

▼ 運輸過程是進口農產品的碳排熱點，在地生產與在地消費可降低碳足跡



## 農產品碳足跡與減碳策略

文/吳以健、廖崇億  
圖/吳以健、鄧執庸

### 【氣候變遷與溫室效應】

氣候變遷與全球暖化是目前人類所面臨最重要的議題，過去數十年累積的研究已可以確定20世紀後的全球暖化是由於工業革命後的大量化石燃料使用，相較過去排放更多的溫室氣體，這些額外的溫室氣體，加劇了原本地球的溫室效應，地表氣溫進一步的升高，導致全球暖化與引發氣候變遷。這些溫室氣體，包括排放量最大的二氧化碳、從水田與畜牧業排放的甲烷、氮肥製造與分解相關的氧化亞氮，從1850年至今，大氣中此3種溫室氣體的濃度呈現顯著增加，二氧化碳由280ppm升高至超過400ppm，甲烷由800ppb增加到1800ppb，氧化亞氮則由270ppb上升至330ppb，而增加的溫室氣體，已顯著造成各地的升溫，臺灣的暖化尤其明顯，過去每10年增加0.29℃的

氣溫，也就是說，如果現行產業不進行任何針對溫室氣體減量的改變，未來的升溫趨勢將更劇烈，並導致更嚴重的產業衝擊。

有鑑於不斷增加的溫室氣體及帶來的暖化與氣候變遷風險，聯合國跨政府氣候變遷組織(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在最新的第六次評估報告(Sixth Assessment Report, AR6)中指出，若要將全球升溫的幅度在本世紀末維持在1.5°C以內，環境的溫室氣體必須在2050年達到淨零排放，也就是說溫室氣體的排放量與固定/吸存量必須達到平衡，因此如何有效達到減少排放與增加吸存，正是現階段最重要的目標。而規劃減排與增匯方式之前，必須先就現行產業與產品所造成的溫室氣體排放進行盤點，建立其「碳足跡」資訊後，再依此擬定未來執行的調整策略。

## 【什麼是碳足跡】

由於目前溫室氣體總排放量的75%是二氧化碳，因此溫室氣體排放常簡稱為「碳排」，溫室氣體減排則稱為「減碳」，低溫室氣體排放稱為「低碳」，以此類推2050年淨零碳排、碳匯、碳足跡等。碳足跡分為「產品碳足跡」與「企業或組織碳足跡」，產品碳足跡是指某個產品在其整個「生命週期」之中，包括原料取得、製造生產、運輸配銷、使用、廢棄等階段，所造成的直接與間接的溫室氣體排放總和，附帶一提，產品碳足跡不限於實體商品，服務同樣可作為產品來進行碳足跡評估，舉例來說，高鐵公司提供載客服務，在高鐵列車與其他相關運作造成的碳排，可分配在該服務旅程之中；而企業或組織碳足跡，則是某個企業在運作過程中，直接與間接的溫室氣體排放，包括廠房建造所造成的排放、車輛使用的燃油、日常使用的電力等。無論是產品碳足跡或是企業碳足跡，均為現行的溫室氣體排放重要資訊，作為擬定未來減排策略的重要參考。本文著重產品碳足跡的調查方式、碳足跡代表的意義、農產品的碳足跡評估及農業減碳的可能策略進行說明。

## 【碳足跡怎麼調查】

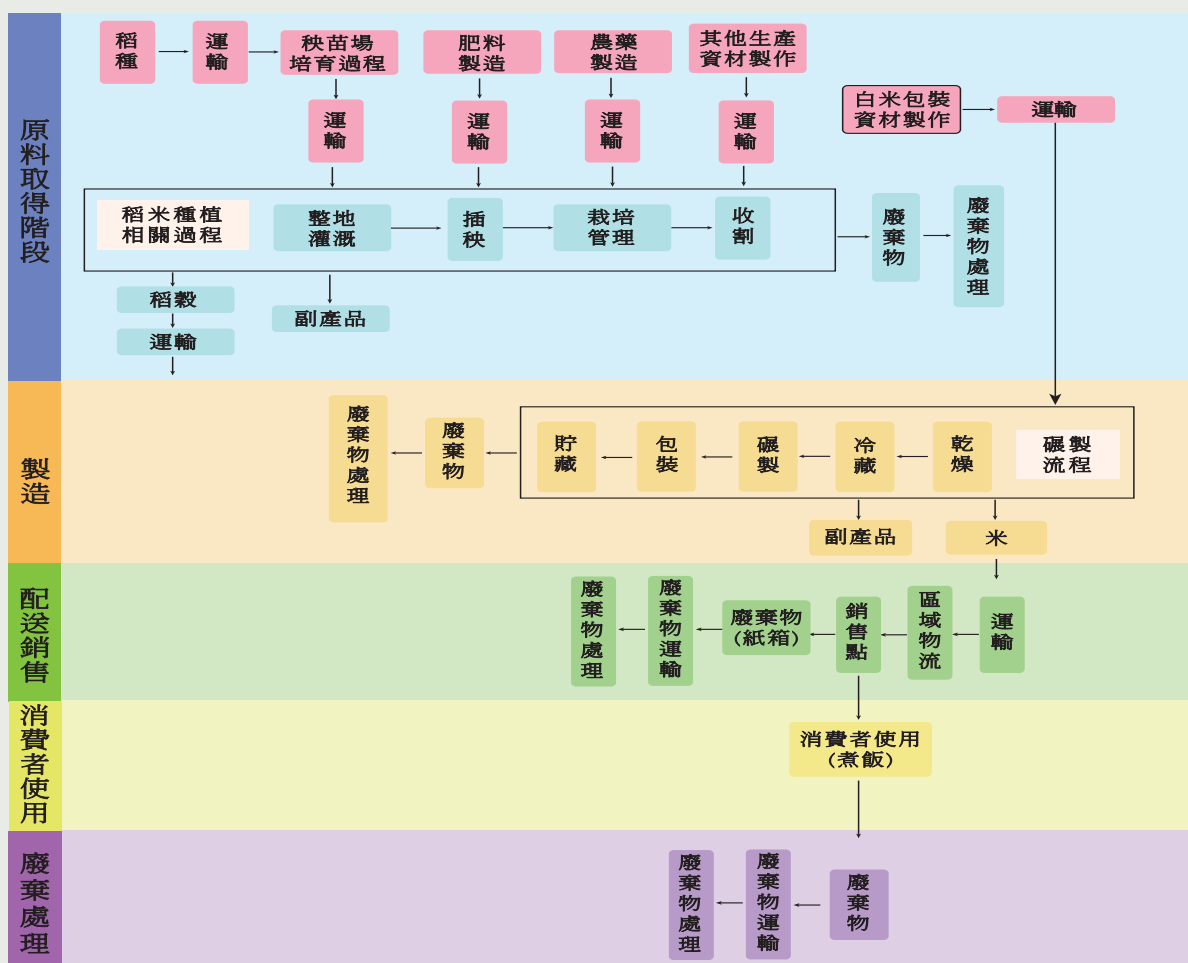
產品碳足跡的調查方式，乃依國際標準化組織(International Organization for Standardization, ISO)規範，該組織於2018年發布「ISO 14067: 2018」，為最新版的產品碳足跡評估方式，其中明定產品碳足跡評估應以環境工程學的「生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)」方式進行，生命週期評估分為四大步驟。

## (一) 目標與範疇界定

產品碳足跡評估的第一步，要確定目標產品，包括產品的內容物、內容量及包裝，並依此確定該產品的生命周期，以及生命周期各階段將調查的項目，盤查的項目越詳細，其評估結果就越接近實際碳排，但盤查項目中包含過多碳排較少者，反而會花費過多的時間與人力成本，然而，若盤查的項目過少或過於簡單，則可能有評估結果失真的疑慮，因此，ISO 14067 則規定各產品的生命周期評估必須依循該產品的「產品類別規則(Product Category Rules, PCR)」，以規範該類別的產品必須盤查的項目，也就是該產品碳足跡盤查的範疇必須符合其所屬的產品類別規則。

## (二) 生命周期盤查分析

依循產品類別規則完成碳足跡盤查項目後，接著應依之詳細進行投入與產出的調查，以下圖為例，稻米投入的調查包括所有資材的耗用量、電力消



產品類別規則中有規範各類產品必須盤查的項目，圖為稻米的規範項目(資料來源/環境部碳足跡產品類別規則-米 第4.0版 文件編號20-042)

耗量、燃油消耗量，其中使用的資材的製造端所造成的碳排也須計算在本產品之中；而產出的調查則包括目標產品生產量、副產物產生量、廢棄物排放，其中副產物若另有用途，則可依規定分攤部分碳排量在副產物的碳足跡上，至於廢棄物排放則包括固體、液體、氣體排放物，固體與液體廢棄物在廢棄處理時(例如廢水處理)所造成的碳排同樣應計算在本產品之中，而氣體排放則是溫室氣體直接排放的計算來源，是產品碳足跡的一大重點。

### (三) 生命周期衝擊評估

完成投入與產出的調查後，下一步是要將所有收集的資料進行計算與轉換，最終整合為二氧化碳當量(CO<sub>2</sub> eq)的形式，作為碳足跡的量化單位。調查資料中，單位電力與燃油消耗的碳排係數，可在臺灣的「產品碳足跡資訊網」查詢，而投入資材方面，常用資材可在該資訊網查詢製造端碳排係數，同樣的，常用廢棄物處理之碳排也可在該資訊網查詢；最終是溫室氣體排放的整合，若有1公噸甲烷、氧化亞氮或其他溫室氣體的直接排放，分別相當28公噸CO<sub>2</sub> eq、298公噸CO<sub>2</sub> eq排放，則可依本文所附的係數換算為二氧化碳當量（詳如下表）。整合上述計算結果，可提出產品生命周期的總碳足跡，以及各階段的碳足跡量與所占比例。

各種溫室氣體的溫室效應潛勢(相對於二氧化碳)

溫室氣體種類	溫室效應潛勢
二氧化碳	1
甲烷	28
氧化亞氮	298
氫氟碳化物	124-14,800
全氟碳化物	7,390-12,200
六氟化硫	22,800

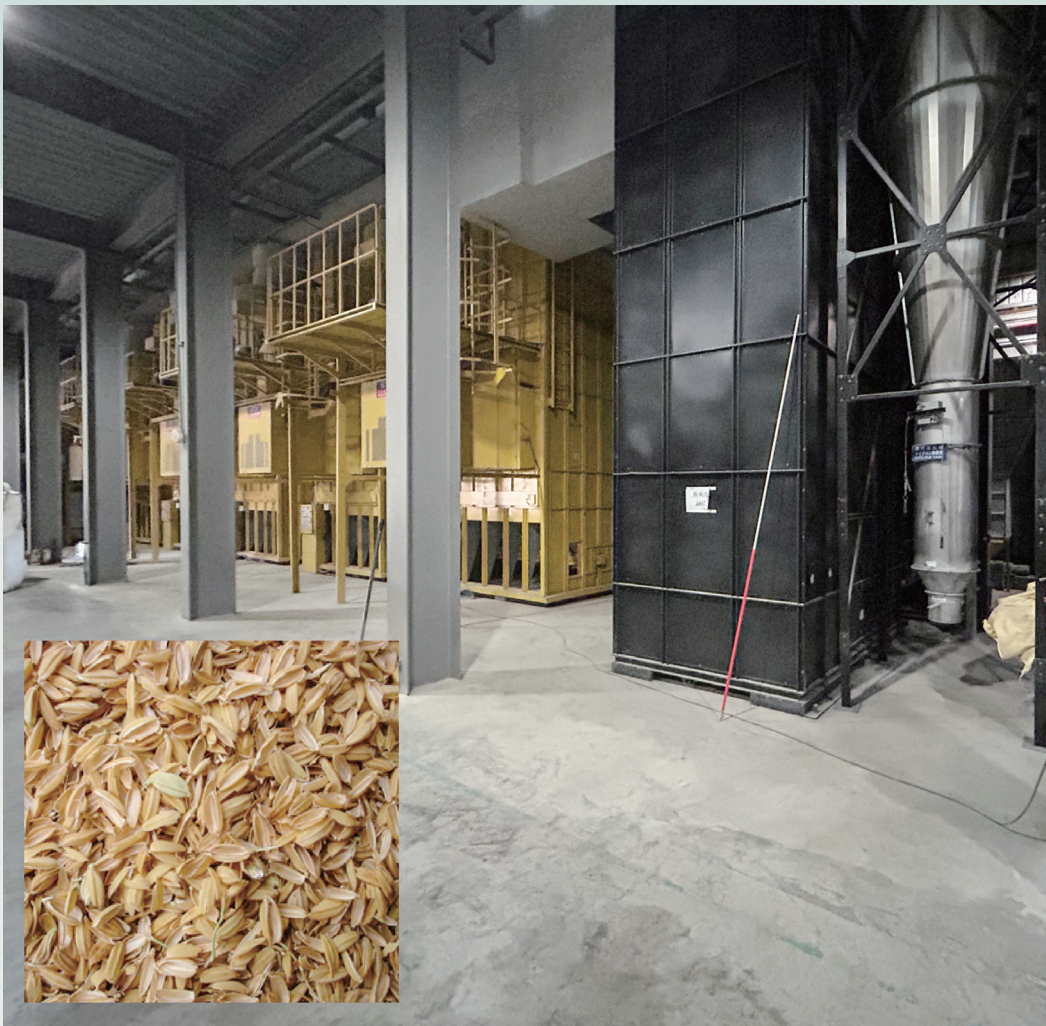
### (四) 生命周期結果闡釋

依據上一步驟計算出來的產品總碳足跡，可作為同類型產品之間碳排資訊的比較，除了提供消費者作為選擇的誘因外，更可作為未來課徵碳稅碳費、碳權交易、企業碳抵換的重要依據。而產品生命周期各階段的碳足跡，更可供生產者瞭解排放最高的階段(稱為熱點Hot Spot)，並可優先針對熱點進行減碳策略的擬定，以因應未來淨零碳排的全球目標。

## 【農產品的碳足跡】

產品碳足跡的評估，早在20世紀中葉即開始，然而，農產品的碳足跡直至近年才較為常見，這是由於農產品的生命週期中，田間栽培階段不管是在碳足跡的占比與生命週期時間長度都相當高，然而田間栽培階段卻受到氣候、土壤、栽培品種、栽培管理等各種不確定因素的影響，導致不易進行準確且有效率的碳排調查。近年由於減碳意識抬頭，加上調查技術進步，如大數據庫概念導入、新測量儀器與估算軟體的發明，甚至AI人工智慧技術的結合，顯著提升農產品碳足跡評估的質與量。目前許多常見的農產品皆已完成碳足跡資訊的建立，包括農糧作物的稻米、小麥、玉米及大豆。

稻米是臺灣栽培面積最大，也是臺灣最重要的糧食作物，年栽培面積兩期作共計24萬公頃，經計算，每公斤白米生命週期的碳足跡約為1.4-2.5公



稻穀烘乾機應用粗糠作為燃料，減少燃油消耗，達到減碳效果

斤二氧化碳當量，其熱點在田間栽培階段，約占總碳足跡的60-70%，主要原因在水田的湛水環境下導致的土壤甲烷大量排放，以及所施用的化學氮肥，其製造時高溫高壓所需的能源消耗之碳排，除了田間栽培階段，烘乾碾米階段則是其次的熱點，稻米收穫後需要將鮮穀烘乾至水分含量13-14%，再進行碾米、選別與包裝，此階段消耗的能源將貢獻碳排。

相較稻米，以旱田方式生產的黃豆、小麥及玉米，由於沒有水田甲烷的排放，此3種作物的田間碳排顯著低於稻米，黃豆、小麥及玉米之產地國的碳足跡，每公斤穀物僅有0.3、0.7、0.6公斤二氧化碳當量，然而，臺灣所需的黃豆、小麥及玉米大多來自進口，以主要進口國美國與巴西計算，光是陸運加上海運的碳足跡，每公斤穀物就高達0.8公斤二氧化碳當量，加總後，「黃、小、玉」的每公斤碳排高達1.1-1.5公斤二氧化碳當量，相較國產雜糧徒有價格優勢卻不具低碳的優勢。

## 【農產品生產過程如何減碳】

農產品的碳足跡資訊建立後，最重要的意義在於依此進行減碳策略的擬定，以下就數項可能的減碳方式進行介紹：

### (一) 在地生產與消費

由本文前述可知，除稻米外的大宗穀物主要碳足跡熱點在運輸階段，因此若採用臺灣在地生產的農產品，直接減少10,000公里以上海運的食物里程，除去在地陸運輸約0.1公斤二氧化碳當量，在地生產者每公斤穀物節約超過0.7公斤二氧化碳當量的碳足跡，不只可以貢獻減碳的效益，更維持食物本身的新鮮度，提升食品品質與安全性。

### (二) 合理化施肥

肥料製造是農產品碳足跡的熱點之一，然而農民為求高產常有過量施肥的情形，因此若能依作物生長狀況，給予適量的肥料，除了減少肥料製造的碳足跡，也避免過多的肥料在田間轉變為氧化亞氮再加劇碳排，再者也可節約肥料購買成本與施用的人工成本，以及土壤劣化與環境污染等問題。研究指出，合理化施肥可節約20%以上的氮肥用量，並帶來直接與間接的碳足跡減降效益達30%以上。另一方面，適時適量的肥料可促進作物植株健康，提升產量與品質。

### (三) 水田甲烷管理

水田是甲烷的主要排放源，據調查，甲烷佔稻米生命周期田間排放階段碳足跡的50%以上，而甲烷的排放主要在於湛水的土壤，水田土壤在浸水缺氧狀態下，促使土壤的甲烷生成菌將土壤有機質分解為甲烷排放。因此，若能改善土壤的含氧量，將可減少甲烷的生成，目前最直接的方式為「間歇灌溉」或「乾濕交替」灌溉，有別於傳統的長時間湛水，可調整為田水自然消退到土壤呈濕潤但有部分通氣的狀況，維持數日再重新灌溉，如此可維持稻株正常生長，也因通氣提高氧氣而減少甲烷排放，依研究顯示，彰化地區採乾濕交替灌溉或間歇灌溉，兩期作分別可減少24%與29%以上的田間甲烷排放。此外，為減少甲烷來源與增加田水溶氧，移除前期作的稻稈或飼養禾鴨游水也被證實有助減降甲烷。

### (四) 收穫後加工之能源管理

農產品於田間收穫後，農糧穀物須進行烘乾與碾製，園藝產品需要冷鏈與保鮮處理，都將耗用可觀的能源並帶來碳排。若能設法降低此階段的能源消耗量或能源的碳排，應可貢獻減碳效益。例如目前已有稻穀烘乾機採用燃油與粗糠(稻殼)混合能源的機型，可減少燃油的消耗，也協助處理碾米副產物粗糠；此外，若在適當時機採收，亦可減少烘乾過程的耗能與碳排，例如在稻穀水分含量低於26%收穫，可較水分含量30%以上收穫者，節約至少10%以上的烘乾碳排；另外，若採用綠能或低碳能源如太陽能、風力，可降低電力的碳排，這些方式都可作為農企業在廠房設計時的參考。

## 【結語】

2050年淨零碳排，是全球各國目前都積極努力的目標，需要各行各業加入減碳的行列，農業為所有產業的基礎，支持各國的國家安全，再者，農業也是受氣候變遷影響首當其衝者，因此農業減碳的重要性無庸置疑，由於農產品碳足跡評估之起步較晚，目前仍有許多尚待進一步加強的空間，未來有待結合跨領域的技術，在維持產量與品質的前提下，進一步有效率且永續地減少碳排放，減緩氣候變遷的衝擊。