



水稻減碳生產技術策略

吳以健^{12*} 廖崇億² 鄧執庸² 李誠紘² 盧虎生³

摘要

水稻是臺灣最重要的糧食作物，其生命周期各階段會帶來溫室氣體排放，加劇氣候變遷與全球暖化。因此為抑制暖化朝 2050 年淨零碳排的目標進行，須先進行生命周期評估的碳排資訊建立，再依其中的「熱點」進行調整，以達到整體減碳。稻米生命周期的碳排熱點，在於田間栽培階段、加工碾米階段及運輸階段。田間栽培階段方面，可應用間歇灌溉、合理化施肥或肥料種類的選擇來降低甲烷與氧化亞氮排放；加工碾米階段，則可以採用稻殼混合烘乾技術來節能與減少二氧化碳；運輸階段，則可以在地生產或以大量運輸方式來減碳。總結以上，除了應用技術來減碳之外，仍應考量經濟層面的市場交易與社會層面的糧食分配，以達到最佳的減碳效益。

關鍵詞：水稻、生命周期評估、甲烷、氧化亞氮、間歇灌溉、合理化施肥

1 本文為第一作者博士論文之一部分。

2 農業部臺中區農業改良場。

3 國立臺灣大學農藝學系。

* 通訊作者 (wuyc@tcdares.gov.tw)



前言

氣候變遷與全球暖化是目前人類所面臨最重要的挑戰，諸多證據顯示 20 世紀後的全球暖化乃是由於工業革命後的大量化石燃料使用所排放的各種溫室氣體，加劇了固有的溫室效應，導致氣溫的升高，並引發各種異常氣候 (IPCC, 2022)。農業受到氣候變遷的影響是所有產業中最顯著者，然而農業也對氣候變遷的加劇有所貢獻，農業活動排放的溫室氣體如二氧化碳、甲烷與氧化亞氮正是加劇暖化的元兇。聯合國糧農組織 (Food and Agriculture Organization, FAO) 有鑑於此，早在 2010 年即定義氣候智慧型農業 (Climate Smart Agriculture, CSA)，主要目標為 1. 增加農業生產與收益；2. 建立農業對氣候變遷的適應力與彈性；3. 降低溫室氣體的排放及增加其吸存。而以「調適 (Adaptation)」與「減輕 (Mitigation)」二方向來進行 (FAO, 2010)，其中「減輕」即為藉由生產方式的調整，設法降低溫室氣體排放，以達到減緩暖化的效果。研究指出，必須在 2050 年全球達到溫室氣體的淨零排放，也就是排放與吸存量彼此平衡，才能使全球升溫抑制在 1.5°C 之下 (IPCC, 2022)，因此，各產業更須加緊腳步進行減碳策略的擬定，然而，減碳策略擬定之前，需要先瞭解現行產業的碳排資訊，也就是須先藉由「生命周期評估 (Life Cycle Assessment, LCA)」進行碳排資訊建立，再依其擬定相對應的減碳策略，諸如低碳栽培管理、運輸規畫、加工效率等，以期收事半功倍之效。本文將以稻米為例，說明水稻生產過程中的碳足跡、減碳栽培管理以及其他階段的減碳方式，作為未來稻米產業的重要參考。

生命周期評估與稻米生產的碳足跡

「生命周期評估」是環境工程學上評估環境衝擊的方式，依照 ISO 14040 的規範，生命周期評估係指產品從原料生產、加工、包裝、運輸，以至於後段的上架、販售、使用，以及最後的廢棄處理等所有過程 (即生命週期)，進行整個過程中對於環境的影響評估，評估面向包括資源使用、人類健康與生態的影響，再藉由定義、調查、評估與闡釋，將產品之生命過程對環境之影響得到詳細的分析 (ISO, 2006)，而其評估的衝擊種類



之一即為溫室效應潛勢 (Global Warming Potential, GWP)，或稱之為碳足跡，目前碳足跡的生命周期評估亦有國際標準規範明定於 ISO 14067。而生命周期評估的主要意義在於分析各產品的環境衝擊總量，以及依評估結果，篩選出影響此衝擊的關鍵步驟，或顯示出衝擊最顯著的階段(稱之為「熱點」)，進而依此修正關鍵步驟以達到環境親和的目標。

稻米的生命周期，從稻種準備、育苗、整地、灌溉、插秧、施肥、噴藥、收穫，以至乾燥、碾製、加工、包裝、運輸等，每個階段都造成各種環境衝擊，包括目前最為人重視的溫室氣體排放。例如，機械使用與投入資材的製造端耗用的能源如汽油、柴油、電力，而汽油、柴油或其他燃油在燃燒後，將排放溫室氣體之一的二氧化碳，貢獻碳排放。而水稻在農業生產中，溫室效應潛勢最嚴重的，來自湛水之下的田間土壤。土壤在湛水缺氧狀態下，還原態的土壤電位容易促使有機碳被甲烷生成菌進行無氧分解，產生甲烷，每單位質量貢獻 28 倍二氧化碳當量的溫室效應潛勢。此外，肥料製造的過程亦十分重要，化學肥製造時需要投入大量的能源，尤其是化學氮肥製造時需要高溫高壓環境進行哈柏法 (Smil, 2004)，研究指出化學氮肥的製造耗能就占全球總耗能的 1% (FAO, 2017)，這些能源在製造的過程，都會帶來二氧化碳的排放；而有機肥在製造過程的堆肥化步驟中，因堆肥化環境為有氧或無氧，會分別產生二氧化碳與甲烷，亦成為溫室氣體の間接排放源 (Maeda et al., 2013 ; Ge et al., 2016)。再者，田間溫室氣體排放，其單位質量溫室效應潛勢最高者為氧化亞氮，是 298 倍的二氧化碳當量。研究指出，農田產生的氧化亞氮來自土壤中未被作物吸收氮素的分解，但排放量則與施加氮肥的種類、施用量、施用時機、土壤含水量、微生物活性、土溫等因素有關。基於上述說明，水稻的碳足跡主要來自甲烷、氧化亞氮及二氧化碳的直接與間接排放，茲就此 3 種溫室氣體的減排可能策略進行論述。

田間甲烷減排

據統計，大氣甲烷的濃度正以每年 1 % 的速度上升中，甲烷主要由有機碳在缺氧環境下被甲烷生成菌 (methanogen) 分解所產生，因此主要來源為牛、羊等草食動物的腸胃排放及農田土壤釋放，而二者都和農業操作的方式與細節有關。甲烷生成菌在缺氧的環



境，也就是土壤氧化還原電位低的時候，具有良好的活性，並大量將有機碳轉變為甲烷釋放，也就是「湛水缺氧」與「土壤有機碳」是影響甲烷排放最重要的因子，研究指出，水田湛水的深度、時間長短、水稻品種都會影響甲烷釋放量 (Kesheng and Zhen, 1997；Aulakh et al., 2001)，甚至有機栽培常用的稻鴨共生法，因鴨子在田間游動使得田水溶氧增加，間接降低甲烷生成 (Huang et al., 2005)；然而有機農法施用的有機肥含有大量有機碳，在水田轉為大量甲烷生成 (Vibol and Towprayoon, 2010)。

由於甲烷排放源主要在田間，品種、灌溉、施肥等皆扮演重要角色，早在20年以前，已有學者提出栽培不同水稻品種的田間甲烷排放量具有差異 (Shao and Li, 1997)，近年栽培品種同樣具有差異性 (Riya et al., 2012)，品種造成甲烷排放量差異的原因在於稻株的形態，包括根系活性、根系多寡、莖葉多寡、根部通氣組織大小 (曹等, 2005；葛, 2016)，因此可以推測，根系吸水力、通氣組織、莖葉多寡等皆相關於稻株吸水與蒸散效率，效率越高者，甲烷排放量越大，也由於吸水蒸散效率相關於根、莖、葉及整體植株生理，因此無法單就地上部株型作為品種篩選的依據 (Zhang et al., 2015)，育種上的挑戰較為複雜。灌溉方面，水稻為水田式栽培，為抑制雜草，常執行深水灌溉，但深水灌溉之土壤缺氧狀態導致甲烷產生，故若適當應用間歇灌溉，即湛水後讓田水自然消退，待水位降至土面無水再進行灌溉，提高土壤氧氣含量，將有效降低甲烷的生成 (黃等, 2000；Cabangon et al., 2002；Islam et al., 2018；Rahman et al., 2019)，且在最高分蘖期與成熟期進行間歇灌溉，效果更加顯著 (Yagi et al., 1997)，此外，間歇灌溉亦具有降低水資源耗用、能源耗用、優養化潛勢等優點 (Gathorne-Hardy et al., 2016)，間歇灌溉的減碳效益，近年已在國際稻米研究中心 (IRRI)、泰國、孟加拉的研究中證實 (表 1)，在有機栽培之下甚至可減降 60 % 的 GWP (Maneepitak et al., 2019；Islam et al., 2020)。然而，過度進行間歇灌溉，將由於降低最終稻穀產量，而甲烷排放未呈現持續減量，導致環境效益反而降低 (Fertitta-Roberts et al., 2019)。另一方面，許多有機水稻栽培會在田水種植滿江紅 (Azolla 屬浮水植物)，作為覆蓋作物及生物性肥料，滿江紅可藉由在田水中釋放氧氣的方式，間接降低田間甲烷排放 (Bharati et al., 2000；Ali et al., 2015)。施肥方面，一般來說，化學肥的有機質含量較低，較少有機碳的投入，將減少生成甲烷的原料，進而降低其生成排放，然而，有機肥的種類繁多，包括植物性堆肥、動物糞便堆肥、沼渣肥、



綠肥、作物殘體等，不同的有機肥將有不同的甲烷的排放影響 (劉等, 1999; Bacenetti et al., 2016; Fusi et al., 2017), 施用完全腐熟的堆肥較新鮮有機質 (作物殘體、綠肥) 有較低的甲烷排放 (Yagi and Minami, 1990; Jeong et al., 2018), 且不管在有機栽培或半有機栽培都呈現相同趨勢 (Jeong et al., 2019)。推測原因在於堆肥過程將使其總有機碳、碳氮比降低, 使得施用時的碳投入減少, 降低甲烷生成, 另一方面, 堆肥化亦將提高有機肥的 pH 值、總氮含量 (陳, 2007), 除增加施肥效率外, 增加的 pH 值更可抑制甲烷及氧化亞氮的生成。再者, 一般堆肥的碳氮比約在 20-30 (Guo et al., 2012), 而沼渣肥的碳氮比則多在 10 上下 (Rejis et al., 2005), 沼渣肥的低碳氮比, 將降低甲烷的生成 (Li et al., 1997), 但卻可能增加氧化亞氮的排放風險 (Vallejo et al., 2006)。

田間氧化亞氮減排

根據統計, 在綠色革命之後, 意即 1970 年以後, 短短 20-30 年間, 全球的肥料使用量呈現倍增的現象, 在 1990-2000 年期間, 氮肥的使用量更增加了 10 Mt 之多; 同時科學家注意到此時大氣中的氧化亞氮、NO_x 與 N₂ 濃度增加了 35 % (Desjardins et al., 2007), 意即可以推測氧化亞氮的排放量上升可能來自增施的氮肥, 前人研究亦指出, 60 % 的氧化亞氮增加量是來自於農業的氮肥分解排放及其他間接排放 (楊, 2008)。據研究, 臺灣農田的氧化亞氮排放量為 8.8 Kt, 依照田間栽培管理的不同 (尤其是灌溉管理), 將有多達 20 倍以上的排放量差異 (錢等, 2010), 且氧化亞氮排放量隨著氮肥施用量增加而上升 (Scheer et al., 2008), 在濕潤條件之下更將促進其排放 (Weitz et al., 2001), 然而, 氮素在土壤中分解為氧化亞氮的反應需要氧氣的參與, 故水稻田在湛水狀況下, 產生的氧化亞氮極少, 遠不及旱田 (Nishimura et al., 2005), 因此水稻生產時的氧化亞氮排放, 主要集中在栽培中期的排水曬田期, 以及遭遇缺水灌溉的情況 (錢等, 2010)。

基於以上前人研究, 減量施肥可有效降低氧化亞氮排放 (Cole et al., 1997; Frenay, 1997), 除了施肥量, 施肥時機亦決定氧化亞氮的排放量 (Hao et al., 2001), 前述試驗結果指出二期作的排放高於一期作, 是由於施肥時機的溫度較高, 氮肥礦化反應速度快所



導致，應盡可能選擇在氣溫涼爽的時機施肥。此外，氮肥與空氣的接觸將促進其氧化作用並造成氮氧化物（包括氧化亞氮）的釋放 (Millar et al., 2010)，除減少氮肥製造與儲存時與空氣的接觸之外 (Hasler et al., 2015)，水稻田在施肥後立即灌溉，隔絕氮肥與空氣也是一個方式 (賴，1997；Cai et al., 1997)，或是使用土壤深層施肥技術，除增加氮素利用效率，更可減低氧化亞氮排放 (Liu et al., 2006)，再者，許多國家應用不整地或低度整地栽培，降低下層土壤與空氣接觸，亦可減緩土壤氮素被分解為氧化亞氮散失 (Mummey et al., 1998)，且更有助於土壤有機碳的累積，降低二氧化碳及甲烷的排放 (Alam et al., 2019)。施用的氮肥種類也與氧化亞氮排放息息相關，臺灣水稻栽培常用的氮肥有銨態氮及尿素，前人研究指出，尿素較容易被礦化生成氧化亞氮，故使用分解較慢的硫酸銨作為氮肥為佳 (Tenuta and Beauchamp, 2003；Schellenberg et al., 2012)，若仍要使用尿素，則可在尿素中添加尿素酶抑制劑及硝化抑制劑，將可減緩氧化亞氮排放 (Mosier et al., 1996)，此外，為提高氮素利用效率與節約施肥次數，農業上常使用緩釋性肥料，對氧化亞氮減量同樣有助益 (Yan et al., 2000)，主要原因在於緩慢釋放的有效氮素，被作物吸收的比率提高，即降低氮素被礦化分解的可能 (Snyder et al., 2007)。

生命周期二氧化碳減排

二氧化碳方面，儘管農作物生長行光合作用會吸收二氧化碳，但形成的生物量多半會經由呼吸作用或微生物分解再回歸大氣，若未將生物量以穩定的形式固定（如深層土壤有機碳、木材、煤炭等），則難以進行二氧化碳吸存與形成碳匯，因此一般田間栽培階段的作物及土壤之二氧化碳排放，為碳循環的一部分，通常不計入整體碳足跡的排放計算 (Hokazono and Hayashi, 2012)。而在農業活動所消耗的能源，若非來自綠能，都將直接或間接造成二氧化碳排放，而能源耗用的二氧化碳排放，才是水稻生命周期中關於二氧化碳的碳排計算來源。

研究結果顯示，能源耗用的熱點在於資材製造端、收穫後加工、運輸過程，不同肥料的製造過程的耗能存在差異，舉例來說，依 SimaPro 資料庫，單位氮素的尿素製造過程溫室氣體排放，較硫酸銨高出 23%，而各種肥料製造端的環境衝擊亦不盡相同 (Hasler



et al., 2015)，選擇低碳的資材使用是重要的第一步。其次，收穫後加工的階段，最主要的耗能在於稻穀的烘乾，然而，耗能多寡取決於烘乾的時間長短，烘乾時間則由收穫後的稻穀含水率決定，因此若能在田間稻穀完全成熟後，即稻穀含水率在 24-28% 再進行採收，將可降低此階段的二氧化碳排放，值得注意的是，碾米過程的副產物—稻殼，近年來常直接置於在烘穀機內燃燒，替代熱能來源，間接降低化石燃料耗用，減少二氧化碳排放，前人研究指出，將稻殼直接燃燒替代能源之下，每 kg 稻殼可獲得 1 kg 的二氧化碳減排效益 (何，2001)，就生命周期評估的整體觀點，在溫室效應潛勢、酸化潛勢及優養化潛勢則分別有 97%、88% 及 80% 的減量效益 (Quispe et al., 2019)，再者，應用稻殼的乾燥系統更可能結合預熟米的製程，傳統預熟米的預熟處理之溫室效應潛勢占總量的 23-24% (Roy et al., 2007；Nunes et al., 2017)，新型稻穀乾燥系統可降低預熟米加工過程超過 85% 的溫室效應潛勢 (Kwofie and Ngadi, 2017)，甚至燃燒後的稻殼灰，可作為水泥的添加物，改善水泥的製造成本、溫室效應潛勢及工業特性 (Gursel et al., 2016；Henry and Lynam, 2020)。最後，是變動幅度最大的運輸階段，此階段的碳足跡關聯到運輸的距離，一般來說，臺灣的水稻生產，不管是原料與資材的運移，或是收穫後稻穀載至碾米廠，大抵符合在地作業的模式，然而在工廠產出白米產品，運送至販售地點的階段，其里程則大幅增加，臺灣的人口集中在北部，但主要稻米產區則在中南部，產品由南向北運輸的流向顯著，目前多以貨車運輸，實際上，火車運輸的單位貨物碳足跡僅有貨車的 10% (Reich, 2012)，原因在於單次輸送貨物量大，但火車運輸較偏向於長距離與共同目的地，仍需要系統性的規畫。亦有其他研究指出，除了減少進口農產品的依賴，城市農業或城郊農業，將可大幅減少食物里程 (food mileage) 而降低運輸的碳足跡 (Lee et al., 2015)。

結語

水稻生產過程，各階段都帶來多寡不一的碳排，總結來說，機械密集度高、肥料施用量大、灌溉時間長，會導致大量的溫室氣體排放，然而，減少投入的策略，例如改以自然農法栽培系統，雖然單位耕地面積的碳排降低，但由於稻穀產量的低落，最終的稻



米產品碳足跡也未必具有優勢，因此，須考慮各種減碳策略施行之下，在維持產量與品質的前提，並評估未來氣候環境的交感，發展「整合型的低碳栽培體系」。此外，在生命周期的後半，包括運輸階段與使用階段，則相關於交易市場與糧食分配，以及是否有分配不均以致貯存階段碳排增加或品質劣化的疑慮，也是未來在稻米產銷規畫上，必須進行的調整。整合農業技術的生產層面、交易市場的經濟層面、糧食分配的社會層面，方能達到整體性的「低碳稻米」。

參考文獻

- 何錦城。2001。生質能源之經濟與環保效益研究-以稻殼氣化發電為例。碩士論文。新竹：國立交通大學。
- 陳顛竹。2007。堆肥製作過程二氧化碳及甲烷排放量測。博士論文。臺北：國立臺灣大學。
- 黃山內、林經偉、劉瑞美。2000。全期湛水與間歇灌水對台灣水稻田甲烷釋放之影響。土壤與環境 3:217-226。
- 曹云英、許錦彪、朱慶森。2005。水稻植株狀況對甲烷傳輸速率的影響及其品種間差異。華北農學報 20:105-109。
- 葛會敏。2016。稻田甲烷排放水稻品種間差異及機理。碩士論文。揚州：揚州大學。
- 楊純明。2008。減降農作生產排放溫室氣體對策之淺見。作物、環境與生物資訊 5:297-305。
- 劉瑞美、林經偉、黃山內。1999。不同有機質肥料對台灣水稻田甲烷釋放之影響。中華農業氣象學報 6:139-147。
- 賴朝明。1997。台灣地區氧化亞氮及二氧化碳釋放及其影響因子。全球變遷通訊雜誌 14:31-32。
- 錢元皓、賴朝明、楊盛行。2010。台灣水田、旱田與濕地土壤氧化亞氮之釋放通量及其減量對策。土壤與環境 13:23-42。
- Alam, M. K., Bell, R. W. and Biswas, W. K. 2019. Decreasing the carbon footprint of an



- intensive rice-based cropping system using conservation agriculture on the Eastern Gangetic Plains. *J. Cleaner Prod.* 218:259-272.
- Ali, M. A., Kim, P. J. and Inubushi, K. 2015. Mitigating yield-scaled greenhouse gas emissions through combined application of soil amendments: A comparative study between temperate and subtropical rice paddy soils. *Sci. Total Environ.* 529:140-148.
- Aulakh, M. S., Wassmann, R. and Rennenberg, H. 2001. Methane emissions from rice field quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options. *Adv. Agron.* 70:193-260.
- Bacenetti, J., Fusi, A., Negri, M., Bocchi, S. and Fiala, M. 2016. Organic production systems: Sustainability assessment of rice in Italy. *Agr. Ecosyst. Environ.* 225:33-44.
- Bharati, K. S. R. M., Singh, D. P., Rao, V. R. and Adhya, T. K. 2000. Influence of incorporation or dual cropping of *Azolla* on methane emission from a flooded alluvial soil planted to rice in eastern India. *Agr. Ecosyst. Environ.* 79:73-83.
- Cabangon, R. J., Tuong, T. P. and Abdullah, N. B. 2002. Comparing water input and water productivity of transplanted and directseeded rice production systems. *Agr. Water Manage.* 57:11-31.
- Cai, Z., Xing, G., Yan, X., Xu, H., Tsuruta, H., Yagi, K. and Minami, K. 1997. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management. *Plant and soil* 196:7-14.
- Cole, C. V., Duxbury, J., Freney, J., Heinemeyer, O., Minami, K., Mosier, A., Paustian, K., Rosenberg, N., Sampson, N., Sauerbeck, D. and Zhao, Q. 1997. Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49:221-228.
- Desjardins, R. L., Sivalumar, M. V. K. and Kimpe, C. 2007. The contribution of agriculture to the state of climate: workshop summary and recommendations. *Agr. Forest Meteorol.* 142:314-324.
- FAO. 2010. "Climate-Smart" Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food



- Security, Adaptation and Mitigation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 41pp. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/013/i1881e/i1881e00.pdf>
- FAO. 2017. World fertilizer trends and outlook to 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 38pp. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i6895e.pdf>
- Fertitta-Roberts, C., Oikawa, P. Y. and Jenerette, G. D. 2019. Evaluation the GHG mitigation-potential of alternate wetting and drying in rice through life cycle assessment. *Sci. Total Environ.* 653:1343-1353.
- Freney, J. R. 1997. Strategies to reduce gaseous emissions of nitrogen from irrigated agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 48:155-160.
- Fusi, A., Gonzalez-Garcia, S., Moreira, M. T., Fiala, M. and Bacenetti, J. 2017. Rice fertilized with urban sewage sludge and possible mitigation strategies: an environmental assessment. *J. Clean Prod.* 140:914-923.
- Gathorne-Hardy, A., Reddy, D. N., Venkatanarayana, M. and Harriss-White, B. 2016. System of Rice Intensification provides environmental and economic gains but at the expense of social sustainability-A multidisciplinary analysis in India. *Agr. Syst.* 143:159-168.
- Ge, J., Huang, G., Huang, J., Zeng, J. and Han, L. 2016. Particle-scale modeling of methane emission during pig manure/wheat straw aerobic composting. *Envir. Sci. Tech.* 50:4374-4383.
- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y. and Shen, Y. 2012. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technol.* 112:171-178.
- Gursel, A. P., Maryman, H. and Ostertag, C. 2016. A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of “green” concrete mixes with rice husk ash. *J. Clean Prod.* 112:823-836.
- Hao, X., Chang, C., Carefoot, J. M., Janzen, H. H. and Ellert, B. H. 2001. Nitrous oxide emissions from an irrigated soil as affected by fertilizer and straw management. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 60:1-8.



- Hasler, K., Bröring, S., Omta, S. W. F. and Olf, H.-W. 2015. Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. *Eur. J. Agron.* 69:41-51.
- Henry, C. S. and Lynam, J. G. 2020. Embodied energy of rice husk ash for sustainable cement production. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100004>
- Hokazono S. and Hayashi, K. 2012. Variability in environmental impacts during conversion from conventional to organic farming: a comparison among three rice production systems in Japan. *J. Clean Prod.* 28:101-112.
- Huang, Y., Wang, H., Huang, H., Feng, Z. W., Yang, Z. H. and Luo, Y. C. 2005. Characteristics of methane emission from wetland rice–duck complex ecosystem. *Agr. Ecosyst. Environ.* 105:181-193.
- IPCC. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Islam, S. F., Groenigen, J. W., Jensen, L. S., Sander, B. O. and Neergaard., A. 2018. The effective mitigation of greenhouse gas emissions from rice paddies without compromising yield by early-season drainage. *Sci. Total Environ.* 612:1329-1339.
- Islam, S. F., Neergaard, A., Sander, B. O., Jensen, L. S., Wassmann, R. and Groenigen, J. W. 2020a. Reducing greenhouse gas emissions and grain arsenic and lead levels without compromising yield in organically produced rice. *Agr. Ecosyst. Environ.* 295:106922.
- Islam, S. M. M., Gaihre, Y. K., Islam, M. R., Akter, M., Mahmud, A. A., Singh, U. and Sander, B. O. 2020b. Effects of water management on greenhouse gas emissions from farmers' rice fields in Bangladesh. *Sci. Total Environ.* 734:139382.
- ISO. 2006. *ISO 14040: Environmental management: Life cycle assessment, Principles and*



- guidelines. International Organization for Standardization, Geneva.
- Jeong, S. T., Kim, G. W., Hwang, H. Y., Kim, P. J. and Kim, S. Y. 2018. Beneficial effect of compost utilization on reducing greenhouse gas emissions in a rice cultivation system through the overall management chain. *Sci. Total Environ.* 613-614:115-122.
- Jeong, S. T., Cho, S. R., Lee, J. G., Kim, P. J. and Kim, G. W. 2019. Composting and compost application: trade-off between greenhouse gas emission and soil carbon sequestration in whole rice cropping system. *J. Clean Prod.* 212:1132-1142.
- Kesheng, S. and Zhen, L. 1997. Effect of rice cultivars and fertilizer management on methane emission in a rice paddy in Beijing. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49:139-146.
- Kwofie, E. M. and Ngadi, M. 2017. A comparative lifecycle assessment of rural parboiling system and an integrated steaming and drying system fired with rice husk. *J. Clean Prod.* 140:622-630.
- Lee, G. G., Lee, H. W. and Lee, J. H. 2015. Greenhouse gas emission reduction effect in the transportation sector by urban agriculture in Seoul, Korea. *Landscape Urban Plan.* 140:1-7.
- Li, J., Wang, M. and Chen, D. 1997. Studies on mitigation of methane emission from rice field. *Chinese J. Agrometeorology.* 18:9-14.
- Liu, X., Mosier, A., Halvorson, A. and Zhang, F. 2006. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from a clay loam soil. *Plant Soil.* 280:177-188.
- Maeda, K., Hanajima, D., Morioka, R., Toyoda, S., Yoshida, N. and Osada, T. 2013. Mitigation of greenhouse gas emission from the cattle manure composting process by use of a bulking agent. *Soil Sci. Plant Nutr.* 59:96-106.
- Maneevitak, S., Ullah, H., Datta, A., Shrestha, R. P., Shrestha, S. and Kachenchart, B. 2019. Effects of water and rice straw management practices on water savings and greenhouse gas emissions from a double-rice paddy field in the Central Plain of Thailand. *Eur. J. Agron.* 107:18-29.
- Millar, N., Robertson, G. P., Grace, P. R., Gehl, R. J. and Hoben, J. P. 2010. Nitrogen fertilizer management for nitrous oxide (N₂O) mitigation in intensive corn (Maize) production: an



- emissions reduction protocol for US Midwest agriculture. *Mitig. Adapt. Strat. Gl.* 15:185-204.
- Mosier, A. R., Duxbury, J. M., Freney, J. R., Heinemeyer, O. and Minami, K. Minami. 1996. Nitrous oxide emission from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil* 181:95-108.
- Mummey, D. L., J. L. Smith and G. Bluhm. 1998. Assessment of alternative soil management practices on N₂O emissions from US Agriculture. *Agr. Ecosyst. Environ.* 70:79-87.
- Nishimura, S., Sawamoto, T., Akiyama, H., Sudo, S., Cheng, W. and Yagi, K. 2005. Continuous, automated nitrous oxide measurements from paddy soils converted to upland crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1977-1986.
- Nunes, F. A., Seferin, M., Maciel, V. G. and Ayub, M. A. Z. 2017. Life Cycle Assessment comparison between brown parboiled rice produced under organic and minimal tillage cultivation systems. *J. Clean Prod.* 161:95-104.
- Quispe, I., Navia, R. and Kahhat, R. 2019. Life Cycle Assessment of rice husk as an energy source. A Peruvian case study. *J. Clean Prod.* 209:1235-1244.
- Rahman, M. H. A., Chen, S. S., Razak, P. R. A., Baker, N. A. A., Shahrin, M. S., Zawawi, N. Z., Mujab, A. A. M., Abdullah, F., Jumat, F., Kamaruzaman, R., Saidon, S. A. and Talib, S. A. A. 2019. Life cycle assessment in conventional rice farming system: Estimation of greenhouse gas emissions using cradle-to-gate approach. *J. Clean Prod.* 212:1526-1535.
- Reich, A. A. 2012. Transportation efficiency. *Strategic Planning for Energy and the Environment.* 32(2): 32-43.
- Rejis, J. W., Sonneveld, M. P. W., Sorensen, P., Schils, R. L. M., Groot, J. C. J. and Lantinga, E. A. 2005. Utilization of nitrogen from cattle slurry applied to grassland as affected by diet composition.
- Riya, S., Zhou, S., Watanabe, Y., Sagehashi, M., Terada, A. and Hosomi, M. 2012. CH₄ and N₂O emissions from different varieties of forage rice (*Oryza sativa* L.) treating liquid cattle waste. *Sci. Total Environ.* 419:178-186.



- Roy, P., Shimizu, N., Okadome, H., Shiina, T. and Kimura, T. 2007. Life cycle of rice: Challenges and choices for Bangladesh. *J. Food Eng.* 79:1250-1255.
- Scheer, C., Wassmann, R., Kienzler, K., Ibragimov, N. and Eschanov, R. 2008. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices. *Soil Biol. Biochem.* 40:290-301.
- Schellenberg, D. L., Alsina, M. M., Muhammad, S., Stockert, C. M., Wolff, M. W., Sanden, B. L., Brown, P. H. and Smart, D. R. 2012. Yield-scaled global warming potential from N₂O emissions and CH₄ oxidation for almond (*Prunus dulcis*) irrigated with nitrogen fertilizers on arid land. *Agr. Ecosyst. Environ.* 155:7-15.
- Shao, K. and Li, Z. 1997. Effect of rice cultivars and fertilizer management on methane emission in a rice paddy in Beijing. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49:139-146
- Smil, V. 2004. *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production.* Cambridge, MA: MIT Press. ISBN 978-0-262-69313-4.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W. and Jensen, T. L. 2007. Greenhouse gas emissions from cropping systems and the influence of fertilizer management—a literature review. International Plant Nutrition Institute, Norcross.
- Tenuta, M. and Beauchamp, E. G. 2003. Nitrous oxide production from granular nitrogen fertilizers applied to a silt loam. *Cana. J. Soil Sci.* 83:521–532.
- Vallejo, A., Skiba, U. M., Garcia-Torres, L., Arce, A., Lopez-Fernandez, S. and Sanchez-Martin, I. 2006. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts. *Soil Biol. Biochem.* 38:2782-2793.
- Vibol, S. and Towprayoon, S. 2010. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from rice field with rice straw management in Cambodia. *Environ. Monit. Assess.* 161:301-313.
- Weitz, A. M., Linder, E., Frolking, S., Crill, P. M. and Keller, M. 2001. N₂O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. *Soil Biol. Biochem.* 33:1077-1093.



- Yagi, K. and Minami, K. 1990. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36:599-610.
- Yagi, K., Tsuruta, H. and Minami, K. 1997. Possible options for mitigating methane emission from rice cultivation. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 49:213-220.
- Yan, X., Du, L., Shi, S. and Xing, G. 2000. Nitrous oxide emission from wetland rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilizers and mid-season aeration. *Biol. Fert. Soils* 32:60-66.
- Zhang, Y., Jiang, Y., Li, Z., Zhu, X., Wang, X., Chen, J., Hang, X., Deng, A., Zhang, J. and Zhang, W. 2015. Aboveground morphological traits do not predict rice variety effects on CH₄ emissions. *Agr. Ecosyst. Environ.* 208:86-93.

表 1 間歇灌溉在熱帶亞洲國家稻田的減碳效益

Table 1 Benefits of carbon decreasing of alternative wetting and drying irrigation in tropical Asian countries.

		IRRI ^a		泰國 ^b		孟加拉 ^c	
		傳統灌溉	間歇灌溉	傳統灌溉	間歇灌溉	傳統灌溉	間歇灌溉
單位耕	慣行	2.89	1.59	5.51	4.01	8.86	5.74
地面積 ^d	有機	8.90	2.80	--	--	--	--
單位白	慣行	0.41	0.24	1.53	0.96	1.56	1.05
米產量 ^e	有機	1.61	0.49	--	--	--	--

資料來源：^aIslam et al., 2020a；^bManeepitak et al., 2019；^cIslam et al., 2020b

^d單位 ton CO₂ eq / ha

^e單位 kg CO₂ eq / kg 白米



Strategies of rice production for carbon emission reduction

Yi-Chien Wu^{1,2*} Chong-Yi Liao² Chi-Yong Deng² Chen-Hong Lee² Hsu-Sheng Lur^{3*}

Abstract

Rice is the most important food crop in Taiwan, and its life cycle will bring about greenhouse gas emissions, exacerbating climate change and global warming. Therefore, in order to curb global warming and move towards the goal of net zero carbon emissions by 2050, it is necessary to establish life cycle assessment carbon emission information first, and then adjust according to the "hot spots" in order to achieve overall carbon reduction. The carbon emission hotspots in the rice life cycle are in the field cultivation stage, rice processing and milling stage, and transportation stage. In the field cultivation stage, alternative wetting and drying irrigation, rationale fertilization or selection of fertilizer types can be applied to reduce methane and nitrous oxide emissions. In the rice processing and milling stage, rice husk mixed drying technology can be used to save energy and reduce carbon dioxide. In the transportation stage, local production or shipped in bulk to reduce carbon emissions. To sum up the above, in addition to the application of technology to reduce carbon emissions, market transactions at the economic level and food distribution at the social level should still be considered to achieve the best carbon reduction benefits.

Keyword: Rice, Life cycle assessment, Methane, Nitrous oxide, Alternative wetting and drying, Rationale fertilization

1 This research and article is the part of Ph.D thesis of the first author

2 Taichung District Agricultural Research and Extension Station, MOA, Taiwan

3 Department of Agronomy, National Taiwan University, Taiwan

*Corresponding author (wuyc@tcdares.gov.tw)