

以複合濾料水質淨化系統去除水庫原水有機物

之效果與機制探討

*郭上禎 **張智華 ***黃文傑 ****林宏達
國立成功大學環境工程系 *碩士生 **副教授
行政院環境保護署水質保護處 ***副工程司 ****科長

摘要

離島水庫總有機碳(Total Organic Carbon, TOC)濃度偏高，以澎湖成功水庫為例其 TOC 介於 7-12 mg/L 間，不僅無法符合飲用水水源水質標準，亦增加處理成本與消毒副產物生成風險。複合濾料水質淨化系統(Multi-Soil-Layering, MSL)是一種源自日本的土壤滲濾改良工法，其將土壤與鐵、木炭及有機質等複合濾料包覆在磚型土工包內強化土壤功能，再透過土工包層與沸石或礫石構成的透水層之成層磚砌結構改善阻塞與短流。因此，相較於傳統土壤處理工法，MSL 具有進流水濃度接受範圍寬，面積負荷率高，且能強化土壤對懸浮物、營養鹽及有機物淨化功能之優點。本研究於澎湖成功水庫旁設置最大處理量 40 CMD 的 MSL 試驗模場(4 槽 MSL 獨立操作、4 個 MSL 槽的土工包分別以不同比例的複合濾料混合現地土壤調配而成、每槽 2m 深含 136 個土工包構成之 8 層土工包層、負荷率為 2000 L/m²/日)，進流水取自水庫，先通過工研院專利生物網膜系統(BioNet)前處理後再進入 MSL 單元。在完整一年的試驗期間內，進流水 TOC 介於 7 到 12 mg/L、模場出流水 TOC 能穩定維持在 2-4 mg/L 之間，其中 BioNet 對 TOC 的平均去除率僅有 14%，遠不如 MSL 系統的 60% (4 槽分別為 59%、62%、53%、56%)。根據螢光光譜分析結果，最佳配比之 MSL 對類芳香蛋白及類可

溶性微生物代謝物質之去除率(68%)優於對類黃酸及類腐植酸之去除率(56%)，可見 MSL 對有機物之去除機制以生物分解為主。

一、前言

離島水庫因降雨量少、蒸發量大，水質優養化程度高又缺乏循環活化，導致總有機碳(Total Organic Carbon, TOC)濃度高。以澎湖成功水庫為例，其夏、秋兩季(豐水期)濃度介於 7-10 mg/L，冬、春季(枯水期)濃度介於 9-12 mg/L，皆不符合飲用水水源水質標準。離島 TOC 濃度高使得後續淨水處理程序用藥量與處理成本增加，此外，TOC 所含各種天然有機物(Natural Organic Matters, NOMs)為消毒副產物前驅物質(Liang & Singer, 2003)，TOC 濃度高亦使三鹵甲烷及鹵化乙酸等消毒副產物生成風險提高。

源自於日本的多層複合濾料水質淨化系統(Multi-Soil-Layering, MSL)，是一種強化土壤氮、磷去除功能的現地工法(Wakatsuki, Esumi, & Omura, 1993)。MSL 由混合土壤層(Soil Mixture Layer, SML)與透水層(Permeable Layer, PL)成層堆疊構成，故又稱為成層土壤水質淨化工法。每層 SML 由數個包含土壤與水淨材料(鐵、木炭、有機質)的定型磚單元(Soil Mixture Block, SMB, 土工包)組成，PL 則含礫石或沸石，透過導水性低的 SMB (10^{-3} cm/s)與導水性高的 PL (10^{-1}

cm/s)的磚砌結構可提供均勻與不均勻水流，能改善傳統土壤滲濾系統易因堵塞及短流導致淨化能力下降的問題(Siegrist, 1987)。此外，SMB 能藉水淨材料配方調控來強化水質淨化效果，與傳統土壤處理相比，MSL 具有強化土壤淨化功能(過濾、吸附及生物分解)、提高氮、磷及有機物處理效率及效果可預測性等優點。相關文獻顯示，MSL 不但有高水力負荷，且即使進流水濃度變動大(BOD：5-1400 mg/L；TP：0.1-8.0 mg/L)，仍能維持穩定、可接受的污染物去除率。

為測試新型現地工法對離島水庫水質活化與優養改善的效果，本研究於澎湖成功水庫旁設置一座最大處理量 80 CMD 之 BioNet+MSL 試驗模場抽取水庫原水進行處理，試驗期間為 108 年 7 月至 109 年 9 月。模場設有四座獨立操作之 MSL 槽，每槽 MSL 的 SMB 分別以不同比例的現地土壤、鐵粒、碳粉及木屑混合調配，以探討不同配比對於 TOC 去除效率的影響，並結合螢光激發/發射陣列光譜(Fluorescence Excitation Emission Matrix, FEEM)對水中 NOM 進行定性及定量，以探討 MSL 對水庫原水有機物之去除效果與機制。

二、研究材料與方法

2.1 成功水庫

成功水庫位於澎湖縣湖西鄉，為澎湖境內及我國離島地區最大水庫，有效蓄容量為 121 萬立方公尺，滿水位為 9 m，以雨水做為主要水源，日供水量 3,000 CMD，為馬公市水庫水主要供水來源。

圖 1 為研究期間(108-109 年)夏、秋季及冬、春季成功水庫大壩處 TOC 濃度分布(模場原水水質)，夏、秋季(豐

水期)濃度介於 7-10 mg/L，平均濃度 8.3 mg/L，冬、春季(枯水期)濃度介於 9-12 mg/L，平均濃度 10.3 mg/L，均高於飲用水水源水質標準(TOC 濃度低於 4 mg/L)。

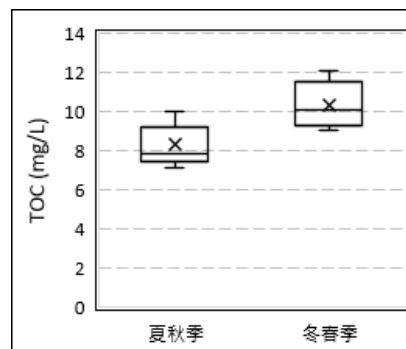


圖 1 108-109 年成功水庫大壩原水 TOC 濃度分佈圖

2.2 MSL 試驗模場

本研究 MSL 試驗模場建置於成功水庫東北角，如圖 2 所示，為國內第一座採用 MSL 淨化水質的現地設施。水庫原水抽水點設於水庫大壩靠近中點處，因為此處水位較深，可避免枯水期時水位下降，抽取到過多底部泥沙而導致系統堵塞。



圖 2 MSL 模場位置及原水取水點

MSL 模場系統流程如圖 3 所示，

水庫原水自取水點抽入原水暫存槽，原水先進入 Bionet 以降低 SS 與 TOC 濃度，避免後端 MSL 發生物理性或生物膜阻塞。Bionet 出流水溢流至 Bionet 暫存槽後，再分別抽入四座 MSL 處理槽(A、B、C、D)，每槽進流量控制為 10 CMD (可獨立調控，單槽流量可控制在 0 至 20 CMD 之間)，相當於面積負荷率 2000 L/m²/日。如圖 3，水質採樣點位分別為原水進流端(W1)、Bionet 進流端(W2)、A 槽出流水(W3)、B 槽出流水(W4)、C 槽出流水(W5)及 D 槽出流水(W6)。

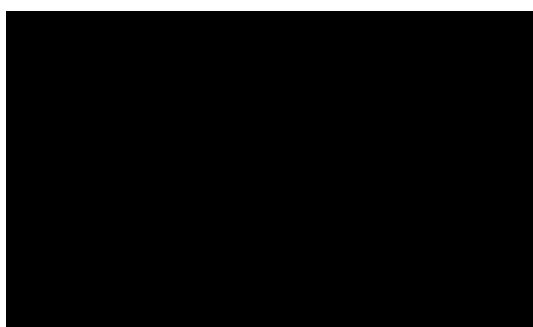


圖 3 MSL 模場系統流程圖

本研究每座 MSL 槽長 2.5 m、寬 2 m、高 2 m，其剖面配置如圖 4 上視平面配置如圖 5。如圖 4 所示，槽體上方 0.1 m 為進流端空間，設置日字形散水管，使進流水能均勻分布。進流端下 1.7 m 空間為 MSL 主要淨水區域，由 9 層厚 0.1 m 的 PL 及含有 SMB、厚 0.1 m 的 8 層 SML 成層堆疊而成，曝氣管設置於第三層 SML 層下方。槽體最下方 0.2 m 為出流水集流空間，填充直徑 10-20 mm 礫石級配以保護鋪設於槽體最下方的多孔出流管。土工包平面配置如圖 5，每層 SML 由四種不同尺寸之 SMB 排列而成，其尺寸分別為 50 cm x 60 cm x 10 cm (Type ①)、50 cm x 30 cm x 10 cm (Type ②)、20 cm x 60 cm x 10 cm (Type ③)及 20 cm x 30 cm x 10 cm (Type ④)。

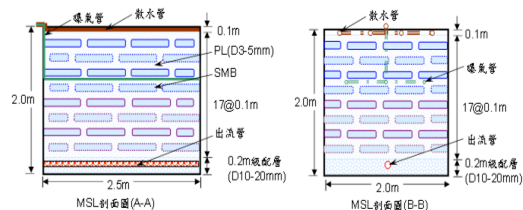


圖 4 MSL 處理槽剖面圖

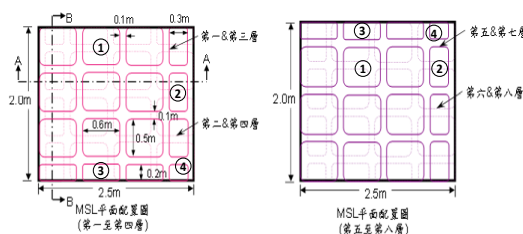


圖 5 MSL 土工包平面配置

每槽土工包由不同配比之現地土壤、鐵粒、木屑及碳粉等複合濾料以不織布包覆而成如表 1 所示，以探討不同配比对有機物去除之影響。

表 1 四槽 SMB 與 PL 材料配比

配置 No.	PL 層	SMB 配比
		(土壤:有機質:碳粉:鐵粒)
A	沸石	75%:5%:10%:10%
B	礫石	75%:5%:10%:10%
C	礫石	80%:5%:10%:5%
D	礫石	70%:5%:10%:15%

2.3 現地水質總有機碳分析

現地水樣收集後，每週於自來水公司七區管理處實驗室分析 TOC，分析儀器為 SUEZ 公司 Sievers M5310 C，其偵測範圍為 4 ppb - 50 ppm，精密度低於 1% RSD，準確度±0.5 ppb，有效位數 3 位。

2.4 螢光激發/發射陣列光譜

模場水樣每兩週送回成功大學實驗室，以 Perkin Elmer LS-55 Luminescence Spectrometer 分析酸化過濾後水樣(0.45 μm)之螢光激發/發射陣列光譜(Fluorescence Excitation Emission Matrix, FEEM)。分析儀器為以 150 W 氙燈為光源，提供激發與發射波長 200-890 nm 之掃描範圍，搭配 FL WinLab 軟體設定波長範圍、掃描間距及速度等參數，並即時讀取掃描資料。本研究設定激發(Excitation)波長範圍為 210-400 nm，發射(Emission)波長範圍為 280-550 nm，掃描間距 Ex 與 Em 分別以 10 與 0.5 nm 的方式進行，掃描速度為 1000 nm/min。

激發波長、發射波長和螢光強度(Intensity)為螢光光譜分析的重要參數，利用螢光光譜儀三維或二維等高繪圖方式，透過與已知特性之螢光區塊比對(Chen, Westerhoff, Leenheer, & Booksh, 2003)，並記錄螢光光譜位置與強度，即能提供物種存在的資訊。圖 6 中由虛線區分出五個區塊，分別代表類芳香蛋白 I (簡稱 API，位於 I 區)，例如酪胺酸；類芳香蛋白 II (簡稱 APII，位於 II 區)，例如色胺酸；類黃酸物質(簡稱 FA，位於 III 區)，例如黃酸及疏水性有機酸；類可溶性微生物代謝物質(簡稱 SMP，位於 IV 區)，例如類蛋白質；類腐植酸(簡稱 HA，位於 V 區)，例如海洋腐植酸；以此，做為不同 NOM 之定性依據。水樣 FEEM 分析結果示意如圖 7 所示，每區範圍內螢光強度先積分為總強度後再計算 AFI (Average Fluorescence Intensity)，以定量五種不同區塊之有機物。

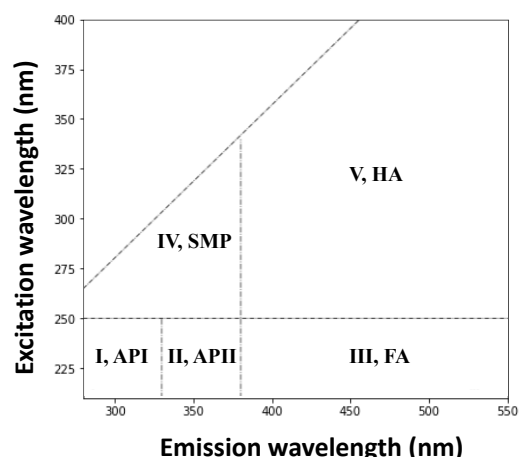


圖 6 螢光特性區塊(Chen et al., 2003)

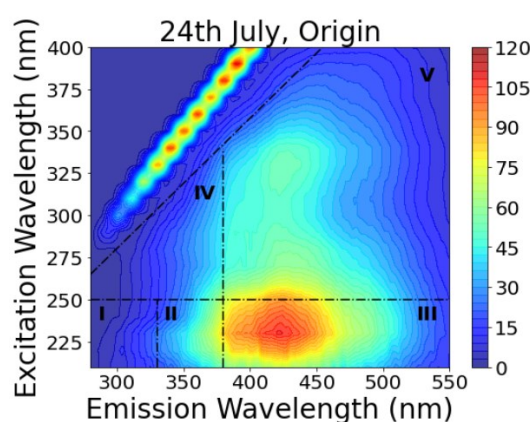


圖 7 水樣 FEEM 示意圖

2.5 實驗室有機碳分析

分析 FEEM 之水樣同時亦依環檢所公告之燃燒/紅外線測定法(NIEAW530.51C)分析非揮發溶解性有機碳(Non Purgeable Dissolved Organic Carbon, NPDOC)。採用儀器為 Shimadzu® TOC-L，偵測極限為 4 $\mu\text{g/L}$ 。水樣分析前，需先配製適當濃度之 TOC 標準品，係取 2.1254 克的無水鄰苯二甲酸氫鉀(KHP, Anhydrous potassium biphthalate, $\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$, Merck, Germany)溶於純水中，並定容至 1000 ml，即為濃度 1000 mg/L 之 TOC 標準品，再依樣品濃度稀釋至適當濃度，據以製作檢量線。

本研究 FEEM 所得之總 AFI 與該

水樣之 NPDOC 關係如圖 8，總 AFI 與 NPDOC 相關性佳($R^2 > 0.9$)，表示水樣總 AFI 可代表有機物的總量，故可以 AFI 量化水樣中各類有機物以探討其組成(諾維亞, 2015)。

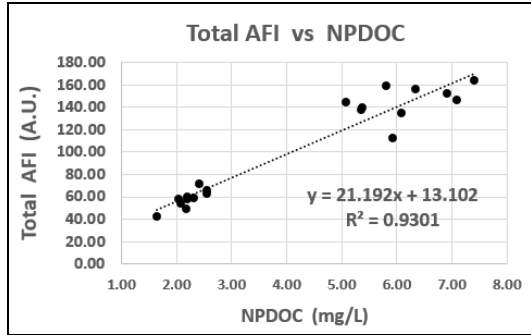


圖 8 樣品總 AFI 與 NPDOC 之相關性

三、結果與討論

本研究試驗期間為 108 年 7 月至 109 年 9 月，期間 108 年 10 月至 109 年 1 月模場維持運作但未收數據，109 年 6 月進水故障停止運作、109 年 7 月起以各 10 CMD 水量操作 A、B 槽。本文 TOC 去除效果乃彙整所有研究期間數據進行分析(共 45 個水樣)，關於 FEEM 與不同種類 NOM 之去除效果與機制探討採用 109 年 7 月後寄回實驗室之 5 個水樣進行統計分析。

3.1 原水水質及有機物組成

圖 9 為試驗期間進流原水(W1) TOC 濃度變化，進流水濃度隨季節與水庫水位變化，夏、秋兩季雨水豐沛、水位高，此時 TOC 濃度低；冬、春兩季為枯水期，水位低時 TOC 濃度偏高，整體範圍介於 7-12 mg/L 間，平均濃度 8.7 mg/L。

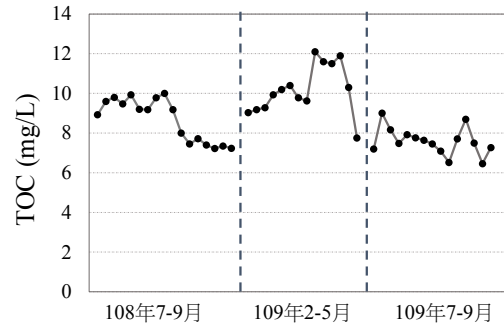


圖 9 進流原水(W1) TOC 濃度變化

W1 之 FEEM 分析結果以 109 年 8 月 12 日水樣為例，如圖 10 所示，其發散波峰強度依序位於 III、II、V、IV 及 I 區，故可依圖 6 判讀原水 NOM 組成依序為類黃酸(FA)、類芳香蛋白質 II (APII)、類腐植酸(HA)、類可溶性微生物代謝物質(SMP)及類芳香蛋白質 I (API)。5 個原水水樣 FEEM 分析結果均與圖 10 類似，雖有強度之分但組成類似，其平均 AFI 如圖 11，顯示成功水庫夏季原水以 FA 為主佔 32.5%、其次為 APII 佔 28.4%，其他依序為 HA、SMP 及 API，整體而言水庫原水較易被生物分解之 NOM 佔 50.2% (API+APII+SMP)，不易分解為 49.8% (FA+HA)。

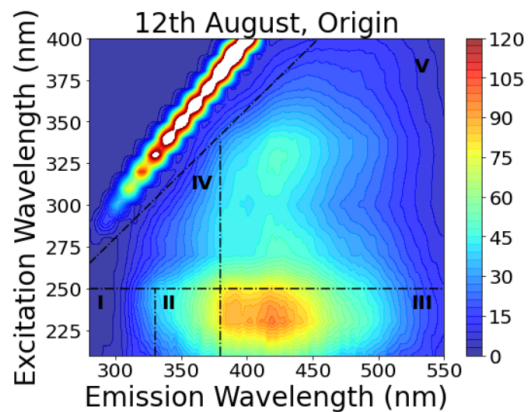


圖 10 109/8/12 原水 FEEM (W1、夏季)

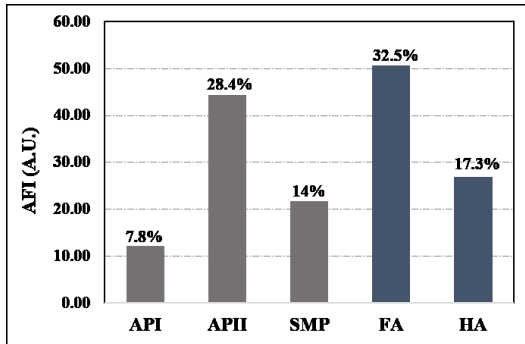


圖 11 水庫原水 NOM 組成(W1、夏季)

3.2 BioNet 處理成效

BioNet 進出流水水質分別以 W1 及 W2 做為代表，W1 如前所述，W2 的 TOC 濃度介於 5-9 mg/L 之間，平均濃度 7.5 mg/L，平均去除率 14%。BioNet 對 TOC 之去除效率取決於停留時間與原水濃度，水庫原水 TOC 濃度比一般受污染河川還要高、而在本系統總進流水 20-40 CMD 操作條件下，BioNet 停留時間僅 1.4-2.8 小時之間，再加上 W1 僅有 50% 較易被生物分解，此條件下 BioNet 對 TOC 僅有 10-15% 去除效果。

圖 3.2-1 為 W2 AFI 分析結果，原水經 BioNet 處理後與圖 11 相比有機物組成變化非常有限。BioNet 對生物可分解有機物去除率為 20-40% 間，對 FA+HA 去除率不到 10%。

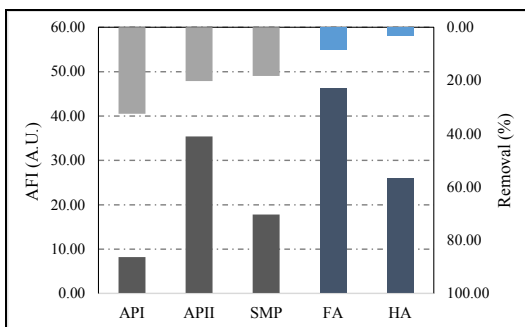


圖 12 BioNet 放流水 NOM 組成(W2)

3.3 MSL 處理成效

MSL 進出流水水質分別以 W2 及 W3、W4、W5、W6 做為代表，W2 如前所述，MSL 出流水水質如表 2 所示，可見 TOC 去除率以 B 槽最佳，A 槽次之，其他依序為 D 槽及 C 槽。去除效果較佳的 A、B 兩槽 SMB 配比相同，顯示配比 75:5:10:10 (土壤:有機質:碳粉:鐵粒) 之 SMB 具有較佳 TOC 去除能力。此外，A 槽使用沸石作為 PL 層，而 B 槽使用礫石，因沸石導水係數較礫石佳，使 A 槽進流水滲入土工包之機率較 B 槽略低，研判此為 A 槽 TOC 去除效率不若 B 槽的原因。

表 2 MSL 出流水水質

MSL	水樣	TOC 濃度 95% 信賴區間 (mg/L)	平均去除率
A	W3	3.1±0.5	59%
B	W4	2.9±0.4	62%
C	W5	3.7±1	53%
D	W6	3.4±0.9	56%

圖 13 為試驗期間各水樣 TOC 濃度變化及分佈，顯示 108 年 7-9 月水庫原水 TOC 較低，經 4 個 MSL 處理後的出流水的 TOC 濃度幾乎低於 4 mg/L，109 年 2-5 月水庫原水 TOC 因水位降低而升高，此時系統已連續操作 6 個月以上，陸續發生進流幫浦故障、面積式流量計長滿生物膜不易判讀及調控進流量、以及可能散水管亦發生生物膜阻塞情形，再加上此時進流水 TOC 開始升高達 10 mg/L 以上，故 A、C 及 D 三槽出流水會高於 4 mg/L，僅阻塞條件較輕微之 B 槽仍能維持穩定去除率及低於 4 mg/L 之出流水質。109 年 6 月進行全面停水兩週、系統修繕、MSL 槽放乾及通氣排除阻塞後，109 年 7-9 月僅啟用 A、B 兩槽，去除率又恢復第一試程水準。整體而

言，在監控阻塞及穩定每槽進出水流量都在 2000 L/m²/d 之操作條件下，經 BioNet 及 MSL 處理過後的成功水庫高 TOC 濃度原水(7-12 mg/L)可符合飲用水水源水質標準。

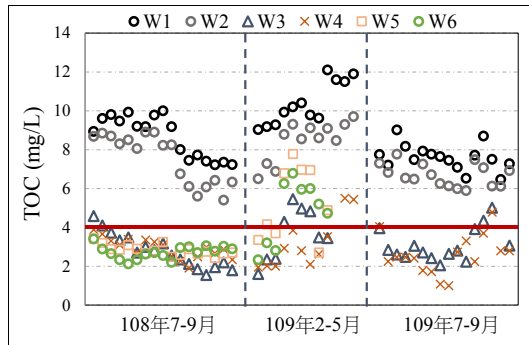


圖 13 水樣 TOC 濃度變化及分佈

因 A、B 槽對 TOC 之去除效率較佳且穩定，故本研究選擇 A、B 兩槽出流水(W5、W6)進行 FEEM 及 AFI 分析，探討其有機物組成及 A、B 槽對各類有機物之去除率，以瞭解有機物去除機制，結果如圖 14 及圖 15。經 MSL 處理後，與圖 12 之 BioNet 出流水組成相比，5 類有機物之組成比例雖變動不大(FA > APII > HA > SMP > API)，但螢光強度皆大幅下降，A、B 槽對 API、APII 及 SMP 等生物可分解之有機物去除率分別為 60.2% 及 68.1%，FA 及 HA 分別為 47.1% 及 56.2%，由此可知 MSL 對 TOC 的去除機制是以生物分解為主。經 MSL 處理後之水庫原水，易被生物分解之 NOM 佔 40% (API+APII+SMP)，不易分解為 60% (FA+HA)。

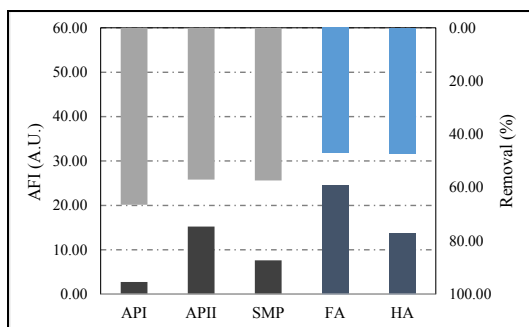


圖 14 W5 AFI 分析

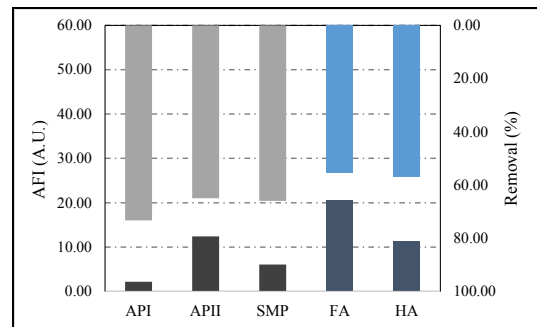


圖 15 W6 AFI 分析

3.4 MSL 進出流水濃度關係

由以上 TOC 去除率分析結果可知 MSL 對 TOC 之去除效率取決於面積負荷率與進流原水濃度，在負荷率維持 2000 L/m²/d 的條件下，本研究接著探討 MSL 出流水質與進流水之關係。本研究排除第二試程期間因流量不穩定造成之異值後，採用四槽各 19、21、12 及 11 筆數據建立進出流水 TOC 濃度關係如圖 16、圖 17、圖 18 及圖 19，其中 A、B 及 D 槽進出流水 TOC 濃度具有良好的線性關係(R² > 0.6)。以 R² 最佳之 A 槽為例，顯示在面積負荷率 2000 L/m²/日的條件下，若原水 TOC 濃度低於 10 mg/L、BioNet 出流水 TOC 濃度低於 9 mg/L、MSL 出流水 TOC 濃度可符合飲用水水源水質標準。

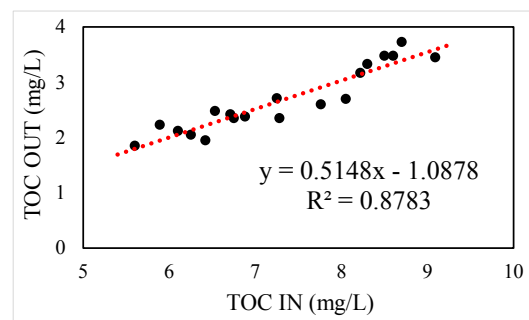


圖 16 A 槽進出流水 TOC 濃度關係圖

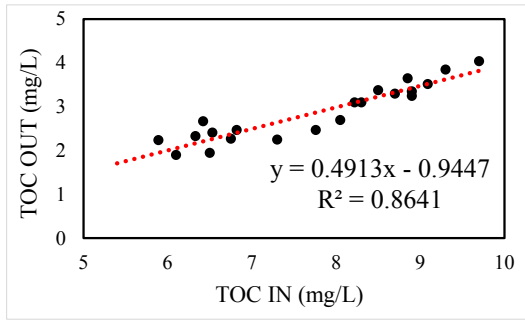


圖 17 B 槽進出流水 TOC 濃度關係圖

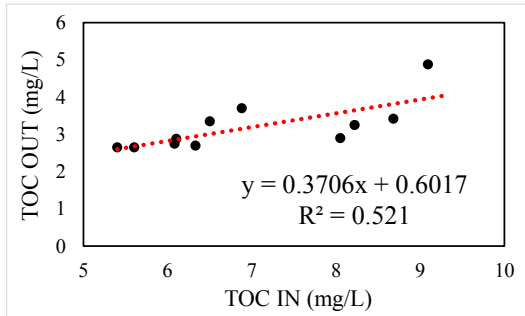


圖 18 C 槽進出流水 TOC 濃度關係圖

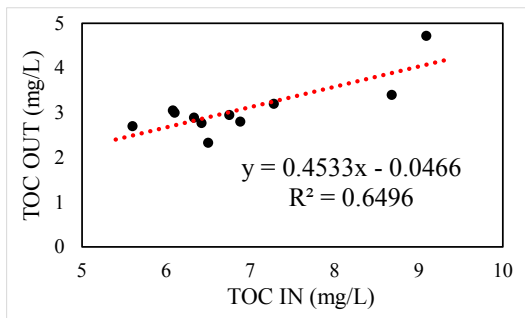


圖 19 D 槽進出流水 TOC 濃度關係圖

四、 結論

本研究運用 BioNet+MSL 程序循環淨化成功水庫原水，經模場現地試驗一年，探討此淨化程序去除水庫原水有機物之效果與機制，彙整結論如下：

1. 水庫原水 TOC 介於 7-12 mg/L 之間，尤以春、冬季低水位時為高。其夏季 NOM 組成依序為類黃酸、類芳香蛋白質 II、類腐植酸、類可溶性微生物代謝物質及類芳香蛋白質 I，易被生物分解及不易分解之 NOM 各佔一半。

2. 在本研究高負荷條件下，原水在 BioNet 之停留時間只有 1-3 小時，且水庫原水易被生物分解之有機物不高，使 BioNet 對 TOC 之去除率僅 14%。
3. MSL 四槽 TOC 平均去除率介於 50-60%之間，其出流水 TOC 濃度在每槽 2000 L/m²/d 之負荷率下，大部分可符合飲用水水源水質標準。MSL 對水庫原水 NOM 的去除機制研判以生物分解為主。
4. 由 MSL 進出流水 TOC 濃度有穩定、可靠之線性關係來看，顯示與傳統土壤處理相比，MSL 具有水質可預測性之優點。

參考文獻

1. Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J. A., & Booksh, K. (2003). Fluorescence Excitation-Emission Matrix Regional Integration to Quantify Spectra for Dissolved Organic Matter. *Environmental Science & Technology*, 37(24), 5701-5710. doi:10.1021/es034354c
2. Liang, L., & Singer, P. C. (2003). Factors influencing the formation and relative distribution of haloacetic acids and trihalomethanes in drinking water. *Environmental science & technology*, 37(13), 2920-2928.
3. Siegrist, R. L. (1987). Soil clogging during subsurface wastewater infiltration as affected by effluent composition and loading rate. *Journal of Environmental Quality*, 16(2), 181-187.

4. Wakatsuki, T., Esumi, H., & Omura, S. (1993). High performance and N & P-removable on-site domestic waste water treatment system by multi-soil-layering method. *Water Science and Technology*, 27(1), 31-40.
5. 諾維亞. (2015). 利用 FEEM 及 HPSEC 追蹤自然有機物在淨水程序中之變化. 國立成功大學, Available from Airiti AiritiLibrary database. (2015 年)