

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

校園新建人工溼地之操作與處理過廢水再利用的探討

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-041-014-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：嘉南藥理科技大學環境資源管理系

計畫主持人：李得元

共同主持人：荊樹人，林瑩峰

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

校園新建人工溼地之操作與處理過廢水再利用的探討

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2211-E-041-014

執行期間：民國 93 年 08 月 01 日 至 民國 94 年 07 月 31 日

計畫主持人：李得元

共同主持人：荊樹人、林瑩峯

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學

中 華 民 國 九 十 四 年 十 月 十 九 日

校園新建人工溼地之操作與處理過廢水再利用的探討

計畫編號：NSC 93-2211-E-041-014
執行期間：93年8月1日至94年7月31日
計畫主持人：李得元

摘要

本研究計畫為利用已操作數年之模場人工溼地參數評估嘉南藥理科技大學校園宿舍區新建立之實場人工溼地處理污水廠排放廢水的效能，該實場人工溼地面積約為5000平方公尺，分為進流池、表面流動式系統(FWS)、表面下流動式系統(SSF)及生態池，校區污水經人工溼地處理再利用，可達到水資源再利用之目的，此為永續大學校園計畫之一環。評估方式為先以操作數年之模場人工溼地所得數據，包括人工溼地去除各項污染物之處理效能與操作變數(季節、學期時段、滯留時間及水生植物)對系統效能的影響；再以柱塞型流動之數學模式估計反應參數，然後再以所得參數，評估實場人工溼地處理校園生活污水之效果，以建立人工溼地系統直接處理校園生活污水之操作參數，達到校園污水之最佳再利用方式。結果為：小型人工溼地實驗模場操作，系統進水量為0.69 CMD，各項污染物 BOD₅、COD、TSS、NH₄-N、PO₄-P、*E.coli* 及 Total Coliform 之去除效率分別為 60.49%、53.89%、89.16%、42.60%、17.50%、97.82% 及 89.73%；經計算四種主要污染物濃度之柱塞流一次動力學 k ，進行評估實場人工溼地(800CMD)四種主要污染物的放流水濃度值，該四種污染物經人工溼地處理過，去除效率均可達 60% 以上，即各污染物之入口濃度分別：BOD 為 30 mg/L，COD 為 100 mg/L，TSS 為 30 mg/L，NH₄-N 為 10 mg N/L 的假設下，計算各項污染物的出口濃度分別為 BOD 12 mg/L，COD 24 mg/L，TSS 3 mg/L，NH₄-N 2.4 mg N/L；如此低之出口濃度，適合於用來澆灌、洗滌等用途，將可達廢水再利用與廢水零排放的目標。

關鍵詞：人工溼地、校園污水、水資源再利用、零排放

Abstract

The objective of this project is to investigate the efficiency of a new setting scale constructed wetland systems (CW) in Chan-Nan of Pharmacy and Science University using the parameters gained from the data of a CW model. This model has been operated several years. This new CW system based on the idea of Sustained Campus will be built near the area of campus dormitory. This new CW system has the area of 5000 m² and is partitioned to four ponds: entrancing pool, free water surface wetlands (FWS), subsurface wetland (SSF), and ecosystem-pond. This project will also estimate the feasibility of recycling to reuse of the wastewater in the campus. The research work included removal efficiencies of various pollutants and different operating parameters (seasons, semesters, retention time, and various plants). And it also was evaluated the effect of the CW on the ecosystem and the reuse of the treated water. Using the data, the primary operating parameters of using constructed wetlands to treat campus wastewater were established. And then, the efficiency of the new CW used to treat the campus wastewater will be estimated. The results are: the removal efficiency of the pollutants BOD₅, COD, TSS, NH₄-N, PO₄-P, *E.coli* and Total Coliform were 60.49%, 53.89%, 89.16%, 42.60%, 17.50%, 97.82% and 89.73%, respectively. The data were obtained from the operation of model CW with the hydraulic loading of 0.69 CMD. Under the assumption of first-order plug flow kinetics, the first-order reaction constants of four main pollutants were calculated, which will be used to estimate the exit concentrations of four main pollutants while

pass the new CW with the hydraulic loading of 800CMD. When the entering concentrations of BOD, COD, TSS and NH₄-N were 30 mg/L, 100 mg/L, 30 mg/L, and 10 mg N/L, respectively, the estimated exit concentrations of four pollutants are 12 mg/L, 24 mg/L, 3 mg/L, and 2.4 mg N/L, respectively. That is to say the removal efficiency of four pollutants are over than 60%. The low exit concentrations will fit the use of watering and washing. Then, the ultimate goal of zero-drainage for the campus wastewater will be achieved using the CW to treat the campus wastewater directly.

Keywords: constructed wetland, campus wastewater, reuse of the treated water, zero-drainage

一、前言

近幾年來，國人已慢慢了解生態環境的重要性，也逐漸重視到溼地所賦予的自然生態，並著手進行生態保育的工作。然而，溼地的功能不僅如此，溼地還有氣候的調節、水質淨化、生態環境的復育以及生態環境教育等功能。

人工溼地(constructed wetland, CW)主要是利用天然溼地的淨化水質和生態保育的功能⁽¹⁻³⁾，使用最自然的方式來處理人類因生活、工作等所產生之廢污水，並提供一個生態環境的復育。人工溼地是將生態工程技術應用於水或廢水的管理及處理的一種自然淨化程序，與一般傳統之廢水處理系統做比較，具有省能源、低成本、無二次污染、操作維護簡單、不破壞生態等優點，同時，又能提供生態棲息空間、自然景觀、教學與休憩等許多功能⁽⁴⁾。故人工溼地為水資源技術上，是一個具經濟效益，且值得探討其應用價值的自然處理方法。

二、研究目的

本計畫的目的為：以人工溼地技術處理本校校園宿舍區之污水處理廠所排放的污水，達到水資源再利用；因而，「能將研究成果落實應用於現場」、「發揮環保教育功能」、「實現廢水再利用」為本研究計畫的未來目標，進而創造出具有示範效果的校園人工溼地。

三、文獻探討

影響人工溼地操作的因素十分繁複，在地點的選擇上需要考量氣候、水力、地質以及環保法規等因素。在實地操作上需要考量進流水質及水量、水生植物種類、微生物、底棲生物、溼地種類、區域環境狀況等因素⁽⁵⁻⁶⁾。因此，欲以人工溼地有效的處理各類目標廢水，需要對上述之影響因素做一通盤的了解。目前，所發展出來的人工溼地系統有兩種類型：一為自由水層系統(FWS, free water surface system)，此為模擬天然濕地的環境狀態，底部鋪設不透水布，其上之土壤層約 20-30 公分，並高密度地種植挺水性植物(emergent plants；根生於水底，葉伸出水面，例如燈心草、蘆葦、香蒲等)，使其約佔 50% 的表面積；水深約 20-30 公分，進流水則在濕地表層開放性地流動，當水流經植物的莖及根部可行淨化作用；美國大多採用此種系統。另一為表層下流動系統(SSF, subsurface flow system)，為一窪地槽體，充填約 40-60 公分厚的可透水性砂土或碎石作為介質，以此支持挺水性植物的生長，進流水被迫在砂土或碎石表層下間流動，以達到淨化作用；此種系統則是在歐洲、澳洲及南非較普遍。

國內雖有郭文健等⁽⁷⁾、李志源等⁽⁸⁾、高志明等⁽⁹⁾，已針對人工溼地系統對生活污水之淨化能力探討，但所探討的污水為三級污水及非點源者，對校園定點所排放之二級污水之淨化能力，未有進一步探討。近來，對於校園內之污廢水的處理與園區景觀的結合已趨成型，

如光華女中於校園內建構之人工溼地即結合污水處理與再利用、校園景觀及教學實習活動；又如成大建築系將人工溼地與建築美學結合呈現於校園中⁽¹⁰⁾；再如雲林科技大學即利用校園中貫穿的河流渠道及下流域地，探討校園廢水再利用的狀況⁽¹¹⁾。因此，在校園內設置人工溼地為兼具綠美化、景觀、生態保育、環保生態教學之功能，結合研究理論、成果及師生參與，藉此處理與淨化校園污水，以降低校園之水污染負荷，並將淨化後的處理水再用於校園植栽澆灌，達節省水資源之目標。

四、研究方法

本研究之校園人工施地共分為兩個部份，第一個部份的校園人工溼地為一實驗模場，第二部份為實場級的校園人工施地。實驗模場除了用來收集建構實場級人工溼地所需的各項參數之外，另外還將模擬實場級人工溼地中各污染物的處理效果與效能，並且還可透過實驗模場的各項模擬操作，以了解實場級校園人工溼地改變操作參數後可能遭遇的困難與結果。

(一) 校園人工溼地模場

本研究之校園人工溼地模場是由表面自由流動式(free water surface, FWS)及表面下流動式(subsurface flow, SSF)之人工溼地串聯而成，系統後方接一生態池，藉以觀察經系統處理後之水質變化。在 FWS 與 SSF 溼地中，分別以不銹鋼板分隔成 50 cm 寬之水道，一方面減少短流現象(short circuiting)，另一方面使得系統操作更接近於柱塞型(plug flow)反應槽，兩類型溼地之水道總長各約為 10 m。FWS 溼地底部有 20 cm 之泥土，水深 25 cm，種植香蒲；SSF 溼地中放置礫石(平均直徑為 2 cm，孔隙率為 50%)，水深 45 cm 並種植蘆葦。本系統之進流水由環工及幼保兩棟大樓排放之污水道合流後，以沉水式抽水機抽至蓄水塔中，再以重力方式進流溼地系統，平均進流水量控制為 0.69 CMD。

(二) 實場級校園人工溼地系統

本研究之實場級校園人工位於嘉南藥理科技大學新建宿舍區。人工溼地所處理的污水來源主要為校園新建宿舍區之污水處理廠所排放的二級放流水，這些二級放流水經人工溼地果裡過後，再導入廢水再利用系統，達到中水再利用及水資源保護目標。實場級校園人工溼地系統規劃使用面積約為 5000 m²，如圖 1 所示。平均流量為 800 CMD，本研究之人工溼地系統規劃為利用兩個人工溼地，分別為表面流動式(FWS)與表面下流動式(SSF)，完成污水的處理。

估計未來污水處理廠之進流水流量為 800 CMD，則在先經污水處理廠處理後，其放流水直接引入人工溼地的設計下(取代原有中水再利用之前處理設施)，污水處理廠之排放水流量與水質分別為 800 CMD 與 BOD 30 mg/L。

(三) 人工溼地系統的操控

1) 流量：計畫中主要改變的操作參數為進流水的流量，從過去的實驗結果與及文獻資料可知，人工溼地系統在處理有機物之水力停留時間為 4 至 8 天即可達到相當去除效率。為了解常用範圍的人工溼地系統的相關行為，本研究計畫將探討數個進流水的流量，即總水力停留時間，於不同之季節、學期中與寒暑假，在一般操作條件下，人工溼地系統的基本行為、能夠完成處理的相關條件；而各項分析、檢測、紀錄等工作項目，將重複實施。

溼地系統的水力停留時間控制，以其總水力停留時間作為流量控制的計算依據。不同水力停留的時間則以採樣位置和進流口距離與反應槽總長的比例，乘以總水力停留時間而得。因此，在每一個測試階段，只需改變進流流量即可同步完成不同的水力停留

時間。總水力停留時間預計將測試 2 天、4 天、8 天以及 12 天。水力停留時間與流經系統之平均流量的關係如下：

$$HRT = \frac{V}{Q} \quad (1) \quad Q = \frac{(Q_{in} + Q_{out})}{2} \quad (2) \quad q = \frac{Q}{area} \quad (3)$$

其中，Q：流經系統的平均水量，m³/day (CMD)；Q_{in}：水入流量，m³/day；Q_{out}：水出流量，m³/day；V：濕地中水量所佔總體積，m³；HRT：水力停留時間（處理時間），day；q：水力負荷，m/d；area：溼地面積，m²

- 2) 樣本採集：校園人工溼地系統自進流口開始，於每個階段起始或是系統中間適當位置採集水樣(各池進出口)。
- 3) 樣本分析：所採集的水樣需進行各項水質分析，分析項目相當廣泛，幾乎含蓋了廢污水水質檢測的主要項目，但是因人力條件之限制，檢測項目則選擇：COD、TSS、VSS、氨氮、NO₂-N、NO₃-N、總凱式氮、正磷酸鹽、總磷、pH、DO、水溫、氧化還原電位等，依照標準法進行，即“水與廢水的標準測試法”(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16 Ed., American Public Health Association, Inc., New York, 1985)。

五、結果與討論

本計劃共分為兩個階段，第一階段為利用校園人工溼地模場，模擬校園人工溼地可能遭遇的各種狀況，以及獲得各項操作參數，第二階段為利用第一階段獲得各項操作參數，估算實場級校園人工溼地的處理結果與效能，並與實際操作結果比較，以驗證模擬與實際操作結果的差異性。

第一階段：

本計畫利用一小型人工溼地實驗模場進行操作，以模擬實場校園人工溼地的水理特性以及各項污染物的去除效能，未來可作為實場級校園人工溼地之操作參考依據，實驗模場之分析數據及描述分述如下：

表 2 為校園人工溼地模場各污染物進出流之平均濃度及去除效率，由表中結果得知，系統進水量為 0.69 CMD，BOD₅、COD、TSS、NH₄-N、PO₄-P、*E.coli* 及 Total Coliform 之去除效率分別為 60.49%、53.89%、89.16%、42.60%、17.50%、97.82% 及 89.73%，以上各污染物質之進流濃度與去除效率分別如圖 2 至圖 8 所示。

圖 2 為模場入流 BOD 月平均濃度與去除效率，可從圖中看出，2003 年 6 月至 8 月期間正逢寒假，學生人數較少，因而造成污水量少、入流濃度低等現象，因此 CW 系統整體的總去除率偏低。圖 3 為模場入流 COD 月平均濃度與去除效率，根據圖中顯示，平均去除效率均在 50% 以上，其中又以夏秋二季時之去除效率較高。圖 4 為模場入流 TSS 月平均濃度與去除效率，由圖中可看出，TSS 平均入流濃度較低，但 CW 對於 TSS 仍有一定之去除效果，污水進入 CW 系統時，會因流速減緩而對懸浮物質產生沉降作用，又因 FWS 系統所種植之植物體，對於懸浮物質具有截留作用；SSF 系統間的礫石孔徑，則具有其過濾效果，故 SS 在整個系統處理過程中，皆有強去除效果。圖 5 為模場入流 NH₄-N 月平均濃度與去除效率，由圖中結果得知，大部分去除效能可達 50% 以上，CW 系統整體的去除效率約為 45.01%；圖 6 為模場入流 PO₄-P 月平均濃度與去除效率，由圖中看出，入流濃度為 6 mg/L 以下，處理效能約為 50%，又因 PO₄-P 只有在使用清潔劑才會大量產生，由於校園排放之廢污水主要含日常生活之用水，故 PO₄-P 之入濃度均不高。圖 7、圖 8 分別為模場入流 *E.coli* 及 Total Coliform 月平均濃度與去除效率，根據結果顯示，CW 系統整體對 *E.coli* 之去除則

可高達 97.34%，Total coliform 去除率達 90% 以上，文獻資料中提到，部分植物的根部(e.g. *Scirpus lacustris* or *Phragmites australis*)會釋出某種毒性物質來殺死大腸桿菌及致病菌，抑制微生物之新陳代謝，同時在 FWS 系統中，會受到陽光直接照射，因此具有殺菌之效果；進入 SSF 系統時，礫石間之孔隙則具有過濾之效果，由此證明，大腸菌類並不易在 CW 系統中生存。

第二階段：

第二階段的主要研究目標，為利用第一階段所獲得之數據進行估算，以評估實場級校園人工溼地的處理效能。第一階段校園人工溼地模場所處理的污水中，主要污染物為 BOD₅、COD、NH₄-N、以及 TSS 等。由表 1 可得知，校園人工溼地模場所進流的污水濃度，與法規所規範的污水處理廠二級放流水濃度相當，剛好符合實場級人工溼地欲處理的進流濃度。假設這四種污染物在人工溼地均遵循柱塞流一次動力學模式(1st-order plug flow kinetic)

$$k = -\ln\left(\frac{C_0 - C^*}{C_i - C^*}\right) \times q \quad (4) \quad \text{或} \quad C_0 = -\ln\left(\frac{k}{q}\right) \times C_i \quad (5)$$

其中， C_0 =溼地的出流水污染物濃度(mg/L)； C_i =溼地的進流水污染物濃度(mg/L)； C^* =人工溼地的污染物背景濃度，在本文均假設為 0 mg/L； q =水力負荷 (m/d)； k =溼地中硝酸氮的一次動力學去除速率常數 (m/d)。

● 校園人工溼地污染物動力學估算

由表 1 之四種污染物濃度分別以(4)式估算柱塞流一次動力學 k ，結果如表 2 所示。

● 實場級校園人工溼地處理效能估算

經由校園人工溼地模場估算出各項污染物的一階動力學常數之後，再分別估算實場級校園人工溼地的處理效能。由於實場級校園人工溼地污水處理來源為校園污水處理廠的二級排放水，因此本研究之實場級校園人工溼地進流污染物濃度，均以法規所規範之二級放流水污染物濃度進行估算，BOD 為 30 mg/L，COD 為 100 mg/L，TSS 為 30 mg/L，NH₄-N 為 10 mg N/L；實場校園人工溼地的總面積為 5000 m²，流量為 800 CMD，經計算其水力負荷為 0.16 m/d，因此以(5)式估算各污染物的經人工處理處理過後的濃度與處理效能如表 3 所示。

由以上之估算，可評估實場級人工溼地主要污染物的放流水濃度值，這些污染物經過人工溼地處理過，處理效能均可達 60 % 以上，並且各項污染物的濃度值均已經非常低，非常適合於用來澆灌、洗滌等用途，可達到廢水再利用的目標與廢水離排放的目標。目前實場級人工溼地仍在建造中，未來將進一步收集數據，以驗證模場模擬結果與實場實際結果的差異，以提供未來校園人工溼地之規劃設計與操作管理之參考。

六、結論與建議

第一階段之校園人工溼地模場，污水進流量為 0.69 CMD，BOD₅、COD、TSS、NH₄-N、PO₄-P、*E.coli* 及 Total Coliform 之去除效率分別為 60 %、54 %、89 %、43 %、18 %、98 % 及 90 %。第二階段之實場級校園人工溼地處理效能估算，主要為利用第一階段獲得之各項結果，以柱塞流一階動力學，估算實場級校園人工溼地的污染物的出流濃度，以及污染物處理效能，經估算後，BOD₅、COD、TSS、NH₄-N 的出流濃度分別為 12 mg/L、24 mg/L、3 mg/L、2.39 mg N/L，處理效果均可達 60 % 以上，由於處理過後的淨化水污染物濃度均非常低，適合利用於澆灌、洗滌等非接觸性的再利用，可達到污水再利用與零排放的目標。

七、計畫成果自評

本計畫利用實驗模場所建立之操作與設計之相關參數與模式，規劃建置一座校園人工溼地，不僅為全國首座以自然方式處理校園污水的實場，提供環保主管機關推展校園污水污染削減及永續利用水資源等相關計劃的示範場址。同時，該人工溼地所形成的景觀及生態系統，亦可作為學生與附近社區居民休閒活動場所，亦是其他學校生態教學、鄉土教學、環保教育的最方便的野外教室及最好的教材來源，在水資源保育及再利用上提供一個低成本、省能源、無額外污染、不破壞生態之技術選擇，以期提升國內的水利科技水準。

八、參考文獻

1. Brix, H., 1997. "Do Macrophytes Play a Role in Constructed treatment Wetlands?", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp.11-17.
2. Knight, R.L., 1997. "Wildlife Habitat and Public Use Benefits of Treatment Wetlands", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp.35-43.
3. Worall, P., Peberdy, K.J. and Millett, M.C., 1997. "Constructed Wetlands and Natural Conservation", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 5, pp.205-213.
4. Bavor, H.J., Roser, D.J. and Adcock, P.W., 1995. "Challenges for the development of advanced wetlands technology", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 32, No. 3, pp.13-20.
5. Hammer, D.A., Editor(1989)"Constructed Wetlands for Wastewater Treatment – Municipal, Industrial and Agricultural", Lewis Publishers, inc., Michigan.
6. USEPA (2000) "Manual of Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater", EPA/625/R-99/010.
7. 郭文健，生活污水之濕地處理及再利用研究(I)、(II)，(III)，88、89及90年度行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
8. 李志源等，本土化人工濕地設計準則之建立(I)、(II)，(III)，88、89及90年度行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
9. 高志明等，自然濕地對非點源污染物之調查(I)、(II)，(III)，88、89及90年度行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
10. 歐文生、荊樹人、林瑩峰、林憲德，2003，人工溼地淨化校區污水再利用之研究，第二十八屆廢水處理技術研討會，pp.1-117，台中。
11. 袁又罡、鄭榮翰、施泰安、黃智敏，自然演替下土地處理系統水質淨化與植物多樣性之研究，第二十八屆廢水處理技術研討會，pp.1-131，台中。

表 1 校園人工溼地模場各污染物進出流之平均濃度

項目	BOD ₅ mg/L	COD mg/L	TSS mg/L	NH ₄ -N mg/L	PO ₄ -P mg/L	<i>E.coli</i> CFU/ml	Total Coliform CFU/ml
進流濃度	24	74	78	11.29	0.40	229	779
出流濃度	10	34	8	6.48	0.33	5	80
去除效率,%	60	54	89	42	17	98	89

表 2 校園人工溼地模場各污染物之一階動力學常數

項目	BOD ₅	COD	TSS	NH ₄ -N
<i>k</i> , m/d	0.238	0.126	0.175	0.126

表 3 實場校園人工溼地所估算之各污染物進出流濃度

項目	BOD ₅	COD	TSS	NH ₄ -N
進流濃度, mg/L	30	100	30	10
出流濃度, mg/L	12	24	3	2.39
去除效率,%	60	76	90	76

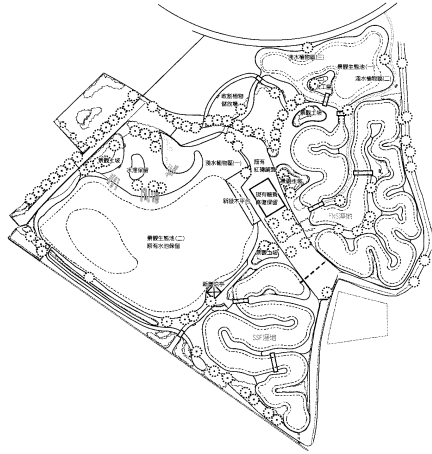


圖 1 嘉南藥理科技大學校園人工溼地配置圖

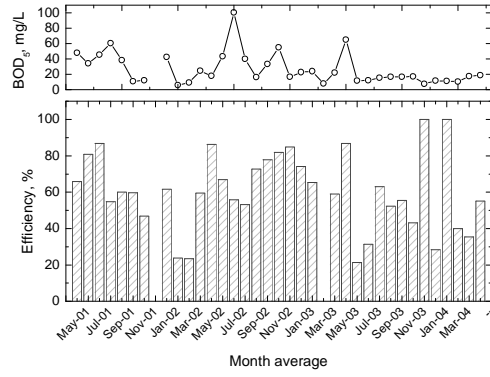


圖 2 模場入流 BOD 月平均濃度與去除效率

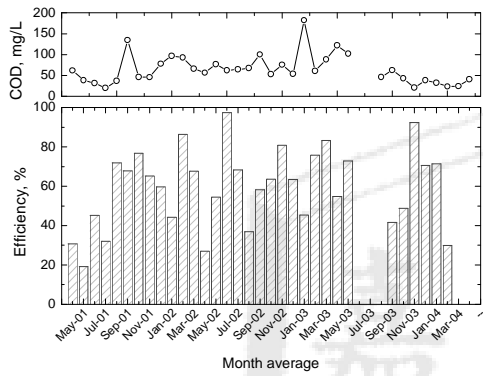


圖 3 模場入流 COD 月平均濃度與去除效率

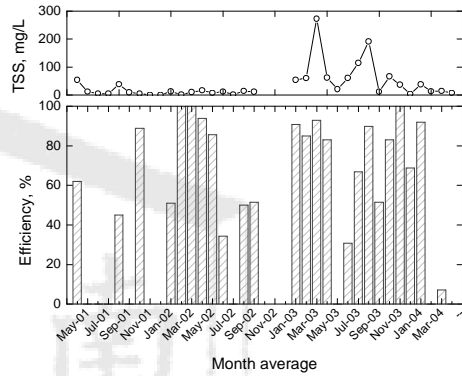


圖 4 模場入流 TSS 月平均濃度與去除效率

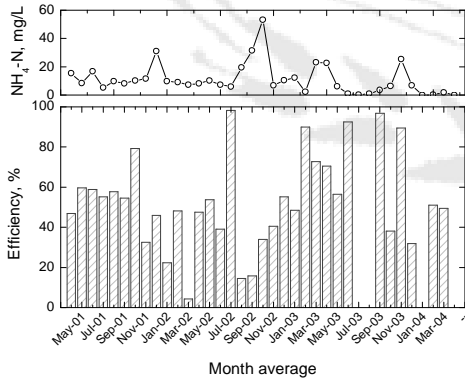


圖 5 模場入流 NH₄-N 月平均濃度與去除效率

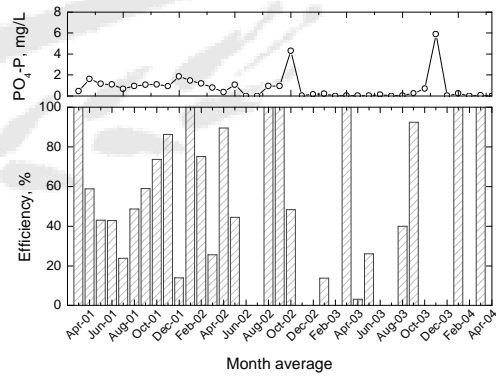


圖 6 模場入流 PO₄-P 月平均濃度與去除效率

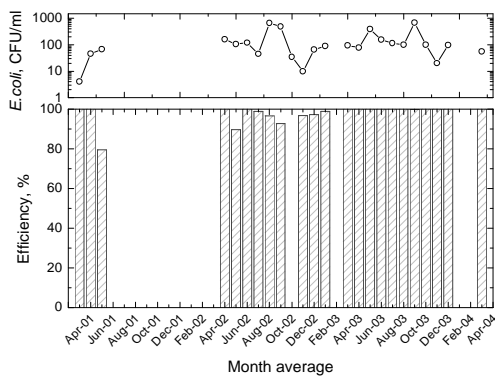


圖 7 模場入流 *E.coli* 月平均濃度與去除效率

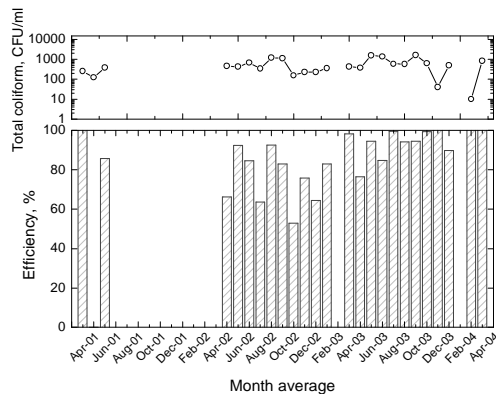


圖 8 模場入流總大腸菌類月平均濃度與去除效率