理的差異。若未來有更詳細各地栽種方式與溫室氣體差異再行呈現。

表 4-4 水稻田場域在不同國家調查結果

Water management	Organic matter addition	Cases	Mean annual precipitation	Nitrogen rate	Rice Yield
			mm	kg ha ⁻¹ yr ⁻¹	t ha ⁻¹ yr ⁻¹
Continuous flooding	No	Case 1	1224	111.86	6.71
	Yes	Case 2	1190	97.63	6.58
Non-continuous flooding	No	Case 3	1127	154.78	7.44
	Yes	Case 4	1349	140.28	7.48

Case 1: 連續淹田法，耕種前不加入有機物質，較多南韓、印度報導案例。

Case 2: 連續淹田法，耕種前加入有機物質，盛行於南韓報導案例。

Case 3: 非連續淹田法，耕種前不加入有機物質，較多中國報導案例。

Case 4: 非連續淹田法，耕種前加入有機物質，較多日本、孟加拉、義大利報導案例。

(三) 污染逸散源通量檢測場域

溫室氣體逸散排放經常發生在掩埋場、煤炭開採、天然氣儲存槽和運輸過程。

2015 年在美國加州就曾發生因儲存設備老舊導致地下天然氣甲烷約每小時有 60 公噸逸散於大氣中。

澳洲坎培拉(Canberra, Australia)的金寧德拉溫室氣體釋放控制實驗場(Ginninderra greenhouse gas controlled release facility) (圖 4-28) (Feitz et al., 2018)自 2010 年開始即用來評估不同的檢測技術，提供近地表逸散源相關溫室氣體通量研究的重要基礎 (Feitz et al., 2018; Humphries et al., 2012)。溫室氣體減量從減少化石燃料開採、運輸和燃燒是許多國家在 2030 年積極所要達成的目標。溫室氣體通量檢測可精準掌握周邊場域溫室氣體變遷趨勢，對未來逸散事件、減排和大氣中溫室

氣體量化部分，發揮重要的參考作用。

台灣目前尚無污染逸散源通量檢測實驗場域，透過相關污染逸散源通量場域示範有助於國內外政府的法令要求，並協助研擬最具效益之策略，降低對社會環境之衝擊 (Dixon and Romanak, 2015)。

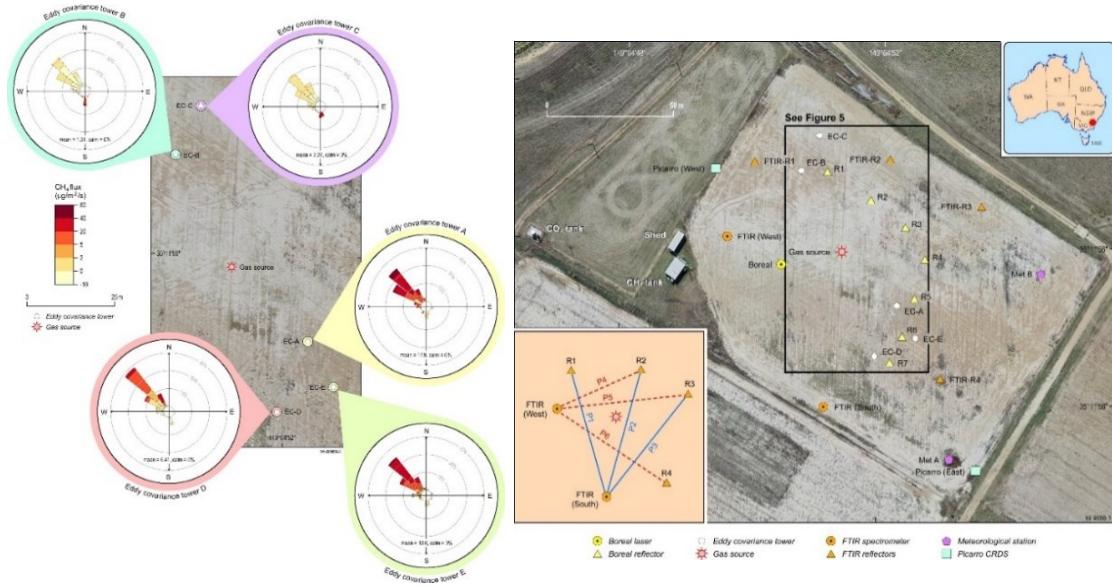


圖 4-28 金寧德拉甲烷(CH₄)釋放控制實驗場域

據估計，垃圾掩埋場約佔美國人為甲烷排放量的 16%。為了制定或評估控制排放的措施，或估計溫室氣體清單的排放係數，有必要量化各個垃圾掩埋場的甲烷排放並了解其關鍵驅動因素。

大多數排放量化方法（例如示蹤相關法（TCM）和通量腔體觀測法）需要幾個小時才能完成。因此通常以單日內這些短期排放測量值的平均值代表當天的測量排放率。然而，甲烷排放量隨大氣參數的變化而變化，包括風速、氣溫、大氣壓力和太陽輻射，以及其他潛在因素。由於這些驅動因素的晝夜變化，來自垃圾掩埋場的甲烷通量，特別是那些沒有最終覆蓋的垃圾掩埋場，也可能每天都有所不同。因此，短期量化可能無法準確估計平均每日排放量。

為了研究此問題，加州環境保護局的研究人員於 2012 年 6 月至 2013 年 2 月在美國東南部垃圾掩埋場透過的渦流相關方法 (EC)進行資料蒐集。EC 觀測

塔以黃色三角形如圖 4-29 所示。由於此垃圾掩埋場大部分為中間覆蓋層($\geq 90\%$)且缺乏氣體收集系統，因此大氣參數在控制排放方面可能比其他有氣體收集的場所更為重要。數據是在不同土壤濕度和溫度條件下的三個時期收集的：分為乾燥和溫暖(2012 年 6 月)；降雨事件後，濕冷(2012 年 12 月)；潮濕且涼爽(2013 年 2 月)。對這些數據的分析可以深入了解該垃圾掩埋場的每日甲烷通量模式，並可能顯示其他垃圾掩埋場的每日變化(Delkash et al., 2022)。

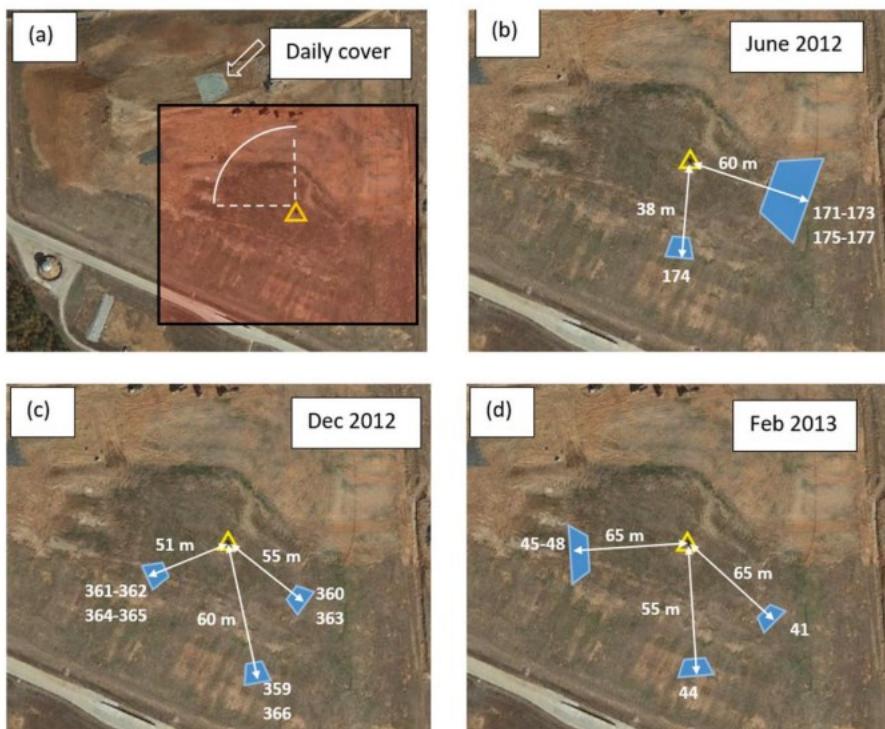


圖 4-29 美國東南部垃圾掩埋場現場測量方案。(a)風向 90° 濾鏡的圖示：透明矩形顯示其他圖中的焦點區域；(b) 2012 年 6 月的 7 或 8 天測量期間內藍色陰影區域內為在 EC 塔到測量總貢獻 50% 氣團的位置；(c) 2012 年 12 月總貢獻 50% 氣團的位置；(d) 2013 年 2 月總貢獻 50% 氣團的位置。

(四)森林通量檢測場域

Pihlatie et al. (2005) 在丹麥的森林裡利用渦流相關法和密閉罩法測量了老山

毛櫸森林場域 (*Fagus sylvatica* L.) 氧化亞氮 (N_2O) 排放，如圖 4-30 所示。研究的目的即在觀測 N_2O 排放的空間和時間變異性特性，並將排放與土壤環境參數做連結。在為期五週的測量期間內，渦流相關法、自動密閉罩法和手動密閉罩法的平均 N_2O 通量分別為 5.6 ± 1.1 、 10 ± 1 和 $16 \pm 11 \mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Pihlatie et al., 2005)。作者已經證明渦流相關法和密閉罩法在森林地面產生 N_2O 排放結果具有可比較性，儘管這些技術用於通量量測具不同的空間和時間尺度。

密閉罩法的測量顯示 N_2O 通量存在較大的空間尺度變化，而渦流相關法則整合了土壤中 N_2O 排放量高和低的區域。研究結果顯示，如果 N_2O 排放測量僅基於密閉罩法，則應專注於腔室的放置位置，以涵蓋土壤 N_2O 排放的空間變異。對於生態系層級 N_2O 排放量的估算，大尺度技術（例如渦流相關法）可作為森林地面通量觀測的替代方式。

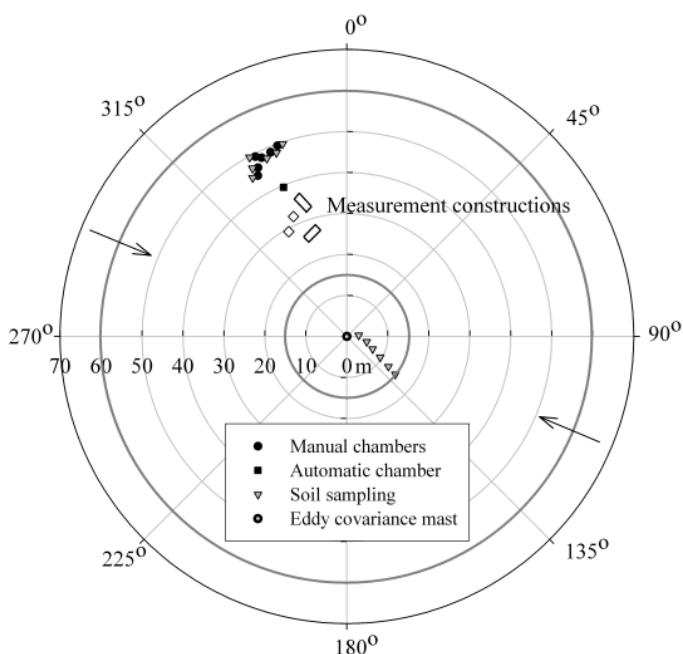


圖 4-30 丹麥小波格斯科夫山毛櫸樹林的場地地圖。原點的黑色開放圓圈代表渦流相關法支架，黑色圓圈代表手動密閉罩，黑色方塊代表自動密閉罩，灰色三角形代表土壤採樣點，空心方塊代表場地上的兩座測量塔樓和測量建築物。場地周圍的灰色線條表示 N_2O 通量的來源區域，其中 50%（在 15 米處）和 85%

(在 60 米處)。箭頭指示在活動期間的主要風向。

莊振義與夏禹九(2010)，其研究團隊於 2005 年 3 月底完成棲蘭通量觀測系統，使用渦度相關法觀測棲蘭試區的 CO₂ 通量)。棲蘭試區是屬於 Koppen 氣候分類中的亞熱帶溫暖型 (Cfb)。受地形影響，每日山、谷風的交替非常固定，再加上因蘭陽溪谷為東北—西南走向，冬季為盛行風之迎風面，地形霧與冬季鋒面霧雙重的影響，霧是影響本區森林水文、能量及碳收支的重要因子。開路式的紅外線分析儀受到霧及雨的干擾很大，觀測的資料品質很不理想。2007 年 7 月合併開路與閉路式的系統使用後，通量觀測的資料品質改善很大。2007 年 7 月以後以開閉路合併式的通量觀測系統所收集的資料，經開、閉路式互補後可使用的資料達 68%。以棲蘭試區多雨霧及陡坡地形的條件下，此一資料獲取率應已達水準。2007 年 7 月至 2008 年 6 月期間，此一扁柏林的日 CO₂ 通量都在 10 gCO₂m⁻²day⁻¹ 之間，且一般所認為是生長旺季的夏季其 CO₂ 通量亦與春、秋季的 CO₂ 通量差不多。逐月的淨生態系交換，在 200~340 g CO₂m⁻²month⁻¹ 之間，並沒有明顯的季節變異。其中 CO₂ 通量以 2008 年 3 月最高，2008 年 2 月最低，次低的月份則是 2007 年 11 月。以這 16 個月的 CO₂ 通量量測推估此一扁柏林分的年 CO₂ 吸存量約為 32.5 tonha⁻¹year⁻¹ (8.9 tonCha⁻¹year⁻¹)，與緯度相近的其他通量測站相較，棲蘭測站的年 CO₂ 吸存量接近其最大值，不過因為森林的年 CO₂ 吸存量的年間變異相當大，只以一年的數值做比較，尚無法有肯定的結論。

(五)應用衛星技術觀測溫室氣體通量

Prasad et al. (2014)利用兩顆衛星資料(SCIAMACHY、GOSAT)研究印度上空 CO₂ 和 CH₄ 柱狀平均濃度的時空變化。這些數據與美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)碳循環溫室氣體合作空氣採樣網以及特定位置的採樣罐數據被拿來作分析比較。兩種儀器的資訊顯示出相似的變化，只是 GOSAT 的值比 SCIAMACHY 的值小約 1-2%。這可能是由於它們的觀察靈敏度和檢索演算法不同。

印度的 CO₂ 最大值出現在 5 月，最小值出現在 8/9 月，而 CH₄ 最大值出現在 9 月，最小值出現在 2/3 月。二氧化石的季節變化與全球和印度的地面 NOAA 數據非常吻合，證實了二氧化石在大氣中充分混合的事實。與來自兩個經度不同但緯度接近的地表面站的 NOAA 採樣罐數據的比較，CH₄ 具有空間和時間變化。CH₄ 分佈也隨高度層變化很大。與地表層變化相比，CH₄ 柱狀平均濃度似乎與地表面 NOAA 數據以相反相位變化。因此，了解 CH₄ 在大氣中的傳輸和混合不僅是對於模型很重要，而且對於衛星資料的解釋也很重要(圖 4-31; 4-32)。

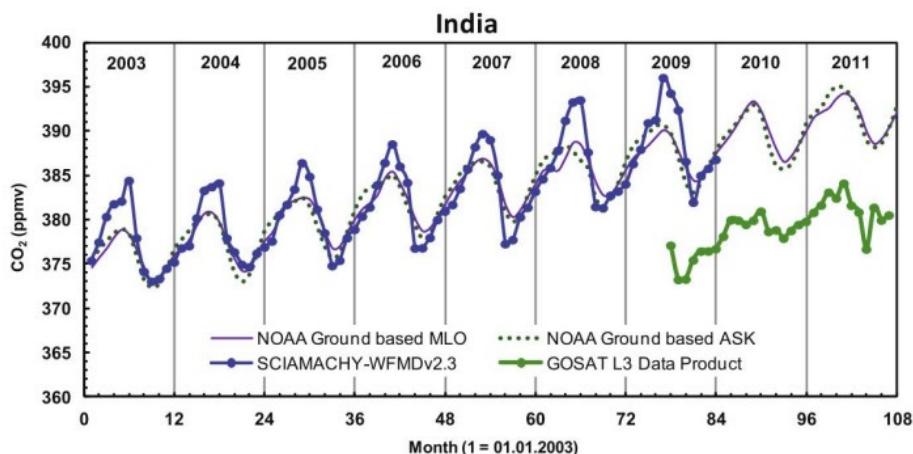


圖 4-31 印度上空 CO₂ 的 SCIAMACHY 和 GOSAT 資料與 Mauna Loa (MLO) 和 Assekrem (ASK) 的 NOAA 地面站資料以及採樣罐資料進行比較。

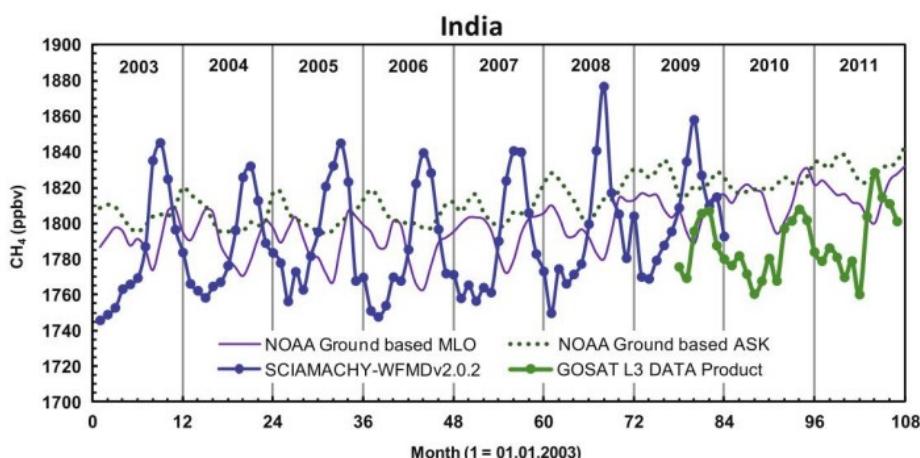


圖 4-32 印度上空 CH₄ 的 SCIAMACHY 和 GOSAT 資料與 Mauna Loa (MLO) 和 Assekrem (ASK) 的 NOAA 地面站資料以及採樣罐資料進行比較。

(六)應用飛機航測技術觀測溫室氣體

Machida et al. (2008)應用飛機航測技術觀測溫室氣體，並探討了安裝在日本航空(JAL)飛機上的 CME(Continuous CO₂ Measuring Equipment, CME)和 ASE(Automatic Air Sampling Equipment, ASE)二氧化碳分析儀測量結果。連續二氧化碳測量設備 (CME) 主要由一個非分散紅外線分析儀、數據記錄儀和兩個用於即時二氧化碳測量的校正鋼瓶所組成。

另一方面，自動空氣採樣設備 (ASE) 是專為採樣罐採樣而設計的；該設備與金屬波紋管馬達相連，可容納 12 個 1.75L 的採樣罐。CME 平台可用於對 CO₂ 進行高頻測量，以獲得大範圍的詳細空間觀測，ASE 儘管採樣頻率有限，但不僅可以提供有用的 CO₂ 分佈，還可以提供各種微量氣體種類，如同位素比率。 ASE 和 CME 安裝在飛機前貨艙的機架上，空氣旁通氣口安裝在在循環風扇上游的空調管道上。兩組採樣設備均透過飛機數據系統輸入相關飛行參數進行自動控制(圖 4-33; 4-34; 4-35)。

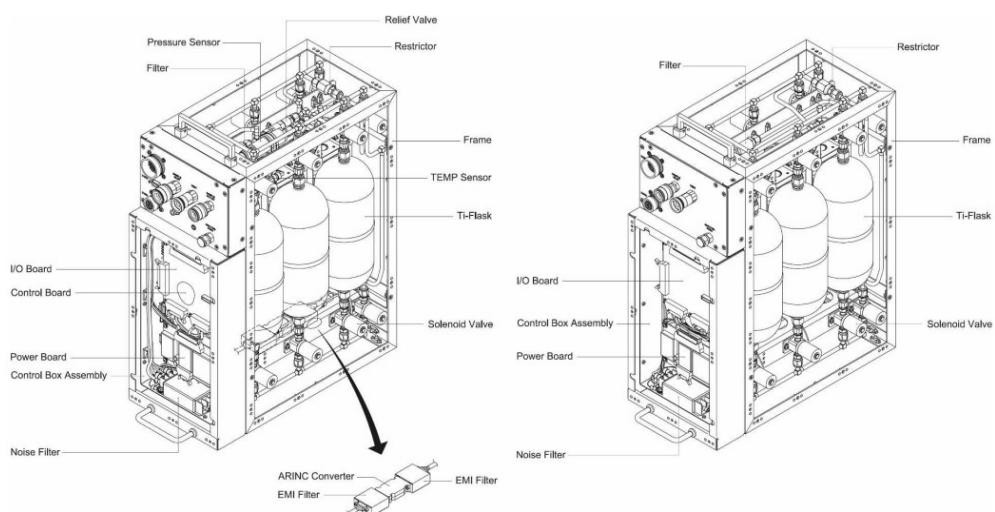


圖 4-33 JAL 飛機上配置之自動空氣採樣系統圖示。(左) ASE-1 和 (右) ASE-2 的三維視圖

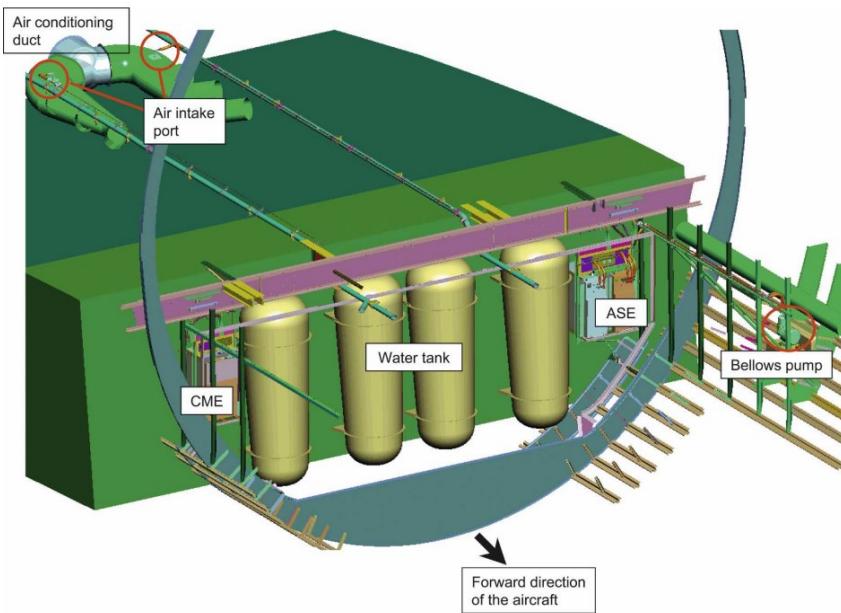


圖 4-34 波音 747-400 飛機機艙地板下的設備和風流管道的三維示意圖。兩個用於 ASE 和 CME 的空氣進氣口安裝在空調管道上。ASE 和 CME 安裝在前貨艙的機架上。

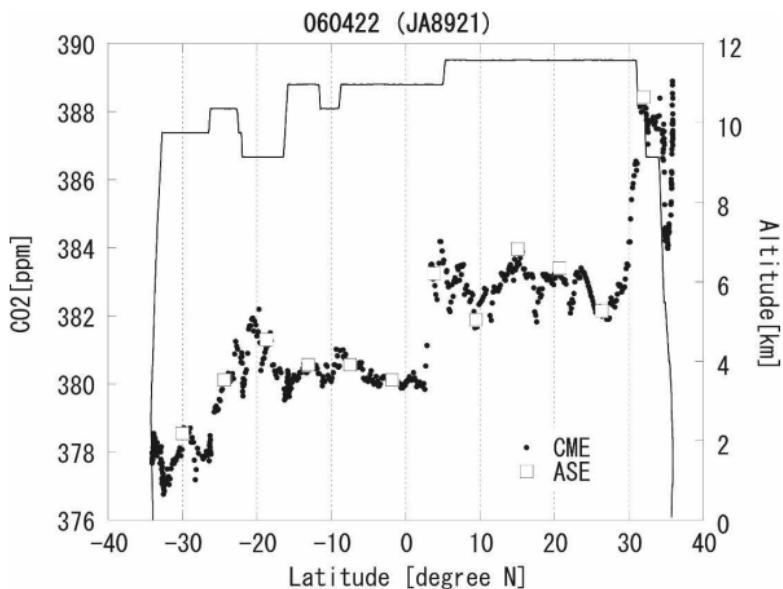


圖 4-35 2006 年 4 月 22 日日本航空公司 (JAL) 從雪梨飛往成田的航班期間，ASE (空心方塊) 和 CME (黑色圓點) 測得的 CO₂ 濃度與經緯度分佈。細線表示飛行高度。

(七)NOAA 全球溫室氣體通量分析方法簡介

隸屬美國商務部的國家海洋大氣署(NOAA)是國際上大氣環境監測研究的領導機構之一，轄下的全球監測實驗室(Global Monitoring Laboratory)對於全球溫室氣體濃度之變化與排放分布設有長期的工作計畫，相關的規劃與執行方法可提供我國參考。

1. 溫室氣體監測網

美國的溫室氣體監測工作是由許多的政府機構和大學實驗室協力完成，其中涵蓋了衛星、飛機、船舶、高塔、以及地面測站等不同屬性的監測平台。以人造衛星搭載溫室氣體監測儀是進行全球長期溫室氣體監測的重要方法，美國現役的溫室氣體監測衛星主要是太空總署的 OCO-2，可以提供全球 CO₂的大氣柱密度，2017 發射的 NOAA-20 更把監測項目擴及 CH₄ 和 N₂O。

國家海洋大氣署(NOAA)的 GML 則設置有全球溫室氣體監測網 (Global Greenhouse Gas Reference Network)，NOAA 透過國際合作在世界各地採集空氣樣品並送回 NOAA 的實驗室進行溫室氣體濃度分析，NOAA 在美國境內則設有 4 座背景大氣監測站以及多座高塔對溫室氣體進行的長期且連續的精密監測作業，在北美地區並利用研究飛機或是大氣柱探測氣球進行大氣垂直剖面的調查，這些溫室氣體濃度的監測調查工作提供了全球最完整的溫室氣體濃度資料，是分析全球溫室氣體變化所需的基礎。下圖 4-36 為美國溫室氣體監測的重要項目摘要，相關資訊可參考 NOAA 的網頁 (<https://gml.noaa.gov/ccgg/>)。

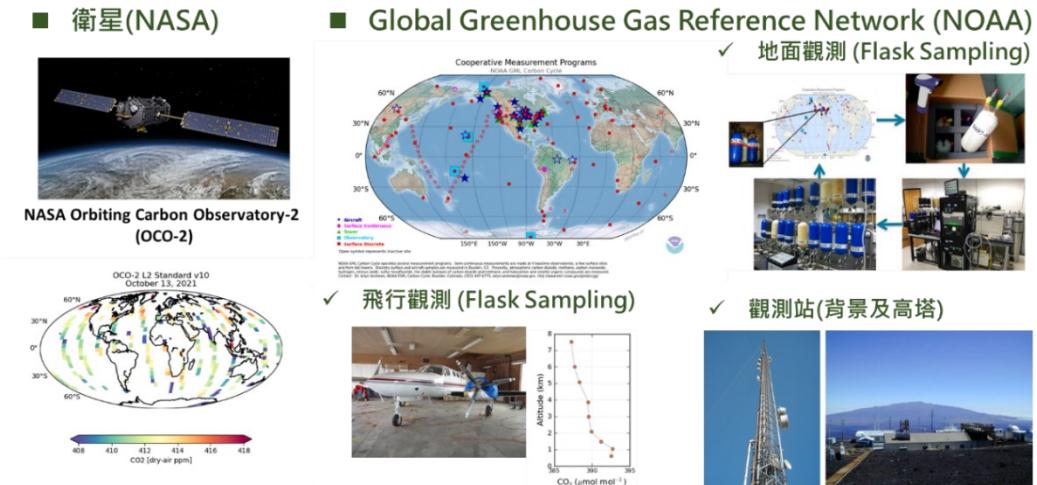


圖 4-36 美國 NASA 的 OCO-2 衛星和 NOAA 的全球溫室氣體監測網架構摘要

2. NOAA 發展之溫室氣體排放量分析模式 Carbon Tracker

為了掌握地表溫室氣體的排放，NOAA 也針對分析方法進行了工具開發。由於溫室氣體的排放極為多元且機制非常複雜，以全球的尺度而言，詳細掌握每個單元的排放量存在實務上的限制，因此，NOAA 的策略是採用“Top-Down”的方法，藉由大氣動力模式綜整全球陸域系統排放量、海氣交換、火災及森林變遷、化石燃料使用等全球資料庫或是國家清冊進行初始模擬，再採觀測資料進行最佳化調校，最終產出全球的溫室氣體排放地圖，這個溫室氣體排放的模擬模式名為 Carbon Tracker，圖 4-37 顯示 Carbon Tracker 架構中的主要內容，其中無論是海氣交換過程或是陸域生態系和土壤的氣體交換通量都是以另行發展的機制模式為基礎，由美國能源部支持的溫室氣體通量網(AmeriFlux)研究提供了許多生態系的溫室氣體通量資料，相關通量資料可用於發展陸域生態系的碳循環研究，進而形成機制模式，間接貢獻到 Carbon Tracker 的碳收之計算中，詳細資訊可參考相關網頁 (<https://gml.noaa.gov/ccgg/carbontracker/>)。

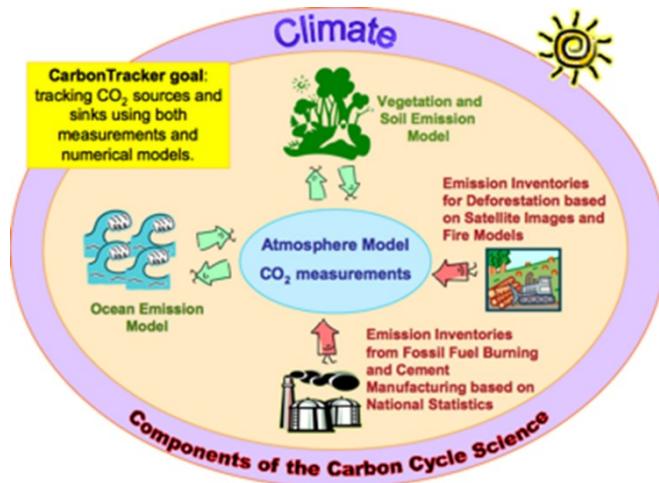


圖 4-37 NOAA 的 Carbon Tracker 模式中主要的機制模組。

Carbon Tracker 目前可提供全球 1° 乘 1° 的 CO₂ 排放資料，例如：圖 4-38 為 2020 年陸域生態系的 1° 乘 1° CO₂ 通量，但是因觀測資料仍然十分有限，相關的量化資料仍然有相當大的不確定性。經由 Carbon Tracker 的計算，可以估計全球、美國(如圖 4-39)或是其他國家的 CO₂ 排放量。

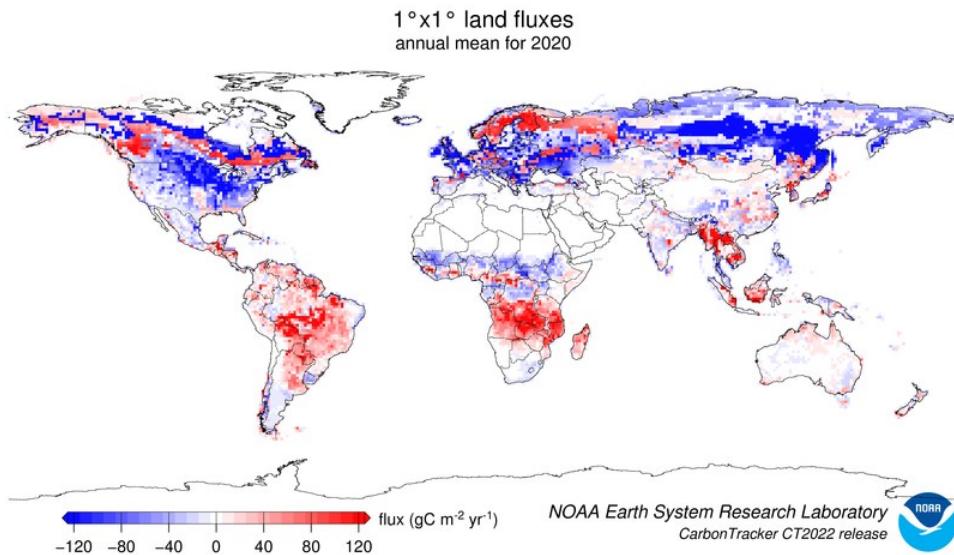


圖 4-38 Carbon Tracker 推估全球陸域生態系 2020 年 1° 乘 1° 之 CO₂ 通量

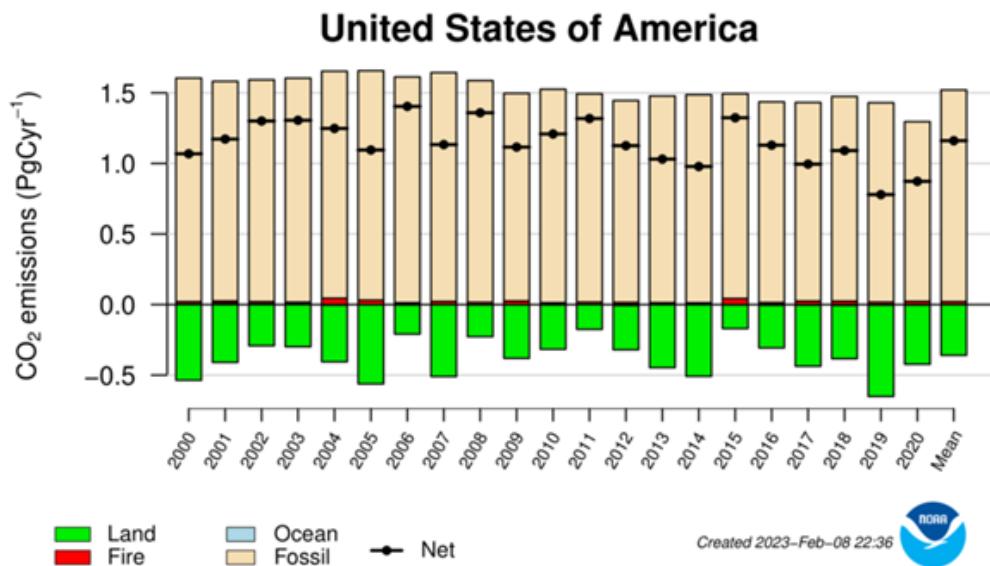


圖 4-39 Carbon Tracker 推估 2000-2020 年美國全國的化石 CO₂ 排放量以及主要生態系 CO₂ 通量

4.1.3 彙整國內外農業場域碳驗證標準方法

(一) 我國碳驗證標準發展現況

目前國內並無農業系統碳驗證減量方法學，截至 2024 年 10 月 7 日之前根據環境部事業溫室氣體排放量資訊平台以及溫室氣體自願減量暨抵換資訊平臺所提供的溫室氣體減量方法學查詢，目前僅針對森林碳匯造林與林業類別以及半導體和工業等提供減量方法學之依循。森林碳匯造林方法學主要是參考聯合國清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)以「濕地以外施行的小規模造林及再造林減量方法」為基礎(Simplified baseline and monitoring methodology for small-scale CDM afforestation and reforestation project activities implemented on lands other than wetlands) (AR-AMS0007)。然而，在實際操作適用條件與國內有所差異，因此國內在該方法學制度建立上以本土化為方向，建立一套符合國內適用的「造林與植林碳匯專案活動」(No. AR-TMS0001)，本章節僅針對部分內容彙整如下(陳文輝, 2012)：

1. 適用條件

森林碳匯專案活動範疇為造林碳匯專案，其主要透過栽植林木及撫育以增加碳儲存量的碳匯專案，適用條件如下：

- (1) 本減量方法適用濕地以外的造林專案活動(含政府獎勵造林的相關政策)。根據 CDM 定義，濕地類別包括潮間帶濕地及水庫邊緣的季節性氾濫區域。
- (2) 適用於 2000 年 1 月 1 日以後開始造林的專案活動。
- (3) 平地造林土壤擾動面積不能超過 40%，而山坡地造林不能超過 33%。
- (4) 專案活動不會造成專案開始前農業活動(如作物種植及放牧等)的轉移。
- (5) 參照 CDM 對造林專案小規模減量方法學的規範，專案活動之植林毗連面積應大於 0.5 公頃(ha)，且年平均減量/移除量應小於 16,000 公噸二氧化碳當量(tCO₂-e)。

2. 專案邊界及土地合格性

專案邊界為專案申請者(project participants, PPs)所管理的造林專案活動之地理範圍，可包含多筆分散的土地，每筆分散的土地皆應證明具土地合格性。土地合格性方面，專案申請者應提供資料證實於專案活動起始前，土地應為非森林地，可透過下列其中一種方式提供證明文件：

- a. 表示過去土地利用狀況的航空照片圖或衛星影像圖。
- b. 藉由地圖或數位空間資訊提供土地利用情況。
- c. 地面基本調查資料，如土地清冊及所有權人登記等。

森林碳匯專案活動碳庫(carbon pool)計算包括地上部、地下部生物量(biomass)，而枯死木、枯枝落葉及土壤有機碳的碳庫選擇不計入，可參考下表 4-4 所示。

表 4-5 碳庫計算項目

碳庫	是否計入	說明/解說
地上部生物量	是	為專案的主要碳庫
地下部生物量	是	為專案的主要碳庫
枯死木、枯枝落葉及土壤有機碳	否	施行專案可能造成這些碳存量增加，但可能不為主要碳存量來源，且考量計算成本，故保守忽略不計。

(二) 國際碳驗證相關機構及方法

有礙於目前國內尚未建立農業相關減碳驗證方法，初步彙整國際針對農業系統減碳方法，包含清潔發展機制方法(CDM Methodology)、美國 Indigo 農業技術公司(Indigo Agriculture)、Verra 碳驗證標準(Verified Carbon Standard Program, VCS)、黃金標準(Gold Standard, GS)、美國碳註冊標準(American Carbon Registry Standard, ACR) 及氣候行動標準(Climate Action Reserve, CAR) 等農業碳驗證。應儘速掌握國際方法學，以利大幅提升農業溫室氣體減量驗證方法之依循。本章節已初步彙整有關農業系統國際減碳驗證程序及方法供參考。

1. 清潔發展機制方法學(CDM Methodology)

「清潔發展機制(Clean Development Mechanism, CDM)」為京都議定書中三種溫室氣體排放減量彈性機制之一，以協助各國能以經濟、有效及更具執行彈性的方式，遵循其溫室氣體減量承諾。各國執行 CDM 專案時，均需依聯合國清潔發展機制執行委員會(Clean Development Mechanism Executive Board, CDM EB)所制定之基線與監測方法學，作為登錄專案與驗證之指引(詹煜銘, 2008)。CDM 於 2014 已提出透過「調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量」之依循，本章節將其使用規模、適用性等相關資訊彙整如下(CDM, 2014):

(1) 規模(Scope)

參考 CDM 於農業溫室氣體減量方法學，2014 年提出「透過調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量」，下表 4-5 為此減量方法技術/措施關鍵要素說明：

表 4-6 「調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量」方法的關鍵要素

項目	說明
典型田間操作碳減量方法	1. 稻田在耕作期間將水管理從連續的淹田改為間歇性和/或縮短的淹田條件。 2. 乾濕交替法及水稻好氧栽培方法。 3. 水稻種植從水稻移植改為水稻直接播種(Direct Seeded Rice, DSR)方式。
溫室氣體減量行動	避免溫室氣體(GHG)排放：減少水稻種植土壤中有機物的厭氧分解。

(2) 適用性：

- a. 水稻種植專案的主要特徵是在生長季節中以灌溉和淹田的方式進行，意味著農民可以通過引水或灌溉設施控制水源，以確保水田得到足夠的水分，促進水稻的正常生長和發育。如果農場主要依賴自然降雨如雨季稻田(rainfed rice ecosystem)、陸稻生態系統(upland rice ecosystem) 或者是深水稻生態體系(deep water rice ecosystem)，由於無法有效控制水源，這類農場在水稻種植方法中可能無法參與或無法符合資格。此方法所需的資訊還應包括水稻種植季節之前

的水田管理情況的調查，也需要提供所使用的有機改良措施等資訊，包括施用的有機肥料或其他有機土壤改良劑等。

- b. 水稻種植專案需配置有受控制的灌溉和排水設施，在旱季和雨季都可以在田地上建立適當的乾燥/積水條件。意味著農民可以根據需要調整水位，無論是在旱季還是雨季。
- c. 水稻田種植專案不會導致水稻產量的降低，也不會要求農場變換不同種植的品種。
- d. 培訓和技術支援是本方法內容的一部分，主要在種植季節提供相關知識經驗分享，包括田間操作、灌溉、排水和肥料使用。這些培訓和技術支援是可透過紙本紀錄、現場訪問文件等來驗證。計畫發起方能夠確保農民通過自己豐富經驗的協助來確定作物對氮肥的需求，其他採用的方法可使用水稻葉色板(Leaf Color Chart)、光敏感測器等進行水稻肥料需求評估。
- e. 水稻田種植專案應確保導入的耕作方式不受當地法規限制，包括特定的田間操作、技術和耕作期間作物產品的使用。
- f. 除非在甲烷(CH_4)排放減量計算選擇使用 IPCC 第 6.1.2 節 tier 1 方法預設值進行計算外，計畫發起方可以使用密閉室方法(Closed chamber)和實驗室分析來測量參考田地的 CH_4 排放，並且需具備相應的基礎設備。
- g. 水稻田種植專案年度減排總量應小於或等於 60 千噸二氧化碳當量。

(3) 計畫水稻田可以根據其耕作模式進行分組，並通過水稻田特徵來描述(表 4-8)，。

具有相同耕作模式的稻田可歸納為同一組。

(4) 定義及標準參考文獻說明(表 4-7)

計畫參與者應參考「General guidelines for SSC CDM methodologies, “Guidelines on the demonstration of additionality of small-scale project activities”」、「General guidance on leakage in biomass project activities (附錄 B 的附件 C)」。

表 4-7 CDM methodologies 名詞定義

名詞定義	說明
水稻移植 (Transplanted rice)	一種水稻種植系統，種子在苗床中培育約 20 至 30 天。然後將幼苗直接移植到淹沒的稻田中。
水稻直播(Direct seeded rice)	一種水稻栽培系統，其中預先發芽或乾燥的種子在乾土壤或濕土壤條件下直接在田間播種或播種；不涉及移植過程。
聯合國跨政府氣候變遷報告方法 (IPCC approach)	IPCC 適用的有關水稻種植甲烷排放指南的最新版本。此方法核准時適用的版本是「2006 年 IPCC 國家溫室氣體清冊指南」第 5.5 章第 4 節。
專案栽種操作 (Project cultivation practice)	CDM 專案計畫中，採用的一套田間操作方式。這主要包括調整灌溉方式。還可能包括整地、施肥以及雜草和害蟲防治。
水文狀況(Water regime)	水稻生態系統水文類型（例如灌溉、雨水和深水）和洪水模式（例如持續洪水、間歇性洪水）。
旱田(Upland)	田地在相當長的一段時間內不曾淹田。
灌溉(Irrigated)	田地被淹沒很長一段時間，並且水情可以控制。
雨養和深水(Rainfed and deep water)	田地處於相當長的一段時間內被水淹沒，並且水情僅取決於降雨。

表 4-8 耕作模式參數定義

Nr.	Parameter	Type ^a	Values/categories	Source/method ^b
1	水分管理 (生長季期間) ^c	動態參數	<ul style="list-style-type: none"> 連續性淹田 單一排水渠道 分布式排水渠道 	基線資訊:農民資料 專案水稻田:監測資料
2	水分管理 (生長季前)	動態參數	<ul style="list-style-type: none"> 淹田 短時排水週期(<180 days) 長時排水週期(>180 days) 	基線資訊:農民資料 專案水稻田:監測資料
3	有機改良施用	動態參數	<ol style="list-style-type: none"> 當季稻稈^c 綠肥 非當季稻稈^c 有機肥料 堆肥 無土壤有機改良 	基線資訊:農民資料 專案水稻田:監測資料
4	土壤 pH	靜態參數	<ul style="list-style-type: none"> < 4.5 4.5-5.5 > 5.5 	參考國際土壤資訊中心開發的全球土壤資料庫(ISRIC-WISE) ^e
5	土壤有機炭	靜態參數	<ul style="list-style-type: none"> < 1% 1-3% > 3% 	參考國際土壤資訊中心開發的全球土壤資料庫(ISRIC-WISE) ^e
6	氣候帶 ^d	靜態參數	[AEZ] ^f	水稻年鑑 (Rice Almanac) &Harvest Choice

- a. 動態參數(dynamic)與田間操作有關，可隨時間操作變化（無論是由操作引起或是由其他原因引起），應在專案區水稻田進行監測(e.g.田間操作紀錄)。靜態參數(static)是指土壤的相關參數，基本上在時間變化上並不會（顯著地）變化，因此原則上只需在計畫區水稻田中確定一次參數即可。
- b. 確定每個適用參數的資料採集來源/方法。
- c. 雨季稻田(rainfed rice ecosystem)、陸稻生態系統(upland rice ecosystem) 或者是深水稻生態體系(deep water rice ecosystem)及乾旱區(drought prone)，這些是經常被使用於區分在季節中的水文情況(請參考 IPCC 指南)，是不會在此處提及，因為這些類別都被排除在此方法學外。
- d. 水稻生長季節開始之前或期間施用稻稈作為土壤改良劑(稻草留在表面或混入土壤)。
- e. 氣候區域的定義使用可參考《水稻年鑑》(第三版，2002 年) 或 HarvestChoice 提供的農業生態區劃。
- f. 參考《水稻年鑑》(第三版，2002 年) 或 Harvest Choice 資訊。

(5) 基線方法(Baseline methodology)

- 專案邊界(Project boundary)

地理位置的邊界包含其中耕作方法和水體管理所變化之範圍，即包括所有在專案活動的情況下改變耕作模式的稻田。

- 基線(Baseline)

基線情境是指在延續當前的農耕操作模式，如計畫田水稻採移植或連續淹田耕作方式。

- 基線排放(Baseline emissions)

基線排放量應按生長季計算，公式如下：

$$BE_y = \sum_s BE_s$$

$$BE_s = \sum_{g=1}^G EF_{BL,s,g} \times A_{s,g} \times 10^{-3} \times GWP_{CH_4}$$

BE_y = 年基準排放量 y (tCO₂e)

BE_s = 季基準排放量 s (tCO₂e)

$EF_{BL,s,g}$ = 某季(s)及某群(g)基線排放係數(kgCH₄ / ha per season)

$A_{s,g}$ = 某群(g)專案田及某季(s)的面積(ha)

GWP_{CH_4} = 甲烷全球暖化潛勢 (t CO₂e/t CH₄)

g = 同一群包含相同耕作模式的稻田

- 定義基線排放係數(Baseline emissions factor)

有關基線排放係數訂定應至少應具有三個相同模式的參考田(reference field)。這些田應使用密閉室方法進行測量，每次測量以作物生長季每公頃的單位來表示排放係數(kg CH₄/ha)，應採每組以三重複平均值作為基線排放係數。此外在計畫區域內，具有相同耕作模式的田地(如表 2 所定義)可以歸納為同一組。

- 漏漏(Leakage)

專案活動對邊界外任何影響所造成溫室氣體排放均被視為可忽略不計，本方法不予以考慮。

- 計畫排放(Project emission)

指計畫耕作模式改變甲烷(CH₄)的排放(根據適用性(d)段的適用性標準，氮肥控制)，N₂O 排放在稻田耕作期不會顯著偏離基線排放，因此不予以考慮。

CH₄排放按季計算，公式如下：

$$PE_y = \sum_s PE_s$$

$$PE_s = \sum_{g=1}^G EF_{P,s,g} \times A_{s,g} \times 10^{-3} \times GWP_{CH_4}$$

PE_y= 年計畫排放量 y (tCO₂e)

PE_s= 季計畫排放量 s (tCO₂e)

EF_{P,s,g}= 某季(s)及某群(g)計畫排放係數(kgCH₄ / ha per season)

A_{s,g}=某群(g)計畫田及某季(s)的面積(ha)

GWP_{CH₄}= 甲烷全球暖化潛勢 (t CO₂e/t CH₄)

g = 指相同耕作模式同一群的稻田

- 定義計畫排放係數(Project emission factor)

應使用至少三個符合與基線參考區域相同條件的計畫參考田，依測量結果來確定生長期間排放係數 EF_{P,s,g}。計畫參考田地應設在靠近基線參考區域的地方，並以相同生長季開始栽種。EF_{P,s,g}是取三個參考田測量結果的平均值。

- 排放減量計算(Emission reduction)

排放減量計算以基線排放量扣除計畫排放量之差

$$ER_s = BE_s - PE_s$$

ER_s=季減排量(tCO₂e)

- 使用 IPCC tier1 方法或預設值(default value)進行減排量計算。

計畫參與方可以使用以下兩種簡化方法擇一來計算減排量（即 Option 1 或 Option 2）。

Option 1：使用 IPCC tier 1 方法，根據以下公式進行測量以確定連續淹田的基線排放係數：

$$ER_y = EF_{ER} \times A_y \times L_y \times 10^{-3} \times GWP_{CH_4}$$

$$EF_{ER} = EF_{BL} - EF_P$$

$$EF_{BL} = EF_{BL,c} \times SF_{BL,w} \times SF_{BL,p} \times SF_{BL,o}$$

$$EF_P = EF_{BL,c} \times SF_{P,w} \times SF_{P,p} \times SF_{P,o}$$

ER_y = 年計畫排放減量 y (tCO₂e)

EF_{ER} = 調整後的每天排放係數 (kgCH₄/ha/天)。或者可以做為生長季排放係數 (kgCH₄/ha/season)

A_y = 計畫田在某年 y 的面積(ha)

L_y = 計畫田在此年度耕作天(days/year)。如已確定生長季排放係數，此項則不適用。

GWP CH₄ = 甲烷全球暖化潛勢 (t CO₂e/t CH₄)

EF_{BL} = 基線排放係數(kgCH₄ / ha / day)or (kgCH₄ / ha / season)

EF_P = 計畫排放係數(kgCH₄ / ha / day)or (kgCH₄ / ha / season)

$EF_{BL,c}$ = 連續灌溉(continuously flooded)且不施加有機改良劑的基線排放係數 (kgCH₄ / ha / day)or (kgCH₄ / ha / season)。此排放係數 ($EF_{BL,c}$) 應在計畫開始前預先確定，或者每年監測一次。監測方式採密閉式方式量測，並取三個參考田測量結果的平均值。

$SF_{BL,w}$ or $SF_{P,w}$ = 基線排放或計畫排放的調整因子，用於考慮在種植期間水文(water regime)差異。

$SF_{BL,p}$ or $SF_{P,p}$ = 基線排放或計畫排放的調整因子，用於考慮在栽培期前水文(water regime)差異。

$SF_{BL,o}$ or $SF_{P,o}$ = 基線排放或計畫排放的調整因子，用於考量有機改良劑的不同類型和數量施用後差異。

◆ 此方法學中” season” 指的是整個生長期（從土壤前期準備到收割或種植季節後的排水過程）。如果選擇了季節性排放因子，應基於整個淹水期的測量，並考慮在排水時造成土壤封存甲烷的通量。

IPCC 預設基線排放($SF_{BL,w}$)或計畫排放($SF_{P,w}$)的調整因子如下表 4-8 所示：

表 4-9 IPCC 栽培期間水文情況調整因子

栽培期間水文情況 SF _{BL, w} or SF _{P, w}		調整因子
灌溉	持續性淹田	1
	間歇性淹田(single aeration) ^b	0.60
	間歇性淹田(multiple aeration) ^c	0.52

資料來源: IPCC 2006, volume 4, chapter 5.5, Table 5.12; 持續性淹田:田地在整個水稻生長季節都有淹田，只有在收割時才會乾涸（生長季末排水）；間歇性淹田:農田在耕作季期間至少有一次超過三天的通氣期(曬田); a:單次通氣(single aeration)：耕作季期間任何生長階段進行單次通氣(曬田)，除生長季末排水外; b: 多次通氣(multiple aeration):耕作季節有多次通氣期(曬田)，季末排水除外。

表 4-10 IPCC 栽培期前水文調整因子

栽培期前的水文情況 SF _{BL, p} or SF _{P, p}	調整因子
生長季前期（非淹田）< 180 天的情況 (輪作耕作模式)	1
生長季前期（非淹田）> 180 天的情況 (單一作物模式)	0.68

資料來源: IPCC 2006, volume 4, chapter 5.5, Table 5.12

IPCC 預設基線排放(SF_{BL, o})或計畫排放(SF_{P, o})調整因子，用於考量有機改良劑的不同類型和數量施用後差異，其計算公式如下所示:

$$SF_o = (1 + \sum_i ROA_i \times CFOA_i)^{0.59}$$

ROAi:指有機改良物類型 i 的施用率，對於稻草是以乾重計(dry weight)，對於其他物質是以新鮮重計(fresh weight)，單位為(ton ha⁻¹)。以 5 噸/公頃假設為基線的量，因為在收割後剩餘的稻草數量在 3-7 噸/公頃的範圍內，3 噸/公頃假設以人工收割，幾乎沒有殘根/渣在土壤表面，7 噸/公頃假設為機械收割，田間會留下大量作物殘根/渣。

CFOAi: 有機改良劑類型 i 的換算係數 (相對於施用的稻稈的效果)。0.29 用於單一作物(single crop)，1.0 用於輪作(double crop)。對於單一作物(single crop)而言，廢稻稈通常在收割後回填於土壤，並長時間保留在田地中 (即在耕作前廢稻稈被埋入土壤的時間超過 30 天)，這樣的稻稈已經在乾燥的田地中礦化。因此，廢稻

稈可輕易發酵的機會較少，導致土壤淹田時產生的甲烷較少，因此採用 0.29 為換算值。

表 4-11 IPCC 預設栽培期前用於考量有機改良劑調整因子

栽培期前的水文情況 SF _{BL,o} or SF _{P,o}	調整因子	計算方式
生長季前期（非淹田）< 180 天的情況 (輪作耕作模式)	2.88	SF _{BL,o} or SF _{P,o} = (1 + 5 × 1) ^{0.59}
生長季前期（非淹田）> 180 天的情況 (單一作物模式)	1.70	SF _{BL,o} or SF _{P,o} = (1 + 5 × 0.29) ^{0.59}

資料來源: IPCC 2006, volume 4, chapter 5.5, Table 5.12

以上表格僅涉及稻稈，其他有機改良物，按照 IPCC 2006 年表 5.14 的資料彙整如下：

- (a) 針對堆肥情況，SF_{BL,o} or SF_{P,o} = (1 + C × 0.05)^{0.59}
- (b) 針農業肥料情況，SF_{BL,o} or SF_{P,o} = (1 + YM × 0.14)^{0.59}
- (c) 針綠肥情況，SF_{BL,o} or SF_{P,o} = (1 + GM × 0.5)^{0.59}
- (d) C、YM、GM 分別為堆肥、農業肥料、綠肥的施用量(噸/公頃)。

根據上述說明有關基線和計畫排放係數 (EF_{BL} 和 EF_P) 已彙整於下表 4-9 中 (單位：kgCH₄/公頃/天)。

表 4-12 基線和計畫排放係數於不同情境之調整因子

	EF _{BL} . ^c	Baseline				Project Scenarios	Project				EF _{ER}
		SF _{BL,w}	SF _{BL,p}	SF _{BL,o}	EF _{BL}		SF _{P,w}	SF _{P,p}	SF _{P,o}	EF _P	
對於實行輪作的模式地區或國家	EF _{BL} .c	1.0	1.0	2.88	EF _{BL,c} × 2.88	Scenario 1	0.6	1.0	2.88	EF _{BL,c} × 1.73	EF _{BL,c} × 1.15
						Scenario 2	0.52	1.0	2.88	EF _{BL,c} × 1.50	EF _{BL,c} × 1.38
對於實行單一作物模式的地區或國家	EF _{BL} .c	1.0	0.68	1.70	EF _{BL,c} × 1.16	Scenario 1	0.6	0.68	1.70	EF _{BL,c} × 0.68	EF _{BL,c} × 0.46
						Scenario 2	0.52	0.68	1.70	EF _{BL,c} × 0.60	EF _{BL,c} × 0.55

Scenario 1:水文從連續淹田條件改為間歇淹田條件（單次通氣）；Scenario 2：將水文從連續淹田條件改為間歇淹田條件（多次通氣）。

Option 2：使用從 IPCC tier 1 方法中，全球通用預設(default value)係數，減排量應按照公式 (6)，依照下面不同減量操作情境排放係數 EF (kgCH₄/ha/day) 的預設值進行計算。

(a) 對於實行輪作的地區或國家：

- 對於轉為間歇性淹田操作（單次通氣）的計畫，EF 使用 1.50 (kgCH₄/ha/day)。
- 對於轉為間歇性淹田操作（多次通氣）的計畫，EF 使用 1.80 (kgCH₄/ha/day)

(b) 對於實行單一作物的地區或國家：

- 對於轉為間歇性淹田操作（單次通氣）的計畫，EF 使用 0.60 (kgCH₄/ha/day)。
- 對於轉為間歇性淹田操作（多次通氣）的計畫，EF 使用 0.72 (kgCH₄/ha/day)。

- 監測(Monitoring)

專案參與者應符合 SSC 清潔發展機制(CDM)方法學的綜合指南中規定的適用要求（例如校準要求及取樣要求），如下表 4-13 所示。

表 4-13 清潔發展機制(CDM)方法學的數據與參數

編號	數據/ 參數	說明	單位	監測/紀錄頻率	量測方法 及程序
1	EF _{BL,s,g}	基準線排放係數	kg CH ₄ / 公頃、 每季	生長季因素，按照密閉式法(chamber)指南進行定期的測量	按照在附錄中的指引(用於測量稻田甲烷排放之指南)以及 IPCC 指南(章節 5.5.5)。
2	EF _{P,s,g}	計畫排放係數	kg CH ₄ / 公頃、 每季	生長季因素，按照密閉式法(chamber)指南進行定期的測量	按照在附錄中的指引(用於測量稻田甲烷排放之指南)以及 IPCC 指南(章節 5.5.5)。
3	A _{s,g}	專案計畫中，累計專案區域於特定季節內專案涉及的所有單獨區域或田地的總和	公頃	生長季	通過收集專案田地大小的資料來確定。專案田地的大小將通過使用 GPS(全球定位系統)或衛星資料來確定。如果沒有這些技術，則應使用已建立的田地大小測量方法。

(6) 追蹤農民是否遵守計畫之操作

為了確定該專案稻田是否確實根據專案活動定義之耕作流程進行，並可保證在參考稻田上的測量方式足以代表專案稻田之排放，對於所有的專案稻田都必須維持耕作的紀錄簿。有了此紀錄簿之協助，所有的參數都成為了專案操作之一部分，下列幾項資料必須由農民進行田間紀錄：

- 播種日期
- 肥料及農作物保護應用(日期及數量)
- 在此稻田上之水文情況(例如乾燥/濕潤/浸泡)
- 產量

- e. 農民應說明他們是否遵循調整後的水管理措施中提供的施肥建議。
- f. 專案發起者應保證其他稻田都是依循此專案計畫範圍內，對於甲烷排放是以保守的方式進行耕作。如果農民的作法偏離了專案耕作計畫，則他們的稻田就無法再被視為是參考的稻田，那些稻田不能被列入計算該季聚集專案面積 As, g。此要求將可保證那些被列入計算排放減量的農田，是真正符合專案耕作計畫的稻田。
- g. 須遵循 2021 年最新 CDM 標準【小型規模專案活動的採樣及調查之綜合指南】，報告及驗證應來自農民之耕作紀錄簿 (CDM, 2021)。
- h. 專案發起者應該設置一個資料庫，此資料庫保留相關數據及資訊，可以讓參加專案的稻田有清楚的識別，包括稻米栽種者之姓名及地址，稻田之面積大小，及額外農田特殊資訊。

(7) 稻田甲烷排放量測指南

- 稻田中實施甲烷排放測量，需要有此領域的專家參與，或者至少要經由專家培訓過有經驗的工作人員(也就是來自研究機構的工作人員)(表 4-13)。
- 專案發起人應在生長季開始之前準備一份詳細甲烷測量計畫。該計畫應包括田間和實驗室測量的時間表、將氣體樣品送到實驗室所需的流程以及作物年曆表。計畫還應包括有關耕作農田的所有資訊，包括位置和氣候、土壤、水管理、植物特性、肥料處理和有機改良的具體資訊。
- 下列指南是根據稻田測量到排放因子計算的步驟所建構。專案發起人應該確認在專案和參考稻田之測量，都是以相同的方式進行。

表 4-14 對於箱體設計之技術選項

項目	條件	
	Option 1	Option 2
箱體材質	<ul style="list-style-type: none"> ● 不透明箱體 ● 市面上可取得的聚氯乙 烯容器(PVC)或是其他生 產製造的箱體。 ● 噴塗白色或是以反射性 物質包覆(以避免內部溫 度增加)。 ● 適合用於短時間採樣(一 般為 30 分鐘)。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 透明 ● 利用壓克力製造的箱體 ● 透明箱體的優點：可能被放 置在稻田中跨越較長的時 間。可配備一個蓋子並且在 測量的間隔期間都保持打開 的狀態，只有在測量的時候 關閉。
放置於土 壤中	<ul style="list-style-type: none"> ● 固定底座(static chamber) ● 底座採用不腐蝕材料製 成，可在田中維持整個生 長季 ● 底座應能使腔室緊密密 封 ● 底座浸沒部分應有孔，以 便內部和外部進行水交 換 ● 應在第一次採樣前至少 24 小時安裝底座 	<ul style="list-style-type: none"> ● 無固定底作 (dynamic chamber) ● 腔室必須放置在土壤上，帶 有開關的蓋子，以允許最終 的氣體釋放
其他輔助 監測&工具	用於測量腔室內溫度的溫度計；室內的風扇（電池供電）用於在採樣過程中混合內部空氣；採樣口(腔室孔橡膠塞)	
基底面積	矩形或圓形，但必須至少覆蓋約 0.1 m^2	
高度	固定高度或總高度（突出底 座+腔室）應超過植物高度	不同高度或模組化設計的腔室， 可依植物高度進行調整

表 4-15 現地氣體採樣

項目	條件
每個觀測田重覆監測數量	最低要求：每個觀測田須置至少三個腔室進行取樣
氣體採樣次數	最低要求：每次氣體取樣須進行 3 重覆
現地腔室取樣停留時間	30 分鐘
量測時段	日間
量測頻率	一周一次
氣密針	測量前進行適用性測試，最好配備防漏閥，以便於操作
採樣後保存時間	儲存<24 小時：空氣樣本可以保留在注射器中 儲存> 24 小時：將空氣樣本轉移至真空瓶中(evacuated vial)，在相對高壓下保存。

表 4-16 實驗室氣體分析

項目	條件
方法	具有火焰離子化偵測器 (FID) 的氣相層析儀
注射方式	直接進樣或使用多通閥進樣
管柱	填充柱（例如分子篩）或毛細管柱
校正	每天分析前後使用經認證的標準氣體進行校正

2. 黃金標準(Gold standard, GS)

黃金標準（Gold Standard, GS）由世界自然基金會和其他國際非政府組織於2003年創立，旨在確保環境減少碳排放的計畫具有最高水準且完整性，並為永續發展做出貢獻。隨著「巴黎氣候協定」和永續發展目標的通過，推出了氣候和永續發展措施的最佳實踐標準，即「全球目標黃金標準(Gold Standard for the Global Goals)」，以最大限度地發揮影響力，為世界各地的人們和我們共同的地球創造價值。本章節將其使用方法範圍、架構、適用性等相關資訊彙整如下(Gold Standard, 2020)。

(1) 方法及架構

透過農業操作改善，可以實現減少溫室氣體排放和增加土壤有機碳，間接提升土壤碳封存之效益。因此，GS 提出了改善農業操作對溫室氣體（GHGs）排放和增加土壤有機碳（SOC）儲存量之方式(圖 4-40)。本方法學提供了 3 種方式來作為 SOC 基線(baseline)和專案計畫量化方式：

- a. 進行現場測量，直接記錄 SOC 基線和專案計畫土壤有機碳(SOC)儲量。
- b. 參考同儕審查之國際期刊資料或相關場域調查報告。
- c. 參考 IPCC 國家溫室氣體排放清冊指南，盡可能採用 tier 2 方法預設值。

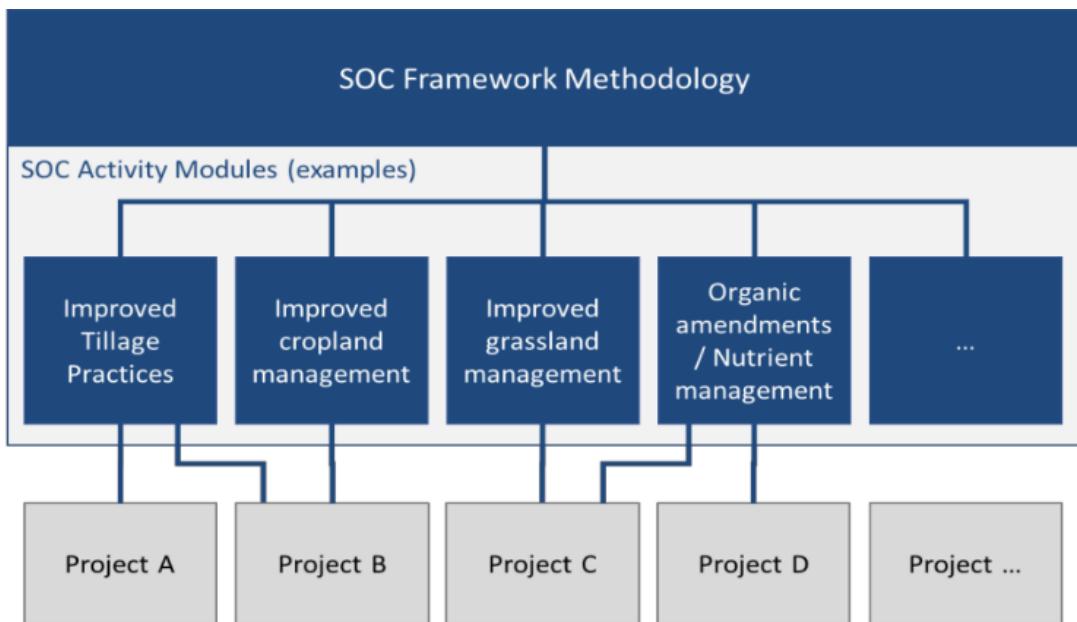


圖 4-40 土壤有機碳(SOC)基本方法學框架

SOC 量化基本方法框架主要是為了能確保各執行專案的品質和效益量化達全球目標黃金標準設定的高水準期望。此土壤有機碳 SOC 量化框架將訂定：

- 適用於所有農業耕作的指引
- 確保不同農業操作專案品質和一致性，例如量化方法。
- 通過訂定共同的基礎和方法，以及總體要求促進農業操作模式的開發。
- 須訂定規範，以防止在專案計畫中應用多個農業操作模式時效益重疊。

農業操作模式是根據框架方法提供的指引所設計。提供了適用於各農業操作模式要求和計算方法，透過上述農業操作及指引參考，可提升土壤有機碳 SOC 的封存量。有關農業操作模式陳述如下：

- 訂定具體農業操作模式適用條件、要求和計算方法的選擇。
- 提出具體農業操作模式的測量和監測要求。
- 此操作模式可能具有全球適用性，也可能僅適用於特定農業操作模式（例如土壤、氣候區域及資料可用性）。

- 可提供具體活動的資料來源和/或應用的模型（例如全球或區域適用的參數）

(2) 定義及參考文獻

- a. 以下資料包含定義及相關文獻參考內容說明
- 全球目標黃金標準詞彙說明(<https://globalgoals.goldstandard.org/faqs-glossary/>)
- 土地利用及森林碳認證要求(LUF Activity Requirements)
(<https://globalgoals.goldstandard.org/203-ar-luf-activity-requirements/>)
- b. 有關土壤有機碳方法框架以及有關的操作模式，相關名詞定義如下表所示

表 4-17 土壤有機碳方法框架名詞定義

項目	說明
基線	基線情境下的土壤碳儲量估算
基線情境	在沒有任何農業操作模式的情況
碳存量計算	碳儲量之間變化的計算，如碳信用認證區間
碳信用計入期間	可以計入 SDGs 並受到監測的時間跨度
作物	被有意栽培和/或收穫以滿足人類和牲畜需求的植物或菌類植物
農作殘餘物	在農田或果園中，收割後遺留下來的物質。這些殘留物包括莖和稈（莖）及葉子等。農作加工殘留物，指在農作物被加工成可用資源後遺留下來的物質。這些殘留物可能包括外殼、種子、蔗渣和根等。
農作系統	農地上種植的作物、作物耕作順序、耕作時間以及使用的管理技術
農地	主要為可耕地土壤規範作為農地使用
草地	植被主要由禾本科（Poaceae）草類主導；然而，還可以找到莎草科（Cyperaceae）和燈心草科（Juncaceae）的植物家族。
土地利用改變	從一個土地利用類別轉變為另一個土地利用類別
家畜	所有家畜。除非在農業用地上被飼養或圈養，否則不包括在內。
模擬單元(Modelling Unit, MU)	不同區域擁有均質特性，可作為永續發展目標（SDG）量化之影響
監測區間(Monitoring period)	用於計算溫室氣體減排，例如減碳認證之間的時間
計畫情境	計畫施行並執行後所研擬情境
土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC)	碳存在土壤有機質含量
土壤有機質 (Soil Organic Matter)	土壤中的有機質成分，如來自植物和動物的屍體，分解產生的產物以及土壤微生物生物量
耕作 (Tillage)	透過各種類型的機械攪拌（如挖掘、攪拌和翻土）進行土壤整田農業活動。

(3) 適用性(Applicability)

計畫應符合土壤有機碳框架方法論中規定適用的條件以及相對的操作模式。否則將無法適用於有機碳框架方法論。

以下條件適用：

- a. 地理位置適用性：此土壤有機碳驗證框架可適用於各個國家，土壤有機碳(SOC)操作模式可能因地理位置不同而有所限制。
- b. 區域位置適用性：
 - 此計畫應在相同基線的土地上進行。
 - 區域位置不得為溼地。
 - 根據《土地利用及森林碳認證要求》，此專案不適用於森林場域。
- c. 場域的準備
 - 場域於計畫中不允許進行生物質燃燒。
 - 計畫不得因灌溉、排水或其他顯著的人為改變地下水位對地表和淺層(<1m)土壤水文的影響。
- d. 土地利用
 - 農作系統（例如單一作物或輪作）在計畫實施前必須已經進行至少5年。
 - 專案計畫不得導致土地利用變化。
- e. 糧食安全
 - 專案計畫不得導致作物產量減少。專案計畫區域內的應產生至少等同於基線產量（專案計畫開始前的五年平均水準）的產量。如果地區作物生產力發生變化（例如由於氣候因素），專案區域的產量不得顯著減少超過專案區域產量的5%。

(4) 計畫邊界 (Project Boundaries)

a. 空間邊界(Spatial boundary)

空間邊界即包含所有農業操作者可控況下產生的影響。這些農業操作可導致碳排放減少和/或碳在土壤中的封存，從而增加計畫區域的有機碳 (SOC) 含量。在專案期間，任何非空間邊界內區域即不再包含土壤有機碳監測範圍。

如果土壤有機碳(SOC)計畫考慮改變基線和專案情境之間的作物，該模式應提供證據和計算方法，證明此變化不會在中期（例如 5 年中）對 SOC 儲量產生負面影響或具體量化這些變化。

下列情況將直接對土壤有機碳(SOC)直接影響：

- 農業化學品投入，例如化學肥料或其他營養物質投入、殺蟲劑、其他添加劑
- 土壤水文變化，例如灌溉、排水和作物覆蓋季節性變化。
- 與作物有關的投入變化，包括植物殘渣和固氮。
- 作物技術管理的變化（例如用於種植、處理和收割的機械使用）
- 作物管理活動的季節性變化（例如收割、休耕期以及沒有植被覆蓋的季節）

b. 時間邊界(Temporal boundary)

根據土地利用及森林碳認證要求(LUF Activity Requirements)，碳信用的持續時間在方法層面上有具體規定。土壤有機碳(SOC)的碳信用期間應在 5 至 20 年之間。農業操作模式應針對氣候、土壤類型等相關 SOC 影響因子在此範圍內定義適用的 SOC 碳信用區間。

c. 碳庫(Carbon pool)

此框架方法完全著重於土壤有機碳增加的效益。因此，效益計算僅限於土壤有機碳庫部分。

d. 溫室氣體(Greenhouse gases)

土壤有機碳框架所觀測的溫室氣體以二氧化碳(CO_2)為主，對於其他農業操

作模式如施肥的變化等，可能會需要監測額外溫室氣體如甲烷(CH_4)及氧化亞氮(N_2O)。原則上，土壤有機碳框架法學應涵蓋所有溫室氣體源(Source)與匯(Sink)的監測。溫室氣體排放不顯著（占總碳減排和封存的 5%以下）時，可以從監測中省略。

(5) 基線情境(Baseline scenario)

相關的基線情境是在計畫開始日期前 5 年內，持續採用的土地管理做法。為了確定計畫區域基準情境，將根據以下條件，將土壤分層為幾個模式單元 (Modelling units, MU)。

- a. 土壤類型(Soil type)
- b. 氣候帶(Climate zone)
- c. 土地管理/耕作系統(Land management / cropping system)
- d. 土壤肥力輸入(input level) (e.g. 施肥)
- e. 根據適用性，可被定義於土壤有機碳操作模式內：
 - 耕作方式(Tillage practice)
 - 土壤特性 (e.g. 養分或土壤健康狀況)
 - 土壤水文(Hydrology)
 - 碳損失的風險(Risk of carbon loss)(e.g. 燃燒)

本方法學提供了 3 種方式來作為 SOC 基線(baseline)和專案計畫量化方式：

Approach 1: 進行現場量測，直接量測 SOC 基線和專案計畫土壤有機碳(SOC)儲量。

Approach 2: 參考同儕審查之國際期刊資料或相關場域調查報告。

Approach 3: 參考 IPCC 國家溫室氣體排放清冊指南，盡可能採用 tier 2 方法預設值。

(6) 基線情境計算方式

對於所有符合條件的專案區域中，基線土壤有機碳(SOC)存量的計算方式為每個土壤層中的碳儲量總和乘以該層面積，如公式所示：

$$SOC_{BL} = \sum_{y=1}^n (SOC_{BL,y} \times A_y)$$

SOC_{BL} = 符合條件的區域於計畫開始前土壤有機碳總噸數(tC)

$SOC_{BL,y}$ = 符合條件的區域於計畫開始前該層(y)土壤有機碳含量 ($tC\ ha^{-1}$)

A_y = 該層(y)土壤面積(ha)

對於符合專案區域條件中每個土壤層，可使用通用方法(Approach 1~3)擇一來量化基線土壤有機碳(SOC)存量。可以針對不同土壤層採用不同的方法。

Approach 1：進行現場量測，直接量測 SOC 基線和專案計畫土壤有機碳(SOC)儲量。土壤剖面中取足夠數量的樣品進行測量，以滿足每個地層的(Goden Standard, GS)不確定性要求。土壤有機碳(SOC)量測應遵循合規的採樣和分析規範(可參考本方法附件 1)。

Approach 2: $SOC_{BL,y}$ 來自同儕評審國際文獻中發表的數據或模型，必須依照 GS 方法第 16.2 節所述，提供專案地點的適用性及文獻驗證。具體來說必需針對其氣候因素（例如降水量和季節分佈）、土壤和植被類型、現階段和以往農作管理系統（土地使用類別、作物、耕作技術及施肥）的方法適用性。僅當文獻資料來源條件與專案計畫環境相當時，才允許直接應用文獻參考值，並應依照 GS 第 16 節所述提供相應驗證。如果文獻來源中給出了一系列參數值或在不同環境因子水平上數據整合（例如，一個區域、一系列土壤類型的平均 SOC），則應採用最保守的估計值。或者，可以透過文獻中的 SOC 值與相應土壤層內一組採樣點的測量值進行比較與驗證。

Approach 3: 如果 $SOC_{BL,y}$ 沒有可用數據，可以使用下列公式進行模擬。此計算方
式參考來自 IPCC 2019:

$$SOC_{BL,y} = SOC_{REF,y} \times (1 + (F_{LU,y} \times F_{MG,BL,y} \times F_{I,BL,y} - 1) \times \frac{T_{BL}}{D_{BL}})$$

$SOC_{BL,y}$ = 符合條件的區域於計畫開始前該土壤層有機碳含量 ($tC\ ha^{-1}$)。

$SOC_{REF,y}$ = 參考土壤層(y)植被下土壤有機碳存量($tC\ ha^{-1}$)。

$F_{LU,y}$ = 土壤層(y)土地使用因子(無因次單位)。

$F_{MG,BL,y}$ = 土壤層(y) 專案計畫開始前耕作係數 (無因次單位)。

$F_{I,BL,y}$ = 土壤層(y) 專案計畫開始輸入因子 (無因次單位)。

$D_{BL} = F_{MG,BL}$ 和 $F_{I,BL}$ 時間因子(年)。

T_{BL} = 自導入基線操作以來的年數; 最大 $T_{BL} = D$ (年)。

此方法學中， $SOC_{REF,y}$ 參考應從適當的文獻科學資料來源或測量中選擇，並記錄其在項目土壤層中的適用性。這必須包括證明 SOC_{REF} 參考值源自與 GS 方法學第 16 節所述相應的氣候、土壤和植被環境。如果驗證機構 (VVB) 認為提供的 SOC_{REF} 參考值適用性不足，就需要進行適當的測量。

3. Verra 碳驗證標準(Verified Carbon Standard Program, VCS)

Verra 於 2007 年由環保及商界領袖因看到了在自願性碳市場中對於更高品質保證的需求而創立。Verra 目前管理全球領先的自願性碳市場計畫，即核證碳標準 (VCS) 計劃，以及一系列其他計畫，並孵化新構想，以大規模創造具實質環境及社會價值，並推動這些計畫在全球的應用。Verra 的策略方向由 Verra 的董事會和工作人員決定。Verra 的目標是透過以下幾個方向來達成氣候和永續發展，以及加速向永續未來的過渡。

- 為各種活動制定標準，包括減少森林砍伐、改善農業實踐、解決塑膠垃圾問題以及實現性別平等。
- 管理計畫以證明這些活動取得了可衡量的高度誠信的成果。
- 與政府、企業和民間社會合作，推動這些標準的使用，包括透過市場發展。

Verra 會定期審查 VCS 方法，以確保它們繼續反映最佳實踐、科學共識以及

行業不斷變化的市場條件和技術發展。Verra 將至少每五年或其他需要時進行一次這些審查。根據審查結果，Verra 可能會修改該方法。Verra 還可以將先前在 VCS 計畫下批准的方法版本設定為暫停使用狀態(inactive)，直到新的修訂版本發布。截至 2024/10/7 為止在 Verra 官方的正常使用狀態(active)方法學中只有找到一個跟農業相關的方法學，本章節將其使用方法範圍、架構、適用性等相關資訊彙整如下(VM0042 ，Improved Agricultural Land Management, v2.1)。

(1) 方法及架構

這份農業土地管理(ALM)方法學提供了一套程序，用於估算採用改良 ALM 實踐後所產生的溫室氣體(GHG)減排 (CO₂、CH₄ 和 N₂O) 以及二氧化碳移除 (減排和移除) 的數據。該方法學與再生農業相容，特別著重於增加土壤有機碳(SOC) 儲存。

基線及附加性是通過計畫方法確定的。基線場景假設在計畫實施前的農業土地管理實踐持續進行。基線場景的實踐是通過回顧至少三年的歷史期，來製定每個計畫區域內的量化單位（如每塊田地）的年度活動時間表（如耕作、種植、收割和施肥等活動），並在基線期內重複。然後對基線排放/庫存變化進行建模。或者，基線 SOC 庫存變化可以直接在根據計畫實施前實踐管理的“基線控制地點”進行測量。基線場景需根據最新版本的 VCS 標準進行重新評估，並根據需要進行修訂，以反映當地當前的農業生產情況。

額外性是通過障礙分析來呈現的，並說明在項目活動下實施的操作實務變化並非普遍做法。操作實務變化包括以下任何一項：

- 採用新的操作實務(如採用適用條件 1 所涵蓋的某些類別的操作實務)；
- 停止先前存在的操作實務（如停止耕作或灌溉）；
- 對先前存在的操作實務進行調整；
- 或以上幾者的組合。

任何定量調整（如降低肥料施用率）必須超過先前值的 5%，才能被視為操

作實務變化。該方法學提供了三種量化由改良 ALM 操作實務產生的減排和移除的途徑：

量化途徑 1：測量和建模——使用生物地球化學的過程模型來估算與 SOC 庫存變化、土壤甲烷生成以及氮肥和固氮植物使用相關的溫室氣體排放。模型的輸入來自樣田中的土壤特性、實際農業操作實務、初始 SOC 庫存測量和氣候條件。至少每五年需進行一次 SOC 庫存的定期測量。

量化途徑 2：測量和重新測量——直接測量用於量化 SOC 庫存的變化。這種方法適用於模型不可用或尚未針對某特定地區、作物或操作實務進行驗證或參數化的情況，或項目參與者偏好直接測量 SOC 庫存變化的情況。

量化途徑 3：預設因子——使用預設排放因子計算化石燃料燃燒產生的 CO₂ 排放以及 N₂O 和 CH₄ 排放（不包括甲烷生成的 CH₄ 排放）。

量化途徑根據排放/移除類型而有所不同。

(2) 定義

除了 VCS 文件《計畫定義》中列出的定義外，以下定義適用於此方法學。

一年生植物:在一年內完成生命週期、繁殖並死亡的植物種類。

- **基線控制區域**:根據計畫實施前(基線)實踐管理的定義區域，用於直接測量基線土壤有機碳庫存變化。它與一個或多個量化單元的土地相關聯並具代表性。基線控制區域可以位於計畫區域內或外。
- **歷史回顧期**: 計畫開始日期之前的時間段，涵蓋至少三年和一個完整的作物輪作周期。歷史回顧期用於訂定活動時間表（見下文定義）。
- **改良農業土地管理操作實務**:一種能增加土壤有機碳儲存或其他氣候效益的農業操作實務，涉及對肥料或其他土壤改良劑的應用、灌溉/水管理、耕作、殘渣管理、作物種植和收割，及/或放牧操作實務的調整。計畫可以在每塊田地或項目的一部分土地上實施單一操作實務或多種(疊

加) 操作實務。

- 非彈性中子散射(INS):一種基於中子照射後土壤元素發射的伽馬射線檢測與分析的現場(原位)測量技術，也稱為中子激發伽馬射線分析或光譜技術。
- 紅外光譜:包括中紅外(MIR)、近紅外(NIR)和可見近紅外(Vis-NIR)光譜，涵蓋擴散反射光譜(DRS) 和擴散反射紅外傅立葉變換光譜(DRIFT)。Vis-NIR 通常指從 350 到 2500 nm 的波長範圍(可見光範圍為 350 到 700nm)，MIR 則涵蓋 4000 cm^{-1} 到 600(或 400) cm^{-1} 的範圍，具體取決於儀器。
- 激光誘導擊穿光譜(LIBS):將高能脈衝應用於土壤樣本以產生高溫等離子體，根據樣本中存在的元素，等離子體會發射不同波長的輻射。
- 固氮植物:任何與根部結節中發現的固氮微生物相關的植物種類，包括但不限於大豆、苜蓿和豌豆。
- 有機氮肥:含氮的有機材料，包括但不限於動物糞肥、堆肥和生物固體。
- 多年生植物:生命週期、繁殖和死亡跨越多年的植物種類。
- 專業農學家:具有作物及/或土壤科學專業知識、技能、教育、經驗或培訓的人員。這些人可能是土壤科學家、畜牧專家、農學家或政府農業機構的代表。
- 計畫領域:模型應用已驗證的條件集(包括作物種類、土壤質地和氣候)(參見 VCS 模塊 VMD0053 改良農業土地管理的模型校準、驗證和不確定性指導)。
- 樣本點:未定義面積的樣本位置。
- 量化單元:計畫內的定義區域，通過選定的量化方法估算溫室氣體減排和二氧化碳移除(減排和移除)。
- 活動時間表:基線場景中歷史回顧期內每年的管理/活動時間表(如耕作、種植、收割和施肥活動)。這些是根據數據要求確定的。合成氮肥:任何

層級:每個量化單元的子集，其中變量的值和導致該變量變化的過程相對均勻。

- 合成氮肥:任何由化學合成製成並含有氮的肥料（固體、液體、氣體）。這可以是單一營養肥料產品(僅包含氮)，或任何含氮的其他合成肥料，如多營養肥料（例如 N-P-K 肥料）和“增效”氮肥料（例如緩釋、控釋和穩定化氮肥料）。
- 木本多年生植物:生命週期超過兩年的樹木和灌木，排除具有木質組織的栽培一年生植物，如棉花或大麻。

(3) 適用條件 (APPLICABILITY CONDITIONS)

此方法學適用於廣泛的計畫，這些活動通過與基線場景相比增加土壤有機碳 (SOC) 儲存和/或減少淨二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 和氧化亞氮 (N_2O) 排放。此方法學具有全球適用性。此方法學適用於以下條件：

- 計畫引入或實施一項或多項新的改進農業土地管理 (ALM) 操作實務，包括：a)改進肥料（有機或無機）管理；b)改進水管理/灌溉；c)減少耕作/改進殘渣管理；d)改進作物種植和收割(如改進的農林業、作物輪作、覆蓋作物)；e)改進放牧。
- 計畫引入或實施定量調整（如減少肥料施用量），該調整超過現有值的 5%，該值基於基線活動時間表的歷史回顧期內的平均值計算。附錄 1 提供了關於操作實務和確定操作實務變更的詳細資訊。
- 計畫活動實施於項目開始日期為耕地或草地的土地上。土地在計畫期間必須保持為耕地或草地，除以下情況外：a)在證明為長期 ALM 系統的一部分的情況下，耕地中引入臨時草地（例如綜合耕作-放牧系統）。計畫申請者必須提供涵蓋計畫期間的長期管理計畫，該計畫描述提議的操作實務、作物和綜合草地-耕地管理的預期效益和成果；或 b)從草地到

耕地或反之的一次性轉換，當基準場景中的計畫土地已退化且引入改良土地使用變更操作實務可顯著改善土壤健康時。計畫申請者必須提供文件證明土地在計畫開始時已退化，並且基準場景中的退化驅動因素或壓力將導致退化持續存在。參見附錄 2 了解如何提出這類土地使用變更的程序。

- 使用量化方法 1 的實證或基於過程的模式必須:a)來自可信的公共來源，並公開提供（不一定免費），如模式開發者網站、IPCC 或政府機構。輸入、輸出以及模式如何功能性地表示 SOC 動態的足夠概念性文件必須對公眾開放。計畫申請者必須在計畫描述中包含模式來源（如模式的日期，或引用經過同行評審的出版物）。不需要提供原始碼或 API 進行獨立計算； b) 通過同行評審的科學研究證明，成功模擬了計畫描述中 ALM 變更所帶來的 SOC 變化和微量氣體排放； c)支持重複計畫的模式模擬，這包括明確的模式版本控制和穩定的軟體支持，並報告所有參數的來源和使用的值。如果計畫中使用了多組參數，必須清楚地識別參數來源及其應用於 SOC 變更/排放估算的方式。可接受的來源包括同行評審文獻和專家小組的聲明，這些聲明通過作者身份或專家報告證明其專業知識； d)根據 VCS VMD0053 的校正、驗證和不確定性指導中的數據集和程序進行校正，並使用與計畫中使用的參數相同的參數集進行模式預測誤差的計算；e)基準情境和計畫情境中使用相同的模式版本和參數集。

此方法學不適用於以下情況：

- 計畫區域在項目開始日期之前的 10 年內已經清除原生生態系統。
- 計畫活動可能導致生產力持續下降超過 5%，根據同行評審和/或已發表的區域或類似區域的研究得出結論。
- 計畫活動涉及生物炭應用。生物炭可以作為土壤改良劑應用於計畫區域，

但應在每次核查事件中將應用的生物炭總有機碳含量從估計的計畫情境 SOC 變更中扣除。

- 計畫活動發生在濕地；該條件不排除受人工淹水的作物，只要證明作物栽培不影響附近濕地的水文狀況。

(4) 計畫邊界 (Project Boundaries)

計畫邊界的空間範圍涵蓋所有計畫實施改進農業土地管理 (ALM) 實踐的土地。在基線和計畫情境中納入計畫邊界的碳庫列於表 4-18 中。

表 4-18 基線和計畫情境中選擇的碳庫

來源	是否包含?	理由/解釋
地上木質生物量	是/可選	當計畫活動顯著減少該碳庫時，必須包含地上木質生物量。在其他情況下，地上木質生物量是可選碳庫。
地上非木質生物量	否	該碳庫未納入，因為它不會發生顯著變化，或可能的變化是短暫性的。
地下木質生物量	可選	當計畫活動顯著增加該碳庫時，地下木質生物量可選擇納入。
地下非木質生物量	否	該碳庫未納入，因為它不會發生顯著變化，或可能的變化是短暫性的。
枯木	否	該碳庫未納入，因為它不會發生顯著變化，或可能的變化是短暫性的。
凋落物	否	該碳庫未納入，因為它不會發生顯著變化，或可能的變化是短暫性的。
土壤有機碳 (SOC)	是	計畫活動影響的重要碳庫，預計在計畫情境中會增加。

木製產品	否	木製產品是 ALM 項目方法學中的可選碳庫，可以排除在計畫邊界之外。
------	---	------------------------------------

在基線和計畫情境中，納入計畫邊界的溫室氣體(GHG)來源列於表 4-18 中。某些特定碳庫和溫室氣體來源可能被認為是微不足道的，並且不需要計算(即值設定為零)，當碳庫中的碳儲量減少或 GHG 排放增加低於項目總 GHG 效益的 5% 時，可以不計入。這包括導致項目和洩漏排放的來源和碳庫。

表 4-19 基線和計畫情境中包含或不包含在計畫邊界內的溫室氣體源

來源	氣體	是否包含?	理由/解釋
土壤有機碳(SOC)	CO ₂	是	做為碳庫變化量進行量化，而非排放來源。
化石燃料	CO ₂	S*	化石燃料排放來源為車輛(如卡車、拖拉機)和 ALM 活動所需的機械設備。
石灰施用	CO ₂	S*	石灰或白雲石作為土壤改良劑施用，可能是 CO ₂ 的重要來源。
土壤甲烷生成	CH ₄	S*	土壤的厭氧條件可能導致甲烷生成。
腸道發酵	CH ₄	是	當畜牧業存在於基準或項目場景中時，必須包括來自腸道發酵的 CH ₄ 排放。
糞便沉積	CH ₄	是	當畜牧業存在於基準或計畫情境中時，必須包括來自糞便沉積和管理的 CH ₄ 和 N ₂ O 排放。
氮肥使用	N ₂ O	是	當基準情境下有氮肥施用或計畫

			情境中的氮肥施用量大於基準情境時，必須包括來自氮肥使用的 N ₂ O 排放。
固氮植物使用	N ₂ O	是	當計畫中種植固氮植物時，必須包括固氮植物帶來的 N ₂ O 排放。
生物質燃燒	CO ₂	排除	燒燬導致的碳儲量減少計算為碳儲量變化。
生物質燃燒	CH ₄	S*	生物質燃燒會釋放 CH ₄ 。
生物質燃燒	N ₂ O	S*	生物質燃燒會釋放 N ₂ O。

S* 當計畫活動導致排放顯著增加（超過基線情境 5%）時，必須納入，並且當項目活動減少排放時，也可選擇納入。

(5) 基線情境 (BASELINE SCENARIO)

繼續計畫實施前的 ALM 是最合理的基線情境。對於每個量化單元（例如，每塊田地），基線情境設定為與歷史回顧期內實施的實務操作相匹配，建立一個年度活動時間表，並在第一個基線期內重複。然後對基線排放/庫存變化進行建模（量化方法 1）或（僅對 SOC 庫存變化）在遵循年度活動時間表的基線控制地點直接測量（量化方法 2）。請注意，在量化方法 1 下，還需要在 $t = 0$ 年時進行直接 SOC 庫存估算，作為模式初始化的輸入。基線情境中假設的作物和實務操作必須根據最新版本的 VCS 標準的要求進行重新評估，並在必要時進行修訂，以反映該地區當前的農業生產。

基線情境中活動時間表的制定

對於每個量化單元，基線情境中的活動時間表是依據評估計畫開始日期之前的實務操作來確定的。評估實務操作的時間必須至少為三年，並且必須至少包括一個完整的作物輪作周期（如適用）。對於每一年，從 $t = -1$ 到 $t = -$

x（即項目開始前的年份），必須根據表 4-19 中的要求確定 ALM 的資訊。在大多數情況下，定量資訊與相關的定性資訊相關聯。因此，對定性資訊的否定回應意味著沒有與該實務操作相關的定量資訊，而對定性資訊的肯定回應則需要與該實務操作相關的定量資訊。從 $t = -x$ 年開始的活動時間表應用於基線情境，從 $t = 1$ 開始，每 x 年重複一次，直到第一個基線期結束。根據最新版本的 VCS 標準的要求，基線情境中的活動時間表在需要重新評估時有效。在每個基線期結束時，重新評估基線情境中商業作物的生產。在當前基線期結束前的五年內，必須查閱已發表的區域（次國家級）農業生產數據。

- 如果有證據顯示該地區繼續使用相同的 ALM 生產相關的商業作物，則基線情境按原樣有效，繼續使用先前的活動時間表。
- 如果沒有證據顯示繼續生產相關的商業作物，則基於獨立的專業農學家、土壤科學家、畜牧專家和農學家，或政府農業機構代表（包括政府農業推廣人員）為樣本田地提供的書面建議，開發新的 ALM 活動時間表（根據該地區的常見實務操作進行評估）。建議必須提供足夠的詳細資訊，以得到表 4-20 中概述的基線 ALM 最低規範。
- 如果建議中記錄了多個值（例如，書面建議中規定了一系列施用率），則必須應用保守性原則，選擇在基線情境中導致預期排放量最低（或庫存變化率最高）的值。
- 如果證據不是特定於田地的，則必須通過記錄的方法支持保守推導的田地特定值，證明選擇的適當性。

表 4-20：基線情境中 ALM 實務操作的最低規範

ALM 實務操作	定性	定量
作物種植和收割	<ul style="list-style-type: none"> ● 作物類型（種類） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 大致種植日期（如適用） ● 大致收割/終止日期（如適用） ● 作物產量（如適用）
氮肥施用	<ul style="list-style-type: none"> ●糞肥（是/否） ●堆肥（是/否） ●合成氮肥（是/否） 	<ul style="list-style-type: none"> ●糞肥類型施用率（如適用） ●堆肥類型施用率（如適用） ●合成肥料中的氮施用率（如適用）
耕作和/或殘留物管理	<ul style="list-style-type: none"> ● 耕作（是/否） ● 作物殘留物移除（是/否） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 耕作深度（如適用） ● 耕作頻率（如適用） ● 土壤區域受擾動的百分比（如適用） ● 作物殘留物移除的百分比（如適用）
水管理/灌溉	<ul style="list-style-type: none"> ● 灌溉（是/否） ● 淹水（是/否） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 灌溉率（如適用）
放牧實踐	<ul style="list-style-type: none"> ● 放牧（是/否） ● 動物類型（如適用） ● 收割/修剪（是/否） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 放牧強度（即每年在每個區域放牧的動物數量和時間長度，如適用） ● 收割頻率
石灰施用	<ul style="list-style-type: none"> ● 施用方解石、石灰石或白雲石（是/否） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 方解石石灰石或白雲石施用率（如適用）

(6) 外加性(ADDITIONALITY)

該方法學使用計畫方法來展示外加性。對於分組項目，外加性的展示必須基於最初的計畫活動實例（詳情請參見最新版本的 VCS 標準）。使用此方法學的計畫發起人必須：

- 展示法規盈餘(超出法規要求的額外部分。在環保和能源領域，這通常指的是購買或產生的可再生能源超過了法律或法規所要求的部分。例如，當企業購買可再生能源證書 (RECs) 時，他們可以證明他們的綠色能源使用量超出

了法規的要求，這就是所謂的 "法規盈餘")；

- 確定阻礙現有農業土地管理（ALM）變更的制度障礙；
- 展示擬議計畫活動集的採用並非常見做法。

每個步驟的詳細資訊如下所述。

第一步：法規盈餘

項目發起人必須根據最新版本的 VCS 標準中規定的規則和要求，展示法規盈餘。

第二步：確定阻礙實施現有 ALM 變更的制度障礙

項目發起人必須確定是否存在文化和/或社會障礙（如文化、社會規範、態度和信仰），這些障礙會阻礙在沒有發起人干預和來自經核證的碳單位（VCU）銷售的收益下實施擬議的 ALM 變更。發起人必須列出並描述實施預計變更的障礙，以確定如果沒有發起人的參與，這些變更將不會發生，且計畫不會被註冊為 VCS 計畫。對文化或社會障礙的證明必須由針對計畫地區的同行評審和/或已發表的研究支持。如果計畫地區的證據不可用，可以使用其他地區的證據，但必須說明這些文化和/或社會障礙如何適用於計畫地區。

這些障礙可能包括傳統知識或缺乏傳統知識、法律和習俗、市場條件以及缺乏改變實踐的動機，包括但不限於：

- 傳統設備和技術；
- 種植者對採用新 ALM 的風險承受能力及信念，及其決策的影響；
- 種植者對新想法的開放態度及對變更程度的認知；
- 與種植者身份相關的障礙。

第三步：說明擬議項目活動集的採用並非常見做法

計畫發起人必須確定擬議的計畫活動是否在計畫區域內的每個地區（或 VCS 標準中針對分組計畫定義的「地理區域」）中為常見做法。常見做法的定義是採用率超過 20%。如果計畫只實施一項活動，則該活動的採用率必須在計畫空間邊

界內的每個地區低於 20%。

要證明計畫活動並非常見做法，計畫發起人必須顯示計畫區域內每個地區兩個（或更多）主要擬議計畫活動的面積加權平均採用率低於 20%。因此，如果某項活動（例如，減少耕作）的採用率超過 20%，則計畫必須包括其他採用率較低活動的比例（例如，覆蓋作物、改進的肥料管理），以將擬議計畫活動的加權平均值降低到 20%以下。採用率低於或等於 20%的單個活動可視為具外加性，而採用率超過 20%的單個活動則需要通過所有計畫活動的加權平均採用率來評估其外加性。

計畫活動類別的展示可根據提供證據中的類別來定義，或使用附錄 1 中概述的類別。證據應以以下形式提供：

- a) 農業普查或其他政府數據（如調查數據）； b) 同行評審的科學文獻； c) 獨立研究數據； d) 行業協會編制的報告或評估。

為了展示某計畫活動是否屬於常見做法，必須將計畫區域按國家或省級（或等同的二級行政區劃）進行劃分。在開展計畫的國家中，如果在省級或州級無法獲得支持證據（例如，開發中國家），可以使用次國家、國家或區域級別的聚合數據，但需提供正當理由。如果基於地理政治邊界的分層不切實際（例如，由於數據缺乏），可以使用其他分層形式（如主要土壤類型或作物區）並提供正當理由。必須在整個計畫中使用相同的分層方法和數據來源，以保持常見做法的完整性。如果計畫地區的一部分無法獲得常見做法評估數據來源，則必須提供使用不同數據來源的正當理由。

如果區域內沒有現有的單個擬議計畫活動的證據，計畫發起人可以從合資格的獨立當地專家（例如，農業推廣代理、認證農藝師）處獲得簽署並註明日期的聲明，估計用於加權平均計算的採用率。如果無法獲得整個計畫活動組合的證據，則可以從合資格的獨立當地專家處獲得聲明，說明該計畫活動組合在區域內是否

為常見做法，並提供該活動組合的區域現有採用率的估算值（EA_{ay}；請參見方程式（1））。所有使用獨立當地專家聲明的計畫必須提供專家的資歷以及其分析方法。方程式（1）必須應用於計算計畫區域內每個地區的加權平均採用率。如果計畫只涉及一項活動，且計畫發起人證明該活動在計畫區域所在地區的採用率低於 20%，則不需要應用方程式（1）。

方程式（1）如下：

$$AR = (EA_{a1} \times PA_{a1}) + (EA_{a2} \times PA_{a2}) + \dots + (EA_{ay} \times PA_{ay}) \quad (1)$$

方程式的各個參數解釋如下：

AR：加權平均採用率，表示計畫區域內各地區的採用率百分比。

EA_{ay}：活動 ay 在區域內的現有採用率百分比，代表該計畫活動的現有普及率。

PA_{ay}：活動 ay 在計畫區域內的採用比例，表示該活動相對於其他計畫活動的採用比例。

Area_{ay}：活動 ay 在計畫區域內的採用面積（公頃），代表該活動實施的土地面積。

ay：擬議的計畫活動，編號從 1 到 ay。

計畫發起人可以在同一片土地上實施多項活動（如減少耕作和覆蓋作物）。此時，應用現有的證據來計算這些活動的合併採用率，即參數 EA_{ay} 會代表這些活動在同一土地上的綜合採用率。如果缺少合併活動的採用率數據，計畫發起人可以通過將各單獨活動的現有採用率相乘來估算合併活動的採用率。例如，如果某州的減少耕作現有採用率為 40%，而覆蓋作物的採用率為 10%，那麼這兩項活動合併後的採用率將為 4%（即 $0.4 \times 0.1 = 0.04$ ）。

當步驟 1 至 3 都滿足時，擬議的計畫活動將被視為具備外加性。

由於目前國內並無提出農業系統碳驗證減量方法學，所以暫時無法提供比較資料，本團隊會持續蒐集國外認證機構相近方法學來進行比較，或持續追蹤彙整

國內農業系統碳驗證方法學，提供國外認證機構方法學比較表如表 4-21。

表 4-21 國外認證機構方法學比較

機構	方法學	調整/管理方向
CDM	透過調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量	連續淹田/間歇性淹田(乾濕交替法)/水稻移植/水稻直接播種
GS	農業操作改善	改善犁田整地方法/改善稻田管理/改善草地管理/有機施肥或肥料管理
Verra	農業土地管理(ALM)	涉及對肥料或其他土壤改良劑的應用、灌溉/水管理、耕作、殘渣管理、作物種植和收割，及/或放牧操作實務

4.1.4 彙整台灣溫室氣體相關法規和政策

台灣主要和溫室氣體有關的法規是溫室氣體減量及管理法，此法在 2015 年 7 月由總統下令公布施行，共計 34 條，包含總則、政府機關權責、減量對策、獎勵與罰則等。法源依據聯合國氣候變化綱要公約（UNFCCC）精神，要求政府明定溫室氣體減量中長期目標，以因應氣候變遷、落實環境正義。此法於 112 年 2 月 15 日由環境部公布施行「氣候變遷因應法」，其相關法規整理如下表 4-22，因為法規會隨時間而修改或變更(停用)，本次整理的法規是於 113 年 10 月 8 日之前完成的。

表 4-21 溫室氣體相關法規

公發布日(修正日期)	法規名稱	法規類別	緣由
2023/2/15	氣候變遷因應法	法律	前身為溫室氣體減量及管理法
2023/12/29	氣候變遷因應法施行細則	命令	本細則依氣候變遷因應法第六十二條規定訂定之。
2023/10/12	溫室氣體自願減量專案管理辦法	命令	本辦法依氣候變遷因應法第二十五條第四項規定訂定之。
2023/10/12	溫室氣體排放量增量抵換管理辦法	命令	本辦法依氣候變遷因應法第二十四條第二項規定訂定之。
2023/10/5	溫室氣體認證機構及查驗機構管理辦法	命令	本辦法依氣候變遷因應法第二十二條第二項及第三項規定訂定之。
2023/9/14	溫室氣體排放量盤查登錄及查驗管理辦法	命令	本辦法依氣候變遷因應法第二十一條第二項規定訂定之。
2023/1/11	老舊汽車汰舊換新溫室氣體減量獎勵辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法第二十七條第二項規定訂定之。
2023/1/14	淘汰老舊機車換購電動機車溫室氣體減量獎勵辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法第二十七條第二項規定訂定之。
2019/1/11	溫室氣體排放源符合效能標準獎勵辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法(以下簡稱本法)第二十二條第三項規定訂定之。
2018/12/27	溫室氣體抵換專案管理辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法(以下簡稱本法)第二十二條第三項規定訂定之。
2018/11/13	補助溫室氣體減量管理及氣候變遷調適研究發展計畫作業辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法第二十七條第二項規定訂定之。

2017/7/10	低碳產品獎勵辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法第二十七條第二項規定訂定之。
2016/1/30	溫室氣體管理基金收支保管及運用辦法	命令	為因應全球氣候變遷，制定氣候變遷調適策略，降低與管理溫室氣體排放，特依溫室氣體減量及管理法（以下簡稱本法）第十九條第一項規定，設置溫室氣體管理基金（以下簡稱本基金），並依同條第五項及預算法第二十一條規定，訂定本辦法。
2015/12/25	一般廢棄物掩埋場降低溫室氣體排放獎勵辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法第二十七條第二項規定訂定之。
2024/2/22	事業應盤查登錄及查驗溫室氣體排放量之排放源	實質法規	依據：氣候變遷因應法第二十一條第一項。
2018/12/19	新設或變更溫室氣體排放源排放量規模	實質法規	依據：溫室氣體減量及管理法（以下簡稱本法）第二十條第六項。
2023/11/22	溫室氣體階段管制目標學者專家技術諮詢小組設置要點	行政規則	環境部（以下簡稱本部）為深化階段管制目標擬定過程，依氣候變遷因應法（以下簡稱本法）第十條第一項規定，設置溫室氣體階段管制目標學者專家技術諮詢小組（以下簡稱本小組），特訂定本要點。
2023/10/30	環境部溫室氣體抵換專案及自願減量專案審議會設置及作業要點	行政規則	環境部（以下簡稱本部）為辦理溫室氣體抵換專案及自願減量專案各項申請之審查相關作業，特設溫室氣體抵換專案及自願減量專案審議會（以下簡稱本會），並訂定本要點。
2023/1/11	老舊汽車汰舊換新溫室氣體減量效益媒合服務作業程序	行政規則	本辦法依溫室氣體減量及管理法第二十七條第二項規定訂定之
2023/1/11	淘汰老舊機車換購電動機車溫室氣體減量效益媒合服務作業程序	行政規則	一、行政院環境保護署（以下簡稱本署）辦理以淘汰老舊機車換購電動機車取得之溫室氣體減量效益（以下簡稱減量效益），作為溫室氣體排放量增量抵換來源之媒合

			相關作業，利用本署媒合平台提供媒合服務，特訂定本作業程序。
2023/12/1	碳費費率審議會設置要點	行政規則	環境部（以下簡稱本部）為審議碳費之徵收費率，特設碳費費率審議會（以下簡稱本會）。
2023/1/19	行政院環境保護署審查開發行為溫室氣體排放量增量抵換處理原則	行政規則	行政院環境保護署（以下簡稱本署）為妥善審查環境影響評估開發案溫室氣體排放量（以下簡稱排放量）增量抵換方式，提出處理建議，以供開發行為環境影響評估審查之參考，特訂定本原則。
2020/3/16	行政院環境保護署推動產品碳足跡管理要點	行政規則	行政院環境保護署（以下簡稱本署）為鼓勵廠商核算產品碳足跡及持續減碳，並以產品碳足跡標籤及產品碳足跡減量標籤標示，俾供民眾選購參考，落實環境基本法第六條及第八條規定，特訂定本要點。
2024/7/1	溫室氣體減量額度交易拍賣及移轉管理辦法	命令	本辦法依氣候變遷因應法（以下簡稱本法）第二十五條第五項規定訂定之
2023/10/5	溫室氣體認證機構及查驗機構管理辦法	命令	本辦法依氣候變遷因應法（以下簡稱本法）第二十二條第二項及第三項規定訂定之
2018/2/8	經濟部辦理氣候變遷調適或溫室氣體研究管理與推動績效優良獎勵補助辦法	命令	本辦法依溫室氣體減量及管理法第二十七條第二項規定訂定之

4.2 制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範

4.2.1 開放式農地場域架設

根據 ICOS 場域架設規範，有關檢測場域描述須提供資訊包括土地所有者(受監測農地場域所有者)以及用於測量的通量塔的資訊，例如記錄塔結構、地理位置、塔高度、土地管理、農作管理、施肥類型、電力系統、資料數據傳輸方式等。

通量儀器架設位置須遵守渦流相關法理論假設，通量塔架設需遵守下列基本條件：

1. 符合地表均質且地形平坦等理想條件。
2. 需確保儀器放置在合適的高度，以充分代表欲觀測通量足跡及滿足渦流相關法的基本假設。
3. 塔結構和煙囪效應(chimney effect)造成的流場畸變(flow distortion)必須最小化。
4. 在架設塔台之前應確定盛行風向、當地環流模式以及風向的日/夜和季節變化。
5. 在規劃階段應考慮實際需求，例如電力可用性以及全年維護站點的可行性。
6. 塔結構必須堅固、穩定，並且能夠承受強風和極端環境。
7. 塔台必須為現場工作人員提供安全存放儀器的空間，包括將設備運送到儀器位置的能力。
8. 應定期維護塔架和儀器免受雷電、鳥類和昆蟲所致損害。

儀器的最佳觀測位置為恆定通量層(Constant flux layer)，且須高於地面作物高度 1.2-2 倍，或至少須達作物高度 1-2 倍但不可高於混合層高度(Mixing layer height)(混合層高度：地面高度約 100-120m)(Burba, 2021) (圖 4-41; 4-42)。

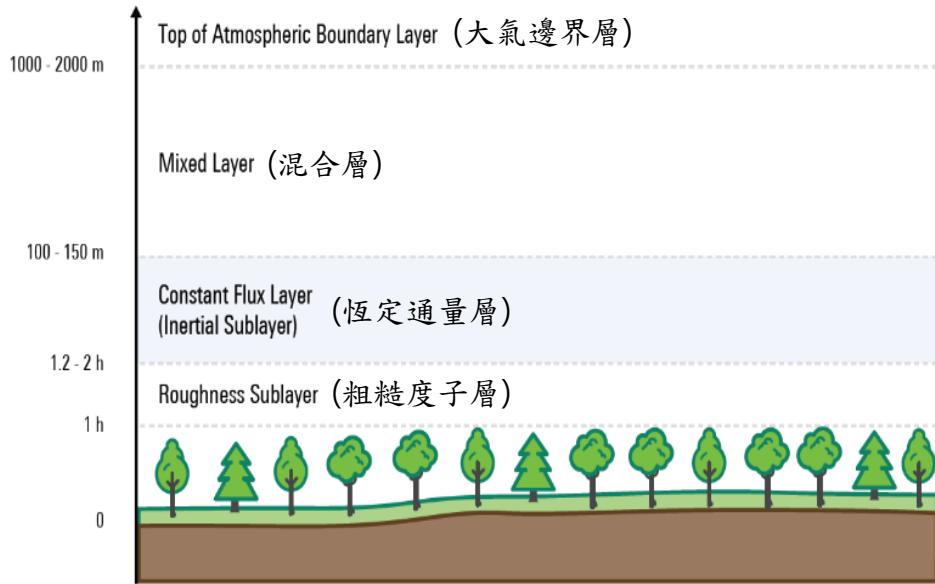


圖 4-41 通量儀器理想設置高度

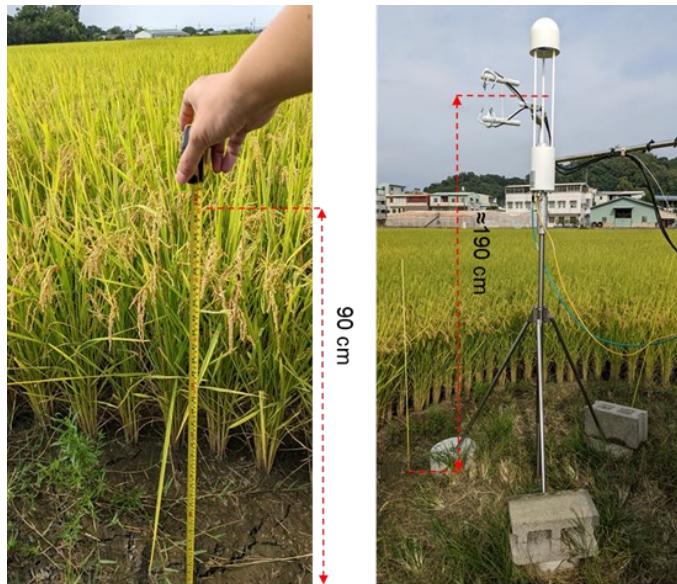


圖 4-42 水稻觀測田儀器架設高度(範例)

(一) 開放式農地場域選擇

在農地場域設置檢測站時，必須先獲得土地所有者的許可，與在森林中建立的塔相比，在農地上建造的塔往往較小。然而，在農地場域中建造通量檢測塔可能會對農業操作效率產生不利影響（特別是需要由耕犁機械完成的工作）。儘管在農地場域中安裝通量檢測塔很少會影響周圍的田地，但也必須獲得鄰近土地所

有者的同意來管理檢測點位。

在進行開放式農地場域點位選擇時，可以利用地形圖、植被圖、航空攝影、衛星圖像、土地利用圖、森林管理圖、氣候和水文條件資料，以及土地利用和管理的資訊。通過這些資料，您可以選擇出最符合您檢測點位，以確保檢測資料有效性和可靠性。

就氣候條件而言，針對檢測區域盛行風速、風向及其日常和季節模式的變化有助於確定最合適的溫室氣體通量檢測系統點位。溫室氣體通量場域檢測，有必要蒐集土地所有權、土地使用權和建築限制等資訊。同時，觀測計劃的制定，明確觀測期限、作物管理方法、人力需求、資料收集方法、資料使用、資料公開程序以及與其他通量研究之間關係。

避免選擇有人為擾動或施工的區域，例如建築物、輸電線路或附近有汽車和其他交通設施的區域。因為交通的氣體排放可能會使檢測資料無效。區域選擇上，最好在進行生態學和土壤學調查時，擇取具有相同生態系統的區域，減少植被和土壤擾動且不會影響通量檢測。

亞洲地區大多數國家，除了永久性草地以外，農業區域常以一公頃(1ha)或更小面積進行管理。每個農地區域可能使用不同的作物以及管理方式，這可能對檢測結果產生不利影響。在進行檢測初步調查時，應考慮到這一因素。此外，場域規劃上，最好有一條通往檢測塔的道路，以便能夠將重型檢測設備運送到塔進行維護。由於車輛排放可能對觀測結果產生不利影響，因此需要對車輛進出進行一定的限制。

由於渦流相關法所採用觀測系統都架設在一定的高度上，其測量結果只反映特定點區域或某部分區域的物理過程，不能完全說明觀測結果是否具有該區域的代表性及空間變異性。因此，通量足跡(flux footprint)模式是為了解決這一問題，進一步描述近地面層表面源或匯的空間分佈和儀器觀測通量值之間的關係，也可

以說是為了確保通量塔所觀測的上風區域是否屬於觀測儀器所記錄的範圍。

通量足跡主要取決於儀器量測高度、表面粗糙度以及熱穩定性。如圖 4-43(a) 所示，僅針對儀器量測高度對於通量足跡影響做說明。大部分貢獻通常不是來自塔底，也不是來自幾公里外，而是來自兩者之間的某個距離。圖 4-43(b) 代表從通量足跡對於不同塔高 4.5 和 1.5 m 的潛在影響，且發現較低的觀測塔高對於通量足跡所涵蓋的範圍較小(Burba, 2021)。

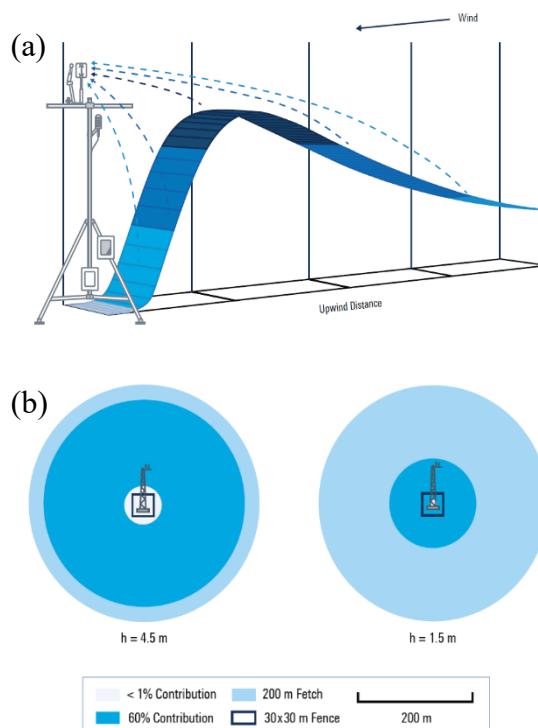


圖 4-43 通量足跡示意圖(a)通量足跡分布 (b)不同高度通量塔對足跡貢獻的影響

簡易通量足跡貢獻模式是由 Schuepp 在 1990 年所提出，可在中性穩定條件下(Neutral stability condition)透過擴散方程解析並預測通量足跡的貢獻 (Eq. 7) (Schuepp et al., 1990)。目前也發展出需多通量足跡模型，可進一步評估以及預測通量足跡實際距離及貢獻 (Hsieh et al., 2000; Kljun et al., 2004; Kormann and Meixner, 2001)。

$$\text{CNF} (\%) = - \int_0^{X_L} \frac{u(z-d)}{u^* k x^2} e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k x}} dx = e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k X_L}} \quad (7)$$

通量足跡貢獻模式(Cumulative Normalized Contribution to Flux measurement, CNF)所需的參數包含:

- 儀器量測高度 z (m)
- 平均風速資料 u ($m\ s^{-1}$)
- 通量足跡貢獻與通量塔的距離 X_L (m)
- 地面修正高度(zero plane displacement height, d)(m)
- 摩擦風速(friction velocity, u^*)($m\ s^{-1}$)
- Von Karman 糜數($k=0.4$)

(二) 場域通量塔設置

在草原或農業區，多採用 3-5m 左右的桿狀塔，由於農田的觀測站，每年會進行多次農業操作，如種植、收割和耕作（主要由大型機械完成）。這些活動會改變地型表面條件，在農地上建造的塔可能會干擾農業操作。農業系統通量塔檢測通常包含熱輻射、土壤熱通量、植物群落剖面等，因此確保塔附近的土地均勻性是非常重要的。

因此在農業場域通量塔設置建議，可以以輕鬆攜帶的簡化塔（如三腳架）進行觀測，在農業操作時可臨時拆除；另一種是將檢測儀器長久持續安裝在塔上進行觀測，請求田地管理員避免在塔周圍進行農業工作，並讓檢測者在塔附近手動進行農業工作。

(三) 場域雷擊預防措施

雷擊對檢測塔構成潛在威脅，應採取預防措施，以最小化對檢測設備的損害之影響。以下是處理檢測塔雷擊損害的一些建議：

- (1) 防雷系統：在檢測塔上安裝防雷系統。避雷針、導體和接地系統可以將電荷安全引導到地面，降低觀測塔和設備受損的風險。
- (2) 浪湧保護裝置：為敏感的電子設備和儀器配置浪湧保護裝置(Surge Protection

Device, SPD)。浪湧保護器可以將過電壓轉移至設備之外，防止雷電引起的電力浪湧損害。

- (3) 接地：確保通量檢測塔和相關設備正確接地。這有助於將電能釋放到地面，減少損害的風險。
- (4) 塔的設計：考慮檢測塔的設計，以最小化雷擊損害的風險。例如，避免將檢測塔置於容易引雷的開闊區域。適當的塔設計有助於分散電荷並減少雷電擊中的可能性。
- (5) 關機程式：制定在雷擊暴發期間檢測設備的關機程式。這可能包括臨時斷開電源或資料傳輸，以防止雷電活動期間的損害。
- (6) 遠程監控：實施遠端監控系統，允許從遠處監控和控制觀測設備。這有助於在雷電暴發期間執行關機程式，無需親自到場。
- (7) 定期檢查：定期檢查防雷系統、接地和觀測設備，確保它們處於良好工作狀態。及時更換任何受損的元件。
- (8) 緊急回應計畫：制定一個緊急回應計畫，包括處理與雷擊相關事件的程式。這可能涉及立即關機、設備檢查和隨後的檢查。

(四) 國際通量網絡架設規範

根據 112 年溫室氣體通量檢測技術開發驗證計畫，本團隊已彙整歐洲 ICOS 通量網絡以及亞洲 Asia Flux 區域通量網絡，將持續針對 Ameriflux 等其他國際網路架設規範進一步彙整。同時評估這些架構和規範對於台灣溫室氣體觀測的適用性。

表 4-22 ICOS 通量網絡以及亞洲 Asia Flux 區域通量網絡規範說明

項目	ICOS	Asia Flux
測站位置	ICOS 測站應該選擇在代表性的地理位置上建立，以能夠測量和監測該地區的溫室氣體排放和吸收。測站的位置應該遠離任何潛在的干擾源，如高流量道路或工業區。	盡量挑選地形平緩且單一植被地方作為站點。最好可以取得該點的風速風向資料(四季變化和盛行風方向)。如果沒有站點之前的風速風向資料，站點最好架設在欲觀測地點的中心位置。須注意站點是否有道路可通達以及商用電來源，避免在有柵欄或是崎嶇的地形設立站點。
測量儀器	ICOS 測站應該使用經過驗證和準確校準的測量儀器，以確保準確性和可比性。這些儀器應該符合 ICOS 的測量要求和標準 (ICOS, 2024)。	建議使用近紅外光吸收光譜分析儀來進行 CO ₂ 以及 H ₂ O 濃度分析。 <ul style="list-style-type: none">• 分析儀可分為開放式以及封閉式：開放式分析儀很適合做 EC 檢測，推薦 LI-COR LI-7500 以及 ADC BIOSCIENTIFIC OP-2 和 ADVANET E009B。• 封閉式分析儀主要以 NDIR 為檢測器，和開放式分析儀相比，因為管路干擾以及衰減導致反應時間會比較差，但因其穩定性高所以也常拿來進行通量觀測。推薦 LI-COR LI-6262 以及 LI-7000。
監測參數	ICOS 測站應該測量多個溫室氣體，如二氧化碳、甲烷和氮氧化物等。此外還應該監測相關的氣象和氣候參數，如溫度、風速和降雨等。	Asia Flux 所建議測站量測項目主要可分為氣象、土壤以及植被特性。氣象部分包含動量、潛熱、可感熱、CO ₂ 通量、溫度、風速和降雨等。土壤因子包含濕度、溫度、熱通量以及土壤呼吸等。植被特性包含光合有效輻射 (PAR)、葉面積指數(LAI)
風速計規範	參考 ICOS 生態測站氣象變數指南(ICOS, 2024)	Asia Flux 所建議可測量三維的風速且測量頻率要大於 10 Hz，在垂直方向的風速測量需要有高精度，只有超音波風速風向計符合以上需求。無提供詳細規範參數以及範圍。

溫度計規範	參考 ICOS 生態測站氣象變數指南(ICOS, 2024)	Asia Flux 建議使用超音波風速風向計搭配大氣壓力計以及水氣壓力來計算溫度，使用直徑 12.5 um 的熱電阻感應器或是使用直徑 25-50 um 的熱電偶感應器，須注意熱電阻/熱電偶的偵測元件非常脆弱且容易受強風強雨而損壞。無提供詳細規範參數以及範圍。
溼度計規範	參考 ICOS 生態測站氣象變數指南(ICOS, 2024)	Asia Flux 建議使用溼度計(吸收水的 UV 輻射)或是乾溼球溫度計來進行濕度觀測，但乾溼球溫度計因為需要時常維護(加水)所以不適合做長期通量觀測。無提供詳細規範參數以及範圍。
測量頻率	ICOS 測站應該以高頻率進行測量，以獲取具有高時間解析度的數據。	採樣頻率要為訊號變化頻率的兩倍。當通量觀測的高度超過 20 m，建議的採樣頻率是 5-10 Hz。當通量觀測的高度為 2 - 5m，建議的採樣頻率是 10-20 Hz。採樣頻率越高，高頻訊號損失的機率就越小，但會產生大量的資料。預先觀測期使用較高的採樣頻率，再從資料分析中挑選出合適的採樣頻率。建議使用 16 bits 以上的類比轉數位訊號轉化器。
資料儲存空間建議	可以配置不同的記錄儀，每個記錄儀可以產生一個或多個文件。要求每個採集頻率產生一個文件。必須記錄和存檔儀器單位和物理單位。記錄儀必須在彼此之間以及與 EC 數據的記錄系統之間進行同步，每天使用 GPS 或 NTP 檢查一次時間對齊。每個記錄儀產生的文件必須包含在一天內收集的數據。	如果因儲存空間不足無法將所有原始數據存放在站點的記錄器或電腦中，可以直接將數據計算成通量然後儲存通量資料，但需要在實驗初期檢查計算出來的通量數據是否正確。如在偏遠測站有電話線，通量和其他氣象參數可以透過電話線傳回實驗室，其他原始數據還是先存在站點。這樣有助於檢查站點設備是否有問題。

4.2.2 溫室氣體通量檢測系統維護方法

溫室氣體通量檢測系統所需儀器包含水氣(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、三維音波風速計、甲烷(CH_4)及氧化亞氮(N_2O)分析儀，將進一步針對開放式農地場域提供系統維護方法。

根據 112 年溫室氣體通量檢測技術開發驗證計畫，本團隊已初步將常見溫室氣體通量檢測系統基本維護方式彙整如下，將持續擬定溫室氣體相關檢測系統維護方法。

(一) 水氣 (H_2O)、二氧化碳(CO_2)及三維音波風速計分析儀維護方法

通量檢測有許多不同的方法，本計畫採用的是渦流相關法原理(Eddy Covariance Method)來進行通量的檢測。水氣/二氧化碳分析儀由於偵測原理相近、通量發生機制相關，因此水氣與二氧化碳的檢測常製作成同一檢測設備。檢測原理採用紅外線氣體分析儀(Campbell IRGASON)以高監測速率、高精確度測量 H_2O/CO_2 濃度(ppm)，配合同步監測的溫度計算空氣密度，並搭配高頻音波風速計來計算通量(圖 4-44)。

Campbell IRGASON 包含紅外線光譜吸收的氣體分析儀以及三維音波風速計，使用的是中紅外光雷射，用來偵測二氧化碳的雷射波長為 $4.3\mu m$ ，用來偵測水氣的雷射波長為 $2.7\mu m$ 。除了這兩個主體之外，要能讓這兩個主要設備能正常工作還需要其他配件：

- (1) 溫度感測器：環境溫度的測量使用，本研究使用的是 Campbell Model 107 溫度感測器以及輻射遮罩。
- (2) 電子單元：包含了儀器的電子部分，用於數據採集、嵌入式處理和傳輸。它必須安裝在與音波風速計相距一定距離的電纜處。本研究使用的是 Campbell EC 100。
- (3) 資料儲存器：用於數據採集、處理和傳輸。它必須安裝在與音波風速計相距一

定距離的電纜處。本研究使用的是 Campbell CR 1000X。

- (4) 加熱帶:在一些場域為了避免三維音波風速計的感測頭結冰或結霜而影響到觀測資料，會使用加熱帶。使用加熱帶時需避免加熱帶不會影響三維音波風速計周圍的氣流以及三維音波風速不會超過製造商指定的工作溫度範圍。



圖 4-44 開放式二氧化碳/水氣分析儀(a) IRGASON, Campbell, USA; (b) LI 7500DS, Li-COR, USA

Campbell IRGASON，為開放式偵測系統，因此需每個月檢查一次 EC100 箱子內乾燥劑，如發現乾燥劑已接近飽和狀態請更換新的乾燥劑，未更換乾燥劑將影響光通量路徑的初始訊號強度(因水氣在機器內部的干擾)。

正常情況下 EC100 箱子裡面應該會亮 3 個綠燈，如果沒看到 3 個綠燈請檢察 IRGASON 與 EC100 之間的連接線路以及電源線是否有鬆脫或異常。當水滴或灰塵完全遮擋住三維音波風速計的感測器表面時，IRGASON 無法測量風速，因此需定期請人清潔維護，目前計畫為每周一、三、五都會派人前往維護，維護方式以酒精清潔，於測風柱以衛生紙擦拭乾淨，鏡面以拭鏡紙擦拭。

如果該站點經常降雨，可以考慮在三維音波風速計感測器上使用吸水纖維(wick)以幫助去除水分。吸水纖維有助於去除水分。然而，在某些情況下，水滴可能會積聚並留在感測器的表面。一旦水滴蒸發或被清除，IRGASON 將再次

恢復測量風速。可以使用棉花棒或紙巾在感測器表面輕輕擦拭以去除水滴。使用者必須自行判斷是否需要使用吸水纖維。如果不使用吸水纖維，輕輕從三維音波風速計感測器上取下吸水纖維，注意不要損壞感測器的銅結構部分。三維音波風速計感測器上的吸水纖維正確安裝的方式請參考下圖 4-45。

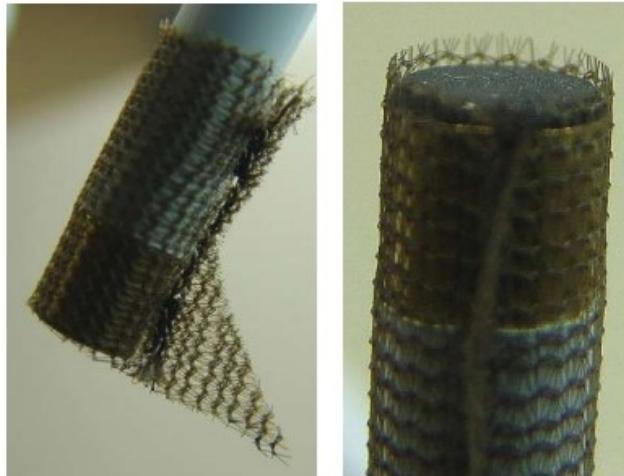


圖 4-45 三維音波風速計感測器上的吸水纖維正確安裝的方式(IRGASON 使用手冊)

IRGASON 氣體分析儀的鏡面有經過拋光並以傾斜的角度設計，以防止水滴積聚在其表面上。由於與感測器的接觸界面上增加了表面張力，水可能在邊緣處積聚並部分阻塞光路而減弱信號。

為了最小化此類事件的發生和造成數據損失，建議考慮使用吸水纖維。吸水纖維的結構促進毛細作用，將水從鏡面邊緣處吸引走。吸水纖維的縫線和直邊被覆以一種橡膠化合物，以防止它們在操作過程中移位。

正確安裝吸水纖維非常重要，請參考圖 4-46。它們不應該阻塞或侵入光路。在安裝之前，記錄 H_2O 和 CO_2 的信號強度。安裝後，這些值應保持不變。如果二氧化碳 (CO_2) 或水 (H_2O) 的信號強度下降到原始值的 0.7 或 70% 以下，應清潔 IRGASON 氣體分析儀的鏡面。這些數值可以從輸出數據中進行監測，或者可以使用 ECMon 查看。

清潔鏡面，可使用異丙醇（2-丙醇/異丙醇）和棉花棒、不刮傷鏡面的紙巾或布料。在清潔後，請確認信號強度恢復到接近 1.0 的數值。

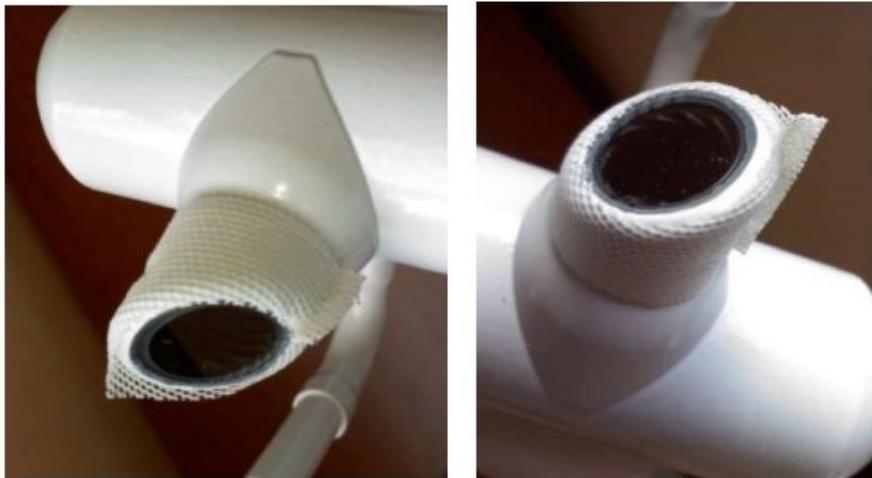


圖 4-46 IRGASON 氣體分析儀鏡面上的吸水纖維正確安裝的方式(IRGASON 使用手冊)

光學設備因環境因素的不同，IRGASON 氣體分析儀的測量結果可能會稍微漂移。因此，定期維護需要進行定零點和跨度(SPAN)的檢查程序。這個程序的頻率取決於儀器進行測量的環境條件。Campbell Scientific 建議新儀器或移至新位置的儀器每個月進行一次零點和跨度的檢查程序。此外，建議在清潔鏡面後要對分析儀進行零點和跨度的檢查程序。在進行了最初幾次的零點和跨度的檢查程序之後，將對現有環境條件下分析儀的增益和偏移漂移速率有更好的了解。以便使用者能夠評估零點和跨度檢查程序的適當操作時間頻率。然而，如果 IRGASON 在環境條件發生大幅季節性變化的場所使用，則應每季度進行零點和跨度的檢查程序。

零點(Zero)和跨度(Span)的檢查程序必須正確執行，應為該程序留出充足的时间（至少 1 小時），使用的 CO₂標氣需為空氣充填非氮氣充填不然會產生誤差，校正氣體的使用量為 0.4~0.6 LPM(每公升每分鐘)，進入校正套管的空氣流量應該接近建議的速率。如果流量太低，校正套管將無法得到徹底的沖洗；如果流

量太高，校正套管內的氣壓將過高，分析儀的零點和跨度的檢查程序將無法正確進行。前 5~10 分鐘可以調大氣體流量以加速平衡。以下為零點和跨度的檢查以及校正操作程序：

1. 斷開 EC100 的電源。
2. 使用酒精和不刮傷鏡面的紙巾或布清潔鏡面和校正套管。
3. 將 IRGASON 校正套管(pn 26390)裝在上下套筒上(圖 4-47)。要做到這一點，扭曲套管的兩端以最小化套管的長度。確保套管末端的橡膠密封件乾淨且狀態良好。將套管的一端放在下套筒上，扭曲套管的頂部部分，讓其伸展並覆蓋上套筒；在這樣做的過程中，避免與三維音波風速計的感測器接觸。

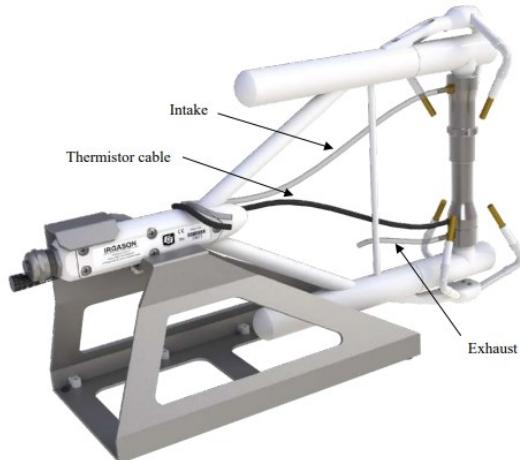


圖 4-47 IRGASON 校正套管安裝示意圖(IRGASON 使用手冊)

4. 斷開 IRGASON 的溫度感測器與 EC100 的連接，將校正套管的溫度感測器連接到相同位置。
5. 使用 EC100 USB 連接線(pn 26563)將 EC100 連接到個人電腦。
6. 重啟 EC100 的電源，等待三個燈號轉成綠色。
7. 開啟 ECMon，選擇適當的 USB 端口，然後點擊連接。主屏幕現在應顯示實時的 CO₂ 和 H₂O 濃度。點擊零點/跨度。在零點/跨度視窗的下半部分，將出現一個圖形，顯示 CO₂ 和 H₂O 的時間序列圖。

8. 將已知 CO₂ 濃度的標準氣體連接到壓力調節器，然後連接到流量控制器，最後連接到校正套管的進氣口。最理想的是，跨度 CO₂ 的濃度應接近在現場測量的 CO₂ 濃度，建議使用濃度範圍在 400~500 ppm 的 CO₂ 標氣(標氣的準確度在 5%之內，而且標氣需要是用空氣充填而不是氮氣充填，才不會對 CO₂ 的光譜計算時發生誤差)。首先關閉壓力調節器和流量控制器，然後使用壓力調節器慢慢增加壓力到流量控制器的需求。然後將流量設定在 0.4 至 0.6 LPM 之間 (進入校正套管的氣流應接近建議的流速。如果流速太低，校正套管將無法得到適當的沖洗；如果流速太高，校正套管內的氣壓將過高，分析儀器將無法正確進行零點和跨度調整)。觀察 ECMon 視窗的 CO₂ 和 H₂O 時間序列圖，等待 CO₂ 讀值穩定 (約 5 至 10 分鐘)。一旦穩定，記錄 CO₂ 濃度。
9. 將 CO₂ 標準氣體從校正套管的進氣口移除，並使用露點產生器或其他標準參考來替換 H₂O 跨度氣體。由於水分子可能吸附在管道和罩子的內部，H₂O 濃度穩定可能需要較長時間。如果需要，可以在最初的幾分鐘內增加流量，以更快地使系統穩定，再將流量調回在 0.4 至 0.6 LPM 之間進行 H₂O 測量。
10. 移除 H₂O 跨度氣體，並將零空氣連接到校正套管的進氣口。如第 8 步所述，使用壓力調節器和流量控制器，使零空氣以 0.4 至 0.6 LPM 的速率通過校正套管。等待測量讀數穩定，記下 CO₂ 和 H₂O 濃度值。如果讀數仍然不穩定，請確保零空氣的流量足夠並且校正套管有正確安裝在套筒上。
11. 檢查記錄下來的 CO₂、H₂O 跨度和零空氣的測量結果。使用以下方程式計算儀器增益的漂移：

$$gain = \frac{span_{actual}}{span_{meas} - zero_{meas}}$$

- span_{actual} = 跨度氣體的已知濃度
- span_{meas} = 跨度氣體的測量濃度
- zero_{meas} = 零空氣的測量濃度。

在 ECMon 的零點和跨度視窗中，軟體通過露點溫度和當前環境溫度和壓力來計算 $\text{span}_{\text{actual}}$ 。如果 CO_2 或 H_2O 零點或跨度的漂移過大(超過 5%)，可能需要更換脫濕劑和 CO_2 吸收瓶。

12. 當零空氣測值穩定時，在 ECMon 的零點和跨度視窗中點擊 “Zero CO_2 and H_2O ” 按鈕。
13. 移除零空氣，接上 CO_2 標準氣體。保持氣體流速在 0.4 至 0.6 LPM 之間。等待讀數穩定。
14. 在零點和跨度視窗中，輸入已知的 CO_2 濃度 (以 ppm 表示) 在標有跨度濃度的框中，然後按下跨度按鈕。
15. 接上已知露點的 H_2O 跨度氣體。保持氣體流速在 0.4 至 0.6 LPM 之間。等待讀數穩定。
16. 在標有跨度露點的框中輸入已知的露點 (以 $^{\circ}\text{C}$ 表示)，然後按下跨度按鈕。
17. 零點和跨度程序現在已經完成。移除校正套管，重新連接 IRGASON 溫度感測器，恢復正常觀測。

表 4-23 水氣(H_2O)、二氧化碳(CO_2)及三維音波風速計分析儀維護

項目	檢查/校正週期	目的/標的	方法
a. 儀氣狀態檢查			
H_2O / CO_2 signal	每 3 天	清潔 IRGASON 氣體分析儀的鏡面，使雷射訊號> 80%	使用異丙醇(2-丙醇/異丙醇)和棉花棒、不刮傷鏡面的紙巾或布料
b. 耗材更換			
乾燥劑	檢查：每月 更換：每年 CO_2 偏移>30ppm, H_2O 偏移>1500ppm	降低氣體分析儀數值飄移(drift)	
除水網 (超音波風速計使用)		當水滴完全遮擋住三維音波風速計的感測器表面時，IRGASON 無法測量風速。	
除水網 (氣體分析儀)		水可能在邊緣處積聚並部分阻塞光路，減弱信號	
c. 校正/原廠校正			
氣體分析儀零點&跨度(zero & span)校正	新購儀器、新建位置：每月檢查 常規：每季檢查	校正環境的溫度與現場溫差小於 $\pm 6^\circ C$	ECmon 校正零點及斜率
風速計檢查	每季	確認風速計偏移小於 $U_x, U_y: \pm 8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ $U_z: \pm 4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	風速零點偏移檢查

(二) 甲烷(CH_4)分析儀維護方法

CH_4 參考機種為 LI-COR LI-7700，為開放式檢測系統(圖 4-48)，使用的雷射波長為 $1.61 \mu\text{m}$ ，LI-7700 需搭配以下配件才能正常使用：

- 溫度感測器 (熱電偶): LI-7700 所使用的溫度感測器其偵測時間解析度為 1 Hz，零件號為 9977-038。

- b. 輻射遮罩:建議使用原廠提供的最新版輻射遮罩，其下緣會比 LI-7700 上方的感測器低 2 釐米，可以保護上方的感測器比較不容易弄髒。
- c. 乾燥劑: LI-7700 上方的感測器裡面裝有乾燥劑，防止感測器裡面的電子零件因潮濕而損壞。
- d. 清潔套組:包含水箱儲筒以及馬達還有噴嘴。
- e. 校正腔體罩:在校正時用來隔絕外界空氣的遮罩，兩端各有一個氣體接口可以讓校正氣體流入和流出。
- f. 站立支架:當在室內使用 LI-7700 時用來支撐 LI-7700。

LI-7700 頂部有一個乾燥盒，裡面充填著藍色的乾燥劑，如乾燥劑太久(超過 1 年)沒更換將影響讀值。乾燥盒位於分析儀頂部圓形感測器的底部。當 LI-7700 在潮濕環境中使用時，建議每年更換一次乾燥劑。另外一個參考指標是參數 Optics RH 通常應該接近零。如果超過 30%，則表示是需要更換乾燥劑。LI-7700 配置有自動清潔工具，應根據每個站點條件進行調整，以最大限度提高數據覆蓋率並減少因鏡子旋轉、加熱和噴水馬達而引起的功率損耗。



圖 4-48 開放式甲烷 (CH_4)氣體分析儀 (LI 7700, Li COR, USA)



圖 4-49 LI-7700 乾燥劑位置示意圖(LI-7700 使用手冊)

為了避免凝結，建議使頂部鏡子的溫度比環境溫度高 0.5 至 1°C (加熱使用全功率的 5%至 20%)，並以約 10%的功率加熱底部鏡子。在每小時結束前每 10-15 秒旋轉一次底部鏡子，有助於保持鏡子清潔，延長手動清潔之間的時間間隔。

在 RSSI(相對信號強度)降到 25%或更低時啟動自動清潔工具(噴水加上旋轉底部鏡子)，如果清潔後，RSSI 未恢復到 40%以上，建議手動清潔鏡子(可以使用軟布搭配中性清潔劑或是酒精來進行清潔鏡子)。在清潔期間要將數據刪除。標記或刪除 RSSI 低於 20%時收集的數據。當 LI-7700 的 RSSI 降至 20%或更低時，觀測到的濃度值會受到影響，而當 RSSI 高於 25%時，觀測到的濃度值有一定的可信度。然而，若以通量的角度視之，建議以 40%為維護最低標準，否則觀測資料品質不佳建議刪除。

儀器校正偏移很小，因此通常每年進行一次校正就足夠了。在校正之前，應該先清潔鏡面。零點和跨度應該在實驗室中每年進行一次；不建議在野外校正，因為容易出錯。

零氣可以是不含甲烷的合成空氣或氮氣但是校正氣體一定要用空氣充填；濃度範圍是 2 至 10 ppm (標氣的準確度在 5%之內)；因為使用氮氣充填的甲烷校正氣體進行校正會影響光譜壓力延展並產生錯誤結果。

LI-7700 的整體準確性取決於其零點和跨度校正。建議使用品質良好的零空氣和標準氣體(標氣的準確度在 5%之內)，以下是零點校正的步驟：

1. 將 LI-7700 接上電源後連接到電腦。啟動 LI-7700 軟體並與儀器建立連接。
2. 移除輻射屏蔽罩：輻射屏蔽罩會非常緊密地安裝。不要施加過大的力量。
3. 安裝校正罩，確保它能夠完全封住頂部和底部的開口。
4. 將零氣連接到校正罩的接頭上。
5. 讓氣體通過校正罩流入。根據流量的不同，需要 10 到 30 分鐘的時間進行平衡，建議一開始先將氣體以 5 LPM 的流率通入 LI-7700 約 5 分鐘，之後將流率調整成 2-3 LPM，可以減少平衡時間。
6. 在校正視窗中點擊 “Zero CH₄” 按鈕。
7. 當儀器開始進行零點校正時，“Zero CH₄”會變為“Abort”。點擊“Abort”可終止零點校正程序。通常需要大約 10 秒鐘來完成零點校正。如果時間明顯較長，請檢查是否有漏氣情況或是檢查零氣的壓力是否充足。軟體完成零點校正操作後，選擇是否應用新的校正值或恢復之前的校正值。如果在接收到確認命令之前應用程式就關閉或 LI-7700 關機，新的校準值將不會被應用。
8. 進行跨度校正與零點校正基本上相同，只是需要在校正視窗上輸入跨度氣體的濃度（ppm）。建議選擇一個略高於環境濃度(~ 2ppm)的甲烷標氣濃度。跨度校正的步驟可以參考零點校正步驟。

(三) 氧化亞氮(N₂O)分析儀維護方法

氧化亞氮(N₂O)通量檢測儀參照機種為 Aerodyne TILDAS(圖 4-50)，為閉路式偵測系統，採用中紅外量子級雷射技術監測大氣中的微量氣體，雷射的波長為 7.87μm。具有抽氣裝置，需要每個月清潔和檢查防雨帽和防蟲網，以防止堵塞。依據當地的環境條件(如：空氣品質)以及進氣壓力和流量測量結果來決定是否需要更換過濾器。以霧峰農試所場域為例，每個月需要更換一次過濾器。進樣管路的部分建議至少每兩年更換主要進氣管道，但也應在可見污濁時進行更換。在更換管道之前和之後，必須進行參考氣體測量和流量測量，並將結果記錄下來。在更換進氣管道的同時，檢查系統是否存在漏氣問題，可以將零氣通入系統進行溢

流測試來進行檢查。



圖 4-50 閉路式氧化亞氮氣體分析儀: TILDAS, Aerodyne Research Inc., USA

TILDAS 的雷射強度(Laser Range)會隨著時間而降低，可能的原因有雷射強度自然衰退和腔體內的鏡面髒汙，如果是因後者造成的雷射強度降低，需根據當地的環境條件以及雷射強度降低的幅度來決定是否需要做鏡面清潔。做鏡面清潔時須注意不能使用任何的機械力以免造成鏡面鍍層的損壞，建議用超高純度乙醇(純度> 99.7%以上)對鏡面做噴洗，然後用零空氣將表面髒污吹除或是等乙醇自然揮發並帶走髒汙的物質，因為清潔鏡面需要將整個腔體移出 TILDAS，當鏡面清潔完成之後須做光路的調整維持雷射的強度。

真空馬達需要持續運行以保持測量腔體的低壓。當馬達連續運行時，馬達內的聚四氟乙烯密封圈會因使用時間而磨損。一些馬達具有工作時間計數器，而其他則沒有。如果沒有計數器，建議每 14-16 個月更換一次密封圈。這可以通過使用維修套件手動更換，或將馬達送回製造商進行更換。更換密封圈後，必須確認馬達恢復到與更換前相似的性能。定期更換密封圈可以避免馬達故障後聚四氟乙烯粒子污染測量馬達。另外，使用長管道將分析儀和馬達分隔開也可以避免碎片逆流造成的問題。

TILDAS 有自動通入零氣校正光譜零點的功能(ABG)，建議每小時通入約 20-25 秒的零空氣校正光譜零點，每三個月通入一次校正氣體做濃度的確認，校正氣體一定要用空氣充填且濃度範圍是 0.3 至 0.4 ppm(標氣的準確度在 10% 之內)。

TILDAS 不像其他設備可以透過軟體來修改斜率和截距值，所以需記錄每次做校正氣體和零空氣時的濃度自行計算出斜率和截距值，在資料處理時將真實濃度修正回來。以下是原廠手冊建議的每日檢查項目：

1. 檢查軟體有執行到正確的模式(Stream Mode)。
2. 檢查雷射的溫度和電流：因為有使用 Frequency lock 功能，系統會自動調整雷射溫度來維持鎖定我們的目標圖譜，通常系統自動調整的雷射溫度會小於 0.1°C，除非我們更動了冷卻系統的設定溫度。
3. 檢查雷射強度：以下幾種是可能造成雷射改變(降低)的原因
 - a.冷卻系統設定溫度改變，需等到冷卻系統溫度達到平衡。
 - b.重開機(冷機時)會需要大約 1 小時的暖機時間。
 - c.當執行 Frequency lock 功能，系統會自動調整雷射溫度。
 - d.當進行設備搬運時，光路可能會受到影響.可以重新調整光路。
4. 檢查過去一天的資料。
5. 檢查腔體內的壓力：確認壓力是否在我們設定的範圍且是否穩定。
6. 檢查流量。
7. 檢查腔體內的溫度。
8. 檢查擬合圖譜的品質：確認偵測到的圖譜(綠色)以及擬合圖譜(藍色)是否一致，如果不一致，可以重新執行 Frequency lock 功能，如果還是不一致，就進行雷射調諧(tuning rate)速率的調整。
9. 檢查過濾器：當需要時更換新的過濾器。
10. 檢查雷射冷卻系統的冷卻液液面：雷射冷卻系統是一個封閉系統，冷卻液液面在短時間內不應該會劇烈下降，如發生要立即停機檢查測漏。
11. 檢查軟體設定：[wd], [ass], [flk4]應保持開啟狀態。
12. 檢查所有排程程序是否有正確啟動。

(四) 校正氣體規格與存放

針對本研究使用校正氣體的規格，因三種溫室氣體($\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$)在大氣中的背景濃度差異，所以在氣體廠商配置時的準確度規格不同， CO_2 和 CH_4 校正氣體的準確度需在 5%之內； N_2O 校正氣體的準確度需在 10%之內。校正氣體所使用的充填氣體必須是空氣以符合在一般場域條件下對於通量的觀測，所有校正氣體皆須可以追溯到環境部或是 NIST 等級。校正氣體的濃度範圍建議在背景濃度的 0.8~5 倍之間，校正氣體需存放在通風良好且不會受到直接日曬的場地，最好可以放置在有空調的場地。

(五) 溫室氣體通量檢測系統性能測試程序

本團隊於先期計畫參照 ICOS 大氣測站的設備測試規範中建立出溫室氣體通量檢測系統性能測試程序，先期計畫以溫室氣體濃度監測儀器來開發及驗證測試程序，本年度計畫將以通量檢測系統來進行，測試程序分成濃度校正與精密度測試及再現性測試。

1. 濃度校正

分析儀器要進行精密度和再現性測試之前要先做濃度校正，此程序需取得可以追溯到 NIST 等級的氣體標準品，作為配製濃度上限，零級氣體作為濃度下限，進行校驗樣品配製。

濃度校正的濃度範圍根據過去三年在農業溫室氣體通量檢測場域得出三種不同溫室氣體真實濃度的 0.025%濃度值乘以 0.8 當成最低濃度點，三種不同溫室氣體真實濃度的 97.5%濃度值乘以 2~3 當成最高濃度點，包含零空氣至少配製出三個以上的不同濃度氣體校驗樣品，最後實際進行多點校正的標氣濃度如表 4-24。

根據先期計畫的經驗，從濃度校正到後續的精密度以及再現性的測試方法，一律採用直接將標準氣體鋼瓶接上浮球流量計或是氣體稀釋器控制到測試設備

所需要的流量，再接上一個三通連接頭以 over-blow (通入比所需設備流量還高的流量並且讓多餘的氣體透過三通連接頭直接排到大氣)的方式將標準氣體通入分析儀器，這個測試方法的缺點就是會用掉大量的標準氣體，以一瓶 30L 的三合一 ($\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$) 標準氣體大約要花費 3 萬元以及約一個月(以上的)訂購時間，大概只能做到一到兩次完整的濃度校正和精密度以及再現性實驗。例如 Tildas 設備的流量為 12 -12.5 lpm，我們就會將浮球流量計調整為 13 lpm 的輸出，並且持續通氣達到穩定，三分鐘內側值的變動幅度小於 1%，即為穩定，取穩定的測值做 1 分鐘平均值，做出包含零點和至少三個不同的校驗樣品濃度點的校正檢量線，檢量線的 R^2 值需大於 0.95，如果小於 0.95 即重新進行濃度校正直到做出的檢量線達到規範，圖 4-51 為符合規範的校正檢量線。當通量設備到目標場域開始做通量觀測後，建議每一年做一次的濃度校正(多點)，濃度確認(單點)的部分建議每一季或是每半年做一次，以維持數據品質。

表 4-24 三種不同溫室氣體的校正曲線實際濃度配製點

$\text{CH}_4(\text{ppm})$	$\text{N}_2\text{O}(\text{ppm})$	$\text{CO}_2(\text{ppm})$
0	0	0
1.39	0.211	298
1.67	0.304	381
1.86	0.405	449
2.78	0.59	793
6.74	0.981	996

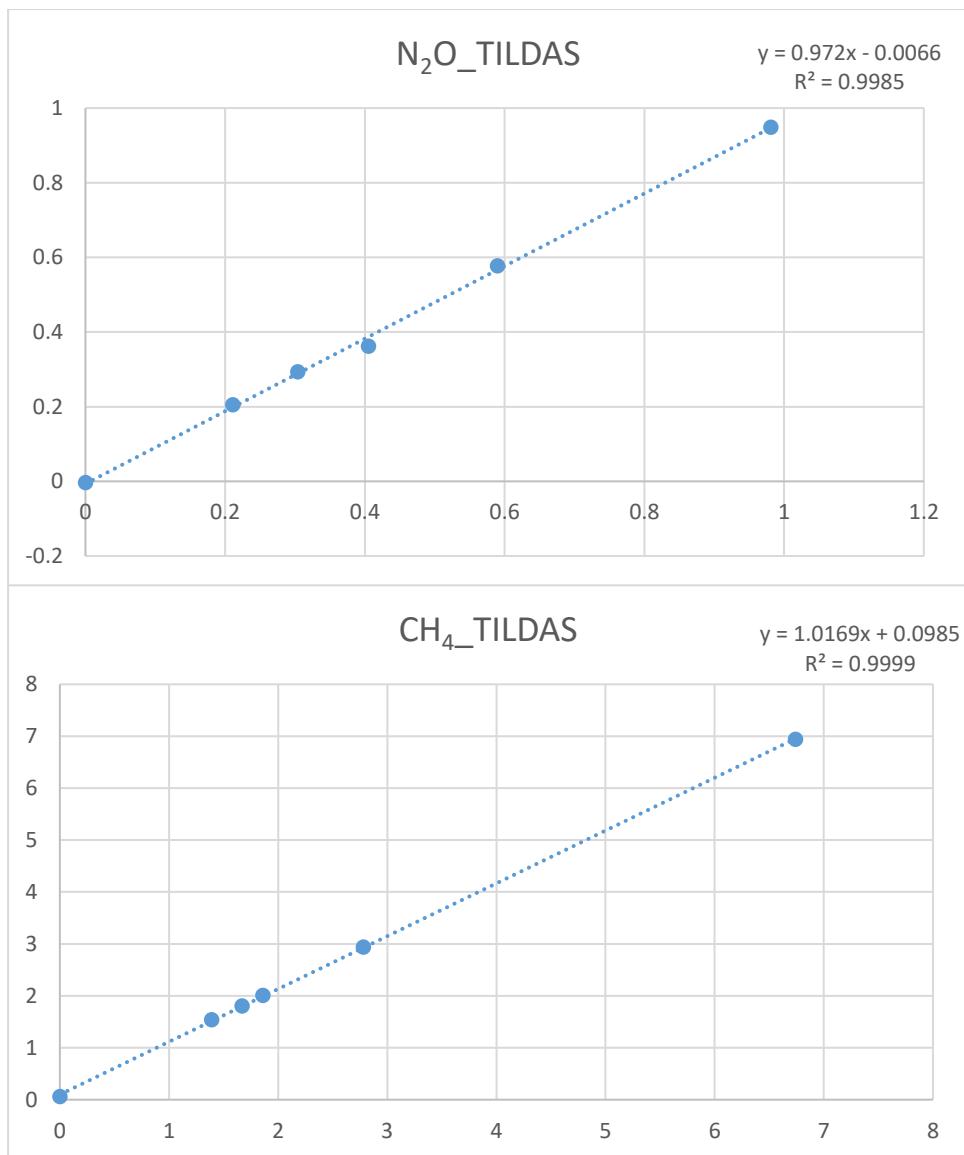


圖 4-51 氣體分析儀器 Tildas 對於兩種不同溫室氣體 N₂O / CH₄的濃度校正結果。

2. 精密度測試

本計畫參採 ICOS 大氣測站規範 (ICOS Atmospheric Station specifications Version 2.0 - September 2020)擬定的精密度測試方法如下：將配製完成的校驗樣品連續通入分析儀器超過 25 小時以上，第 1 小時為分析儀器穩定時間，取剩下的 24 小時資料來做 1 分鐘以及 60 分鐘的標準偏差。儀器規格的參考標準為 ICOS 生態測站的 CH₄ 和 N₂O EC 觀測指南(TURBULENT FLUXES CH₄ & N₂O Version:

20240325)與 CO₂ 的 EC 觀測指南(TURBULENT FLUX CO₂ & energy Version: 20240119)，這兩份指南除了清楚描述 CO₂、CH₄、N₂O 觀測設備的架設和維護，也訂出了這三種測項的設備規範(精密度 RMS@10 Hz)，對 CO₂、CH₄、N₂O 來說分別是 110 ppb、10 ppb、1 ppb。當通量設備到目標場域開始做通量觀測後，建議每一年做一次的精密度測試，以維持數據品質。

本計畫依上述規範對現有的通量設備進行測試，圖 4-52 為以 Aeris 的 Ultra 分析儀為例之測試資料，個項儀器的測試結果綜整如表 4-26，除了 Aeris 的 CO₂ 測項之外，其他設備的所有測項都符合 ICOS 生態測站的設備規範，Aeris Ultra 可能是因為將 CO₂ 和 N₂O 放在同一台設備做觀測，因為要優化 N₂O 的觀測光譜結果而導致 CO₂ 的觀測結果稍微差了一點。

表 4-26 氣體分析儀器 IRGASON&LI-7700&TILDAS&Aeris-UltraICOS 精密度測試結果

	CO ₂ Ppb	CH ₄ ppb	N ₂ O ppb
ICOS 建議範圍	≤ 110	≤ 10	≤ 1
ICOS Ecosystem Instructions			
TURBULENT FLUX		ICOS Ecosystem Instructions	
CO ₂ & energy		TURBULENT FLUXES CH4 & N ₂ O	
參考文獻來源	Version: 20240119	Version: 20240325	
Campbell IRGASON	62.4	-	-
LI-COR LI-7700	-	5	-
Aerodyne TILDAS-CS	-	3.9	0.9
Aeris Ultra	189.1	1.68	1.42

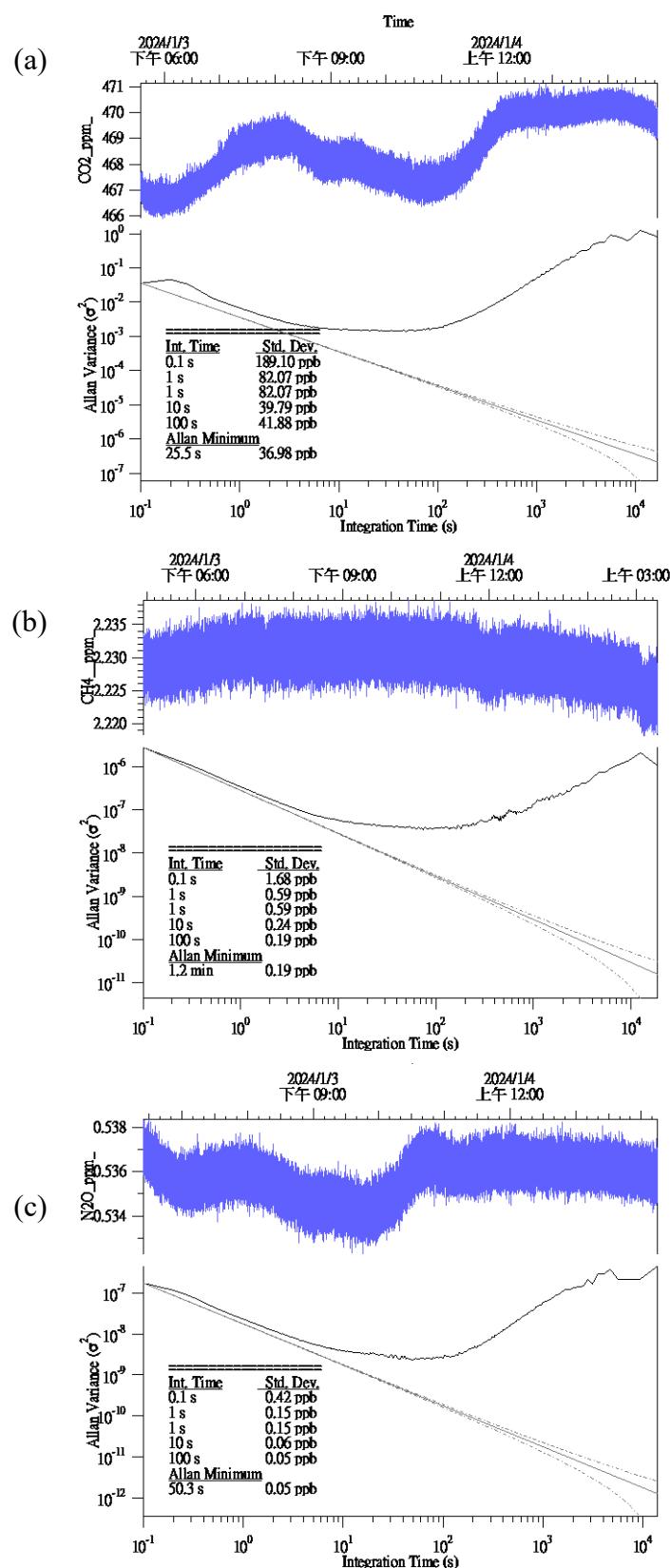


圖 4-52 Aeris_Ultra 精密度結果。(a)CO₂、(b)CH₄、(c)N₂O

4.2.3 數據品質校驗方法

(一) 涡流相關法原理(Eddy Covariance Method)

通量測定主要是以渦流相關法為基礎，並根據泰勒假設(Taylor's hypothesis)原理。因環境中存在許多紊流現象，紊流是由許多大大小小不同尺度的渦流(eddy)所組成。每一個渦流擁有三維的立體結構，並同時具有水汽、熱能及化學組成的差異。該理論假設當渦流通過偵測器時可視為凝固狀態，其物理性質(溫度、濕度以及空氣密度)可視為定值。因此，研究人員只需要透過單點、且連續觀測渦流的現象即可得知當時候渦流內部的物理量變化。此外，為了能具體了解整個紊流現象(Reynolds, 1894)，可透過雷諾分解(Reynolds decomposition)理論來進一步描述並計算。

紊流現象可以被認為是一段時間內平均值上下擾動的部分，也就是說在紊流中的每一個物理量，皆可以拆解成平均量和變異量(Stull, 1988)。如圖 4-53; 4-54，以某個瞬間之二氧化碳濃度 (s) 及垂直風速(w)為例，可拆解成平均項及變異項 (Eq. 2& 3)。

$$s = \bar{s} + s' \quad (2)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (3)$$

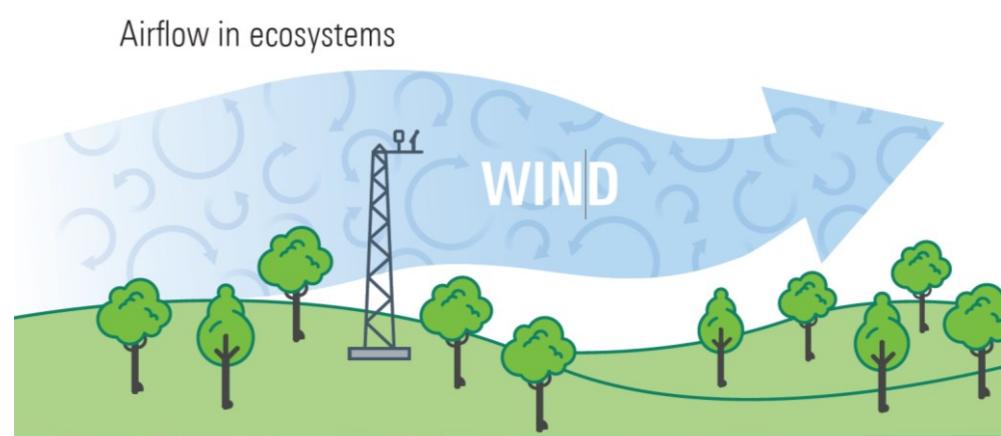
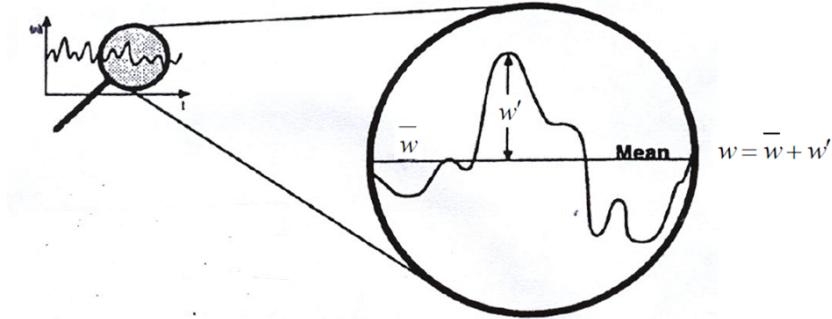


圖 4-53 生態系統中渦流示意圖



資料來源: Stull, (1988); 吳致甄 (2009)

圖 4-54 雷諾分解(Reynolds decomposition)理論示意圖

環境中的通量主要是在描述通量在垂直的變化，根據紊流的假設， ρ_d 為空氣密度， w 為垂直風速， s 為微量氣體之混合比或莫爾濃度(乾空氣狀態下)，其通用的公式可以表示為(Eq. 4):

$$Flux = \overline{\rho_d w s} \quad (4)$$

根據雷諾理論，將各項分解平均項跟變異項(Eq. 5)。由於渦流運動是隨機的，根據雷諾理論紊流經長時間平均後將會為零 $\overline{w'} = 0$ 及 $\overline{s'} = 0$ ；此外，雷諾假設在一般大氣條件下，地形均勻且平坦，可假設空氣流場具有不可壓縮流，可忽略渦流氣團密度變化 $\overline{\rho'_d} = 0$ 、 $\overline{\rho_d}$ 為定值所以，瞬間平均氣體通量可以表示如(Eq. 6)。

$$Flux = (\overline{\rho_d} + \overline{\rho'_d})(\overline{w} + w')(\overline{s} + s') \quad (5)$$

$$Flux = \overline{\rho_d} \overline{w s} + \overline{\rho_d} \overline{w' s'} \quad (6)$$

第二個重要假設，平坦地形上無幅合(convergence)及幅散(divergence)，即平均垂直風速應為零($\overline{w} = 0$)。最後上述公式可改寫為(Eq. 7)。由上述結果可以得知，渦流相關法之通量計算即為欲測物質之濃度($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}, \text{H}_2\text{O}$, etc.)與垂直風速之共變異量乘積(Lee et al., 2005; Mason, 1994; Stull, 1988)。

$$Flux \approx \overline{\rho_d} \overline{w' s'} \quad (7)$$

由於地表層氣體交換或是擴散是由大大小小渦流所生成，也因垂直風速與濃度瞬變量非常快速，必須使用高速反應之偵測器來執行。典型高速採樣器採樣頻

率可達 1-20 Hz，為符合小渦流監測需求，並避免樣品採樣標準差過大，至少設定 10Hz 為基準進行高頻採樣。

(二) 資料處理流程

制定相關標準檢測方法以提升數據解讀的一致性及可比較性，數據資料處理流程包含原始資料的檢視、資料前處理以及後續通量的品質檢定等，以確保該資料是否合乎觀測標的以及場域要求。相關數據資料處理流程如圖 4-55 所示。



圖 4-55 數據資料處理流程

(1) 原始資料蒐集&檢索(Data collection and retrieval)

本研究觀測資料種類繁多，為維持數據品質及穩定性，因此選用 CAMPBELL 的 CR1000X 資料紀錄器來記錄，此紀錄器適配本研究使用之各項觀測儀器，且使用其搭配之應用程式 LoggerNet 以固定頻率紀錄數據並可隨時檢查數據品質。

紀錄之資料會先暫存於紀錄器中並可透過以下三種蒐集數據之方式蒐集，第一種是以網路線連接至電腦並每日定時回傳資料，其優點上傳速度快且最為方便整理數據，第二種是以 micro usb 傳輸線連接電腦，此方式需手動下載資料，數據過大時下載速度緩慢，第三種為使用 SD 卡安裝於紀錄器上，此方式亦可設定定時寫入數據但需定期更換 SD 卡以防記憶體用盡，本研究以網路收集數據為主，

可定時上傳資料以減少人工收集之時間成本。數據格式為.dat 檔，若直接下載紀錄器中檔案可能會格式不符，此時可利用 LoggerNet 中的 CardConvert 轉檔即可。

(2) 單位轉換(Unit conversion)

單位轉換涉及所有儀器所輸出的資料是否為高頻，且所使用之單位是否合乎未來通量計算之要求。由於通量檢測所需儀器包含高頻氣體分析儀、音波風速計、資料紀錄器等設備，假如氣體分析儀所輸出以高頻資料呈現，則其他儀器需要與氣體輸出頻率一致，包含溫度、含水量以及氣體壓力等資料，否則未來將造成通量計算上的誤差(Burba, 2021; Lee et al., 2005)。

(3) 消除資料異常值(Despike)

原始資料(Raw data)處理過程經常會發現某些資料過大或過小，通稱為異常值(Spike)，這些異常值常發生於儀器本身記錄過程(e.g.開放式分析儀遇強降雨等)，或是紀錄器本身雜訊(Instrument malfunction)(鄭丞孝, 2013)。資料處理流程所採用方式如下：

- (1) 原始資料在消除異常值前，需先檢視是否需進行單位轉換，並根據所選擇的時距(30 min)進行資料切割。
- (2) 檢視資料周期內(30 min 時距)如大於 3-8 倍標準差，則該筆資料將被移除(圖 4-56)。數據處理人員應時常檢視原始資料，確保資料移除標準仍適用並應注意避免設定太嚴格的資料移除標準導致太多資料缺值的問題(Burba, 2021, 2013)。

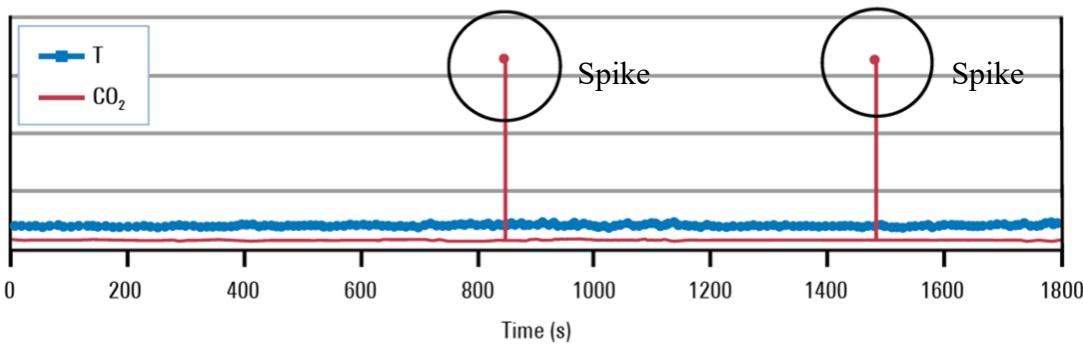


圖 4-56 消除資料異常值示意圖 (Despiking)

(4) 消除資料趨勢性(Detrend)

渦流相關法所觀測到的溫度、密度水氣等資料容易受日變化或其他大氣變化而改變資料統計特性。因此，在資料處理過程需將平均時距內的變化修正。資料處理方式將根據時間周期內的資料，以線性方程式進行迴歸(Burba, 2021; Lee et al., 2005)。

(5) WPL 校正 (Webb-Pearman-Leuning calibration)

WPL 校正主要由 Webb, Pearman 及 Leuning 在 1980 年發現，計算通量必須考慮濕空氣之熱含量、溫度以及垂直風速之共變異量。主要目的是為了補償因環境中熱通量以及水氣通量的存在而導致量測物質密度瞬變量的變化(圖 4-57)。除非儀器本身可以直接輸出高頻乾基摩爾分率(dry mole fraction)的資料，則乾空氣所組成之平均垂直通量為零 $w\rho_a$ (Eq. 8)。否則一般在濕度較高或是溫暖的環境必須再加上因為熱通量以及水氣通量的貢獻量(Eq. 9)，WPL 校正公式如下所示(Burba, 2021)。

F_c 為 WPL 校正後的通量值， ρ_a 為空氣密度、 c 為某微量氣體濃度、 T 為空氣溫度、 w 為垂直風速、 ρ_d 為乾空氣密度、 ρ_c 為物質密度、 ρ_v 為水氣密度， μ 為空氣與水摩爾比($\mu = 1.6077$) (Burba, 2021, 2013)。

$$F_c = [\overline{w' \rho'_c} + \mu \frac{\overline{\rho_c}}{\rho_d} \overline{w' \rho'_v} + \left(1 + \mu \frac{\overline{\rho_v}}{\rho_d}\right) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w' T'} - \overline{\rho_c} \left(1 + \mu \frac{\overline{\rho_v}}{\rho_d}\right) \frac{\overline{w' p'}}{\overline{p}}] \quad (8)$$

↑
↑
↑
↑
某物質密度的 水氣濃度稀 热力浮力項 壓力修正項(此項貢獻相當少
渦流相關項 釋項 因此忽略不計)

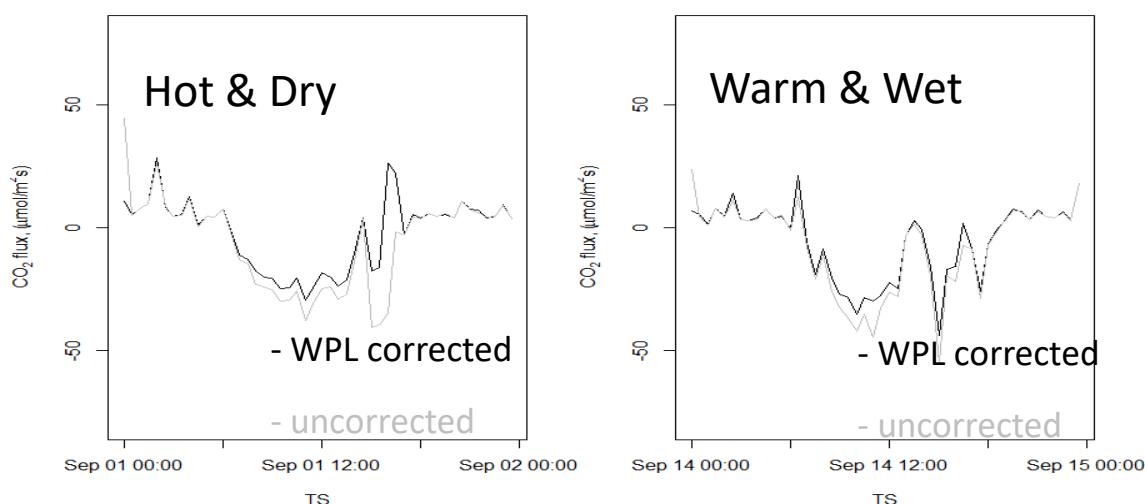


圖 4-57 WPL 通量校正前後示意圖

(6) 時間延遲校正(Time delay calibration)

此一步驟通常發生於閉路式(closed path)氣體分析儀因取樣管路傳輸需耗費較長的時間，導致分析資料無法與風速計量測時間同步。而開放式(open path)分析儀所造成的延遲部份是由於分析儀和風速計之間的距離差異，相對於其風速以及風向的資料上的落差。值得注意的是，如果採集相對黏性較大的氣體(e.g. NH₃)，會在管柱所造成延遲高於 CO₂ 及 CH₄。上述所發現到的時間延遲可透過兩變量交叉相關(Cross correlation)分析方式進一步校正(圖 4-58)(Burba, 2021, 2013)。

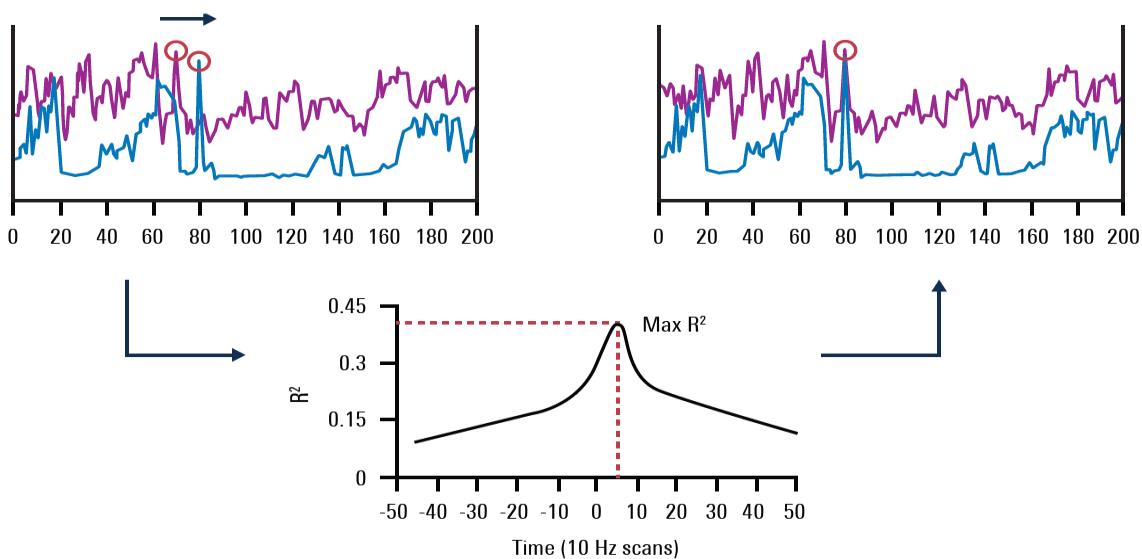


圖 4-58 時間延遲校正示意圖(Time delay correction)

(7) 座標軸旋轉(Double rotation)

為了修正人為或地形因素所造成的傾斜角誤差，該步驟將強制旋轉座標軸以符合風場與理論假設。理論推導過程中採用到垂直方向上平均風速為零的假設，而現地所觀測到的風場並不會完全符合該理論假設。音波風速計觀測到垂直方向上平均風速不為零的情況有(鄭丞孝, 2013; 魏谷州, 2007):

- (1) 水平風向未與現地觀測風場地表平行。
- (2) 因研究區域內之地物造成垂直方向上平均風速不為零。
- (3) 儀器架設時，未能將儀器確實水平架設造成量測到平均垂直風速不為零。

由於上述三種情況皆會造成通量計算上的誤差，因此將採用二維座標軸旋轉(Double rotation)的方法，使風場符合理論假設。利用三維音波風速計測得卡氏三軸(x , y 與 z)相對於風速 u , v 與 w 。二維座標軸旋轉(Double rotation)描述方式如下:

(一)第一步驟

首先以 z 為旋轉軸，找出原 x 、 y 平面內水平向量的方向(longitudinal direction)，並進一步將其視為新的 x 軸向(x')，計算在該平均時距內沿著 x' 軸向上的水平風速，並計算其與原 x 軸向的夾角 θ 。因此，定義了新的 y 軸向 y' ，使得 $\bar{v}' = 0$ 。

其矩陣運算數學式可表示 (Eq. 10, 11):

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中， $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{u}}{\bar{v}} \right)$ (11)

(二) 第二步驟

以新的 y' 軸為轉軸，旋轉 φ 角。定義新的 x 軸與 z 軸分別以 x'' 與 z'' 表示，其風速分別為 u'' 與 w'' 。強制沿著新的 z'' 軸向上的平均風速為零，使得 $\bar{w}'' = 0$ 。其矩陣運算數學式可表示為(Eq. 12, 13):

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中， $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{w}}{\bar{u}'} \right)$ (13)

進行矩陣運算可以得到下式(Eq. 14):

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (14)$$

轉動座標軸後，可以得到新的三軸風速 u'' 、 v'' 及 w'' ，其中 v'' 及 w'' 兩項平均風速均為零。

(三) 資料品質控制(Data quality control)

通量資料經過前處理後，除了資料奇異值處理、座標軸轉換及時間延遲校正外，尚須檢視其他參數來確認當時大氣條件是否符合理論基本假設。由於資料品質好壞容易受到當時大氣環境差異的影響，特別是在夜間情況。夜間因為伴隨著風量較小、逆溫及熱分層不穩定，導致湍流沒有辦法充分發展。通常會透過摩擦速度檢核 (Friction velocity)、穩定性測試 (Stationarity test)、相似性分析 (Integral turbulence characteristics) 以及資料頻譜分析 (Cospectral analysis) 來檢核大氣條件以及紊流發展情形 (Foken, 2006; Foken and Wichura, 1996)。

相反的，相對穩定的情況下，通量足跡 (Flux footprint) 也可能快速增長，導致通量儀器所量測到的資料可能來自通量足跡外的資料。因此，可透過上述通量足跡分析的方式進一步濾除足跡以外的資料，確保通量品質的一致性以及穩定性。由於近地表能量平衡必須滿足能量守恆的概念，也可透過能量平衡式來檢視通量資料的品質 (Burba, 2021, 2013; Lee et al., 2005)。

(1) 摩擦速度修正(Friction velocity)

通量品質好壞容易受到當時大氣環境差異的影響，特別是在夜間情況。普遍使用摩擦速度修正法以合宜的篩選摩擦速度來確保資料品質優劣標準。摩擦速度的大小往往可作為紊流發展強弱的指標，根據定義可透過觀察夜間二氣化碳通量資料與相對應的摩擦速度分布圖來檢視之間的變化(Papale et al., 2006)。當摩擦速度增大，二氣化碳渦流通量也漸漸增加。隨著摩擦速度增大至一定數值後，即使摩擦速度持續增大，二氣化碳渦流通量也不會有太大起伏且趨於平穩。當二氣化碳渦流通量達一定平穩後，當時的摩擦速度即為欲求之摩擦速度臨界值。

該臨界值的意義為，當量測到的通量資料超過摩擦速度臨界值即代表當時紊流發展相當強烈且穩定，可以確定當時進出生態系之二氣化碳有強烈紊流得以輸送。反之，量測通量資料低於此指標即代表該時段的紊流相當微弱，通量資料可能受到限制，因此不足以採信。

(2) 穩定性測試(Stationarity test)

穩定性測試主要是由 Foken 跟 Wichura 於 1996 年發表文章所採用，主要是以統計的方式檢核當時大氣條件是否穩定(Foken and Wichura, 1996)。該方式是以統計方式比較了原始資料週期與所設定短時間週期，垂直風(w)與水平風分量(x)的共變異數。假設以 10Hz 觀測頻率來看，30 分鐘的時間序列共計 18,000 筆量測值 ($N=18000$)。短時間週期設定為 5 分鐘，5 分鐘共計有 3000 筆量測值($M=3000$)。參照以下公式進行共變量運算(Eq. 15, 16, 17)，最後進一步檢視兩個時間週期的相關性強度(RN_{cov})，如果差異小於 30%，即可認定為可接受的資料(Eq.18) (Lee et al.,

2005)。

$$(\overline{x'w'})i = \frac{1}{N-1} \left[\sum_j x_j w_j - \frac{1}{N} \sum_j x_j \sum_j w_j \right] \quad (15)$$

$$\overline{x'w'} = \frac{1}{M} \sum_i (\overline{x'w'})i \quad (16)$$

$$(\overline{x'w'})o = \frac{1}{M(N-1)} \left[\sum_i (\sum_j x_j w_j) i - \frac{1}{MN} \sum_i (\sum_j x_j \sum_j w_j) i \right] \quad (17)$$

$$RN_{cov} = \left| \frac{(\overline{x'w'}) - (\overline{x'w'})o}{(\overline{x'w'})o} \right| \quad (18)$$

(3) 相似性分析(Integral turbulence characteristics)

相似性分析是根據莫尼(Monin)及奧克考夫(Obukhov)所提出的相似性理論，在水平方向地勢平坦且植被均質，當大氣穩態時可以由四個互為獨立的參數來決定，參數分別為地表高度(Z)、摩擦風速(u^*)、可感熱通量($H/\rho_a C_p$)以及浮力(g/T_a) (Monin and Yaglom, 1973; 魏谷州, 2007)。上述四個參數可以組合成一個無因次參數，該參數又被稱為大氣穩定尺度(ζ)，表示如下(Eq. 19):

$$\zeta = Z/L \quad (19)$$

L 稱為奧克考夫尺度長度(Obukhov's Length)，其數學關係式表示如下(Eq. 20):

$$L = \left(\frac{-u_*^3}{k \left(\frac{g}{T_a} \right) \left(\frac{H}{\rho_a C_p} \right)} \right) \quad (20)$$

u^* :為摩擦風速

g : 重力加速度，其值為 9.8，單位為(m/s^2)

C_p : 空氣比熱，其值為 1008，單位為($J/Kg K$)

T_a : 為空氣平均溫度，單位為(K)

奧克考夫尺度長度為近地表大氣中，剪應力與浮力效應相同時，距離地表的高度。當地表溫度高於大氣溫度時，可感熱通量向上傳遞($H > 0$)，這時候大氣處於不穩定的狀態($L < 0$; $\zeta > 0$)。同理，當地表溫度低於大氣溫度時，大氣處於穩定的狀態，奧克考夫尺度長度大於零，大氣穩定尺度($L > 0$; $\zeta > 0$)。當大氣穩定

尺度(ζ)接近零時，此時大氣是處於穩定與不穩之間的中性狀態，當大氣穩定尺度(ζ)遠小於1時，表示觀測點受到浮力效的影響比剪應力的效應重要(Monin and Yaglom, 1973)。

此外，大氣中的物理量，其標準差在地勢平坦、植被均質以及具有定常性的大氣條件下，依據莫尼(Monin)及奧克考夫(Obukhov)提出的相似性理論，可以表示成下列數學式(Eq. 21)(Lee et al., 2005; Monin and Yaglom, 1973):

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = \psi\left(\frac{Z}{L}\right) \quad (21)$$

σ_x :風分量的標準偏差

u^* :為摩擦風速

L:奧克考夫尺度長度

ψ :大氣穩定尺度函數

相似性分析是測試湍流條件發展的好方法，該相似性意味著垂直風向的標準偏差與其湍流通量的比值幾乎是恆定的或者是一個穩定的參數。上述通式(general form)必須滿足兩個條件：

- (a) 當大氣接近中性狀態時， $\frac{\sigma_x}{u^*}$ 必須趨近於一個定值。
- (b) 當大氣狀態為不穩定時，該通式必須不受摩擦風速(u^*)的影響。

能滿足上述二個條件的通式，其數學關係式表示如下(Eq. 22)：

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = C_1 \left(C_2 - \frac{Z}{L} \right)^{-1/3} \quad (22)$$

其中， C_1 與 C_2 為無因次的常數，當大氣接近中性狀態時($-Z/L \approx 0$)，方程式可改為，由此可知看出當大氣接近中性狀態時(σ_x/u^*)趨近於常數(Eq. 23)。

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = C_1 (C_2)^{-1/3} \quad (23)$$

當大氣為不穩定狀態時($-Z/L >> C_2$)，其數學關係式表示如下，也可從關係式得知，其不受到摩擦風速的影響(Eq. 24)(Lee et al., 2005)。

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = C_1 \left(-\frac{z}{L} \right)^{-1/3} \quad (24)$$

(4) 能量平衡式(Energy balance closure)

利用渦流相關法量測近地表通量也可透過能量平衡式來檢視通量資料的品質。由於近地表能量平衡必須滿足能量守恆的概念，因此 Wilson et al (2002)等人利用下列數學關係式描述地表面的能量平衡(Eq. 25)。而地表平衡的示意圖如圖 4-59 所示：

$$R_n + LH + H + G \approx 0 \quad (25)$$

G:土壤熱通量 (W/m^2)

H:可感熱通量(W/m^2)

LH:潛熱通量(W/m^2)

R_n:淨輻射通量(W/m^2)

淨輻射能量(R_n)主要為地表面吸收到的輻射能量減去反射回去的輻射能量稱為淨輻射能量。由於太陽主要以短波輻射的方式向地表面傳遞能量，部份的太陽短波輻射能量會傳到地表面，而部份的短波輻射會經過大氣產生散射、反射或是吸收等效應。除此之外，大氣也會透過長波輻射的方式將其所吸收的能量傳回至地表面。當地表面收到太陽的短波輻射時，會將部份的能量反射回去，此外地表面亦會以長波輻射的方式將能量向大氣傳遞。

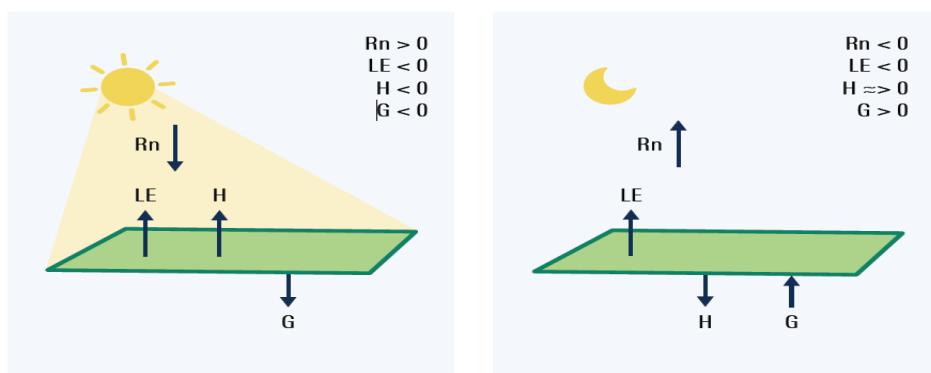


圖 4-59 地表能量平衡示意圖

土壤熱通量(G)主要因為土壤溫度梯度而產生的能量傳遞。當太陽照射在土壤表面，當表面的土壤吸收了部份日光能量之後會增加表層土壤的溫度。當上方土壤與下方土壤產生溫度差時，即產生溫度梯度，此時熱能會由上層土壤向下傳遞，而夜間則有相反的溫度傳遞過程。上述所提及淨輻射能量(R_n)以及土壤熱通量可透過淨輻射計以及熱通量板進行觀測(Burba, 2021, 2013)。

可感熱通量(H)主要因為地表吸收來自太陽與大氣所產生之輻射能，造成地表溫度上升使得近地表的氣溫也隨著地溫上升而改變。熱能可藉由空氣的流動而向上傳遞，其傳遞熱能的通量可透過渦度相關法計算(Eq. 26)。

$$H = \rho_a C_p (\overline{w' T_a}) \quad (26)$$

ρ_a :空氣密度，其可視為定值(1.168 Kg/m^3)

C_p :空氣比熱，其可視為定值($1008 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$)

w:垂直風速(m/s)

T_a :空氣溫度($^\circ\text{C}$)

環境中的「蒸發散」是地表與大氣間一個相當重要的現象，其不僅是陸氣間的交換，也伴隨能量的傳輸。當水分子吸收了來自外界的能量後，由原先的水(液相)轉變為水氣(氣相)，再經由地表相大氣傳輸的過程中所消耗的能量稱之為潛熱能(LH)。潛熱能可藉由空氣的流動而向上傳遞，其傳遞熱能的通量也可透過渦度相關法計算(Eq.27)。

$$LH = \overline{w' \rho_v'} \quad (27)$$

LH:潛熱通量($\text{Kg/m}^2\text{s}$)

w:垂直風速(m/s)

ρ_v :水氣密度(Kg/m^3)

(5) 資料頻譜分析(Cospectral analysis)

氣體通量頻譜分析有助於我們了解在哪些頻率下氣體通量可能被遺漏或量測不正確。大氣中紊流流場是由許多大大小小的渦流(eddy)所組成，渦流傳輸有

些以較高頻率完成，一些以較低頻率完成，整個頻率範圍可從小時為單位小至以0.1秒的渦流傳輸。資料頻譜分析即透過傅立葉轉換(Fourier transform)的方式使時間序列從時域轉為頻域來表示這個變化。當在一個穩定的風場，風不會受到鄰近物體干擾，可透過音波風速計以很小的誤差對風速以及溫度進行非常快速的採樣，從中可得到資料頻譜分析的理想的頻譜曲線(藍色)即以垂直風速和溫度($w'T'$)的協方差並透過傅立葉轉換方式來呈現(圖 4-60)。

從氣體通量頻譜分析結果也可發現，高頻的氣體通量資料(black dots)通常低於理想的頻譜曲線(藍色線)，該頻率損失主要是由於幾個原因所造成，包含儀器本身反應時間、閉路式儀器訊號雷射衰減、時間延遲問題等。理想頻譜曲線(藍色線)與實際通量頻譜曲線(紅色線)的比率可稱為校正因子 $nC(n)/\sqrt{w'x'}$ 。該校正因子可用來修正特定氣體通量在量測特定條件以及時間內的非理想頻譜的資料。可透過資料頻譜分析確認是否能觀測到所有尺度的渦流，並從中檢視儀器採樣頻率以及平均時距是否足夠，可做為檢查儀器觀測性能的有效指標。相關的傅立葉校正計算可透過 EddyPro 通量運算工具來檢視(Burba, 2021)。

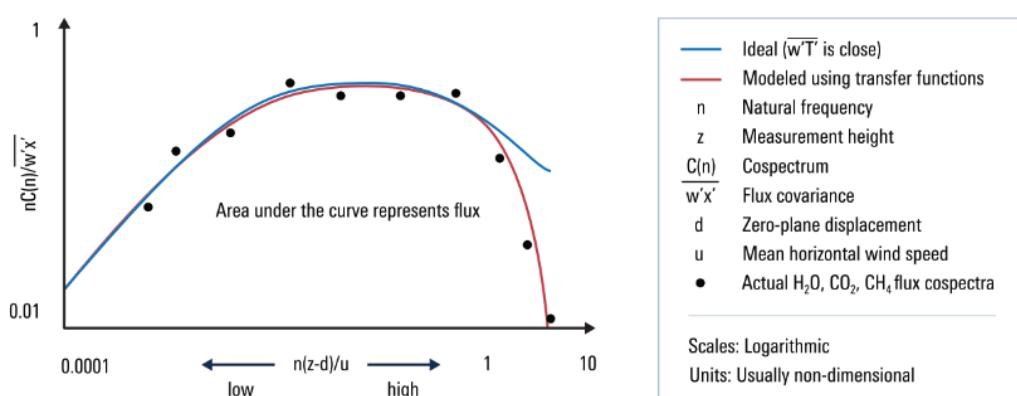


圖 4-60 資料頻譜分析示意圖

(6) 資料補遺(Gap filling)

連續的渦流相關法進行長時間觀測，勢必遭逢因大氣紊流環境因素等條件變化導致資料缺漏、品質不佳必須剔除致使資料不完整。為了獲得完整的資料，必

須尋求一套解決、補遺的方法。雖然歐洲綜合碳觀測系統(ICOS)測站建議採標準化方式進行資料補遺，但實際仍尚無採用一致性的方式進行資料補遺，主要因為季節差異、測站的差異性以及不同的環境驅動因子和排放模式的複雜性，因此難以以固定一種方式在各測站中實施(Nemitz et al., 2018)。

相關方法包含過濾取徑(filtering approach)，該方法主要是先建立合理的資料篩選標準，篩選完後以品質最佳的資料作為描繪生態系二氧化碳通量的代表。並將此資料與當時對應的環境因子(溫度、光合作用有效輻射等)建立關係模式。之前缺漏的資料或是剔除的資料即透過該關係模式進行推估，然後取代補遺缺漏的資料(Baldocchi et al., 2001; 吳致甄, 2009)。較短的資料缺漏可透過線性插值(linear interpolation)的方式來填補資料，或是利用每周的資料為區間(weekly time window)採移動平均(running average)的方式進行填補(Nemitz et al., 2018)。

(7) 隨機通量觀測誤差(Random flux error)

透過渦流相關法檢測需進一步檢視相關觀測要點，包含氣體分析儀的檢測極限，該檢測極限並非實驗室條件下最靈敏的分析性能，而是現地實際檢測情況。因此須進一步檢視通量觀測誤差，以及相關文獻資料比對其他生態類型或陸域GHGs 收支的相對貢獻以及相關性。隨機通量觀測誤差(random flux error)可透過通量的檢測極限以及現地儀器的雜訊來計算(Eq.28)。

$$RE = \sqrt{\frac{(\sigma_c^{noise})^2 \sigma_w^2}{N}} \quad (28)$$

σ_c^{noise} :儀器的雜訊資料

σ_w :垂直風速的標準偏差

N: 30 分鐘時距為基準的 10Hz 資料數量

4.3 溫室氣體通量檢測指引

本計畫綜整相關資料以及實際的操作經驗編撰溫室氣體通量監測指引草案，本節僅擷錄重點，完整版本列於本成果報告附錄。

(一)前言

大氣中溫室氣體濃度的影響以及差異可歸因於地域、季節、生物、非生物以及環境因子之調節，也因人為干擾日趨嚴重，全球碳平衡產生很大變化。近年來「2050 淨零排放」的政策目標及《氣候變遷因應法》之相關規範，全國政府的各部門正透過強化法規與改善政策的方式來面對全球日趨嚴峻的氣候變遷。

減緩溫室氣體已是國際間許多國家或企業推動之共同努力之目標，其中以大氣中溫室氣體濃度變化趨勢以及水氣、能量收支為目前最關注的焦點。然而，溫室氣體生命週期非常長，持續監測並瞭解都市環境、農業場域、森林生態系統和大氣之間的交互作用至關重要。由於現今所監測到的溫室氣體濃度是過去長期累積的結果，因此減量措施所產生區域(碳源、碳匯)效益變化無法透過濃度資料來檢視與呈現減量成效。況且目前國內尚未有簡單、完整且可靠的技術來進行較準確且大範圍「面」的各種溫室氣體排放通量監測。

有鑑於此，本指引參考 LI-COR Biosciences 通量測站架設方法、歐洲綜合碳觀測系統(Integrated Carbon Observation System, ICOS)測站認證標準及國際上各個通量觀測網絡，並以開放式農業(open farmland)通量監測場域為例，提供國內三種溫室氣體(CO_2 、 CH_4 及 N_2O)通量監測系統架設、適用範圍、設備及材料、通量監測執行步驟、基礎設施與人力需求配置提出建議以及如何進行現地測站之維護。透過本指引可初步應用於評估監測場域對溫室氣體短、中期的影響，進而提供未來更為準確的環境調查資料供政策擬定之參考依據。

(二) 涡流相關法通量監測工作流程

下圖 4-61 提供典型通量監測完整工作流程架構與所需的操作順序，通量監測工作分為四個主要階段：實驗設計、場域架設、原始數據處理及通量數據處理與分析。

- (1) 實驗設計階段包含儀器選擇、軟硬體需求或調整現有的軟體來收集和數據處理、合適場域選擇(通量塔位置)以及建立可行的儀器設備維護計畫。
- (2) 實施階段主要內容為通量塔設置、資料蒐集和檢索測試、數據處理測試以及持續遵守儀器設備維護計畫。
- (3) 資料處理部分包括「原始(raw data)」資料的處理以及「通量(flux)」資料處理。原始數據資料通常為 5、10 或 20 Hz 取樣頻率，數據平均時距的處理（通常為 0.5 小時）。其他處理內容包括單位轉換、消除數據歧異值、數據校正、座標軸旋轉、時間延遲校正、數據去趨勢、其他數據資料校正程序。通量資料處理程序包括需進行資料品質控制、數據補遺、最後進行數據成果解析。



圖 4-61 涡流相關法典型通量監測工作流程

(三)開放式及閉路式通量監測系統

開放式和閉路式通量監測系統的安裝、校準和通量計算方法有所不同。因此，

必須了解兩種類型觀測系統的優點和缺點，以便使用者選擇最合適觀測的系統。開放式和閉路式通量監測系統在安裝、校準和反應頻率特性方面的差異分述如下：

(1) 開放式通量監測系統架設

開放式監測系統可直接暴露於大氣中對氣體進行濃度分析，卻容易受外在環境的影響，例如大雨、雲霧、鳥類糞便及鳥類滯留等，常造成儀器無法正常運作或是資料錯誤等。反之，閉路式監測系統則是利用抽氣幫浦將氣體抽入取樣管，氣體隨著取樣管從塔頂至分析儀器進行分析。

氣體經過取樣管傳輸需耗費較長的時間，容易導致分析資料無法與風速計量測時間同步。在塔觀測中，塔本身和塔上的儀器可能會造成嚴重的流量畸變，因此在塔上安裝通量感測器時需要注意，以便將誤差控制在可接受範圍內。Kaimal 和 Finnigan (1994) 提出了一些開放式分析儀安裝的建議，彙整如下(Kaimal & Finnigan, 1994)：

- 為了避免塔的直接影響，建議從塔頂部直立一根細桿，在桿的末端安裝感測器。為此，請選擇長度至少為塔架寬度 3 倍的桿。
- 如果感測器必須安裝在塔架的中間高度，則應將臂桿沿盛行風向水平伸出，並將感測器安裝在距離塔架最大塔寬 1.5 倍以上的位置。
- 由於塔架的背風面受到尾流的強烈影響，因此在分析時應排除以塔架風道為中心的 60°風向段所收集的資料。
- 感測器附近或背風面不應放置儲物箱等障礙物，在安裝超音波風速計時，水平調整相當重要。應使用水平儀仔細進行調整，因為分析儀探測頭的傾斜會導致一些誤差。然而，如果探頭安裝在吊桿頂端，要達到仔細的水平調整會較為困難。在這種情況下，應在探測頭底座上安裝二維傾斜儀並測量傾斜角度，以便隨後校正探測頭傾斜度。
- 架設前，應將探測頭蓋上盒子，並檢查零風速輸出。如果使用開放式分析儀，量測頭部應置於與超音波風速計探測頭相同的高度。建議裝設方式應以不干

擾通過超音波風速計的風為優先考量。

- 風速計探測頭和其他儀器量測盡可能靠近，風速計與開放式分析儀觀測頭之間的間隔距離越大，頻譜的高頻分量衰減就越大，導致通量低估。對於由於感測器分離（路徑）引起的誤差，建議使用傳遞函數進行校正(Kaimal et al., 1972; Moore, 1986)。

(2) 閉路式通量監測系統架設

閉路式系統的設置通常比開放式系統的設置更為複雜。首先，將閉路式系統的進氣口固定在超音波風速計探頭附近，然後安裝一條管道將空氣輸送到分析儀。分析儀與幫浦和氣體開關裝置一起安裝在恆溫容器或室內中。在閉路系統中，空氣被吸入管中。因此，該取樣系統之 CO₂ 和水氣密度變動的時間序列落後於風速變動的時間序列。

因此資料採集後，須對兩個時間序列之間的時間偏移進行校正。由於當空氣通過管子時，密度變動的高頻訊號有可能產生衰減，因此如有必要應對頻譜進行校正。

閉路式系統允許將分析儀放置在溫度控制區域。因此，閉路式系統無論天氣條件如何都能穩定運行，因此被認為是相對於開放系統的優勢。透過定期給予分析儀特定標準濃度 CO₂ 氣體，可以一定的精度連續測量 CO₂ 絶對濃度值。這個精度比大氣 CO₂ 背景濃度測量的精度低一個數量級以上，但足以計算陸域值被冠層之 CO₂ 氣體的變動。如果閉路式系統安裝於作物等高植被上方，則分析儀可安裝在觀測塔離離地面的某個高度，在前一種情況下，進樣管的長度應最小化到幾公尺內。對於長度小於幾公尺的管道，由於使用管道而導致的時間延遲通常為 1 至 2 秒，對於 35 公尺 長的管道，通常為 4 至 6 秒。就管內流動而言，紊流流況較層流能更控制高頻成分的衰減，因此，通常會以高達 6 至 10 L min⁻¹ 的流速吸入空氣。當使用特別長的管子時，空氣以 20 至 50 L min⁻¹ 的速率從塔抽至分析儀附近，並且一部分空氣分支到分析儀中。

幫浦之設置可在分析儀的上游或下游。如果使用長管且需要高流量，則通常在分析儀的上游設置高功率幫浦。如果使用短管，則幫浦可以設置在分析儀的下游，以控制幫浦引起的壓力波動。在任何一種情況下，分析儀單元都不同於大氣壓力，因此通量計算需要氣壓修正。

管內需要安裝過濾器，用以保護進樣管本身和分析儀免受污垢和灰塵的影響。過濾器應偶爾更換。加熱器可以安裝在分析儀的管子或盒子中，以保持閉路系統中的溫度高於環境空氣，防止系統中形成露水。

(四)開放式農地場域微氣象(microclimate)背景條件篩選

氣象資料對於分析和解釋通量資料是必要的。氣象資料也用作模型填補通量資料空白所需的參數，在氣象感測器時，需要注意選擇安裝位置，以盡量減少對通量感測器的影響。對於通量觀測，需要一個儲藏箱或觀測棚來操作資料記錄器或個人電腦。棚子更加方便，因為它可以存放校準用的工具和氣體鋼瓶，但必須設定得不干擾觀測環境。例如，如果在塔附近設置棚子，觀測棚屋頂的影響可能會出現在淨輻射、反照率或能量通量資料中。

另外，存放空間的溫度和濕度必須控制在一定的範圍內，以確保設備的正常運作。遮陽、屏蔽和通風可有效防止高溫，隔熱可有效防止低溫。通風時，在通風孔處安裝防蟲網。如果有充足供電，也可以使用空調或暖氣。在儲藏箱內相對濕度較高的情況下（例如晝夜溫差較大），需要採取防止結露的措施（例如使用乾燥劑）。此外，設備也必須考慮可能雷擊所造成損壞等預防措施。雖然雷擊無法避免，但可以將雷擊造成的損害降到最低。

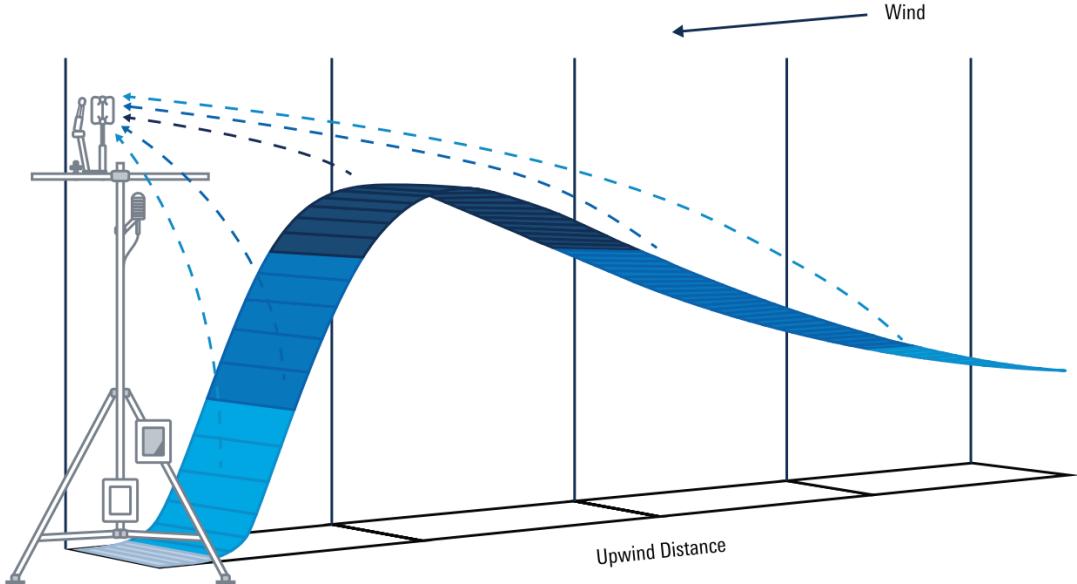
雷擊損壞是直接雷擊和間接雷擊造成的。直接擊中塔等物體的閃電可能會產生 10 至 100 kA 的電流，直接雷擊造成的損壞可能非常嚴重，並可能引起火災。相反，間接雷擊是直接雷擊引發的強電磁場在附近的訊號線和電線中瞬間感應出高電壓的現象（電湧）。突波電流可能會導致設備損壞，包括絕緣破壞、功能中斷或劣化。

避免或減輕此類損害最有效的手段是安裝避雷針。塔尖安裝避雷針，並使用低電阻接地線接地。安裝避雷器，透過接地線將較大的雷電感應電流洩放至大地也是有效的。安裝接地線需要與土壤有較大的接觸面積，以降低接地電阻。

(五)開放式農地場域溫室氣體通量足跡評估方法

用最簡單的方式來說明，通量足跡是塔上儀器「看到」的區域。換句話說，它是塔的逆風區域，因此塔上通量檢測系統可以記錄該區域中產生的通

量。另一個經常使用的術語稱為「受風距離(fetch)」通常是指在描述足跡時距塔的距離。了解通量足跡概念對於正確規劃和執行渦流相關法實驗至關重要。



資料來源: Burba (2022)

圖 4-62 通量足跡概念

通量足跡如上圖 4-62 所示：顏色越深代表來自該區域的通量貢獻越大。因此，大部分貢獻通常不是來自塔下，也不是來自幾公里外，而是來自兩者之間的某個區域。有許多模型可用於評估足跡貢獻，對於接近中性的條件(near-neutral conditions)，Schuepp 等人 (1990) 提出了簡單描述性的模型。此模型估計對通量測量 (cumulative normalized contribution to flux, CNF) 的累積標準化(normalized contribution)貢獻，該貢獻是根據中性條件下擴散方程計算(Eq. 29)。

$$\text{CNF}(X_L) = - \int_0^{X_L} \frac{u(z-d)}{u^* k x^2} e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k x}} dx = e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k X_L}} \quad (29)$$

Cumulative Normalized contribution to Flux measurement (CNF) (%)

X_L , Distance from the station (m)

u , Mean integrated wind speed (m s^{-1})

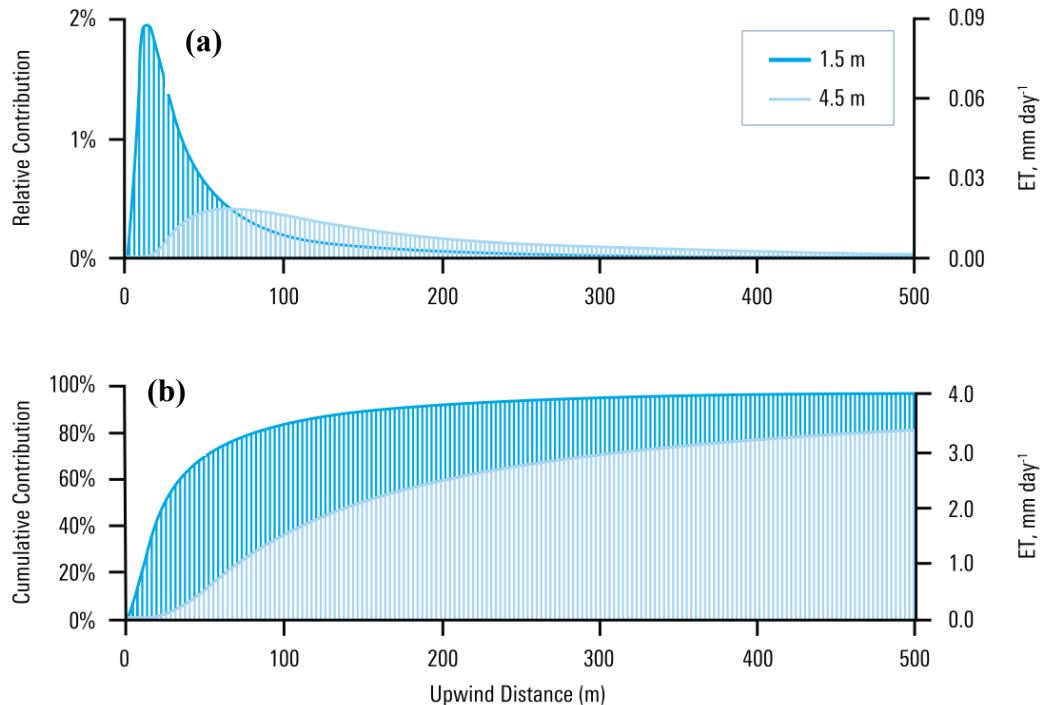
z , Measurement height(m)

d, Zero plain displacement(m)

u^* , Friction velocity (m s^{-1})

k, Von Karman constant (0.4)

由上述模型公式，計算出有多少測量的通量是來自特定距離。輸入參數包含儀器高度(z)、冠層高度、風速(u)、距塔的所需距離(X_L)、摩擦速度(u^*)和零平面位移(d)。



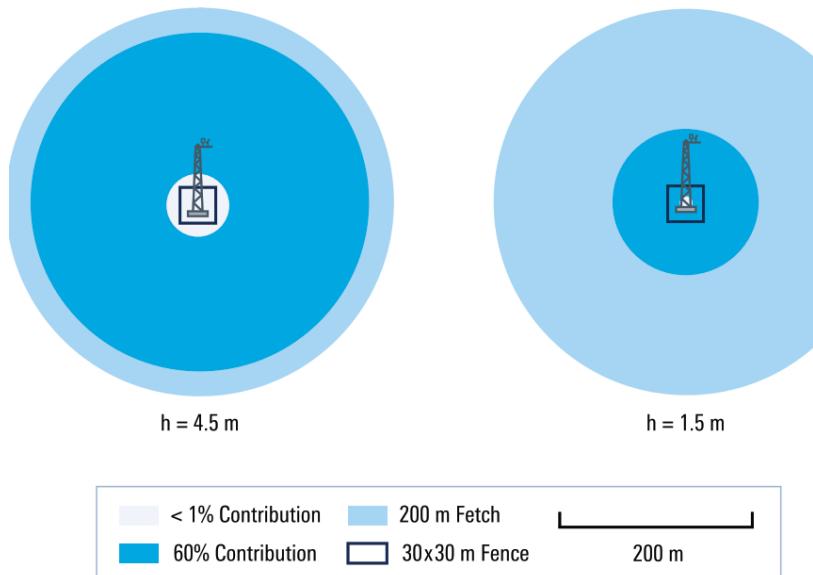
資料來源: Burba (2022)

圖 4-63 不同架設高度蒸發散(ET)通量貢獻與迎風距離關係 (a)代表來自上風處某距離通量貢獻 (b)代表通量貢獻累積

由圖 4-63(a)淺藍色圖形說明在 4.5 m 高度測量時，蒸發的峰值貢獻主要來自約通量塔 60~65 m 的上風距離，而距通量塔 20~30 m 距離範圍內的區域則相對沒有貢獻。從累計貢獻來看，日總通量的 80%來自上風向 20~450 m 的距離。

由圖 4-63(a)深藍色圖形說明在 1.5 m 的較低測量高度，觀察到貢獻的顯著變化。峰值貢獻來自距通量塔 12-18 m 的較近距離。超過 80% 的日蒸散量來自站點 80 m 範圍內的區域。圖 4-64 呈現與前述資料相同，以俯視圖繪製 4.5m 和 1.5 m 通

量塔從所有風向的足跡的潛在貢獻。整體而言，隨著測量高度的增加，通量貢獻峰值距離增加，而累積通量貢獻的幅度減少。通量足跡隨著測量高度的增加而增加，然而在鄰近通量塔足跡也可能受到影響。也就是說，通量塔越高測站周圍「無通量貢獻」的足跡也相對增加。



資料來源: Burba (2022)

圖 4- 64 不同架設高度通量潛在貢獻 (a)塔高 4.5 公尺 (b)塔高 1.5 公尺

(六)監測場域之基礎設施與人力資源之配置需求

本指引參考環境部國家環境研究院「112 年溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定計畫」，並以開放式農業場域的通量檢測設備為基礎，提供當時操作經驗，彙整以下通量檢測站儀器維護人力(時間)需求表(表 4-27)，未來如有不同的通量檢測場域所需實際的維護人力(時間)，需視情況做調整。。

表 4-27 通量觀測站儀器維護人力(時間)需求表

維護項目 ¹	每週所需人力(小時)				備註
	IRGASON	Campbell	LI-COR LI-7700	Aerodyne TILDAS	
目視檢查(髒污)/外部清潔/更換過濾器/加水		0.4	0.6*3=1.8	0.4	干擾來源： a. 空氣品質：鏡面灰塵干擾。 b. 降水：感測器積水。
資料下載&處理		1	1	1.5	
清潔機器內鏡面&調整儀器光路	- ²	- ²		1.5	儀器內部鏡面清潔、乾燥劑檢查。
通零級空氣/校正氣體	(0.25) 3hr/1季	(0.25) 3hr/1季		0.5	零級空氣：每週 校正氣體：每月
加總	1.65		3.05	3.9	所有維護時間加總為 8.6

*1: Campbell IRGASON: CO₂ @>10 Hz ; LI-COR LI7700: CH₄ @>10 Hz; Aerodyne TILDAS (single laser): CH₄, N₂O @>10 Hz; PICARRO G2508: CO₂, CH₄, N₂O @ 1 Hz

*2: - 表示無此項維護需求。

4.4 開放式農地場域碳匯驗證評估報告

農業環境溫室氣體排放的整體研究中，在真實生態環境中的通量檢測調查和溫室中的控制變因實驗均為不可缺少的工作，農業環境之溫室氣體通量受氣象條

件影響甚大，因此在農業碳排量的計算以及國際已公告之農業碳匯認證方法中，均強調必須在專案場域中進行調查，或是引用適當的調查參數。本計畫的目標為建立開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統及方法，結合現地溫室氣體檢測作業提供場域碳匯驗證實例。

4.4.1 開放式農地場域溫室氣體減排管理策略規劃

在田間農作物生產過程中，二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)與氧化亞氮(N_2O)是主要排放的溫室氣體。本計畫以稻米為標的作物，因為稻米是台灣種植面積最大的經濟作物，水稻田則是甲烷(CH_4)的重要排放源。根據文獻探討以及和農業相關專業人員討論後，本計畫挑選同時採用農廢操作(移除稻稈)及水份控制(間歇性灌溉)為本計畫的減碳情境，移除稻稈是因為如不將前期稻稈移走，稻稈會腐化進而發酵產生溫室氣體，水份控制則是有文獻和方法學提到可降低甲烷(CH_4)排放。由於本計畫未能提前執行基線調查，因此以 2024 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告中的水稻種植各期作甲烷排放係數(清冊報告表 5.4.1)之中的中彰投一期稻作排放係數為基線排放量。2024 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告中的水稻種植各期作甲烷排放係數主要參考文獻使用兩種方法(渦流相關法以及密閉罩法)，而中彰投一期稻作的甲烷排放係數引用文獻的使用方法為渦流相關法，觀測的地點(霧峰農試所)和使用的設備(LI-7700)也都和本團隊相同，採用相同的試驗方法可加強這個比對實驗的可靠性。為了能提供碳匯驗證所需要的資訊，本計畫架設通量觀測站、微氣象水文觀測點、通量足跡，最後進行碳匯量估計。以下小節敘述開放式農地場域碳匯計算內容：

4.4.2 溫室氣體通量觀測

1. 建立開放式農地場域觀測期程規劃

本計畫於農業部農業試驗所位於霧峰的 49 號(0.5 公頃)以及 53 號(0.5 公頃)共計 1 公頃試驗田作為測試場域，作物的選擇方面，挑選台灣種植面積最大的經

濟作物-水稻為標的作物。由於與開放式農地場域溫室氣體(如二氣化碳、甲烷以及氧化亞氮等)通量來自農地土壤、植物與大氣之間的氣體交換通量，其測量結果通常具有明顯的空間與時間變化，已規劃適當的採樣位置及採樣時間，以能涵蓋被調查作物生長季及廣泛空間範圍及時間範圍。

農業溫室氣體減排管理方式是以農廢移除情境(移除稻稈)結合節水管理情境(淹灌-滴灌交替進行)來進行。在農廢管理方面，現行常見作法則是將稻稈留置田間，待翻土時埋入土中；而移除稻稈情境則是指前一期水稻種植之後，收割後便把稻稈自田間移除，僅留根部在土壤中。在水份管理方面，慣行做法為連續淹田操作，自插秧後僅施肥前會將水放低避免肥力喪失，此外皆是保持稻田淹水的狀態直至收割前兩三周，將水放乾進行曬田；在節水管理(淹灌-滴灌交替進行)操作下，在第二次施肥後將自淹田操作轉以定期滴灌的方式來達成省水操作。然而，由於今年春雨及梅雨降雨量相對較多，使本期的節水管理並沒有達成預期的條件，後續僅以農廢移除當作減碳情境的結果。

觀測期程於水稻生長週期進行全期的測量，作物生長週期包含(插秧、幼苗期、分蘖期、結穗期、成熟期及收割期)。一般一期稻作約 110 天左右，全台各地依照當地氣溫選擇適合的插秧時間，在中部通常是二月中末插秧至六月中收割。
詳細田間管理紀錄見表 4-28。

表 4-28 田間管理紀錄

田間管理操作	開始日期	結束日期
收割	2023-10-31	2023-10-31
稻草捆團	2023-11-06	2023-11-06
灌水淹田	2024-02-22	2024-02-28
施基肥	2024-02-26	2024-02-26
插秧	2024-02-29	2024-02-29
補水淹田	2024-03-04	2024-03-16
施一追肥	2024-03-19	2024-03-19
噴灌	2024-03-17	2024-04-19
施二追肥	2024-03-29	2024-03-29
曬田	2024-04-19	2024-06-28
施穗肥	2024-04-30	2024-04-30
收割	2024-06-28	2024-06-28

2. 通量站位置的選擇

113 年開放式農地場域採用渦流相關法原理來進行通量檢測，其需遵守渦流相關法理論基本假設：(1)符合地表均質且地形平坦等理想條件(2)需確保儀器放置在合適的高度，以充分代表欲觀測通量足跡範圍。根據前述條件，本計畫決定採用霧峰農試所的 49 號(0.5 公頃)和 53 號(0.5 公頃)共計 1.0 公頃試驗田作為今年度的採樣點(圖 4-65)，根據先期場勘確認試驗田邊緣周圍 30~50m 之內都是平坦的田地，符合通量監測的需要。



圖 4-65 霧峰農試所 49 號和 53 號試驗田(紅色框框範圍之內)

3. 採樣週期及檢測

本計畫針對二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)以及氧化亞氮(N_2O)三種溫室氣體進行開放式農地場域通量檢測，需要使用到的設備包含高頻超音波風速風向計、高頻微量氣體分析儀等設備。本計畫所使用氣體分析儀分別為 IRGASON, Campbell[®] (超音波風速及高頻二 CO_2)、LI-770, LI-COR[®] (高頻甲烷(CH_4)) 以及 TILDAS-CS, Aerodyne[®] (高頻氧化亞氮(N_2O)濃度分析儀)來進行三種溫室氣體的通量觀測。其它輔助微氣象水文監測項目包含環境溫度架設於主要通量站；土壤監測部分包含土壤溫度、含水率則架設於田區四周，見圖 4-66。通量檢測期程自 2 月 29 日完成稻作插秧起至 6 月 12 日完成收割結束。

4.4.3 開放式農地場域微氣象觀測資料

現場微氣象水文資料整理如圖 4-67、圖 4-68 及表 4-29，主要觀測項目包含環境溫度、環境相對濕度，土壤溫度及土壤含水率(土壤參數埋設深度為 10cm、20cm 及 30cm)，這幾項參數為最常見生地化通量觀測站一併監測的項目，偵測週期為 30 分鐘一筆數值。一期稻期間的環境均溫為 22.04°C ($7.40^\circ\text{C} - 34.50^\circ\text{C}$)(最小值-最大值)，相對溼度(RH)平均是 77.58% (20.00 %- 99.00%)。土壤溫度、含水率觀測部分：地下 10 公分處的平均土壤溫度為 24.17°C ($13.60^\circ\text{C} - 39.38^\circ\text{C}$)；土壤含水率的部分，平均為 24.09% (18.00% - 29.83%)。

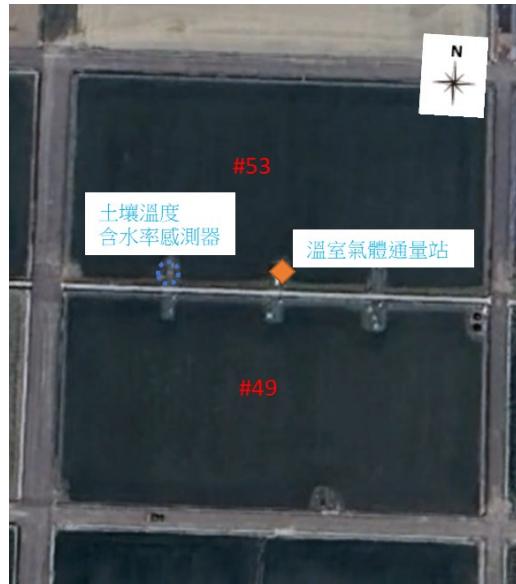


圖 4-66 微水文氣象資料架設地點示意圖

表 4-29 微氣象水文資料

參數	單位	平均	最小值	最大值
環境氣溫	°C	22.04	7.40	34.50
相對溼度	%	77.58	20.00	99.00
土溫 (10 cm)	°C	25.52	13.60	39.38
含水率(10 cm)	%	25.21	18.00	29.83

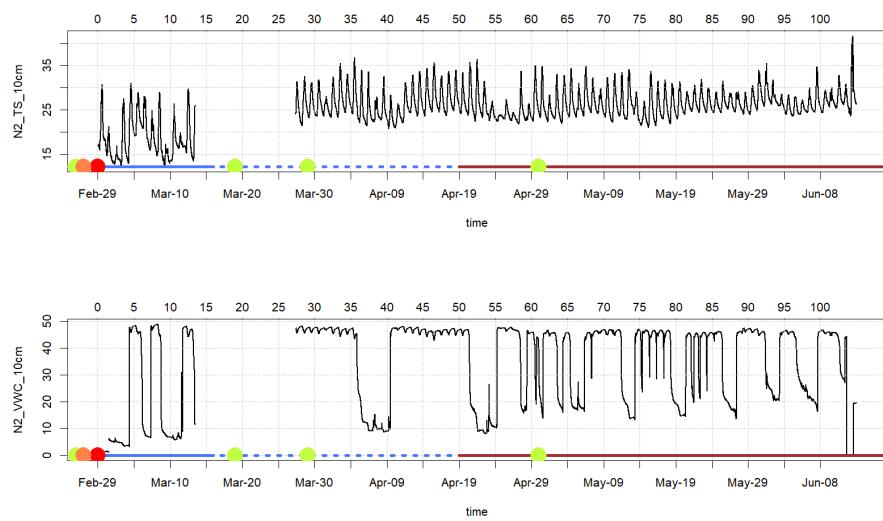


圖 4-67 一期稻作的土壤 10 公分深度溫度(上)及土壤水分時序圖(下)。

4.4.4 運用通量足跡模式評估所測得溫室氣體通量之空間代表性

本計畫採用 Kljun 等人於 2015 年(Kljun 等, 2015) 發展的通量足跡模式(Flux Footprint Prediction (FFP)) (<https://footprint.kljun.net/>)，輸入標準 Fluxnet 格式(2015 版本, <https://fluxnet.org/data/fluxnet2015-dataset/fullset-data-product/>) 的資料表可計算碳源匯通量主要的區域，用以檢核通量站點位架設地點的空間代表性。

用 FFP 通量足跡模式計算出來 49 號和 53 號試驗田的一期稻作日夜風場如圖 4-68，可以看出不論是白天(0600-1800)或是夜間(1800-0600)都有 80%的通量足跡都來自於 49 號和 53 號試驗田。顯示第一期稻作期間，日間主要風場來自西北方，而夜間則是西北方及東南方都有貢獻。經由通量足跡模式檢核後，確認本場域的觀測通量大部分來自於預期的觀測田區之內，並非鄰近非種植水稻的田區。

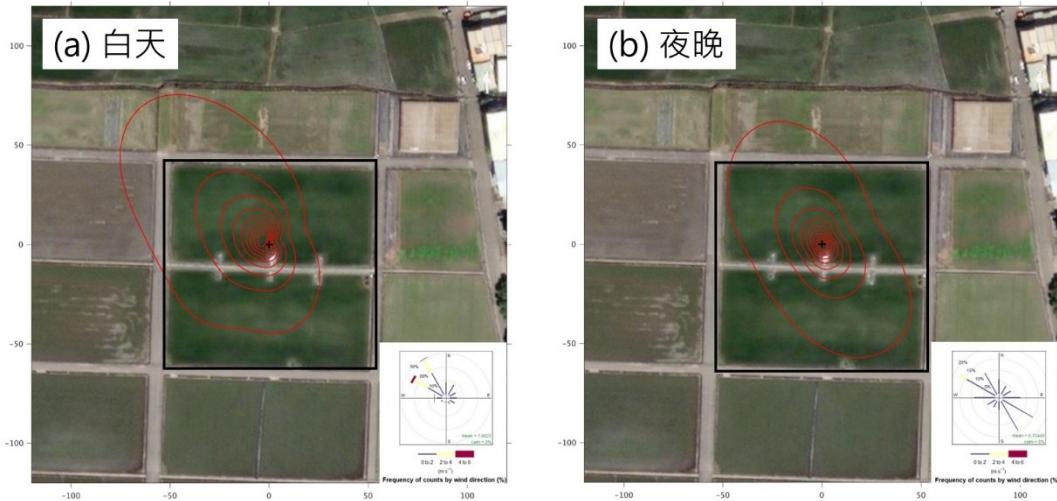


圖 4-68 一期稻作 49 號和 53 號試驗田的日夜風場圖以及風瑰圖，最外圈為 80% 來源範圍，間距為 10%。(a)白天風場以及風花圖、(b)夜間風場以及風花圖

4.4.5 溫室氣體通量估算

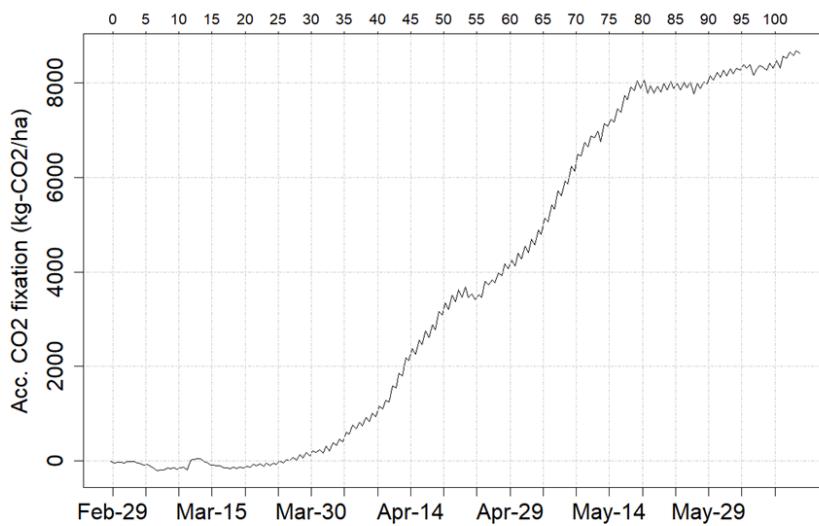
在開放式農田主要溫室氣體監測上，二氧化碳、甲烷及氧化亞氮為最主要交換的溫室氣體。碳匯量計算採用團隊自行開發的計算流程（教育訓練工作坊有介紹），將高頻超音波風速(IRGASON, Campbell)、高頻二氧化碳濃度(IRGASON, Campbell)、高頻甲烷濃度 (LI7700, LI-COR)、高頻氧化亞氮濃度 (TILDAS-CS, Aerodyne)原始觀測資料計算成每 30min 一筆的通量資料，再進行資料除錯及補遺後獲得累積通量估算值。碳匯量估算資料如圖 4-69; 4-70; 4-71，因為是通量的累積圖所以和氣象場當天的擴散沒有關係(通量計算的是極短時間的變異度，不是濃度而是排放量(通量))，當氣象場非常強的時候也會因為監測不到測值而產生無效值。 CO_2 碳匯大約是 $8.6 \text{ ton-}\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ ， CH_4 以及 N_2O 的累積通量分別是 $33 \text{ kg-}\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1}(0.0314 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$ 以及 $0.5 \text{ kg-}\text{N}_2\text{O ha}^{-1}(0.00038 \text{ g N}_2\text{O m}^{-2} \text{ day}^{-1})$ 。 CO_2 吸收的高峰為插秧後約 40-80 天之間， CH_4 在第一期稻作自插秧後第十天起呈現穩定釋出的狀態，本次觀測並沒有看到明顯的高峰期； N_2O 則是施肥時期由尿素(NH_4SO_4)轉化成 N_2O 為最主要的來源。

減碳情境效益部分，根據台灣 2024 年排放清冊的一期稻甲烷期作排放係數(表 4-30)，因甲烷排放會受到天候因素(溫度)、土壤及農業操作等影響，挑選清冊中的臺中、彰化、南投地區的排放係數 $36.9 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} (0.0271 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1})$ 來和本計畫的一期稻甲烷排放(霧峰)做比較，兩者的差異為 10.6%。不過本計畫於霧峰農地進行移除稻稈及間歇性灌溉因為屬單一測試，呈現技術之可應用性，但是對於確實的減量效益尚非定論，仍需更多的測試資料加以確認。

表 4-30 水稻種植各期作甲烷排放係數

地區	各期作甲烷排放係數			
	期作	排放係數 ¹ (毫克 / 平方公尺 / 時)	日排放係數 (公斤 / 公頃 / 天)	期作排放係數 ² (公斤 / 公頃 / 期)
臺北、基隆	一期稻	2.12	0.5088	69.1968
	二期稻	4.85	1.1640	144.3360
宜蘭	一期稻	0.69	0.1656	22.5216
	二期稻	8.93	0.9331	115.7069
桃園、新竹	一期稻	0.89	0.2136	29.0496
	二期稻	4.15	0.9960	123.5040
苗栗	一期稻	2.92	0.7008	95.3088
	二期稻	13.70	0.9331	115.7069
臺中、彰化、南投	一期稻	1.13	0.2713	36.9000
	二期稻	6.07	1.4565	180.6000
雲林、嘉義、臺南	一期稻	1.84	0.4419	60.1000
	二期稻	5.88	1.4113	175.0000
高雄、屏東	一期稻	0.82	0.1968	26.7648
	二期稻	2.94	0.7056	87.4944
花蓮、臺東	一期稻	2.11	0.5064	68.8704
	二期稻	4.2125	1.0104	125.2896

資料來源:台灣 2024 排放清冊

圖 4-69 一期稻作之 CO₂ 累積碳匯量估算。上方 x 軸為插秧後天數。

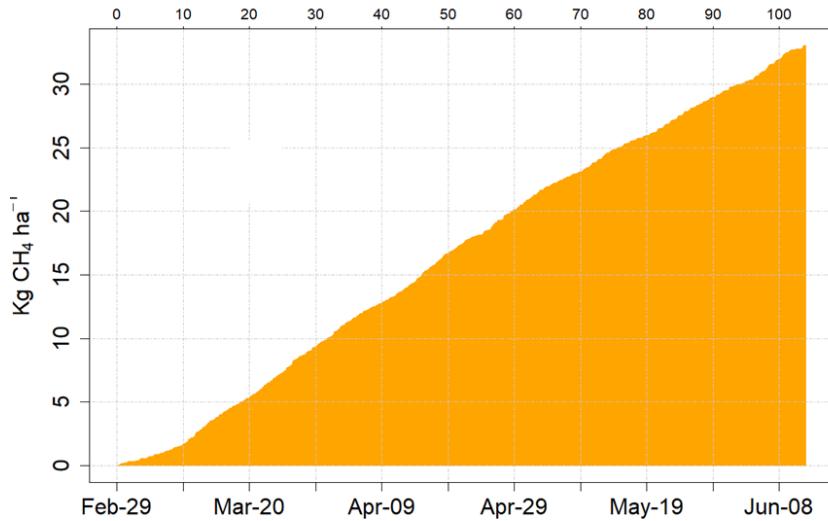


圖 4-70 一期稻作之 CH_4 的累積排量估算。上方 x 軸為插秧後天數。

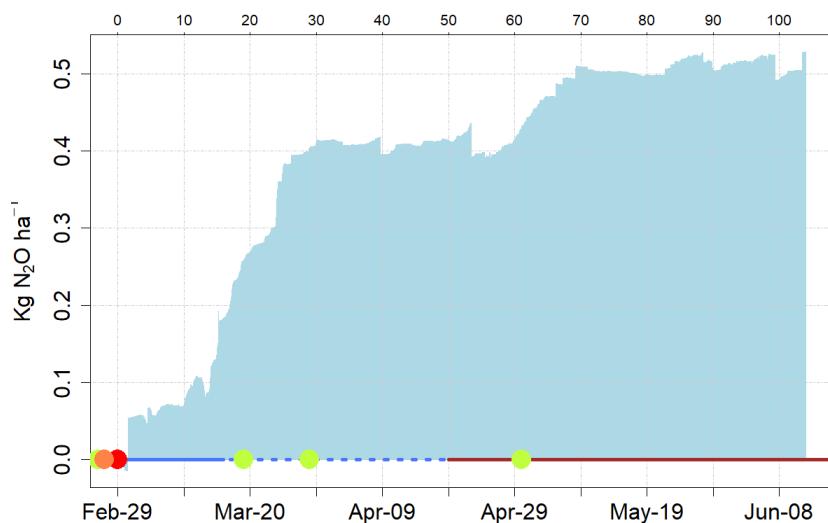


圖 4-71 一期稻作之 N_2O 的累積排量估算，淺綠色圓點是施肥時間，藍色直線是淹水期、藍色虛線是滴灌期、紅色直線是曬田期。上方 x 軸為插秧後天數。

4.5 通量檢測系統技術擴散教育訓練工作坊

本計畫於 113 年 5 月 16 日在霧峰農試所完成第一場次的工作坊，工作坊內容是溫室氣體通量示範場場勘以及通量設備介紹，工作坊的參與對象是國環院同仁，工作坊的內容對應到第二章計畫工作內容第五項中的第五點(農業場域教育訓練及現地訪查)並且於當天下午進行了第一次工作會議，當天的活動照片請參考附錄的第一次工作會議紀錄。第二場次的工作坊於 113 年 8 月 15 日在國環院舉行，工作坊內容是邀請國內兩位專家學者進行通量塔儀器架設原則與實際架設操作(中研院環境變遷研究中心-施郁庭博士)與通量場域選址規範含頻譜分析/源匯分析以及資料處理實機操作(中研院環境變遷研究中心-陳奕穎博士)，工作坊的內容分別對應到第二章計畫工作內容第五項中的第三點(通量場域選址規範及通量塔儀器架設原則)以及第四點(通量檢測數據的解析)，工作坊的參與對象是國環院同仁，附上當天的活動照片及簽到表如圖 4-72。因本計畫主要在於開放式農地場域的溫室氣體通量檢測系統方法開發和驗證，今年度的工作坊挑選如何就通量場域選址和架設儀器以及通量數據解析這兩個重點來進行。

表 4-31 第二場次通量檢測系統技術擴散教育訓練工作坊議程

時間	議程
13:30-13:35	主持人開場
13:35-14:35	通量塔儀器架設原則與實際架設操作 中研院環境變遷研究中心 施郁庭博士
14:35-14:45	休息
14:45-16:30	通量場域選址規範含頻譜分析/源匯分析 以及資料處理實機操作 中研院環境變遷研究中心 陳奕穎博士

「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定 2/4」

計畫技術擴散教育訓練工作坊

簽到表

日期: 113 年 8 月 15 日

地點: 國家環境研究院 R402 會議室

任職單位	簽名	任職單位	簽名
中央研究院 環境變遷研究中心		國家環境研究院	許元正
中央研究院 環境變遷研究中心	陳奕穎	國家環境研究院	
中央研究院 環境變遷研究中心	潘康暉	國家環境研究院	
中央研究院 環境變遷研究中心	齊羽昇	國家環境研究院	
中央研究院 環境變遷研究中心	施志忠	國家環境研究院	
中央研究院 環境變遷研究中心	傅育農	國家環境研究院	
國立聯合大學	張璽端	國家環境研究院	劉新聰
國家環境研究院	王祥恆	國家環境研究院	毛羽毅
國家環境研究院	蘇晉澤	國家環境研究院	林志宇
國家環境研究院	黃容汝	國家環境研究院	謝仰慶
國家環境研究院		國家環境研究院	王致立
國家環境研究院	李加訓	國家環境研究院	陳令宏



圖 4-72 技術擴散暨教育訓練工作坊之簽到表及活動照片

第五章、結論與建議

5.1 成果摘要

本計畫成果包括建立開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統及方法、制定開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範、研擬開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引草案以及農地場域碳匯驗證評估報告，成果摘要簡述如下。

國際通量網絡資料挑選全世界主要的通量觀測網絡，包括全球通量觀測網(Fluxnet)以及區域通量網絡(如 AmeriFlux、ICOS、OzFlux、AsiaFlux 及 ChinaFLUX)做其現況及未來趨勢介紹，另外挑選 20 篇重要的溫室氣體研究進行摘述，包含都市場域二氧化碳(CO_2)通量的時空變化、農業場域氮肥施放及田間作業對 CO_2 及 N_2O 的貢獻、森林的氧化亞氮 (N_2O) 通量觀測；在技術方面列舉探討渦流相關法和密閉罩法獲得的 N_2O 通量以及甲烷 (CH_4) 通量的差異、應用衛星技術觀測溫室氣體通量、應用飛機航測技術觀測溫室氣體等文章。在彙整國內外農業場域碳驗證標準方法的項目中介紹我國碳驗證標準發展現況以及清潔發展機制方法學(CDM Methodology)和黃金標準(Gold standard, GS)以及 Verra 碳驗證標準(Verified Carbon Standard Program, VCS)方法學。

本計畫參考 ICOS 的測站架設規範，草擬了開放式農地場域溫室氣體通量檢測系統使用、維護及校驗規範(例如：開放式農地場域選擇、場域通量塔設置、溫室氣體通量檢測系統維護方法以及數據品質校驗方法)。並同步研擬開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引草案。提供溫室氣體通量檢測指引架構以及初步的內容(例如：本指引相關名詞定義、溫室氣體通量檢測系統架設、適用範圍、結果處理及基礎設備材料與人力需求配置)。

本計畫依循溫室氣體通量檢測指引在霧峰農試所進行實場操作，並設計農廢移除合併節水灌溉減碳實驗，進行開放式農地場域碳匯驗證評估，結果顯示一期稻作期間 CH_4 排放量為 $33 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ ，相對於 2024 年中華民國國家溫室

氣體排放清冊報告所報導的中彰投稻作甲烷排放係數($36.9 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1}$)，本計畫實驗降低約 10.6% 甲烷排放通量。不過本計畫於霧峰農地進行移除稻稈及間歇性灌溉因為屬單一測試，目的為呈現技術之可應用性，但是對於確實的減量效益尚非定論，仍需更多的測試資料加以確認。

5.2 建議

本計畫在 112 年初步建立溫室氣體通量檢測之設施與相關程序，並於 113 年計畫期間在開放式農業場域進行了方法測試，確認相關方法與程序的可行性。為了將成果能夠延續或放大，建議後期接續計畫可繼續進行以下的工作內容：

1. 以本計畫之技術資料為基礎，將開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引擴大推廣(如辦理相關的技術擴散教育訓練工作坊)，或是將資料分享給相關單位做為開放式場域通量檢測技術之參考。
2. 持續精進相關技術並應用在其他場域，例如掩埋場或是都會區域，提供更廣泛的溫室氣體排放量實測資料。

第六章 參考文獻

- Alberto, M.C.R., Wassmann, R., Buresh, R.J., Quilty, J.R., Correa, T.Q., Sandro, J.M., Centeno, C.A.R., 2014. Measuring methane flux from irrigated rice fields by eddy covariance method using open-path gas analyzer. *F. Crop. Res.* 160, 12 – 21.
<https://doi.org/10.1016/J.FCR.2014.02.008>
- Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23, 1 – 26.
<https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., 2001. FLUXNET : A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide , Water Vapor , and Energy Flux Densities 0477.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415)
- Bhattacharyya, P., Barman, D., 2018. Crop Residue Management and Greenhouse Gases Emissions in Tropical Rice Lands, Soil Management and Climate Change: Effects on Organic Carbon, Nitrogen Dynamics, and Greenhouse Gas Emissions. Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812128-3.00021-5>
- Burba, G., 2022. Eddy Covariance Method. <https://doi.org/10.1109/INEC.2010.5424536>
- Burba, G., 2021. Eddy Covariance Method for Scientific, Regulatory, and Commercial Applications, LI-COR.
- Burba, G., 2013. Eddy Covariance Method-for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications, Book.
- CDM, 2021. Standard Sampling and surveys for CDM project activities and programmes of activities (CDM-EB50-A30-STAN v9.0).
- CDM, 2014. Small-scale Methodology Methane emission reduction by adjusted water management practice in rice cultivation.
- Chaichana, N., Bellingrath-Kimura, S.D., Komiya, S., Fujii, Y., Noborio, K., Dietrich, O., Pakoktom, T., 2018. Comparison of closed chamber and eddy covariance methods to improve the understanding of methane fluxes from rice paddy fields in Japan. *Atmosphere (Basel)*. 9. <https://doi.org/10.3390/atmos9090356>
- Coutts, A.M., Beringer, J., Tapper, N.J., 2007. Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 46, 477 – 493.
<https://doi.org/10.1175/JAM2462.1>
- Cui, W., Chui, T.F.M., 2021. Measurements and simulations of energy fluxes over a high-rise and compact urban area in Hong Kong. *Sci. Total Environ.* 765, 142718.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142718>
- Delkash, M., Chow, F.K., Imhoff, P.T., 2022. Diurnal landfill methane flux patterns across

- different seasons at a landfill in Southeastern US. *Waste Manag.* 144, 76 – 86.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.004>
- Dorich, C.D., Conant, R.T., Albanito, F., Butterbach-Bahl, K., Grace, P., Scheer, C., Snow, V.O., Vogeler, I., van derWeerden, T.J., 2020. Improving N₂O emission estimates with the global N₂O database. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 47, 13 – 20.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.04.006>
- Foken, T., 2006. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory. *Boundary-Layer Meteorol.* <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9048-6>
- Foken, T., Wichura, B., 1996a. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. For. Meteorol.* 78, 83 – 105. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02248-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02248-1)
- Foken, T., Wichura, B., 1996b. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Ge, H.X., Zhang, H.S., Zhang, H., Cai, X.H., Song, Y., Kang, L., 2018. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in East China measured using the eddy covariance method. *Agric. For. Meteorol.* 249, 228 – 238.
<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMAT.2017.11.010>
- Gold Standard, 2020. Soil Organic Carbon Framework Methodology, Gold Standard.
- Helfter, C., Tremper, A.H., Halios, C.H., Kotthaus, S., Bjorkgren, A., Grimmond, C.S.B., Barlow, J.F., Nemitz, E., 2016. Spatial and temporal variability of urban fluxes of methane , carbon monoxide and carbon dioxide above London , UK 10543 – 10557.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-10543-2016>
- Hirano, T., Sugawara, H., Murayama, S., Kondo, H., 2015. Diurnal variation of CO₂ flux in an urban area of Tokyo. *Sci. Online Lett. Atmos.* 11, 100 – 103.
<https://doi.org/10.2151/sola.2015-024>
- Hong, J.W., Hong, J., Chun, J., Lee, Y.H., Chang, L.S., Lee, J.B., Yi, K., Park, Y.S., Byun, Y.H., Joo, S., 2019. Comparative assessment of net CO₂ exchange across an urbanization gradient in Korea based on eddy covariance measurements. *Carbon Balance Manag.* 14, 1 – 18. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0128-6>
- IPCC, 2023. Synthesis Report of the Ipcc Sixth Assessment Report (AR6), European University Institute.
- J C Kaimal, J.J.F., 1994. Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurement. *Boundary-Layer Meteorol.* 72, 213 – 214.
<https://doi.org/10.1007/bf00712396>
- Jhang, S.R., Chen, Y.Y., Shiau, Y.J., Lee, C.W., Chen, W.N., Chang, C.C., Chiang, C.F., Guo, H.Y., Wang, P.K., Chou, C.C.K., 2022. Denitrifiers and Nitrous Oxide Emissions from a Subtropical Vegetable Cropland. *ACS Earth Sp. Chem.* 6, 2024 –

2031. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00106>
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Coté, O.R., 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 98, 563 – 589.
<https://doi.org/10.1002/qj.49709841707>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci. Model Dev.* 8, 3695 – 3713. <https://doi.org/10.5194/GMD-8-3695-2015>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2004. A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorol.* 112, 503 – 523.
<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000030653.71031.96>
- Lee, X., Massman, W., Law, B., 2005. *Handbook of Micrometeorology: A guide for Surface Flux Measurement and Analysis.*
- Li, D., Bou-Zeid, E., 2013. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 52, 2051 – 2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Loridan, T., Grimmond, C.S.B., 2012. Characterization of energy flux partitioning in urban environments: Links with surface seasonal properties. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51, 219 – 241. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-038.1>
- Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., Nakagawa, Y., Hirotani, K., Kondo, N., Goto, K., Nakazawa, T., Ishikawa, K., Ogawa, T., 2008. Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 25, 1744 – 1754. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHA1082.1>
- MOENV, T., 2024. 中華民國國家溫室氣體排放清冊報告.
- Molodovskaya, M., Singurindy, O., Richards, B.K., Warland, J., Johnson, M.S., Steenhuis, T.S., 2012. Temporal Variability of Nitrous Oxide from Fertilized Croplands: Hot Moment Analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 1728 – 1740.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0039>
- Monin, a S., Yaglom, a M., 1973. *Statistical fluid mechanics.* MIT Press 1.
- Moore, C.J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorol.* 37, 17 – 35. <https://doi.org/10.1007/BF00122754>
- Nemitz, E., Mammarella, I., Ibrom, A., Aurela, M., Burba, G.G., Dengel, S., Gielen, B., Grelle, A., Heinesch, B., Herbst, M., Hörtnagl, L., Klemedtsson, L., Lindroth, A., Lohila, A., McDermitt, D.K., Meier, P., Merbold, L., Nelson, D., Nicolini, G., Nilsson, M.B., Peltola, O., Rinne, J., Zahniser, M., 2018. Standardisation of eddy-covariance flux measurements of methane and nitrous oxide. *Int. Agrophysics* 32, 517 – 549. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0042>
- Nikolaisen, M., Hillier, J., Smith, P., Nayak, D., 2023. Modelling CH₄ emission from rice ecosystem: A comparison between existing empirical models. *Front. Agron.* 4, 1 –

13. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.1058649>
- Northrup, D.L., Basso, B., Wang, M.Q., Morgan, C.L.S., Benfey, P.N., 2021. Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row-crop production. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 118, 1 – 7. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022666118>
- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D., 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences* 3, 571 – 583. <https://doi.org/10.5194/bg-3-571-2006>
- Park, C., Jeong, S., Park, M.S., Park, H., Yun, J., Lee, S.S., Park, S.H., 2022. Spatiotemporal variations in urban CO₂ flux with land-use types in Seoul. *Carbon Balance Manag.* 17, 1 – 14. <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00206-w>
- Pihlatie, M., Rinne, J., Ambus, P., Pilegaard, K., Dorsey, J.R., Rannik, Ü., Markkanen, T., Launiainen, S., Vesala, T., 2005. Nitrous oxide emissions from a beech forest floor measured by eddy covariance and soil enclosure techniques. *Biogeosciences* 2, 377 – 387. <https://doi.org/10.5194/bg-2-377-2005>
- Reba, M.L., Fong, B.N., Rijal, I., Adviento-Borbe, M.A., Chiu, Y.L., Massey, J.H., 2020. Methane flux measurements in rice by static flux chamber and eddycovariance. *Agrosystems, Geosci. Environ.* 3, 1 – 12. <https://doi.org/10.1002/agg2.20119>
- Reynolds, O., 1894. IV. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Proc. R. Soc. London* 10.
- Roth, M., Jansson, C., Velasco, E., 2017. Multi-year energy balance and carbon dioxide fluxes over a residential neighbourhood in a tropical city. *Int. J. Climatol.* 37, 2679 – 2698. <https://doi.org/10.1002/joc.4873>
- Schmutz, M., Vogt, R., Feigenwinter, C., Parlow, E., 2016. Ten years of eddy covariance measurements in Basel, Switzerland: Seasonal and interannual variabilities of urban CO₂ mole fraction and flux. *J. Geophys. Res. Atmos.* 175, 238. <https://doi.org/10.1038/175238c0>
- Sheng, R.T.C., Huang, Y.H., Chan, P.C., Bhat, S.A., Wu, Y.C., Huang, N.F., 2022. Rice Growth Stage Classification via RF-Based Machine Learning and Image Processing. *Agric.* 12, 1 – 23. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122137>
- Shukla, P.R., Skea, J., Reisinger, A., Slade, R., Fradera, R., Pathak, M., Al, A., Malek, K., Renée Van Diemen, B., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., Malley, J., Mccollum, D., Some, S., 2022. Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change.
- Smith, P.D.M., 2007. Agriculture. *Stud. Econ. Hist.* 287 – 372. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3874-2_7

-
- Stull, R.B., 1988. An introduction to boundary layer meteorology. An Introd. to Bound. layer Meteorol. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- Taiwan EPA, 2021. National Greenhouse Gas Inventory Report.
- UN, 2022. Emissions Gap Report 2022: The Closing Window, New Labor Forum (Sage Publications Inc.).
- UN, 2018. 2018 Revision of World Urbanization Prospects | Multimedia Library - United Nations Department of Economic and Social Affairs [WWW Document]. URL <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (accessed 11.2.22).
- UNEP, 2023. Emissions Gap Report 2023, Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again).
- Wilson, K., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., 2002. DigitalCommons @ University of Nebraska - Lincoln Energy Balance Closure at FLUXNET Sites. Agric. For. Meteorol. 223 – 243.
- Yang, S.S., Liu, C.M., Liu, Y.L., 2003. Estimation of methane and nitrous oxide emission from animal production sector in Taiwan during 1990-2000. Chemosphere 52, 1381 – 1388. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00473-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00473-9)
- Yang, S.S., Chang H.-L., 2001. Methane emission from paddy fields in Taiwan. Biol Fertil Soils. 33, 157 – 165.
- ychenatsinca, 2022. ychenatsinca/CSSAGRI_EDDY: R scripts for analysising the EC fluxes. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6474717>
- Zhang, J., Zhang, W., Jansson, P.E., Petersen, S.O., 2022. Modeling nitrous oxide emissions from agricultural soil incubation experiments using CoupModel. Biogeosciences 19, 4811 – 4832. <https://doi.org/10.5194/bg-19-4811-2022>
- 吳致甄, 2009. 樓蘭山通量站二氣化碳通量資料補遺方法之比較. 國立東華大學.
- 姚銘輝, 陳俊仁, 2013. 氣象通量技術在農業氣象觀測上之運用. 102年度農業工程與自動化計畫研討會論文集, 台中市, pp. 148 – 153.
- 林文傑, 2017. 簡介日本農林水產省因應氣候變遷的政策措施.
- 行政院農業委員會, 2021. 農業部門第二期溫室氣體排放管制行動方案.
- 袁一夫, 2008. 應用通量變異法與渦流相關法推估地表通量. 國立中央大學.
- 許龍欣, 2022. 農田溫室氣體量測與計算方法簡介.
- 詹煜銘, 2008. 清潔發展機制(CDM)發展趨勢現況與方法學介紹.
- 謝明軒, 2017. 於春夏季使用渦流相關性系統進行二氣化碳及甲烷通量觀測之研究-以台南北門鹽田為例. 國立中興大學.
- 賴彥任, 洪志遠, 魏聰輝, 張振生, 江博能, 衛強, 余瑞珠, 莊振義, 謝正義, 蔡明哲, 王亞男, 2012. 溪頭地區二氣化碳支初探.
- 鄭丞孝, 2013. 索流協變系統之全年度水稻田甲烷通量觀測及模擬. 國立中興大學.

- 陳文輝, 2012. 清潔發展機制 (CDM) 發展趨勢現況與 方法學介紹 63 - 82.
- 魏谷州, 2007. 地表通量觀測與分析. 國立中央大學.
- 馮浦捷, 2015. 台灣地區水稻田全年度甲烷通量觀測－以台中霧峰為例. 大氣科學
第四十三期第三號
- 莊振義, 2010, 行政院環境保護署「99年度二氧化碳通量儀器運轉維護及資料分
析」專案工作計畫

國家環境研究院「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法 制定(2/4)」案採購評選委員會第一次會議(評選會議)會議 紀錄

壹、會議時間：113 年 2 月 19 日（星期一）下午 2 時

貳、會議地點：本院 M408 會議室

參、主持人：沈建中召集人 紀錄：許令宜

肆、評選委員會組成：專家學者委員 4 人、專家學者以外之委員 3 人，共計 7 人組成。

伍、出席委員：張哲明委員、蕭大智委員、黃欣俊委員、林能暉委員、沈建中委員、許元正委員、楊喜男委員

陸、請假委員：蕭大智委員

柒、列席人員（工作小組成員）：列席人員（工作小組成員）：王欽彥、郭育仁（具有採購人員資格）、許令宜（具有採購人員資格、協助評選委員會辦理與評選有關之作業）

捌、評選方式：採序位法。

玖、投標廠商家數及名稱：投標廠商 1 家且其資格及評選項目以外資料經審查合格，廠商名稱為中央研究院。

拾、召集人致詞：(略)

拾壹、報告事項：

一、主辦單位就本案需求內容及廠商評選事宜報告（略）。

二、工作小組初審意見報告（略）。

拾貳、委員確認事項：評選委員確認知悉「採購評選委員會委員須知」內容，且無應辭職或予以解聘之情形。

拾參、廠商詢答事項：略。

拾肆、評選結果：

- 一、經本委員會就各評選項目、受評廠商資料及工作小組初審意見逐項討論後，綜合評選結果詳評選總表（如附件）。
- 二、經各委員依據本採購案評分表評定參與評選廠商分數（序位），並將各委員評分結果填列於評選總表，中央研究院總評分/平均分為 480/80，序位合計值為 6。
- 三、本案評選結果有無差異性：無明顯差異情形，且評選委員會或個別委員評選結果未與工作小組初審意見有異。

四、決議：

- (一) 採序位法者：1 家參與評選廠商之平均總評分達 70 分以上，經出席委員過半數決議：序位第一之中央研究院為第 1 優勝廠商。
- (二) 本次會議評選結果，將由承辦單位簽陳機關首長或其授權人核定，再辦理後續議價程序或相關事宜。

拾伍、委員是否另附有不同意見：無。

拾陸、散會：下午 3 時 20 分。

拾柒、委員意見：

- (一) 沈建中委員
 1. 目前今年開發已開放農田為主，那請問這個技術是否適用於溫室量測？室內栽培作物（如香菇寮、溫室花卉、木瓜）有什麼建議觀測方案。
 2. 這個計畫以霧峰農試所的農地為試驗場地，是否有跟農業部的相關合作？
 3. 服務建議書提到關於我國碳驗證標準發展現況，裡面的森林碳匯造林方法學，今年度是農業場域，之後是否可以用在森林場域或是其他場域？
 4. 以本計畫產生的數據，未來是否進行國際合作以增進技術或數據的可用性？
 5. 這個技術使用的器材是否是當前所能採用的最先進器材？跟美國與歐

洲上主流觀測網使用的器材同步或是更先進？

(二) 張哲明委員

本服務建議書包括工作內容(建立溫室檢測系統方法、制定通量檢測系統)、儀器維護及檢驗規範、編撰檢測指引、完成碳匯驗證報告、辦理技術及教育訓練、執行方法與步驟、預定期程、預期效應、經費分配及團隊主持人及成員學經歷和人力配置/實績多能符合計畫需求。

1. 表 1-2 台灣農業較近似日本，宜有農業 GHG' S 減排策略及現況供參考。(P.7)
2. Asia Flux 亞洲地區有 100 多長期通量觀測塔，其中日本籌建 50 餘，台灣有 4 個，多用在林地，希望能提供日本用於 open farm(水稻)使用狀況和經驗。
3. 表 3 – 2 0 減碳情境如節水管理，間歇代替連續淹田，澆灌代大面積水，宜考慮農民實務運作與區域差異與灌溉水水質也可能為影響因子。
4. 執行 112 年計畫是否遭遇困難，有待克服，有否具體成果可資參酌及精進。
5. 本年計畫將 GHG' S 通量檢測技術落實在 open farm 場域，期待務實可用。

(三) 林能暉委員

1. 本服務建議書所提農地溫室氣體通量量測方法與現行 I P C C 所認可或建議方法、指引，有多少異同？又如 I C O S 已有案例，若為可接受方法，則本案可否在其基礎上，盡快提出適合我國現況之方法。
2. 以水稻田為例，是否有地域性差異？則在台中所得相關係數能具有轉移性。

(四) 許元正委員

1. 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引，建議參考環境部環境標準檢測方法架構編撰。
2. 評估國內外不同通量場域實際應用現況，請納入未來國內應用合適場域的盤點評估，並對於參與國際交流進行先期規劃。

3. 本計畫所開發驗證正的技術，數據資料的處理軟體程式除儀器原廠外，是否涉及委辦單位自行開發之軟體。若有，計畫完成後是否無償提供主辦單位使用。
4. 通量測定結果與農林碳匯的連結，是否有公認的方法學可以依循。

(五) 楊喜男委員

- 1 · 未來因為訂定指引[調查設備規範是否有獨家問題？如未來應用於農地監測時定期校正或維護保養是否與國內現有監測戰相似？
- 2 · 涡流穩定性測試與氣候干擾相關，測試是在中部是否也適用在國內其他區域？
- 3 · 目前以地面監測區域方式為主，評估時是否與採高空位置大範圍差異變大？

(六) 黃欣俊委員

- 1 · 國內氣候、土壤及栽培方式迥異國外，在資料蒐集方面宜加強與國內相近農作生態的國家（如日本等）的溫氣排放相關技術與政策，特別是旱田或蔬菜作物的排放。
- 2 · 國內耕作面積較為細碎，通量量測則須較大範圍的耕地，其相關技術的擴散性如何
- 3 · 是否與密罩式量測進行相關比對建立每日不同時刻相關模式以提高成本效益
- 4 · 不同地區不同農法（慣行或永續）的差異如何掌握

本案水稻種植排放情境評估僅評估一情境模式是否足夠反應後續碳匯相關問題。

評選會議委員意見及回覆

委員	審查意見	回覆內容
沈建中委員	<p>1. 目前今年開發已開放農田為主，那請問這個技術是否適用於溫室量測？室內栽培作物（如香菇寮、溫室花卉、木瓜）有什麼建議觀測方案。</p>	<p>感謝委員建議，在農業環境溫室氣體排放的整體研究中，在真實生態環境中的通量監測調查和溫室中的控制變因實驗均為不可缺少的工作，農業環境之溫室氣體通量受氣象條件影響甚大，因此在農業碳排量的計算以及國際已公告之農業碳匯認證方法中，均強調必須在專案場域中進行調查，或是引用適當的調查參數。</p> <p>本計畫的目標為建立碳通量監測的基礎規範，實場監測作業是為驗證相關程序之合宜性，誠如前文所述，農場作業各有不同方式，開放式農場與室內栽培作物的溫室氣體傳輸受風場擾動的物理機制差異甚大。</p>

		若針對溫室內部的溫室氣體輸出，可以考慮採用密閉罩形式的監測方式。此外，農作物及土壤微生物系統的碳循環及溫室氣體排放機制研究確實必須在溫室的調控環境中方可進行，中研院團隊具有溫室實驗的設施與經驗，如有需要可將室內溫室監測納入未來計畫推動。
	2. 這個計畫以霧峰農試所的農地為試驗場地，是否有跟農業部的相關合作?	感謝委員建議，我們之前有和霧峰農試所有正式的合作計畫，但目前這個計畫已經結束，目前和農試所進行的是非正式的合作交流。
	3. 服務建議書提到關於我國碳驗證標準發展現況，裡面的森林碳匯造林方法學，今年度是農業場域，之後是否可以用在森林場域或是其他場域？	感謝委員建議，EC 方法可以應用在農業之外的其他場域，基本上使用的設備是相同的，但是設備的架設需要因應不同場域來做調整。
	4. 以本計畫產生的數	感謝委員建議，這個計畫

	<p>據，未來是否進行國際合作以增進技術或數據的可用性？</p>	<p>產生的數據，未來會進行國際合作以增進技術或數據的可用性。</p>
	<p>5.這個技術使用的器材是否是當前所能採用的最先進器材？跟美國與歐洲上主流觀測網使用的器材同步或是更先進？</p>	<p>感謝委員建議，這個技術使用的器材是當前所能採用的最先進器材，跟美國與歐洲上主流觀測網使用的器材是同步的。</p>
張哲明委員	<p>1. 表 1-2 台灣農業教近似日本，宜有農業 GHG' S 減排策略及現況供參考。(P.7)</p>	<p>感謝委員建議，我們會進行相關的文獻匯整，並將相關資料整理到報告中。</p>
	<p>2. Asia Flux 亞洲地區有 100 多長期通量觀測塔，其中日本籌建 50 餘，台灣有 4 個，多用在林地，希望能提供日本用於 open farm(水稻)使用狀況和經驗。</p>	<p>感謝委員建議，我們會進行相關的文獻匯整，並將相關資料整理到報告中。</p>
	<p>3. 表 3-20 減碳情境如節水管理，間歇代替連續淹田，澆灌代大面積水，宜考慮農民實務運作與區域差異與灌溉水水質也可能為影響因</p>	<p>感謝委員建議，我們會參考您的建議然後和農試所的專家討論出今年計畫要進行的減碳情境。</p>

	予。	
	4. 執行 112 年計畫是否遭遇困難，有待克服，有否具體成果可資參酌及精進。	感謝委員建議，112 年計畫最大的困難是我們用來作方法驗證的試驗田不夠大，造成計算出來的 foot print 只有不到約 6 成多的數據來自於我們的試驗田，但目前不容易找到更大面積的理想試驗田來進行試驗。理想試驗田的條件需要面積大、平坦區域、風場穩定(周遭空曠無農舍、盡量無道路(含水圳)分隔)，與現地操作人員合作(例如撰寫田間操作紀錄)等因素。
	5. 本年計畫將 GHG' S 通量檢測技術落實在 open farm 場域，期待務實可用。	感謝委員的期待和肯定。
林能暉委員	1. 本服務建議書所提農地溫室氣體通量量測方法與現行 I P C C 所認可或建議方法、指引，有多少異同？又如 I C	感謝委員建議，本計畫在建立農地溫室氣體通量量測方法就是以 ICOS 為參考的基礎架構，並針對我國現狀來做出調整的。

	<p>O S已有案例，若為可接受方法，則本案可否在其基礎上，盡快提出適合我國現況之方法。</p>	
	<p>2. 以水稻田為例，是否有地域性差異？則在台中所得相關係數能具有轉移性。</p>	<p>感謝委員建議，根據 IPCC 和台灣的排放清冊，水稻田的甲烷通量排放係數是地域性的差異，主因是區域溫度與土壤含水量控制，因此本計畫得到台中的參數只能應用在類似的環境中。</p>
許元正委員	<p>1. 編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引，建議參考環境部環境標準檢測方法架構來編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引。</p>	<p>感謝委員建議，我們再參考環境部環境標準檢測方法架構來編撰開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引。</p>
	<p>2. 評估國內外不同通量場域實際應用現況，請納入未來國內應用合適場域的盤點評估，並對於參與國際交流進行先期規劃。</p>	<p>感謝委員建議，我們會將這個部分做資料的整理後再放入報告中。</p>
	<p>3. 本計畫所開發驗證的技術，數據資料的處理</p>	<p>感謝委員建議，本計畫所開發驗證的技術，數據資</p>

	<p>軟體程式除儀器原廠外，是否涉及委辦單位自行開發之軟體。若有，計畫完成後是否無償提供主辦單位使用。</p>	<p>料的處理軟體程式除儀器原廠外，有涉及委辦單位自行開發之軟體，計畫完成後可以無償提供主辦單位使用。</p>
	<p>4. 通量測定結果與農林碳匯的連結，是否有公認的方法學可以依循。</p>	<p>感謝委員建議，目前國內並無農業系統碳驗證減量方法學，但可以參考國外的部分(詳細內容請參考本報告的 4.1.3 章節)。</p>
楊喜男委員	<p>1 · 未來因為訂定指引調查設備規範是否有獨家問題？如未來應用於農地監測時定期校正或維護保養是否與國內現有監測站相似？</p>	<p>感謝委員建議，我們在提供訂定指引的設備規範時會注意去避免掉監測器材獨家問題。另外因通量的監測和國內現有的空品監測站使用的設備不同，在定期校正或維護保養的方式和頻度也會有所差異。</p>
	<p>2. 涡流穩定性測試與氣候干擾相關，測試是在中部是否也適用在國內其他區域？</p>	<p>感謝委員建議，每個區域的地形及氣候條件都不同，在場域選擇時我們都會先做先期的氣候條件測試以評估場域是否符合我們的需求。</p>
	<p>3 · 目前以地面監測區域</p>	<p>感謝委員建議，因為我們</p>

	方式為主，評估時是否與採高空位置大範圍差異變大？	目前蒐集到的資料有限，還無法和高空位置的數據做比對，不過根據文獻，CH ₄ 在不同高度的通量資料會有差異。
黃欣俊委員	1. 國內氣候、土壤及栽培方式迥異國外，在資料蒐集方面宜加強與國內相近農作生態的國家（如日本等）的溫氣排放相關技術與政策，特別是旱田或蔬菜作物的排放。	感謝委員建議，我們會將這個部分做資料的整理後再放入報告中。
	2. 國內耕作面積較為細碎，通量量測則須較大範圍的耕地，其相關技術的擴散性如何	感謝委員建議，這個計畫開發的技術適用的範圍建議最少的空間需求是 100m ×100m 以上的空間，建議的空間範圍為 100m×100m 到 900m×900m。因此未來要將監測場域擴散到民間，建議是推行共同合作的方式，讓數位鄰近農民共同進行相同的田間管理，如此較適合做為溫室氣體排放監測場域。

	3. 是否與密罩式量測進行相關比對建立每日不同時刻相關模式以提高成本效益	感謝委員建議，因為密罩式量測需要大量的人力和其它相關的資源，我們會評估看是否可以在這個計畫來執行。
	4. 不同地區不同農法（慣行或永續）的差異如何掌握	<p>慣行與永續農法與溫室氣體相關的為施肥與水分管理。本計畫進行目標訂於監測流程建立。農法的差異方面，只要是相同作物，監測器材與維護方式並無太大不同。</p> <p>惟須注意田間管理紀錄必須仔細記錄，例如施肥日期、每公頃用量、翻土日期等資訊。搭配環境監測餐數，例如氣溫、土溫、氣壓、土壤含水量等參數對比 GHGs 的釋出量才能確認是否是因為農法的不同造成不同程度的 GHGs 釋出量。</p>
	5. 本案水稻種植排放情境評估僅評估一情境模式是否足夠反應後續	感謝委員建議，碳匯相關問題牽涉到很多情境模式，我們今年度會先採用

	碳匯相關問題。	節水管理模式來評估其碳 匯的變化。
--	---------	----------------------

「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定

(2/4) 啟動會議會議紀錄

一、時間：113年3月4日（星期一）下午2時

二、地點：本所4樓 M411會議室

三、主席：許元正主任 紀錄：許令宜

四、出（列席）單位及人員：

計畫執行單位 周崇光、陳奕穎、張頊瑞、蔡朝陽

本院人員 李如訓、王欽彥、許令宜

五、主席致詞：(略)

六、報告事項：(略)

七、會議結論：

(一) 請依甘特圖規劃辦理，另「開放式農地碳匯驗證評估報告」，可進行專諮詢討論以利完善。

(二) 部長指示事項

(1)「請與中研院檢討現行檢測方法，並參考 NOAA 檢測方式，於高空位置進行量測。另如以農地為監測對象，或可考量以溫室為實驗場域。」等回應資料，請於3月中旬以書面提供給本院；另部長指示事項

(2)「本計畫成果資料可與歐盟等國際資料進行比對，以得到客觀結論。」，請於本年4月底前以書面提供研析成果給本院。

八、散會（下午3時35分）

「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定

(2/4) 第一次工作進度報告會議紀錄

一、時間：113年5月13日（星期一）上午10時30分

二、地點：本院2樓 M210會議室

三、主席：許元正主任 紀錄：許令宜

四、出（列）席單位及人員：(如會議簽到單)

計畫執行單位 周崇光、陳奕穎、施郁庭、蔡朝陽

本院人員 李如訓、王欽彥、謝炎恭、毛栩毅、許令宜

五、主席致詞：(略)

六、計畫執行單位報告：(略)

七、承辦單位報告：(略)

八、審查意見：

(一) 啟動會議紀錄修正：「會議結論(一)：開放式農地碳匯驗 證評估報告，可進行專諮詢討論以利完善。」修正為 「開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引，可進行專諮詢 會討論以利完善。」。

(二) 第一次工作進度報告第54頁最後一段：「密閉罩法和渦流 相關法不同優勢和劣勢可以相互補充」，請就密閉罩式及 渦流相關法二種方法優缺點及如何進行相互補助進行說明。

(三) 本案評選會議中黃欣俊及張哲明委員皆建議由本計畫提供亞

洲如日本用於水稻或相近農作通量技術實測的狀況 和經驗，建議團隊持續收集及整理相關農作之文獻。

九、會議結論：

- (一) 本計畫已依契約書規劃期程完成應辦工作事項，並提送 第一次工作進度報告經機關認可，撥付計畫經費第1期 款。
- (二) 相關意見請納入後續期中、期末報告中回覆，並依討論意見及契約規定，辦理後續相關事宜。

十、散會（上午11時44分）。

第一次工作進度報告會議委員意見及回覆

委員	審查意見	回覆內容									
許令宜委員	<p>1. 啟動會議紀錄修正：「會議結論(一)：開放式農地碳匯驗證評估報告，可進行專諮詢會討論以利完善。」修正為「開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引，可進行專諮詢會討論以利完善。」。</p>	<p>感謝委員建議，我們會在 113 年 8 月底前完成開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引初稿，再請國環院來安排專諮詢會進行討論，並將專諮詢會委員的建議納入通量檢測指引的修訂參考。</p>									
	<p>2. 第一次工作進度報告第 54 頁最後一段：「密閉罩法和渦流相關法不同優勢和劣勢可以相互補充」，請就密閉罩式及渦流相關法二種方法優缺點及如何進行相互補助進行說明。</p>	<p>感謝委員建議，這兩種方法的優缺點比較如下表，密閉罩法適合做不同條件(土壤/作物基因等)對溫室氣體排放的探討而渦流相關法適合做大尺度的溫室氣體通量連續觀測。</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>渦流相關法</th> <th>密閉罩法</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>優</td> <td>即時性&連續性：EC 方法</td> <td>易於操作：Closed Chamber</td> </tr> <tr> <td>點</td> <td>可以提供連續的實時數據，</td> <td>方法相對簡單，操作和設置相對容易。</td> </tr> </tbody> </table>		渦流相關法	密閉罩法	優	即時性&連續性：EC 方法	易於操作：Closed Chamber	點	可以提供連續的實時數據，	方法相對簡單，操作和設置相對容易。
	渦流相關法	密閉罩法									
優	即時性&連續性：EC 方法	易於操作：Closed Chamber									
點	可以提供連續的實時數據，	方法相對簡單，操作和設置相對容易。									

		量大氣和生態 系統之間的氣 體交換。	
	可靠性高：對 於一些生態系 統，尤其是小 面積生態系 統，Closed Chamber 方法 可能提供更可 靠的數據。	高精度：EC 方法可以提供 高精度的測 量，因為它考 慮了複雜的氣 流變化和生態 系統動態。	可靠性高：對 於一些生態系 統，尤其是小 面積生態系 統，Closed Chamber 方法 可能提供更可 靠的數據。
	無需取樣處 理：EC 方法 不需要收集樣 本進行後續分 析，因此可以 節省時間和成 本。	可移植性： Closed Chamber 方法可以方便 地應用於不同 場地和環 境。	可移植性： Closed Chamber 方法可以方便 地應用於不同 場地和環 境。
	樣本收集： 方法需要收集 樣本進行後續 分析，這可能 需要額外的時 間和成本。	設備昂貴： EC 監測站需 要昂貴的儀器 設備和複雜的 安裝。	樣本收集： 方法需要收集 樣本進行後續 分析，這可能 需要額外的時 間和成本。

		<p>可塑性有限： Closed Chamber</p> <p>技術要求高：方法通常用於 EC 方法需要較小的生態系 具有相應技術統，對於大範 知識和訓練的圍的生態系統 專業人員操作監測可能不太 和維護。適用。</p> <p>間接性：由於 是在固定的容 器內進行測 量，Closed Chamber 方法 的結果可能與 實際生態系統 中的氣體交換 有所不同。</p>
黃欣俊&張哲明委員	<p>1. 本案評選會議中黃欣俊及張哲明委員皆建議由本計畫提供亞洲如日本用於水稻或相近農作通量技術實測的狀況和經驗，建議團隊持續收集及整理相關農</p>	感謝委員建議，我們會進行相關的文獻匯整，並將相關資料整理到報告中。

	作之文獻。	
--	-------	--

溫室氣體通量檢測技術開發驗證與方法制定(2/4)」

第一次工作會議紀錄

一、 時間：113年5月16日（星期四）下午2時

二、 地點：臺中霧峰農業部農業試驗所

三、 主席：李如訓簡任研究員 紀錄：許令宜

四、 出（列）席單位及人員： 計畫執行單位 張頊瑞、施郁庭、蔡朝陽 本院人員 李如訓、許令宜

五、 主席致詞：(略)

六、 計畫執行單位報告：(略)

七、 會議討論：

（一） 計畫執行進度確認：

1.本案已於113年5月13日於本院進行第一次工作進度報告，本次於臺中霧峰農業部農業試驗所進行第一次工作會議，進行溫室氣體通量示範場勘及計畫討論（如附照片）。

2.團隊已於今年2月29日開始進行間歇灌溉農田以及淹田灌溉等二種不同試驗田的插秧，並持續進行通量監測。

3. 本次會議除討論開放式通量儀器維護及操作說明外，另進行農地密罩式溫室氣體採樣說明，目前計畫符合進度。

（二） 預定規劃：於7月進行本計畫技術擴散會議，另於8月底前

提交期中報告初稿給國環院。

八、 會議結論：請持續依進度執行計畫工作項目。

九、 散會（下午 4 時 20 分）。



圖 1 霧峰農試所試驗田開放式通量儀器說明



圖 2 農地密罩式溫室氣體採樣說明

113年度「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定

(2/4) 計畫期中報告審查會議紀錄

- 一、 時間： 113年9月2日（星期一）上午10時
- 二、 地點：本院二樓 M210會議室
- 三、 主席： 巫月春副院長 紀錄：許令宣
- 四、 出（列）席單位及人員：

審查委員：張木彬 張哲明 陳律言 許元正 顏振華

中央研究院：周崇光 陳奕穎 施郁庭 蔡朝陽

聯合大學：張頊瑞

氣變中心：李如訓 王祥恆

- 五、 主席致詞：(略)

- 六、 計畫工作內容及進度背景說明：(略)

- 七、 報告單位簡報：(略)

- 八、 審查委員審查意見：

(一) 張木彬委員：

1. 錯別字多，宜加強校稿，如圖4-55所列“再線性”。圖4-65所列之“Nagative”等。
2. 圖4-67僅列出節水農法之 N₂O 累積排放量，未見慣行農法數據，應補充。
3. 圖4-66(b)所示慣行農法之 CH₄累積碳匯量呈上下跳動趨勢，數據是否正確？宜進一步確認。
4. 節水農法之甲烷排放量反高於慣性農法，原因為何？宜再確認。

(二) 張哲明委員

本期中報告包括執行內容、方法步驟、預定進度和效益，多符合計畫需求，並有階段性成果，值得肯定。

1. 已蒐集國際通量觀測網絡，包括 Fluxnet 等6大網絡和農業場域 GHG's 通量觀測和技術探討(CC 和 EC)，請說明如何參酌制定本土系統及方法。將來是否也將應用衛星技術和飛航觀測 GHG's 觀測 GHG's 通量觀測。
2. 開放式農地場域 GHG's 通量觀測，宜請就 closed chamber(CC) 及 eddy covariance 的異同，亦可參酌國內（如楊盛行團隊和中大團隊）和日本（農研所）的經驗。
3. 驗證評估報告 p.158 優行農法和節水農法， 優行農法 CO₂ 多了3 噸/ha 差異是呼吸作用，CO₂ 少了3.5 噸/ha （淹水時間長），但水稻甲烷排放和水深水質關係密切，宜進一步探討將有助田間管理減量。
4. 通量檢測系統之技術擴散教育訓練，請說明對象及其將來的回饋互動。
5. 將來宜將森林碳匯及衛生掩埋場碳排列入，俾有助計畫完整性。

（三）陳律言委員

1. p.27表3-4所列設備是否本計畫所使用者？如是，標題應修訂，若僅為可能使用之各廠牌設備，應敘明可能使用之不同廠牌設備之規格及性能，以確認其差異是否顯著影響測定結果。
2. p.29最後一列「渦流相關變 (EC)」似多一個變字，請確認。
3. 4.1.1節之內容為全球各地通量觀測網路之介紹，但基本上未敘及具體之通量技術及其發展。宜依 p.11計畫工作內容一（一）所述補充具體內容。
4. 4.1.2節內容似對應 p.11工作內容一（二）所述。建議可在可行範圍內將資料彙整成不同通量場域之比較表，便於比較及應用之參考。
5. P.141表4-25中 Aeris Ultra 之 CO₂ 精密度結果不佳，未必僅肇因於儀器，建議再釐清。

-
6. 4.1.3節（二）之內容似對應 p.11工作內容一（三），其中敘及 GS 相關內容。如 p.11一（二）中其他機構均無「農業碳驗證方法學」，建議於報告中敘明截至本報告提交日止，以上組織均無相應內容，如能輔以所用搜尋關鍵詞更佳。
 7. P.106第三列「 50Lmin^{-1} 」為「 50Lmin^{-1} 」之誤。
 8. 4.2節之溫室氣體通量檢測指引內容，建議確認及調整陳述方式，以利對照 p.12工作內容三（一）（二）之內容。

（四） 許元正委員

1. 後續計畫執行建議強化國際間的應用案例蒐集，並於期末提供國內未來應用之建議。
2. 今年以開放式農地作為驗證場域，未來對不同場域的應用，須要考量的因素或設備參數、需求是否能提供一些參考指引。
3. 後續技術指引專諮詢會，邀請專家名單請提前與國環院承辦單位研商確認。

（五） 顏振華委員

1. P.6，水稻田的 CH_4 排放係數，在間歇性乾濕灌溉操作（如越南、台灣）與連續淹田方式（如義大利）有明顯的差異，建議蒐集文獻補充說明其原因或機轉。（特別是 P.158 就試驗場地的結果似與國際文獻有所差異）
2. 計畫中所得到的 GHG 單位排放量，是否適合擴大應用於各類型農地。
3. P.93，表4-15 GHG 相關法規中，是否有些法規（尤其是依據溫室氣體減量及管理法發布者）已隨氣候變遷因應法之施行而有更新。

4. 第4-2節 GHG 通量檢測指引部分，

(1) 建議本節標題依計畫工作內容較清楚的敘明，以釐清

本計畫所適用場域。

(2) 期中報告中所述指引的制定參考依據，建議補充；或

是在期末報告時就最新公布的國際文獻予以補強。

(3) 建議完整的指引，放在附錄；本文中以重點方式說

明。

5. P.161，教育訓練工作坊的教材或錄影帶建議納入期末報告

的光碟附錄中。

九、 結論：

(一) 本計畫進度已達契約之工作要求，請依契約相關規

定辦理第2期款撥付事宜。

(二) 請計畫執行單位將各委員意見納入計畫後續執行事
宜，並將參採或回應情形併入期末（成果）報告中。

十、 散會：上午11時40分。

期中工作進度報告會議委員意見及回覆

委員	審查意見	回覆內容
張木彬委員	<p>1. 錯別字多，宜加強校稿，如圖 4-55 所列“再線性”。圖 4-65 所列之“Nagative”等。</p>	<p>感謝委員建議，我們會加強校稿，並於成果報告中修正您提出來的這些錯誤。</p>
	<p>2. 圖 4-67 僅列出節水農法之 N2O 累積排放量，未見慣行農法數據，應補充。</p>	<p>感謝委員建議，因為目前我們只有一套可以量測 N2O 通量的設備，所以只有放在節水農法的水稻田使用。國環院今年有採購一套可以量測 N2O 通量的設備，但預計要到今年 10 月之後才能交貨驗收。</p>
	<p>3. 圖 4-66 (b) 所示慣行農法之 CH4 累積碳匯量呈上下跳動趨勢，數據是否正確？宜進一步確認。</p>	<p>感謝委員建議，我們會再進一步確認這個圖中的數據是否正確，並於成果報告中呈現。</p>
	<p>4. 節水農法之甲烷排放量反高於慣性農法，原因為何？宜再確認。</p>	<p>感謝委員建議，我們也還在尋找可能的原因，目前是真實呈現我們觀察到的數據。</p>

張哲明委員	<p>1. 已蒐集國際通量觀測網絡，包括 Fluxnet 等 6 大網絡和農業場域 GHG 's 通量觀測和技術探討 (CC 和 EC)，請說明如何參酌制定本土系統及方法。將來是否也將應用衛星技術和飛航觀測 GHG 's 觀測 GHG 's 通量觀測。</p>	<p>感謝委員建議，我們今年度計畫主要是進行開放式農地場域的溫室氣體通量檢測技術的開發以及實地驗證這個方法，衛星技術和飛航觀測等方法因為需要整合相關資源，今年計畫還無法應用，在後期計畫我們會納入參考。</p>
	<p>2. 開放式農地場域 GHG 's 通量觀測，宜請就 closed chamber(CC) 及 eddy covariance 的異同，亦可參酌國內（如楊盛行團隊和中大團隊）和日本（農研所）的經驗。</p>	<p>感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入成果報告中。</p>
	<p>3. 驗證評估報告 p.158 優行農法和節水農法， 優行農法 CO₂ 多了 3 噸/ha 差異是呼吸作用，CO₂ 少了 3.5 噸/ha （淹水時間長），但水稻甲烷排放和水深水質關係密切，宜進一步探討將有助田</p>	<p>感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入成果報告中。</p>

	間管理減量。	
	4. 通量檢測系統之技術擴散教育訓練，請說明對象及其將來的回饋互動。	感謝委員建議，這個活動的對象主要是針對國環院的同仁，採樣現場教學以及實際演練操作的互動模式。
陳律言委員	1. p.27 表 3-4 所列設備是否本計畫所使用者？如是，標題應修訂，若僅為可能使用之各廠牌設備，應敘明可能使用之不同廠牌設備之規格及性能，以確認其差異是否顯著影響測定結果。	感謝委員建議，表 3-4 所列設備是可能使用之各廠牌設備，因為我們能拿到做為測試的設備有限，會把相關的測試結果放到成果報告中。
	2. p.29 最後一列「渦流相關變 (EC)」似多一個變字，請確認。	感謝委員建議，我們已修正錯誤。
	3. 4.1.1 節之內容為全球各地通量觀測網路之介紹，但基本上未敘及具體之通量技術及其發展。宜依 p.11 計畫工作內容一（一）所述補充具體內容。	感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入成果報告中。
	4. 4.1.2 節內容似對應	感謝委員建議，我們會參

	p.11 工作內容一（二）所述。建議可在可行範圍內將資料彙整成不同通量場域之比較表，便於比較及應用之參考。	考您的建議並將相關內容放入成果報告中。
	5. P.141 表 4-25 中 Aeris Ultra 之 CO ₂ 精密度結果不佳，未必僅肇因於儀器，建議再釐清。	感謝委員建議，因 Aeris Ultra 將 CO ₂ 和 N ₂ O 兩個物種整合到一台光譜設備，因此而造成 CO ₂ 精密度結果不佳。
	6. 4.1.3 節（二）之內容似對應 p.11 工作內容一（三），其中敘及 GS 相關內容。如 p.11 一（二）中其他機構均無「農業碳驗證方法學」，建議於報告中敘明截至本報告提交日止，以上組織均無相應內容，如能輔以所用搜尋關鍵詞更佳。	感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入成果報告中。
	7. P.106 第三列「50Lmin-'」為「50Lmin ⁻¹ 」之誤。	感謝委員建議，我們已修正錯誤。
	8. 4.2 節之溫室氣體通量	感謝委員建議，我們會參

	檢測指引內容，建議確認及調整陳述方式，以利對照 p.12 工作內容三（一）（二）之內容。	考您的建議並將相關內容放入成果報告中。
許元正委員	1. 後續計畫執行建議強化國際間的應用案例蒐集，並於期末提供國內未來應用之建議。 2. 今年以開放式農地作為驗證場域，未來對不同場域的應用，須要考量的因素或設備參數、需求是否能提供一些參考指引。 3. 後續技術指引專諮詢會，邀請專家名單請提前與國環院承辦單位研商確認。	感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入成果報告中。 感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引中。 感謝委員建議，我們會將擬邀請的專家名單提前與國環院承辦單位研商確認。
顏振華委員	1. P.6，水稻田的 CH ₄ 排放係數，在間歇性乾濕灌溉操作（如越南、台灣）與連續淹田方式（如義大利）有明顯的差異，建議蒐集文獻補充說明其原因或機轉。	感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入開放式農地場域溫室氣體通量檢測指引中。

	(特別是 P.158 就試驗場地的結果似與國際文獻有所差異)	
	2. 計畫中所得到的 GHG 單位排放量，是否適合擴大應用於各類型農地。	感謝委員建議，因為 GHG 排放量會受到各地的氣候條件和使用的水稻品種等差異影響，所以只適合應用在類似條件的農地。
	3. P.93，表 4-15 GHG 相關法規中，是否有些法規（尤其是依據溫室氣體減量及管理法發布者）已隨氣候變遷因應法之施行而有更新。	感謝委員建議，我們會再追蹤確認相關內容，並將結果更新於成果報告中。
	4. 第 4-2 節 GHG 通量檢測指引部分， (1) 建議本節標題依計畫工作內容較清楚的敘明，以釐清本計畫所適用場域。 (2) 期中報告中所述指引的制定參考依據，建議補充；或是在期末報告時就最新公布的國際文獻予以補強。	感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入成果報告中。

	(3) 建議完整的指引，放在附錄；本文中以重點方式說明。	
	5. P.161，教育訓練工作坊的教材或錄影帶建議納入期末報告的光碟附錄中。	感謝委員建議，我們會參考您的建議並將相關內容放入成果報告光碟附錄中。

113 年「溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)」計畫成果報告驗收審查會議紀錄

一、時間：113 年 11 月 28 日（星期四）下午 3 時 30 分

二、地點：本院 4 樓 M408 會議室及視訊會議併行

(<https://meet.google.com/uqw-ytie-why>)

三、主席：巫月春副院長

紀錄：許令宣

四、出（列）席單位及人員：

審查委員：張木彬 張哲明 陳律言 顏振華 許元正

中央研究院：周崇光 陳奕穎 張頊瑞 施郁庭 蔡朝陽 潘康嫻

國環院：李如訓 王祥恒

五、主席致詞：(略)。

六、承辦單位報告：(略)。

七、廠商說明：(略)。

八、委員意見：

（一）張木彬委員

6. 4.1.1 節”開放式農地場域溫室氣體減排管理策略規劃”之內容過於簡略，建議可再充實。

7. 4.4.5 節所述本研究所得水稻田之 CH₄ 累積通量 0.0314g CH₄/m².day，與全球平均排放係數 0.119 CH₄/m².day 差異甚大，建議於下一年度詳細探討其可能原因，找出精進方向。

（二）張哲明委員

本期末報告包括 OPEN FARM GHG' S 通量檢測系統及方法，檢測系統使用、維護及檢測規範、編撰檢測指引，完成碳匯評估報告、技術擴散及教育訓練等內容，執行方法及步驟、預定期程及效益等符合計畫需求，並有具體且實用成果，值得肯定。提出意見及建議如下：

1. 有關文獻收集部分，森林偏重 N₂O 通量檢測無 CO₂ 資料，僅丹麥案例，宜多廣為蒐集分析。

-
2. 編撰 OPEN FARM GHG' S 通量指引，多僅參考 ICOS，其架構和內容亦參考其他網絡，如 Asia Flex(119 站，其中日本約有 50 個通量站)，與其農業的農作物、水分管理、田間耕作的管理施肥，對通量碳源匯來看，Asia Flex 或更值得參考。
 3. 農試所在霧峰以「移除稻桿」做為農地減碳情境測試， CH_4 累積排放量降低 10.6%，值得肯定，如能有其他試點比較驗，或將更有助技術擴散。農地稻桿移除宜考量目前農作現況，俾有助推動。
 4. p.57 Yang et al. (2001)用 EC 量測水稻田 CH_4 排放，第二季高於第一季，p.173 霧峰也有類似。其主因可能是季節、施肥及灌溉等有關，其實以過去經驗，水位（灌溉）和水質很有關係，健請除霧峰站外，宜再加點量測進行比較分析。水稻田 CH_4 量測，密閉罩(Closed Chamber, CC)相較於渦流相關法(Eddy Covariance, EC) 差異明顯，廣域量測應以 CC 為基礎，再利用 EC 加量測(p.55 日本農工大學實驗場圖 4-27)。
 5. 污染源通量檢測場如垃圾掩埋場，仍宜以 CC 為基礎，再行 EC 量測。
 6. 全國性及都市 GHG' S 量測除了 EC 和 LICOR 之外，仍很期待參酌引進飛機航測和衛星觀測，如 NOAA GHG' S 通量分析包括監測網及排放量分析模式(carbon tracker)。
 7. 技術擴散及教育訓練宜有參與者的意見回饋及互動。

(三) 陳律言委員

1. 4.1.1 節中內容仍是各觀測網路之簡介，未見 4.1.1 節標題所述之「通量技術發展趨勢」，建議確認後為應有之補充。
2. p.25 表 3-4 中屬於本計畫實際採用之設備，應補充其偵測極限，測值時間解析度與具體性能數據於表格或該章之相應文字段落中。
3. 4.1.2 節之各國場域比較似仍未有綜整比較，建議補充。

4. 4.1.3 節內容包括 CDM，GS，Verra 此三標準，惟 p.11 工項一(三)2. 中尚有 Indigo，ACR，CAR 未出現於該節之內容中，宜予補充，或具體說明卻無相關方法學。
5. p.11 工項一(三)3 之國內外農業碳驗證標準方法，宜依 4.1.3 節已有內容及可能補充者，列出比較表格呈現。
6. 4.2 及 4.3 節建議納入專諮會後所產出之修訂版本，做必要之修訂。
7. 4.5 節所述工作坊內容側重 p.12~13 工項五(三)、(四)，建議在報告中述及此二主題之重要性。

(四) 顏振華委員

1. 簡報 p.22 及報告 p.173 建議 2024 排放清冊的甲烷排放係數的引用情境可以略在報告中說明。
2. 簡報 p.11 列出了主要的農地管理減碳策略，建議可以補充在報告中；並說明報告 p.167 中，4.4.1 節何以選擇農廢(稻桿)移除作為本期計畫的減碳情境(例如簡報中提及的減少醱酵情況)。
3. (1) 第 5.2 節建議第 1 點提到可提供農業部門做為農地碳匯驗證評估之參考，建議可蒐集農業部是否在這部分已有相關研究或作為？
(2) 第 5.2 節第 2 點提到進而制定開放式都市場域溫室氣體通量檢測系統使用，然在簡報 p.9 亦提及東京有都市高樓層的通量檢測，後續的研究是否要侷限於“開放式”都市場域。
4. 第 5.3 節（預定執行進度及查核重點）、5.4 節（查核重點）已無需安排在第五章（結論與建議）中，若要在報告中呈現或可放在第二章末或第三章開頭。
5. 勘誤部分
 - (1) 目錄 p.II 末行有空格宜刪除。
 - (2) 成果報告中尚有部分規劃性字句（p.167、p.168、p.182 及 p.185 等）建議調整。

(3) p.173 第二行所引[表 4-30 似為表 4-31 之誤，建議修正。

(五) 許元正委員

1. 5.2 建議一節，敘述方式請與委託單位討論後調整。
2. 本計畫進行水稻田對全球 CH₄ 排放係數估計值與全球估計值相較僅為 22.7%，請補充說明。
3. 圖 4-70 日夜風場圖是否可增加風塊圖，較能明瞭監測期間風場的變化，尤其夜間似乎有較大變化，這部分在最後數據解析會有什麼影響也請補充。
4. 計畫結論部分是否能夠增加本項技術應用於不同場域的可行性評估。

九、主席裁示：

1. 本計畫目標為開發開放式場域通量技術，開發過程先以農地場域進行減量初探，於霧峰農地進行移除稻稈因為屬單一測試，需更多的測試資料加以確認，請於文中明確說明本數據非為定論。
2. 簡報第 22 頁 N₂O 的主要來源？跟施肥是否有關？是否可以將施肥時間標註於圖內。
3. 成果報告第 164 頁塔高與量測範圍的關係論述不完整，再請補充說明。另除了量測儀器規範外，請補充通量塔建置規範，例如設置高度、位置等最適環境規範；多少範圍須設置一處等。

十、本計畫結論為：

本案成果報告驗收結果與契約規定不符，請廠商於本會議紀錄之發文日起 7 日內依審查委員意見改正，並以電子修正稿報請本院辦理複驗，由本院自行辦理書面複驗事宜。

十一、散會：下午 5 時 10 分。

成果報告會議委員意見及回覆

委員	審查意見	回覆內容
張木彬委員	<p>1. 4.4.1 節”開放式農地場域溫室氣體減排管理策略規劃”之內容過於簡略，建議可再充實。</p> <p>2. 4.4.5 節所述本研究所得水稻田之 CH4 累積通量 0.0314g CH4/m2.day，與全球平均排放係數 0.119 CH4/m2.day 差異甚大，建議於下一年度詳細探討其可能原因，找出精進方向。</p>	感謝委員建議，已按照委員建議做修改。
張哲明委員	<p>1. 有關文獻收集部分，森林偏重 N2O 通量檢測，無 CO2，僅丹麥</p>	感謝委員建議，已按照委員建議做修改。

	<p>案例，宜多廣為蒐集分析。</p>	
	<p>2. 編撰 OPEN FARM GHG' S 通量指引，多僅參考 ICOS，其架構和內容亦參考其他網絡，如 Asia Flex(119 站，日本通量約有 50 個站)，與其農業的農作物、水分管理、田間耕作的管理施肥，對通量碳源匯，Asia Flux 或更值得參考。</p>	<p>感謝委員建議，因目前公開資料比較找不到關於技術細節的資料，暫不進行相關的資料補充。</p>
	<p>3. 農試所在霧峰以「移除稻桿」做為農地減碳情境測試，CH4 累積排放量降低 10.6%，值得肯定，如能有其他試點比較驗，或</p>	<p>感謝委員建議，因受限於觀測設備的數量，本計畫以技術開發為目的，農地減碳情境測試只進行單點測試，明年度起將優先以都市場域為主，將本成果公開後可助其他團隊進行後續試驗。</p>

	<p>將更有助技術擴散。農地稻桿移除宜考量目前農作現況，俾有助推動。</p>	
	<p>4. p.57 Yang et al. (2001)用 EC 量測水稻田 CH₄ 排放，第二季高於第一季，p.173 霧峰也有類似。其主因可能是季節、施肥及灌溉等有關，其實以過去經驗，水位（灌溉）和水質很有關係，建議除霧峰站外，宜再加點量測進行比較分析。水稻田 CH₄ 量測，密閉罩(Closed Chamber, CC)相較於渦流相關法(EC) 差異明</p>	<p>感謝委員建議，因受限於觀測設備的數量，本計畫以技術開發為目的，農地減碳情境測試只進行單點測試，明年度起將優先以都市場域為主，將本成果公開後可助其他團隊進行後續試驗。</p>

	<p>顯，廣域量測應以 CC 為基礎，再利用 EC 加量測 (p.55 日本農工大學 圖 4-27)</p>	
	<p>5. 污染源通量檢測場如垃圾掩埋場，仍宜以 CC 為基礎，再行 EC 量測。</p>	<p>感謝委員建議，之後進行相關的場域如垃圾掩埋場研究會優先考量您的建議。</p>
	<p>6. 全國性及都市 GHG' S 量測除了 EC 和 LICOR 之外，仍很期待參酌引進飛機航測和衛星觀測，如 NOAA GHG' S 通量分析包括監測網及排放量分析模式(carbon tracker)</p>	<p>感謝委員建議，因受限於資源，本團隊目前未規劃飛機航測，另外我們將來會嘗試取得衛星觀測公開資料搭配實測結果進行研析，感謝委員建議。</p>
	<p>7. 技術擴散及教育訓練宜有參與者的意見回饋及互動。</p>	<p>我們會參考您的建議，於日後舉行技術擴散及教育訓練時，將收集參與者意見回饋以利調整課程。</p>

陳律言委員	<p>1. 4.1.1 節中內容仍是各觀測網路之簡介，未見4.1.1 節標題所述之「通量技術發展趨勢」，建議確認後為應有之補充。</p>	<p>感謝委員建議，關於通量技術的部份還是以 ICOS 提供的最完整，有在本章節的 ICOS 小節內容(4.1.1(四)的第 5 小點)加入了通量技術發展描述。</p>
	<p>2. 表 3-4(p.25)中屬於本計畫實際採用之設備，應補充其偵測極限，測值時間解析度與具體性能數據於表格或該章之相應文字段落中。</p>	<p>感謝委員建議，已將建議內容修改於報告中。</p>
	<p>3. 4.1.2 節之各國場域比較似仍未有綜整比較，建議補充。</p>	<p>感謝委員建議，感謝委員建議，新增水稻田場域在中國、日本、韓國、印度等地的文字敘述於報告的 4.1.2 節。</p>
	<p>4. 4.1.3 節內容包括 CDM，GS，Verra 此三標準，惟 p.11 工項一</p>	<p>本計畫主要在於開放式農地場域的溫室氣體通量檢測系統方法開發和驗證，依招標規範一(三)2.為彙整國際碳驗證相關機構及標準，如 Indigo、VCS、GS、ACR、CAR 等，</p>

<p>(三)2. 中尚有 Indigo, ACR, CAR 未出現於該節之內容中，宜予補充，或具體說明卻無相關方法學。</p>	<p>只挑選工項中比較有代表性的 3 個機構來做說明。</p>												
<p>5. p.11 工項一 (三)3 之國內外農業碳驗證標準方法，宜依 4.1.3 節已有內容及可能補充者，列出比較表格呈現。</p>	<p>補充比較表格如下：</p> <table border="1" data-bbox="700 765 1337 1904"> <thead> <tr> <th>機構</th> <th>方法學</th> <th>調整/管理方向</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CDM</td> <td>透過調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量</td> <td>連續淹田/間歇性淹田(乾濕交替法)/水稻移植/水稻直接播種</td> </tr> <tr> <td>GS</td> <td>農業操作改善</td> <td>改善犁田整地方法/改善稻田管理/改善草地管理/有機施肥或肥料管理</td> </tr> <tr> <td>Verra</td> <td>農業土地管理(ALM)</td> <td>涉及對肥料或其他土壤改良劑的應用、灌溉/水管理、耕作、殘渣管理、作物種植和收割，及/或放牧操作實務</td> </tr> </tbody> </table>	機構	方法學	調整/管理方向	CDM	透過調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量	連續淹田/間歇性淹田(乾濕交替法)/水稻移植/水稻直接播種	GS	農業操作改善	改善犁田整地方法/改善稻田管理/改善草地管理/有機施肥或肥料管理	Verra	農業土地管理(ALM)	涉及對肥料或其他土壤改良劑的應用、灌溉/水管理、耕作、殘渣管理、作物種植和收割，及/或放牧操作實務
機構	方法學	調整/管理方向											
CDM	透過調整水稻種植用水管理來實踐甲烷排放減量	連續淹田/間歇性淹田(乾濕交替法)/水稻移植/水稻直接播種											
GS	農業操作改善	改善犁田整地方法/改善稻田管理/改善草地管理/有機施肥或肥料管理											
Verra	農業土地管理(ALM)	涉及對肥料或其他土壤改良劑的應用、灌溉/水管理、耕作、殘渣管理、作物種植和收割，及/或放牧操作實務											

	6. 4.2 及 4.3 節建議納入專諮詢會後所產出之修訂版本，做必要之修訂。	謝謝委員，相關的專有名詞文字修正以及專有名詞對照表已完成修改，其他技術層面的資料會在之後版本做出滾動式修正。
	7. 4.5 節所述工作坊內容側重 p.12~13 工項五(三)、(四)，建議在報告中述及此二主題之重要性。	感謝委員，已將建議內容修改於報告中。
顏振華委員	1. 簡報 p.22 及報告 p.173 建議 2024 排放清冊的甲烷排放係數的引用情境可以略報告中說明。	感謝委員建議，已將建議內容修改於報告中(第 4.1.1 章節)。
	2. 簡報 p.11 列出了主要的農地管理減碳策略，建議可以補充在報告中；並說明報告 p.167 中，4.1.1	感謝委員建議，已將建議內容修改於報告中(第 4.1.1 章節)。

	<p>節何以選擇農廢 (稻桿)移除作為本期計畫的減碳情境（例如簡報中提及的減少酸酵情況）。</p>
	<p>3. (1) 第 5.2 節建議第 1 點提到可提供農業部門做為農地碳匯驗證評估之參考，建議可蒐集農業部是否在這部分已有相關研究或作為？</p> <p>(2) 第 5.2 節建議第 2 點提到進而制定開放式都市場域溫室氣體通量檢測系統使用，然在簡報 p.9 亦提及東京有都市高樓層的通量檢測，後續的研究是否要侷限</p> <p>感謝委員建議，本團隊這幾年都有持續和農試所合作，他們也有進行溫室氣體通量的研究。本團隊研究的這個溫室氣體通量監測方法不一定要侷限在開放式都市場域，不過因為要符合渦流相關法的基本假設，場域的挑選是會受到一定的限制。</p>

	於”開放式”都市場域。	
	4. 第 5.3 節（預定執行進度及查核重點）、5.4 節（查核重點）以無需安排在第五章（結論與建議）中，若要在報告中呈現或可放在第二章末或第三章開頭。	感謝委員建議，已將建議內容修改於報告中（第三章）。
	5. 勘誤部分 (1) 目錄 p. II 未行有空格宜刪除。 (2) 成果報告中尚有部分規劃性字句（p.167、p.168、p.182 及 p.185 等）建議調整。 (3) p.173 第二行所引表 4-30 似為表 4-31 之	感謝委員建議，已將建議內容修改於報告中。

	誤，建議修正。	
許元正委員	1. 5.2 建議一節，敘述方式請與委託單位討論後調整。	感謝委員建議，已將建議內容修改於報告中。
	2. 本計畫進行水稻田對全球 CH4 排放係數估計值與全球估計值相較僅為 22.7%，請補充說明。	感謝委員建議，這部分內容經團隊討論後覺得我們只是單一次資料不適合拿來做比較，已經內容做修改移除。
	3. 圖 4-70 日夜風場圖是否可增加風塊圖，較能明瞭監測期間風場的變化，尤其夜間似乎有較大變化，這部分在最後數據解析會有什麼影響也請補充。	感謝委員建議，已於圖 4-68 加入風塊圖。
	4. 計畫結論部分是否能夠增加本項技術應用於不同場域的可行性	感謝委員建議，本項技術經過一些條件修改後可應用於都市及污染逸散源及森林場域，因為要符合渦流相關法的基本假設，場域的挑選是會受到一定的限制。

	評估。	
巫月春主席	<p>1.本計畫目標為開發開放式場域通量技術，開發過程先以農地場域進行減量初探，於霧峰農地進行移除稻稈因為屬單一測試，需更多的測試資料加以確認，請於文中明確說明本數據非為定論。</p>	感謝主席建議，已將建議內容修改於報告中。
	<p>2.簡報第 22 頁 N2O 的主要來源? 跟施肥是否有關? 是否可以將施肥時間標註於圖內。</p>	感謝主席，已將建議內容修改於報告中。
	<p>3.成果報告第 164 頁塔高與量測範圍的關係論述不完整，再請補充說明。另除了量測儀器規範外，</p>	感謝主席建議，已將建議內容修改於報告中。本計畫使用的量測儀器規範如表 3-6，通量塔建置規範因受限於各種場域，請參考附錄溫室氣體通量檢測指引草案的 3.5~3.5.3 章節，如本計畫採用的示範場域霧峰農試所為例，示範場域的通量塔設置高度為 2 公

	<p>請補充通量塔建 置規範，例如設 置高度、位置等 最適環境規範； 多少範圍須設置 一處等。</p>	<p>尺，在我們的目標場域(1 公頃稻田)可以涵 蓋的通量足跡範圍為 80%。</p>
--	---	---

環境部
國家環境研究院

溫室氣體通量監測指引草案

執行單位:中央研究院環境變遷研究中心

國家環境研究院

中華民國 113 年 11 月

目錄

1.前言	1
2.本指引名詞定義	2
3.渦流相關法(Eddy Covariance Method)通量監測.....	4
3.1 涡流相關法通量監測理論	4
3.2 涡流相關法通量監測工作流程.....	6
3.3 溫室氣體通量監測所需硬體需求.....	8
3.4 開放式及閉路式通量監測系統.....	12
3.4.1 開放式通量監測系統架設	12
3.4.2 閉路式通量監測系統架設	13
3.5 通量監測系統位址及高度選擇.....	14
3.5.1 通量監測系統量測高度	15
3.5.2 通量監測塔的選擇.....	18
3.5.3 通量足跡	19
3.6 進氣管氣體層流與紊流.....	22
3.7 其他輔助量測設備	24
3.8 電源供應	25
3.9 雜訊控制	26
3.10 資料紀錄器	26
3.10.1 資料紀錄器類別	27
3.11 通量監測系統所需軟體需求.....	28
4 溫室氣體通量監測系統維護方法	32
4.1 紅外光吸收光譜 CO ₂ /H ₂ O 量測及三維音波風速計維護方法	33
4.2 甲烷(CH ₄)分析儀維護方法	43
4.3 氧化亞氮(N ₂ O)分析儀維護方法	49
4.4 校正氣體規格與存放	53
4.5 設備材料與人力需求配置	54
4.6 溫室氣體通量監測系統性能測試	55
4.6 歐洲綜合碳觀測系統(ICOS)生態測站設備規範	62
5 數據資料處理	66

5.1 資料蒐集與檢索.....	66
5.2 單位轉換.....	67
5.3 消除資料異常值.....	68
5.4 消除資料趨勢性.....	69
5.5 WPL 校正.....	69
5.6 時間延遲校正.....	70
5.7 座標軸旋轉.....	71
5.8 平均時距選擇.....	72
5.9 資料品質控制.....	73
5.10 能量平衡式.....	77
5.11 共頻譜分析.....	79
5.12 資料補遺.....	81
5.13 隨機通量監測誤差	82
6.參考文獻	83
附錄	87

圖目錄

圖 3- 1 生態系統中渦流示意圖	4
圖 3- 2 雷諾分解 (Reynolds decomposition) 理論示意圖.....	5
圖 3- 3 涡流相關法典型通量監測工作流程	7
圖 3- 4 土壤表面上方測量高度與分層.....	15
圖 3- 5 進氣口相對於三維音波風速計的位置示意圖.....	17
圖 3- 6 LI-7700 開放式甲烷氣體分析儀(a)架設在 10 m 高度以上的通量塔(b)架設 接近植被高度	17
圖 3- 7 矩形截面鷹架通量塔	19
圖 3- 8 三腳桿通量塔	19
圖 3- 9 通量足跡概念.....	20
圖 3- 10 不同架設高度蒸發散(ET)通量貢獻與迎風距離關係 (a)代表來自上風處 某距離通量貢獻 (b)代表通量貢獻累積.....	21
圖 3- 11 不同架設高度通量潛在貢獻 (a)塔高 4.5 公尺 (b)塔高 1.5 公尺	22
圖 3- 12 進氣管中的層流與紊流	23
圖 3- 13 氣體衰減對 10 Hz 非黏性氣體、黏性氣體和溫度的實際影響	24
圖 3- 14 EddyPro® 7 Software.....	29
圖 4- 1 開放式二氧化矽/水氣分析儀(a) IRGASON, Campbell, USA; (b) LI 7500DS, LI- COR, USA	33
圖 4- 2 Campbell IRGASON 其他配件示意圖.....	35
圖 4- 3 EC150 Campbell IRGASON H ₂ O/CO ₂ 分子篩示意圖	35
圖 4- 4 三維音波風速計感測器上的吸水纖維正確安裝的方式	36
圖 4- 5 IRGASON 氣體分析儀鏡面上的吸水纖維正確安裝的方式	37
圖 4- 6 IRGASON 校正套管安裝示意圖.....	39

圖 4- 7 CH ₄ 參考機種(a) LI-COR LI-7700(b)&乾燥劑位置示意圖(b)LI 7550 資料整合 (c) CR1000x 資料紀錄器(d)防雨箱.....	44
圖 4- 8 LI-7700 鏡面清潔元件(左邊為待清潔之鏡面).....	45
圖 4- 9 LI-7700 通量系統於霧峰農試所氣體校正照片	46
圖 4- 10 LI-7700 校正視窗介面.....	46
圖 4- 11 氧化亞氮(N ₂ O)氣體監測儀(a)氧化亞氮(N ₂ O)監測系統平面圖(b) Aerodyne Research Inc. (ARI) TILDAS	49
圖 4- 12 進樣管路(a)防雨帽和(b)防蟲網示意圖	50
圖 4- 13 Aerodyne Research Inc. (ARI) TILDAS 恒溫箱內 TSI 5230-2 流量計	51
圖 4- 14 氣體分析儀器 TILDAS 對於兩種不同溫室氣體 N ₂ O / CH ₄ 的濃度校正結果	56
圖 4- 15 TILDAS-CS 的精密度測試之時間序列圖(a) CH ₄ 、(b)N ₂ O	60
圖 4- 16 TILDAS-CS 再現性測試計算使用資料時間序列圖 (10 分鐘)	62
圖 4- 17 Aeris_Ultra 精密度結果(a)CO ₂ 、(b)CH ₄ 及(c)N ₂ O.....	65
圖 5- 2 數據資料處理流程	66
圖 5- 3 LoggerNet 軟體示意圖	67
圖 5- 4 消除資料異常值示意圖(Despiking)	69
圖 5- 5 三種主要去趨勢方法(a) 移動平均 (b) 線性去趨勢 (c) 非線性濾波	69
圖 5- 6 WPL 通量校正前後示意圖.....	70
圖 5- 7 時間延遲校正示意圖(Time delay correction).....	71
圖 5- 8 地表能量平衡示意圖	78
圖 5- 9 資料頻譜分析示意圖	79
圖 5- 10 資料頻譜分析示意圖	80
圖 5- 11 理想共頻譜分析與頻譜衰減示意圖	81

表目錄

表 3- 1 開放式分析儀以及閉路式分析儀在通量系統優缺點	8
表 3- 2 常見溫室氣體通量監測設備廠牌及型式.....	10
表 3- 2 常見溫室氣體通量監測設備廠牌及型式(續)	11
表 3- 3 通量計算及輔助軟體參考	30
表 4- 1 水氣(H ₂ O)、二氧化碳(CO ₂)及三維音波風速計分析儀維護	42
表 4- 2 甲烷(CH ₄)LI 7700 分析儀維護.....	48
表 4- 3 氧化亞氮(N ₂ O) TILDAS 分析儀維護建議.....	52
表 4- 4 通量檢測站儀器維護人力(時間)需求表	54
表 4- 5 三種不同溫室氣體的校正曲線實際濃度配製點	57
表 4- 6 ICOS 大氣測站三種溫室氣體精密度和再現性規範.....	57
表 4- 7 氣體分析儀器低頻精密度測試得到的結果.....	59
表 4- 8 氣體分析儀器低頻再現性測試得到的結果	61
表 4- 9 氣體分析儀器高頻精密度測試結果	64
附表 1 中英文名詞對照表.....	87

(一)前言

大氣中溫室氣體濃度的影響以及差異可歸因於地域、季節、生物、非生物以及環境因子之調節，也因人為干擾日趨嚴重，全球碳平衡產生很大變化。近年來「2050 淨零排放」的政策目標及《氣候變遷因應法》之相關規範，全國政府的各部門正透過強化法規與改善政策的方式來面對全球日趨嚴峻的氣候變遷。

減緩溫室氣體已是國際間許多國家或企業推動之共同努力之目標，其中以大氣中溫室氣體濃度變化趨勢以及水氣、能量收支為目前最關注的焦點。然而，溫室氣體生命週期非常長，持續監測並瞭解都市環境、農業場域、森林生態系統和大氣之間的交互作用至關重要。由於現今所監測到的溫室氣體濃度是過去長期累積的結果，因此減量措施所產生區域(碳源、碳匯)效益變化無法透過濃度資料來檢視與呈現減量成效。況且目前國內尚未有簡單、完整且可靠的技術來進行較準確且大範圍「面」的各種溫室氣體排放通量監測。

有鑑於此，本指引參考 LI-COR Biosciences 通量測站架設方法、歐洲綜合碳觀測系統(Integrated Carbon Observation System, ICOS)測站認證標準及國際上各個通量觀測網絡，並以開放式農業(open farmland)通量監測場域為例，提供國內三種溫室氣體(CO_2 、 CH_4 及 N_2O)通量監測系統架設、適用範圍、設備及材料、通量監測執行步驟、基礎設施與人力需求配置提出建議以及如何進行現地測站之維護。透過本指引可初步應用於評估監測場域對溫室氣體短、中期的影響，進而提供未來更為準確的環境調查資料供政策擬定之參考依據。

(二)本指引名詞定義

本節將彙整開放式農地場域溫室氣體通量監測指引名詞定義，內容包含渦流相關法、紊流、層流、溫室氣體、通量、通量足跡、粗糙層、碳匯及碳源等，逐一彙整如下。

- ◆ 涡流相關法(Eddy Covariance Method):渦流相關法為一現今公認可長期量測大氣地表層內 (Atmosphere Surface Layer) 溫室效應氣體、水氣及能量通量之良好方法。由於環境中由許多大大小小不同尺度的渦流 (eddy) 所組成，每一個渦流擁有三維的立體結構，並同時具有水汽、熱能及化學組成的差異。渦流相關法只需要透過單點、且連續觀測該渦流的變化現象即可得知當時候渦流內部的物理量變化。
- ◆ 紊流(Turbulent Flow): 是流體運動中一種不規則、混亂且難以預測的狀態，通常發生在高雷諾數(Reynolds number) 條件下。
- ◆ 層流(Laminar Flow):是流體運動的一種狀態，特徵是流體粒子沿著平行的流線 (streamlines) 有序地流動，彼此之間幾乎沒有混合或交錯。層流通常出現在流速較低或雷諾數 (Reynolds number) 較小的情況下，適用於描述流體運動中的簡單、穩定模式。
- ◆ 溫室氣體 (Greenhouse Gases):指能夠吸收從地球表面釋放出紅外線的氣體，其中包括二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4)、氧化亞氮 (N_2O)、氫氟碳化物 (HFCs)、全氟碳化物 (PFCs)、六氟化硫 (SF_6)、三氟化氮 (NF_3) 及其他經中央主管機關公告者。
- ◆ 通量(Flux): 為單位面積時間內通過之物理量，可進一步用於描述地表生態系與大氣之間的交互作用，例如：通量的強弱與傳輸方向。
- ◆ 通量足跡 (Flux Footprint) :是描述地表與大氣之間的渦流通量（如溫室氣體、水蒸氣或熱量）在測量位置周圍的源區 (source area) 影響範圍的

概念。

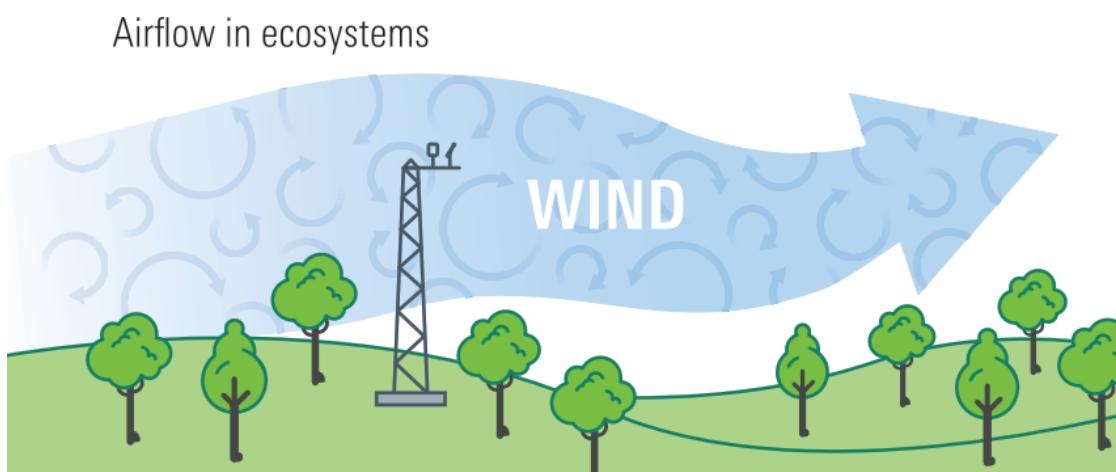
- ◆ 碳匯 (Carbon Sink): 自然界的碳匯乃指含碳物質經碳循環過程的歸結場所，自然界的碳被固定在海洋、土壤、岩石與生物體中。另外，依據聯合國氣候變化框架公約(UNFCCC)定義為從大氣中清除二氧化碳的人為過程、活動或機制。
- ◆ 碳源 (Carbon Source): 碳源是指二氧化碳氣體成分從地球表面進入大氣（如地面燃燒過程向大氣中排放 CO₂），或者在大氣中由其他物質經化學過程轉化為二氧化碳氣體成分（如大氣中的 CO 被氧化為 CO₂，對於 CO 來說也叫源）(IPCC, 2000)。依據《聯合國氣候變化框架公約》(UNFCCC)將碳源定義為向大氣中釋放二氧化碳的過程、活動或機制。
- ◆ 固定通量層(Constant Flux Layer):是大氣邊界層 (Atmospheric Boundary Layer, ABL) 近地表層，通常厚度為數十公尺，大約佔整個大氣邊界層的下方 10%。在此層中，動量、熱量或其他物質的垂直湍流通量 (vertical turbulent flux) 隨高度的變化小於其總量的 10%。固定通量層的存在和特性對於地表與大氣交互作用之研究，如氣候模型、污染物傳輸和地表紊流等，具有重要意義。
- ◆ 粗糙層(Roughness Sublayer):位於大氣邊界層 (Atmospheric Boundary Layer, ABL) 內，受到地表粗糙源（例如樹冠、建築物或其他地表障礙物）直接影響。粗糙層是地表與大氣之間渦流交換的關鍵區域，渦流結構和流場特性在此層中有顯著變化。

(三) 涡流相關法(Eddy Covariance Method)通量監測

3.1 涡流相關法通量監測理論

本指引介紹渦流相關法用於測量通量所需的風速、溫度、溫室氣體和濕度(水蒸氣密度)的渦流量測儀器。通量監測主要是以渦流相關法為基礎，並根據泰勒假設 (Taylor's hypothesis)原理進行推估。

因環境中存在許多紊流現象，紊流是由許多大大小小不同尺度的渦流 (eddy) 所組成。每一個渦流擁有三維的立體結構，並同時具有水汽、熱能及化學組成的差異。該理論假設當渦流通過偵測儀器時不受其影響。紊流場的物理性質(溫度、濕度以及空氣密度)具有定常性，即物理性質的空間分布可透過單點連續觀測所取得。因此，研究人員只需要透過單點、且連續觀測渦流的現象即可得知當時候渦流內部各物理量的變化 (圖 3-1)。



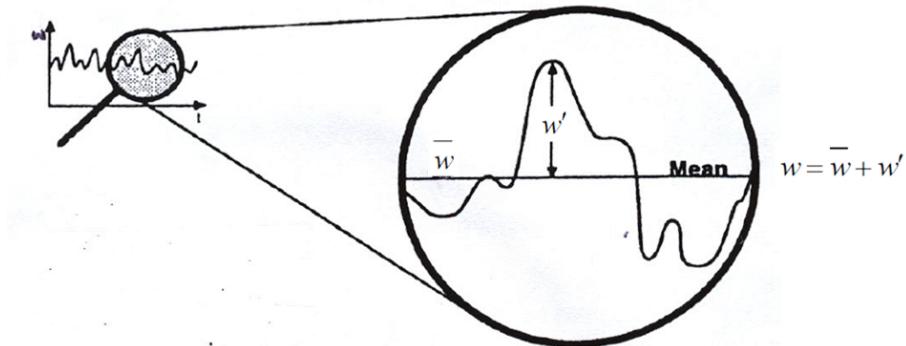
資料來源: Burba (2021)

圖 3- 1 生態系統中渦流示意圖

為了能具體了解整個紊流現象(Reynolds, 1894)，可透過雷諾分解(Reynolds decomposition) 理論來進一步描述並計算。紊流現象可以被認為是一段時間內平均值上下擾動的部分，也就是說在紊流中的每一個物理量，皆可以拆解成平均量和變異量(Stull 1988) (Eq. 1)。

$$s = \bar{s} + s' \quad (1)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2)$$



資料來源: Stull, 1988; 吳致甄, 2009

圖 3-2 雷諾分解 (Reynolds decomposition) 理論示意圖

以某個瞬間之混合比 (s) 及垂直風速 (w) 為例，可拆解成平均項及變異項 (圖 3-2)。環境中的通量主要是在描述通量在垂直的變化，根據紊流的假設， ρ_d 為乾空氣密度， w 為垂直風速， s 為微量氣體之混合比或莫爾濃度(乾空氣狀態下)，其通用的公式可以表示為(Eq. 3):

$$Flux = \bar{\rho}_d \bar{w} \bar{s} \quad (3)$$

根據雷諾理論，將各項分解平均項跟變異項(Eq. 4)。由於渦流運動是隨機的，根據雷諾理論紊流經長時間平均後將會為零 $\bar{w}' = 0$ 及 $\bar{s}' = 0$ ；此外，雷諾假設在一般大氣條件下，地形均勻且平坦，可假設空氣流場具有不可壓縮流，可忽略渦流氣團密度變化 $\bar{\rho}'_d = 0$ 、 $\bar{\rho}_d$ 為定值所以，瞬間平均氣體通量可以表示如(Eq. 5)。

$$Flux = (\bar{\rho}_d + \rho'_d)(\bar{w} + w')(\bar{s} + s') \quad (4)$$

$$Flux = \bar{\rho}_d \bar{w} \bar{s} + \bar{\rho}_d \bar{w}' s' \quad (5)$$

第二個重要假設，平坦地形上無幅合 (convergence)及幅散 (divergence)，即平均垂直風速應為零 ($\bar{w} = 0$)。最後上述公式可改寫為 (Eq. 6)。由上述結果可以得知，渦流相關法之通量計算即為欲測物質之濃度($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}, \text{H}_2\text{O}$, etc.)與垂直風速之共變異量乘積(Kaimal 1994; Lee et al. 2005; Stull 1988)。

$$Flux \approx \bar{\rho}_d \bar{w}' s' \quad (6)$$

由於地表層氣體交換或是擴散是由大大小小渦流所生成，也因垂直風速與濃度瞬變量非常快速，必須使用高速反應之偵測器來執行。典型高速採樣器採樣頻率可達 1-20 Hz，為符合小渦流監測需求，並避免樣品採樣標準差過大，至少設定 10 Hz 為基準進行高頻採樣。

3.2 涡流相關法通量監測工作流程

下圖 3-3 提供典型通量監測完整工作流程架構與所需的操作順序，通量監測工作分為四個主要階段：實驗設計、場域架設、原始數據處理及通量數據處理與分析。

- (1) 實驗設計階段包含儀器選擇、軟硬體需求或調整現有的軟體來收集和數據處理、合適場域選擇(通量塔位置)以及建立可行的儀器設備維護計畫。
- (2) 實施階段主要內容為通量塔設置、資料蒐集和檢索測試、數據處理測試以及持續遵守儀器設備維護計畫。
- (3) 資料處理部分包括「原始(raw data)」資料的處理以及「通量(flux)」資料處理。原始數據資料通常為 5、10 或 20 Hz 取樣頻率，數據平均時距的處理（通常為 0.5 小時）。其他處理內容包括單位轉換、消除數據歧異值、數據校正、座標軸旋轉、時間延遲校正、數據去趨勢、其他數據資料校正程序。通量資料處理程序包括需進行資料品質控制、數據補遺、最後進行數據成果解析。



圖 3-3 涡流相關法典型通量監測工作流程

3.3 溫室氣體通量監測所需硬體需求

本指引通量測定主要以渦流相關法(Eddy Covariance, EC)為主，為了要符合此方法的假設和計算基礎，儀器選用上需要達高頻(觀測頻率 $\geq 10\text{ Hz}$)的三維音波風速計，以及高頻(觀測頻率 $\geq 10\text{ Hz}$)氣體分析儀器。高頻氣體分析儀器又可分為開放式跟閉路式，兩者主要的差異為氣體採樣點及光學分析單元的位置。開放式分析儀路徑兩者同步，但在閉路式路徑為分離狀況(需透過額外管路連通進樣口進行取樣)。兩種方式不單純只是形式上的不同，也會進一步影響實驗設計以及資料處理方式。兩種型式分析儀器在實際應用上各有其優缺點，可依據使用者需求選擇，下表 3-1 彙整使用上優缺點。表 3-2 彙整目前可取得的相關設備及常見廠牌以及型號。

表 3-1 開放式分析儀以及閉路式分析儀在通量系統優缺點

微量氣體分析儀	開放式(Open-Path)	閉路式(Closed-Path)
優點	<ol style="list-style-type: none">1. 低電源需求。2. 鏡面維護簡易。3. 幾乎沒有管路延遲效應。4. 系統簡單、輕巧、容易使用。5. 高頻訊號衰減可以忽略。6. 測得為路徑距離平均濃度。	<ol style="list-style-type: none">1. 以長時間來看儀器訊號較穩定，且資料缺失率較低。不易受到降雨與霧而干擾訊號。2. 精度較高、偵測極限通常較低。可自動執行校準程序不需人力的校正。3. 對於空氣密度跳動的修正值較開放式氣體分析儀來的小。4. 測得為進樣口濃度。

缺點	<p>1. 強降雨、下雪或儀器結冰易干擾觀測，導致數據缺漏。</p> <p>2. 雷射鏡面維護頻率要求高。</p> <p>3. 偵測極限較高，干擾多。</p>	<p>1. 使用幫浦抽氣致使高電源需求。</p> <p>2. 訊號易受到進氣管影響而衰減以及有時間延遲問題，需進一步校正。</p> <p>3. 雷射鏡面清理技術較高，須拆機維護。</p> <p>4. 部分機種須提供恆溫環境。</p>
----	---	--

表 3-2 常見溫室氣體通量監測設備廠牌及型式

監測項目	常見型號/廠牌	圖示	型式
三維音波風速、風向	<ul style="list-style-type: none"> ● CSAT3B/ IRGASON, Campbell Scientific Inc. ● Gill-50/100/ Wind Master Pro. 	 CSAT3B	開放式(Open-Path)
CO ₂	EC150/IRGASON, Campbell Scientific Inc.		開放式(Open-Path CO ₂ /H ₂ O Analyzer)
	LI-7200RS/ LI-COR		閉路式(Closed-Path CO ₂ /H ₂ O Analyzer)
	LI-7500DS/ LI-COR		開放式(Open-Path CO ₂ /H ₂ O Analyzer)
	MIRA-Ultra-CO ₂ / Aeris		閉路式(Closed-Path CO ₂ Analyzer)

表 3-3 常見溫室氣體通量監測設備廠牌及型式(續)

監測項目	常見型號/廠牌	圖示	型式
CH ₄	LI-7700/ LI-COR		開放式(Open-Path CH ₄ Analyzer)
	MIRA-Ultra-LDS/ Aeris		
	TILDAS-CS for CH ₄ / Aerodyne Research Inc.		
N ₂ O	MIRA-Ultra-N ₂ O/ Aeris		閉路式(Closed-Path N ₂ O/CH ₄ Analyzer)
	TILDAS-CS for N ₂ O/ Aerodyne Research Inc.		

3.4 開放式及閉路式通量監測系統

開放式和閉路式通量監測系統的安裝、校準和通量計算方法有所不同。因此，必須了解兩種類型觀測系統的優點和缺點，以便使用者選擇最合適觀測的系統。開放式和閉路式通量監測系統在安裝、校準和反應頻率特性方面的差異分述如下。

3.4.1 開放式通量監測系統架設

開放式監測系統可直接暴露於大氣中對氣體進行濃度分析，卻容易受外在環境的影響，例如大雨、雲霧、鳥類糞便及鳥類滯留等，常造成儀器無法正常運作或是資料錯誤等。反之，閉路式監測系統則是利用抽氣幫浦將氣體抽入取樣管，氣體隨著取樣管從塔頂至分析儀器進行分析。

氣體經過取樣管傳輸需耗費較長的時間，容易導致分析資料無法與風速計量測時間同步。在塔觀測中，塔本身和塔上的儀器可能會造成嚴重的流量畸變，因此在塔上安裝通量感測器時需要注意，以便將誤差控制在可接受範圍內。Kaimal 和 Finnigan (1994) 提出了一些開放式分析儀安裝的建議，彙整如下(Kaimal & Finnigan, 1994)：

- 為了避免塔的直接影響，建議從塔頂部直立一根細桿，在桿的末端安裝感測器。為此，請選擇長度至少為塔架寬度 3 倍的桿。
- 如果感測器必須安裝在塔架的中間高度，則應將臂桿沿盛行風向水平伸出，並將感測器安裝在距離塔架最大塔寬 1.5 倍以上的位置。
- 由於塔架的背風面受到尾流的強烈影響，因此在分析時應排除以塔架風道為中心的 60°風向段所收集的資料。
- 感測器附近或背風面不應放置儲物箱等障礙物，在安裝超音波風速計時，水平調整相當重要。應使用水平儀仔細進行調整，因為分析儀探測頭的傾斜會導致一些誤差。然而，如果探頭安裝在吊桿頂端，要達到仔細的水平調整會較為困難。在這種情況下，應在探測頭底座上安裝二維傾斜儀並測量傾斜角度，以便隨後校正探測頭傾斜度。

- 架設前，應將探測頭蓋上盒子，並檢查零風速輸出。如果使用開放式分析儀，量測頭部應置於與超音波風速計探測頭相同的高度。建議裝設方式應以不干擾通過超音波風速計的風為優先考量。
- 風速計探測頭和其他儀器量測盡可能靠近，風速計與開放式分析儀觀測頭之間的間隔距離越大，頻譜的高頻分量衰減就越大，導致通量低估。對於由於感測器分離（路徑）引起的誤差，建議使用傳遞函數進行校正(Kaimal et al., 1972; Moore, 1986)。

3.4.2 閉路式通量監測系統架設

閉路式系統的設置通常比開放式系統的設置更為複雜。首先，將閉路式系統的進氣口固定在超音波風速計探頭附近，然後安裝一條管道將空氣輸送到分析儀。分析儀與幫浦和氣體開關裝置一起安裝在恆溫容器或室內中。在閉路系統中，空氣被吸入管中。因此，該取樣系統之 CO₂ 和水氣密度變動的時間序列落後於風速變動的時間序列。

因此資料採集後，須對兩個時間序列之間的時間偏移進行校正（請參閱第 5.6 節）。由於當空氣通過管子時，密度變動的高頻訊號有可能產生衰減，因此如有必要應對頻譜進行校正（請參閱第 5.11 節）。

閉路式系統允許將分析儀放置在溫度控制區域。因此，閉路式系統無論天氣條件如何都能穩定運行，因此被認為是相對於開放系統的優勢。透過定期給予分析儀特定標準濃度 CO₂ 氣體，可以一定的精度連續測量 CO₂ 絕對濃度值。這個精度比大氣 CO₂ 背景濃度測量的精度低一個數量級以上，但足以計算陸域植被冠層之 CO₂ 氣體的變動。如果閉路式系統安裝於作物等高植被上方，則分析儀可安裝在觀測塔離離地面的某個高度，在前一種情況下，進樣管的長度應最小化到幾公尺內。對於長度小於幾公尺的管道，由於使用管道而導致的時間延遲通常為 1 至 2 秒，對於 35 公尺長的管道，通常為 4 至 6 秒。

就管內流動而言，紊流流況較層流能更控制高頻成分的衰減，因此，通常會

以高達 6 至 10 L min^{-1} 的流速吸入空氣。當使用特別長的管子時，空氣以 20 至 50 L min^{-1} 的速率從塔抽至分析儀，並且一部分空氣分支到分析儀中。

幫浦之設置可在分析儀的上游或下游。如果使用長管且需要高流量，則通常在分析儀的上游設置高功率幫浦。如果使用短管，則幫浦可以設置在分析儀的下游，以控制幫浦引起的壓力波動。在任何一種情況下，分析儀單元都不同於大氣壓力，因此通量計算需要氣壓修正。

管內需要安裝過濾器，用以保護進樣管本身和分析儀免受污垢和灰塵的影響。過濾器應偶爾更換。加熱器可以安裝在分析儀的管子或盒子中，以保持閉路系統中的溫度高於環境空氣，防止系統中形成露水。

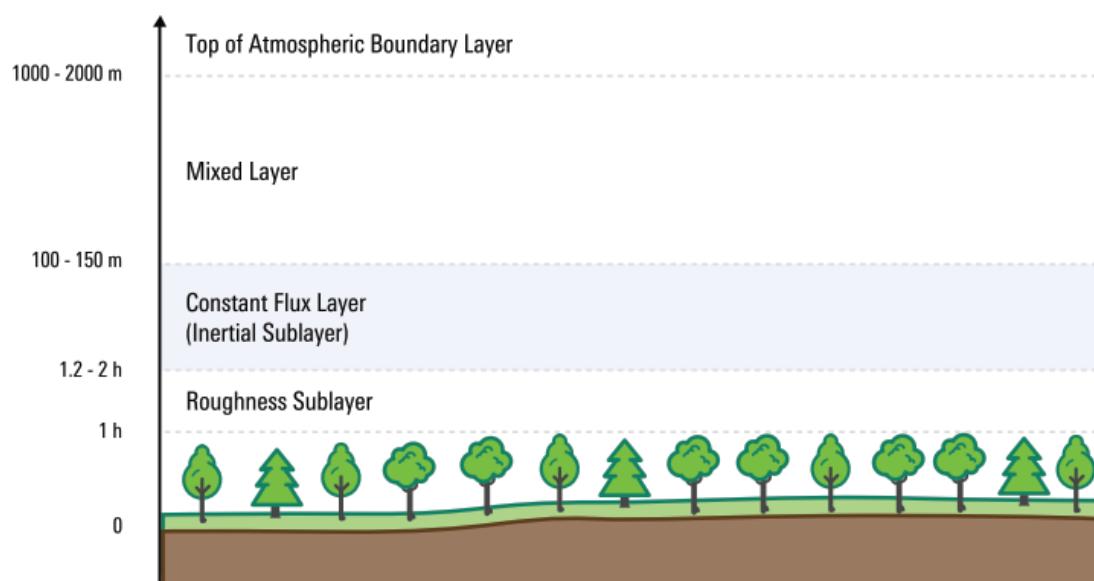
3.5 通量監測系統位址及高度選擇

本節介紹通量觀測系統位址及塔高度選擇，及附加設備和電源的建議方法。幾乎所有情況下，通量監測會先確定監測目標(生態系統)，然後尋找合適的監測位址（例如森林或草原）進行通量監測。一旦監測開始後，即難以更動，因此監測位置和高度是影響採集資料的重要因素。

通量測量的理想地點是地形平坦且植被均勻的地點。雖然現實的情況下地表具有傾斜或起伏的表面，該地形因素是通量監測目前一個重要的研究課題，但仍建議尋找條件理想的地點進行監測。如果已選定監測目標或感興趣地點（或場域），則應調查盛行風的季節變化。應選擇監測塔的潛在設置位置，以便在生物活動高的季節允許長時間的資料蒐集。如果風力條件未知，則應選擇場地的中心區域作為潛在的安裝位置。此外，塔的位置應考慮當地道路的便利性和商業供電的可用性，並應避免位於有間隙或地形崎嶇的地方。如果距離汽車通行道路太遠，維護和檢查工作將變得困難，數據品質也可能面臨風險。通量監測系統適用場域包含於農業系統、都市系統及污染逸散源場域。空間的大小會影響到通量觀測系統的通量足跡覆蓋率，經驗法則是垂直高度與水平吹風距離的長度比例約為 1:100 (Burba, 2022)。

3.5.1 通量監測系統量測高度

通量監測受上風區影響較大，且需要較長時間的資料紀錄。因此，為了提高監測通量的空間代表性，應提高監測高度，且要確保與目標觀測場域不同之上風處不會造成太大影響。



資料來源: Burba (2022)

圖 3- 4 土壤表面上方測量高度與分層

實際上，渦流相關法所使用儀器的最佳位置是在恆定通量層中(Constant Flux Layer)，位於土壤表面上方約 1.2-2 個樹冠層高度處，最好在樹冠頂部上方至少 1.0-2.0 倍，但在混合層(Mixing Layer)下方（大致為距土壤表面 100 – 150 m)(圖 3-4)。應避免在鄰近樹冠層附近進行監測，這對農田場域尤其重要，因距離植被屬粗糙度子層(Roughness Sublayer)，粗糙度子層中距離樹冠層太近的儀器，量測數據可能無法代表目標監測生態場域，也可能因單棵樹或植物等分支的局部影響或干擾。本節將進一步針對 2024ICOS 指引所提供之開放式通量監測系統 (三維音波風速計及 LI-7700)高度建議分別說明如下(ICOS, 2024):

A. 三維音波風速計

(1) 三維音波風速計設備高度建議

以三維音波風速計系統高度(H_m)架設為例，主要是以感測器的中心位置到植被(樹冠)層之間的距離來做計算， H_c 為植被(樹冠)層的高度。不論植被(樹冠)層 H_c 的高度為何， H_m 都不能低於 2 m。對於 H_c 不高於 1.75 m 的草地、農田和灌木， H_m 的高度範圍應符合 $1.67 H_c < H_m < 6H_c$ 。對於森林或複雜的生態系統， H_m 的高度範圍應符合 $1.67 H_c < H_m < 2H_c$ ，還需要盡量維持 [$H_m - 0.67 * H_c$] 的差值變化維持在 $\pm 10\%$ 之內，如果因為隨著植物成長而需要調整 H_m 的高度，更改 H_m 高度的頻率需要大於兩周。

另外以稻米的通量觀測為例，初始的 H_m 為 2 m，建議等稻米長到 0.8 m 時將 H_m 調整成 2.2 m，等稻米長到 1.1 m 時將 H_m 調整成 2.4 m，這樣從稻米長到 0.6 m 之後，都可以維持 [$H_m(2) - 0.67 * H_m(0.6)$] 的差值變化在 0.16 (1.6*10%) 之內 (ICOS, 2024)。

(2) 系統懸臂長度建議

為了盡量避免用來架設溫室氣體通量監測系統使用的通量塔或是支架影響到風場， ICOS Ecosystem Instructions TURBULENT FLUX CO₂ & energy Version: 20240119 提供溫室氣體通量觀測系統懸臂長度的建議。當塔的截面（或寬度）不超過 60 公分時，要求的 sonic boom 設計允許它從塔的外部延伸至少 85 公分，以確保達到功能或穩定性的需求。而對於較大截面尺寸的塔架，懸臂必須足夠長，使觀測系統至少位於最大截面尺寸的 1.2 倍距離處，無論通量塔尺寸如何，懸臂的最大長度為 4 公尺。

(3) 進氣口相對於三維音波風速計的位置

如果溫室氣體通量觀測系統中有使用到半閉路式氣體分析儀(LI 7200RS)，需要讓這個閉路式氣體分析儀的進樣口盡量靠近三維音波風速計感測器的中心點，要避免影響到風場，才可以減少通量計算上的誤差。以半閉路式氣體分析儀(LI 7200RS)為例，進樣管要有 5 度以上的傾斜角且中心必須放置在一個以 (X、Y、Z) 分別為 6.5 × 5 × 16 公分的區域內，該區域對應於(見下圖 3-5) (ICOS, 2024)：

- X = 三維音波風速計水平懸臂軸線之間的距離。
- Y = 垂直超音波臂中心點高度與下方支架的距離。
- Z = 水平懸臂軸線周圍的容差範圍（每個部分 8 公分）。

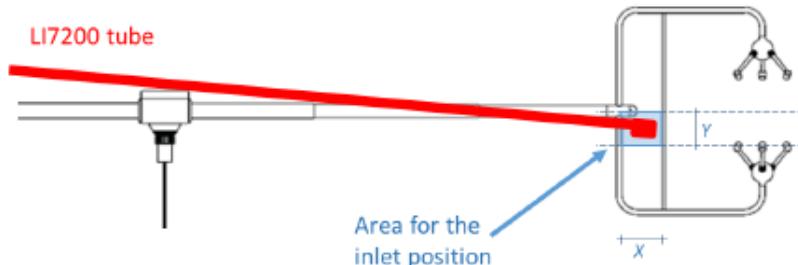
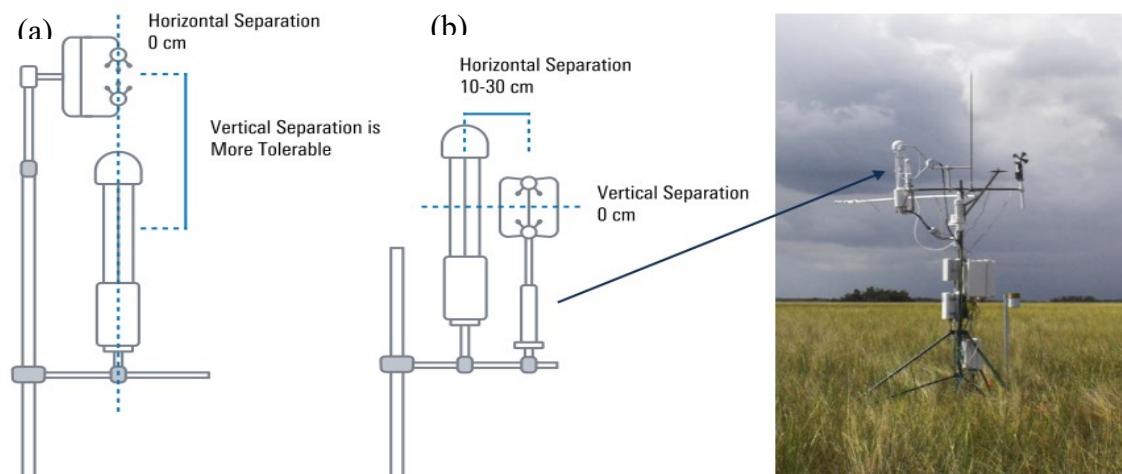


圖 3-5 進氣口相對於三維音波風速計的位置示意圖

開放式氣體分析儀 (例如 IRGASON 或是 LI-7700) 的感測器中心最好要能和三維音波風速計的感測器中心高度一致，開放式氣體分析儀和三維音波風速計的水平間隔建議在儀器邊緣之間約 10-30 cm (ICOS Ecosystem Instructions TURBULENT FLUX CO₂& energy Version: 20240119)，如果是架設在 10 m 高度以上的通量塔，開放式氣體分析儀可以放置在風速儀下方，使水平分離為零(圖 3-6)。



資料來源: Burba (2022)

圖 3-6 LI-7700 開放式甲烷氣體分析儀(a)架設在 10 m 高度以上的通量塔(b)
架設接近植被高度

B. LI-7700 開放式甲烷氣體分析儀

(1) LI-7700 開放式甲烷氣體分析儀設備高度建議

LI-7700 最好能以垂直方向安裝設置，有助於保持頂部鏡面的清潔。所有相關的配件盒子和外殼應該放置在氣體分析儀和三維音波風速計的下方或較遠的地方，盡可能使用 5 公尺長度的訊號傳輸線和電源線。如果站點的風向圖顯示有多個不同的風向，則氣體分析儀和其他龐大的結構（包括塔本身）應該相對於三維音波風速計放置在最不常出現的風向上。當站點的風向圖顯示為一個主要的風向時，則氣體分析儀和三維音波風速計應該垂直於主要的風向放置。建議將 LI-7700 溫度感測器探針遠離主要風向以及安裝最新版的輻射遮罩，前者可以延長溫度感測器探針的使用期限，後者可以維持上方的鏡面比較不容易變髒。

3.5.2 通量監測塔的選擇

在草原、稻田等地，多使用 2~3m 高的簡易三腳桿，在森林中則多使用 10 ~50m 高的觀測塔。觀測塔大致分為兩種基本類型：三角形塔和矩形截面鷹架塔。有中立式和獨立式兩種，其中立式比獨立式更具經濟性(圖 3-7& 3-8)。三角塔通常由鍍鋅鋼材料製成，具有高耐腐蝕。為了盡量減少塔架對通量觀測的影響，應選擇截面積較小的塔架，因為它使風容易穿過塔（遮擋影響較低）。然而，由於設備安裝、維護和校準等任務必須定期執行，因此提供接近觀測高度的鷹架是必須的。建造塔時，必須注意確保不會因踐踏周圍的植被而產生間隙。森林地面的狀況也需要注意，並且最好在森林地面上安裝保護裝置，例如針對土壤和植被的木棧道路。



資料來源: Eureka Flux Tower of PEARL



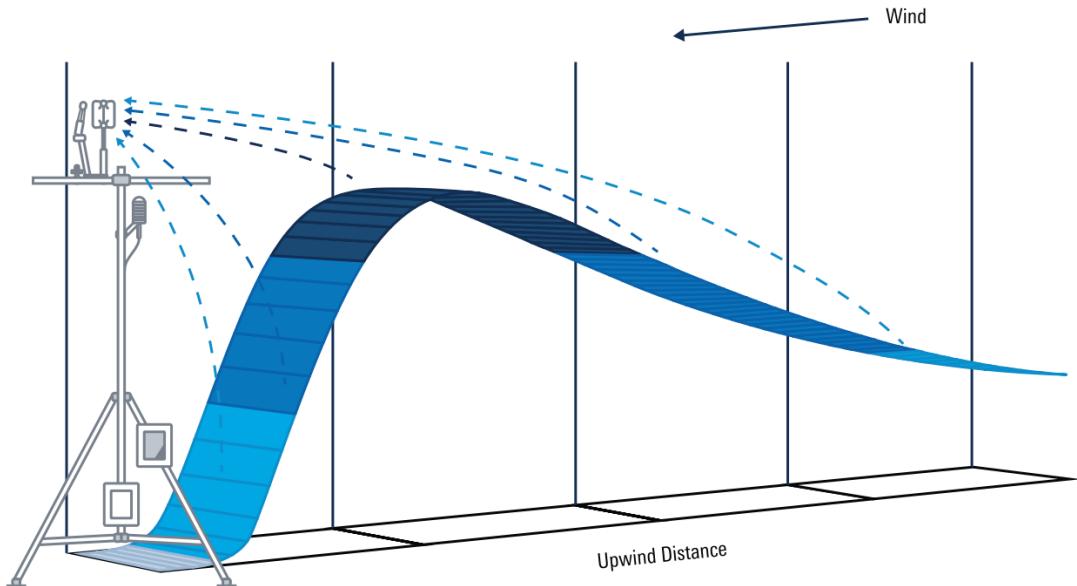
資料來源: Academia Sinica, Taiwan

圖 3-7 矩形截面鷹架通量塔

圖 3-8 三腳桿通量塔

3.5.3 通量足跡

用最簡單的方式來說明，通量足跡是塔上儀器「看到」的區域。換句話說，它是塔的上風區域，因此測塔上的通量監測系統可以記錄該區域所產生的通量。另一個經常使用的術語稱為「吹風距離/風域 (fetch)」通常是指在描述足跡時是以距塔的距離表示。了解通量足跡概念對於正確規劃和執行渦流相關法實驗至關重要。



資料來源: Burba (2022)

圖 3-9 通量足跡概念

通量足跡如上圖 3-9 所示：顏色越深代表來自該區域的通量貢獻越大。因此，大部分貢獻通常不是來自塔下，也不是來自於好幾公里之外，而是來自於兩者之間的某個區域。目前學界有許多模型可用於評估足跡貢獻的通量足跡模式，對於接近中性的條件(near-neutral conditions)，Schuepp 等人 (1990) 提出了簡單描述性的模型。此模型估計對通量測量 (cumulative normalized contribution to flux, CNF) 的累積標準化(normalized contribution)貢獻，該貢獻是根據中性條件下擴散方程計算 (Eq. 7)(Schuepp et al., 1990)。

$$CNF(X_L) = - \int_0^{X_L} \frac{u(z-d)}{u^* k x^2} e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k x}} dx = e^{-\frac{u(z-d)}{u^* k X_L}} \quad (7)$$

Cumulative Normalized contribution to Flux measurement (CNF) (%)

X_L , Distance from the station (m)

u , Mean integrated wind speed ($m s^{-1}$)

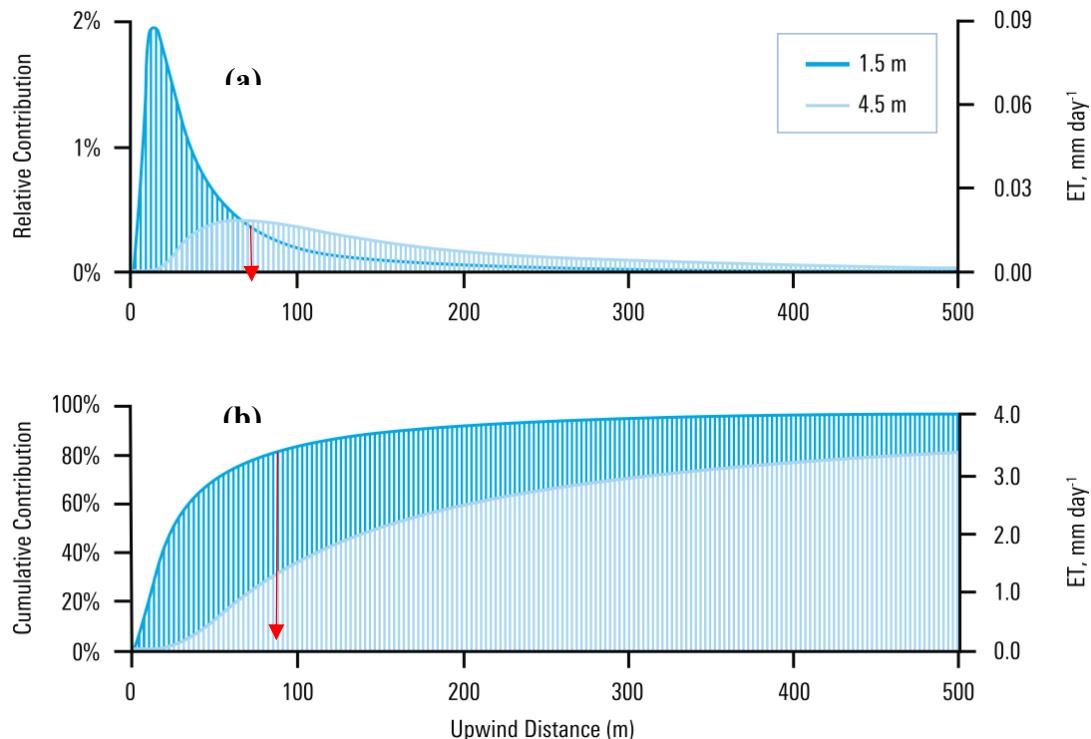
z , Measurement height (m)

d , Zero plain displacement (m)

u^* , Friction velocity ($m s^{-1}$)

k, Von Karman constant (0.4)

由上述模型公式，計算出有多少測量的通量是來自特定距離。輸入參數包含儀器高度(z)、冠層高度、風速(u)、距塔的所需距離(X_L)、摩擦速度(u^*)和零平面位移(d)。



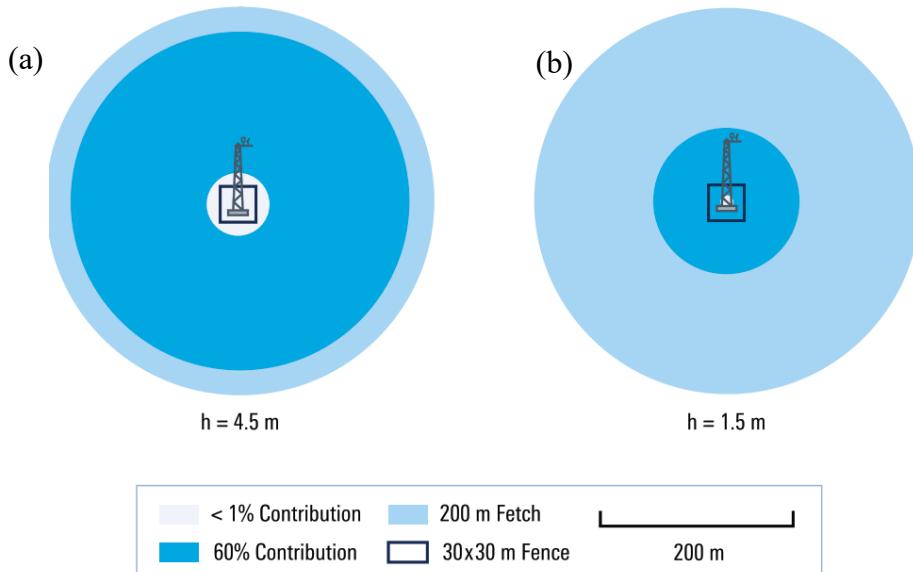
資料來源: Burba (2022)

圖 3-10 不同架設高度蒸發散(ET)通量貢獻與迎風距離關係 (a)代表來自上風處某距離通量貢獻 (b)代表通量貢獻累積

由圖 3-10 說明在 4.5 m 高度測量時，蒸發散的峰值貢獻主要來自約通量塔 60~65 m 的上風距離，而距通量塔 20~30 m 距離範圍內的區域則相對沒有貢獻。從圖 3-10(b)累計貢獻來看，日總通量的 80%來自上風向 20~450 m 的距離。

在 1.5 m 的較低測量高度，觀察到貢獻的顯著變化。峰值貢獻來自距通量塔 12-18 m 的較近距離。超過 80% 的日蒸發散量來自站點 80 m 範圍內的區域。圖 3-11 呈現與前述資料相同，以俯視圖繪製 4.5 和 1.5 m 通量塔從所有風向的足跡的潛在貢獻。整體而言，隨著測量高度的增加，通量貢獻峰值距離增加，而累積通量貢獻的幅度減少。通量足跡隨著測量高度的增加而增加，然而在鄰近通量

塔足跡也可能受到影響。也就是說，通量塔越高測站周圍「無通量貢獻」的足跡也相對增加。高度會影響到通量觀測系統的通量足跡覆蓋率，經驗法則是垂直高度與水平吹風距離的長度比例約為 1:100 (Burba, 2022)。



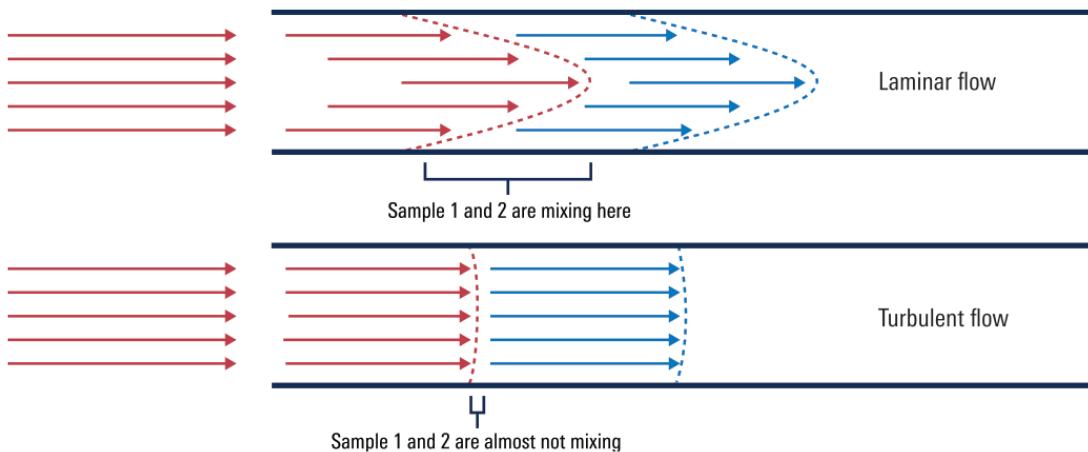
資料來源: Burba (2022)

圖 3-11 不同架設高度通量潛在貢獻 (a)塔高 4.5 公尺 (b)塔高 1.5 公尺

3.6 進氣管氣體層流與紊流

氣體種類、環境條件、管材質、長度、管壁污染程度、流速和許多其他物理參數的變化可能會影響取樣氣體和管壁之間的相互作用，這可能會影響各自的傳遞函數。隨著新儀器可用於測量各種氣體種類的通量，應仔細對待進氣管衰減問題，特別是在使用長進氣管時，大部分頻譜校正可能是由於進氣管衰減造成的。

進氣管道氣體總是會減弱（或抑制）造成流量微小波動。進氣管衰減校正可補償因這種影響而發生的通量損失。此校正適用於閉路和封閉式分析儀測量的氣體和水蒸氣通量。它也可以作為確定進氣管長度是否足夠且足以克服大部分溫度波動所造成的通量影響。

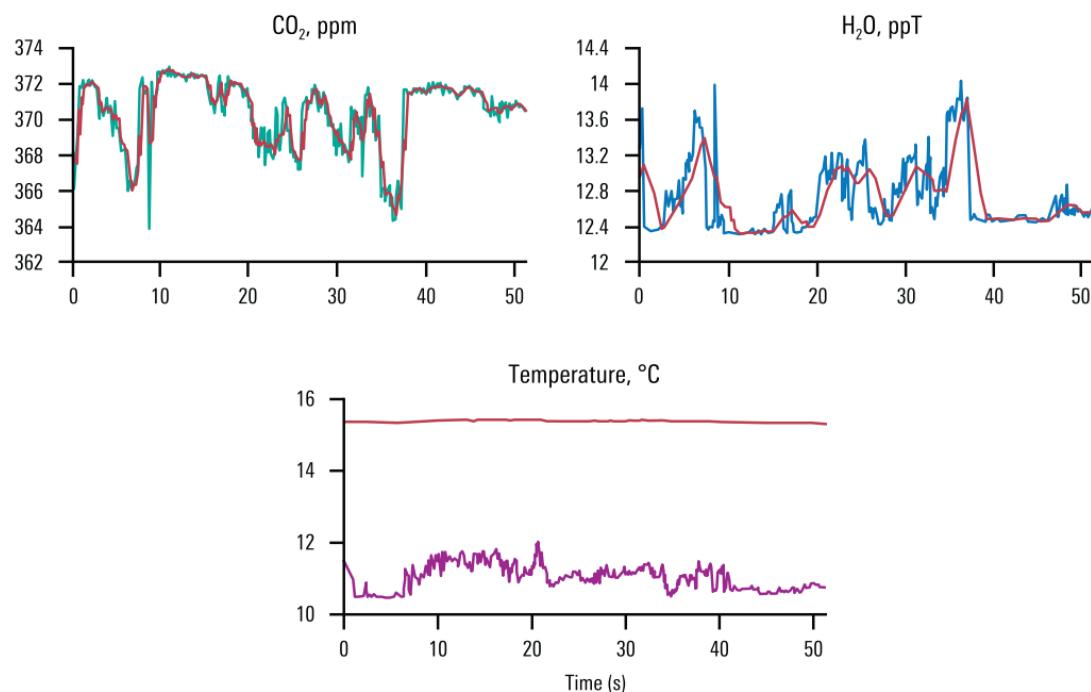


資料來源: Burba (2022)

圖 3-12 進氣管中的層流與紊流

透過檢視通過進氣管的兩種流動方式(層流與紊流)，可以以簡化的方式說明進氣管衰減對渦流協方差通量的影響。儘管取樣的氣體在任何管道中都會受到一定程度的污染，但當流體為層流(Laminar flow)時，污染相當嚴重，導致兩個連續的 10 Hz 氣體混合，如紅色和藍色所示。此種類型的混合導致無法區分渦流協方差計算所需的氣體濃度連續波動情況。垂直風仍然快速變化，但由於管中 10 Hz 樣本的混合，測量的氣體濃度出現緩慢變化。如果流動是紊流 (Turbulent flow)，則進氣管拖尾較小，導致兩個連續 10 Hz 樣本幾乎沒有混合(圖 3-12)。

為了提供指引特定儀器設定的採樣，應選擇什麼流速，可以使用雷諾數(Re)。根據管的橫截面形狀、直徑和流速， Re 可以幫助將進氣管流分類為層流 ($Re < 2300$)、瞬態 ($2300 < Re < 4000$) 或完全紊流 ($Re > 4000$)。對於封閉式氣體分析儀使用的短進氣管，特別是在測量非黏性氣體時以及使用短於 0.5 m 的管道時，即使在瞬時流速下，衰減也可能很小。但對於較長進氣管和黏性氣體，流動必須足夠快才能保持紊流。通常，對於內徑約為 0.4 – 0.8 cm 的管道，可以在 9 – 18 LPM 的速率範圍內實現紊流，具體情況也取決於進氣系統的其他部件 (例如顆粒過濾器、集水器、雨水收集器等)。



資料來源: Burba (2022)

圖 3-13 氣體衰減對 10 Hz 非黏性氣體、黏性氣體和溫度的實際影響

上圖 3-13 說明了進氣管氣體衰減對 10 Hz 非黏性氣體、黏性氣體和溫度的實際現場數據影響。綠色、藍色和紫色線是在現地測量的實際波動。紅線是它們通過進氣管後的氣體衰減情況。對於完全紊流和非黏性氣體（例如 CO_2 ），小的拖尾會導緻小的阻尼和小的時間延遲（左上圖的紅線）。對於 H_2O 等黏滯氣體，阻尼和時間延遲較大（右上圖的紅線），因此頻率損失也會較大。在溫度情況下，行進空氣中的熱量與管壁快速交換，並且衰減非常強（底部圖中的紅線）。

假如儀器可直接輸出乾基莫耳分率數據意味著已考慮了採樣空氣的瞬時熱和壓力相關膨脹以及水稀釋。因此，計算通量時不再需要密度校正。這將大大簡化計算並減少不確定性。

3.7 其他輔助量測設備

氣象資料對於分析和解釋通量資料是必要的。氣象資料也用作模型填補通量資料空白所需的參數，在氣象感測器時，需要注意選擇安裝位置，以盡量減少對通量感測器的影響。對於通量觀測，需要一個儲藏箱或觀測棚來容納資料記錄器

或個人電腦。棚子更加方便，因為它可以存放校準用的工具和氣體鋼瓶，但必須設定得不干擾觀測環境。例如，如果在塔附近設置棚子，觀測棚屋頂的影響可能會出現在淨輻射、反照率或能量通量資料中。

另外，存放空間的溫度和濕度必須控制在一定的範圍內，以確保設備的正常運作。遮陽、屏蔽和通風可有效防止高溫，隔熱可有效防止低溫。通風時，在通風孔處安裝防蟲網。如果有多餘供電，也可以使用空調或暖氣。在儲藏箱內相對濕度較高的情況下（例如晝夜溫差較大），需要採取防止結露的措施（例如使用乾燥劑）。此外，設備也必須考慮可能雷擊所造成損壞等預防措施。雖然雷擊無法避免，但可以將雷擊造成的損害降到最低。往往會擊中比周圍環境高的尖頭物體，因此觀測塔本質上很容易受到雷擊。

雷擊損壞是直接雷擊和間接雷擊造成的。直接擊中塔等物體的閃電可能會產生 10 至 100 kA 的電流，直接雷擊造成的損壞可能非常嚴重，並可能引起火災。相反，間接雷擊是直接雷擊引發的強電磁場在附近的訊號線和電線中瞬間感應出高電壓的現象。突波電流可能會導致設備損壞，包括絕緣破壞、功能中斷或劣化。

避免或減輕此類損害最有效的手段是安裝避雷針。塔尖安裝避雷針，並使用低電阻接地線接地。安裝避雷器，透過接地線將較大的雷電感應電流洩放至大地也是有效的。安裝接地線需要與土壤有較大的接觸面積，以降低接地電阻。

3.8 電源供應

電源供應部分應盡可能使用商業用電源。電氣設備的數量通常隨著觀測計畫的擴展而增加，因此希望採用在電氣容量方面充足設施。為避免森林中倒下的樹木或樹枝造成線路損壞或斷裂，電源線應插入保護管並埋入地下或舖設在地面上。應提供備用電源，以防停電。

太陽能電源供應部分，乃基於太陽能系統需要太陽能板用於發電和電池用於充電。此系統中，在白天陽光充足的時段，太陽能系統產生的電力多於消耗的電力，多餘的電被儲存入電池。充電的能量在夜間以及發電量較低的白天被消耗。

充電控制器用於防止電池因過度充放電而劣化。

3.9 雜訊控制

與一般氣象觀測相比，渦流相關法以更高的取樣頻率記錄資料。因此，一旦現場開始觀測，數據可能會受到各種形式雜訊的影響。當類比訊號通過電纜傳輸時，電纜通常會產生雜訊，且 A/D 轉換器(Analog-to-digital converter) 可能也會受到 A/D 轉換器周圍熱環境的影響而產生的雜訊。雜訊產生於儀器本身、連接儀器的電纜、資料擷取系統和 A/D 轉換部分。雜訊來源包括 A/D 電源、發電機和幫浦震動。

雜訊從源頭控制是最有效的。雜訊控制的手段包括良好設備使用環境（必要時提供通風、冷卻或隔熱）、採用有效接地、與可能產生雜訊的設備（如發電機、交流電等）充分隔離。如果使用電流而不是電壓並且使用數位訊號而不是類比訊號，則通過長電纜的資料傳輸不易受到雜訊的影響。以上如果已採取了這些措施，仍然出現高頻噪音，則可以透過在 A/D 轉換器之前放置低通濾波器來改善。

3.10 資料紀錄器

採用渦流相關法的連續測量需要一個資料紀錄系統來連續擷取和記錄來自儀器的訊號。因為需要收集高頻 (10 Hz)的數據，建議準備 1T 以上的 SD 卡和網路通訊以及 10T 以上的雲端空間，可以多重備份收集到的資料。另外建議將所有資料的收集彙整到同一台電腦或是資料記錄器，可以減少因時間不同步而造成的誤差。

資料紀錄器的選擇取決於現場觀測站可用資源和其他環境因素，這些現場資源和環境因素包括，可用電源類型和容量（交流或直流）、資料收集的頻率和方法、所需的資料儲存容量以及通訊設施的使用、線路和區域網路，確定資料擷取系統的規格所需的資訊包括取樣頻率、資料解析度、輸出訊號範圍以及儀器輸出訊號使用類比。為了確保連續穩定的資料收集，也必須做好停電、資料雜訊和儀器故障的準備。

3.10.1 資料紀錄器類別

現在許多測量儀器都可以選擇類比和數位輸出，並且輸出可以以一種或兩種形式發送到資料紀錄器。下面描述了常用的數據蒐集系統，用於記錄儀器的類比輸出和數位輸出。作為連續渦流相關法測量常用方法，來自多個儀器（例如超音波風速計和紅外線氣體計）的電壓（或電流）模擬輸出訊號分析儀，被送到單一 A/D 轉換器，所有訊號同時轉換為數位形式並且被記錄。方法可以分為以下三種：

(1) 採用個人電腦(PC)及其內部 A/D 轉換器或外部 A/D 轉換器的方法

市面上有多種不同內建頻道和解析度的 PC 及 A/D 轉換器。例如內建於桌上型 PC 中的 A/D 轉換板、可插入 PC 插槽的 A/D 轉換器以及外部 A/D 轉換器。可根據其應用來選擇轉換器。當使用 PC 和 A/D 轉換器時，可以在進行資料擷取的同時在顯示器上進行計算和圖形繪製。PC 和 A/D 轉換器的使用也允許使用 PC 的通訊能力。這些被認為是本方法的優點。

(2) 採用市面上常見商用高速資料紀錄器

近年來能夠以高於 10 至 20 Hz 的頻率連續記錄的高速資料記錄器已經在市場上可以買得到，並且通常用於渦流相關法。由於 AD 轉換和資料擷取可以透過單一裝置完成，無需使用電腦。使用這些高速記錄儀，可以調整每個頻道的電壓範圍，並且操作簡單，不需要下載應用程式但價格相對昂貴。

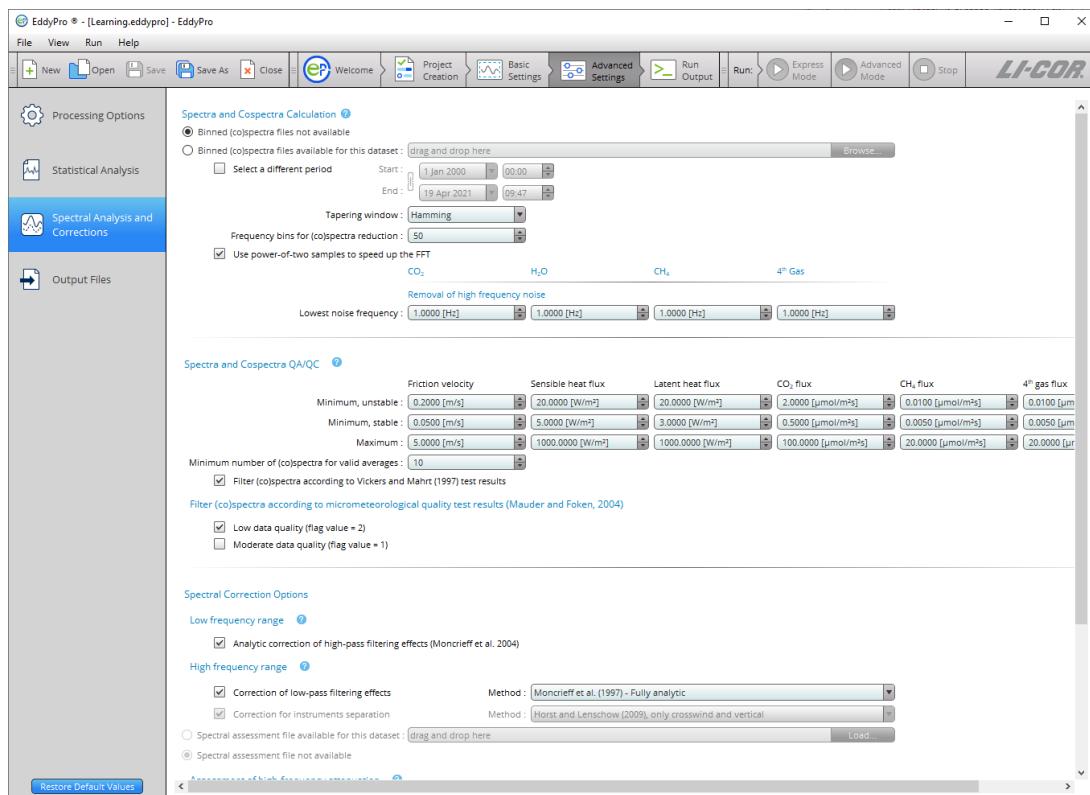
(3) 使用個人電腦(PC)和數據資料記錄器的方法

儘管某些類型的市售資料記錄器提供了足夠大的取樣頻率，但其內建儲存容量不足以用於渦流相關法，在這種情況下，數據記錄器與個人電腦(PC)結合使用，訊號被傳送到資料記錄器進行 A/D 轉換，數位資料隨後由 PC 所記錄。Campbell 的 CR23x 允許根據獲取的數據計算湍流數據統計，包括相關性。它還具有編程功能，允許輸出電壓訊號來控制電磁閥和溫度控制器。然而，資料記錄器與 PC 同時使用時需要小心，因為如果到 PC 的資料傳輸速度不夠，傳輸過程中可能會遺失一些資料。

3.11 通量監測系統所需軟體需求

目前較為廣泛使用通量計算軟體如表 3-3 所示。其他相關計算工具也可參考中央研究院陳奕穎副研究員所開發之氣象通量處理程式(ychenatsinca, 2022)。該程式主要是透過 R 程式語言編撰而成。處理程序包含單位轉換、消除歧異值、數據去趨勢、座標軸旋轉、WPL 校正(熱通量跟水氣通量校正)、時間延遲校正、平均時距的選擇、平穩性檢定、整體湍流檢定及通量足跡檢定，目前已成功應用於農業場域的溫室氣體通量研究(Jhang et al., 2022)。

EddyPro 由生技公司(LI-COR Biosciences, USA)為符合儀器通量計算需求所開發的工具。是設定為不同程度的使用者(新手到專家)，使用渦流相關法處理通量資料軟體之一。目前為公開免費，並由 LI-COR Biosciences 記錄、維護和支援。目前已被全球通量網絡、研究人員廣泛採用，並作為標準處理工具之一，能夠進一步對全球各地的通量系統進行最準確的交叉比對。透過 EddyPro 計算能量、動量、二氧化氮、水蒸氣、甲烷和其他微量氣體的通量。EddyPro 介面有兩種操作模式可供選擇：快速模式(express)和進階模式(advance)。在快速模式下，使用者只需使用預設設定值，單擊幾下即可處理數據，這些預設設定旨在提供合理且安全的處理假設，但不適合現場條件。在進階模式下，經驗豐富的研究人員可以預先使用軟體，並根據需要微調整個處理工作流程。當研究人員對資料處理有更多調整需求的情況下，進階模式有利於非標準測站和數值設定，例如，消除歧異值範圍的標準、添加攻角校正或使用平面擬合旋轉代替雙重旋轉校正等(圖 3-14)。

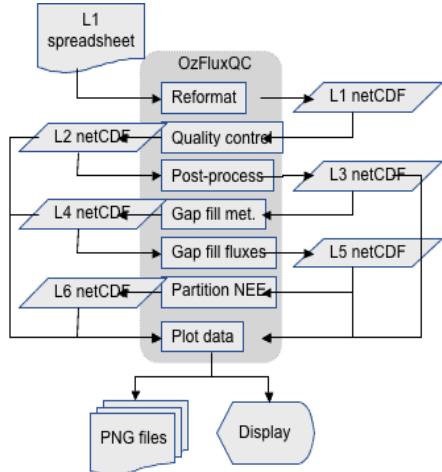


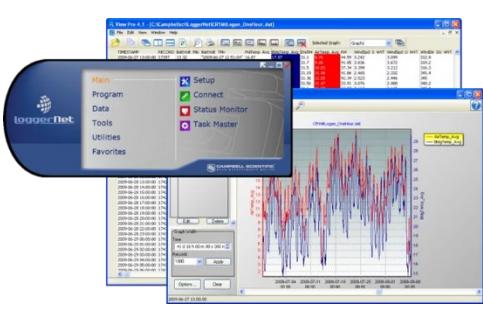
資料來源: LI-COR Biosciences

圖 3- 14 EddyPro® 7 Software

EddyPro 格式和內容是依循 ICOS、AmeriFlux、TERN-OzFlux 和 FluxNet 通量網絡所設計的。該軟體支援包含資料處理各種類型的原始輸入檔(例如, EddySoft 和 EdiSol 的 ASCII、二進位、TOB1 和 SLT)。然而，最無縫的格式設定是使用 LI-COR 設備情況下建立的 GHG 檔案格式。GHG 格式(由.ghg 檔案以副檔名表示)是一種壓縮製表分隔文字格式，資料輸出包含兩種檔案：(i) 實際的快速資料文件，以及 (ii) 包含通量站設定的資訊元件檔案。目前它已被全球數千名研究人員使用。此外，Kljun 於 2015 年也開發了通量足跡預測模型，可進一步評估並預測場域通量足跡所涵蓋的範圍(Kljun et al., 2015, 2004)，可結合 Li-COR 公司所開發的 Tovi 軟體處理通量足跡視覺化的部分(表 3-3)。LoggerNet 為 Campbell Scientific 提供 Datalogger Support Software，支援各項觀測儀適配之應用程式，可使用 LoggerNet 來進行週期性資料切割、固定頻率數據紀錄並可隨時檢查數據品質。

表 3-4 通量計算及輔助軟體參考

通量計算及輔助軟體	說明
	EddyPro 主要由生技公司(LI-COR Biosciences, USA)為符合儀器通量計算需求所開發的工具。目前已被全球通量網絡、研究人員廣泛採用，並作為他們標準處理工具之一，能夠進一步對全球各地的通量系統進行最準確的交叉比對。
	OzFluxQC 為澳洲和紐西蘭(OzFlux)區域通量組織所開發數據處理工具，主要是能透過該工具，更容易探索 OzFlux 所涵蓋各個通量監測塔網絡資料。其應用層面也包含測站資料的下載、資料前處理、資料品質處理以及資料的傳輸等。
	Tovi 軟體由 Li-COR 公司所開發，可使用該程式進行資料整合，並繪製呈現通量足跡視覺化。



LoggerNet 為 Campbell Scientific 提供 Datalogger Support Software，支援各項觀測儀適配之應用程式，可使用 LoggerNet 來進行週期性資料切割、固定頻率數據紀錄並可隨時檢查數據品質。

資料來源: Burba (2013, 2021, 2022)

4. 溫室氣體通量監測系統維護方法

通量監測主要是以渦流相關法，且為了要符合渦流相關法的假設和計算基礎，儀器選用上需要達到高頻(監測頻率 $\geq 10\text{ Hz}$)的三維音波風速計以及高頻(監測頻率 $\geq 10\text{ Hz}$)氣體分析儀器。

使用渦流相關法所採用風速計需具備三維分量(u 、 v 、 w)，三維分量當中，垂直風速(w)是一個特別重要的分量，通常小於水平分量(u , v)。因此，風速計選用上須具備能夠量測高精準度、高頻率($>10\text{ Hz}$)風速計。連續的場域測量要求儀器需具有高度耐用性和長期穩定性。迄今為止，唯一能滿足這些要求的儀器是聲波風速計(sonic anemometer) (可參考常見廠牌型號如表 3-2)。

聲波風速計主要測量主要透過一對聲學元件(發射器和接收器)點對點設置，兩端依序發射和接收脈衝。聲音在發射器和接收器之間的傳播的時間，並根據超音波訊號在空氣中的速度隨風速變化的原理，將其轉換為風速。

風速在路徑方向的分量 V_d (m s^{-1}) 可透過以下公式計算，發射器和接收器之間的距離 $d(\text{m})$ 又稱為跨距(span)，背風(leeward)和迎風(windward)所傳輸的時間定義為 $t_1(\text{s})$ 與 $t_2(\text{s})$

$$V_d = \frac{d}{2} \left[\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right]$$

這裡得到的 V_d 值是路徑平均值，因此小於跨距的渦流是線平均。聲波風速計的反應取決於跨度，對於較短的跨度，反應性能會提高，但探頭引起的流量失真也會同時增加。通量測量通常使用跨度為 0.1 至 0.2 m 的探頭。

目前商用 3D 音波風速計具有三對發射器和接收器的探頭以及資料轉換器(處理器)所組成。有些風速計具有內建類比/數位轉換器(A/D 轉換器)，透過輸入來自另一個測量儀器的類比訊號(例如:環境濕度波動)，同時將其與風速訊號同步來提供數位輸出。探頭的形狀因型號而異(見圖 4-1)，由發射器和接收器的三維探頭支架位置決定。

4.1 紅外光吸收光譜 CO₂/H₂O 量測及三維音波風速計維護方法

採用近紅外光吸收光譜儀來測量 CO₂ 和 H₂O。市面上有幾種此類分析儀產品，它們使用 CO₂ ($4.3 \mu\text{m}$) 和水氣 ($2.6 \mu\text{m}$) 特有的近紅外光吸收波長，同時測量 CO₂ 和 H₂O 密度（或莫耳濃度）。具體來說，可以根據發射器和光接收器之間的路徑估計的空氣的輻射吸收率來獲得氣體的密度。此外，依儀器配置，測量方法共可分為兩類：開放式和閉路式。開放式分析儀具有與聲速風速計相同的暴露路徑，可以透過高於 10 Hz 的速率快速測量 CO₂ 和 H₂O 密度。原則上，使用開放式氣體分析儀最適合渦流相關法（可參考常見廠牌型號如表 3-2）。

水氣/二氧化碳分析儀由於偵測原理相近、通量發生機制相關，因此水氣與二氧化碳的監測常整合成同一監測設備（圖 4-1）。監測原理採用紅外線氣體分析儀（Campbell IRGASON）以高監測速率、高精確度測量 H₂O/CO₂ 濃度(ppm)，配合同步監測的溫度計算空氣密度，並搭配高頻音波風速計來計算通量（魏谷州, 2007）。

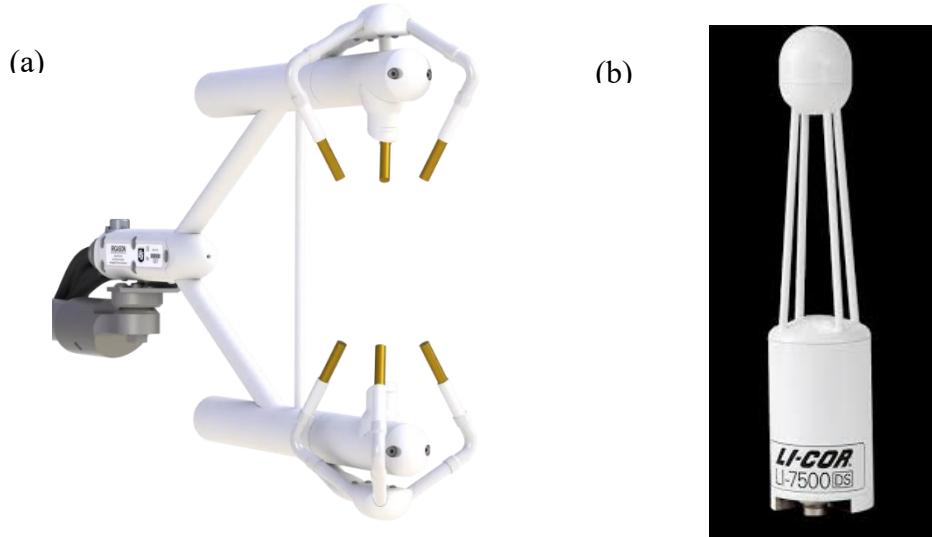
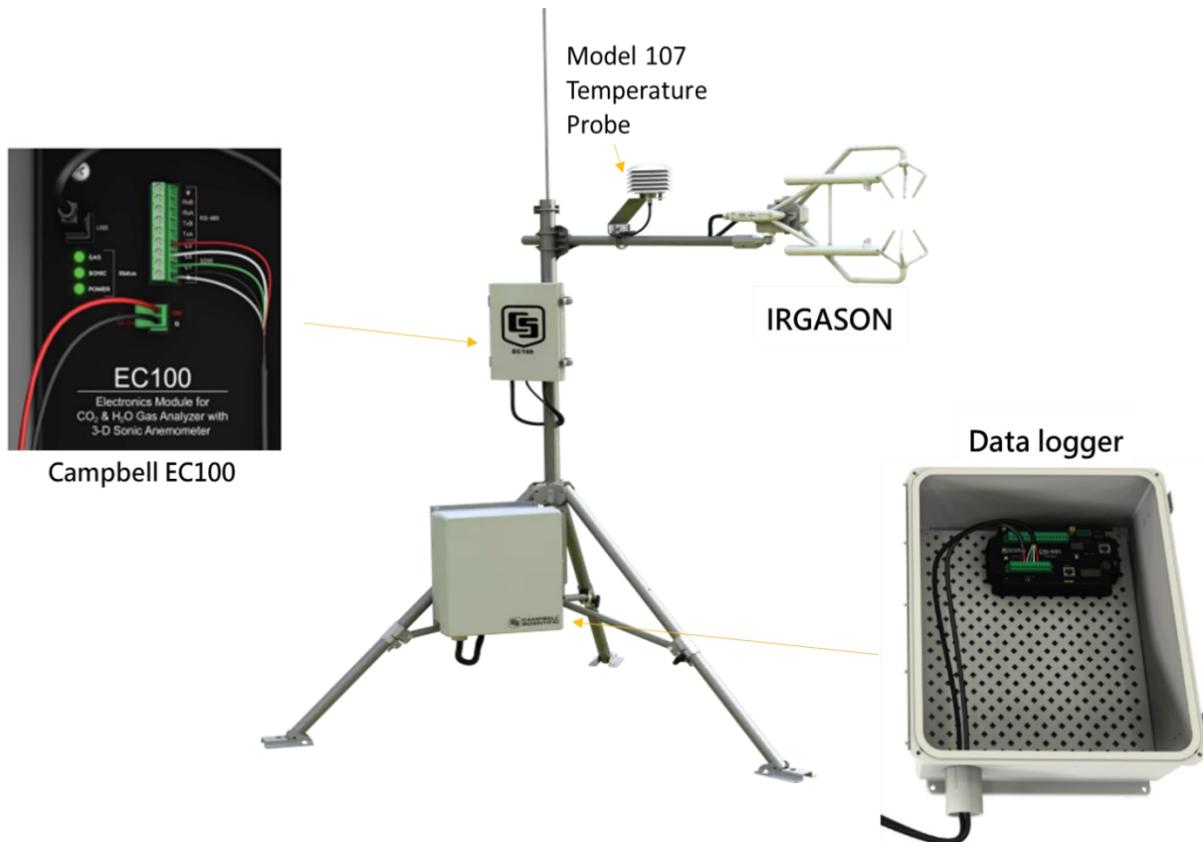


圖 4- 73 開放式二氧化碳/水氣分析儀(a) IRGASON, Campbell, USA; (b) LI 7500DS, LI-COR, USA

本指引以 Campbell IRGASON 做說明，此設備整合紅外線光譜吸收的氣體分析儀(H₂O/CO₂)以及三維音波風速計，除了這兩個主體之外，要能讓這兩個主要設

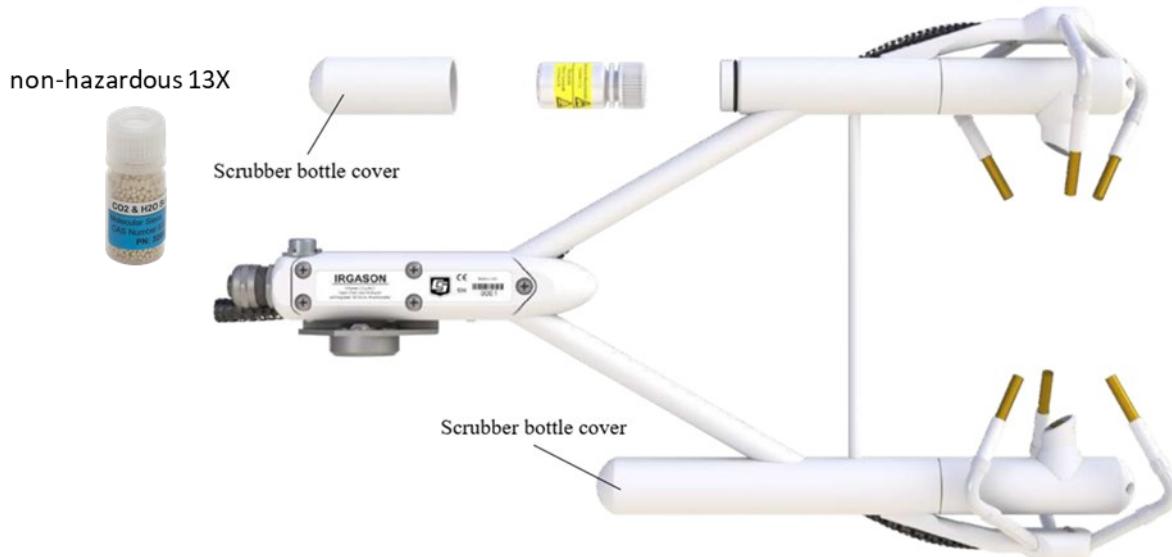
備能正常工作還需要其他配件(圖 4-2):

- (1) 溫度感測器:環境溫度的測量使用，本研究使用的是 Campbell Model 107 溫度感測器以及輻射遮罩。
- (2) 電子單元:包含了儀器的電子部分，用於數據採集、嵌入式處理和傳輸。它必須安裝在與音波風速計相距一定距離。本系統使用的是 Campbell EC 100。EC100 是與 Campbell Scientific 的 CO₂/H₂O 氣體分析儀和 CSAT3A 音波風速計配合使用的電子模組單元。正常情況下 EC100 箱子裡面應該會亮 3 個綠燈，如果沒看到 3 個綠燈請檢察 IRGASON 與 EC100 之間的連接線路以及電源線是否有鬆脫或異常。
- (3) 資料儲存器:用於數據採集、處理和傳輸。它必須安裝在與音波風速計相距一定距離的電纜處。本指引使用的是 Campbell CR 1000X。
- (4) 加熱帶:在一些場域為了避免三維音波風速計的感測頭結冰或結霜而影響到觀測資料，會使用加熱帶。使用加熱帶時需避免加熱帶不會影響三維音波風速計周圍的氣流以及三維音波風速不會超過製造商指定的工作溫度範圍。



資料來源: Campbell IRGASON

圖 4- 74 Campbell IRGASON 其他配件示意圖



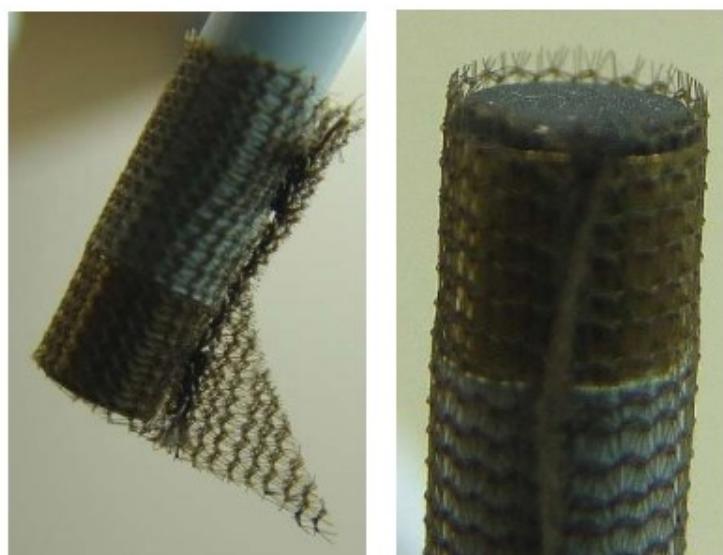
資料來源: Campbell IRGASON

圖 4- 75 EC150 Campbell IRGASON H₂O/CO₂ 分子篩示意圖

Campbell IRGASON，為開放式偵測系統，因此需每個月檢查一次 EC100 箱內乾燥劑，如發現乾燥劑已接近飽和狀態請更換新的乾燥劑，未更換乾燥劑將影

響光通量路徑的初始訊號強度(因水氣在機器內部的干擾)。此外，應用於 IRGASON 和 EC150 的化學分子篩瓶(13X)，此部分是 EC150 和 IRGASON 維護需更換耗材。每個塑膠瓶都裝有 Ascarite II 和高氯酸鎂，分別位於分析儀的上部和下部外殼中應用於過濾，用於清除氣體分析儀內部二氧化碳和水氣(圖 4-3)。

如果該站點經常降雨，可以考慮在三維音波風速計感測器上使用吸水纖維(wick)以幫助去除水分。吸水纖維有助於去除水分。然而，在某些情況下，水滴可能會積聚並留在感測器的表面。當水滴完全遮擋住三維音波風速計感測器表面時，IRGASON 無法測量風速。一旦水滴蒸發或被清除，IRGASON 將再次恢復測量風速。可以使用棉花棒或紙巾在感測器表面輕輕擦拭以去除水滴。使用者必須自行判斷是否需要使用吸水纖維。如果不使用吸水纖維，輕輕從三維音波風速計感測器上取下吸水纖維，注意不要損壞感測器的銅結構部分。三維音波風速計感測器上的吸水纖維正確安裝的方式請參考下圖 4-4。



資料來源: IRGASON 使用手冊

圖 4- 76 三維音波風速計感測器上的吸水纖維正確安裝的方式

IRGASON 氣體分析儀的鏡面有經過拋光並以傾斜的角度設計，以防止水滴積聚在其表面上。由於與感測器的接觸界面上增加了表面張力，水可能在邊緣處積聚並部分阻塞光路而減弱訊號。為了最小化此類事件的發生和造成數據損失，

建議考慮使用吸水纖維。吸水纖維的結構促進毛細作用，將水從鏡面邊緣處吸引走。吸水纖維的縫線和直邊被覆以一種橡膠化合物，以防止它們在操作過程中移位。

正確安裝吸水纖維非常重要，它們不應該阻塞或侵入光路(圖 4-5)。在安裝之前，記錄 H₂O 和 CO₂ 的信號強度。安裝後，這些值應保持不變。如果二氧化碳 (CO₂) 或水 (H₂O) 的信號強度下降到原始值的 0.7 或 70% 以下，應清潔 IRGASON 氣體分析儀的鏡面。這些數值可以從輸出數據中進行監測，或者可以使用 ECMon 查看。

清潔鏡面，可使用異丙醇 (2-丙醇/異丙醇) 和棉花棒、不刮傷鏡面的紙巾或布料。在清潔後，請確認信號強度恢復到接近 1.0 的數值。



資料來源: IRGASON 使用手冊

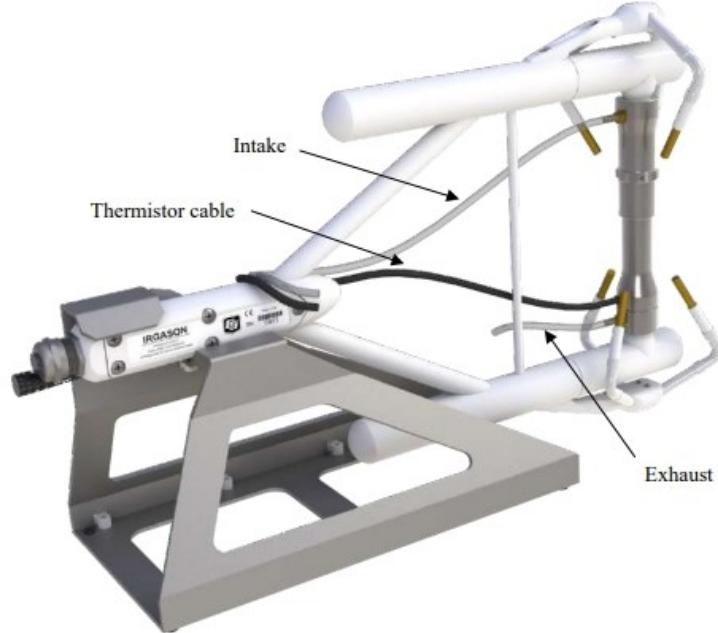
圖 4-77 IRGASON 氣體分析儀鏡面上的吸水纖維正確安裝的方式

光學設備因環境因素的不同，IRGASON 氣體分析儀的測量結果可能會稍微漂移。因此，定期維護需要進行定零點(ZERO)和跨度(SPAN)的檢查程序。這個程序的頻率取決於儀器進行測量的環境條件。Campbell Scientific 建議新儀器或移至新位置的儀器每個月進行一次零點和跨度的檢查程序。此外，建議在清潔鏡面後要對分析儀進行零點和跨度的檢查程序。在進行了最初幾次的零點和跨度的檢查

程序之後，將對現有環境條件下分析儀的增益和偏移漂移速率有更好的了解。以便使用者能夠評估零點和跨度檢查程序的適當操作時間頻率。然而，如果 IRGASON 在環境條件發生大幅季節性變化的場所使用，則應每季度進行零點和跨度的檢查程序。

零點和跨度的檢查程序必須正確執行，因為該程序留出充足的時間（至少 1 小時），使用的 CO₂ 標氣需為空氣充填非氮氣充填不然會產生誤差，校正氣體的使用量為 0.4~0.6 LPM，進入校正套管的空氣流量應該接近建議的速率。如果流量太低，校正套管將無法得到徹底的沖洗；如果流量太高，校正套管內的氣壓將過高，分析儀的零點和跨度的檢查程序將無法正確進行。前 5~10 分鐘可以調大氣體流量以加速平衡。以下為零點和跨度的檢查以及校正操作程序，水氣(H₂O)、二氧化碳(CO₂)及三維音波風速計分析儀維護如表 4-1 所示：

18. 斷開 EC100 的電源。
19. 使用酒精和不刮傷鏡面的紙巾或布清潔鏡面和校正套管。
20. 將 IRGASON 校正套管 (pn 26390) 裝在上下套筒上。要做到這一點，扭曲套管的兩端以最小化套管的長度。確保套管末端的橡膠密封件乾淨且狀態良好。將套管的一端放在下套筒上，扭曲套管的頂部部分，讓其伸展並覆蓋上套筒；在這樣做的過程中，避免與三維音波風速計的感測器接觸(圖 4-6)。



資料來源: IRGASON 使用手冊

圖 4- 78 IRGASON 校正套管安裝示意圖

21. 斷開 IRGASON 的溫度感測器與 EC100 的連接，將校正套管的溫度感測器連接到相同位置。
22. 使用 EC100 USB 連接線 (pn 26563) 將 EC100 連接到個人電腦。
23. 重啟 EC100 的電源，等待三個燈號轉成綠色。
24. 開啟 ECMon，選擇適當的 USB 端口，然後點擊連接。主屏幕現在應顯示實時的 CO₂ 和 H₂O 濃度。點擊零點/跨度。在零點/跨度視窗的下半部分，將出現一個圖形，顯示 CO₂ 和 H₂O 的時間序列圖。
25. 將已知 CO₂ 濃度的標準氣體連接到壓力調節器，然後連接到流量控制器，最後連接到校正套管的進氣口。最理想的是，跨度 CO₂ 的濃度應接近在現場測量的 CO₂ 濃度，建議使用濃度範圍在 400~500 ppm 的 CO₂ 標氣(標氣的準確度在 5% 之內，而且標氣需要是用空氣充填而不是氮氣充填，才不會對 CO₂ 的光譜計算時發生誤差)。首先關閉壓力調節器和流量控制器，然後使用壓力調節器慢慢增加壓力到流量控制器的需求。然後將流量設定在 0.4 至 0.6 LPM

之間 (進入校正套管的氣流應接近建議的流速。如果流速太低，校正套管將無法得到適當的沖洗；如果流速太高，校正套管內的氣壓將過高，分析儀器將無法正確進行零點和跨度調整)。觀察 ECMon 視窗的 CO₂ 和 H₂O 時間序列圖，等待 CO₂ 讀值穩定 (約 5 至 10 分鐘)。一旦穩定，記錄 CO₂ 濃度。

26. 將 CO₂ 標準氣體從校正套管的進氣口移除，並使用露點產生器或其他標準參考來替換 H₂O 跨度氣體。由於水分子可能吸附在管道和罩子的內部，H₂O 濃度穩定可能需要較長時間。如果需要，可以在最初的幾分鐘內增加流量，以更快地使系統穩定，再將流量調回在 0.4 至 0.6 LPM 之間進行 H₂O 測量。
27. 移除 H₂O 跨度氣體，並將零級空氣連接到校正套管的進氣口。如第 8 步所述，使用壓力調節器和流量控制器，使零級空氣以 0.4 至 0.6 LPM 的速率通過校正套管。等待測量讀數穩定，記下 CO₂ 和 H₂O 濃度值。如果讀數仍然不穩定，請確保零空氣的流量足夠並且校正套管有正確安裝在套筒上。
28. 檢查記錄下來的 CO₂、H₂O 跨度和零級空氣的測量結果。使用以下方程式計算儀器增益的漂移：

$$gain = \frac{\text{span_actual}}{\text{span_meas} - \text{zero_meas}}$$

- span_{actual} = 跨度氣體的已知濃度
 - span_{meas} = 跨度氣體的測量濃度
 - zero_{meas} = 零級空氣的測量濃度。
29. 在 ECMon 的零點和跨度視窗中，軟體通過露點溫度和當前環境溫度和壓力來計算 span actual。如果 CO₂ 或 H₂O 零點或增益的漂移過大(超過 5%)，可能需要更換脫濕劑和 CO₂ 吸收瓶。
 30. 當零級空氣測值穩定時，在 ECMon 的零點和跨度視窗中點擊 “Zero CO₂ and H₂O” 按鈕。
 31. 移除零級空氣，接上 CO₂ 標準氣體。保持氣體流速在 0.4 至 0.6 LPM 之間。

等待讀數穩定。

32. 在零點和跨度視窗中，輸入已知的 CO₂ 濃度（以 ppm 表示）在標有跨度濃度的框中，然後按下跨度按鈕。
33. 接上已知露點的 H₂O 跨度氣體。保持氣體流速在 0.4 至 0.6 LPM 之間。等待讀數穩定。
34. 在標有跨度露點的框中輸入已知的露點（以 °C 表示），然後按下跨度按鈕
35. 零點和跨度程序現在已經完成。移除校正套管，重新連接 IRGASON 溫度感測器，恢復正常觀測。

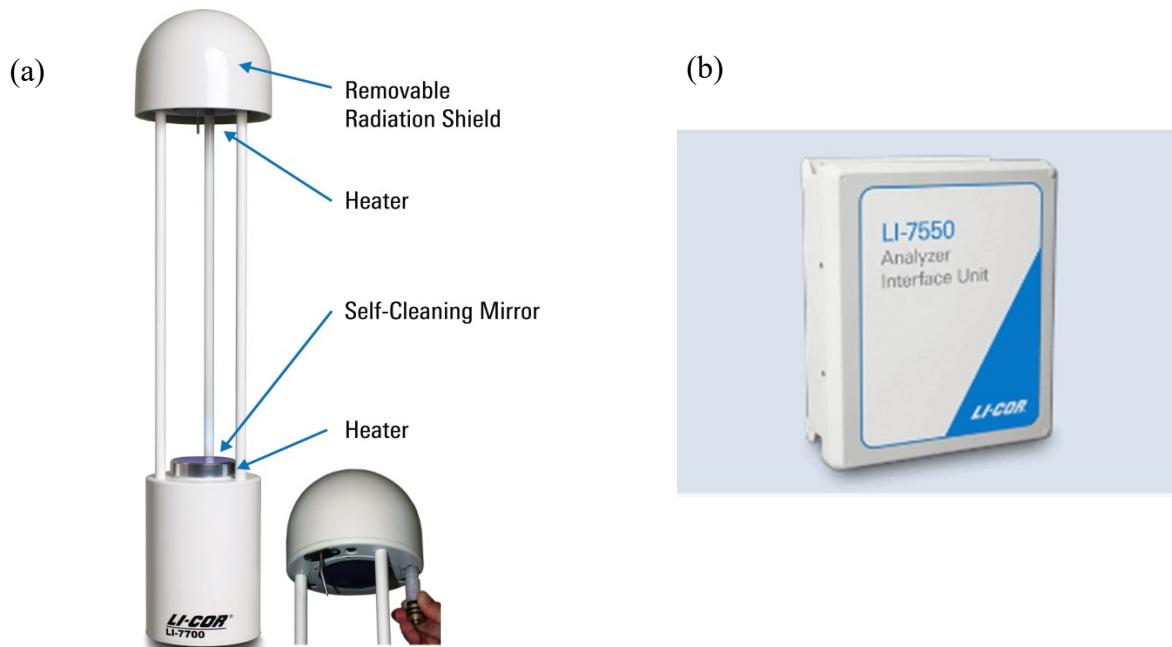
表 4-1 水氣(H_2O)、二氧化碳(CO_2)及三維音波風速計分析儀維護

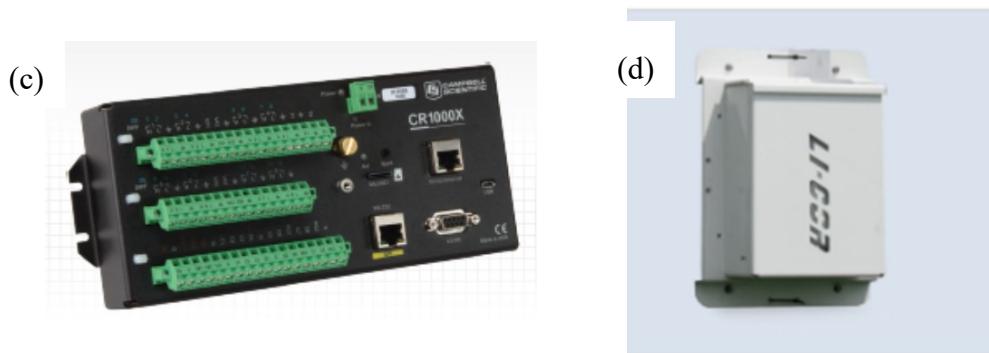
項目	檢查/校正週期	目的/標的	方法
d. 儀器狀態檢查			
H_2O / CO_2 signal	每 3 天	清潔 IRGASON 氣體分析儀的鏡面，使雷射訊號> 80%	手冊建議: 使用異丙醇(2-丙醇)/異丙醇) 和棉花棒、不刮傷鏡面的紙巾或布料 本團隊建議: DI水 (清除鹽類)+ 拭鏡紙
e. 耗材更換			
CO_2/H_2O 化學分子篩(13x)	檢查：每月 更換：每年 CO_2 偏移>30ppm, H_2O 偏移>1500ppm	分析儀的上部和下部外殼中應用於確保氣體分析儀內部無二氧化碳和水氣，降低氣體分析儀數值飄移(drift)	
除水網 (超音波風速計使用)		當水滴完全遮擋住三維音波風速計的感測器表面時，IRGASON 無法測量風速。	

除水網 (氣體分析儀)		水可能在邊緣處 積聚並部分阻塞 光路，減弱信號	
f. 校正/原廠校正			
氣體分析儀零 點&跨度(zero & span)校正	新購儀器、新建位 置：每月檢查 常規：每季檢查	校正環境的溫度 與現場溫差小於 $\pm 6^\circ\text{C}$	ECmon 校正零 點及斜率
風速計檢查	每季	確認風速計偏移 小於 $U_x, U_y: \pm 8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ $U_z: \pm 4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	風速零點偏移 檢查

參考資料: Andersson et al., (2011); Rebmann et al., (2018)

4.2 甲烷(CH_4)分析儀維護方法





資料來源: Burba (2022)

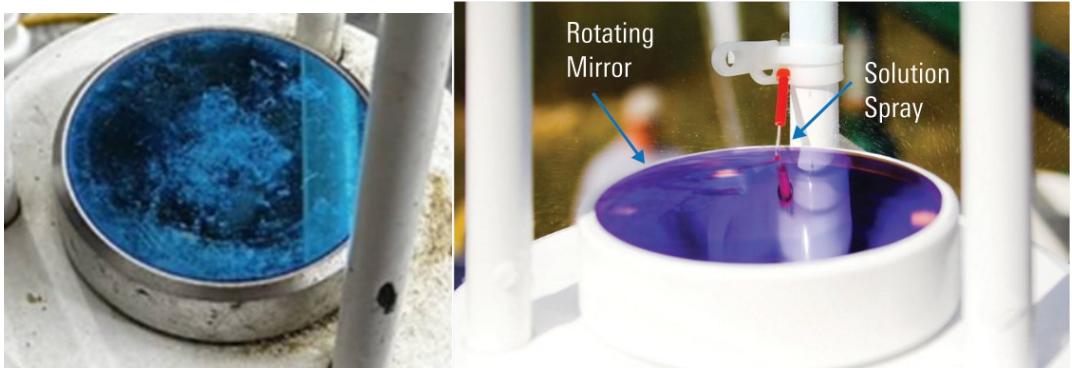
圖 4- 79 CH₄參考機種(a) LI-COR LI-7700(b)&乾燥劑位置示意圖(b)LI 7550 資料整合(c) CR1000x 資料紀錄器(d)防雨箱

CH₄參考機種為 LI-COR LI-7700，為開放式監測系統(圖 4-7)。除了主機本體外，其他輔助設備(工具)包含資料收集器(LI-7500&Datalogger CR1000X)以及水箱。除了主機本體外，其他輔助設備(工具)包含資料搜集器(LI-7500&Datalogger CR1000X)以及水箱。圖 4-5(a)可見其頂部有一個乾燥盒，裡面充填著藍色的乾燥劑，乾燥劑未更換將干擾讀值。乾燥盒位於分析儀頂部圓形感測器的底部。當 LI-7700 在潮濕環境中使用時，建議每年更換一次乾燥劑。

另外一個參考指標是參數 Optics RH 通常應該接近零。如果超過 30%，則表示是需要更換乾燥劑。LI-7700 配置有自動清潔工具，應根據每個站點條件進行調整，以最大限度提高數據覆蓋率並減少因鏡子旋轉、加熱和噴水馬達而引起的功率損耗。

為了避免凝結，建議使頂部鏡子的溫度比環境溫度高 0.5 至 1°C (加熱使用全功率的 5%至 20%)，並以約 10%的功率加熱底部鏡子。在每小時結束前每 10-15 秒旋轉一次底部鏡子，有助於保持鏡子清潔，延長手動清潔之間的時間間隔

(圖 4-8)。



資料來源: Burba (2022)

圖 4- 80 LI-7700 鏡面清潔元件(左邊為待清潔之鏡面)

在 RSSI(相對信號訊號強度)降到 25%或更低時啟動自動清潔工具(噴水加上旋轉底部鏡子)，如果清潔後，RSSI 未恢復到 40%以上，建議手動清潔鏡子(可以使用軟布搭配中性清潔劑或是酒精來進行清潔鏡子)。在清潔期間要將數據刪除。標記或刪除 RSSI 低於 20%時收集的數據。當 LI-7700 的 RSSI 降至 20%或更低時，觀測到的濃度值會受到影響，而當 RSSI 高於 25%時，觀測到的濃度值有一定的可信度。然而，若以通量的角度視之，建議以 40%為維護最低標準，否則觀測資料品質不佳建議刪除。詳細甲烷(CH_4)LI 7700 分析儀維護建議參考表 4-2 所示。

儀器校正偏移很小，因此通常每年進行一次校正就足夠了。在校正之前，應該先清潔鏡面。零點和跨度應該在實驗室中每年進行一次；不建議在野外校正，因為容易造成誤差。

零氣可以是不含甲烷的合成空氣或氮氣但是校正氣體一定要用空氣充填；濃度範圍是 2 至 10 ppm (標氣的準確度在 5%之內)；因為使用氮氣充填的甲烷校正氣體進行校正會影響光譜壓力延展並產生錯誤結果。下圖 4-9 為 LI-7700 通量系統於霧峰農試所校正照片。

LI-7700 的整體準確性取決於其零點和跨度校正。建議使用品質良好的零點和標準氣體(標氣的準確度在 5%之內)，以下是零點校正的步驟。

- (1) 將 LI-7700 接上電源後連接到電腦。啟動 LI-7700 軟體並與儀器建立連接。
- (2) 移除輻射屏蔽罩：輻射屏蔽罩會非常緊密地安裝。不要施加過大的力量。
- (3) 安裝校正罩，確保它能夠完全封住頂部和底部的開口。
- (4) 將零氣連接到校正罩的接頭上。
- (5) 讓氣體通過校正罩流入。根據流量的不同，需要 10 到 30 分鐘的時間進行平衡。



資料來源:Academia Sinica, Taiwan

圖 4- 81 LI-7700 通量系統於霧峰農試所氣體校正照片

- (6) 在校正視窗中點擊 “Zero CH₄” 按鈕(圖 4-8)。

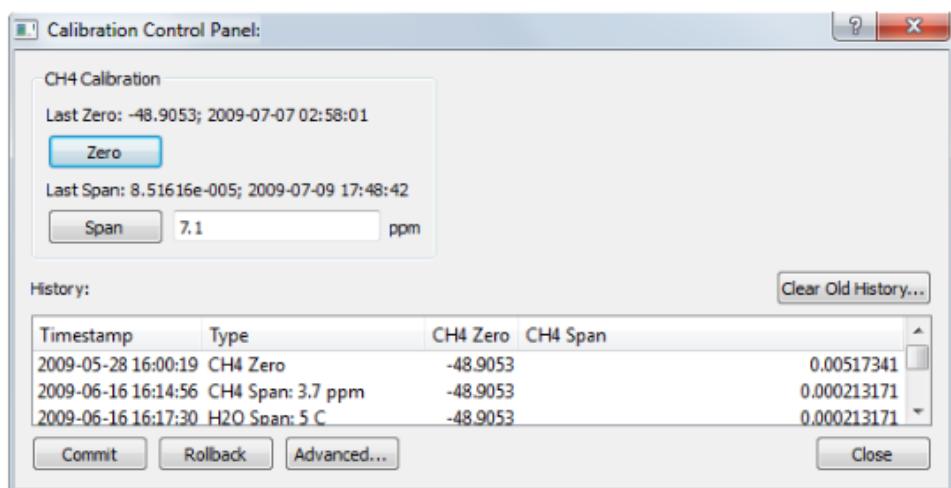


圖 4- 82 LI-7700 校正視窗介面

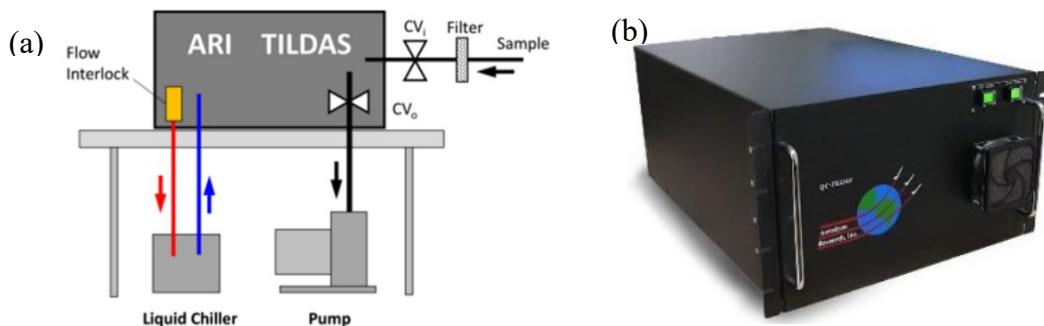
- (7) 當儀器開始進行零點校正時，"Zero CH₄"會變為"Abort"。點擊"Abort"可終止零點校正程序。通常需要大約 10 秒鐘來完成零點校正。如果時間明顯較長，請檢查是否有漏氣情況或是檢查零氣的壓力是否充足。軟體完成零點校正操作後，選擇是否應用新的校正值或恢復之前的校正值。如果在接收到確認命令之前應用程式就關閉或 LI-7700 關機，新的校準值將不會被應用。
- (8) 進行跨度校正與零點校正基本上相同，只是需要在校正視窗上輸入跨度氣體的濃度 (ppm)。建議選擇一個略高於環境濃度 (~ 2ppm) 的甲烷標氣濃度。跨度校正的步驟可以參考零點校正步驟。

表 4- 2 甲烷(CH₄)LI 7700 分析儀維護

項目	檢查/校正週期	目的/標的	方法
a. 儀器狀態檢查			
檢視鏡面情況	檢查：每月	訊號強度過低的原因可能為鏡面有污漬	<ul style="list-style-type: none"> 建議使頂部鏡子的溫度比環境溫度高 0.5 至 1°C，每小時結束前每 10-15 秒旋轉一次底部鏡子，有助於保持鏡子清潔，延長手動清潔之時間間隔。
訊號強度(Rceived Signal Strength Indicator, RSSI) 過低	檢查：每月	參考訊號強度原廠設定在 40% 到 60% 之間，如果低於此訊號強度須檢視雷射控制狀態(Laser Control Status)。	<ul style="list-style-type: none"> 建議以 40% 為維護最低標準，標記或刪除 RSSI 低於 20% 時收集的數據。 以酒精噴拭 LI7700 鏡面(上及下)，並以拭鏡紙以同心圓的方式向外將髒污。
b. 耗材更換			
乾燥劑	<ul style="list-style-type: none"> 檢查：每月 更換：每年(當 LI-7700 在潮濕環境中使用時，建議每年更換一次乾燥劑) Optics RH 通常應該接近零。如果超過 30%，則表示是需要更換乾燥劑。 	乾燥劑未更換將干擾讀值	手動頂部有一個乾燥盒

4.3 氧化亞氮(N₂O)分析儀維護方法

氧化亞氮(N₂O)通量監測儀參照機種為 Aerodyne Research Inc. (ARI) tunable infrared laser direct absorption spectroscopy (TILDAS)，它們使用 N₂O (1270 cm⁻¹ = 7.87 μm) 和中紅外光吸收波長，為一閉路式氧化亞氮氣體偵測儀，具有抽氣幫浦以及液態冷卻系統 (圖 4-11)。



資料來源: Aerodyne Research Inc. (2022)

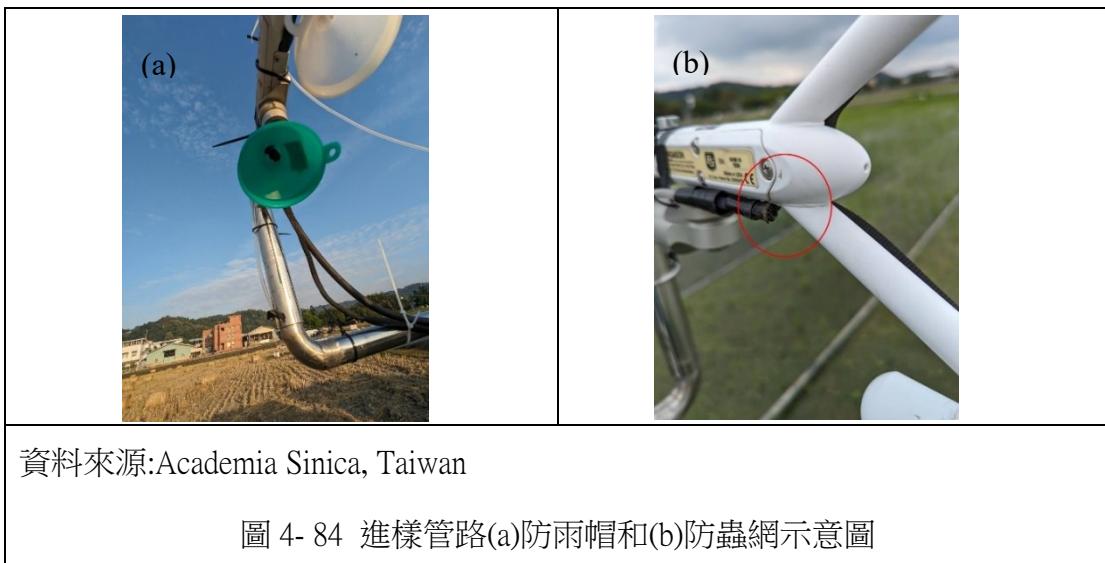
圖 4- 83 氧化亞氮(N₂O)氣體監測儀(a)氧化亞氮(N₂O)監測系統平面圖(b)

Aerodyne Research Inc. (ARI) TILDAS

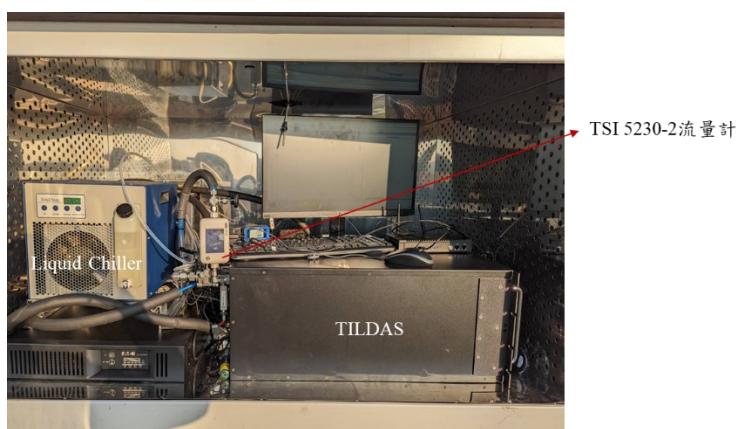
TILDAS 的雷射強度(Laser Range)會隨著使用時間長而減弱，造成此問題主要來自雷射強度自然衰退和腔體內的鏡面髒汙。如果是因後者造成的雷射強度降低，需根據當地的環境條件以及雷射強度降低的幅度來決定是否需要做鏡面清潔。清潔鏡面需要特別留意，因要將整個腔體從主機移出，當鏡面清潔完成之後可進行光路的調整來維持雷射的強度。鏡面清潔時須注意不能使用任何的機械力以免造成鏡面鍍層的損壞，建議用超高純度乙醇(純度> 99.7%以上)對鏡面做噴洗，然後用零級空氣將表面髒污吹除或是等乙醇自然揮發並帶走髒垢的物質。除此之外，進樣管路建議每兩年更換主要進氣管道，每周須檢視以及清潔防雨帽和防蟲網，以防止堵塞造成鏡面污垢導致雷射強度受到影響(圖 4-12)。

真空馬達需要持續運行以保持測量腔體的壓力。當馬達連續運行時，馬達內的聚四氟乙烯密封圈會因使用時間而磨損。一些馬達具有工作時間計數器，而其

他則沒有。如果沒有計數器，建議每 14-16 個月更換一次密封圈。這可以通過使用維修套件手動更換，或將馬達送回製造商進行更換。更換密封圈後，必須確認馬達恢復到與更換前相似的性能。定期更換密封圈可以避免馬達故障後聚四氟乙烯粒子影響抽氣馬達。另外，使用長管道將分析儀和馬達分隔開也可以避免碎片逆流造成的問題。



以霧峰農試所場域為例，每個月需要更換一次進樣管路過濾器(filter)。進樣管路的部分建議至少每兩年更換主要進氣管道，但也應在可見污濁時進行更換。在更換管道之前和之後，必須進行參考氣體測量和流量測量(流量範圍 10-12 LPM)，並將結果記錄下來，可建議搭配 TSI 5230-2 流量計(圖 4-13)。在更換進氣管道的同時，檢查系統是否存在漏氣問題，可以將零級氣體通入系統進行溢流測試來進行檢查。



資料來源: Academia Sinica, Taiwan

圖 4- 85 Aerodyne Research Inc. (ARI) TILDAS 恒溫箱內 TSI 5230-2 流量計

TILDAS 具有自動通入零級氣校正光譜零點的功能[abg]，建議每小時通入約 20-25 秒的零級空氣校正光譜零點，每三個月使用一次校正氣體做濃度的確認，校正氣體一定要用空氣充填且濃度範圍是 0.3 至 0.4 ppm(標氣的準確度在 10% 之內)。

TILDAS 不像其他設備可以透過軟體來修改斜率和截距值，所以需記錄每次做校正氣體和零級空氣時的濃度自行計算出斜率和截距值，在資料處理時將真實濃度修正回來。以下是原廠手冊建議的每日檢查項目：

1. 檢查軟體有執行到正確的模式(Stream Mode)。
2. 檢查雷射的溫度和電流:因為有使用 Frequency lock 功能，系統會自動調整雷射溫度來鎖定並維持我們的目標圖譜，通常系統自動調整的雷射溫度會小於 0.1°C，除非我們更動了冷卻系統的設定溫度。
3. 檢查雷射強度:以下幾種是可能造成雷射改變(降低)的原因
 - (a) 冷卻系統設定溫度改變，需等到冷卻系統溫度達到平衡。
 - (b) 重開機(冷機時)會需要大約 1 小時的暖機時間。
 - (c) 當執行 Frequency lock 功能，系統會自動調整雷射溫度。
 - (d) 當進行設備搬運時，光路可能會受到影響.可以重新調整光路。
 - (e) 腔內鏡面受到污漬影響。
4. 檢查過去一天的資料。
5. 檢查腔體內的壓力:確認壓力是否在我們設定的範圍且是否穩定(壓力範圍 38-40 torr)。
6. 檢查流量(流量範圍 10-12 LPM)。
7. 檢查腔體內的溫度(腔內溫度範圍 294.3~294.8K)。

8. 檢查擬合圖譜的品質:確認偵測到的圖譜(綠色)以及擬合圖譜(藍色)是否一致，如果不一致，可以重新執行 Frequency lock 功能，如果還是不一致，就進行雷射調諧(tuning rate)速率的調整。
9. 檢查過濾器:當需要時更換新的過濾器。
10. 檢查雷射冷卻系統的冷卻液液面:雷射冷卻系統是一個閉路系統，冷卻液液面在短時間內不應該會劇烈下降，如發生要立即停機檢查測漏。
11. 檢查軟體設定: [wd], [ass], [flk4]應保持開啟狀態。
12. 檢查所有排程程序是否有正確啟動。

表 4- 3 氧化亞氮(N₂O) TILDAS 分析儀維護建議

項目	檢查/校正週期	目的/標的	方法
a. 儀器狀態檢查			
雷射強度	檢查:每周		建議用超高純度乙醇(純度> 99.7%以上)
進樣管路防雨帽和防蟲網	檢查:每周	<ul style="list-style-type: none">• 根據當地的環境條件以及雷射強度降低的幅度來決定是否需要做鏡面清潔。• 防止堵塞造成鏡面污垢導致雷射強度受到影響。	對鏡面做噴洗，使用零級空氣將表面髒污吹除或是等乙醇自然揮發並帶走髒垢的物質。除此之外，進樣管路建議每兩年更換主要進氣管道。
鏡面清潔	檢查:每周或當雷射強度衰減時		
腔體內的溫度	檢查:每周(日)或超過合適溫度範圍(294.3~294.8K)	保持測量腔體的溫度	透過遠端連線檢視儀器狀態

真空馬達	檢查:每周(壓力範圍 38-40 torr; 流量範圍 10-12 LPM)	保持測量腔體的壓力	
b. 耗材更換			
進樣管路過濾器	建議每個月更換一次進樣管路過濾器	防止空氣中髒污顆粒阻塞,影響進氣壓力或是流量	通過使用維修套件手動更換
真空馬達密封圈	建議每 14-16 個月更換一次密封圈	定期更換密封圈可以避免馬達故障後聚四氟乙烯粒子影響抽氣馬達。使用長管道將分析儀和馬達分隔開也可以避免碎片逆流造成的問題	通過使用維修套件手動更換，或將馬達送回製造商進行更換

4.4 校正氣體規格與存放

針對本研究使用校正氣體的規格，因三種溫室氣體($\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$)在大氣中的背景濃度差異，所以在氣體廠商配置時的準確度規格不同， CO_2 和 CH_4 校正氣體的準確度需在 5%之內； N_2O 校正氣體的準確度需在 10%之內。校正氣體所使用的充填氣體必須是空氣以符合在一般場域條件下對於通量的觀測，所有校正氣體皆須可以追溯到環境部或是 NIST 等級。校正氣體的濃度範圍建議在背景濃度的 0.8~5 倍之間，校正氣體需存放在通風良好且不會受到直接日曬的場地，最好可以放置在有空調的場地。

4.5 設備材料與人力需求配置

本指引參考環境部國家環境研究院「112 年溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定計畫」，並以開放式農業場域的通量檢測設備為基礎，提供當時操作經驗，彙整以下通量檢測站儀器維護人力(時間)需求表(表 4-4)，未來如有不同的通量檢測場域所需實際的維護人力(時間)，需視情況做調整。

表 4-4 通量檢測站儀器維護人力(時間)需求表

每週所需人力(小時)				
維護項目 ¹	IRGASON Campbell	LI-7700 LI-COR	TILDAS Aerodyne	備註
目視檢查(髒污)/ 外部清潔/更換 過濾器/加水	0.4	0.6*3=1.8	0.4	干擾來源： a. 空氣品質：鏡面灰塵干擾。 b. 降水：感測器積水。
資料下載&處理	1	1	1.5	
清潔機器內鏡面 &調整儀器光路	²	²	1.5	儀器內部鏡面清潔、乾燥劑檢查。
通零級空氣/校正氣體	(0.25) 3hr/1 季	(0.25) 3hr/1 季	0.5	零級空氣：每週 校正氣體：每月
加總	1.65	3.05	3.9	所有維護時間加總為 8.6

Note:

¹ Campbell IRGASON: CO₂ @>10 Hz; LI-COR LI7700: CH₄ @>10 Hz; Aerodyne TILDAS (single laser): CH₄, N₂O @>10 Hz; PICARRO G2508: CO₂, CH₄, N₂O @ 1 Hz。

²-表示無此項維護需求。

4.6 溫室氣體通量監測系統性能測試

本指引參照 ICOS 大氣測站的設備測試規範中建立出溫室氣體通量監測系統性能測試程序，測試程序分成濃度校正與精密度測試及再現性測試。

(1) 濃度校正

分析儀器要進行精密度和再現性測試之前要先做濃度校正，此程序需取得可以追溯到 NIST 等級的氣體標準品，作為配製濃度上限，零級氣體作為濃度下限，進行校驗樣品配製。

濃度校正的濃度範圍根據過去三年在農業溫室氣體通量監測場域得出三種不同溫室氣體真實濃度的 0.025%濃度值乘以 0.8 當成最低濃度點，三種不同溫室氣體真實濃度的 97.5%濃度值乘以 2~3 當成最高濃度點，包含零級空氣至少配製出三個以上的不同濃度氣體校驗樣品，最後實際進行多點校正的標準體氣濃度如表 4-5。

從濃度校正到後續的精密度以及再現性的測試方法，一律採用標準氣體鋼瓶接上浮球流量計或是氣體稀釋器控制到測試設備所需要的流量，再接上一個三通連接頭以 over-blow (通入流量比設備所需流量還高，且讓多餘的氣體透過三通連接頭直接排到大氣中)的方式將標準氣體通入分析儀器，這個測試方法的缺點就是會用掉大量的標準氣體，以一瓶 30L 的三合一 (CO₂/CH₄/N₂O)標準氣體大約要花費 3 萬元以及約一個月(以上)的訂購時間，大概只能做到一到兩次完整的濃度校正和精密度以及再現性實驗。例如 TILDAS 設備的流量為 12 -12.5 LPM，我們就會將浮球流量計調整為 13 LPM 的輸出，並且持續通氣達到穩定，三分鐘內測值的變動幅度小於 1%，即為穩定，取穩定的測值做 1 分鐘平均值，做出包含零

點和至少三個不同的校驗樣品濃度點的校正檢量線，檢量線的 R^2 值需大於 0.95，如果小於 0.95 即重新進行濃度校正直到做出的檢量線達到規範，圖 4-10 為符合規範的校正檢量線。當通量設備到目標場域開始做通量觀測後，建議每一年做一次的濃度校正(多點)，濃度確認(單點)的部分建議每一季或是每半年做一次，以維持數據品質。

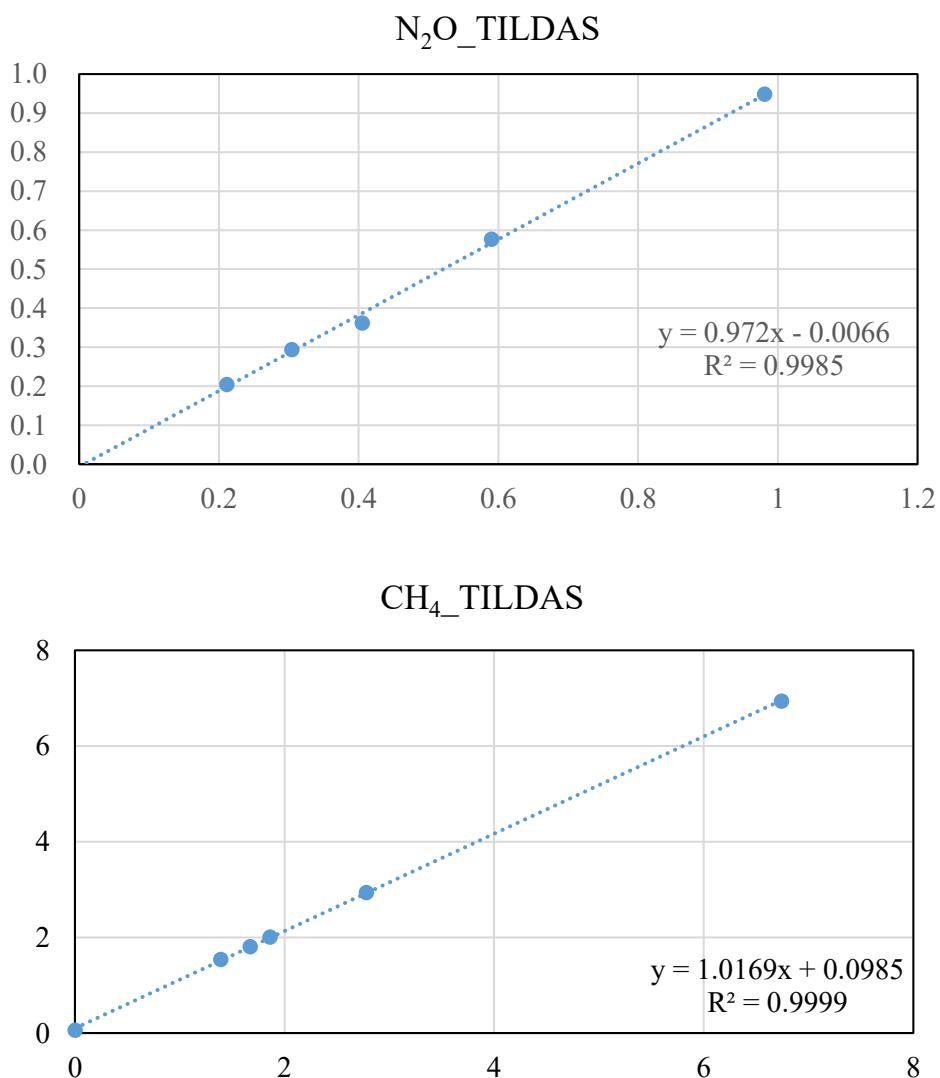


圖 4-86 氣體分析儀器 TILDAS 對於兩種不同溫室氣體 N₂O / CH₄的濃度校正結果

(2) 精密度測試

將配製完成的校驗樣品連續通入分析儀器超過 25 小時以上，第 1 小時為分析儀器穩定時間，取剩下的 24 小時資料來做 1 分鐘以及 60 分鐘的標準偏差，得

到的標準偏差需要小於表 4-6 ICOS 大氣測站規範 (ICOS Atmospheric Station specifications Version 2.0 - September 2020)，本次測試得到的結果如表 4-7 以及圖 4-11(a)-(b)時間序列圖。從實驗結果來看 N_2O 通量監測儀 (TILDAS) 在低流速 (0.55 LPM) 條件下， N_2O 和 CH_4 都有符合原廠規格以及 ICOS 精密度規範，但在高流速(15 LPM)條件下，因為一般標準氣體鋼瓶 (30L) 沒有足夠的氣體可以連續輸出 25 小時，我們將測試的條件改成將配製完成的校驗樣品連續通入分析儀器超過 4 小時以上，前 10 分鐘為分析儀器穩定時間，取剩下的資料來做 1 分鐘以及 60 分鐘的標準偏差，在這條件下 N_2O 和 CH_4 都沒有符合 ICOS 精密度規範，而 Aeris-Ultra 只有 N_2O 符合 ICOS 精密度規範。當通量設備到目標場域開始做通量觀測後，建議每一年做一次的精密度測試，以維持數據品質。

表 4- 5 三種不同溫室氣體的校正曲線實際濃度配製點

$\text{CH}_4(\text{ppm})$	$\text{N}_2\text{O}(\text{ppm})$	$\text{CO}_2(\text{ppm})$
0	0	0
1.39	0.211	298
1.67	0.304	381
1.86	0.405	449
2.78	0.59	793
6.74	0.981	996

表 4- 6 ICOS 大氣測站三種溫室氣體精密度和再現性規範

測項	保證精密度範圍	精密度規範	再現性規範
CO_2	350 - 500 ppm	< 50 ppb(1min) / < 25 ppb(60min)	<50ppb (10min)
CH_4	1700 - 2900 ppb	< 1 ppb(1min) / < 0.5 ppb(60min)	<0.5ppb (10min)

溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)

N ₂ O	300 - 400 ppb	< 0.1 ppb(1min) / < 0.05 ppb(60min)	<0.1 ppb (10min)
------------------	---------------	-------------------------------------	------------------

*測試條件:乾空氣，溫度: 20°C ± 2°C，壓力:自然變化下的大氣壓力

表 4-7 氣體分析儀器低頻精密度測試得到的結果

Freq	q (LPM)	tau (s)	chamber pressure (torr)	精密度規範 (1 min)			精密度規範 (60 min)		
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
ICOS ATC*				< 50	< 1	< 0.1	< 25	< 0.5	< 0.05
IRGASON	10 Hz	0.5		60.4			79.4		
LI-7700	10 Hz	1			2.4			2.32	
TILDAS-CS	10 Hz	15	0.105	40		0.58	0.17		0.44 0.16
TILDAS-CS	10 Hz	0.55	3.4	40		0.62	0.1		0.57 0.1
Aeris-Ultra	10 Hz	5		105	1141	1.12	0.72	1106	0.91 0.68

Note: 測試條件:乾空氣，溫度: 25°C ± 2°C，壓力:自然變化下的大氣壓力; *本表依據 ICOS 大氣濃度測站規範(ICOS Atmospheric Station specifications Version 2.0 - September 2020)。ICOS 通量測站(ICOS ETC)尚未規定儀器的精度要求。

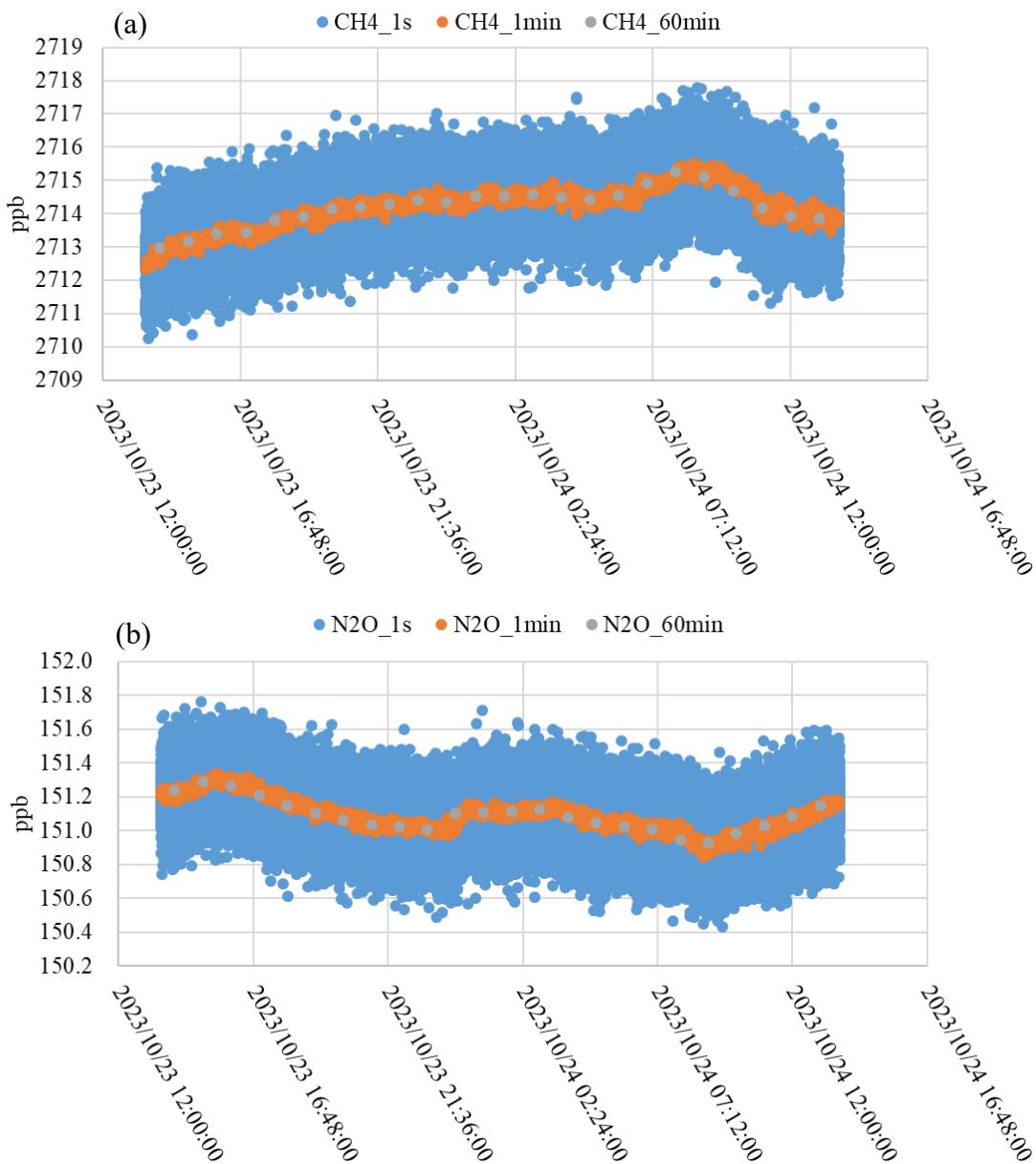


圖 4- 87 TILDAS-CS 的精密度測試之時間序列圖(a) CH₄、(b)N₂O

(3) 再現性測試

在連續 75 小時之內將配製完成的校驗樣品以 30 分鐘和一般室內空氣 270 分鐘為間隔持續通入分析儀器(30 分鐘標氣/270 分鐘空氣/30 分鐘標氣/270 分鐘空氣)，取每次標氣最後的 10 分鐘測值的總數來做 10 分鐘的平均值，再取這 15 筆平均值做出標準偏差，得到的標準偏差需要小於表 4-19 ICOS 大氣測站規範 (ICOS Atmospheric Station specifications Version 2.0 - September 2020)，本次測試得到

的結果如表 4-8 及圖 4-12 (a)~(b)時間序列圖。

因為一般標準氣體鋼瓶(30L)沒有足夠的氣體可以連續輸出 7.5 小時以上，我們將 TILDAS 的測試方法修正為：在連續 75 小時之內將配製完成的校驗樣品以 12 分鐘和一般室內空氣 288 分鐘為間隔持續通入分析儀器(12 分標氣/288 分空氣 /12 分標氣/288 分空氣)，一樣取每次標氣最後的 10 分鐘測值的總數做 10 分鐘的平均值，再取這 15 筆平均值做出標準偏差。測試得到的結果來看 TILDAS 以及 Aeris-Ultra 不符合 ICOS 大氣測站再現性規範。當通量設備到目標場域開始做通量觀測後，建議每一年做一次的再現性測試，以維持數據品質。

表 4-8 氣體分析儀器低頻再現性測試得到的結果

	Freq	q	tau	chamber pressure	再現性規範 (10 min)					
					LPM	s	torr	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
								ppb	ppb	ppb
ICOS ATC*					< 50	< 1	< 0.1			
G2401	1 Hz	0.25	1.33	140	30.6	0.18	-			
G2508	1 Hz	0.25	1.33	140	46.2	0.043	0.34			
IRGASON	10 Hz	0.5	-	-	70	-	-			
LI-7700	10 Hz	1	-	-	-	2.93	-			
TILDAS-CS	10 Hz	15	0.105	40	-	3.64	1.08			
TILDAS-CS	10 Hz	0.55	3.4	40	-	2.02	0.3			
Aeris-Ultra	10 Hz	5		105	606	2.05	0.41			

Note: 測試條件:乾空氣，溫度: 25°C ± 2°C，壓力:自然變化下的大氣壓力; *本表依據 ICOS 大氣濃度測站規範(ICOS Atmospheric Station specifications Version 2.0 - September 2020)。ICOS 通量測站 (ICOS ETC)尚未規定儀器的精度要求。

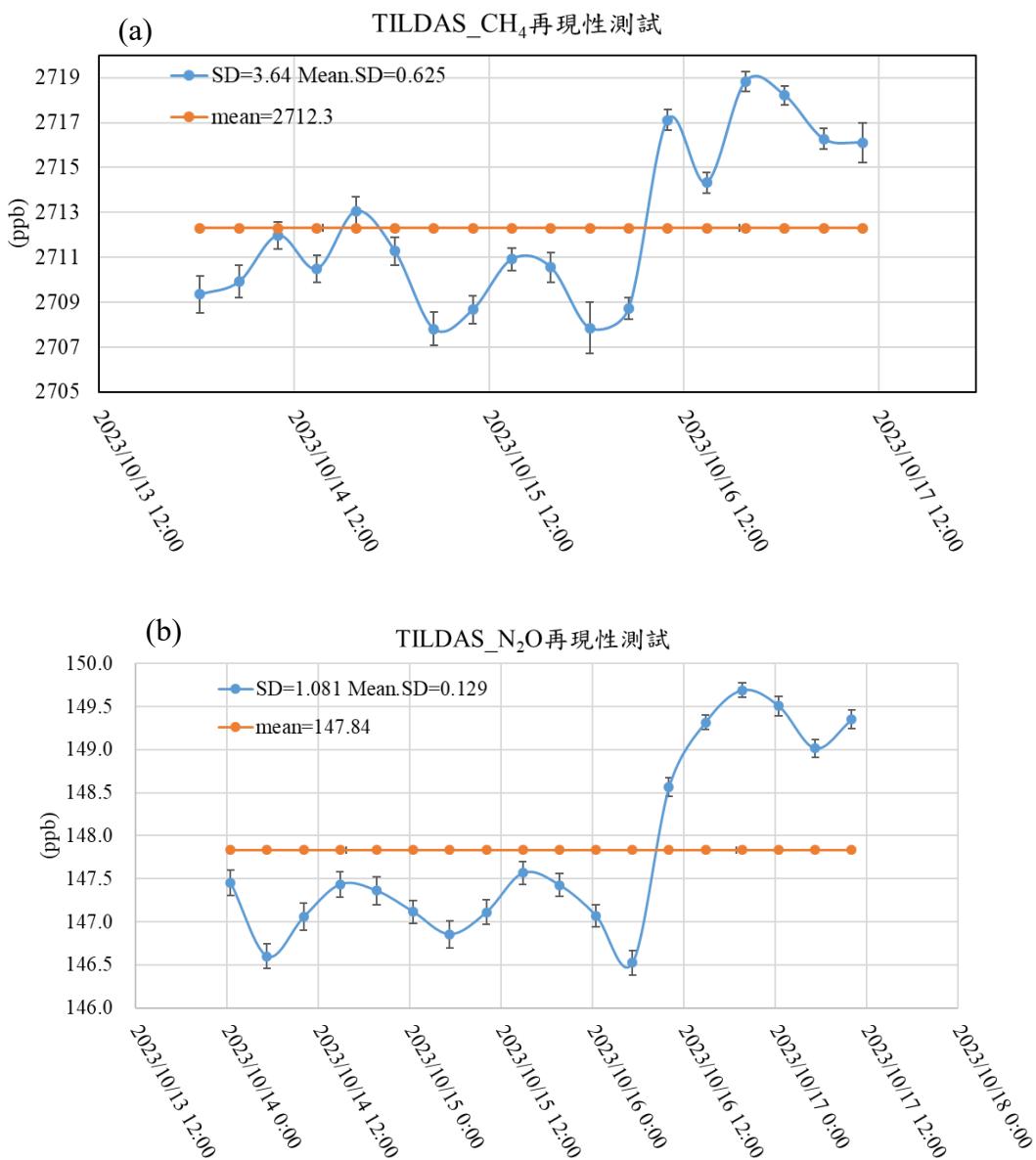


圖 4-88 TILDAS-CS 再現性測試計算使用資料時間序列圖 (10 分鐘)

(a)CH₄ 、 (b)N₂O

4.6 歐洲綜合碳觀測系統(ICOS)生態測站設備規範

Integrated Carbon Observation System (ICOS)於今年(2024/3/25)公告關於生態測站的 CH_4 和 N_2O 的 EC 觀測指南(TURBULENT FLUXES CH_4 & N_2O Version: 20240325)，再搭配之前公告 CO_2 的 EC 觀測指南(TURBULENT FLUX CO_2 & energy Version: 20240119)，這兩份指南除了清楚描述 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 觀測設備的架設和

維護，也訂出了這三種測項的設備規範(精密度 RMS@10 Hz)，對 CO₂、CH₄、N₂O 來說分別是 110 ppb、10 ppb、1 ppb。

我們根據這個規範對現有的通量設備做測試，其結果如表 4-9 和圖 4-13。除了 Aeris 的 CO₂ 測項之外，其他設備的所有測項都符合 ICOS 生態測站的設備規範，Aeris 的部分可能因為將 CO₂ 和 N₂O 放在同一台設備做觀測，推測因要優化 N₂O 的觀測光譜結果而導致 CO₂ 的訊號受到影響。

溫室氣體通量檢測技術開發驗證及方法制定(2/4)

表 4-9 氣體分析儀器高頻精密度測試結果

	CO ₂ ppb	CH ₄ ppb	N ₂ O ppb
ICOS 建議範圍	≤ 110	≤ 10	≤ 1
ICOS Ecosystem			
Instructions			
TURBULENT FLUX			ICOS Ecosystem Instructions
CO ₂ & energy		TURBULENT FLUXES CH ₄ & N ₂ O	
參考文獻來源	Version: 20240119	Version: 20240325	
Campbell IRGASON	62.4	-	-
LI-COR LI-7700	-	5	-
Aerodyne TILDAS-CS	-	3.9	0.9
Aeris Ultra	189.1	1.68	1.42

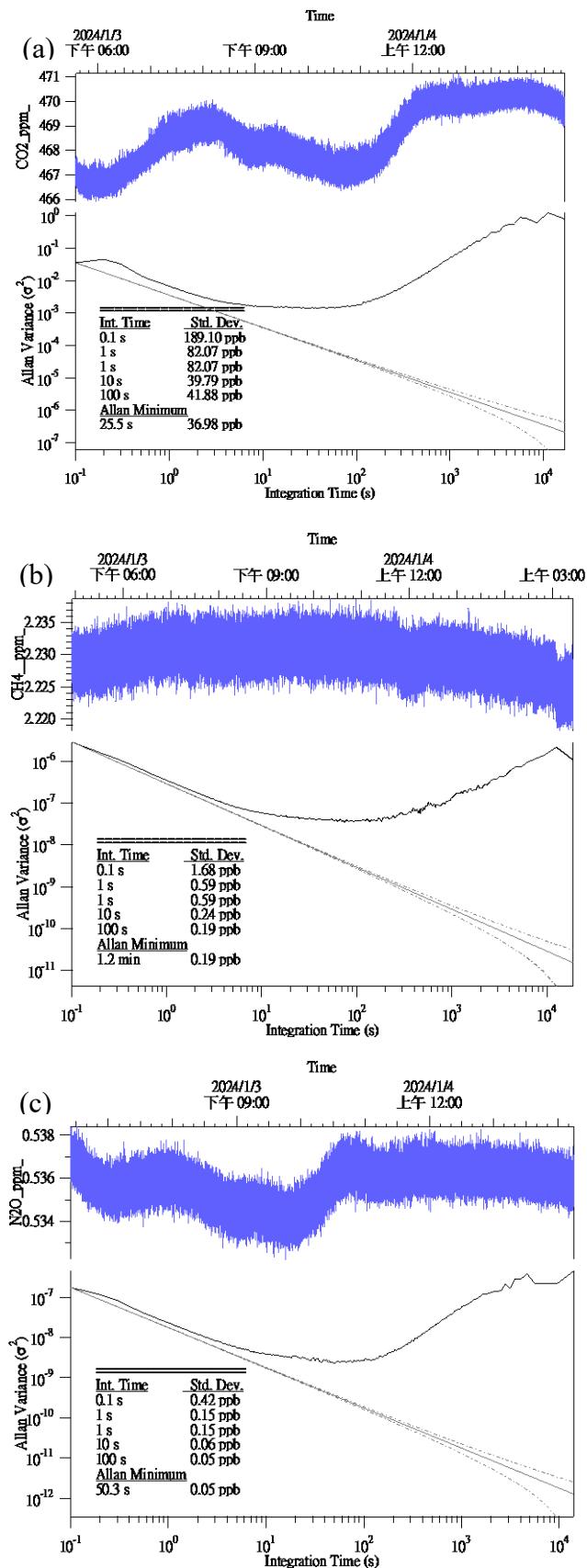


圖 4-89 Aeris_Ultra 精密度結果(a)CO₂、(b)CH₄ 及(c)N₂O

5. 數據資料處理

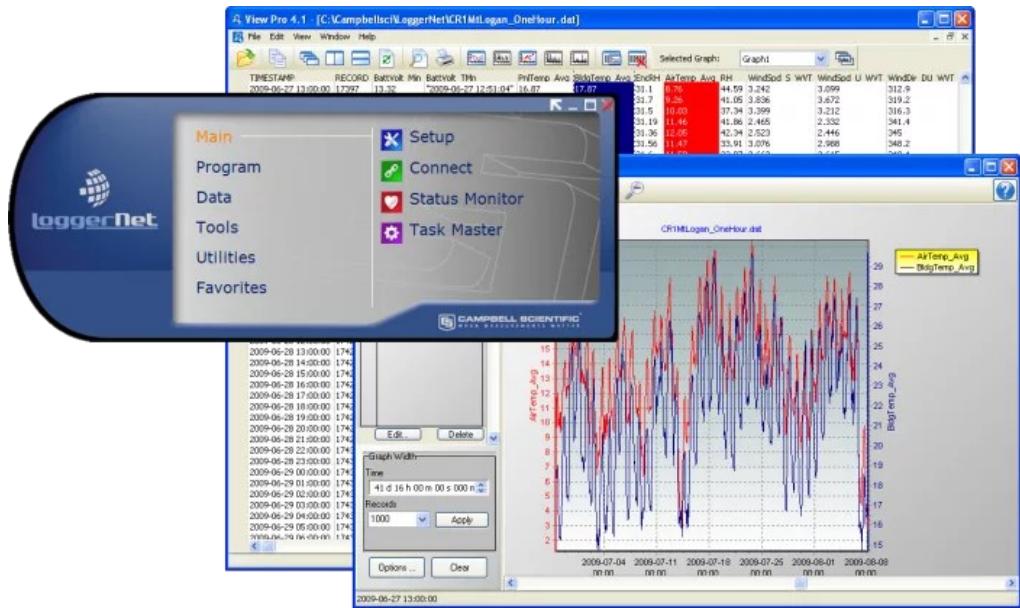
制定相關標準監測方法以提升數據解讀的一致性及可比較性，數據資料處理流程包含原始資料的檢視、資料前處理以及後續通量的品質檢定，以確保該資料是否合乎觀測標的以及場域要求，相關數據資料處理流程如圖 5-1 所示。



圖 5-1 數據資料處理流程

5.1 資料蒐集與檢索

溫室氣體通量監測資料種類繁多，為維持數據品質及穩定性，本節以 CAMPBELL 的 CR1000X 作為資料蒐集與檢索介紹。此紀錄器適配溫室氣體通量監測之各項觀測儀器，且使用其搭配之應用程式 LoggerNet 以固定頻率紀錄數據並可隨時檢查數據品質(圖 5-2)。



資料來源: Campbell Scientific, Inc.

圖 5- 2 LoggerNet 軟體示意圖

紀錄之資料會先暫存於紀錄器中並可透過以下三種蒐集數據之方式蒐集:

- (1) 第一種是以網路線連接至電腦並每日定時回傳資料，其優點上傳速度快且最為方便整理數據。
- (2) 第二種是以 microUSB 傳輸線連接電腦，此方式需手動下載資料，數據過大時下載速度緩慢。
- (3) 第三種為使用 SD 卡安裝於紀錄器上，此方式亦可設定定時寫入數據但需定期更換 SD 卡以防記憶體用盡，本研究以網路收集數據為主，可定時上傳資料以減少人工收集之時間成本。數據格式為.dat 檔，若直接下載紀錄器中檔案可能會格式不符，此時可利用 LoggerNet 中的 CardConvert 轉檔即可。

5.2 單位轉換

單位轉換涉及所有儀器所輸出的資料是否為高頻，且所使用之單位是否合乎未來通量計算之要求。單位轉換通常是處理瞬時資料的第一步。雖然有些人喜歡先消除資料異常值，然後再執行單位轉換和其餘處理。如果仔細處理，此步驟應該會產生與下面所示相同的結果。

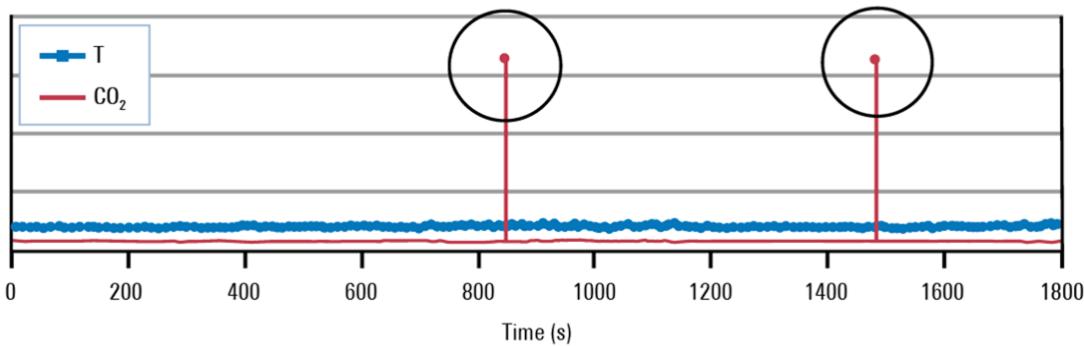
由於通量監測所需儀器包含高頻氣體分析儀、音波風速計、資料紀錄器等設備，假如氣體分析儀所輸出以高頻資料呈現，則其他儀器需要與氣體輸出頻率一致，包含溫度、含水量以及氣體壓力等資料，否則未來將造成通量計算上的誤差(Burba, 2021; Lee et al., 2005; 袁一夫, 2008)。

5.3 消除資料異常值

原始資料(Raw data)處理過程經常會發現某些資料過大或過小，通稱為異常值(Spike)，這些異常值常發生於儀器本身記錄過程(e.g.開放式分析儀遇強降雨等)，或是紀錄器本身雜訊(Instrument malfunction)(袁一夫, 2008; 鄭丞孝, 2013)。資料處理流程所採用方式如下：

- (1) 原始資料在消除異常值前，需先檢視是否進行單位轉換，並根據所選擇的時距(30 min)進行資料切割。
- (2) 檢視資料周期內(30 min 時距)如大於 3-8 倍標準差，則該筆資料將被移除(圖 5-3)。數據處理人員應時常檢視原始資料，確保資料移除標準仍適用並應注意避免設定太嚴格的資料移除標準導致太多資料缺值的問題(Burba, 2021, 2013)。

雖然過多的異常值通常表示儀器或訊號出現問題，但有些情況（例如生態系統夜間交互作用）可能看起來像異常值，但實際上是自然現象。自然生態系統在科學應用中的異常值去除標準可能與目標氣體（例如，在垃圾掩埋場或潟湖中產生甲烷的情況下）的監測或商業應用中的標準有很大不同。相對較小的陣風加上氣壓和地形的變化可能會因為從基質中釋放而導致氣體濃度發生非常大的偏移。在這種情況下，可能需要更寬的去異常閾值標準（8 個或更多標準差）。

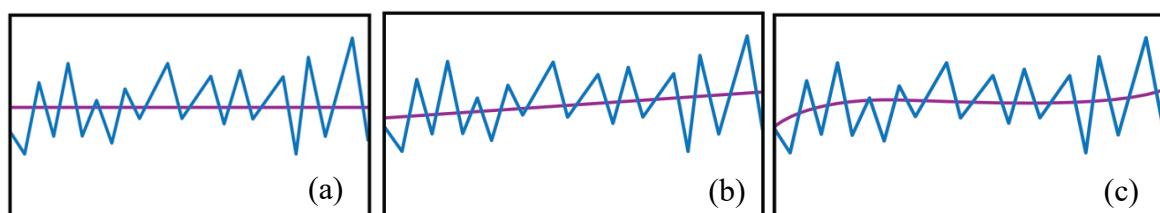


資料來源:Burba (2022)

圖 5- 3 消除資料異常值示意圖(Despiking)

5.4 消除資料趨勢性

渦流相關法所觀測到的溫度、密度水氣等資料容易受日變化或其他大氣變化而改變資料統計特性(袁一夫, 2008)。因此，在資料處理過程需要將平均時距內的變化修正，即消除資料去趨勢。傳統上有三種主要的方法來處理這一問題，分別對應三種技術：移動平均、線性去趨勢和非線性濾波(圖 5-4)。每種方法可能適用於特定的情況。儘管移動平均法是最常用的去趨勢方式(有時甚至被視為不需要去趨勢)，在複雜地形和某些區域濃度快速變化的情況下，可能需要採用線性和非線性濾波方法(Burba, 2021; Lee et al., 2005)。



資料來源:Burba (2022)

圖 5- 4 三種主要去趨勢方法(a) 移動平均 (b) 線性去趨勢 (c) 非線性濾波

5.5 WPL 校正

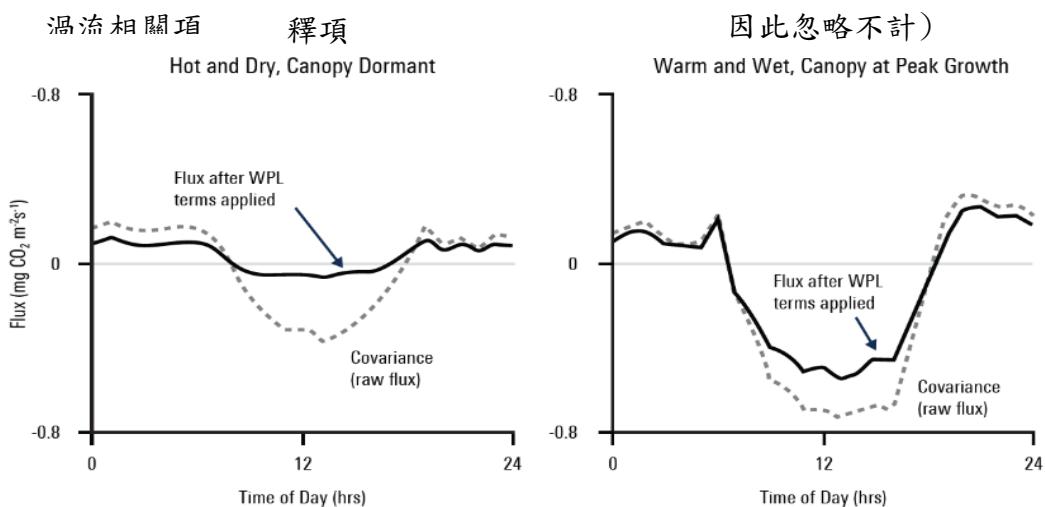
WPL 校正主要由 Webb, Pearman 及 Leuning 在 1980 年發現，計算通量必須考慮濕空氣之熱含量、溫度以及垂直風速之變量。主要目的是為了補償因環境中熱通量以及水氣通量的存在而導致量測物質密度瞬變量的變化(圖 5-5)。Fc 為 WPL

校正後的通量值， ρ_a 為空氣密度、c為某微量氣體濃度、T為空氣溫度、w為垂直風速、 ρ_d 為乾空氣密度、 ρ_c 為物質密度、 ρ_v 為水氣密度， μ 為空氣與水摩爾比 ($\mu = 1.6077$) (Burba, 2021, 2013)。

$$F_c = [\bar{w}' \bar{\rho}_c' + \mu \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{\rho}_d} \bar{w}' \bar{\rho}_v' + \left(1 + \mu \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_d}\right) \frac{\bar{\rho}_c}{\bar{T}} \bar{w}' \bar{T}' - \bar{\rho}_c \left(1 + \mu \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}_d}\right) \frac{\bar{w}' \bar{\rho}_v'}{\bar{p}}] \quad (8)$$



某物質密度的 水氣濃度稀 热力浮力項 壓力修正項(此項貢獻相當少)



資料來源: Burba (2022)

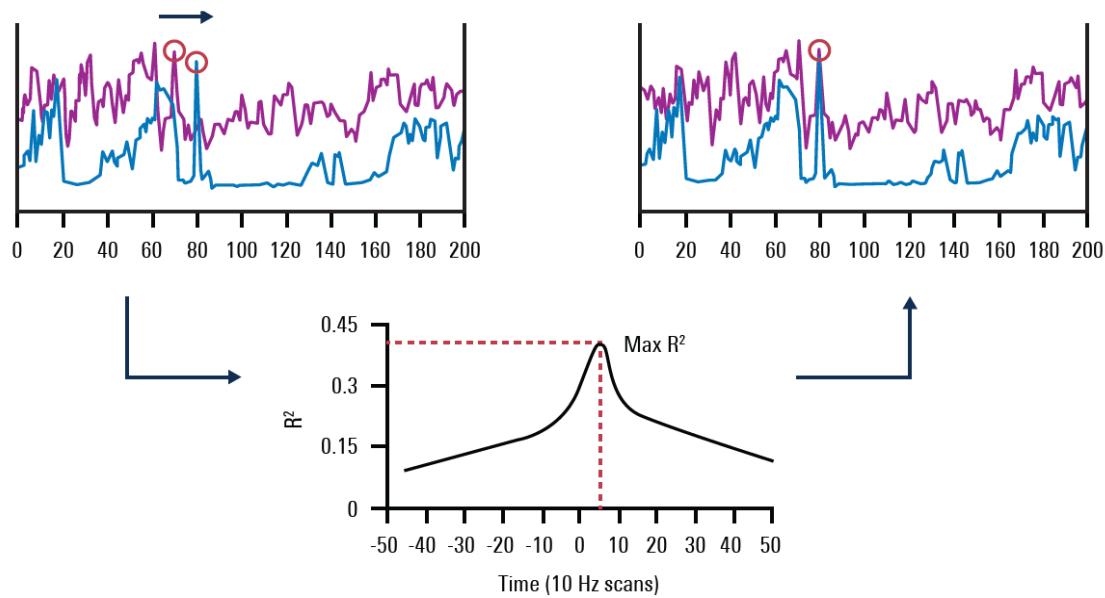
圖 5-5 WPL 通量校正前後示意圖

5.6 時間延遲校正

時間延遲的具體原因對於開放式、閉路和封閉式分析儀並非相同，在開放式設備中，大部分延遲是由於分析儀和風速計之間相對於風向和風速的較小間隔距離以及電子、處理和記錄延遲造成的。開放路徑系統中的總延遲通常較小，約為幾個 10 Hz (0.1 – 0.3 s)。在閉路式儀器中，最大的延遲是由於採樣空氣通過進氣管所需的時間造成的，而其他延遲來源（例如感測器分離、電子設備、記錄等）相對較小。延遲通常相當大，通常約為幾秒鐘，隨溫度、濕度和管中雜質而變化。

而開放式(Open-Path)分析儀所造成的延遲部份是由於分析儀和風速計之間

的距離差異，相對於其風速以及風向的資料上的落差。值得注意的是，如果採集相對黏性較大的氣體(e.g. NH₃)，會在管柱所造成延遲高於 CO₂ 及 CH₄。上述所發現到的時間延遲可透過兩變量交叉相關(Cross correlation)分析方式進一步校正(Burba, 2021, 2013)(圖 5-6)。



資料來源: Burba (2022)

圖 5-6 時間延遲校正示意圖(Time delay correction)

5.7 座標軸旋轉

為了修正人為或地形因素所造成的傾斜角誤差，該步驟將強制旋轉座標軸以符合風場與理論假設。理論推導過程中採用到垂直方向上平均風速為零的假設，而現地所觀測到的風場並不會完全符合該理論假設。音波風速計觀測到垂直方向上平均風速不為零的情況有(鄭丞孝, 2013; 魏谷州, 2007):

- (1) 水平風向未與現地觀測風場地表平行。
- (2) 因研究區域內之地物造成垂直方向上平均風速不為零。
- (3) 儀器架設時，未能將儀器確實水平架設造成量測到平均垂直風速不為零。

由於上述三種情況皆會造成通量計算上的誤差，因此將採用二維座標軸旋

轉(Double rotation)的方法，使風場符合理論假設。利用三維音波風速計測得卡氏三軸(x , y 與 z)相對於風速 u , v 與 w 。二維座標軸旋轉(Double rotation)描述方式如下：

(三)第一步驟

首先以 z 為旋轉軸，找出原 x 、 y 平面內水平向量的方向(longitudinal direction)，並進一步將其視為新的 x 軸向(x')，計算在該平均時距內沿著 x' 軸向上的水平風速，並計算其與原 x 軸向的夾角 θ 。因此，定義了新的 y 軸向 y' ，使得 $\bar{v}' = 0$ 。其矩陣運算數學式可表示 (Eq. 10, 11):

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中， $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{u}}{\bar{v}}\right)$ (11)

(四)第二步驟

以新的 y' 軸為轉軸，旋轉 φ 角。定義新的 x 軸與 z 軸分別以 x'' 與 z'' 表示，其風速分別為 u'' 與 w'' 。強制沿著新的 z'' 軸向上的平均風速為零，使得 $\bar{w}'' = 0$ 。其矩陣運算數學式可表示為 (Eq. 12, 13):

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中， $\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\bar{w}'}{\bar{u}'}\right)$ (13)

進行矩陣運算可以得到下式(Eq. 14):

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \\ w'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \sin \theta \sin \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\cos \theta \sin \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (14)$$

轉動座標軸後，可以得到新的三軸風速 u'' 、 v'' 及 w'' ，其中 v'' 及 w'' 兩項平均風速均為零。

5.8 平均時距選擇

在進行通量運算時，原始數據經由前述章節處理篩選之後，即可進一步選定適合的平均時距週期，以進行下一步的資料處理與通量運算。平均時距間隔不宜太長，如果太長資料可能會抓取到含蓋緩慢或非渦流貢獻的訊號。此外，測量通量的晝夜週期可能會被 5-6 小時或更長的平均時距間隔所掩蓋或消除。平均間隔也不宜太短，如果太短，可能會導致類似於高通濾波的效果，容許高頻訊號通過、但減弱（或減少）頻率低訊號，從而導致丟失較低頻率的貢獻而低估測量的通量。建議時距選擇方法採用 15 分鐘或 1 小時的標準平均時距週期。它易於執行，並且適用於許多傳統設置，且不隨時段與天氣狀態改變，但可能不適合所有條件(Oncley et al., 1996; 林繼于, 2010)。紊流運動的強度越激烈、越不穩定的大氣，紊流尺度越大，其所需的平均週期越長(Oncley et al., 1996; Wyngaard et al., 1975)。此外，相關研究也發現，一天當中不同時段即使在同一個樣區影響的平均時距周期也可能不盡相同(林繼于, 2010)。因此，平均時距週期的選擇，或是合適的平均週期長度，仍為通量計算需要克服的問題。平均週期長度的選擇，必須先瞭解紊流的發展情形以及渦流的時間尺度。有許多研究提出方法，可透過頻譜分析(spectrum analysis)，及透過 ogive 函數可確認攜帶通量的渦流尺度(Metzger et al., 2008)。有助於瞭解紊流運動的發展情形，並確保紊流運動的時間尺度(Stull, 1988)。Ogive 函數是將垂直風速與所量測物質濃度，各頻率的共頻譜，透過積分方式，從高頻漸漸積分至低頻，參考下列公式(Foken, 2006a; Oncley et al., 1996; 林繼于, 2010):

$$Og_{wc}(f) = \int_{f_{height}}^f Co_{wc}(f) df$$

5.9 資料品質控制

通量資料經過前處理後，除了資料奇異值處理、座標軸轉換及時間延遲校正外，尚須檢視其他參數來確認當時大氣條件是否符合理論基本假設。由於資料品質好壞容易受到當時大氣環境差異的影響，特別是在夜間情況。夜間因為

伴隨著風量較小、逆溫及熱分層不穩定，導致湍流沒有辦法充分發展。通常會透過摩擦速度檢核 (Friction velocity)、穩定性測試 (Stationarity test)、相似性分析 (Integral turbulence characteristics) 以及資料頻譜分析 (Cospectral analysis) 來檢核大氣條件以及紊流發展情形(Foken, 2006b; Foken and Wichura, 1996a)。

相反的，相對穩定的情況下，通量足跡 (Flux footprint) 也可能快速增長，導致通量儀器所量測到的資料可能來自通量足跡外的資料。因此，可透過上述通量足跡分析的方式進一步濾除足跡以外的資料，確保通量品質的一致性以及穩定性。由於近地表能量平衡必須滿足能量守恆的概念，也可透過能量平衡式來檢視通量資料的品質(Burba, 2021; Lee et al., 2005)。

(五)摩擦速度修正(Friction velocity)

通量品質好壞容易受到當時大氣環境差異的影響，特別是在夜間情況。普遍使用摩擦速度修正法以合宜的篩選摩擦速度來確保資料品質優劣標準。摩擦速度的大小往往可作為紊流發展強弱的指標，根據定義可透過觀察夜間二氧化碳通量資料與相對應的摩擦速度分布圖來檢視之間的變化(Papale et al., 2006)。當摩擦速度增大，二氧化碳渦流通量也漸漸增加。隨著摩擦速度增大至一定數值後，即使摩擦速度持續增大，二氧化碳渦流通量也不會有太大起伏且趨於平穩。當二氧化碳渦流通量達一定平穩後，當時的摩擦速度即為欲求之摩擦速度臨界值。

該臨界值的意義為，當量測到的通量資料超過摩擦速度臨界值即代表當時紊流發展相當強烈且穩定，可以確定當時進出生態系之二氧化碳有強烈紊流得以輸送。反之，量測通量資料低於此指標即代表該時段的紊流相當微弱，通量資料可能受到限制，因此不足以採信(吳致甄, 2009)。

(六)穩定性測試(Stationarity test)

穩定性測試主要是由 Foken 跟 Wichura 於 1996 年發表文章所採用，主要是以

統計的方式檢核當時大氣條件是否穩定(Foken and Wichura 1996b)。該方式是以統計方式比較了原始資料週期與所設定短時間週期，垂直風(w)與水平風分量(x)的共變異數。假設以 10Hz 觀測頻率來看，30 分鐘的時間序列共計 18,000 筆量測值(N=18000)。短時間週期設定為 5 分鐘，5 分鐘共計有 3000 筆量測值(M=3000)。參照以下公式進行共變量運算(Eq. 15, 16, 17)，最後進一步檢視兩個時間週期的相關性強度(RN_{cov})，如果差異小於 30%，即可認定為可接受的資料(Eq.18) (Lee et al., 2005)。

$$(\overline{x'w'})i = \frac{1}{N-1} \left[\sum_j x_j w_j - \frac{1}{N} \sum_j x_j \sum_j w_j \right] \quad (15)$$

$$\overline{x'w'} = \frac{1}{M} \sum_i (\overline{x'w'})i \quad (16)$$

$$(\overline{x'w'})o = \frac{1}{M(N-1)} \left[\sum_i (\sum_j x_j w_j)i - \frac{1}{MN} \sum_i (\sum_j x_j \sum_j w_j)i \right] \quad (17)$$

$$RN_{cov} = \left| \frac{\overline{(x'w')} - \overline{(x'w')}o}{\overline{(x'w')}o} \right| \quad (18)$$

(七)相似性分析(Integral turbulence characteristics)

相似性分析是根據莫尼(Monin)及奧克考夫(Obukhov)所提出的相似性理論，在水平方向地勢平坦且植被均質，當大氣穩態時可以由四個互為獨立的參數來決定，參數分別為地表高度(Z)、摩擦風速(u*)、可感熱通量(H/ρ_aC_p)以及浮力(g/T_a) (Monin and Yaglom, 1973; 魏谷州, 2007)。上述四個參數可以組合成一個無因次參數，該參數又被稱為大氣穩定尺度(ζ)，表示如下(Eq. 19):

$$\zeta = Z/L \quad (19)$$

L 稱為奧克考夫尺度長度(Obukhov's Length)，其數學關係式表示如下(Eq. 20):

$$L = \left(\frac{-u_*^3}{k \left(\frac{g}{T_a} \right) \left(\frac{H}{\rho_a C_p} \right)} \right) \quad (20)$$

*u**:為摩擦風速

g：重力加速度，其值為 9.8，單位為(m/s²)

C_p ：空氣比熱，其值為 1008，單位為(J/Kg K)

T_a ：為空氣平均溫度，單位為(K)

奧克考夫尺度長度為近地表大氣中，剪應力與浮力效應相同時，距離地表的高度。當地表溫度高於大氣溫度時，可感熱通量向上傳遞($H > 0$)，這時候大氣處於不穩定的狀態($L < 0; \zeta > 0$)。同理，當地表溫度低於大氣溫度時，大氣處於穩定的狀態，奧克考夫尺度長度大於零，大氣穩定尺度($L > 0; \zeta > 0$)。當大氣穩定尺度(ζ)接近零時，此時大氣是處於穩定與不穩之間的中性狀態，當大氣穩定尺度(ζ)遠小於 1 時，表示觀測點受到浮力效的影響比剪應力的效應重要(Monin and Yaglom, 1973; 魏谷州, 2007)。

此外，大氣中的物理量，其標準差在地勢平坦、植被均質以及具有定常性的大氣條件下，依據莫尼(Monin)及奧克考夫(Obukhov)提出的相似性理論，可以表示成下列數學式(Eq. 21)(Lee et al., 2005; Monin and Yaglom, 1973; 魏谷州, 2007):

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = \psi\left(\frac{Z}{L}\right) \quad (21)$$

σ_x :水平風速分量的標準偏差

u^* :為摩擦風速

L :奧克考夫尺度長度

ψ :大氣穩定尺度函數

相似性分析是測試湍流條件發展的好方法，該相似性意味著垂直風向的標準偏差與其湍流通量的比值幾乎是恆定的或者是一個穩定的參數。上述通式(general form)必須滿足兩個條件：

(c) 當大氣接近中性狀態時， $\frac{\sigma_x}{u^*}$ 必須趨近於一個定值。

(d) 當大氣狀態為不穩定時，該通式必須不受摩擦風速(u^*)的影響。

能滿足上述二個條件的通式，其數學關係式表示如下(Eq. 22)：

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = C_1 \left(C_2 - \frac{z}{L} \right)^{-1/3} \quad (22)$$

其中， C_1 與 C_2 為無因次的常數，當大氣接近中性狀態時($-Z/L \approx 0$)，方程式可改為，由此可知看出當大氣接近中性狀態時(σ_x/u^*)趨近於常數(Eq. 23)。

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = C_1 (C_2)^{-1/3} \quad (23)$$

當大氣為不穩定狀態時($-Z/L >> C_2$)，其數學關係式表示如下，也可從關係式得知，其不受到摩擦風速的影響(Eq. 24)(Lee et al., 2005)。

$$\frac{\sigma_x}{u^*} = C_1 \left(-\frac{Z}{L} \right)^{-1/3}$$

5.10 能量平衡式

利用渦流相關法量測近地表通量也可透過能量平衡式來檢視通量資料的品質。由於近地表能量平衡必須滿足能量守恆的概念，因此 Wilson et al (2002)等人利用下列數學關係式描述地表面的能量平衡(Eq. 25)。而地表平衡的如圖 5-8 所示：

$$R_n + LH + H + G \approx 0 \quad (25)$$

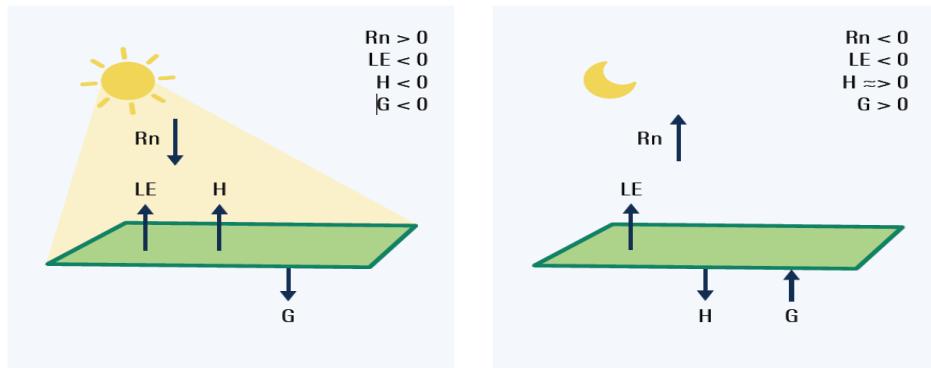
G:土壤熱通量 (W/m^2)

H:可感熱通量(W/m^2)

LH:潛熱通量(W/m^2)

R_n :淨輻射通量(W/m^2)

淨輻射能量(R_n)主要為地表面吸收到的輻射能量減去反射回去的輻射能量稱為淨輻射能量。由於太陽主要以短波輻射的方式向地表面傳遞能量，部份的太陽短波輻射能量會傳到地表面，而部份的短波輻射會經過大氣產生散射、反射或是吸收等效應。除此之外，大氣也會透過長波輻射的方式將其所吸收的能量傳回至地表面。當地表面收到太陽的短波輻射時，會將部份的能量反射回去，此外地表面亦會以長波輻射的方式將能量向大氣傳遞(魏谷州, 2007)。



資料來源: Burba (2022)

圖 5-7 地表能量平衡示意圖

土壤熱通量(G)主要因為土壤溫度梯度而產生的能量傳遞。當太陽照射在土壤表面，當表面的土壤吸收了部份日光能量之後會增加表層土壤的溫度。當上方土壤與下方土壤產生溫度差時，即產生溫度梯度，此時熱能會由上層土壤向下傳遞，而夜間則有相反的溫度傳遞過程。上述所提及淨輻射能量(R_n)以及土壤熱通量可透過淨輻射計以及熱通量板進行觀測(Burba, 2021, 2013)。

可感熱通量(H)主要因為地表吸收來自太陽與大氣所產生之輻射能，造成地表溫度上升使得近地表的氣溫也隨著地溫上升而改變。熱能可藉由空氣的流動而向上傳遞，其傳遞熱能的通量可透過渦度相關法計算(Eq. 26)。

$$H = \rho_a C_p (\overline{w' T'_a}) \quad (26)$$

ρ_a : 空氣密度，其可視為定值(1.168 Kg/m^3)

C_p : 空氣比熱，其可視為定值($1008 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$)

w: 垂直風速(m/s)

T_a : 空氣溫度($^\circ\text{C}$)

環境中的「蒸發散」是地表與大氣間一個相當重要的現象，其不僅是陸氣間的交換，也伴隨能量的傳輸。當水分子吸收了來自外界的能量後，由原先的之水(液相)轉變為水氣(氣相)，再經由地表相大氣傳輸的過程中所消耗的能量稱之為

潛熱能(LH)。潛熱能可藉由空氣的流動而向上傳遞，其傳遞熱能的通量也可透過渦度相關法計算(Eq.27)。

$$LH = \overline{w' \rho'_v} \quad (27)$$

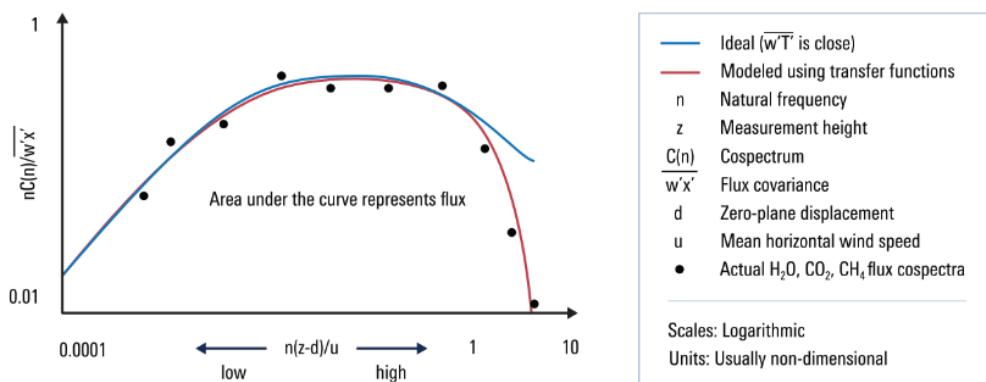
LH:潛熱通量(Kg/m²s)

w:垂直風速(m/s)

ρ'_v :水氣密度(Kg/m³)

5.11 共頻譜分析

氣體通量頻譜分析有助於我們了解在哪些頻率下氣體通量可能被遺漏或量測不正確。大氣中紊流流場是由許多大大小小的渦流(eddy)所組成，渦流傳輸有些以較高頻率完成，一些以較低頻率完成，整個頻率範圍可從小時為單位小至以0.1秒的渦流傳輸。資料共頻譜分析即透過傅立葉轉換(Fourier transform)的方式使時間序列從時域轉為頻域來表示這個變化。當在一個穩定的風場，風不會受到鄰近物體干擾，可透過音波風速計以很小的誤差對風速以及溫度進行非常快速的採樣，從中可得到資料頻譜分析的理想的頻譜曲線(藍色)即以垂直風速和溫度($w'T'$)的協方差並透過傅立葉轉換方式來呈現(圖 5-9)。



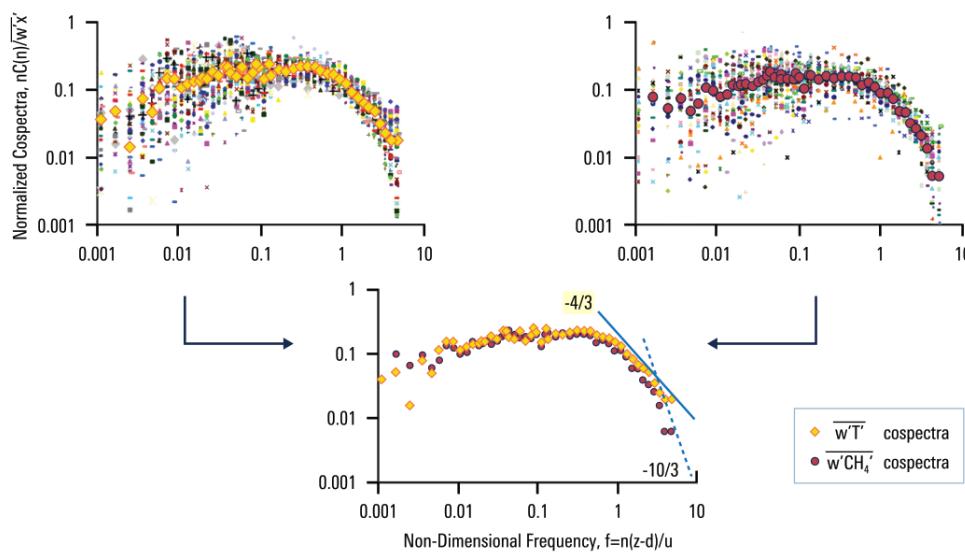
資料來源: Burba (2022)

圖 5-8 資料頻譜分析示意圖

從氣體通量頻譜分析結果也可發現，高頻的氣體通量資料(black dots)通常低於理想的頻譜曲線(藍色線)，代表該頻率有損失情況。頻率損失原因主要是由於幾個原因所造成，包含儀器本身反應時間、閉路式儀器訊號雷射衰減、時間延遲問題等。

理想頻譜曲線(藍色線)與實際通量頻譜曲線(紅色線)的比率可稱為校正因子 $nC(n)/\overline{w'x'}$ 。該校正因子可用來修正特定氣體通量在量測特定條件以及時間內的非理想頻譜的資料。可透過資料頻譜分析確認是否能觀測到所有尺度的渦流，並從中檢視儀器採樣頻率以及平均時距是否足夠，可做為檢查儀器觀測性能的有效指標。相關的傅立葉校正計算可透過 EddyPro 通量運算工具來檢視(Burba, 2021)。

儘管現代通量工具將計算應用，皆已包含部分頻譜校正分析功能，如為了對特定地點，並確保所觀測到的特定頻譜資料看起來合理。可計算多日中午或白天區間的資料，進行平均每小時頻譜分析，來作為頻譜分析系統的參考指標。這些頻譜分析結果可以與卡莫(Kaimal)頻譜模型或感熱通量進行比較。

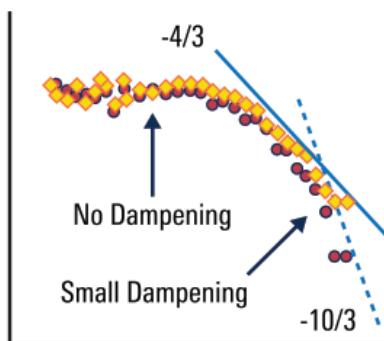


資料來源: Burba (2022)

圖 5-9 資料頻譜分析示意圖

上圖 5-10 左上角的描述了白天時段個別每小時可感熱通量 $w'T$ 的共頻譜(彩

色菱形標記)，以及平均共頻譜(黃色較大菱形標記)，該圖的最左部分描述了來自低頻率的通量貢獻(0.001 – 0.01 Hz；較大且緩慢渦流)。圖的右部分甲烷通量，描述了來自高頻率(1.0 – 10 Hz；較少且快速渦流)的通量貢獻。共頻譜分析可以用來衡量理想情況下在特定地點的頻率影響表現狀況。經過共頻譜資料處理後，圖 5-11 可以發此範例甲烷開放式分析儀在高頻率處會些微頻率衰減情況(slope:-10/3)，理想的共頻譜斜率為(slope:-4/3)。



資料來源: Burba (2022)

圖 5- 10 理想共頻譜分析與頻譜衰減示意圖

5.12 資料補遺

連續的渦流相關法進行長時間觀測，勢必遭逢因大氣紊流環境因素等條件變化導致資料缺漏、品質不佳必須剔除致使資料不完整。為了獲得完整的資料，必須尋求一套解決、補遺的方法。雖然歐洲綜合碳觀測系統(ICOS)測站建議採標準化方式進行資料補遺，但實際仍尚無採用一致性的方式進行資料補遺，主要因為季節差異、測站的差異性以及不同的環境驅動因子和排放模式的複雜性，因此難以以固定一種方式在各測站中實施(Nemitz et al., 2018)。

相關方法包含過濾取徑(filtering approach)，該方法主要是先建立合理的資料篩選標準，篩選完後以品質最佳的資料作為描繪生態系二氧化碳通量的代表。並將此資料與當時對應的環境因子(溫度、光合作用有效輻射等)建立關係模式。之前缺漏的資料或是剔除的資料即透過該關係模式進行推估，然後取代補遺缺漏的

資料(Baldocchi et al., 2001; 吳致甄, 2009)。較短的資料缺漏可透過線性插值(linear interpolation)的方式來填補資料，或是利用每周的資料為區間(weekly time window)採移動平均(running average)的方式進行填補(Nemitz et al., 2018)。

5.13 隨機通量監測誤差

透過渦流相關法監測需進一步檢視相關觀測要點，包含氣體分析儀的監測極限，該監測極限並非實驗室條件下最靈敏的分析性能，而是現地實際監測情況。因此須進一步檢視通量觀測誤差，以及相關文獻資料比對其他生態類型或陸域GHGs 收支的相對貢獻以及相關性。隨機通量觀測誤差(random flux error)可透過通量的監測極限以及現地儀器的雜訊來計算(Eq.13)。

$$RE = \sqrt{\frac{(\sigma_c^{noise})^2 \sigma_w^2}{N}} \quad (13)$$

σ_c^{noise} :儀器的雜訊資料

σ_w :垂直風速的標準偏差

N: 30 分鐘時距為基準的 10Hz 資料數量

6.参考文献

- Andersson, M., Klintberg, L., Hjort, K., 2011. MOLECULAR SIEVE CO₂ AND H₂O SCRUBBING SOLUTION.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., 2001. FLUXNET : A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide , Water Vapor , and Energy Flux Densities 0477.
[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415)
- Burba, G., 2022. Eddy Covariance Method. <https://doi.org/10.1109/INEC.2010.5424536>
- Burba, G., 2021. Eddy Covariance Method for Scientific, Regulatory, and Commercial Applications, LI-COR Biosciences.
- Burba, G., 2013. Eddy Covariance Method-for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications, LI-COR Biosciences.
- Foken, T., 2006a. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory. Boundary-Layer Meteorol. 119, 431 – 447. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9048-6>
- Foken, T., 2006b. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory. Boundary-Layer Meteorol. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9048-6>
- Foken, T., Wichura, B., 1996a. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric. For. Meteorol. 78, 83 – 105. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02248-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02248-1)
- Foken, T., Wichura, B., 1996b. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, Agricultural and Forest Meteorology.
- ICOS, 2024. INSTRUCTIONS FOR TURBULENT FLUX MEASUREMENTS OF CO₂, ENERGY AND MOMENTUM.
- Inc., A.R., 2022. Compact Single Trace Gas Monitor Hardware User Manual.

- J C Kaimal, J.J.F., 1994. Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurement. *Boundary-Layer Meteorol.* 72, 213 – 214.
<https://doi.org/10.1007/bf00712396>
- Jhang, S.R., Chen, Y.Y., Shiao, Y.J., Lee, C.W., Chen, W.N., Chang, C.C., Chiang, C.F., Guo, H.Y., Wang, P.K., Chou, C.C.K., 2022. Denitrifiers and Nitrous Oxide Emissions from a Subtropical Vegetable Cropland. *ACS Earth Sp. Chem.* 6, 2024 – 2031. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.2c00106>
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y., Coté, O.R., 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 98, 563 – 589.
<https://doi.org/10.1002/qj.49709841707>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci. Model Dev.* 8, 3695 – 3713. <https://doi.org/10.5194/GMD-8-3695-2015>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2004. A simple parameterisation for flux footprint predictions. *Boundary-Layer Meteorol.* 112, 503 – 523.
<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000030653.71031.96>
- Lee, X., Massman, W., Law, B., 2005. Handbook of Micrometeorology: A guide for Surface Flux Measurement and Analysis.
- Metzger, R.J., Klein, O.D., Martin, G.R., Krasnow, M.A., 2008. The Branching Program of Mouse Lung Development. *Nature* 453, 745 – 750.
<https://doi.org/10.1038/nature07005>
- Monin, a S., Yaglom, a M., 1973. Statistical fluid mechanics. MIT Press 1.
- Moore, C.J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorol.* 37, 17 – 35. <https://doi.org/10.1007/BF00122754>

Nemitz, E., Mammarella, I., Ibrom, A., Aurela, M., Burba, G.G., Dengel, S., Gielen, B., Grelle, A., Heinesch, B., Herbst, M., Hörtnagl, L., Klemedtsson, L., Lindroth, A., Lohila, A., McDermitt, D.K., Meier, P., Merbold, L., Nelson, D., Nicolini, G., Nilsson, M.B., Peltola, O., Rinne, J., Zahniser, M., 2018. Standardisation of eddy-covariance flux measurements of methane and nitrous oxide. *Int. Agrophysics* 32, 517 – 549. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0042>

Oncley, S.P., Friehe, C.A., Larue, J.C., Businger, J.A., Itsweire, E.C., Chang, S.S., 1996. Surface-Layer Fluxes, Profiles, and Turbulence Measurements over Uniform Terrain under Near-Neutral Conditions. *J. Atmos. Sci.* 53, 1029 – 1044.

Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D., 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences* 3, 571 – 583. <https://doi.org/10.5194/bg-3-571-2006>

Rebmann, C., Aubinet, M., Schmid, H., Arriga, N., Aurela, M., Burba, G., Clement, R., DeLigne, A., Fratini, G., Gielen, B., Grace, J., Graf, A., Gross, P., Haapanala, S., Herbst, M., Hörtnagl, L., Ibrom, A., Joly, L., Kljun, N., Kolle, O., Kowalski, A., Lindroth, A., Loustau, D., Mammarella, I., Mauder, M., Merbold, L., Metzger, S., Mölder, M., Montagnani, L., Papale, D., Pavelka, M., Peichl, M., Roland, M., Serrano-Ortiz, P., Siebicke, L., Steinbrecher, R., Tuovinen, J.P., Vesala, T., Wohlfahrt, G., Franz, D., 2018. ICOS eddy covariance flux-station site setup: A review. *Int. Agrophysics* 32, 471 – 494. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0044>

Reynolds, O., 1894. IV. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Proc. R. Soc. London* 10.

Schuepp, P.H., Leclerc, M.Y., MacPherson, J.I., Desjardins, R.L., 1990. Footprint

prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation.

Boundary-Layer Meteorol. 1990 501 50, 355 – 373.

<https://doi.org/10.1007/BF00120530>

Stull, R.B., 1988. An introduction to boundary layer meteorology. An Introd. to Bound. layer Meteorol. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>

Wilson, K., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., 2002. DigitalCommons @ University of Nebraska - Lincoln Energy Balance Closure at FLUXNET Sites. Agric. For. Meteorol. 223 – 243.

Wyngaard, J.C., Coté, O.R., Rao, K.S., 1975. Modeling the Atmospheric Boundary Layer. Adv. Geophys. 18, 193 – 211. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60461-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60461-6)
ychenatsinca, 2022. ychenatsinca/CSSAGRI_EDDY: R scripts for analysising the EC fluxes. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6474717>

吳致甄, 2009. 棲蘭山通量站二氣化碳通量資料補遺方法之比較. 國立東華大學.
林繼于, 2010. 涡流相關法的最適平均週期參數 -以棲蘭山台灣扁柏森林樣區為
例. 國立東華大學.

袁一夫, 2008. 應用通量變異法與渦流相關法推估地表通量. 國立中央大學.
鄭丞孝, 2013. 索流協變系統之全年度水稻田甲烷通量觀測及模擬. 國立中興大
學.

魏谷州, 2007. 地表通量觀測與分析. 國立中央大學.

附錄

附表 1 中英文名詞對照表

英文(縮寫)	中文
AmeriFlux	美洲通量觀測網絡
Analog-to-digital converter	A/D 轉化器
Atmospheric boundary layer (ABL)	大氣邊界層
Carbon dioxide (CO ₂)	二氧化碳
Closed-Path	閉路式
Constant flux layer	固定通量層
Cospectral analysis	資料頻譜分析
Cross correlation	兩變量交叉相關
Cumulative normalized contribution to flux (CNF)	標準化通量貢獻
Double rotation	座標軸旋轉
Eddy covariance method (EC)	渦流相關法
FluxNet	全球通量觀測網絡
Fourier transform	傅立葉轉換
Friction velocity	摩擦速度
Greenhouse gases (GHGs)	溫室氣體
Hydrofluorocarbons (HFCs)	氫氟碳化物
ICOS atmosphere thematic centre (ICOS ATC)	ICOS 大氣測站中心
ICOS ecosystem thematic centre (ICOS ETC)	ICOS 生態測站中心
Instrument malfunction	儀器故障
Integral turbulence characteristics	交叉相似度分析
Integrated carbon observation system (ICOS)	歐洲綜合碳觀測系統

Laminar flow	層流
Laser control status	雷射控制狀態
Leeward	背風
Windward	迎風
linear interpolation	線性插值
Litter per minute(LPM)	每分鐘多少公升
Methane(CH ₄)	甲烷
Mixing layer	混合層
Near-neutral conditions	接近中性的條件
Nitrogen trifluoride (NF ₃)	三氟化氮
Nitrous oxide(N ₂ O)	氧化亞氮
Open farmland	開放式農地場域
Open-Path	開放式
OzFlux	澳洲、紐西蘭通量觀測網絡
Perfluorinated compounds (PFCs)	全氟碳化物
Random flux error	隨機通量觀測誤差
Received signal strength indicator (RSSI)	訊號強度
Reynolds number (Re)	雷諾數
Roughness Sublayer	粗糙層
running average	移動平均
Sonic anemometer	聲波風速計
SPAN	跨距
Stationarity test	穩定性測試
Sulfur hexafluoride (SF ₆)	六氟化硫

Tunable infrared laser direct absorption spectroscopy (TILDAS)	可調諧二極體雷射吸收光譜儀
Turbulent flow	紊流
Webb-Pearman-Leuning correction method (WPL)	WPL 校正方法

統一編號 NERA024113034

- * 「本報告係受託單位或計畫主持人個人之意見，僅供本院施政之參考，不代表本院立場」。
- * 「本報告之著作財產權屬（國家環境研究院）所有，非經（國家環境研究院）同意，任何人均不得重製、仿製或其他之侵害」