

# 我國人工濕地與礫間接觸設施 之處理效能與問題調查

朱敬平

財團法人中興工程顧問社環境工程研究中心副經理

## 摘要

本研究針對國內人工濕地與礫間接觸等現地處理場址，進行實場現勘與分析，彙總建置現況、現地處理適用範圍、處理效能、建置成本、操作維護，同時與各場址之管理單位連繫，收集場址處理水質與水量歷史資料，了解既有單元之設置成本、面積、處理效能、植生種類、碳匯效益，以及各種操作問題。調查結果顯示，現地處理工法中以礫間接觸與人工濕地於國內設置較多，礫間接觸之建設與操作維護成本較高，但單位面積處理量亦較大；水質數據顯示，礫間接觸處理工法之處理效能較人工濕地穩定，惟其與人工濕地之功能有所不同。考慮國內設置十年後之現況，如何覓得適當之現地處理設置地點，避免受到洪氾破壞，且應循適當之操作模式進行維護，是為國內現地處理設施永續營運之關鍵重點。

關鍵字：現地處理、人工濕地、礫間接觸、濕地植栽、烏河流域、高灘地

## 一、現地處理工法原理簡介

國內許多縣市污水下水道系統普及率仍不及 30%，區域生活污水未經處理即排入水體，若遇枯水期河川流量減少，污染負荷超過河川涵容能力，將嚴重污染河川水質，影響水體環境生態與水資源之有效利用。環保署自民國 91 年起配合河川水質淨化計畫，補助各縣市設置「現地處理工法」(On-site Treatment)，建置人工濕地、礫間接觸等設施，迄今已有 50 處以上場址完工使用。

現地處理工程方法大致可區分為如下三類：



- (一) 植生處理法：透過植栽生物吸收及分解作用，使污水濃度和重金屬毒性反應降低；常見工法包括人工濕地（表面流式人工濕地、地下流式人工濕地、植栽濾床人工濕地、水生植物系統）、草溝、草帶、人工浮島等。
- (二) 土壤處理法：利用土壤礦物吸附、微生物分解及植物吸收等程序，常見工法包括土壤慢滲系統、土壤快滲系統、地表漫地流系統、地下滲漏等。
- (三) 接觸氧化法：使污水通過粗顆粒的礫石，讓礫石上的生物膜分解污水中的有機質；常見工法包括礫間接觸工法、生物濾材接觸氧化工法、礫間氧化接觸工法等。

表 1 就前述各種處理工法之特點加以綜整，部分工法因國內外設置數量較少，或不具規模，不易估算其處理值與建置成本；在台灣使用較多之工法仍以人工濕地與礫間接觸兩種為主；表 2 即就各種現地處理工法在國內河川條件下設置時之優缺點，另作一評析。

表 1 各種現地處理工法之特點比較綜整

處理技術	實場處理量 設計值範圍 (CMD)	說明	建置 成本	單位時間 處理量	除污 能力
表面流人工濕地	150~15,000	係於濕地表面上自由流動，藉由水池、底泥土壤與水生植物等組合，透過各項機制改善水質	中	相對較低	相對較低
地下流人工濕地		利用濕地內碎石或礫石過濾水中顆粒，並於開放水域栽種水生植物轉化水中有機物與營養鹽			
土壤滲濾	實場資訊不足	利用土壤礦物吸附、微生物分解及植物吸收等程序	相對較低	相對較低	相對較低
礫間接觸氧化	5,500~10,000	將需淨化的河水引入充填礫石之槽體內，利用礫石表面之生物膜分解水中有機營養質	高	相對較高	相對較高

處理技術	實場處理量 設計值範圍 (CMD)	說明	建置 成本	單位時間 處理量	除污 能力
草溝草帶	實場資訊不足	係利用草根與周邊土壤中的微生物擔負淨化水質的功能	相對較低	相對較低	相對較低
曝氣	實場資訊不足	係透過打氣、跌水效應或噴水提高水中溶氧	中	中	相對較高
人工浮島	實場資訊不足	運用浮島上植物通透氧氣、根系能提供微生物附著生長之特性進行水質淨化	相對較低	相對較低	相對較低

表 2 各種現地處理工法於國內設置時之可行性

	濕地	草溝	草帶	人工浮島	慢滲	快滲	地表漫流	地下滲濾	礫間接觸氧化	填充濾材	淵與瀨
(1)計畫區適用性	○	△	△	○	△	△	△	△	○	○	○
(2)土地面積	×	×	×	○	×	×	×	×	○	○	○
(3)上部空間利用	×	×	×	×	×	×	×	△	○	○	×
(4)水質變異承受度	△	△	△	△	×	×	×	○	○	○	○
(5)污染物去除率	△	×	×	△	△	△	△	△	○	○	○
(6)初設及營運費用	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△
(7)二次公害	△	△	△	○	△	△	△	○	△	△	○

「○」：優 「△」：中等 「×」：不佳

歐洲、美國與日本對於各類水質現地處理工法（或稱「自然淨化工法」），如植生處理、土壤處理、接觸氧化等工法，已有相當程度之研究與施行，惟在應用



上因國情而有差異；日本主要處理標的為河川淨化，囿於土地利用空間有限，常採行之工法為礫間接觸氧化，並納入串連現地處理設施概念，達到全流域整治目的。美國以及德國為主的歐盟國家，河川多為大陸型，依據流域上中下游之水文、地形環境條件，且考量生態保育而採用不同之改善工程，因此有人工濕地、土壤滲濾等多種工法搭配使用，所使用土地面積也較廣大。

在理想條件下，現地處理工法可以較低的成本去除水中有機物與營養鹽，削減河川污染，提升水質，補償河川自淨作用；且河川生態系統參與其中，促進河川周邊生物棲息的功能、景觀美化，改善整體水體環境之效果；另其可提供開放水域、礫石與植生覆蓋，因此具有揚塵抑制之效果（類似水覆蓋、護甲覆蓋和稻草蓆配合植生覆蓋等工法），預期可降低約七成之河川裸露灘地揚塵量；故於烏溪流域高灘地設置現地處理設施；而人工濕地植栽尚具有「碳匯」(Carbon Sink)功能，可吸收二氧化碳。

## 二、國內現地處理工法設置狀況

本研究歸納行政院環境保護署歷年補助地方政府以及與水利單位合作建置之現地處理設施之案例彙整，截至 100 年 12 月，已完成礫間處理 17 座（圖 1）與人工濕地 37 座（圖 2）。整體而言，礫間接觸處理系統主要作為淨化水質之用，人工濕地處理系統除淨化水質外，亦提供生物棲地，有助於生態多樣性，功能取向有所不同。人工濕地因利用水生植栽去除水中污染物質，為保持植栽種植面積與水域面積成一定比例，因此具有設置面積需求大之特性，我國人工濕地系統設置面積每處從 0.35 至 40 公頃不等，處理水量最小為 350 CMD，最大達 30,000 CMD；礫間接觸法因水力停留時間較短，水域容許深度較大，因此具有設置面積需求較小，處理水量高之特性，我國礫間接觸設施設置面積每處從 0.05 至 2 公頃不等，處理水量最小為 160 CMD，最大達 50,000 CMD。

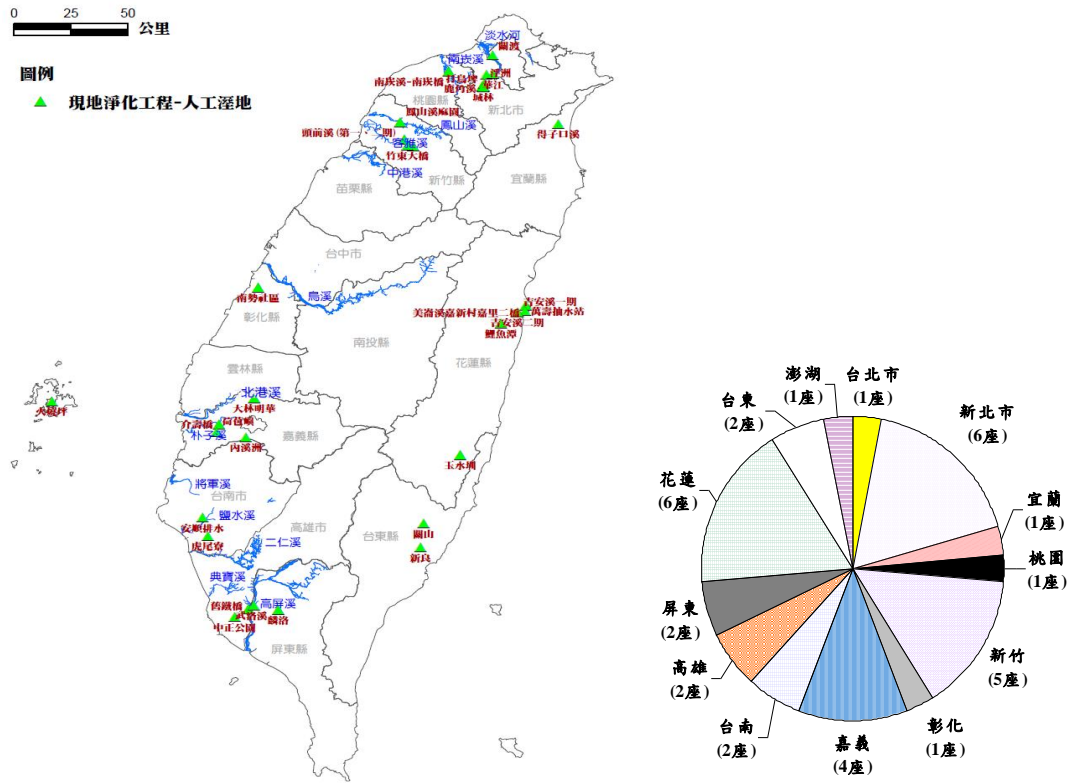


圖 1 國內人工濕地之分布 (截至 100 年 12 月)

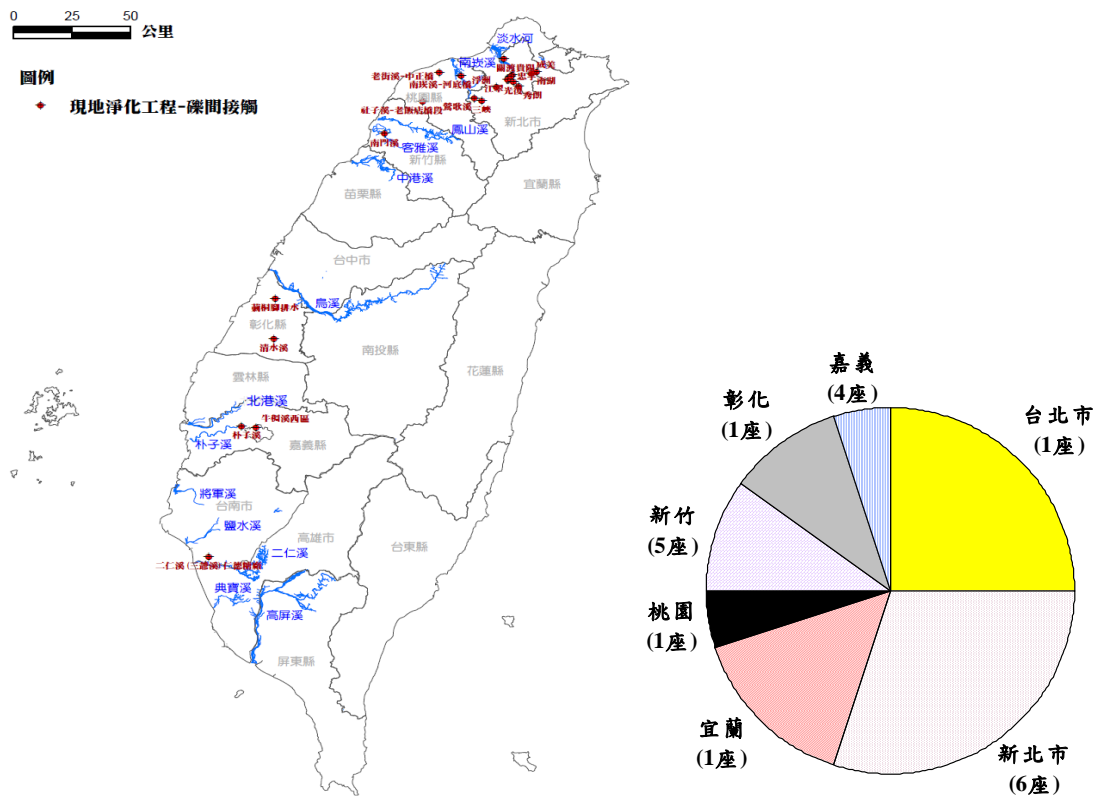


圖 2 國內碟間接觸之分布 (截至 100 年 12 月)



分析國內案例顯示，建置 1 CMD 之人工濕地，其建設成本約需 6,000~10,000 元，礫間接觸則需 10,000~13,000 元，後者在設備較完整情況下，已接近二級污水處理廠之建置成本（每 CMD 20,000~30,000 元）；若以單位面積處理量作計算，則人工濕地每公頃可處理 2,000~5,000 立方公尺之污水，礫間接觸每公頃則約可處理 10,000~20,000 立方公尺之污水，礫間接觸之建設與操作維護成本較人工濕地高，但單位面積處理量亦較大。

### 三、國內人工濕地與礫間接觸水質處理效能概況

參考各縣市政府公布之水質數據，以及本研究隨機採樣檢測顯示，礫間接觸處理工法之處理效能較人工濕地穩定，SS 多可達 60% 以上去除率，若 BOD 進流濃度介於 20~40 mg/L 間，處理效能多可達去除率 90% 以上，而曝氣量若足夠則 NH<sub>3</sub>-N 處理效能可達 50%；人工濕地則受植栽生長及割除之影響，場址之 SS 及 BOD 處理效能較無明確規律，而 NH<sub>3</sub>-N 處理效率則多半不佳，主要原因乃因各場址之 NH<sub>3</sub>-N 進流濃度低，加上未能適時割除與清理植栽，使得出流水濃度有高於進流水濃度之現象。以下即就各項水質之處理效能作一分析。

- (一) 懸浮固體物：礫間接觸處理工法之懸浮固體處理效能大都可達 60% 以上去除率，而人工濕地場址則受限於植栽生長狀況或清理頻率，因此部分場址懸浮固體處理效能低於 50%，甚至有出流水濃度高於進流水濃度之現象（圖 3）。

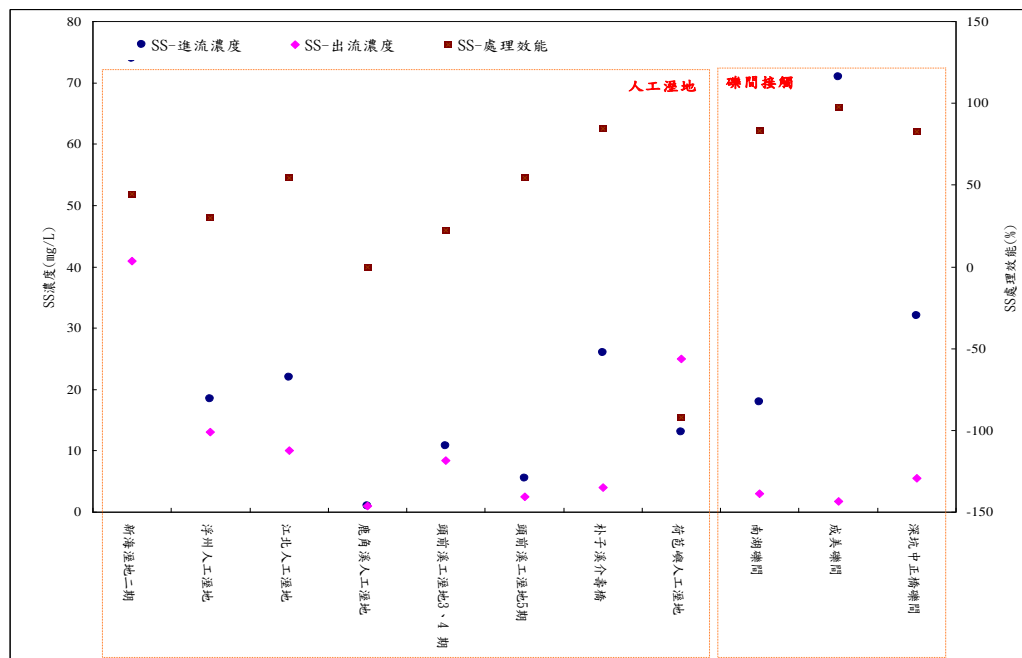


圖 3 國內現地處理設施懸浮固體 (SS) 處理效能概況

(二) 生化需氧量：以礫間處理工法處理時，當 BOD 進流濃度在 20~40 mg/L 間，去除率多能達 90% 以上；若進流濃度小於 10 mg/L，則去除效果不明顯，大都落於 20% 左右之去除率。若為人工濕地則其處理效能較無明確規律，以新北市大漢溪新海橋表面流人工濕地一期及嘉義縣三疊溪大林人工濕地為例，其 BOD 進流濃度約為 20 mg/L，但新海橋人工濕地去除效能可達 90%，而大林人工濕地去除效能則僅約 15%。且評析進流濃度小於 10 mg/L 之人工濕地場址，其出流水濃度大都有高於進流水濃度之現象；在設計上，或可採去除率 50% 進行規劃（圖 4）。

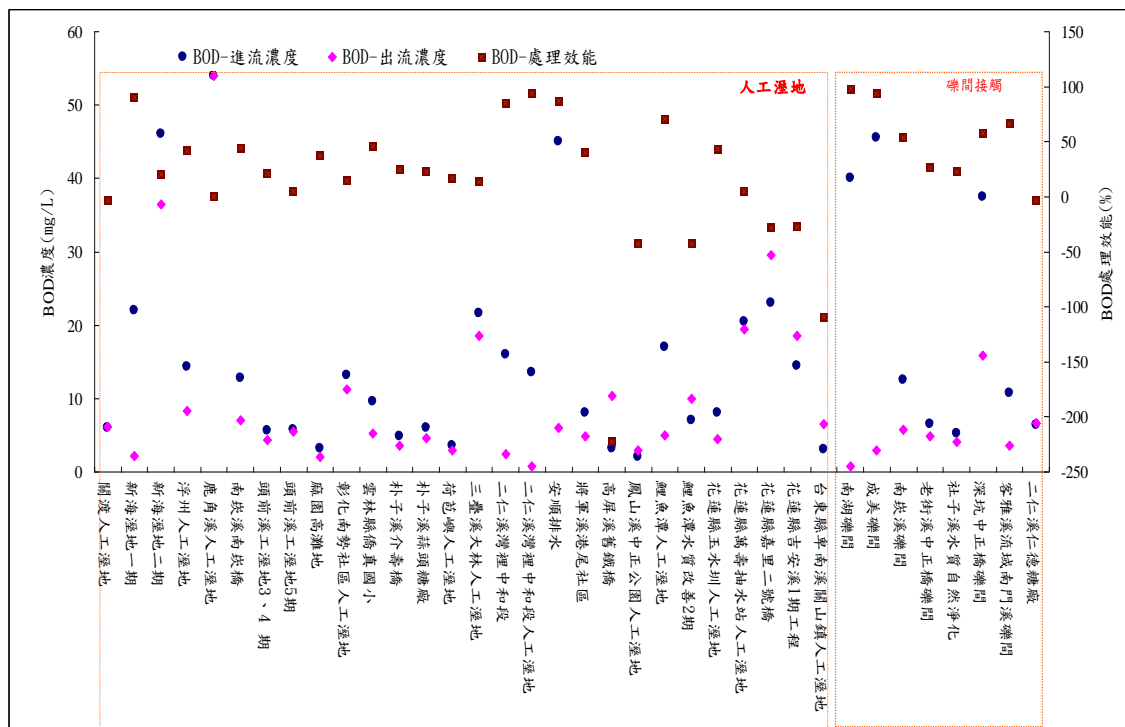


圖 4 國內現地處理設施生化需氧量 (BOD5) 處理效能概況

(三) 氨氮：採礫間處理工法時，若其曝氣量足夠，則氨氮處理效能可達 50~80%，如南湖雨水抽水站晴天排水地下礫間接觸曝氣氧化工程，及成美雨水抽水站水質淨化現地處理工程。若採人工濕地則處理效能較無明確規律，部分場址處理效能可達 50%，以台北縣鹿角溪人工濕地、嘉義縣朴子溪荷苞嶼人工濕地及嘉義縣朴子溪蒜頭糖廠生態園表面流式人工濕地為例，氨氮進流濃度約為 4 mg/L，但鹿角溪人工濕地去除效能為 0%，荷苞嶼人工濕地去除效能為 50%，朴子溪蒜頭糖廠生態園表面流式人工濕地去除效能則為 -4.2%（圖 5）。

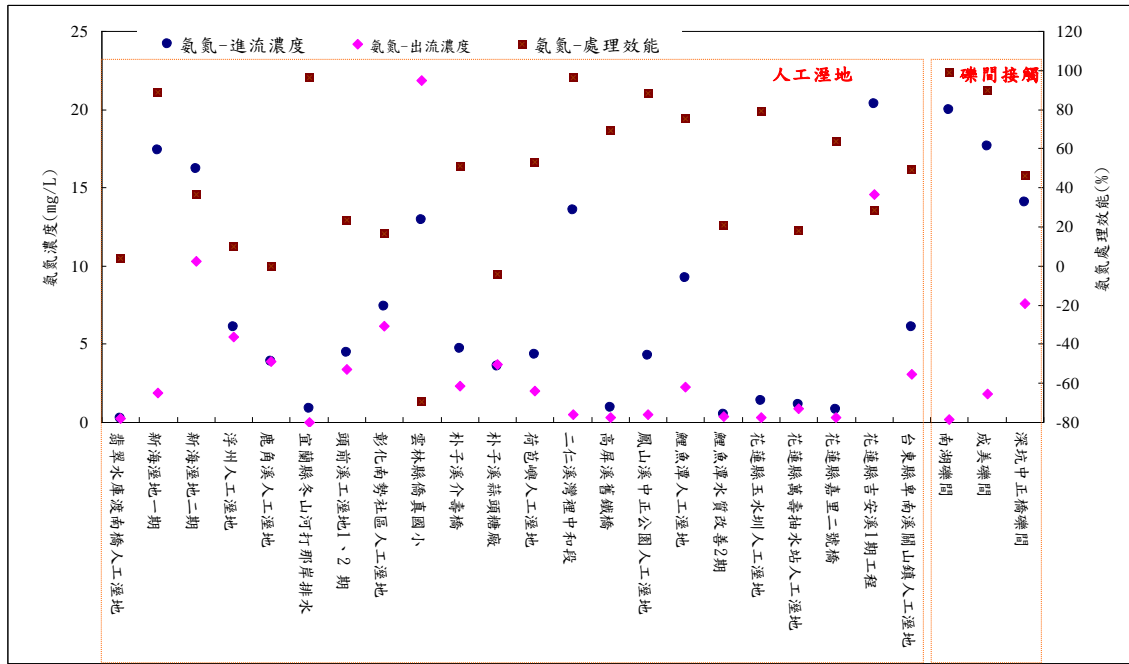


圖 5 國內現地處理設施氨氮 (NH<sub>3</sub>-N) 處理效能概況

(四) 總磷：一般狀況下，磷需要較長的停留時間，才能藉由生物或植物吸收作用去除，所以需要較長的水力停留時間，且因生物對磷的需求有限，故對於磷的去除濃度有所限制，濃度太低處理效能亦會受到限制，彙整結果顯示，總磷之處理效能各場址間差異性大，其中新海濕地一期、鹿角溪人工濕地與成美藥間處理效能皆可超過 80% (圖 6)。

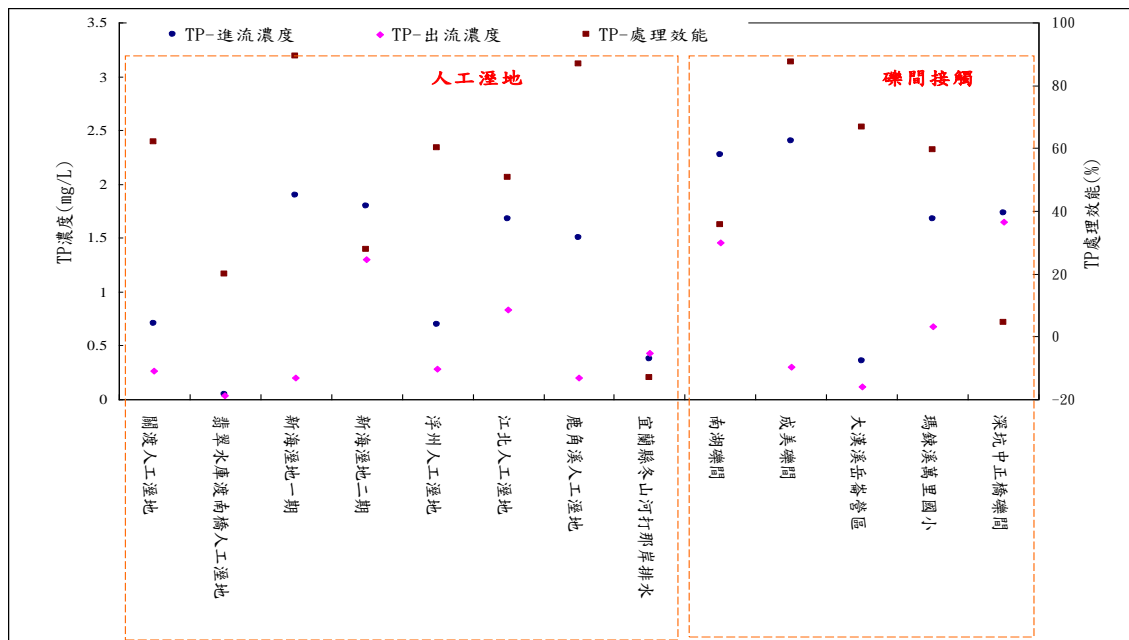


圖 6 國內現地處理設施總磷 (TP) 處理效能概況

表 3 即以台中市烏溪大度橋測站之水質為例，評估經過人工濕地，以及再經過礫間接觸後，其水質之改善狀況；其顯示水質若依國內處理平均狀況來看，最優狀態可符合丙類水體水質標準，或具轉作高級淨水處理場進水(三級公共用水)之可能性。

表 3 現地處理水質處理效能預估（以烏溪大度橋為例）

水質項目	烏溪原水質 (大度橋)	經人工濕地 處理	經人工濕地+ 礫間接觸處理	灌溉用水 水質標準	乙類水體 水質標準	丙類水體 水質標準
懸浮固體 (SS)	336	30 ~ 40	20 ~ 40	100	< 25	< 40
BOD5	7.13	3 ~ 6	1 ~ 4	--	< 2	< 4
總氮 (TN)	5.3	2 ~ 4	2 ~ 4	3	--	--
氨氮 (NH3-N)	3.02	0.3 ~ 1	0.3 ~ 1	--	< 0.3	< 0.3
總磷 (TP)	0.8	0.1 ~ 0.5	0.1 ~ 0.5	--	< 0.05	--

圖 7 為國內常見水生植物照片。分析國內案例，各場址於以水生植物物種選擇上，以本土性水生植物居多，其中又以蘆葦及香蒲之 BOD 去除率較高，分別為 4.3 及 4.1 g/m<sup>2</sup>-day，而收成植栽總量則分別為 183~6,000 及 574~9,339 g/m<sup>2</sup>/year。



田字草



布袋蓮



菱



大萍

圖 7a 浮水性植物



水蘊草



莎草



空心菜

圖 7b 沉水性植物與浮根著葉性植物



台北草



酢漿草

圖 7c 地被植物



香蒲



蘆葦



鴨拓草



芋



象草



香附子



水燭

圖 7d 挺水性植物

人工濕地在運作維護管理上，需定期割除或撈取植栽，使植栽維持最適生長密度以及最適生長高度，確保濕地系統水域面積維持在最適比例，常見之廢棄植栽處置方法為採取自然腐熟或燃燒等方式，或視為廢棄物逕行處置，若能妥善收集這些割除植栽，經過適當物理或熱化學處理，將具有運用於後續能源或非能源方面再利用，作為取代部分化石燃料使用之潛力，成為有效之碳匯（Carbon sink），是為其附加價值，此一功能目前已漸受國內研究單位重視，或有作為一項碳抵換額度之潛力。這些藉由人工濕地植栽製成之生質燃料，將具有「碳中和」燃料特性；碳中和係指植物於生長過程具有儲存二氧化碳的功能，在植物內以各種有機碳的形式貯藏，當燃燒時將以二氧化碳氣體的形式排至大氣中，而大氣中的二氧化碳又會經由植物的生長週期而被吸收，於後續再利用時被排出至大氣中，經此型式不斷進行循環，故大氣中二氧化碳總濃度並未產生變化，故稱為「碳中和」現象（Carbon neutral）（圖 8）。

不同於木本植物，濕地植栽多為一至二年生，若結合區域能源中心（如垃圾焚化爐）或是設有汽電共生鍋爐的工廠，作為這些生質燃料的去化目標，作有效發電或餘熱再利用等用途，將可有效達到化石燃料減用之目的，整體的廢棄植栽處理流程，如打包方式、運送、前處理模式以及進料需求等，尚需較完整之調查規劃。廢棄植栽再利用方式除了前述採物理與熱化學處理作為生質能，將富含纖維之生質廢棄物轉換成生質燃料等能源應用方式外，尚包括非能源利用方式，如利用乾燥、磨碎等物理方式製作成飼料、肥料添加物；近年來也有研究指出，若利用適當的前處理技術，可將富含纖維的生質物原料製作成再生紙漿，或產製纖維酒精等原料，達到資源活化再利用之目的。以常見含水率 80%，碳含量 40% 計算，預估人工濕地每公頃每年約可固定 10 公噸之二氧化碳，惟仍需就國內人工濕地系統進行更廣泛的調查與評估後，方能有所定論。

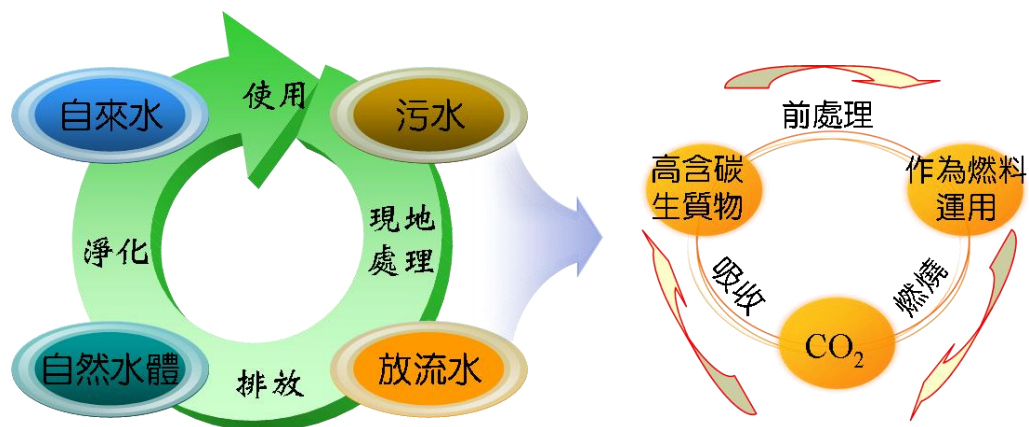


圖 8 人工濕地碳中和功能示意圖



## 四、現地處理操作問題整體剖析

我國在發展現地處理設施技術，雖然有國際間的案例可供參考，但臺灣本島有本身存在獨特的河川水理特性、土地使用狀態、植生品種與文化背景等，故國外經驗無法完全移植，加上各縣市政府在接受補助後，後續往往缺乏足夠經費進行良好維護，而颱風後所可能造成之破壞，也往往讓設備無法再恢復功能。

就礫間接觸淨化工法，最常見問題為因節省成本未進行曝氣，造成密閉式槽體呈缺氧狀態，水中溶氧偏低，附著於礫石之微生物膜無法獲得充足氧氣供應，影響水質處理效率；未來類似工程規劃時，除設置反沖洗曝氣系統外，可考量設置依溶氧濃度啟動之曝氣系統，採間歇式曝氣操作。此外，礫間接觸污泥產生量相對較少，但若長期未處理，發生堵塞時多半難以清理，可能造成水力流動困難。

人工濕地則受植栽生長及割除之影響，場址之懸浮固體及生化需氧量處理效能較無明確規律，甚至出流水濃度有高於進流水濃度之現象，而氨氮處理效率多半不佳，主要原因為未能適時割除與清理植栽，造成腐爛或植栽生長不佳之狀況。

就共同層面而言，一般現地處理其處理效能及管理不佳之主要原因如下：

### （一）水質處理效果不佳之共同原因

1. 引入之處理水量不足，導致無出流量，無法計算 BOD、NH<sub>3</sub>-N 及 SS 等污染削減量。
2. 易受進流量及污染濃度影響，處理效率並不穩定。若因工業廢水不當導入，造成進流重金屬或難分解有機物增加，將導致系統內之微生物無法正常存活。
3. 場址生化需氧量進流濃度約 10 mg/L，低於現地處理設施可處理的最低限制，以致造成水質處理效果無法呈現。
4. 進出流量差異大，導致污染削減量降低，可能與植栽過密導致蒸發散量大或水域區有滲漏情況有關。
5. 未能適時割除與清理植栽，進而影響水質淨化成效。

### （二）操作維護管理不佳之共同原因

1. 未比照一般污水處理廠設置良好前置攔污柵，大型污物流入破壞系統，或相關設備未撥付相當人力操作。
2. 場址區位易受天災（颱風）影響而沖毀或淤積，導致無法運作。

- 3.場址設施功能未正常運作且無定期維修養護。
- 4.水質與流量監測數據未確實記錄。
- 5.取水口處未定期清淤，易受泥砂阻塞影響進流量。

## 五、結論與建議

本研究首先針對國內人工濕地與礫間接觸等現地處理場址，進行實場現勘與分析，彙總建置現況、現地處理適用範圍、處理效能、建置成本、操作維護，以及既有單元之操作問題。現地處理工法對於懸浮固體、生化需氧量及氨氮具有一定處理效果，若能設於目前未獲妥善利用之河川高灘地，可兼具國土有效利用、水質淨化、補充水源，以及抑制揚塵等效果。國內案例顯示現地處理工法中以礫間接觸水質處理效果較佳，人工濕地則相對較差，惟人工濕地具有碳匯效果。另國際間對現地處理技術已有多年研究可供參考，惟台灣各區域的河川水理特性、土地使用狀態、植生品種與文化背景皆有獨特性，未來有相關工程時，應於評估階段仍需一併納入考慮，並於設計之前建置模型廠實作以推估水質處理成效，再針對其成果進行整體生命週期評估與碳排放量，方為永續經營之關鍵。

## 參考文獻

- 1.行政院環境保護署，“事業廢水處理之改善評鑑與管理手冊-建築物污水處理設施”（1993）。
- 2.行政院環境保護署，“建築物污水處理功能及管理研究”（1994）。
- 3.行政院環境保護署，“建立礫間處理與人工濕地工程手冊計畫”，國立臺灣大學執行（2008）。
- 4.行政院環境保護署，“水質淨化現地處理技術研究計畫”，國立臺灣大學執行（2009）。
- 5.行政院公共工程委員會，“建立人工濕地設置與操作作業程序及技術之研究”（2005）。
- 6.經濟部水利署“人工濕地水淨化處理利用之可行性先期研究計畫”（2009）。
- 7.經濟部水利署水利規劃試驗所，“中央管河川高灘地水質淨化可行河段調查及



環境營造研究(1/2)” (2009)。

8.經濟部水利署水利規劃試驗所，“中央管河川高灘地水質淨化可行河段調查及環境營造研究(2/2)” (2010)。

9.吳芳池 “河川流域管理-WASP 水質模式評估愛河之整治方案” (2003)。

10.高雄市公共工程處，“高雄市愛河污染整治工程規劃報告” (1984)。