

不同淨水程序對藻類去除效率之研究

曾怡禎¹、葉宣顯²、賴文亮^{2,3}、陳振正^{2,3}
謝東穎²、林昇衡²、蔡木川²、王尚銘²

摘 要

本文主要比較澄清湖實廠及模廠，不同藻種於不同淨水程序間的變化及各淨水程序操作參數對去除效率之影響。結果顯示，澄清湖實廠以前氣/浮除/快砂濾之程序最佳，而模廠中前、後臭氧及 GAC 床程序較未預氣之傳統淨水流程為佳，但若降低濾速時，則濾後二者去除率則相差不大，因此高級處理程序可以承受較高流量之衝擊。至於不同藻種對淨水程序之影響，如細小之圓型綠藻(*Chlorella*)，易於混凝單元中去除，但其至快濾池時，則易穿透濾床；反之，細長型之矽藻，如 *Synedra* 或 *Melosira*，混凝被去除的效果較差，但卻容易被濾床截留去除。

綜合以上所述，水廠必須針對不同的優勢藻類來決定其操作參數，如原水以 *Chlorella* 為主時，則考量增加混凝劑量；但在 *Synedra* 或 *Melosira* 大量繁殖時，則降低濾速，如此可加強淨水程序對藻類的去除。

一、前 言

近年來因河川湖泊遭受污染，使水庫及湖泊中養分增加，而形成優養化的現象，進而使水中生態改變，大量的水生植物生長，水庫使用年限縮短，及水源利用價值降低。若淨水場直接以優養化之水庫或湖泊為原水時，易導致操作上之困擾，並使操作成本提高，而飲用水也常會有色度及臭味之問題(陳氏, 1984; 陳氏, 1986)，進而引起消費者之抱怨。澄清湖為大高雄地區主要民生用水水源，且受藻類的困擾已久，且在不同季節會有不同的優勢藻種繁殖，然基本上仍以綠藻/藍綠藻/矽藻三者輪替出現，其中藍綠藻及矽藻分別會產生類似於霉臭及魚腥之味道，對水質影響很大，因此加強藻類去除為澄清湖淨水場之主要目標。

目前澄清湖淨水場有三套淨水設備，分別為圓型混凝沉澱池/傳統式快砂濾、膠凝浮除/哈丁齊快濾池及混凝沉澱池/自動反沖洗快濾池，所有程序皆有前加氣。因民眾對水質之要求提高，故水公司於澄清湖設置高級處理模型廠進行相關之研究，模廠主要有二個流程，一為傳統淨水程序但未前加氣，另一程序為前臭氧/混凝/沉澱/快砂濾/後臭氧/結晶軟化/GAC 床/後加氣。

Mouchet(1998)曾分別使用二個 UPSBC (Upflow Pulsed Sludge Blanket Clarifiers)並聯，測試法國 Seine 河水在有、無前加氣對 *Pediastrum* 及 *Melosira* 去除之影響，發現對沉澱池有預氣者之除藻效果優於未預氣者。Sukenik 等研究者 (1987)分別以氯、二氧化氯及臭氧做為前氧化劑，探討其對後續混凝去除 *Scenedesmus* 的影響，結果顯示：在高加氯量時，以氯為前氧化劑與沒有加氯比較，若要達到相同的藻類去除率，前者需要增加混凝劑量 15 至 20%，表示高加氯量不利混凝除藻，但臭氧及二氧化氯恰為相反。而 Antoine 等 (1998)在研究有、無前臭氧對藻類在浮除池後之去除率，前者約為 93%，而後者僅有 75%。至於藻類之形狀、結構也會影響混凝除藻之效果(Bernhardt et al., 1991; Steynberg, 1996)，而鐵鹽之除藻效果則較明礬為佳(Benoufella, 1994)。

-
1. 國立成功大學生物學系
 2. 國立成功大學環境工程學系
 3. 大仁技術學院環境工程衛生系

綜合以上所述，藻類之去除除受前氧化劑、混凝劑種類及加量之影響外，藻種也是重要之因子，故各研究者所得之結果仍不一致。然而澄清湖在不同時期，有不同的優勢藻類，故本研究的重點主要配合季節變化時，當湖中優勢藻種也隨之變化時，便採取設於澄清湖水庫之模型廠中之傳統、臭氧 / 活性碳程序及實廠程序單元之出水水樣，分析其水質，並比較討論其操作結果，藉以作為改善現有實廠或將來增建實廠時之參考，進而希望能提昇大高雄地區之飲用水品質。

二、實驗流程、單元規格及分析方法

1. 模型廠

模型廠主要流程可分為二。其中流程一，主要是模擬澄清湖淨水廠之現有傳統淨水程序，但不實施前加氣，以視使整個流程生物活性化後，是否可以生物氧化方式去除氮與有機物等污染物，以減少三鹵甲烷等氯化有機物之生成。目前流程為原水/快混/膠凝/沉澱/砂濾/活性碳濾床(快濾池與活性碳濾床以並聯或串聯操作)/氣接觸槽。流程二之處理流程為前臭氧/混凝/沉澱/過濾/後臭氧/流體化結晶軟化/GAC 床/氣接觸槽，其中臭氧部份分為前臭氧及後臭氧，前者之目的在於藉微膠凝作用，增進混凝對濁度之去除與延長砂濾濾程，而後者除有殺菌作用外，並有增加水中有機物生物分解性之作用，除可促進後續 GAC 床之生物活性，亦即形成所謂生物活性碳(BAC)之外，並可藉 GAC 之吸附作用進一步去除溶解性有機物。而模廠主要單元之規格則詳述如下。

1-1 混凝沉澱

試驗期間，快混池攪拌機之轉速定於 110 rpm，而液體硫酸鋁 (7.5%, Al_2O_3) 之加藥點則設置在快混池之進水口處，本試驗期間流程一及流程二之明礬加藥量均為 80 mg/L。至於慢混池之 G 值兩流程均控制在 40 sec^{-1} ；沉澱池兩流程均採斜管沉澱池，其溢流率流程一為 18.8 ~ 68.4 m^3/m^2-d ，而流程二為 34.9 ~ 69.8 m^3/m^2-d 。

1-2 快濾床

兩流程之快濾床內之濾料均採雙層鋪設，下層為石英砂 25 cm，上層為無煙煤 35 cm，無煙煤與濾砂有效粒徑分別為 0.52 mm 及 0.38 mm。試驗期間，兩流程之濾速控制在 100~200 m/d。

1-3 臭氧接觸槽

臭氧接觸槽槽體材質為 SUS304，包含三支接觸槽，槽管徑分別是 25 cm、25 cm 及 38 cm，槽高度皆為 4.5 m。進流水從槽體上端流入，進流口設於每一支接觸槽距槽頂下 35 cm 處，亦即水流方向採向下流式。而臭氧氣體則可由任何一支接觸槽底部之散氣盤注入，氣體採向上流式，氣體注入量由各別之流量計以針閥控制之。臭氧是由臭氧產生機 (OZAT CFS-1, Ozonia, France) 以液氧製造。試驗期間，前、後臭氧量之劑量分別控制在 0.5~1 mg/L 及 1.6~2.8 mg/L。

1-4 粒狀活性碳(GAC)床

傳統淨水程序之 GAC 床，填充 60 cm 之粒狀活性碳 (Filtrisorb 300, Calgon)，其 EBCT 為 4.3 min。至於後臭氧程序後，設置二支內徑 50 cm，高度 3.5 m 之 GAC 床，裏面分別填裝高度為 62 及 110 cm 之粒狀活性碳 (Filtrisorb 300, Calgon)，其 EBCT 分別為 7.1 及 12.5 min。

2. 澄清湖實廠

本場目前之處理設施可分成三套，分別為圓型混凝沉澱池/傳統式快砂濾，膠凝浮除/哈丁

齊(Hardinge)快濾池及平底式混凝沉澱池/自動反洗快濾池(Auto backwashing filtration, ABF)，所有程序皆有前加氣。其中圓形混凝沉澱池設計之溢流率為 54.8 m/d，而平底式混凝沉澱池設計之溢流率為 113.8 m/d。對於快濾池之設計濾速，傳統式、哈丁齊及自動反沖洗快濾池分別為 450、180~200 及 200 m/d。

3. 水質之分析方法

本模廠之試驗中各種水質參數主要依據美國水及廢水標準檢驗方法(Standard Methods)第十九版進行。至於藻類之測定，採樣後需立即以直徑 25 mm (0.45 μm) 之濾紙過濾，並記錄過濾之水量。真空過濾時，須注意最初壓力要小於 50 kg/cm²，而當水樣殘留 5 cm 高時，此時便降低壓力至約 12 kg/cm²，持續過濾，直至濾紙保持溼潤即可，並將濾紙靜置隔夜，俟水分蒸發後，滴上浸漬油 (immersion oil, ZEISS, Germany)，等濾紙變成透明狀，即可在顯微鏡下計數。而藻種的鑑定則對照圖鑑加以判定。

三、結果與討論

1. 藻類在不同季節之變動

表 1 為澄清湖原水在試驗期間優勢藻種之變動情形，主要以 *Chlorella*、*Cyclotella* 及 *Microcystis* 為主，但陳氏(1984)調查時，係以 *Oscillatoria*、*Melosira* 及 *Synedra* 為主。而模廠在 87 年 11 月操作運期間曾因藻類大量繁殖，造成快濾池濾程縮短，故模廠流程在一般參數、有機物參數與消毒副產物均可符合現行，甚至未來飲用水水質標準之前提下(葉氏, 1999)，加強藻類在程序單元中之去除，應有益於模廠各單元功能之提昇。

表 1 不同時期之優勢藻類變化

採樣日期	23/11/98	10/12/98	02/01/99	07/01/99	02/02/99	24/02/99
優勢藻種	<i>Chlorella</i>	<i>Synedra</i> & <i>Melosira</i>	<i>Cyclotella</i>	<i>Cyclotella</i>	<i>Cyclotella</i>	<i>Microcystis</i>
藻類數量 (unit/mL)	16425	7266	2124	3681	3398	7080

2. 不同處理程序對藻類之去除

圖 1 為 87 年 11 月 23 日針對模廠流程一、流程二及澄清湖實廠中藻類數量在處理流程中變化之比較。本次採樣期間，原水中優勢藻類以 *Chlorella* 為主，此種藻類細胞微小，呈圓形或橢圓形，通常單獨存在，也有以一定的形態組成小群體，大量存在時會產生霉臭。模廠原水含藻類數量為 16,426 units/mL，而澄清湖實廠當日藻類數量為 12,744 units/mL，後者之藻類數量較前者為低，其原因可能為模廠取水口較淺，而實廠之取水口較深，當白天時，藻類多聚集在湖水表面，因此模廠原水中之藻類數量才會較高。

流程一及流程二，在明礬加量、濾速皆分別控制在 80 mg/L 及 200 m/d 時，流程二以臭氧為前氧化劑，兩流程快濾後藻類之數量分別降至 85 及 28 units/mL，去除率為 99.48 % 及 99.83 %，顯示前臭氧有促進除藻的功能，此與 Benoufella(1994)之研究有相近之結論。至於模廠流程一之快濾床及實廠之 ABF 對藻類去除效果不佳，尤以後者最差。實廠第三套之混凝沉澱出水藻類為 142 units/mL，經 ABF 濾池後僅降至 113 units/mL，其減少並不明顯，此與 Steynberg(1996)之研究結果，*Chlorella* 難以過濾去除之結果相同。故可看出實廠第二套之混凝過程並未能有效去除 *Chlorella*，故導致後續之 ABF 難以攔截 *Chlorella*。模廠流程一在混凝

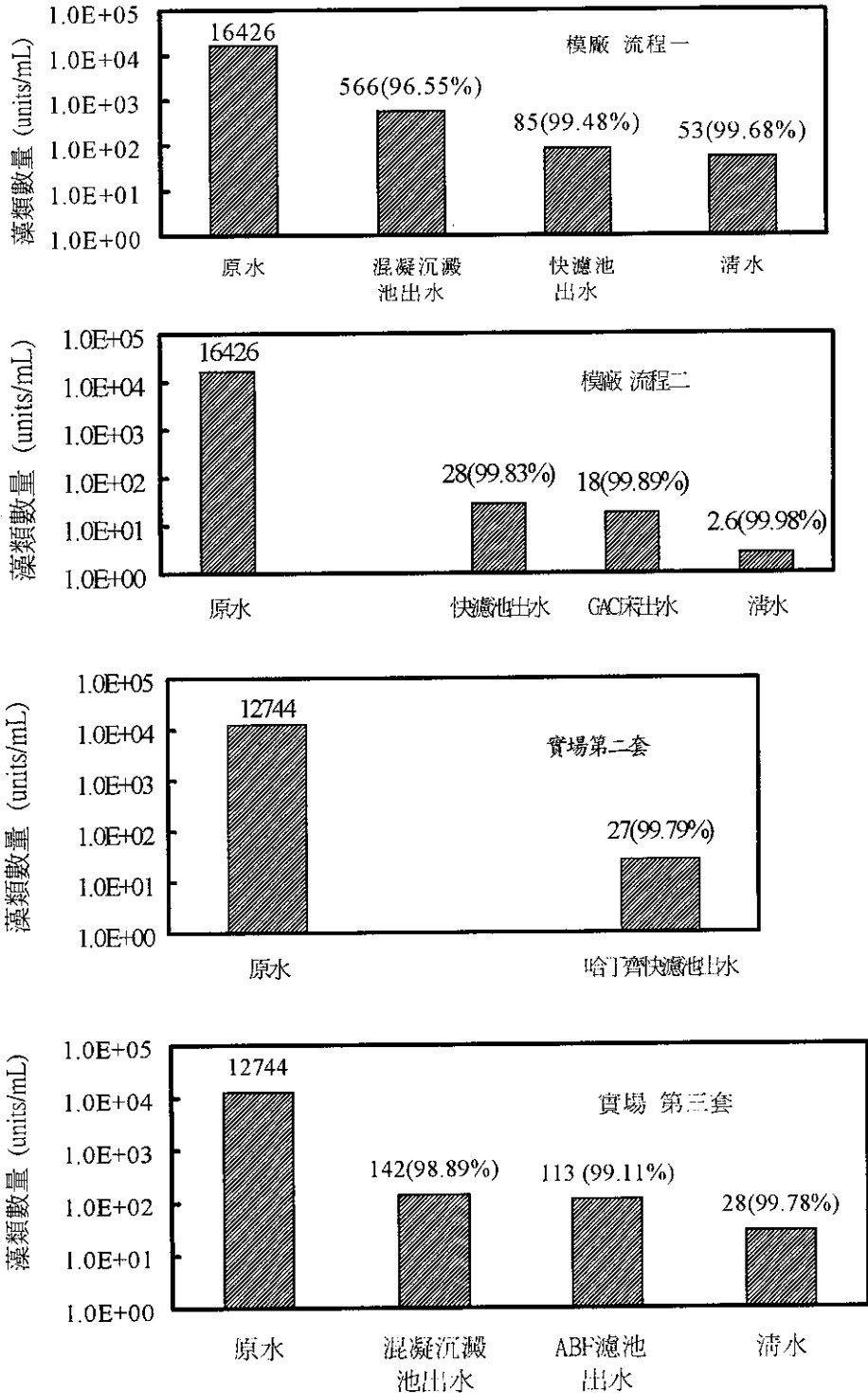


圖 1 模型廠及澄清湖實廠不同程序中藻類數量之變化 (23/11/98)

後之藻數為 566 units/mL，較實廠第三套之 142 units/mL 為高，其原因應是後者採預氣方式，依 Mouchet (1998) 之研究，預氣有增加藻類去除之功能。但隨後經快濾後，流程一之藻數降至 85 units/mL，而實廠第三套僅降至 113 units/mL，明顯地，後者之濾床並未能將藻類有效去除，此結果可能由加氣改變藻類性質或快濾床濾速之差異性所造成，此應可於日後之試驗持續追蹤。流程二在砂濾後有後臭氧及 GAC 床，在 GAC 後藻類數量會再降至 18 units/mL，顯示 GAC 床也擔負部分攔截除藻作用。對清水而言，不管程序一或程序二，藻類數量會再減少，其可能原因為後加氯破壞藻類個體所致。

比較澄清湖實廠中第二套及第三套淨水程序在經過快濾池之藻類數量，前者較後者為低，亦即顯示膠凝浮除及哈丁齊快濾池之除藻效果優於膠凝沉澱及 ABF 快濾池。

3. 濾速對藻類去除之影響

為比較濾速對藻類去除之影響，模廠於 87 年 12 月 8 日，將流程一及流程二之濾速分別調降為 110 及 100 m/d，希望能增加藻類的去除效果。圖 2 為模廠各程序單元出水之藻類採樣分析結果，此時原水之優勢藻類已由 *Chlorella* 轉為 *Melosira* 及 *Synedra*(參閱表 1)，其數量為 7267 unit/mL，較 88 年 11 月 23 日時，藻類數量 16426 unit/mL 為低。流程一在混凝沉澱後之除藻效率已降至 77.07%，而流程二因有前臭氧之關係，混凝沉澱後之去除率仍可達到 97.27%。流程一及流程二快濾後藻類去除效率相當好，其值分別為 99.86% 及 99.83%，此原因應是 *Melosira* 及 *Synedra* 均屬細長型之藻類，雖不易於混凝去除(Bernhardt, 1991)，但因快濾床對此藻類有較佳之攔截效果，且此次試程之濾速甚低，故造成流程一及流程二在快濾後的除藻效果差異性不大，與 87 年 11 月 23 日之結果相異。此次採樣由於原水中藻類之種類及數量，均異於 87 年 11 月 23 日之原水，故難以比較降低濾速對藻類去除效果的影響。

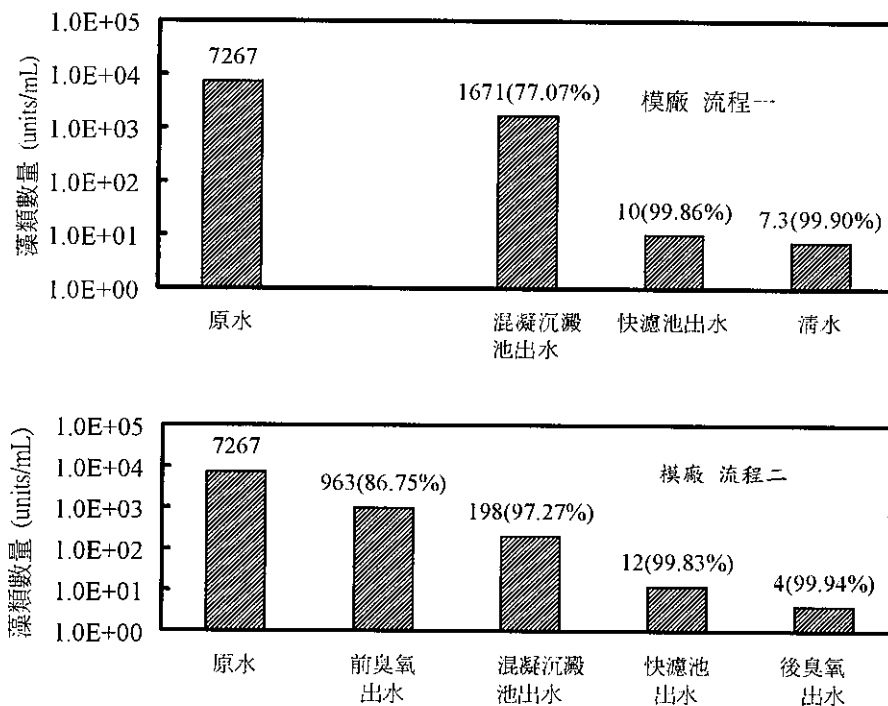


圖 2 模廠於濾速 100 m/d 時不同程序藻類數量之變化 (8/12/98)

依上述結論，為能確切比較濾速對藻類去除之影響，乃於88年1月2日及88年1月7日再度分別針對模廠及實廠各單元出水進行採樣，其結果繪製於圖3及圖4。其中1月2日，流程一及流程二濾速分別為110及100 m/d；在1月4日，將二個流程濾速改為200 m/d，並於1月7日採樣，其代表濾速200 m/d之資料。兩次採樣期間，因水溫再度下降，原水中之優勢藻類雖異於87年12月10日之水樣，但此二次採樣的優勢藻類皆相同，且數量相差較少，主要為矽藻 *Cyclotella* (表1)。由圖3可知，在混凝沉澱後藻類之去除率，流程一為88%，其去除率較87年11月23日(主要藻種為 *Chlorella*)為差；流程二則為99.29%，與87年11月23日之結果相差無幾。至於在快濾床方面，流程一之除藻效率為99.81%，流程二則為99.93%，此結果顯示，前臭氧之除藻效果在低濾速時並不明顯。

至於實廠方面，原水藻類含量為6514 unit/mL，因此藻種易存在於深層水中，且由於實廠之採樣口較模廠為深，故此次藻類之數量，實廠反較模廠為多。在混凝沉澱出水，模廠流程一之除藻效果為88%，仍較實廠第三套之96.96%為低，可見加氯對 *Cyclotella* 於混凝去除有增加之作用。至於87年1月7日澄清湖實廠濾後出水，第二套流程之除藻效率為99.53%，而第三套流程為88.75%，顯示前者之除藻效果優於後者(圖4)。由圖5可發現，流程一在快濾床後(濾速200 m/d)之除藻效果較濾速110 m/d時為差，但在流程二方面，不同濾速於快濾床後之去除率，並沒有明顯的變化，顯示流程二受濾速昇高的衝擊較小。

4. 不同藻種於不同處理程序中去除率之比較

圖6為模廠流程一及流程二於不同優勢藻類時，比較有、無前臭氧對混凝/沉澱/快砂濾對藻類去除之影響。圖6可發現，在87年11月23日時，斜板沉澱池之溢流率為34.2 m/d，流程一之混凝沉澱對 *Chlorella* 之去除率為96.55%，於87年12月8日，因進流量降低而使沉澱池溢流率降為18.8 m/d，此時優勢藻類為 *Melosira* 及 *Synedra*，而去除率則降至77.07%，而此兩次之混凝劑量均為80 mg/L，可見 *Melosira* 及 *Synedra* 較不宜混凝去除。在88年1月2日，溢流率維持在18.8 m/d，混凝劑量仍為80 mg/L，此時優勢藻種為 *Cyclotella*，其於混凝沉澱之去除效果較 *Melosira* 及 *Synedra* 為佳，但較 *Chlorella* 為差。在過濾池方面，*Chlorella* 的去除效果明顯較 *Synedra* 及 *Melosira* 為差，可見 *Chlorella* 並不適於過濾去除，而 *Synedra* 及 *Melosira* 則較易由此去除。再者流程二因有前臭氧之單元，混凝對不同藻種之去除，均在97.27%~99.49%之間(圖7)，較流程一穩定，表示前臭氧有益於混凝除藻，並降低後續處理程序之負擔，故流程二砂濾後之除藻效率可控制在99.83%~99.93%。

四、結論

經由比較澄清淨水實廠及模廠不同淨水廠程序單元之組合及其操作參數與各種藻類去除率間之關係，可獲得下列數點結論：

1. 澄清湖內之優勢藻種隨季節及水溫而異變，由綠藻、矽藻及藍綠藻輪替交換。水溫低時，以矽藻類為主，可產生魚腥味，而水溫高時，以藍綠為主，為土霉味。
2. 不同之藻種在淨水程序中去除率不同，如細小之圓型綠藻(*Chlorella*)，易於混凝單元中去除，但其至快濾池時，則易穿透濾床；反之，細長型之矽藻，如 *Synedra* 或 *Melosira*，混凝被去除的效果較差，但卻容易被濾床截留去除。
3. 在低濾速操作，模廠之混凝/沉澱/砂濾與前臭氧/混凝/沉澱/砂濾之除藻效果相近，在高濾速時前者之去除效果則較後者為差，顯示後者對藻類之去除較後者穩定。
4. 在實廠各處理流程之比較，結果顯示以前氯/膠凝/浮除/砂濾之程序除藻效果最佳。可見前氧化有助於除藻，而浮除之除藻效果優於沉澱。

5. 建議以優養化水體為水源之淨水廠，應偵測原水中所含之優勢藻種，並據以決定其操作參數，如原水以 *Chlorella* 為主時，則考量增加混凝劑量；但在 *Synedra* 或 *Melosira* 大量繁殖時，則降低濾速，如此可提昇對藻類之去除率。

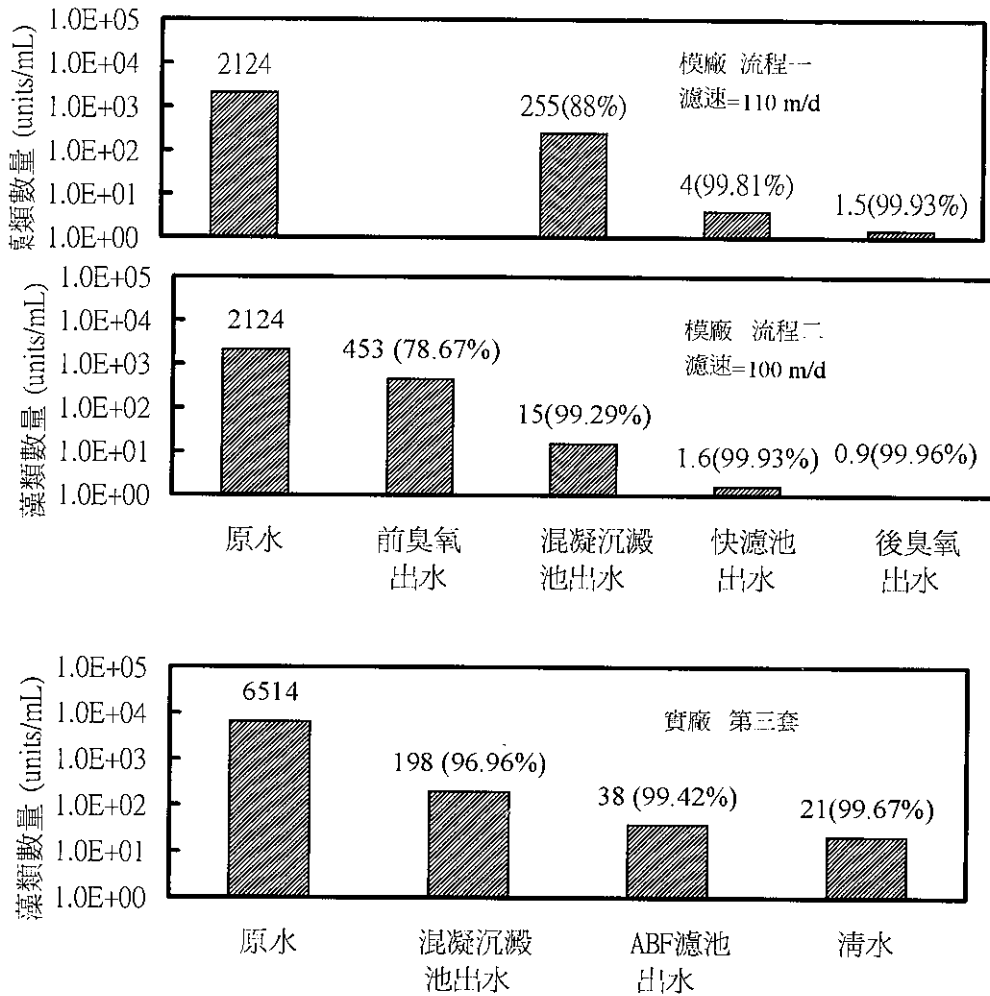


圖 3 模廠及澄清湖實廠不同程序中藻類數量之變化(2/1/99)

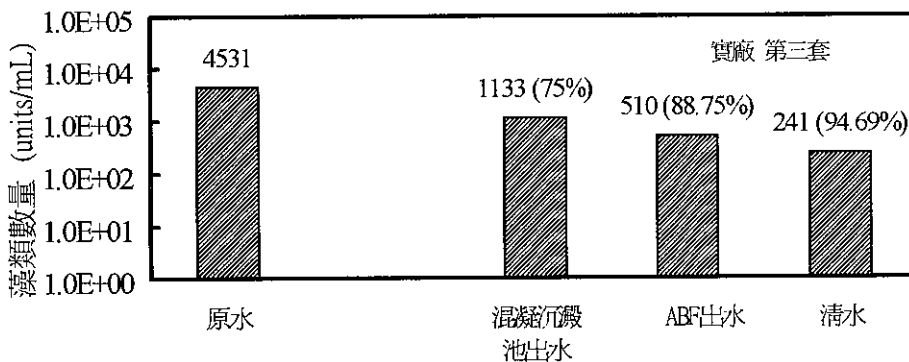
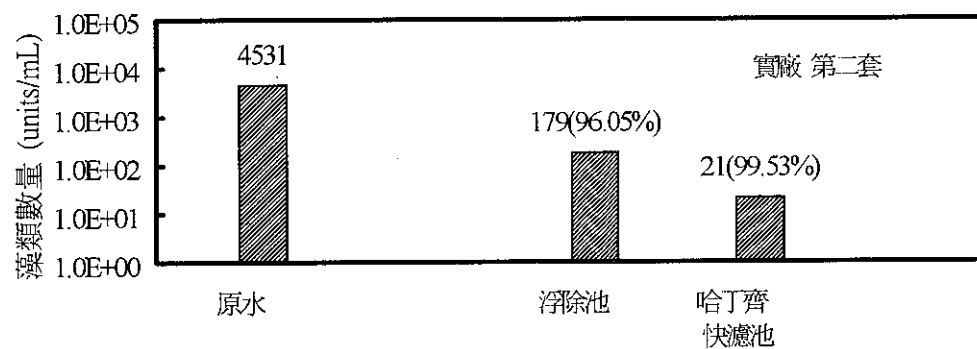
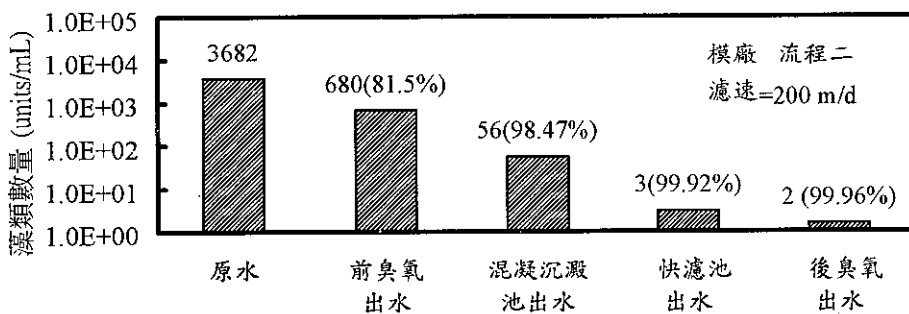
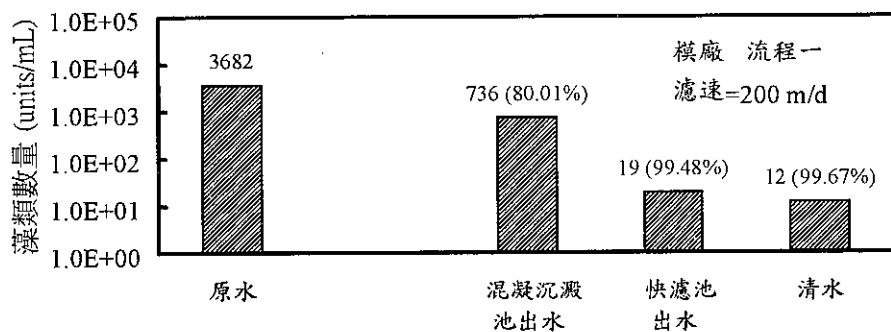


圖 4 模廠及澄清湖實廠不同程序中藻類數量之變化(7/1/99)

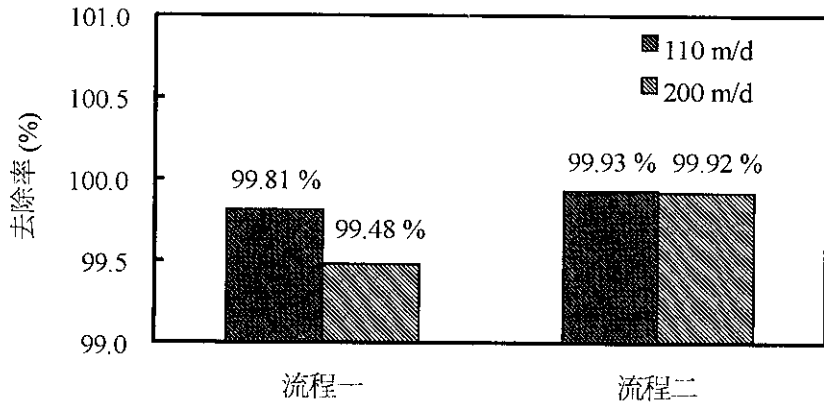


圖 5 流程一、流程二於不同濾速下對藻類去除率之影響

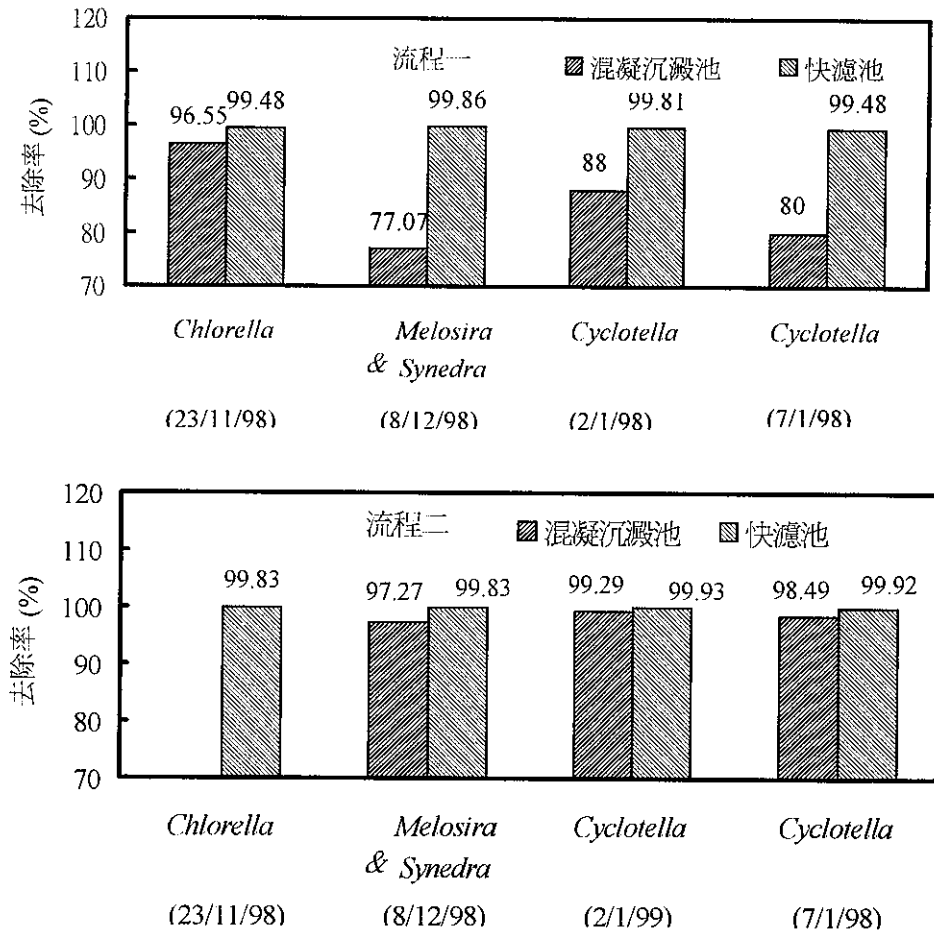


圖 6 流程一及二在不同優勢藻種時，比較有、無前臭氧對混凝沉澱及快砂濾除藻之影響

誌謝

本研究承蒙台灣省自來水公司提供研究經費。計畫執行期間，並蒙該公司第七區管理處相關人員熱心提供資料，並協助採樣事宜，在此表示十二萬分之感謝。同時要感謝中國鋼鐵公司提供模廠研究設備經費，工業技術研究院化學工業研究所在設備維護上所提供之協助。

參考文獻

- Benoufella, F., Laplanche, A., Boisdon, V., and Bourbigot, M. M., Elimination of *Microcystis* Cyanobacteria (Blue-Green Algae) by an Ozonflotation Process : A Pilot Plant Study, *Wat. Sci. Tech.*, 30(8), 245-257, 1994.
- Bernhardt, H. and Clasen, J., Flocculation of Micro-organisms, *J Water SRT-Aqua*, 40(2), 76-87, 1991.
- Mouchet, P. and Bonnelye, V., Solving Algae Problems : French Expertise and World-wide Applications, *J Water SRT-Aqua*, 47(3), 125-141, 1998.
- Steynberg, M. C., Guglielmi, M. M., Geldenhuys, J. C. and Pieterse, J. H., Chlorine and Chlorine Dioxide : Pre-oxidants Used as Algocide in Potable Water Plants, *J Water SRT-Aqua*, 45(4), 162-170, 1996.
- Sukenik, A., Teltch, B., Wachs, A. W., Shelef, G., Nir, I. and Levanon, D. Effect of Oxidants on Microalgal Flocculation, *Wat. Res.*, 21(5), 533-539, 1987.
- 陳是瑩、曾怡禎, 「湖生態的研究 I : 澄清湖水質與藻類季節性變遷的研究」, 中華民國自來水協會第一屆給水技術研討會論文集, 1984.
- 陳是瑩、曾怡禎, 「澄清湖藻類圖鑑」, 國立成功大學生物系, 1986.
- 葉宣顯、鄭幸雄、曾怡禎、林財富, 「澄清湖高級淨水處理模型廠試驗之研究」, 1999.