

# 嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

## 人工溼地處理高密度室內養殖循環水之研究

計畫類別：個別型計畫                      整合型計畫

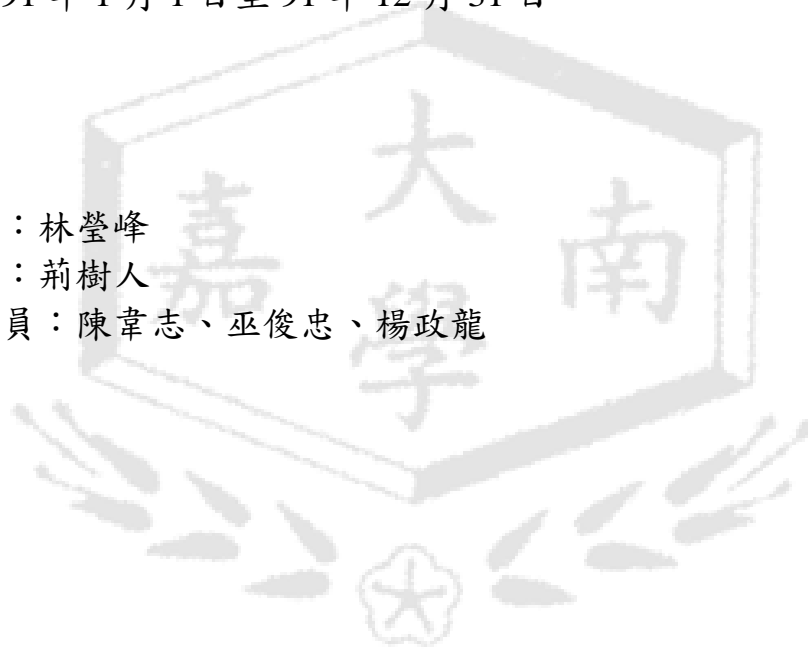
計畫編號：CNEV-91-14

執行期間：91年1月1日至91年12月31日

計畫主持人：林瑩峰

共同主持人：荊樹人

計畫參與人員：陳韋志、巫俊忠、楊政龍



執行單位：嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

中華民國 92 年 2 月 27 日

# 嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

## 人工溼地處理高密度室內養殖循環水之研究

計畫編號：CNEV-91-14

執行期限：91年1月1日至91年12月31日

計畫主持人：林瑩峰 嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

共同主持人：荊樹人 嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

計畫參與人員：陳韋志、巫俊忠、楊政龍 嘉南藥理科技大學環境工程衛生系

### 一、中文摘要

養殖用水處理技術與節水養殖技術之開發，並將養殖水及排放廢水再予利用，可減輕養殖業對環境的衝擊，此為台灣養殖業永續發展的重要課題。本研究結合人工溼地技術應用於循環水養蝦，建立了一實場規模(large scale)之循環水系統，探討自由水層溼地(free water surface flow wetland, FWS)串聯另一個表層下溼地(subsurface flow wetland, SSF)溼地對循環水之處理效能及對養殖水質維護之影響。

實場規模循環水系統中，FWS-SSF溼地之水力負荷平均操作於 $1.88\pm 0.49$  m/d，溼地可同時去除循環水中各項污染物，包括BOD<sub>5</sub>(37%)、SS(55%)、NH<sub>4</sub>-N(69%)、NO<sub>2</sub>-N(80%)，濁度(98%)。可能因高水力負荷之影響，溼地對NO<sub>3</sub>-N及PO<sub>4</sub>-P無明顯的去除。大體上，循環水系統養殖池水中各污染物濃度經溼地處理後循環水及養殖池水之各項水質均可達一般循環水養殖水質要求。

養殖過程中，循環水系統在無須換水的條件下養殖白蝦(*Litopenaeus vannamei*)，放養密度採1000尾/m<sup>2</sup>之高密度養殖，養殖期間餌料之投放量則依據蝦體大小及攝食狀況調整，每日餵飼2~4次，至養殖達第165天時總投餌量累計達約263.52 kg。蝦體初重為0.05g，養殖達第137天時蝦體大小平均可達6.98g，全期蝦子平均生長速率約0.05 g/d。

人工溼地建設中無須安置機械設備，在養殖過程中無須曝氣、無須時常排泥、操作簡單，因此為循環水養殖中效率高、低成本、省能源、維護簡單的淨水技術。

**關鍵詞：**人工溼地、養殖業廢水、循環水養殖、白蝦。

### Abstract

Water treatment and water-saving technologies are helpful for sustaining aquaculture development in Taiwan. In this study, the constructed wetlands (CWs) were integrated into the recirculating aquaculture system (RAS) so as to regulate the water qualities for culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). A commercial scale RAS was built to demonstrate the

performance of the CWs in treating the recirculating wastewater and to examine the effect of water qualities regulation by the CWs on the shrimp growth.

In the RAS system, a cultivation tank (8 m wide × 8 m long), a settling basin (1 m wide × 1.5 m long), a FWS wetland (1 m wide × 12 m long), a SSF wetland (1 m wide × 15.6 m long), and a wet well (1 m wide × 1 m long) were established and integrated. The FWS-SSF CWs removed simultaneously the major pollutants in the recirculating water under an average HLR of  $1.88\pm 0.49$  m/d for around 165 days operation. These pollutants included BOD<sub>5</sub> (37%), SS (55%), NH<sub>4</sub>-N (69%), NO<sub>2</sub>-N (80%), and turbidity (98%). Significant removals of nitrate and phosphate were not observed possibly due to the high HLR operated in large-scale RAS. However, the treated effluent from the FWS-SSF CWs can meet the general water quality guidelines for recirculating fish culture system.

This study concludes that the integrated use of the CWs into the recirculating shrimp culture system can improve qualities of culture environment and consequently increase the shrimp growth. Additionally, CW technology is characterized by the advantages of moderate capital costs, low energy consumption and maintenance requirements, and benefits of increased wildlife habitat.

**Keywords:** constructed wetland, aquaculture wastewater, recirculating aquaculture system, white shrimp.

### 二、緣由與目的

良好的水質管理程序是成功養殖及水產養殖業永續經營的基本關鍵[1]。結合傳統廢水處理技術應用在水產養殖業的水質管理及廢水處理上，為近年來養殖工程的重要發展課題。例如，利用物理處理之沉砂池、沉澱池、過篩、微過篩或砂濾等單元，去除懸浮固體物或生物處理後的剝落污泥；利用生物濾床、滴濾池、旋轉生物圓盤法及流體化床，去除水中溶解性有機質及氮氮；利用紫外線照射、臭氧處理、加氯等消毒程序，去除病原菌[1]。上述養殖水處理程序已證實可有效維護養殖池水水質，但是這些處理單元基本上是屬於機械式處理法，去除速率雖快，但其缺點為需求能源、須經常且專業性地操作維護、產生大量污泥、並只能達成部分處理功能等。

人工濕地系統 (constructed wetland system) 是將生態工程技術應用於水或廢水管理及處理上的一種自然淨化程序，具有可將污染物同化及轉換的能力 (兼具物理、化學及生物處理特性)、不需能源輸入及不必經常維護便可自給自足等優點。因此為一種省能源、低成本、無二次污染、操作維護簡單、不破壞生態的綠色環保技術 [2, 3]。台灣地處亞熱帶，日照充足、氣溫適宜，相當適合人工濕地技術的發展 [4-7]。綜覽文獻，將人工濕地應用於水產養殖廢水之處理及再利用之研究報導尚屬少見，但近年來有逐漸引起研究注目的趨勢 [8, 9]。由文獻中所述及之人工濕地的淨化效能觀之，去除養殖池中所產生的主要污染物 (有機質、懸浮固體、CO<sub>2</sub>、含氮物質、病原菌等) 並作為魚池水質管理的處理單元，人工濕地應是游刃有餘。過去兩年，本研究室已陸續證實人工濕地在養殖業廢水處理及循環再利用之實際應用潛力，並獲得人工濕地處理養殖廢水的詳細設計及操作資料 [10, 11]。

本研究主要目的為研究實場規模 (large-scale) 室外循環水養殖中濕地的處理效能及對池水維護的影響，及養殖物生存率與生長率，評估此項技術推廣應用上之可行性。

### 三、研究方法

#### 1. 實場規模循環水系統

實場規模 (large-scale) 循環水養殖系統的各單元配置流程為：初沉池 (長 1.5 m、寬 1 m)、FWS 溼地 (長 12 m、寬 1 m)、SSF 溼地 (長 15.6 m、寬 1 m)、濕井 (長 1 m、寬 1 m、水深 0.75 m) 及養殖池 (長 8 公尺、寬 8 公尺、控制水深 1.2 公尺) 等單元聯結成環路，均為混凝土結構。FWS 溼地每 m<sup>2</sup> 種植 4 株香蒲 (*Typha* spp.)。FWS 之進流由初沉池以液位差方式流入，再經前端之有孔整流壁，以利水平流方向流至出流端，溼地空隙率 ( $\epsilon$ ) 估計為 85%。SSF 溼地種植蘆葦 (*Phragmites australis*)，密度為 4 顆/m<sup>2</sup>，溼地床體體積空隙率估計為 45%。實場規模養殖池設於室內，以散氣曝氣裝置及鼓風機供應空氣。養殖池水以重力流方式流入人工濕地系統初沉池。養殖物為白蝦，蝦苗放養密度採 1000 尾/m<sup>2</sup> 之高密度養殖。餌料之投放量一般依據蝦體大小及攝食狀況調整，每日餵飼 2~4 次，並記錄投餌量。

#### 2. 分析方法

水樣的各項水質分析，包括 COD、SS、總氮 (TAN)、亞硝酸氮、硝酸氮、PO<sub>4</sub>-P、大腸菌類、葉綠素 a、DO、pH、ORP 等，依照標準方法進行 [12]。

### 四、結果與討論

#### 1. 實場規模循環水養殖操作結果

本研究實場規模之循環水養殖系統為民國 91 年 8 月開始放養並監測水質，共計養殖約 165 天。

人工溼地進流量範圍介於 51.9±13.4 m<sup>3</sup>/d，相當於每日進流養殖池水的 67±18% 進行循環處理。此操作下，FWS-SSF 溼地之水力負荷介於

1.88±0.49m/d，FWS 及 SSF 溼地之平均水力停留時間分別為 2.1±0.8 及 2.3±0.8h。本研究 FWS-SSF 溼地水力負荷仍低於 Panella et al. [9] 之研究操作值 (5.3 m/d)。

養殖池中每日投餌量隨養殖過程逐漸增加，然而估算每日投餌量僅為蝦體重的 1% (平均蝦重 3 g 時) 至 3% (平均蝦重 1 g 時)，較一般白蝦養殖管理上所建議的 (幼蝦投餌為體重的 20%，小蝦 5%、中蝦 3%) 還低。

表 1 顯示循環水流經 FWS 溼地時 pH 大體上約略增加，此乃由於 FWS 開放水層中水生植物及藻類生長進行光合作用貢獻鹼度之結果。然而，流經 SSF 溼地後則發現 pH 普遍下降之現象，此乃歸因於 SSF 溼地中進行硝化作用消耗了鹼度及缺乏藻類生長所致。由於人工溼地對鹼度之緩衝能力，養殖池中 pH 維持在 8.0±0.4，接近白蝦生長的最適 pH 水質 8.0±0.3。而循環水經溼地系統處理後 pH 為 7.6±0.5，符合一般循環水養殖之池水水質要求 (pH = 6.0~9.0，表 5)。

由於旺盛的光合作用能力，循環水流經 FWS 溼地時保持好氧狀態。再者，因為硝化作用耗氧行為及表層下遮光無光合作用進行，導致循環水流經 SSF 溼地時 DO 下降。然而，溼地系統之處理水 DO 仍能維持在 3.5±1.8 之好氧狀態。

循環水流經 FWS 溼地時 SS 的去除並不一致，有幾天數據中 FWS 出流水濃度甚至比進流還高，數據之平均結果 SS 去除效率約為 27% (表 1)。而循環水流經 SSF 溼地時，SS 濃度則顯著下降，SS 平均去除率約為 37.5% (表 1)。整個 FWS-SSF 溼地系統之 SS 去除效率平均達 55% (表 1)。根據本研究室先前之研究 [11]，FWS 濕地對 SS 去除的主要機制為：沉降、遮光 (抑制藻類生長) 及植物組織間的過濾作用，植物覆蓋密度的穩定會增強這些去除機制，而 pilot-scale FWS 溼地對 SS 去除的啟動適應期約需 5 個月。由植物生長調查顯示，養殖開始進行時 FWS 中的香蒲密度約 4-6 株/m<sup>2</sup>，操作達 38 及 73 天時分別達 15 及 30 株/m<sup>2</sup>；一般而言，溼地植被達穩定 (>100 株/m<sup>2</sup> 或 80% 面積覆蓋率)，至少需 1 個生長期，亦即春季至秋季約 7~8 個月 [3, 10]。因此，本研究中 FWS 的 SS 去除能力較低且未達穩定，可能與植物覆蓋密度尚未達成穩定有關。另外，由於 SSF 溼地去除固體最主要靠礫石間隙之過濾及沉降作用，SS 去除效能上無須啟動適應期，亦即無須獲得穩定的溼地植被即可發揮良好且穩定的 SS 去除能力 [10]。本研究結果亦驗證了先前研究的論點。

雖然 FWS 溼地平均有 27% 的 SS 去除效率，但是對水中濁度並無明顯改變。此結果顯示，可沈降性的固體僅貢獻濁度的一部份，此部分可在 FWS 溼地中去除；然而，在 FWS 中亦可能衍生浮游性藻類，及植物根部釋放氧氣導致顆粒再懸浮。反觀，SSF 溼地放流水相當清澈，約有 50% 以上的採樣頻率發現濁度為零，SSF 溼地對濁度的降低效率達 97%，整個 FWS-SSF 溼地對濁度的降低效率則為 98%。

溼地處理水之 SS 為  $10 \pm 5 \text{ mg/L}$ ，能符合一般循環水養殖水質要求 ( $< 10 \text{ mg SS/L}$ ，表 2)。由於人工溼地的淨化功能，養殖池水之 SS 及濁度分別維持在  $22 \pm 12 \text{ mg/L}$  及  $1.7 \pm 1.4 \text{ NTU}$ 。

循環水流經 FWS 溼地時， $\text{BOD}_5$  濃度無明顯變化，而經 SSF 溼地後平均約下降 37% ( $P < 0.05$ ，表 1)。整體溼地系統  $\text{BOD}_5$  去除效率及速率不高的主要原因為溼地進流水中  $\text{BOD}_5$  濃度相當低 ( $3.0 \pm 1.2 \text{ mg/L}$ )。養殖池中進行機械曝氣，增強了池水之有機物分解能力，使養殖池中之  $\text{BOD}_5$  僅為  $3.1 \pm 1.2 \text{ mg/L}$ 。溼地處理水之  $\text{BOD}_5$  為  $1.9 \pm 1.6 \text{ mg/L}$ ，符合一般循環水養殖水質 ( $< 5 \text{ mg BOD}_5/\text{L}$ ，表 2)。

系統啟動初期，FWS 溼地的氮氣去除並不一致，出流水濃度甚至高於進流水。當操作 45 天以後，FWS 溼地逐漸表現一致的氮氣去除能力，去除效率為約達 21%。反觀，SSF 溼地在啟動操作 10 天後，即表現相當顯著且一致的氮氣之去除，至操作結束期間的氮氣平均去除效率為 54%。上述結果顯示，本研究 FWS 及 SSF 溼地達穩定操作的啟動適應時間 (start-up period) 分別約為 40 及 10 天。人工溼地中氮氣去除之主要機制為細菌硝化作用 (nitrification)。本研究溼地去除氮氣之啟動時間比先前研究來得短 (利用試驗規模 FWS 及 SSF 溼地處理漁塭排水，去除氮氣之啟動期分別為 70 及 30 天)，主要原因可能為本研究溼地系統之水力負荷較大 (本研究  $1.88 \pm 0.49 \text{ m/d}$  v.s. 先前研究  $0.018 \sim 0.135 \text{ m/d}$ )，能促進硝化菌之穩定形成。

在整個研究期間，FWS-SSF 溼地系統氮氣去除效率平均達 69% (表 1)，氮氣去除速率達  $0.31 \pm 0.21 \text{ g N/m}^2/\text{d}$ 。溼地處理水氮氣濃度相當低為  $0.06 \pm 0.05 \text{ mg/L}$ ，符合一般循環水養殖水質 ( $< 0.5 \text{ mg NH}_3/\text{L}$ ，表 2)；而養殖池水氮氣濃度亦維持在  $0.23 \pm 0.13 \text{ mg/L}$ ，超過 90% 之採樣頻率均符合白蝦生長之最佳水質要求 ( $< 0.4 \text{ mg NH}_4\text{-N/L}$ )<sup>(37, 38)</sup>。

大部分的亞硝酸氮去除幾乎發生於 SSF 溼地中，FWS 溼地進、出流水之亞硝酸氮不無明顯變化。由於亞硝酸氮去除機制主要為硝化作用 (nitrification)，消耗鹼度，因此上述現象與 pH 變化相當一致。FWS-SSF 濕地之亞硝酸氮去除效率平均高達 80%，而處理水亞硝酸氮濃度相當低 ( $0.07 \pm 0.14 \text{ mg N/L}$ )，養殖池水氮氣濃度亦維持在  $0.26 \pm 0.18 \text{ mg N/L}$  (表 1)，均符合一般循環水養殖之水質要求 ( $0.2 \sim 5.0 \text{ mg NO}_2\text{-L}$ ) (表 2)。

由進出流水偵測結果顯示，FWS 及 SSF 溼地對循環水硝酸氮並無去除之現象，溼地出流水濃度甚至高於進流水。由於此現象，導致養殖池硝酸氮隨養殖過程而累積增加之趨勢，由一開始的  $6.36 \text{ mg NO}_3\text{-N/L}$  至本研究結束時的  $77.6 \text{ mg NO}_3\text{-N/L}$ 。溼地中硝酸鹽之去除機制主要靠脫硝作用 (denitrification)，並利用植物之生產力作為脫硝之電子提供者。本研究溼地對硝酸鹽無明顯去除能力之原因可能為：實場規模水力負荷操作高，水力停留時間短，因此降低脫硝速率；另一原因可能為，溼地植物相未穩定，脫硝所需之碳源仍相當缺乏。所幸，硝酸鹽對養殖物並無毒性，溼地處理水

( $39.8 \pm 29.1 \text{ mg NO}_3\text{-L}$ ) 及養殖池水 ( $39.9 \pm 28.4 \text{ mg NO}_3\text{-L}$ )，均符合一般循環水養殖之水質要求 ( $< 1000 \text{ mg NO}_3\text{-L}$ ) (表 2)。

養殖池水及循環水中之磷酸鹽濃度均不高，且無法偵測到 FWS 及 SSF 溼地之磷酸鹽去除能力 (表 1)。溼地中磷酸鹽去除機制主要為：化學沈澱、基質吸附及植物攝取。實場規模循環水系統之 FWS-SSF 溼地，可能由於水力負荷平均高達  $1.55 \text{ m/d}$ ，因而影響磷酸鹽去除功能。

#### 四、結論

1. 人工溼地對循環水懸浮固體及濁度的平均衰減效率分別達 55 及 98%，使養殖池內的懸浮固體及濁度分別維持於  $22 \pm 12 \text{ mg/L}$  及  $1.7 \pm 1.4 \text{ NTU}$ 。
2. 生化需氧量、氮氣、亞硝酸氮淨化效果均相當良好，平均去除效率分別達到 37%、69%、80%，使養殖池內的生化需氧量、氮氣、亞硝酸氮分別維持於  $3.1 \pm 1.2 \text{ mg/L}$ 、 $0.23 \pm 0.13 \text{ mg/L}$ 、 $0.26 \pm 0.18 \text{ mg/L}$ 。
3. 養殖期間白蝦全期平均生長速率約  $0.05 \text{ g/d}$ ，養殖至第 137 天時平均可達  $6.98 \text{ g}$ 。
4. 本研究證實人工溼地高效率之處理功能，使循環水養殖系統水質中之各項污染物濃度均符合養殖水水質標準，並造成較良好之養殖環境。人工溼地建設上無須安置機械設備，養殖過程中，溼地無須機械動力輸入、無污泥產生、不需專業及複雜之維護，因此為循環水養殖技術上一種效率高、省能源、低成本、容易操作之淨水技術。

#### 五、參考文獻

- [1] Lawson, T.B. (1995) *Fundamentals of Aquacultural Engineering*. Chapman & Hall, New York.
- [2] Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996) *Treatment Wetlands*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [3] International Water Association (2000) *Constructed Wetlands for Pollution Control. Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Publishing, London, UK.
- [4] Jing, S.R., Lin, Y.F., Lee, D.Y., Wang, T.W. (2001) Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 76(2):131-135.
- [5] Jing, S.R., Lin, Y.F., Lee, D.Y., Wang, T.W. (2001) Use CW Systems to Remove Solids from Highly Polluted River Water. *Water Science and Technology: Water Supply*, 1(1), 89-96.
- [6] Jing, S.R., Lin, Y.F., Lee, D.Y., Wang, T.W. (2001) Effects of Hydraulic Loading and Macrophytes on Performance of Microcosm Wetlands. *Journal of Environmental Quality*, in press.
- [7] Lin, Y.F., Jing, S.R., Wang, T.W., Lee, D.Y. (2001) Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands.

- Environmental Pollution*. in press.
- [8] Zachritz, W. H., Jacquez, R. B. (1993). Treating intensive aquaculture recycled water with a constructed wetlands filter system. In *Constructed wetlands for water quality improvement* (Moshiri, G.A. Ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 609-613.
- [9] Panella, S., Cignini, I., Battilotti, M., Falcucci, M., Hull, V., Milone, N., Monfrinotti, M., Mulas, G.A., Pipornetti, G., Tancioni, L., Cataudella, S. (1999). Ecodepuration performances of a small-scale experimental constructed wetland system treating and recycling intensive aquaculture wastewater. *Ann. New York Aca. of Sci.* Vol. 879, 427-431.
- [10] Lin, Y.F., Jing, S.R., Lee, D.Y., Wang, T.W. (2001) Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system. "*Aquaculture*", in press.
- [11] Lin, Y.F., Jing, S.R., Lee, D.Y., Wang, T.W. (2001) Removal of solids and oxygen demand from aquaculture wastewater with a constructed wetlands system. *Water Environmental Research*, Washington, D. C.
- [12] Yang, L., Chou, L.S., and Shieh, W.K. (2001) Biofilter treatment of aquaculture water for reuse applications. *Wat. Res.* Vol. 35, No. 13, 3097-3108.
- [13] APHA (1989) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (17th edition). American Public Health Association,

表 1 實場規模循環水養殖系統各採樣點之平均水質

Parameter	FWS influent	FWS effluent	SSF effluent	Pond
pH	8.17	8.32	7.89	7.98
DO (mg/L)	8.7±2.8	8.7±2.8	3.5±1.8	8.3±1.3
SS (mg/L)	22±14	16±6	10±5	22±12
Turbidity	1.4±1.4	0.7±0.8	0.02±0.08	1.7±1.4
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	3.0±1.2	3.0±1.1	1.9±1.6	3.1±1.2
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	0.18±0.09	0.13±0.10	0.06±0.05	0.23±0.13
NO <sub>2</sub> -N (µg/L)	0.35±0.221	0.31±0.22	0.07±0.14	0.26±0.18
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	39.6±28.1	39.7±27.	39.8±29.	39.9±28.4
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	3.59±1.90	3.52±2.01	3.80±2.14	3.70±2.07
Chl-a (µg/L)	24	6	75	

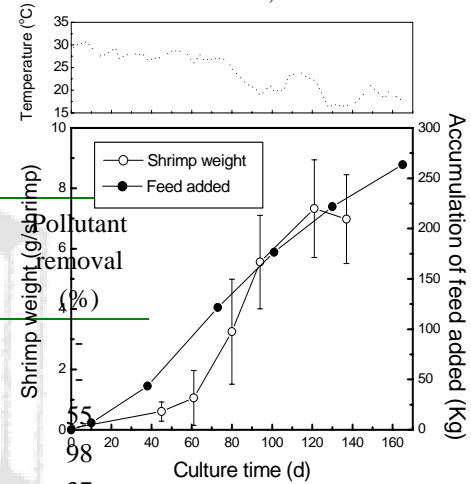


表 2 循環水養殖系統池水水質的一般要求標準<sup>(13)</sup>

Water quality parameter	Unit	Water quality guidelines
DO	mg/L	> 0.6
Carbon dioxide (CO <sub>2</sub> )	mg/L	< 20
pH		6.0~9.0
Alkalinity	mg/L as CaCO <sub>3</sub>	> 20
BOD <sub>5</sub>	mg/L	< 5
SS	mg/L	< 10
NH <sub>3</sub>	mg/L	0.02~0.5
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0.2~5.0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	< 1000

圖 1 白蝦之生長曲線與投餌量之關係圖

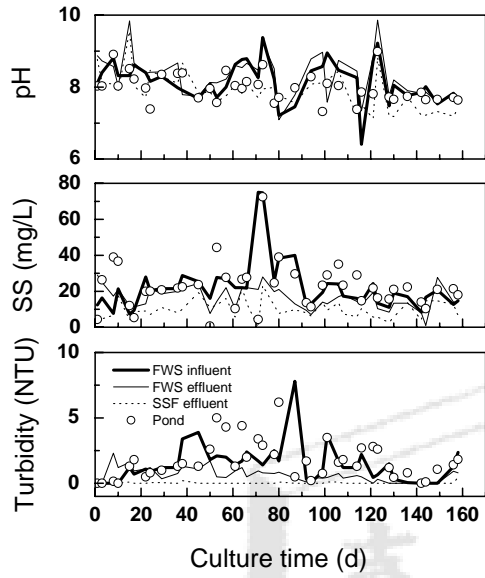


圖 2 實場規模循環水養殖系統各採樣點之 pH、SS 及濁度之變化

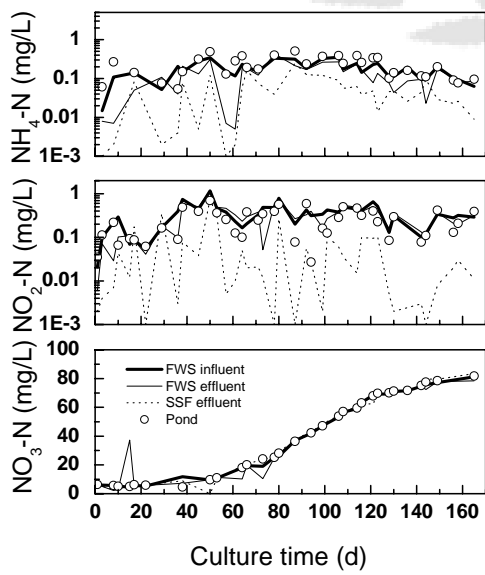


圖 3 實場規模循環水養殖系統各採樣點之氨氮、亞硝酸氮、硝酸氮之變化