

農田溫室氣體 量測與計算方法簡介

文／圖 ■ 許龍欣

前言

近年各國極端天氣事件頻繁發生，顯示氣候變遷已成為國際間不可忽視的急迫性問題。聯合國政府間氣候變遷委員會於2022年公布第六次評估報告 (IPCC AR6) 指出，人類的工業活動、能源、運輸及土地利用型態改變等，使大量溫室氣體排放到大氣中，加速全球暖化，是造成氣候變遷之主因。

聯合國氣候變遷大會 (UNFCCC COP26) 呼籲各國應採取迫切行動，將全球溫室氣體排放量在2030年前減半，並於2050年達到淨零，方可將全球升溫控制在1.5°C以內，以減緩全球氣候高風險之衝擊。目前超過130個國家已宣示於2050年達成淨零排放目標，不僅順應國際潮流也是承擔地球公民責任，臺灣亦於2021年宣示2050淨零排放承諾。

淨零排放並非完全不排放溫室氣體，而是致力於降低人為排放量，同時發展負碳技術並增加森林、海洋、土壤碳匯。臺灣農業淨零以「減量」、「增匯」、「循環」、「綠趨勢」4大主軸進行，其中減量策略之

首要步驟，需先盤點現行各項農業溫室氣體排放源，並具體量化慣行模式與減排操作的排放數據，才能據以規劃減排策略及評估減排量能與成效。農作物生產過程中，二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 與氧化亞氮 (N₂O) 是農田主要排放的溫室氣體，作物栽培過程中既固碳也排碳，二氧化碳淨排放量來自於光合作用固碳、呼吸作用及殘株分解排放之差值，而甲烷排放主要來自水稻栽培，氧化亞氮排放則為土壤肥料施用的氮揮失、淋洗及逕流等造成。不同作物、不同地區的土壤環境變異、栽培管理模式差異也會造成溫室氣體排放量變動。

本文將介紹主要農地溫室氣體現地監測方法、常見的溫室氣體估算模型及國家氣體清冊指南方法。精確的溫室氣體現地量測數據是排放通量估算的基礎，根據不同場域建立適合的量測方法、蒐集具有代表性的數據，才能掌握各種農業栽培情境的溫室氣體排放情形。

密閉罩法

密閉罩法主要有手動密閉罩和自動密閉罩兩種方式，原理為利用封閉箱體罩住土壤

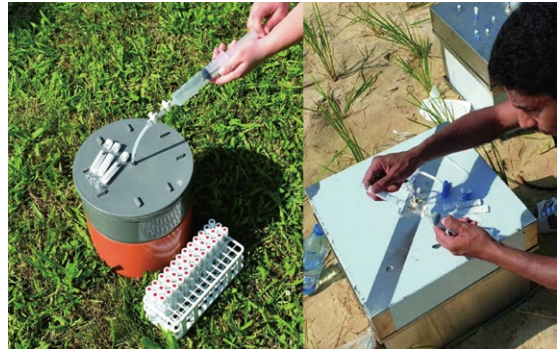


圖一、靜置箱法抽取水田氣體樣品



圖二、靜置箱法搭配痕量氣體分析儀即時分析氣體通量

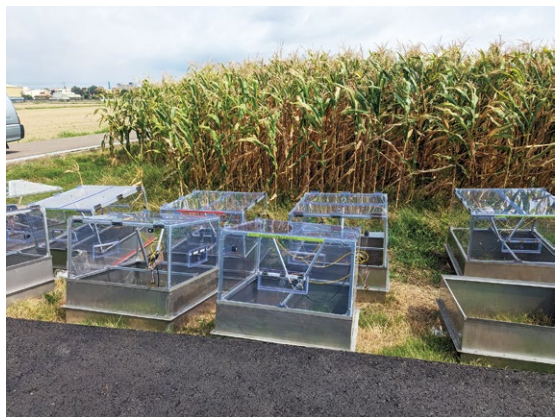
表面形成密封空間，每隔一段時間從密罩內抽取土壤或植株產生的氣體樣品，再使用氣象層析儀 (GC) 分析氣體濃度 (圖一、圖三)，或搭配攜帶式痕量氣體分析儀 (圖二) 現地直接量測氣體通量，計算出這段時間內的密罩內氣體濃度變化速率，來推算目標氣體的排放通量。手動密閉罩法的優點為可利用不同材質，配合不同作物場域設計適合蒐集氣體的密閉罩形狀與尺寸，設置簡單易行、經費合理、容易配合試驗需求設置重複測量、適用於不同土壤類型和環境條件下的量測，且單次蒐集之氣體樣品可由GC同時測定二氧化碳、甲烷與氧化亞氮3種溫室氣體，因此



圖三、旱田手動靜置箱田間監測 (圖引用自Zaman, et al. (2021). Methodology for measuring greenhouse gas emissions from agricultural soils using non-isotopic techniques. *Measuring Emission of Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options using Nuclear and Related Techniques: Applications of Nuclear Techniques for GHGs*, 11-108.)

密閉罩法為最普遍使用的氣體監測方式。然而，於田間設置密閉罩可能使土壤微環境及作物生長受影響，封閉箱體的測量期間，箱內的光照及溫度皆與實際開放的土壤環境有所差異，可能導致測量結果受到干擾。此外手動密閉罩法最大缺點為無法進行連續長期監測，田區整體排放通量估算受到取樣時間及取樣頻率影響，需定期多次量測以達到足夠的監測密度來提升數據代表性，因此採用手動密閉罩法需要投入的測量人力與時間較高。

自動密閉罩法 (圖四) 可連接電力及配備痕量氣體分析儀，由於密罩可設定定時開合，於密罩關閉期間直接取樣分析氣體濃度變化，因此自動密閉罩法可進行長期連續監測、且無須投入人力密集量測，但自動密閉罩之設置及維護成本、痕量氣體分析儀成本較高，考量有限成本下，可能無法於田間設置太多自動密閉罩的樣點重複。

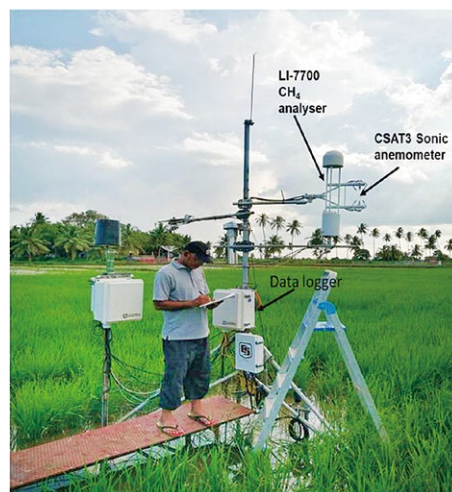


圖四、自動靜置箱連續監測

以最廣泛運用的手動密閉罩而言，應用於不同作物田區需搭配不同的密罩設計，旱田作物如玉米、大豆田區土壤排放溫室氣體主要為氧化亞氮，其排放來自土壤，因此密罩僅需覆蓋住土壤即可。然而水稻田排放溫室氣體包含甲烷及氧化亞氮，且水田土壤產生的甲烷90%藉由水稻植株的通氣組織排放到空氣中，因此以密罩法監測水稻溫室氣體排放時，密罩設計須配合水稻不同生育時期的植株大小、監測時密罩需同時涵蓋植株與土壤（圖一、圖三）。根據日本農研機構編著的《手動密閉罩法量測水稻甲烷及氧化亞氮排放指南》中建議，一日內以上午時段取樣的田間氣體濃度最具日通量代表性。密閉罩法同時也是IPCC國家溫室氣體清冊-水稻甲烷排放係數建立的建議方法，若以建立甲烷排放係數為目標時，每周至少需進行兩次以上的取樣監測頻率，且監測時間應覆蓋整個水稻生長季，若以監測氧化亞氮為目標時，取樣監測頻率應包含完整年度內的生育期間及休耕期間。

微氣象法-渦流協方差

相對於密閉罩法為「點」的片段量測，微氣象法以渦流協方差 (Eddy covariance, EC) 為理論基礎，於現地設置通量塔進行較大區域「面」的連續觀測，每組通量塔包含風向風速計、開放式痕量氣體分析儀，並搭配微氣候(溫度、輻射)等氣象觀測數據進行數值校正比對(圖五)。優點為可獲得長期連續監測數據、易於評估氣體排放的晝夜變化及季節性變化、可進行大面積之氣體通量監測、耗費人力較少。缺點為儀器造價格昂貴、維護不易，目標植被或作物高度越高，則所需監測範圍面積越大，渦流協方差之理想監測圓面積之直徑至少需為監測高度的100倍(例：監測1公尺高度則需100公尺×100公尺之水平面積)，且範圍內作物需均勻覆蓋，以臺灣農地規模細碎多樣化



圖五、微氣象法-渦流協方差通量塔田間設置(圖引用自Rahman, M. M., *et al.* (2020). Methane cycling in paddy field: a global warming Issue. In *Agrometeorology* (p. 21). IntechOpen.)

而言，微氣象法的農業應用情境較受限，此外，受限於目前開放式甲烷分析儀及開放式氧化亞氮分析儀仍較為稀少且昂貴，微氣象法目前以各類生態場域的二氧化碳通量監測為主，觀測特定生態系統內的碳收支變化。

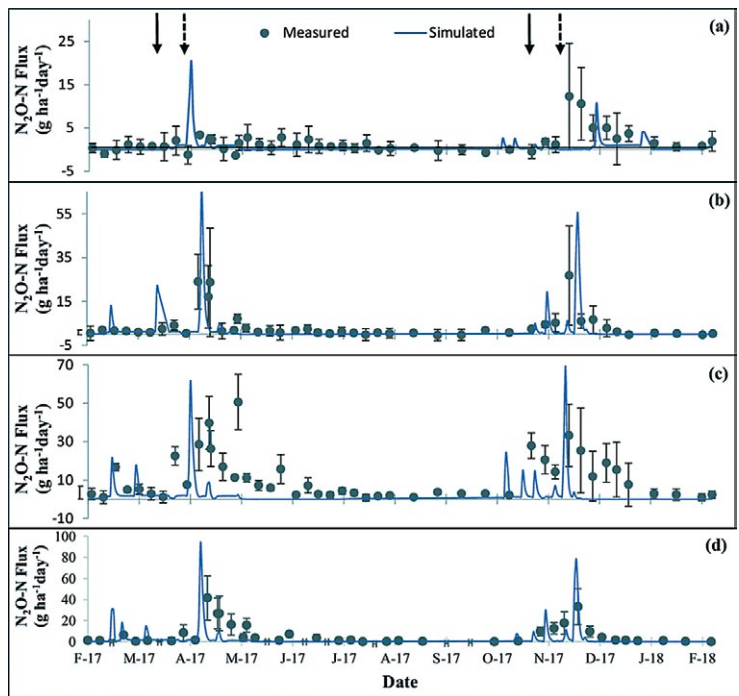
模型估算法

常見的農業溫室氣體估算模型如DNDC、DayCent等，此類模型通常以土壤-植體-大氣中的碳氮循環機制為基礎，配合田間氣象因子、土壤條件、植被及栽培等條件輸入，結合土壤中的有機物質分解、硝化作用、氨揮發、二氧化碳產生(土壤微生物和根系呼吸)、植物氮吸收和植物生長等過程機轉，進行整體系統性的土壤-植體-大氣碳氮循環，並包含溫室氣體排放模擬等。

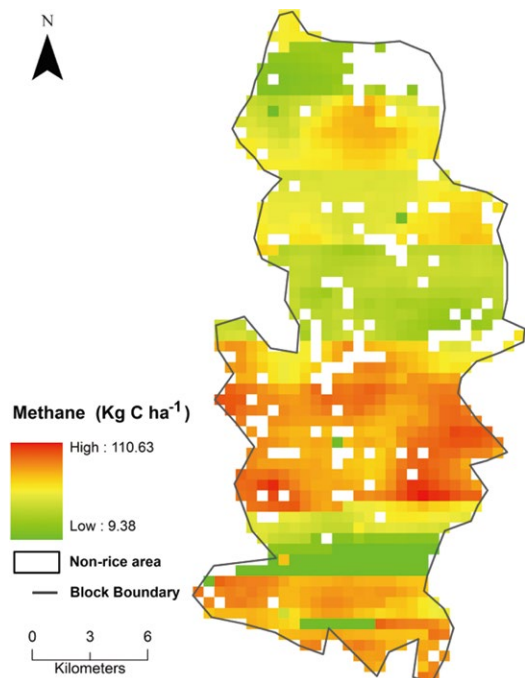
DNDC是目前最廣泛使用來模擬生物地球化學循環的模型之一，模型開發以來經過長期修改與完善，已衍生出適合不同作物別的農田生態系統、森林、濕地等陸域系統的碳氮動態變化模擬。DNDC模型所需的輸入參數包含氣象、土壤、植被及栽培管理，而模型預算後可輸出的結果包含土壤物理變化、土壤化學變化、植物生長及氣體排放等(表一)，模型的輸出結果可配合田間直接測量結果進行比對，以驗證模型效力的可靠性，經過驗證具有良好模擬預測的溫室氣體

表一、DNDC模型的輸入參數與輸出參數

輸入項目	重要參數
氣象參數	日最高溫、日最低溫、日輻量、日輻射量
土壤參數	土壤質地、容重、黏粒含量百分比、pH、總有機質含量
作物參數	作物種類、輪作或連作模式、種植日期、收穫日期、成熟積溫、植體碳氮含量
栽培管理	整地日期及整地深度；施肥日期、肥料種類及施肥深度；灌溉日期及灌溉水深
輸出項目	重要參數
土壤物理	逐日的土壤剖面溫度、濕度、pH值及Eh值、田區水分蒸發量
土壤化學	土壤有機碳庫、氮、NO ₃ ⁻ 含量、NH ₄ ⁺ 含量、有機質礦化速率
作物生長	作物每日生長量、植體各部位的生物量累積、氮積收量、水分吸收量
氣體排放	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O、N ₂ 、NH ₃ 的日排放通量



圖六、以DNDC預測結果搭配田間氣體實測數據進行驗證(引用自Macharia, J. M., et al.. Parameterization, calibration and validation of the DNDC model for carbon dioxide, nitrous oxide and maize crop performance estimation in East Africa. *Heliyon*, 7(5).)



圖七、以DNDC模擬印度東部水稻田甲烷排放情形分布(引用自 Tripathi, R., et al. (2021). Modelling the Spatial Variation of Methane and Nitrous Oxide Emission from Rice Fields Using DNDC Model. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 49, 2919-2931.)

估算模型(圖六),可同時考量多項環境及栽培參數、應用於不同栽培情境,進行多年度長期的溫室氣體排放推估;或可搭配氣象、土壤環境資料結合GIS數據或ENVI遙測影像等資料,提升為較廣域尺度或國家層級的農田溫室氣體排放估算效率(圖七)。

IPCC國家溫室氣體清冊指南

依循聯合國氣候變化綱要公約及京都議定書相關規範,各國每年需編定國家溫室氣體清冊報告,以量化各國溫室氣體排放情形。清冊內的各項排放數據估算須遵循IPCC國家溫室氣體清冊指南的建議方法(2006年及2019年修訂版)進行,以農業部門排放而言,與作物生產相關的排放源及排放氣體如表二,使用方法學如表三。

表二、國家溫室氣體排放清冊-農業部門排放源界定(畜牧除外)

排放源	範疇定義	排放氣體
3. C水稻種植	有機物在浸水的稻田中會因厭氧環境,被微生物分解而產生甲烷,產生之甲烷主要經由水稻植株擴散至大氣中。	甲烷
3. D農業土壤	農業活動,包括農地施用化學氮肥、有機氮肥、作物殘體的埋入或改變土地利用管理等,這些農業活動使氮素進入土壤,造成土壤有效性氮的增加、脫氮量增加,而造成氧化亞氮的直接與間接排放。	氧化亞氮
3. E草原焚燒	熱帶與亞熱帶地區之草原燃燒時所產生的非二氧化碳溫室氣體,包含一氧化碳、甲烷、氧化亞氮與氮氧化物,因我國農業鮮有此種經營管理模式且無相關統計資料,暫未估算。	無
3. F作物殘體燃燒	現地焚燒農作物殘體時所產生的非二氧化碳溫室氣體,包含一氧化碳、甲烷、氧化亞氮與氮氧化物。	甲烷、氧化亞氮
3. G石灰處理	於土壤中使用石灰的目的係以改善土壤酸鹼度,使土壤性質適於植物生長,而施用碳酸鹽類石灰,包括碳酸鈣(CaCO ₃)或白雲岩(CaMg(CO ₃) ₂)等,隨著碳酸鹽石灰溶解和釋放碳酸氫鹽(HCO ₃ ⁻),而轉變為二氧化碳和水,導致二氧化碳排放,因我國國內使用量少且缺乏確切統計資料,暫未估算。	無
3. H尿素施用	尿素施用於土壤後,其水解過程,使工業生產過程所固定的二氧化碳又再排放。	二氧化碳
3. I其他含碳肥料	IPCC並未對此項目進行定義或指導,我國國內使用量少且缺乏確切統計資料,暫未估算。	無

表三、國家溫室氣體排放清冊-農業部門使用方法學(畜牧除外)

排放源分類	範疇定義		排放氣體			
	方法學	排放係數	方法學	排放係數	方法學	排放係數
3. C水稻種植			T2	CS		
3. D農業土壤					T1	D
3. E草原焚燒			NE	NE	NE	NE
3. F作物殘體燃燒			T1	D	T1	D
3. G石灰處理	NE	NE				
3. H尿素施用	T1	D				
3. I其他含碳肥料	NE	NE	NE	NE	NE	NE
3. J其他	NO	NO	NO	NO	NO	NO

備註：T1 (IPCC Tier1), T2 (IPCC Tier2), T3 (IPCC Tier3), D (IPCC default), CS (country specific method/EF), NE (未調查估計該分類項目), NO (我國該分類項目無生產或使用, 如停產), 灰底 (指南未建議納入統計該氣體)。

依據不同農業氣體排放源, 適用不同層級 (Tier) 的計算方法, Tier 1及Tier 2基本計算方式為: 氣體排放量=排放係數x活動數據, 排放係數基於現地測量等結果推算出。例如臺灣的水稻甲烷排放以Tier 2方法進行, 其計算方式為:

$$CH_{4\text{水稻}} = \sum_{i,j,k} (EF_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \times t_{i,j,k} \times 10^{-6})$$

- ◆ $CH_{4\text{水稻}}$ =水稻種植每年產生的甲烷排放量, 千公噸/年
- ◆ $EF_{i,j,k}$ =在*i,j,k*條件下各區各期水稻田排放係數, 公斤/公頃/期
- ◆ $A_{i,j,k}$ =在*i,j,k*條件下各區各期水稻種植面積, 公頃/年
- ◆ $t_{i,j,k}$ =在*i,j,k*條件下各區各期水稻種植時間, 公頃/年
- ◆*i,j,k*=表示不同的生態系統、水分管理與有機添加物的種類與數量及其他排放因子

而臺灣目前所使用的稻田甲烷排放係數為各產區過往現地量測資料, 一期作甲烷排放係數介於22.5~95.3公斤/公頃; 二期作甲烷排放係數介於87.5~180.6公斤/公頃, 然而現行排放係數引用文獻為2009年以前調

查數據, 需根據現行栽培環境改變重測更新排放係數, 以符合現行排放趨勢。

此外有些國家發展符合當地環境運算模式為Tier 3之計算方式, 如日本以DNDC-rice模型進行稻田甲烷排放計算、美國以DayCent模型進行水稻甲烷及農耕土壤氧化亞氮之排放計算, 以提供全國範圍內農業排放的全面評估。這些清冊排放數據皆為碳政策制定與國際報告的重要基礎。

結語

淨零減碳已是國際共同趨勢, 為達成農業淨零目標, 選擇合適的農業現地量測方法建立排放數據, 是各種量化方法的首要步驟。此外配合經驗證之溫室氣體排放模型, 可建立不同栽培模式、單年度或多年度、單點或廣域之溫室氣體排放預測。綜合各種量測及計算方法, 為未來建置與推動符合可量化、可報告、可查驗 (MRV) 原則的碳管理與減量機制基礎。