

探討緩效性肥料施用對營養鹽流失量與植體生長之影響

Use of slow-release fertilizer as an alternative strategy to mitigate nutrient loss from farmland

國立臺灣大學生物環境系統工程學系

碩士班研究生

陳梓忻

Tze Shin, Tan

博士班研究生

黃雅甄

Ya-Zhen Huang

教授

范致豪

Chihhao Fan*

摘 要

農業非點源污染的主要來源之一為農業肥料施用後之營養鹽流失，就農業上的耕作習慣而言，農民為了確保作物的產量，往往會施用過量的肥料，期望能確保作物的生長。然而營養鹽無法有效的被植體吸收或保存在土壤時，會隨著降雨流入地表水體或滲透進入地下水，造成水體污染。長期過量的化學肥料施用，更可能衍生土壤酸化、鹽化與水質污染等問題，嚴重可能威脅到環境的生態。非點源污染防治工作推動不易，過往多採用末端處理方法，若能從源頭減量改善非點源污染，便可節省後期去除污染的成本支出。

本研究選定莧菜作為目標作物，於溫室盆栽試驗中，透過探討施用緩效性肥料對營養鹽流失量與植體生長之影響，利用不同種類的肥料與混合比例以找尋最佳的施肥條件。並模擬暴雨時緩效性肥料的分解速率及營養鹽流失的濃度變化，了解爾後農民實際運用在農田時的可行性。根據研究結果顯示，在單一種類肥料施肥的條件下，化學肥料 > 緩效性肥料(減少60%) > 有機肥料(減少80%)。此外，從混合施肥中觀察到的養分損失順序為：20 %化學肥料 + 80 %緩效性肥料(減少70%) > 30 %化學肥料 + 70 %緩效性肥料(減少60%) > 50 %化學肥料 + 50 %緩效性肥料(減少30%)。隨著時間的推移，緩效性肥料的損失逐漸增加，因為在此期間逐漸釋放養分。在暴雨模擬的過程中，發現緩效性肥料會隨著時間的推移，釋放出更多的營養鹽於土壤中。

本研究利用生命週期評估(LCA)探討作物生長過程中使用緩效性肥料對碳足跡及環境的影響。此外，本研究使用 SimaPro 作為農業系統之生命週期評估模擬工具，其結果可比較不同施肥策略之間的差異。本次實驗結合緩效性肥料的使用結果與利弊，期望對爾後農民在農田中的實際運用與施肥策略提供正面影響，除可能提高農業產值，亦能改善環境品質，達經濟與環保雙贏之局面。

關鍵字：農業非點源污染、緩效性肥料、營養鹽流失、莧菜

Abstract

Agricultural non-point source pollution is primarily caused by the loss of nutrients after applying agricultural fertilizers. In terms of agricultural practices, farmers often apply excessive fertilizers to ensure crop yields, hoping to promote crop growth. However, when nutrients cannot be effectively absorbed by plants or retained in the soil, they flow into surface water or seep into groundwater during rainfall, causing water pollution. Long-term excessive use of chemical fertilizers can lead to soil acidification, salinization, and water quality pollution, posing a serious threat to environmental ecology. Controlling non-point source pollution is challenging, as past efforts have mainly focused on end-of-pipe treatments. Reducing pollution at the source could save costs associated with later pollution removal.

This study chose *Amaranthus mangostanus* as the target crop and conducted greenhouse pot experiments to investigate the impact of slow-release fertilizers on nutrient loss and plant growth. Different fertilizers and mixing ratios were used to identify the optimal fertilization conditions. The study also simulated the decomposition rate of slow-release fertilizers during heavy rainfall and the subsequent changes in nutrient loss concentrations to assess their practicality when used in actual farming by farmers. According to the research results, under single fertilizer application conditions, chemical fertilizers > slow-release fertilizers (reduced by 60 %) > organic fertilizers (reduced by 80 %). Furthermore, the observed order of nutrient loss from mixed fertilization was: 20 % chemical fertilizer + 80 % slow-release fertilizer (reduced by 70 %) > 30 % chemical fertilizer + 70 % slow-release fertilizer (reduced by 60 %) > 50 % chemical fertilizer + 50 % slow-release fertilizer (reduced by 30 %). As time passed, the loss of slow-release fertilizers gradually increased due to nutrient release. During the heavy rainfall simulation, it was found that slow-release fertilizers released more nutrients into the soil over time.

A life cycle assessment (LCA) was conducted to determine the carbon footprint and environmental impacts of using slow-release fertilizer in farmland production. The inventory results of various fertilization practices were compared using SimaPro, an LCA tool, to model agricultural systems. This experiment combined the results and pros and cons of using slow-release fertilizers to positively influence farmers' actual use and fertilization strategies in the field, potentially increasing agricultural productivity and improving environmental quality for a win-win economic and environmental protection.

Keywords: Agricultural non-point source pollution, Slow-release fertilizer, Nutrient loss,

Amaranthus mangostanus

一、前言

台灣前期農業發展重視作物的穩定性與提升其產量，因此常使用慣性農法進行作物的種植作業，大量使用價格低廉的化學肥料以補充土壤養分。加上農民對肥料用量的傳統認知產量與肥料用量成正比關係，導致施肥所添加的養分與養分的利用率無法取得平衡。雨季期間，大部分農民選擇增加化學肥料的施用頻率，以補充降雨所導致的營養鹽流失。那些無法被作物吸收之過量營養鹽及農藥，易隨著降雨及灌溉用水所形成的地表逕流與入滲水流入自然水體，造成周遭環境水質污染的問題(Xia et al., 2020)。氮元素作為植物生長所需的元素，複合化學肥料中含大量的氮元素，可補充土壤的氮含量。然而，當土壤的氮儲存量達到飽和，氮元素會通過一系列作用轉化成易揮發的氣態 NH_3 揮發於空氣中。農業非點源污染除傳輸到水體外，亦會造成土壤酸化，對環境與生態帶來嚴重的負面影響(Wu et al., 2021)。

人類活動所造成的全球暖化，加劇了全球氣候變遷的影響。氣候變遷形成極端降雨或乾旱事件，導致農業灌溉用水短缺，土壤肥力流失等問題。如今亦有許多調適策略用於應對氣候變遷對農業永續發展的影響(Malhi et al., 2021)。水作為主要的主要傳輸媒介，在不同的灌溉水量或雨量影響下，對污染物的生成量亦會有影響。根據文獻資料顯示，農業活動所產生的污染物，其傳輸途徑受各類生物性與非生物性因素，如氣候季節、作物種類、土壤質地的影響(Zhao et al., 2023)。

對於這類非點源污染的持續監測與防治策略所需的費用可能與產生的經濟價值無法達到平衡(Liu et al., 2023)。因此，為達到確保農作物的產量不受影響同時減緩農業非點源污染的條件下，應從污染源頭進行控制。通過精準農業，減少種植期間肥料的用量，有效降低農業非點源污染的發生。良好的肥料施用的策略及應用友善環境資材等方法於農業中，已被許多研究證實其可改善農業非點源污染的情形。然而這些技術與方法雖能有效減少肥料中的營養鹽流失，但其於現實農田中施用後的實際效果與研究的狀況不完全相同。經濟成本、穩定性及使用條件限制等皆會對實際應用的結果產生影響，對於不同作物的應用情況仍需藉由實際操作而進行後續評估，後可進行改良以達到維護環境的同時實現產量最大化。

二、研究方法

本研究著重於緩效性肥料的使用效果，此外也將農業中最常使用之化學肥料與有機肥料作為驗條件的設計，其整體架構如圖 1 所示。根據良好農業規範 TGAP 中對於滿足氮元素的用量作為基準，設計 10 組實驗施肥條件。除全量使用單一種肥料(對照組)外，亦混合不同比例之緩效性肥料、化學肥料及有機肥料，以探討作物生長效果最好肥料最佳比例。本實驗使用之化學肥料為台灣肥料股份有限公司的台肥 1 號即溶複合肥料；有機肥料為台灣糖業股份有限公司的台糖田寶 11 號有機質肥料；緩效性肥料為大益農科的綠豹 313。

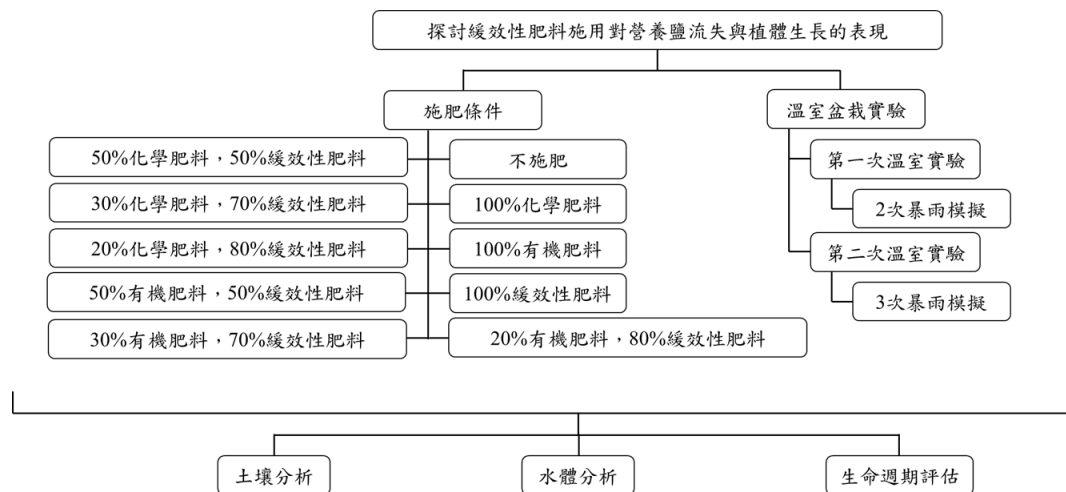


圖 1 本研究之實驗架構圖

單個盆栽種植的面積約為 0.12 m²，故為確保土壤採集不影響植體生長，每個實驗肥料條件分別種植 3 個盆栽。基肥中氮肥佔總量之 50 % 中，第一次與第二次追肥之氮元素含量需佔總量之 50 %，因此其使用量與基肥中的使用量相同。然而每種肥料的氮、磷、鉀元素比例不同，但我們選擇氮元素作為主要觀察的元素，計算出整個實驗過程中使用的各元素總含量，如表 1 所示。

表 1 各實驗條件總施用氮、磷、鉀含量

	氮含量 (g)	磷含量 (g)	鉀含量 (g)
NF	0.00	0.00	0.00
CF	18.00	9.00	9.00
OF	18.00	10.80	18.00
SF	18.00	11.57	19.29
C5S5	18.00	10.29	14.14
C3S7	18.00	10.80	16.20
C2S8	18.00	11.06	17.23
O5S5	18.00	11.19	18.64
O3S7	18.00	11.34	18.90
O2S8	18.00	11.42	19.03

備註：不施肥(NF)；化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 % 化學肥料+50 % 緩效性肥料(C5S5)；30 % 化學肥料+70 % 緩效性肥料(C3S7)；20 % 化學肥料+80 % 緩效性肥料(C2S8)；50 % 有機肥料+50 % 緩效性肥料(O5S5)；30 % 有機肥料+70 % 緩效性肥料(O3S7)；20 % 有機肥料+80 % 緩效性肥料(O2S8)

此外，本研究利用人工降雨的方式，模擬氣候變遷條件下所發生之極端降雨事件，以探討暴雨對於土壤營養鹽流失的影響。本研究一共進行了兩次溫室實驗，兩次實驗的整體時間流程如圖 2(a)和(b)所示。第一次溫室實驗的區間為 2023 年 8 月 23 日至 2023 年 9 月 22 日，共 30 天。於播種前 5 天施用基肥及播種後 15 天進行追肥，暴雨模擬則是播種後的第 10 天及 25 天進行。第二次溫室實驗延續第一次溫室實驗的盆栽條件進行，以探討連續耕作對土壤營養鹽的累積與流失的影響。因天氣原因第二次溫室實驗滾動調整至播種後 40 天方進行採收，從 2023 年 10 月 18 日進行至 2023 年 11 月 27 日，與第一次溫室實驗的施肥方式有差異的部分為第二次溫室實驗在第 31 天增加一次追肥，因此暴雨模擬進行了三次分別在播種後第 10 天，25 天及 37 天進行。

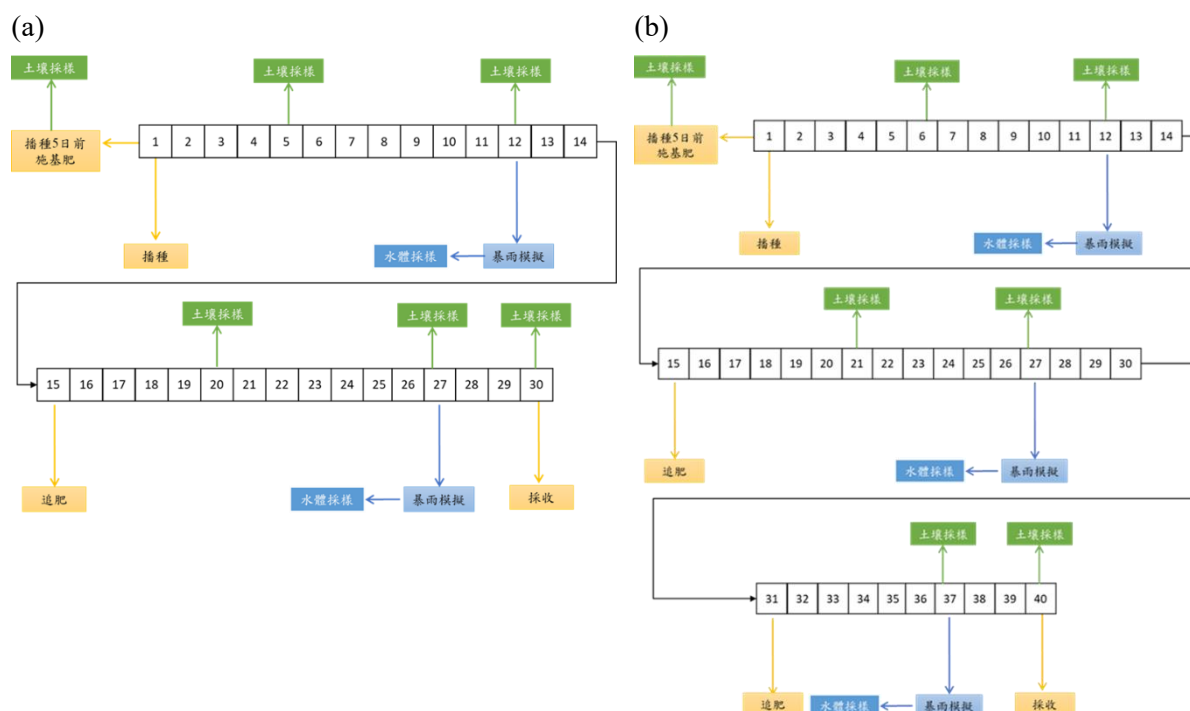
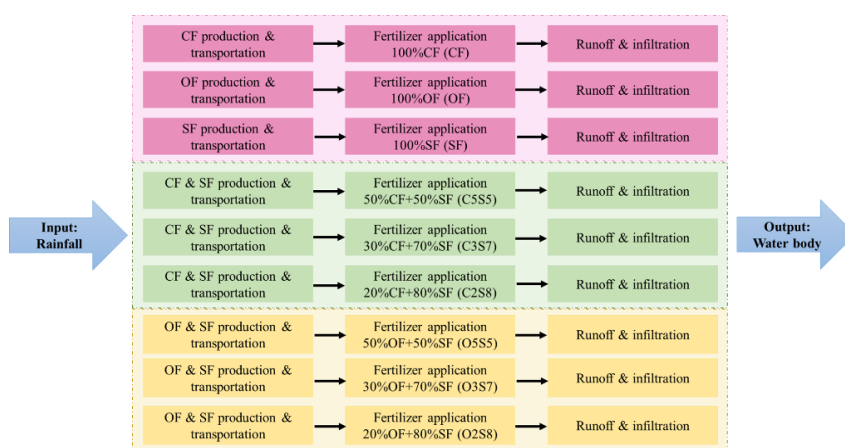


圖 2 實驗時間流程規劃(a)第一次溫室實驗；(b)第二次溫室實驗

暴雨模擬的設計參考台灣雨量分級指標中大雨之雨量設定，在第一次溫室實驗中，第一次暴雨模擬之雨量設計為每個盆栽以 15 分鐘平均降下共 1.2 L 之水量，得其平均降雨強度為 40 mm/hr。而之後的暴雨模擬在維持同樣降雨強度下，將水量提升至 2.4 L，以確保雨量在植物截留後，仍足以形成入滲水及逕流水。在降雨結束後 24 小時內收集所有的入滲水及逕流水，並進行水體分析實驗。水體分析包含量測水溫、pH 值、導電度、凱氏氮、總磷及總鉀。

在種植期間定期採集土壤及進行分析，以了解營養鹽的運輸及流失狀況。土壤之分析項目有土壤基本之物理性質，包括質地、總體密度、孔隙度及陽離子交換容量。此外，也檢測土壤凱氏氮、有效性磷、有效性鉀、總磷及總鉀。同時觀察植體生長狀況，進一步了解肥料與作物產量之間的影響。植體分析則隨機採收 10 棵相同肥料條件之作物，將其根、莖、葉分開量測其鮮重、乾重、株高及葉片數，上述量測數據之結果將以其平均值呈現。

生命週期評估可分為目標與範疇界定(Goal and Scope Definition)、生命週期盤查分析(Life Cycle Inventory Analysis, LCI)、生命週期衝擊評估(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)及闡釋(Interpretation)四個部分。本實驗使用之功能單元為 1 kg 莧菜之產量，計算方法為 ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.08。除不施肥之試驗條件，其他 9 個情境分別對應其餘 9 個施肥條件。人類健康、生態系統和資源是三個主要終點的影響類別，此外也針對 22 個環境衝擊細項類別去作分析與比較。本研究生命週期的範疇界定如圖 3 所示，9 個情境大致可分成三組，分別是全量使用單種肥料，不同比例之化學肥料與緩效性肥料，及不同比例之有機肥料與緩效性肥料。



備註：化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 %化學肥料+50 %緩效性肥料(C5S5)；30 %化學肥料+70 %緩效性肥料(C3S7)；20 %化學肥料+80 %緩效性肥料(C2S8)；50 %有機肥料+50 %緩效性肥料(O5S5)；30 %有機肥料+70 %緩效性肥料(O3S7)；20 %有機肥料+80 %緩效性肥料(O2S8)

圖 3 生命週期評估之範疇界定

三、結果與討論

3.1 土壤分析結果

本實驗使用之土壤屬於砂壤土，土壤總體密度與孔隙率為 1.07 g/cm³ 和 43.46 %。隨著種植時間的增長，土壤中有機質含量逐漸增加，但皆維持在 5 % 以內。不同施肥條件下土壤陽離子交換容量介於 65.60 至 76.29 meq/100g 之間。第一次溫室實驗的土壤 pH 值介於 5.64 至 7.29 之間，介於弱酸至中性土壤。第二次溫室實驗的土壤 pH 值介於 5.08 至 6.97 之間，屬於弱酸性土壤。從圖 4(a)和圖 4(b)趨勢可觀察到整體的 pH 值呈現下降的趨勢，以單種施肥來看 CF 與 SF 的 pH 值比 NF 和 OF 明顯較低。因緩效性肥料僅透過包膜控制其釋放速率，但其核心肥料的成分與化學肥料類似，因此會造成土壤 pH 值下降。若長期使用可能會導致土壤酸化的問題，因此建議可搭配其他中和土壤 pH 值之環境友善資材，達到控制營養鹽流失的同時保持土壤品質。

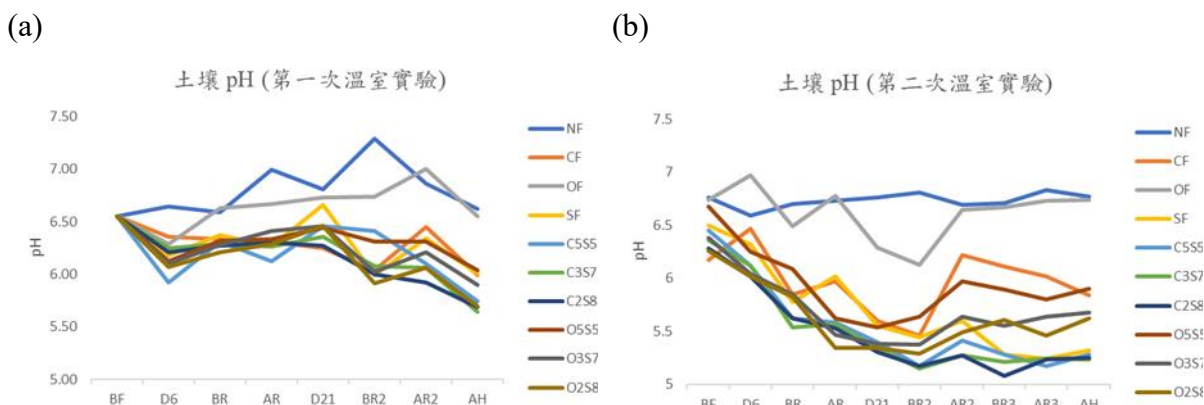


圖 4 土壤 pH 值趨勢圖(a) 第一次溫室實驗；(b) 第二次溫室實驗

第一次溫室實驗的土壤凱氏氮介於 203 mg/kg 至 504 mg/kg，而第二次溫室實驗的土壤凱氏氮介於 448 mg/kg 至 700 mg/kg。土壤有效性磷濃度在第一次溫室實驗與第二次溫室實驗中範圍分別介於 0.10 mg/kg 至 33.73 mg/kg 與 19.78 mg/kg 至 49.37 mg/kg 間。而兩次溫室實驗土壤中有效性鉀濃度範圍則分別介於 4.17 mg/kg 至 47.20 mg/kg 與 3.91 mg/kg 至 61.75 mg/kg 之間。第一次溫室實驗土壤總磷和總鉀濃度範圍分別介於 9.25

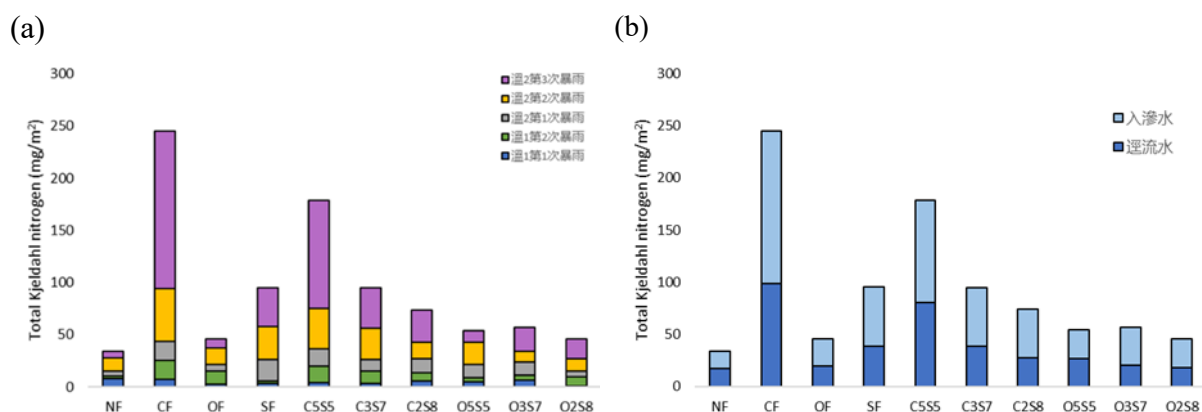
mg/kg 至 14.62 mg/kg 與 33.07 mg/kg 至 14.71 mg/kg 之間。而第一次溫室實驗土壤總磷和總鉀含量範圍則分別介於 13.04 mg/kg 至 17.88 mg/kg 與 50.73 mg/kg 至 111.10 mg/kg 之間。由於土壤為非均質性，土壤中的營養鹽濃度不僅受肥料用量與種類控制，也可能因降雨及植體吸收狀況而導致濃度產生變化。緩效肥的包膜若在暴雨模擬的過程中爆裂，導致肥料內的營養鹽瞬間釋放到環境中，未被雨水衝走而與部分水體一起留在土壤中，亦可能導致土壤的營養鹽含量上升。

3.2 水體分析結果

水體中的凱氏氮包含水中的氨氮及有機氮之加總，凱氏氮佔水體流失的中大部分的氮元素，因此本實驗的呈現主要以凱氏氮為主。本實驗對每個實驗條件各施用 氮含量共 12 g 之肥料，圖 5(a)和圖 5(b)顯示兩次實驗凱氏氮濃度換算成克數之總流失量。經歷共 5 次的暴雨，全量單種施用肥料實驗條件與實驗控制組對總凱氏氮流失量依序為 CF(88.22 mg/m²) > SF(34.33 mg/m²) > OF(16.59 mg/m²) > NF(12.29 mg/m²)。緩效性肥料可通過緩慢釋放肥料養分到環境中，滿足植體生長的趨勢所需的營養量，亦可增加氮肥的利用率，可有效減少流失。而有機肥料含大量有機質能固定肥料養分，相較於化學肥料快速作用，有機肥料需長期施用方能展現出改善土壤的效果(Sánchez et al., 2017)，本實驗選著之短期葉菜類的生長週期較短，因此其流失量不多。

化學肥料與緩效性肥料組合中總凱氏氮流失量之排序，CF(88.22 mg/m²) > C5S5(64.36 mg/m²) > SF(34.33 mg/m²) > C3S7(34.22 mg/m²) > C2S8(26.60 mg/m²)。緩效性肥料中含有植物可吸收之養分的成分與化學肥料的性質相似，可溶於水中再通過水分傳輸。隨著越多的營養鹽在種植過程中，通過灌溉水及雨水釋放至土壤，圖 5(a)和圖 5(b)可觀察到時間越往後的降雨事件中，營養鹽的流失量越多。因此緩效性肥料與化學肥料的混合比例會隨著緩效性肥料的施用比例的增加而使水中氮的流失量下降，C2S8 為組合中之最佳比例。

通過圖 5(a)和圖 5(b)可以觀察到有機肥料與緩效性肥料不同混合比例之總凱氏氮流失量，SF(34.33 mg/m²) > O3S7(20.55 mg/m²) > O5S5(19.52 mg/m²) > O2S8(16.56 mg/m²) > OF(16.51 mg/m²)。當緩效性肥料的外殼破裂會將原本應該在種植過程中緩慢釋放的肥料，直接進入土壤中，而這些曝露在土壤的營養鹽易在降雨過程中流。由此可見，若僅通過流失量做判斷，有機肥料與緩效性肥料混合的最佳比例應為 O2S8。



備註：不施肥(NF)；化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 %化學肥料+50 %緩效性肥料(C5S5)；30 %化學肥料+70 %緩效性肥料(C3S7)；20 %化學肥料+80 %緩效性肥料(C2S8)；50 %有機肥料+50 %緩效性肥料(O5S5)；30 %有機肥料+70 %緩效性肥料(O3S7)；20 %有機肥料+80 %緩效性肥料(O2S8)

圖 5 水體凱氏氮流失累積量圖(a)依施肥時程區分；(b)依入滲水及逕流水區分

兩次溫室實驗的暴雨模擬加總，根據總氮之討論與計算方式，將總磷濃度換算成流失量，呈現如圖 6(a)和圖 6(b)所示。本實驗設計以氮元素為基準，因不同肥料混合而導致的磷含量比例不同，亦會對實驗中流失的比例產生影響。以全量單種施用肥料與控制組作比較，總磷的流失量依序為 CF(24.28 mg/m²) > SF(15.96 mg/m²) > OF(10.88 mg/m²) > NF(7.69 mg/m²)。包膜緩效性肥料內部肥料的磷元素透過包膜的緩慢釋放機制，通過滲透壓或表面的孔洞溶於水中後進入土壤(Jin et al., 2013)。因此養分的利用率較高，其流失量與全量化學肥料相比較低。化學肥料與緩效性肥料混合比例之總磷流失量排序為，C3S7(24.67 mg/m²) > CF(24.28 mg/m²) > C5S5(23.28 mg/m²) > C2S8(27.88 mg/m²) > SF(15.96 mg/m²)。不同有機肥與緩效性肥料混合比例之實驗條件下得出其總磷流失量排序為，O3S7(16.92 mg/m²) > SF(15.96 mg/m²) > O2S8(14.49 mg/m²) > O5S5(13.41 mg/m²) > OF(10.88 mg/m²)。磷在土壤中的溶解度較低，且容易吸附在土壤顆粒，因此其較容易通過土壤侵蝕與逕流水流失。由於磷元素在土壤與肥料中含量較少，其離子易吸附於土壤顆粒，因此不易隨著雨水流失，計算出來的流失量之間差異不明顯。

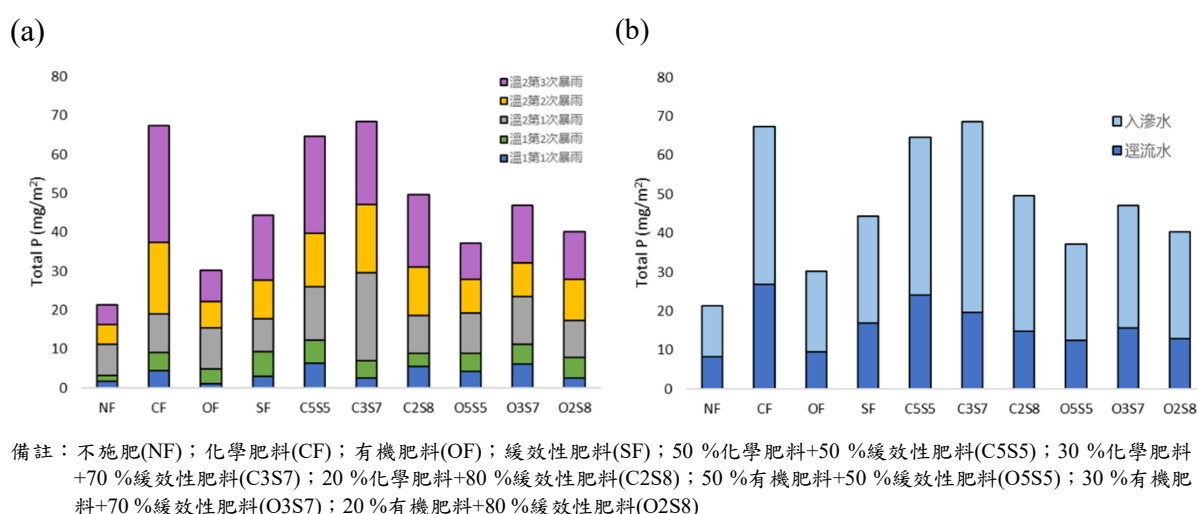
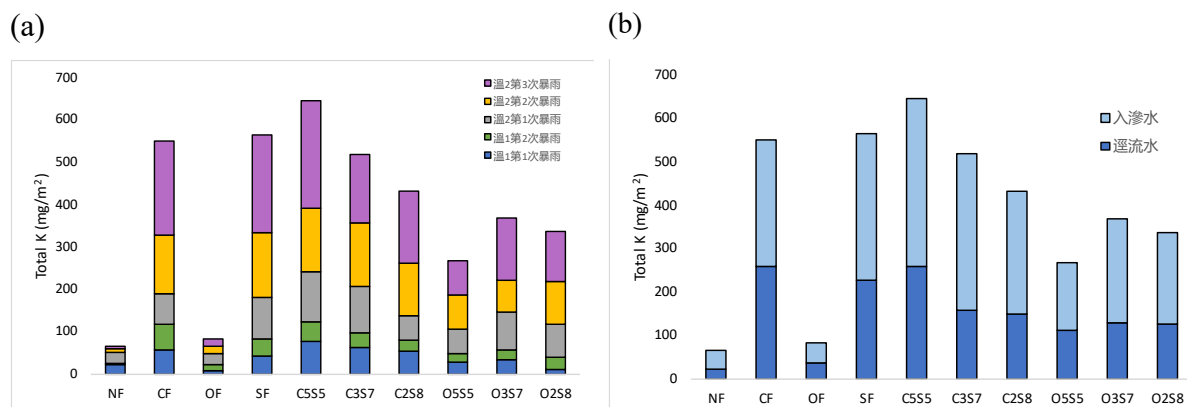


圖 6 水體總磷流失累積量圖(a)依施肥時程區分；(b)依入滲水及逕流水區分

與水體總磷含量的計算方法類似，實驗總共的總鉀流失量如圖 7(a)和圖 7(b)所示。全量單種施用肥料實驗條件對總鉀流失量依序為 SF(203.17 mg/m²) > CF(198.63 mg/m²) > OF(30.04 mg/m²) > NF(23.02 mg/m²)。緩效性肥料與化學肥料的總鉀流失量相當接近，但實際的施肥量中，緩效性肥料總共含有化學肥料兩倍之鉀元素。在土壤含量差異如此大之情況下，緩效性肥料的總鉀流失比例較少，證明與化學肥料相比緩效性肥料可以透過控制營養鹽的逐漸釋放而減少營養鹽流失。化學肥料與緩效性肥料組合相比，總鉀的流失量依序為 C5S5(232.46 mg/m²) > SF(203.17 mg/m²) > CF(198.63 mg/m²) > C3S7(186.31 mg/m²) > C2S8(1155.58 mg/m²)。有機肥料與緩效性肥料不同混合比例來看，總鉀的流失量依序為 SF(203.17 mg/m²) > O3S7(132.39 mg/m²) > O2S8(120.72 mg/m²) > O5S5(96.68 mg/m²) > OF(30.04 mg/m²)。



備註：不施肥(NF)；化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 %化學肥料+50 %緩效性肥料(C5S5)；30 %化學肥料+70 %緩效性肥料(C3S7)；20 %化學肥料+80 %緩效性肥料(C2S8)；50 %有機肥料+50 %緩效性肥料(O5S5)；30 %有機肥料+70 %緩效性肥料(O3S7)；20 %有機肥料+80 %緩效性肥料(O2S8)

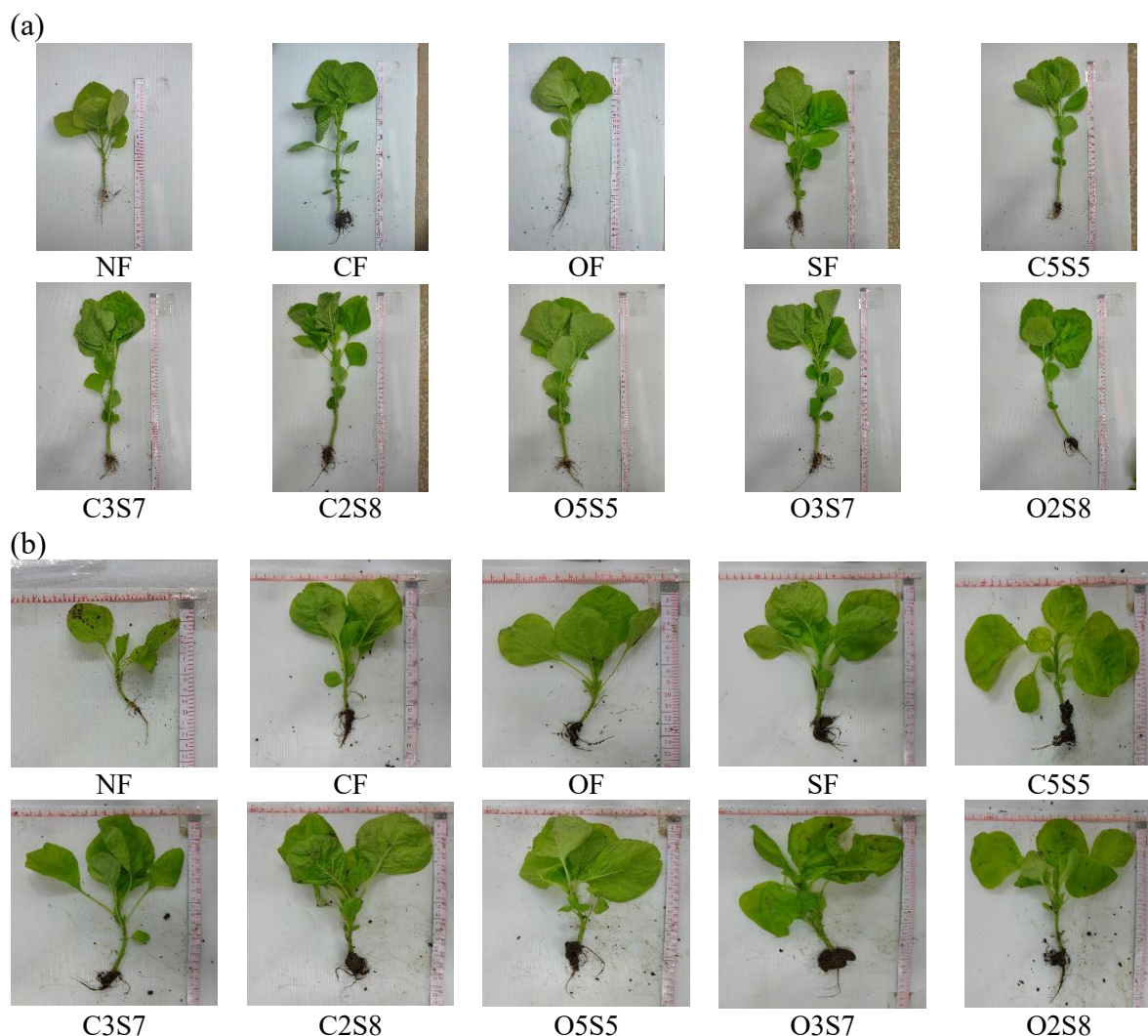
圖 7 水體總鉀流失累積量圖(a)依施肥時程區分；(b)依入滲水及逕流水區分

3.3 植體分析結果

在採收作業上，每個實驗組別採集 10 顆植體量測其數據，並記錄計算其平均值的結果。圖 8(a)和 8(b)顯示了每個實驗組別的其中一株採收之植體實拍圖。第一次實驗的氣候條件較溫暖，因此相比於第二次溫室實驗在較冷的氣候環境下，植體的整體生長狀況較好。不同施肥條件下，所量測的植體生長狀況如表 2(a)與表 2(b)所示。以全量施用單種肥料的條件下，CF 與 SF 條件下的植體產量差異不顯著，然而 OF 條件下，植體的生長較差。化肥與緩效肥的組合中，產量最高的為 C2S8，因此使用緩效肥以取代化學肥料的使用，並不會對作物產量帶來負面影響。此外，O3S7 是化肥與緩效肥的組合條件下，產量最高的組別。相較於僅使用全量有機肥，緩效肥可以增加植物可吸收之養分，提高作物產量。

表 2 不同施肥條件植體生長狀況數據(a)第一次溫室實驗；(b)第二次溫室實驗

(a) 第一次溫室實驗				
	平均高度(cm)	平均寬度(cm)	平均總鮮重(g)	平均總乾重(g)
NF	17.49	14.76	4.02	0.41
CF	32.05	21.93	12.15	0.94
OF	22.18	17.20	5.90	0.57
SF	32.30	20.02	12.08	1.11
C5S5	33.77	20.52	13.20	1.26
C3S7	31.99	20.59	13.80	1.21
C2S8	34.47	20.38	14.59	1.47
O5S5	32.96	21.05	12.19	1.03
O3S7	34.03	20.51	13.23	1.10
O2S8	28.87	21.73	10.99	1.09
(b) 第二次溫室實驗				
	平均高度(cm)	平均寬度(cm)	平均總鮮重(g)	平均總乾重(g)
NF	10.06	9.36	1.01	0.05
CF	16.6	15.62	5.16	0.31
OF	12.19	12.14	1.84	0.11
SF	17.98	18.45	6.34	0.38
C5S5	14.02	16.84	3.85	0.18
C3S7	19.33	19.72	6.88	0.39
C2S8	18.54	17.12	5.53	0.29
O5S5	18.25	16.35	5.24	0.27
O3S7	18.41	17.35	6.09	0.33
O2S8	16.19	17.65	4.40	0.23



備註：不施肥(NF)；化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 %化學肥料+50 %緩效性肥料(C5S5)；30 %化學肥料+70 %緩效性肥料(C3S7)；20 %化學肥料+80 %緩效性肥料(C2S8)；50 %有機肥料+50 %緩效性肥料(O5S5)；30 %有機肥料+70 %緩效性肥料(O3S7)；20 %有機肥料+80 %緩效性肥料(O2S8)

圖 8 不同施肥條件的植體照片圖(a) 第一次溫室實驗(b) 第二次溫室實驗

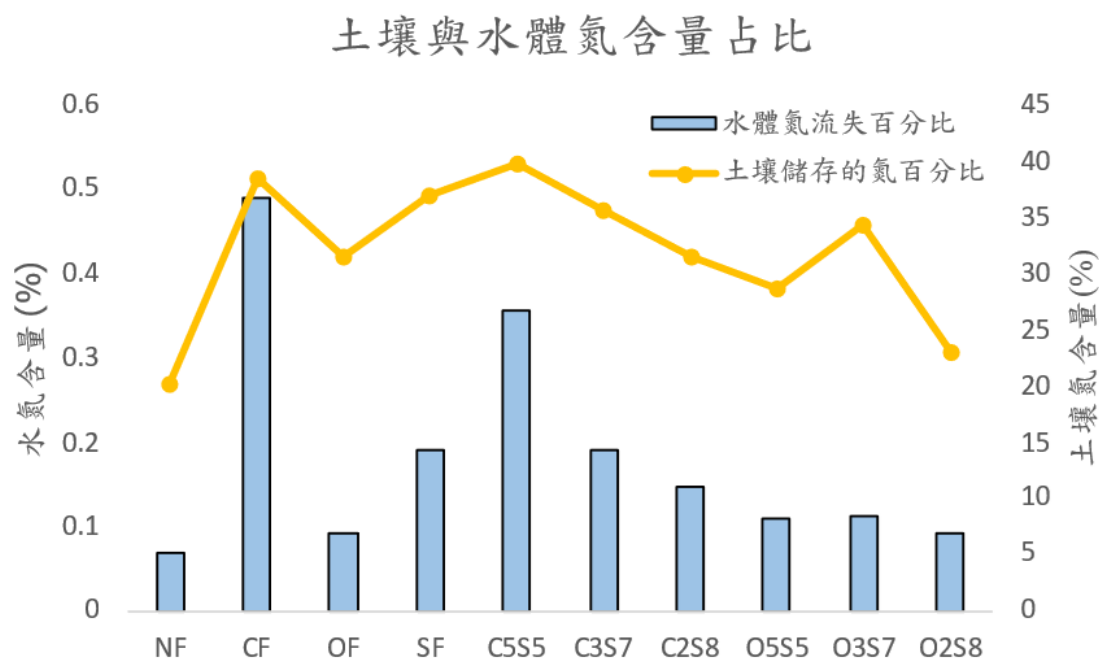
3.4 綜合討論緩效性肥料對土壤與水體養分含量之影響

土壤中氮元素的儲存量，佔總施肥重量的 23 %至 40 %之間。圖 9 顯示了所有實驗條件中土壤儲存與水體流失的氮含量百分比，從單種全量施肥可以觀察土壤的氮儲存量以化學肥料條件下最高，然而其水體檢測流失量也是所有條件中最高。相較之下，緩效性肥料的流失量較少，但其在採收後土壤中的含量還是增加，但上升幅度較小。在化學肥料與緩效性肥料的混合條件中，土壤氮的儲存量與水體氮的流失量成正相關，且隨著緩效性肥料比例上升而下降。比起全量使用化學肥料，以緩效性肥料取代部分化學肥料的實驗條件下的總鮮重較高。因此，緩效性肥料可以通過控制養分的釋放，提高作物對土壤營養鹽的利用率，減少營養鹽的流失。在有機肥料的組合比例中，流失量最多的 O3S7 的土壤中氮儲存量較高。由此可見，緩效性肥料提供充足的養分使植體得以穩定生長，而使其產量高於全量使用有機肥料。

土壤基本物理性質在種植前後並不會有大幅度的變化，然而土壤為非均質性加上孔隙率的改變會使土壤分析營養鹽濃度結果有小部分的浮動變化。緩效性肥料在實際應用中環境的不同的物理性質，如土壤性質，氣溫變化等，皆會因此而影響其釋放速

率。此外土壤中微生物與環境的交互作用，亦會導致本實驗所量測的數據有偏差。綜合以上原因，營養鹽的流失量與不同土壤養分濃度呈現不同幅度的跳動。

本實驗選擇短期葉菜類作為目標作物，因此整個實驗的週期較短，無法觀測長期使用的條件下，對土壤所造成的影響。根據良好農業規範中的施肥量來設計模擬現實中農民的種植情況，溫室實驗的種植面積有限，因此肥料的使用量也相應的較少。然而，暴雨過程中所觀察到的營養鹽流失量大部分來源於肥料，因此使用量較少會導致各肥料的流失量之間的差異不顯著。建議爾後可以通過長期大量數據檢測，確認肥料施用對營養鹽流失的趨勢之影響。

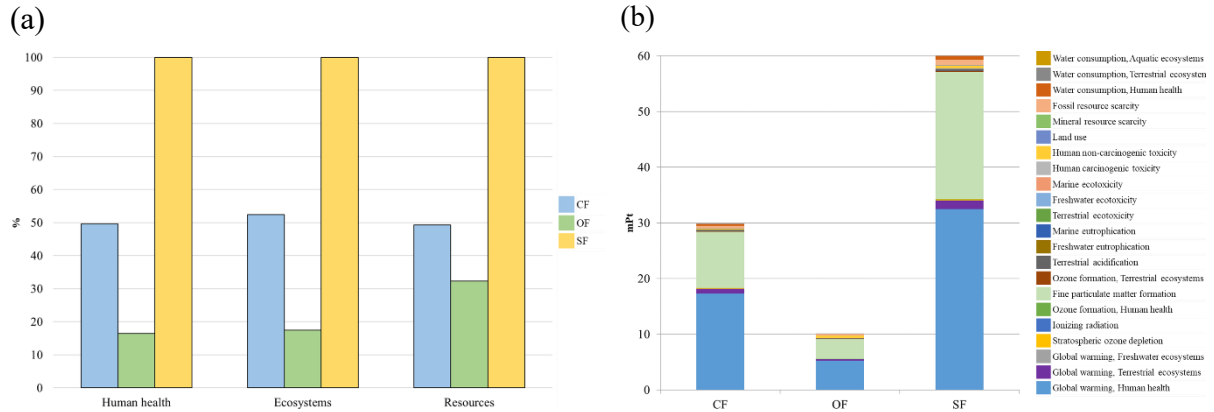


備註：不施肥(NF)；化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 %化學肥料+50 %緩效性肥料(C5S5)；30 %化學肥料+70 %緩效性肥料(C3S7)；20 %化學肥料+80 %緩效性肥料(C2S8)；50 %有機肥料+50 %緩效性肥料(O5S5)；30 %有機肥料+70 %緩效性肥料(O3S7)；20 %有機肥料+80 %緩效性肥料(O2S8)

圖 9 土壤儲存與水體流失的氮含量百分比圖

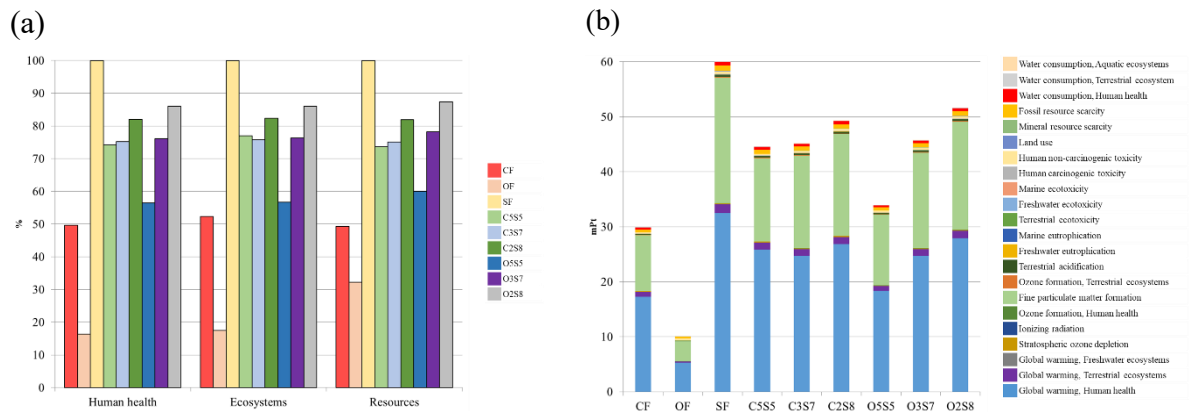
3.5 生命週期評估結果

本研究利用生命週期評估(LCA)期望可以對實驗使用之施肥條件對碳足跡及環境的衝擊。此外，本研究使用 SimaPro 作為農業系統之生命週期評估模擬工，評估結果顯示不同施肥策略的環境衝擊，通過了解其碳排放，可作為減碳施用肥料策略之參考。根據圖 10(a)全量施用緩效性肥料在所有情境中其對人體健康、生態系與資源的負面影響是最高的。緩效性肥料的主要營養鹽成分與化學肥料一樣屬於無機肥料，因此其製作及使用過程仍會對環境造成負面衝擊。從圖 11(a)對於不同比例的施肥條件中，隨著緩效性肥料比例的增加，其整體對環境的負面影響也隨之上升。全量使用有機肥料是所有情境中對三個區域的損壞評估影響最小。從圖 11(b)可觀察，9 個不同情境看影響最多的前三個單一分數順序為全球暖化，人類健康；細顆粒物形成；全球暖化，陸地生態系統。



備註：化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 %化學肥料+50 %緩效性肥料(C5S5)；30 %化學肥料+70 %緩效性肥料(C3S7)；20 %化學肥料+80 %緩效性肥料(C2S8)；50 %有機肥料+50 %緩效性肥料(O5S5)；30 %有機肥料+70 %緩效性肥料(O3S7)；20 %有機肥料+80 %緩效性肥料(O2S8)

圖 10 單種施肥條件之生命週期評估結果(a)損壞評估分析；(b)單一分數分析



備註：化學肥料(CF)；有機肥料(OF)；緩效性肥料(SF)；50 %化學肥料+50 %緩效性肥料(C5S5)；30 %化學肥料+70 %緩效性肥料(C3S7)；20 %化學肥料+80 %緩效性肥料(C2S8)；50 %有機肥料+50 %緩效性肥料(O5S5)；30 %有機肥料+70 %緩效性肥料(O3S7)；20 %有機肥料+80 %緩效性肥料(O2S8)

圖 11 所有情境的生命週期評估結果(a)損壞評估分析；(b)單一分數分析

四、結論

本實驗致力於探討施用緩效性肥料對營養鹽流失量與植體生長之影響，利用不種類的肥料與混合比例以找尋最佳的施肥條件。並模擬暴雨時緩效性肥料的分解速率及營養鹽流失的濃度變化，了解爾後農民實際運用在農田時的可行性。本研究的主要結論如下：

1. 在全量施用單一種類肥料的條件下，化學肥料與緩效性肥料相比，緩效性肥料能有效減少 60 %的營養鹽流失，且對莧菜的生長狀況並無明顯的負面影響。而有機肥料與緩效性肥料相比，雖然緩效性肥料對於營養鹽流失量減少並沒有明顯優勢，但對以莧菜的鮮重總量來看，有機肥料的產量小於緩效性肥料約 57 %。
2. 化學肥料與緩效性肥料之最佳混合比例為 20 %化學肥料 + 80 %緩效性肥料，此實驗條件為最佳減少營養鹽流失之組合，且莧菜的產量與全量化肥相比增加了 16 %。然因緩效性肥料釋放的養分結構與化學肥料類似，在實驗過程土壤 pH 有些微下降

趨勢，長期施用可能會造成土壤酸化狀況，因此建議可搭配中和土壤 pH 值之其他資材與技術結合使用，其整體效果更佳。

3. 有機肥料與緩效性肥料之最佳混合比例為 30 % 有機肥料 + 70 % 緩效性肥料，此實驗條件相較於單一使用有機肥料，營養鹽流失量較高，但能使莧菜獲得充足的可吸收之養分，最佳混合比例的莧菜產量比使用全量有機肥料增加 149 % 的鮮重。
4. 在暴雨模擬的過程中，發現緩效性肥料會隨著時間的推移，釋放出更多的營養鹽於土壤中。此外，實驗過程中，緩效性肥料的包膜受到超過其可承受的壓力也會瞬間釋放肥料中所有的養分，導致莧菜到了栽種後期，容易受到暴雨事件，營養鹽大量流失的現象。
5. 本實驗時程較短且為溫室條件下的盆栽試驗，故其種植面積較小，肥料的施用量較少，加上部分肥料對於土壤作用需要長時間的觀察，以上原因皆可能影響到營養流失狀況於各實驗條件之間流失總量的差異相對較小，影響趨勢不甚明顯。
6. 生命週期評估結果顯示了使用緩效性肥料並不會對碳排放及環境衝擊帶來正面的影響。雖使用緩效性肥料可減少污染物的排放，但在實際使用上仍需考慮其用量及頻率。

本研究探討施用緩效性肥料對營養鹽流失量與植體生長之影響，也通過生命週期評估探討不同是非條件對環境的衝擊及損壞評估。本次實驗結合緩效性肥料的使用結果與利弊，為緩效性肥料爾後的實際運用與施肥策略提供建議，期望在提高農業產值同時改善環境品質，達經濟與環保雙贏之局面。

參考文獻

- Jin, S., Wang, Y., He, J., Yang, Y., Yu, X., & Yue, G. (2013). Preparation and properties of a degradable interpenetrating polymer networks based on starch with water retention, amelioration of soil, and slow release of nitrogen and phosphorus fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(1), 407-415.
- Liu, W., Zhang, L., Wu, H., Wang, Y., Zhang, Y., Xu, J., Wei, D., Zhang, R., Yu, Y., & Wu, D. (2023). Strategy for cost-effective BMPs of non-point source pollution in the small agricultural watershed of Poyang Lake: A case study of the Zhuxi River. *Chemosphere*, 333, 138949.
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, 13(3), 1318.
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste management*, 69, 136- 153.
- Wu, H., MacDonald, G. K., Galloway, J. N., Zhang, L., Gao, L., Yang, L., ... & Yang, T. (2021). The influence of crop and chemical fertilizer combinations on greenhouse gas emissions: A partial life-cycle assessment of fertilizer production and use in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105303.
- Xia, Y., Zhang, M., Tsang, D. C., Geng, N., Lu, D., Zhu, L., ... & Ok, Y. S. (2020). Recent advances in control technologies for non-point source pollution with nitrogen and phosphorous from agricultural runoff: current practices and future prospects. *Applied Biological Chemistry*, 63, 1-13.

Zhao, Z., Liu, K., Yu, B., Liu, G., Wang, Y., & Wu, C. (2023). Modeling of agricultural nonpoint-source pollution quantitative assessment: a case study in the mun river basin, Thailand. *Sustainability*, 15(13), 10325.