科技部補助

大專學生研究計畫研究成果報告

＊ ********* ** ＊
＊ 計 畫 ＊
＊ ： 改良式表面流動人工濕地除氮效能之探討 ＊
＊ 名 稱 ＊
＊ ********* ** ＊

執行計畫學生： 余沐錦
學生計畫編號： MOST 104-2815-C-041-012-E
研 究 期 間 ： 104 年 07 月 01 日至 105 年 02 月 28 日止，計 8 個月
指 導 教 授 ： 錢紀銘

處理方式： 本計畫可公開查詢

執 行 單 位： 嘉藥學校財團法人嘉南藥理大學環境資源管理系(含碩士班)

中華民國 105 年 03 月 31 日

科技部補助大專生參與研究計畫成果報告

改良式表面流動人工濕地除氮效能之探討

計畫編號：MOST 104 －2815－C－041－012－E

執行期限：104 年 7 月1 日至 105 年2 月28 日

執行單位：嘉南藥理大學環境資源管理系

指導教授：錢紀銘副教授

執行學生：余沐錦

摘　　要

本專題研究主要是藉用多孔濾料單元改良蜂巢整流在槽曝氣表面流動式人工溼地，藉由所形成的兼氣或厭氣環境來解決原有曝氣作用所產生的硝酸氮累積問題，希望在表面流動式人工溼地系統中就可以形成比較完整的氮汙染物的去除系統。由實驗結果發現生化需氧量之入流平均濃度僅 5.43mg/L，在槽曝氣對去除率效果並不明顯。而對銨氮的去除率則可以由 65.42%增加到 90.78%，但是多孔濾料並沒有有效的抑制硝酸氮的累積，曝氣後的排放濃度達到 7.94mg/L。

一、　前言

在現今使用的水或廢水處理方法中，人工濕地系統(Constructed wetlands system，CW)是以人為方式操作和控制濕地之各種環境參數，利用生態自然系統淨化水質的一種生態工程技術，在實際操作時，添加化學藥劑或是界質單體附著的人造物質，亦不需曝氣、攪拌、加壓等動力設備，所以在排除土地成本時，人工濕地具有構造簡單、操作容易、維護費低等優勢，因此，全球各國皆廣泛採用人工濕地作為主要水處理方法之一，尤其在土地成本較低之偏遠區。

學生過去因為參與「以蜂巢式整流器提升在槽曝氣對人工溼地氨氮之降解效能」的專題研究計畫時就發現系統的硝酸鹽會有累積的現象，學生在收集資料、閱讀相關文獻時，對提升人工溼地氨氮去除效率後所累積的硝酸氮的去除產生濃厚興趣，由於一般硝酸氮的去除主要是經由脫氮作用轉換為氮氣後去除，而現場監測所得水中溶氧因為曝氣後大部分都高於 2.0 mg/L，高溶氧會明顯影響脫氮作用，經向指導教授詢問降低水中溶氧是否可以增加人工溼地硝酸氮的去除效能，

指導教授說目前已有相關研究，一般主要集中在潛流式人工濕地(Subsurface flow constructed wetland，SSF CW)，至於表面流動式人工溼地(free water surface flow constructed wetland，FWS CW)就比較少，利用曝氣增加氨氮去除率再降低溶氧來解決硝酸氮累積的問題，十分具有探討的價值，所在老師的鼓勵幫助之下，嘗試性在原來的蜂巢整流曝氣式表面流動人工溼地加入多孔濾料單元來降低水中溶氧，提出一「改良式表面流動人工濕地除氮效能之探討」的專題研究。

二、 文獻回顧及探討

一般而言，人工濕地系統中氮的主要去除機制為氨氮(NH_3-N)的揮發、硝化作用、脫硝作用、固氮作用、同化作用等等一連串但循環來完成，在廢水中氮的去除機制較複雜，大部分多為植物及微生物吸收，氮的存在分為有機氮和無機氮，有機氮通常會被微生物分解為無機氮，部分被植物所吸收作為生長中的重要元素，而定期修剪植物可避免植物所吸收的氮元素又回到承受水體中而去除部分水中的含氮氮營養鹽(許文明，2011)。濕地中氮營養鹽的常見的無機氮型態包括；銨、亞硝酸根、硝酸根、氧化亞氮，氣態氮有氮氣、一氧化二氮、氧化氮及氨等(Vymazal，2007)。

近幾年許多國內外皆有學者對人工濕地處理氮污染物進行研究探討，以下為各學者依人工濕地對不同類型之廢污水之研究；許原哲(2006)以人工濕地處理慈濟大林醫院污水，其氨氮的進流濃度為 1.75 mg-N/L，出流濃度為 0.71 mg-N/L，其去除率為 59%。黃献文(2003)以人工濕地系統處理校園定點排放之二級污水，其氨氮再進入系統之前 0.3 天，表面流動式人工濕地系統對氨氮的處理效果最好，在此階段前端氨氮的去除率已達 10%，在後續系統之去除率趨於平穩，進入潛流式人工溼地系統前端總去除率只有 15%，但在離開 SSF 系統時去除率達 47%。

由前述的研究可發現國內的人工濕地氨氮去除效能大部分都不高，至於曝氣作用對人工溼地的污染去除效應之影響則有簡等人(2010)用三段式表面流人工濕地觀察曝氣及未曝氣作用對處理人工合成污水之影響，第一單元植密區未曝氣試程中的總氮(Total nitrogen, TN)去除率是 77.3%，NH3-N 去除率 94.9%，第二單元開放性水域曝氣試程中 TN 去除率可以提升到 85.3%，NH3-N 去除率也增加到 97.7%。在第二單元硝化作用明顯增強，所以由三段式表面流人工濕地之第二單元可以發現，適當增加水中溶氧，將可達到氮移除的較佳效果。

李等人(2009)以垂直潛流式人工濕地進行曝氣及未曝氣來探討 TN 的去除率，發現去除率分別達到 68%和 55%。從曝氣組觀察到，再曝氣點附近氨氮濃度逐漸下降，而相對應的亞硝酸鹽但濃度則越來越高，表示好氧區域內的硝化反應活躍使得亞硝酸鹽但大量產生，而在未曝氣的氨氮濃度雖然也逐漸下降，但其中亞硝酸鹽濃度則無明顯的變化，由此可說明，曝氣使人工濕地內部硝化反應速率增加，底部的脫硝作用也提供了更多電子受體，因此提高了 TN 的去除率。

錢等人(2013)探討分在槽式曝氣對不同人工溼地系統之汙水處理效能之影

響，由其結果發現曝氣或未曝氣系統的 BOD 去除率分別是 95.7 %與 96.2 %，高去除率造成曝氣作用對有機汙染去除效能之影響並不明顯。而 FWS 系統氨氮確實會因溶氧之增加而使去除率由未曝氣的 21.7 %增為曝氣的 37.1%，但是仍有很大的增加空間，根據他的說明是因為曝氣所造成的流場擾動減緩了去除率的增加量。

Jamieson et al., (2003)以潛流式人工濕地處理農場廢污水，分為三個階段進行處理，第一階段沒有曝氣，第二階段是停滯期，第三階段開始曝氣，它的人工濕地包括三個串連的槽體，曝氣放在第一個槽體。沒有曝氣時氨氮進流濃度平均為 107mg/L，出流平均濃度為 54mg/L，去除率是 51%，在曝氣後進流平均濃度為 106mg/L，出流平均濃度為 7.0mg/L，去除率可以增加到 93%。硝酸鹽氮在沒有曝氣時進流與出流平均濃度皆為 0.6mg/L，曝氣後進流平均濃度為 16.8mg/L，出流平均濃度為 68.7mg/L。表示在人工濕地中加入曝氣系統可以有效地去除氨氮污染物，硝酸鹽氮的濃度表示也驗證了曝氣增加了耗氧量無法進行厭氧脫硝作用，導致硝酸鹽氮濃度的上升。

Claudiane et al.,(2006)用水平潛流式人工溼地處理魚池廢水，實驗時採用種植及未種植水生植物以及未曝氣和曝氣組合式程，觀察在冬季與夏季 TKN 去除汙染物的影響，由結果發現所有式程的去除率皆達 70%以上，因廢水為一低濃度負荷的水質所以在未曝氣時已是一高去除率，文獻表示若將廢水改為一高濃度負荷的水質再提供人工曝氣其去除率則會更加明顯。

Nivala et al.,(2007)用潛流式人工濕地在曝氣及未曝氣條件下分別處理垃圾處理場之滲出水，分別討論冬、春、夏、秋四季未曝氣及曝氣的污染物去除率，未曝氣 NH_4^+-N 總去除率分別為 40%、14%、43%、32%，曝氣後分別為 93%、96%、98%、93%。結果表示在人工濕地中加入曝氣試程可以有效地增加含氮污染物的去除，其中又以夏天去除率最佳。

Chazarenc et al.,(2009)在人工濕地種植植物及提供人工曝氣觀察其對固體物累積及生物活性的影響，其結果總氮去除可達 0.65g Nm-2d-1 顯示在種植床上曝氣可產生更多的生物活性，植物的吸收及提供曝氣增加水中溶氧，可提高總氮的去除。

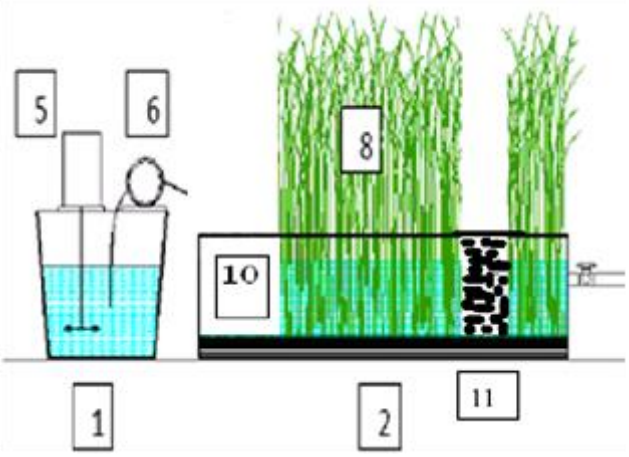
由以上國內外的研究可以知道曝氣作用可以讓人工溼地對含氮污染物處理效能有不錯的提升效果，但是大部分的研究都集中在潛流式人工溼地，對於表面流動式的人工溼地則僅有離槽式的曝氣作用，由於人工濕地的停留時間都比較長，水流流量也小，所以造成離槽曝氣並沒有實質提升 FWS 的溶氧，氨氮去除效能的提升主要是在離槽的曝氣槽，而不是在 FWS。而在槽式整流曝氣雖然可以增加表面流動式人工溼地的汙染物分解效率，但是會產生硝酸氮的累積問題，為了改善這個缺點，所以學生在原來的蜂巢整流曝氣式表面流動人工溼地加入多孔濾料單元來降低水中溶氧，提出一「**改良式表面流動人工濕地除氮效能之探討**」的專題研究。

三、　實驗佈置與分析

本專題研究主是利用原來的蜂巢整流曝氣式表面流動人工溼地加入多孔濾料單元來降低水中溶氧，使水體轉換成兼氣或厭氣環境，有利脫氮作用的進行，解決曝氣後所產生的硝酸氮累積問題，為了進行相關的研究，相關的驗設施主要設置在嘉南藥理大學校本部的廢水廠，共規劃設置兩套人工溼地系統，藉由改良整流曝氣組與對照組表面流動式人工溼地的氮汙染物去除率的比較，就可以了解蜂巢式整流在槽曝氣與多孔濾料單元對氨汙染物降解特性變化的影響，以下將對實驗的各項細節進行說明。

3.1改良式表面流動人工濕地系統的規劃與操作

人工溼地系統的規劃主要是表面流動式人工溼地，反應槽之尺寸分別為176cm、寬30cm、高46cm，水槽地規劃佈置如圖1所示。由於在槽式曝氣槽曝氣時會形成比較強的曝氣水流，進而影響FWS其他的處理功能，所以在曝氣區與FWS水生植物區放置蜂槽式整流器，整流器是用廢棄吸管剪成10cm的長管再用膠水黏合堆疊，希望能減少對FWS水流的干擾，但是溶氧卻可以經由多孔版擴散傳輸到FWS而增加其他部分的溶氧。後段約1/4的地方加入多孔濾料單元，濾材上會長滿生物膜可以消耗水中的溶氧，這樣就可以讓水體形成兼氣或厭氣環境，降低水中的硝酸氮。



1：進流基質桶　2：表面流動式人工溼地　5：基質桶攪拌機
6：人工濕地進流幫浦 8：香蒲(*Typha orientalis Presl.*)
10：蜂槽式整流曝氣槽11：多孔濾料單元

圖1改良式在槽曝氣人工溼地實驗系統之規劃佈置圖

為便於種植水生植物，本研究在FWS槽體系統底部鋪了15cm的土壤，水深為0.30m。實驗用水是抽取廢水廠進流槽的校園廢水作為系統的進流水，流量大約是201.6L/d，水力負荷大約是0.18m^3/m^2d，空槽理論水力停留時間約是2.08天。

3.2實驗模場水質之採樣與分析

人工溼地系統完成後經過1~2個月的穩定及植物培植後，才可以在分別進行各項採樣、監測及分析工作，研究期的採樣頻率為每週一次，採樣時間約在每次採樣日的上午8點~上午10點，實驗分析包括現場監測與實驗室分析兩類，專題研究所有分析皆依照行政院環境保護署所公告之檢測方法進行。

(1).現場監測

現場監測包括水溫、pH 值、溶氧(DO)等水質項目，每次監測前儀器須先予以校正，而監測點系於人工濕地系統，進流桶、蜂巢、FWS共七點，距水面10~20cm 處進行，現場記錄後再執行後續水質採樣工作。

(2).實驗室分析：

本研究之水樣每次以500mL 之PVC 瓶在相同監測位置採集水樣，於實驗室中進一步進行各項水質分析，其分析項目包括總磷(Total Phosphate，TP)、生化需氧量(Biochemical Oxygen Demand，BOD5)，銨氮(Ammonium-Nitrogen，$NH4^{+}$-N)，硝酸鹽氮(Nitrate nitrogen ，NO_3^{-}-N)，亞硝酸鹽氮(Nitrite nitrogen，NO_2^{-}-N)、葉綠素-a 等，所有分析項目除BOD_5外，其他分析項目均於當日分析完成。檢測方法如表1所示

表 1 人工濕地各項水質檢測方法彙整

檢測項目	檢測方法
銨氮	NIEA W448.51B
硝酸鹽	NIEA W419.51A
亞硝酸鹽	NIEA W418.51C
溶氧	NIEA W455.52C
總磷	NIEA W444.51C
水溫	NIEA W217.51A

四、　結果與討論

本實驗系統因設置在嘉南藥理大學校園廢水處理場的樓頂，水溫會隨日夜溫差及季節所影響，而水溫的高低是影響到濕地系統的生化反應的重要因子之一，人工濕地之汙染降解頗為複雜，本研究分別設置 A、B 兩系統，A 系統在進流口部分裝設曝氣機、整流設備、多孔濾料單元，B 系統則是為曝氣及厭氧系統的對照組。由於空間限制，反應槽之長寬比為 16:1。遠小於正常的 10:1，其留況較難呈柱塞流特性，因此，本研究主要探討蜂巢式整流在槽曝氣與多孔濾料單元對氨汙染物降解特性變化的影響。

本系統在實驗監測期間期進流水之汙染物濃度:生化需氧量平均濃度為 5.43mg/L、銨氮平均濃度為 21.27mg/L、亞硝酸氮平均濃度為 0.12mg/L 以及硝酸氮平均濃度為 0.07mg/L，其溶氧量為 2.39mg/L，在溫度方面實驗期間從秋季至冬季進流水為 20.2℃，A、B 系統溫度平均落在 18.8℃，然實驗的最高溫曾達 25.3℃，而最低溫則是 13.1℃，此高低水溫的變化對濕地系統處理之效能有明顯之影響，在實驗期間 pH 的平均值為 8.58，其他人工濕地介於 7.11~7.26 之間 Metcalf et al.，(2004)指出水中微生物在 pH 大於 9.5 及小於 4 時無法生存的，硝化菌最佳超做酸鹼值的範圍是 6.5~7.5 之間，而脫硝菌是當酸鹼值為 7.2 時會處於最佳狀態效能，本實驗酸鹼值監測結果顯示微生物生存的 pH 環境大多數時段符合最佳效能的範圍，本專題的監測值如表 2 所示；

表 2 實驗系統之水溫、PH 值及溶氧觀測平均統計結果

環境因子	進流水	A 系統(進)	A 系統(出)	B 系統(進)	B 系統(出)
水溫(℃)	20.28	18.92	19	18.8	18.8
pH	8.4	8.8	8.8	8.5	8.5
溶氧(mg/L)	2.4	7.29	7.2	5.5	7

4-1 多孔濾料單元對系統進流-出流之水質濃度變化及去除率

4-1-1 多孔濾料單元作用對生化需氧量之濃度變化與去除率

圖 1(A)為汙水廠人工濕地系統之濃度變化，由圖可看出經過系統處理後之放流水濃度明顯降低由此可知對於生化需氧量有一定之去除效果;由於本實驗是直接取學校汙水做為進流水以至於本研究進流水會因長假導致生化需氧量濃度上下起伏的情況，最大進流濃度為 16.62mg/L、最小進流濃度 0.32mg/L；平均進流濃度為 5.43mg/L、其 A 系統出流水平均濃度降為 4.51mg/L 而 B 系統出流水平均濃度則為 4.53mg/L。推得系統曝氣可加速有機物之分解作用。實驗期間發現冬季的生化需氧量去除率比夏季少。系統則在 11 月 20 號後漸趨穩定這可能是系統前期馴養期尚未達到穩定，導致汙水處理不穩定。實驗數值如表 3 所示

表 3 人工濕地系統生化需氧量觀測統計結果

統計參數	進流水	A 系統(進)	A 系統(出)	B 系統(進)	B 系統(出)
平均濃度	5.43	4.47	4.51	4.98	4.53
平均去除率		17.7	16.9	8.22	16.58

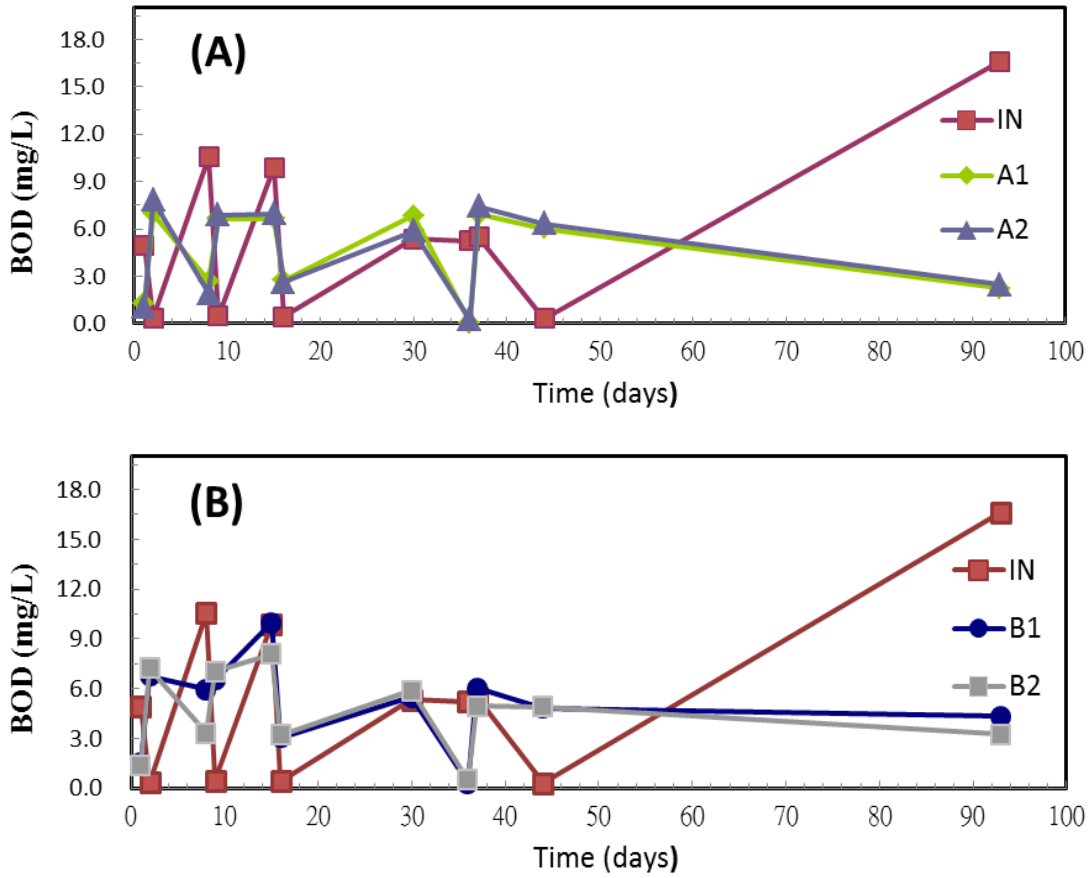


圖 2 人工濕地之；(A) A 槽 BOD 濃度與(B)B 槽 BOD 濃度之歷時變化

4-1-2 多孔濾料單元作用對含氮汙染物之去除效能影響

銨氮主要去除機制為硝化作用，會受到酸鹼值和溫度影響，由銨氮經好氧轉化成亞硝酸氮在將亞硝酸氮氧化成硝酸氮，銨氮濃度過高會抑制硝化作用；汙水中之有機物會消耗溶氧使硝化作用受限制。如圖 2(A)，進流水平均濃度為 21.27 mg/L，而 A、B 系統出流口平均濃度分別降為 1.96mg/L 及 7.36mg/L，而從圖 2(B)中，發現有曝氣之 A 系統銨氮去除率為 90.8%，而未曝氣的 B 系統僅為 65.4%，從中看出多孔濾料單元作用對銨氮去除有明顯之效能。實驗數值如表 4 所示

表 4 人工濕地系統銨氮觀測統計結果

統計參數	進流水	A 系統(進)	A 系統(出)	B 系統(進)	B 系統(出)
平均濃度	21.27	2.25	1.96	8.40	7.36
平均去除率		89.43	90.78	60.50	65.42

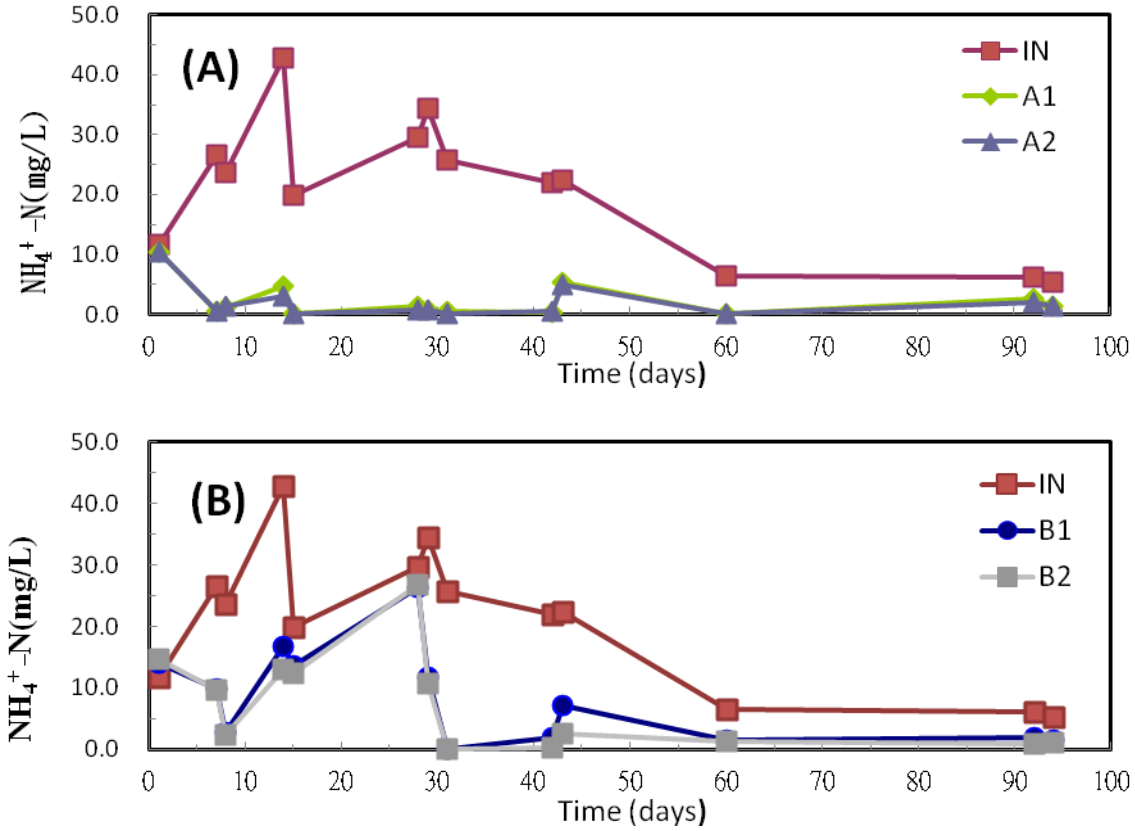


圖 3 人工濕地之；(A) A 槽 NH_4^+濃度與(B)B 槽 NH_4^+濃度之歷時變化

4-1-3 多孔濾料單元作用對亞硝酸鹽氮汙染物之降解效能

如圖 4 所示，進流平均濃度為 0.12mg/L；而 A、B 兩系統出流水分別為 0.74mg/L 及 0.40mg/L，從中顯示亞硝酸鹽氮在本系統因氨氮的硝化作用並無明顯累積狀況。實驗數值如表 5 所示

表 5 人工濕地系統亞硝酸鹽氮觀測統計結果

統計參數	進流水	A 系統(進)	A 系統(出)	B 系統(進)	B 系統(出)
平均濃度	0.12	0.74	0.36	0.40	0.39

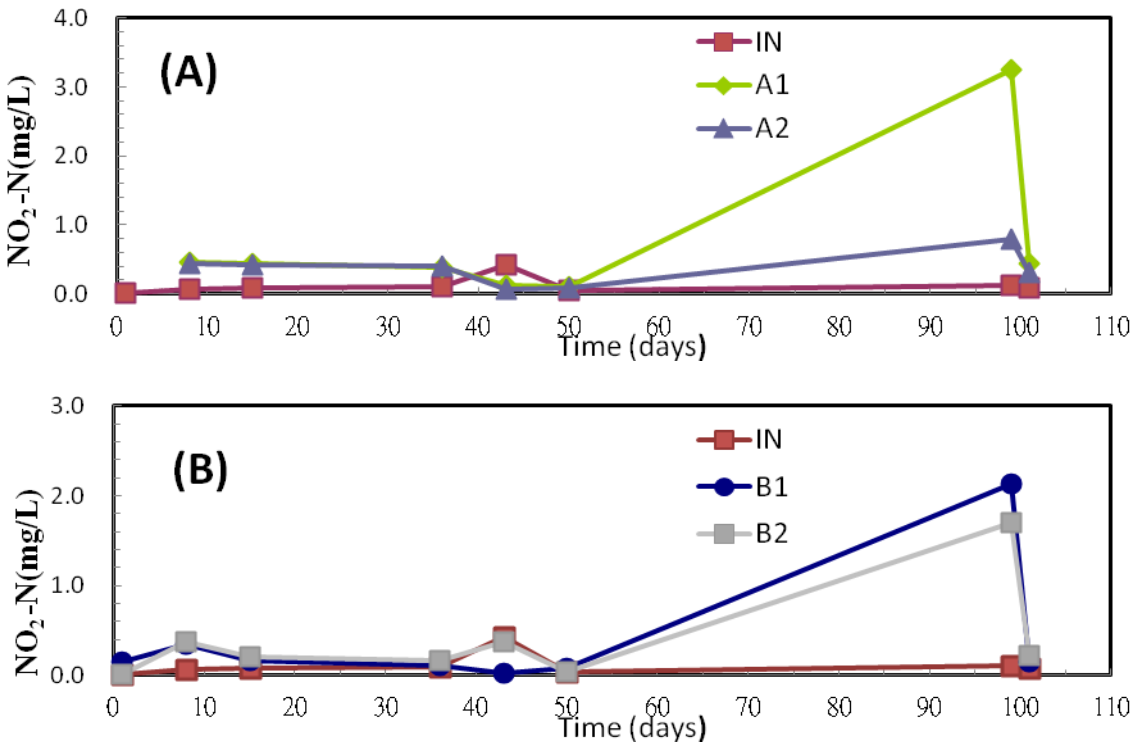


圖 4 人工濕地之；(A)A 槽 NO_2-N 與(B)B 槽 NO_2-N 之濃度歷時變化

4-1-4 多孔濾料單元作用對硝酸鹽氮汙染物之降解效能

如圖 5 所示，硝酸鹽氮之進流水質平均濃度為 0.07mg/L，A、B 兩系統出流水分別為 7.94mg/L 及 0.25mg/L，在 A 系統出流口測得高濃度硝酸鹽氮，因 A 系統裝設曝氣槽，使溶氧量增高無法發生脫硝反應，使得濃度增高。由此可之高溶氧能有效去除銨氮，但使硝酸鹽氮產生累積現象。實驗數值如表 6 所示

表 6 人工濕地系統硝酸鹽氮觀測統計結果

統計參數	進流水	A 系統(進)	A 系統(出)	B 系統(進)	B 系統(出)
平均濃度	0.07	7.93	7.94	0.18	0.25

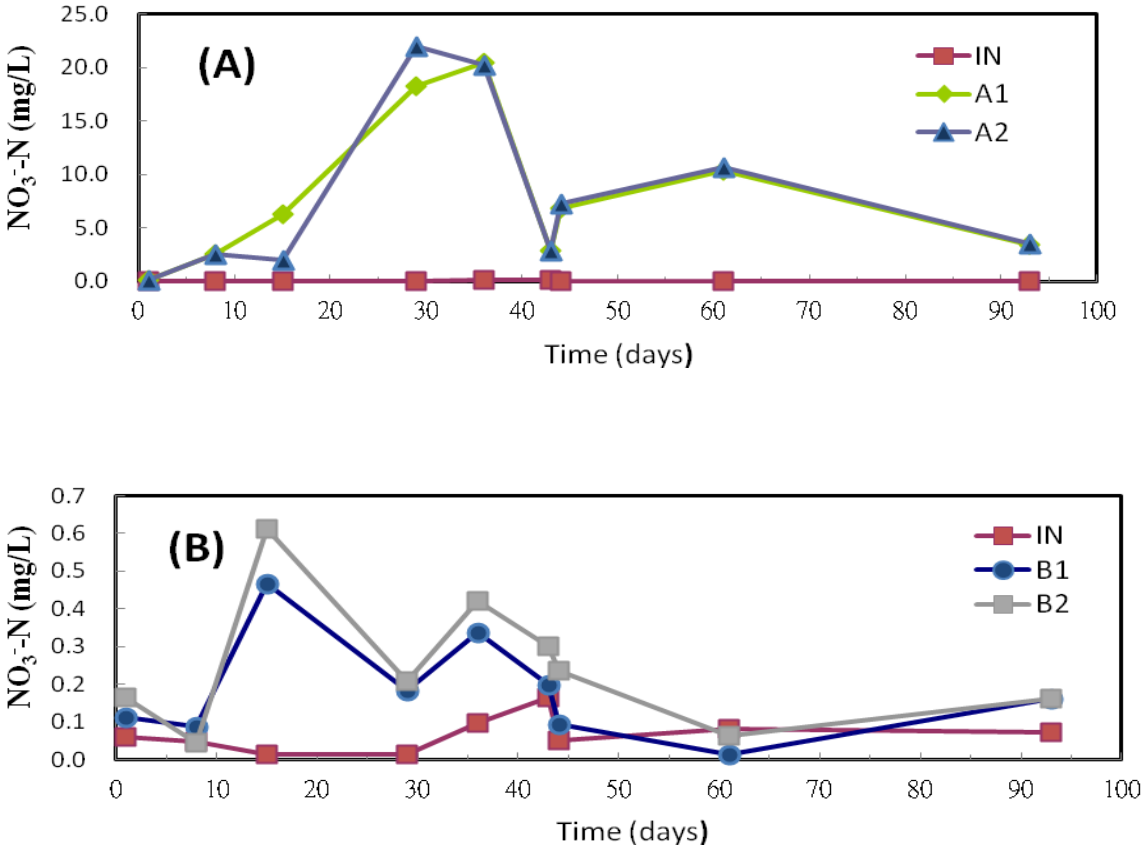


圖 5 人工濕地之；(A)A 槽 NO3-N(B)B 槽 NO3-N 濃度歷時變化

4-1-4 多孔濾料單元作用對總磷汙染物之降解效能

如圖 5 所示，總磷之水質平均濃度為 1.99mg/L，A、B 兩系統出流水分別為 1.28mg/L 及 1.28mg/L，去除率的部分，有曝氣之 A 系統總磷去除率為 35.8%，而未曝氣的 B 系統僅為 31.6%，從中發現多孔濾料單元作用對總磷去除效能並不明顯。實驗數值如表 7 所示

表 7 人工濕地系統總磷觀測統計結果

統計參數	進流水	A 系統(進)	A 系統(出)	B 系統(進)	B 系統(出)
平均濃度	1.99	1.28	1.28	1.37	1.36
平均去除率		35.8	35.5	31.31	31.6

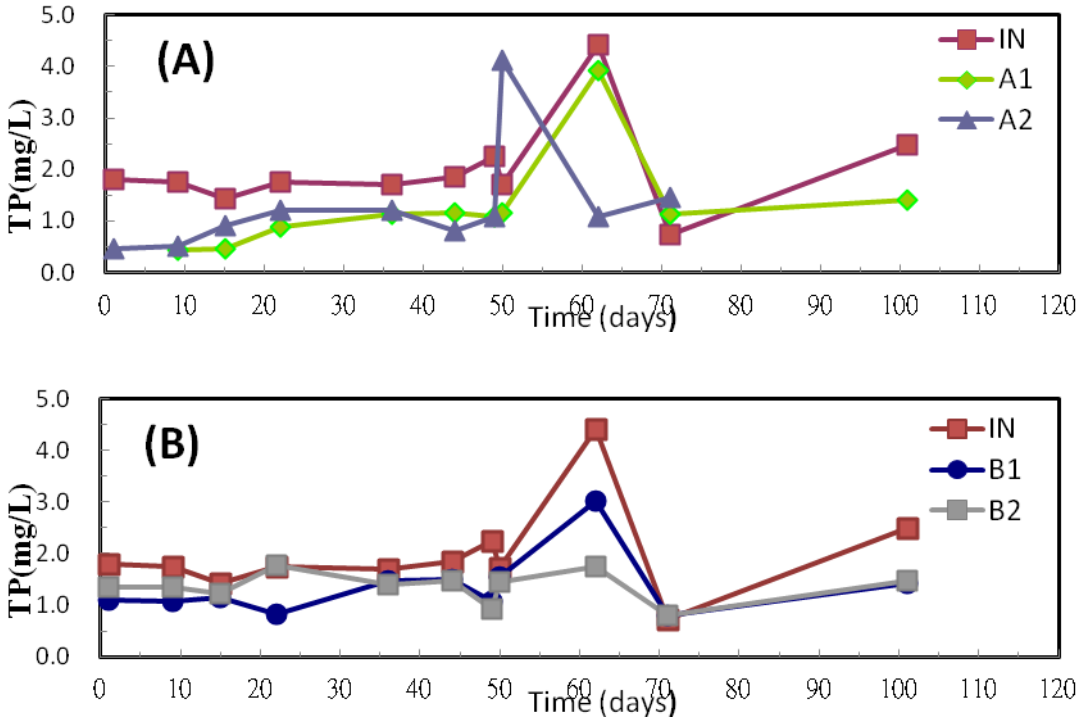


圖 6 人工濕地之；(A)A 槽 TP 濃度與(B)B 槽 TP 濃度之歷時變化

五、 結論

本專題主要研究以多孔濾料單元提升人工溼地汙染之降解效能，在研究期間經過秋冬兩季的氣候變化，使濃度及去除率會有明顯之起伏。從研究結果得知，A 系統在進流口裝設曝氣池溶氧約 7.29 mg/L，因為溶氧量的增加，使銨氮的去除校能明顯的提升，然而因溶氧量之提高使硝酸鹽氮有累積的現象時，而亞硝酸鹽氮則未有累積之現象。從前面的數據可發現多孔濾料單元對人工溼地之有機物與銨氮有顯著之去除效能，頗值得深入探討，特別是對於如何於去除氨氮的狀況況下，也能去除硝酸鹽氮，使其不再累積。

參考文獻

1. 黃献文，「人工濕地處理校園廢污水之效能機制探討」，嘉南藥理科技大學環境工程衛生系，碩士論文，(2003)。

2. 許原哲，「以人工濕地處理醫院污水處理廠放流水之研究」，嘉南藥理科技大學環境工程與科學系，碩士論文，(2006)。

3. 李想，「曝氣增強垂直潛流型人工濕地脫氮效果研究」，北京工商大學學報，北京，北京工商大學，(2009)。

4. 簡伊敏、郭念祖、陳佑禎，鄭慈儀、沈玉潔、江漢全，“人工曝氣對

三段式表面流人工濕地除氮效益之影響”，中華民國環境工程學會第二十二屆廢水處理技術研討會，屏東科技大學，計畫編號：99-2815-c-197-008-E，(2010)。

5. 許文明，「以現地及小型人工濕地探討數種水生植物淨化養豬廢水之效能比較」，國立屏東科技大學環境工程與科學研究所，碩士論文，(2011)。

6. 錢紀銘、周怡安、范宥榆、林佳慧、陳威凱、許齡藝，“在槽式曝氣對人工濕地汙染降解效能之影響”，中華民國環境工程學會2013廢水處理技術研討會，國立高雄大學，(2013)。

7. Claudiane, O.P., Florent, C., Yves, C., Jacques, B., 2006. Artificial aeration to increasepollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate. Ecol. Eng.27 (3), 258–264.

8. Chazarenc, F., Gagnona, V., Comeaub, Y., Brissona ,J.Effect of plant and artificial aeration on solids accumulationand biological activities in constructed wetlands.ecological engineering 35,1005–1010(2009).

9. Jamieson, T.S., Stratton, G.W., Gordon ,R. and Madani ,A.The use of aeration to enhance ammonianitrogen removal in constructed wetlands.1Department of Environmental Sciences and 2Department of Engineering, Nova Scotia Agricultural College, P.O. Box 550, Truro,Nova Scotia, Canada B2N 5E3,(2003).

10. Nivala , J., Hoos , M.B., Cross , C.,Wallace ,S., Parkin G. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. Total Environment 380 19–27, (2007).

11. Vymazal, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands, Science of the Total Environment 380(1-3): 48-65, (2007).