

澄清湖曝氣工程對水庫藻類及臭味影響之評估

Assessing the Effects of Artificial Aeration System on Phytoplankton and Odor in Cheng-Ching Lake

莊淑滿¹ 溫清光² 陳是瑩³ 張穗蘋¹

摘要

澄清湖(22°40'N; 120°20'E)係一典型的熱帶人工湖泊，湖中的營養狀態深受溫度、日照、季節性降雨等之影響，全年水溫均在20°C以上，水溫梯度不大；高生產力、高分解率為該湖的特性。

依據澄清湖以往相關之調查與監測資料，顯示其具有諸多熱帶人工湖泊之特性，如高度季節性變化的藻類相：澄清湖曾經出現之藻類共有35科79屬131種，其中綠藻門(Chlorophyta)有16科44屬84種，矽藻門(Bacillariophyta)有9科13屬15種，藍綠藻門(Cyanophyta)有3科12屬22種，其他藻類有7科9屬9種。曝氣工程實施後所進行的一整年實驗觀察(民國83年2月至84年1月)，發現藻類共有27科56屬，全水域藻類平均數為 3729 ± 2257 ~ 12910 ± 5895 units/L；藻類數呈明顯季節性變化，兩個高峰期分別在梅雨季節過後的次月(6月)及颱風季節過後的次月(9月)。本研究並發現優勢藻種在曝氣前後稍有改變，尤其是呈鏈狀或成群體之藍綠藻藻種，如以往每年7月迄次年2月大量出現之顫藻(*Oscillatoria*)，目前出現數量明顯減少。優勢種評估法和卡爾森優養指數評估法皆顯示目前澄清湖仍屬於優養水域。曝氣前後，湖水初嗅數並無明顯差異。在本研究調查期間，澄清湖湖水的初嗅數起伏不大，平均初嗅數為 5.4 ± 3.5 ；初嗅數於83年8月達最高峰(初嗅數為15)，此時表層水之放線菌含量達最高峰約300 units/mL，此時也是表層水之藍綠藻達最高峰(6月)後的第2月。

關鍵字：曝氣工程，澄清湖，藻類，優養化。

前言

澄清湖係人工修建之蓄水庫，完成於民國32年，湖底平坦，標高13.2公尺，滿水位標高18公尺，最大蓄水容積為 2.5×10^6 m³，水體表面積為300萬平方公尺，平常水深介於3-4公尺，因湖淺，故成層現象不完全，只要有風的攪動即可能破壞其分層，缺乏較長期穩定的成層時期，湖泊屬多循環湖(polymictic lake)。因受其引水河川—高屏溪的日益污染和澄清湖底泥營養鹽之釋出等影響，致使澄清湖水質趨於惡化，省自來水公司仍積極從事各項之水質改善工程，本研究係針對曝氣工程對藻類相及臭味影響之改變進行探討。

¹ 崑山工專環境工程科講師

² 成功大學環境工程研究所教授

³ 成功大學生物研究所教授

澄清湖水庫之優養特性

澄清湖係一典型之熱帶水庫，水溫年週期性變化小於 15°C ，各月之月平均溫度均高於 20°C ，高溫與強日照致使湖中藻類可終年生長。從民國70年間的調查時，本湖即已呈優養現象，其優養之原因經陳是瑩等人^[1,2]之研究認為主要是(1)引水之曹公圳之水源污染，尤其在雨季十分明顯，(2)湖底淤泥不斷釋出各種營養鹽，(3)由於浮游植物之生長而導致有機磷和有機氮的增加，(4)放線菌之季節性增殖亦會使無機磷和無機氮增加。

基本上熱帶水庫與溫帶水庫之優養化過程十分相似，但是在優養化特徵(eutrophic symptom)、水質指標和營養狀態方面則與溫帶地區有所不同，熱帶水庫氮磷比偏低，因此可行固氮作用的藍綠藻常成為優勢藻種；氮營養鹽常成為藻類生長的限制因子，因此Thornton^[3]建議熱帶與亞熱帶湖泊或水庫之中養(mesotrophic)與優養(eutrophic)磷營養鹽濃度分界應提升至 $50\text{--}60\ \mu\text{g P/L}$ 。此外熱帶水庫藻類可終年生長，但藻類相受雨季的影響頗巨，最大藻類量產生在雨季後的一或兩個月。民國81年9月實施曝氣工程之後，溫清光等人之研究^[4]顯示，澄清湖之葉綠素平均濃度達 $25\ \mu\text{g/L}$ ，沙奇盤深度平均僅94公分，總氮濃度高達 $2770\ \mu\text{g N/L}$ ，年平均總磷濃度亦達 $210\ \mu\text{g P/L}$ ，由表一之比較結果可知澄清湖水質之優養化程度遠超過熱帶水庫之優養標準。

表一、澄清湖曝氣工程實施後水質之優養狀態表

營養指標	中養與優養之平均分界 ¹		澄清湖 ² 水質
	溫帶湖泊	熱帶湖泊	
初級生產($\text{g C/m}^2\ \text{day}$)	1.0	2-3	—
葉綠素 a ($\mu\text{g/L}$)	10-15	10-15	25
總磷 ($\mu\text{g P/L}$)	30	50-60	210
總氮 ($\mu\text{g N/L}$)	50-100	20-100	2770
常見之限制營養鹽	磷	氮	N/P < 16
優勢藻種	矽藻	藍綠藻	綠藻及藍綠藻
光合作用效率 (%)	< 1%	> 2-3%	—

1. 引自 Thornton, 1987^[3]。

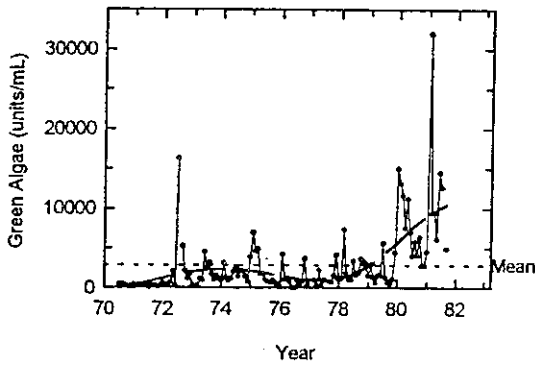
2. 引自溫清光, 1995^[4]。

水庫曝氣前歷年藻類繁殖狀況及臭味統計分析

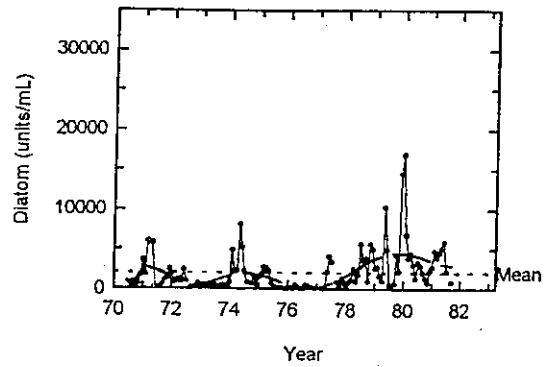
歷年藻類繁殖狀況統計分析

依據以往相關之調查與監測資料^[1,2,5,6,7,8,9,10,11]統計，澄清湖曾出現之藻類計35科79屬131種。其中綠藻類計有16科44屬84種，矽藻類計有9科13屬15種，藍綠藻類計有3科13屬22種，其他藻種合計有7科9屬9種。

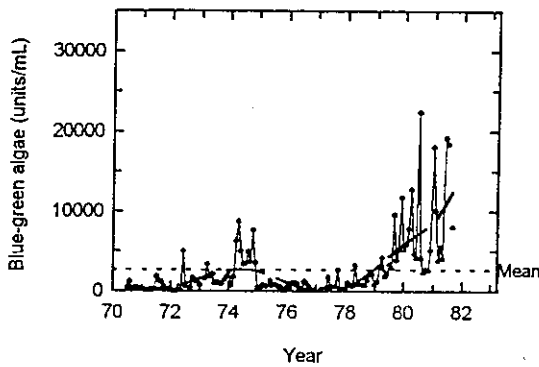
自來水公司之資料^[12]與陳是瑩等人^[1,2]之研究資料，顯示自民國70年迄82年澄清湖水中綠藻、矽藻、藍綠藻和以上三種藻類之總量的長期變化情形如圖一至四，自民國70年至79年期間平均藻類總量約為 $5 \times 10^3\ \text{units/mL}$ ，其中民國72年夏天及民國74年迄75年上半年藻類數量有偏高情形，雖然水公司曾分別於72年、77年及78年施加 CuSO_4 ，使藻類數



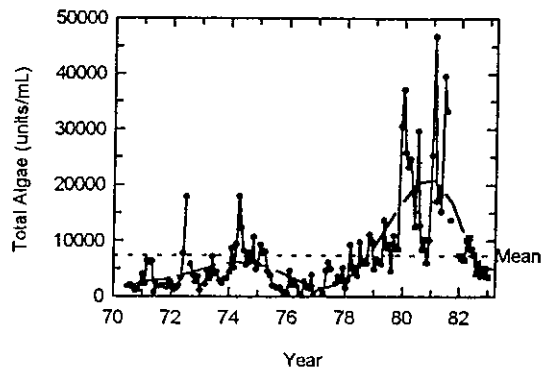
圖一、民國70年迄81年澄清湖湖水中綠藻的長期變化情形(70年7月迄72年6月之藻數為陳是瑩等人之調查結果,其餘為自來水公司之調查結果)



圖二、民國70年迄81年澄清湖湖水中矽藻的長期變化情形(數據來源同圖一)



圖三、民國70年迄81年澄清湖湖水中藍綠藻的長期變化情形(數據來源同圖一)



圖四、民國70年迄82年澄清湖湖水中藻類總量的長期變化情形(數據來源同圖一)

量減少,但長期效益似不顯著,民國80年以後藻類數量急驟增加,因此自來水公司進行了各項水質改善措施。

這段時間綠藻、矽藻、藍綠藻和藻量總數之月變化情形表示於圖五。藻類季節性變化,由長期資料顯示,每年2月及6和7月有兩個藻類出現高峰期,第一個高峰期與綠藻出現之高峰期相吻合,第二個高峰期則與藍綠藻之月變化相吻合。

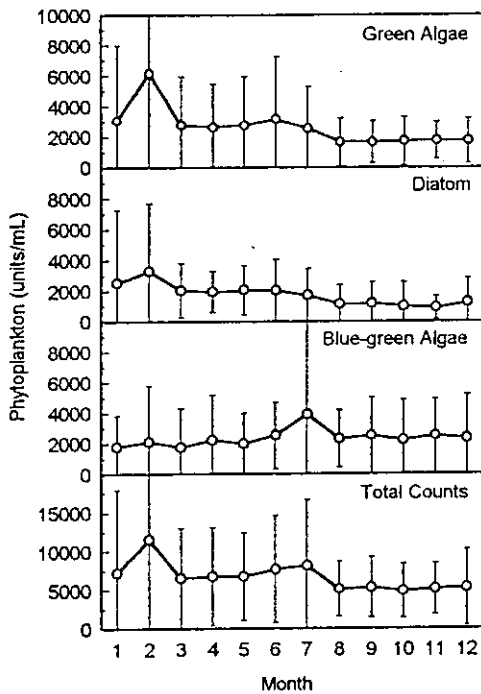
歷年藻類繁殖狀況與臭味之關係

有關澄清湖湖水臭味及澄清湖藻類繁殖狀況與臭味關係之研究極少,歷年之研究報告僅陳是瑩^[13,14]及高銘木^[15]等三篇;其研究結果顯示,曝氣工程實施前澄清湖湖水季節性臭味的發生,主要是屬於生物性,係由於藻類與放線菌的大量繁殖所造成。

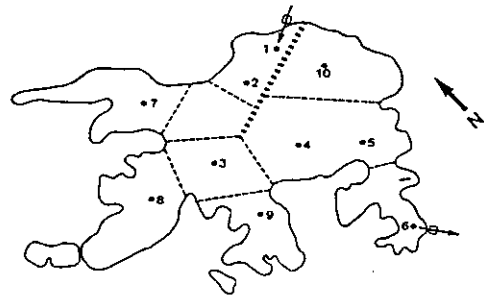
實驗材料與方法

一、採樣時間與地點

自民國83年2月至84年1月止,每月一次前往澄清湖採樣、調查,採樣地點如圖六,



圖五、民國70年迄81年澄清湖湖水中藻類的月變化情形(數據來源同圖一)



圖六、澄清湖取樣站地圖 • 取樣站

共設置十個取樣站。除第一個取樣站外，每個取樣站以分別取表層、中層、下層三層水樣為原則。表層水樣在水面下0.3公尺處採樣，中層水樣在全深一半處採樣，下層水樣在湖底上方0.5公尺處採樣。另外從5月開始亦在伏流水入口處設置取樣站(表層水樣)，從8月開始在夢裡加壓站增設取樣站(表層水樣)。

二、藻類的鑑定與計數

每個採樣點均採取一公升水樣，加入3mL路戈氏碘液(Lugol's solution)或3%~5% 福馬林保存，水樣瓶標記後放置暗處保存，水樣保存以一個月為限。每個水樣經適當濃縮後均以位相差顯微鏡(Olympus BX50)鑑定藻種，並用深度為0.2mm的計數池(Brand, Fuchs-Rosenthal)計算綠藻類、矽藻類和藍綠藻類的各別總含量或各個藻屬之含量。藻類的計數，原則上以單一細胞為準，如遇有自然狀態的群聚體，除*Melosira*係以細胞計數外，其餘均以一個自然群聚體為準。

三、優養化評估方法

利用(1)優勢種評估法、(2)歧異度(diversity)指數評估法、(3)水質指數(quality index)評估法及(4)卡爾森(Calson)優養指數評估法等四種評估方法進行分析，評估曝氣後澄清湖優養化程度：

1、優勢種評估法

利用藻類鑑定與計數的結果，判定各月優勢藻種之種類，並依據日本水產資源保護協會(1980)之判定標準^[16]，評估曝氣後澄清湖優養化程度。

2、歧異度指數評估法

生物歧異度指數是用於表示多種生物所組成的混合生物群落數量與種類之關係的一種指數。歧異度指數方法甚多如 Simpson 氏歧異度指數(1975)、Shannon 氏歧異度指數(1949)、McIntosh 氏歧異度指數(1960)、Margalef 氏歧異度指數(1968)、Menhirick 氏歧異度指數(1964)及 Fager 氏歧異度指數(1972) . . . 等^[17]。本研究擬採 Shannon 氏與 McIntosh 氏歧異度指數。並簡述如下：

(1) Shannon 歧異度指數(H)

$$H = \sum_{i=1}^s P_i \cdot \log_2 P_i$$

式中， P_i 為 i 種藻類之存在率， $P_i = N_i/N$ 。其中 N_i 為 i 種藻類數量， N 為所有藻類數量； s 為藻類種數。

(2) McIntosh 歧異度指數(M_cI)

$$M_cI = 1 - \left[\sum_{i=1}^s (P_i)^2 \right]^{1/2}$$

式中， P_i 為 i 種藻類之存在率， $P_i = N_i/N$ 。其中 N_i 為 i 種藻類數量， N 為所有藻類數量； s 為藻類種數。

3、水質指數評估法

另以前述 McIntosh 歧異度指數及 Shannon 歧異度指數求其平均綜合值，以作為水質指數(QI)。

$$QI = \frac{1}{2} \left(\frac{H}{s} + M_cI \right) \times 100\%$$

QI 值之理論最大為 100，對一般水庫而言，當 QI 值大於 75 時為優良水質； $50 < QI < 75$ 時，則屬中等水質，當 QI 小於 50 則為不良水質，即相當於優養水質。

4、卡爾森優養指數評估法

此法是由卡爾森^[18]所創立，使用湖水之透明度、葉綠素 a 及總磷等三種參數分別求出一個指數，再求三種指數之平均值即為優養等級指數；卡爾森優養指數小於 40 時為貧養水域，介於 40 至 50 時為中養水域，大於 50 時為優養水域。

曝氣後澄清湖藻類對湖水臭味之影響的評估方法

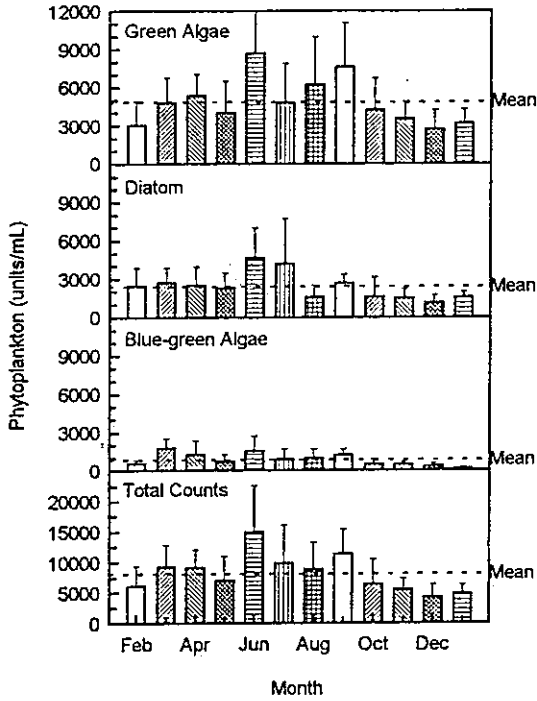
利用高銘木^[15]與本研究同時進行之「澄清湖曝氣工程對水庫藻類及臭味影響之評估」的實驗結果當作評估依據。

結果與討論

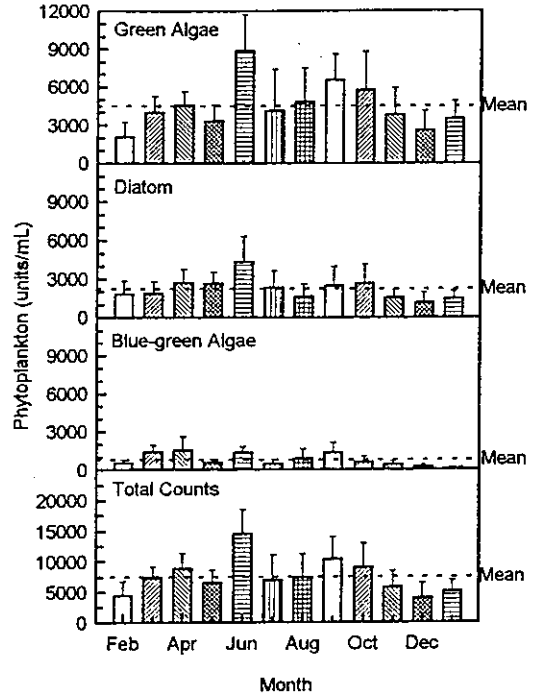
一、藻類數量與季節性變化

從1994年2月到1995年1月，本實驗所觀察到之綠藻、矽藻和藍綠藻三類藻種共有27科56屬；其中綠藻類計有14科34屬，矽藻類計有10科12屬，藍綠藻類計有3科10屬。調查結果分別列於圖七至十。從1994年2月到1995年1月，平均藻類總量表層水為 $4227 \pm 2190 \sim 14919 \pm 7669$ units/mL，中層水為 $4052 \pm 2413 \sim 14575 \pm 3901$ units/mL，底層水為 $2200 \pm 371 \sim 8790 \pm 2261$ units/mL；而全水域藻類平均數為 $3729 \pm 2257 \sim 12910 \pm 5895$ units/mL。與前述利用自來水公司之資料和陳是瑩等人之研究資料，所整理出民國70年迄82年澄清湖湖水中綠藻類、矽藻類、藍綠藻類和以上三種藻類之總量的長期變化情形（圖一至四）互相比較，83年2月至5月平均藻類總量比80~81年度高峰期為低，與前十三年累積平均藻總量相當；而83年6月的平均藻類總量雖有大增情形但仍比80~81年度高峰期為低；83年7月以後的平均藻類總量又有反降情形，除可能與曝氣工程有關外，亦可能與七月迄九月連續幾場大雨使湖水水力停留時間縮短，水中濁度增加，造成藻類的洗出(washout)及影響藻類之光合作用^[19]。民國80年及81年七月份藻類平均總數均達31510 units/mL，而調查期間七月份藻類平均總數僅7611 units/mL，藻類平均總數有明顯下降。83年10月藻類平均總數約6358 units/mL，83年11月迄84年1月之藻類平均總數均降低至5000 units/mL以下，與民國80~81年同期間之藻類總量維持在6000~37148 units/mL之情形相比，亦有明顯的下降。另外，由五月開始增加伏流水入口處採樣站，由調查結果可知此站水樣之藻類總量比其他採樣站為低，當然係因伏流水藻類尚未孳生的原因。83年8月迄10月夢裡加壓站之藻類平均總數約為5000 units/mL，比同期湖水中藻類平均總數稍低；但83年11月迄84年1月湖水中藻類平均總數明顯下降時，夢裡加壓站之藻類平均總數並未下降，平均約為8000 units/mL。

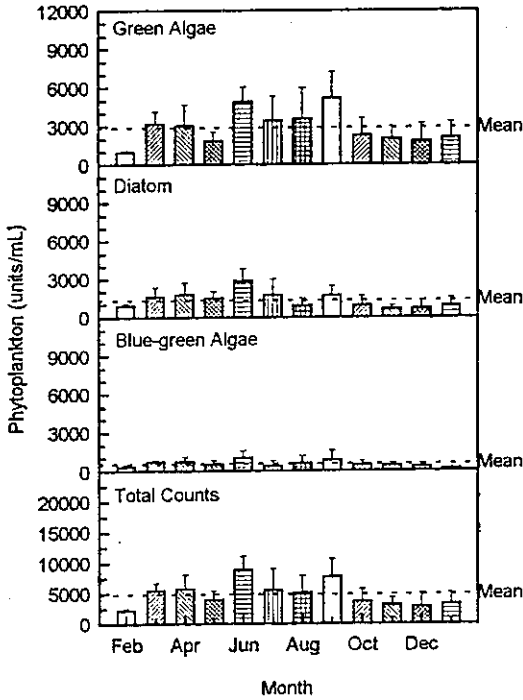
民國70年迄82年澄清湖湖水中藻類季節性變化，由圖五顯示，每年2月及6至7月有兩個藻類出現高峰期，第一個高峰期與綠藻類出現之高峰期相吻合，第二個高峰期則與藍綠藻類之月變化相吻合。本次調查期間，綠藻類、矽藻類、藍綠藻類和以上三種藻類之藻類總量的月變化情形如圖七至十所示，2月至5月的平均藻類總量無劇大變化，但六月份的平均藻類總量有大增情形，而七、八月份的平均藻類總量又有反降情形其可能原因已於前節說明；以往由每年9月迄12月藻類總數均維持在5500 units/mL左右，在此次調查中，九月份藻類總數平均則在9931 units/mL，十月份約為6358 units/mL，十一及十二月份則降到約4300 units/mL，其中以藍綠藻減少數量最為顯著；以往澄清湖中之藻類數於一月份時則開始增加，此次調查一月份藻類總數與十一與十二月份相較增加並不明顯。由各月份不同水層所採水樣中藻類總數比較，表層與中層藻類總數之差異不大，表層水全年藻類總數約為8000 units/mL，中層則約為7500 units/mL，表、中層與底層藻類總數之差異則較大，下底之全年藻類總數平均僅約4800 units/mL；此可能與澄清湖水淺，縱然是風的擾動，即能引起湖水垂直面的混合，尤其在曝氣工程實施後，其破壞分層，造成水體混合的情形是可以預期的，而且其混合情形也可由不同分層藻類數，或甚至其他如葉綠素、磷、氮營養鹽濃度上之差異而推斷。在不同分層中，以綠藻數目變異較大，相對的藍綠藻數目之變化則較少。另由本調查一年週期來看，澄清湖內之藻類相在曝氣工程實施後與曝氣前比較，第一個藻類高峰期延後一個月，由以往每年二月份延到仲春的三月，第二個高峰期仍是出現在夏季之六、七月。



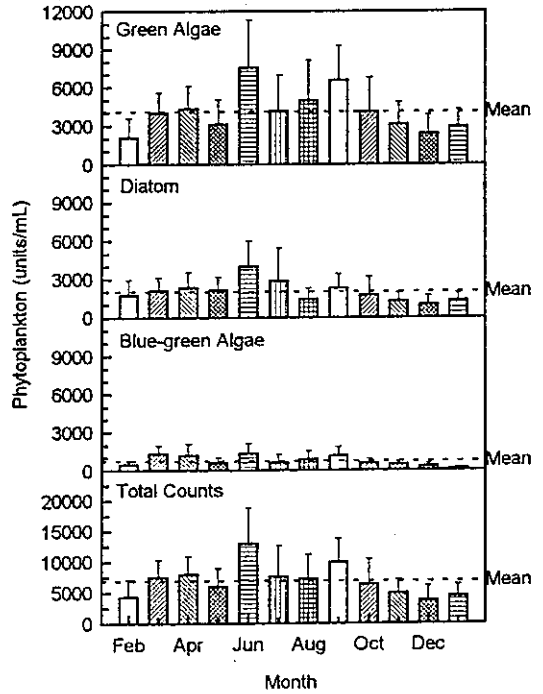
圖七、民國83年2月至84年1月澄清湖表層湖水中藻類含量的變化情形



圖八、民國83年2月至84年1月澄清湖中層湖水中藻類含量的變化情形



圖九、民國83年2月至84年1月澄清湖底層湖水中藻類含量的變化情形



圖十、民國83年2月至84年1月澄清湖全水域藻類含量的變化情形

二、優勢藻種之變化

一般湖泊中各種水生生物數量均維持其相對的穩定關係，一旦發生優養化現象，浮游植物中某些類屬可能得到充份的氮、磷等營養物質而大量繁殖；而另外一些類屬數量則有明顯減少的趨勢。這些優勢藻種，雖然只有少數之種類，因個體數目多、體型大或生產力高，以致可反應出藻類相與水質之特性，由陳是瑩等人^[1,2,6,7,8]以往相關研究顯示澄清湖之優勢藻種的出現除與水中氮、磷營養鹽含量有關外亦與季節性溫度變化及澄清湖高硬度、低矽含量的特性有關。以往澄清湖優勢藻種出現特性為：

1、藍綠藻類常於夏秋季時成為優勢種，主要為*Oscillatoria limnetica*與*Microcystis*屬之藻類，有時在湖面某些區域形成水華(algae bloom)，尤其當水溫達到30°C時藍綠藻即大量繁殖，而且放線菌伴隨藍綠藻之繁殖而大量孳生，以致引起原水霉臭與土味臭的問題。

2、澄清湖除秋季部分時段氮磷比會轉成大於15:1外，大部分均小於15:1，故氮常成藻類生長之限制因子，而有利於可自行固氮的藍綠藻繁殖，但當外部有機物污染或氨氮增加時則很快轉成綠藻為優勢藻種。

3、矽藻中*Synedra*屬之出現在春季，並形成優勢藻種，此時水溫在20°C左右，氮磷比最佳比值為4.5。當水溫升到25°C~28°C時，矽藻之*Melosira*將大量繁殖而成為優勢藻種，由陳是瑩等人以往之研究顯示*Melosira*屬之藻種包括*M. italica*與*M. granulata*，在此溫度範圍出現之優勢種為後者；而前者為低溫型，其出現期比*Synedra*早。

4、矽藻之大量出現除與氮、磷和溫度有關外，水中矽含量之影響亦頗大，此外矽藻之大量出現常伴隨湖水魚腥臭之發生。

澄清湖近年(74~81年)來各月份出現優勢藻種(屬)在澄清湖中可能出現優勢之月份及可能產生之困擾列於表二。本研究結果顯示，過去曾在澄清湖出現之藻種現在也幾乎會在湖中所有的測站出現，只是數量不一；出現藻種和數量與測站在湖中之地點或深度似乎並無絕對關係。湖中的優勢藻種似乎稍有改變，綠藻之出現較優勢，*Chlorella*於83年2月至5月在每一個測站均大量出現，佔絕對優勢，而在其他月份之出現數量仍高；從6月開始，綠藻之*Microspora*數量逐漸增多，從7月以後迄84年1月*Microspora*一直佔優勢(如表三)；其他如綠藻類之*Monoraphidium*、*Chlamydomonas*和*Golenkina*均在不同月份佔優勢。在本次調查期間，從2月至6月矽藻中的*Melosira*雖也曾出現，但數量並不多，而以*Synedra*和*Cyclotella*為矽藻之優勢藻，其他月份則以*Cyclotella*和*Melosira*同佔優勢。藍綠藻類則以*Microcystis*、*Merismopedia*和*Chroococcus*較佔優勢。本次調查期間一些呈群體或長鏈狀之藻種明顯減少，如以往於每年7月迄次年2月大量出現之顫藻(*Oscillatoria*)，目前出現數量稀少；*Melosira*和*Microspora*雖為長鏈狀藻類，但是由鏡檢中發現它們的長度均比一般自然長度為短，大約只有2-5個細胞長；此可能由於曝氣工程造成湖水之擾動，影響藻類生態。

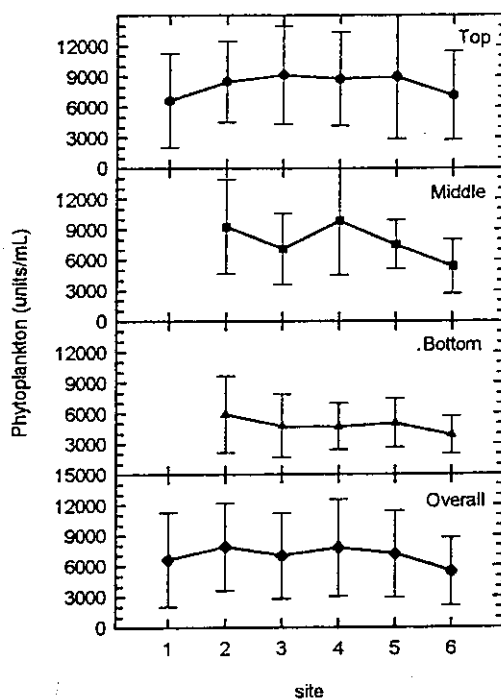
三、主流水流經路線藻類相之變化

由採樣點1,2,3,4,5,6之順序(即入水口到出水口之水流經路線)，其表、中、底層及不分層之藻類平均總數的變化情形如圖十一所示。綜合來看，若全水域不分層，以1號採樣點(即入水口)及6號採樣點(即出水口)之藻類平均總數比其他各採樣點相對較低，其他所經之各採樣點變化差異不大；不同深層之藻類平均總數的變化情形亦同。各採樣點於

表二、民國74至78年澄清湖湖水中排名前5名之優勢藻種可能出現優勢之月份和可能產生之困擾

藻種	可能出現優勢之月份	可能產生之困擾 ¹
CHLOROPHYTA		
Actinastrum	6-8,10	M
Ankistrodesmus	1	
Botryococcus	1,2,5	
Chlamydomonas	1-5,7-8,10-12	
Chlorella	1-7,9-12	F.C.,M,Co
Coelastrum	1,5,11-12	
Dictyosphaerium	11-12	F.C.,G
Golenkinia	3,4,9,11	
Hormidium	12	
Micractinium	2-3	
Pediastrum	5,7,9-12	F.C.,G
Scenedesmus	1-4,10-12	G
Westella	3	
CYANOPHYTA		
Anacystis	1-6,8-11	F.C.,Co,Ds
Aphanocapsa	2,3,7,10,12	Ds
Chroococcus	9	
Lyngbya	6	
Microcystis	10	Ds
Oscillatoria	1,3,4,5,8-12	F.C.,M
BACILLARIOPHYTA		
Cyclotella	1,3,5	F.C.,Df
Melosira	1-12	F.C.,Df
Navicula	1,6-7,12	
Nitzschia	1,3,4-7,9	
Synedra	1,5,7,9	F.C.,Df

1.根據陳(1986)之判斷結果^[1],Df表魚腥臭,Ds表腐敗臭,G表青草臭,M表霉臭;F.C.表阻塞過濾;Co表示會產生色素。



圖十一、民國83年2月至84年1月澄清湖內主流水流經路線之藻總量的變化情形

表三、民國83年3月至84年1月澄清湖湖水中排名前5名之優勢藻屬

時間/名次	1	2	3	4	5
83年3月	Chlorella sp.	Synedra sp.	Microcystis sp.	Cyclotella sp.	Chlamydomonas sp.
83年4月	Chlorella sp.	Synedra sp.	Microcystis sp.	Cyclotella sp.	Carteria sp.
83年5月	Chlorella sp.	Synedra sp.	Cyclotella sp.	Carteria sp.	Oscillatoria sp.
83年6月	Cyclotella sp.	Chlorella sp.	Microspora sp.	Chroococcus sp.	Synedra sp.
83年7月	Microspora sp.	Cyclotella sp.	Chlorella sp.	Monoraphidium sp.	Aphanocapsa sp.
83年8月	Microspora sp.	Merismopedia sp.	Cyclotella sp.	Melosira sp.	Monoraphidium sp.
83年9月	Microspora sp.	Cyclotella sp.	Monoraphidium sp.	Merismopedia sp.	Melosira sp.
83年10月	Microspora sp.	Cyclotella sp.	Monoraphidium sp.	Merismopedia sp.	Chlorella sp.
83年11月	Microspora sp.	Cyclotella sp.	Monoraphidium sp.	Melosira sp.	Merismopedia sp.
83年12月	Microspora sp.	Cyclotella sp.	Monoraphidium sp.	Chlorella sp.	Melosira sp.
84年1月	Microspora sp.	Cyclotella sp.	Chlamydomonas sp.	Golenkinia sp.	Melosira sp.

底層之藻類總數均比表、中層相對較低。

四、曝氣工程實施後澄清湖之優養化評估

當前湖泊優養化評估方法較常見的是配合水質項目之參數法或指數法，然而，湖中生物與藻類相變化是湖泊水域優養化之重要標誌之一，湖中生物之種類與數量等均可作為評估湖泊優養狀態之參考^[16,20,21]。本研究就藻類指標部分進行分析，採用(1)優勢種評估法、(2)歧異度(diversity)指數評估法、(3)水質指數(quality index)評估法及(4)卡爾森(Calson)優養指數評估法等四種評估方法。

因不同營養狀態之水域，其優勢藻種亦有所差異，一般而言，貧養湖泊中的浮游植物以金藻綱為主，中營養型湖泊是以矽藻(Bacillariophyta)為主，優養型湖泊以綠藻與藍綠藻為主，不同營養狀態與浮游植物優勢藻種之關係如表四。民國74年迄78年澄清湖湖水中排名前5名之優勢藻種的優養指標程度整理於表五；民國83年2月迄84年1月澄清湖湖水中排名前5名之優勢藻種的優養指標程度整理於表六。由這些資料顯示，目前澄清湖仍屬於優養水域。

生物歧異度指數，是用於表示多種生物所組成的混合生物群落數量與種類之關係的一種指數。種的歧異現象，稱之為生物社會之種類歧異性。生物社會之物種組成(species composition)常具有一值得注意之普遍現象，即出現量較多之種，常佔少數，出現量較少之種則佔極多數。以優勢度而言，優勢種之種數不多，而從屬種及較稀少種之種數目卻很多，即使一生物社會出現若干共優勢種，然其種類亦遠較從屬種及較稀少種之種數為少。優勢種控制湖中藻類相中大部份能量及營養資源，從屬種及稀少種則控制湖泊中藻類相之歧異度。由上節優勢種評估法配合本節歧異度指數，則以藻類相評估優養狀態能較深入。歧異度指數方法甚多，本研究採用Shannon氏歧異度指數(H)與McIntosh氏歧異度指數(McI)，計算結果分列於表七；另以前述McIntosh氏歧異度指數及Shannon氏歧異度指數求其平均綜合值，以作為水質指數(QI)，計算結果亦列於表七。由1994年2月迄1995年元月所採水樣之藻類相，其Shannon歧異度指數由2.78到4.14，McIntosh歧異度指數則由0.41到0.67，其中均以7、8兩個月份之數據為最低，即相對水質為較差。再由Shannon歧異度指數及McIntosh歧異度指數所換算之水質指數結果如表八所示，明顯無法反應澄清湖之水質狀況。分析其原因，澄清湖之藻種數很多，部份鑑定至屬即高達82種以上，且其中常有3~5屬為共同優勢藻(即其所佔百分比在10%以上)至使相對歧異度增大，而無法顯示該湖目前優養狀態，如擬採用藻類相歧異度指數作為澄清湖水庫優養程度之判定，則須依澄清湖水質及藻類相之特性重新設計。

以上兩種歧異度指數，均是以澄清湖浮游性藻類總數作為分母求得，故指數對結果的解釋較具意義。故依據上述指數以評定澄清湖優養狀態(歧異度指數愈小，優養程度愈嚴重)，而且還可以根據不同時期多樣性指數之測定結果再進一步判斷該湖優養化程度的趨勢。然於本調查中，因藻種鑑定問題仍多，歸為其他藻種部份之藻類，如裸藻等在固定保存上即有諸多困難，未能詳細鑑定與分別計數，致使以歧異度指數作為水質優養程度之指標的方法上仍有困難，實際上藻類相優養化評估體系之建立仍需配合其他水質等評估體系，才能更臻周延。

表四、湖泊優養狀態與浮游植物中優勢藻種之關係

營養狀態	優勢藻類
貧養水域	金褐藻類
貧~中養水域	隱藻類
中養水域	甲藻類
中~優養水域	矽藻類
優養水域	矽藻類與綠藻類
過優養水域	藍綠藻類與綠藻類

資料引自日本水產資源保護協會，1980^[16]。

表六、民國83年2月至84年1月澄清湖湖水中各月排名前5名之優勢藻種的優養指標程度¹

藻種	富營養	中營養	貧營養
CHLOROPHYTA			
Carteria			
Chlamydomonas	—	xxxx	—
Chlorella	—	xx	xxxx
Golenkina			
Microspora			
Monoraphidium			
CYANOPHYTA			
Aphanocapsa			
Chroococcus			
Meristopedia			
Microcystis pulvera		xxxx	xxxx
Oscillatoria		xxxx	xxxx
BACILLARIOPHYTA			
Cyclotella		xxxx	xxxx
Melosira granulata			xxxx
Synedra acus			xxxx
Synedra ulna			—

1.根據日本水產資源保護協會之判定標準^[16]。

表七、民國83年2月至84年1月澄清湖湖水中藻類之生物歧異度及水質指數

時間	Shannon歧異度(H)	McIntosh歧異度(McI)	水質指數(QI)
83年2月	—	—	—
83年3月	3.12	0.55	58.72
83年4月	3.36	0.58	63.35
83年5月	4.14	0.65	74.03
83年6月	3.61	0.62	67.22
83年7月	2.79	0.49	52.47
83年8月	2.78	0.41	48.45
83年9月	3.05	0.50	55.37
83年10月	3.21	0.51	57.42
83年11月	3.91	0.61	69.40
83年12月	3.95	0.63	70.85
84年1月	3.94	0.67	73.04

表五、民國74至78年澄清湖湖水中各月排名前5名之優勢藻種的優養指標程度¹

藻種	富營養	中營養	貧營養
CHLOROPHYTA			
Actinastrium			
Ankistrodesmus falcatus	—	xx	xxxx
Botryococcus			
Chlamydomonas		—	xxxx
Chlorella	—	—	xx
Coelastrum reticulatum			xxxx
Dictyosphaerium ehrenbergianum			
Golenkina			
Horradium			
Microactinium			
Pediastrum duplex			
Scenedesmus quadricauda		—	xxxx
Westella			
CYANOPHYTA			
Anacystis			
Aphanocapsa			
Chroococcus			
Lyngbya contorta ²	xx	xxxx	xxxx
Microcystis aeruginosa			xxxx
Oscillatoria tenuis	xx	xxxx	xxxx
BACILLARIOPHYTA			
Cyclotella			xxxx
Melosira granulata			xxxx
Navicula			
Nitzschia acicularis ²			xxxx
Synedra acus			xxxx
Synedra ulna			—

1.根據日本水產資源保護協會之判定標準^[16]。

2.未能確定是否與澄清湖出現者同種。

表八、民國83年2月至84年1月澄清湖湖水中可能引起臭味之優勢藻種

藻種	可能產生之臭味 ^a
CHLOROPHYTA	
Chlorella	霉臭
Chlamydomonas	魚腥臭 ^b
Scenedesmus	青草臭
Cyanophyta	
Aphanocapsa	腐敗臭
Microcystis	腐敗臭
Oscillatoria	霉臭
BACILLARIOPHYTA	
Cyclotella	魚腥臭
Melosira	魚腥臭
Synedra	魚腥臭

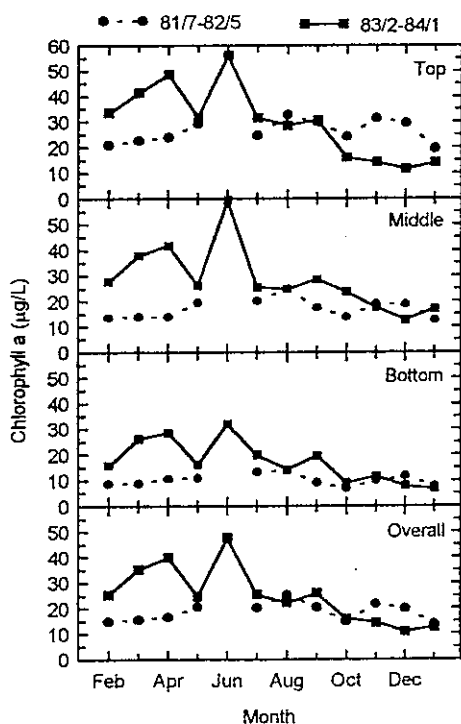
^a根據陳(1986)之判斷結果^[1]。

^b根據Palmer(1959)之判斷結果^[26]。

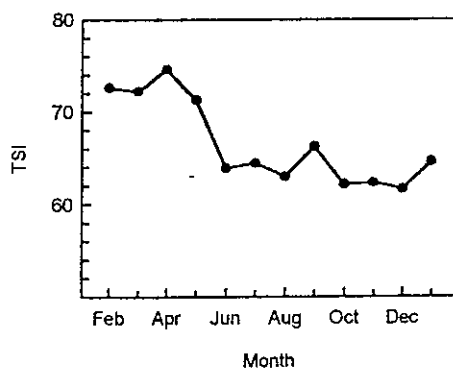
卡爾森(Calson)優養指數評估法使用湖水之透明度、葉綠素a及總磷等三種參數分別求出一個指數，再求三種指數之平均值即為優養等級指數；卡爾森優養指數小於40時為貧養水域，介於40至50時為中養水域，大於50時為優養水域。由葉綠素a含量來探討，本次研究調查期間之葉綠素a含量與民國81年迄82年同期間之葉綠素a含量之比較如圖十二，本次研究調查期間之葉綠素a含量與民國81年7月迄82年5月同期間之葉綠素a含量大致相等。本次研究調查期間之卡爾森優養指數如圖十三所示，全年各月均大於優養之50指數值。

曝氣工程實施後澄清湖藻類對臭味之影響的評估

Sigworth於1957年對全美水源管理工作站進行調查^[22]，其中即有241個水源管理工作站指出藻類常引起其給水臭味與口感不良的問題，而引起上述問題的主要原因係死亡的藻類細胞在分解腐化過程中藉由真菌、細菌或放線菌的活動，所產生之中間產物或所合成之特殊物質引起；以藍綠藻而言，主要為硫化物，包括甲基硫醇(methyl mercaptan)、dimethyl sulfide、isobutyl mercaptan 與 n-butyl mercaptan，而形成特殊之霉臭味。除藍綠藻外，會引起臭味的主要藻類尚包括某些矽藻和含色素的鞭毛藻(pigmented flagellates)，再其次為小部分的綠藻。針對藻類引起的臭味，美國波士頓州對某些會引起臭味之藻類在公共給水水源中的數量訂有最大允許標準，諸如*Chlamydomonas*為10 units/mL，*Cryptomonas*、*Synura*和*Uroglenopsis*等屬為200 units/mL，而藍綠藻的*Aphanizomenon*為1000 units/mL^[23]。為了防止放



圖十二、澄清湖湖水中葉綠素含量的比較情形 (81年7月迄82年5月之葉綠素含量為劉香舍之分析結果，83年2月迄84年1月為本計劃之分析結果)



圖十三、澄清湖湖水之卡爾森指數的月變化情形

線菌活動引發之臭味問題，Dickson於1968年^[24]發現當藍綠藻大量繁殖時，隨後(約3至4星期後)引發放線菌之孳生，控制臭味的產生最好的方法為(1)施放殺藻劑、(2)以活性炭吸附水中之含臭物質及其他有機物、(3)以 1.2×10^5 濃度的*Bacillus cereus*處理，以快速減輕放線菌引發臭味與口感不佳的問題。第三種方法被成功的使用在Oklahoma City之Hefner湖處理廠，他們以5000加侖的水槽培養桿菌24到36小時後放入水庫中，效果良好。針對澄清湖水源臭味控制方法李俊德等人^[25]於1984年亦曾有過深入的探討，其研究結果顯示，當湖水呈霉臭時，水廠的混凝沉澱、快濾程序皆無法去除水臭。而湖水呈魚腥臭時，混凝程序可降低30~50%水臭，但快濾程序對水臭無去除效果，湖水混合部份沉澱出流水經由慢濾池處理，水臭可降低至初嗅數3。

陳是瑩等人於1982與1983年針對澄清湖之藻種與放線菌繁殖狀況對水源臭味之影響進行專題研究^[13,14]，自民國70年7月至72年6月止，歷經兩年連續調查的結果顯示，澄清湖湖水季節性臭味的發生，主要係由於藻類與放線菌的大量繁殖所造成。湖水於矽藻繁殖的季節(11月至5月)主要呈魚腥臭，當藍綠藻與放線菌大量孳生時，湖水則呈霉臭或土味臭。在這段期間，澄清湖湖水均維持相當高之臭度，初嗅數在7.5~56之間。71年7月時，湖水臭度達最高峰(初嗅數為56)，此時表面水之放線菌含量達最高峰約31000 cds/mL，此時湖水呈顯著的土味臭。

本研究在83年2月至84年1月水樣中所發現可能引起臭味之一些較優勢藻種如表八所列，包括魚腥味或霉臭味之*Chlorella*、*Synedra*和*Microcystis*等。其中以3~5月出現的*Chlorella*較為嚴重，冬季則*Chlamydomonas*應注意。高銘木^[15]發現曝氣工程實施後與曝氣工程實施前一樣，澄清湖湖水臭度主要來源皆屬生物性。澄清湖水庫於81年9月開始實行曝氣工程計劃，但澄清湖湖水的初嗅數卻在80年至81年間已有明顯降低，初嗅度介於8左右，曝氣前後初嗅數並無明顯差異，且曝氣後湖水的初嗅數有時甚至有高起。在本研究調查期間，澄清湖表層水的初嗅數起伏不大，平均初嗅數為 5.4 ± 3.5 ；初嗅數於83年8月達最高峰(初嗅數為15)，此時表層水之放線菌含量達最高峰約300 units/mL，此時約為表層水之藍綠藻達最高峰(6月)後的第2月。

結論與建議

本藻類相之調查係在曝氣工程(1992年9月)實施後一年四個月後開始進行，為期一年四季的調查，結論與建議為：

- 1、在10個採樣點，分上、中、底部三層的藻類相觀察結果顯示，各採樣點之間除伏流水入口處外，其餘各點不論所出現之藻種類屬或數量上之差異並不顯著，實因澄清湖水體容積僅250萬立方公尺，不大且湖水平均深度亦僅3~4公尺，在曝氣工程實施後，水體混合良好。故以後澄清湖藻類監測之採樣站，縮減至4站實已具代表性。不同深層之藻類相間之差異，如前述因水體混合性良好，又因湖水很淺致使表、中層之藻類相與藻數幾無差異，底層部分之藻數則低於表、中層。

- 2、基本上澄清湖之藻類相呈明顯之季節性變化，且藻類之種數亦多。本年度優勢藻種與曝氣前所出現之優勢藻種稍有改變，尤其是呈鏈狀或成群體之藻種，如以往於每年7月迄次年2月大量出現之顫藻(*Oscillatoria*)，目前出現數量稀少。
- 3、澄清湖在各項水質改善工程實施前，民國80年藻類年平均總數達25000 units/mL，民國81年更高達32000 units/mL。在此次調查期間，全水域年平均總藻數降至7000 units/mL。其原因可能與澄清湖水質改善工程有關，但因今年7、8月在南部地區有幾場大雨，以及澄清湖本年水位一直較往年為高，其可能影響亦應考量。然而曝氣後避免湖底部厭氧情形，造成磷營養鹽之釋出，加速氮營養鹽之硝化作用，部分藻類被帶入底層減低其光合作用效率，增加水體中懸浮物質，減低陽光之入射，部分大型藻體之破壞或形成不利其生長之環境均為該湖相關曝氣工程抑制藻類孳生之正面效果。
- 4、本研究試以藻類相之歧異度指數及其水質指數建立澄清湖之優養程度指標，由所選月份計算後，並不適合澄清湖使用，如須建立仍須更進一步之修正，另外對澄清湖藻種鑑定問題仍須克服。
- 5、由卡爾森指數法來評估澄清湖之水質優養化程度，全年各月均大於優養之50，顯示目前澄清湖水質仍為優養程度。
- 6、水庫藻類引起之臭味問題並非一般混凝、活性炭吸附等淨水方法所易去除；而藉桿菌生物控制方法在國外成效頗佳，建議國內可考慮類似技術。
- 7、藻類大量孳生致使水庫優養為國內作為飲用水水之水庫的常見問題，國外有關於引起臭味之藻類數量，在公共給水水源中的最大允許標準，國內若能引進，以作為水庫管理之依據，對水源水質之維護，可能有所助益。

誌謝

本文承蒙臺灣省自來水公司提供研究經費，澄清湖水廠工作人員之協助採樣，以及環保署齊家科長協助藻類鑑定，謹此致由衷之謝忱。

參考文獻

1. 陳是瑩、曾怡禎，「澄清湖藻類圖鑑」，國立成功大學，1986。
2. 陳是瑩、曾怡禎，「澄清湖浮游植物的生態及其生產量之研究：(I)澄清湖浮游植物的季節性變化與阻塞水廠濾池藻類之研究」，生物科學，19：1~20，1982。
3. Thornton, J. A., "Aspects of Eutrophication Management in Tropical/Sub-tropical region", J. Limnol. Soc. Sth. Afr., 13(1), 25-43, 1987.
4. 溫清光等，「澄清湖曝氣工程效益評估」，自來水公司委託計劃，國立成功大學環境工程研究所，1995。
5. 陳從和，「澄清湖浮游生物研究報告」，自來水季刊，11：69~82，1970。
6. 曾怡禎、陳是瑩，「澄清湖浮游植物的生態及其生產量之研究：環境與營養因子對澄清湖阻塞濾池藻類生長之研究」，生物科學，19：1~20，1982。

7. 陳是瑩、曾怡禎，「澄清湖浮游植物的生態及其生產量之研究：(III)澄清湖營養因子與季節性變化對浮游植物繁殖的影響」，生物科學，21：29-46，1983。
8. 陳是瑩、曾怡禎，「澄清湖生態的研究：(I)澄清湖水質與藻類季節性變遷的研究」，第一屆給水技術研討會論文集，84-97，1984。
9. 曾怡禎、陳是瑩，「澄清湖生態的研究：(II)澄清湖水質的評估」，第一屆給水技術研討會論文集，98-108，1984，。
10. 秋山優，「台灣湖沼水庫浮游植物之調查報告」，衛生署環境保護局，1984。
11. 森若美代子，「台灣地區主要水庫優養化調查報告」，環保署，1990。
12. 臺灣省自來水公司第七區管理處浮游生物檢驗報告，1971-1992。
13. 陳是瑩、李俊德、曾怡禎，「澄清湖浮游生物與放線菌繁殖狀況對水源臭味之影響(一)」，國立成功大學環境工程研究所研究報告第21號，1982。
14. 陳是瑩、李俊德、曾怡禎，「澄清湖浮游生物與放線菌繁殖狀況對水源臭味之影響(二)」，國立成功大學環境工程研究所研究報告第40號，1983。
15. 高銘木，「澄清湖曝氣工程對水庫藻類及臭味影響之評估」，輯於「澄清湖曝氣工程效益評估」(溫清光等)，自來水公司委託計劃，國立成功大學環境工程研究所，1995。
16. 日本水產資源保護協會，「新編水質污濁調查指針」，恆星社厚生閣，日本，1980。
17. Dindal, D. L., "The Note of Community Ecology", S.U.N.Y. College of Environmental Science & Forestry, Syracuse, New York, U.S.A., 1983.
18. Calson, R. E., "A Trophic State Index for Lake", *Limnol. Oceanogr.*, 22, 361-369, 1977.
19. Kimmel, B. L., O. T. Lind, and L. J. Paulson, "Reservoir Primary Production", in: *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives (Ed. by K. W. Thornton, B. L. Kimmel, and F. E. Payne)*, John Wiley & Sons Inc., U.S.A., 1990.
20. 全國主要湖泊、水庫富營養化調查研究課題組，「湖泊營養化調查規範」，中國環境科學出版社，中國大陸，1987。
21. Hutchinson, G. E., "A Treatise on Limnology, Vol. II", John Wiley & Sons Inc., U.S.A., 1967.
22. Sigworth, E. A., "Control of Order and Taste in Water Supplies", *J. Amer. Water Works Association*, 49:1507-1521, 1957.
23. Mackenthun, K. M., "The Practice of Water Pollution Biology", Water Pollution Control Administration, Washington, D.C., U.S.A., 1969.
24. Dickson, K. L., "Actinomycetes and Water Quality", *J. Amer. Water Works Association*, 60(4):379-381, 1968.
25. 李俊德、陳是瑩，「澄清湖水源臭味控制方法之研究」，國立成功大學環境工程研究所研究報告，1984。
26. Palmer, C. M., "Algae in Water Supplies", U. S. Public Health Service Publication No. 657, 88pp, 1959.