

# 農產品生命周期碳足跡建立—以稻米產品為例<sup>1</sup>

吳以健<sup>2\*</sup>、郭芝秀<sup>3</sup>、廖崇億<sup>4</sup>、李誠紘<sup>5</sup>、鄧執庸<sup>5</sup>

## 摘 要

本研究依據 ISO 14040 與 ISO 14067 標準，採用生命周期評估(Life Cycle Assessment)方法，建立臺灣稻米產品之碳足跡架構，評估範圍涵蓋原料取得、製造加工、運輸、使用等階段。試驗結果顯示，每 kg 白米產品的總碳足跡為 2.07 kg CO<sub>2</sub>e，其中原料取得階段的田間栽培為碳排放最主要來源，約占總排放量的 70 %，製造加工與使用階段分別占 9 %與 19 %。在田間栽培中，甲烷排放佔整體碳足跡將近一半，為最主要熱點，其次為氧化亞氮排放及化學氮肥製造端的碳排；乾燥作業則為加工階段碳排的主要來源，約占該階段的一半以上。與日本、美國及義大利等地的研究相比，臺灣稻米產品的碳足跡略高於前兩者、低於後者，顯示臺灣生產體系在資材使用效率與能源管理上仍有優化空間。造成差異的主因在於臺灣亞熱帶氣候條件下甲烷生成量較高，且氮肥施用量與期作頻率相對較多。整體而言，稻米產品碳排的關鍵熱點集中於田間栽培與稻穀乾燥，顯示農田管理與能源利用效率對碳足跡影響甚鉅。減碳策略建議包括推廣間歇灌溉與延長季中曬田以抑制甲烷生成，並透過施肥合理化與使用緩效性肥料減少氧化亞氮排放，同時改善烘乾稻穀方式以提升加工階段能源效率。本研究成果不僅呈現臺灣稻米產品碳足跡之結構特性，亦提供量化基礎與依據，可作為稻米產業推動碳標籤、低碳生產及淨零農業政策之重要參考。

**關鍵字：**稻米、溫室氣體、碳足跡、溫室效應潛勢、生命周期評估、產品類別規則、甲烷

---

<sup>1</sup> 農業部臺中區農業改良場研究報告第 1113 號。

<sup>2</sup> 農業部臺中區農業改良場作物改良科副研究員。

<sup>3</sup> 農業部臺中區農業改良場作物改良科研究助理。

<sup>4</sup> 農業部臺中區農業改良場作物環境科助理研究員。

<sup>5</sup> 農業部臺中區農業改良場作物改良科助理研究員。

\*通訊作者：吳以健，Email: wuyc@tcdares.gov.tw

## 前 言

氣候變遷與環境永續性已成為全球關注的議題，農業生產對溫室氣體排放的影響不容忽視。稻米作為臺灣主要糧食作物之一，其生產過程涉及土地利用、水資源管理、肥料施用與機械操作等多個環節，均會排放溫室氣體，而將產品生產過程以至運輸與使用，意即與產品相關的所有階段，其溫室氣體排放的淨總量，就是該產品的碳足跡，因此，碳足跡是評估產品溫室氣體排放量的重要指標，涵蓋從農地管理、種植、收穫、加工、運輸到消費使用及廢棄的各個階段，並且有國際規範明定應採用「生命周期評估(Life Cycle Assessment, LCA)」來進行建立(ISO, 2018)，透過科學化的碳足跡評估，不僅可量化稻米生產對環境的影響，亦有助於制定低碳農業策略，提高產業競爭力並促進永續發展。稻米是全球三大農作物之一，同時在農業的碳排占有重要角色，水稻在栽培期間的田間碳排放(包括甲烷與氧化亞氮)占全球農業排放的 10%以上(FAO, 2024)，且稻米生產的碳足跡更是其他二大作物的玉米與小麥的 2.7 倍與 5.7 倍(Ritchie *et al.*, 2020)，儘管世界各國對稻米的碳排調查已有許多研究(Blengini and Busto, 2009; Hokazono and Hayashi, 2012; Janz *et al.*, 2019)，然而，目前臺灣稻米產品的碳足跡相關研究仍相對有限，尤其是臺灣特異於各個水稻生產國的兩期作栽培生產體系(張，1999)，因此臺灣稻米產品的碳足跡評估有其必要性。本研究旨在透過生命周期評估方法，分析臺灣稻米產品的碳足跡，並探討該產品生命周期中，碳排放的關鍵階段。藉由碳足跡評估結果中碳排最顯著的熱點(hot spot)，作為減碳策略擬定的重要依據，以促進臺灣稻米產業邁向低碳淨零目標。

## 材料與方法

### 一、生命周期評估定義

LCA起源於20世紀中期，並在1970至1990年間因石油危機的影響而發展。最初，LCA主要用於分析能源使用情形，以提升能源效率並減少石油消耗。隨著環境保護意識的提升，生命周期評估的應用範圍逐漸擴展，並於1993年正式納入國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO) 14000系統之中。根據ISO 14040規範，LCA旨在評估產品從原料取得、加工、包裝、運輸、銷售、使用，直至最終廢棄處理的完整生命周期對環境的影響，其評估面向涵蓋資源消耗、人類健康及生態影響(ISO, 2006)，也包括本研究所聚焦的溫室氣體排放或稱碳足跡。一般而言，生命周期評估包括4個主要步驟：(1)目標與範圍界定(Goal and Scope Definition)；(2)生命周期盤查分析

(Life Cycle Inventory Analysis, LCI)；(3)生命周期衝擊評估(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)；(4)生命周期闡釋(Life Cycle Interpretation)。而生命周期評估之中，針對溫室氣體排放的「碳足跡」更獨立為ISO 14067篇章詳述(ISO, 2018)，本研究將依據上述4個步驟，建立臺灣稻米產品的碳足跡資訊，並於後續章節進行詳細說明。

## 二、目標與範圍界定

「目標與範圍界定」是生命周期評估的第一步，也是最重要的一步，包括決定評估項目及定義評估基礎單位與涵蓋範圍。本研究將進行稻米產品碳足跡資訊建立，因此此階段將以溫室氣體排放為環境衝擊評估之項目，產品則以米屋智農公司的1 kg真空包裝馥米為評估單位，馥米產品乃是採用水稻台中194號品種所製，該品種主要以出色的米質而非豐產聞名，因此預期相較於其他高產品種而言，產品單位重量的碳足跡可能較高。涵蓋範圍又稱為系統邊界(System Boundary)，則決定後續盤查的項目，若涵蓋範圍訂定過小，則無法確實呈現實際環境衝擊；若涵蓋範圍訂定過大，則將耗費過多無謂的時間與人力在影響較小的項目上。本次研究之系統邊界包括5大階段：1.原料取得階段；2.製造加工階段；3.運輸階段；4.使用階段；5.廢棄階段。並將依照此5大階段進行後續的溫室氣體排放相關盤查。而本產品之產品組成如表一所示，稻米產品之產品組成單純，僅有白米與包材。

表一、本研究目標產品組成

Table 1. Constitution of the product in this study

Target product	Ingredient	Material	Weight (kg)	Ratio (%)
1 package of aromatic rice	Polished rice	Polished rice	1	99
	Package	PE	0.01	1
		Total	1.01	100

## 三、生命周期盤查分析

針對上述之生命周期5大階段，進行與碳排相關資料的盤查，茲分述如下：

### 1.原料取得階段:

原料取得階段主要在於產品的稻穀生產，也就是田間栽培階段，包括稻種準備、育苗作業、田間整地、插秧移植、施肥、病蟲草管理、收穫作業，並在這些田間作業調查與碳排相關的資料，包括單位面積之稻種用量、秧苗用量、育苗中心用電量、育苗過程肥料農藥用量、整地機械用油量、肥料種類與用量、施肥機具用油量、病蟲草管理之農

藥種類與用量、噴藥機具用油/用電量、收穫機具用油量，並調查單位面積乾穀產量並換算為白米產量，再將單位面積盤查結果除以單位面積白米產量，即可統整各項目的單位白米產量的資源用量。另一方面，田間甲烷與氧化亞氮的排放將是碳排重點，此項目以國家溫室氣體排放清冊進行計算，本研究之場域與期作為彰化縣一期作，即為每公頃每期作180.6 kg的甲烷與4.408 kg的氧化亞氮(環境部，2024)。此外，最終白米產品的包裝袋用量，亦在此階段進行盤查。

## 2.製造加工階段

稻穀收穫後，即至碾米廠進行烘乾、碾製與包裝，此階段乃進行米屋智農公司之碾米廠烘乾作業之全年度用油量、碾製與包裝作業的機具用電量，以及該廠區其他用電量之盤查，並盤查其總白米生產量，再將用電用油量除以總白米生產量，即可統整此階段的單位白米產量的資源用量，作為下一步驟之碳排計算的資料來源。

## 3.運輸階段

在稻穀收穫後，須以貨車將稻穀載運至碾米廠，而在碾米廠完成生產白米產品後，亦需要以貨車將產品載運到銷售地點，此2段路程的運輸，應盤查每次運輸之里程、用油種類、用油量與載運量，並計算單位白米產量之運輸用油量。

## 4.使用階段

本研究設定白米產品之使用階段為烹煮米飯與食用，食用過程並未有碳排產生，因此使用階段的盤查為使用電子鍋烹煮的用電量，以及每次烹煮的白米用量，並將用電量除以白米用量，即可得出單位白米的烹煮用電量。

## 5.廢棄階段

由於米飯食用後並未有廢棄物，此階段可省略不計，而白米產品之包裝袋重量每包僅0.01 kg，換算為碳排約0.012 kgCO<sub>2e</sub>，佔比低於總碳足跡的1%，因此依ISO 14067的規定，包裝袋的廢棄碳排可省略不計。

## 四、生命周期衝擊評估

將前階段之盤查結果，包括稻種、氮肥、磷肥、鉀肥、農藥、電力、汽油、柴油、甲烷排放及氧化亞氮排放等，依照各自的碳排係數進行換算，即可得出每個項目的碳排量，上述每個碳排係數詳列如表二，此碳排係數資料來源為第一級調查數據、臺灣國家碳足跡資訊網、IPCC第六次評估報告、以及生命周期評估軟體SimaPro 8中的Ecoinvent 3.8資料庫。將每個項目換算為碳排量後，進行加總，即計算出每個白米產品的總碳足跡，以及每個階段占總碳足跡的比例，以評估碳排熱點(Hot Spot)。

表二、各階段生命周期盤查之項目、碳排係數及資料來源

Table 2. Inventory items, carbon emission coefficients and references of LCA inventory

Stage	Inventory items	Coefficiency	unit	reference
Raw materials (seedling production)	Rice seed	1.8	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Primary data
	Liquid nitrogen	1.8	kg CO <sub>2</sub> e / L	Ecoivent 3.8
	Liquid phosphorus	0.847	kg CO <sub>2</sub> e / L	Ecoivent 3.8
	Liquid potassium	0.61	kg CO <sub>2</sub> e / L	Ecoivent 3.8
	Prochloraz	14.41	kg CO <sub>2</sub> e / L	Ecoivent 3.8
	Electricity	0.59	kg CO <sub>2</sub> e / kWh	Carbon footprint information platform
Raw materials (field cultivation)	Ammonium Sulfate	0.5628	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Ecoivent 3.8
	Urea	1.65	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Ecoivent 3.8
	Ammonium type nitrogen	2.68	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Ecoivent 3.8
	Phosphorus pentoxide	1.18	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Ecoivent 3.8
	Potassium oxide	0.664	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Ecoivent 3.8
	Lambda-Cyhalothrin + Thiamethoxam	10.28	kg CO <sub>2</sub> e / L	Ecoivent 3.8
	Kasugamycin	13.69	kg CO <sub>2</sub> e / L	Ecoivent 3.8
	Tricyclazole	14.41	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Ecoivent 3.8
	Diesel	3.34	kg CO <sub>2</sub> e / L	Carbon footprint information platform
	Gasoline	3.01	kg CO <sub>2</sub> e / L	Carbon footprint information platform
	Methane emission	27.9	kg CO <sub>2</sub> e / kg	National GHG inventory report
	Nitrous oxide emission	273	kg CO <sub>2</sub> e / kg	National GHG inventory report
Production and Processing	Electricity	0.59	kg CO <sub>2</sub> e / kWh	Carbon footprint information platform
	Diesel	3.34	kg CO <sub>2</sub> e / L	Carbon footprint information platform
	Package (PE)	2.02	kg CO <sub>2</sub> e / kg	Carbon footprint information platform
Transportation	Diesel	3.34	kg CO <sub>2</sub> e / L	Carbon footprint information platform
Use	Electricity	0.59	kg CO <sub>2</sub> e / kWh	Carbon footprint information platform

## 五、生命週期闡釋

完成白米產品的碳足跡評估後，可進行許多進一步探討，本研究將就臺灣白米產品與各國的白米產品碳足跡進行比較，並分析差異之可能原因。另一方面，並藉由碳足跡評估的熱點所在，進行可能減碳策略的討論，作為未來國家稻作低碳生產決策的重要參考。

## 結果與討論

依前述之稻米產品生命週期規劃之盤查項目，進行原料取得階段(包括育苗階段與田間栽培階段)、製造加工階段、運輸階段、使用階段等4個階段的活動數據盤查，並分別依其各自的盤查基礎單位，換算為每包1 kg白米的碳排，茲分述如下。

### 一、原料取得階段

原料取得階段包括育苗與田間栽培，茲分述如下。

育苗作業以每一期作為單位，進行育苗中心的碳排盤查，盤查項目包括稻種、液態氮/磷/鉀肥、消毒藥劑以及電力用量，並依照前述表二之碳排係數，加上育苗中心單期作的總生產秧苗量(175,000盤/單期作)，計算單期作該作業的碳排量，以及單位秧苗之碳排量，最終則結合每公頃耕地的秧苗用量(300盤/公頃)，計算出每公頃耕地的秧苗碳排，並進一步以現地調查之每公頃耕地的白米產量(5,075 kg/公頃)，計算每kg白米的秧苗碳排。計算結果如表三，結果顯示，在育苗時期，每生產1盤秧苗的平均碳排約為558 g CO<sub>2</sub>e，也就是每公頃所使用的秧苗的碳排為167 kg CO<sub>2</sub>e，每kg白米中的秧苗碳排則是0.033 kg CO<sub>2</sub>e。秧苗生產過程中，碳排佔比最大的，乃是稻種與電力使用，雖然液態肥與消毒藥劑也貢獻部分碳排，但由於用量不多，因此計算後的碳排貢獻並不高。前人研究指出，育苗僅占稻米全生命週期碳足跡的5%以下(沈，2020)，儘管改變育苗基質可能有20 %以上的減碳效果，但對於整體稻米碳足跡的減量有限。因此，有些國家(例如美國、巴西等)的水稻栽培乃是採用直接播種方式，省去育苗作業的碳排放之效益，可以推測並不顯著。

田間栽培銜接育苗之後，以每公頃耕地面積為單位，依田間作業項目包括整地、插秧、施肥、噴藥、收穫以及田間直接排放進行資材耗用量與氣體排放量的盤查，再依照前述表二之碳排係數進行計算，最終則以每公頃耕地的白米產量(5,075 kg/公頃)，計算每kg白米的田間栽培各項碳排，計算結果如表四。結果顯示，田間栽培的碳排每公頃達到7.2 Mg CO<sub>2</sub>e，而每kg白米的碳排在此處亦達到1.42 kg CO<sub>2</sub>e，主要來自於田間甲烷排

表三、每期作育苗中心之碳排盤查結果，並以育苗中心單期作育苗量為175,000盤來換算為每盤秧苗的碳排

Table 3. Carbon inventory in seedling nursery center of each cropping season. The carbon emissions per tray of seedlings are calculated based on the seedling production capacity of 175,000 trays per season.

Inventory items	amount	unit	Carbon emissions per season (kg CO <sub>2</sub> e)	Carbon emissions per tray of seedlings (g CO <sub>2</sub> e)	Carbon emissions per ha of field (kg CO <sub>2</sub> e)	Carbon emissions per kg of polished rice (kg CO <sub>2</sub> e)
Rice seed	52,500	kg	94,500	540	162	0.0320
Liquid nitrogen	5.18	L	9.32	0.0532	0.0160	3.16E-06
Liquid phosphorus	6.47	L	5.48	0.0313	0.00939	1.86E-06
Liquid potassium	5.18	L	3.16	0.0180	0.00541	1.07E-06
Prochloraz	31.0	L	448.0	2.56	0.768	0.000152
Electricity	4,406	kWh	2,600	14.85	4.46	0.00088
total				558	167	0.0330

放、田間氧化亞氮排放以及化學肥料的製造端，尤其是田間甲烷排放，更是占田間栽培碳排的70%。目前已發表的各國稻米碳排文獻中，幾乎全數皆指出田間栽培是碳排最顯著的熱點(Blengini and Busto, 2009; Hokazono and Hayashi, 2012; Brodt *et al.*, 2014)，且其中最顯著的碳排正是田間直接甲烷排放，主要原因在於水稻田的湛水栽培方式，缺氧土壤的還原態之下，導致土壤中的甲烷生成菌將土壤有機碳轉變為甲烷，再經由水稻的通氣組織排放至大氣中(Kim *et al.*, 2018)，且臺灣位處亞熱帶，高溫環境促使甲烷更較其他溫帶水稻產國有更高的排放，然而，目前許多的稻米產品碳足跡仍採用跨政府氣候變遷組織(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)係數或國家甲烷排放清冊係數，對於特定田區的排放估算可能有所偏差導致碳排評估的不確定性，未來建議可採用更為準確且考量因素更為全面的模式例如DNDC model取代之(Oo *et al.*, 2020)。此外，田間氧化亞氮排放乃是第二熱點，主要來自未完全吸收的氮肥，在土壤微生物的脫氮作用之下產生的；而化學氮肥製造端則是第三熱點，則是因為目前的化學氮肥主要以哈柏法(Haber-Bosch Process)製造，也就是將氮氣與氫氣在200大氣壓與400°C的狀態下以鐵粉為催化劑，製造氨氣的方式(Smil, 2004)，極大的壓力與高溫，需要極高的能源投入，

因此化學氮肥的製造端相當耗用能源，也帶來大量碳排，且氮肥更是肥料三要素中用量最大者，更顯示氮肥在農業碳排上的重要性。

表四、田間栽培期間單位耕地面積與單位kg白米之碳排盤查結果

Table 4. Carbon inventory per unit of field area and per kg of polished rice during the field cultivation

Activity	Material use or direct emissions	amount	Unit	Carbon emissions per ha of field (kg CO <sub>2</sub> e)	Carbon emissions per kg of polished rice (kg CO <sub>2</sub> e)
Land preparation	Diesel	55.9	L/ha	187	0.0368
Transplanting	Diesel	5.92	L/ha	19.8	0.00390
Fertilization	Gasoline	2.63	L/ha	7.92	0.00156
	Ammonium Sulfate	440	kg/ha	248	0.0488
Fertilizer	Urea	80.0	kg/ha	132	0.0260
	Ammonium type nitrogen	96.0	kg/ha	257	0.0507
	Phosphorus pentoxide	24.0	kg/ha	28.3	0.00558
	Potassium oxide	48.0	kg/ha	31.9	0.00628
	Lambda-Cyhalothrin + Thiamethoxam	0.0789	L/ha	0.811	0.000160
Pesticide	Kasugamycin	0.0152	L/ha	0.208	0.000041
	Tricyclazole	0.228	kg/ha	3.29	0.000648
Harvest	Diesel	11.8	L/ha	39.5	0.00779
Direct Emission	Methane	181	kg/ha	5,047	0.995
	Nitrous oxide	4.41	kg/ha	1,203	0.237
total				7,205	1.42

## 二、製造加工階段

在田間稻穀收穫後，須運送至碾米加工廠進行進一步加工與製造產品，在碾米加工廠主要進行稻穀烘乾、碾米精白及產品包裝等3項作業，其分別與碳排相關的盤查為柴油用量、電力耗用以及包材使用，而此階段的盤查則以碾米廠1整年的用量進行，結果如表五。結果顯示此階段的每kg白米碳排約為0.182 kg CO<sub>2</sub>e，其中超過一半來自烘乾作業，而由於白米產品的內容物組成較單純(只包含白米本身)，因此此階段的作業與投入資材並不複雜，相同情況也可於麥類作物的生命週期中發現(Moresi and Cimini, 2025)，若是進一步精緻加工的食品產品，例如稻米加工製品的米粉絲，或是大麥進一步製造的啤酒，前者將包括陳化儲存過程與蒸煮加工過程的耗能，後者則包括發酵過程與過濾純化過程的碳排，這類產品的碳排在此階段則會進一步增加。

表五、製造加工階段的碳排盤查結果

Table 5. Carbon inventory during the production and processing stage

Activity	Material use	amount	Unit	Carbon emissions per kg of polished rice (kg CO <sub>2</sub> e)
Drying	Diesel	14,000	L/year	0.103
Polishing and packaging	Electricity	45,228	kWh/year	0.0587
Package	PE	0.01	kg/product	0.0202
total				0.182

## 三、運輸與使用階段

運輸階段包括2個部分，第一為田間收穫後的稻穀運輸至碾米廠的過程，第二為碾米廠生產為產品後，將產品運輸至銷售地點的過程，此二部分的運輸皆使用大型貨車運輸，其與碳排相關的盤查為柴油使用。而消費者自銷售地點購買產品回家後，使用階段則是煮飯作業，煮飯使用電子鍋，與碳排相關的盤查為電力使用，盤查結果如表六。結果顯示，此階段的每kg白米碳排約為0.439 kg CO<sub>2</sub>e，最主要來自於煮飯時使用電子鍋的電力使用，另一方面，運輸方面則皆在於貨車的柴油用量，不同於美國或中國等大國常以火車運輸(Brodt *et al.*, 2014)，貨車的運輸效率通常較差，但事實上，由於本次評估產品為國產米，加上臺灣面積不如其他國家，因此運輸里程與運輸碳排亦將低於其他國家。

表六. 運輸與使用階段的碳排盤查結果

Table 6. Carbon inventory for transportation and use stages

Stage	Activity	Material use	amount	Unit	Carbon emissions per kg of polished rice (kg CO <sub>2</sub> e)
Transportation	Grain transportation	Diesel	10	L/trip	0.00418
	Products transportation	Diesel	80	L/trip	0.0411
Use	Cooking	Electricity	0.5	kWh/time	0.393
total	total				0.439

#### 四、全生命周期彙總評估

總結以上各階段碳排結果，彙整如表七，每kg白米碳足跡總計為2.07 kg CO<sub>2</sub>e，比較目前已有登錄產品碳足跡的稻米產品，包括臺中、花蓮、臺東等地所生產，其每kg產品的碳足跡自1.0 kg至4.0 kg CO<sub>2</sub>e都有。碳足跡的差異除了由於栽培管理之外，品種、田區氣候、土壤都可能是影響因子，因此若要彼此比較，仍應詳細評估其每一產品所記載之盤查報告細節。另一方面，若比較其他各國的結果，由於各國研究皆未包括使用階段，因此若扣除使用階段，本研究之每kg白米碳足跡為1.68 kg CO<sub>2</sub>e，高於日本評估結果的1.46 kg CO<sub>2</sub>e (Hokazono and Hayashi, 2012)與美國評估的1.55 kg CO<sub>2</sub>e (Brodt *et al.*, 2014)，低於義大利研究的2.76 kg CO<sub>2</sub>e (Blengini and Busto, 2009)；其中有超過70%來自原料取得階段，若單比較原料取得階段，則本研究之1.45 kg CO<sub>2</sub>e更明顯低於泰國(2.97-5.55 kg CO<sub>2</sub>e)(Thanawong *et al.*, 2014)，而與中國華中地區相當(1.50 kg CO<sub>2</sub>e)(Wang *et al.*, 2010)。也就是說，臺灣目前相較與先進稻米生產國家如美國與日本，田間生產的碳足跡仍略顯偏高，主要原因在於美國之稻米生產一年僅一個期作，氣候、品種、栽培管理之影響下，單位面積產量較高，因此單位稻米之碳足跡則較低，美國加州稻米產區之單位面積乾穀產量甚至可達每公頃9公噸之多(CDFA, 2013)；日本方面雖然產量不如美國，但日本水稻應用間歇灌溉與施用較少氮肥，加上休耕期低溫且不澆水，可有效降低田間碳排(Hokazono and Hayashi, 2012)，臺灣水稻栽培觀念與栽培方式皆近似於日本，水稻減碳策略方面確實可借鏡日本。

表七、各階段貢獻之碳排與產品總碳足跡

Table 7. Carbon emissions contributed by each stage and the total carbon footprint of the product

Stage	Carbon emissions per kg of polished rice (kg CO <sub>2</sub> e)	Percentage of total carbon footprint (%)
Raw materials	1.45	70.1
Production	0.182	8.76
Transportation	0.0453	2.18
Use	0.393	19.0
total	2.07	100

## 五、可能的減碳策略

由本研究評估結果，顯示臺灣稻米產品碳足跡的碳排熱點，主要在於田間甲烷排放、田間氧化亞氮排放與氮肥製造、碾米過程之乾燥耗能，茲就此3項目探討可能減碳策略。

1. 田間甲烷排放: 要減少水稻田的甲烷排放，可從提高田間土壤氧化還原電位與降低田間土壤有機碳二方面著手。由於傳統的湛水方式導致田間土壤缺氧而使甲烷大量排放，因此近年有許多方式針對此方面改善，包括間歇灌溉(Alternative Wetting and Drying Irrigation, AWD)或是延長季中曬田(Prolonging Mid-season Drainage)，經證實，間歇灌溉至少可以減少近50%的田間甲烷排放(Linquist *et al.*, 2015)，而在本場研究亦發現不同強度的間歇灌溉方式能減少田間甲烷排放30-70%(資料未發表)，且在不同水稻品種之間更可能具有差異；另一方面，延長季中曬田亦可降低約52%的田間甲烷排放(Liu *et al.*, 2019)，然而，不管是間歇灌溉或延長曬田期，都應注意期間稻株是否處於缺水逆境，否則將帶來減產的風險(Carrijo *et al.*, 2017)。另一方面，若要降低田間土壤有機碳，針對收穫後稻株殘體的管理亦具有效果。研究指出，其甲烷減降效益可達60-75%(Cordeiro *et al.*, 2024)，而在本場研究則顯示約可降低50-80%的甲烷排放(資料未發表)，顯示其顯著的甲烷減降效益，但仍應考慮移除後的稻稈的用途規劃，不應作為廢棄物焚燒，否則減碳效益將受影響(Cordeiro *et al.*, 2024)。
2. 田間氧化亞氮排放與氮肥製造: 田間氧化亞氮排放量，取決於田間氮肥的施用量，過去有許多研究證實氧化亞氮排放與氮肥施用量呈高度正相關(MacKenzie *et al.*, 1998 ; McSwiney and Robertson, 2005 ; Halvorson *et al.*, 2008)，日本的田間碳排較少，主要原

因之一在於日本為了追求更好的稻米食味，欲降低米粒粗蛋白質含量，常嚴格控制氮肥的施用量(五十嵐與後藤，2025)，研究亦指出氮肥施用越低，氧化亞氮的排放確實呈現降低，且呈明顯正相關(Cole *et al.*, 1997 ; Freney, 1997)，且氮肥施用量降低，更可直接減少氮肥製造端的碳排，惟過低的氮肥，除了影響產量之外，更可能降低稻米對高溫的耐性而導致白垩質穀粒的增加，傷害外觀品質(Guo *et al.*, 2024)，因此為兼顧減碳與產量品質，應精準評估氮肥用量。另一方面，氧化亞氮的產生主要在於氮肥的釋放速度大於作物吸收速度，因此可應用緩效性氮肥或加入硝化抑制劑(Mosier *et al.*, 1996; Yan *et al.*, 2000)，除了提高氮肥使用效率，降低氮肥使用量之外，將可大幅降低氧化亞氮的排放。

3. 乾燥作業的耗能：稻穀收穫後水分含量大多高於25 %，而最適當的儲存狀況則是13-14 %，因此需要將稻穀乾燥至最適水分含量，近年此作業多採用稻穀烘乾設備，傳統的烘乾設備使用柴油，因需要產生大量的熱，造成柴油燃燒的碳排頗高，因此若要降低此階段的碳排，可由縮短烘乾時間與改善燃料/能源種類著手，第一，可力行適時收穫，也就是不過早收穫，使稻穀水分含量在田間降至27-28 %再收穫，相較於過早收穫的稻穀(水分含量超過30%)，可節約烘乾時間並降低能源使用以及相伴的碳排，前人研究成果顯示，收穫時的玉米或小麥水分每少1 %，每噸玉米烘乾時可減少3-5 kg CO<sub>2</sub>e(Choudhury *et al.*, 2023)，而稻米方面，若水分含量差5 %，可節省超過15 %的烘乾碳排(Müller *et al.*, 2022)。另一方面，可應用生物質能源來替代柴油，像是使用碾米的副產物稻殼，並採用新型烘乾機(設計可燃燒稻殼作為熱源)，可減少柴油耗用並減少碳排，研究指出，採用燃燒稻殼烘乾機來烘乾稻穀，每公噸可以減少97%的碳排(Quispe *et al.*, 2019)。

## 結 論

本研究以生命周期評估LCA方法，依據ISO 14040與ISO 14067標準，建立臺灣稻米產品之碳足跡架構，評估範圍涵蓋原料取得、製造加工、運輸、使用等階段。研究結果顯示，稻米產品的碳排放主要集中於田間栽培階段，其次為使用與加工階段，整體碳足跡結構與國際研究趨勢一致，顯示田間甲烷與氧化亞氮排放為主要熱點來源。造成臺灣稻米碳排相對偏高的原因，與亞熱帶氣候條件、栽培期作次數及肥料投入強度相關。未來若能推廣AWD與延長季中曬田等節水管理技術，將有助於降低湛水狀態下的甲烷生成；同時透過合理化施肥、採用緩效性氮肥或硝化抑制劑，可有效減少氧化亞氮排放；在後段加工階段，若能採行適時收穫與以稻殼燃料取代柴油烘乾，亦可顯著降低能源使

用與碳排放。綜合而言，本研究建立之碳足跡架構與分析結果，可提供我國稻米產品碳管理之基礎依據，並可作為推動低碳生產、碳標籤認證及淨零農業政策的重要參考，促進稻米產業向永續與淨零目標邁進。

## 誌 謝

本研究承蒙米屋智農股份有限公司協助，共同調查其產品生產過程中之資材用量、能源使用量及其他碳排相關項目，謹此誠摯謝忱。

## 參考文獻

1. 五十嵐俊成、後藤英次。2025。北海道における高品質・良食味米生産を目指した施肥・栽培管理技術。日本土壤肥料学雑誌，96(3): 234-240。
2. 沈紅。2020。水稻生產碳足跡評估與減排路徑研究。農業工程學報，36(2)，25-31。
3. 張學焜。1999。台灣稻米栽培之歷史背景及環境與期作性。In. 張彩泉編，台灣稻作發展史(頁259-264) 臺灣，臺北: 臺灣省政府農林廳。
4. 環境部。2024。2024 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。
5. Blengini, G. A. and M. Busto. 2009. The life cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy). *J. Environ. Manage.* 90: 1512-1522.
6. Brodt, S., A. Kendall, Y. Mohammadi, A. Arslan, J. Yuan, I. S. Lee and B. Linqvist. 2014. Life cycle greenhouse gas emissions in California rice production. *Field Crops Res.* 169: 89-98.
7. California Department of Food and Agriculture (CDFA). 2013. California Agricultural Production Statistics: Field Crops. CDFA, Sacramento, CA.
8. Carrijo, D. R., M. E. Lundy and B. A. Linqvist. 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying management: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 203: 173–180.
9. Choudhury, S., B. Pradhan, S. A. J. Francis and D. S. Roy. 2023. An energy efficient fog level resource management scheme for software defined cities. *Sustainable Energy Technol. Assess.* 57: 103289.
10. Cole, C. V., J. Duxbury, J. Freney, O. Heinemeyer, K. Minami, A. Mosier, K. Paustian, N. Rosenberg, N. Sampson, D. Sauerbeck and Q. Zhao. 1997. Global estimates of

- potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. *Nutrient Cycling Agroecosyst.* 49: 221-228.
11. Cordeiro, E. U., L. Arenas-Calle, D. Woolf, S. Sherpa, S. Poonia, K. Kritee, R. Dubey, A. Choudhary, V. Kumar and A. McDonald. 2024. The fate of rice crop residues and context-dependent greenhouse gas emissions: Model-based insights from Eastern India. *J. Clean. Prod.* 435: 140240.
  12. FAO. 2024. Emissions from crops: Rice cultivation. FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/GR>
  13. Freney, J. R. 1997. Strategies to reduce gaseous emissions of nitrogen from irrigated agriculture. *Nutrient Cycling Agroecosyst.* 48: 155-160.
  14. Guo, C., L. Zhang, P. Jiang, Z. Yang, Z. Chen, F. Xu, X. Guo, Y. Sun and J. Ma. 2024. Grain chalkiness is decreased by balancing the synthesis of protein and starch in hybrid indica rice grains under nitrogen fertilization. *Foods* 13: 855.
  15. Halvorson, A. D., S. J. Del Grosso and C. A. Reule. 2008. Nitrogen, tillage, and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *J. Environ. Qual.* 37: 1337-1344.
  16. Hokazono, S. and K. Hayashi. 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.
  17. ISO. 2006. ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization, Geneva.
  18. ISO. 2018. ISO 14067: Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification. International Organization for Standardization, Geneva.
  19. Janz, B., S. Weller, D. Kraus, H. S. Racela, R. Wassmann, K. Butterbach-Bahl and R. Kiese. 2019. Greenhouse gas footprint of diversifying rice cropping systems: impacts of water regime and organic amendments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 271: 41-54.
  20. Kim, W. J., L. T. Bui, J. B. Chun, A. M. McClung and J. Y. Barnaby. 2018. Correlation between methane (CH<sub>4</sub>) emissions and root aerenchyma of rice varieties. *Plant Breed. Biotechnol.* 6(4): 381-390.

21. Linqvist, B. A., M. M. Anders, M. A. A. Adviento-Borbe, R. L. Chaney, L. L. Nalley, E. F. F. da Rosa and C. van Kessel. 2015. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biol.* 21(1): 407-417.
22. MacKenzie, A. F., M. X. Fan and F. Cadrin. 1998. Nitrous oxide emission in three years as affected by tillage, corn–soybean–alfalfa rotations, and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.* 27: 698-703.
23. McSwiney, C. P. and G. P. Robertson. 2005. Nonlinear response of N<sub>2</sub>O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. *Global Change Biol.* 11: 1712-1719.
24. Moresi, M. and A. Cimini. 2025. Effect of malthouse size and transportation on the environmental profile of malt production. *Sustainability.* 17(11): 5077.
25. Mosier, A. R., J. M. Duxbury, J. R. Freney, O. Heinemeyer and K. Minami. 1996. Nitrous oxide emission from agricultural fields: assessment, measurement and mitigation. *Plant Soil.* 181: 95-108.
26. Müller, A., M. T. Nunes, V. Maldaner, P. C. Coradi, R. S. de Moraes, S. Martens, A. F. Leal, V. F. Pereira and C. K. Marin. 2022. Rice drying, storage and processing: effects of post-harvest operations on grain quality. *Rice Sci.* 29: 16-30.
27. Oo, A. Z., S. Sudo, T. Fumoto, K. Inubushi, K. Ono, A. Yamamoto, S. D. Bellingrath-Kimura, K. T. Win, C. Umamageswari, K. S. Bama, M. Raju, K. Vanitha, P. Elayakumar, V. Ravi and V. Ambethgar. 2020. Field validation of the DNDC-Rice model for methane and nitrous oxide emissions from double-cropping paddy rice under different irrigation practices in Tamil Nadu, India. *Agriculture* 10: 355.
28. Quispe, I., R. Navia and R. Kahhat. 2019. Life cycle assessment of rice husk as an energy source: a Peruvian case study. *J. Clean. Prod.* 209: 1235-1244.
29. Ritchie, H., P. Rosado, M. Roser. 2022. Environmental Impacts of Food Production. Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food>' [Online Resource]
30. Smil, V. 2004. *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production.* MIT Press, Cambridge, MA.

31. Thanawong, K., S. R. Perret and C. Basset-Mens. 2014. Eco-efficiency of paddy rice production in Northeastern Thailand: a comparison of rain-fed and irrigated cropping systems. *J. Clean. Prod.* 73: 204-217.
32. Wang, M. X., X. F. Xia, Q. J. Zhang and J. G. Liu. 2010. Life cycle assessment of a rice production system in Taihu region, China. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 17: 157-161.
33. Yan, X., L. Du, S. Shi and G. Xing. 2000. Nitrous oxide emission from wetland rice soil as affected by the application of controlled-availability fertilizers and mid-season aeration. *Biol. Fertil. Soils.* 32: 60-66.

# Establishing the Carbon Footprint of Agricultural Products Across the Life Cycle: A Case Study of Rice Products<sup>1</sup>

Yi-Chien Wu<sup>2\*</sup>, Chi-Shiou Kuo<sup>3</sup>, Chung-Yi Liao<sup>4</sup>, Cheng-Hong Li<sup>5</sup>  
and Chi-Yong Teng<sup>5</sup>

## ABSTRACT

This study applied the Life Cycle Assessment (LCA) approach in accordance with ISO 14040 and ISO 14067 standards to establish a carbon footprint framework for rice products in Taiwan. The assessment covered the stages of raw materials, production, transportation, and use. The results showed that the total carbon footprint of one kg of polished rice was 2.07 kg CO<sub>2</sub>e. Among all stages, field cultivation was identified as the dominant source of emissions, accounting for approximately 70 % of the total, followed by production (9%) and the use stage (19%). Within the field stage, methane emissions contributed nearly half of the total carbon footprint, representing the primary hotspot, followed by nitrous oxide emissions and the upstream production of inorganic nitrogen fertilizers. The drying operation was the main contributor to carbon emissions in the production stage, accounting for more than half of that stage's total. Compared with studies conducted in Japan, the United States, and Italy, the carbon footprint of Taiwan's rice products was slightly higher than those of Japan and the U.S., but lower than that of Italy, indicating opportunities for improvement in resource use efficiency and energy management within Taiwan's production system. The higher

---

<sup>1</sup> Contribution No.1113 from Taichung DARES,COA.

<sup>2</sup> Associate Researcher of Crop Improvement Section Taichung DARES, Changhua, Taiwan, ROC.

<sup>3</sup> Research Assistance of Crop Improvement Section, Taichung DARES, Changhua, Taiwan, ROC.

<sup>4</sup> Assistant Researcher Crop Environment Section, Taichung DARES, Changhua, Taiwan, ROC.

<sup>5</sup> Assistant Researcher Crop Improvement Section, Taichung DARES, Changhua, Taiwan, ROC.

\*Corresponding Author: Yi-Chien Wu, Email: wuyc@tcdares.gov.tw

emissions were mainly attributed to greater methane generation under subtropical climatic conditions and the relatively higher rates of nitrogen fertilizer application and cropping frequency. Overall, the key emission hotspots were concentrated in the field and drying stages, suggesting that field management practices and energy utilization efficiency have substantial impacts on the carbon footprint. Recommended mitigation strategies include promoting alternate wetting and drying (AWD) irrigation and prolonged mid-season drainage to reduce methane emissions, adopting optimized nitrogen management and slow-release fertilizers to mitigate nitrous oxide emissions, and improving rice drying processes to enhance energy efficiency during postharvest processing. The findings of this study not only reveal the structural characteristics of the carbon footprint of Taiwan's rice products but also provide a quantitative foundation and reference for advancing carbon labeling, low-carbon production, and net-zero agricultural policies in the rice industry.

**Key words:** rice, greenhouse gas (GHG), carbon footprint, global warming potential, life cycle assessment (LCA), product category rule, methane