

循環水養殖系統之濾材物性與配置 對水處理效率影響研究

Influence of Physical Properties of Biofilter Material and Equipment on Water Treatment Efficiency in Recirculating Aquaculture System

國立台灣大學
生物環境系統工程系副教授

侯文祥
Wen-Shang Hou

國立台灣大學
生物環境系統工程研究所碩士

顏在宏
Chai-Hong Gan

摘 要

在綠環境生物產業發展主題中，以零廢污排放為最終目標的養殖系統用水如經適當處理後必定可再循環使用，而兼顧經濟、簡易操作及維護型的水處理設備之設計及其效率評估，與選用的濾材物性特徵有著密切關聯。本研究設計一套實驗流程，測試台製毛刷、日製繩材、美製雙星球型、米格型、葉片型、風球型及皇冠型等五種塑膠濾球，共七種不同的市售濾材，比較其充填成本、單位體積濾床之有效表面積、三種不同水力停留時間、二種不同充填率等物性之固型物與總氨氮的去除效率，且評估其經濟性。結果得知，毛刷的單位體積處理速率($\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$)最高，其次是雙星球型及繩狀濾材。在充填成本方面，則以皇冠型最低，其次是毛刷，以葉片型最高。若以單位充填成本所能處理的速率($\text{mg}/\text{m}^3/\text{元}/\text{day}$)來看，則以毛刷速率最高，皇冠型次高，葉片型最低，雙星球型次低。且得知，有效表面積愈高者總氨氮的單位體積處理速率愈高。綜合上述，在濾材部分，明確得知本土產毛刷為一極適用的生物濾材。

關鍵詞：濾材，物性，毛刷，循環水養殖系統，氨氮，固型物。

ABSTRACT

Accumulation of solids and ammonia nitrogen (TAN) in aquacultural ponds is lethal to aquatic creatures and must be removed for water reuse. The efficiency of treatments for recirculating culture water is influenced by the physical properties of biofilter media. In

this study, influence of hydraulic retention time (HRT) and packing rate of Hairbrush, Ring, TBR, Migring, Pall, Windball and Heilex in seven media types on solid and TAN removal efficiency in fresh water were examined. The HRT were set for 3, 5 and 10 minutes, and the packing rate were 50% and 100%. The highest removal efficiency occurred in Hairbrush media, next came ring type and TBR. However, the cost of Heilex type was most economical, the second was Hairbrush type. If took the cost and removal efficiency into consideration at same time, Hairbrush type was the best of all combinations, the second was Heilex type. The media with higher effective surface area provided higher removal efficiency in this study. To sum up, hairbrush type was proven as a suitable biofilter media and the operation conditions were adjusted according to quality of wastewater to meet its highest efficiency.

Keywords: Media, Physical properties, Hairbrush, Recirculating aquacultural ponds, Ammonia nitrogen, Solids.

一、研究背景與目的

長年以來，台灣的戶外流水式九孔立體養殖法，其池水交換率每日達 20 回以上 (張，1998)；露天流水式鰻魚養殖每生產 1 公斤成鰻約需消耗 15~30 噸的淡水 (侯，1994)，由此可知養殖過程所排放養殖廢水的龐大。以往，業者爲了取得淡水水源而開挖水井，超抽地下水，曾被以爲是地層下陷的主因之一。然而，即使是海水養殖貝蝦類生物，由於高密度甚且立體化養殖方法，池內日投餌量大，養殖生物的飼料換肉率卻未相對提高，使水中殘餌及排泄物累積速度激增，養殖水中的殘留氮磷物質呈高負荷，不但易影響生物存活率與飼料換肉率，業者一直只能以更快速的更換池水做爲應對措施，因此養殖廢水被大量排放，導致對周邊水域環境的衝擊也日漸加劇。更甚者，業者爲了快速換水衍生出水質不易控管問題，爲了防治池內的病害發生，不可避免須投放抗生素及化學性或生物性藥劑，也隨排放水擴逸而出，更可能造成周邊水域環境品質惡化。因此，爲減少養殖廢水排放量，可提升養殖用水的再利用率之本土型循環水養殖系統發展成爲台灣養殖業轉型的重要方向。而循環水的工程設計方法與明確的水處理效率等資料建立則爲其必要步驟。至於另一種台灣傳統的止水式室外養殖

方法，缺點是池內用水因持續未作任何處理而連續使用，水質容易隨時間、天候變化而不易控制，造成養殖環境的不穩定。在蝦類養殖方面，台灣曾有養蝦王國的美稱，但近年來因爲養殖用水和蝦病問題，造成重大衝擊。而封閉式循環水養殖系統最能克服上述兩個問題。使用養殖用水循環再利用方式可減少引進外來水源，阻絕病原經由水源及帶病之生物的入侵，從養殖水環境的控制可達到減少蝦類感染疾病的途徑 (陳，2000)。循環水養殖系統的排水需經適當處理才可再循環使用，而水處理設施中濾材的選擇則以低造價、本土化、操作維護容易及可重覆使用爲選擇原則。在本土化濾材中，毛刷曾被認爲是可推廣的低造價濾材 (林、彭，1995)，至今卻一直未被國內產業界與研究單位重視，主要乃因爲毛刷濾材的物理性質、操作配置、對顆粒及氮化合物去除速率的關係等一直未被明確提及，且與其它引入國內的國外濾材之物理性質比較、處理速率比較等的差異也尚未被作任何探討所致。綜合上述，本研究探討在循環水養殖系統中，非常重要的濾材選用過程，以其物性、配置法、操作法、對顆粒及總氮處理速率的影響、經濟性等明確實驗資料，提出工程設計與濾材選用的原則。比較各種濾材的物理性質，在實驗室就不同的操作及充填率下探討濾材對顆粒及

總氮處理速率、充填成本的影響等，以做為濾材選擇的依據。

二、文獻探討

2.1 循環水養殖系統

所謂循環水養殖系統，是指利用養殖池所排出的養殖廢水，經過一系列的廢水處理設施，再回流到養殖池中重覆使用。如能明確得知設施的處理效率與操作管理技術之關係，在循環水養殖過程，只需不定期的補充少量水應可滿足生物的水質環境需求。養殖池容易累積大量對養殖生物可能有害的物質，主要包括固態顆粒及溶解態氮化合物等，為一高度優養化環境，物質轉換速率快，常使養殖池生態機制來不及反應，造成水中酸鹼度太高或太低、溶氧不足、氮及亞硝酸鹽濃度升高等不利於養殖生物之環境。因此，循環水設備的目標是維持物質收支的平衡，將這些在養殖過程中逐漸累積的物質加以去除，以維持養殖池中水質的穩定。其中，顆粒及氮化合物中的總氮、亞硝酸氮便是養殖池中迫切需要處理的物質。

2.2 顆粒處理方法

佐野(1987)指出養殖池中處理顆粒的方法主要為物理性方法，一般可分為稀釋、沉澱、過濾三種。稀釋方法為利用大量的水混合稀釋至適合養殖的濃度，一般流水式養殖多使用此法。沉澱方法為利用顆粒的重力沉降達到去除水中懸浮物的目的，對於沉降速度大於表面溢流率的顆粒，理論上可達到百分之百的去除率。過濾方法為利用砂石、毛刷、塑膠濾材或機械式過濾器等從水中過濾出懸浮物而加以去除。在砂石過濾方面，侯(1988)利用無煙煤及矽砂作為濾材，在濾出水量 $169 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{day}$ 的情況下處理鰻魚池水中懸浮固形物得到 80% 以上去除率。在機械式過濾方面，侯(1996)整理國內外文獻提及對丹麥式滾筒機械設備的顆粒去除效率均僅約 30% 而已，彰化一地實測例也得 33% 去除的相近效果。侯(1996)也指出過濾後的 $60 \mu\text{m}$ 以下顆粒濃度有大量增加現象，表示循環流速過大及過大的逆洗

水壓與水量會將中大型顆粒打碎而使其通過濾網殘留於循環水中。陳(1994, 1995)使用網目 $72 \mu\text{m}$ 國內製微粒過濾器處理顆粒濃度 $133.5 \pm 35.5 \text{ mg/L}$ 的鰻魚池水，得到 $19.0 \pm 10.3 \%$ 的去除效率；處理斑節蝦、長臂蝦池水中之懸浮性顆粒，分別得到 17.5%、16.4% 的去除效率。而侯(1999)計測滾筒機械式過濾器在網目 $60\sim 80 \mu\text{m}$ ，水力停留時間 0.5 秒的情況下對鰻魚池水中懸浮固形物的處理效率為 7.1%。此外，也有利用氣泡的表面張力吸附浮除水中顆粒的方法，如泡沫分離機、氣泡柱等設施。侯(1999)比較機械過濾器、沉澱槽、氣泡柱及毛刷微生物過濾槽等四種去除鰻魚池中固型物的設備成本、去除顆粒的顆徑範圍及固型物的去除效率，得知毛刷槽及氣泡柱對於中小顆粒的去除效果較佳且功能相近，二者均具有部分生物濾槽功能，而氣泡柱使用空間小，具增氧功能，更不需清洗，毛刷槽造價則較低。本研究則進一步比較微生物過濾槽中濾材的成本及濾材物性對顆粒處理效率的影響。

2.3 氮化合物處理方法及水質環境影響因子

在養殖用水的處理方法上，主要採用生物脫氮法及生物膜法。生物脫氮法是在養殖池或是養殖池旁的其它池中，栽種或混養其它水生動植物，一般為水生植物，藉由這些動植物來達到吸收水中廢氮的淨水方法，由於氮氮可以作為水生植物的養分，栽種的水生植物又具經濟價值，可增加收益，因此被稱為複合式養殖。但是此法有混養生物選擇不易、生物的適當放養密度不易管理以平衡環境物質收支、處理時間長、需求空間大等問題存在，不適合高密度的養殖。生物膜法利用一些不溶性的物質，作為微生物附著的載體，使微生物附著在其上。載體早期多採用碎石、細砂，現在則多以塑膠顆粒做為生物載體，將待處理的水通過濾床，與微生物反應以達到淨化水質的效果。生物膜法的處理效率高，其中，又以沉浸式生物濾床操作最簡便、設備最小。而市面上塑膠濾材種類繁多，其物性也各不相同，如何在相同環境設計基準及操作管理條件比較出材料的優劣即為本研究的主題之一。至於水質

環境因子對處理效率的影響方面，可依微生物處理氮化合物的硝化作用和脫硝作用機制分別討論。進行硝化作用所需的自營菌除了對所處環境的溫度、酸鹼度、溶氧、總氮濃度及鹽度非常敏感外，濾床的高度、水流速、氣流速、預前處理及反沖洗等操作及濾材的選擇亦會對濾床內的硝化作用造成影響。茲將這些影響整理如下：

- (1) 溫度：硝化作用的最適溫度為 28~36 °C。在溫度為 20 °C，溶氧和總氮分別為限制因子的情況下，溫度每升高 1 °C，硝化作用分別增加 1.108 % 及 4.275 % (Zhu and Chen, 2002)。亦有學者認為溫度在 10-29 °C 的範圍內，每升高 1 °C，硝化作用增加 2 %，29 °C 之後則有下降趨勢(Polanco, 1994)。Choi(1998)則發現在有充填介質的濾床內，溫度對於硝化作用的影響不超過 1 %/°C。陳 (1986) 在填充式濾床法去除水中氮氮研究中，在溫度 22~24 °C、溶氧 7.9~8.1 mg/L 及溫度 27~30 °C、溶氧 6.9~7.1 mg/L 兩組實驗中發現，前者溫度低約 5 °C 溶氧則高 1 mg/L，氮氮去除率卻達 90~95 %，比後者的 75 % 高約 15~20 %，顯示溶氧的影響遠較溫度為大。生物膜法的去氮效率受限於基質的傳輸，而溫度對溶氧在生物膜的擴散影響很小。在一般負荷操作下，因溶氧往往成為硝化作用的控制或限制因子，間接證明溫度對硝化作用的影響不大，且在高溫時生物膜內的細菌雖具較大活性，但呼吸作用率亦較高，致使生物膜內溶氧較低溫時來得低，與高溫對硝化作用的影響具抵消作用(Okey, 1989)。台灣冬夏兩季水溫約相差 10°C 左右，綜合以上文獻，硝化作用率可能相差 10~20 %。
- (2) 酸鹼度：Villaverde 等(1996)根據多位學者的研究，整理出硝化作用的酸鹼度最適值介於 7.0~8.8。亞硝酸菌的酸鹼度最適值為 7.9~8.2；硝酸菌則為 7.2~7.6；Villaverde 等 (1996) 同時指出，在酸鹼度為 5.0~8.5 的範圍內，酸鹼度每升高 1 個單位，硝化

作用效率提高 13 %。而酸鹼度與溫度之間對硝化作用的影響沒有交互的關係(Shammas, 1986)。養殖池酸鹼度一般都控制在 7~8 中性偏鹼的範圍，硝化作用率在此範圍內的變化並不大。

- (3) 溶氧：硝化 1 mg/L NH_4^+-N 及 NO_2-N 的理論需氧量分別為 3.43 及 1.14 mg/L，因此，硝化 1 mg/L NH_4^+-N 轉化成 NO_3-N 的理論需氧量為 4.57 mg/L。Boller 等(1994)指出液膜內溶氧應維持在 3-4 mg/L 以上，方不致影響硝化作用。Lazarova 等(1998)則認為所需的溶氧並不如理論上那麼大，在液膜內溶氧和氮氮比例在 1.5~2.0 g $\text{O}_2/\text{g NH}_4^+-\text{N}$ 以上，溶氧將不致成為限制因子。曾(2000)指出出流水溶氧在 2 mg/L 以上是硝化濾床之安全濃度。在本研究中，採用出流水溶氧控制在 2 mg/L 以上，做為濾床的溶氧濃度操作下限。
- (4) 氮氮：Polanco 等(1994)的研究認為未解離氮的濃度在 1 mg $\text{NH}_3-\text{N}/\text{mg VAS}$ (Volatile Attached Solid, 代表附著在濾材上的微生物量)以上時，硝化菌的活性會受到抑制，造成 NO_2-N 的累積率可達 80 %。Nijhof and Bovendeur (1990) 的研究則顯示，在溶氧供應充足的情況下，海水處理系統中總氮氮濃度需大於 3 mg/L，淡水中大於 2.2 mg/L，硝化作用率方不受總氮氮濃度的影響。養殖廢水的總氮氮值屬於低濃度值，未解離氮濃度不致對硝化作用產生抑制，因此，本研究的總氮氮值控制在 2.2~5 mg/L 之間，使總氮氮的去除不致受到濃度值的影響。
- (5) 鹽度：鹽度會影響細菌的新陳代謝，減低微生物的生長及總氮氮氧化速率。Nijhof and Bovendeur (1990) 指出總氮氮在淡水和海水中的去除效率可以 1/2 次或 0 次方程式來表達，在溫度為 24°C 時，海水及淡水總氮氮濃度分別在 3.0 及 2.2 mg/L 以下，去除速率為 1/2 次方程式，分別為 $0.23 C^{0.5}-0.11$ 及 $0.55 C^{0.5}-0.12$ ，其中 C 為總氮

氮濃度：在 3.0 及 2.2 mg/L 以上，去除速率為 0 次方程式，分別為 0.28 及 0.69 g NH₄-N/m²/day，去除速率與總氮濃度無關。海水中總氮的去除效率只有淡水中的 40%。Rosa 等(1998)亦曾對淡、鹽水中的去氮效率進行研究，其結果為水中鹽度為 50 g/L 時的去氮效率只有淡水的 47%。

2.4 氮化合物處理方法及水理環境影響因子

Boller 等(1994)提出主要影響沉浸式生物濾床效率的操作因子包括濾材(比表面積)、水流速度、前處理及反沖洗。曾(2000)則指出影響生物濾床操作效率的因素包括比表面積、水力負荷及濾床深度等。

- (1) 濾材：濾材的選擇應具備能提供愈大的微生物生長面積愈佳；水流通過濾材時要均勻且呈亂流，使水與微生物的接觸效果良好；濾材的強度要夠，重量要輕；操作要簡單，且洗淨效果良好，可重覆使用等功能(佐野，1987)。而塑膠物質雖具備高孔隙比、重量輕、不受陽光曝曬可維持很久等優點，但單價卻高(曾，2000)。本土生產的毛刷除具備以上優點外，造價運轉成本亦低，被認為可大量推廣，而毛刷的物理性質及其對處理效率的影響、與其它市售濾材之差異目前則尚無文獻探討。濾材的表面粗糙度將影響微生物及基質的截留，表面粗糙度較大的濾材微生物較易附著長成生物膜。濾材的比表面積愈大，單位體積之濾材可著生之細菌較多，單位體積濾床可去除之氮態氮亦較多(曾，2000)。Boller 等(1994)針對沉浸式濾床試驗中，三組化學及物理性質各異的濾材，比表面積較大者具有較高的單位處理速率，並建議濾材的比表面積應為 200-1500 m²/m³。而 Thörn (1996) 等針對滴濾式生物濾床的研究中，比表面積較大的一組濾材對氮亦具有較高的處理速率。Ridha 和 Cruz (2001)則在兩種比表面積相同、化學性質各異的濾材的硝化作用率比對研究中，得

到兩組濾材具相同硝化作用率的結果。因此，濾材的比表面積、粗糙度與物質處理速率間應存在著一定的關係，可以做為濾材選擇的指標之一。本研究的濾材試驗乃選用五種表面粗糙度較大，兩種較小而比表面積各異的濾材，針對這兩種物理性質與物質處理速率做比較探討。

- (2) 水流速度/水力負荷：Boller 等(1994)提出濾床水流平均速度應保持在 2~6 m/h，空氣流速維持在 10 m/h 左右。曾 (2000) 則指出濾床的流速設計以能提供濾床的需氧量為準。Peladan (1996)的研究中提出水流速 30 m/h、水力停留時間不小於 2 分鐘，水流速不致對硝化作用造成負面影響，水流速由 5 m/h 增加到 10 m/h，去除速率增加 18%；由 5 m/h 增加至 20 m/h，去除速率增加 33%。因此，在本研究的濾材試驗中，水流速的操作控制在水力時間不短於 2 分鐘，且能提供濾床足夠的需氧量。
- (3) 反沖洗：Sastry (1999) 針對 1/24、1/12、1/48、2/48、2/24、3/24、5/24 (次/小時) 珠子滴床反沖洗實驗中，反沖洗次數愈多，硝化作用率愈高。反沖洗次數由 2/48 減至 1/48 次/小時，硝化作用率減少 30%；由 1/24 增至 1/12 次/小時，硝化作用率約增加 19%；由 2/48 增至 2/24 次/小時，硝化作用率約增加 20%；由 3/24 增至 5/24 次/小時，硝化作用率約增加 16%。本研究濾材試驗中，採用一天一次的反沖洗數，在相同基準下對各種濾材進行比較。
- (4) 前處理：原水經前處理將水中固形物去除，可減少生物濾床的負荷，避免大量顆粒在濾床內累積造成濾床的阻塞，且避免供微生物生長的表面積減少，使得生物濾床處理速率減低甚至失效。在有前處理與沒有前處理的去氮速率比較中，有前處理的一組具較高的處理速率，速率約為沒有前處理的 1.6 倍(Boller，1994)。本濾材試驗中，為調製高氮濃度原水，先將飼料投入水中待其溶解沉澱，再取其上部澄清

液倒進 0.5 噸飼養少量吳郭魚及大肚魚的原水儲存槽做為處理的原水。

- (5) 濾床高度：曾(2000)指出大部分濾床需 1 m 以上高度，使用直徑 7~10 cm 的粗濾材及高流量之濾床，濾床高度可能達 4-5 m。Peladan (1996) 則指出在相同的水流速下，不同高度的濾床具相同的處理速率 ($\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$)，因此，在同體積及入流量下，濾床高度愈高(水流速愈快)，硝化作用率愈佳。

在生物膜中，硝化和脫硝作用分別在生物膜表層好氧區域和內層厭氧區域同時進行(Reddy, 1998)，但對於養殖循環水而言，一般上不需要考慮到硝酸態氮的處理，因此，對於脫氮作用不詳加討論。

三、材料與方法

3.1 實驗器材

- (1) 透明壓克力管：為便於觀察管內水流及濾材互動狀況，使用三支直徑 10 cm，高度 140 cm 的圓形透明壓克力管做為上流沉浸式生物濾槽，配置如圖 1。
- (2) 濾材：選用七種市售濾材，分別為美製塑膠顆粒五種，日製繩狀 TBR 濾材一種及台製毛刷等。由產品目錄規格得知，其物理性質與售價如表 1 及圖 2 所示。表中未記入數字者表示無產品規格資料。
- (3) 抽水馬達及馬錶：抽水馬達將原水抽進濾床，使用馬錶以「體積-時間法」計算入水流量。
- (4) 濾紙與真空抽濾設備：使用日製 Toyo-GS25 濾紙，孔徑 $0.45 \mu\text{m}$ ，直徑 47 mm。德製 Sartorius D-3400 型過濾器，真空泵 (GAST Model DOA-P104-AA)等，以負壓方式進行水樣過濾，以計測濾紙上殘留顆粒濃度，並取得計測無機氮濃度用的無粒子溶解態水樣。
- (5) 酸鹼度儀：型號 Sentron 1001，利用電極感測，可檢測水中酸鹼度及溫度。
- (6) 溶氧感測器：以丹麥製 Oxyguard 電極連接

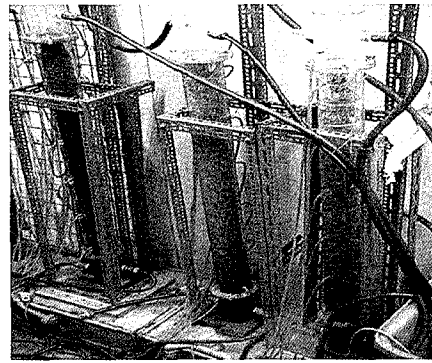


圖 1 透明壓克力管配置圖

電壓資料記錄器，用於水中溶氧直讀。氧氣經薄膜擴散入感測器內與陽極連接的陰極，經化學反應產生一電流(μA)，經電阻 (1000Ω)轉換成電壓值(mV)。

- (7) 濁度計：沉水式 OBS-3 型號，連接電壓資料記錄器，自計水中濁度。以紅外光感測，計測散射光的角度為 $140^{\circ}\sim 165^{\circ}$ ，所測得之散射光強度依一定比例轉換為電流訊號 (mA)，在輸出端加上電阻(100Ω)，以電壓訊號(mV)輸出。OBS-3 濁度計所測得的數值可經檢量線轉換成顆粒濃度值(侯，2001)，因此可用來做顆粒濃度的直讀儀，與濾紙過濾乾燥秤重所得顆粒濃度結果作比對校正。
- (8) 資料記錄器：美製 Campbell 之 CR-10X Data Logger，能接收處理類比輸入濁度、溶氧等信號，並且自動記錄儲存。
- (9) 溶解性無機氮分析儀及藥品：美製 ORBECO-HELLIGE Model 975-MP 分光光度計，可檢測多種水中化學性質，包括總氨氮(Test NO.21，受測波長 490 nm，可測範圍 0~6.8 mg-N/L)、亞硝酸氮(Test NO.24，受測波長 535 nm，可測範圍 0~500 $\mu\text{g-N/L}$)和硝酸氮(Test NO.07，受測波長 565 nm，可測範圍 0~10 mg-N/L)。總氨氮測定原理為納氏比色法 (Nessler's Method；環署檢字第 24890 號(NIEA W416.50A))，使用藥劑 R-418，海水樣本則需另外添加藥劑 RT-111 粉末。

表 1 試驗用濾材物性 (已知資料: 產品規格)

濾材	毛刷	雙星球型	繩狀	米格型	葉片型	風球型	皇冠型
直徑, cm	--	2.54	4.5	2.54	2.54	3.81	5.08
長度, cm	30	--	--	--	--	--	--
比表面積, m ² /m ³	--	274	250	206	210	210	100
理論孔隙比, %	--	91	--	88	94	86	93
充填個數, 個/m ³	--	74000	--	22700	51000	19200	7500
單價	80 元/m	1.1 元/個	37 元/m	1.5 元/個	1.4 元/個	1.5 元/個	1.5 元/個

註: 表內「--」表示無產品規格資料。

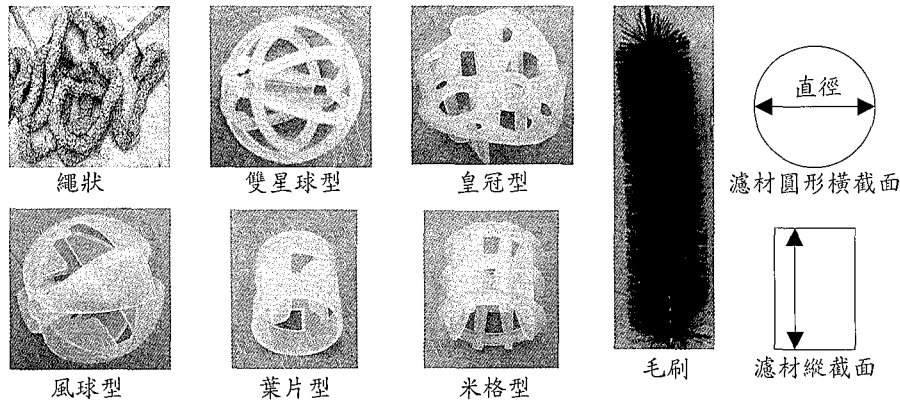


圖 2 試驗用濾材示意圖

3.2 試驗現場

濾材試驗在台灣大學校內進行, 待處理原水儲存槽容積 0.5 噸, 槽內飼養吳郭魚及大肚魚。飼料先在水中靜置多日待其溶解後倒入原水儲存槽中做為待處理的原水, 因此, 待處理原水的主要物質為溶解後的魚飼料溶液及吳郭魚、大肚魚排泄物等物質。配置如圖 3。

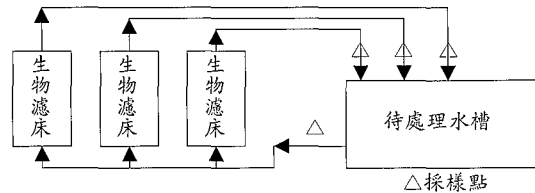


圖 3 濾材試驗配置圖

3.3 濾材試驗方法

(1) 水質環境因子設定:

- 酸鹼度 pH: 養殖池水一般介於 7~8, 因此濾材試驗中的原水 pH 控制在 7.0~7.5 間。
- 溶氧: 出流水溶氧控制在 2 mg/L 以上, 確保生物濾床內溶氧在安全操作濃度以上, 使溶氧不致成為本實驗的限制因子。
- 溫度: 由文獻得知, 溫度是影響硝化作用率較小的環境因子, 因此在本實驗中

為較不受控制的環境因子, 本實驗現場因位在室外, 試驗工作經歷秋冬春季, 因此入流水的溫度約介於 18~27 °C。

- 總氮: 養殖池中的總氮濃度一般屬於低濃度, 且由文獻得知總氮濃度在 2.2 mg/L 以上時, 總氮去除速率將不受入流水濃度影響, 因此本濾材試驗中的原水總氮濃度控制在 2.2~5.0 mg/L 之間。
- (2) 操作參數組合: 試驗中以毛刷為比較基準, 每次以兩種濾材和毛刷做比較, 讓原水同時通過毛刷及此兩種濾材。在 50 % 與

100 %二種不同充填率的設施設計，以及 3、5、10 分鐘等三種不同水力停留時間的操作管理方法下，求得顆粒及總氮氮的去除率。

(3) 採樣：對每一個充填濾材槽體在濾槽的入流及出流口各採集兩個樣本，一個做總氮氮檢測；另一個則做濁度檢測。

(4) 水質分析：

- a. 顆粒濃度：侯(2001)研究得知，OBS-3 濁度計所測得之 mV 值與顆粒濃度呈線性關係，因此，先將各不同濃度樣本經由 OBS-3 求得 mV 值後，再將樣本依環署檢字第 20713 號(NIEA W210.55A)檢測方法，以預先經 250 ml 去離子水過濾、烘乾、秤重後之濾紙(w_1)，將水樣過濾，記錄過濾水樣體積，在 103~105 °C 烘箱乾燥濾紙 2 小時，冷卻後秤重(w_2)，扣除濾紙原乾重，並考慮濾紙二次乾燥平均減重 w_0 僅約濾紙乾重的 0.17 %，可忽略不計(侯，1994)。因此，可得到懸浮顆粒乾重 ($w_3=w_2-w_1$)，再除以水樣體積即可得懸浮性顆粒濃度 (mg/L)。利用所建立的濁度 (mV)與顆粒濃度(mg/L)檢量線，可轉換得每一模組實驗的顆粒濃度(侯，2001)。
- b. 溶解性總氮氮濃度：過濾後水樣 10 ml 注入玻璃樣品槽內，滴加 R-418 試劑 6 滴，加蓋後輕搖，使均勻混合，靜置 15 分鐘等待呈色。如樣本中含有氨態氮，樣品將呈橙黃色。分光光度計選擇氨態氮檢測模式並調整至正確波長，先讀取空白樣本吸光值，再放入受測樣本，兩吸光值之差值即可換算成水樣中的氨態氮濃度，以 mg-N/L 單位輸出。如為海水樣本時則需在加入 R-418 試劑前加入 RT-111 粉末一匙，以去除鹽類干擾。若樣本之濃度超過儀器可測範圍，則先以試藥級無氨水加以稀釋。

(5) 資料分析：

測得各種濾材對顆粒及總氮氮去除率後，可比較各濾材對此兩種物質的去除率，及其與濾材

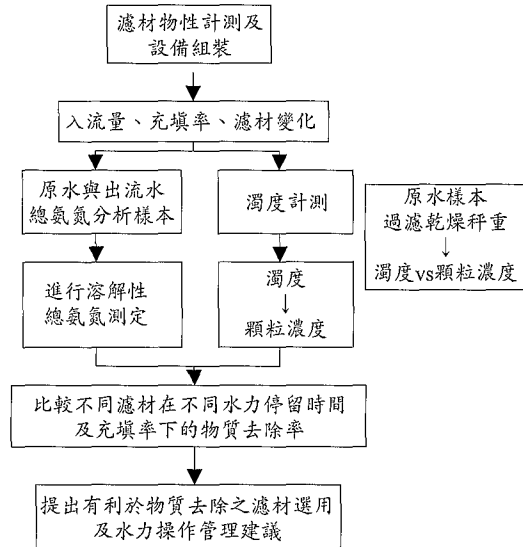


圖 4 濾材試驗流程圖

物理性質、水力停留時間、充填率、充填成本的關係，以提出有利濾材選用及操作管理的建議。本研究的濾材試驗流程圖示於圖 4。

四、結果與討論

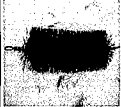


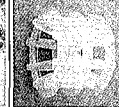



4.1 濾材物性特徵

本研究選用五種美國製塑膠顆粒、一種日製繩狀濾材及一種本土製毛刷濾材，其產品規格、實際充填狀況與所構成的物性特徵整理於表 2。

表 2 內濾材各性質的物理意義及計測方法說明如下。

- (1) 濾材直徑及長度：直徑為濾材圓形橫截面長，長度為濾材縱截面長。塑膠及繩狀濾材直徑由產品規格資料提供，毛刷直徑則用尺量測。
- (2) 比表面積：除毛刷為實測外，其餘濾材的比表面積均由產品規格資料提供。毛刷的比表面積計測方法為以每根毛刷的刷毛數乘以每根刷毛表面積，再除以毛刷材料所構成的體積，即， $(\pi d h) \times (n) \div (\pi R^2 H)$ 。其中， d 為刷毛直徑 (cm)， R 為毛刷直徑 (cm)， h 為刷毛長度 (cm)， H 為毛刷長度 (cm)， n 為刷毛數。本毛刷產品的 $d = 0.075$, $h = 12$, $n = 2260$, $R = 6$, $H = 30$ 。

表 2 濾材物性及成本

濾材		毛刷	雙星球型	繩狀	米格型	葉片型	風球型	皇冠型
圖示								
材質		塑膠	塑膠	合成纖維	塑膠	塑膠	塑膠	塑膠
產品規格	表面性質	粗糙	粗糙	粗糙	粗糙	光滑	光滑	粗糙
	長度, cm	30	2.54 *	120 *	3.5 *	2.54 *	3.81 *	4.75 *
	直徑, cm	12 *	2.54	4.5	2.54	2.54	3.81	5.08
	比表面積, m ² /m ³	188 *	274	250	206	210	210	100
	孔隙比, %	--	91	--	88	94	86	93
	單價	80 元/m	1.1 元/個	37 元/m	1.5 元/個	1.4 元/個	1.5 元/個	1.5 元/個
濾床內充填狀況	充填個數	4 條	528 個	5 條	197 個	425 個	155 個	59 個
	孔隙比, %	96	93	94	89	95	88	94
	有效表面積, m ²	2.560	1.965	2.386	1.787	1.750	1.695	0.787
	充填成本, 元	96	581	222	296	595	233	89

註：1. 濾床體積 9.424 公升，高 1.2 公尺，直徑 10 公分

註：2. 「*」為本研究實測值

- (3) 理論孔隙比：由產品規格資料提供。
- (4) 實際孔隙比：毛刷及繩狀濾材的實際孔隙比計測方法為在濾槽充填滿濾材後，量測可倒入水量以充滿整個濾槽，所得的水體積即是濾槽內的全孔隙體積，再除以空濾槽的體積，即得知其實際孔隙比。其它塑膠濾材則由產品規格資料的理論充填個數，及濾床內實際充填個數等，換算出實際孔隙比。
- (5) 有效表面積：濾床體積乘以濾床內濾材實際充填個數，除以理論充填個數，再乘以各濾材的比表面積。

4.2 顆粒去除效率

在顆粒的去除試驗中，採用以毛刷結果為比較基準，每次以兩種濾材和毛刷做比較，讓原水同時通過毛刷及此兩種濾材，結果以各濾材相對於毛刷的顆粒去除效率比表示。在水力停留時間為 30 分鐘，入流水顆粒濃度介於 23.4 ± 3.5 mg/L 時，毛刷的顆粒濃度去除效率為 42.3 ± 2.3 %。在水力停留時間為 60 分鐘，入流水顆粒濃度為 22.8 ± 0.3 mg/L 時，毛刷的顆粒去除效率為 40 %。以

上結果得知，顆粒去除效率與水力停留時間的關係不大，此結果是由於入流水的顆粒主要都是未完全溶解的飼料，在濾槽內的去除主要是靠濾材對顆粒的攔截而非沉澱。在顆粒濃度為 4.23~9.15 mg/L 的低濃度，毛刷在水力停留時間 30 分鐘的處理效率為 30 %，10 分鐘的處理效率為 35.2 %，遠低於侯(1988)利用無煙煤及矽砂作為濾材，在濾出水量 169 m³/m²/day 的情況下處理鰻魚池中懸浮固形物得到 80 % 以上去除率，但與侯(1996)整理國內外提及對丹麥式滾筒機械設備的 30 % 顆粒去除效率，彰化一地實測的 33 % 去除率接近。在 3 分鐘時卻低至 10 % 以下，與侯(1999)指出利用網目 60~80 μm，水力停留時間 0.5 秒的滾筒機械式過濾機處理鰻魚池中懸浮固形物所得到的 7.1 % 處理效率接近。因此，水流速高達 24 m/h，水力停留時間為 3 分鐘以上時，對顆粒的攔截效果會明顯的降低。由以上結果，可得知操作條件的上限管理。

在七種濾材中，以毛刷的去除效果最好，其次是日製繩狀濾材及雙星球型，各濾材與毛刷的相對處理效率如表 3 所示。結果得知，有效表面積愈大者，可攔截顆粒的面積愈大，去除效率大

表 3 各濾材與毛刷之相對顆粒去除效率

濾材	毛刷	繩狀	雙星球型	風球型	葉片型	皇冠型	米格型
有效表面積比, %	100	93	76	66	68	31	70
相對去除率, %	100	91.5± 2.3	83.1± 1.5	74.0± 5.0	68.5± 4.7	60.5± 5.2	52.5± 4.0

表 4 各濾材物理性質與總氨氮處理速率

濾材	毛刷	雙星球型	繩狀	米格型	葉片型	風球型	皇冠型
表面性質	粗糙	粗糙	粗糙	粗糙	光滑	光滑	粗糙
比表面積 m^2/m^3	188	274	250	206	210	210	100
濾材有效表面積 m^2	2.56	1.956	2.386	1.788	1.750	1.695	0.787
與毛刷有效表面積比, %	100	76	93	70	68	66	31
與毛刷去氨速率比, %	100	86.8±8.5	81.1±2.3	74.1±2.5	68.9±6.1	68.8±1.9	59.0±8.3
濾材單位表面積處理速率 $g/m^2/day$	1.47± 0.004	1.64± 0.106	1.29± 0.039	1.42± 0.028	1.38± 0.057	1.44± 0.085	2.55± 0.156
濾槽內表面處理速率(無濾材) $g/m^2/day$	0.96±0.063						

註：水力停留時間為 3 分鐘

致愈高。但米格型卻例外，原因為其外型主要由長條型塑膠構成，缺少大面積的曲型表面，較難截留顆粒，或截留後又被水流帶走。且米格型濾材因體積的關係，充填後濾材與濾材間留下的大孔隙較多，顆粒可能未經阻擋就由這些孔隙流過濾床。毛刷與雙星球型外型雖同樣是由條狀塑膠構成，但充填後濾材與濾材間的孔隙小，有些孔隙甚至被生物膜填滿，因此顆粒去除效率較高。相對於前三種濾材，皇冠型濾材有效表面積雖然比較小，但因具有較大面積的不規則曲型表面，因此顆粒被阻擋後較易截留，或截留後較不易又被水流帶走。

4.3 總氨氮去除速率

(1) 濾材物性對總氨氮去除速率影響：

影響濾材總氨氮去除效率的物理性質包括比表面積和濾材的粗糙度。前者主要影響濾床內可供微生物聚集及附著的表面積，稱為有效表面積，一般而言比表面積較大的濾材充填後所得的有效表面積較大。後者則主要影響微生物及基質在濾材表面的截留，當微生物隨著液體流動而接近濾材表面時，表面粗糙度較大的濾材，較易將微生物及基質截留。本研究的各濾材有效表面積

與處理速率的關係如表 4 所示，其中有效表面積較高的濾材具有較高的單位體積處理速率。毛刷的比表面積雖然不是最大，但因為毛刷的刷毛可任意壓縮扭曲，可充填在濾槽內的數量較多，因此在濾槽中的有效表面積比較大。比表面積在 188~274 m^2/m^3 的六種濾材，在濾槽內的單位面積總氨氮去除速率約為 1.29~1.64 $g/m^2/day$ ，與 Boller (1994) 利用比表面積 200 及 400 m^2/m^3 的塑膠濾材進行實驗所得到的 1.30~1.65 $g/m^2/day$ 頗為接近，而比 Nijhof (1990) 利用比表面積 200 m^2/m^3 的塑膠濾材所得到的 0.69 $g/m^2/day$ 結果高。本研究所選定的葉片型與風球型兩種濾材表面性質較光滑者，在第一次實驗中經過 30 天後處理效果仍未能顯現出來，且濾材表面仍保持原有的白色，沒有生物膜附著的現象。在第二次實驗中，將時間延長到 45 天後開始測試，總氨氮的去除效果方才顯現，且濾材表面附著黃褐色黏膜狀生物膜。因此，表面光滑的濾材較難截留微生物細胞，生物膜的長成需要較長的時間。

(2) 水力操作對總氨氮去除速率影響：

水力操作管理指入流水的流速及水力停留時間管理。提高水流速可使生物膜表面的液膜不

表 5 水力操作對總氮去除速率的影響

水力因子		水質因子	處理速率 g/m ³ /day		
水流速 m ³ /m ² /hr	水力停留時間, min	出流水溶氧 ppm	毛刷	雙星球型	繩狀
7.2	10	<0.5	246.2	230.3	226.0
14.4	5	>2	400.3	341.3	334.1
24	3	>2	438.7	347.0	345.6

表 6 濾槽內濾材充填率對總氮去除速率之影響

濾材		毛刷	雙星球型	米格型	葉片型	風球型	皇冠型
水力停留時間, min	充填率%	處理速率, g/m ³ /day					
3	50	236.8	224.2	169.4	158.4	177.6	153.6
	100	438.7	347.0	315.8	310.1	275.5	232.8
5	50	234.2	--	--	--	--	--
	100	400.3	--	--	--	--	--
濾材充填減半, 總氮速率減低 %		50.4	39.8	52.8	55.8	41.3	40.7

註：(1) 濾床高 1.2 公尺，直徑 10 公分，提供之有效表面積為 0.38 m²。

(2) 在無充填濾材的情況下，濾槽之單位體積處理速率為 38.4±2.53 g/m³/day。

致太厚，而液膜愈薄物質的傳輸愈快，總氮氮的去除速率也就愈高。由表 5 可知，在不同水流速操作下，水流速愈快，總氮氮的去除速率愈高，但除非原有水流速不能提供足夠溶氧，否則水流速增加對總氮氮的去除效果的提升並不顯著。以表 5 所列的三種濾材為例，水流速在 7.2 m³/m²/hr 的情況下，溶氧成為限制因子而使總氮氮去除速率偏低，因此當水流速增加到 14.4 m³/m²/hr 時，總氮氮去除速率大幅度提高至 1.5~1.6 倍；當出流水溶氧保持在 2 mg/L 以上時，水流速從 14.4 增加至 24 m³/m²/hr，總氮氮去除速率卻僅約增加 1.7~9.5 %。除了毛刷外，所增加的速率並不如 Peladan (1996) 及陳 (1986) 的研究所示的水流速增加一倍速率提高到 1.18 及 1.5~1.9 倍那麼顯著。而本研究所得結果，在水流速 24 m³/m²/hr 所得到的去除速率 345.6~438.7 g/m³/day，亦比 Peladan (1996) 所得到的 1800~2280 g/m³/day 來得低。水流速操作在 7.2 m³/m²/hr 時的總氮氮去除速率 226.0~246.2 g/m³/day 則與陳 (1986) 在水流速 8.33 m³/m²/hr 的操作情況下所得到的 250 g/m³/day 的處理速率結果相近。因此，水流速維持在足以供應濾槽內溶氧的狀況便足夠了。至於水力停留時間設計，Peladan (1996) 提出水力停

留時間不應短於 2 分鐘，本研究結果為水力停留時間在 3 至 5 分鐘可得較佳去除速率結果。

(3) 濾材充填率對總氮氮去除速率影響：

在濾材填滿整個濾槽時，濾材與濾材間的緊密接合將使濾材的有效表面積減小；而在充填率減少的情況下，水流向上流動使得濾材各自分開，床體膨脹，可使濾材與水流接觸的有效表面積增加。本研究中比較各濾材在 50 % 及 100 % 充填率的總氮氮去除速率，結果如表 6 所示。得知在濾材減少 50 %，總氮氮去除速率減少約 39.8~55.8 %，平均約減少 46.8 %。由此可知，改變濾材充填率對濾材單位體積的總氮氮去除速率影響並不大。因此，欲達到相同的速率，確實填滿整個濾槽可以減少所需要的濾槽體積。

(4) 濾材反沖洗對總氮氮處理速率影響

如圖 6 至圖 8 所示，濾槽內在無反沖洗的情況下，總氮氮的處理速率會隨著時間而降低，但自第 4 天起總氮氮處理速率卻有保持穩定的趨勢。雖然濾材表面的生物膜因增厚影響基質傳輸，使得總氮氮處理速率減低，但是生長在濾材表面之間的生物膜，卻可略為抵消生物膜因為增厚而減低的處理速率。雖然如此，反沖洗還是有其必要性，尤其是當濾槽內累積過多的顆粒性氮

表 7 總氮處理速率與充填成本

濾材	單位體積處理速率 g/m ³ /day	相同處理速率所需 之體積比	充填成本 元	單位體積單位充填成本處理速率 mg/元/m ³ /day
毛刷	438.7	1	96	43.1
雙星球型	347.0	1.26	581	5.6
繩狀	345.6	1.27	222	14.7
米格型	315.8	1.39	296	10.1
葉片型	310.1	1.41	595	4.9
風球型	275.5	1.59	233	11.1
皇冠型	232.8	1.88	89	24.7

註：水力停留時間 3 分鐘之處理狀況

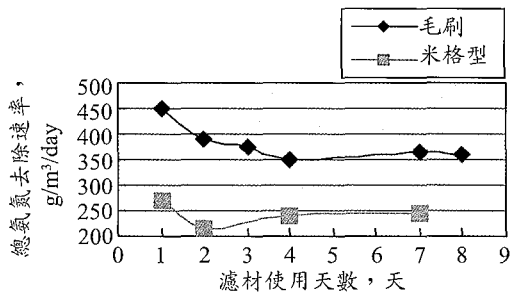


圖 6 濾材無反沖洗狀況下總氮處理速率變化情形



圖 7 毛刷起始狀態



圖 8 毛刷一星期無反沖洗狀態

化合物，將增加濾槽內微生物的負荷，必需加以清除。反沖洗次數需視處理的水質而定，以本試驗中的無反沖洗狀況實驗而言，處理的水質顆粒濃度都在 10 mg/L 以下，一星期沒有反沖洗仍不致造成濾槽的阻塞，且原水中的氮化合物主要以液態為主，不致使濾床的固體性負荷量快速增加，因此即使經過 7 天不反沖洗，對處理速率的降低影響仍然有限。因此，以循環水方式養殖水產生物的系統，如能保持處理後池水中的顆粒濃度在上述處理限度之內，將可有效減低反沖洗所需增加操作的管理人力。

(5) 單位充填成本之總氮去除速率

在本研究中，單位體積處理速率最高的濾材為毛刷、雙星球型及繩狀等三種，而充填成本最低的濾材則是皇冠型及毛刷。因此，可將充填成本與單位體積處理速率同時考慮，以單位體積內單位充填成本的處理速率(mg/元/m³/day)表示，即，每單位體積的濾床內每 1 元的充填成本每天所能處理的總氮量。如表 7 所示，單位體積內單位充填成本處理速率最高的濾材為毛刷，其次是皇冠型。雙星球型的單位體積處理速率雖然高居第二，但在考慮到每單位充填成本所能處理的速率時卻排名倒數第二。因此在做濾材選擇時，應同時考慮濾材的充填成本、處理速率及處理槽所需體積、土地面積及費用。在土地使用面積不受限制的情況下，可考慮選擇單位體積內單位充填成本處理速率最高的濾材。綜合上述，明確得知本土產毛刷為一適用的生物濾材，且明確得知其單位去除能力資料。

五、結論與建議

5.1 濾材物性與選用

- (1) 本實驗證明濾材的比表面積、表面粗糙度等物理性質與總氮氮的去除速率之間有明顯的相關性。比表面積愈高，充填後的有效表面積愈高，其處理速率也愈高。表面粗糙度則影響生物膜的附著與形成，在本實驗中，表面光滑的濾材形成生物膜所需的時間較表面粗糙的濾材多 15 天左右。
- (2) 濾材具有較大曲型表面及表面積大者對顆粒的處理效果較佳。在七種濾材的顆粒去除效率比較中，以毛刷、繩狀及雙星球型三種濾材的處理效率最高，繩狀及雙星球型的處理效率分別為毛刷的 91 % 及 83 %。
- (3) 水力停留時間與濾材對顆粒的截留關係不大。在水力停留時間為 30 及 60 分鐘處理效率相近，可選擇水力停留時間較短的 30 分鐘，可以有效減少濾槽體積。
- (4) 在七種濾材的總氮氮去除速率比較中，以毛刷、雙星球型及繩狀三種濾材單位體積處理速率最高，在水力停留時間為 3 分鐘時，處理速率分別為 438.7、347.0 及 345.6 $\text{g}/\text{m}^3/\text{day}$ 。此三種濾材的共同點是在單位體積內所具有的有效表面積都較其它幾種濾材高，理論上濾材的比表面積愈高，充填後的有效表面積也愈高，因此在做濾材的選擇時可用濾材的比表面積做為預估其處理效率的指標之一。
- (5) 在溶氧充足下，待處理水流經濾槽的流速 ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{hr}$) 的增加對總氮氮的去除效果只略為提升。因此，水流速只要操作在能夠提供濾槽所需的氧氣就足夠了。
- (6) 在濾材充填率對總氮氮去除速率影響實驗中，充填濾材減少一半，總氮氮去除速率減少 46.8 %。因此，在 50 % 及 100 % 兩種充填率下，以充填率愈接近 100 % 較節省使用空間。
- (7) 在本實驗濾材的充填成本中，以皇冠型最低，其次是毛刷。單位體積內單位濾材成

本處理速率 ($\text{mg}/\text{元}/\text{m}^3/\text{day}$) 則以毛刷最高，其次是皇冠型，分別是 43.1 及 24.7 $\text{mg}/\text{元}/\text{m}^3/\text{day}$ 。即，每立方公尺的濾床中毛刷濾材每 1 塊錢的充填成本每天所能處理的總氮氮量 43.1 mg ，皇冠型為 24.7 mg 。因此，在選擇濾材時，在土地使用面積不受限制下，應優先選擇單位體積單位成本處理效率較高的濾材。而在土地使用面積受限制下，受限於濾槽體積，考慮到處理後的水質需達到某一標準，則需選擇單位體積處理效率較高的濾材。

- (8) 在不另外提供曝氣的濾槽，為了提供濾槽內足夠的溶氧處理氮化合物，水流速往往需維持在某一速度，然而水流速快到某一限度，顆粒的處理效率勢必受到影響，可考慮在濾槽某一階段增設曝氣設備，則可因溶氧不必完全由進流水提供，水流速可以減低，顆粒去除效率得以提高。
- (9) 在理想狀況下，顆粒和總氮氮應分開處理，可確保顆粒和總氮氮的處理可以操作在各自最適宜的參數下，也可避免顆粒附著在濾材上，減少可供微生物附著的表面積，導致效率減低及所需反沖洗次數增加。因此在設計養殖廢水處理系統時，應儘量作上述考慮。
- (10) 就顆粒及氮化合物去除速率與充填成本而言，毛刷為一適用生物濾材，且可重覆使用，而不定期洗淨過程對處理效果影響很大，在使用操作時有必要注意。

5.2 濾材選用建議

- (1) 濾材的選擇應同時考慮到濾材的充填成本、處理效率及處理槽所需體積與所需土地面積及費用。在處理效率方面，可以濾材的物理性質，包括比表面積、粗糙度等來做初步評估。比表面積高，表面粗糙度大的濾材優先考量。其次比較濾材的充填成本，評估濾材的單位體積單位充填成本的處理效率 ($\text{mg}/\text{元}/\text{m}^3/\text{day}$)，配合可使用土地面積，做出最佳的選擇。



- (2) 濾床 50 %及 100 %充填率對總氮處理速率影響並不大，可考慮充填最大密度，以節省處理槽所需體積。
- (3) 處理總氮所需的濾材數量可以濾材單位表面積的處理速率決定，以毛刷為例，在溶氧及總氮供應充足且環境適宜的情況下，單位表面積處理速率為 $1.47\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ ，設每日需處理 500 g 的總氮，則所需的毛刷表面積為 340 m^2 ，以每支長度 30 cm 的毛刷具有 0.64 m^2 的表面積估算，所需毛刷量為 532 支。

參考文獻

1. 行政院環保署環境檢驗所，1992，水質檢測方法彙編，行政院環保署環境檢驗所，366 頁。
2. 林天生，彭弘光，1995，養殖用水循環利用技術資料輯，農委會漁業特刊，51: 25-55。
3. 林天生，彭弘光，1996，不同循環過濾方式在歐洲鰻養殖之效益，農委會漁業特刊第 58 號：1~13。
4. 侯文祥，1988，無閥式自動反沖洗重力過濾設備應用於鰻魚池循環水再利用系統之研究，中國農業工程學報，34 (4)：77~91。
5. 侯文祥，1994，循環式養鰻系統水環境管理與污濁固形物通量之關係，中國農業工程學報，40 (1)：55~63。
6. 侯文祥，1996，循環用水系統之評估與推廣－養殖用水(一)，國立台灣大學水工試驗所研究報告，113 頁。
7. 侯文祥，1999，鰻池四種去除固形物設備效率評估及設計，中國水產月刊，555: 45~58。
8. 侯棋麟，2001，以濁度計量化立體式九孔養殖固形物濃度之研究，國立台灣大學農工所碩士論文。
9. 陳瑤湖，2000，循環水養殖系統之介紹，循環水養殖技術推廣訓練講習教材，農委會編印，5~13 頁。
10. 陳獻等，1994，養殖用水物理過濾機之應用，農工中心研究報告。
11. 陳獻等，1995，養殖池水循環過濾機初步研發，農工中心研究成果報告。
12. 張維均，1998，養殖生態環境之特徵－九孔立體養殖池之物質收支，國立台灣大學農工所碩士論文。
13. 曾國鋒，2000，硝化生物濾床原理，循環水養殖技術推廣訓練講習教材，農委會編印，67~85 頁。
14. Boller M., W. Gujer and M. Tschui, 1994, Parameters affecting nitrifying biofilm reactors, *Wat. Sci. Tech.*, 29(10~11): 1-11.
15. Choi Euiso, Daewhan Rhu, Zuwhan Yun and Euisin Lee, 1998, Temperature effects on biological nutrient removal system with weak municipal wastewater, *Wat. Sci. Tech.* 37(9) : 219-226.
16. Lazarova V., R. Nogueira, J. Manem and L. Melo, 1998, influence of Dissolved Oxygen on nitrification kinetics in circulating bed reactor”, *Wat. Sci. Tech.*, 37(4~5): 189-193.
17. Lekang O. I., Helge Kleppe, 2000, Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media, *Agricultural Engineering*, 21: 181-199.
18. Nijhof M. and Bovendeur, 1990, Fixed film nitrification characteristics in sea-water recirculation fish culture systems, *Aquaculture*, 87: 133-143.
19. Key. R. W., O. E. Albertson, 1989, Evidence for oxygen-limiting conditions during tertiary fixed-film nitrification, *Lournal WPCF*, 61(4): 510-519.
20. Peladan J. G., H. Lemmel and R. Pujol, 1996, High nitrification rate with upflow biofiltration, *Wat. Sci. Tech.* 34(1-2): 347-353.
21. Polanco F. F., S. Villaverde and P. A. Garcia, 1994, Temperature effect on nitrifying bacteria activity in biofilters: activation and free ammonia inhibition, *Wat. Sci. Tech.* 30(11): 121-130.

22. Reddy M., 1998, Biological and chemical systems for nutrient removal, Water Environment Federation, 59-74.
23. Ridha M. T., E. M. Cruz, 2001, Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile Tilapia *Oreochromis Niloticus* L. reared in a simple recirculating system, *Aquacultural Engineering*, 24: 157-166.
24. Rosa M. F., Angela A. L. Furtado, Ricardo T. Albuquerque, Selma G.F. Leite & Ricardo A. Medronho, 1998, Biofilm development and ammonia removal in the nitrification of a saline wastewater, *Bioresource Technology*, 65: 135-138.
25. Sastry B. N., Aurelio A. DeLosReyes Jr., Kelly A. Rusch, Ronald F. Malone, 1999, Nitrification performance of a bubble-washed bead filter for combined solids removal and biological filtration in recirculating aquaculture system, *Aquacultural Engineering*, 19: 105-117.
26. Shammass N. Kh., 1986, Interactions of temperature, pH, and biomass on the nitrification process, *Journal WPCF*, 58(1): 52-59.
27. Thörn Marina, Ann Mattsson and Fred Sörensson, 1996, Biofilm development in a nitrifying trickling filter, *Wat. Sci. Tech.* 34(1-2): 83-89.
28. Villaverde S., P. A. Emcina, and Fdz. Polanco, 1997, Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters, *Wat. Res.* 31(5): 1180-1186.
29. Zhu SongMing, Shulin Chen, 2002, The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters, *Aquacultural Engineering*, 26: 221~237.
30. 佐野和生, 1987, 水産養殖と水第II集—水の有効利用技術から沿岸環境の改善まで, サイエンティスト社, 253頁。

收稿日期：民國 93 年 3 月 9 日

修正日期：民國 93 年 4 月 14 日

接受日期：民國 93 年 4 月 20 日