

綠色防治技術應用於農業非點源污染控制

Green Technology for Non-Point Source Control in Agriculture

國立台灣大學
生物環境系統工程系
博士班研究生

黃雅甄
Ya-Zhen Huang

國立台灣大學
生物環境系統工程系
研究助理

羅子翔
Tzu-Hsiang Lo

財團法人農業工程研究中心
環境組
研究員兼環境組組長

張大偉
Ta-Wei Chang

國立台灣大學
生物環境系統工程系
研究助理

李俊緯
Jun-Wei Li

國立台灣大學
生物環境系統工程系
研究助理

林振男
Jhen-Nan Lin

國立台灣大學
生物環境系統工程系
教授

范致豪*
Chihhao Fan

摘要

農業活動所造成的非點源污染物會隨降雨或灌溉經由地表逕流、中間流及地下水流等傳輸方式進入周圍的水體，對水質造成負面影響。這項研究的主要目的為評估使用綠色防治技術對於農業非點源污染的控制效率。結果顯示，相較於化學肥料，有機肥料其可溶性成分含量較高，更易因降雨冲刷而流失，入滲水與地表逕流中氮含量呈現以下趨勢：過量施肥(120%) > 全量施肥(100%) > 半量施肥+生物菌劑(50%) > 無施肥(0%)。值得注意的是磷酸鹽養分流失表現不同的趨勢，因添加含有溶磷菌之生物菌劑，將土壤中固定的無機磷轉換成水溶性磷。此外，試驗結果也反映出農田中肥料施用後之營養鹽流失，主要受降雨事件冲刷淋洗所致。藉由減少肥料施用量並結合生物菌劑使用等作為，可發現作物收成與施用全量肥料相若，而過度施用肥料未必然促進植物生長，亦可能導致作物損傷及氮肥損失。本研究採用的綠色防治技術，可有效地減少農業活動造成的非點源污染，並維持農作物的整體生長和產量。

關鍵詞：農業非點源污染、綠色防治技術、化學肥料、有機肥料。

* 通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程系教授
106 台北市羅斯福路四段一號，chfan@ntu.edu.tw

Green Technology for Non-Point Source Control in Agriculture

Ya-Zhen Huang

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Tzu-Hsiang Lo

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Ta-Wei Chang

Agricultural Engineering
Research Center

Jun-Wei Li

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Jhen-Nan Lin

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

Chihhao Fan*

National Taiwan University
Department of
Bioenvironmental Systems
Engineering

ABSTRACT

Non-point source pollution resulting from agricultural activities may enter neighboring water bodies through surface, intermediate, or groundwater flows due to rainfall or irrigation and cause negative impacts on water quality. The main purpose of this study is to evaluate the efficiency for using green farming technology for agricultural non-point source pollution control. The results show that organic fertilizers are more likely to be washed out by rainfall or irrigation due to their higher content of soluble components as compared to chemical fertilizers. The analytical results showed that the concentrations of nitrogen nutrients in both infiltration water and surface runoff exhibited the following trend: over-fertilization (120 %) > full fertilization (100 %) > microbial agents + half fertilization (50 %) > zero fertilization (0 %). It is worth noting that the washed-away phosphate nutrient demonstrated a different trend because the addition of microbial agents, including phosphorus solubilizing bacteria, converted fixed inorganic phosphorus in the soil into water-soluble phosphorus. In addition, the experimental results proved that the loss of nutrients in the farmland after fertilizer application is mainly caused by the scouring and leaching in rainfall events. By combining the fertilizer reduction and microbial agents, the crop yield remained similar to that with full amount of fertilizer (100 %) application. Over-dose application in fertilizer may not necessarily promote the crop growth, but may cause crop damage and fertilizer loss. The green farming technology employed in this study can effectively reduced non-point source pollution from agricultural activities without impairing the overall growth and yield of crops.

Keywords: Agricultural Non-point source pollution, Green farming technology, Chemical fertilizer, Organic fertilizer.

Huang, Y.Z., Lo, T.H., Chang, T.W., Li, J.W., Lin, J.N., & Fan, C.H. (2021). "Green Technology for Non-Point Source Control in Agriculture." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 67(3), 30-40.

[https://doi.org/10.29974/JTAE.202109_67\(3\).0003](https://doi.org/10.29974/JTAE.202109_67(3).0003)

一、前言

農業生產是國家經濟發展與糧食安全穩定的基礎。然而，農業耕作期間為有效提升農業生產量，施用大量肥料及農藥，甚至超量施肥。根據聯合國世界糧農組織(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)統計的數據顯示，世界各國的氮肥與磷肥之使用量在 2005 年到 2015 年的 10 年間呈現不斷上升的趨勢，全球的平均氮肥使用量從 2005 年的每公頃 57.55 公斤上升至每公頃 68.61 公斤，磷肥則從 2005 年的每公頃 24.98 公斤上升至每公頃 30.10 公斤(Xia *et al.*, 2020)。此種農業行為在長時間操作下，因肥料或農藥過量使用，易造成水環境污染，為非點源污染成因之一(Wang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019)。

根據研究，施用的化學肥料僅有 20~50 %被作物吸收，過量之化學肥料及農藥，將使地力劣化，同時因暴雨沖刷將過剩營養鹽(如氮與磷)攜帶進入水體，經由土壤入滲及深層滲漏污染地下水體，亦可經由降雨逕流或農田排水而污染地面承受水體及地下水(如河川、湖泊、水庫與地下水等)，導致營養鹽濃度增加(Wang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2016; 謝政道，2007)，甚至可能造成藻華與藻類腐爛導致缺氧或水環境中的「死域(Dead zones)」，因其對造成世界各地的水體負面影響，而受到越來越多的關注(EPA, 2016; Kellr *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2020)。

根據美國國家環境保護署(Environmental Protection Agency, EPA)於 2016 年的報告指出，農業非點源污染是造成溪流與野溪問題的主要來源，同時也是湖泊的第三大污染源。英國環保署(Environment Agency, EA)2007 年的報告中表示，有 45 %與 50 %的河川受到高濃度硝酸鹽與磷酸鹽的危害。農業非點源污染對於歐盟和德國的地表水的非點源污染分別佔了 55 %和 48 %的貢獻度(Volk *et al.*, 2009)。於中國境內，農業非點源污染估計占總氮與總磷負荷量的 52 %與 54 %，而在義大利則分別占有 24 %及 71 % (Xia, 2020)。Zhang 和 Lou 於 2011 年發表的研究認為，農業與畜牧業產生的非點源污染比工業廢水和生活污水中的佔比多出許多。

截至目前為止，世界各地已有許多專家學者投入研究非點源污染之最佳管理策略與控管措施，主要係採行結構性最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)，其中結構性 BMPs 如設置人工溼地、草溝、草帶、多層複合濾料淨化系統(Multi-Soil Layering, MSL)等(Bugg *et al.*, 2017; Hanrahan *et al.*, 2018; Leroy *et al.*, 2016)，期藉由各種策略與工法的改良，以改善

水體污染，降低水體中總氮(Total Nitrogen, TN)、總磷(Total Phosphorus, TP)、生化需氧量(Biochemical Oxygen Demand, BOD)、化學需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)、懸浮固體(Suspended Solid, SS)與重金金屬等污染物。然各種策略雖可截流初期暴雨，減緩肥料及農藥進入水體，但其成效須考量眾多環境因素，如河道寬度、土壤類型、植被種類等，皆可能影響其消滅效率(Jain and Singh, 2019; Wu *et al.*, 2013)。最近廣受關注的控制策略，認為應從污染源頭重手進行控制，減少肥料使用，始能有效降低污染。本研究將規劃綠色防治技術應用於農業非點源污染控制之現地試驗，並進行入滲水、逕流水與土壤之採樣與檢測分析，以掌握農業活動使用之肥料流入環境中的狀況及污染防治技術之效能，評估綠色防治技術對於農業非點源污染的控制成效，可做為未來綠色防治技術應用與推行之參考。

二、研究方法

本研究藉由現地試驗的設計，探討綠色防治技術對於農業非點源污染的控制成效，現地試驗場址為桃園農工中心，為 6.8 公尺長，2.8 公尺寬之矩形試驗場地，各試驗條件之栽種面積為，1.44 平方公尺。

2.1 現地試驗流程與方法

現地試驗選擇生長週期約 25~35 天之萵苣做為試驗作物，並以「不同農法」、「不同施肥量」與「有無添加生物菌劑(Microbial Agents, MA)」設計試驗組別。就「不同農法」而言，本試驗規劃比較慣行農法與有機農法兩者間對於環境污染貢獻的差異，慣行農法係指以人工化學技術，克服病蟲害及地力衰竭等問題，採行施用農藥、化學肥料、基因改造的密集耕作方式；而有機農法則回歸早期的耕作方式，不使用農藥、化肥及基改技術來刺激生產，但容許適度施用有機肥料及堆肥，使用對土地較無傷害的方式來防治病蟲害。而「不同施肥量」與「有無添加生物菌劑」的設計內涵，無論慣行農法或有機農法，本研究皆依照農委會臺灣良好農業規範(Taiwan Good Agriculture Practice, TGAP)推薦肥料添加量進行試驗組別設計，分別為：0 %為不使用肥料；50 %+MA 為使用 0.5 倍 TGAP 推薦量肥料+生物菌劑；100 %為使用 1.0 倍 TGAP 推薦量肥料；120%為使用 1.2 倍 TGAP 推薦量

表 1 化學肥料與有機肥料之廠牌、營養組成等資訊

	廠牌	營養組成
化學肥料 (臺肥 1 號)	臺灣肥料股份有限公司	全氮：26 % (內含銨態氮 2 %) 水溶性磷酐：13 % 水溶性氧化鉀：13 %
有機肥料 (田寶 P25 號)	臺灣糖業股份有限公司	全氮：5.5 % 全磷酐：2.0 % 全氧化鉀：2.0 % 有機質：85 %

肥料。本試驗所使用之化學肥料(Chemical Fertilizer, CF)與有機肥料(Organic Fertilizer, OF)相關資訊如表 1。依據 TGAP 之建議，於耕作前進行整地施以基肥，爾後進行 2 次追肥，經種植後 4 週從試驗田收穫作物。並於種植中，採集水體和土壤樣品，原則上各次施肥作業後，經 4~5 天進行土壤採集，盡可能配合降雨事件，於有效降雨事件隔天進行田間入滲水及逕流水採集。

2.2 土壤採樣與性質分析

本研究於基肥施用前和作物採收後進行土壤樣品採集，其方法為選定試驗田不同位置處，採混合採樣法隨機選取三個點進行土壤採樣，每點採集之土樣置於塑膠盆中，充分混合均勻後再取出適當量體進行土壤檢驗分析。而每一點土壤採樣深度為表土層 0~15 公分，用土壤採集器將表土掘成 V 形空穴，深約 15 公分，取出約 1.5 公分厚上下齊寬的土，大約須採集 1 公斤。土壤檢測分析項目應包含質地(比重法)、總體密度(體積法)、孔隙度(體積法)、pH 值(NIEA S410.62C)、陽離子交換容量(NIEA S202.60A)、導電度(TARI S101.1B)、有機質(TARI S201.1B)及營養鹽含量(TARI S301.1B)。

2.3 水體採樣與營養鹽濃度分析

本研究規劃於試驗田放置訂製之逕流水採集器以收集逕流水樣品，另以埋於土壤內之盛水盤收集入滲水樣品，如圖 1 所示。採樣頻率原則為於施肥後第一次降雨後至現地採集樣品，且於 24 小時內採集，並依現地實際狀況進行調整，而降雨量須累積至少在 10 mm 以上，平均值±25 %內(將參考中央氣象局測站

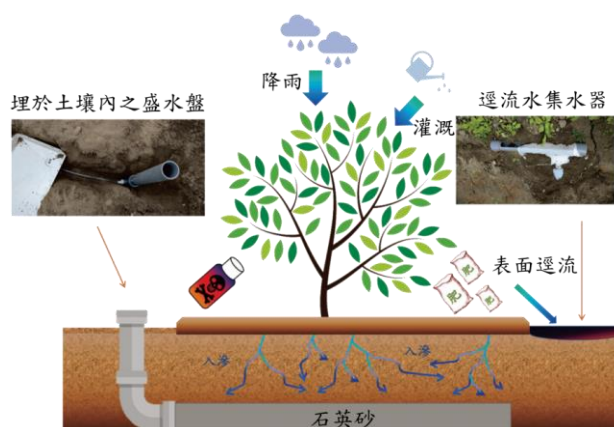


圖 1 現地試驗入滲水及逕流水採集規劃示意圖

之數據，與本計畫自行放置之量筒所測得之降雨雨量)。入滲水與逕流水檢測分析項目應包含氨氮(NIEA W437)、硝酸鹽氮(NIEA W415)、凱氏氮(NIEA W438)、亞硝酸鹽氮(NIEA W415)、總磷酸鹽(NIEA W427.53B)、總鉀(NIEA W313.54B)等。

2.4 肥料營養鹽流失量推估方式

本研究針對現地試驗過程中收集入滲水及逕流水進行水質分析，設置於田間之採集器採集取得流入之水體，代表試驗田區之入滲水及逕流水水質條件，並以此進行營養鹽流失量估算。營養鹽添加及流失量數據呈現方式均為「公克/單位試驗田面積」。由於本計畫現地入滲水及逕流水之主要來源為降雨及灌溉水，參考灌溉原理與本計畫土壤樣品調查成果可知，雨水與灌溉水進入田間後會因土壤質地影響其入滲速率，土壤質地越細則入滲速率越慢，反之土壤質地越粗則入滲速率越快。以壤土質地為例，當雨水與灌溉水進入田間土壤後，其土體滲透量(Percolation)約為 12 mm/day，此滲漏量即為本試驗所收集之入滲水樣品，而當有高於土體滲漏量之雨水或灌溉水進入田間時，則會形成地表逕流，即為本試驗收集之逕流水樣品。本計畫估算田間入滲水及逕流水之總量時，除透過每日降雨量外，無降雨期間則以人工灌溉方式維持作物生長，每次灌溉量約為 15,000 mL，而後依據土壤質地分析結果，進行入滲水量計算。壤土與黏質壤土之土體滲透量分別為 12 mm/day 及 7 mm/day，計算公式如下：

$$\text{入滲水量(mL)} = \text{土體滲透量(mL/m}^2\text{)} \times \text{栽種土壤面積(m}^2\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{逕流量(mL)} = (\text{降雨量(mL/m}^2\text{)} \times \text{栽種土壤面積(m}^2\text{)} + \text{灌溉量(mL)} \times n) - \text{田間容水量(mL)} - \text{入滲水量(mL)} \dots (2)$$

$$\text{入滲水冲刷量(g/m}^2\text{)} = \text{入滲水量(mL)} \times \text{污染濃度(mg/L)} \times 1,000 \div \text{栽種土壤積(m}^2\text{)} \dots (3)$$

$$\text{逕流水冲刷量(g/m}^2\text{)} = \text{逕流量(mL)} \times \text{污染濃度(mg/L)} \times 1,000 \div \text{栽種土壤面積(m}^2\text{)} \dots (4)$$

2.5 萵苣之田間栽培概況與採收數據統計

本研究試驗之萵苣，選擇葉用品種進行栽種，萵苣屬於冷涼型作物，適合於臺灣秋冬季與春季進行栽培。現地試驗栽種約為臺灣氣候之春季，生長狀況良好。萵苣樣品數據以田區內生長狀況較佳之十顆萵苣進行採計，記錄萵苣之鮮重、株高及葉數，並以數據之平均值代表該條件下萵苣之生長表現。

三、結果與討論

3.1 現地試驗田土壤基本性質調查

土壤質地、總體密度、孔隙度、有機質及土壤陽離子交換容量調查為瞭解土壤物理及化學特性的重要方法之一。本研究之現地試驗場址為桃園農工中心試驗田，其土壤經基本物理性質分析結果如表 2 顯示，土壤質地屬於粉質粘壤土(砂粒：18.45 ± 2.17 %；粉粒：42.75 ± 1.58 %；粘粒：38.81 ± 1.46 %)，總體密度約為 1.15 %，孔隙度約為 40 ~ 50 %。土壤砂粒含量明顯較低，仍有相當高的粘粒含量，土壤排水能力雖較差，但從土壤總體密度和孔隙度可得知土壤並無壓實狀況發生，表示其具有足夠的孔隙提供水分和空氣進行交換，作物根系可正常向下發展，有足夠的生長空間給

表 2 萵苣慣行/有機農法試驗田土壤基本物理性質

	試驗田土壤
砂粒 (%)	18.45 ± 2.17
粉粒 (%)	42.75 ± 1.58
粘粒 (%)	38.81 ± 1.46
土壤質地	粉質粘壤土
總體密度 (%)	1.15
土壤孔隙度 (%)	40-50

註：0 %CF(無施肥)；50 %CF+MA (半量施肥+生物菌劑)；100 %CF (全量施肥)；120 %CF (過量施肥)

作物根系和微生物，且具有較高的保肥能力。

而從土壤化學性質分析結果(如表 3 和表 4)顯示，土壤於試驗前/後 pH 值整體變化範圍約為 5.08 至 5.96 之間，pH 值偏低，呈酸性土壤。導電度皆小於 1,000 μS/cm，陽離子交換容量約為 9.75 ± 0.14 meq/100g，土壤總氮量變化範圍約為 266 mg/kg 至 448 mg/kg。而有機質約為 2.5 %。比較分別施用化學肥料與有機肥料之萵苣種植試驗結果發現，以有機肥料栽培萵苣之土壤有機質含量，於施用基肥前至採收後並未有上升，顯示有機肥料中的有機物質並未顯著提升土壤中有機質含量，推測係因本次試驗所使用之有機肥料主要成分為豆粕類的資材，屬易分解的有機物質，故在肥料施用後即分解被作物所利用，或隨灌溉水流失。

而施用化學肥料和有機肥料之試驗田組別 0 %CF、0 %OF、100 %CF、100 %OF、120 %CF 和 120 %OF

表 3 萵苣慣行農法試驗田試驗前/後土壤基本化學性質

	0 %NF (試驗前/後)	50 %CF+MA (試驗前/後)	100 %CF (試驗前/後)	120 %CF (試驗前/後)
pH	5.24/6.14	5.08/5.95	5.38/5.74	5.33/5.67
導電度 (μS/cm)	251/127.4	179.2/193	214/348	179.5/387
陽離子交換容量 (meq/100g)	5.83/11.1	6.81/10.94	5.89/10.46	11.17/11.53
有機質 (%)	3.13/1.86	3.05/1.87	3.13/2.06	3.04/2.03
總氮 (mg/kg)	336/252	448/294	350/308	448/364
有效性磷 (mg/kg)	6.6/36	38.7/136.8	51.5/0.9	109/4.9
有效性鉀 (mg/kg)	263.1/136	427.3/309.1	495.3/548.8	696.9/604.5

註：0 %CF (無施肥)；50 %CF+MA (半量施肥+生物菌劑)；100 %CF (全量施肥)；120 %CF (過量施肥)

表 4 萬苣有機農法試驗田試驗前/後土壤基本化學性質

	0 %NF (試驗前/後)	50 %OF+MA (試驗前/後)	100 %OF (試驗前/後)	120 %OF (試驗前/後)
pH	5.11/5.96	5.35/5.82	5.32/5.77	5.22/5.71
導電度 (μS/cm)	284/117.6	315/159	255/174	53.3/192
陽離子交換容量 (meq/100g)	8.57/10.84	9.36/11.27	9.46/11.56	9.89/11.48
有機質 (%)	2.45/1.22	2.52/1.43	2.6/2.21	3.12/1.98
總氮 (mg/kg)	280/252	266/294	378/308	364/350
有效性磷 (mg/kg)	4.6/30.7	26.4/100.9	107.3/93.4	119.5/277.9
有效性鉀 (mg/kg)	108.9/67.4	516.8/241.5	787.2/382.8	707.3/412.3

註：0 %NF (無施肥)；50 %OF+MA (半量施肥+生物菌劑)；100 %OF (全量施肥)；120 %OF (過量施肥)

之土壤有效性磷和有效性鉀皆為試驗前大於試驗後，其有效性磷和有效性鉀含量下降，可能因為被作物所利用外，或隨降雨的淋洗或沖刷等方式流失。由結果中亦可發現添加生物菌劑的試驗組別(50 %CF+MA 和 50 %OF+MA)，其土壤有效性磷含量提升，推估係土壤中溶磷菌作用使固定於土壤中的磷轉換成水溶性磷，因而提高土壤中有效磷含量。

3.2 生物菌劑菌種鑑定

目前市面上生物菌劑種類眾多，加上使用的菌種配方不同，對於試驗結果影響也會有所不同。本研究針對試驗所使用之生物菌劑進行菌種鑑定，透過微生物的 rDNA 保守區域進行擴增及定序，與 NCBI 資料庫進行比對出最符合的菌種，共鑑定出 168 種的微生物菌種，其中有 7 種為溶磷菌及 7 種為光合菌，詳如表 5 所示，其他 154 種為與本試驗較無直接關係的菌種。

表 5 本試驗使用的生物菌劑菌種分析結果摘錄表

種類	菌種
溶磷菌	<i>Achromobacter</i>
	<i>Acinetobacter</i>
	<i>Acinetobacter lwoffii</i>
	<i>Bacillus</i>
	<i>Bacillus thermoamylovorans</i>
	<i>Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia</i>
	<i>Pseudomonas</i>
光合菌	<i>Anaerolineaceae</i>
	<i>Gulbenkiania indica</i>
	KD4-96
	<i>Rhodocyclaceae</i>
	<i>Rhodopseudomonas palustris</i>
	<i>Rhodopseudomonas</i>
	<i>Vogesella</i>

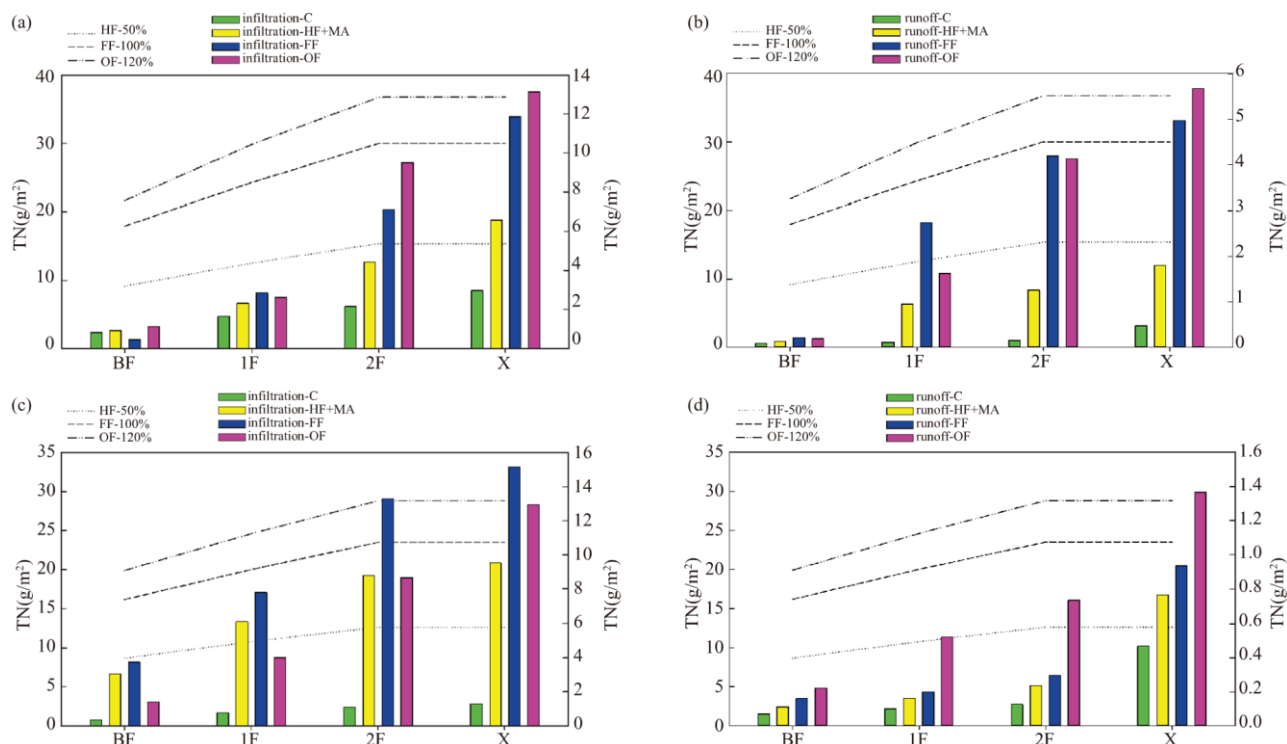
註：僅摘錄與本試驗相關之微生物菌種

3.3 氮肥流失量

現地試驗期間水體樣品之氨氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮及凱氏氮分析結果於所有試驗條件下，氮類濃度均為入滲水>逕流水，且濃度高低依序為硝酸鹽氮>凱氏氮>氨氮>亞硝酸鹽氮，由此趨勢可知肥料中未被作物使用的氮將溶出至水中，形成硝酸鹽氮穩定存在。為探討氮污染物沖刷量，每次測得之氨氮、硝酸鹽氮、亞硝酸鹽氮、凱氏氮由濃度換算成沖刷量，並推估經由入滲或逕流沖刷流失之累加量，並與肥料施用量進行比對，詳如圖 2。試驗結果顯示，各試驗組別總氮累加流失量(入滲水+逕流水)依序為慣行農法栽種萬苣試驗時，過量施肥(18.82 g/m²)>全量施肥(16.83 g/m²)>半量施肥+生物菌劑(8.39 g/m²)>無施肥(3.43 g/m²)；有機農法栽種萬苣試驗時，全量施肥(16.08 g/m²)>過量施肥(14.30 g/m²)>半量施肥+生物菌劑(10.28 g/m²)>無施肥(1.78 g/m²)。

由圖 2 結果中亦發現總氮流失量也為慣行農法栽種萬苣試驗>有機農法栽種萬苣試驗。於過量施肥條件下，兩者最終氮肥施用量換算成總氮量皆為 76.37 g，而施用量與流失量差異大。依據中央氣象局的降雨量顯示，於採收前降雨量為 40.5 mm，降雨量較少，故總氮量流失量也減少許多，由此可知，降雨量為影響總氮量流失的重要因子之一。然而由結果中亦可發現添加生物菌劑的組別(50 %CF+MA)，有能有效降低水中總氮含量之效果。

義大利科學家發現一種名為 *Rhodobacter capsulatus* 的紫色非硫光合細菌(Costa *et al.*, 2017)，其於不同環境條件下具有不同代謝活性，利用該光合細菌進行城市廢水營養鹽淨化測試，發現於加入該光合細菌的廢水中，其 NO₃-N 濃度減少約 95 %、NH₃-N 濃度減少約 70 %及 COD 濃度降低約 69 %，該研究另分析其分解環境與成本效益，證實於有氧及黑暗的條件下其水質淨化效果較佳，可適用於廢水淨化。而根據中國



註 1：BF(基肥)；1F(1 追)；2F(2 追)；X(採收)

註 2：C(無施肥)；HF+MA(半量施肥+生物菌劑)；FF(全量施肥)；OF(過量施肥)

圖 2 萵苣試驗田水體總氮數據圖(a)慣行農法入滲水；(b)慣行農法逕流水；(c)有機農法入滲水；(d)有機農法逕流水

及馬來西亞研究中則發現 *Rhodobacter sphaeroides* 可於一般環境條件及缺氧黑暗條件下，吸收與去除大量的氮與硝酸鹽物質(Ids et al., 2015; Madukasi et al., 2011)。該光合細菌於光異養生長條件下，可有效去除廢水中 71 %硝酸鹽類、62 %氮及 50~80 % COD，可做為廢水處理良好淨化劑。

3.4 磷肥流失量

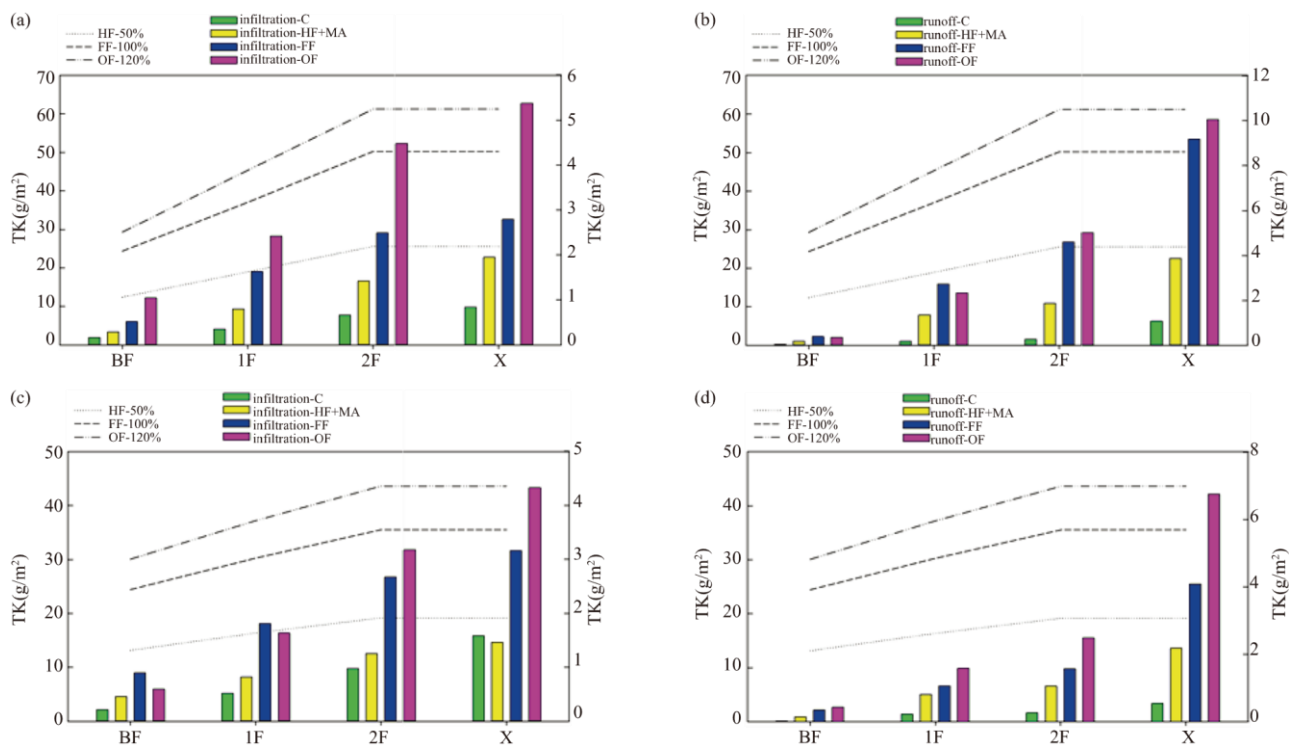
現地試驗期間入滲水與逕流水樣品之總磷分析結果依循總氮之分析討論方式，量測獲得之總磷濃度換算成流失量，再進行累加，並與肥料施用量進行比對，詳如圖 3 所示。試驗結果顯示，各試驗組別總磷流失量(入滲水+逕流水)依序為慣行農法栽種萵苣試驗時，過量施肥(0.40 g/m²) > 全量施肥(0.09 g/m²) > 半量施肥+生物菌劑(0.08 g/m²) > 無施肥(0.04 g/m²)；有機農法栽種萵苣試驗時，過量施肥(0.07 g/m²) > 全量施肥(0.04 g/m²) > 半量施肥+生物菌劑(0.04 g/m²) > 無施肥(0.02 g/m²)。

然而由結果中亦可發現，採半量之 TGAP 推薦肥料量配合添加生物菌劑的組別(50 %CF+MA)，其水中總磷含量不論是慣行農法或有機農法栽種萵苣皆與依

照 TGAP 推薦量肥料的試驗組相近，顯示生物菌劑中含有溶磷菌，能將土壤和肥料中的磷轉換成水溶性磷，導致流失量較大。韓國學者透過共生培養 *Chlorella vulgaris* 及 *Pseudomonas putida* 兩種光合細菌，研究其對於受污染水體中營養鹽(氮及磷酸鹽等)與 COD 之影響與去除效果(Mujtaba et al., 2017)。於共生培養系統中，此兩種光合細菌相互促進生長，顯示兩者間存在共生作用，且能同時去除廢水中的氮、磷及有機碳物質等，降低水體中約 60~80 %COD。透過共生培養系統重複分批的操作試驗，證實其營養鹽去除效果與循環系統之穩定性，且光合細菌共生培養系統可應用於實際污水連續處理。

3.5 鉀肥流失量

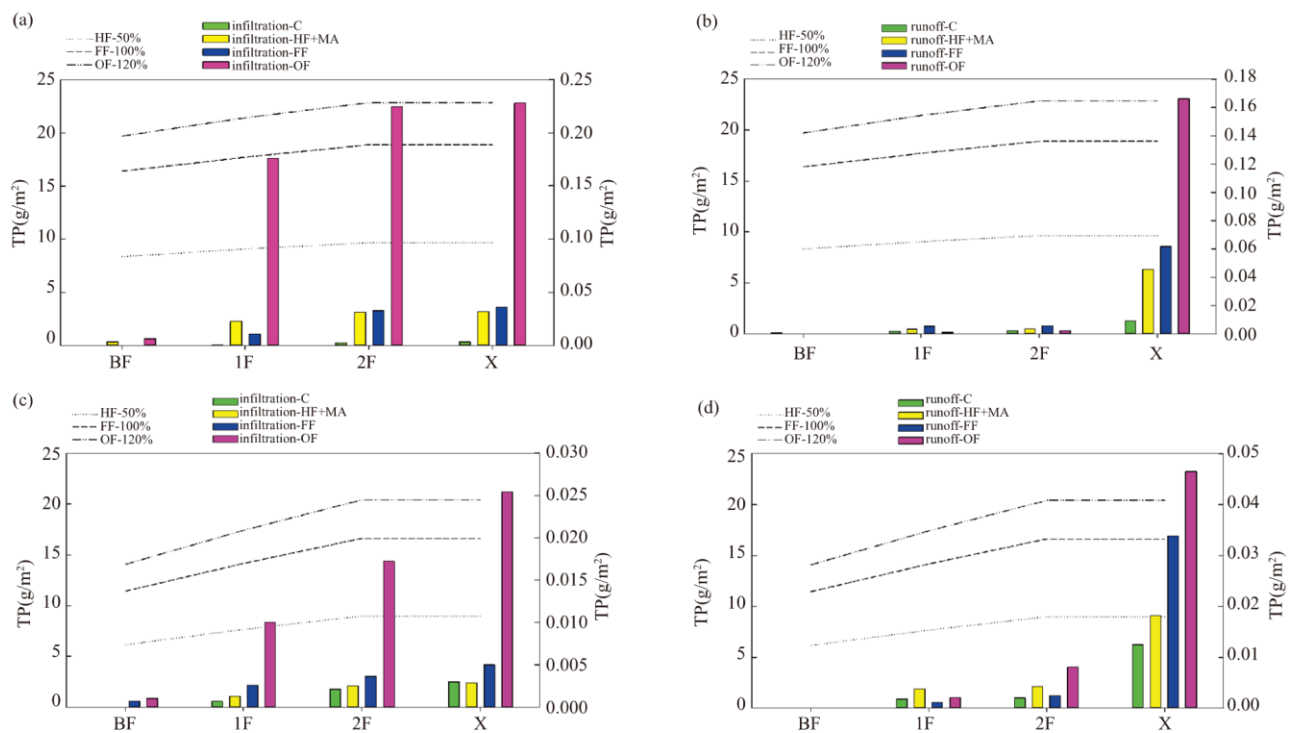
現地試驗期間入滲水與逕流水樣品之總鉀分析結果，依循總氮之分析討論方式，量測獲得之總鉀濃度，換算成流失量，再進行累加，並與肥料施用量進行比對，詳如圖 4 所示。試驗結果顯示，各試驗組別總鉀流失量(入滲水+逕流水)依序為慣行農法栽種萵苣試驗時，過量施肥(15.42 g/m²) > 全量施肥(11.12 g/m²) > 半量施肥+生物菌劑(6.67 g/m²) > 無施肥(1.93 g/m²)；



註 1：BF(基肥)；1F(1 追)；2F(2 追)；X(採收)

註 2：C(無施肥)；HF+MA(半量施肥+生物菌劑)；FF(全量施肥)；OF(過量施肥)

圖 3 苜蓿試驗田水體總磷數據圖(a)慣行農法入滲水；(b)慣行農法逕流水；(c)有機農法入滲水；(d)有機農法逕流水



註 1：BF(基肥)；1F(1 追)；2F(2 追)；X(採收)

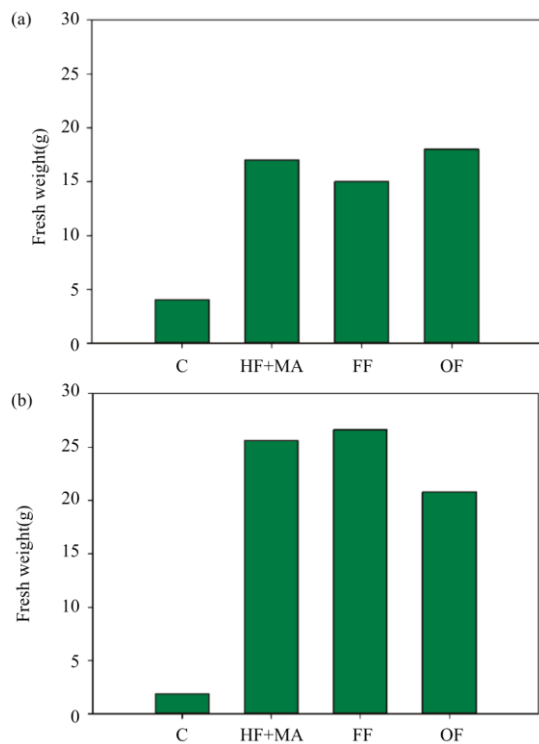
註 2：C(無施肥)；HF+MA(半量施肥+生物菌劑)；FF(全量施肥)；OF(過量施肥)

圖 4 苜蓿試驗田水體總鉀數據圖(a)慣行農法入滲水；(b)慣行農法逕流水；(c)有機農法入滲水；(d)有機農法逕流水

有機農法栽種茼蒿試驗時，過量施肥(11.08 g/m^2) > 全量施肥(7.25 g/m^2) > 半量施肥+生物菌劑(3.65 g/m^2) > 無施肥(2.13 g/m^2)。試驗結果發現，於施用不同種類肥料的條件下，總鉀流失量變化有顯著差異，尤其以入滲水具較明顯趨勢(過量施肥 > 全量施肥 > 半量施肥+生物菌劑 > 無施肥)，且逕流水之總鉀流失量高於入滲水。

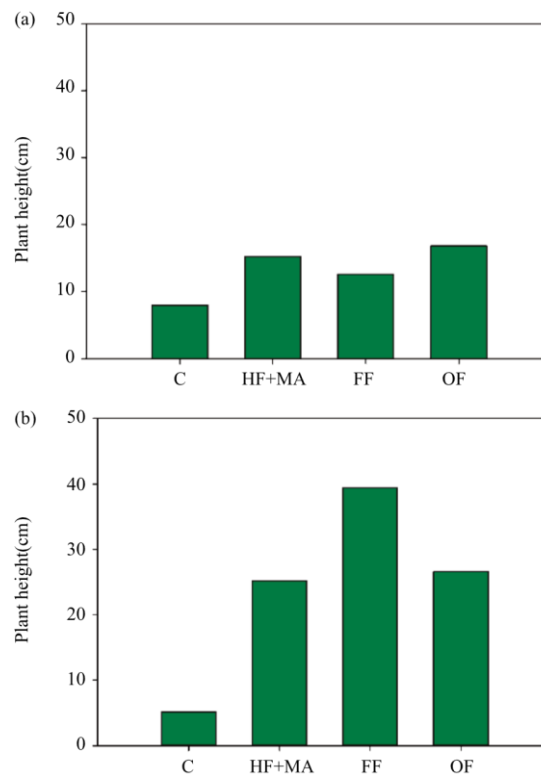
3.6 綠色防治技術對植物生長的影響

本試驗亦針對慣行和有機農法種植之茼蒿進行植物生長促進作用之分析，試驗組別為無施肥(0%)、半量施肥(50%)+生物菌劑、全量施肥(100%)及過量施肥(120%)四種。茼蒿使用慣行農法種植之試驗結果如圖5a、圖6a、圖7a所示，於無施肥條件下，茼蒿單株鮮重4g、株高達7.97cm、單株葉片數為7片，為四種試驗組別中最差；以半量施肥並添加生物菌劑之條件下茼蒿生長狀況為第二佳，單株鮮重17g、株高達15.20cm、單株葉片數為14片；以全量施肥條件下茼蒿單株鮮重15g、株高達12.61cm、單株葉片數為10片，於四種試驗組別中排序第三；而於過量施肥條件下，茼蒿的生長狀況最佳，其單株鮮重18g、株高達16.79cm、單株葉片數為15片。



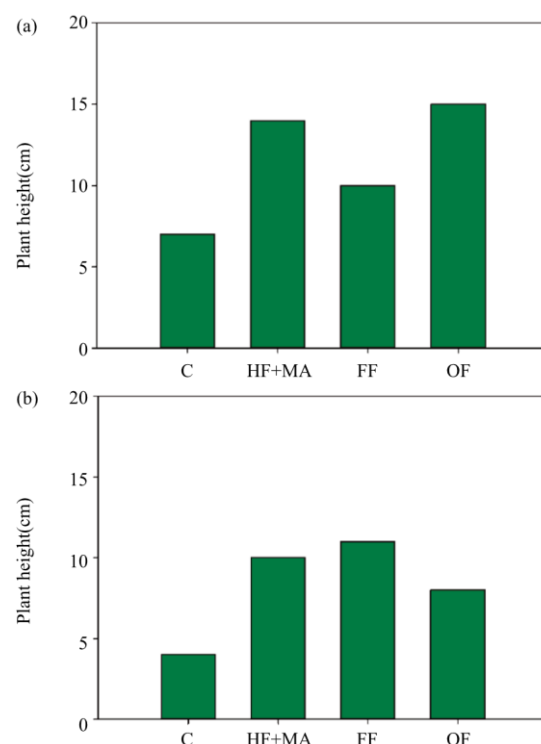
註：C(無施肥)；HF+MA(半量施肥+生物菌劑)；FF(全量施肥)；OF(過量施肥)

圖5 植體鮮重(a)慣行農法；(b)有機農法



註：C(無施肥)；HF+MA(半量施肥+生物菌劑)；FF(全量施肥)；OF(過量施肥)

圖6 植體株高(a)慣行農法；(b)有機農法



註：C(無施肥)；HF+MA(半量施肥+生物菌劑)；FF(全量施肥)；OF(過量施肥)

圖7 單株植體葉片數(a)慣行農法；(b)有機農法

萵苣使用有機農法種植之試驗結果如圖 5b、圖 6b、圖 7b 所示，於無施肥條件下，萵苣單株鮮重 1.9 g、株高達 5.12 cm、單株葉片數為 4 片，為四種試驗組別中最差；以半量施肥並添加生物菌劑之條件下萵苣生長狀況第二佳，其單株鮮重 25.6 g、株高達 25.15 cm、單株葉片數為 10 片；以全量施肥條件下，萵苣的生長狀況最佳，其單株鮮重 26.6 g、株高達 39.43 cm、單株葉片數為 11 片；而於過量施肥條件下，為四種試驗組別中排序第三，其單株鮮重 20.8 g、株高達 26.59 cm、單株葉片數為 8 片。

由上述結果顯示，在使用半量 TGAP 推薦量肥料並添加生物菌劑的條件下，不論是慣行農法或是有機農法耕種萵苣，其生長狀況與施用全量 TGAP 推薦量肥料和 1.2 倍 TGAP 推薦量肥料的試驗組並沒有顯著的差異。根據研究指出，光合菌能強化土壤固氮能力，使得作物增產，如施用生物菌劑後，發現穀類產量有效提升 21~29 % (Harada *et al.*, 2005)。而於栽種白菜的土壤裡，添加 *Rhodopseudomonas palustris*，只需要施用原先所需的一半肥料量，即可與施用全量施肥量的組別，達到一樣的生長效果，因為 *Rhodopseudomonas palustris* 可提高肥料中氮元素的利用效率(Wong *et al.*, 2014)。

四、結論與建議

4.1 結論

綜整本研究現地試驗檢測分析結果，數值大致呈現不同幅度跳動趨勢。土壤基本性質因施肥前後差異較不明顯，各養分之有效性與土壤物化性質較有關聯。整體而言，於不同肥料施用量下，入滲水與地表逕流之肥料營養鹽流失量，呈現過量施肥(120 %) > 全量施肥(100 %) > 半量施肥+生物菌劑(50 %) > 無施肥(0 %)。在過量施肥(1.2 倍推薦使用量)的條件下，其田間入滲水及逕流水氮、磷等物質濃度較高，且逕流水濃度高於入滲水，表示此條件下，肥料多隨著雨水或灌溉水淋洗而流失。而磷肥之流失量，受生物菌劑添加呈現不一樣趨勢，主要因溶磷菌將土壤中固定的磷轉換成水溶性磷。

另比較慣行農法(施用化學肥料)與有機農法(施用有機肥料)試驗成果，雖然兩者添加生物菌劑皆能有效降低營養鹽流失，相較於化學肥料，有機肥料較容易流失，推測因本試驗使用之有機肥料屬豆粕類資材，可溶性營養鹽含量高所致。此外，試驗結果也反映出

農田中肥料施用後之營養鹽流失，主要受降雨事件沖刷淋洗所致。而從搭配生物菌劑使用之試驗結果顯示，化學肥料量即使減少至 0.5 倍推薦使用量，萵苣葉片飽滿厚實，且單株鮮重與 1.0 倍推薦使用量組別試驗成果相若；然過量施肥(1.2 倍推薦使用量)下，作物可能產生肥傷且生長不佳。因此，添加生物菌劑使用可促進作物有效吸收營養鹽而生長，達到化學肥料減量使用的目標。

4.2 建議

應用綠色防治技術能有效降低農地非點源污染，從源頭削減非點源污染排放，可降低傳統最佳整治策略較難處理的入滲水污染。若對於水田、旱田及果園等農業衍生之入滲水污染等，推行應用綠色防治技術，除能更加有效地控制農業非點源污染，於適當條件下亦能增加作物產量，達到環境與經濟之雙贏。由於環境的多變與複雜性，各農業非點源污染熱區採用綠色防治技術時，建議先使用現行農法相互結合搭配，並因時因地適度調整，注意其作物種類、土壤質地、施用量與時機及不同菌劑與物質間之交互反應，以達到最大污染削減之效益。

參考文獻

1. Bugg, R. A., Donald, W., Zech, W., and Perez, M. "Performance Evaluations of Three Silt Fence Practices Using a Full-Scale Testing Apparatus." *Water*, 9(7), 502, 2017.
2. Costa, S., Ganzerli, S., Rugiero, I., Pellizzari, S., Pedrini, P., and Tamburini, E. "Potential of rhodobacter capsulatus grown in anaerobic-light or aerobic-dark conditions as bioremediation agent for biological wastewater treatments." *Water*, 9(2), 108, 2017.
3. Environmental Protection Agency, EPA. "National Nonpoint Source Program—a catalyst for water quality improvements." EPA 841-R-16-009, 2016.
4. Hanrahan, B. R., Tank, J. L., Dee, M. M., Trentman, M. T., Berg, E. M., and McMillan, S. K. "Restored floodplains enhance denitrification compared to naturalized floodplains in agricultural streams." *Biogeochemistry*, 141(3), 419-437, 2018.
5. Harada, N., Nishiyama, M., Otsuka, S., and Matsumoto, S. "Effects of inoculation of phototrophic purple bacteria

- on grain yield of rice and nitrogenase activity of paddy soil in a pot experiment.” *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(3), 361-367, 2005.
6. Idi, A., Ibrahim, Z., Mohamad, S. E., and Majid, Z. A. “Biokinetics of nitrogen removal at high concentrations by *Rhodobacter sphaeroides* ADZ101.” *International Biodeterioration and Biodegradation*, 105, 245-251, 2015.
 7. Jain, C. K., and Singh, S. “Best management practices for agricultural nonpoint source pollution: Policy interventions and way forward.” *World Water Policy*, 5(2), 207-228, 2019.
 8. Keller, A. A., Chen, X., Fox, J., Fulda, M., Dorsey, R., Seapy, B., and Bray, E. “Attenuation coefficients for water quality trading.” *Environmental science and technology*, 48(12), 6788-6794, 2014.
 9. Leroy, M.-c., Portet-Koltalo, F., Legras, M., Lederf, F., Moncond'Huy, V., Polaert, I., and Marcotte, S. “Performance of vegetated swales for improving road runoff quality in a moderate traffic urban area.” *Science of The Total Environment*, 566, 113-121, 2016.
 10. Madukasi, E., Chunhua, H., and Zhang, G. “Isolation and application of a wild strain photosynthetic bacterium to environmental waste management.” *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8(3), 513-522, 2011.
 11. Mujtaba, G., Rizwan, M., and Lee, K. “Removal of nutrients and COD from wastewater using symbiotic co-culture of bacterium *Pseudomonas putida* and immobilized microalga *Chlorella vulgaris*.” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 49, 145-151, 2017.
 12. Wang, M., Zhang, D., Dong, J., and Tan, S. K. “Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review.” *Hydrobiologia*, 805(1), 1-31, 2018.
 13. Wang, H., He, P., Shen, C., and Wu, Z. “Effect of irrigation amount and fertilization on agriculture non-point source pollution in the paddy field.” *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 10363-10373, 2019.
 14. Wong, W. T., Tseng, C. H., Hsu, S. H., Lur, H. S., Mo, C. W., Huang, C. N., and Liu, C. T. “Promoting effects of a single *Rhodopseudomonas palustris* inoculant on plant growth by *Brassica rapa chinensis* under low fertilizer input.” *Microbes and environments*, ME14056, 2014.
 15. Wu, M., Tang, X., Li, Q., Yang, W., Jin, F., Tang, M., and Scholz, M. “Review of ecological engineering solutions for rural non-point source water pollution control in Hubei Province, China.” *Water, Air, and Soil Pollution*, 224(5), 1561, 2013.
 16. Xia, Y., Zhang, M., Tsang, D. C., Geng, N., Lu, D., Zhu, L., and Ok, Y. S. “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), 1-13, 2020.
 17. Zhang, Q., and Lou, Z. “The environmental changes and mitigation actions in the Three Gorges Reservoir region, China.” *Environmental Science and Policy*, 14(8), 1132-1138, 2011.
 18. Zhang, T., Ni, J., and Xie, D. “Assessment of the relationship between rural non-point source pollution and economic development in the Three Gorges Reservoir Area.” *Environmental Science and Pollution Research*, 23(8), 8125-8132, 2016.
 19. Zhang, T., Yang, Y., Ni, J., and Xie, D. “Adoption behavior of cleaner production techniques to control agricultural non-point source pollution: A case study in the Three Gorges Reservoir Area.” *Journal of cleaner production*, 223, 897-906, 2019.
 20. Zhang, T., Yang, Y., Ni, J., and Xie, D. “Construction of an integrated technology system for control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Areas.” *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 295, 106919, 2020.
 21. 謝政道：「水庫集水區水土資源管理決策之研究」。國立臺灣大學碩士學位論文，國立臺灣大學環境工程學研究所，2007。