

# 金門太湖水庫優養化之溶氧分層特徵與底層增氧 改善效率研究

## The Characteristics of Stratified Dissolved Oxygen and the Aeration Efficiency in Bottom Level of Water in Shallow and Eutrophic Reservoir Taifu in Kinmen

國立臺灣大學  
生物環境系統工程系副教授

**侯 文 祥\***

Wen-Shang Hou

國立臺灣大學  
生物環境系統工程系學生

**梁 維 真**

Wei-Zhen Liang

國立臺灣大學  
生物環境系統工程系碩士

**游 政 勳**

Chen-Hsun Yu

國立臺灣大學  
生物環境系統工程系碩士

**葉 曉 娟**

Hsiao-Chuan Yeh

國立臺灣大學  
生物環境系統工程系碩士

**陳 以 容**

I-Zon Chen

### 摘 要

針對供應自來水的金門太湖小型水庫，夏季水深約 5m，在 2005 年 11 月和 2006 年 5 月，發生藻華現象的各二日夜期間，每四小時，間隔 0.5m 垂直水層，實測日夜間溶氧的垂直分層特徵，且在底水層以低造價的微細氣泡增氧設備進行小區域增氧改善示範研究。測試設備在日夜間的增氧效率，包括 15 分鐘緊急增氧能力試驗、2 小時與 24 小時溶氧擴散效率試驗，以探討溶氧分層與藻華聚集水層及與時間變化的關係。得知藻類多浮游於約 2m 以內上水層，尤其在表水 1m 內的密度最高。在光合作用減緩後，水深 2m 以下的水層溶氧即迅速降低。底水層明顯缺氧，清晨時降至 2ppm 以下，甚達近厭氧狀態。確定太湖水庫的底水層應考慮進行長期有效的增氧改善。在水溫 24°C 的夏季藻華狀況，0.5HP 微細氣泡機約可增加 27~35% 的溶氧飽和度。以太湖發生藻華的水質狀況，得知一支 0.5HP 動力微細氣泡機的配置間隔可設計為 30 至 40m。以 110v 動力供應的設備，每組不含施工的造價約 1 萬元，可改

\*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程系副教授，106 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，houws@ntu.edu.tw

善水體底層面積約 1250m<sup>2</sup>、水體體積約 6250m<sup>3</sup>。

**關鍵詞：**金門，太湖水庫，優養化，溶氧，微細氣泡，曝氣效率，底層水。

## ABSTRACT

The Taifu Reservoir about 5 meter depth in summer supplies drinking water in Kinmen. However in November 2005 and May 2006, the algae bloom phenomenon was occurred. The characteristics of stratified dissolved oxygen (DO) were measured every 0.5m of water depth, four hours a time for 24 hours. The low-cost micro bubble aerator was used in bottom level water to carry on the demonstration research of aeration improvement in a pilot test at about 80 meter square area. The aeration efficiency tests lasted for 24 hours included the emergent aeration capability test after aerating 15 minutes, the DO diffusion efficiency tests after aerating 2 hours and 24 hour, in order to study the relationship of stratified DO level and algae bloom gathering water level as time went by. It was known that most of algae were suspended within the 2 meter deep, especially the density was the highest within the 1 meter of surface. As the photosynthesis slowed down, the DO reduced rapidly after 2 meter depth. The bottom level was shortage of oxygen obviously, it was decreased below 2 mg/l in early morning, sometimes even close to anaerobic state. It was clear that a long term and effective aeration improvement for the bottom level of water in Taifu Reservoir was necessary. When the water temperature was 24°C and the algae bloom happened in summer, the 0.5 horsepower(HP) micro bubble equipment can improve the situation by increasing about 27~35% of DO concentration. The installation space for the 0.5HP equipment can be designed per 30m to 40m in accordance with the algae bloom condition in summer. The material costs are about 10000 taiwan dollars. The range of estimated improved condition can reach 1250m<sup>2</sup> of bottom water area and about 6250m<sup>3</sup> of water volume.

**Keywords:** Kinmen, Taifu reservoir, Eutrophication, Aeration efficiency, Dissolved oxygen, Micro bubble, Bottom level of water.

## 一、前言

國外水庫曾發生毒藻優養化現象，產生毒素散佈水中，嚴重影響水質；國內部分水庫優養化現象也漸明顯。環保署每年對全台水庫進行季節性檢測，於民國 94 年 2 月發現二十七座水庫中，有十四座出現微囊藻(*Microcystis*)，其中，離島地區包括金門、馬祖等七座小型水庫全都出現微囊藻蹤跡，雖然環保署表示水質安全無虞，但仍引起地方民眾關切(環保署，2005)。成功大學在民國 93 年檢測金門的榮湖、陽明湖，即檢測出帶有微量微囊藻(郭等，2005)。因此，優養化問題已漸成國內水庫的隱憂。由於金門的湖庫規模

小，蓄水不易流動，極易受農田、家庭廢水或雨後地表逕流污染，造成藻類繁殖，產生湖庫優養化現象，影響飲用水水源之水質。其中最主要水源之一的太湖水庫(最大湖面積約 38.44 公頃，全年水深變化約 3~5m)，近年來漸呈劣化現象，其水源主要由小太湖(面積約 9000m<sup>2</sup>，全年水深變化約 1.5~3m)流入。因此，本研究針對太湖水庫及小太湖，在藻華發生期間，以低造價增氧設施進行增氧改善示範研究實場，探討小型湖庫優養化改善可行性。

水體優養化狀態可以下列兩種指標判別：

1. 營養狀態指數：為國內研究水庫優養化狀態最常被採用的指標。如卡爾森營養狀態

指數(CTSI)乃將水體總磷濃度、葉綠素 a 濃度及透視度三項水質，分別帶入公式求 CTSI 值。CTSI<40 為貧養狀態，40<CTSI<50 為中養狀態，CTSI>50 為優養化狀態。

2. 下水層溶氧指標：通常以下水層溶氧大於 80%飽和溶氧以上者為貧養狀態，小於 10%者為優養狀態，介於 10~80%者為中養狀態。

本研究針對水庫內的設備示範水區與無設備對照水區，計測底水層的總磷濃度、葉綠素 a 濃度、透明度、及溶氧等水質資料，利用 CTSI 營養狀態指數與下水層溶氧指標方法，比較設備改善水質的效率。

目前湖庫較常使用解決水質優養化問題的處理方法為曝氣法，理論上，1mg/l 的氮氣要完全轉化成硝酸鹽氮，需用掉 4.57mg/l 的溶氧(黃，2000)。因此，氮氣經硝化作用會減少水中溶氧量，使得水體呈厭氧狀態。在厭氧狀況下水庫底泥之磷的釋出速率較快，易形成水庫之內部負荷，其負荷量在優養嚴重之湖泊或水庫，常佔總污染量之 20 至 40% (Sternberg, 1986)。因此，提高水庫底水層之溶氧量，應可有效降低水中溶解磷的產生。水體水質優養化嚴重時，當水溫升高或季節變化時，容易發生藻華現象，由於上水層受到大量藻類行光合作用，表層溶氧可達過飽和；而水體底層由於藻類大量繁殖後，新陳代謝的結果會產生許多植物的遺骸，細菌需要耗用水中的氧氣來進行分解，導致水體底層呈現缺氧狀態。

湖庫曝氣增氧之主要目的在於改善湖庫水質，經過曝氣來強制水體流動，一方面提供生物氧化分解有機物所需的氧，另一方面亦可破壞湖庫底層厭氧層以消除底層長期累積之底泥。湖庫曝氣的基本原理主要是藉由少量動力配合流力作用，使水體產生上下循環流動，再藉由氣泡與水之接觸界面氧傳效果，得以改善湖庫水質。水底曝氣兩大特點之一是靠輸入之微細氣泡空氣來提高水中溶氧溶入效率，另一部份是藉湖庫下層缺氧水與表面高溶氧水交替混合，並靠水面波動，吸入大氣氧氣，達到湖庫水質改善功效。在水體下層進行曝氣除了可以提供下層水體溶氧

外，並可使底泥中鐵離子氧化成三價而與磷結合沉澱，阻止釋放出藻類可利用的溶解磷(郭等，1989)。

郭等(2005)也提出，台灣較封閉的湖庫水域，常因上下水層或內外水域交換不易，使水域環境內某一水層造成環境緊迫現象，造成國內目前有 40%以上的水庫全年有一半時間處於優養狀態。因此，該報告提出對於水庫深水域的水質改善方法，可以利用曝氣設備增氧去除氮磷等污染物，以改善水體優養化的問題。並提出選定蘭潭水庫及新山水庫列為後續最優先整治之水庫。其中，建議在蘭潭水庫內增設及維修曝氣設備 2066 萬元，每年操作維修費 100 萬元，預期效益為蘭潭水庫內部總磷負荷由 669kg/yr 降為 435-535kg/yr。至於新山水庫，則建議在出口增設二座曝氣設備經費 3000 萬元，每年操作維修費 500 萬元。由以上得知，目前台灣水庫所使用的曝氣設備均為高單價與高維修費，且因價昂，無法在水庫廣大水域內因應不同水區與水層特徵做多數量設備的配置設計，因此，只能選擇在靠近入出流口或取水口附近作單一位置的密集處理作為因應設計。以上現況對於欲使用曝氣工法操作，淨化長期分布在湖庫廣大水域面積的深水層內的有機污染質而言，仍有設計未善之處。因此，如能考慮以低造價單元曝氣設備，化整為零式的以多數量設備分散佈置在廣大水域空間內，利用直接曝氣深水層增氧之物理方式改善水體水質，且把握水庫內不同水層水體的水質特徵與曝氣工法的設計效率。

在歐美廣泛使用連續式曝氣法，大致可分為多孔管型散氣式、揚水筒型及抽水汞型三種。多孔管型於陸地上設有空氣壓縮機站房，用送氣管將壓縮空氣送至湖底再用散氣管或散氣盤將空氣變成氣泡擴散到底層水氣泡上升帶動水流，使湖水上下混合而打破分層。國內澄清湖及鳳山水庫之曝氣裝置即屬於這種型式，鳳山水庫尚在表層水裝有散氣設備，以加強曝氣量。噴射式曝氣系統為目前最普遍使用之湖庫曝氣方式，然而由於耗電量大，再加上攪拌深度受到限制，因此目前之使用案例已逐漸趨向於應用在小面積，較淺

水深水體之曝氣。Colt and Orwicz (1991)測試其曝氣效率(SAE)約 1.1-3.0 kgO<sub>2</sub>/kw/hr。美國在 1981 年前至少曾有 38 個水庫湖泊使用過曝氣工法，德國、瑞典、英國、加拿大、瑞士、澳洲及波蘭等國家也都有實例。在處理的效果上，以總磷為例，20 個例子中，反而增高的有 5 例，降低的有 6 例，無明顯變化的有 8 例，狀況不確定的有 1 例。對於 33 個案例中，藻類密度有 6 個上升，14 個下降，8 個沒有變化，5 個不確定(Cooke *et al.*, 1993；Peterson *et al.*, 1994)。

本研究團隊有感於國內至今使用以曝氣工法進行水質改善的設備造價昂貴、處理成本偏高，且針對曝氣設備的效率與經濟性等相關資料之建立仍不充足，無法提供現場使用者做客觀的選擇。因此，於 2004 年底研發出低造價的微細氣泡增氧曝氣設備，已取得國內專利(「微細氣泡產生裝置」，新型第 M271870 號，專利期間：2004.11~2014.10)。此設備因低造價，具經濟性，且應用於養魚池、灌溉水池等較淺水深的不同水體之設備效率也已明確得知(侯、葉、梁，2006)。因此，為了日後可因應國內較深水域的水庫在不同季節具有溫度分層與溶氧分層的特徵，配合水區水質狀態，可以化整為零方式配置多數量低造價曝氣與攪水設備，以進行水體增氧與破壞分層現象等過程，達到水質改善目標，乃進行本研究。

## 實驗方法

### 1. 示範區域選定

本計畫自 94 年 7 月至 95 年 6 月歷經春夏秋冬四季的現場研究，試驗水域的平均水深自夏季約 5m 降至春末約 3m，依水深與溶氧及溫度等分層分布特徵，選定水深約 4 至 5m，且底層溶氧較低的水區分別作為設備示範區與無設備對照區，各涵蓋約 80m 之方型水區內，示於圖 1，全計測面積約 14000m<sup>2</sup>。研究期間在秋季(94 年 11 月 27-29 日)和夏季(95 年 5 月 7-9 日)的試驗水域分別發生藻華現象。現地試驗針對無增氧設備水區和配置五組微細氣泡機水區，上下水層溶氧變化與日夜間及季節性差異，進行現場試驗，並進行設備效率測試。

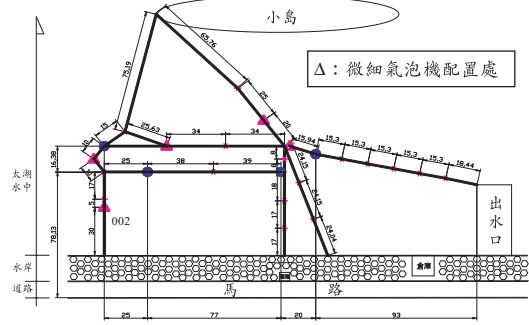


圖 1 太湖水域增氧設備配置示意圖(單位：公尺，m)

### 2. 微細氣泡機構造

在束縮管內以負壓方式吸入空氣，並被高壓噴流打碎成微細氣泡以快速溶入水中，提高溶氧的設計原理，以市售塑膠管及沉水式抽水馬達組成。圖 2 為微細氣泡機設計圖。

### 3. 試驗方法

#### 3.1 無增氧設備區在清晨及日夜間之表底層溶氧變化試驗：

對水庫而言，天候變化會影響水溫，同時改變水中藻類的繁殖速度、光合作用進行，及底質的分解速率等，為水中溶氧量變化的重要變因。針對太湖在藻華期間所形成的水體狀態，在無設備水域對照區，進行包括(1)水區內清晨之表底層溶氧分布直讀計測(使用直讀式儀器計測 1 小時)，以及(2)代表測點位置在日夜間之表底層溶氧自計監測(使用自計式儀器計測 24 小時)等兩項試驗。此結果可以客觀的比較不同天候狀態或設備有無造成溶氧與其他水質變化特徵。

#### 3.2 增氧設備之緊急增氧能力試驗：

利用兩艘橡皮艇在湖面進行溶氧擴散分布試驗，比較微細氣泡機緊急增氧對上下水層的即時增氧能力與影響範圍。開啓一組微細氣泡機 15 分鐘後對四周水體上下水層的溶氧變化，進行上下水層的溶氧分布範圍計測，使用直讀式儀器沿著固定繩索以每間隔 1m 逐次向外擴展方式之多點計測，約測量至設備半徑 15~20m。每回試驗於 20 分鐘內完成。同時間內，計測無設備區水

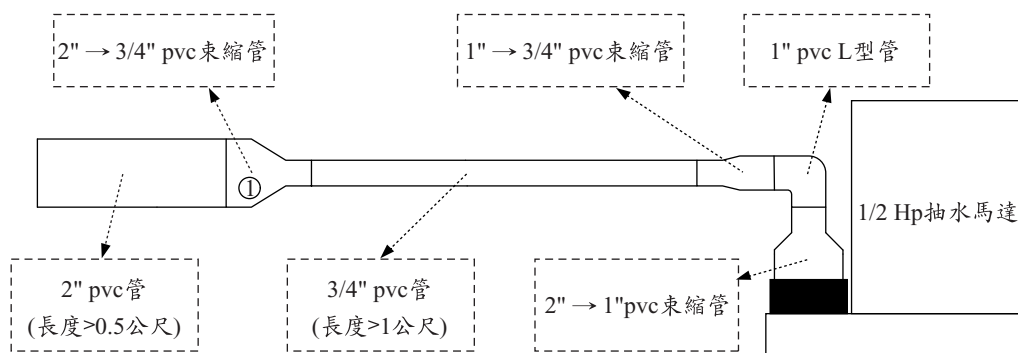


圖 2 微細氣泡產生管構造示意圖

域內代表測點處，相同兩個水深的溶氧飽和度，比較有無增氧設備機差異。

### 3.3 增氧設備之 2 小時及 24 小時溶氧擴散效率試驗：

比較微細氣泡機之增氧分布效率差異。本試驗以六點自計式溶氧儀連續同步紀錄，開啓一組微細氣泡機兩小時後對四周水體之溶氧變化。改變距離增氧機出水口不同距離之計測位置，每回固定三位置兩水深，共六個計測定點，進行上下水層的分布範圍計測，以確定設備增氧的影響範圍上限與擴散狀態。在 95 年 5 月 8 日，選定在距離微細氣泡機出水口 9、12 及 15m 位置之上下兩個水深處同步紀錄。至於 24 小時連續計測試驗，可以經由比較設備區與無設備對照區資料，探討設備在夜間對上下水層的增氧效率。同時時間內，計測無設備區水域內代表測點處，相同兩個水深的溶氧飽和度，作為比對用資料。

### 3.4 水體出現藻華狀態時在垂直水層之溶氧量變化試驗：

在 95 年 5 月發生藻華，當時水庫內水深僅約 3m，因此本試驗在太湖的無設備區及有設備區，自清晨 6 點起每四小時，計測每 0.5m 垂直水層溶氧，並作底層水採樣。

### 3.5 試驗水區與對照區水中總磷與葉綠素 a 之實驗方法：

- (1) 總磷：於實驗過程中，採集各水區 3 瓶底層水 500ml，以 4℃ 冷藏期限不超過 7 天，以環保署 NIEA W427.52B 方法分析。
- (2) 葉綠素 a：視水中浮游藻類密度採取近表

水層約 100 至 4000 ml，並記錄採樣體積、採樣時間及地點等。依環保署環境檢驗所水中葉綠素 a 檢驗方法-丙酮萃取法及 NIEA E507.01T 方法分析。

## 4. 資料分析方法

由上述試驗內容，可分成溶氧資料整理法與設備增氧能力、以卡爾森指數及下水層溶氧指標評估水質等二項敘述資料分析方法如下：

### 4.1 溶氧資料整理法與設備增氧能力

不論有無增氧設備區，在各時間測得底水層及上水層之溶氧資料，包括使用直讀數位溶氧儀及使用德製 Oxyguard 與自製溶氧感測器，分別可讀得水溫(℃)、溶氧濃度(ppm)、溶氧飽和度(%)、電壓訊號強度(mv)等資料。以上四種資料可作為互相檢正用。各溶氧感測器均有其溶氧飽和度與電壓的關係式。而以空氣中飽和溶氧(100%)為基準，各溶氧感測器所得到電壓訊號強度(mv)，即可推算水中各位置的溶氧飽和度(%)，再以當時水溫資料(℃)，即可以水溫與飽和溶氧量關係式(℃-ppm)推算出水中各位置的溶氧濃度(ppm)。至於測試位置的底水層為底質上方 5 cm 處，上水層為 2m 水深處量測，試驗水域內均勻分布計測 20~25 測點位置。於不同季節及不同時間量測各位置的水深(m)與溶氧飽和度(%)，將資料依季節時段蒐集後，並利用 surffer 軟體繪製成等水深圖與等溶氧濃度分布(X<sub>i</sub>)圖。以不同等濃度線所圍成之體積 V<sub>i</sub>，乘以該兩等濃度線之平均值，最後累加其總和，再以擴散能力內影響的

全部水體積除之，可得出約 80m 之方型計測水區內的平均代表測點位置與影響水區內的平均溶氧濃度，公式如下。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(X_{i-1} + X_i) V_i}{2}}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

由此平均代表測點位置的溶氧濃度與時間關係的增氧曲線變化資料，取  $\ln(C_S - C_t)$  和  $T_S - T_t$  的關係曲線中之 10%  $\ln(C_S - C_t)$  和 70%  $\ln(C_S - C_t)$  作為計算基準點，可計算得溶氧質傳係數  $(K_{la})_t = (\ln(C_S - C_{t10}) - \ln(C_S - C_{t70})) / ((t_{70} - t_{10}) / 60)$ 。再經溫度校正  $(K_{la})_t = (K_{la})_{20} \times 1.024^{(t-20)}$  後，可得  $(K_{la})_{20}$ 。由此數據可算出曝氣設備應用在現場水區的氧氣轉換效率  $(kg\ O_2/hr)$  與曝氣效率  $(kg\ O_2/kw/hr)$ 。

進而得知設備的平均增氧能力，公式如下：在同一溫度下，設備對該水區的增氧效率(%) = (有設備區的平均溶氧飽和度 - 無設備區的溶氧飽和度) ÷ 無設備區的溶氧飽和度。

#### 4.2 以卡爾森指數評估水質資料整理法

針對太湖的水質評估方法，主要以下水層溶氧指標及卡爾森營養指數(CTSI)探討。由水庫底水層測得之總磷濃度(TP,  $\mu g/l$ )、透明度(SD, m)和葉綠素 a 濃度(Chl-a,  $\mu g/l$ )等項目，計算水庫之水質優養化程度，當 CTSI 大於 50 時，水庫屬於優養水質。計算式如下：

$$TSI(Chl-a) = 9.81 \ln(Chl-a) + 30.6;$$

$$TSI(SD) = 60 - 14.41 \ln(SD);$$

$$TSI(TP) = 14.42 \ln(TP) + 4.15;$$

$$CTSI = [TSI(Chl-a) + TSI(SD) + TSI(TP)] / 3$$

## 結果與討論

### 1. 太湖水庫藻華期間之水質特性

在 94.11(秋)及 95.5(夏)兩季的現場試驗期間，太湖水庫發生藻華，底水層明顯缺氧，清晨時降至 2ppm 以下。透明度過低易阻礙水生植物行光合作用，在下午四點開始的底水層即出現溶

表 1 太湖水庫之水質特性

| 水 庫 區 域                            |               |              |    | 太 湖  |
|------------------------------------|---------------|--------------|----|------|
| 藻華現象                               | 94.11.28      |              |    | 發生藻華 |
|                                    | 95.5.7        |              |    | 發生藻華 |
| 營養化狀態<br>Carlson<br>優養指數<br>(CTSI) | 95.5.7.<br>清晨 | 水溫(°C)       |    | 21.2 |
|                                    |               | 透明度(m)       |    | 0.35 |
|                                    |               | 總磷 (µg/l)    |    | 170  |
|                                    |               | 葉綠素 a (µg/l) |    | 121  |
|                                    |               | CTSI         |    | 77   |
|                                    |               | 優養化狀態        |    | 優養水質 |
| 下水層<br>溶氧指標<br>(ppm)               | 94.11.28      | AM6          | 表層 | 11.0 |
|                                    |               |              | 底層 | 2.0  |
|                                    |               | PM2          | 表層 | 12.3 |
|                                    |               |              | 底層 | 4.0  |
|                                    | 95.5.8        | AM6          | 表層 | 9.4  |
|                                    |               |              | 底層 | 1.9  |
|                                    |               | PM2          | 表層 | 13.7 |
|                                    |               |              | 底層 | 4.8  |

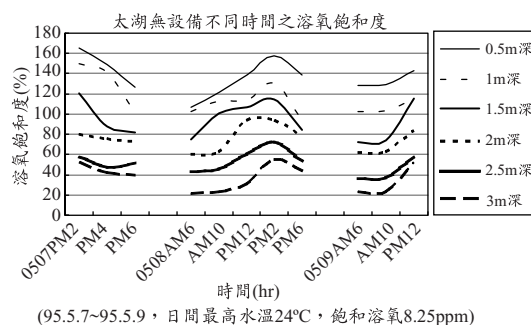


圖 3 太湖無設備區在發生藻華三日間的垂直水層溶氧變化

氧偏低現象。由於本研究重點為探討增氧設備效率，因此，後續對於微細氣泡機對水體增氧能力的分析，主要使用發生藻華期間，在設備水區與對照水區的測試結果做比較。以 Carlson 優養化指數及下水層溶氧指標分別整理太湖水庫藻華期間之水質特性，結果示於表 1。

在 95.5 發生藻華時，不同時間、不同水深的垂直水層溶氧變化，整理於圖 3，可探討溶氧分層與藻華聚集水層及與時間變化的關係。由圖 3 得知，太湖的水體表層與底層之溶氧飽和度於藻華時相差甚劇，清晨時表水層與底水層的溶氧急遽變化臨界點約發生在水深 1.5~2m 處，隨著太

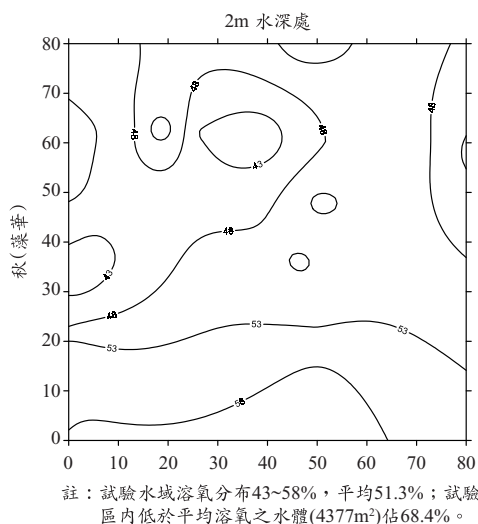


圖 4 94.11.29 Pm 1，晴(水溫 18.3℃)

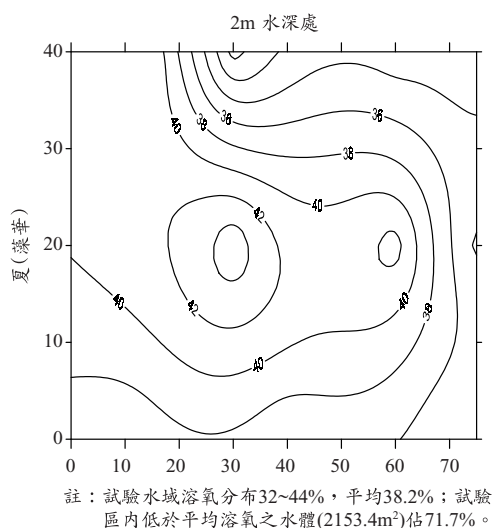


圖 6 95.5.8 Am 6:30，晴(水溫 24℃)

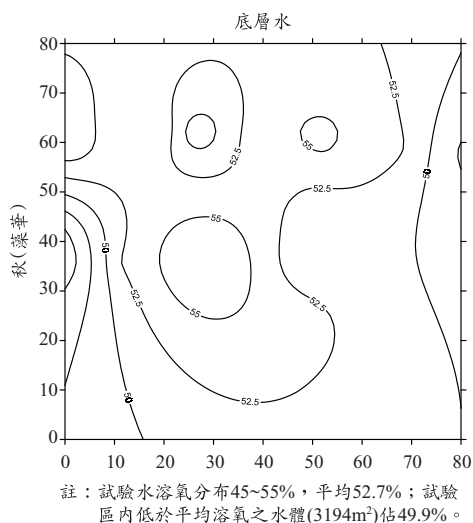


圖 5 94.11.29 Pm 1，晴(水溫 18℃)

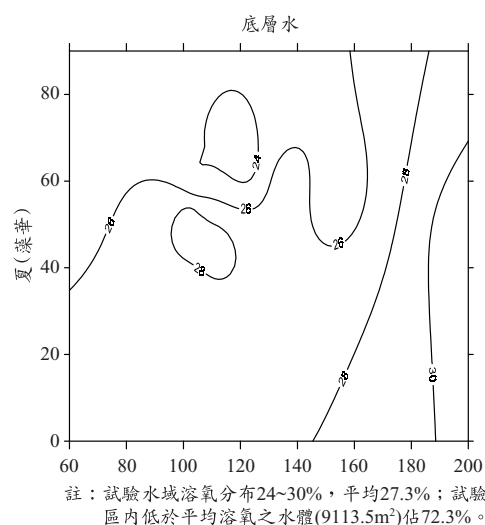


圖 7 95.5.8 Am 6:30，晴(水溫 24℃)

陽升起，藻類行光合作用產生氧氣，水體藉由擴散作用將氧氣均勻散佈，使得日間溶氧急遽變化臨界點之水深增加至 2.5~3m 處。在清晨 6 點的溶氧飽和度最低，下午 2 點飽和度達最高，傍晚後逐漸下降，夜間由於大量藻類、微生物行呼吸作用，及水中有機物質進行耗氧分解，造成溶氧迅速降至最低。此圖為連續三天在太湖的無設備區同一定點，在不同時間、不同水深之溶氧飽和度，可得知不論晨昏晝夜，在水深 2.3m 以下底

水層的溶氧飽和度幾乎都低於 50%。

## 2. 太湖水庫在秋夏季藻華期間之日夜間表底水層溶氧特徵

在無增氧設備時，分別計測一日間的最高與最低溶氧量分布。計測清晨日出前及午後時段上下水層之溶氧飽和度，結果整理於圖 4 至圖 7。圖中 X 軸與 Y 軸代表試驗區的水面大小，以公尺為單位，可繪製出上水層與底水層的等溶氧飽

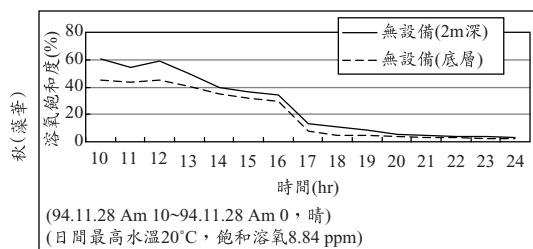


圖 8 太湖無設備水區秋季溶氧飽和度之日夜變化圖

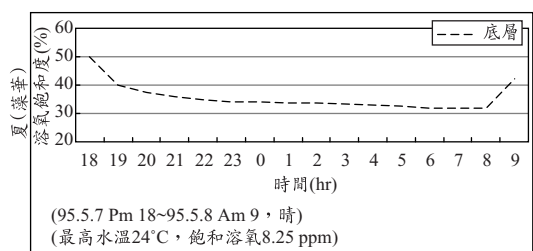


圖 9 太湖無設備水區夏季底層溶氧飽和度之日夜變化圖

和度分布曲線圖，求得代表測點位置與水中溶氧飽和度的平均值。以圖 7 夏季藻華(95.5.8 Am 6:30，晴，水溫 24°C)結果為例說明，可得知試驗區內的溶氧飽和度範圍 24~30%，平均溶氧飽和度 27.3%；全區內底水層的溶氧飽和度分布差約 6%；試驗區內低於平均溶氧飽和度之低溶氧水體(9113.5m<sup>2</sup>)佔 72.3%。由結果知，太湖在藻華期間底水層的溶氧飽和度，低於平均溶氧之低溶氧水體均佔一半以上。圖 8 及圖 9 為無設備水區內代表平均溶氧量的測點在發生藻華時的日夜間溶氧飽和度變化圖。

圖 8 顯示 94.11.28 的下午，由於氣溫突然降低，太湖發生倒藻現象，藻類大量死亡，自黃昏起一小時內，水中底層溶氧飽和度自 30%驟降至 10%以下，顯示上水層與底層底質含大量有機物質持續進行耗氧反應。圖 9 顯示在夏初 95.5.7 太湖發生藻華，5 月 8 日仍在藻華茂盛期，雖然夜間底層有機物質進行耗氧反應，底層溶氧飽和度在清晨雖僅降低至 24~30%，但低於平均溶氧飽和度 27.3%的面積高達 72.3%。以上結果顯示太湖水庫於夏、秋二季受到藻華影響，日夜間溶氧

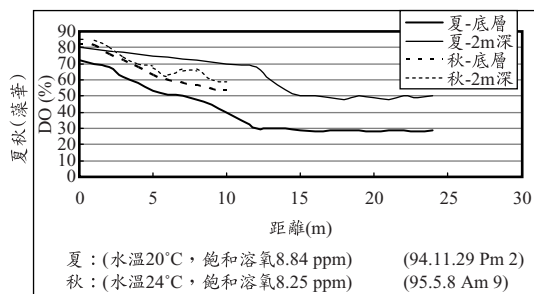


圖 10 微細氣泡機對太湖之緊急增氧能力範圍(啓動 15 分鐘後)

飽和度差異大。因此，可確定太湖水庫的底水層應考慮進行長期有效的增氧改善。

### 3. 微細氣泡機增氧設備對水庫表底水層之增氧效率

#### 3.1 15 分鐘緊急增氧能力範圍

由以上可知水中溶氧濃度多寡與分布特徵主要受藻華影響很大，故後續主要探討微細氣泡機在藻華期間對水域之增氧能力。以一組微氣機出水口為中心，水平距離 10 至 25m 內，每隔 1m 處的溶氧飽和度變化結果整理得圖 10。

由圖 8，在秋天 11 月的太湖無設備區水域的下午 1 時發生藻華現象時，測得水深 2m 處與底層水的溶氧飽和度分別為 51.3%與 52.7%。與圖 10 設備區資料比較，可知一組微細氣泡機之緊急增氧能力範圍至少可達 10m 距離。在增氧能力範圍水域內，可使溶氧飽和度提高，自 54%~84%間變化，且對上水層與底水層的增氧能力相當。影響範圍水域內的中層與底層水之平均溶氧量可分別提高至 70%與 66%。在夏天 5 月發生藻華的太湖無設備區水域，上午測得中底水層溶氧飽和度僅為 27.3~38.4%。由圖 10，可知一組微細氣泡機在夏天藻華發生狀況，增氧分布能力範圍約為 17m 距離。在增氧能力範圍水域內，水中溶氧飽和度自 29.3%~80.5%間變化。影響範圍水域內的中水層與底水層之平均溶氧量可分別提高至 72%與 50%。

#### 3.2 微細氣泡機之增氧效率

在 95.5.8 以一組微細氣泡機自開啓後兩小時

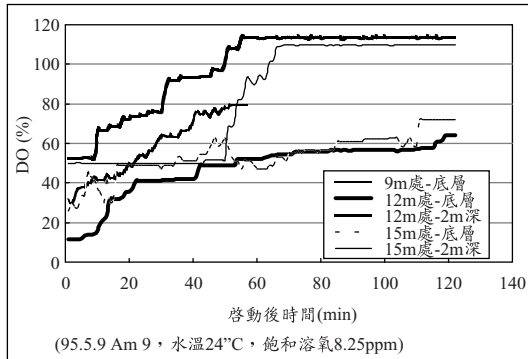


圖 11 距出氣口分別為 9m, 12m, 15m 處的溶氧飽和度變化

內，對四週水體之溶氧變化進行自計，選定在距離微細氣泡機出水口 9、12 及 15m 上下兩個水深處同步紀錄，計測上、下水層的分布範圍。同時時間內，也計測無設備區水域內代表測點處的相同兩個水深的溶氧，作為比對用資料。由於當時太湖發生藻華現象，使得下水層之溶氧飽和度偏低，由圖 11 所示，設備未開啓前，下水層溶氧飽和度僅 15~30%，微細氣泡機啓動後，溶氧飽和度以緩慢速度上升，上水層溶氧在距離微細氣泡機 12 及 15m 處之穩定時間分別為 60 與 65 分鐘；下水層溶氧之穩定時間距微細氣泡機 9、12 及 15m 處分別為 60、120 與 120 分鐘。由於底層溶氧量偏低，所以水體溶氧達穩定平衡需較長時間。兩狀況在溶氧達穩定後，上水層平均增氧百分比約 52~63%，下水層約 36~55%。由以上結果得知，日後針對太湖水庫作增氧設計，以 0.5hp 微細氣泡機之增氧效率，即使在最惡劣氣候狀況，一組改良水體的影響半徑可達約 15m，可提供良好的增氧效率。且在啓動 15 分鐘後已具有增氧效率，在開啓後 2 小時以內可達到穩定的增氧分布能力與效率。

### 3.3 日夜別微細氣泡機之增氧效率

圖 12 為微細氣泡機開啓後 23 至 32 小時內之溶氧擴散效率。得知在水溫 24°C 的夏季藻華狀況下，在下午兩點，光合作用最旺盛時，距離微細氣泡機出水口 12m 及 15m 水體的底水層之溶氧飽和度範圍可達 85~100%，同時間無設備區之底水層溶氧僅 40%；清晨時距離微細氣泡機

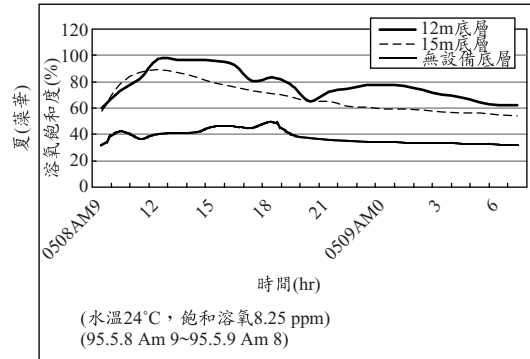


圖 12 微細氣泡機在夜間之增氧效率圖

15m 之底水層溶氧飽和度為 59~61%，無設備區溶氧迅速降低至 34%。因此，可得知微細氣泡機在任何氣候與水質狀態，對於上下水層皆可提供良好的增氧效率。0.5hp 微細氣泡機約可增加 27~35% 的溶氧飽和度。

## 4. 設備效率

### 4.1 微細氣泡機的溶氧傳遞速率( $K_{La}$ )

由上述未開設備時與開啓設備 2 小時後六個位置的溶氧分布計測結果，可以計算得知微細氣泡機的溶氧傳遞速率。以夏季狀態水體的  $K_{La}$  值表示微細氣泡機增氧設備應用於太湖水庫之增氧能力。結果如表 2。95/5/8 計測時水溫為 21.2°C。

由表 2 結果，得知各測點之氣液質傳效果相當優良，置於金門太湖之微細氣泡裝置之混合管長度僅 50cm，增氧效果也相當好，由於氣泡在水中的停留時間隨水深而增加，增氧效果也因而增加。可見各測點溶氧達到穩定的時間隨距離而加長，可推估曝氣機之影響半徑大於 25m。

### 4.2 微細氣泡機在發生藻華期間的增氧效率：

太湖水源主要由小太湖(面積約 9000  $m^2$ )流入，在小太湖與太湖發生優養化時，水體之溶氧飽和度相近。在清晨，水體底層溶氧皆偏低，小太湖底層之溶氧甚至為 0ppm，表層溶氧也僅為 3ppm。下午，由於光合作用較旺盛，表層溶氧迅速上升至 10.4ppm 的過飽和狀態，底層仍只有 0.5ppm。由圖 3 及圖 13 顯示清晨六點的太湖，

表 2 太湖水庫微細氣泡機的溶氧傳遞速率與增氧效率

| 日期             | 水溫 t<br>(°C) | 溶氧量 sat<br>(ppm) | 距出氣口<br>距離(m) | 計測位置<br>水深(m) | 溶氧量 t0<br>(ppm) | 經過時間<br>tn (hr) | 溶氧量 tn<br>(ppm) | $(K_{La})_t$<br>(1/hr) | $(K_{La})_{20}$<br>(1/hr) |
|----------------|--------------|------------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|---------------------------|
| 95/5/8<br>夏有藻華 | 21.2         | 8.7              | 9             | 3             | 2.70            | 0.87            | 6.90            | 1.39                   | 1.35                      |
|                | 21.2         | 8.7              | 12            | 1             | 4.58            | 0.77            | 8.46            | 3.71                   | 3.61                      |
|                | 21.2         | 8.7              | 12            | 3             | 0.99            | 1.98            | 5.57            | 0.46                   | 0.44                      |
|                | 21.2         | 8.7              | 15            | 1             | 4.32            | 1.05            | 8.23            | 2.13                   | 2.07                      |
|                | 21.2         | 8.7              | 15            | 3             | 2.26            | 1.85            | 6.28            | 1.39                   | 0.51                      |

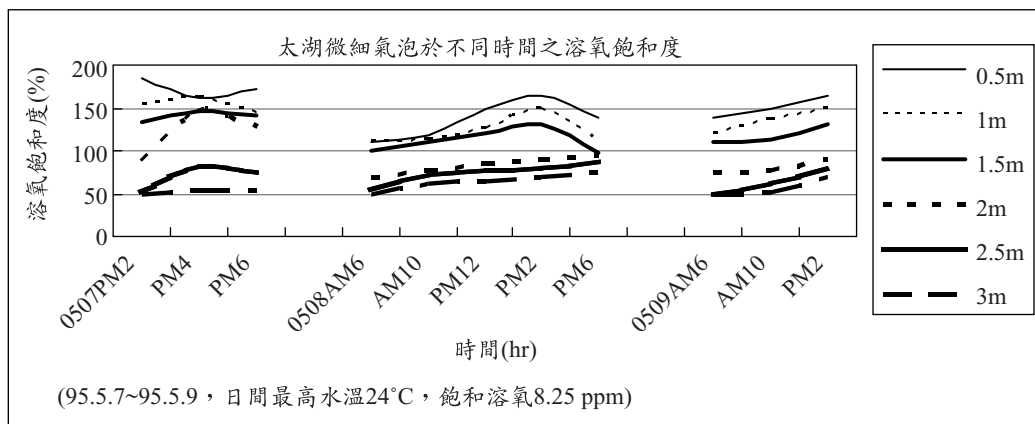


圖 13 太湖發生藻華時的微細氣泡機水區在不同時間不同水層之溶氧變化

微細氣泡機設備區之底水層溶氧飽和度較無設備區提升 29.8%，底水層溶氧達 4.5ppm。在傍晚時，由圖可知水深 2m 以下的設備區，溶氧下降速度也較為緩慢。

圖 14 顯示太湖有設備與無設備區於夏季發生藻華現象，有設備的底層溶氧會逐漸上升，傍晚的溶氧下降速度也較緩。反之無設備區底水層的溶氧在上午 10 點前，並沒有變化，中午以後，由於光合作用與水體交換造成溶氧飽和度迅速攀高，但是其效果依然較微細氣泡機差。有設備區及無設備區關係線間之面積即為微細氣泡機的增氧效率，在清晨，底層溶氧約可提高 2.6ppm，上午及中午提高 3.3ppm，至下午、傍晚稍微略減，僅提升 1.9 及 2.7ppm。

圖 15 及圖 16 顯示，當夏季發生藻華現象，水中溶氧在極低的狀況下，僅約 2ppm，微細氣泡機及湧升柱開啓後可發揮超過百分之百的高增氧效率，使設備周圍 10~12m 範圍內的水體中溶氧在 60~120 分鐘內迅速上升。至於設備應用

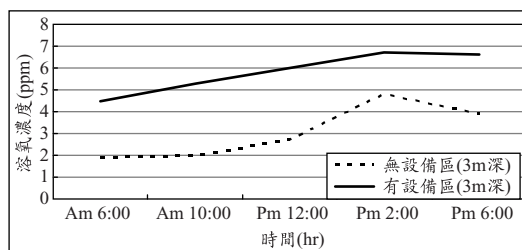


圖 14 發生藻華期的日間，有無設備區的底層溶氧與時間關係

在其它季節時的增氧效率，與無設備時的初始溶氧飽和度有關，但仍可見設備增氧效率。

## 結論與建議

1. 太湖水庫在全年測試過程未出現溫度分層現象，上下水層溫差僅約 0.3°C 以內，然而溶氧分層現象明顯。因此，本研究並不需處理溫度分層問題，主要以改善上下水層溶氧差異為研究重點。

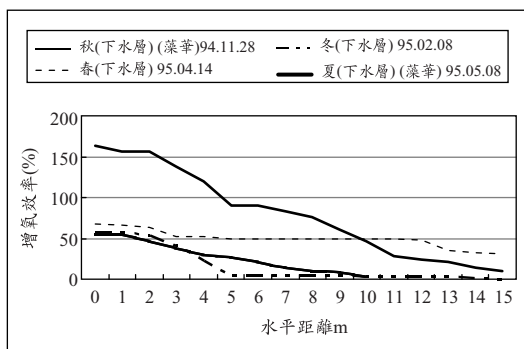


圖 15 微細氣泡機在太湖水庫內不同季節對不同距離底水層之增氧效率

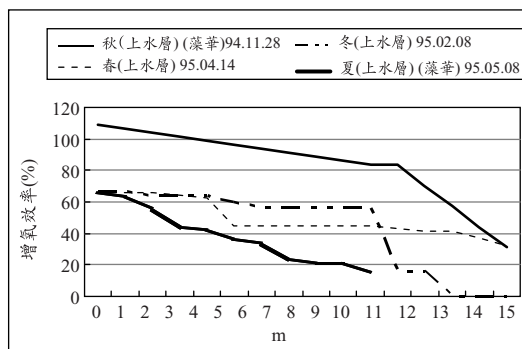


圖 16 微細氣泡機在太湖水庫內不同季節對不同距離上水層之增氧效率

2. 太湖在研究期間內的秋季 94.11 與夏季 95.5 發生兩次藻華現象，由日間溶氧的垂直分布特徵得知，藻類多浮游於約 2m 以上之表水域，尤其在表水 1m 以內的密度最高。因此在光合作用減緩的下午四點後，水深 2m 以下的底水層溶氧即迅速降低。底層水域有明顯缺氧的情況，清晨時降至 0~2ppm。
3. 在夏季藻華期間，太湖表水層日間溶氧高達 9.4~13.7ppm。而水深 3m 的底層水因缺乏藻類且含有大量有機物質進行耗氧反應，水中溶氧僅約 1.9~4ppm，水域內低於平均溶氧飽和度的面積約 72.3%。而太湖水源主要由小太湖流入，在小太湖也發生優養化時，清晨底層溶氧低至 0ppm，表層溶氧也僅 3ppm；下午由於光合作用較旺盛，表層溶氧迅速上升至 10.4ppm 的過飽和狀態，底層仍只有 0.5ppm。因此，可確定小太湖及太湖水庫的底水層應考慮進行長期有效的增氧改善，而整治小太湖更應優先於太湖。
4. 在夏季藻華期間，太湖的表底水層溶氧飽和度相差甚劇，清晨表底水層的溶氧急遽變化臨界點約發生在水深 1.5~2m 處，隨著藻類行光合作用產生氧氣，水體藉由擴散作用將氧氣均勻散佈，使得溶氧急遽變化臨界點之水深增加至 2.5~3m 處。此結果可作為日後配置增氧設備位置的依據。
5. 增氧設備的溶氧擴散能力主要由 15 分鐘緊急增氧能力試驗、2 小時溶氧擴散效率試

- 驗、24 小時溶氧擴散效率試驗等三部分試驗結果得知。
6. 太湖水庫在夏天藻華狀況，增氧設備的影響水域範圍內之溶氧達穩定所需時間較無藻華水質所需時間長。兩狀況在溶氧達穩定後，上水層平均增氧百分比約 52~63%，下水層約 3~55%。一組 0.5HP 微細氣泡機利用在太湖水庫，即使在惡劣的濕冷氣候狀況，其改良水體的影響半徑可達 12~15m，可提供良好的增氧效率。且在啟動 15 分鐘後已發揮增氧效率。
7. 在水溫 24°C 的夏季藻華狀況下，下午光合作用最旺盛時，距離微細氣泡機 15m 的底水層溶氧可達 85~100%，同時間無設備區之底水層溶氧飽和度僅 40%；清晨時增氧區同位置之底水層溶氧飽和度為 59~61%，無設備區溶氧迅速降低至 34%。因此，可得知微細氣泡機對於底水層可提供良好的增氧效率。0.5HP 微細氣泡機約可增加 27~35% 的溶氧飽和度。單位動力增氧量為 7.41kg O<sub>2</sub>/hr；在影響水區體積內的平均增氧量為 1.53ppm。
8. 以全年最大水深 5m 的太湖在夏季發生藻華的水質狀況，實測設備擴散效率結果，得知一支 0.5HP 動力微細氣泡機的平均擴散半徑範圍約 15m，可增加 27~35% 的溶氧飽和度。因此，微細氣泡機的配置間隔可設計為 30~40m。以 110v 動力供應的設備，每組不含施工的造價約 10000 元，可改善水體底層面積約為 1250m<sup>2</sup>、水體體積約為 6250m<sup>3</sup>。耗電速度為

0.297 度電/小時。若連續使用，耗電成本約 550 元/月與 6670 元/年。若以時間控制器調節操作期距，可更節約成本。

## 謝 誌

本研究得以順利完成，感謝金門縣自來水廠提供經費補助。執行期間，工作團隊林志軒、鄧德慧、余信昇、謝恩倉等研究生及助理等多次協同工作，謹致誠摯謝意。

## 參考文獻

1. Colt J., K. Orwicz, and Bouck G., 1991, Water quality considerations and criteria for high-density fish culture with supplemental oxygen. American Fisheries Society Symposium, 10: 372-385.
2. Cooke G. D., E. B. Welch, S. A. Peterson, and P. R. Newroth, 1993. Restoration and Management of Lakes and Reservoir, Lewis Publishers.
3. Peterson S. A., W. L. Smith, and K. W. Malueg, 1994, Full-scale harvest of aquatic plants: nutrient removal from a eutrophication lake, Journal of Water Pollution Control Federation, 46: 679-707.
4. Sternberg, R. W., Johnson II, R. V., Cacchione, D.A. and Drake, D. E., 1986, An instrument system for monitoring and sampling suspended

sediment in the benthic boundary layer. Marine Geology, 71: 187-199.

5. Marine Forum 21, 1995, 「水質計測裝置評價基準」，新技術評價基準作成委員會。217 頁。
6. 行政院環保署九十四年水庫年報 <http://www.epa.gov.tw>
7. 行政院環境保護署環境檢驗所水中葉綠素 *a* 檢驗方法-丙酮萃取法。NIEA E507.01T, 1994。
8. 侯文祥、葉曉娟、梁維真，2006，利用微細氣泡機增氧對養鰻池節約地下水使用之效益研究，台灣環境資源永續發展研討會論文摘要集，5~6 頁。
9. 黃宇宏，2000，「養殖廢水氨氮去除速率之探討」，台灣大學生物產業機電工程學研究所碩士論文，4~18 頁。
10. 郭振泰等，2005，「以生態工法淨化水庫水質控制優養化研究」，環保署委託計畫成果報告。

收稿日期：民國 96 年 4 月 10 日

修正日期：民國 96 年 8 月 27 日

接受日期：民國 96 年 10 月 2 日