

生物濾床作為受污染原水前處理單元之模廠試驗

*游惠宋，**黃志彬，***烏春梅，***王韻蟬

*國立交通大學環境工程研究所博士候選人，**國立交通大學環境工程研究所教授

***國立交通大學環境工程研究所研究助理

摘要

根據鳳山水庫淨水廠之現有傳統淨水處理程序，對原水中之氮氮與臭味去除幾乎全仰賴濾前加氯以氧化去除之，但此程序在原水富含有機物下，易帶來清水中含三鹵甲烷等消毒副產物之疑慮。且常發現有氮氮去除不完全及臭味猶存的現象。鑑此，先前諸多之研究顯示，增設高級處理程序可有效控制消毒副產物之產出，然此等程序之設備投資及相關維護所費不貲，對自來水公司現有財務將構成嚴重挑戰。因此搭配生物濾床前處理程序操作，應可有效降低加氯消毒副產物形成前質，並提供一較經濟且技術可行之投資改善方案。本文為上述生物濾床前處理模廠試驗之研究結果，旨在闡明鳳山水庫原水採用生物濾床前處理對污染物質之去除效率與經濟效益。

鳳山水庫原水經 92 年 1 月至 92 年 8 月間取樣分析結果顯示，在 pH 均維持於

7.6 左右變化甚小；濁度因先有水庫沉澱之故，大多介於 4-6 NTU，8 月下旬以後因颱風關係，濁度值明顯增高達到 15 NTU。原水氮氮值偏高一直是鳳山水庫原水之主要問題，在 92 年 1-5 月月份，氮氮均維持在 4-8 mg/L 之間，92 年 6 月份以後，逐漸下降至 1.0 mg/L 以下；DOC 自 92 年 1-8 月份濃度介於 2-4 mg/L 之間。

生物濾床模型廠直徑 25 公分、高度為 250 公分，有效體積為 100 公升。生物濾床以聚醚系列 (polyether base) 之網狀泡綿為載體，泡綿填充率以 70% 計算，反應槽中總孔隙率接近 98%。原水由泵浦抽送，由生物濾床之底部進入由頂部流出，進流量為每小時 180 L，曝氣量為 250 mL/min 以供應充足之溶氧；為防止固體顆粒物大量截留於生物濾床中，造成阻塞而影響生物處理功能，於是在生物濾床之氣體管線上，裝設一組由電磁閥與定時器組成之自動控制反沖洗系統，每天定時反沖洗一次，每次三分鐘，反沖洗氣體量為

1000 mL/min。生物濾床於不同高度設有六個採樣口，各採樣口之空床停留時間 (EBCT) 分別為 5、10、15、20、25 與 30 分鐘，本研究主要探討之對象包括濁度、氨氮及有機物 (DOC)。

生物濾床模廠試驗之結果顯示，生物濾床具有穩定濁度之功能，且當生物濾床 EBCT 高於 5 分鐘，生物濾床對濁度之去除效果即不受 EBCT 的影響。以平均去除率而言，生物濾床之 EBCT 為 5 分鐘時，氨氮之去除率為 92.64%，當 EBCT 延長 10 分鐘時，氨氮之去除率提昇為 96.28%，而後 EBCT 延長 15 分鐘至 30 分鐘時，氨氮之去除率為微幅提升至 98.16%。此結果顯示，當生物濾床之 EBCT 超過 10 分鐘後，提高 EBCT 並未能對氨氮之去除提供顯著之效益。生物濾床對 DOC 之去除率在 EBCT 為 5 分鐘時，去除率為 16.58%，當 EBCT 延長 10 分鐘至 15 分鐘時，DOC 之去除率提昇為 21.24%，當 EBCT 再延長 15 分鐘至 30 分鐘時，DOC 之去除率為 25.13%。

鳳山水庫每日供應 20 萬噸原水，氨氮平均濃度為 5.80 mg/L，生物濾床前處理之氨氮去除率 95%，實務上一般折點加氯之加氯量以氨氮濃度之 10 倍，每公斤氯之購入價格約為 7.5 元計算，以生物濾床取代前加氯，每天則可節省 11,000 Kg 之加氯量，每年可節省 3,011 萬元之加藥成本。生物濾床前處理之 EBCT 訂為 10 分鐘，每日處理 20 萬噸原水，其初設成本概估為

2,700 萬元，每年之運轉費用約 100 萬元，故應用生物濾床前處理以去除鳳山水庫原水之氨氮，取代既有之預氯系統，應具有經濟效益。

前言

根據 Chien *et al.* (1997) 之研究報告指出，亞洲地區許多國家水源受到人為污染，原水中氨氮濃度高達 1~5 mg/L。原水污染之來源通常是人類活動造成，受污染水源其水質特性常含有氨氮、分子量較小之有機物等，在傳統自來水處理程序中，為克服氨氮所造成之困擾，通常以預氯方式處理，將氨氮氧化成氯胺；但預氯方式容易衍生更多的 DBPs。

對受污染水源而言，生物處理單元均設置於混凝沉澱之前，其主要功能在於取代前加氯單元去除氨氮、中、低分子量之有機物，以降低 DBPs 之產生量 (Yeh and Chen, 1988; Chien *et al.*, 1997)。Yeh *et al.* (1995) 使用生物濾床進行受污染水源之處理研究時發現，生物濾床前處理可大幅降低加氯所需之成本。許多文獻研究顯示，利用生物濾床進行受污染水源前處理，可降低後續混凝單元混凝劑之添加量 (Yeh and Chen, 1988; Chien *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 1997; 黃, 2000)。生物前處理雖然可

同時去除氮氮與有機物，但是其功能深受槽中累積之生物質量所調控，黃（2000）之研究指出，生物濾床對有機物之去除功能與槽中生物質量成正比；但對氮氮之去除功能卻與槽中生物質量成反比。

目前已廠化運用之自來水生物前處理技術包括：浸水濾床、旋轉生物圓盤法 (Matsumoto *et al.*, 1992 ; Koki, 1993 ; Xu *et al.*, 1997 ; Sakimura *et al.*, 1997 ; 鄭, 1997)。上述之生物前處理法是利用高分子材料（如 PVC、PP、PE）或濾砂當填充材，做為微生物附著生長之擔體，利用微生物進行污染物之淨化作用。

Matsumoto *et al.* (1992) 報導唐戶淨水廠 (19,700 m³/day) 利用旋轉生物圓盤法 (RBC) 進行自來水生物前處理以去除氮氮，其結果顯示在平均水力負荷 0.216 m³/m²-day、水力停留時間為 40 分鐘之操作條件下，高水溫期 (15~23℃)，原水之氮氮平均濃度 0.11~0.86 mg/L 時，氮氮平均去除率為 70%；低水溫期 (7.7~17℃) 原水之氮氮平均濃度 0.38~2.61 mg/L 時，氮氮平均去除率為 74%。日本沖繩縣北谷淨水廠每日出水量為 194,000 m³/day，但因原水受人為污染影響，因此增設生物接觸氧化槽，以取代既有預氣單元，並在砂濾床之後設置後臭氣氧化與生物活性碳單元。生物接觸氧化槽分為四個

系統 (8 列 3 段 24 槽)，每一系統出水量為 48,500 m³/day，填充載體為孔洞 13 mm 之蜂巢管，接觸時間為 1.5 小時，曝氣量為處理水量之 4 倍，實廠運轉結果顯示最終處理水 THMFP 去除率達 75%，可惜該報告未列出其他污染物之去除成效 (Koki, 1993)。

自來水採用生物處理時，原水中所含之污染物濃度低，故經生物氧化後所轉化成之生物質量亦低，因此維持自來水生物處理系統中足夠的微生物量，是發揮生物處理功能之主要因素。在生物處理系統中，微生物量之累積取決於系統中微生物之增殖、死亡與流失，前兩項屬微生物之本質，不易受人力所控制，但在實驗設計上卻可藉由適當方法，使微生物流失量降至最低；而選擇適當生物載體，是確保生物處理功能的關鍵。

Marquet *et al.* (1999) 以熔鐵爐渣為載體之滴濾床，藉由出流水中顆粒分佈探討其出流水特性，實驗結果發現，水中顆粒經滴濾床後會凝聚成大顆粒，顆粒之平均粒徑由 44.5 μm 成長為 117.4 μm。Sakimura (1997) 的報告指出截至 1997 年止，在日本已有 180 個利用繩索狀濾材，裝置於河川內直接進行河川水質淨化作用，根據廣島縣福山市之處理結果，在滯留時間 10~40 分鐘 (隨河川流量而異) 時，BOD 去除率為 11~46%、總氮去除

率 4 ~ 54 %、總磷去除率達 3 ~ 35 %。Nohara *et al.* 於 1995 年，利用水泥球（過濾速度 58 m/day）與塑膠濾材（滯留時間為 1.5 小時）組成之生物處理程序，來淨化河川水質，然後再將經淨化後之處理水排放回河川中。該模場實驗結果顯示，此系統之 SS 截留率 91.2 %、BOD 去除率 69 %、氨氮去除率 72.6 %。Fujii *et al.* (1997) 於泰國曼谷利用礫石床做成渠道式生物過濾床，進行受污染河川之現地處理試驗，水力滯留時間在 9 小時條件下，SS 截留率達 75 %、BOD 去除率為 50 ~ 60 %、氨氮進流濃度 5 mg/L，其去除率達 52 %，此礫石床之主要反應機制為沈澱及生物分解。Lim 和 Shin (1997) 利用纖維材質、比表面積為 421 m²/m³ 之濾材所填充成的濾床進行模場試驗，探討生物前處理對 DOC、藻類及臭味功能，模型廠操作結果發現，當水力停留時間超過 60 分鐘，DOC 之去除率可趨於穩定（約 23 %）；藻類之去除效率，若以葉綠素 a 來表示，可達 33 ~ 40 %，臭味之去除率亦可達 40 ~ 50 %（以 geosmin 為指標）。Sasa *et al.* (1995) 則以聚酯纖維製成直徑 5 ~ 7 mm 之球型載體，填充於直徑 30 公分、高 400 公分之模廠，載體填充高度為 200 公分，接觸時間為 12 分鐘，研究結果發現濁度與氨氮均有很高之去除率，當水溫高於 10°C 以上，氨氮之載體負荷 300 ~ 400 g NH₃-N /m³-support-day，氨氮之平均去除率達 90

%，低溫時(5°C)氨氮去除率亦可達 80 %。鄒 (1999) 利用泡綿為載體，於港西淨水廠進行模廠試驗，在 EBCT 於 15 分鐘下，可有效去除氨氮。黃 (2000) 以急水溪原水進行兩年泡綿生物濾床現地試驗，研究結果顯示泡綿生物濾床可快速去除氨氮，使生物濾床出流水之氨氮濃度達到水源水質管制標準。

研究方法

連續式生物濾床處理設備

生物處理系統模廠設備總體積為 120 公升，直徑 25 公分，高度為 2.5 公尺，生物固定床之有效體積為 100 公升。生物固定床以聚醚系列(polyether base)之網狀泡綿為載體，此泡綿具開放型孔洞，孔隙率高達 97 %，泡綿填充率以 70 % 計算，反應槽中總孔隙率接近 98 % (97 % × 70 % + 30 %)。原水由泵浦抽送，由生物固定床之底部進入由頂部流出，為防止固體顆粒物大量截留於生物處理槽中，造成阻塞而影響生物處理功能，於是在生物固定床之氣體管線上，裝設一組由電磁閥與定時器組成之自動控制反沖洗系統，生物處理系統之主要處理對象為氨氮及有機物，本研究探討之水質指標為氨氮、DOC、濁度等項目，並檢討是否能符合飲用水水源水質標準。生物處理系統之進流量為每小時 180 L，曝氣量為 250 mL/min，反沖洗操

作策略為每天一次，每次三分鐘，反沖洗氣體量為 1000 mL/min。生物固定床設置 6 個採樣口，其 EBCT 分別為 5、10、15、20、25 與 30 分鐘，生物處理系統之組裝設備如圖 1 所示。

非揮發性溶解有機碳 (NPDOC) 之分析

樣品先以 0.45 μ m 濾紙過濾後，以 6 N HCl 酸化至 pH<2，再以高純度空氣曝氣 5-10 分鐘，利用總有機碳分析儀 (SHIMADZU TOC-5000A, Japan) 進行非揮發性溶解有機碳 (NPDOC) 之分析。

其他各項水質參數主要是依照行政院環保署環境檢驗所頒定或美國水及廢水標準檢驗方法 (Standard Method) 第 20 版之水質檢驗方法進行。

結果與討論

鳳山水庫原水水質分析

本研究使用之原水均採自鳳山淨水廠之進水車站，原水之主要水質特性 (pH、濁度、氨氮與 DOC) 其分析結果則如圖 2 所示，其中 pH、濁度、氨氮等乃由現場每日實地取樣於鳳山廠之水質實驗室分析，DOC 則每週取樣 2~3 次冷藏快遞至交通大學環工所實驗室進行分析。由 92 年 1 月至 92 年 8 月間取樣之分析顯示，在 pH

項大致均維持於 7.6 左右變化甚小；濁度因先有水庫沉澱之故大多介於 4-6 NTU，8 月下旬以後因颱風關係，濁度值明顯增高達到 15 NTU。進水氨氮值偏高一直是鳳山水廠之主要問題，在 92 年 1-5 月月份，氨氮均維持在 4-8 mg/L 之間，92 年 6 月份以後，逐漸下降至 1.0 mg/L 以下；DOC 自 92 年 1-8 月份濃度介於 2-4 mg/L 之間。

生物濾床對濁度之去除性能評估

本模廠試驗期間 (92 年 1 月至 92 年 8 月)，鳳山水庫原水在不同 EBCT 下經生物濾床處理後，生物濾床進、出流水之濁度變化與濁度去除率如圖 3 與圖 4 所示，鳳山水庫原水平均濁度為 5.5 NTU，試驗期間各個 EBCT 下，生物濾床出流水之平均殘餘濁度為 2.8 NTU 與平均濁度去除效率為 45-46%，不受 EBCT 的影響。證明生物濾床有穩定濁度之功能。

生物濾床對 DOC 之去除性能評估

由於生物濾床中生物膜脫附、生物膠凝作用，使生物濾床之出流水中，常含有顆粒物，而這些顆粒物在混凝沈澱中，藉助本身重量即可沈澱，不會影響後續混凝程序之加藥量，因此本研究評估生物濾床對有機物之去除效率時，將顆粒狀之有機物排除，進行溶解性有機碳 (DOC) 之分析。試驗期間鳳山水庫原水其 DOC 濃度

介於 2 ~ 4 mg/L 之間，平均值為 3.16 mg/L。為探討生物濾床在不同 EBCT 對 DOC 之去除效率之影響，在 EBCT 於 5、10、15、20、25、30 分鐘進行採樣分析，圖 5 與圖 6 分別是不同的 EBCT 下 DOC 之殘餘濃度與去除率；生物濾床出流水中 DOC 之平均濃度由原水的 3.16 mg/L，依序降低為 2.62、2.63、2.44、2.44、2.33、2.38 mg/L，隨生物濾床 EBCT 之增加而緩慢降低，當 EBCT 高於 15 分鐘後，延長 EBCT 時間，對提昇 DOC 之去除功能並不顯著；以去除率而言，生物濾床之 EBCT 為 5 分鐘時，DOC 之去除率為 16.58%，當 EBCT 延長 10 分鐘至 15 分鐘時，DOC 之去除率提昇為 21.24%，當 EBCT 再延長 15 分鐘至 30 分鐘時，DOC 之去除率為 25.13%。生物濾床 EBCT 在 30 分鐘時對 DOC 之去除效率為 23.77%。

生物濾床對氨氮之去除性能評估

鳳山水庫於試驗期間原水之氨氮濃度介於 0.3-8 mg/L 之間，平均濃度 5.8 mg/L，鳳山水庫原水之氨氮濃度變異非常大。為探討生物濾床在不同 EBCT 對氨氮之去除效率之影響，在 EBCT 於 5、10、15、20、25、30 分鐘，採樣分析結果如圖 7 與圖 8 所示，生物濾床出流水中氨氮之平均濃度由原水的 5.80 mg/L，依序降低為 0.47、0.21、0.13、0.12、0.11、0.10 mg/L，以平均值而言，生物濾床 EBCT 超過 5 分鐘，其出流水之平均

氨氮即可小於 1 mg/L，而氨氮之去除率於 EBCT 5 分鐘時為 96%，EBCT 為 10 分鐘時，氨氮之去除率提升為 96%，而後增加 EBCT 至 30 分鐘，氨氮之去除率則維持在 98%，顯示當生物濾床之 EBCT 超過 10 分鐘後，提高 EBCT 並未能對氨氮之去除提供顯著之效益。但在 92 年 4 月 7 日至 92 年 4 月 11 日期間，正值鳳山水庫原水之氨氮濃度最高值達 7.12 ~ 7.68 mg/L，此時生物濾床之 EBCT 為 5 分鐘時，生物濾床出流水中氨氮濃度介於 1.38 ~ 1.96 mg/L 之間，無法達到飲用水水源水質對氨氮之管制標準為 1 mg/L 之要求，為安全的要求，生物濾床之 EBCT 仍需設定為 10 分鐘較適宜。

生物濾床前處理經濟效益概算

在以鳳山水庫原水之氨氮平均濃度為 5.80 mg/L，生物濾床前處理之氨氮去除率 95%，氨氮之去除量為 5.5 mg/L，為估算前提下一般折點加氯之加氯量以氨氮濃度之 10 倍計算，則可發現鳳山水庫原水如以生物濾床取代前加氯，至少可節省 55 mg/L 之加氯量（因未計入 DOC 去除所減少之加氯量），在每日供應 20 萬噸下，每天則可節省 11,000 Kg 之加氯量（ $200,000 \text{ m}^3/\text{day} \times 55 \text{ g/m}^3$ ），目前自來水公司每公斤氯之購入價格約為 7.5 元，則每噸水得以減少 0.41 元之預氯操作成本，每天可節省 82,500 元（每年可節省 3,011 萬元）之加藥成本。

為計算生物前處理之初設成本（不含

泵浦系統)，假設鳳山水庫以每日供應 20 萬噸原水計算，若生物濾床前處理之 EBCT 訂為 5、10、20、30 分鐘，則生物濾床之設計體積分別為 833、1,667、3,333、5,000 m³，以土木工程、機械工程、生物載體及試車工程四部分粗估工程初設成本 1,272、2,083、3,707、5,330 萬元（請參考提升傳統淨水廠處理程序效能之研究—鳳山場內模型廠試驗研究，第二年期中報告）。

由前面各節之實驗結果顯示，生物濾床前處理對濁度、DOC 與氨氮均具有不同程度之去除效果；以濁度而言，生物濾床之 EBCT 高於 5 分鐘後，延長生物濾床之 EBCT，並無提昇濁度之去除功能；生物濾床前處理對 DOC 之去除效率，則隨 EBCT 之延長而緩慢提昇，當 EBCT 為 5 分鐘延長為 30 分鐘時，DOC 之去除率為 18% 提高至 25%；而生物濾床前處理對氨氮之去除功能，亦隨 EBCT 之增加而增加，當 EBCT 為 10 分鐘時，氨氮之去除率達到最高點，再延長生物濾床之 EBCT，對提昇生物濾床之氨氮去除功能並不顯著。由以上之結果分析，鳳山水庫原水若採用生物濾床前處理，EBCT 宜設計為 10 分鐘，其概估之初設成本為 2,083 萬元，若工程概估容許之誤差為 30%，則 EBCT 為 10 分鐘，出水量為 200,000 CMD 之生物濾床前處理工程，其初設成本約為 2,700 萬元（假設既有管線可使用），可由第一年所節省 3,011 萬元之加氣成本予以攤還，故應用生物濾床前處理以去除鳳山水庫原水之氨氮，取代既有之預氣系統，應具有經濟效益。

結論

- 一、採用生物濾床前處理以去除鳳山水庫原水之氨氮，取代既有之預氣系統，應具有經濟效益。
- 二、生物濾床之 EBCT 高於 10 分鐘時，其平均濁度去除效率為 46%，延長生物濾床之 EBCT，並無提昇濁度之去除功能。
- 三、生物濾床前處理對 DOC 之去除效率，隨 EBCT 之延長而緩慢提昇，當 EBCT 為 30 分鐘時，DOC 之去除率為 25.13%，其功能與去年研究結果相近。
- 四、生物濾床前處理對氨氮之去除功能，隨 EBCT 之增加而增加，當 EBCT 為 10 分鐘時，氨氮之去除率達到 96.28%，再延長生物濾床之 EBCT，對提昇生物濾床之氨氮去除功能並不顯著。

誌謝

本研究進行過程中，謝謝鳳山淨水廠同仁之參與與協助。並感謝自來水公司之研究經費補助。

參考文獻

- Chien, T. Y. C., Chen, J. W. J. and Pitts, W. E. (1997) Pilot Plant Demonstrates Biological

Filtration for Ammonia Removal in Water Treatment. Proc. AWWA WQTC, (CD-Rom).

Fujii, S., Niwa, C., Mouri, M. and Jindal, R. (1997) Pilot-Plant Experimenters for Improvement of Polluted Canl/Klong Water by Rock-Bed Filtration. *Water Sci. Technol.*, 35:8:83.

Kim, W. H., Nishijima, W., Shoto, E. and Okada, M. (1997) Evaluation of Biofiltration Processes as Pretreatment of Rapid Filtration for Drinking Water. *Jour. Water and Waste*, 39:5:392 (in Japanese).

Koki, M. (1993) The Existing State of the Advanced Water Purification Technology at CHATAN Water Purification Plant. *Jour. Japan Society on Water Environ*, 16:12:854 (in Japanese).

Lim, K. H. and Shin, H. S. (1997) Operating Characteristics of Aerated Submerged Biofilm Reactors for Drinking Water Treatment. *Water Sci. Technol.*, 36:12:101.

Marquet, R., Mietton-Peuchot, M. and Wheatley, A.D. (1999) Characterisation of Tricking Filter Effluent by Particle Size Distribution and High Performance Size Exclusion Chromatography. *Water Res.*, 33:6:1415.

Matsumoto, T., Nagano, H. and Kobayashi, M. (1992) Pre-Purification by an Biological Rotating Contractor in Water Treatment. *Environ. Conser. Eng.*, 21:2:40 (in Japanese).

Nohara, M., Nomura, K., Sekine, T. and Norimatsu, I. (1995) River Purification Method by Biological Contact Filtration. *Jour. Japan Society on Water Environ.*, 24:7:30 (in Japanese).

Sakimura, S. (1997) Direct River Purification Method by the BioCord the Contact Material Cord. *Jour. Water and Waste*, 39:3:241 (in Japanese).

Sasa, T., Tsukiyama, T., Matoba, H. and Sugisawa, S. (1995) Developing Biological Contact Filtration by

Fibrous Microorganisms Support Water Treatment. *IWSA Specilized Conference on Advanced Treatment and Integrated System Management Into the 21st Century*, Osaka, Japan.

Xu, K.Q., Tsukura, H. and Sudo, R. (1997) Purification of Raw Water by Biofilm Processes for Water Supply. *Jour. Water and Waste* 39:8:66 (in Japanese).

Yeh, H. H. and Chen, S. K. (1988) Packed Bed Filters for Ammonia-Nitrogen Removal from Raw Waters. *Water Supply*, 6:3:219.

Yeh, H. H., Huang, W. J., Hung, C. J. and Wang, S. C. (1995) Advanced Treatment Processes for Disinfection By-Products Control when Treating Polluted Source Water. *20th International Water Supply Congress*, Durban, South Africa.

黃志彬 (2000) 受污染水源之最佳可行處理技術研究 (第二年) 國立交通大學環境工程研究所。

鄒文源 (1999) BioNET 處理技術開發-自來水原水應用案例報告 工業技術研究院環安中心。

鄭幸雄 (1997) 台灣南部給水源污染特性及生物處理程序功能之探討, *自來水會刊*, 16:1:30。



