

# 嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

計畫編號：CNEE94-06

計畫名稱：利用生態處理技術進行河川污染整治之研究(1/3)

執行期間：94 年 1 月 1 日至 94 年 12 月 31 日

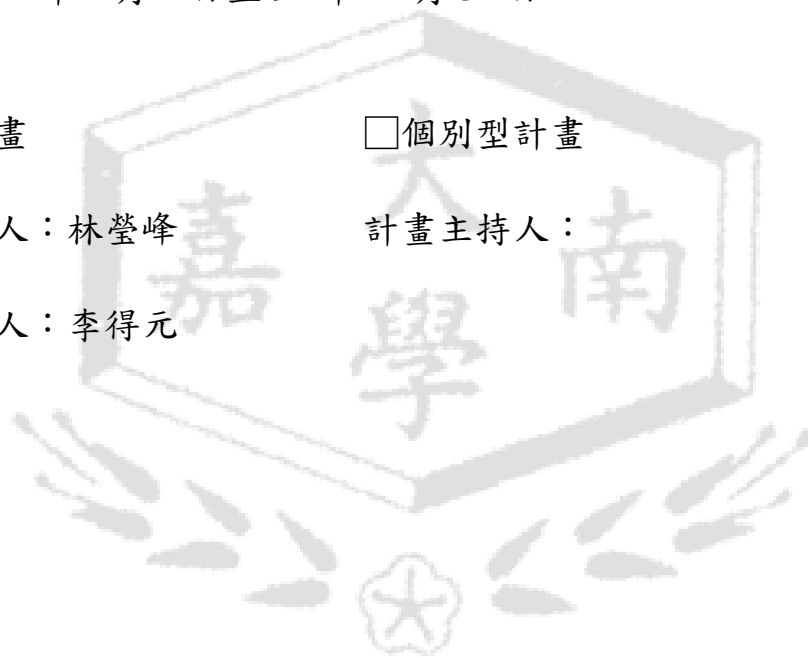
整合型計畫

個別型計畫

計畫總主持人：林瑩峰

計畫主持人：

子計畫主持人：李得元



中華民國 94 年 12 月 31 日

## 摘要

竹溪位於台南市人口密集的東區，現階段主要功能做為都市區域性污水與雨水的主要排水渠道，排水區面積約 7.44 平方公里，總長度約 10 公里，直接流入台灣海峽。晴天時主要承受家庭污水，水質屬嚴重性污染，日平均排水流量約 23,000~44,000 m<sup>3</sup>/d。溪岸採混泥土施工，溪底坡度緩和，河深與水流速度單一化，加上水質惡化，因此水域環境之生態景觀條件相當貧乏。竹溪示範性人工溼地系統完成於 2004 年 8 月，由環保署提供經費，台南市政府執行建造。濕地系統建構於竹溪現有河岸之水泥河階地，進流部分的竹溪排水，主要設置目標為探討溼地生態工法現地淨化污染性都市排水的可行性及增進都市河川生態多樣性及景觀美化的功能，並由試驗結果提出竹溪污染整治的可行性與完整性的生態工法構想。竹溪濕地系統由三個單元串聯所組成，第一單元為表面下流動濕地(SSF, subsurface flow system, 200 m<sup>2</sup>)，第二單元為表面流動式系統(FWS, free water surface system, 600 m<sup>2</sup>)，第三單元為 SSF 濕地(200 m<sup>2</sup>)。濕地植物選擇兼具污染淨化及景觀美化的種類，如莎草、香蒲、培地茅、風車草、美人蕉。溼地進流水以沉浸式抽水機從竹溪取水，啟動階段(2004 年 8 月至 2005 年 3 月)濕地系統進流流量平均控制於 76 m<sup>3</sup>/day，水力負荷為 0.076 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day，水力停留時間平均為 3.81 天；之後(2005 年 3 月至 2006 年 1 月)進流量提高到平均 107 m<sup>3</sup>/day 進行穩定階段的操作，此時水力負荷為 0.107 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day，水力停留時間約為 2.66 天。

啟動階段人工溼地系統對進流水主要污染物的平均去除效能分別為：總懸浮固體物(TSS) 75% (2.31 g/m<sup>2</sup>/day)、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>) 75% (3.08 g/m<sup>2</sup>/day)、化學需氧量(COD) 55% (4.22g /m<sup>2</sup>/day)、總氮(TN) 20% (0.45 g/m<sup>2</sup>/day)、總磷(TP) -6%(-0.0021 g/m<sup>2</sup>/day)。穩定操作階段的污染物的平均去除效能分別為：TSS 81% (2.73 g/m<sup>2</sup>/day)、BOD<sub>5</sub> 79% (4.17 g/m<sup>2</sup>/day)、COD 46% (4.59 g/m<sup>2</sup>/day)、TN 24% (1.13g/m<sup>2</sup>/day)、TP 22%(0.07 g/m<sup>2</sup>/day)。此結果顯示，人工溼地生態系統需經過一段適應期才能逐漸提升並表現穩定的污染物淨化效能，由其針對氮磷營養物的去除需更長的適應期。由一階柱塞流反應器模式(first order plug-flow reactor model)估算人工溼地系統啟動階段及穩定操作階段的 BOD<sub>5</sub> 去除速率常數平均分別為 0.48 day<sup>-1</sup>(24°C)及 0.75 day<sup>-1</sup>(25°C)，相當於或甚至高於一般河川水質自淨模式中的 BOD<sub>5</sub> 脫氧速率常數的 0.232 day<sup>-1</sup>(20°C)。此結果顯示人工溼地生態系統的天然淨化功能可能高於河川的自淨功能，未來若將竹溪的水泥河階地全面性構築成人工溼地，並均散地分佈溪排水使流經溼地環境，預期將可有效的提昇竹溪的自淨功能，達到全面性水質淨化的目標。

## Abstract

Bamboo Creek, a typical urban river, is originated from the East District of Tainan City and offers an important function as a main drainage for both sewage and storm water runoff from urban areas. Its flow ends at Kun-Shen Bay, having a total length of about 10 km and drainage area of about 7.44 km<sup>2</sup>. Creek water is seriously polluted by the receiving sewage with a flow rate ranging from 23,000 to 44,000 m<sup>3</sup>/d when sunny days. The bank and bed of Bamboo Creek are mostly made of concrete; the slope of the creek bed is gentle, thus

causing an unchanged water depth and velocity of water flow. Accordingly, ecological diversity and landscape esthetics along the creek are poor. The pilot-scale Bamboo Creek constructed wetland system was built in August 2004 by Tainan City Government under a project financially supported by Environmental Protection Administration. The treatment wetland system was constructed on the concrete bank of the creek and received part of the polluted creek water for purification. The goals of the wetland constructing project are to (1) investigate the performance of the pilot-scale constructed wetland for purification of the Bamboo Creek water, (2) examine the benefit of enhancement of biological diversity and landscape esthetics due to wetland construction, (3) propose feasible approaches for improvement in water quality of the whole Bamboo Creek. The Bamboo Creek wetland system has a channel configuration, which consists of a subsurface flow (SSF) unit (4 m × 50 m), a free water surface flow (FWS) unit (4 m × 150 m), and an SSF unit (4 m × 50 m) connecting in series. Macrophytes with functions of pollutants purification and landscape values, such as cattail, cyperus, vetiver grass, reed, and canna, were planted in wetlands. Creek water was pumped into the front part of the first wetland unit and then flowed through the system by gravity. The flow rate of influent was operated at 76 m<sup>3</sup>/day in average during the start-up phase from August 2004 to March 2005, and then increased to 107 m<sup>3</sup>/day in average afterward for a stable phase operation. This hydraulic condition represented an average hydraulic retention time (HRT) of the whole wetland system being 3.81 and 2.66 day for the start-up phase and the stable phase, respectively.

The monitoring results of influent-effluent water quality show that major pollutants in influent were significantly reduced by 75% (2.31 g/m<sup>2</sup>/day) for total suspended solid (TSS), 75% (3.08 g/m<sup>2</sup>/day) for biochemical oxygen demand (BOD<sub>5</sub>), 55% (4.22 g/m<sup>2</sup>/day) for chemical oxygen demand (COD), and 20% for total nitrogen (TN) in the start-up phase; but, total phosphorous (TP) removal was insignificant. In the stable phase, pollutants removal of the wetland system increased to be 81% (2.73 g/m<sup>2</sup>/day) for TSS, 79% (4.17 g/m<sup>2</sup>/day) for BOD<sub>5</sub>, 46% (4.59 g/m<sup>2</sup>/day) for COD, 24% (1.13 g/m<sup>2</sup>/day) for TN, 22% (0.07 g/m<sup>2</sup>/day) for TP. This finding suggests that constructed wetlands need an adaptation period, approximately 8 months in this study, to achieve a stable treatment performance particularly for nutrient removal. Using first order plug-flow reactor model, BOD<sub>5</sub> removal rate constants of the whole wetland system were estimated to be 0.48 day<sup>-1</sup> (at 24°C) and 0.75 day<sup>-1</sup> (at 25°C) in the start-up and stable phase, respectively. These values were comparable to or even higher than the value of deoxygenation rate constant, 0.23 day<sup>-1</sup> (at 20°C), that is normally used in the river water-quality model. This may indicate that a constructed wetland potentially provides higher performance in water quality improvement than a river does. Creation of more wetland zones using the existed creek bank areas is proposed to improve water quality of the whole Bamboo Creek. A cost-effective method to construct wetlands and distribute the creek water in wetlands by gravity is also proposed.

## 前言

國內過去的河川水岸經常以防洪排水的工程角度著眼，很少付及生物多樣化的環境設計，常使河川直線化、河岸鋼筋混泥土化、河深與水流速度單一化，因此造成動植物棲息環境消失、水域景觀惡化的情形。另外，許多位於都市區域內的河川溪流，由於下水道系統的缺乏，使這些河川成為承受家庭污水唯一水體，造成都市區域的河川普遍受到嚴重污染，因此如何兼顧河川綠美化、動植物棲息，以及淨化污染性河水，成為重要的課題。

溼地技術在水污染防治及水資源保育上之應用，是近二十年來才逐漸地發展並受到國際間的重視。無論是已開發國家(如美國、英國、挪威、澳大利亞)或開發中國家(如南非、印度、中國、斯洛凡尼亞)均陸續有許多學者參與計畫研究，並有超過 1000 個溼地系統被實際應用。這些文獻報導又以人工溼地系統佔絕大多數，其研究與應用目的，大多是將人工溼地當作二級處理程序或高級處理程序，用以處理都市污水、工業廢水及垃圾掩埋場(或礦場滲)出水(Cole, 1998)。而從研究結果中可知，對於廢(污)水中的主要或微量污染物，例如懸浮固體、有機物質、氮磷營養物、重金屬及微生物，人工溼地均可提供良好的去除效能(Reed et al., 1995)、(Kadlec et al., 1996)。

台南市竹溪流域位於健康路以上集水區面積約 7.44 平方公里，集水區內主要為住商集中區域，本區內主要之污染源以家庭污水為主，因此竹溪中之水體污染物與一般的家庭污水相當類似。竹溪示範性人工溼地系統完成於 2004 年 8 月，由環保署提供經費，台南市政府執行建造。濕地系統建構於竹溪現有河岸之水泥河階地，進流部分的竹溪排水，主要設置目標為探討溼地生態工法現地淨化污染性都市排水的可行性及增進都市河川生態多樣性及景觀美化的功能，並由試驗結果提出竹溪污染整治的可行性與完整性的生態工法構想。

## 研究目的

本研究主要目的為報導竹溪人工溼地淨化竹溪污染性溪水之處理效能，並建立可供利用的設計參數。

## 研究方法

### 1、人工溼地系統

竹溪人工溼地系統設置於台南市竹溪里、健康路及竹溪街之竹溪右岸高水位灘地上，由於設置時已經考量暴雨的影響，並且希望暴雨後可立即恢復系統之操作，因此並無太多之人工硬體設施，而在槽體部分利用紐澤西護欄排列組成，並且於底部及周圍鋪設不透水布。

竹溪人工溼地系統的設計流程(圖 1)共可分為三個階段，第一階段淨化(SSF I)為表面下流動型人工溼地，面積約為 200 m<sup>2</sup>，平均水深約為 0.6 m，主要是利用表面下流動型人工溼地之礫石床所形成之高密度植生群落，發揮溼地介質過濾功能，並增強污染物的穩

定化，以有效去除懸浮固體及有機物，種植之水生植物為香蒲、蘆葦、莎草、培地毛、美人蕉；第二階段淨化(FWS)為表面流動型人工溼地，面積約為 600 m<sup>2</sup>，平均水深約為 0.3 m，池底土壤厚度約為 0.3 m，種植挺水性植物，以形成高密度植生群落，以增強溼地過濾、穩定化、除氮及抑制藻類生長的功能，主要水生植物為香蒲及莎草；第三階段淨化(SSF II)為表面下流動型人工溼地，面積約為 200 m<sup>2</sup>，平均水深約為 0.6 m，以其礫石床所形成之高密度植生群落，增強溼地介質過濾功能，以有效去除懸浮固體、有機物及氮磷，種植之水生植物為香蒲、蘆葦、莎草、培地毛、美人蕉。

## 2、操作方法

人工溼地自 93 年 8 月開始連續進流操作，目前採樣記錄至 94 年 10 月，研究期間使用以馬達抽取竹溪流域溪水直接引進至人工溼地系統。溼地操作自連續進流後，分兩階段進行。第一階段稱啟動階段(又稱 A 試程，自 2004 年 8 月至 2005 年 3 月)，溼地系統以較小流量進流，平均控制於 76 m<sup>3</sup>/day，水力負荷為 0.076 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day，水力停留時間平均為 3.81 天。之後，2005 年 3 月至 2006 年 1 月提高進流流量到平均 107 m<sup>3</sup>/day，進行穩定階段的操作，此時水力負荷為 0.107 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day，水力停留時間約為 2.66 天，此階段又稱為 B 試程。

## 3、採樣與分析：

採樣點分別採集為：進流水（採樣點 A）、SSF I 出流（採樣點 B）、FWS 出流（採樣點 C）、出流水（採樣點 D），且每週採樣 1 次。

水樣的各項水質分析包括：生化需氧量（BOD<sub>5</sub>）、化學需氧量（COD）、氨氮、總懸浮固體物（TSS）、正磷酸鹽、總磷(TP)、硝酸鹽、亞硝酸鹽、總氮(TN)、DO、pH、水溫等。各項水質分析方法，均參考“水與廢水的標準測試法”(APHA, 19<sup>th</sup> Ed)。COD、氨氮、正磷酸鹽、硝酸鹽、亞硝酸鹽之水樣，均預先以濾膜過濾，分析結果屬溶解態。

## 4、去除速率：

溼地系統中污染物之負荷量（PLR）可表示成：

$$PLR = C_i \times q \quad (1)$$

其中，

PLR：污染負荷，g/m<sup>2</sup>/d

C<sub>i</sub>：溼地系統污染物進流濃度，mg/l

q：水力負荷，m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d

溼地系統中之去除速率（RR）可表示成：

$$RR = (C_i - C_e) \times q \quad (2)$$

其中，

RR：去除速率，g/m<sup>2</sup>/d

q：水力負荷，m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d

$C_e$ ：溼地系統污染物出流濃度，mg/l

5、人工溼地去除動力學模式估算：

假設污染物在人工溼地遵循柱塞流一次動力學模式(First-order plug flow kinetic)(Kadlec , 2001)

$$K_T = -\frac{\ln\left(\frac{C_0 - C^*}{C_i - C^*}\right)}{HRT} \quad (3)$$

其中，

$C_0$ =出流水濃度(mg/L)

$C_i$ =進流水濃度(mg/L)

$C^*$ =人工溼地的背景濃度，本文假設  $BOD_5$  背景濃度為 2 mg/L

HRT=水力停留時間，day

$K_T$ =溫度 T 時的一次動力學去除速率常數

## 結果與討論

### 1. 竹溪人工溼地之水質特性：

本文人工溼地操作結果分啟動階段（A試程）與穩定階段（B試程）進行討論。根據竹溪進流水質（表1）平均濃度顯示，A試程：pH 7.54、ORP -64 mv、DO 0.50 mg/L、溫度 24.5°C、導電度 834  $\mu$ s/cm、 $BOD_5$  53.1 mg/L、COD 98.3 mg/L、TSS 38.7 mg/L、TP 2.45 mg/L、TN 27.8 N mg/L；在B試程：pH 7.50、ORP -21 mv、DO 0.34 mg/L、溫度 25.1°C、導電度 729  $\mu$ s/cm、 $BOD_5$  48.5 mg/L、COD 91.8 mg/L、TSS 30.9 mg/L、TP 2.71 mg/L、TN 36.3 N mg/L。

### 2、人工溼地之水質淨化效能

#### （1）TSS去除

A試程中，平均進流水質TSS濃度38.7 mg/L，流經人工溼地系統放流水TSS濃度為7.5 mg/L；B試程中，平均進流水質TSS濃度30.9 mg/L，人工溼地放流水TSS濃度5.6 mg/L（表1）。放流水TSS濃度可時常達到國家放流水標準的30 mg/L。

TSS污染負荷A試程為2.85 g/m<sup>2</sup>/day，B試程為3.35 g/m<sup>2</sup>/day。TSS去除速率A試程為2.31g/m<sup>2</sup>/day，B試程為2.73 g/m<sup>2</sup>/day（表3）。TSS去除效率，A試程為75%，B試程增加至81%（表3）。

本研究與二行人工溼地(游程凱，2004)進行比較後發現，顯示 A、B 試程 TSS 污染負荷均高於二行村系統 TSS 污染負荷 2.04 g/m<sup>2</sup>/day，且 A、B 試程 TSS 去除速率也高於二行人工溼地的 TSS 去除速率 1.03 g/m<sup>2</sup>/day，在 A、B 試程 TSS 去除效率（75%、81%）優於二行人工溼地的 TSS 去除效率 50%。

由圖2中顯示，竹溪人工溼地啟動階段即呈現穩定的處理效果，在穩定階段時仍然呈現穩定的狀況，且在去除率上由75%增加至81%。

## (2) BOD<sub>5</sub>去除

A試程平均進流水BOD<sub>5</sub>濃度為53.1 mg/L，流經人工溼地後放流水BOD<sub>5</sub>濃度13.3 mg/L (表1)。B試程平均進流水質BOD<sub>5</sub>濃度48.5 mg/L，流經竹溪人工溼地後放流水平均BOD<sub>5</sub>濃度10.1 mg/L。放流水BOD<sub>5</sub>經常低於國家放流水標準中的30 mg/L。

表3顯示，A試程之BOD<sub>5</sub>污染負荷為4.05 g/m<sup>2</sup>/day，B試程增加為5.28 g/m<sup>2</sup>/day。去除速率由A試程的3.08g/m<sup>2</sup>/day，提升至B試程的4.17 g/m<sup>2</sup>/day。去除效率則由A試程75%增加至B試程的79%。

本研究與二行人工溼地(游程凱，2004)進行比較後發現，二行人工溼地的平均去除效率85%，明顯高於本研究A、B試程的75%與79%，但是二行人工溼地BOD<sub>5</sub>去除速率平均為2.59 g/m<sup>2</sup>/day卻低於本研究的A、B試程的去除速率(3.08g/m<sup>2</sup>/day、4.177 g/m<sup>2</sup>/day)。主要原因為本研究A、B試程的BOD<sub>5</sub>污染負荷(4.05 g/m<sup>2</sup>/day、5.28 g/m<sup>2</sup>/day)，高於二行村系統BOD<sub>5</sub>污染負荷平均3.05 g/m<sup>2</sup>/day。

由圖3中顯示，竹溪人工溼地在初期略微不穩定，在出流時有較高的濃度，而後即有良好的去除BOD<sub>5</sub>能力，當進流負荷增加後，在出流濃度並無增加的趨向，而有略微降低的情況。顯示竹溪人工溼地污染負荷增加至5.28 g/m<sup>2</sup>/day時，去除速率達4.17 g/m<sup>2</sup>/day，去除效率增加至80%，並且可以有效減少放流水BOD<sub>5</sub>濃度。

## (3) COD去除

A試程平均進流水質COD濃度98.3 mg/L，流經人工溼地後放流水COD濃度43.4 mg/L；B試程平均進流水質COD濃度91.8 mg/L，流經竹溪人工溼地後放流水COD濃度48.9 mg/L。放流水COD經常低於國家放流水標準中的100 mg/L。

COD污染負荷A試程為7.56 g/m<sup>2</sup>/day，B試程為9.96 g/m<sup>2</sup>/day。A試程的去除速率為4.22 g/m<sup>2</sup>/day，提升至B試程的4.59 g/m<sup>2</sup>/day。A試程去除效率為55%，B試程去除效率為46%。

本研究與二行人工溼地(游程凱，2004)進行比較後發現，本研究A試程COD污染負荷7.56 g/m<sup>2</sup>/day低於二行村系統COD污染負荷平均8.39 g/m<sup>2</sup>/day，而在A試程的去除速率、去除效率(4.22 g/m<sup>2</sup>/day、55%)，與二行人工溼地的46%、去除速率平均為3.87 g/m<sup>2</sup>/day效率接近。COD污染負荷9.72 g/m<sup>2</sup>/day，高於二行村系統COD污染負荷，而在B試程的去除速率、去除效率4.59 g/m<sup>2</sup>/day、46%，與二行人工溼地的46%、去除速率平均為3.87 g/m<sup>2</sup>/day比較後發現，去除速率較優於二行人溼地，去除效率與二行人工溼地相當。

由圖4中顯示，竹溪人工溼地初期約需經五個月適應後，對COD有較明顯的去除效果，在穩定階段初期(94年3月-8月)處理效果呈顯穩定狀況，且在經歷淹水(94年6-7月)後去除效能並無明顯的影響。

## (4) TP去除

A試程平均進流水質TP濃度為2.45 mg/L，人工溼地放流水TP濃度為2.51 mg/L。B試程平均進流水質TP濃度為2.71 mg/L，人工溼地後放流水TP濃度2.09 mg/L。

A試程的TP污染負荷為0.19 g/m<sup>2</sup>/day，B試程增加為0.29 g/m<sup>2</sup>/day。A試程的TP去除速率為負值，B試程增加至0.07 g/m<sup>2</sup>/day。TP去除效率由A試程的-6%增加至B試程的22%。

本研究與二行人工溼地進行比較後發現，本研究A、B試程TP污染負荷(0.19 g/m<sup>2</sup>/day、0.29 g/m<sup>2</sup>/day)、去除速率(0.00 g/m<sup>2</sup>/day、0.07 g/m<sup>2</sup>/day)，與二行村系統TP

污染負荷平均  $0.24 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、去除速率平均為  $0.13 \text{ g/m}^2/\text{day}$  比較後發現，A、B 試程污染負荷與二行人工溼地接近，A、B 試程去除速率有較低於二行人工溼地，二行人工溼地的去除效率 54% 顯著高於本研究 A、B 試程的去除效率 (-6%、22%)。

由圖5中顯示，啟動階段的竹溪人工溼地對於TP，並無去除的效果，而在出流濃度呈現增加的情形。在穩定階段有較明顯的去除效果，但在整體去除上，仍然呈現不穩定的狀況。

#### (5) TN去除

A試程平均進流水質TN濃度  $27.8 \text{ N mg/L}$ ，人工溼地後放流水TN濃度  $21.7 \text{ N mg/L}$ ；B試程平均進流水質TN濃度  $36.3 \text{ N mg/L}$ ，流經竹溪人工溼地後放流水TN濃度  $25.1 \text{ N mg/L}$ 。

污染負荷A試程為  $2.07 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ；B試程為  $3.81 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 。A試程的TN去除速率為  $0.45 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，提升至B試程的  $1.13 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 。去除效率由A試程的20%增加至B試程的24%。

本研究 A、B 試程與二行人工溼地進行比較後發現，本研究 A、B 試程 TN 污染負荷 ( $2.07 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、 $3.81 \text{ g/m}^2/\text{day}$ )，高於二行村系統 TN 污染負荷平均  $1.37 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ；二行人工溼地 TN 去除速率平均為  $0.80 \text{ g/m}^2/\text{day}$  高於本研究 A 試程的去除速率  $0.45 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ，而低於本研究 B 試程的去除速率  $1.13 \text{ g/m}^2/\text{day}$ ；二行人工溼地的去除效率 58% 高於本研究 A、B 試程 TN 的去除效率 (20%、24%)。可能的原因為本研究水力負荷及污染負荷均較高。

由圖6中顯示，竹溪人工溼地在啟動階段約需六個月適應期後，有較明顯的處理能力，在穩定階段雖有較好的處理能力，但卻容易受到外界因素（大雨、颱風）影響，使穩定階段的處理效果呈現時好時壞的情況。

#### (6) 總大腸菌類去除

本研究 A、B 試程水質結果：A 試程進流大腸菌類  $47318 \text{ CFU/mL}$ ，流經人工溼地後出流大腸菌類為  $1905 \text{ CFU/mL}$ ，去除速率為 96%；B 試程進流大腸菌類  $28860 \text{ CFU/mL}$ ，流經人工溼地後出流為  $7395 \text{ CFU/mL}$ ，去除速率僅為 74%。

### 3、人工溼地去除速率常數(*k*)

#### (1) BOD<sub>5</sub>

由表3顯示，A試程與B試程的BOD<sub>5</sub>去除速率常數，SSF I為0.60與1.05  $\text{d}^{-1}$ ，SSF II為1.19與1.54  $\text{d}^{-1}$ ，兩者均高於FWS的0.17與0.34  $\text{d}^{-1}$ ，而整個人工溼地的*k*值為0.48 與0.75  $\text{d}^{-1}$ ，以上結果顯示SSF濕地的BOD<sub>5</sub>去除效能優於FWS濕地。一般河川水質自淨模式中的BOD<sub>5</sub>脫氧速率常數為  $0.232 \text{ day}^{-1}$  (20°C)，本研究SSF濕地及整個人工溼地的BOD<sub>5</sub>去除速率常數，均明顯高於河川自淨能力的脫氧速率常數，表示竹溪人工溼地對於淨化河川BOD<sub>5</sub>是有貢獻的。

圖7中顯示啟動階段與穩定階段的水力停留時間與BOD<sub>5</sub>濃度的關係，顯示啟動階段及穩定階段的SSF I及SSF II處理能較優於FWS，且在穩定階段有較優於啟動階段的情況，當在穩定階段時，利用較短的停留時間即可達到與啟動階段相當的處理能力，甚至有較好的處理能力。

#### (2) TSS



由表3顯示，A試程與B試程的TSS去除速率常數，SSF I為3.25與5.04  $d^{-1}$ ，SSF II為2.59與1.41  $d^{-1}$ ，明顯高於FWS的-0.57與0.12  $d^{-1}$ ，顯示SSF濕地對TSS去除效率優於FWS濕地。

圖8中顯示啟動階段與穩定階段的水力停留時間與TSS濃度的關係，顯示啟動階段及穩定階段的SSF I有相當類似的處理能力，並且對於處理TSS是可以肯定的。對於FWS處理TSS，在圖7中，可以明顯看出處理上的差異，在啟動階段的FWS去除TSS有負面的效果，而在穩定階段的FWS並沒有明顯的處理能力。在SSF II處理TSS上，啟動階段與穩定階段皆有明顯的處理能力，且啟動階段處理能力明顯優於穩定階段，原因為啟動階段因FWS提升的負荷，使啟動階段有較高的負荷，所以有較高的處理能力。穩定階段利用較短的水力停留時間仍可以達到啟動階段的處理能力，甚至有較好的處理能力。

#### 4、颱風對溼地之影響：

人工濕地於93年8月設置完成，並且進行連續進流操作。設置完成後，歷經颱風侵襲，致使根系尚未扎實依附的植物，經歷颱風肆虐時的大雨所產生的大水帶走剛植栽的植物。有了此次經驗後，於93年9月重新植栽，且穩定操作於93年12月植物生長逐漸穩定。在本研究期間（93年8月～95年1月）發現每逢大雨或是颱風，溼地將要承受大雨所產生的洪水的沖刷及溼地完全被洪水淹沒的命運，並且水中部分魚類及少數植物被大水沖走，而本研究中發現培地茅與風車草較不容易受到洪水沖刷倒塌；美人蕉與香蒲則是相當容易倒塌。

颱風及大雨後，洪水帶來了大量的泥沙、垃圾及油脂，對溼地帶來莫大的傷害，泥沙造成SSF系統孔隙阻塞的問題，可能成為溼地壽命的減少的最大主因；洪水帶來的垃圾也對溼地造成影響，造成SSF及FWS系統產生蚊蟲、惡臭、並且對水質也有影響，因此在大雨或颱風後，溼地系統需要人力維護及恢復；洪水後，FWS會有浮油殘存水表面，導致該FWS之溶氧降低，且在颱風或大雨過後會使FWS的微生物大量繁殖，且發生蚊蟲滋生的問題。

溼地植物在94年7月時做一次全面性的採收，在採收後隨即經歷超大豪雨，接連颱風的肆虐，期間整個人工溼地浸泡在洪水的沖刷中長達1週之久。但是，上述的淹水情況，都在洪水消退、水位降低後，紐澤西護欄所構築的濕地結構均無損壞，系統仍然能正常持續操作。

至今竹溪人工溼地仍然持續經歷颱風以及洪水，而竹溪人工溼地也仍然持續連續的操作，並且對河川污染物的去除仍有效的運作著，證明人工溼地是可以設置於河溪的水泥河階地，並且有上有許多狀況以及問題是需要去發現以及克服的。

## 結論

- 1、啟動階段人工溼地系統對進流水主要污染物的平均去除效能分別為：總懸浮固體物(TSS) 75% ( 2.31  $g/m^2/day$ )、生化需氧量(BOD<sub>5</sub>) 75% ( 3.08  $g/m^2/day$ )、化學需氧量(COD) 55% ( 4.22  $g/m^2/day$ )、總氮(TN) 20% ( 0.45  $g/m^2/day$ )、總磷(TP) -6%。
- 2、穩定操作階段的污染物的平均去除效能分別為：TSS 81% (2.73  $g/m^2/day$ )、BOD<sub>5</sub>

79% (4.17 g/m<sup>2</sup>/day)、COD 46% (4.59 g/m<sup>2</sup>/day)、TN 24% (1.13g/m<sup>2</sup>/day)、TP 22% (0.07 g/m<sup>2</sup>/day)。

- 3、竹溪人工溼地啟動階段 TSS 去除能力即呈現穩定的處理效果，在穩定階段時，TSS 去除能力仍然呈現穩定的狀況，且在去除率上由 75%增加至 81%。
- 4、竹溪人工溼地在去除 BOD<sub>5</sub> 效能上，A、B 試程的污染負荷 (4.05 g/m<sup>2</sup>/day、5.28 g/m<sup>2</sup>/day) 雖然較高於二行人工溼地系統，但去除效率仍然可以維持在 A、B 試程的 75%與 79%。
- 5、竹溪人工溼地的 TSS、BOD<sub>5</sub> 及 COD 排放水皆符合環保署公告「放流水標準」。
- 6、竹溪人工溼地在去除 BOD<sub>5</sub> 時，無論在啟動階段或穩定階段，SSF 的處理能力較優於 FWS，並且呈現穩定的狀況。

## 參考文獻

1. Cole, The emergence of the treatment wetlands. Environ. Sci. Technol. 32: 218A-223A.(1998)
2. Reed, S. C., R. W. Crites, and E. J. Middlebrooks., Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2nd ed. McGraw-Hill, New York.( 1995)
3. Kadlec, R. H., and R. L. Knight. Treatment Wetlands. CRC Press, Boca Raton, FL.( 1996)
4. APHA, "Standard Methods for the Examination of Water and wastewater", 19th Ed., American Public Health Association, Washington, D.C
5. Kadlec, R.H., and K.R. Reddy, "Temperature Effects in Treatment Wetlands," Water Environment Research, 73, 5, pp. 543-557(2001).
6. 游程凱，"利用穩定塘連接人工溼地處理社區污水效能之探討"，碩士論文，嘉南藥理科技大學環境工程與科學研究所，台南 (2004)。
7. 吳堅瑜、荊樹人、林瑩峰、李得元、游程凱、宋金樹、張天化，"以實場人工溼地系統直接處理社區污水效能之研究"，第二十八屆廢水處理技術研討會，第 1-116 頁，台中(2004)，計畫編號：NSC-90-2211-E-041-005。
8. 左惠文、李得元、張翊峰、李俊儀、莊淳凱、賴玟錡，"不同水力負荷對人工溼地去除校園廢污水之研究"，第二十九屆廢水處理技術研討會，第 1-83 頁，台南(2004)，計畫編號：NSC 92-2211-E-041-014。
9. 王姿文、荊樹人、林瑩峰、李得元、洪嘉星，"施以農藥 Atrazine 之人工溼地系統中硝酸鹽去除效果之探討"，第二十九屆廢水處理技術研討會，第 1-47 頁，台南(2004)，計畫編號：NSC 92-2211-E-041-007。
10. 林瑩峰、荊樹人、李得元、張翊峰、余元傑、施凱鐘、張弘昌、李穆生，"社區水資源再利用與永續經營"，第九屆水再生及再利用研討會，pp.21，中壢 (2004) 計畫編號：NSC 91-2211-E-041-003。

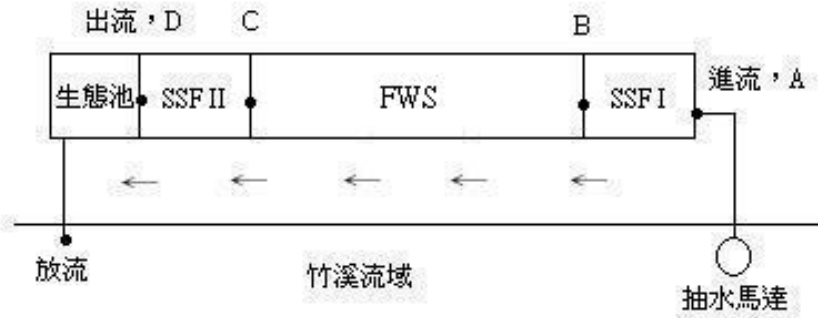


圖 1

註：A、B、C、D 分別為採樣點位置，分別為進流水、SSF I 出流、FWS 出流、SSF 出流。

項目	試程	Influent	SSF I	FWS	SSF II
pH	A	7.54±0.34	7.55±0.35	8.02±0.45	7.70±0.30
	B	7.50±0.40	7.37±0.31	7.47±0.32	7.40±0.26
ORP (mV)	A	-64±121	-217±101	-44±123	-111±133
	B	-21±133	-204±133	-86±144	-187±114
DO (mg/L)	A	0.50±0.50	0.32±0.41	2.99±3.01	0.90±0.71
	B	0.34±0.55	0.23±0.43	1.92±2.06	0.23±0.27
溫度 (°C)	A	24.54±2.5	24.4±2.6	24.3±2.9	23.9±2.8
	B	25.1±3.7	24.9±3.9	25.4±4.6	25.0±4.4
導電度 (µs/cm)	A	834±163	788±154	761±189	810±184
	B	729±119	703±61	675±140	675±160
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	A	53.10±12.95	34.47±9.71	25.01±7.21	13.25±7.96
	B	48.53±12.78	28.50±8.61	19.05±7.90	10.18±4.45
COD (mg/L)	A	98.33±32.65	59.51±26.45	62.81±30.86	43.39±24.90
	B	91.76±32.79	61.06±34.04	59.38±34.24	48.89±27.05
TSS (mg/L)	A	38.67±30.24	10.33±6.34	21.38±25.24	7.46±5.66
	B	30.87±12.33	10.06±7.80	8.65±6.68	5.61±4.95
TP (mg/L)	A	2.45±0.68	2.67±0.74	2.28±0.71	2.51±0.80
	B	2.71±0.58	2.45±0.47	2.28±1.05	2.09±0.67
TN (N mg/L)	A	27.80±10.81	22.40±7.52	19.71±7.86	21.71±8.91
	B	36.25±16.85	29.72±10.23	32.25±37.42	25.07±7.42
Total E-coli (CFU/mL)	A	47318±92840	13978±30285	6557±17432	1950±2755
	B	28860±46682	25632±67269	13522±28465	7395±13060

註：A：啟動階段；B：穩定階段；SSF I：第一階段出流（FWS 進流）；FWS：第二階段出流（SSF II 進

流)；SSF II：第三階段出流（出流水）。

項目	試程	污染負荷 (g/m <sup>2</sup> /day)	去除速率 (g/m <sup>2</sup> /day)	去除效率
TSS	A	4.05	3.08	75%
	B	5.28	4.17	79%
BOD <sub>5</sub>	A	7.56	4.22	55%
	B	9.96	4.59	46%
COD	A	2.85	2.31	75%
	B	3.35	2.73	81%
TP	A	0.19	0.00	-6%
	B	0.29	0.07	22%
TN	A	2.07	0.45	20%
	B	3.81	1.13	24%

註：A：啓動階段；B：穩定階段。

項目	試程	SSF I	FWS	SSF II	CW
BOD	A	0.60 (24.5±2.5°C)	0.17 (24.4±2.6°C)	1.19 (24.3±2.9°C)	0.48 (23.9±2.8°C)
	B	1.05 (25.1±3.7°C)	0.34 (24.9±3.9°C)	1.54 (25.4±4.6°C)	0.75 (25.0±4.4°C)
TSS	A	3.25	-0.57	2.59	0.92
	B	5.04	0.12	1.41	2.51

註：A：啓動階段；B：穩定階段；SSF I：第一階段出流（FWS 進流）；FWS：第二階段出流（SSF II 進流）；SSF II：第三階段出流（出流水）；CW：竹溪人工溼地系統。

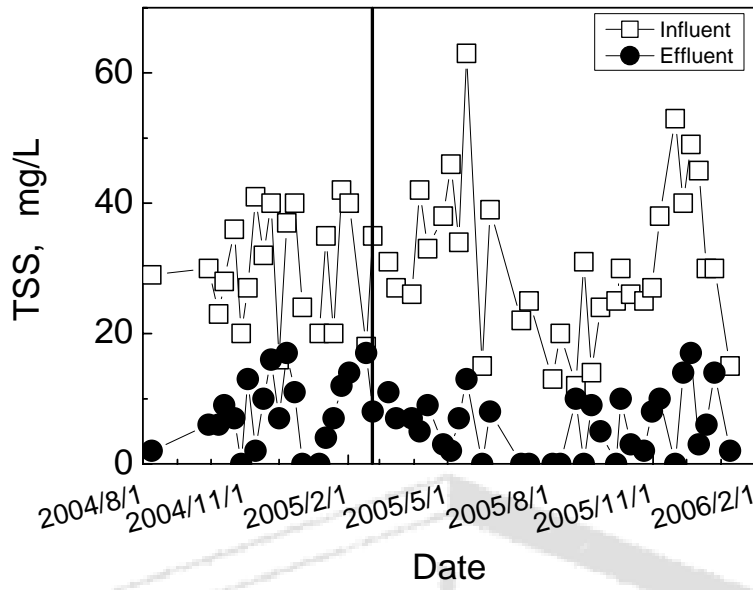


圖 2 A、B 試程 TSS 濃度與時間關係

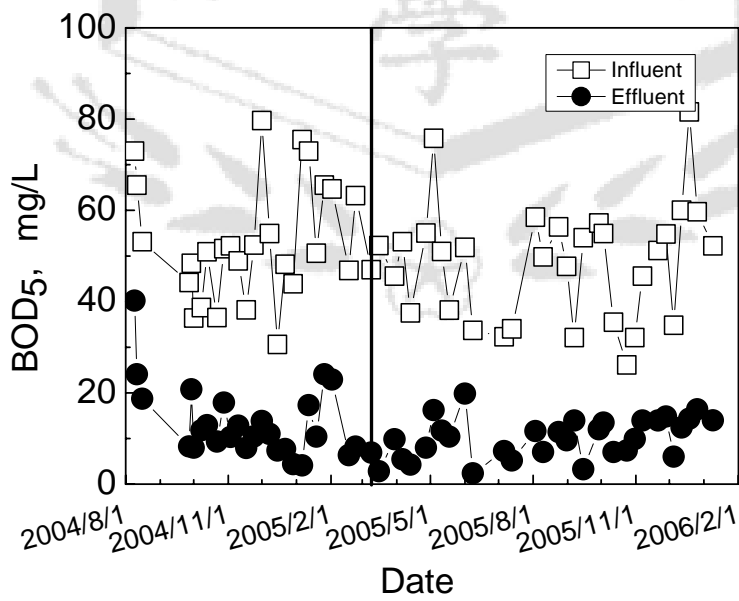


圖 3 A、B 試程 BOD<sub>5</sub> 濃度與時間關係

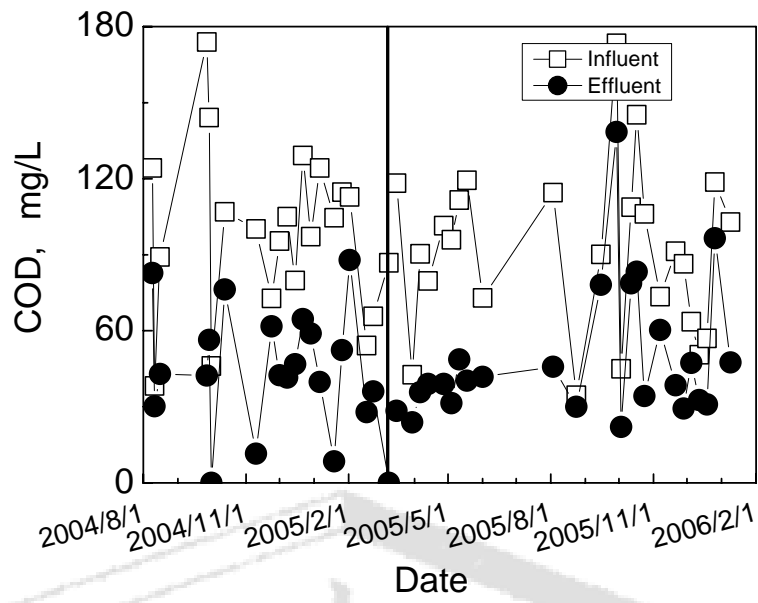
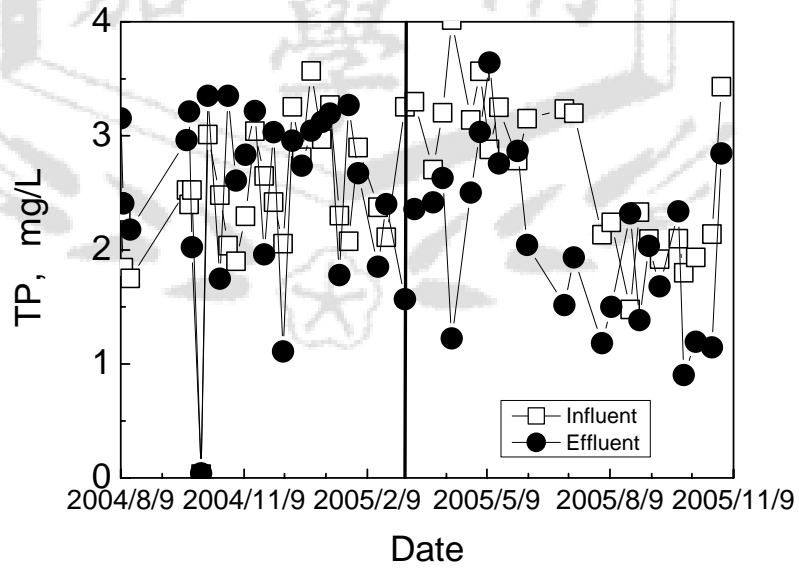


圖 4 A、B 試程 COD 濃度與時間關係



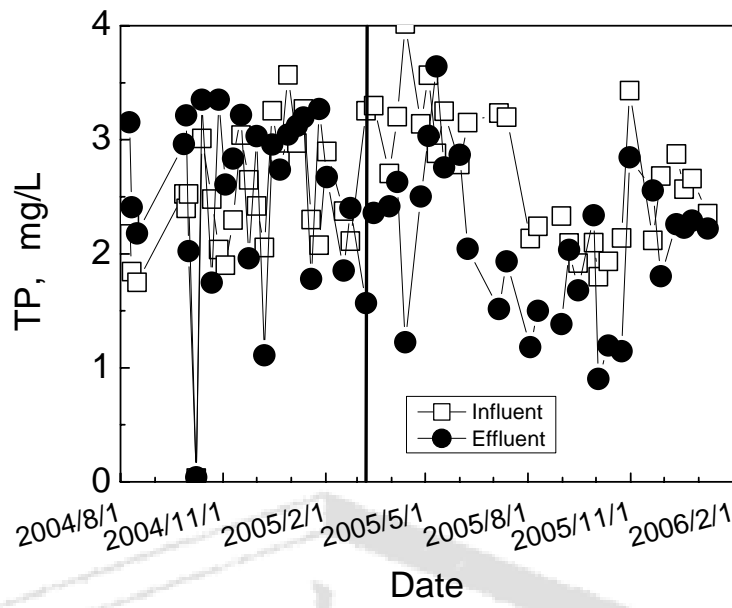


圖 5 A、B 試程 TP 濃度與時間關係

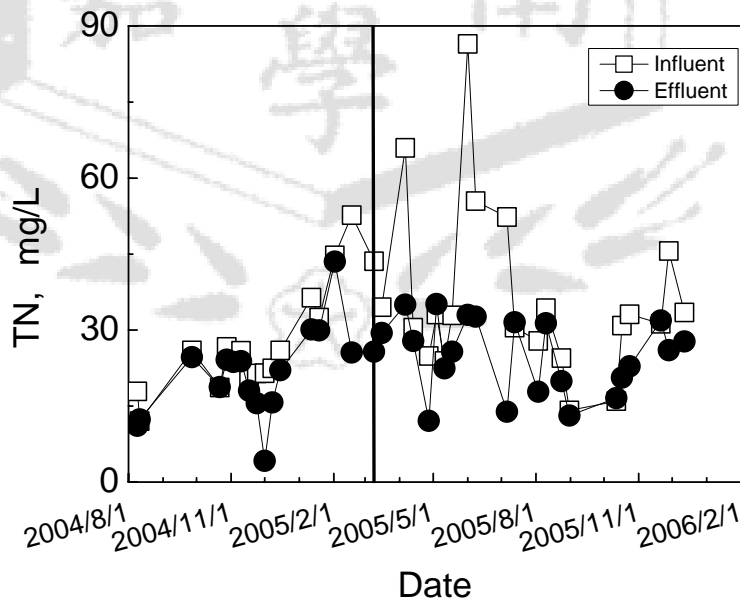


圖 6 A、B 試程 TN 濃度與時間關係

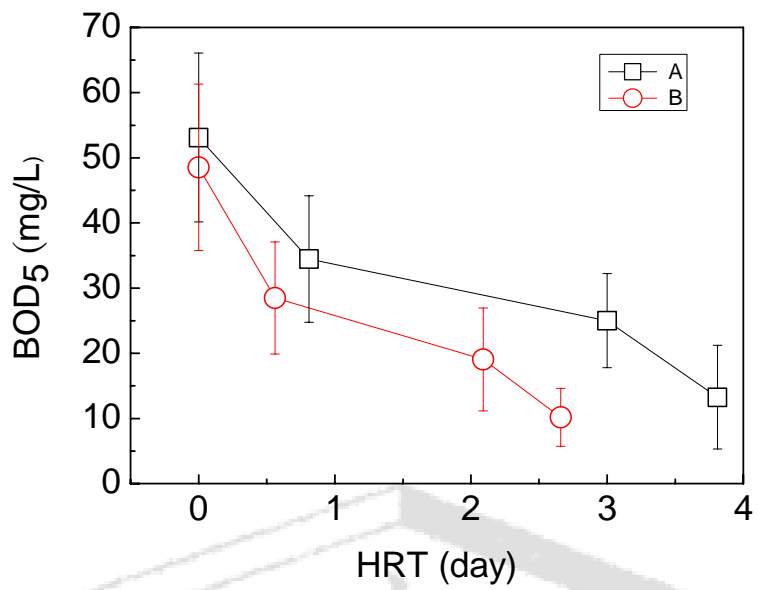


圖 7 A、B 試程 BOD<sub>5</sub> 濃度與停留時間

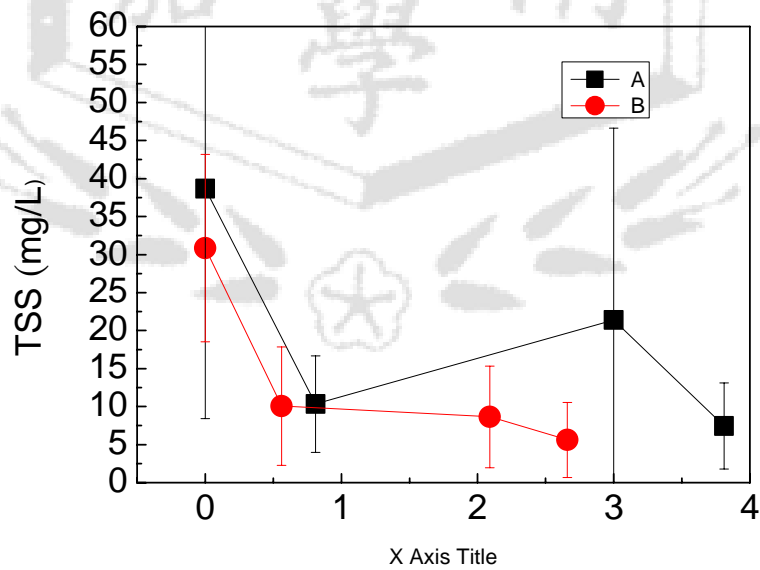


圖 8 A、B 試程 TSS 濃度與停留時間