

水生植物淡化與淨化工業區 污水處理廠放流水之效能

童淑珠

崑山科技大學環境工程系副教授

黃秋雯

台南市西勢國小教師

蔡淑鳳

台南市楠西國小教師

摘 要

本研究主要利用水生植物淡化與淨化污水廠放流水，將耐鹽的物種試種在污水處理廠的生態池，探討水生植物淡化與淨化水質的成效。在實驗室以污水廠放流水養植四種紅樹林植物(海茄苳、紅海欖、水筆仔、欖李)、大安水蓑衣、異葉水蓑衣、過長沙，此七種水生植物在最高鹽分平均每克乾重的累積量分別為 71.3、67.9、52.1、46.8、58.6、96.5、146.2 mg。

污水處理場生態池之深水池浮島選栽的大安水蓑衣與過長沙在鹽度 6‰~9‰的環境，每克乾重平均累積的鹽量分別為 14.9、20.6 mg。生態池之氧化渠種植美人蕉、水蠟燭、傘輪莎草，植株體內每克乾重累積的鹽量分別為 10.6-14.9、15.7-20.3、17.1-20.6 mg，海茄苳、紅海欖、欖李分別為 13.3-37.7、17.4-26.8、6.4-17.1 mg，

生態池深水池進出流水的鹽度維持在 6~9‰，鹽度去除率不顯著，硝酸鹽氮平均去除率為 4.7%、磷酸鹽的去除率為 2.2%、鋅的去除率為 2.5%。氧化渠 I 氨氮去除率為 3.0%，硝酸鹽氮去除率為 0.8%，磷酸鹽去除率 4.7%。鋅的去除率約 0.7%，其他項目去除率不顯著。

關鍵字：水生植物、淡化、淨化、耐鹽、人工濕地

一、前言

一般工業廢水經處理後之放流水皆可回收再利用，回收水通常用於洗掃街、澆灌植物或洗車，然而當放流水水質不佳時，如鹽度過高，則無法回收再利用。



目前為了使放流水回收利用率提高，或是基於永續、綠色工業區的概念，很多科技園區、科學園區或是工業區會建置人工濕地，將放流水再淨化，俾使回收再利用的用途更廣，不僅使用於清洗，也可用於冷卻系統，甚至低階的製程用水。人工濕地除了具有淨化水質而達到回收再利用之性能，在生態意義上，可結合景觀資源、生態復育、教育學習及促進生物多樣性等；人工濕地之技術發展在國內外已有數十年以上之發展歷史，其處理效率與技術已達成熟階段，並廣泛應用於處理生活污水、社區污水、農牧業污水、垃圾掩埋場滲出水及重金屬污染等多樣屬性之污染源，規模上甚至得以處理都市污水層級之規模。

目前人工濕地常用於處理淡水系統，大部分的水生植物也都適應淡水水體，而不能種於高鹽度的水體。本研究選栽耐鹽及抗鹽的樹種，將其分別種植於實驗室及污水廠內的人工濕地，再檢測這些樹種對鹽分的耐受性及蓄鹽能力，期能降低放流水鹽度，也能淨化水質，提高放流水再利用的可能性，以達到工業廢水零排放的目標，進而營造兼具綠美化與生物多樣性的濕地環境。

二、研究架構與方法

(一) 研究架構

本研究分別在「實驗室」與「人工濕地」以工業區污水處理廠放流水澆灌水生植物，選擇多種耐鹽的水生植物進行養植試驗，進而探討水生植物對污水處理廠放流水的水質淡化與淨化的效能。

(二) 研究方法

本研究分別於實驗室試種與工業區綜合污水處理廠生態池進行實作，實驗室種植的植物有紅樹林植物海茄苳(*Avicennia marina*)、水筆仔(*Kandelia obovata*)、紅海欖(*Rhizophora stylosa*)、欖李(*Lumnitzera racemosa*)，另外，還有挺水性大安水蓑衣(*Hygrophila pogonocalyx*)、異葉水蓑衣(*Hygrophila difformis*)與過長沙(*Bacopa monnieri*)，觀察植物生長的狀況及記錄水體的鹽度，選定不同的環境鹽度，進一步檢測植體各部位累積的鹽分；而生態池水體的鹽度皆維持在 6‰~9‰，種植海茄苳、紅海欖、欖李、大安水蓑衣、過長沙、美人蕉(*Canna indica*)、水蠟燭(*Typha orientalis*)、傘輪莎草(*Cyperus alternifolius*)，不定期執行生態池植物體鹽分的檢測。為了解水生植物對污水廠放流水淡化與淨化的效果，也進行各

單元水質檢測。。

1.實驗室「盆栽試驗」

實驗室選栽的水生植物馴養一星期，待植物生長穩定後，即開始以工業區污水廠放流水澆灌，每 2-3 天澆灌放流水 500 ml，並在澆灌前以比重計檢測水體之鹽度，且拍照記錄植物之生長狀況，並進一步檢測植體各部位累積的鹽分。

2.生態池現場試驗

不定時採取生態池的各種植物，檢測植體各部位的累積鹽分。

3.植株各部位鹽分測定

植株體內各部位累積的鹽分測定步驟為(a)先測定植株生長環境的鹽度，(b)將植株清洗乾淨，分成根、莖、葉三部分，置入烘箱內，以 60°C 烘乾 10 小時，(c)再將烘乾的植株分部位秤重，(d)依植株質量多寡加適當的水量，以果汁機打成汁，倒入燒杯中，靜置 2 小時後，最後以比重計檢測液體的鹽度，再換算成植物體內的鹽分。

4.水質分析：在生態池各單元的進出流採樣，水質檢測的項目包含鹽度、導電度、濁度、懸浮固體、銨氮、硝酸鹽氮、總磷、磷酸鹽、重金屬(銅、鋅、鉻、鉛)。

三、結果與討論

以下就試驗的植物蓄鹽量，及每增加一單位鹽度植體增加的蓄鹽量進行說明，並藉由進出流水的水質檢測，初步探討植體對水體營養鹽與鹽分的去除效果。

(一) 實驗室水生植物蓄鹽能力測定結果

1.挺水植物

(1)大安水蓼衣

大安水蓼衣可適應 0‰~27‰的鹽度環境。據陳正為(2004)的研究顯示，在人為控制條件下，大安水蓼衣能在 NaCl 濃度 0.4% (4‰) 的培養液中生長，而本研究更發現大安水蓼衣耐鹽性至少達 27‰。由圖 1 發現植體在鹽度 0‰~27‰環境下，平均每克乾重累積的鹽分由 7.4 增至 54.7 mg/g。當鹽度漸增，各部位的



吸鹽能力依序為根、葉、莖，由圖 2 可知生長環境的鹽度與植體鹽分的蓄積量呈現顯著的正相關顯示生長環境每增加一個鹽度單位(1‰)，根、莖與葉每克乾重，鹽分增量分別為 3.14、1.58、1.70 mg，由此推測大安水蓼衣的根部應具有抗鹽的能力，以至於根部的鹽分高於莖與葉，葉累積的鹽分為根的 57%~95%，植株亦可藉由老葉掉落，移除體內過多的鹽分，也是植株耐高鹽環境的重要機制。

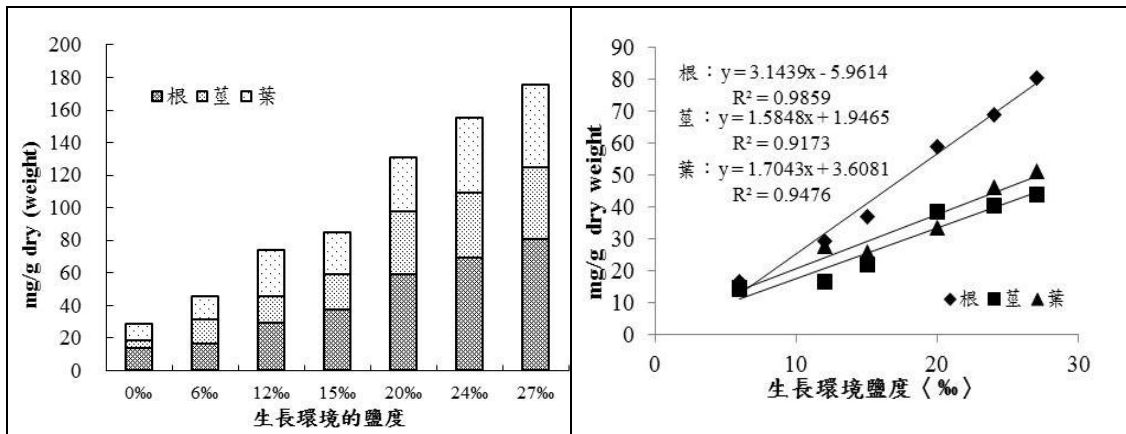


圖 1. 大安水蓼衣各部位鹽分累積量
(2)異葉水蓼衣

圖 2. 大安水蓼衣累積的鹽度增量

異葉水蓼衣可適應 0‰~25‰的鹽度環境，由圖 3 發現植株各部位蓄積的鹽分隨鹽度增加呈上升趨勢。在 0‰~25‰的環境，植體平均每克乾重累積的鹽分自 9.1 增至 91.2 mg，各部位蓄鹽量依序為葉、根、莖。由圖 4 可知每增加一個單位鹽分，根、莖與葉的每克乾重，鹽分累積增量分別為 4.12、2.58、6.64 mg。

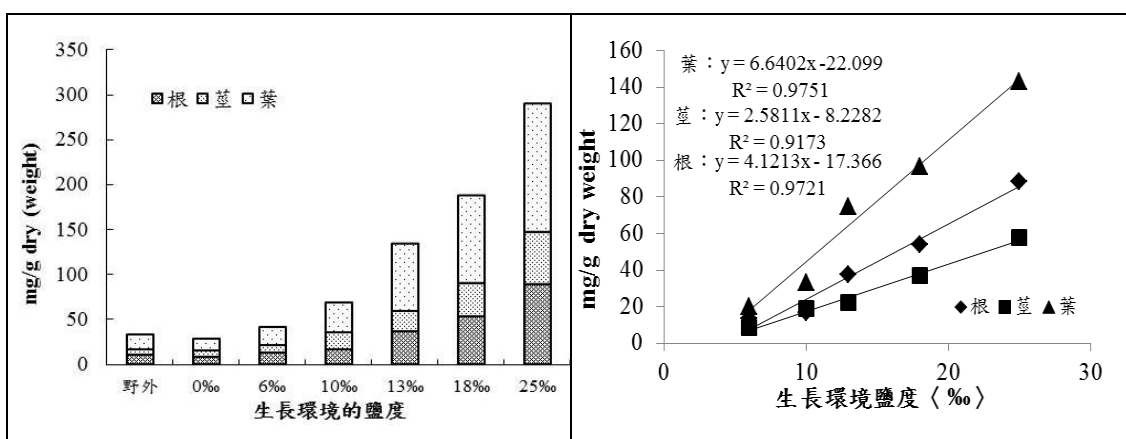


圖 3. 異葉水蓼衣各部位鹽分累積量
(3)過長沙

圖 4. 異葉水蓼衣累積的鹽度增量

圖 5 顯示過長沙在 0‰~30‰的鹽度環境，植株體內每克乾重平均累積的鹽分自 14.0 增至 146.5 mg。由圖中可看出在不同鹽度環境下，各部位蓄鹽量尤以葉最高。圖 6 顯示環境鹽度每增加一個單位，根、莖與葉的每克乾重，鹽分累積增量分別為 4.07、2.44、8.13 mg。葉鹽分累積量幾乎約為莖、根的 2~3 倍，鹽分主要累積在葉片，藉由老葉掉落移以除植體過多的鹽分。

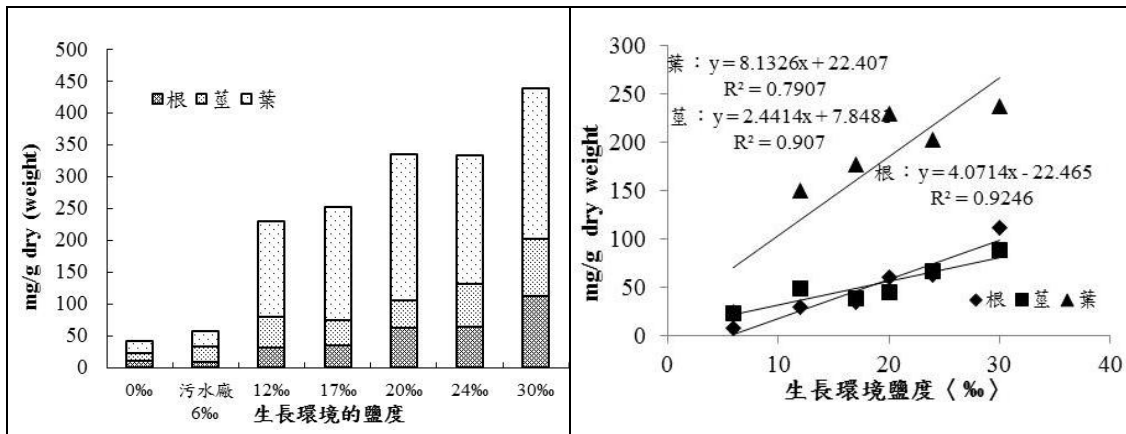


圖 5. 過長沙各部位鹽分累積量

圖 6. 過長沙累積的鹽度增量

2. 紅樹林植物

(1) 海茄苳

由圖 7 可看出，海茄苳可適應 0-50‰的鹽度環境，林瑩峰等（2006）在不同含鹽分的小規模濕地系統中，以批次更換不同鹽分營養液的方式培養單一植物，發現海茄苳在 0-25 g/L (約 0-24‰) 的高鹽分逆境中有相當良好的耐受性。而本研究的海茄苳耐鹽的濃度至少可達 50‰。由圖 8 發現，環境鹽度由低至高時，海茄苳吸收鹽分的總量亦由少到多。在 0-50‰的鹽度環境下，平均每克乾重蓄鹽量由 37.7 增至 71.3 mg，攝取鹽分的能力依序是葉、根、莖。由圖 11 顯示鹽度與各部位蓄鹽量的相關性，根、莖、葉蓄鹽量與環境鹽度的相關係數分別為 0.87、0.84、0.95。在鹽度 7-50‰，每增加一個單位鹽度，根、莖、葉每克乾重鹽分增加量分別是 0.51、0.44、1.34 mg。葉片測得較多的鹽分驗證了 Drennan 等（1982）所推測的耐鹽植物海茄苳葉表面具有豐富的腺體組織，用來排出體內所吸收的過剩離子，使植物在鹽生環境中得以維持滲透壓平衡，確保植株的正常生長。

(2) 水筆仔



由圖 8 可看出，水筆仔可適應 0-30‰的鹽度環境，但超過 25‰，無新葉生成，葉漸枯黃。王露儀等（2004）以 0~ 50‰等不同鹽度於實驗室種植水筆仔幼苗，當鹽度超過 40‰，苗木 100%的枯死率，而 10‰鹽度時，苗木單株生長量最佳，但隨鹽度升高生長量即減少。又 Huang and Chen（1995）指出適合水筆仔生長的鹽度介於 0-15‰之間，以 5‰為最佳，高於 20‰的鹽度則對水筆仔幼苗有抑制作用。當生長環境鹽度由 0-30‰逐漸增加時，植株體內平均每克乾重的鹽分累積量由 27.8 增至 71.3 mg。水筆仔各部位的蓄鹽效果依序是葉、根、莖。水筆仔在環境鹽度 10-30‰，每增加一個單位鹽度，根、莖、葉每克乾重鹽分增加的量分別是 1.28 mg、0.66 mg、2.06 mg。謝蕙蓮與施上粟（2006）認為水筆仔的樹幹基部分枝長出許多呼吸根，向地面隆起形成「板根狀」，可幫助吸收氧氣及過濾大多數的鹽分，並將鹽儲存在老葉以脫落排鹽。而本研究的水筆仔未形成板根狀的呼吸根，因此排鹽的方式主要是將鹽儲存於老葉再予以脫落。

(3) 紅海欖

由圖 9 可知紅海欖可適應 0-45‰的鹽度環境，紅海欖在生長環境鹽度 20‰，植株體內平均每克乾重的鹽分累積量達最高 67.9 mg，但超過 20‰後，植株體內的總鹽分開始減少，但仍有一定的蓄鹽量，推測紅海欖雖是耐鹽植物，但蓄鹽量並非隨著環境鹽度越來越高而逐漸增多，而是有一個極限耐鹽量。由圖 12 顯示紅海欖在環境鹽度 7-20‰，每增加一個單位鹽度，根、莖、葉每克乾重鹽分增加的量分別是 4.02 mg、1.91 mg、0.45 mg。推測紅海欖的根部在高鹽度環境中發揮拒鹽的機制，進而將鹽分攔截於根部，阻止多餘的鹽分往上輸送，因此葉片的鹽分增加不明顯，根部的鹽分卻有大幅度增加。

(4) 欖李

欖李在 0‰-50‰的鹽度環境下，具有絕佳的耐鹽性。由圖 10 可看出，欖李在生長環境鹽度 35‰，植株體內累積的總鹽度達最高 160.0 mg/g，但超過 35‰後，植株體內的鹽度逐漸減少，推測欖李雖是耐鹽植物，但是有一個最高負荷量，以免過量的鹽分干擾植株體內正常細胞的運作。不同鹽度環境下，欖李各部位的吸鹽效果大致以葉片最多，根和莖較少。

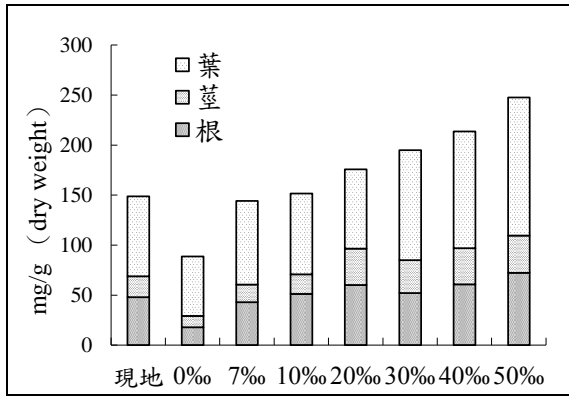


圖 7.海茄苳各部位鹽分累積量

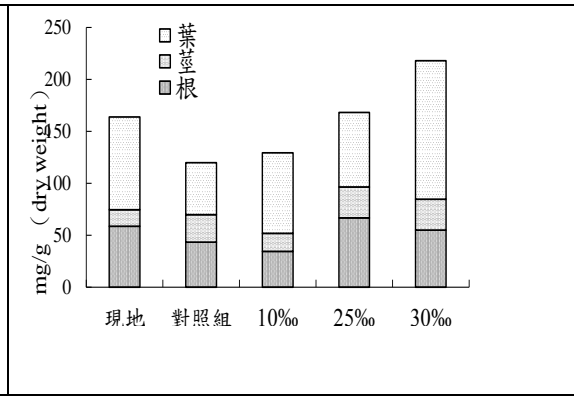


圖 8.水筆仔在不同鹽度環境累積的鹽分

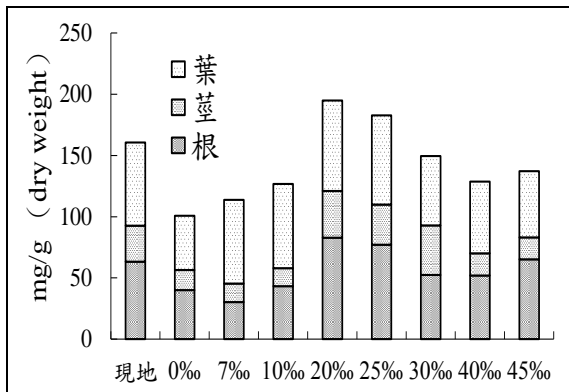


圖 9.紅海欖各部位鹽分累積量

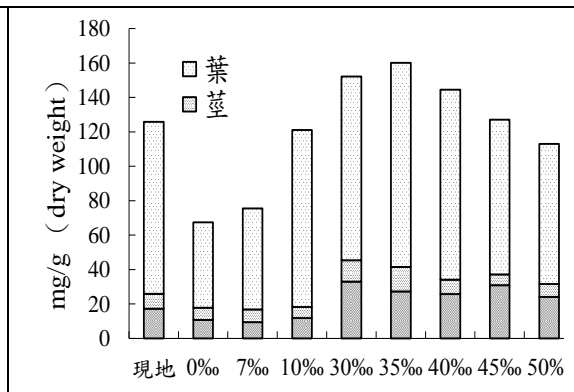


圖 10.欖李在不同鹽度環境累積的鹽分

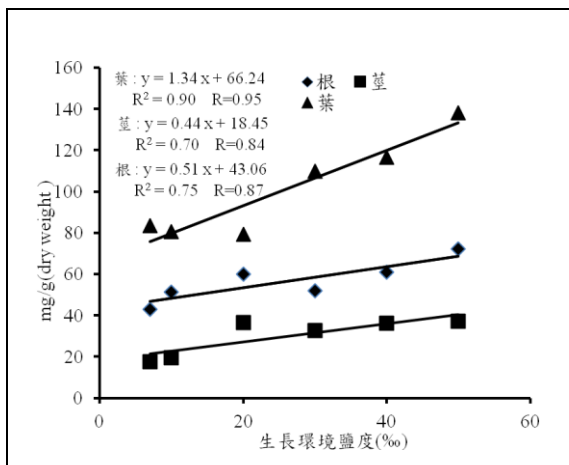


圖 11. 海茄苳各部位累積的鹽度增量

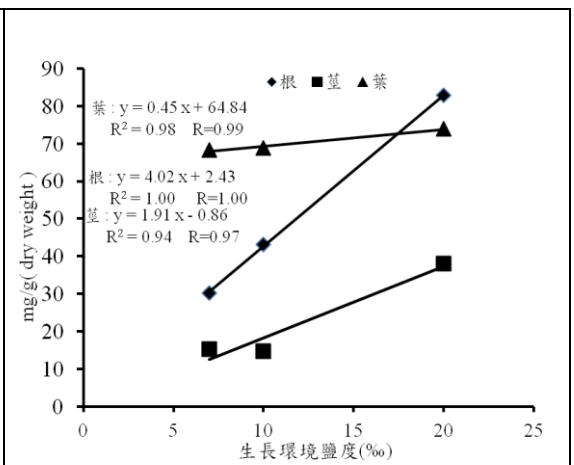


圖 12. 紅海欖各部位累積的鹽度增量

(二) 生態池水生植物蓄鹽能力測定結果

污水處理場生態池之深水池浮島選栽大安水蓼衣與過長沙，生態池試種的結果，水體鹽度維持在 6‰~7‰，檢測時間前後間隔 6 個月，每克乾重平均累積的鹽量分別為 14.9、20.6 mg，過長沙生長快速，很容易導致與其共存的植物因失去生長空間而死亡，目前過長沙一枝獨秀，形成綠島。而氧化渠除了種植三種紅



樹林植物，還有美人蕉、水蠟燭、傘輪莎草等耐鹽的水生植物，植株每克乾重鹽分累積量為海茄苳 13.3-37.7 mg、紅海欖 17.4-26.8 mg、欖李 6.4-17.1 mg、美人蕉 10.6-14.9 mg、水蠟燭 15.7-20.3 mg、傘輪莎草 17.1-20.6 mg。同樣的鹽度環境下，隨著生長時間的增加，植物體內鹽分累積量沒有持續增加，而呈現一個飽和量。

(三) 水質淨化的效能評估

針對生態池每個單元的進出流口進行水質的採樣分析，初步發現鹽度並無明顯改善，所有單元的進出流的鹽度維持在 6~9‰，氨氮的濃度高達 1200~2400 mg/L，氨氮濃度偏高理應會造成植物的危害，但目前觀察到生態池除了紅樹林植物生長良好，尚有其他挺水植物過長沙、大安水蓼衣、傘輪莎草、水蠟燭、美人蕉生長其中，其他試種未能生存的植栽包括布袋蓮、水芙蓉、慈菇等，顯示以上三種植物不耐鹽，也無抗鹽的能力。氧化態硝酸鹽氮的濃度受氨氮的影響也高達 150~290 mg/L，整體評估看不到生態池對氮的去除效能，但如考慮水力停留時間 24 小時，則每個單元對硝酸氮皆有些微的去除率，約為 5.7%~7.4%。總磷濃度為 0.3~0.6 mg/L，磷的去除效果不顯著，推估應是生態池的植栽不足，再者紅樹林植物生長較為緩慢，導致鹽度與營養鹽的去除不明顯。本廠污水尚含有銅、鋅、鉛等重金屬，鋅的去除率約有 16%，鉛的去除率約 21%。生態池包含深水池、氧化渠 I、氧化渠 II、礫石表面下水流池 (SSF, subsurface flow system)、出流池等單元，以下針對本研究維護管理的深水池與氧化渠 I 進行說明。

深水池種植大安水蓼衣和過長沙，由深水池進流水至出流，水力停留時間約為六小時，連續檢測水質兩星期。若考慮水力停留時間，處理效率的計算為採用進流水前 9 天的平均值，出流水為後 9 天的平均值，計算去除率。經水質檢測結果發現進出流的水質穩定，且差異性不大，深水池的水質淨化效果不彰，深水池對硝酸鹽氮的去除率為 4.7%、磷酸鹽的去除率為 2.2%、鋅的去除率為 2.5%。

氧化渠 I 種植三種紅樹林、過長沙、水蠟燭、美人蕉、傘輪莎草，出流氨氮有些微下降的趨勢，平均去除率 3.0%。總磷去除效果不明顯，磷酸鹽平均去除率僅達 4.7%。氧化渠對重金屬的去除效果不明顯，僅鋅有少許去除效果，鋅平均去除率 0.7%。

根據周明顯與彭致豪(2000)的研究指出污水在人工濕地的水力停留時間大都在 5 天以內，水質淨化會有顯著的效果，本研究發現造成生態池之深水池與氧化渠 I 淨化效果不彰的關鍵包括水力停留時間過短，從進流到放流僅各約 6 小

時的停留時間、水體的鹽度與氨氮負荷過高、植物的生長已達飽和，後續如欲提升淨化效能，除了增加水力停留時間，植物也應進行疏伐。

四、結論與建議

(一) 結論

- 1.實驗室以污水廠放流水養植四種紅樹林植物(海茄苳、紅海欖、水筆仔、欖李)、大安水蓼衣、異葉水蓼衣、過長沙，此七種水生植物在最高鹽分平均每克乾重的累積量分別為 71.3、67.9、52.1、46.8、58.6、96.5、146.2 mg。。
- 2.每增加一個單位鹽度(1‰)，植物每克乾重的鹽分累積增加量，除大安水蓼衣以根部居高，異葉水蓼衣與過長沙均以葉部的鹽分累積量最高，莖部最低。大安水蓼衣根、莖與葉每克乾重，鹽分增量分別為 3.14、1.58、1.70 mg；異葉水蓼衣根、莖與葉每克乾重，鹽分增量分別為 4.12、2.58、6.64 mg；過長沙則為 4.07、2.44、8.13 mg。
- 3.四種紅樹林植物都有極佳的耐鹽性，其中海茄苳、紅海欖、欖李可生長在 45~50‰的高鹽度環境，四種紅樹林植物各部位鹽分的累積量大都以葉片最高，其次分別是根與莖，紅樹林植物皆藉由老葉掉落以移除植物體過多的鹽分。當生長環境鹽度上升時，植體內累積的鹽分也會隨之增加，除了紅海欖，其他三種植物鹽分上升幅度最小的是莖，最大的是葉片，當環境中增加一個鹽度單位(1‰)，根每克乾重增加 0.51~1.28 mg 的鹽分，莖每克乾重增加 0.27~0.66 mg 的鹽分，葉每克乾重增加 1.34~2.06 mg 的鹽分。紅海欖根、莖、葉每克乾重鹽分增加量分別為 4.02、1.91、1.45 mg。
- 4.深水池進流至出流，水力停留時間約為六小時，進出流水的鹽度維持在 6~9‰，去除率不顯著，氨氮進出流濃度介於 1200~2300 mg/L，硝酸鹽氮進出流濃度介於 150~290 mg/L，平均去除率為 4.7%、磷酸鹽的去除率為 2.2%、鋅的去除率為 2.5%。
- 5.氧化渠 I 的進出流口的鹽度維持在 6~9‰，氨氮的濃度高達 1400-2400 mg/L，硝酸鹽氮高達 152-270 mg/L，氧化渠對氨氮去除率為 3.0%，硝酸鹽氮去除率為 0.8%，磷酸鹽去除率 4.7%。鋅的去除率約 0.7%，其他項目去除率不顯著。

(二) 建議



- 1.目前於污水處理廠生態池之氧化渠 II 與原規劃的 SSF(表面下流動式)池並無植物，未來可規劃種植適合的水生植物，以增加生態池對水體淡化與淨化的效能。
- 2.人工溼地除了利用植物淨化水體，還有綠美化的功能，更可提供多樣性生物的生育地，未來亦可在周遭栽種蝴蝶的食草與蜜源植物，進而建構出一個多采多姿的環境，具有建構為環境教育場所的潛能。
- 3.生態池的管理與維護常是人工濕地經營成功與否的關鍵，當水生植物生長達飽和時不僅無法有效淨化水質，還常因為老株的死亡而造成水體水質惡化，建議廠區內的生態池應有專人負責維護，適時的疏伐才能維持濕地淨化的功能。

參考文獻

- 1.蔣永正、蔣慕琰，“臺灣布袋蓮 *Eichhornia crassipes* 之生育特性及生長季節性變化”，植物保護學會會刊，第 47 卷，第 4 期，第 337-347 頁(2005)。
- 2.林瑩峰，李得元，張翊峰，余文傑，劉俊宏，劉景元，李俊儀，陳易佐，“人工溼地技術永續管理水產養殖場水及廢水之研究(III)—人工溼地中耐鹽性挺水植物的篩選”，行政院國家科學委員會補助專題研究計畫，2006。
- 3.王露儀，陳紀伶，李明仁，“鹽度對水筆仔苗木生長之效應”，中華林學季刊，37:147-155，2004。
- 4.謝蕙蓮與施上粟，“淡水河系紅樹林疏伐可行研究(1/2)”，經濟部水利署水利規劃試驗所委託研究，2006。
- 5.周明顯，彭致豪，“人工濕地污水處理技術”，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所，2000。
- 6.Drennan, P., Pammenter, N. W., "Physiology of salt excretion in the mangrove, *Avicennia marina* Forsk [J] , " Vierh New Phytol, 91:597-606, 1982
- 7.Y. H. Huang, and S. C. Chen, "Anatomical responses in *Kandelia candel* (L.) Druce seedlings growing in the presence of different concentrations of NaCl," Bot, Bull, Acad, Sin, 36:181-188, 1995.