

邁向淨零農業—碳排係數之研究

撰文 | 臺中區農業改良場 廖崇億、吳以健、李昱錡

碳排放計算

淨零碳排是減緩全球暖化的重要議題，如何進行減碳和達到淨零目標，必須要先了解碳排來源與碳排放量，碳排放量可藉由直接量測或計算取得。雖然直接量測碳排最為直觀與精準，但因直接量測溫室氣體常有設備昂貴、需要長期調查、目標物無法全面性進行定量或量測無法追溯等問題，基於成本與時間考量，碳排放量更常透過「計算取得」；而計算碳排的憑據，通常有較長留存性，只要有依據資料，通常就可追溯。碳排放係數計算方式包含「質量平衡」與「排放係數」2種類型，質量平衡計算方式主要依據化學反應前後的質量，據「質量守恆定率」進行計算，常適用於工業生產或能源碳排，因為此類過程多處於可監測和受控的環境，物質的投入、產出、洩漏或廢棄通常容易被確認，數值誤差較低；但環境碳排不同，會受到各種周遭環境因子影響，如氣候、土壤、栽培管理習慣、地形……等，此外有些碳排放難以逐一定量，所以透過廣泛研究調查取得代表性排放係數值或彙整後以單位平均量值表示，以



利各種情境計算，屬「排放係數」類型。

碳排放的計算方法需有對應的依據，依照碳盤查目標不同，碳排放有不同的界定範圍與盤查項目。以產品而言，一般依據ISO 14067規範，即常見的碳足跡計算，由產品的生命周期進行評估，計算「搖籃」到「墳墓」的碳排放量，即產品由原料到廢棄過程所產生的碳排放；而企業組織層級的碳排放，則是依據ISO 14064進行計算，其邊界可為實體亦可為投資範圍邊界，在碳盤查計算上，有個常用口訣：「邊、源、算、報、查」，也就是「確定盤查邊界」、「找出排放源」、「排放量計算」、

「製作盤查報告」、「結果查證」，包括從匡列計算範圍到內外部的查證稽核；在國家或區域上，一般依循聯合國政府間氣候變遷組織（IPCC）所編撰的「溫室氣體排放計算指南」，計算範圍內指定活動產生的碳排放。

溫室氣體不限於二氧化碳，尚有許多種類溫室氣體，如甲烷、氧化亞氮、氫氟氯碳化物類、全氟碳化物及六氟化硫等，因此同一種活動數據還可能有不同的溫室氣體產出，為了統一標示，會再乘以暖化潛勢（GWP），將該溫室氣體排放轉化為相對二氧化碳造成之暖化效應倍數，目前多以最新的IPCC第六次評估報告（AR6）所提出的GWP為依據，二氧化碳：甲烷：氧化亞氮百年影響GWP比值為1：27.9：273，如果一碳排源產生了多種溫室氣體，就會將個別產生

的溫室氣體乘以對應之GWP變成二氧化碳當量（CO₂e）後，再進行加總，即可表示總碳排放量。

不管進行何種類型的盤查，使用計算取得之碳排量最基本架構都為「活動數據」乘以「碳排係數」，例如常見的用電碳排計算方法：

$$\begin{aligned} & \text{用電度數 (kwh)} \times \text{電力碳排放係數} \\ & \quad (\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kwh}) \\ & = \text{用電碳排放量 (kgCO}_2\text{e}) \end{aligned}$$

此外，依情境不同，「活動數據」與「碳排係數」可再以更複雜方式組成，例如：估計某電器的碳排放量，則碳排放計算構成為：

$$\begin{aligned} & \text{設備平均功率 (kw)} \times \text{使用時數 (h)} \\ & \times \text{電力碳排放係數 (kgCO}_2\text{e}/\text{kwh}) \\ & = \text{用電碳排放量 (kgCO}_2\text{e}) \end{aligned}$$



農地碳排研究調查是淨零的第一步。

由碳排放計算的簡易計算式可知，減碳的推動，有兩個關鍵要點，即活動數據與碳排係數。

活動數據的統計與變化

活動數據來源需有憑有據，對於組織碳盤查計算，常見的活動數據憑證有交易單據或購買證明等，如水電費、加油單據與料源的購入等；對於國家清冊，活動數據通常使用國家各種統計資料或研究調查，以農業部門為例，活動數據來源包含各種農業統計資料：農作物生產量、各種作物生產面積、畜牧生產頭隻數與各種農業資材用量等。畜牧碳排計算主要活動數據為家禽畜飼養頭數、水稻種植產生的甲烷主要依據為種植面積、土壤氧化亞氮排放主要為肥料用量、作物殘體燃燒碳排為稻稈燃燒量等。長期以來，從農委會到現在的農業部，農業統計上都維持長期詳細的紀錄，可作為減排策略擬定或碳排計算的精進上的重要依據。

以水稻田的甲烷排放計算為例，目前國內清冊計算方法是依據地區、期作建立不同的甲烷排放係數：

$$\text{地區期作水稻甲烷排放量} = \text{地區期作水稻耕作面積} \times \text{地區期作水稻排放係數}$$

對於減排策略，雖最直觀的方法就是降低活動數據，例如目前推動的「稻作四選三」或「肥料實名制」等農糧政



收穫後稻稈移除亦可減少田間甲烷排放。

策，在降低水稻耕作面積與氮肥投入上都有一定成果。但實務上，不論農糧生產或工業生產，某些活動數據難以降低或歸零，特別是農業生產提供基本的糧食需求，是國家生存發展的基礎，對於農業生產者，如果減排的方法只減少活動數據，例如減少飼養畜牧頭數、減少肥料投入或減少水稻耕作面積等，將直接影響生產者的收入甚至造成糧食安全疑慮；所以單純改變活動數據，難以減排達到淨零，因此另一種減排策略就是改變碳排係數。

碳排係數的研究與變動

不改變活動數據下，如何降低碳排放總量？以能源為例，台灣電力公司每年都會公告最新的電力碳排放係數，在綠能及能源轉換政策推動下，電力碳排放係數自1996年的0.562公斤二氧化碳當量/度電，下降到2024年的0.474公斤

二氧化碳當量/度電。另一種方式，前述以設備功率計算能源碳排放方式，對應就是高效能與低功率的省電機具的補助政策推動。

家禽畜生產或水稻種植都是糧食生產必須，在維持一定活動數據下，那麼改變碳排係數亦是農業減排策略之一，相對活動數據的引用要有一定依據，碳排係數引用也要有一定依據。如前述，實際進行碳排放量測都需要花費相當成本與時間，所以很多碳排放係數建立都是由政府主導或學術研究單位建立，在嚴謹審認後，透過政府公告或學術文章發表提供各方引用。在較單純碳排係數變動上，以水稻甲烷碳排放係數為例，目前我國國家清冊依據僅地區與期作特性，共有16個數值，但僅由慣行灌溉管理方式所建立（不適用其他低碳灌溉

方式）；而日本則已依據土壤排水灌溉管理、稻稈處理、有機物添加與地區進行分類；IPCC方法一則是依據不同管理有不同的選擇係數，可計算各種水稻管理的碳排；本場近期研究調查則顯示間歇灌溉管理甲烷排放約為單次排水的1/3以下，但特定水稻品種產量有下降可能，稻稈移除與本土灌溉管理則相對單次排水有更顯著減排。由下表可知不同管理情境的水稻甲烷排放高低，水稻田減排策略就可依據不同需求，如推動灌溉管理調整或稻稈移除等來進行減排。

此外，日本國家清冊中，提到使用含有硝化抑制劑肥料，可減少26%氧化亞氮排放，在茶園中一般氮肥的氧化亞氮-氮排放比（kg-N₂O-N/kg-N）為2.9%，而使用含硝化抑制劑之氮肥排放

水稻不同管理甲烷排係數放比差異

稻稈處理	水分管理型態	IPCC 方法一 ¹	本土調查 ²	日本係數 ³
稻稈留存	持續淹灌	100%	-	100%
	單次排水（僅曬田和收穫前排水）	71%	100%	
	當地的間歇灌溉管理 ⁴	-	24%～58%	74%
	間歇灌溉（乾溼交替，AWD）	55%	12%～33%	-
稻稈移除	單次排水（僅曬田和收穫前排水）	21%	-	16%
	當地的間歇灌溉管理	-	2%～4%	5%
	間歇灌溉（乾溼交替，AWD）	16%	-	-

1. IPCC方法一：由多種選擇係數構成，簡式為「水田碳排係數=基本係數×灌溉管理係數×作前淹灌管理係數×有機添加係數」。稻稈留存量以7公噸計，並在作前30日內翻耕入土，其餘選用相同係數值進行計算。

2. 本土調查：基於臺中區農業改良場2023年二期至2024年二期調查初步調查結果。

3. 日本係數：以日本國家清冊之2021年北陸地區（Hokuriku）排水不良土地為代表。

4. 當地的間歇灌溉管理：臺灣與日本使用之水稻「間歇灌溉」管理類似，為前期淹灌，曬田後才以灌溉管理，與IPCC所指在插秧後間歇灌溉管理（或稱為乾溼交替管理，AWD）不同。

我國農業部門碳排放清冊計算依據活動數據與排放係數來源概要

主要計算項目	活動數據組成	IPCC之計算方法與係數分類
家禽畜腸胃道發酵	家禽畜頭隻數	方法一、方法三（預設係與本土調查係數值）
水稻種植	水稻耕作面積	方法二（本土調查係數數值）
農耕土壤	肥料用量	方法一（預設係數值）
作物殘體燃燒	稻稈焚燒量	方法一（預設係數值）
石灰資材使用	無統計資料未計算	-
尿素使用	尿素用量	方法一（質量平衡法）

比降低為2.1% ($= 2.9\% \times (1-0.26)$)，因此推動高利用效率的氮肥，就是土壤氧化亞氮減排策略之一；目前農業部正加強緩釋型肥料推動，未來配合緩釋肥料碳排係數建立，降低土壤碳排量統計值。環境碳排可能因年度、地區和環境氣候不同，有不同碳排，進而發展利用模式與地理資訊計算碳排，基本架構也是活動數據乘以排放係數，只是計算過程更複雜或係數種類更多。像日本水稻甲烷排放係數，每個年度有100多個係數值；在家禽畜飼養上，以紐西蘭為例，透過飼料配方改進調整與模式利用，可精算出不同年度家畜腸胃道發酵產生甲烷的排放係數值。

目前國內農業部門清冊計算，除了使用IPCC預設係數外，亦使用過去本土眾多研究人員的調查研究成果，IPCC預設係數雖也基於大量研究調查建立，但這些資料常基於歐美農業管理型態，與國內農業管理並不完全相符；為了精準計算國家碳排或表示地區發展

的減碳成果，許多國家都在發展與調查各自國家的農業環境碳排碳匯係數。為了達到淨零，更詳盡的活動數據統計或更精確的碳排係數都是必要的，如前述日本多樣化的水稻管理面積、特定作物的含硝化抑制劑肥料的使用或是紐西蘭不同年度的家畜碳排係數。

計算結果的品保、品管、驗證或查核

不只碳排可以透過計算進行，未來可作為抵銷碳排的碳匯量也可藉由計算取得，依據IPCC計算指南，目前國家清冊對於「土地利用變化」僅計算森林碳排碳匯部分，在整體土地利用的碳排碳匯尚未完整計算，所以近年農業部推動許多農地碳排及碳匯相關調查計畫，除了精進本土碳排係數準確性，也在分析一些管理技術是否有具體的減排或碳匯效果，期望建立各種減碳管理農耕的碳排係數，以進一步在國家清冊中具體展現國家碳排減量成果。另一方面，這

些係數更可作為國內農企業碳盤查、產品碳足跡和方法學應用，更準確計算碳排放量，並進一步推動減排以達到淨零。

在完成組織碳盤查或產品碳足跡之後，其結果是否正確合理，通常會透過第三方驗證單位來確認，包括是否正確計算與活動數據是否有憑據；而國家清冊亦透過專家會議審認相關數據與計算結果，對於國家或區域的碳排結果查證，為避免弊端發生，需要回歸實際調查，並將採大尺度的廣域調查，目前溫室氣體調查不僅可由地表的實際氣體量測進行，亦可由高空或外太空遙測進行調查，如同空氣污染一樣，當周圍無明顯污染物、溫室氣體排放時，未受控制的溫室氣體排放將成為明顯的排放熱點。國際上已有大氣溫室氣體或地表土地利用監測衛星在運作，但解析與調查頻率有限，難以精確調查臺灣較細微的

溫室氣體排放源；先前環境部、太空中心與中央大學進行合作，發展自有的溫室氣體監測衛星。未來，臺灣各種溫室氣體排放源將無所遁形，因此發展農業環境溫室氣體監測進行減排成果追蹤將有其必要。

淨零推動的願景

只要有產業存在，就會有活動數據；而碳排係數方面，雖可透過技術升級進行減排管理，降低的幅度仍有其極限，即減碳工作進行到最後，難以再降低時，就只能透過碳移除、碳捕捉或碳匯方式來抵銷碳排，這就是整個淨零推動的流程。

這種全球性的大氣調整行為並不容易，但已有先例，在過去1980～2010年間南北極的臭氧層破洞一直是全球性的重要環保議題，隨1987年通過的「蒙特婁議定書」，1990～2000年間全球性的氟氯碳化物的禁用與替代物質的推廣，目前地球極區的臭氧層已逐漸恢復，學者預估南極的臭氧層破洞在本世紀中期就會回復到1980年水平。相對氟氯碳化物的禁用到臭氧層破洞減緩，國際上耗費近半世紀來解決問題，淨零減碳牽涉更多經濟與技術層面，透過淨零減碳減緩氣候變遷，預期將會花費更久的時間，但不開始就不會改變，從研究中尋找方向，從政策與生活中推動減碳，一步一步進行，逐步達成淨零目標，進而減緩氣候變遷。



透過水分管理減少水稻田甲烷排放。