



大樹舊鐵橋人工濕地水質淨化與生態效益探討

涂耀琹、林維鴻、蔡建緯、謝佳翰／國立中山大學環境工程研究所研究生
高志明／國立中山大學環境工程研究所西灣講座教授

引言

我國下水道工程興建，至 2016 年 7 月底全國污水處理率雖然達 52.47%，其中全國平均之公共污水下水道普及率僅有 29.33%，尚有許多污水並未納入下水道系統（營建署，2016），亦有許多生活污水未經適當處理即排放至鄰近排水渠道或溪流。臺灣大多數河川受限於南北狹長之地型，使得河道較短且流速較急，未能提供河川自我淨化、吸收與轉化污染物之足夠時間而逕流入海。根據行政院環境保護署（TEPA）調查結果顯示，其中有超過 20% 的主要河川受到生活、工業和農業廢水排放造成之污染。雖然公共下水道污水收集系統的普及率持續增加，但許多地區因人口數量較少或是偏遠地區之因素，尚未規劃興建下水道系統，導致污水直接排放至河川，導致河川污染負荷增加。而近年來因全球氣候變遷，極端氣候出現，世界各地天災頻傳，使生態系統中之生態物種逐漸減少趨勢。因此人類開始重視環境議題，綠生活的概念也因應而生，綠生活是指在人們生活中的每一個事物均考慮與要求，需設計達到減少能源、資源消耗、提高環境友善度以及降低生態衝擊等環保訴求（陳文輝，2008）。過去污水處理，主要以大興土木所建置之污水處理廠為主，此工法雖然能有效處理大量污水，但不能達到環境之永續發展。自然淨化工法對水質淨化是一個天然、有效、低度管理與低成本之工法，一般可分為植生處理法、土壤處理法及接觸氧化法，自然淨化是將生態工法技術應用於水或廢水處理及管理上的一種自然淨化程序，利用大自然中既有的污染涵容與淨化能力，將受污染的水或廢水導入其中處理（環保署，2006）。人工濕地（constructed wetland）系統與傳統之廢水處理廠相較下，人工濕地系統不需添加任何化學藥劑、減少能源利用、降低碳排放、操作起來也較為容易及無二次污染等優點，是一種有助於環境生態永續發展的自然淨化

工法（Knowles *et al.*, 2011; Vymazal and Kropfelova, 2008）。臺灣地區自 2000 年以來，在臺灣使用人工濕地淨化受污染河川的案例漸漸增加。至 2016 年依據內政部營建署國家重要濕地保育計畫公告重要濕地全台共有 92 處，數量非常多，顯示濕地在台灣之重要性。因此更需要瞭解濕地效益。目前多數研究所探討與評估之濕地功能包含了防洪、地下水補注、氣候調適、水質淨化、生態物種多樣性效益以及提倡環境教育效益。其中濕地水質淨化過程中，影響水質變化因素包含了水文、氣候、水中的生化作用等，當水體水質改善，伴隨著環境中生態物種相對豐富度增加。本篇文章以高雄之大樹舊鐵橋人工濕地系統做為案例探討人工濕地水質淨化及生態效益。

大樹舊鐵橋人工濕地

大樹舊鐵橋人工濕地位於高雄大樹區台 29 縣道旁，過去高屏溪上游有許多農耕及畜牧，由於不易管理，河川水體污染、垃圾堆積、違建景觀惡化及違規使用等事件發生，造成河川污染負荷增加。同時位於高雄大樹區竹寮社區排入竹寮溪溝之生活污水與永豐餘久堂廠之二級放流水亦長期排入高屏溪，增加河川之污染負荷，進而影響河川生態與水質，使民眾親水環境受到危害。大樹舊鐵橋人工濕地於 2001 年由第七河川局辦理高屏溪右岸高屏大橋至舊鐵路橋高灘地設置人工濕地，並於 2005 年完成啟用，藉由河岸生態復育，重新塑造自然生態環境，以回復高屏溪潔淨之原貌。高屏溪右岸規劃 120 公頃的河川高灘地中建置具備水質淨化、生物多樣性及遊憩等多目標之人工濕地。然而大樹舊鐵橋人工濕地在 2009 年遭受到莫拉克風災嚴重之破壞（圖 1），導致生態、淨水及景觀功能完全喪失，經由政府及當地志工共同努力下恢復原本之淨水、景觀及生態之功能（圖 2）。舊鐵橋人工濕地主要為



圖 1 莫拉克風災受創大樹舊鐵橋濕地



圖 2 現今大樹舊鐵橋濕地

表面流人工濕地，為自由表面流系統 (free water surface system, FWS)，共分為 A、B 二個主要的系統。A 系統濕地水源主要以永豐餘紙業久堂廠之放流水及九曲堂都市計畫區 (九曲路以北城隍路以東部分及部分竹寮村) 之排水。竹寮溪溝為 B 系統濕地系統主要引水。竹寮溪溝源自小坪頂，集水範圍涵蓋竹寮村之大部分山坡地，其組成除雨水外，尚有竹寮村之農牧廢水、生活污水及零星工業

廢水等。竹寮溪溝之水體污染較嚴重、流量小，永豐餘排水污染較輕，流量約為竹寮溪溝排水 10 倍。因此，利用永豐餘排水稀釋竹寮溪溝污水，經匯流後分別流入 A、B 二濕地系統。如圖 3 中所示，A 系統水池單元設置 A1 至 A6 共計 6 池，B 系統設置 B1 至 B4 共計 4 池。整體人工濕地以複合功能設計，A1 及 B1 池為沉澱池，A2-A5 及 B2-B3 池設計以淨化為主生態為輔的水池，A6 及 B4 為生態復育功能為主。

水質淨化效益評估

本團隊透過濕地水質、水文監測及資料收集，瞭解本濕地對於水質淨化之功能與成效。本研究水質調查採樣地點為 A 與 B 兩系統之進出流，於 A 系統之 A1 池進流及 A6 池出流；B 系統之 B1 池進流及 B2 池出流規劃為水質監測與水流量測之調查。每季進行一次，每年共四次，本團隊由 2012 年開始調查至 2015 年。透過各水質監測，瞭解濕地水質淨化情形，同時亦進行生物物種之調查，瞭解生物豐富度之變化。

水流量測結果

本團隊彙整 2012 年至 2015 年水流量測結果如表 1 所示。根據量測結果計算濕地各項水文操作參數，濕地平均進流流量 (Qin) A 系統為 9,009 m³/day，B 系統為 3,561 m³/day。A 系統水力負荷 (HLR) 範圍為 0.045 ~ 0.077 m/day、B 系統為 0.237 ~ 1.034 m/day；A 系統水力停留時間 (HRT) 範圍為 5.97 ~ 10.7 day，B 系統為 0.59 ~ 1.04 day。結果顯示，濕地 A 系統 HLR 略大於 (U. S. EPA, 2005) 建議值 0.015 ~ 0.050 m/day；B 系統除 2014 年外其餘之 HLR 量測結果皆大於建議值。A 系統 HRT 較長主要係由於 A 系統水域面積較大池子較多。



圖 3 大樹舊鐵橋濕地配置示意圖

表 1 2012~2015 年舊鐵橋人工濕地水水量測結果

項目	A 系統			B 系統		
	Q	HRT	HLR	Q	HRT	HLR
	(CMD)	(day)	(m/day)	(CMD)	(day)	(m/day)
2012	12,532	5.97	0.077	5,310	0.59	1.034
2013	8,851	7.63	0.057	2,946	1.04	0.517
2014	6,977	10.70	0.045	1,561	0.70	0.237
2015	7,677	6.00	0.050	4,428	0.87	0.673

Q：流量、HRT：水力停留時間、HLR：水力負荷

水質效益評估

懸浮固體物 (SS)

濕地水質淨化效益經由水體採樣分析進行評估，本團隊長期水質採樣分析（2012~2015 年）結果如表 2 所示，舊鐵橋人工濕地對於 SS 去除效率，由 A 系統各年平均去除效率來看，介於 17.22~82.96% 之間；B 系統為 1.08~65.96% 之間，經由 A 系統進出流濃度與流量計算，A 系統每日 SS 移除量 (Removal Efficiency Mass, REM) 介於 0~320 kg/day，B 系統 REM 介於 0~56.5 kg/day，表面流人工濕地 SS 會受到植體掉落及藻類生長之影響導致 SS 去除效果下降，根據 Lin 等人研究報告顯示水中藻類增加相對可能提高水中 SS 含量 (Lin *et al.*, 2015)。

生化需氧量 (BOD)、化學需氧量 (COD)

BOD 去除多由水體之微生物進行生物降解反應，同時水體溶氧與有機物總類均可影響濕地對於有機物的分解效率，部分粒徑較大之有機物會連同 SS 藉由重力沉降於底部。BOD 於濕地水質淨化之結果顯示，A 系統年平均之去除效率介於 14.04~76.65% 之間；B 系統去除率為 27.36~36.63%，A 與 B 系統 BOD 每日最大 REM 分別為 304 及 44.9 kg/day。在 COD 於濕地水質淨化之結果顯示，A 系統年平均之去除效率介於 16.23~60.30% 之間；B 系統去除率為 14.47~54.92% 之間。

氨氮 (NH₃-N)、總氮 (TN)

經由氧化狀態下將氨氮氧化成硝酸鹽。硝化及脫硝作用能有效率地對氮進行去除，水中氨氮由硝化菌氧化成硝酸鹽，硝酸鹽隨後在厭氧狀態下被脫硝菌還原成自由態氮。舊鐵橋人工濕地系統經由 4 年採樣分析各年平均結果顯示 A 系統氨氮處理效率 26.59~46.83%；B 系統為 10.0~31.39%。總氮部分 A 系統總氮處理效率介於 36.43~65.71% 之間；B 系統為 4.55~54.33% 之間。舊鐵橋濕地 A 系統總氮每日最大處理量為 66.9 kg/day；B 系統為 19.9 kg/day。A 系統水域面積較大 HRT 時間較長，相對處理效率會比 B 系統較好。

總磷 (TP)

廢水中之磷會經由物理沉澱、吸附及植物吸收降解，磷濃度增加能促進對氮的去除。舊鐵橋人工濕地對於總磷之去除率顯示 A 系統年平均介於 29.79~95.63% 之間；B 系統為 29.84~70.01%。由此顯示舊鐵橋人工濕地系統對磷能有效之去除。以每日最大移除量計算，A 系統總磷每日 66.6 kg/day；B 系統為 7.1 kg/day。

葉綠素 a (Chl-a)、大腸桿菌 (TC)

舊鐵橋在 2012~2015 年分析結果顯示，濕地系統對於水體中 Chl-a 無良好之去除效率，由於 FWS 人工濕地為開放性水域，當豐富之光合作用及營養鹽的環境下藻類將大量繁殖，致使 Chl-a 提高。反之 FWS 系統對於 TC 去除率效果顯著，A 系統處理效率介於 59.26~91.96% 之間；B 系統為 77.18~89.36% 之間，主要是南部地區日照充足，在日照充足下能抑制水體中大腸桿菌生長 (Lai, 2016)。

表 2 2012~2015 年舊鐵橋人工濕地水質分析結果

項目/年度	A 系統			
	2012	2013	2014	2015
SS	33.79	17.22	82.96	75.48
BOD	60.55	14.04	76.65	14.58
COD	50.00	16.23	60.30	48.46
NH ₃ -N	33.72	36.11	46.83	26.59
TN	62.50	65.71	36.43	41.37
TP	95.63	29.79	33.19	41.08
Chl-a	60.28	23.35	64.87	-
TC	77.63	59.26	91.96	60.08
項目/年度	B 系統			
	2012	2013	2014	2015
SS	32.17	56.34	1.08	65.96
BOD	31.43	30.71	36.63	27.36
COD	54.92	49.62	14.47	27.99
NH ₃ -N	17.07	22.61	10.00	31.39
TN	33.67	32.28	4.55	54.33
TP	70.01	53.38	29.84	31.05
Chl-a	-	12.08	12.00	23.94
TC	89.36	77.18	85.22	71.65

去除率單位：%

濕地生態效益評估

- 鳥類：共記錄到 31 科 67 種鳥類，主要記錄鳥類種類大多為平地常見之種類，其中有記錄到鳳頭蒼鷹、水雉及紅尾伯勞保育類鳥類，顯示舊鐵橋人工濕地復育相當良好。鳥類記錄中又以舊鐵橋南側記錄之鳥類種數較多，因舊鐵橋南側 A6 池與 B7 池為生態復育功能為主，因此相對物種豐富度較多。
- 陸生爬蟲類與兩棲類：陸生爬蟲類共記錄到 4 科 5 種包含斯文豪氏攀蜥、無疣蝟虎、疣尾蝟虎、多線

南蜥及臭青公。兩棲類共記錄到 4 科 6 種包含赤蛙科的虎皮蛙、澤蛙、貢德氏赤蛙、小雨蛙、花狹口蛙及蟾蜍科的黑眶蟾蜍。

- 3. 蜻蛉及蝶類：蜻蛉類共記錄到 3 科 19 種。蝶類共記錄到 5 科 48 種，其中包含：灰蝶科 12 種，弄蝶科 6 種，蛺蝶科 18 種，鳳蝶科 5 種及粉蝶科 7 種。
- 4. 植物：共記錄 92 科 335 種植物種類，其中包含蕨類植物、雙子葉植物、單子葉植物。
- 5. 魚類：共記錄 11 科 16 種魚類，其中又花鱸魚科食蚊魚、慈鯛科吳郭魚及棘甲鯰科琵琶鼠數量佔大多數。

結論

經由 2012 ~ 2015 年之間水質採樣分析評估結果，大樹舊鐵橋人工濕地具有良好水質淨化、生態復育及休閒教育之功能，水質淨化部分，大樹舊鐵橋人工濕地除對 SS 及 Chl-a 去除率略差，其餘大部分的污染物質具有不錯的去除效率。SS 有時去除的效果偏低，主要的原因與濕地種植水生植物的種類較多、植株較密，導致水中的植物碎屑較多，增加懸浮固體濃度。A 與 B 兩系統 BOD 每日最大移除率共達 348.9 kg/day，總氮每日最大處理量為 86.8 kg/day，總磷每日最大處理量為 73.3 kg/day。經由舊鐵橋人工濕地淨化後之水體進入高屏溪，如此一來能減少河川污染負荷量，同時對於舊鐵橋人工濕地帶來豐富生物物種。過去 2009 年莫拉克風災使

得舊鐵橋人工濕地嚴重受損，原有之生態物種也隨之消失，經由 4 年時間生態重新演替，在 2015 年所調查之生態物種多樣性，已經回復到原有之物種，且吸引了多種保育鳥類來棲息。人工濕地除淨化水質之外也能增加生態物種多樣性，同時提供地下水補注、防洪及氣候調節 … 等功能。近年來環境教育法通過，也能透過濕地演替及功能讓民眾實地接觸瞭解濕地重要性及環境保護之觀念。

參考文獻

1. Knowles, P., Dotro, G., Nivala, J. and Clogging, J.G., In subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors Ecological Engineering, Vol. 37, pp. 99-112 (2011).
2. Lin, J.L., Tu, Y.T., Chiang, P.C., Chen, S.H. and Kao, C.M., Using aerated gravel- packed contact bed and constructed wetland system for polluted river water purification; A case study in Taiwan. Journal of Hydrology, Vol. 525, pp. 400-408 (2015).
3. U.S. EPA, (2005). Constructed Wetlands Handbooks.
4. Vymazal, J. and Kröpfelová, L. (2008) Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow Springer.
5. Wu, S., Carvalho, P.N., Muller, J.A., Manoj, V.R. and Dong, R., Sanitation in constructed wetlands; A review on the removal of human pathogens and fecal indicators. Science of the Total Environment, Vol. 541, pp. 8-22 (2016).
6. 內政部營建署，(2016)，「全國污水下水道用戶接管普及率及整體污水處理率統計表」。
7. 行政院環保署，(2006)，「水質自然淨化工法操作維護彙編」。
8. 陳文輝，(2008)，「全球化綠色環保規範發展近況與因應措施」，經濟部工業局，永續產業發展雙月刊，國際環保指令與綠色供應鏈專輯，第 42 期，第 3-19 頁。



土木水利 雙月刊

向您約稿

本刊出版有關土木水利工程之報導及論文，以知識性、報導性、及聯誼性為主要取向，為一綜合性刊物，內容分工程論著、技術報導、工程講座、特介、工程新知報導及其他各類報導性文章及專欄，歡迎賜稿，來稿請 email: service@ciche.org.tw 或寄 10055 台北市中正區仁愛路二段 1 號 4 樓，中國土木水利工程學會編輯出版委員會會刊編輯小組收，刊登後將贈送每位作者一本雜誌，不再另致稿酬；歡迎以英文撰寫之國內外工程報導之文章，相關注意事項如後：

- 工程新知及技術報導，行文宜簡潔。
- 技術研究為工程實務之研究心得，工程講座為對某一問題廣泛而深入之論述與探討。工程報導為新知介紹及國內外工程之報導。
- 本刊並歡迎對已刊登文章之討論及來函。
- 工程論著及技術研究類文章，由本刊委請專家 1~2 人審查，來文請寄電子檔案，照片解析度需 300dpi 以上。
- 文章應力求精簡，並附圖表照片，所有圖表及照片務求清晰，且應附簡短說明，並均請註明製圖者及攝影者，請勿任意由網站下載圖片，以釐清版權問題。