

優養化水體水質處理技術及設備研發應用 之研究

Study of Water Quality Treatment Technology and Its Application in Eutrophication Water Bodies

國立臺灣大學
生物機電工程學系
博士
陳以容
Yi-Ron Chen

國立臺灣大學
漁業科學研究所
退休教授
侯文祥
Wen-Shang Hou

國立臺灣大學
生物機電工程學系
退休教授
周楚洋
Chu-Yang Chou

教授
黃振康
Chen-Kang Huang

摘 要

優養化水體的處理技術，可分為物理處理法、化學處理法及生物處理法。目前改善湖庫水體優養化的方法，較常使用物理性方法中的曝氣法；生物濾床法通常用於處理高污染水質，在濾床內填充濾材介質，使微生物附著於濾材上並與廢水中有機質接觸，以淨化水質，處理效率高，適合小面積的水質處理；生物控制水質管理法，係利用水域中生態系食物鏈方式進行水質淨化的方式，是近 10 年來國外極為重視及使用的生物處理法。

本研究主要目的有兩部分，一是生物濾床系統及曝氣設備的研發及應用、一是建立國內生物控制水質管理法的操作參數及實地應用。研究重點偏重在研發設備的水質處理效率及生物控制水質管理法現地實驗的應用結果之探討。

研究結果包括：

1. 研發「低動力生物濾床系統」並應用於景觀池及養殖池。景觀池實驗操作共計400日，實驗期間氨氮平均去除率為58%；養殖池實驗操作116日，實驗前期(15天~57天)設備去除總氨氮的效率最高可達63%。而自第75天開始，設備出水總氨氮均高於入水總氨氮，推測可能原因是養殖過程中定期持續地投放營養劑，設備有機物堆積太多，硝化菌生物膜老化，因而抑制硝化作用，以致設備在實驗後期無法正常發揮作用。
2. 研發曝氣設備「耘水機」，同時在台大醉月湖及湖泊水庫探討此曝氣設備的增氧效率評估及景觀湖泊的水質改善分析。實驗結果顯示「耘水機」曝氣設備的攪動水體擴散半徑約20公尺，攪動水體擴散面積約1,256 m²，攪動水體體積約3,140 m³。
3. 生物控制水質管理法(Biomanipulation)是以人為方式改變魚類相的組成，再利用魚類的食性關係，控制浮游生物相的群聚結構，以達到水質淨化。本研究於台大醉月湖放養黑鯪進行生物控制水質管理，實驗中計算其生長過程，以6年為期，

即6年後應再補充新的魚苗，原有黑鯪則可進行捕撈替換，結果顯示如此可穩定水質、維持黑鯪攝食藻類的穩定性，成功地提高黑鯪在醉月湖的合理利用效益。

關鍵字：優養化水體、生物濾床系統、曝氣設備、生物控制水質管理法、黑鯪

Abstract

The treatment of eutrophication water bodies can be divided into physical, chemical and biological treatment method. At present, aeration of the physical method is frequently adopted to improve the eutrophication of lakes and reservoirs. The biological filter is usually used to treat highly polluted water, with the media filled in the filter, the microorganisms will be attached on the media and thus to purify the water. It has a high treatment efficiency and is suitable for small-scale water bodies. The biomanipulation is a most prevailing biological method in this decade by using the ecological food chain in the water body to purify the water.

The objective of this study has two parts: one is to develop a facility - recirculating aquaculture system (RAS) with biofilters and aeration equipment, and its application; the other is to establish the operational parameters and field application of domestic biomanipulation. To achieve the above objective, the research focuses on investigating the treatment efficiency of the facility developed and the application results of the field experiment of the Biomanipulation.

The results of this study include:

1. Development of the "recirculating aquaculture system (RAS) with biofilters" and its application on landscape pond and culture pond. The landscape pond was operated for a total of 400 days, and the average removal rate of ammonia nitrogen was 58% during the experiment. The operation of the culture pond was 116 days. At the early stage of the experiment (15 ~ 57 days), the removal efficiency of the total ammonia nitrogen could reach up to 63%. While starting from the 75th day, the total ammonia nitrogen of the effluent was higher than the influent. It was presumed too much organic matters accumulated in the equipment due to the periodically supply of the nutritional broth. It thus resulted the aging of the nitrifier biofilm and inhibited the nitrification, so that the system could not normally function at the later stage of the experiment.

2. Development of the aeration equipment "pond aeration system" and evaluation of its oxygenation efficiency by conducting experiment at the Drunken Moon Lake of National Taiwan University, and its efficacy in improvement of the water quality of the landscape lake reservoir. The experimental results showed that the aeration equipment of the "pond aeration system" had a diffusion radius of about 20 meters, a diffusion area of about 1,256 m², and a volume of about 3,140 m³ of agitated water.

3. Biomanipulation is a water quality management practice which the natural aquatic organisms is controlled by changing the composition of the fish phase artificially, and then uses the feeding relationship of the fish to control the cluster structure of the plankton phase so as to achieve the water purification. In this study, the silver carp was stocked in the Drunken Moon

Lake of National Taiwan University by using biomanipulation method to biologically control the water quality. During experiment, the growth process of the silver carp was monitored and calculated for a period of 6 years, i.e., new fry would be added after 6 years, and the original silver carp were replaced by fishing. Experimental results showed the water quality and the feed algae of the silver carp was able to stably maintained, could enhance the rational utilization of the silver carp in Drunken Moon Lake successfully.

Keywords: Eutrophication water bodies, Recirculating aquaculture system (RAS) with biofilters, Aeration equipment, Biomanipulation, Silver carp

一、前言

優養化水體不論在自然環境還是人為環境(如陸域養殖池、景觀池、廢水處理槽、人工淨化槽等)，皆為水中營養鹽的濃度產生變化，進而造成臭味及毒性物質的產生。在台灣自然環境中封閉的湖泊水域，由於點源及非點源污染，因為高溫造成湖庫近半年時間處於優養狀態。優養化會造成水中浮游性動植物及藻類的大量繁衍，將於水表面形成遮蔽陽光的現象，大量藻類的增加將因光合作用而使水中酸鹼值上升，藻類死亡時又加速湖庫淤積的問題(環保署，2005)。

人為環境中的陸域養殖池則因為高密度養殖，需投入較多的餌料增加養殖生物成長；另台灣傳統的戶外養殖方式，常為了製造養殖池的水色(藻色)而投入肥料增加營養鹽，提供水中藻類的繁生，這亦會使水體產生優養化現象。景觀池通常位於市中心位置，具有防災、景觀、提供緊急用水等諸多特點。景觀池通常被認為是一個封閉的系統，即使有助於改善人類生活的條件，但在封閉的水體中，地表徑流和有機污染物，常導致污染物的累積(Chang et al., 2010)。又如遊客投餵麵包、餌料或景觀池中放養鴨鵝等禽類，其糞便亦是造成水體優養化的主因之一，這些營養鹽在水中的積累最終可能導致優養化，使得病媒蚊生長及傳播，造成衛生問題，增加管理的困難。

優養化水體的處理技術，可分為物理處理法、化學處理法及生物處理法。目前改善湖庫水體優養化的方法，較常使用物理性方法中的曝氣法；生物濾床法通常用於處理高污染水質，在濾床內填充濾材介質，使微生物附著於濾材上並與廢水中有機質接觸，以淨化水質，處理效率高，適合小面積的水質處理；生物控制水質管理法，係利用水域中生態系食物鏈方式進行水質淨化的方式，是近 10 年來國外極為重視及使用的生物處理法。

本研究主要目的有兩部分，一是生物濾床系統及曝氣設備的研發及應用、一是建立國內生物控制水質管理法的操作參數及實地應用。研究重點偏重在研發設備的水質處理效率及生物控制水質管理法現地實驗的應用結果之探討。

研究內容主題包括以下 4 項:

1. 低動力生物濾床系統的設計研發及應用。同時探討生物濾床系統應用於景觀水池及養殖池之除氮及硝化特性。
2. 曝氣設備的設計研發及應用。同時探討曝氣設備的增氧效率評估及景觀湖泊的

水質改善分析。

3. 探討生物控制水質管理法應用於景觀湖泊的水質改善分析及功效。
4. 探討曝氣設備與生物控制水質管理法應用於景觀湖泊的水質改善分析及功效。

二、 材料與方法

本研究主要探討二個大方向，一是生物濾床系統及曝氣設備的設計研發及應用，另一是建立國內生物控制水質管理法的操作參數及實地應用。研究內容及實驗場地依設備處理需求、水質狀況包括：

1. 低動力生物濾床系統的設計研發及應用。同時探討生物濾床系統應用於景觀水池(普養水質)及養殖池(優養水質)之除氮及硝化特性。
2. 曝氣設備的設計研發及應用。同時探討曝氣設備的增氧效率評估及景觀湖泊(普養水質)的水質改善分析。
3. 探討生物控制水質管理法應用於景觀湖泊(普養水質)的水質改善分析及功效。
4. 探討曝氣設備與生物控制水質管理法應用於景觀湖泊(普養水質)的水質改善分析及功效。

2.1 低動力生物濾床系統設計

「低動力生物濾床系統」採上下層方式排列，利用重力的原理，增加水流速。系統上下層尺寸分別為 80 cm*50 cm*38 cm 及 100 cm*50 cm*39 cm 的長方形 PVC 槽體，上層設置過濾棉，下層設置直立式毛刷。上層為脫硝反應區，下層為硝化反應區。二層充分隔離以解決硝化區需充分曝氣的需要。水流由上層設備入水、下層設備出水，利用虹吸原理將池水引入生物濾床之淨化系統內。為增加系統內水力停留時間，在上下兩層共設置 7 層隔板(圖 2-1)；另為避免上層的水流來不及流入下層，故將上層的入水管設計為 1”，下層的出水管則設計為 1/2”，可避免系統內水流排空來不及補水而破壞系統內的虹吸作用。如此循環不斷將淨化後的池水流回景觀生態池中，以達到水質淨化的功效。

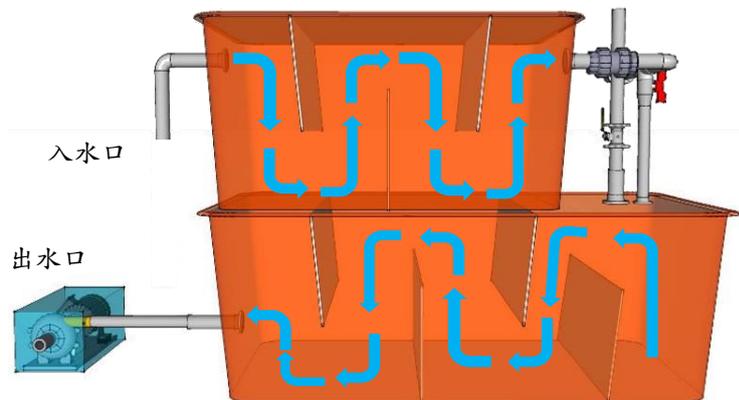


圖 2-1 低動力生物濾床系統水力示意圖

2.2 耘水機曝氣設備構造設計

耘水機曝氣設備構造設計，係利用 Solidworks (Solidworks corporation, MA., USA)繪製耘水機曝氣設備的實體模型，先以 1:20 的比例建構實驗室測試模組，模型建構完成後，使用流體模擬軟體 CFdesign 9.0 (Autodesk, CA., USA)模擬耘水機曝氣設備模組於水槽內的運作情形，主要目的是希望經由模擬來觀察耘水機曝氣設備模組所產生的流場情形、驗證耘水機曝氣設備模組的效用，並於 60 cm 寬的水族缸內測試其水流狀況，經過實測與軟體模擬分析的流況一致。研發設計過程共經過 4 代的改良，針對傳統的葉輪式水車，進行葉扇形式及攪水方式的改變，從傳統的垂直式攪動曝氣改為水平式攪動曝氣，葉扇形狀及配置也有所不同。由於第 4 代曝氣設備，葉扇造成水體水流的分布形狀，類似葉扇在水中耕耘的畫面，因此將設備取名為”耘水機”，圖 2-2 為耘水機曝氣設備 3D 示意圖。

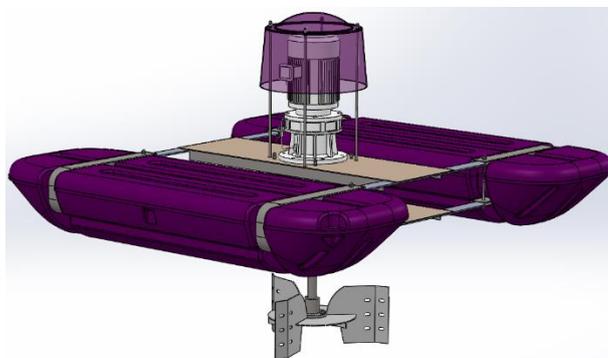


圖 2-2 耘水機曝氣設備 3D 示意圖

2.3 生物控制水質管理法操作方式及分析方法

生物控制水質管理法(Biomanipulation)是以人為方式改變魚類相的組成，再利用魚類的食性關係，控制浮游生物相的群聚結構，以達到水質淨化目的。依氣候條件與棲地環境的不同有兩種操作方式，Shapiro *et al.* (1975) 提出溫帶地區的生物控制水質管理法的理論與操作方式，Thomas (1990) 則發展出熱帶地區的生物控制水質管理法。溫帶水域的生物控制理論基礎，是以增加浮游動物數量，來達到減少藻類的目的。然而在熱帶及亞熱帶水域，由於棲地環境與浮游動物的種類及體型大小與溫帶水域有所不同，所以在攝食浮游植物效率上也有所差異，以致無法有效控制浮游植物數量(圖2-3)。Thomas *et al.* (1990) 針對熱帶及亞熱帶水域的水質管理提出直接以濾食浮游植物之魚類來替代溫帶地區浮游動物的角色，達到減少藻類的目的。

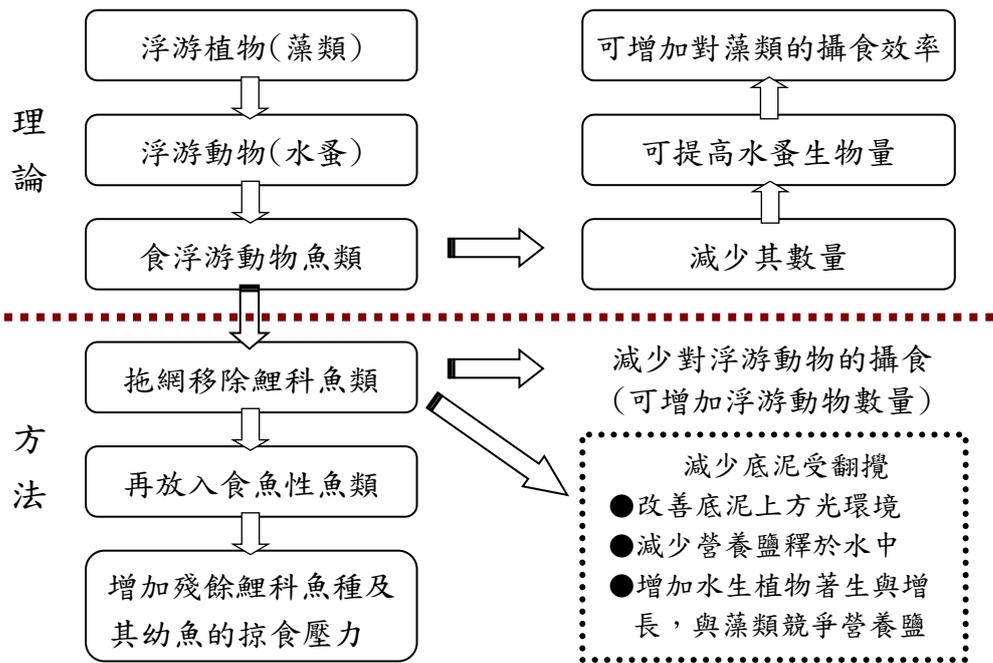


圖 2-3 生物控制水質理論示意圖 (Hansson *et al.*, 1998)

生物控制水質管理法的操作關鍵為須先調查水域內的魚類相，知道水域內魚類相的組成結構，才能依照魚群結構的組成以人為方式改變其族群，進而達成生物控制水質管理法的應用。因此，長時間的魚類相調查是非常重要且必需的，本研究以翡翠水庫及台灣大學醉月湖為調查實驗地點，翡翠水庫自2006~2020年長期監測調查達15年(侯與陳，2006-2008、侯與陳，2009-2020)，醉月湖自2014~2021年共計調查了8年(侯與陳，2014-2021)。翡翠水庫係大臺北地區公共用水的主要供應來源，為確保大臺北地區民眾用水的健康與安全，需透過長期監測，以掌握水庫內水生動物之物種與數量變化對水質的影響。本研究長期調查及監測翡翠水庫水生動物與水質關係，提供翡翠水庫管理局針對水庫水質維護與改善之相關對策作為參考，而台大醉月湖的調查監測則作為實施生物控制水質管理法的操作場域。由文獻得知，濾食性魚類黑鯰及白鯰由於濾食能力強、成長快速、且具高經濟食用魚類之特點，在國內外的湖泊與水庫大部分以鯰鱘魚類來達到減少藻類的目的。本研究以台灣大學醉月湖作為優養化水質改善的實驗場地，於2015年5及7月分別放養濾食性魚類黑鯰共486尾(體長約15 cm)，用來替代浮游動物攝食藻類的角色，做為濾食醉月湖中藻類的魚類。無論是增加浮游動物數量來提高對藻類的攝食效率，或是增加食藻性魚類控制藻類數量，皆是以生物控制水質管理法的方式來達到淨化水質的目的。

三、結果

3.1 低動力生物濾床系統應用及水質處理效率探討

探討在封閉水體中「低動力生物濾床系統」的除氮能力及水質處理效率。針對所研發的「低動力生物濾床系統」並應用於景觀池及養殖池。

1. 以「低動力生物濾床系統」在臺灣大學的景觀池進行水質改善實驗。現場實驗共計 400 天兩個階段，分為 332 天及 68 天兩個階段完成。第一階段從設備設置開始至第 332 天止，於 332 天進行設備內部清洗；第二階段為 332 天至第 400 天止。景觀池實驗操作共計 400 日，實驗期間氨氮平均去除率為 58%；
2. 以屏東九如泰國蝦養殖池作為另一個試驗現場。利用省水節能之池內循環水系統，降低淡水長臂大蝦養殖池中營養鹽累積對生物及環境影響。本試驗場地約為 1,400 m³ 的養殖池，放養 15,000 尾平均 3.67 g 體型的淡水長臂大蝦，本實驗操作共 116 日，每日設備操作時間為 24 小時，(每運轉 45 分，停機 15 分)，其水力停留時間為 14.5 分鐘，全池水量之日循環率為 2%/day，設備每日處理水量為 23 m³/day，處理每單位水體積耗能為 190 W/m³。養實驗前期(15 天~57 天) 設備去除總氨氮的效率最高可達 63%。而自第 75 天開始，設備出水總氨氮均高於入水總氨氮，推測可能原因是養殖過程中定期持續地投放營養劑，設備有機物堆積太多，硝化菌生物膜老化，因而抑制硝化作用，以致設備在實驗後期無法正常發揮作用。

3.2 耘水機曝氣設備構造設計

探討以 1:1 的尺寸放大製作耘水機的實體原型機，在小型湖庫中進行增氧效率及流場分佈量測分析。測試地點分別設置在大陸安海鎮山兜水庫及臺灣大學醉月湖二處。由於不同水體可能因為季節氣候條件、現場水體初始溶氧狀況不同，使得溶氧擴散範圍有所差異，因此為了客觀比較「耘水機」曝氣設備攪動水體擴散能力上的差異，本實驗以流場分佈方式，利用流速儀量測「耘水機」在開啟後造成實驗水體流場的變化情況，作為判斷「耘水機」攪動水體擴散能力的依據。以「耘水機」啟動後，其中心點水流向外擴散的距離，定義為「耘水機」攪動水體擴散半徑，可得知「耘水機」攪動水體擴散面積及攪動水體體積，藉此可評估、比較「耘水機」攪動水體擴散能力。

1. 大陸安海鎮山兜水庫:「耘水機」曝氣設備啟動前後水中溶氧變化情形。設備未啟動前水下 0.5 m DO 為 4.89 mg/l，水深 2.5 m 位置 DO 為 0.08 mg/l；設備啟動後，具曝氣設備水平 3 m 處量測水中溶氧，0.5 m DO 為 6.4 mg/l，水深 2.5 m 位置 DO 為 0.38 mg/l；具曝氣設備水平 5 m 處量測水中溶氧，0.5 m DO 為 6.27 mg/l，水深 2.5 m 位置 DO 為 0.08 mg/l。由表 4.2 顯示，設備啟動後，除了接近池底表面外，水中溶氧皆有逐漸增加的現象，尤其在水深 1.0~1.5 m 處，距離曝氣設備越遠，增氧效果越佳，此現象與曝氣設備流場模擬時的現象一致。
2. 臺灣大學醉月湖:現地測試啟動前後水中溶氧及流速變化結果。設備未啟動前水下 0.5 m 處 DO 為 7.96 mg/l，水深 2.5 m 位置 DO 為 0.5 mg/l；設備啟動後，具曝氣設備水平 0、3、5、10、15、20 m 處量測水中溶氧及流速，並紀錄水中溶氧與流速變化關係。設備開啟後，表水層溶氧(0.5 m)在 8.90~9.46 mg/l 之間，底水層溶氧(2.5 m)在 7.27~8.75 mg/l 之間。由以上結果顯示「耘水機」攪動水體後使得水中溶氧分佈平均。醉月湖量測的水中溶氧與山兜水庫現況一致，皆是距離曝氣設備越遠增氧效果越好，距曝氣設備水平 20 m 處已靠近岸邊，因此無法再擴大水平距離，由現況顯示

水中溶氧並無減弱現象。實驗結果顯示「耘水機」曝氣設備的攪動水體擴散半徑約 20 公尺，攪動水體擴散面積約 1,256 m²，攪動水體體積約 3,140 m³。

3.3 生物控制水質管理法在景觀湖泊之應用與水質分析

生物控制水質管理法的操作關鍵為須先調查水域內的魚類相，知道水域內魚類相的組成結構，才能依照魚群結構的組成以人為方式改變其族群，進而達成生物控制水質管理法的應用。調查實驗地點分別為臺北翡翠水庫及台灣大學醉月湖二處，翡翠水庫係長期調查及監測翡翠水庫水生動物與水質關係，提供翡翠水庫管理局針對水庫水質維護與改善之相關對策作為參考，而台大醉月湖的調查監測則作為實施生物控制水質管理法的操作場域。

由文獻得知，濾食性魚類黑鱧及白鱧由於濾食能力強、成長快速、且具高經濟食用魚類之特點，在國內外的湖泊與水庫大部分以鱧鱸魚類來達到減少藻類的目的。文獻指出，白鱧對於濾食浮游植物的能力優於黑鱧，但由下列調查研究指出，黑鱧仍具有防止藻華發生的效益，又黑鱧魚苗在台灣容易購得，因此決定以黑鱧作為生物控制水質管理法放養之魚類。本研究於醉月湖2015年5月19日放養黑鱧共486尾，分別在同年5月、7月及12月紀錄量測黑鱧體重及體長變化。自2015年至2021年連續每年皆調查2-4次黑鱧的成長變化、水中透明度及氮氮變化，並加以記錄、分析黑鱧的成長率對醉月湖水質優養化的去除效益。

四、討論

本研究目的係針對優養化水體水質處理技術研究及設備的研發與應用，並以水質處理設備的研發與應用為主；水質處理技術則以物理處理法及生物控制水質管理法為主要研究方向。水質處理設備的研發與應用，在本研究中，共研發了「低動力生物濾床系統」及「耘水機曝氣設備」2套水質處理裝置，其中「耘水機曝氣設備」同時取得中華民國(專利證號:發明第 I624220 號)及中國大陸(專利證號:ZL-2017-1-0068818.0)的發明專利；「低動力生物濾床系統」則因為在申請專利之前，已在公開期刊中發表，故無法申請專利。兩組水質處理設備經實驗及現地操作結果顯示，皆具有其水質處理功效，且皆可達商品化規格，目前僅需量產即可作為產品銷售。生物控制水質管理法則提供現地實驗操作數據，以在台灣本土操作數據，提供國內日後以生物控制水質管理法管理景觀湖泊水質時之參考。

以下針對上述結果分點說明。

1. 「低動力生物濾床系統」
 - (1) 「低動力生物濾床系統」設計概念:係將生物濾床系統設置於處理槽或污染水體之中，以虹吸的原理將污染水體引入本系統之中，只需要低動力馬達(250 W)即能帶動整個水體循環流動，可減少用電量，並藉由調整出水口流量來控制水力停留時間，除

可節省生物濾床另外設置的土地面積，還能達到節能的功效。系統槽體體積 0.347 m^3 ，每日可處理水體約 23 m^3 ，可依現地處理需求增加系統尺寸，即可放大處理效率。

- (2) 「低動力生物濾床系統」應用於景觀池及養殖池之水質處理效率分析。景觀池現場實驗共計400天兩個階段，實驗期間平均的去除率為58%。
- (3) 養殖池實驗操作共116日，水力停留時間為14.5分鐘，全池水量之日循環率為2%/day，設備每日處理水量為 $23\text{ m}^3/\text{day}$ ，處理每單位水體積耗能為 $190\text{ W}/\text{m}^3$ 。本研究前期(15天~57天)設備去除總氮的效率最高可達63%，硝酸態氮的池中濃度變化率最高可達23.7%，顯示設備可有效轉換氮；在第116天設備出水的亞硝酸態氮及硝酸態氮低於入水，設備效能降低，推測可能原因是養殖過程中定期持續地投放肥料，設備有機物堆積太多，硝化菌生物膜老化，因而抑制硝化作用，以致設備在實驗後期無法正常發揮作用。

2. 「耘水機曝氣設備」

- (1) 「耘水機曝氣設備」的增氧效率為傳統水車的2-3倍，即同樣為2 Hp的設備動力，「耘水機曝氣設備」只需一台即可達到傳統水車2~3台的增氧效率，相對省電，另「耘水機曝氣設備」的底部增氧效率10 min可與水表面溶氧相當，設備未開啟前底部水中溶氧為 $0.5\text{ mg}/\text{l}$ ，設備開啟後10分鐘底部水中溶氧增加至 $8.67\text{ mg}/\text{l}$ (以醉月湖距設備10 m 溶氧量測結果，如表4.4所示)。
- (2) 「耘水機曝氣設備」的葉扇轉動為每分鐘45-60 rpm，轉動速度緩慢(一般2 Hp的馬達每分鐘rpm為1800)，因此才能更有效地將溶氧溶入水體中，而不會因快速轉動又將溶氧逸散回大氣中。
- (3) 在台大醉月湖實測結果顯示，「耘水機曝氣設備」的攪動水體擴散半徑約20 m，攪動水體擴散面積約 $1,256\text{ m}^2$ ，由於醉月湖水深2.5 m，攪動水體體積約 $3,140\text{ m}^3$ 。

3. 生物控制水質管理法

- (1) 「生物控制水質管理法」的操作關鍵為須先調查水域內的魚類相，知道水域內魚類相的組成結構，才能依照魚群結構的組成以人為方式改變其族群，進而達成生物控制水質管理法的應用。本研究以翡翠水庫及台灣大學醉月湖為調查實驗地點，翡翠水庫自2006~2020年長期監測調查達15年，醉月湖自2014~2021年共計調查了8年。
- (2) 為計算翡翠水庫水質與優勢魚類相關性，採用主成分分析法(Principal components analysis, PCA)，以翡翠水庫集水區內九處水域進行魚類及水質的採樣調查。結果顯示，冷暖季對於翡翠水庫水質變化是重要因素之一，影響水質項目包括透明度、水溫、pH、溶氧量、葉綠素a及藻個數。冷暖季造成水質差異的主要原因為藻類濃度消長，暖季的藻個數明顯比冷季高，若改以上中下游水域區分，顯示導致上中下游水域差異的因素為優養化程度，得知翡翠水庫越上游之優養化程度越高。
- (3) 翡翠水庫魚類數據統計及群聚結構分析自2006年1月到2020年10月間進行8年共43次的魚類採樣，其中29次在暖季進行，14次在冷季進行。翡翠水庫全水域中共採集到31種魚類，每次採樣的物種數介於5~19種間。

- (4) 對於群聚結構差異貢獻度較大的魚類相，可知黑鯪、吳郭魚、鯉魚等過往研究結果顯示會影響水中藻個數及濁度的魚類，在此10年間捕獲數量的改變足以影響群聚結構，同理在全水域造成群聚結構差異的魚種不一定會在上中下游水域影響群聚結構，如鯉魚在上中下游對於群聚結構皆無影響，但綜合全水域就有顯著差異。另外於2020年的魚類相顯示，珍珠石斑已成為翡翠水庫的常見魚種，而珍珠石斑為2014年以前從未捕捉過之物種，但於2014年以後陸續增多，顯示珍珠石斑已於翡翠水庫形成群聚，未來需觀察是否會排擠到其他物種。
- (5) 在臺灣大學醉月湖施行生物控制水質管理法，自2015年5月開始迄今已逾7年，黑鯪作為生物控制法放養的魚種，進行水中藻類的濾食；調查結果顯示，醉月湖水中透明度逐年提升，顯示黑鯪對於醉月湖水質改善有正面意義。
- (6) 黑鯪作為醉月湖施行生物控制法放養的魚種，經過成長方程式計算，應以6年為期，即6年後應再補充新的魚苗，原有黑鯪則可進行捕撈替換，如此可穩定水質，維持黑鯪攝食藻類的穩定性，以提高黑鯪在醉月湖的合理利用效益。另黑鯪的成長具有明顯的季節性，每年的8~9月增重最快，9~10月增重最小，故其捕撈期應避開高速成長期。
- (7) 本研究以生物控制水質管理法及物理曝氣法，同步進行醉月湖水體水質改善，自2014年10月至2021年12月已逾7年。生物控制水質管理法是以放養攝食浮游藻類的黑鯪進行水中藻類的去除；物理曝氣法則是以增加水中溶氧轉化水中氨氮來改善水質。黑鯪的放養對水中透明度提高有顯著相關，增氧曝氣設備對水中溶氧增加亦有顯著效果，上述兩種方法的施作，皆具有良好成效。

參考文獻

1. 行政院環境保護署。2005。“河川水質淨化工法設計研究計畫”，3-197~3-203。
2. 侯文祥、陳以容。2006-2008。“翡翠水庫水生動物多樣性之長期監測(一)~(三)”。台北:臺北翡翠水庫管理局成果報告。
3. 侯文祥、陳以容。2009-2020。“翡翠水庫水生動物多樣性之長期監測”。台北:臺北翡翠水庫管理局成果報告。
4. 侯文祥、陳以容。2014-2021。“103年-110年台灣大學醉月湖水質維護及生態調查計畫”。台北:國立台灣大學總務處成果報告。
5. Chang C.Y., J. S. Chang., C. M., C.C. Chen, and S.Vigneswaran. 2010. An innovative attached-growth biological system for purification of pond water *Bioresource Technology* 101:1506-1510 .doi:10.1016/j.biortech.2009.08.059
6. Hansson, L.A., H. Annadotte, and E. Bergman. 1998. Minireview: Biomanipulation as an application of food-chain theory: constraints, synthesis, and recommendations for temperate lakes. *Ecosystems* 1, 558-574.
7. Shapiro J, V. Lamarra, and M. Lynch. 1975. Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration. In PL Brezonik, *Proceedings of the symposium on water*. 85-96.
8. Thomas L. C., and R. B. John. 1990. Applicability of planktonic biomanipulation for managing eutrophication in the subtropics. *Hydrobiologia*. 200/201:177-185.
9. Thörn Marina., A. Mattsson, and F. Sörensson. 1996. Biofilm development in a nitrifying trickling filter. *Wat. Sci. Tech.* 34(1-2): 83-89.