

澄清湖曝氣工程效益評估

溫清光¹ 高銘木¹ 郭文健² 莊淑滿³ 張穗蘋³
黃家勤⁴ 楊磊⁵ 鄭幸雄¹

摘 要

本研究以十三個月時間調查澄清湖曝氣工程操作期間之各項優養相關之水質參數，並與曝氣前比較，以評估曝氣工程操作之水質效益。經調查澄清湖民國八十三年二月至八十四年一月之年平均水質為溶氧6.7mg/L、生化需氧量3.6mg/L、總有機碳2.2mg/L、氨氮0.46mg/L、總氮2.77mg/L、總磷0.21mg/L、葉綠素甲 25 μ g/L、透明度94公分、藻類7,000unit/mL，Carlson優養指數67，為優養水庫。水庫營養鹽主要來自外部負荷，底泥釋出之污染量所佔之比例極低。

比較澄清湖曝氣前後相關水質、底泥性質、葉綠素濃度及放線菌密度等調查資料發現，曝氣對水庫水之臭度、三鹵甲烷生成潛能、葉綠素濃度等沒有明顯影響。對湖水之有機物及氨氮濃度和藻類數量稍有降低作用。曝氣對底泥的安定性稍有幫助，但對於改善水庫優養和減少氨氮含量效果有限，無法減少淨水場的加氯量和加藥量，其可計量之效益不大。

-
- 1 國立成功大學環工系教授
 - 2 國立屏東技術學院環保系副教授
 - 3 私立崑山技術學院環工系副教授及講師
 - 4 私立高雄工學院土木系副教授
 - 5 國立中山大學海環系副教授

壹、前言

澄清湖取水前因受嚴重污染，以致水庫中氮(尤其是氨氮)、磷及有機物含量很高，造成水庫優養，原水水質惡劣，以致加氣量很高，臭味及在來水水質不佳。為了改善水庫水的分層，使底層水有溶氧，以減少底泥釋放氮、磷及有機物，並藉著上下水的循環，藻類沉到下層失去陽光，抑制其生長，減少臭味的發生，更可藉著曝氣促使氨氮基速硝化，以減少原水中氮之濃度和處理時的加氣量。今為評估曝氣設備的上述功能，擬針對上述各項功能做一調查與評估，以研究曝氣設備之功能、適用性與限制因子；以及對水質、藻菌及底泥安定性之影響。

貳、水庫水質改善方法⁽²⁾

水庫污染的來源可分為從水庫以外的外部負荷和從水庫本身產生的內部負荷。外部負荷又可分為點源和非點源污染，點源污染主要來自家庭污水、工業廢水和畜牧廢水；非點源污染主要來自林地、農地、市區和草濕地的暴雨逕流。水庫內部負荷主要來自底泥分解所釋放出來之污染物如營養鹽及有機物等。

1. 水庫水質改善的方法

水庫水質改善的方法可分為水庫前污染控制方法、水庫中和水庫水質改善的方法。水庫前污染控制方法是控制水庫集水區的點源和非點源污染在流入水庫之前就把污染物除掉。控制非點源污染最有效的方法是廢水處理和利用自然淨化去除污染物。控制非點源污染的方法有滯水池法、濕地法、草帶法、各種的水土保持方法及其他各種自然淨化法。

2. 水庫中水質改善的方法

在水庫中改善水質的方法及適用條件有下列幾種：

(1) 底泥浚渫法

適用於底泥有機物(一說VS含量超過15%)及營養鹽(N、P)含量

高。水庫淤積需要擴增蓄水量和適當的棄土區。浚渫方法可用浚渫船以抽泥泵抽取或抓斗挖取；或將湖水放乾直接挖泥。

(2)底泥覆蓋或固化法

適用於底泥有機物及營養物鹽含量高，附近地區有廉價之砂、粘土、塑膠、飛灰或水泥等無害物質，可做為覆蓋或固化之材料。使用時將覆蓋或固化材料覆蓋或固化，以安定底泥。

(3)營養鹽不活化法(或稱沉澱法)

磷控制之優養湖泊，若面積較小，水深較深，底層流動較小，可使用硫酸鋁將湖水之磷酸鹽混凝沉澱於湖底。

(4)強迫循環法(或稱曝氣法)

本法是使用空氣或氧氣送入分層湖水之底層，以增加底層水之溶氧或破壞湖水之分層。本法可再分為全層循環法、深層循環法和二層分離曝氣法三種。本法適用於平均水深在5公尺以上有分層之水庫，若要有良好的效果，必須投入足夠之動力和空氣量，根據統計每1000萬 m^3 湖水，需要有5KWH至15KWH之曝氣動力或每公頃湖面需要有0.66至1.0 m^3/min 之空氣量，即使在湖水發生翻騰時也要繼續曝氣，尤其是溫暖地區。

(5)生物控制方法

本法有可分為以浮游動物捕食藻類法、以魚貝類捕食藻類法、以水生生物大量吸收水中營養鹽法或以藻類病毒或其他細菌控制藻類法。本法必須將施放之生物回收才會有效，否則控制生物死亡後，營養鹽仍溶回湖水中，而失去意義。

(6)湖中去藻法

使用化學藥劑(以 $CuSO_4$ 最常用)，將湖中之藻類殺死，但本法之缺點是死亡藻類會分解，而使營養鹽再溶於水中。

另外一種方法是使用過濾方式將湖水中的藻類過濾，本法雖效果好，但過濾緩慢，只適用於局部性大量藻類繁殖之水域。

(7)選擇性去水或放水法

水庫中的水質若有明顯之好壞分層和有適當之閘門或可置抽水機地方可採用本法，一般水庫底部水質較差，若採用此法排除惡化之水質，可兼而排沙，減少水庫之淤積。在雨季時，水庫洩洪時應打開庫底之閘門，以排除沉積之營養鹽和沉沙。

參、澄清湖水庫及淨水場簡介

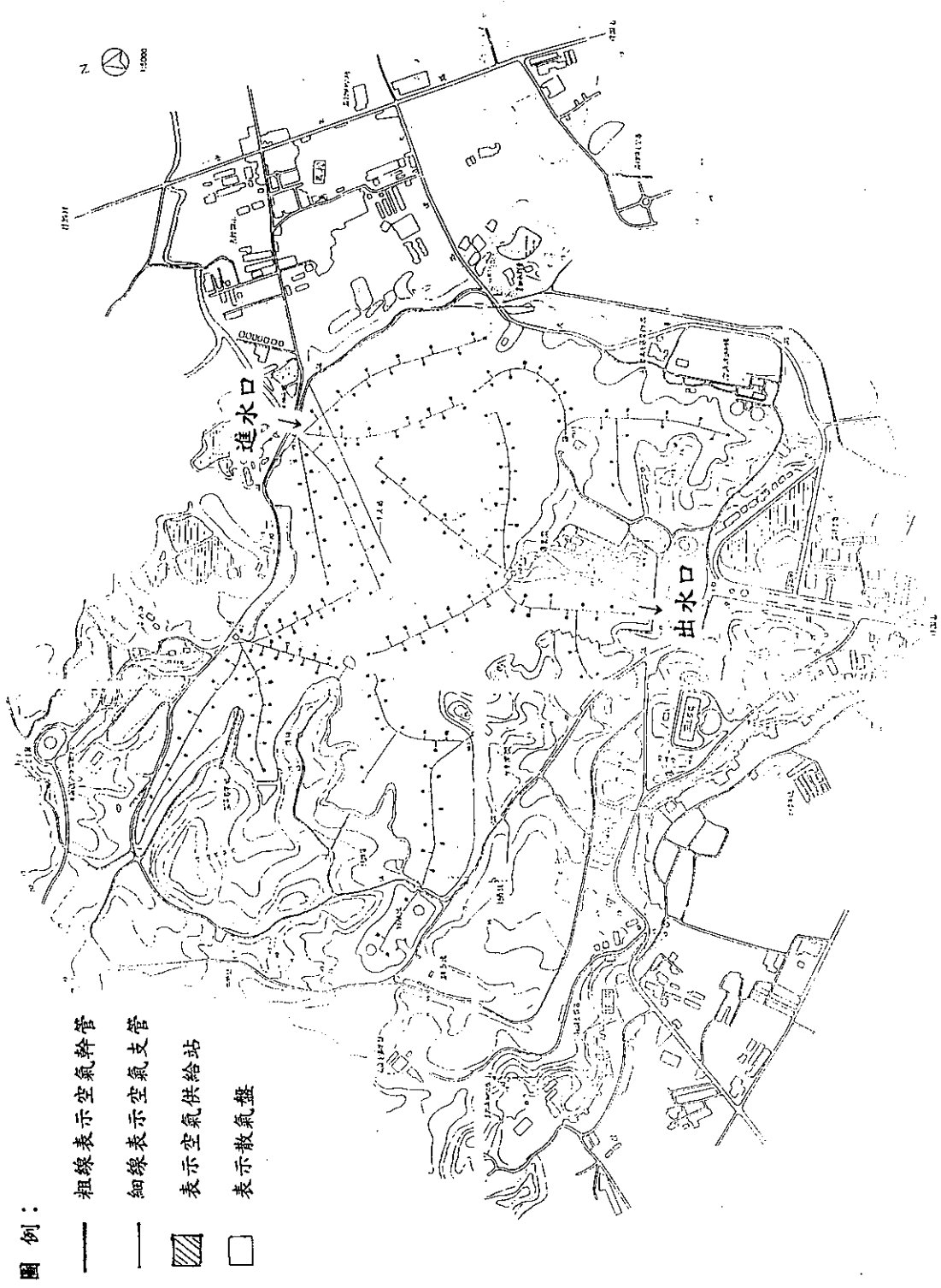
1. 澄清湖水庫簡介

澄清湖，原名大貝湖，除為澄清湖淨水場主要水源，以供應大高雄地區之用水外，同時兼具有觀光及休閒之功能。

澄清湖位於高雄縣烏松鄉，為一挖鑿式蓄水庫，於日據時代即已存在。提供高雄地區之用水，也已超過有五十年的歷史。湖水水源主要是抽自高屏溪之河川水，並經由曹公圳引入，流程約9公里。此外，因近年來高雄地區用水量激增，為補充澄清湖水源之不足，而增抽高屏溪之伏流水。所收集之伏流水再由九曲堂抽水站直接抽至澄清湖淨水場處理使用。目前抽水量約每日31萬立方公尺。湖水面積約103公頃，平均水深約3~4公尺，湖水容量約250萬立方公尺。水源水進流口位於湖之東岸，而淨水場原水取水口則位於湖之南岸。除每年12月為配合高雄農田水利會曹公圳歲修，停止進水外，其他時間則每日從高屏溪抽取9萬~16萬立方公尺，引入湖內。所以，一年中除12月因停止進水，為澄清湖之枯水期外，其他月份之水位經常維持在海拔17~18公尺(1)。澄清湖水庫之地形圖，如圖1所示。

2. 澄清湖淨水場簡介

澄清湖淨水場創建於民國31年，為國內歷史較為悠久之淨水場之一。該場位於澄清湖之東南隅大貝路旁，為台灣省自來水公司高雄區給水系統主要水源之一，供用於大高雄地區部分工業及淨水場附近社區民生用水。原舊有淨水場出水量為15萬立方公尺/日(cmd)，原水取自高屏溪高屏大橋地面水，藉曹公圳輸送到夢裡，用抽水機抽入澄清湖，再送至淨水場處理。由於高雄地區用水量日增，高屏溪及曹公圳污染日增，民國76年在高屏大橋附近埋設伏流管，抽取高屏溪伏流



圖例：

- 粗線表示空氣幹管
- 細線表示空氣支管
- ▨ 表示空氣供給站
- 表示散氣盤

圖 1 澄清湖及其曝氣系統圖

水，直接用1650公厘水管送至水場處理，以減少在輸送過程受污染。八十一年四月28日擴場完成(新場簡稱ABW)，每日增加出水量20萬立方公尺，原水部分來自伏流水，部分來自澄清湖。由於伏流水的水質(尤其是氨氮)日漸惡化，影響加氯量，因此在民國八十二年八月6日將伏流水全部引入湖水，再以湖水抽送至ABW場。所以目前澄清湖絳水場總出水量約35萬立方公尺/日(cmd)。

肆、澄清湖曝氣工程簡介

澄清湖使用散氣式全層曝氣法，全湖共設 192 個散氣盤從湖底曝氣，曝氣系統由 5 個空壓站組成(如圖 1)，每站設 25 匹馬力空壓機一台，散氣量 $3.1\text{m}^3/\text{min}$ ，壓力 50psi。為延長水力停留時間，防止進水口與出水口間的短流，進水口附近並設置導流牆。

伍、澄清湖曝氣工程效益評估方法⁽³⁾

本文針對曝氣工程 1.對水庫水質之影響， 2.對淨水程序之影響處理效益評估， 3.對清水水質之影響， 4.適用性及限制因子做評估，評估的方法如下。

1.曝氣工程對水庫水質之影響

- (1)收集歷年來水庫及其進流水水質資料，如水溫、濁度、色度、葉綠素甲、藻菌類、臭味、溶氧、氨氮、總氮、磷、THMFP、TOC、ORP、BOD₅、底泥成份及釋放污染物之速率。
- (2)每月測定水庫之水質：在曝氣工程已操作情況下，每月採取水樣及底泥，連續一年，分析相關項目，做為曝氣工程對水質影響評估之用。
- (3)測定原水之 THMFP 以評估曝氣工程對三鹵甲烷形成潛勢之影響。
- (4)測定各種型態氮以評估曝氣工程對生物硝化之影響。
- (5)在有氧及無氧情況下，測定氧化還原電位以及底泥釋出氮、磷、有

機碳之速率，以比較曝氣工程對底泥之影響。

2. 曝氣工程對淨水程序之效益評估

- (1)統計澄清湖原水之水質(如藻類、濁度、色度、 NH_3 等)及濾程、加藥量(混凝劑及 Cl_2)間之關係。
- (2)統計曝氣工程完工後兩淨水廠原水水質與濾程及加藥量間之關係。
- (3)調查曝氣工程之操作費用。
- (4)統計評估曝氣工程對淨水程序之效益。

3. 曝氣工程對清水水質之影響

- (1)收集澄清湖淨水場歷年之清水水質。
- (2)分析清水之相關水質。
- (3)統計及評估曝氣前後清水水質之變化。

4. 曝氣工程之適用性及限制因子

- (1)收集文獻並評估各種曝氣方式對水質改善之影響因子。
- (2)統計水庫曝氣操作前後之水質，以檢討全層曝氣可以改善及無法改善之水質因子。
- (3)以質量平衡評估曝氣工程之效益。

陸、評估結果

1. 曝氣工程對水庫水質影響

- (1)澄清湖進流水的水質遭受污染，且有日漸嚴重之趨勢。影響水庫溶氧和淨水場加藥量的氨氮濃度增加幅度更大，高屏溪流域的污染管制有待加強。
- (2)澄清湖1994年2月至1995年1月全年年平均水質，溶氧 6.7mg/l 、 BOD_5 3.6mg/l 、有機碳 2.2mg/l 、氨氮 0.46mg/l 、硝酸氮 1.58mg/l 、總氮 2.77mg/l 、正磷酸鹽 0.15mg/l 、總磷 0.21mg/l 、葉綠素甲 $25\ \mu\text{g/L}$ 、

透明度94公分、Carlson優養指數為67。

- (3)澄清湖平均水深不到4公尺，並無熱分層現象，湖水溶氧全年平均6.7mg/l。不曝氣時白天溶氧與曝氣時接近，清晨時低於曝氣時1mg/l左右，但全日溶氧都在5mg/l以上。底層亦無缺氧現象。
- (4)澄清湖氨氮去除，是由硝化作用與藻類及其他微生物的吸收利用所致，但硝化作用進行緩慢，對氨氮降低功能有限。
- (5)曝氣後澄清湖的葉綠素濃度與曝氣前(1992年)沒有明顯差異，但與以往出現之高峰期及1981年比較有顯著減少。曝氣工程對於抑制藻類生長是否有效，有待進一步探討。
- (6)清水的錳、濁度、臭度和亞硝酸氮濃度，不受曝氣之影響，但清水的氨氮和亞硝酸氮有逐年增加的趨勢，據判斷是由於水庫進流水和水廠原水各種污染物濃度逐年增加所致，而非曝氣的負面影響。
- (7)澄清湖及其曝氣系統對有機物(TOC或BOD表示)有分解作用，但功能有限。水庫1994年2月至1995年1月全年平均之TOC為2.2mg/l，BOD₅為3.6mg/l。
- (8)水庫進流水和出流水之三鹵甲烷生成潛能(THMFP)各月平均值分別為259及253 μ g/L，進流水與出流水相差不顯著。
- (9)澄清湖水的氧化還原電位(ORP)維持在152mv左右，進出水口沒有顯著差別。

2. 曝氣工程對水庫底泥之影響

- (1)澄清湖曝氣前(1990年)底泥揮發性固體物含量(VS)約10.5%左右，ORP平均值為-366mv，曝氣後(1994年)VS為7.3%，ORP為-125mv，曝氣對底泥的安定有顯著影響。曝氣後底泥的含水率平均為65%，底泥泥柱上層五公分之孔隙水氨氮平均濃度18.7mg/l，硝酸氮2.82mg/l，磷酸鹽0.35mg/l，總磷0.71mg/l，TOC 17.9mg/l。曝氣前孔隙水總磷為1.87mg/l、TOC為15mg/l。曝氣後總磷減少但TOC沒有明顯變化。
- (2)曝氣後澄清湖底泥的耗氧速率平均為1.74 gO₂/m²-day。在喜氣狀態

下氮氣、硝酸氮、磷酸鹽及TOC釋放速率分別為6.58、1.11、微量及28.4 mg/m²-day，在厭氧狀態下，依次4.79、微量、6.57及29.1mg/m²-day。厭氧狀態較喜氣狀態下釋出速率高。

(3)曝氣工程可以供給澄清湖湖水較多之溶氧，使之保持喜氣狀態，可降低底泥營養鹽及有機物之釋出量，但由於澄清湖外部污染負荷大遠高於內部負荷，曝氣對降低水庫污染負荷的效果有限。

3. 曝氣工程對藻類之影響

(1)基本上澄清湖之藻類相呈明顯季節性變化，且藻類之種類亦多。本年度優勢藻種與曝氣前所出現之優勢藻種稍有變化，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 Oscillatoria，目前出現數量少。此外對澄清湖中暝浮性藍綠藻有明顯之抑制功效。

(2)曝氣使水庫產生良好之混合，上下層水中藻類相和葉綠素濃度相差不大，但與部分地點底層藻類較中、下層少。

(3)1994年2月至1995年1月藻類年平均濃度為7,000units/mL，比澄清湖淨水場在1991及1992年測定之藻類數低。但由於這四年間澄清湖曾經試放過鯉魚吃藻和曝氣工程的實施，以介入檢定結果，在5%之顯著水準下，並沒有顯著效果。藻類的濃度受採樣深度以及水場擴建水庫進水量增加的影響甚大。

(4)本研究試以藻類相之歧異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，如須建立仍需更進一步之修正，另外對澄清湖藻種鑑定問題仍須克服。

4. 曝氣工程對臭度與放線菌之影響

(1)在1994年2月至1995年5月的一年間，澄清湖湖水終年初嗅數並不高，年平均初嗅數為5.4，有季節性變化，故生物性異味為湖水臭度主要來源。

(2)放線菌於調查期間的含量都不高，年平均尚不到100cells/mL，菌數最高的8月份也只得250cells/mL，與1982年、1983年陳是瑩教授對澄清湖所作的調查之年平均1,700cells/mL及3,400cells/mL差異很大，

1983年至1993年間因缺乏調查資料，無法了解其間之變化。

(3)湖水初嗅數於1991年下旬起已開始降低(大致都在8以下)此乃與水庫放養魚類及捕食藻類有關，經曝氣處理後並無再顯著降低的初嗅數，曝氣法無法在降低初嗅數。

(4)歷年6月至11月是湖水初嗅數較高的季節，初嗅數與放線菌的相關性很高，如1983年7月初嗅數高達54時，放線菌同樣也高到30,000cells/mL，而1994年6月至11月此時期初嗅數甚少超過6，菌數也甚少超過200cells/mL，故澄清湖於夏、秋兩季，應特別注意放線菌增生所引起的臭味問題。

5. 曝氣工程對成本效益方面

(1)澄清湖曝氣工程初期投資額為6,562.5萬元，折合年金417.4萬元。維護操作費每年需154.7萬元。合計總成本每年需投資572.1萬元。

(2)澄清湖因曝氣原水的氨氮減少有限，無法減少加氯量。

6. 澄清湖曝氣方式和限制因子

澄清湖平均水深低於5公尺，沒有熱分層現象，各處溶氧高於4mg/l以上，且其污染。主要來自外部負荷，又由於高度優養，磷不為藻類生長之限制因子，致使全層循環(曝氣)法，在水庫水質之改善上不如預期。故澄清湖水質優養問題除改善高屏溪水質之治本方法外，在治標方面必須另尋改善策略。

柒、結論與建議

1.澄清湖平均水深只有3至4公尺，湖水不分層，上下層湖水溶氧都很高，曝氣對湖水溶氧沒有太大助益。又該湖之污染負荷主要來自進流水(外部負荷)，所以曝氣造成的內部負荷減少對於湖水水質及優養改善並無顯著效果。

2.澄清湖營養鹽主要來自外部負荷，尤其是水庫進流水，其次是集水區的非點源污染。而來自底泥的內部負荷所佔之比例不大。改善水庫水質，必須控制進流水水質、限制遊客人數同時截流遊憩區污水

或雨水外放或處理。

3. 澄清湖的溶氧(即使不曝氣)，全天都可維持4mg/l以上，若在操作上没有困難，為了節省能源，建議每日清晨3至5點溶氧較低時曝氣兩個小時即可。
4. 由於澄清湖的優養短期內無法明顯改善，自來水公司應繼續尋求有效的優養控制方法，在此之前，建議淨水場早日完成高級處理，以改善自來水水質。

參考文獻

1. 「湖沼之水質保全」，日本環境廳水質保全局，1986。
2. 澄清湖與蘭潭水庫水質改善規劃報告，開元工程顧問公司，1995。
3. 溫清光等「澄清湖水庫曝氣工程效益評估」，成功大學環境工程系暨研究所，1995。