



生物滲濾系統 應用於 水資源再生之 病原菌控制

羅永修／國立臺灣大學環境工程學研究所 碩士生

童心欣／國立臺灣大學環境工程學研究所 教授

臺灣受人為活動排放及極端氣候影響，導致自然水資源受到污染，除可用水源逐漸萎縮之外，更造成生態環境嚴重破壞與人類使用的安全疑慮，水資源開發遂成為一重要課題。生物滲濾系統具有規模彈性、低能源需求及操作成本，並且能針對不同污染物作個別設計，對於各用戶之非飲用水需求皆有極大助益。本文藉由整理文獻並輔以不同之現地研究案例介紹生物滲濾系統之設計、功能與優勢，同時呈現目前生物滲濾系統對於中水回收病原菌抑制效果之研究成果，提供未來開發新興水源應用之資訊。

水資源匱乏問題

人為活動蓬勃發展下，全球暖化造成各地氣候異常，不僅危及人民財產生命安全，同時影響了全球水資源時空分布的情況。表面水體也因為高強度工業活動和都市發展同時伴隨著人口成長，水質受到嚴重影響，許多地區都面臨當地水資源缺乏的壓力^[1]。乾淨且穩定的水資源變得愈來愈難取得，產業發展將受到嚴重限制。農業上將缺少穩定的水源供應灌溉，倚重農業做為經濟來源的國家將大受打擊之外，也伴隨著糧食供應問題；工業上將花費更多成本在水資源的取得；河川的污染造成淨水處理廠負擔加重，進而影響民生用水；甚至因為水源不穩定和水體污染而造成自然環境的劣化，對生態資源的保護更艱難。水資源匱乏問題成為各國眼下面臨的一大挑戰。

臺灣位在全球最大季風區內，存在降雨乾溼季的問題。在全球暖化的影響下，颱風等極端降雨事件對臺灣造成的經濟損失和人員傷亡愈加嚴重，如 2009 年莫拉克颱風對農林漁業造成的產品損失就高達近兩百億新臺幣^[2]，是近十年農業損失最嚴重的風災。除了災

害損失，極端降雨也將大量營養鹽（氮、磷、鉀，來自於施肥）與農業廢棄物（枝葉、動物排泄物、牲畜舍墊料等）等伴隨土壤帶入河川中，引發嚴重的優養化和淤積，造成自然水體惡化，同時縮短水庫使用年限，對南臺灣民生和工業用水造成嚴重影響^[3]。我國環境保護署於 2007 年的統計資料也指出，臺灣有近百分之四十的水庫優養化導因於過量非點源（Non-point-source）營養鹽污染導致^[4]。在降水停留時間短的情況下，水源又受到污染而使得可用水量減少，除了以法律控制污染源排放及保護集水區水源之外，投入部分再生水於灌溉和製程以紓困水源不足問題亦能節省水資源的使用，發展效率及經濟上可行的水再生技術遂成為一亟需開發和研究的主题。

水資源再生

為促進水資源永續利用，我國制定了《再生水資源發展條例》並規範再生水的使用。據該條例定義，再生水係指廢（污）水或放流水，經處理後可再利用之水；依處理水源不同又分為系統和非系統再生水。將事業所

產生相對難處理的高強度廢水送至污水處理廠集中處理，而低強度廢水可藉由家戶排出端或社區型處理廠處理後回到可運用水資源作非飲用水用途。事業體不僅可針對製程中的特殊物質設計相對應之處理流程進而提升回收率之外，亦可建立水回收系統，將處理後的放流水再次投入製程中，減輕對水資源的依賴^[5]；污染強度較低的家戶污水可運用較簡易之設備處理後放流，減低中央負擔。若於處理設備後架設儲供水模組，形成一回收水系統，便能利用該水資源用於如景觀澆灌、環境清洗等非飲用用途，增加淡水資源的使用效率^[6]。對於再生水的成本可行性研究上也現金流計算及益本比分析獲得證實，農業灌溉水源僅使用部分再生水即可在較低操作成本情況下維持同等收益^[7]。

「水再生」在自然中本就持續進行著，處理行為旨在加速這些自然循環之過程，讓水資源更快回到人類行為中。水質穩定是再生水運用與否的重點，若經適當處理，再生水可符合大部分用水水質要求。再生水處理的程序和目標與污水處理廠的二級放流水相似，皆在減少水中有機質和鹽類，以減緩臭味發生和微生物孳生的情況。一般的處理程序依序為過濾、吸附、消毒、緩衝調節後再回到水處理廠進行淨水程序或是直接用於非飲用用途^[8]。依照環保署公告之《建築物生活污水回收再利用建議事項規定》，對於非飲用水用途之回收水在大腸桿菌群數（coliform）、生化需氧量（biochemical oxygen demand）、pH、餘氯量及濁度皆有規範。其中控制微生物生長和臭味發生的關鍵多在於 BOD 和餘氯量，但家戶端之回收水源其餘氯大多都在使用過程中被消耗殆盡，額外之加氯流程也會提升成本，同時還有消毒副產物（disinfection byproducts, DBPs）生成的潛在問題，亦為再生水使用安全上之考量。一般民眾礙於用水規模小、資金不足及程序複雜，無法做到上述之程序，但亦有一些技術可以做到家戶規模簡單的水回收和處理程序，其中以生物滲濾系統（或稱生物濾床，biological filter）最為成熟。

生物滲濾系統

生物滲濾系統是利用具有高比表面積、高吸附能力的材料，將廢水中的污染物以沉澱、攔阻、吸附、與材料間的反應和附著在濾材上的微生物之代謝作用降解和捕捉，進而達到水質淨化處理功效^[9]。由於規模

彈性、成本相對低廉、能源與技術需求低，同時能達到一定程度上的水質淨化，可做為自然水體接受放流水之前的緩衝。該技術不僅適用於家戶端的水回收應用，事業體的放流也會做此預處理以提升放流水質，且開發中國家的居民也較負擔得起^[6,10]，但設計上須考量目標污染物（target compounds）濃度及特性、環境條件（降雨時空分布、地形等）、放流用途等諸多因素以設計較合適的操作系統。

為提升處理效率，可從 (1) 濾材特性，(2) 水力條件，(3) 系統內氧化還原條件等方面調整^[10]。工業產出廢棄物如廢胎碎片、爐渣、飛灰等因為有高比表面積而被認為是具使用價值的吸附材料^[11,12]，在底泥污染的整治上也具應用潛力，但因具有其他有機污染物溶出造成二次污染之問題，在使用上仍需多加考量或須進行前處理。另外也有提出利用表面塗層改質原本材料，以提升離子交換容量，增加重金屬吸附效果者^[13]；使用生質廢棄物燒結而成之生物炭因為具良好吸附能力^[14]，同時達到廢棄物再利用目的，也成為可應用的吸附材料之一。

水力條件設計上，則考慮水力停留時間（hydraulic retention time, HRT）和濾床阻塞（clogging）的問題。前者影響污染物在系統中反應的時間，氨氮進行完整氧化和脫氮之過程到需要較長時間反應^[9]，停留時間過短會造成反應不完全而影響處理效率，微量有機物與塑膠微粒也因為結構難以分解及濃度過低，需要較長的反應時間或加入改質材料協助反應^[15]；後者因懸浮顆粒累積在濾床表層導致流量下降^[16]，同時阻塞會造成系統內污水與濾材接觸面積降低影響處理效率，需藉由篩選不同粒徑之濾材、刮除濾床表層沉積^[16]或是適時反沖洗（backwashing）以維持濾床表現。

應用與相關研究

利用生物滲濾系統處理水中污染物的研究發展多元，為因應極端降雨造成的大量非點源污染以及考量畜養業的排放問題，研究集中於開發低成本和高適應性的滲濾系統以緩衝短時間的大量排放，並考慮操作的簡易程度以快速應用於實廠規模用於控制營養鹽^[3]為主，另外針對處理農藥及個人藥物等微量有機污染物^[17]之相關研究也相繼發表。Gottschall *et al.*^[15] 使用木屑加入水處理廠的混凝污泥作為濾材處理畜牧廢水中的營養鹽及

動物用抗生素，並且於實場操作達半年。結果發現加入污泥之濾床出流中的硝酸鹽、反應性磷酸鹽及抗生素的處理效率較未加入污泥之濾床提升許多，最高可達90%。雖然尚未確定含鋁鹽污泥是否對磷酸鹽及抗生素具處理效果，但相較其他研究，污泥的添加確實有助於硝化及脫氮作用，而抗生素亦能有效被木屑吸附。此結果不僅可以減緩優養化之情況，同時原為廢棄物之污泥做應用，減少水處理廠的處理成本。

對家戶排放污水進行處理並回收是另一個主要研究方向，家戶污水來自於盥洗、清潔用水，污水組成成分複雜如油脂、清潔劑、食物殘渣、排泄物及個人護理用品 (pharmaceutical and personal care products, PPCP) [18]，由於成分各異和各污染物濃度不穩定，以傳統污水處理流程並無法有效降解所有污染物。利用生物滲濾系統對污染物及可能致病微生物進行簡單處理後，回收做非飲用及非身體接觸用途，以增加水資源使用效率。Niwagaba *et al.* [19] 以多種濾材架設實驗性規模 (pilot-scale) 的家庭中水處理及回收設備，並將回收水用於當地蔬果灌溉，在 BOD 與 COD 的處理表現可達 90% 以上，並且對糞生大腸菌群 (fecal coliform) 的去除率也達 95%，雖然在蔬果灌溉方面並未對土壤品質有額外的提升效果，生長上並未特別突出，但仍可作為一補充灌溉水源，尤其對於水源易受污染且相對不穩定之地區仍有其應用價值。

生物濾床抑制病原菌之可能性研究

以下介紹筆者研究以生物滲濾系統模組對指標微生物抑制效果之研究成果：

配製一模擬之家戶生活污水 (溶解性有機碳、氨氮、正磷酸鹽濃度分別為約 20、10、10 毫克/每升)

通入以發泡煉石、經高溫燒結之碎牡蠣殼及玻璃珠為濾材之生物濾床，並以該污水馴化 (acclimation) 兩個月後以大腸桿菌 (*Escherichia coli*) 加入進流水，以選擇性培養基計數進流與出流之大腸桿菌活體數量。另外，以一組未經馴化之濾床作為對照組。其設計參數整理於表 1。

在加入進流水前，先以滅菌 (autoclaved) 及未滅菌之濾材進行批次實驗並植入大腸桿菌，確認濾材本身抑制大腸桿菌生長的效果後再加入進流水操作管柱過濾實驗。不同條件之濾材批次抑制實驗對大腸桿菌的抑制效果如圖 3。從批次實驗中發現，未滅菌濾材在 48 小時內可將接種於反應槽內的大腸桿菌降低至無法計數，滅菌濾材反應槽內的大腸桿菌卻持續生長，表示濾材本身對大腸桿菌沒有抑制效果，抑制效果應來自於濾材上具活性之微生物的交互作用所致。而經過馴化之濾床對大腸桿菌的去除比較情形如圖 4 及圖 5 表示。從圖 4 可知，相較於未馴化的濾床，經過馴化的濾床其污水出流大腸桿菌較進流穩定減少約 90% 以上，經計算平均去除率達 1.77 log，而從圖 5 得到玻璃珠濾床的去除率僅達 60%。



發泡煉石

經灼燒之牡蠣殼

圖 1 使用濾材

表 1 濾床設計參數整理

管柱類型	高度 (cm)	管徑 (cm)	管柱體積 (cm ³)	濾材種類及配比	濾材粒徑 (mm)	填充體積 (cm ³)	流量 (mL/min)	EBCT (min)
濾材濾床 (經馴養)	35	4.6	582 (估算值)	發泡煉石：牡蠣殼 = 1：5	*2.00 ~ 4.76	432	2.89	149.5
玻璃珠濾床 (經馴養)				玻璃珠	4	455	3.01	147.8
濾材濾床 (對照組)				發泡煉石：牡蠣殼 = 1：5	*2.00 ~ 4.76	366	2.47	148.1
玻璃珠濾床 (對照組)				玻璃珠	4	382	2.56	149.3

*AASHTO (美國州際公路及運輸協會) 篩分析法，10 號篩與 4 號篩之間

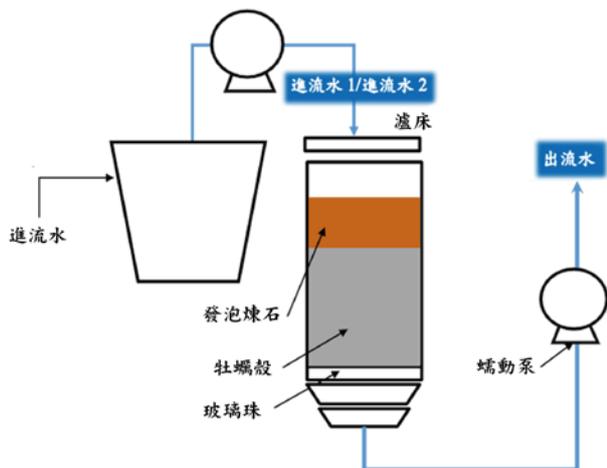


圖 2 滲濾系統示意圖

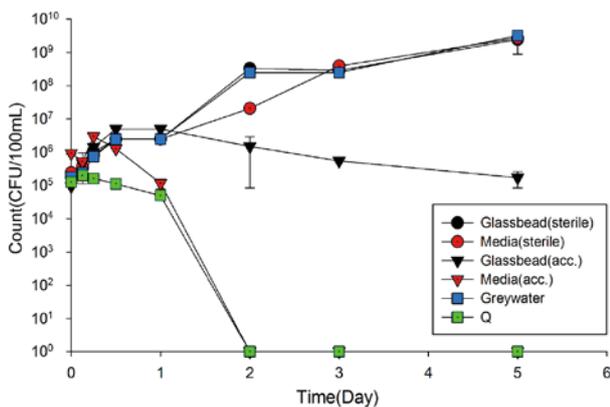


圖 3 滅菌濾材與未滅菌濾材之批次大腸桿菌抑制隨時間變化趨勢圖

可知經馴化的濾床相較對照組因為具有微生物之間的交互作用，致使大腸桿菌生長受到抑制而減少；而玻璃珠濾床可提供之附著表面積較濾材少，去除率也下降。顯示經過馴化之生物滲濾系統確實具有抑制指標微生物生長之能力，對回收水的使用安全上具一定成效。

結語、展望與挑戰

我國目前遭遇的水資源問題有 (1) 降水時空分布不均；(2) 水源污染；(3) 水庫功能衰退，導致可用水源減少。本文整理近年來應用生物滲濾系統於不同規模水資源再生的研究。從研究中得知，由於該技術能源和技術需求低，且同時利用多種物理化學及微生物代謝機制來降解水中污染物，對於成分複雜的污水可以簡單有效的

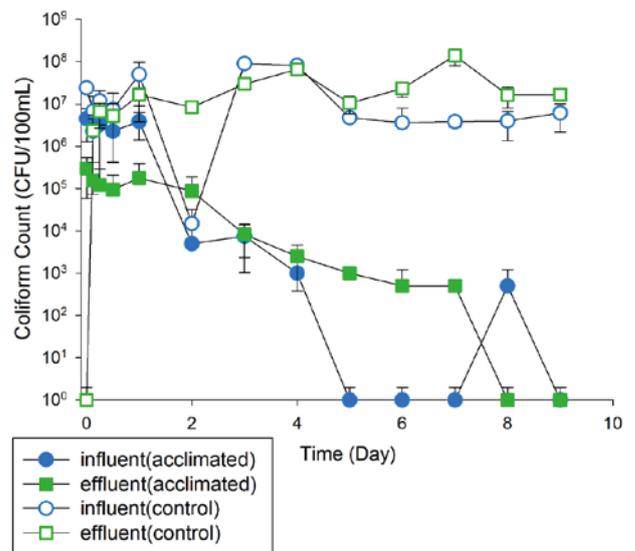


圖 4 含大腸桿菌之污水經濾材濾床（經馴化 (ACCLIMATED) / 未馴化 (CONTROL)）後之變化趨勢圖

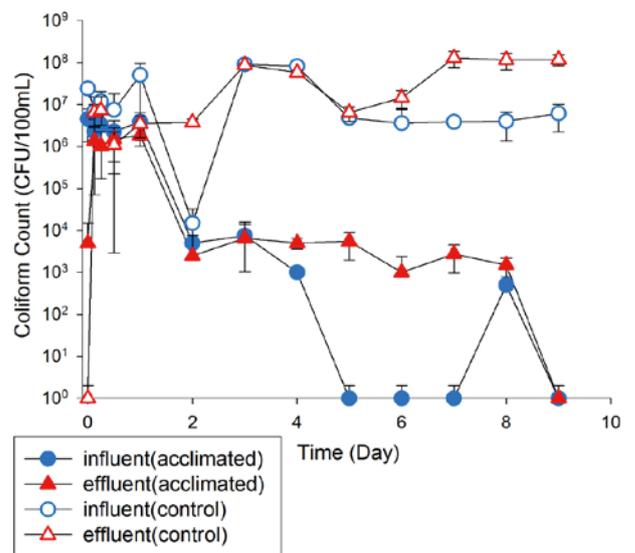


圖 5 含大腸桿菌之污水經玻璃珠濾床（經馴化 (ACCLIMATED) / 未馴化 (CONTROL)）後之變化趨勢圖

處理，且可依據需求設計不同規模，除了做為控制自然水體優養化和污染物的技術外，並於實驗室規模之模組證實能抑制致病指標菌，應用於中水回收上亦極具潛力。但同時，該技術對特定之污染物或高強度污染的耐受度和處理效率為其限制，在面對未來極端氣候影響加劇、廢污水成分漸趨複雜及民眾使用接受度低的挑戰上，仍須更多學術與實務面的努力，以提升生物滲濾系統於水資源再生上的成效，使我國水資源在支持環境保育和經濟發展的需求上更顯充裕。

參考文獻

- Garcia, X. and Pargament, D. (2015), "Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental considerations for decision-making", *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 154-166.
- 行政院農委會 (2016), 農業統計年報。
- Lee, C.-S., Chang, C.-H., Wen, C.-G. and Chang, S.-P. (2010). "Comprehensive nonpoint source pollution models for a free-range chicken farm in a rural watershed in Taiwan", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139(1), 23-32.
- 行政院環保署 (2007), 臺灣飲用水用途水庫優養化指標統計資料。
- Yen, F.-C., You, S.-J. and Chang, T.-C. (2017), "Performance of electro dialysis reversal and reverse osmosis for reclaiming wastewater from high-tech industrial parks in Taiwan: A pilot-scale study", *Journal of Environmental Management*, 187, 393-400.
- Leong, J. Y. C., Oh, K. S., Poh, P. E. and Chong, M. N. (2017), "Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review", *Journal of Cleaner Production*, 142, 3014-3027.
- Maestre-Valero, J. F., Martin-Gorriz, B., Alarcón, J. J., Nicolas, E. and Martinez-Alvarez, V. (2016), "Economic feasibility of implementing regulated deficit irrigation with reclaimed water in a grapefruit orchard", *Agricultural Water Management*, 178, 119-125.
- USEPA (2012), *Guidelines for Water Reuse*, Chapter 6.
- Dalalmeh, S. S., Pell, M., Hylander, L. D., Lalander, C., Vinnerås, B. and Jönsson, H. (2014), "Effects of changing hydraulic and organic loading rates on pollutant reduction in bark, charcoal and sand filters treating greywater", *Journal of Environmental Management*, 132, 338-345.
- Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z. and Raveh, E. (2007), "Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) — A novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households", *Chemosphere*, 66(5), 916-923.
- Babel, S. and Kurniawan, T.A. (2003), "Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review", *Journal of Hazardous Materials*, 97, 219-243.
- Chang, N.-B., Hossain, F. and Wanielista, M. (2010), "Filter media for nutrient removal in natural systems and built environments: I — Previous trends and perspectives", *Environmental Engineering Science*, 27, 689.
- Genç-Fuhrman, H., Mikkelsen, P. S. and Ledin, A. (2007), "Simultaneous removal of As, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn from stormwater: Experimental comparison of 11 different sorbents", *Water Research*, 41(3), 591-602.
- Yu, X.-Y., Ying, G.-G. and Kookana, R. S. (2006), "Sorption and Desorption Behaviors of Diuron in Soils Amended with Charcoal", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8545-8550.
- Gottschall, N., Edwards, M., Craiovan, E., Frey, S. K., Sunohara, M., Ball, B. and Lapen, D. R. (2016), "Amending woodchip bioreactors with water treatment plant residuals to treat nitrogen, phosphorus, and veterinary antibiotic compounds in tile drainage", *Ecological Engineering*, 95, 852-864.
- Hatt, B. E., Fletcher, T. D. and Deletic, A. (2008), "Hydraulic and pollutant removal performance of fine media stormwater filtration systems", *Environmental Science & Technology*, 42(7), 2535-2541.
- Maeng, S. K., Ameda, E., Sharma, S. K., Grützmacher, G. and Amy, G. L. (2010), "Organic micropollutant removal from wastewater effluent-impacted drinking water sources during bank filtration and artificial recharge", *Water Research*, 44(14), 4003-4014.
- Ghaitidak, D. M. and Yadav, K. D. (2013), "Characteristics and treatment of greywater—A review", *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2795-2809.
- Niwagaba, C. B., Dinno, P., Wamala, I., Dalalmeh, S. S., Lalander, C. and Jonsson, H. (2014), "Experiences on the implementation of a pilot grey water treatment and reuse based system at a household in the slum of Kyebando-Kisalosallo, Kampala", *Journal of Water Reuse and Desalination*, 4(4), 294-307. 

國際交流 — 參加蒙古 2018 年年會 107.6.14-16



本次蒙古年會由張鈺輝副秘書長代表出席，並發表 Challenges Faced by Taiwan Civil Engineers & Examples of Innovation/Advanced Technology Applied 演講。張副秘書長受到蒙古熱烈的款待。

