

添加稻殼炭並調整泥炭土擺放位置以降低植生 滯留槽設置初期之高濃度出流

REDUCTION OF HIGH-CONCENTRATION EFFLUENT FROM A BIORETENTION UNIT AT ITS SETTING-UP STAGE BY ADDING
RICE-HUSK CHARCOAL AND ADJUSTING THE LOCATION OF PEAT SOIL

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
教授

許少華*
Shao-Hua Marko Hsu

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
碩士

藩高田
Gao-Tian Fan

摘要

近年來，台灣水庫管理單位為控制農業活動所產生之非點源污染，已逐漸使用植生滯留槽(Bioretention)作為削減非點源污染方法。但植生滯留槽在設置初期因其內部微生物反應及生物膜之削減機制不穩定，造成設置初期去除營養鹽效果不佳之情況。本研究設置四組植生滯留槽，分別為傳統植生滯留槽(對照組)、添加稻殼炭(實驗組 A)、調整泥炭土擺放位置(實驗組 B)、及添加稻殼炭和調整泥炭土擺放位置(實驗組 C)3 種設計，作為改善植生滯留槽設置初期去除營養鹽效果不佳之方案。檢測四組植生滯留槽設置 2 週、1 個月、2 個月、3 個月之淨化水質成效。實驗結果顯示：四組植生滯留槽設置後對於削減懸浮固體成效皆呈現高達 90% 以上；正磷酸鹽方面，實驗組 A、B、C 明顯優於對照組，具有改善設置初期削減正磷酸鹽之成效；化學需氧量方面，四組植生滯留槽從設置後皆呈現相近成效；氨氮方面，雖設置 2 週後，對照組優於其他 3 組植生滯留槽，但隨著設置時間拉長，內部微生物處理系統逐漸穩定，四組植生滯留槽削減成效亦呈現相近趨勢。

關鍵詞：農業非點源污染、植生滯留槽設置初期、低衝擊開發、稻殼炭、泥炭土、水質淨化。

* 通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系教授
40724 台中市西屯區文華路 100 號 · shhsu@fcu.edu.tw

REDUCTION OF HIGH-CONCENTRATION EFFLUENT FROM A BIORETENTION UNIT AT ITS SETTING-UP STAGE BY ADDING RICE-HUSK CHARCOAL AND ADJUSTING THE LOCATION OF PEAT SOIL

Shao-Hua Marko Hsu*

Feng Chia University
Department of Water Resources Engineering
and Conservation

Gao-Tian Fan

Feng Chia University
Department of Water Resources Engineering
and Conservation

ABSTRACT

In recent years, reservoir management authorities in Taiwan gradually adopted bioretention unit as a means and facility to reduce nutrients in flow caused by agricultural activities in order to maintain water quality in the reservoir. However, in the initial stage of installation, due to its internal microbial reaction and biofilm reduction mechanism, the bioretention unit often behaves unstable which caused the common problem of poor nutrient removal at the initial stage. In this study, four groups of bioretention units were set up, which were (1) regular bioretention tank (control group), (2) rice-husk charcoal added tank (experimental group A), (3) placement adjusted on peat soil tank (experimental group B), and (4) adding of rice-busk charcoal as well as placement adjusted on peat soil unit (experimental group C), as potential methods to improve the high nutrient outflow problem in the initial setting stage of a bioretention tank. Experimental results show that the four groups of bioretention tanks are more than 90% effective on reducing suspended solids. In the aspect of orthophosphate, the experimental groups A, B, and C are obviously superior to the control group, with better effect in the initial stage on reducing orthophosphate. For the performance on chemical oxygen demand, all four groups are similar. In the aspect of ammonia, although after the first two weeks, the control group was better than the other three groups, but after an elongated time, with the internal microbial system gradually stabilized, the reduction effect of all four groups also showed similar trends.

Keywords: Non-point source, Bioretention, LID, Rice-husk charcoal, Peat soil, Water purification.

一、前言

現今社會因人口成長，糧食需求量也日益增加。目前台灣農業地狹人稠，在農地有限情況下，需投入大量資金和勞力，發展成為密集農業型態，大多數農民使用除草劑以節省人工除草成本，使用殺蟲劑以消除病蟲害，並使用大量化學肥料以提高單位面積糧食產量。此種農業行為長時間操作下，已在地表上累積可觀的潛在污染源，每當降雨事件發生，於地表所形成的逕流沖蝕土壤表面所造成的水源污染屬於非點源污染(Non-point source, NPS)，非點源污染成分中，最重要是懸浮固體(Suspended Solids, SS)、肥料中的氮、磷和農藥等物質(溫清光等人，2008)，若逕流夾帶人類活動所累積在地表上污染物，進而排入河川、水庫等水域將會造成水體的污染。

非點源污染若沒有妥善控管，當施加於農田表面的肥料或農藥部分混合雨水形成非點源污染逕流進入河川，容易造成地表水體的優養化(Eutrophication)以致於河川及沿海水生物之死亡，且河水濁度之遽升會造成自來水淨水場無法負荷而停水的現象(盧至人等人，2000)。針對以上農業活動所造成的非點源污染等問題，在台灣常使用人工溼地或礫間接觸處理等中型設施處理農業非點源污染，此類傳統處理設施佔地面積大且操作較為繁雜外，導致設施用地取得不易及缺少後續維護管理等問題，造成無法有效落實非點源污染管制。近年來水庫管理單位已逐漸使用設施佔地小且操作維護便利之分散型低衝擊開發設施(Low Impact Development，簡稱 LID)，其中植生滯留槽具入滲及水質過濾淨化功能(何嘉浚等人，2016)。而經過現地水質採樣後發現，於植生滯留槽設置初期出現出流水之氨氮濃度及正磷酸鹽濃度有大於入流水濃度之現象，故解決植生滯留槽設置初期高濃度出流為本研究探討重點。

二、研究方法

2.1 植生滯留槽設計

為解決植生滯留槽設置初期高濃度出流之問題，本研究於實驗室設置四組柱狀植生滯留槽，其設置規格為參考內政部營建署水環境低衝擊開發設施操作手冊(2005 年)，再將添加稻殼炭及調整泥炭土擺放位置之研究構想結合，因稻殼炭具有排水保肥透氣性，含有高量的矽、鉀和鈣；及泥炭土含泥炭苔、石灰、珍珠石，

富含豐富微生物菌，其成分具有磷，曾被計畫報告中(台灣苗栗農田水利會「明德水庫集水區低衝擊開發保育治理工程(非點源污染削減試辦計畫)」，2018)指出可能是植生滯留槽設置初期磷高濃度出流之原因，並於 2019 年 2 月 17 日設置完成。

四組植生滯留槽設施皆以 PVC 管為主體，其剖面圖如圖 1 所示。填裝濾材前，使用砂紙將 PVC 管壁粗糙化，防止鄰近管壁之逕流流速過快；漏斗為承接出口匯流裝置，濾材由下至上依序(長度皆為體積比)為碎石層共 15 公分，由五分漢白玉組成並由紗網包覆形成圓柱狀；粗砂層共 5 公分，由一分漢白玉組成，並由紗網包覆形成圓柱狀；混合土壤層共 60 公分，由現地土壤 42 公分、泥炭土 6 公分、珍珠石 6 公分、蛭石 6 公分攪拌均勻組成植生生長介質，並由土工織布包覆且上方有開口之圓柱狀，種上一株仙丹花，最後鋪上 5 公分灰卵石防止入流水沖蝕表土。四組植生滯留槽其差異如下表 1 所示：

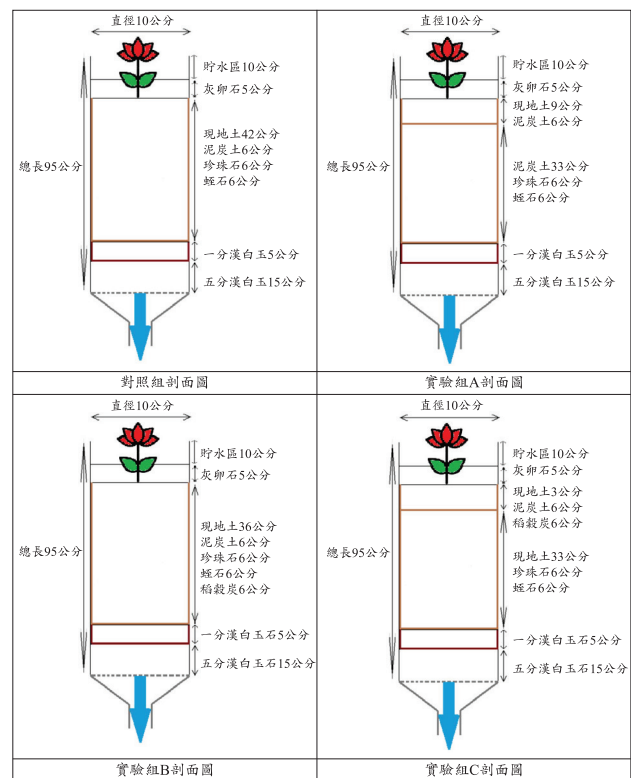


圖 1 各植生滯留槽實驗設置剖面圖

表 1 植生滯留槽設計差異表

植生滯留槽	濾材差異處
對照組	參考營建署操作手冊設置
實驗組 A	於混合土壤層添加 10%(v/v)稻殼炭
實驗組 B	泥炭土移至混合土壤層最上層
實驗組 C	添加 10%(v/v)稻殼炭及泥炭土移至混合土壤層最上層

2.2 人工合成污水

由於非點源污染水樣取得條件嚴苛不易，故本研究採用人工合成污水模擬現地非點源污染水樣濃度，其設計原則是參考張峰毓-植生滯留槽應用於茶園非點源污染削減之研究(2016 年)，將其於現地進行非點源污染逕流採集結果平均，作為本研究人工合成污水調配之參考濃度。

人工合成污水以農友牌台肥 43 號即溶複合肥料作為氮和正磷酸鹽之主要來源，再添加 200 號篩過篩後土粉，使入流污水達到所需氮、正磷酸鹽、懸浮固體濃度，如表 2 所示。

表 2 人工合成污水濃度表

水質項目	濃度(mg/L)
正磷酸鹽	0.18
氮	0.2
懸浮固體	65.0
化學需氧量	31.3

2.3 入流實驗日期及實驗流程

四組植生滯留槽設置完成後，每週會以自來水淋洗一次，洗去槽中不穩定的有機物並沉澱植生滯留槽中之濾材，及植生滯留槽中的粗砂層及碎石層培養出生物膜。

入流實驗日期分別為於植生滯留槽設置後兩週(2019 年 3 月 3 日及 2019 年 3 月 6 日)、一個月(2019 年 3 月 18 日)、兩個月(2019 年 4 月 14 日)、三個月(2019 年 5 月 15 日)進行污水入流實驗，並採集每次實驗之出流 0 分鐘、15 分鐘、30 分鐘之水樣，檢視四組植生滯留槽設置完成後，隨設置時間推移，其削減懸浮固體、氮、正磷酸鹽、化學需氧量之是否獲得改善效果。

三、結果分析

3.1 懸浮固體之去除效果

本實驗於設置後兩週(2019/3/3 及 2019/3/6)、一個月(2019/3/18)、兩個月(2019/4/14)、三個月(2019/5/15)進行入流實驗，懸浮固體平均削減率實驗以圖 2 所示，橫坐標為四組植生滯留槽設置後天數，單位以天數計之；縱坐標為該次實驗之懸浮固體平均削減率，單位為

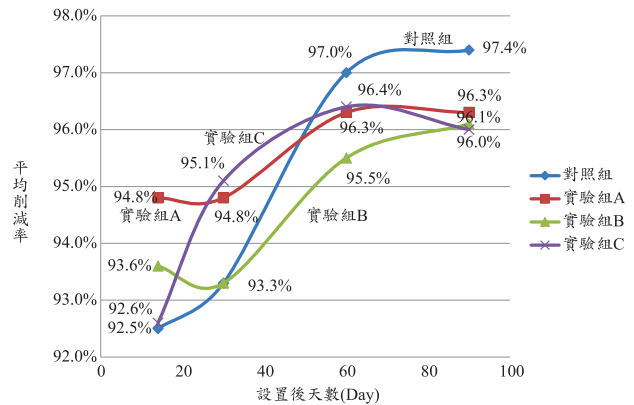


圖 2 四組植生滯留槽之懸浮固體削減率變化圖

百分比。由檢測數據可以得知入流污水懸浮固體濃度介於 70 mg/L~62 mg/L，平均濃度約為 66 mg/L；在植生滯留槽設置後兩週可以發現實驗組 A 削減率為四組當中最高，其平均削減率為 94.8%，證明植生滯留槽可以在短時間內去除水中之懸浮固體物，且皆有 92.5~94.8%削減率。隨著設置時間天數的增長，可發現設置三個月後，對照組削減率高達 97.4%，而其他實驗組削減率約 96.0%，也皆有上升趨勢。推估其原因是設置植生滯留槽時，混合土壤層之濾材皆經由人工攪拌均勻混合，故設置初期時混合土壤層處於鬆散狀；而設置後三個月，鬆散土壤已透過凝聚作用，進一步膠結形成團聚體，使水流通過土壤時速度減慢，故懸浮固體削減率會隨著設置天數增長，有成長趨勢。在唐雙城等人(2015)研究中發現，隨著植生滯留槽運行四年後，其表層土壤砂粒含量明顯升高，由 7.36%增加到 20.55%，細顆粒含量則相應減少，代表隨著設置時間拉長，土粒會膠結形成團聚體，Li and Davis (2008)通過大量室內土柱試驗表明，細顆粒土砂不會穿透表層 5~10 公分之土壤，會在表層累積形成一個緻密層，影響植生滯留槽的入滲性能，但土柱內種有植物時，土壤入滲能力依然維持。

3.2 氮之去除效果

本實驗於設置後兩週(2019/3/3 及 2019/3/6)、一個月(2019/3/18)、兩個月(2019/4/14)、三個月(2019/5/15)進行入流實驗，氮平均削減率實驗以圖 3 所示，橫坐標為四組植生滯留槽設置後天數，單位以天數計之；縱坐標為該次實驗之氮平均削減率，單位為百分比。由檢測數據得知入流污水氮濃度介於 0.212 mg/L~0.224 mg/L，平均濃度約為 0.218 mg/L；四組植生滯留槽設置後兩週之氮削減率皆呈現氮出流濃度遠高

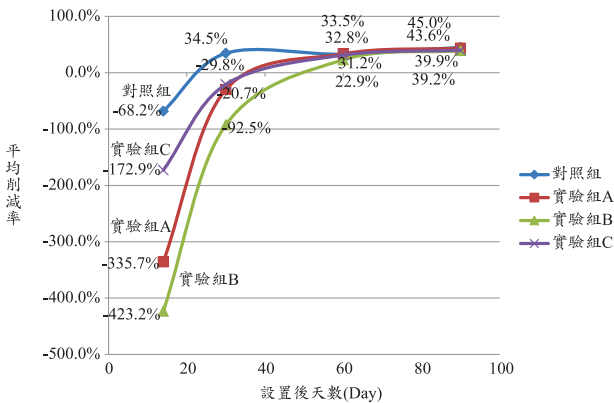


圖 3 四組植生滯留槽之氮氮削減率變化圖

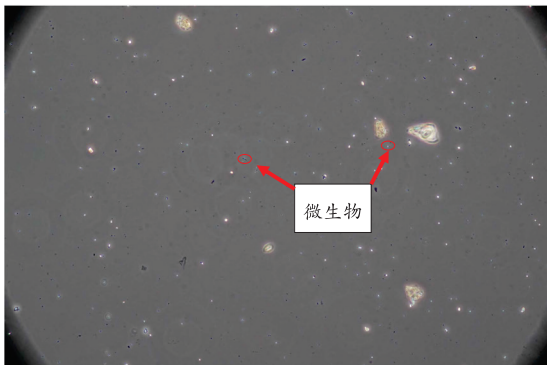


圖 4 植生滯留槽設置三個月後五分漢白玉之微生物觀察圖

於入流濃度現象，實驗組 B 氮氮平均出流濃度甚至出現了成長 423.2%。

自然界氮循環機制多且複雜，以生物處理法為主，是指微生物作用下，將氨氮(NH_4^+)轉化為氮氣(N_2)之過程。傳統生物處理法需經兩步驟達成，首先氨氮在好氧環境經微生物硝化成硝酸鹽氮(NO_3^-)型態，進而硝酸鹽氮於厭氧環境經脫硝作用轉換成氮氣釋出，才可達除氮之目的。故推測氮氮出流濃度遠高於入流濃度現象之原因為植生滯留槽中的透水層為碎石層及粗砂層，其運用原理類似礫間接觸法，於礫石之間發生沉降作用，礫石表面附著之生物膜吸附水中有機物，再由微生物進行分解作用，故假設由於植生滯留槽碎石層及粗砂層尚未生長出微生物膜，故設置後兩週之氮氮削減率呈現出流濃度遠高於入流濃度現象。

在經過每週定期以自來水淋洗植生滯留槽，使其濾材內部有充足水分供微生物生長，在四組植生滯留槽設置後兩個月進行入流實驗，發現皆有氮氮削減現象產生。並於設置植生滯留槽經過三個月後，將碎石層五分漢白玉以無菌容器取出，將五分漢白玉上的微生物以無菌水洗下來進行顯微鏡觀察，實驗結果發現有微生物的存在，故可證明植生滯留槽內部已形成微生

物系統，植生滯留槽具有削減氮氮的能力，如圖 4 所示。

四組植生滯留槽於 2019 年 2 月 17 日設置完成後進行入流實驗發現，設置後兩週對於削減氮氮濃度之效果依序以對照組之植生滯留槽最好，其次為實驗組 C，再來是實驗組 A，最後是實驗組 B；而經過設置兩個月後進行入流實驗發現，四組植生滯留槽趨於穩定皆有相同削減氮氮濃度效果。

3.3 正磷酸鹽之去除效果

本實驗於設置後兩週(2019/3/3 及 2019/3/6)、一個月(2019/3/18)、兩個月(2019/4/14)、三個月(2019/5/15)進行入流實驗，由檢測數據得知入流污水正磷酸鹽濃度介於 0.184 mg/L~0.190 mg/L，平均濃度約為 0.187 mg/L；正磷酸鹽平均削減率實驗以圖 5 所示，橫坐標為四組植生滯留槽設置後天數，單位以天數計之；縱座標為該次實驗之正磷酸鹽平均削減率，單位為百分比。由圖 5 可發現四組植生滯留槽設置後兩週之正磷酸鹽削減率皆呈現正磷酸鹽出流濃度遠高於入流濃度現象，對照組正磷酸鹽平均出流濃度甚至出現了成長 418.1%，而實驗組 B 正磷酸鹽平均出流濃度僅成長 24.0%。對於磷之去除主要是以化學沉澱和物理吸附方式去除，化學沉澱方式為當入流水中之正磷酸鹽與植生滯留槽中之漢白玉石和稻殼炭接觸時，會與他們所富含之鈣離子結合而產生沉澱，形成不易溶解型之磷酸鈣，沉澱於植生滯留槽中，但須經微生物或有機酸作用分解，否則植物所能利用之有效磷，會因此減少；物理吸附方式為當入流水中的磷以正磷酸鹽存在時，可以靠黏土礦物和土壤有機質的某種有機物碎渣來吸附磷，吸附程度取決於入流水與土壤接觸的情形及剩餘吸附的位置，故在設置後兩週，由於除對照組植生滯留槽之外，實驗

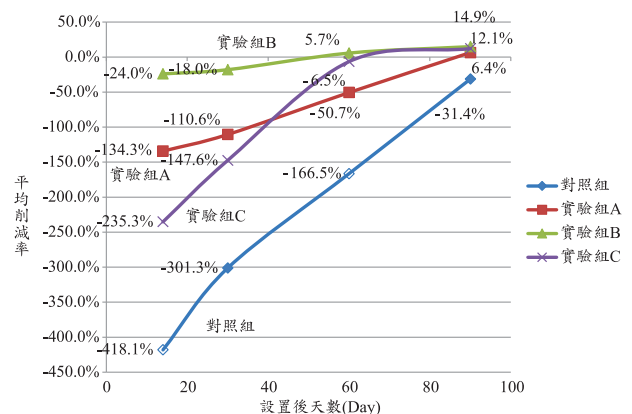


圖 5 四組植生滯留槽之正磷酸鹽削減率變化圖

組 A、C 額外添加稻殼炭，使正磷酸鹽與鈣離子結合沉澱，實驗組 B 將混合土壤層中之泥炭土往上移動，使入流水能接觸更多黏土礦物及有機質，使之正磷酸鹽出流濃度明顯少於對照組之正磷酸鹽出流濃度。在設置後三個月進行入流實驗後，從圖 5 可知，實驗組 A、B、C 皆已出現正磷酸鹽削減現象，故經過長時間設置，植生滯留槽內部已有穩定之微生物處理系統可將入流水中正磷酸鹽進行削減之成效。

四組植生滯留槽於 2019 年 2 月 17 日設置完成後進行入流實驗發現，設置後兩週對於削減正磷酸鹽濃度之效果依序以實驗組 B 之植生滯留槽最好，其次為實驗組 A，再來是實驗組 C，最後是對照組；而經過設置三個月後進行入流實驗發現，對照組仍呈現出流濃度高於入流濃度現象，其他三組植生滯留槽趨於穩定皆有相近削減正磷酸鹽濃度效果。

3.4 化學需氧量之去除效果

本實驗於設置後兩週(2019/3/3 及 2019/3/6)、一個月(2019/3/18)、兩個月(2019/4/14)、三個月(2019/5/15)進行入流實驗，化學需氧量平均削減率實驗以圖 6 所示，橫坐標為四組植生滯留槽設置後天數，單位以天數計之；縱座標為該次實驗之化學需氧量均削減率，單位為百分比。由檢測數據得知入流污水化學需氧量濃度介於 30.5 mg/L~32.0 mg/L，平均濃度約為 31.3 mg/L；在植生滯留槽設置後兩週可以發現實驗組 A 削減率為四組當中最高，其平均削減率為 34.6%，入流水中包含可溶性有機物及不溶性有機物，而透過化學需氧量實驗，可粗略表示水中有機物之含量，以反應水體受有機物污染之程度。入流水中不溶性有機物，植生滯留槽可藉由沉澱、過濾作用，將入流水中不溶性有機物截留於濾材內，發揮良好的削減效果，植生滯留槽可以在短時間內去除水中之懸浮固體物，且皆有 90%懸浮固體削減率；而入流水中可溶性有機物則需要透過植物根系生物膜吸附、吸收及微生物系統分解。由圖 6 可發現設置兩個月後，四組植生滯留槽對於化學需氧量之削減率皆達到約 60%，四組植生滯留槽內部皆已有穩定之微生物處理系統可提供削減氨氮之處理，並表示隨著植生滯留槽設置時間天數的增長，化學需氧量削減率皆有上升趨勢。

四組植生滯留槽於 2019 年 2 月 17 日設置完成後進行入流實驗發現，設置後兩週進行入流實驗發現，四組植生滯留槽設置初期具有相近削減化學需氧量濃度效果；而經過設置後兩個月進行入流實驗發現，對於削減化學需氧量濃度之效果依序為對照組，其次為實驗

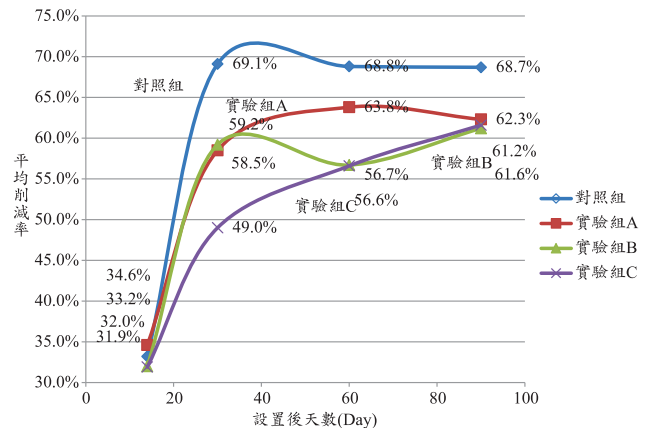


圖 6 四組植生滯留槽之化學需氧量削減率變化圖

組 A，再來是實驗組 B 和實驗組 C 效果相近；而設置後三個月進行入流實驗結果發現，四組植生滯留槽對於削減化學需氧量效果相近，有趨於穩定之現象。

四、結論

1. 四組植生滯留槽對於懸浮固體之削減率皆有優異表現，設置後兩週懸浮固體平均削減率高達 92.5~94.8%，設置後三個月懸浮固體平均削減率高達 96.0~97.4%。
2. 根據實驗結果顯示，四組植生滯留槽對於氨氮削減率在設置後兩週皆呈現氨氮出流濃度遠高於入流濃度之狀況，添加稻殼炭及調整泥炭土位置皆沒有改善效果，推測其原因為由於設置初期植生滯留槽內部尚未形成微生物系統，再加上添加稻殼炭使植生滯留槽之孔隙率增加，故入流水在槽體內停留時間稍長，與混合土壤層之泥炭土接觸時間相對增加，氨氮濃度因此上升，造成氨氮削減率不彰之成果。而植生滯留槽設置後兩個月進行入流實驗，發現皆有氨氮削減現象，故可證明植生滯留槽需約兩個月時間，內部形成微生物處理系統提供氨氮削減之處理。
3. 根據實驗結果顯示，四組植生滯留槽對於正磷酸鹽削減率在設置後兩週雖皆呈現正磷酸鹽出流濃度遠高於入流濃度之狀況，但添加稻殼炭及調整泥炭土位置之正磷酸鹽出流濃度皆比對照組之正磷酸鹽出流濃度相對較低，故可證明添加稻殼炭及調整泥炭土位置，有助於植生滯留槽試設置初期對於正磷酸鹽出流濃度之削減，其原因為稻殼炭含有鈣離子與水成正磷酸鹽結合產生沉澱；而調整泥炭土位置可使植物根系完全接觸泥炭土，

提供植物生長所需之養分，可將泥炭土中之正磷酸鹽吸收，故添加稻殼炭及調整泥炭土位置皆可減少設置初期泥炭土所提供之正磷酸鹽污染。

4. 經過實驗後，對於整體削減效果表現最為穩定為添加稻殼炭之實驗組 A，雖調整泥炭土位置之實驗組 B 對於正磷酸鹽削減呈現表現最好，但其對於氨氮削減效果卻為最差，故本研究推薦添加稻殼炭做為日後植生滯留槽設置之參考。
5. 若地表逕流夾帶著大量的磷進入承受水體，會使水中藻類大量繁殖，進而造成水體優養化，故對磷的削減成效為水質中相當重要的觀測指標之一。在本實驗結果可知，於植生滯留槽添加稻殼炭及調整泥炭土位置，對於植生滯留槽設置初期正磷酸鹽之削減比起對照組之正磷酸鹽削減成效來改善成效，有助於改善植生滯留槽設置初期削減非點源污染。

參考文獻

1. Goh Hui Weng, Lau Tze Liang, Foo Keng Yuen, Chang Chun Kiat and Nor Azazi Zakaria, "Influence of Hydraulic Conductivity and Organic Matter Content in Different Bioretention Media on Nutrient Removal" *Mechanics and Materials* Vol. 802 (2015) pp 448-453, 2015.
2. Goh Hui Weng, Chun Kiat Chang, Tze Liang Lau, Keng Yuen Foo, Nor Azazi Zakaria, "The role of tropical shrub with enhanced bioretention media in nutrient rich runoff treatment" *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, 2015.
3. Goh H.W., N.A. Zakaria, T.L. Lau, K.Y. Foo, C.K. Chang and C.S. Leow, "Mesocosm study of enhanced bioretention media in treating nutrient rich stormwater for mixed development area", *Urban Water Journal*, 2017 VOL. 14, NO. 2, 134-142, 2017.
4. Goh Hui Weng, Chee Hui Lai & Nor Azazi Zakaria, "Long-term performance of enhanced bioretention media under nutrient rich runoff in tropical climate", *Proceedings of the 37th IAHR World Congress*, 2017.
5. Grisham, D. M., "Designing for the first flush" *Civil Engineering*, Vol. 65, No. 11, pp.67-69, 1995.
6. Hseu, Z.Y., Jien, S.H., Chien, W.S., Liou, R.C., "Impacts of biochar on physical properties and erosion potential of a mudstone slope soil" *The Scientific World Journal*, doi:10.1155/2014/602197, 2014.
7. Neitsch, S.L., J.G. Arnold *et al.* "Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation version 2000". Available at <http://www.brc.tamus.edu/swat/doc.html>, 2001.
8. Jien, S.H., Wang, C.S., "Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil" *Catena*, 110, 225-233, 2013.
9. Jien, S.H., Wang, C.C., Lee, C.H., Lee, T.Y., "Stabilization of organic matter by biochar application in compost-amended soils with contrasting pH values and textures" *Sustainability*, 7, 13317-13333, 2015.
10. Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S.P., Theis, J.E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E.G., Luizao, F.J., "Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil" *Organic Chemistry*, 41, 206-213, 2010.
11. LI H, DAVIS A P., "Urban particle capture in bioretention media." *Journal of Environmental Reviews*, 18:159-173, 2008.
12. Line, D. M., Osmond, D. L., Coffey, S.W., McLaughlin, R.A., Jennings, G. D., Gale, J. A., and Spooner, J. "Nonpoint sources" *Water Environment Research*, Vol.69, No. 4, pp. 844-860, 1995.
13. MYERS, C. F., *et al.*, "Nonpoint Sources of Water Pollution" *J. Soil Water Conserv.*, 40(1):14-18, 1985.
14. North Shore City, "New Zealand; Bioretention Guidelines (Rain Garden)", First Edition, 2008.
15. Rondon, M., Lehmann, J., Ramirez, J., Hurtado, M., "Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions" *Biology and Fertility of Soils*, 43,699-708,2007.
16. US EPA, "Bioretention Applications; Inglewood Demonstration Project."
17. Zheng, H., Wang, Z., Deng, X., Herbert, S., Xing, B., (2013), "Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil" *Geoderma*, 206, 32-39, 2000.
18. 行政院環境保護署(2017)。行政院環境保護署-水質淨化現地處理網站。更新日期：2017年3月10日，檢自 <https://wq.epa.gov.tw/Code/Business/Vocabulary.aspx>。
19. 經濟部：「(魚逮)魚堀溪茶園非點源污染削減現地處理調查規劃」。經濟部水利署，2014。
20. 經濟部：「金瓜寮流域茶園非點源污染削減現地處理調查規劃」。經濟部水利署，2013。
21. 台灣苗栗農田水利會「明德水庫集水區低衝擊開發保

- 育治理工程(非點源污染削減試辦計畫)」，2018。
22. 陳萍滢：「含高鹽度石化廢水氨氮之硝化及脫硝研究」。國立中山大學碩士學位論文，國立中山大學環境工程研究所，2015。
23. 黃真雅：「運用礫間接觸法搭配砂濾系統處理小規模生活汙水之可行性研究」。逢甲大學碩士學位論文。逢甲大學水利工程與資源保育系，2016。
24. 何嘉浚、張峰毓：「以植生滯留槽控制農業非點源污染」。土木水利；第四十三卷，第五期，第 12-18 頁，2016。
25. 溫清光、張智華：「台灣農業非點源污染」，農業非點源污染研討會論文集，第 24-40 頁，2008。
26. 盧至人、邱應志：「非點源污染及市區雨水管理」，曉園出版社，2000。
27. 李銘全：「非點源污染質減量對河川水質改善之影響」，高雄區農業專訊；第 46 期，第 22-23 頁，2003。
28. 黃致喬：「非點源削減技術-多槽處理設施之試驗研究」，國立台北科技大學碩士學位論文，國立台北科技大學環境工程與管理研究所，2008。
29. 梁銘基：「農業區非點源污染初期沖刷現象之分析」，國立成功大學碩士學位論文，國立成功大學環境工程學系，2008。
30. 行政院環境保護署：「非點源污染現地處理技術研究計畫-農業活動非點源污染最佳管理措施手冊彙編」。行政院環境保護署，2010。
31. 李珮璇：「暴雨初期沖刷對水源水質衝擊之評估」，國立台北科技大學環境規劃與管理研究所碩士學位論文，國立台北科技大學環境規劃與管理研究所，2002。
32. 蔣本基、郭振泰、顏有利、王福基：「非點源之都市及農業區逕流對河川污染負荷影響之研究」，台灣省環保局，1987。
33. 張智華：「工業區非點源污染初期沖刷之研究」，成功大學環工所碩士論文，成功大學環工所，1997。
34. 張嘉玲：「低衝擊開發之應用及發展趨勢」，土木水利，第三十五卷，第四期，2008。
35. 余嘯雷：「低衝擊開發技術:來由與內涵」，城市低衝擊開發防洪論壇，講義資料，2013。
36. 李家興：「短期施用豬糞堆肥對輪做系統下土壤品質之影響與評估」，國立台灣大學農業化學研究所論文，台灣大學農業化學研究所，2012。
37. 簡士濠、江介倫、王建昇、張庠睿：「添加生物炭對酸性紅壤肥力之影響」，農業工程學報，第 58 卷第 4 期，第 15-22 頁，2012。
38. 簡士濠、陳文棋：「共同施用堆肥與碳化稻殼對坡地土壤氮與磷釋放潛勢之影響」，農業工程學報，第 60 卷第 4 期，第 61-71 頁，2014。
39. 唐雙城、羅毓、賈忠華、李山、仵艷、周萌：「雨水花園對暴雨逕流的削減效果」，水科學進展，第 26 卷第 6 期，第 787-794 頁，2015。
40. 張峰毓：「植生滯留槽應用於茶園非點源污染削減之研究」，國立台北科技大學碩士學位論文，國立台北科技大學土木工程系土木與防災研究所，2016。
41. 內政部營建署：「水環境低衝擊開發設施操作手冊」。內政部營建署，2015。

收稿日期：民國 108 年 08 月 26 日

修改日期：民國 108 年 12 月 13 日

接受日期：民國 109 年 04 月 01 日