

台蕉 5 號生命週期之碳足跡評估

巫金松¹ 洪採梅² 錢玉鳳³ 彭克仲^{4*}

摘要

農田作為重要的陸地生態系統，人們在生產過程中追求產量，經常使用大量肥料、農藥等化學物質，導致農業生產成為溫室氣體排放的重要源頭。本文將以 LCA 方法建立了一套適用於香蕉(台蕉 5 號)生產過程的碳足跡評價模型，並透過盤點台蕉 5 號的碳足跡，找出碳排放的熱點，可進行有效率的達成減碳作為。由碳足跡分析結果可得知碳排放量占比為原料取得階段>製造階段>配送銷售階段。在原料取得階段之排放量最大占比達 41.40%，其中栽培管理為最大熱點。然而，製造階段為碳足跡第二大貢獻熱點，其中又以包裝資材為貢獻熱點，其次碳排放量較高者為配銷階段。

關鍵字：台蕉 5 號、碳盤查、生命週期評價法

¹ 國立屏東科技大學研究總中心講師級研究員

² 高雄市大寮區農會總幹事

³ 國立屏東科技大學農企業管理系碩士

⁴ 國立屏東科技大學農企業管理系教授，通訊作者(kchung@mail.npust.edu.tw)

壹、前言

氣候變化是當前人類社會面臨最為嚴峻的全球環境之一。隨著全球氣候變暖趨勢的不斷加劇，其中溫室氣體(Greenhouse Gases, GHG)排放引起了學術界的廣泛關注與討論。為了緩解氣候變化，減少 GHG 排放，推廣低碳排放技術。自 2008 年起，一些國家不約而同地推出碳市場機制，將商品在生產過程中的溫室氣體排放量以「碳標籤」標示出來，一方面促進消費者低碳消費，另一方面也是應對發達國家利用碳排放設置貿易壁壘的有效手段。

碳標籤制定的前提是獲取商品生產過程中的全部溫室氣體排放，一般採用「碳足跡」來定量評估。「碳足跡」是指企業機構、活動、產品或個人通過交通運輸、食品生產和消費以及生產過程等引起的溫室氣體排放的總和，用二氧化碳當量來表示。農田作為重要的陸地生態系統，人們在生產過程中為了追求產量，經常使用大量肥料、農藥等化學物質，導致農業生產成為溫室氣體排放的重要源頭。然而，農業生產作為與自然環境關係是最為密切的產業之一，農業在全球溫室氣體排放中扮演著重要角色。台灣地處亞熱帶地區風土氣候適宜香蕉生產，以鮮食品種之華蕉系香蕉面積最廣，其中以「北蕉」、「寶島蕉」及「玉山蕉(台蕉 5 號)」等為代表，分布在中南部及東部地區，又以高雄、屏東縣市為主要產區。

本文以香蕉為研究標的，進行生產階段各項能源、資材投入、運輸等盤點，以計算碳排放量。碳足跡核算有 3 種方法，其中以生命週期評價法(Life Cycle Assessment; LCA)最廣為學者所採用的評估法。Gian 等(2009)應用 LCA，評估了稻米從稻田生產到市場銷售整個產業鏈的碳足跡，為了解義大利水稻生態分布提供了一個有效工具。C. Suwam 和 T. Somjai (2022)碳足跡分析泰國 Prachinburi 省的香蕉耕作上環境熱點最重要的是減少肥料使用。Eniclc Aovanes and Anna K. S. (2013)利用 LCA 方法，評估 Ecuadorian 傳統耕作方式的農場和有機農場的香蕉碳足跡分別為 302g 和 249g CO₂e/kg，而 FAO (2017)分析 Costa Rica 的 Cavendish 香蕉碳足跡為 220g CO₂e/kg。因此，本文基於 LCA 方法建立了一套適用於香蕉(台蕉 5 號)生產過程的碳足跡評價模型，並透過盤點香蕉的碳足跡，找出碳排放的熱點，可進行有效率的達成減碳作為。

貳、研究方法

一、生命週期評估與碳足跡

碳足跡核算方法主要有投入產出法、生命週期評價法，以及將投入產出法和生命週期法相結合的混和生命週期法等三種方法。投入產出法是一種自上而下的分析方法，適用於行業等宏觀系統的碳足跡核算，無法獲得某一具體產品的碳排放量，且計算使用的統計數據更新速度慢，影響結果的可信度。生命週期評價法則採用自下而上的方法計算碳足跡，適用於微觀領域，目前在農作物碳足跡核算研究中應用十分廣泛(張潔明等，2023)。

生命週期評價法(Life Cycle Assessment; LCA)起源於 20 世紀中葉，原是為了提高能源的利用效率，進而發展出此評估方式來進行能源使用的分析。然而，隨著時代的演進，環境保護的觀念漸漸發展且受到重視，生命週期評價法逐漸受到重視，在 1993 年正式納入國際標準組織(International Organization for Standardization, ISO)14000 系統之內。依照 ISO 14040 的規範，「生命週期評價」是指對產品從原料生產、加工、包裝、運輸，以至於後段的上架、販售、使用以及最後的廢氣處理等所有過程(即生命週期)，進行整個過程中對於環境的影響評估，其評估面向包括資源使用、人類健康與生態的影響(吳以健、盧虎生，2010)。

一般而言，生命週期評價法之流程則分為以下四項：(1)目標與範圍定義(Goal and Scope Definition)；(2)生命週期盤查分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI)；(3)生命週期衝擊評估(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)及(4)生命週期闡釋(Life Cycle Interpretation)。也就是藉由定義(目的與範圍)、調查、評估與結果闡釋，將產品之生命過程對環境之影響得到詳細的分析。期評估層面包含：能源消耗、水資源使用、全球化影響潛勢、臭氧破壞潛勢、酸雨影響潛勢、優養化潛勢，與光化學污染潛勢等方面。各評估層面皆有其各自的調查對象、運算方式及表示單位，例如全球暖化潛勢方面，將溫室氣體(包括二氧化碳、甲烷與氧化亞氮)調查的結果，藉由相較於二氧化碳之暖化衝擊能力進行單位當量換算，甲烷暖化能力為二氧化碳之 23 倍，氧化亞氮則是 296 倍，再整合以上結果最後統一以二氧化碳當量，亦即碳足跡(Carbon Footprint)之形式呈現(吳以健、盧虎生，2010)。然而，重要的是生命週期評價分析除了評估各產品生產的環境衝擊外，更可積極地篩選出影響此衝擊的關鍵步驟，進而修正關鍵步驟以達到低碳生產的目標。

依據 PAS 2050 標準，對產品生命週期內的溫室氣體(GHG)排放做量化規定，產品的碳足跡可採用兩種評價模式，分別為「從商業到商業(B2B)模式」及「從商業到消費者(B2C)模式」。由於本文盤查對象為香蕉農場的生產鮮食台蕉 5 號，並非直接被消費者使用，故不存在食用與廢棄階段。因此，本研究的研究對象採 B2B 評價模式。

二、香蕉碳足跡盤查範疇與系統邊界

(一)產品選擇

香蕉(Banana)之學名為 *Musa sapientum* L.，別名為甘蕉、香牙蕉，屬於芭蕉群(Scitamineae)芭蕉科(Musaceae)之大型多年生的草本植物，其起源於東南亞，種植於熱帶或亞熱帶地區，目前遍布於 130 多個國家/地區，為世界重要之水果作物或糧食作物(Aurore et al., 2009)。臺灣種植香蕉品種有北蕉、仙人蕉、台蕉 1 號、台蕉 2 號、台蕉 3 號、寶島蕉(新北蕉)、台蕉 5 號(玉山)、台蕉 6 號(玉豐)、台蕉 7 號(玉泉)等。目前最受蕉農廣泛種植的是台蕉 5 號，主要特徵為其株型及果實風味除保留了傳統「北蕉」的特質以外，同時具中抗香蕉黃葉病的能力，廣受中南部蕉農喜愛種植，為外銷主力品種之一。

台蕉 5 號之親本為台蕉 3 號，來源株系為北蕉，於 2007 年申請抗病優良新品種，審查通過命名為台蕉 5 號，又俗稱玉山。新植株高約 250-280 cm，假莖莖周約為 69-72 cm，葉片呈橢圓形，葉形比約為 2.3。果房呈圓柱形，果手數及果指形狀具有北蕉特性。在 18°C 低溫催熟條件下，香蕉轉色均勻，果皮呈金黃色，果肉香甜，風味品質及口感均佳，櫥架壽命約 4.5 天。對香蕉黃葉病具中抗性，然而在排水不良、砂質壤土及過量施殺草劑之蕉園，蕉株發育較差，抗病力亦有降低的情況。

(二)地理位置界線

本文以台蕉 5 號為對象進行生產碳足跡之計算，盤查範圍從原料階段至製造等階段，並包含包裝資材及運輸資訊等。本次盤查場域地點為栽培地點(屏東縣內埔鄉東勢村)及包裝地點(保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社)，配合香蕉生產期間，盤查時間為 2022 年 2 月 27 日至 2022 年 11 月 10 日；香蕉品種為台蕉 5 號，盤查栽培面積約 0.2 公頃，本次產量約為 10,640 公斤。

(三)生命週期界線研究

本次的盤查方法乃運用生命週期評價法(LCA)。根據研究邊界的評價模

式，進行系統邊界的劃分，遵循 5%取捨原則(佔生產過程總量 5%以上的原料或能源消耗相關的生命週期不可忽略)，並以 LCA 與 CFP-PCR 的生命週期劃分，制定了包括了原料取得、製造、配送銷售及廢棄處理等四個主要階段。盤查的範疇從原料階段直到製造階段(B2B)，並包含包裝資材及運輸資訊等相關資訊。透過繪製香蕉產品的生命週期流程圖(圖 1)，作為估算產品碳排放量的依據。

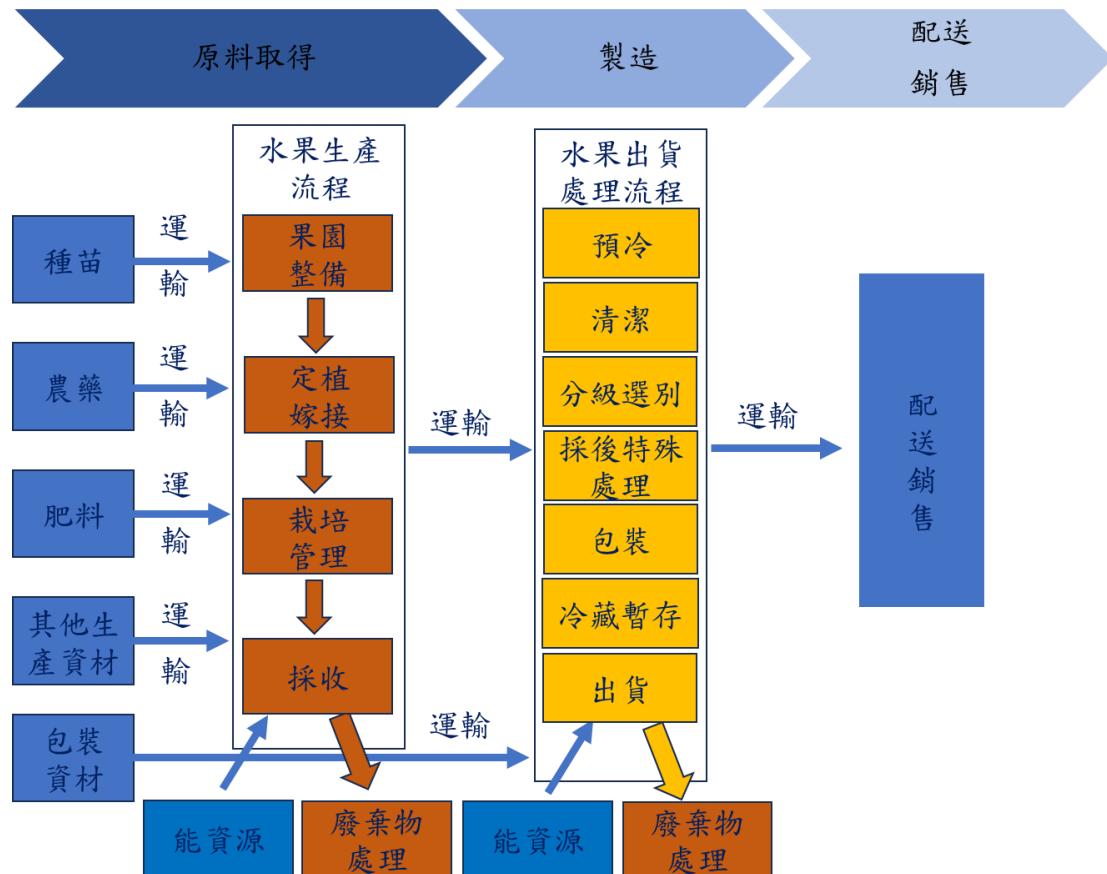


圖 1、香蕉盤查生命週期流程圖

資料來源：本研究彙整

參、台蕉 5 號生命週期碳足跡盤查分析

一、數據收集與確認

本研究碳足跡盤查活動數據皆由農場主提供。將收集到的生命週期流程各階段的數據進行量化和換算，以求得二氧化碳的排放量。香蕉農場場址位於屏東縣內埔鄉東勢村(22°38' 30.5"N 120°33' 49.9"E)，種植台蕉 5 號(玉山蕉)，種植至採收日期為 2022 年 2 月 27 日到 2022 年 11 月 10 日，農

場主提供香蕉栽培作業曆如附表 1。

(一)原料(栽培)情境

依農場主提供之香蕉田間栽培作業曆及於栽培期間訪視之結果，評估下列幾項：

1. 栽培管理

統計在原料階段下，蒐集酒精消耗、農藥及肥料等非能資源、運輸及廢棄項目等，用於作物栽培之活動數據。

2. 能資源使用

(1)灌溉用水及生產香蕉組培苗等，共用電量為 180.00 度。

(2)農機具操作等，共用汽油為 9.00 公升、柴油為 10.00 公升及潤滑油為 0.34 公斤。

3. 運輸

因運輸計算公式關係，需分開計算，各項情境如下：

(1)農場主至九如財團法人台灣香蕉研究所購買組培苗。

(2)農場主至興農股份有限公司內埔營業所購買所需農藥。

(3)農場主至內埔農會購買肥料。

(4)農場主至興農股份有限公司內埔營業所，購買香蕉牛皮套袋及內埔 99 五金百貨內埔店購買塑膠繩 2 捲。

(5)農場主將採收之 10,640 公斤香蕉送至保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社。

(6)購買農機具操作所需之柴油、汽油及潤滑油。

4. 廢棄

(1)栽培至採收過程中約產生 0.80 公斤，如塑膠繩等可燃垃圾。

(二)製造(包裝)情境

農場主將可送至包裝場之香蕉採收後，送達保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社(22°37' 10.3"N 120°34' 01.0"E)，進行包裝，保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社每年進行香蕉包裝約為 1,600 公噸。依包裝提供之香蕉出貨流程及栽培期間訪視之結果，評估下列幾項：

1. 能資源使用

(1)在處理 10,640 公斤的香蕉過程中，共用電量為 916.90 度。

2. 運輸

因運輸計算公式關係，需分開計算，各項情境如下：

(1)從永豐餘購買紙箱。

- (2)從台中陽光塑膠行購買內襯及果實套。
- (3)從彰化福泰開發購買明礬。
- (4)從台灣菸酒公司屏東酒廠購買酒精。
- (5)從保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社配送產品至不同的配送銷貨點。

3. 廢棄

- (1)在處理 10,640 公斤的香蕉過程中，產生約為 91.02 公斤之可燃垃圾。
- (2)在處理 10,640 公斤的香蕉過程中，產生約為 665.00 公斤之不符合之果品，由養豬人戶載走餵養家畜。

二、排放係數選用

以排放係數法作為本次調查之查證方法。利用各種原物料、能源等在生產過程中的使用量，並乘以特定的排放係數，來計算出二氧化碳的排放量，以算出產品碳足跡。

排放係數法公式為： $CO_2e = \sum \{ \text{活動數據} \times \text{排放係數} \times \text{GWP} \}$ 。

排放係數方面，以參考環境部所公告的產品碳足跡資訊網的數據，同時也會參考文獻回顧和其他數據庫等來獲得相關資料(如表 1)，並依公式計算排放強度(如表 2)。

表 1、各活動數據之排放係數 (kg / CO_{2e}) 及資料來源

階段別	各階段品項	原物料/製成名稱	活動數據名稱	排放係數 kgCO ₂ e		排放係數 來源
原料取得	種苗	組培苗	生產-酒精消耗	2.57	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-乙醇
			電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡
			運輸	7.39	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-自用小貨車(汽油)
	農藥	農藥	運輸	7.39	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-自用小貨車(汽油)
			殺菌劑	3.90	公斤	Diacono <i>et al.</i> , 2019
			殺蟲劑	5.10	公斤	Diacono <i>et al.</i> , 2019
			殺草劑	6.30	公斤	Diacono <i>et al.</i> , 2019
	肥料	肥料	運輸	7.39	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-自用小貨車(汽油)
			氮要素	1.80	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-硝酸銨鈣(肥料用)
			磷要素	0.85	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-過磷酸鈣
			鉀要素	0.38	公斤	Diacono <i>et al.</i> , 2019
	其他生產資材	牛皮套袋+塑膠繩	運輸	7.39	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-自用小貨車(汽油)
			牛皮套袋	1.08	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-牛皮紙
			塑膠繩	2.01	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-聚丙烯(PP)
	果園整備	整地	柴油(曳引機)	3.38	公升	環保署產品碳足跡資料庫-柴油(於公路運輸移動源使用)
		作畦	汽油(中耕機)	3.01	公升	環保署產品碳足跡資料庫-車用汽油(於移動源使用)
	定植嫁接	鑽洞種植	汽油	3.01	公升	環保署產品碳足跡資料庫-車用汽油(於移動源使用)
			二行程油	1.09	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-潤滑油(未燃燒)
	栽培管理	病蟲草害防制	汽油	3.01	公升	環保署產品碳足跡資料庫-車用汽油(於移動源使用)
			二行程油	1.09	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-潤滑油(未燃燒)
		鉅管設置	汽油	3.01	公升	環保署產品碳足跡資料庫-車用汽油(於移動源使用)
			二行程油	1.09	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-潤滑油(未燃燒)
		油品購買	運輸	7.39	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-自用小貨車(汽油)
灌溉		電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡	
田區廢棄物	廢棄物處理	運輸	1.31	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-以柴油動力垃圾車清除運輸一般廢棄物	
		焚燒	360.00	公噸	環保署產品碳足跡資料庫-廢棄物焚化處理服務(岡山垃圾焚化廠)	

資料來源：本研究彙整

表 1、各活動數據之排放係數 (kg / CO₂e) 及資料來源 (續)

階段別	各階段品項	原物料/製成名稱	活動數據名稱	排放係數 kgCO ₂ e		排放係數 來源	
製造	採收	採收後運輸	運輸	7.39	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-自用小貨車(汽車)	
	預冷	低溫冷藏	電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡	
	清潔、分級選別	清洗	明礬	6.17	公斤	交通部公路總局蘇花公路改善工程處(2017)	
			明礬運輸	0.13	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-營業大貨車(柴油)	
	採收特殊處理	低溫冷藏	電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡	
			乙烯(酒精)	2.57	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-乙醇	
		催熟	乙烯運輸	0.13	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-營業大貨車(柴油)	
	包裝	包裝資材	運輸	0.13	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-營業大貨車(柴油)	
			紙箱	1.19	平方公尺	環保署產品碳足跡資料庫- AB楞紙箱(3層2浪)	
			紙箱內襯(聚乙烯袋)	1.90	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-低密度聚乙烯	
			果實套(聚丙烯膜)	2.01	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-聚丙烯	
	冷藏暫存	低溫包裝區	電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡	
	出貨區	低溫冷藏	電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡	
	採收特殊處理	低溫冷藏	電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡	
			催熟	乙烯(酒精)	2.57	公斤	環保署產品碳足跡資料庫-乙醇
		催熟	乙烯運輸	0.13	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-營業大貨車(柴油)	
	場內	辦公室及廠區內其他耗電	電力	0.59	度	環保署產品碳足跡資料庫-電力碳足跡	
	廢棄物	廢棄物處理	不符品質之果	餵養豬隻-運送	0.13	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-營業大貨車(柴油)
			運輸	1.31	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫-以柴油動力垃圾車清除運輸一般廢棄物	
	配送銷售	出貨	低溫運送-內銷	運輸各種能源消耗	360.00	公噸	環保署產品碳足跡資料庫-廢棄物焚化處理服務(岡山垃圾焚化廠)
				1.55	延噸公里	環保署產品碳足跡資料庫- 3.49噸低溫貨車服務	

資料來源：本研究彙整

表 2、各活動數據之活動量及排放強度 (kg / CO_{2e})

階段別	各階段品項	原物料/製成名稱	活動數據名稱	資料來源	排放係數 kgCO ₂ e		活動量	排放強度 kgCO _{2e}
原料取得	種苗	組培苗	生產-酒精消耗	香蕉試驗所	2.57	公斤	195.00	501.15
			電力	香蕉試驗所	0.59	度	884.57	521.90
			運輸	google map	7.39	延噸公里	1.90	14.02
	農藥	農藥	運輸	google map	7.39	延噸公里	0.01	0.03
			殺菌劑	農民	3.90	公斤	2.60	10.14
			殺蟲劑	農民	5.10	公斤	0.42	2.16
			殺草劑	農民	6.30	公斤	1.60	10.08
	肥料	肥料	運輸	google map	7.39	延噸公里	0.37	1.76
			氮要素	農民	1.80	公斤	14.34	25.82
			磷要素	農民	0.85	公斤	7.17	6.07
			鉀要素	農民	0.38	公斤	28.69	10.90
	其他生產資材	牛皮套袋+塑膠繩	運輸	google map	7.39	延噸公里	0.09	0.64
			牛皮套袋	農民	1.08	公斤	2.00	2.16
			塑膠繩	農民	2.01	公斤	42.00	84.42
	果園整備	整地	柴油(曳引機)	農民	3.38	公升	10.00	33.80
		作畦	汽油(中耕機)	農民	3.01	公升	1.00	3.01
	定植嫁接	鑽洞種植	汽油	農民	3.01	公升	1.00	3.01
			二行程油	農民	1.09	公斤	0.02	0.02
	栽培管理	病蟲草害防制	汽油	農民	3.01	公升	6.00	18.06
			二行程油	農民	1.09	公斤	0.27	0.29
		銼管設置	汽油	農民	3.01	公升	1.00	3.01
			二行程油	農民	1.09	公斤	0.05	0.05
		油品購買	運輸	google map	7.39	延噸公里	0.09	0.66
灌溉		電力	農民	0.59	度	180.00	106.20	
田區廢棄物	廢棄物處理	運輸	google map	1.31	延噸公里	0.04	0.06	
		焚燒	農民	360.00	公噸	0.00	0.29	

資料來源：本研究彙整

表 2、各活動數據之活動量及排放強度 (kg / CO_{2e}) (續)

階段別	各階段品項	原物料/製成名稱	活動數據名稱	資料來源	排放係數 kgCO ₂ e		活動量	排放強度	
製造	採收	採收後運輸	運輸	google map	7.39	延噸公里	29.79	220.16	
	預冷	低溫冷藏	電力	包裝廠	0.59	度	155.92	91.99	
	清潔、分級選別	清洗	明礬	包裝廠	6.17	公斤	4.55	28.08	
			明礬運輸	包裝廠	0.13	延噸公里	138.70	18.17	
	採收特殊處理	低溫冷藏	電力	包裝廠	0.59	度	233.88	137.99	
		催熟	乙烯(酒精)	包裝廠	2.57	公斤	3.42	8.80	
			乙烯運輸	包裝廠	0.13	延噸公里	3.21	0.42	
	包裝	包裝資材	運輸	google map	0.13	延噸公里	3.62	0.47	
			紙箱	包裝廠	1.19	平方公尺	146.83	174.72	
			紙箱內襯(聚乙烯袋)	包裝廠	1.90	公斤	1.96	3.72	
			果實套(聚丙烯膜)	包裝廠	2.01	公斤	4.85	9.74	
		低溫包裝區	電力	包裝廠	0.59	度	233.88	137.99	
	冷藏暫存	低溫冷藏	電力	包裝廠	0.59	度	77.96	46.00	
	出貨區	低溫	電力	包裝廠	0.59	度	77.96	46.00	
	採收特殊處理	低溫冷藏	電力	包裝廠	0.59	度	233.88	137.99	
		催熟	乙烯(酒精)	包裝廠	2.57	公斤	3.42	8.80	
			乙烯運輸	包裝廠	0.13	延噸公里	3.21	0.42	
	場內	辦公室及廠區內其他耗電	電力	包裝廠	0.59	度	137.30	81.01	
	廢棄物	廢棄物處理	不符品質之果	餵養豬隻-運送	包裝廠	0.13	延噸公里	1.97	0.26
			運輸	google map	1.31	延噸公里	4.97	6.51	
包裝廠				360.00	公噸	0.09	32.77		
配送銷售	出貨	低溫運送-內銷	運輸各種能源消耗	google map	1.55	延噸公里	500.75	776.15	

資料來源：本研究彙整

三、台蕉 5 號碳足跡清單分析與熱點分析

台蕉 5 號碳排放量盤查可先區分原料、製造及配送銷售等三大項目，再區分為各小項目來進行碳排放量加總及計算總碳排放量，各階段基本上可分為能資源使用、運輸及廢棄等項目。能資源為氣、油、蒸氣、水、煤炭及電力等項目加總得知；運輸為各大項所有能資源及各項資材運輸加總得知；廢棄為各大項目中，不可燃垃圾處理所計算的碳排放量加總得知。另外，將原料階段中非能資源使用、運輸及廢棄等使用之資材另外加總為栽培管理，以及將製造階段中非能資源使用、運輸及廢棄等使用之資材另外加總為包裝資材，以利後續評估。

本研究將依每 1.0 公斤台蕉 5 號進行碳足跡計算，根據表 3 計算結果可以發現原料取得階段為最大宗之碳排放階段，約佔 41.40%；其次為製造階段，約佔 33.43%；排放量最低為運輸階段，約佔 25.16%。

在原料取得階段，栽培管理項目會產生 $0.06 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 50.62%；能資源項目會產生 $0.06 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 47.94%；運輸項目會產生 $1.82 \times 10^{-3} \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 1.42%；廢棄項目會產生 $0.003 \times 10^{-3} \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 0.02%。

在製造階段，包裝資材項目會產生 $0.05 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 52.47%；能資源項目會產生 $0.02 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 21.83%；運輸項目會產生 $0.02 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 22.52%；廢棄項目會產生 $3.29 \times 10^{-3} \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度，約佔該階段的 3.18%。

在配送銷售階段，僅有運輸項目會產生 $0.08 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{kg}$ 的碳排放強度。

針對能資源中的電力使用進行分析，根據圖 2 結果可以看到電力使用主要在原料取得階段及製造階段。原料取得階段中，組培苗繁殖使用 521.90 度的電力，約佔總用電量的 44.64%；香蕉栽培灌溉使用 106.20 度的電力，約佔總用電量的 9.08%。

製造階段中，台蕉 5 號採後冷鏈過程使用 459.96 度的電力，約佔總用電量的 39.34%；非冷鏈過程中所使用的電量約為 81.01 度，約佔總用電量的 6.93%。

表 3、每 1.0 公斤台蕉 5 號碳排放量分配比例表

階段名稱	原料取得階段				製造階段				配送銷售階段		
	栽培管理	能資源使用	運輸	廢棄	包裝資材	能資源使用	運輸	廢棄	能資源使用	運輸	廢棄
碳排放量 (10^{-3} kg CO _{2e} / kg)	64.78	61.36	1.82	0.03	54.23	22.56	23.28	3.29	0.00	77.81	0.00
品項在各階段百分比 (%)	50.62 %	47.94 %	1.42 %	0.02 %	52.47 %	21.83 %	22.52 %	3.18 %	0.00 %	100.00 %	0.00 %
各階段總量 (kg CO _{2e} / kg)	0.13				0.10				0.08		
百分比 (%)	41.40%				33.43%				25.16%		
總碳排放量 (kg CO _{2e} / kg)	0.30										

資料來源：本研究計算

各階段電力

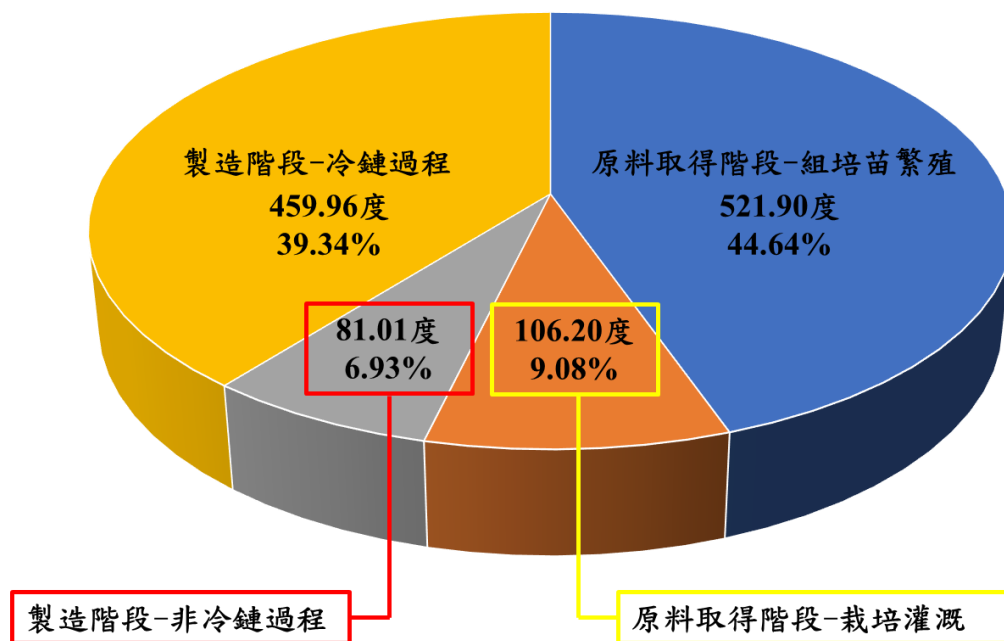


圖 2、階段電力消耗及佔總用電量百分比

資料來源：本研究彙整

綜合上述結果，可得台蕉 5 號從原料至銷售配售到第一個配送銷售點，分析結果可知每 1.0 公斤香蕉，會產生約 0.30 kg CO_{2e} / kg 的碳足跡。

肆、結論

本研究針對台蕉 5 號進行碳足跡盤查分析，由碳足跡分析結果可得知碳排放量占比為原料取得階段>製造階段>配送銷售階段。在原料取得階段之排放量最大占比達 41.40%，其中栽培管理為最大熱點。然而，製造階段為碳足跡第二大貢獻熱點，其中又以包裝資材為貢獻熱點，其次碳排放量較高者為配銷階段。

碳足跡計算，是衡量組織及產品可如何達到下一個碳排放降低的目標依據，依本研究台蕉 5 號碳盤查結果，提出各項目能降低碳排放發生之建議。

一、原料取得階段

- (一)採用更環保的種植方式，如有機種植，減少化肥和農藥的使用。
- (二)優化栽培管理，使用節水技術和提高能源效益，以減少碳排放。
- (三)考慮使用可再生能源，如太陽能或風能，來替代傳統的能源使用。

二、製造階段

- (一)包裝資材的設計低碳化，以降低資材的使用量和提高可回收性。
- (二)採用綠色製造流程，如減少能源和水的使用，使用環保材料等。
- (三)提高製造過程中的能源效率，如導入高效能的生產設備和技術。

三、運輸階段

- (一)促進物流區域化，減少運輸距離和提高運輸效能。
- (二)採用更環保的運輸方式，如使用電動車輛或綠色交通選項。
- (三)尋找合作夥伴以實現更有效的運輸和配送系統。

四、廢棄處理

- (一)推動垃圾減量和回收計畫，減少不可燃垃圾的產生。
- (二)使用更環保的廢棄處理方法。

各項目均可往低碳耕作方式的目標邁進，然而，冷鏈技術作為可延長蔬果保鮮期之重要技術，是否會增加碳排或是存在碳減量空間之相關研究，未來將會十分重要。

參考文獻

一、中文部分

- 王毅勇、余冰、田有、向一桓，2023，「三江平原水稻生產的碳足跡評價」，*土壤與作物*，12(1)：10-17 頁。
- 江秀娥、蔡政諺、張采蘋，2016，「台灣落花生田間生產碳足跡」，*農業試驗所技術服務季刊*，(106)：19-24 頁。
- 吳以健、盧虎生，2010，「稻米生產之生命週期與碳足跡環境影響評估」，*農政與農情*，(212)：66-68 頁。
- 李曉鵬、孫曉峰、郭逸飛、張琳，2011，「我國典型果蔬汁產品生命週期碳足跡探析」，*中國輕工業清潔生產中心*，14(10)：3-8 頁。
- 唐維、陳億乘、劉子銘、王逸琦、周崇熙，2013，「簡訊：畜產品碳足跡之調查：以臺大鮮乳為例」，*台灣獸醫誌*，39(1)：66-72 頁。
- 張明潔、張京紅、李文韜、張亞傑、林紹伍，2023，「中國農作物碳足跡核算研究概述」，*中國農業資源與區劃*，44(5)：148-154 頁。
- 農業部，2017，「香蕉主題館」，<https://kmweb.moa.gov.tw/subject/index.php?id=20>。

二、外文部分

- Blengini, G. A., and Busto, M. (2009), "The Life Cycle of rice: LCA of alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy)," *Journal of environmental management*, 90(3): 1512-1522.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016), "Carbon footprint of the banana supply chain," <https://www.fao.org/word-banana>.
- Roibás, L., Elbehri, A., and Hospido, A. (2016), "Carbon footprint along the Ecuadorian banana supply chain: Methodological improvements and calculation tool," *Journal of Cleaner Production*, 112: 2441-2451.
- Suwan, C., and Somjai, T. (2022), "Carbon footprint analysis of the cultivated banana cultivation in Prachinburi Province, Thailand," *E3S Web of Conferences*, 355(02002):1-6.
- Vinyes, E., Gasol, C. M., Asin, L., Alegre, S., & Muñoz, P. (2015), "Life Cycle Assessment of multiyear peach production," *Journal of Cleaner Production*, 104: 68-79.

附錄

附表 1、農場田間栽培作業曆及可能之排放源

日期	作業種類/項目	可能之排放源
2022/02/27	以大馬力級曳引機整地。	柴油、潤滑油
	以中耕管理機進行作畦。	汽油、潤滑油
2022/03/01	至九如香蕉研究所運送組培苗 390 株。	酒精、電力、運輸
	以鑽土器進行土壤鑽洞種植。	汽油、潤滑油
2022/03/01 至 2022/03/08	澆水(水溝溝灌)。	電力
2022/03/17	至興農股份有限公司內埔營業所購買所需農藥。	運輸
	以機具進行除草及施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲劑、殺草劑
2022/03/20	以機具施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲劑、殺草劑
2022/03/24	至內埔鄉農會購買 5 包肥料，每包 40 公斤。	運輸
	澆水(水溝溝灌)。	電力
	人工肥料施用。	氮、磷、鉀元素
2022/04/03	澆水(水溝溝灌)。	電力
2022/04/10	以機具施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲劑、殺草劑
2022/04/12	人工病株及不良發育之除去及補植 (23 株)。	無
	澆水(水溝溝灌)。	電力
2022/04/22	澆水(水溝溝灌)。	電力
	人工肥料施用。	氮、磷、鉀元素
2022/05/07	人工園區整理。	無
	澆水(水溝溝灌)。	電力
2022/05/13	以機具進行除草及施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲

		劑、殺草劑
2022/05/29	澆水(水溝溝灌)。	電力
	人工肥料施用。	氮、磷、鉀元素
2022/06/30	至興農股份有限公司內埔營業所購買香蕉牛皮套袋 400 入(總重 42 公斤)。	運輸
	至興農股份有限公司內埔營業所購買塑膠繩 2 捲(總重 800 克、總長 150 公尺)。	運輸
	以鑽土器進行土壤鑽洞，以利插立防風支柱(鉅管)(鉅管直徑與長度為 3.81 公分x2.1 公尺)。	汽油、潤滑油
	人工綁繩固定香蕉。	塑膠繩
2022/07/02	澆水(水溝溝灌)。	電力
	以機具進行施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲劑、殺草劑
2022/07/04	人工除側芽及園區整理與綁繩固定香蕉。	塑膠繩
2022/07/05	人工肥料施用。	氮、磷、鉀元素
2022/07/22	澆水(水溝溝灌)。	電力
2022/07/31	澆水(水溝溝灌)。	電力
	以機具進行除草及施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲劑、殺草劑
2022/08/10	澆水(水溝溝灌)。	電力
	人工肥料施用。	氮、磷、鉀元素
2022/08/14	以機具進行施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲劑、殺草劑
2022/08/25	人工除萌及園區整理，綁繩固定香蕉。	塑膠繩
2022/08/31	人工進行香蕉果房整把、疏果、套袋。	牛皮套袋
2022/09/06	澆水(水溝溝灌)。	電力
	人工肥料施用。	氮、磷、鉀元素
2022/09/07	人工進行香蕉果房整把、疏果、套	套袋

	袋。	
2022/09/14	人工進行香蕉果房整把、疏果、套袋。	套袋
	人工綁繩固定香蕉。	塑膠繩
	人工除萌及留萌。	無
2022/09/15	以機具進行除草及施用防治資材。	汽油、潤滑油、殺菌劑、殺蟲劑、殺草劑
2022/10/23	成熟度適宜之果實，以人工採收方式，載至保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社。	運輸
2022/10/31	成熟度適宜之果實，以人工採收方式，載至保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社。	運輸
2022/11/02	人工園區整理。	無
	澆水(水溝溝灌)。	電力
2022/11/10	成熟度適宜之果實，以人工採收方式，載至保證責任屏東縣迦登果菜生產合作社。	運輸

資料來源：本研究彙整

Evaluation on Carbon Footprint in Life Cycle of Tai-Chiao No.5 Banana

Chin-Sung Wu¹ Tsai-Mei Hung² Yu-Feng Chien³ Ke-Chung Peng^{4*}

Abstract

As vital components of terrestrial ecosystems, farmlands play a crucial role in agricultural production. However, the pursuit of higher yields often leads to the extensive use of fertilizers, pesticides, and other chemical substances, turning agricultural practices into significant contributors to greenhouse gas emissions. This study employs the Life Cycle Assessment (LCA) method to establish a carbon footprint evaluation model tailored for the production process of Taiwan Banana No. 5. By conducting a carbon footprint inventory for this banana variety, the study aims to identify key emission hotspots and propose effective strategies for carbon reduction.

The results of the carbon footprint analysis reveal that the carbon emissions are distributed across different stages of the production process, with the highest contributions observed in the raw material acquisition stage, followed by the manufacturing stage, and then the distribution and sales stage. Specifically, the emissions in the raw material acquisition stage account for the largest proportion at 41.40%, with cultivation management identified as the primary hotspot. The manufacturing stage emerges as the second-largest contributor to the carbon footprint, with packaging materials identified as a significant hotspot. Following closely is the distribution and sales stage with notable carbon emissions.

Key words : Taiwan Banana No. 5, Carbon Inventory, Life Cycle Assessment (LCA)

¹General research service center, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung

²General Manager, Daliao District Farmers' Association

³Master, Department of Agribusiness Management, National Pingtung University of Science and Technology

⁴Professor, Department of Agribusiness Management, National Pingtung University of Science and Technology. Corresponding Author (kchung@mail.npust.edu.tw)