

# 全球暖化氣候變遷與 臺灣稻作栽培的碳足跡

作者：吳以健（臺灣大學農藝學系博士班研究生）

農業被稱作「看天吃飯」的產業，氣候是影響農業活動最重要的因子。然而，無論是全球或是臺灣，科學家觀察到近年的氣候，相較於更久以前，有顯著的變化趨勢，未來更將延續此變化。早在1992年聯合國已訂定「氣候變遷綱要公約」以探討人類與氣候系統間的交互影響，其定義氣候變遷為：人類活動諸如工業活動增加、砍伐森林、交通工具使用等，直接或間接改變大氣系統，進而造成的超過正常之變異。聯合國跨政府氣候變遷小組在2007年更證實了近100年人類排放過多的溫室氣體（如二氧化碳等）至大氣中，造成全球暖化，間接引發了南北極冰山融化、洋流改變、降雨變化等後果，進一步導致海平面上升、漁業衝擊、水災、旱災等嚴重後果。

科學家證實溫室效應的加劇是導致氣候變遷的元兇之一。何謂溫室效應？溫室效應是由所謂的溫室氣體如二氧化碳、甲烷、氧化亞氮等所導致，其中二氧化碳最主要來自生物的呼吸作用、化石燃料的使用、和林木的燃燒；甲烷則以畜牧業與水田為主要來源；氧化亞氮則是由工業活動與農業施肥所釋放。這些氣體在大氣中營造一個類似溫室的环境，也就是在太陽輻射進到地球之後，這些氣體吸收了原本應該散失出去外太空的熱量，造成地球氣溫的增加。然而社會大眾常認為「人類活動造成了溫室效應，進而導

作者：盧虎生（臺灣大學農藝學系教授）

電話：02-33664773

致全球暖化」，此觀念是須要修正的，事實是溫室效應本來就存在於地球系統，地球本身就具有這些溫室氣體，在這溫室效應之下，地球才得以保持目前適合人類生存的溫度，若無溫室效應，全球的平均氣溫將可能只有-18°C。而正確的觀念乃是：人類活動排放了過多的溫室氣體，大幅增加了大氣中的溫室氣體濃度，加強了溫室效應，導致全球暖化的發生。

農業屬於生物性的產業，生物的生長發育與環境息息相關，在栽培農作物的過程中，環境中不適合的溫度將影響到作物的生理活動。一般來說，亞熱帶作物的最適生長溫度大約20-25°C，最高生長溫度為40-50°C，高於最適溫度時，作物的生長發育將受到抑制或停止，而超過最高生長溫度之後，作物將承受嚴重的損壞甚至死亡。如此的升溫趨勢，將嚴重影響農作物的產量，以水稻為例，菲律賓國際水稻研究所指出：未來平均溫度每上升1°C，將可能較目前減少7%的稻穀產量。因此暖化的趨勢若不斷持續，未來對農業的衝擊將會與日俱增，特別是熱帶與亞熱帶地區更為明顯。這些地區平常的溫度已接近危害作物產量的邊緣，未來的暖化將使環境條件更加嚴格，再加上高溫引起病蟲害相的變化，間接衝擊了作物的生產。再者，這些地區的經濟活動多半仰賴農業生產，將使其農業生產與經濟狀況更陷入

困境。而臺灣位於亞熱帶，在國際組織的評估中屬於高風險的邊緣地區，極需要立時研究與提出因應的策略，以避免遭受氣候變遷的嚴重威脅。

為了因應目前以及未來的氣候變遷，擬定並執行相關對策是必要的。科學家針對氣候變遷提出三大方向的策略：1. 預測及預警；2. 調適；3. 減緩。「預測及預警」藉由氣候的歷史資料以及統計結果，並經由科學模式的分析，以預估氣候變遷的可能情況與產業衝擊。「調適」為調整產業內涵來適應氣候變遷的環境，以躲避或降低原本會帶來的衝擊。「減輕」則是試著發展對環境更為友善的經營方式，降低人類加劇氣候變遷的危害，以達到減輕氣候變遷威脅強度的目標。舉例來說，若以全球暖化為例，「預測及預警」是利用氣候預測模型，結合目前及未來可能的產業情境，提出未來可能升溫的範圍，並分析可能帶來的衝擊；「調適」像是研發及栽培耐熱品種、避開高溫時期、執行散熱措施等；「減緩」則是藉由不同的環

境親和方式，以降低溫室氣體的排放，進而減緩暖化的趨勢。此三策略中，「減緩」是最針對根源的方式，然而因為成效需要持續長期方能顯現出來，在過去常常被人們所忽略，直到近數十年環保意識的抬頭，才漸漸受到重視。

針對暖化的「減緩」方式相當多樣，然而在進行「減緩」策略之前，必須先對現行產業進行詳細調查，調查產業運作過程中，造成暖化之溫室氣體的總排放量，即所謂的「碳足跡」。「碳足跡」分為產業與產品二方面，產業方面，為該產業在運作單位時間之下，所造成之溫室氣體排放總量；產品方面，則是生產每一單位的該產品，平均會排放的溫室氣體總量。換言之，若以稻米生產為例，產業的碳足跡可以表示為單一栽培季的單位面積溫室氣體排放量；而產品的碳足跡應為單位重量的稻米生產過程中，所造成的溫室氣體排放。產業和產品的連結，則是單位面積的生產量，也就是說：單位面積的碳足跡，除以單位面積的產量，就是單位產

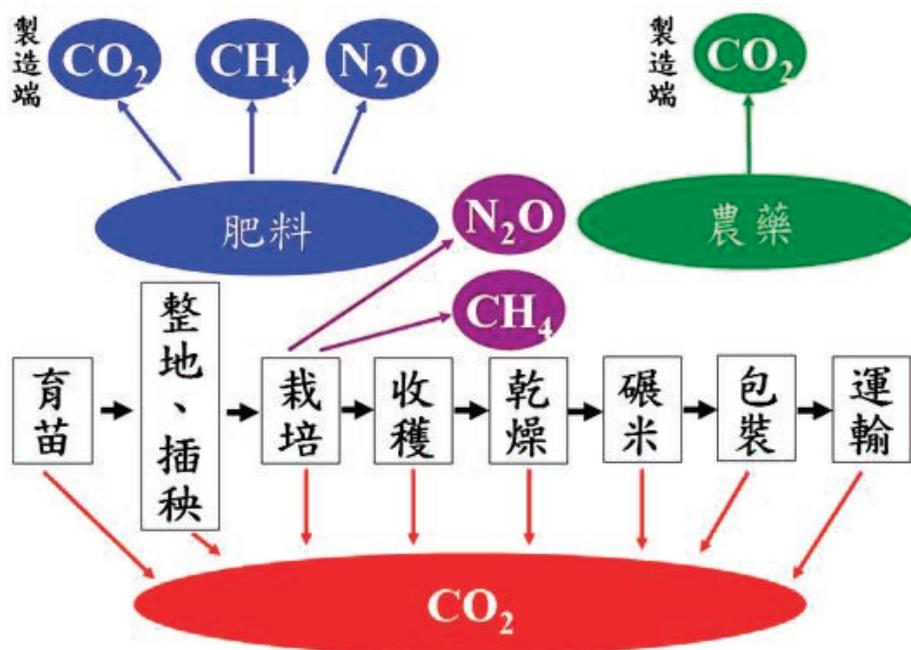


圖1. 稻米生產過程之各階段碳足跡來源示意圖

品的碳足跡。

目前現行的碳足跡分析，較為可靠的方式為「生命週期評估」，分析產品從原料取得，經由一連串生產過程，至後端的產品販售，最後則是產品的使用以及廢棄處理。簡單來說，就是「從搖籃到墳墓」的完整生命週期之範圍內，所造成的環境衝擊。評估的流程分為四大項：目標與範圍界定、盤查分析、衝擊評估、結果闡釋。先確定評估的目標及評估的範圍，接著對生命週期中的各種投入（原料、燃料、能源、消耗資材）以及各種產出（產品、廢氣、廢水）進行詳細盤查，並對投入資材其製造端亦進行詳細盤查，之後彙整所有過程的溫室氣體排放（包括投入資材製造端、產品製造過程、運輸過程、使用過程、廢棄物處理過程）。其次，依照各溫室氣體暖化效應的不同，進行標準化以統一形式呈現，簡單舉例來說，將二氧化碳的暖化效應定為1，則在相同質量之下，甲烷的暖化效應為23，氧化亞氮更高達310，所以，若一個產品的生命週期總計排放了100g的二氧化碳、15g的甲烷、0.6g的氧化亞氮，則本產品的碳足跡，就是 $100 + 15 \times 23 + 0.6 \times 310 = 631\text{g}$ 的二氧化碳當量，即相當於排放了631g的二氧化碳。由以上計算分析可以得知，除了二氧化碳，甲烷與氧化亞氮的暖化效應也不容忽視，而且在相同質量之下，甲烷與氧化亞氮的效應更是二氧化碳的數十甚至數百倍。然而，在臺灣，

農業活動排放的甲烷占全國排放的16%，其中僅僅水稻栽培就占了6.7%。再者，農業排放的氧化亞氮更高達全國排放的87%。如何降低農業生產過程對氣候以至生態環境的影響，是目前全球農業學者與環境學者最重要課題之一。

稻田占臺灣耕地面積超過50%，稱之為臺灣最重要農業活動一點也不為過，然而，稻米的生產過程中，也帶來相當大量的溫室氣體排放。如圖1，此為整個稻米生產過程的碳足跡分析示意圖，育苗過程的電力消耗、整地與插秧的機械燃料、施肥的燃料與肥料製造端、噴灑農藥的燃料與農藥製造端、收穫機械的燃料、乾燥加工與包裝的電力消耗、運輸車輛的燃料、田間栽培過程的排放等，都是碳足跡的貢獻者。經由筆者回顧文獻以及實際調查分析，發現排放最大宗的階段（也就是環境工程學上所謂的「熱點」），在於田間栽培階段的排放，其次為肥料製造端。田間栽培階段，會排放二氧化碳、甲烷、氧化亞氮，其中二氧化碳來自作物與土壤的呼吸作用，甲烷來自土壤中甲烷生成菌的釋放，氧化亞氮則是由施加氮肥以後，氮肥分解而產生。研究指出，田間栽培階段的碳足跡超過總碳足跡的50%以上。除了栽培階段，肥料的製造端同樣也貢獻大量的碳足跡，約占總碳足跡的20%。在水稻栽培時所施加的肥料最主要為氮肥，而氮肥製造過程中極為消耗能源，此製造時所排

放的碳足跡是肥料製造端之碳排放的主要貢獻因子。

由以上分析發現，稻米生產過程碳足跡的「熱點」在於水田排放以及肥料製造，針對此二方面進行生產方式的調整，應可有效改善溫室氣體之排放，達到「減緩」的目標。

針對此二「熱點」，筆者簡單歸納3個調整方向：

1. 妥善灌溉管理：水田排放方面，其中最大部份在於水田的甲烷。研究指出：水田在還原狀態時，也就是在湛水情況下，容易增加甲烷生成菌的活性，進而導致甲烷釋放的增加。因此，在不影響稻株正常生長的前提下，合理進行田間水分管理，例如在分蘖期進行間歇性灌水、分蘖後期確實執行晒田等，皆可有效降低甲烷的釋放，並可節省灌溉水的使用，此在水資源日趨珍貴的未來，亦提供助益。
2. 水旱田輪作：由上述可知，在湛水情況下，田間將釋放大量甲烷，而旱田的釋放將顯著少於水田。除此之外，研究指出：由於生育期溫度較高，二期作的甲烷排放高於一期作。因此，若可以在水稻產量較低的二期作時期轉作旱作如大豆、玉米或綠肥作物，

將可降低田間之甲烷排放。

3. 合理化施肥：前述提到氮肥的製造端產生了大量的碳足跡，因此如果減少氮肥的使用量，必可減少製造端的碳足跡。此外，學者指出：田間氧化亞氮的釋放與氮肥施用量成正比，也就是說若施加了過多的氮肥，不只流失到地下水域造成污染，亦會轉為溫室氣體而增加碳足跡。合理化施肥對於栽培成本的節省與作物病蟲害管理亦十分重要，因此是栽培調整上不可忽視的一環。

氣候變遷雖然對農業帶來相當大的威脅，但也給予我們重新思考的機會。如何面對全球日漸暖化、氣候越來越嚴苛的未來，提出預測、調適、減緩的良策，是農業學者最重要的課題。其中最為人注意的，莫過於溫室效應與碳足跡，未來「低碳」的農產品生產技術將是掌握國際競爭力的關鍵。目前國內外許多產品，已開始進行產品生命週期中碳足跡的調查以及產品包裝上碳足跡的標示，國內如黑松公司的產品已開始有碳足跡的標示。農產品方面，目前臺灣尚未有整體性的碳足跡調查分析，且在栽培上亦尚未有「減碳栽培」的概念及實施，值得農民及產業經營者多加投入心力，方能順應國際環境趨勢，達到產業及生態永續發展多贏的目標。