

養殖水耕系統維運的關鍵因素

溫鈺涓、黃德威、楊順德

水產試驗所淡水繁養殖研究中心

前言

以往的農業耕種方式為求增加產量，過度施用化學肥料，造成氮磷不當使用，對土壤環境產生不利的影響；類似的環境問題也存在於集約式循環水養殖，為使系統維持正常的運作，每天多以 5—10% 的循環水量來換水，維持養殖池水質。然而，養殖排放水含有高濃度的含氮物，直接排放不僅對環境生態造成衝擊，經常換水也會損耗大量水資源。養殖水耕系統為結合魚類養殖和植物水耕的複合農業系統，主要由魚、植物、硝化菌三相所組成，植物和魚類皆屬於經濟作物，硝化細菌則扮演著重要的生物過濾角色，能將有害魚體的氮轉換成硝酸鹽，而硝酸鹽則為植物最重要的營養成分；亦即，系統透過自然的生物循環來提供物植物營養，大幅提升資源再生使用，從而提高系統之經濟效益。從另一面來看，養殖水耕系統發展的關鍵因素就在於如何維持水體系統環境之平衡，達到系統中三種生物的最佳增長並提高生產量，及如何減低甚至充分利用排放的有機廢物。

系統環境

在水體中，氮氮主要來源為魚隻的排泄物及飼料殘餌，以分子氮 (NH_3) 或離子銨 (NH_4^+) 兩種形式存在，統稱為總氮氮。尤其是在高密度的養殖情況下，魚隻的排泄物和殘餌增多，這種情形易讓水質變得更糟，而 NH_3 濃度是影響魚類健康最重要的水質因素之一， NH_3 和 NH_4^+ 所佔之比例與水溫和 pH 值有很大的關聯性，在 28°C 時 pH 值每增加 1.0，則 NH_3 所佔的百分比會增加近 10 倍，例如 pH 為 6.5、7.5 及 8.5 時，化學平衡式中 NH_3 的比例分別為 0.2、2 及 18%。所以，當系統氮氮濃度持續高於 2 ppm 時，應設法降低 pH 值以使水體的 NH_3 濃度減少，並停止餵食及開始換水，務使水中氮氮恢復到安全範圍，從而減低對魚隻的威脅。此外，由於水中的高氮氮 (> 2 ppm) 和低溶氧 (< 3 ppm) 是造成魚隻死亡最常見的因素，故除了定期監測水中氮氮及 pH 之外，還應定期進行溶氧量測。

硝化作用指的是利用硝化菌將水中氮氮轉化的過程，硝酸鹽是硝化作用最終產物，

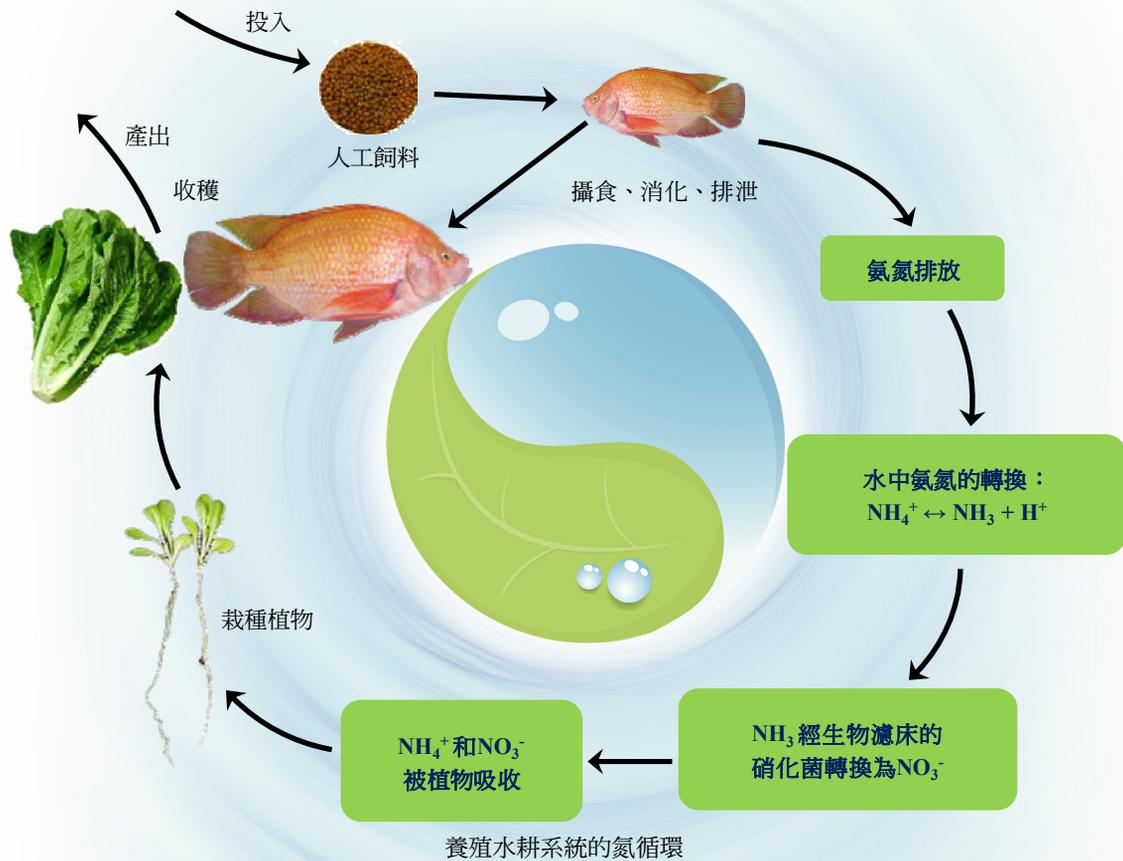
雖然硝酸鹽對魚類的毒性不高，研究顯示，魚隻長時間暴露於 200 mg/L 硝酸鹽環境中，會降低魚類的免疫反應，而硝酸鹽濃度太高也會使植體生長過旺和累積過多硝酸鹽。硝化菌是好氧菌，最佳的生長條件為溫度在 25–30°C、pH 值在 7.5–8.0 之間，而 pH 值在 6.0 以下，硝化菌活性顯著降低，pH 值在 5.0 以下則硝化作用幾乎不存在。

生物濾床是硝化菌附著滋生的地方，能將氨氮先轉換為亞硝酸鹽後再轉換為硝酸鹽，故增加過濾系統的表面積，使硝化菌的附著面積加大，進而增生硝化菌數量，藉此提高硝化作用效率。此外，水體滯留的時間越長，生物濾床的處理效率則越高，系統的水流速過快也將影響植物的生長。生物過濾作用可在系統中的任何地方進行，包括養殖池壁、管道的內部表面甚至是植物根部，均能讓循環水體與硝化菌附著的表面接觸。系統常用的生物濾床有兩種主要類型：固定膜（附著生長）和懸浮生長，固定膜生物濾床可分為沉浸式過濾法、旋轉生物盤法、流化床及滴濾法等。滴濾式生物濾床不但可增加水中的溶氧量、培養大量的硝化菌，也能使硝化菌有充足時間分解氨氮，介質耕式的養殖水耕系統在植栽床鋪設發泡煉石、火山岩、陶粒或砂石等無機物栽培介質，本身就是一個很好的生物濾床。再者，生物濾床的大小應取決於系統中的氨氮量來計算，這又與養殖動物對飼料的消化速率和吸收效率有密切相關。

為達到養殖水耕系統的最大生產量，必須依據所選擇的魚種和植物，找出其最適合之溫度和 pH 值來飼養與栽種。通常，系統

的硝化菌在 pH 7.5–9.0 之間活性最佳，也就是硝化作用在中性或鹼性環境比在酸性環境更能進行反應，因為 pH 值升高時會促進硝化酵素的活性，加速將有毒性的氨 (NH_3) 轉換成硝酸鹽 (NO_3^-)。然而，植物卻是在弱酸性環境才能最有效利用水中的營養元素，如果養殖水耕系統的 pH 值太高，鐵、錳、磷、鈣及鎂等元素容易沉澱而無法利用，造成植物營養缺乏的情形出現，例如高 pH 值導致磷缺乏而使番茄生產量降低。因此，一般建議養殖水耕系統的 pH 值儘量維持在 6.5 和 7.5 之間，如果影響到作物的營養吸收，亦可在營養不良的葉面上噴灑營養液來克服此問題。有趣的是，Tyson et al. (2008) 比較養殖水耕系統在不同 pH 值環境下栽種小黃瓜的效果，發現在持續收穫的初期，小黃瓜產量以 pH 5.0 較 pH 8.0 多，但最後的總產量並沒有明顯差別。這或許是雖然系統 pH 值偏高會使一些營養元素溶解度降低，但由於系統能不斷供應植物根部營養，即使其濃度並不高，植物總產量也終能維持。因此，在養殖水耕系統中種植小黃瓜或可將 pH 值維持在硝化作用較適宜的弱鹼環境，至於其他水耕蔬菜作物如番茄和青椒等，有待進一步研究找出其適合生長的養殖水耕條件。

事實上，有許多因素會影響系統水體的 pH 值變動，包括：(1)硝化作用的過程產生氫離子並消耗碳酸根離子，進而降低水體的 pH 值；(2)植物根系吸收硝酸根離子會導致氫氧根離子的分泌，而導致 pH 值上升；(3)額外補充用水時也會影響原先的 pH 值。一般是使用酸性或鹼性的化學物質來調整水中的 pH 值，例如加入氫氧化鈣或氫氧化鉀來



提高 pH 值，而加入硫酸、磷酸、檸檬酸或鹽酸則可降低 pH 值。除了注意施用安全外，任何 pH 值調節劑的使用，會快速造成養殖槽水質的改變，為避免酸鹼度劇烈變化造成魚體的緊迫與傷害，應先將 pH 值調節劑加入單獨較小的水槽，再慢慢加入養殖槽中，如此可將對魚體的影響降至最低。另外，也可以使用石灰石（碳酸鈣）或白雲石（碳酸鈣鎂）讓 pH 值較為緩慢上升。

系統組合

養殖水耕系統比較常見的養殖方式為循

環水養殖系統，至於植栽系統，理論上，幾乎任何類型的植物栽種水耕系統都可以與養殖系統相結合；然而，兩者系統的結合應排除將有害的微生物和藻類引入系統，以免對魚體和植物造成不利的影響。目前應用在養殖水耕系統最常見的植物栽培方式有深水浮筏式、養液薄膜式和介質耕，浮筏式水耕植栽床的水下空間足夠，能讓植物的根系自由地發展，非常適合短周期成長的葉菜類作物如萵苣等；而應用在商業水耕的養液薄膜系統由於植栽空間上的限制，較適合種植根系較小的作物，根系比較大的蔬菜如番茄、小黃瓜、胡椒及薄荷雖可利用此技術種植，但

植栽的凹槽區域必須夠大可容納作物的根系，並且保有讓水流持續流動的空間。另，介質耕植栽床則適合需良好排水的植栽作物，珍珠岩、蛭石、泥炭、鵝卵石及發泡煉石等都可當作植栽床的栽培介質，其支撐力較佳且能讓硝化菌附著，達到過濾分解的效果。

魚種和植物的選擇

魚種和植物的選擇必須具有經濟實用價值、符合友善環境及合法性等各項考量。例如吳郭魚是最常見的養殖物種，因其具有適應水質條件較廣，對環境的耐受力佳，且具有良好的飼料效率，在溫暖條件下能快速增長，適合與夏季的蔬菜作物如番茄、辣椒或小黃瓜一起種植。但吳郭魚對低溫抵抗力差，10°C以下會造成凍傷或死亡，在水溫低於15°C時要減少投餌量甚或停止餵食。除此之外，其他適合養殖水耕的魚種如鯰魚、錦鯉、觀賞魚或鱸魚等，甚或其他對水質要求較為嚴格而單價較高的魚種亦可為養殖對象；另，淡水長臂大蝦等甲殼類也可放養在養殖水耕系統，但甲殼類在養殖過程會有脫殼成長的現象，在蛻殼後新殼尚未恢復硬度前，須提供適當的躲藏空間避免遭受攻擊。

在植物選擇部分，為提升系統整體效益，普遍種植經濟價值較高的蔬菜作物如番茄、小黃瓜、辣椒、萵苣及香草等植物，雖然所有植物都可以用水耕栽種，但是仍須依各類植物的特性來選擇適合的栽種方式，以增加產量及產值。例如適合在乾燥、排水良好的環境中培育的植物應以介質耕的方式來

栽種，如玉米、火龍果及百香果等。而大多數的葉菜類植物如萵苣、小白菜等則喜歡生長在較濕潤的環境，則適合以浮筏式栽培系統來栽種。蔬果類作物如小黃瓜、番茄在成長過程中需要充裕的水分，每株植物每天需要高達2.3 L的水，對水的需求比萵苣來的多，更適合在養殖水耕系統栽種。另外，為維持系統良好的水質條件，養殖系統應設置沉澱槽以過濾固形物，避免其附著在植物根部影響營養吸收，特別是高密度養殖時更應防止此類情形發生。

結語

養殖水耕的運作需先瞭解養殖系統、微生物相和植栽系統的異同，才能順利整合成一個可持續生產的複合式農作系統，其關鍵的管理條件即是養殖動物、生物過濾和植栽作物。養殖動物的消化排泄物經生物過濾產生植物所需的營養，透過植物的吸收而達到水質淨化和循環利用的效果，養殖水耕系統因而接近零排放和零換水，可達到省水、省肥及友善環境等目的。因此，建立適合動物、植物和硝化菌三者的生長環境是系統長期維運的要因，養殖動物是系統營養流向的源頭，而植栽作物雖然扮演著吸收者的重要角色，硝化作用對於維持水質並將對動物有害的氨轉化為硝酸鹽也極為重要。在維持養殖動物正常生成長和植物產量不降低前提下，如何維持系統環境中動物、植物、硝化菌三種生物的平衡，尤以不同養殖動物和季節性植栽作物的搭配組合，是需要持續探討和建立模式的重要課題。