

以生物炭作為土壤添加劑對作物生長與農業非 點源污染控制之影響

Impact of biochar as a soil amendment on crop growth and agricultural non-point Source pollution control

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學系

碩士班研究生

博士班研究生

教授

林靖蓉

黃雅甄

范致豪

Ching-Jung Lin

Ya-Zhen Huang

Chihhao Fan*

摘 要

非點源污染是一個複雜的問題，受地理因素、氣候變化(包括降雨模式)、土壤特性、土地利用方式和植被覆蓋等影響。這種複雜性使得非點源污染的管理和控制變得具有挑戰性。在農業中，非點源污染主要來自於肥料(氮/磷)和殺蟲劑的不當應用。這些物質被雨水或灌溉帶走，以表面逕流的形式滲入土壤，導致環境中的水體受到擴散性水污染。檢測和管理這類污染是具有挑戰性的。這項實驗性研究旨在調整添加到具有不同肥料比例的土壤中的生物炭的量，作為實驗條件，觀察土壤中的營養素滲漏狀況。其目標是減少營養素滲漏，改善農田周圍水體的非點源污染。竹木衍生的生物炭被選為種植實驗的土壤改良劑。在整個實驗期間，進行了土壤、水和植物分析，此外亦使用LCA繼續進行最終數據分析，以評估對作物和農業非點源污染控制的影響。

實驗結果顯示營養素流失的趨勢如下：全量化學肥料(FCF) > 全量化學肥料(FCF) + 25 g 生物炭(BC) > 半量化學肥料(HCF) + 25 g 生物炭(BC) > 半量化學肥料(HCF) + 50 g 生物炭(BC) > 半量化學肥料(HCF) + 100 g 生物炭(BC)。在相同的100 %化學肥料條件下，添加生物炭的組合相比不添加生物炭的組合減少了營養素流失。此外，在半量施肥的情況下，相同的50 %施肥量和所有添加生物炭的組合中，添加生物炭越多，總氮流失量越低。從FCF到FCF + 25 g BC，總共減少了5.63 %。同樣，在具有相同50 %施肥量且所有添加生物炭的組合中，從HCF + 25 g BC到HCF + 50 g BC減少了14.61%，從HCF + 100 g BC減少了51.77 %。因此，顯而易見，添加更多的生物炭會導致氮流失減少。根據植體分析數據結果顯示，將肥料減半並增加生物炭含量對植體產量沒有顯著影響。結果表明，隨著生物炭添加量的增加，肥料損失相應減少。生物炭對減少土壤營養素流失具有積極影響。這一發現表明了其在環境改善方面具有潛在的大規模應用。它不僅提高了環境質量，而且保持了農業生產力。此外，它還有助於碳減排，實現了經濟和環境可持續性雙重效益。

關鍵字：非點源污染、生物炭、化學肥料

Abstract

Non-point source pollution is a complex issue influenced by geographical factors, climate variations (including rainfall patterns), soil characteristics, land usage practices, and vegetation cover. This complexity makes the management and control of non-point source pollution challenging. In agriculture, non-point source pollution primarily results from the improper application of fertilizers (nitrogen/phosphorus) and pesticides. These substances, carried by rainfall or irrigation, travel as surface runoff and seep into the soil, leading to diffuse water pollution in the environment. Detecting and managing this type of pollution is challenging. This experimental study aimed to adjust the amount of biochar added to soils with varying fertilizer ratios as experimental conditions to observe the nutrient-leaching status in the soil. The objective was to reduce nutrient leaching and ameliorate non-point source pollution of surrounding water bodies in agricultural lands. Bamboo-derived biochar was selected as the soil amendment for the planting experiment. Throughout the experimental period, soil, water, and plant analyses were conducted. LCA was used to analyze the program data to assess the impact on crops and agricultural non-point source pollution control.

The experimental results indicated a trend of nutrient loss as follows: complete chemical fertilizer (FCF) > total chemical fertilizer (FCF) + 25 g biochar (BC) > half chemical fertilizer (FCF) + 25 g biochar (BC) > half chemical fertilizer (FCF) + 50 g biochar (BC) > half chemical fertilizer (FCF) + 100 g biochar (BC). Under the same 100% fertilizer condition, the combination with added biochar exhibited reduced nutrient loss compared to the combination without biochar. Moreover, in the case of half fertilizer application, with the same 50% fertilizer amount and all combinations with biochar, the more biochar added, the lower the total nitrogen loss. From FCF to FCF + 25 g BC, there was a collective reduction of 5.63 %. Similarly, among combinations with the same 50% fertilizer amount and all with added biochar, there was a reduction of 14.61 % from HCF + 25 g BC to HCF + 50 g BC and a decrease of 51.77 % from HCF + 100 g BC. Thus, it is evident that the addition of more biochar leads to a more significant reduction in nitrogen loss. Based on the plant data, it is obvious that halving the fertilizer and increasing the biochar content does not significantly impact the yield of the plants. The results indicate that with an increased addition of biochar, there is a corresponding reduction in fertilizer loss. Biochar exhibits a positive impact on decreasing the leaching of soil nutrients. This finding suggests potential wide-scale applications for environmental improvement. Not only does it enhance environmental quality, but it also maintains agricultural productivity. Moreover, it contributes to carbon reduction benefits, achieving a dual economic and environmental sustainability benefit.

Keywords: Non-point source pollution, Biochar, Chemical Fertilizer

一、前言

1.1 研究動機

非點源污染的形成過程受到地理、氣候、土壤結構、土地利用方式及植被覆蓋等多種因素影響，機制複雜且管理控制困難。農業活動中，因肥料與農藥的不當使用，容易通過地表逕流污染周圍環境水體，且這類分散型污染不易察覺且防治困難(Wang, Alidoust et al. 2018)。台灣位於熱帶與亞熱帶間，氣候適宜、降雨量高，這些因素導致土壤中的營養鹽易被淋洗流失，需要適當補充土壤養分以維持土地的生產力。然而，過量使用化學肥料及農藥可能導致土壤劣化，進一步污染地下水體及地表水體(Cui, Cai et al. 2020)。

近年來，許多研究致力於結構性與非結構性的最佳管理措施，以減少農業非點源污染對環境的負面影響(Wu and Chen 2013, Jain and Singh 2019)。例如，利用生物菌劑、生物炭等綠色防治技術來取代傳統化肥，減少氮肥、磷肥等污染物進入水體的風險。這些技術雖可減少污染物排放，並在適當條件下增加作物產量，但其應用成本高且受環境因素影響，導致農民對其接受度仍有質疑。根據文獻研究顯示，生物炭在農業耕作上，經常被用來作為改善土壤條件與增加土壤孔隙率，同時還能降低土壤中溫室氣體的排放(Zhang et al., 2019)，農民在使用上也較為方便，且無環境上的限制。、稻桿甚至畜禽糞便，都可製成生物炭，若能有效將農業廢棄資材進行利用，除可解決資材處理問題外，對土壤、作物及環境上都有所益處。

因此，本研究選定空心菜為目標作物，使用廢竹製成的生物炭進行實驗，探討生物炭添加量對土壤營養鹽流失及空心菜生長與產量的影響。本研究還模擬農地雨水對土壤營養鹽的沖刷，以期能為非點源污染削減策略提供參考，進一步提升農業產值並改善環境品質，實現循環經濟與環境保護的雙贏局面。

1.2 研究目的

本研究選擇空心菜作為實驗作物，並使用廢竹燒製的生物炭。實驗設計包括調整生物炭添加量以及使用不同肥料（化學肥料和有機肥料）的土壤，來研究生物炭對營養鹽流失的影響。比較兩次收割的空心菜生長情況，以分析生物炭對植體生長和產量的效果。本研究亦模擬降雨情況，通過大量灌溉水來推測雨水對土壤營養鹽流失的影響。主要研究內容包括：

1. 不同肥料條件下，生物炭對營養鹽流失的影響。
2. 生物炭添加量對營養鹽流失的影響。
3. 模擬暴雨下，生物炭對營養鹽流失的影響。
4. 生物炭對空心菜生長的影響。
5. 生物炭對作物生長環境的變化。
6. 生物炭施用對周圍水體非點源污染改善的效益。

二、 研究方法與步驟

2.1 實驗流程

此研究探討生物炭作為土壤添加劑對作物生長及農業非點源污染控制的影響。在溫室條件下，圖 2.1-1 為依照良好農業規範(TGAP)之建議與利用實驗盆栽種植面積換算肥料施用量，分為全量施肥 100%與半量施肥 50%，並搭配不同生物炭添加量(0 g、25 g、50 g、100 g)的組合，對空心菜的生長進行比較，同時監測水質與土壤中的營養鹽變化，探討生物炭在減少營養鹽流失及控制非點源污染的作用。此外，通過大量灌溉模擬降雨，評估雨水對土壤營養源流失的影響。

整體試驗規劃如圖 2.1-2 所示，本實驗開始前，先將所需之生物炭與試驗用土壤均勻混合，施用基肥為播種前將肥料放入土中均勻攪拌，施用後三天進行播種，參考 TGAP 中規範，於播種後 10~12 天進行第一次追肥，待 18~20 天後進行第二次追肥。於種植後 25~30 天即可進行第一次採收，初次採收保留莖下三公分進行採收，使莖部再次生長，待其生長兩週左右後，再進行連根拔起之採收。第二次試驗以同樣的方式進行，而為模擬實際農業植株種植，盆栽土壤中之生物炭未重新添加。

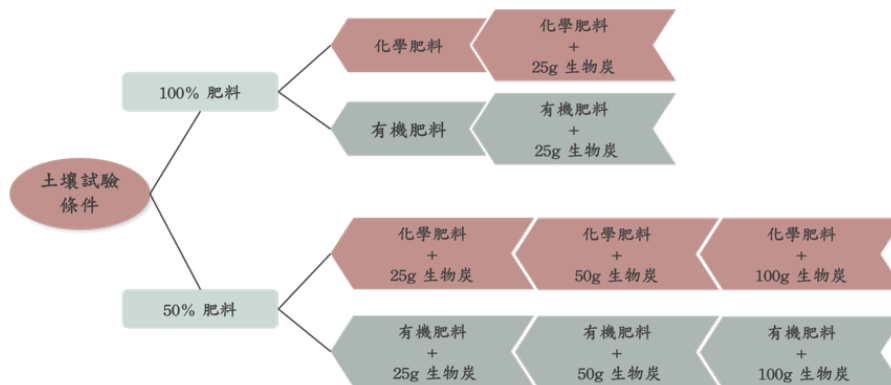


圖 2.1-1 本研究之土壤試驗條件圖

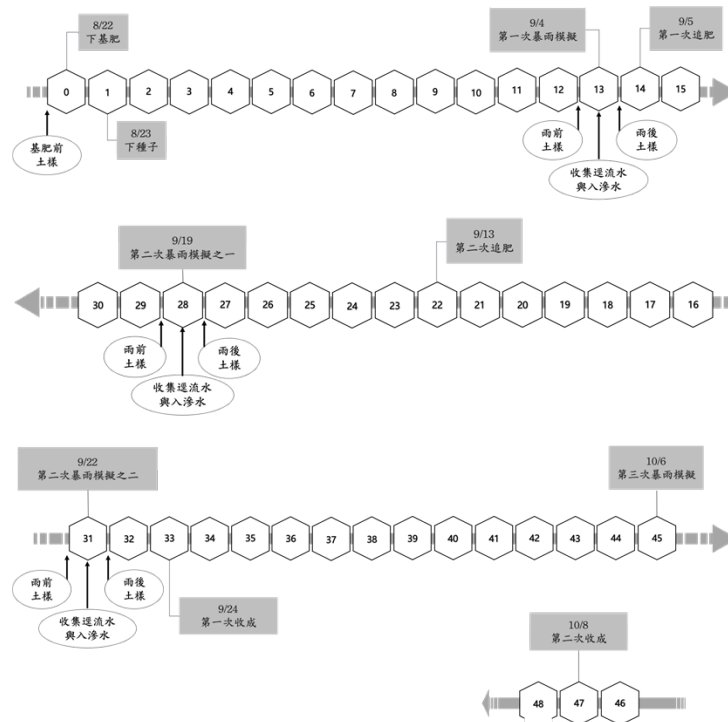


圖 2.1-2 盆栽試驗時間流程規劃

2.2 實驗肥料

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，其成分含 26 % 全氮(內含 2 % 的銨態氮)、13 % 的水溶性磷酐、13 % 的水溶性氧化鉀；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，其成分含 1.5 % 的全氮、0.9 % 的全磷酐、1.5 % 的全氧化鉀和 55.0 % 的有機質。而所添加之生物炭為竹炭，其 BET 表面積： $0.0304 \pm 0.0161 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

施用過程參考良好農業規範(TGAP)中建議之使用量且於實驗中實際情況進行調整，因每種肥料的氮、磷、鉀元素比例不同，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。單個盆栽種植的面積約為 0.12 m^2 ，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。

表 3.2-1 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)
FCF	21.48	10.74	10.74
FCF + 25 g BC	21.48	10.74	10.74
HCF + 25 g BC	10.74	5.37	5.37
HCF + 50 g BC	10.74	5.37	5.37
HCF + 100 g BC	10.74	5.37	5.37
FOF	21.48	12.90	21.48
FOF + 25 g BC	21.48	12.90	21.48
HOF + 25 g BC	10.74	6.45	10.74

HOF + 50 g BC	10.74	6.45	10.74
HOF + 100 g BC	10.74	6.45	10.74

備註：全量化學肥料(FCF)；半量化學肥料(HCF)；全量有機肥料(FOF)；半量有機肥料(HOF)；生物炭(BC)

三、結果與討論

3.1 水體分析

3.1.1 水體總氮含量

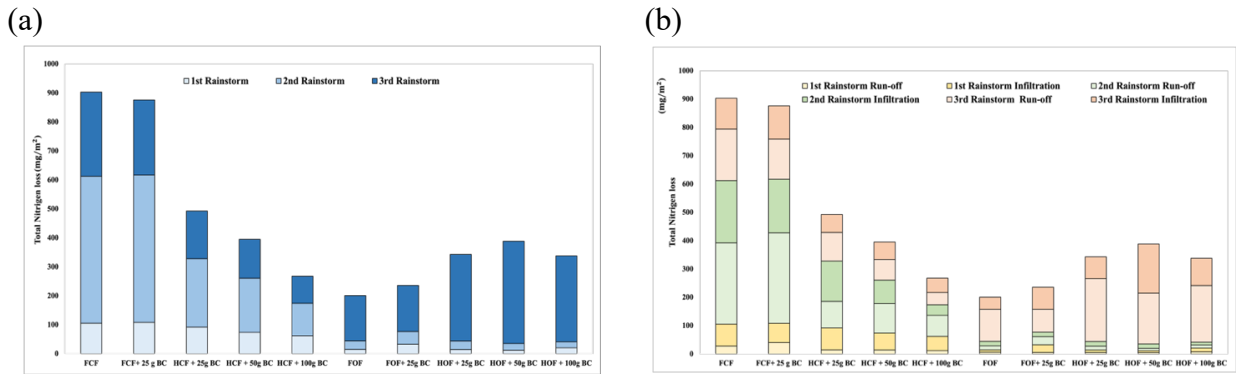
水體中總氮含量為凱氏氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮之加總，其中包含水中的氨氮及有機氮。本試驗過程中全量施肥之組別共施用氮含量 21.48 g，半量施肥之組別共施用氮含量 10.74 g，圖 3.1-1 (a)和圖 3.1-1 (b)顯示兩次實驗凱氏氮濃度換算成克數之總流失量，單位為 mg。

本試驗總共實施 6 次人工暴雨模擬，由圖 3.1-1 (a)和圖 3.1-1 (b)可觀察到全量與半量施用化學肥料實驗條件對總氮的流失量依序為 FCF(903.30 mg/m²) > FCF + 25 g BC(876.04 mg/m²) > HCF + 25 g BC(492.29 mg/m²) > HCF + 50 g BC(395.00 mg/m²) > HCF + 100 g BC(267.60 mg/m²)。由全量施肥之未添加組別至添加 25g 生物炭之組別總氮流失共降低 5.63%；由半量施肥之添加 25 g 生物炭至 50 g 生物炭組別總氮流失量共降低 14.61%，由添加 25 g 生物炭至 100 g 生物炭組別總氮流失量共降低 51.77%。化學肥料與生物炭之組合下，因生物炭之添加，達到肥料中氮含量流失減少的功用，且將其固定於土壤中，進而增加氮肥的利用率(Delgado et al., 2001; Hu et al., 2021)，因此 HCF + 100 g BC 其總氮流失量較少。但因空心菜為短期葉菜類，其生長周期較短，因此整體總流失量不多。

而全量與半量施用有機肥料實驗條件組別對總氮的流失量依序為 HOF + 50 g BC(388.27 mg/m²) > HOF + 25 g BC(343.17 mg/m²) > HOF + 100 g BC(337.75 mg/m²) > FOF + 25 g BC(235.74 mg/m²) > FOF (200.34 mg/m²)。結果顯示，不同比例之有機肥料添加生物炭之組合，沒有明顯減少養分流失的趨勢，整體流失濃度差異不大。減半肥料施用且添加較多生物炭，反而有增加總氮之流失。而因有機肥料含大量有機質能固定肥料養分，釋放肥料中的養分較為緩慢，因此流失之總氮亦較少，有機肥料長期施用能提升土壤中養分(Sánchez, Ospina et al. 2017)，且從圖 4.2.2-1(a)可觀察到營養鹽的流失在三次降雨中隨著時間的推移而上升。

通過圖 4.2.2-1(a)和圖 4.2.2-1(b)發現到全量施用化學肥料與有機肥料混合不同比例生物炭之總氮流失量，FCF + 25 g BC(876.04 mg/m²) > FOF + 25 g BC(235.74 mg/m²)；半量使用化學肥料與有機肥料混合不同比例生物炭之總氮流失量，HCF + 25 g BC(492.29 mg/m²) > HCF + 50 g BC(395.00 mg/m²) > HCF + 100 g BC(267.60 mg/m²) > HOF + 50 g BC(388.27 mg/m²) > HOF + 25 g BC(343.17 mg/m²) > HOF + 100 g BC(337.75 mg/m²)。相較於快速釋放養分的化學肥料，有機肥料釋放營養鹽的速度較慢(Ospina & Montoya

2017)，因此可以觀察到整體試驗中添加化學肥料搭配生物炭總流失量 > 有機肥料搭配生物炭之組合總流失量。

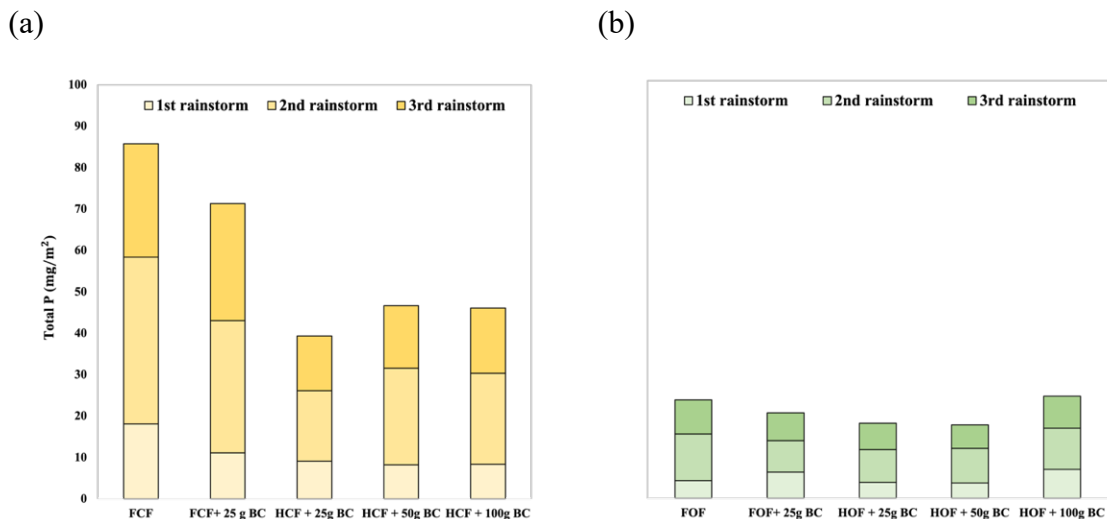


備註：全量化學肥料(FCF)；半量化學肥料(HCF)；全量有機肥料(FOF)；半量有機肥料(HOF)；生物炭(BC)

圖 3.1.1-1 水體總氮流失累積量圖(a)依施肥時程區分；(b)依入滲水及逕流水區分

3.1.2 水體總磷含量

依據總氮計算方式計算總磷含量，且同樣為兩次試驗過程之加總。由圖 3.2-1 可發現全量與半量施用化學肥料實驗條件對總磷的流失量依序為 FCF(85.79 mg/m²) > FCF + 25 g BC(71.33 mg/m²)；HCF + 50 g BC(46.66 mg/m²) > HCF + 100 g BC(46.10 mg/m²) > HCF + 25 g BC(39.32 mg/m²)。而全量與半量施用有機肥料實驗條件對總磷的流失量依序為 FOF (23.53 mg/m²) > FOF + 25 g BC(20.41 mg/m²)；HOF + 100 g BC(24.41 mg/m²) > HOF + 25 g BC(17.94 mg/m²) > HOF + 50 g BC(17.55 mg/m²)。所施用之肥料中，磷元素含量少且離子易吸附固定於土壤中，故整體磷不亦隨水體流失。添加生物炭能改善地表水利用與微生物之活性，將磷固定於土壤中含量及促進植體對磷使用率(Dai, Wang et al. 2020)，因此能發現全量施用化學肥料組合流失量最高。



備註：全量化學肥料(FCF)；半量化學肥料(HCF)；全量有機肥料(FOF)；半量有機肥料(HOF)；生物炭(BC)

圖 3.2-1 水體總磷流失累積量圖(a)化學肥料組別；(b)有機肥料組別

3.1.3 水體總鉀含量

依據總氮計算方式計算總鉀含量，且同樣為兩次試驗過程之加總。由圖 3.3-1 可發現全量與半量施用化學肥料實驗條件對總鉀的流失量依序為 FCF + 25 g BC(597.78 mg/m²) > FCF (544.82 mg/m²)；HCF + 100 g BC(268.88 mg/m²) > HCF + 25 g BC(239.45 mg/m²) > HCF + 50 g BC(227.87 mg/m²)。而全量與半量施用有機肥料實驗條件對總鉀的流失量依序為 FOF(597.78 mg/m²) > FOF + 25 g BC(544.82 mg/m²)；HOF + 100 g BC(140.83 mg/m²) > HOF + 50 g BC(55.62 mg/m²) > HOF + 25 g BC(46.64 mg/m²)。由於生物炭本身特性除了孔造結構能儲存養分於內，其本身即是有機質亦是養分來源，由 Hien 等人(2021) 研究發現，竹類生物炭會釋放鉀元素，並且有助於提高土壤中可溶性鉀之濃度，因此根據結果顯示全量施用化學肥料、半量施用化學肥料與半量施用有機肥添加 100 g 生物炭之組合鉀之流失量相較來說偏高。

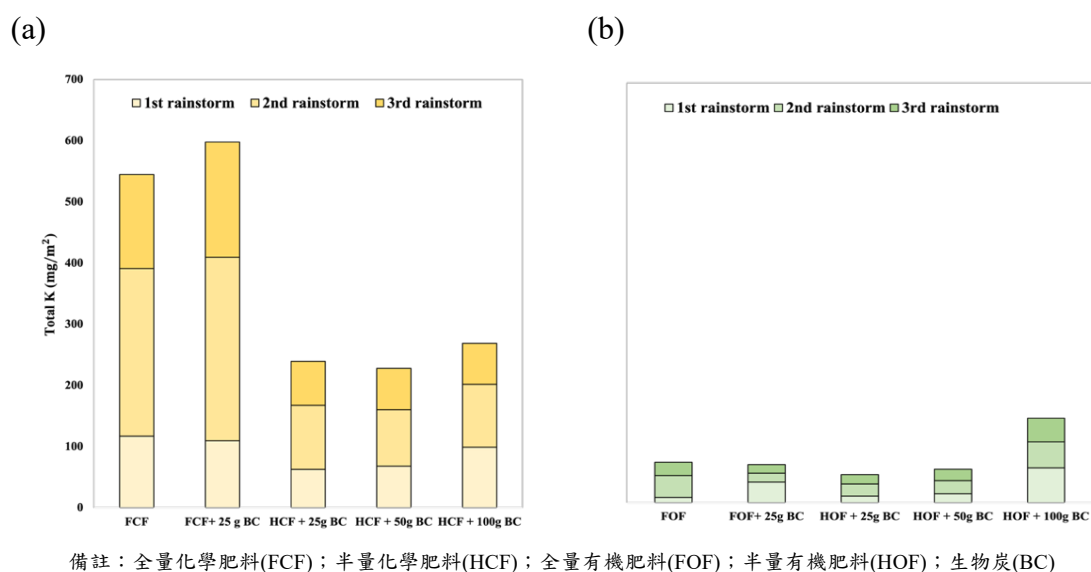


圖 3.3-1 水體總鉀流失累積量圖(a)化學肥料組別；(b)有機肥料組別

3.1.4 土壤與水體分析

圖 3.4-1 為將兩次試驗水體流失之氮含量與土壤固定之氮含量（利用採收後扣除基肥前數據），換算成克數，計算兩者於整體添加肥料的含氮量中所佔的百分比進行討論，單位為%。

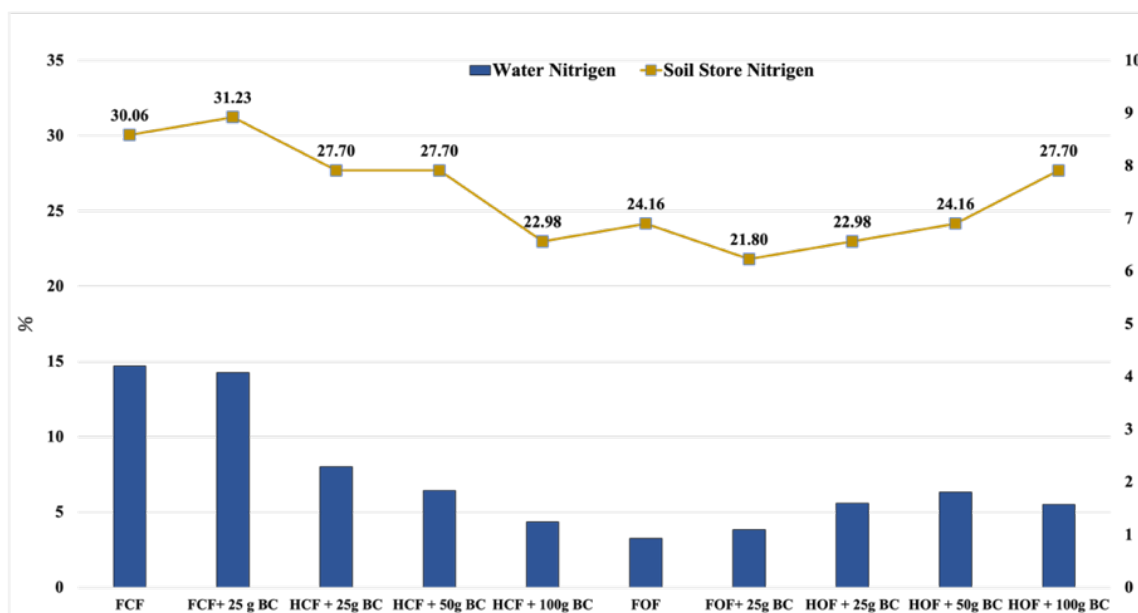
由 100%施肥 FCF 與 FCF + 25 g BC 及 FOF 與 FOF + 25 g BC 比較，發現水體流失比例依序為 FCF (4.21%) > FCF + 25 g BC (4.08%)；FOF + 25 g BC (1.10%) > FOF (0.93%) 時，土壤中含氮量比例依序為 FOF(30.06%) < FCF + 25 g BC (31.23)；FOF + 25 g BC (21.80%) < FOF (24.16%)，以上觀察到 100% 施肥組合，當水體流失量低時，土壤中之含氮量便會較高，化學肥料添加生物炭組合有明顯減少氮元素流失，並將其固定於土壤中，於有機肥料下生物炭之效果並不顯著，推測與兩者混合比例有關，因此無法達到生物炭減少流失的效益。而由 50%施肥發現水體流失比例依序為 HCF + 25 g BC (2.29%) > HCF + 50 g BC (1.84%) > HOF + 50 g BC (1.81%) > HOF + 25 g BC (1.60%) > HOF + 100

g BC (1.57%) > HCF + 100 g BC (1.25%)，土壤中含氮量比例依序為 HCF+ 100 g BC = HOF + 25 g BC (22.98%) < HOF + 50 g BC (24.16%) < HCF+ 25 g BC = HCF + 50 g BC = HOF + 100 g BC (27.98%)，以上觀察到 50%施肥組合，有機肥料之趨勢與 100%相同，且 50%有機肥料下生物炭之效果較為顯著，減少流失氮元素的同時，將其固定於土壤中，而化學肥料組合亦有明顯減少氮含量流失趨勢，但土壤中固定的氮的趨勢與整體實驗有些許差異，推測因化學肥料為快速釋放之肥料，且其搭配生物炭作用於土壤之中，會促進植體吸收之速度，由植體表 4.3-4 亦可發現 100 g 生物炭之組別根部發展較佳，植體有效利用土壤中氮含量，因此半量化肥 HCF + 100 g 之組別土壤中之氮含量較少。

總合比較，50%的化學肥料搭配高劑量生物炭搭配組別與 100%有機肥料不添加生物炭組別，對於減少總氮流失有較明顯的效果；而 50%的化學肥料搭配高劑量生物炭搭配組別及 50% 的有機肥料搭配高劑量生物炭，對於土壤中儲存氮含量有較佳的效果。

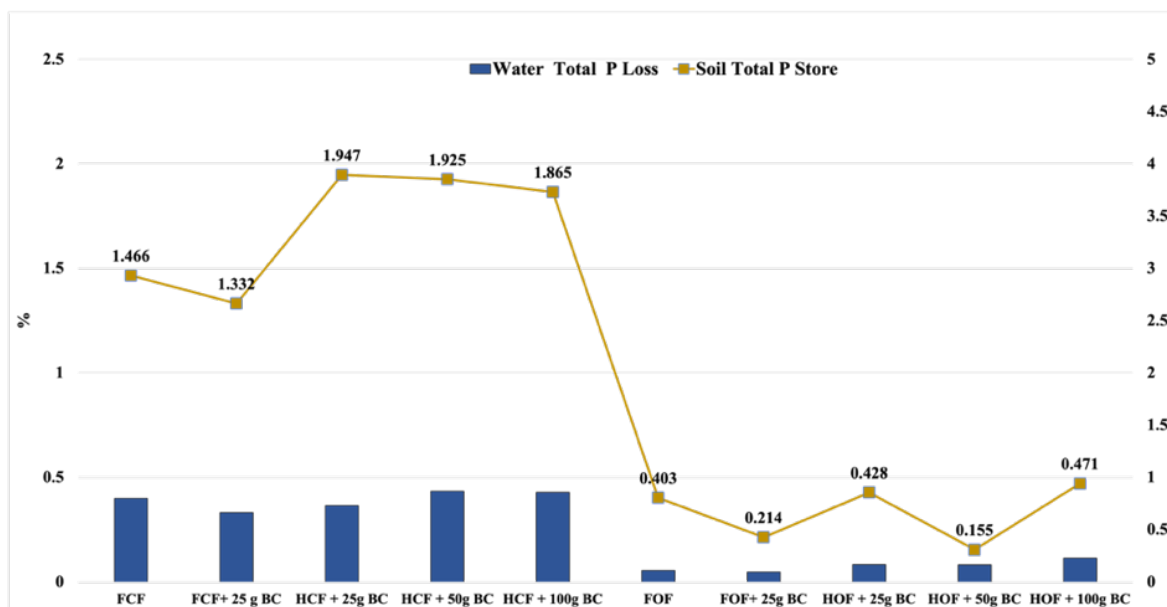
圖 3.4-2 為將兩次試驗水體流失之磷含量與土壤固定之磷含量，換算成克數，計算兩者於整體添加肥料總含磷量中所佔的百分比進行討論，單位為%。

整體肥料中磷含量流失較少，結果顯示化學肥料水體流失之磷含量>有機肥料水體流失之磷含量。而由土壤中可發現添加生物炭之組別，土壤中總磷含量百分比多數大於未添加生物炭之磷含量百分比，且 50%肥料添加 25 g、50 g、100 g 生物炭組別的土壤中磷含量 > 100%肥料添加 25 g、0 g 生物炭組別的土壤中磷含量，顯示當流失比例差異不大情況下，生物炭能增加土壤中磷含量且有效將磷元素固定於土壤之中。而特別地是 HOF+ 50 g 生物炭之組別，土壤中總磷最小，不於實驗趨勢當中，推測採收後之土樣未精確，導致數據誤差。



備註：全量化學肥料(FCF)；半量化學肥料(HCF)；全量有機肥料(FOF)；半量有機肥料(HOF)；生物炭(BC)

圖 3.4-1 水體總氮流失與土壤總氮累積量百分比對照圖



備註：全量化學肥料(FCF)；半量化學肥料(HCF)；全量有機肥料(FOF)；半量有機肥料(HOF)；生物炭(BC)

圖 3.4-2 水體總磷流失與土壤總磷累積量百分比對照圖

3.1.5 植體生長狀況

本研究進行兩次盆栽試驗，每次試驗中進行兩次收成。第一次收成時，從莖部三公分處割取，隨機選擇每盆 3 到 4 株，共計 10 株，記錄葉片數、株高、株寬、莖部半徑、鮮重與乾重，並進行平均分析，收成後施行追肥和第三次人工降雨模擬。第二次收成則連根拔起，同樣記錄 10 株的葉片數、株高、株寬、莖部及根部的鮮重、乾重等數據，再平均進行分析。

由於溫室第一次試驗之季節氣溫較高，且陽光充足，因此由表 3.1.5-1 與表 3.1.5-2 觀察到第一次試驗結果中發現第一次盆栽試驗之整體生長明顯較第二次盆栽試驗之整體生長效果佳。而比較化學肥料與有機肥料之組別，化學肥料為快速反應之肥料，因此整體生長效果較有機肥料生長效果佳。

從收成的結果可明顯的發現半量施肥且添加生物炭之組合，在陽光充足、氣溫適宜之生長條件下，整體生長的產量與全量施肥之組合差異不大。而平均株高、莖平均、鮮重、乾重亦比全量施肥且未添加生物炭之組合有更佳的產量，生物炭的應用可以改善土壤品質，增加農作物產量，減少化肥使用量，對土地資源的保護具有正面效果 (Novak, Busscher et al. 2009)。

表 3.1.5-1 不同施肥條件植體平均高度、寬度、葉片數、莖直徑—第一次收成

(a)第一次盆栽實驗；(b)第二次盆栽實驗

(a)				
	平均高度(cm)	平均寬度(cm)	平均葉片數	平均莖直徑(cm)
FCF	49.98	10.41	12	0.69
FCF + 25 g BC	53.61	9.94	11	0.74

HCF + 25 g BC	56.40	8.66	9	0.82
HCF + 50 g BC	54.65	9.83	10	0.78
HCF + 100 g BC	61.20	9.50	10	0.80
FOF	52.00	9.50	9	0.65
FOF + 25 g BC	53.60	8.00	8	0.75
HOF + 25 g BC	55.90	10.50	9	0.75
HOF + 50 g BC	55.40	8.00	6	0.75
HOF + 100 g BC	40.80	8.70	8	0.60
(b)				
	平均高度(cm)	平均寬度(cm)	平均葉片數	平均莖直徑(cm)
FCF	25.40	11.75	7	0.40
FCF + 25 g BC	26.33	11.35	7	0.43
HCF + 25 g BC	30.88	10.49	6	0.50
HCF + 50 g BC	28.15	11.33	6	0.47
HCF + 100 g BC	28.63	11.36	6	0.50
FOF	26.29	8.34	6	0.39
FOF + 25 g BC	28.23	9.63	6	0.43
HOF + 25 g BC	27.16	9.59	6	0.40
HOF + 50 g BC	28.29	11.18	6	0.42
HOF + 100 g BC	26.41	10.91	5	0.43

備註：全量化學肥料(FCF)；半量化學肥料(HCF)；全量有機肥料(FOF)；半量有機肥料(HOF)；生物炭(BC)

3.1.6 整體生命週期評估

生命週期評估(Life-cycle assessment, LCA)為一種透過計算與評估產品整個生命週期中（包括生產、組裝、運輸、銷售、使用、維修以及廢棄或回收）對環境的影響。只需將產品生命週期的各個過程及生產要素等數據輸入專門的軟件和模型，便可得出以不同的指標表現環境影響的評估結果，如全球暖化潛勢(GWP)、水污染、富營養化、臭氧層破壞、人體健康和生態系統等。充分掌握生產到廢棄的相關數據，便能使用 LCA 技術來比較不同產品對環境的影響(Roy, Nei et al. 2009)。

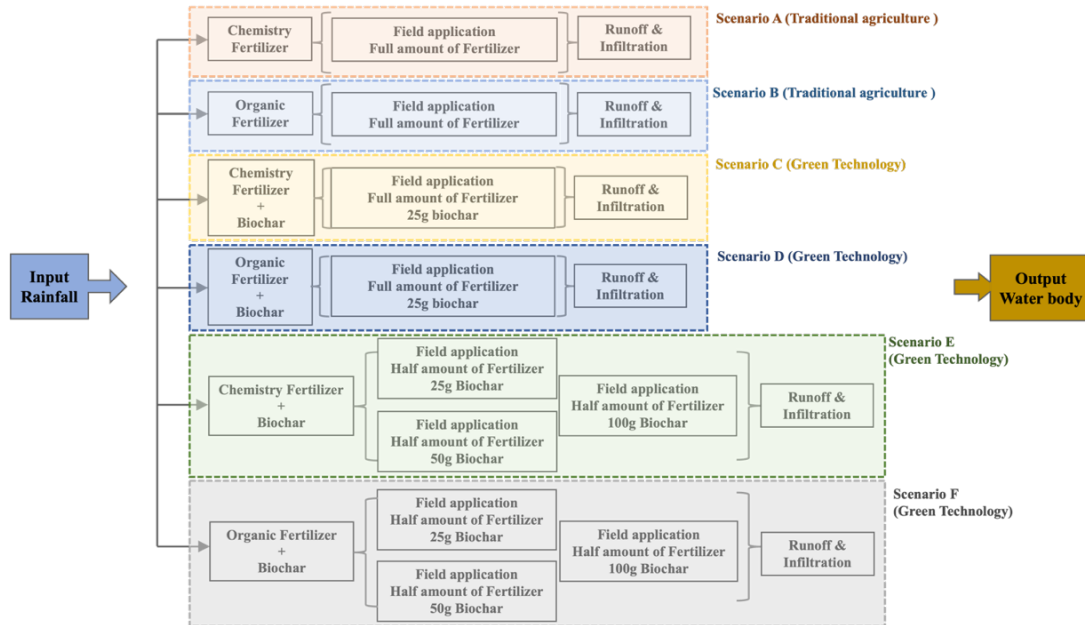
此次實驗主要以追蹤氮足跡為主，圖 4.5.1 為評估生命週期之範疇界定，實驗組別分為傳統農耕與綠色技術兩種方法進行分析與比較，觀察各組別之氮元素影響程度。

由圖 3.1.5-2(a)與圖 3.1.5-2(b)可明顯觀察到添加化學肥料之組別對於環境的衝擊明顯多於有機肥料組別，結果顯示 Scenario A/ Scenario C/ Scenario E (E-1/ E-2/ E-3) 環境衝擊 > Scenario B/ Scenario D/ Scenario F (F-1/ F-2/ F-3) 環境衝擊。

由圖 3.1.5-2(a)與圖 3.1.5-2(b)可觀察到化學肥料實驗組別，由圖 3.1.5-2(a)單一影響類別評估中影響整體環境佔比最明顯為全球暖化,人類健康(Global Warming, Human health)，圖 3.1.5-2(b)損壞評估中，主要評估人類健康(Human health)、生態

(ecosystems)、資源(Resources)之衝擊評估，整體環境衝擊之趨勢 Scenario A > Scenario C > Scenario E (E-1/ E-2/ E-3)，結果顯示化學肥料對於環境影響較負面，且添加生物炭能有效減少化學肥料對環境之衝擊。

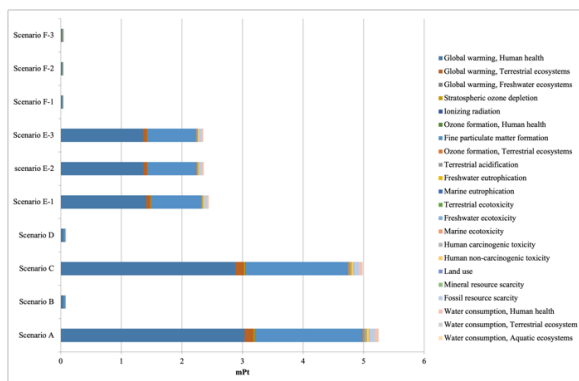
由圖 3.1.5-3(a)可觀察到有機肥料之組別，影響環境中佔高的亦為全球暖化,人類健康(Global Warming, Human health)，而圖 3.1.5-2(b)損壞評估中主要亦是評估人類健康(Human health)、生態(ecosystems)、資源(Resources)之衝擊評估。



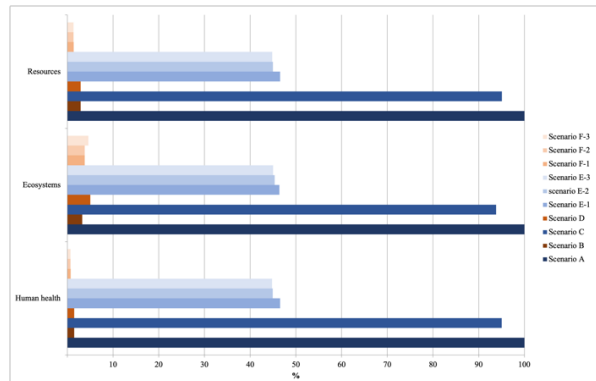
備註：Scenario A-全量化學肥料(FCF)；Scenario B-全量有機肥料(FOF)；Scenario C-全量化學肥料(FCF) + 25 g 生物炭(BC)；Scenario D-全量有機肥料(FOF) + 25 g 生物炭(BC)；Scenario E (E-1/ E-2/ E-3)-半量化學肥料(HCF) + 25/50/100 g 生物炭(BC)；Scenario F(F-1/ F-2/ F-3)-半量有機肥料(HOF) + 25/50/100 g 生物炭(BC)

圖 3.1.5-1 生命週期評估之界定範疇

(a)

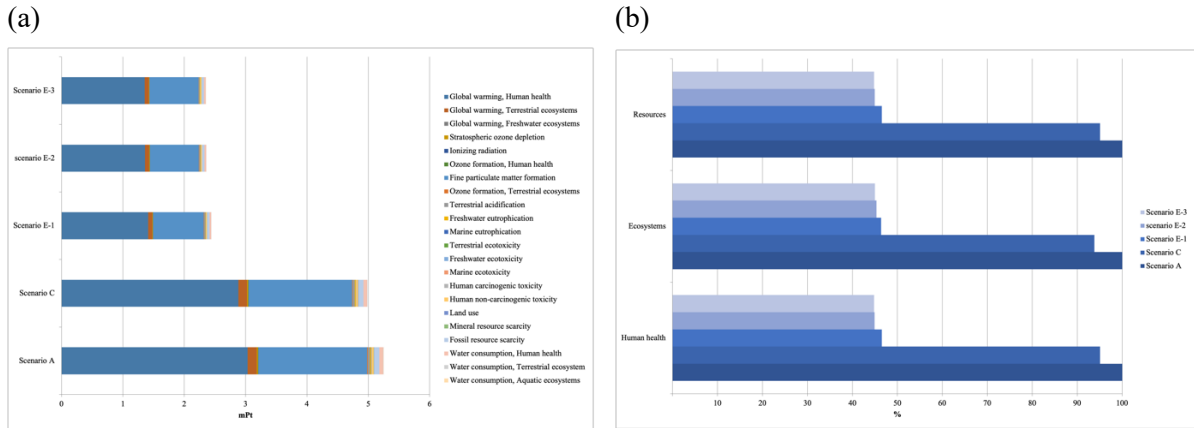


(b)



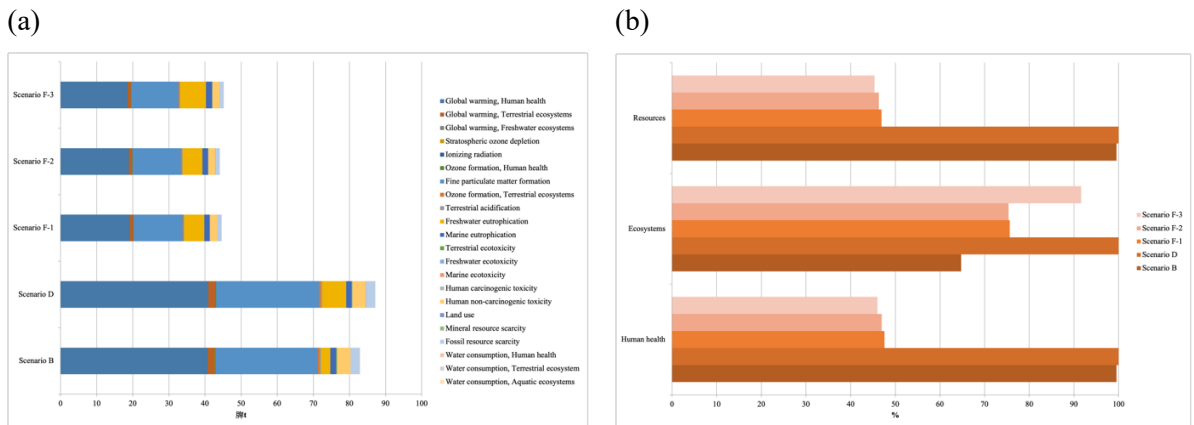
備註：Scenario A-全量化學肥料(FCF)；Scenario B-全量有機肥料(FOF)；Scenario C-全量化學肥料(FCF) + 25 g 生物炭(BC)；Scenario D-全量有機肥料(FOF) + 25 g 生物炭(BC)；Scenario E (E-1/ E-2/ E-3)-半量化學肥料(HCF) + 25/50/100 g 生物炭(BC)；Scenario F(F-1/ F-2/ F-3)-半量有機肥料(HOF) + 25/50/100 g 生物炭(BC)

圖 3.1.5-2 全實驗組別比較 (a)單一影響類別評估 (b)損壞評估比較



備註：Scenario A-全量化學肥料(FCF)；Scenario C-全量化學肥料(FCF) + 25 g 生物炭(BC)；Scenario E (E-1/ E-2/ E-3)-半量化學肥料(HCF) + 25/50/100 g 生物炭(BC)

圖 3.1.5-3 化學肥料組別 (a)單一影響類別評估；(b)損壞評估



備註：Scenario B-全量有機肥料(FOF)；Scenario D-全量有機肥料(FOF) + 25 g 生物炭(BC)；Scenario F (F-1/ F-2/ F-3)-半量有機肥料(HOF) + 25/50/100 g 生物炭(BC)

圖 3.1.5-4 有機肥料組別比較 (a)單一影響類別評估；(b)損壞評估

四、結論

本實驗主要探討於不同種類之肥料添加不同劑量之生物炭，實驗過程中進行暴雨模擬，對於營養鹽流失的狀況進行分析與討論，歸納生物炭施用對於周遭水體非點源污染改善的效益。本研究的主要結論如下：

1. 參照良好農業規範(TGAP)中施用量之全量化學肥料情況下，總氮之水體流失量依序為 FCF(903.30 mg/m^2) > FCF + 25 g BC(876.04 mg/m^2)；施用半量化學肥料下，總氮之流失量依序為 HCF + 25 g BC(492.29 mg/m^2) > HCF + 50 g BC(395.00 mg/m^2) > HCF+100 g BC(267.60 mg/m^2)，顯示添加生物炭可最大程度減少化學肥料中氮含量之流失。
2. 參照良好農業規範(TGAP)中施用量之全量有機肥料情況下，總氮之流失量依序為 FOF + 25 g BC(235.74 mg/m^2) > FOF (200.34 mg/m^2)；施用半量有機肥料下，總氮

之流失量依序為 HOF + 50 g BC(388.27 mg/m²) > HOF + 25 g BC(343.17 mg/m²) > HOF + 100 g BC(337.75 mg/m²)，顯示添加生物炭對於有機肥料之總氮流失並無明顯減少趨勢，添加生物炭與未添加差異並不大，而添加 25 g、50 g 與 100 g 生物炭的流失量差異亦不大。

3. 根據植體數據分析，快速釋放之化學肥料組別整體生長趨勢大於緩慢釋放有機肥料整體生長趨勢。且化學肥料與有機肥料產量上顯示由 100%減少至 50%肥料並添加生物炭的施用，並不會影響整體產量，甚有增加的趨勢，顯示添加生物炭有明顯地維持產量或增加的正面影響。
4. 由整體實驗顯示不同種類之肥料條件下，整體總氮流失最少、固定土壤中氮含量以及植體產量維持不變或提升，化學肥料中 HCF+ 100 g BC 為最佳條件組合；而有機肥料中，FOF 為最佳條件組合，顯示有機肥料添加生物炭的效果並不明顯。整體則是適用有機肥料最為環境友善。
5. 依據生命週期評估(LCA)之數據分析，化學肥料與有機肥料添加生物炭能有效減少肥料對環境之衝擊，進而改善環境問題。
6. 生物炭之原材料與其使用劑量外加植體特性、土壤特性與氣候條件差異，所表現出的效果將有所不同，因此實際應用過程中，須依種植面積、土壤酸鹼度、土壤肥力與植體生長條件，進行生物炭之原料選擇與劑量調整。
7. 本實驗為時程較短且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，生物炭作用時間較短，且土壤本身為非均質性，外加部分肥料作用於土壤釋放時間較長，需要累積長時間的資料才能用趨勢去判斷，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，限制整體趨勢走向。

本試驗結果探討於不同種類之肥料添加不同劑量之生物炭，將其作為土壤添加劑，結果達到提升土壤條件，吸附、固定養分、增加保水性、減少氮肥流失等效益，相關試驗成果對污染削減策略具有正面影響，提高農業產值，改善環境品質，落實循環經濟與環境保護的雙贏局面。

參考文獻

Cui, N., et al. (2020). "Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications." Global Ecology and Conservation **22**: e01011.

Dai, Y., et al. (2020). "Utilization of biochar for the removal of nitrogen and phosphorus." Journal of Cleaner Production **257**: 120573.

Jain, C. K. and S. Singh (2019). "Best management practices for agricultural nonpoint source pollution: Policy interventions and way forward." World Water Policy **5**(2): 207-228.

Novak, J. M., et al. (2009). "Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil." Soil science **174**(2): 105-112.

Roy, P., et al. (2009). "A review of life cycle assessment (LCA) on some food products." Journal of food engineering **90**(1): 1-10.

Sánchez, Ó. J., et al. (2017). "Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process." Waste management **69**: 136-153.

Wang, C., et al. (2018). "Effects of bamboo biochar on soybean root nodulation in multi-elements contaminated soils." Ecotoxicology and Environmental Safety **150**: 62-69.

Wu, Y. and J. Chen (2013). "Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China." Ecological indicators **32**: 294-304.