

Effect of Water Quality by Using Immobilized *Chlorella* sp. in a Recirculating-Water Culture System

固定化小球藻對循環水養殖系統水質處理之影響

Wen-Long Lin¹⁾ Yu-An Ma¹⁾ Jun-Ming Chen²⁾ Chung-Chyi Yu^{2)*}
林文隆 馬聿安 陳俊明 尤瓊琦

Abstract

The main purpose of this research was to investigate the effect of the water quality by using immobilized *Chlorella* sp. in a recirculating-water culture system. The actual cultivating tests with the recirculating-water culture system with the hydraulic retention time (HRT) 2 hr were performed. These tests included the comparison with no algal beads and the influence of the higher initial ammonium concentration. The testing results showed that the algal beads could effectively remove ammonium and nitrite and obtained lower concentrations of the peaks than those with no algal beads happened in the system. The average ammonium and nitrite removal efficiencies of the algal beads in the actual tests were about 65 and 6%, and the average

ammonium and nitrite removal rates were about 26.61 and 48.29 mg/day, respectively. When the ammonium concentration was higher during the initial testing section, the average ammonium and nitrite removal efficiencies of the algal beads would decrease to about 22 and -1%, respectively. However, the average ammonium removal rate of the algal beads was raised to about 32.25 mg/day, while the average nitrite removal rate was dropped to about 6.73 mg/day.

Key words: Immobilized *Chlorella* sp., Water quality, Removal efficiency

摘要

本研究旨在探討固定化小球藻對循環水養殖系統水質的影響。實際循環水養殖系統試驗時，水力停留時間設定為 2 小時，試驗包括有

-
- 1) Graduate student, Dept. of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C. 國立中興大學生物產業機電工程學系研究生。
 - 2) Professor, Dept. of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan, R.O.C., * Corresponding Author. E-mail: ccyu@nchu.edu.tw 國立中興大學生物產業機電工程學系，* 通訊作者。

無放置藻珠之比較，及初始銨 (NH_4^+) 濃度較高時之影響試驗，結果顯示固定化小球藻可有效去除循環水養殖系統中銨 (NH_4^+) 與亞硝酸根離子 (NO_2^-)，並獲致比無藻珠組較低之最高累積濃度，其於實際養殖試驗平均去除效率分別約為 65 與 6%，而平均去除速率則分別約為 (NH_4^+) 26.61 與 (NO_2^-) 48.29 mg/day；當初始銨 (NH_4^+) 濃度較高時，固定化小球藻對銨 (NH_4^+) 與亞硝酸根離子 (NO_2^-) 平均去除效率分別下降至約為 22 與 -1%，而對銨 (NH_4^+) 平均去除速率則增快至約 32.25 mg/day，但對亞硝酸根離子 (NO_2^-) 平均去除速率則下降至約 6.73 mg/day。

關鍵詞： 固定化小球藻、水質、去除效率

前言

台灣養殖業之發展已具有相當之成效，可提供國人豐富且多樣化之水產品，亦可增進漁民之收益。但在土地成本與人工費用高漲及水資源不足下，目前養殖形態已漸由粗放式轉型為集約式之運作模式，而集約式養殖時則仍存在著若干問題有待解決，其中以養殖池的氮化合物濃度累積過高去除以避免魚體傷害為主要之課題。水產養殖時銨 (NH_4^+) 對水中生物的 96 小時半致死濃度 (Lethal Concentration₅₀) 介於 0.5-3.8 mg/l 之間⁽⁷⁾，且水中亞硝酸根離子 (NO_2^-) 對魚體毒性亦相當強，其作用是將魚體中血色素裡的亞鐵氧化成三價鐵，使得血色素失去輸送氧氣的功能⁽³⁾，導致傳統的養殖方式須定期更換新水，以防止氮化合物累積過高。因此集約式養殖時建立良好之循環用水系統，

將養殖廢水進行處理再利用，以降低銨與亞硝酸根離子濃度，及減少水資源的浪費是迫切需要。

目前國內有關室內集約式循環水養殖系統開發已有相當之技術發展^(2,5,9,12)，且亦進一步把室內所發展之技術應用在室外大型養殖池之處理⁽⁴⁾，而將循環水中氮化合物去除是系統可穩定運轉之主要關鍵。一般而言，水質氮化合物處理時，依其作用型式可分為物理、化學與生物處理法，並以生物處理法之硝化濾床，為目前國內循環水養殖系統大多採用之方式；雖已獲致相當不錯的效果，但其進行硝化處理則伴隨著鹼劑添加、濾材逆洗與硝酸氮累積等相關問題須待解決。當循環水養殖系統為避免上述之問題，且藻類對於有機、無機營養鹽與重金屬等物質皆具有去除之效果，並能以氨氮、亞硝酸氮和硝酸氮等氮化合物做為其營養源攝取吸收，亦能於行光合作用時提供水中之溶氧，進而達到淨化及穩定水質的功效⁽¹⁰⁾，可應用作為生物處理法之另一水質處理方式。目前商業上直接應用藻類處理廢水僅有氧化塘和高率藻池等，其運轉則有單一優勢藻種維持困難及藻類自出流水分離不易等問題⁽¹¹⁾。而固定化可解決上述之問題，利用其技術可使固定之微生物易與出流水分離、單一優勢微生物易維持而不流失、外來毒性物質對微生物的傷害減少、不需定期逆洗、處理效率提高與可依廢水性質而有不同的微生物選擇等優點，應用於廢水處理已逐漸受到重視⁽⁸⁾；且利用單細胞微藻做固定化進行各種廢水處理，如去除氮和磷等營養鹽、去除硝酸鹽、去除尿素等亦有相當多之相關研究發表^(15,16,17,19)；而關於應用固定化藻類於水

產養殖方面相關文獻則仍相當少，且大多僅針對批次式養殖時魚體排泄物之氨氮去除進行研究，如 Chen⁽¹⁴⁾ 研究指出含有固定化柵藻之藻珠的魚類養殖池，其水質中氨氮的濃度明顯受到控制且溶氧量亦為穩定，而有關實際應用在循環水系統研究則厥如。

因此為探討固定化藻珠應用於實際循環水養殖系統之水質處理，本研究將使用循環水養殖系統作為實際養殖試驗之設備，以固定化小球藻進行系統廢水處理，首先進行系統模擬養殖廢水測試，且待其測試完成後緊接著進行實際養殖之前導試驗，以觀察藻珠於循環水養殖系統運轉時水質變化情形，而系統水質之分析則主要包括銨濃度、亞硝酸根離子濃度、硝酸根離子 (NO_3^-) 濃度、pH 值、溶氧量 (DO) 與溫度變化，而於後續之相關實際養殖試驗時，系統則分別以藻珠與無藻珠及其初始銨濃度較高之條件下，測試系統對銨與亞硝酸根離子之去除影響，以探討固定化小球藻對循環水養殖系統中氮化合物之去除效果，並評估使用固定化小球藻處理循環水養殖系統中氮化合物之可行性。

材料與方法

一、試驗系統組成

本研究試驗時使用之循環水養殖系統，包括養殖槽 (聯府 K-1500) 一個，其長寬高分別為 780、560 與 480 mm，及由厚度 5 mm 之透明壓克力製成之曝氣式廢水處理槽一個，其長寬高分別為 300、200 與 200 mm，槽中再以高 150 mm 與寬 200 mm 之壓克力板分隔成一長寬高為 200、200 與 150 mm 之置放藻珠槽，其

槽底部距離地面約為 62 cm，並在藻珠槽兩側約 30 mm 處，分別放置 1 只 20 W 日光燈 (東亞 FL 20D-EX/18)，其光照強度經由數位式照度計 (TECPL 530) 量測約為 7700 lux，以作為藻珠中小球藻所需之光源，且其廢水循環處理流程則如圖 1 所示。養殖廢水經由養殖槽之沉水馬達 (Rio 600) 抽送至曝氣式藻珠槽處理後，利用水位差的作用再流回養殖槽使用。系統中之養殖槽有效水體約為 100 公升，而藻珠槽處理廢水的有效水體約為 6 公升，並蓋上尼龍網以避免藻珠流出和雜物掉落槽中，如圖 2 所示。試驗期間，養殖槽與藻珠槽分別以 2 與 1 台之雙孔曝氣機 (永享 SF-8000) 進行打氣，以提供吳郭魚所需之氧氣與藻珠中小球藻所需之二氧化碳。

二、試驗材料

本研究選取淡水小球藻 (*Chlorella* sp.) 做為固定化藻珠之試驗材料，藻種由水試所生物技術組蘇惠美博士所提供。當獲致藻種後，首先進行原藻培養液之馴化放大培養，馴化放大培養時是以 Bristol 培養液⁽¹⁸⁾ 培養馴化小球藻，並置於光照強度約 4300 lux 與溫度設定為 25°C 之恆溫恆濕箱 (KATO SE-23ECN) 內進行培養。其過程為將 150 ml 原藻液與 50 ml Bristol 培養液倒進 500 ml 之三角錐形瓶，即以 3:1 之比例進行馴化，並每間隔 4 天依 3:1 比例進行 3 次馴化培養，獲致藻液約為 360 ml 後，更換培養瓶為 1000 ml 之三角錐形瓶，並將此時所獲致之藻液與 120 ml Bristol 培養液混合，繼續進行馴化放大培養，亦每間隔 4 天依 3:1 比例進行 2 次馴化培養，獲致藻液約為 640 ml，再將 640 ml 藻液與 640 ml Bristol 培養液倒進 3

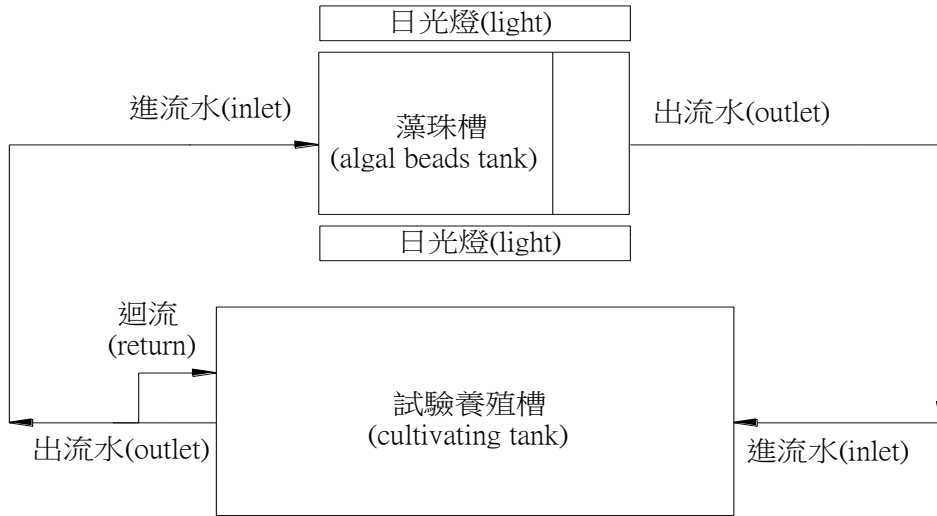


圖 1. 循環水養殖系統配置示意圖

Fig. 1. Schematic diagram of the recirculating-water culture system.

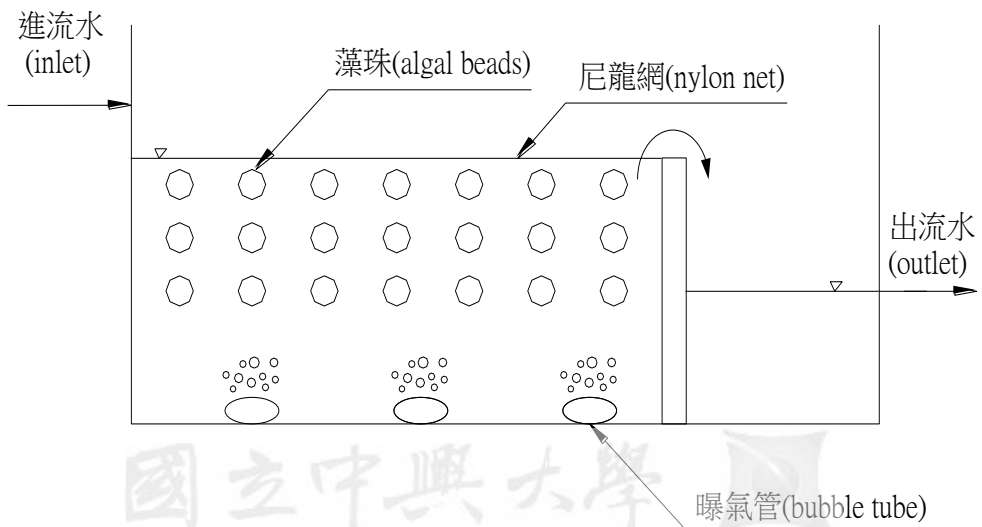


圖 2 曝氣式藻珠槽示意圖

Fig. 2 Schematic diagram of the algal beads tank

升之密封玻璃罐進行培養，即以 1:1 之比例進行馴化放大培養，其後續培養亦每間隔 4 天依 1:1 之比例進行，待獲致足量之藻細胞後，取適量小球藻液進行固定化，而其餘藻液做為保種用，待未來相關試驗時使用。固定化小球藻珠製作完成後，亦置於相同光照強度與溫度之恆溫恆濕槽內培養，於容量 15 公升之透明壓克力桶以適當濃度之人工合成廢液進行增殖培養，以提高藻珠中小球藻濃度，再使用做為相關試驗測試。其人工合成廢液之標準配製是以每公升去離子水含 58.90 mg bacto-peptone、225.00 mg glucose、41.30 mg $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、33.70 mg K_2HPO_4 、50.00 mg $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ 、5.00 mg $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、2.20 mg $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ 、7.00 mg KCl 、3.70 mg CaCl_2 及 277.70 mg NaHCO_3 調配滅菌而成⁽¹⁹⁾；並亦配製濃度分別為 1000 mg/l 之銨、250 mg/l 之亞硝酸根離子與 100 mg/l 之硝酸根離子儲備溶液，其配製為在三個皆裝有 1 公升去離子水之三角錐形瓶各別加入 3.667 g 硫酸銨 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)、1.232 g 亞硝酸鈉 (NaNO_2) 及 0.7218 g 硝酸鉀 (KNO_3) 調配滅菌而成，並待冷卻後將三種儲備溶液放置於 4 °C 冰箱冷藏保存，以作為未來培養藻珠時調配人工合成廢液中氮化合物濃度，及調配循環水養殖系統中不同銨濃度用。

藻珠固定化時之配製是以 4% (w/v) 的褐藻膠 (Na-alginate) 液 1 公升 (Tom and Wong, 2000)，置於高壓滅菌釜 (YIHDER LM-570R) 中 121°C 濕熱滅菌 30 分鐘，待其冷卻後將 1 公升小球藻液加入褐藻膠液，並以磁石攪拌器 (Fargo MS-90) 攪拌約 10 分鐘使達均勻混合，將其滴入濃度 5% 氯化鈣 (CaCl_2) 液體內進

行藻珠製作，其褐藻膠混合液每毫升可形成 20 顆褐藻膠珠，每顆藻珠直徑約為 5 mm；製作成形之藻珠先靜置 12 小時後再以蒸餾水加以沖洗，以去除殘餘之氯化鈣液，再將 2 公升固定為 40000 顆藻珠與分別滅菌過的 1 公升之 10 倍濃度人工合成廢液、0.2 公升亞硝酸根離子儲備溶液、2 公升硝酸根離子儲備溶液及 6.8 公升去離子水一併加入 15 公升之壓克力桶置於恆溫恆濕槽內，並以曝氣量 3.0 l/min 之雙孔曝氣機 (永享 SF-8000) 打氣，待培養 48 小時將人工廢液中銨、亞硝酸根離子與硝酸根離子皆去除後，以獲致高濃度小球藻之藻珠再置入藻珠槽進行循環水系統之相關試驗。試驗時之養殖生物為淡水吳郭魚，其投餵餌料則為福壽牌之草蝦配合飼料。

三、試驗方法

本研究試驗時藻珠槽之水力停留時間 (Hydraulic Residence Time, HRT) 設定皆為 2 小時，並採連續光照與曝氣，而養殖槽亦以連續曝氣之相同操作條件下進行測試。實際養殖時，皆以總重約為 600 g 之 10 尾吳郭魚為試驗養殖生物，試驗期間於早上 8:00 與下午 4:00 分兩次平均投餵，每天投餵總量為 4 g。本研究之水質記錄初始點皆於下午 5:00 開始，除了模擬養殖廢水與前導養殖試驗時水體取樣與藻珠中小球藻濃度量測時間不同外，其餘有放養吳郭魚之實際養殖試驗，其水質皆於測試之前 48 小時，為每間隔 6 小時。分別在試驗養殖槽與藻珠槽進、出水口取水樣進行三重複量測，將水樣分別以靛藍法、分光光度計法與馬錢子鹼比色法，使用分光光度計 (Spectronic 20 GENESYS) 進行銨、亞硝酸根離子與硝酸根離

子濃度量測，並以酸鹼值量測儀(SUNTEX TS-2)與溶氧量感測器(WTW Oxi 330i)分別量測 pH 值與溶氧量(DO)和溫度變化，第 48-72 小時則為每隔 12 小時取樣量測，而第 72 小時後則為每隔 24 小時量測一次；而其藻珠中小球藻濃度量測，則僅在試驗初始及試驗階段之第 120 與 312 小時三時間點進行量測，每次取樣 20 顆小球藻珠置於 4 毫升之 5% 六偏磷酸鈉溶液溶解⁽¹⁴⁾，再以定量吸管(Finnpiptte)取水樣 20 μ l 滴於 MARIENFELD 血球計數盤，置於相位差顯微鏡(BLUELIGHT XS-402)放大 400 倍下進行計數量測藻細胞濃度。試驗所得之數據為避免量測時之偏差，皆取平均值進行分析，以探討藻珠槽在循環水養殖系統中對氮化合物去除、pH 值、溶氧量與溫度之影響，更進一步探討實際養殖時藻珠與無藻珠及初始高濃度銨等對系統水中銨與亞硝酸根離子之去除效率與去除速率的影響，而此兩者參數則依據每隔 24 小時之量測數據進行計算，其定義則分述如下：

$$\text{去除效率}(\%) = \frac{[(\text{藻珠槽進水口平均濃度}) - (\text{藻珠槽出水口平均濃度})]}{(\text{藻珠槽進水口平均濃度})} \times 100\% \dots\dots\dots \textcircled{1}$$
$$\text{去除速率}(\text{mg/day}) = [(\text{藻珠槽進水口平均濃度}) - (\text{藻珠槽出水口濃度平均})] \times (\text{藻珠槽每日處理水量}) \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

(一) 模擬與前導養殖試驗

本模擬試驗循環水養殖系統中未放養吳郭魚，置入人工廢液培養 48 小時 2 公升之 40000 顆藻珠於曝氣式藻珠槽，而其循環廢水配製是加入 550 ml 之銨儲備溶液於系統中，使系統中

各單元銨濃度介於 4.90-5.11 mg/l 之間，且配合系統中清水原含有初始濃度約介於 2.58-2.73 mg/l 之硝酸根離子，以進行模擬養殖之測試。試驗週期為 264 小時，並每間隔 24 小時取樣量測藻細胞濃度，而水質量測於第 0-168 小時以每間隔 12 小時量測銨、亞硝酸根離子與硝酸根離子濃度、溫度、pH 值與溶氧量，第 168-264 小時則為每隔 24 小時取樣量測。模擬試驗達 264 小時後，緊接著於養殖槽放養吳郭魚進行實際養殖之前導試驗，試驗週期亦為 264 小時，以觀察藻珠對實際養殖之循環水養殖系統水質變化的影響，而此階段之水質量測亦與模擬試驗相同，但藻珠中之小球藻濃度量測則僅在第 120 與 264 小時兩時間點進行計數。

(二) 實際養殖試驗

本試驗為瞭解藻珠對循環水養殖系統中水質變化之影響，將分兩組試驗進行比較，一組無放置藻珠，僅有吳郭魚，另一組則有藻珠與吳郭魚，其藻珠亦為培養 48 小時 2 公升之 40000 顆藻珠，並於循環水養殖系統運轉開始前置入曝氣式藻珠槽，且兩組試驗時清水中亦皆含有硝酸根離子，其初始濃度約介於 2.32-2.74 mg/l 之間。兩組試驗週期皆為 312 小時，試驗除了量測銨、亞硝酸根離子與硝酸根離子濃度外，亦量測 pH 值、溶氧量與溫度，並將試驗所得之數據繪製相關參數對時間之變化曲線，以觀察其趨勢並探討藻珠在循環水養殖系統中對水質變化之影響。

(三) 初始高濃度銨 (NH₄⁺) 試驗

本試驗為探討循環水養殖系統高濃度銨時，藻珠對水質變化的影響，以瞭解藻珠是否能有效控制水中氮化合物。試驗前先加入 900

ml 之銨儲備溶液於循環水養殖系統中，使其銨濃度提昇至介於 5.82-7.92 mg/l 之間，且系統中之清水原含有之硝酸根離子，其初始濃度亦約介於 2.12-2.30 mg/l 之間。試驗時亦使用培養 48 小時 2 公升之 40000 顆藻珠，並放養吳郭魚進行測試。試驗週期亦設定為 312 小時，並依據試驗量測所獲得之相關參數，分析高濃度銨對曝氣式藻珠槽中之藻珠處理循環水之影響。

結果與討論

一、模擬與前導養殖試驗分析

模擬試驗時藻珠中小球藻濃度變化如圖 3 所示，圖中顯示於此試驗週期小球藻呈先上昇再下降之趨勢，其試驗初始濃度約為 2.22×10^6 cells/ml，而於第 144 小時達增殖高峰，小球藻濃度約達 8.56×10^6 cells/ml 後下降，其下降原因是受營養源消耗未補充不足，但於此模擬試驗終止時，藻珠中小球藻濃度仍高於其初始濃

度達 4.85×10^6 cells/ml。模擬試驗三量測點之銨濃度變化曲線如圖 4 所示，圖中顯示養殖槽與藻珠槽進、出水口銨之初始濃度分別約為 4.91、5.11 與 4.89 mg/l，皆有穩定下降之趨勢，且藻珠槽出水口之銨濃度皆較藻珠槽進水口低，獲致藻珠有除銨之效果，於測試達第 120 小時，亦分別下降至約 0.55、0.49 與 0.37 mg/l，而至試驗終止時則幾乎消耗殆盡。模擬試驗之亞硝酸根離子濃度變化趨勢則如圖 5 所示，圖中發現其三量測點整體呈現增高再下降之現象，且藻珠槽出水口之亞硝酸根離子濃度於試驗前 72 小時皆高於藻珠槽進水口，其原因可能為藻珠攝取銨 (NH_4^+) 代謝產生，與 Tam and Wong⁽¹⁹⁾ 研究顯示固定化小球藻除銨過程中有亞硝酸根離子產生相似，但試驗於第 84 小時後則藻珠槽進水口之亞硝酸根離子較出水口高，顯示於較低銨濃度下藻珠去除亞硝酸根離子之能力已較代謝產生亞硝酸根離子高，試驗前

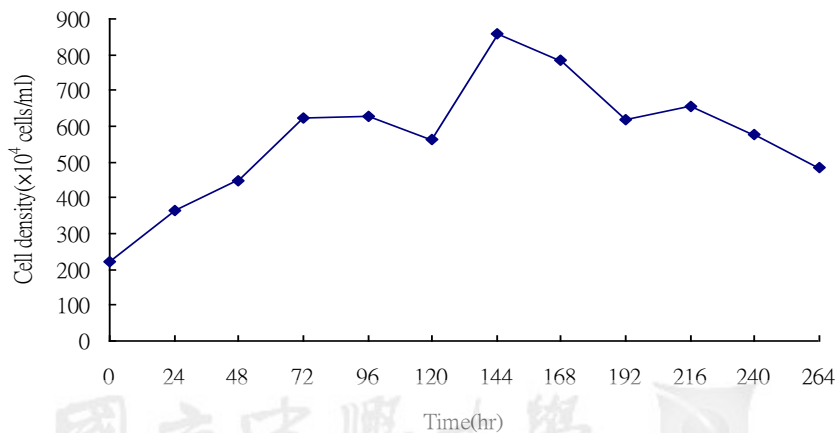


圖 3. 模擬試驗之藻珠中小球藻生長趨勢

Fig. 3. The cell growth densities of algal beads of the recirculating-water culture system under simulated cultivating water test

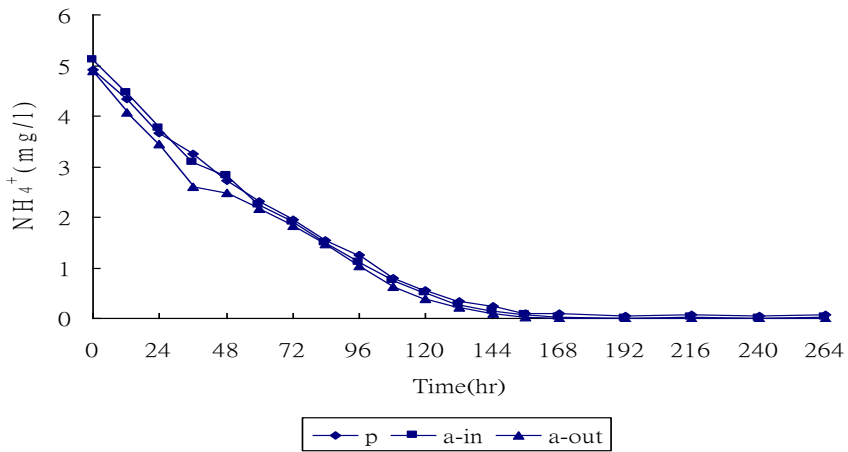


圖 4. 模擬試驗之銨 (NH_4^+) 濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 · a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 4. Plots of the ammonium concentration changes of the recirculating-water culture system under simulated cultivating water test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

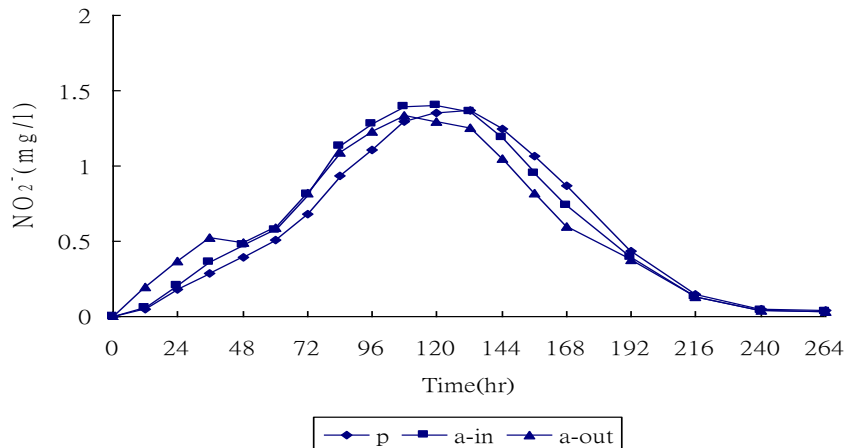


圖 5. 模擬試驗之亞硝酸根離子 (NO_2^-) 濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 · a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 5. Plots of the nitrite concentration changes of the recirculating-water culture system under simulated cultivating water test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

120 小時藻珠槽進水口之亞硝酸根離子濃度皆高於養殖槽，其原因可能是系統中有亞硝酸菌分解銨所造成之結果，而養殖槽與藻珠槽進、出水口之亞硝酸根離子則分別於第 132、120 與 120 小時達高峰，並分別約為 0.55、0.49 與 0.37 mg/l 後開始下降，可能是系統中銨濃度較低，藻珠中小球藻開始較大量攝取亞硝酸根離子營養鹽所造成，且亦由於系統中有硝酸菌存在及藻珠之作用，而呈現養殖槽最高，藻珠槽出水口最低之現象。圖 6 為模擬試驗之硝酸根離子 (NO_3^-) 濃度變化趨勢，圖中顯示養殖槽與藻珠槽進、出水口之硝酸根離子濃度，皆呈現緩慢且持續累積上昇之現象，且於試驗第 156 小時前，亦由於受到藻珠中小球藻攝取銨與亞硝酸根離子之代謝影響，藻珠槽出水口顯現較高之值，亦與 Tam and Wong⁽¹⁹⁾ 研究獲致之結果

相似；且亦因受到小球藻代謝硝酸根離子較銨與亞硝酸根離子慢⁽¹³⁾，及系統中有硝酸菌存在，因此當系統中仍有銨與亞硝酸根離子存在時，藻珠去除硝酸根離子之效果較不佳，導致硝酸根離子累積上昇；於試驗第 264 小時時，養殖槽與藻珠槽進、出水口之硝酸根離子濃度分別約達 5.59、5.63 與 5.67 mg/l。模擬試驗之養殖槽與藻珠槽進、出水口 pH 值變化範圍，分別介於 8.18-8.58、8.23-8.59 與 8.23-8.59 之間，其平均值分別為 8.50、8.48 與 8.47，且藻珠槽出水口 pH 值幾乎略低於進水口，與陳⁽⁶⁾ 指出藻類利用銨會導致 pH 值下降之現象相似，亦顯示藻珠中小球藻具有攝取銨之能力；模擬試驗之養殖槽與藻珠槽進、出水口溶氧量量測結果，分別介於 5.0-5.7、4.9-5.4 與 4.9-5.4 mg/l 之間，平均溶氧量則分別約為 5.2、5.1 與 5.1

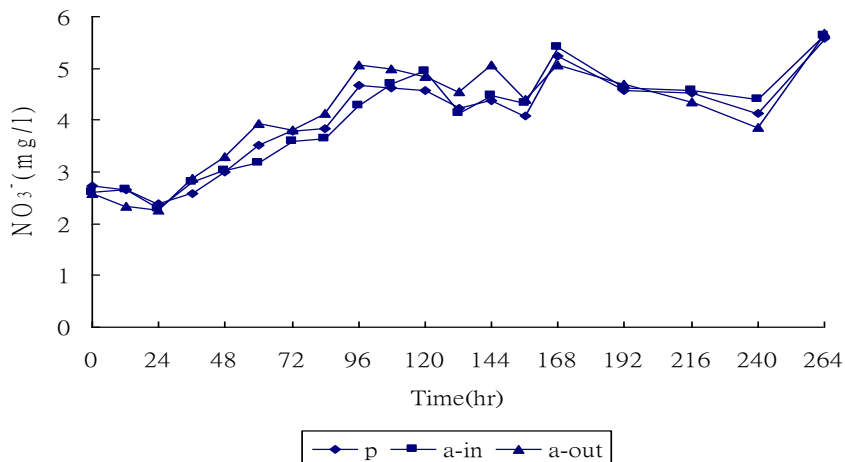


圖 6. 模擬試驗之硝酸根離子 (NO_3^-) 濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽，a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 6. Plots of the nitrate concentration changes of the recirculating-water culture system under simulated cultivating water test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

mg/l，獲致養殖槽之溶氧量皆高於藻珠槽進、出水口，主要是受曝氣機曝氣量之影響；而模擬試驗之養殖槽與藻珠槽進、出水口溫度變化，由於受到試驗當時之氣候變化，分別介於 21.1-26.5、21.4-27.1 與 21.2-27.1°C 之間，其平均溫度則分別約為 24.2、25.1 與 25.0°C，亦顯示藻珠槽受到光照之影響，導致其進、出水口溫度皆高於養殖槽。

緊接著的前導養殖試驗結果，其銨濃度變化趨勢如圖 7 所示，圖中顯示試驗初始階段系統之銨濃度升高，其原因可能是受到藻珠於模擬試驗階段（如圖 3 所示）生長衰退之影響，及藻珠攝取銨之量，較放養之吳郭魚持續排放之排泄物與殘餌之分解量少所造成，且養殖槽與藻珠槽進、出水口三量測點，亦分別於試驗第 48、48 與 30 小時獲致最高之銨濃度，分別

約為 1.35、1.24 與 0.97 mg/l 後，由於藻珠中小球藻增殖攝取，開始呈現下降之現象並趨於平緩，且整體顯現養殖槽最高、藻珠槽進水口次之、以藻珠槽出水口最低之分布情形，亦顯示系統中有亞硝酸菌產生，亦具有分解銨之作用；同時於試驗第 120 小時量測所獲致之小球藻濃度亦增殖達約 1×10^7 cells/ml，但試驗第 264 小時時藻珠中小球藻濃度則降為約 3.9×10^6 cells/ml，其原因主要是藻珠於模擬與前導養殖兩試驗中長時間受曝氣衝擊造成磨損，導致藻珠體積縮小，進而影響小球藻生長。圖 8 為前導養殖試驗之亞硝酸根離子濃度變化趨勢，圖中亦獲致三量測點整體呈現上昇再下降之現象，同時於試驗前 36 小時藻珠槽出水口之亞硝酸根離子濃度皆高於藻珠槽進水口，與模擬試驗有相同之趨勢，且亦顯示隨系統中有較低之

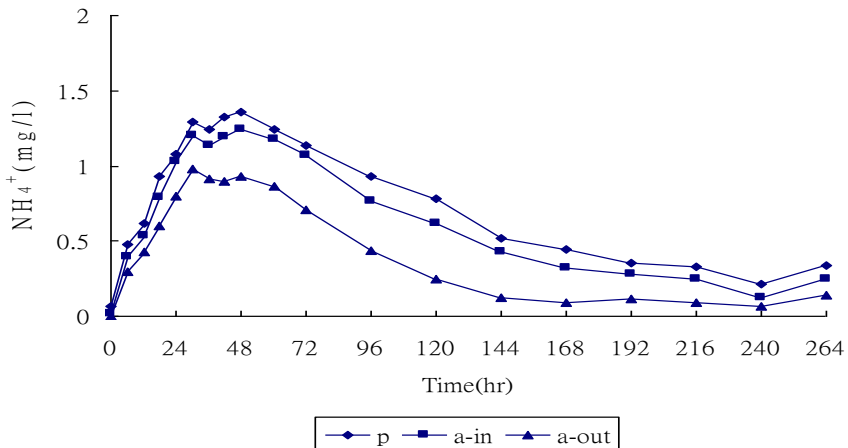


圖 7. 前導養殖試驗之銨 (NH_4^+) 濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽，a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 7. Plots of the ammonium concentration changes of the recirculating-water culture system under actual pilot test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

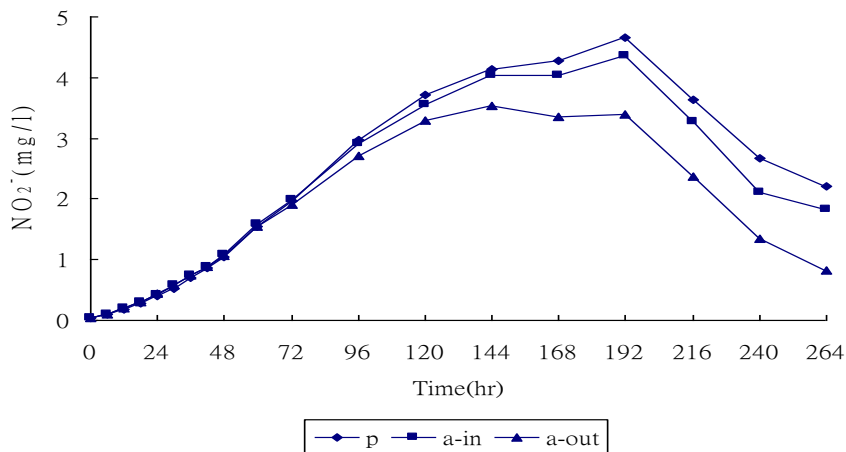


圖 8. 前導養殖試驗之亞硝酸根離子濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽，a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 8. Plots of the nitrite concentration changes of the recirculating-water culture system under actual pilot test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

初始銨濃度，其藻珠除銨過程中產生亞硝酸根離子的時間縮短；三量測點之亞硝酸根離子分別在第 192、192 與 144 小時達高峰，分別約為 4.65、4.35 與 3.54 mg/l 後開始下降，其原因亦可能為藻珠開始對亞硝酸根離子有去除效果，及硝酸菌分解亞硝酸根離子之作用所造成，亦呈現養殖槽最高，藻珠槽出水口最低之現象。圖 9 則為前導養殖試驗之硝酸根離子濃度變化趨勢，圖中亦獲致與模擬試驗相似之現象，即系統之硝酸根離子濃度亦呈現緩慢且持續累積上昇之情形，且於試驗第 168 小時前，藻珠槽出水口整體顯現較高之值，其原因也如模擬試驗中所述，即系統中有硝酸菌存在，及系統中有銨或亞硝酸根離子時藻珠中小球藻攝取代謝之影響，且此時小球藻攝取硝酸根離子較慢，

導致去除硝酸根離子之效果較不佳所致；當於前導試驗終止之第 264 小時時，養殖槽與藻珠槽進、出水口三量測點皆有硝酸根離子累積之現象，其濃度差異不大皆約達 16 mg/l 左右。前導養殖試驗之養殖槽與藻珠槽進、出水口三量測點之 pH 值變化，分別介於 7.98-8.57、8.33-8.58 與 8.19-8.57 之間，其平均值則分別約為 8.25、8.46 與 8.43，亦顯示藻珠攝取銨而使得藻珠槽出水口之 pH 值皆低於其進水口之現象；三量測點之溶氧量分布變化，分別介於 4.5-5.5、4.6-5.5 與 4.6-5.5 mg/l 之間，其平均值相近約為 5.2、5.1 與 5.0 mg/l，亦受曝氣影響養殖槽有稍高之值；溫度分布亦受試驗當時氣候影響，分別介於 21.3-26.5、21.7-27.6 與 21.6-27.5°C 之間，其平均值則分別約為 24.6、25.2 與 25.1°C。

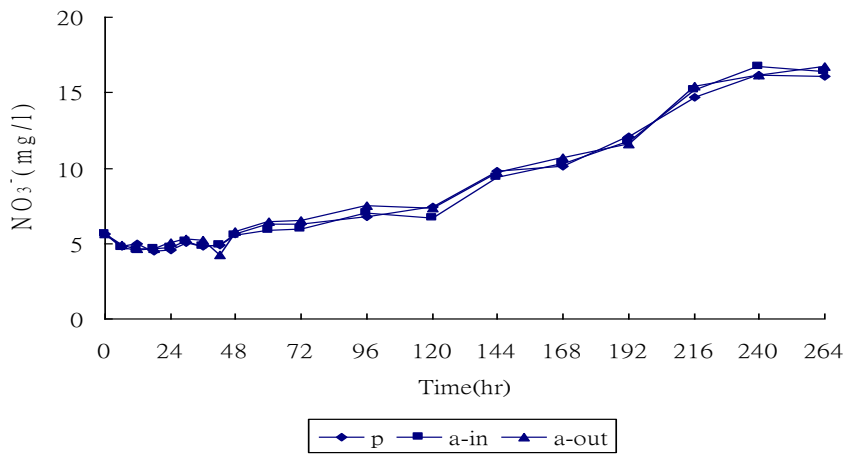


圖 9. 前導養殖試驗之硝酸根離子濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 · a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 9. Plots of the nitrate concentration changes of the recirculating-water culture system under actual pilot test(p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

亦顯示藻珠槽進、出水口之溫度受光照之影響而有較高之情形。

綜合上述兩試驗結果，獲致藻珠於模擬試驗中有穩定除銨的效果，而前導養殖試驗中則受到吳郭魚的排泄物與殘餌之影響，因此養殖初始階段之銨濃度為上昇後再下降；兩試驗之亞硝酸根離子與硝酸根離子濃度變化亦有相同的趨勢，其中亞硝酸根離子皆呈現上昇再下降之情形，顯示藻珠在銨濃度較低時亦具有攝取亞硝酸根離子之作用，但當循環水中仍具有銨與亞硝酸根離子時，在藻珠未以硝酸根離子為主要營養源攝取時，則受其代謝作用與水中硝酸菌之分解，兩試驗組之硝酸根離子皆呈現平緩之增加現象。

二、實際養殖試驗分析

實際養殖試驗時藻珠組之固定化小球藻濃度量測，於試驗初始、第 120 與 312 小時分別約為 2.62×10^6 、 1.33×10^7 與 1.43×10^7 cells/ml，結果顯示實際養殖時吳郭魚之排泄物與殘餌分解，導致循環廢水有足夠之營養源供應，小球藻濃度呈現上昇之趨勢。藻珠組與無藻珠組的三量測點之銨濃度變化趨勢分別如圖 10 與 11 所示，圖 10 顯示藻珠組與前導養殖試驗有相同趨勢，試驗初始階段系統之銨濃度變化，亦受吳郭魚持續排放之排泄物與殘餌之分解作用，並在藻珠中小球藻攝取消耗較小下，導致其濃度在試驗初始先上昇再下降之現象，且其亦受系統中亞硝酸菌之分解及小球藻之攝取，整體變化亦以養殖槽最高，藻珠槽進水口次之，而以藻珠槽出水口最低；三量測點養殖槽與藻珠

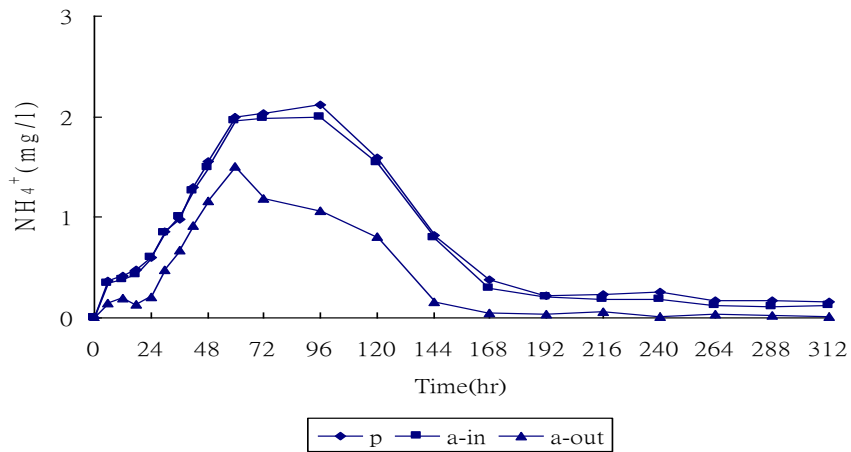


圖 10. 藻珠組之銨 (NH_4^+) 濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 · a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 10. Plots of the ammonium concentration changes of the recirculating-water culture system with algal beads (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

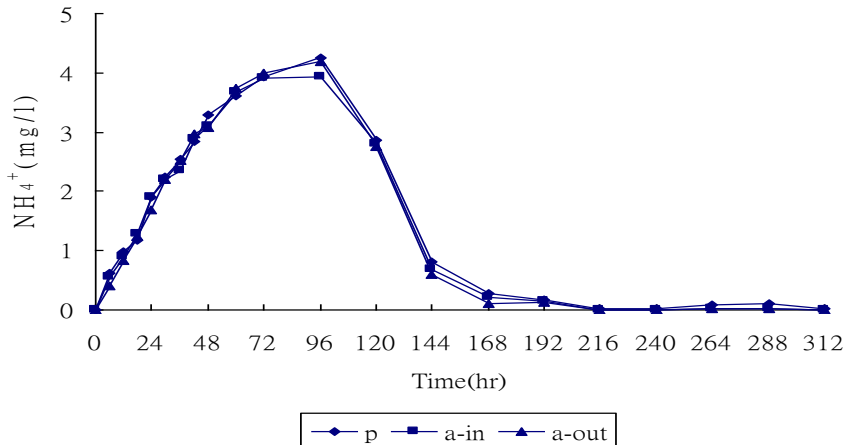


圖 11. 無藻珠組之銨 (NH_4^+) 濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 · a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 11. Plots of the ammonium concentration changes of the recirculating-water culture system without algal beads (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

槽進、出水口之銨濃度分別於試驗第 96、96 與 60 小時達高峰，其值分別為 2.11、1.99 與 1.50 mg/l，且藻珠槽出水口亦於試驗後期趨於零值，養殖槽與藻珠槽進水口亦保持甚低之值，分別介於 0.15-0.17 與 0.11-0.12 mg/l 之間；圖 11 顯示無藻珠組之銨 (NH_4^+) 濃度變化曲線，整體亦與藻珠組相似先上昇再下降，但在未有小球藻之攝取下，藻珠槽出水口未顯現有最低銨濃度情形，且三量測點之銨濃度皆於試驗第 96 小時達最高，分別約為 4.24、3.93 與 4.19 mg/l，同時亦在未有小球藻之作用下皆高於藻珠組三量測點之最高濃度，獲致藻珠槽放置藻珠能有效抑制系統中銨之增高現象，且其於試驗後期亦受系統中有亞硝酸菌存在之影響，亦趨於被完全分解去除，因此可知低密度放養吳郭魚時，系統中的亞硝酸菌就具有將銨分解之效果，而

不會使其產生持續累積上昇之情形。圖 12 與 13 分別為藻珠組與無藻珠組之亞硝酸根離子濃度變化趨勢，圖 12 顯示試驗初始階段與模擬及前導養殖試驗皆有相似之現象，試驗前 30 小時藻珠槽出水口之亞硝酸根離子濃度較藻珠槽進水口高，而在第 36 小時後則藻珠槽出水口之亞硝酸根離子較進水口低，顯示藻珠除亞硝酸根離子之能力已較攝取銨代謝產生亞硝酸根離子高，且亦如前導養殖試驗，當系統中初始銨濃度較低時，藻珠除銨過程中產生亞硝酸根離子的時間會縮短，圖中亦顯示藻珠組養殖槽與藻珠槽進、出水口之亞硝酸根離子濃度分別在第 192、192 與 216 小時達最高，其值分別約為 11.31、11.48 與 10.39 mg/l，亦呈現藻珠槽出水口有最低之值，而試驗達第 312 小時三量測點之濃度則分別下降至約為 4.11、4.04 與 3.76

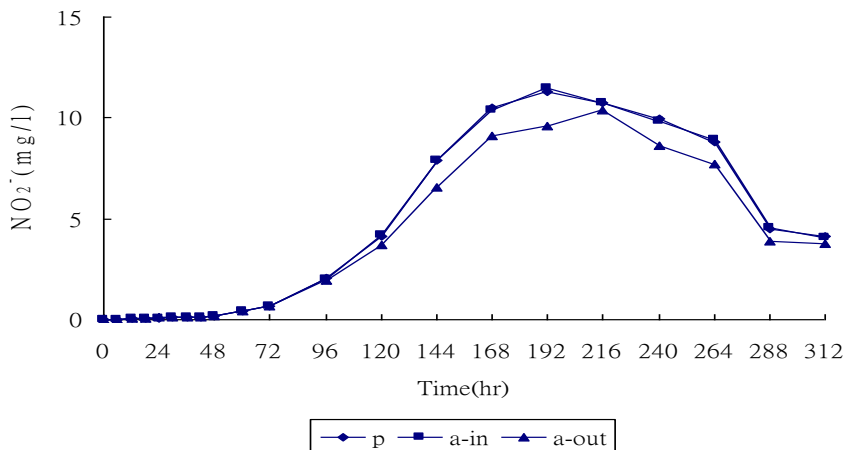


圖 12. 藻珠組之亞硝酸根離子濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽，a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 12. Plots of the nitrite concentration changes of the recirculating-water culture system with algal beads (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

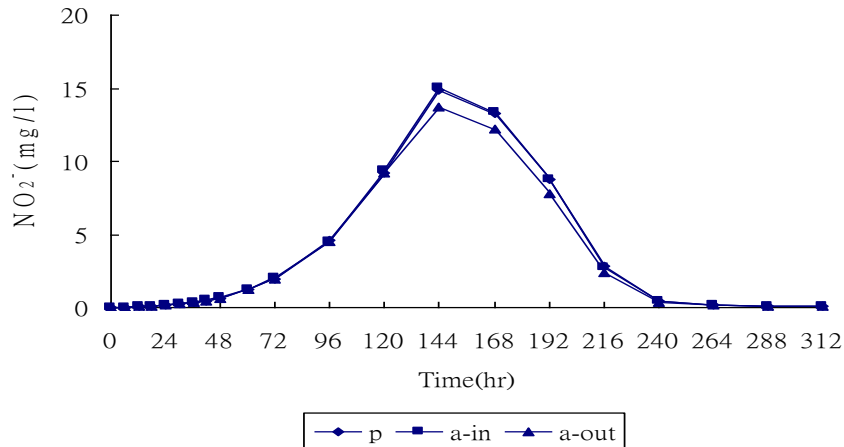


圖 13. 無藻珠組之亞硝酸根離子濃度變化趨勢圖(p 表示養殖槽，a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 13. Plots of the nitrite concentration changes of the recirculating-water culture system without algal beads (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

mg/l，其下降原因主要亦是受到藻珠攝取與硝酸菌分解之共同作用；圖 13 則顯示無藻珠組試驗初始階段與藻珠組呈相反現象，即藻珠槽中未有小球藻之代謝影響及有硝酸菌之分解作用，導致其出水口之亞硝酸根離子濃度較進水口低，且養殖槽與藻珠槽進、出水口皆在試驗第 144 小時時，達最高濃度分別約為 14.89、15.01 與 13.75 mg/l，亦顯示在未有藻珠攝取有效抑制亞硝酸根離子生成下，其皆高於藻珠組三量測點之最高濃度，同時當系統整體亞硝酸根離子達最高濃度後，亦因受系統中有硝酸菌存在增殖之作用，開始呈現下降且趨於被完全去除之趨勢，由此亦可知低密度放養吳郭魚時，系統中的硝酸菌亦如同亞硝酸菌對銨之作用，

具有能將亞硝酸根離子分解，而使其不會在系統中持續累積上昇。藻珠組與無藻珠組之硝酸根離子濃度變化則如圖 14 與 15 所示，兩組試驗三量測點皆顯現持續平緩上昇之現象。圖 14 顯示於試驗第 144 小時前，藻珠槽出水口有較高之值，其原因亦如模擬與前導養殖試驗，即受到藻珠中小球藻攝取銨與亞硝酸根離子之代謝影響，及系統中有硝酸菌存在所致，同時亦受到小球藻攝取硝酸根離子較銨與亞硝酸根離子慢，導致藻珠去除硝酸根離子之效果較不佳而持續累積增大，三量測點在試驗第 312 小時之濃度分別約為 14.89、15.80 與 15.98 mg/l；圖 15 顯示無藻珠組之硝酸根離子濃度，試驗期間皆以藻珠槽出水口最高，其進水口次之，而以

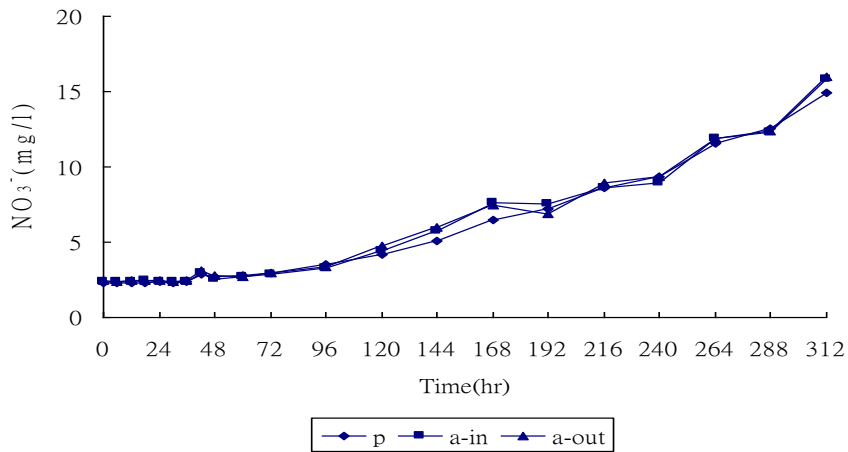


圖 14. 藻珠組之硝酸根離子濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 · a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 14. Plots of the nitrate concentration changes of the recirculating-water culture system with algal beads(p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

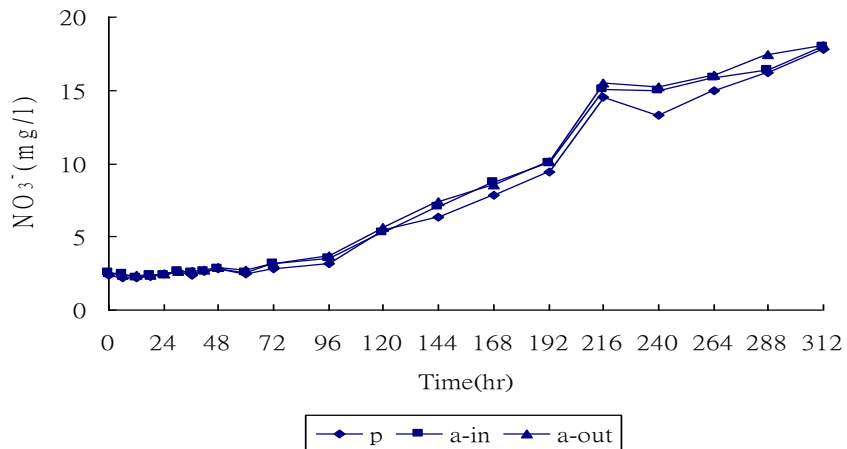


圖 15. 無藻珠組之硝酸根離子 (NO_3^-) 濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 · a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 15. Plots of the nitrate concentration changes of the recirculating-water culture system without algal beads (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

養殖槽最低，顯示系統中養殖槽與藻珠槽皆有硝酸菌存在，且養殖槽與藻珠槽進、出水口於試驗達第 312 小時時，其硝酸根離子濃度皆累積上昇達約 17.81、17.97 與 18.06 mg/l，皆較有藻珠組者高，亦獲致藻珠能有抑制硝酸根離子濃度上昇之作用。

藻珠組養殖槽與藻珠槽進、出水口之 pH 值變化，量測結果分別介於 7.99-8.47、8.27-8.61 與 8.26-8.55 之間，其平均值則分別為 8.32、8.47 與 8.45，且藻珠槽出水口 pH 值皆低於進水口，與模擬及前導養殖試驗具相同現象；無藻珠組三量測點之 pH 值分布亦分別介於 7.96-8.40、8.20-8.55 與 8.18-8.55 之間，而其平均值則分別為 8.27、8.43 與 8.42，且藻珠槽進、出水口之 pH 值幾乎一致，顯示無藻珠的藻珠槽耗鹼作用較弱；同時亦獲致兩組之水質 pH 值皆介於適宜養殖之用水 6.5-9.0 範圍內⁽¹⁾。溶氧量三量測點養殖槽與藻珠槽進、出水口量測結果，藻珠組分別介於 4.4-5.0、4.3-5.0 與 4.3-5.0 mg/l 之間，三者之平均溶氧量則皆約為 4.7 mg/l 左右；無藻珠組之分布則分別介於 4.5-5.4、4.8-5.5 與 4.8-5.5 mg/l 之間，其平均溶氧量則分別約為 5.1、5.3 與 5.3 mg/l；兩組試驗結果顯示受到曝氣之影響，兩者之溶氧量皆呈穩定分布之現象，且藻珠組中藻珠槽之溶氧量並無明顯提高，可能為試驗時藻珠數量仍不夠多，其光合作用仍不足以影響藻珠槽之溶氧量；同時試驗期間亦發現系統中溶氧有隨溫度下降而昇高之情形。藻珠組養殖槽與藻珠槽進、出水口三量測點之溫度變化，量測結果分別介於 23.2-27.7、24.3-28.4 與 24.3-28.5°C 之間，其平均溫度則分別約為 25.2、26.5 與 26.4°C；無藻

珠組三量測點之分布，分別介於 20.3-25.9、20.5-26.8 與 20.6-27.0°C 之間，其平均溫度則分別約為 22.9、23.5 與 23.6°C；兩組試驗亦皆顯示藻珠槽受光照影響而有較高之溫度；同時試驗期間兩組亦皆受氣候變化之影響，造成無藻珠組溫度較藻珠組者低，此亦導致其溶氧分布有較高之趨勢。

兩試驗組對銨與亞硝酸根離子之去除效率，分別依據式①列於表 1 中。表中顯示藻珠組銨之去除效率，由於藻珠中小球藻之攝取消化，整體皆較無藻珠組佳，且其平均去除效率達 65%，亦遠高於無藻珠組之 12%；兩組之亞硝酸根離子去除效率，皆較其銨之去除效率低，其平均去除效率分別僅約 6 與 8%，藻珠組由於受到除銨過程中之代謝影響，導致其平均去除效率較無藻珠組者低。兩試驗組之銨與亞硝酸根離子去除速率，則依據式②獲致藻珠組與無藻珠組之銨平均去除速率，分別約為 26.61 與 0.99 mg/day，亦以藻珠組有較高之值而有單位時間較大量之銨被去除；其亞硝酸根離子平均去除速率則分別約為 48.29 與 22.89 mg/day，亦顯示有藻珠之作用可獲致較大之去除速率，亦在單位時間下有較多之亞硝酸根離子被去除。

綜合上述兩實際養殖試驗結果，獲致藻珠具有穩定除銨與亞硝酸根離子之能力，且藻珠亦能抑制銨與亞硝酸根離子之生成，其最高濃度皆低於無藻珠組，同時此結果亦在兩組之銨與亞硝酸根離子之去除效率與去除速率分析中獲致，且藻珠組亦具有較大之單位時間平均去除量；但當系統中有銨與亞硝酸根離子存在時，由於藻珠攝取營養鹽之特性，其去除硝酸根離

表 1. 實際養殖試驗期間藻珠槽條件對銨與亞硝酸根離子去效率之影響

Table 1. The effect of the algal beads tank condition on the ammonium and nitrite removal efficiency during actual cultivating water tests

時間 (小時) Time (hr)	銨去除效率 (%) Ammonium removal efficiency (%)		亞硝酸離子去除效率 (%) Nitrite removal efficiency (%)	
	藻珠組 (Set with algal beads)	無藻珠組 (Set without algal beads)	藻珠組 (Set with algal beads)	無藻珠組 (Set without algal beads)
	24	65	10	-16
48	22	0	2	5
72	40	-2	1	1
96	46	-6	3	0
120	47	1	10	2
144	79	14	17	8
168	85	49	11	8
192	82	19	16	11
216	64	0	3	12
240	90	27	12	13
264	65	31	13	5
288	82	24	13	11
312	88	0	6	18
平均 (Average)	65	12	6	8

子之效果則較不佳，兩組亦以藻珠組具有抑制作用，獲致其累積增高之硝酸根離子濃度較低；而放養密度不高時之兩試驗組，其水質之 pH 值變化相近，皆無劇烈波動並皆保持在適合養殖用水之 pH 值範圍內；溶氧量之變化兩組皆不大，並受曝氣機打氣與溫度變動之影響，且獲致溫度較低時系統顯現有較高之溶氧情形；同時系統溫度亦受氣候變化之影響，且藻珠槽受到光照之作用，兩組試驗期間其溫度皆較養殖槽高。

三、初始高濃度銨試驗分析

初始高濃度銨試驗之藻珠中小球藻濃度，於試驗初始、第 120 與 312 小時之量測結果分

別約為 2.10×10^6 cells/ml、 1.85×10^7 與 4.02×10^7 cells/ml，顯示銨初始濃度較高時，在較大營養源供應下可獲致藻珠中小球藻有較大之增殖濃度。試驗之銨濃度變化趨勢如圖 16 所示，圖中顯示養殖槽與藻珠槽進、出水口三量測點之銨 (NH_4^+) 濃度於試驗前 48 小時呈一致之波動變化現象，其後首先呈緩慢下降之趨勢，而於測試達 96 小時後則急遽下降，且在第 192 小時時幾乎被去消耗殆盡，獲致藻珠在初始高濃度銨條件下，亦可有效控制養殖廢水中銨濃度之生成，同時亦受到藻珠攝取與系統中亞硝酸菌分解之共同作用，試驗期間皆呈現養殖槽銨濃度最高、藻珠槽進水口次之、而以藻珠槽

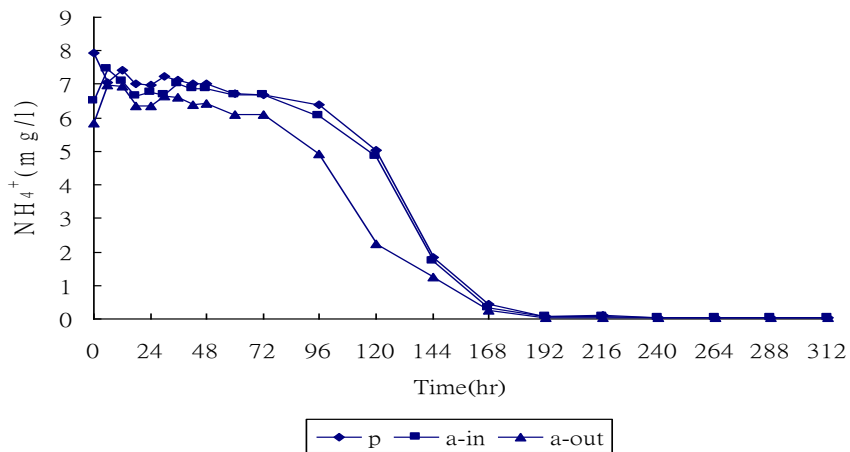


圖 16. 初始高濃度銨試驗之銨濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽，a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 16. Plots of the ammonium concentration changes of the recirculating-water culture system with high initial ammonium concentration test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

出水口最低之分布狀況；圖 17 為系統之亞硝酸根離子濃度變化趨勢，圖中顯示其三量測點之濃度變化亦如模擬與養殖試驗之現象，整體先呈現上昇再下降之趨勢，且藻珠槽出水口之亞硝酸根離子濃度於試驗前 144 小時，受到藻珠攝取銨代謝與亞硝酸菌分解產生之亞硝酸根離子較硝酸菌分解大之作用，其值皆高於藻珠槽進水口，同時試驗前 168 小時亦與模擬試驗有相似之現象，即受到系統中有亞硝酸菌分解銨，其藻珠槽進水口之亞硝酸根離子濃度皆高於養殖槽者；且試驗結果亦顯示初始銨濃度較高時，藻珠槽進水口之亞硝酸根離子濃度高於養殖槽的時間，及藻珠槽出水口高於進水口者的時間皆增長，同時三量測點之亞硝酸根離子濃度亦有較高之上昇現象，其最高值約至 29 mg/l 左

右；圖 18 則為試驗之硝酸根離子濃度變化趨勢，結果獲致養殖槽與藻珠槽進、出水口三量測點之硝酸根離子濃度，亦皆呈持續累積上昇之現象，與前述相關之養殖試驗有相似之趨勢，即受到小球藻攝取硝酸根離子較銨與亞硝酸根離子慢之特性，及系統中有硝酸菌存在與小球藻攝取銨與亞硝酸根離子代謝影響，導致藻珠去除系統中硝酸根離子之效果較不佳，而三量測點之硝酸根離子濃度皆於試驗第 312 小時累積增高至約為 23.28、21.86 與 22.41 mg/l，亦獲致硝酸根離子濃度亦隨著銨與亞硝酸根離子濃度提高而有增大之現象。初始高濃度銨試驗之養殖槽與藻珠槽進、出水口三量測點之 pH 值範圍，量測結果分別介於 7.74-8.27、7.97-8.35 與 8.00-8.34 之間，其平均值則分別約為 8.03、

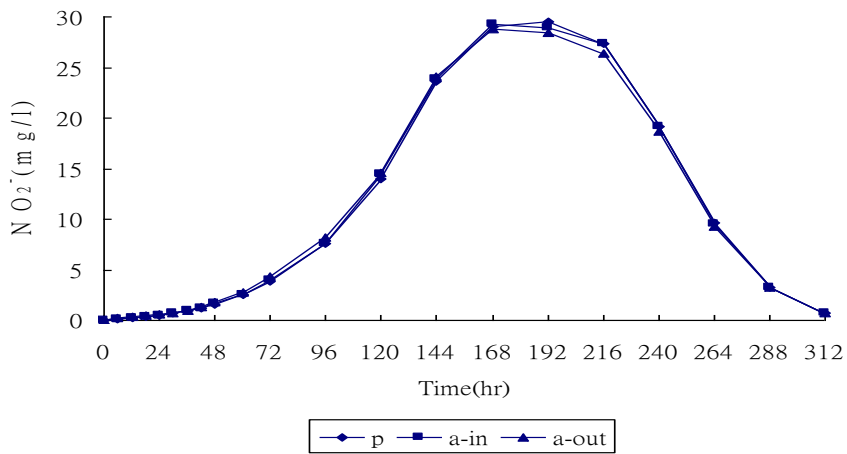


圖 17. 初始高濃度銨試驗之亞硝酸根離子濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 , a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 17. Plots of the nitrite concentration changes of the recirculating-water culture system with high initial ammonium concentration test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

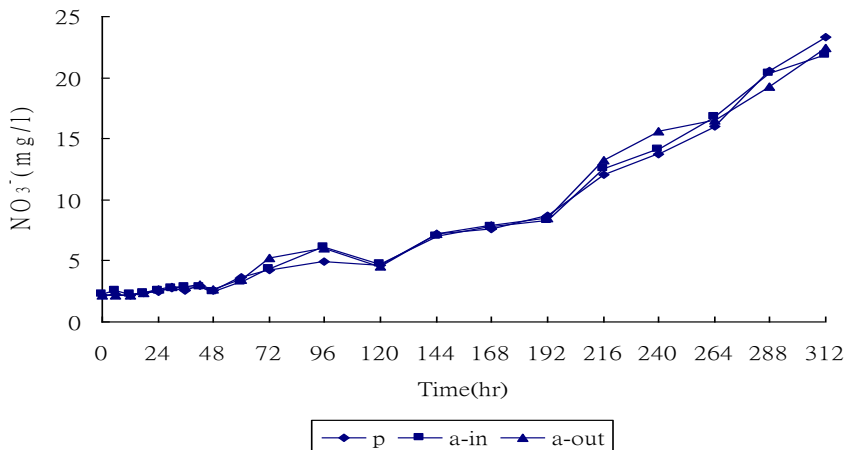


圖 18. 高濃度銨試驗之硝酸根離子濃度變化趨勢圖 (p 表示養殖槽 , a-in 與 a-out 分別表示藻珠槽進、出水口)

Fig. 18. Plots of the nitrate concentration changes of the recirculating-water culture system with high initial ammonium concentration test (p denotes the cultivating tank, a-in denotes the algal beads tank inlet, and a-out denotes the algal beads tank outlet.)

8.23 與 8.21，其趨勢亦與模擬試驗相似；溶氧量三量測點養殖槽與藻珠槽進、出水口之分布，分別介於 4.8-5.5、5.2-5.7 與 5.1-5.6 mg/l 之間，其平均值則分別約為 5.2、5.3 與 5.3 mg/l，亦受曝氣之影響彼此間幾無差異，且亦受亞硝酸根離子濃度增高之影響，導致吳郭魚在需較多氧氣下，試驗期間養殖槽之溶氧則未隨系統溫度下降而有顯著昇高之現象；而三量測點之溫度分布，則分別介於 20.8-25.7、20.9-26.1 與 20.9-26.2°C 之間，其溫度變化主要亦受試驗時氣候變化之影響，而其平均值則分別約為 23.7、24.1 與 24.2°C 之間，獲致藻珠槽亦受光照影響有較高之值。

初始高濃度銨試驗之藻珠對銨與亞硝酸根離子之去除效率，亦分別依據式①之計算列於

表 2 中。表中顯示試驗期間藻珠槽之藻珠皆可有效去除銨 (NH_4^+)，但於試驗前 168 小時則因藻珠槽出水口之亞硝酸根離子 (NO_2^-) 濃度皆較進水口者高，使得其去除效率為負值，而兩者之平均去除效率則分別約為 22 與 -1%，獲致高濃度銨之影響，使得其平均去除效率下降；同時亦依據式②獲致銨與亞硝酸根離子之平均去除速率，分別約為 32.25 與 6.73 mg/day，結果顯示在高濃度銨條件下，藻珠有較大之銨去除速率，但對亞硝酸根離子的去除效果，則受藻珠槽出水口之亞硝酸根離子濃度較藻珠槽進水口高的時間增長影響，而明顯地降低。

綜合上述初始高濃度銨之試驗結果，獲致藻珠在高濃度銨條件下，亦能有效去除養殖廢水中之銨與亞硝酸根離子，且其藻珠槽出水口

表 2. 初始高濃度銨試驗期間藻珠對銨與亞硝酸根離子之去除效率表

Table 2. The ammonium and nitrite removal efficiency by the algal beads during the high initial ammonium concentration test

時間 (小時) Time (hr)	銨去除效率 (%) Ammonium removal efficiency (%)	亞硝酸根離子去除效率 (%) Nitrite removal efficiency (%)
24	5	-8
48	6	-5
72	9	-8
96	18	-8
120	53	-7
144	26	0
168	24	-1
192	45	1
216	59	3
240	11	2
264	15	3
288	11	1
312	8	1
平均 (Average)	22	-1

之亞硝酸根離子濃度較藻珠槽進水口高之時間增長，同時亦獲致隨著銨濃度提高亞硝酸根離子與硝酸根離子之最高濃度亦增大；且亦獲致隨著初始銨濃度之增大，其銨平均去除效率下降，但其去除速率則明顯提高，即在單位時間下可有較多之銨被藻珠攝取消化，進而導致藻珠中小球藻增殖濃度亦增高，而對亞硝酸根離子之作用則相反，其平均去除效率與去除速率則皆下降。

結論

本研究試驗結果獲致固定化小球藻可有效去除循環水養殖系統中銨與亞硝酸根離子，其於實際養殖試驗時，獲致藻珠組兩者之平均去除效率分別約為 65 與 6%，而其平均去除速率則分別約為 26.61 與 48.29 mg/day，皆比無藻珠組試驗有較大之平均去除銨與亞硝酸根離子速率，且亦能抑制銨與亞硝酸根離子濃度之累積升高，使其最高濃度皆低於無藻珠組者；而在有較多營養源供應下之初始高濃度銨試驗結果，獲致藻珠中小球藻增殖情形較佳，其對銨與亞硝酸根離子之平均去除效率，則受到系統有較高銨與亞硝酸根離子濃度分布之影響，分別下降至約 22 與 -1%左右，但亦受高濃度銨之作用，其對銨之平均去除速率則增快至約 32.25 mg/day，而對亞硝酸根離子則受藻珠槽出水口濃度有較高時間增長之影響，其平均去除速率則下降至約 6.73 mg/day。本研究亦獲致藻珠於試驗初始階段除銨過程中會產生亞硝酸根離子，造成藻珠槽出水口之亞硝酸根離子濃度高於藻珠槽進水口者，且亦隨初始銨濃度增高其現象亦增長，進而影響藻珠對亞硝酸根離子

的平均去除效率，造成初始高濃度銨試驗時，獲致其亞硝酸根離子平均去除效率為負值，亦導致其平均去除速率明顯降低。試驗結果亦獲致在有銨與亞硝酸根離子營養鹽存在時，藻珠去除硝酸根離子之效果皆較不佳，亦導致其濃度呈現持續累積平緩上昇之現象。

參考文獻

1. 杜守恩。1995。水產養殖工程技術，初版，pp.6-9。水產出版社。台北。
2. 李明鋒、洪孟璋、尤瓊琦、陳俊明、黃錫泉。2000。本土型室內循環水養殖系統之自動投餌與水質分析。農林學報 49(4): 85-98。
3. 周昱翰。2001。文蛤養殖之水質與底質管理。養魚世界 25(5): 14-20。
4. 洪孟璋。2003。海水養殖用生物濾床探討。碩士論文。國立中興大學生物產業機電工程學研究所。台中。
5. 洪孟璋、李明鋒、尤瓊琦、陳俊明、黃錫泉。2000。滾筒式粒子過濾機對循環水養殖系統水質處理之影響。農林學報 51(1): 41-55。
6. 陳明耀。1997。生物餌料培養，初版，pp.51、pp.92-103。水產出版社。基隆。
7. 陳樂才。1995。魚池的廢氮。中國水產 507: 5-14。
8. 陳國誠、吳建一。1998。微生物固定化技術在廢水處理的應用。工業污染防治 68: 1-23。台北。
9. 童國枝、陳俊明、尤瓊琦、黃錫泉。2003。循環水草魚孵化系統之研究。農林學報 52(2): 35-46。
10. 葉信平、鄭文騰、翁韶蓮、邱秋霞、張文炳。

- 1996。泰國蝦養殖池循環水之研究。農委會漁業特刊 58: 87-100。台北。
11. 盧偉銘、盧重興、李季眉、陳伯中。1993。固定化藍綠藻處理含氮廢水之研究。第十八屆廢水處理技術研討會論文集，pp.513-526。台中。
12. 蘇一峰、尤瓊琦、陳俊明、黃錫泉。氧氣錐基礎研究。2004。農林學報 53(2): 121-139。
13. Becker, E. W. 1994. Microalgae: biotechnology and microbiology. 1st ed., pp.18-24. Cambridge University Press. Cambridge.
14. Chen, Yean-Chang. 2001. Immobilized microalga *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyta, Chlorococcales) for long-term storage and for application in fish culture water quality control. Aquaculture 195(1-2): 71-80.
15. Chevalier, P. and J. de la Noüe. 1985. Efficiency of immobilized hyperconcentrated algae for ammonium and orthophosphate removal from wastewater. Biotechnology Letters 7(6): 395-400.
16. Garbisu, C., J. M. Gil, M. J. Bazin, D. O. Hall and J. L. Serra. 1991. Removal of nitrate from water by foam-immobilized *Phormidium laminosum* in batch and continuous-flow bioreactors. Journal of Applied Phycology 3: 221-234.
17. Mak, A. L. and M. D. Trevan. 1987. Urea as a nitrogen source for calcium-alginate immobilized *Chlorella*. Enzyme Microb. Technol. 10: 207-213.
18. Stein, J. R. 1973. Handbook of phycological methods: culture methods and growth requirements. 1st ed., pp.7-24. Cambridge University Press. Cambridge.
19. Tam, N. F. Y. and Y. S. Wong. 2000. Effect of immobilized microalgal bead concentrations on wastewater nutrient removal. Environmental Pollution 107: 145-151.

Received: June 1, 2012

Accepted: September 15, 2012