

零換水養殖模式下的生物膠羽 (bioflocs) 技術

楊明樺、鄭金華

水產試驗所東港生技研究中心

前言

根據 FAO 2007 年的資料，全球水產養殖產量自 1970 年以來，每年以 8.9—9.1% 的速度成長，高於海洋捕撈業的 1.2% 與陸地畜產業的 2.8%。儘管水產養殖產量在過去 50 年成長了 40 倍，為了因應世界人口不斷倍增以及對水產品的喜好與需求，在未來 50 年，水產養殖的產量仍太少須增加 5 倍 (Avnimelech, 2009)。然而面對近幾年來，土地與自然資源逐漸短缺，養殖生物疫情蔓延，養殖成本逐漸攀升，以及環保意識不斷高漲的情況下，水產養殖產業要再創高峰並求永續經營，必須跳脫傳統思維，以綜觀的角度思考未來發展方向。

現今養殖產業所遭遇的問題

水產養殖為追求產量提升，勢必增加放養密度，並使用含高量蛋白質的配方飼料，結果首先面臨的是氮氮物質及有機顆粒的累積，為此需配合大量換水的方式來排除水中的有毒廢棄物。然而經由這樣的生產模式所引發的問題有：(1)大量換水意即需要大量抽取淡、海水，勢將面臨淡水資源枯竭並造成

地層嚴重下陷；(2)排放的污水富含營養鹽，易引發環境議題；(3)病原到處流竄，引進的新水可能就是別人排放的廢水，增加養殖風險；(4)蛋白質利用效率不佳，飼料蛋白質約只有 20—25% 最後經由魚蝦被收穫，其餘都在換水過程中流失 (Avnimelech, 2006)；(5)飼養 1 kg 的魚需從海洋捕撈 1—5 kg 的魚，使養殖產業無法永續發展 (Naylor et al., 2000)。為了解決以上問題，近年來以生物安全防疫的原則所發展出的零換水養殖模式逐漸受到重視。

零換水養殖模式下的自營性 / 異營性細菌相

早期從事水產養殖的業者認為養殖池的水越乾淨越好，因此每天大量換水，很難接受在零換水的情況下所形成看起來污濁的水。但近年來，陸續有人發表以零換水養殖成功的案例 (Ray et al., 2010; Samocha, 2009)，顯示零換水養殖不僅可行，而且產量比傳統大量換水者還要高。在零換水模式下，水中有機物與無機氮氮廢棄物逐漸累積，須藉由物理方式控制懸浮顆粒濃度，並藉由附著於懸浮顆粒表面的化合自營性細菌

(chemolithotrophs) 行硝化作用，將有毒的氨氮轉化成毒性較低的硝酸態氮，再利用脫氮菌在缺氧環境下進行脫氮作用，將無機氮化合物徹底從養殖池移除。無機氮化合物的移除方法除了前述的硝化與脫氮作用外，還可提高水中碳/氮比例，利用異營性細菌 (heterotrophs) 的增殖將氨氮固定成為蛋白質 (表 1)。

微生物細胞的主要組成物質為氮與碳，其比例約 1 : 4-5，當水體中碳氮比越高 (10 以上)，即有機碳的含量越多，總氨氮的移除方式越傾向以異營性細菌為主，硝化作用則受到抑制。與化合自營性細菌相較，異營性細菌生長快速，自營性細菌則需長時間建立，並且需要較大面積的附著基質，否則一旦換水或將過多懸浮顆粒移除時，細菌量被稀釋，硝化作用也將停止。兩者都消耗鹼度，異營性細菌須額外供應有機碳。當同樣移除

1 g 的總氨氮時，異營性細菌消耗的溶氧稍高，消耗的鹼度約是自營性細菌的一半，產生較多的二氧化碳，製造的微生物量則是自營性細菌的 40 倍，也就是總懸浮固體量會快速增加，若養殖生物無法即時利用，則須適度排除。Avnimelech (1999) 計算出當添加含碳量 50% 的碳水化合物 20 g 時，可固定 1 g 的總氨氮在細菌體內，添加 200 ppm 葡萄糖，約 5 小時後可使環境中氨態氮由 10 ppm 降到 1 ppm 以下 (Avnimelech, 1999)，在養殖池總氨氮過高時，可以此方法快速又有效的解決，但須防範溶氧不足與 pH 下降的問題。除了額外添加有機碳以外，由於一般飼料含碳量約 50%，而飼料粗蛋白的含氮量約佔 15.5%，如此可計算出含 35% 粗蛋白飼料的 C/N 為 9.2，而含 20% 粗蛋白飼料的 C/N 為 16.1 (Avnimelech, 2009)，飼料中蛋白質的比例越低，則 C/N 越高，異營性細菌越能主動

表 1 自營性與異營性細菌移除氨氮的比較(Ebeling et al., 2006)

	化合自營性細菌	異營性細菌
世代時間	15-20 小時	20 分鐘
需氧量	4.18 g O ₂ /g N	4.71 g O ₂ /g N
二氧化碳產生量	5.85 g CO ₂ /g N	9.65 g CO ₂ /g N
微生物量	0.20 g VSS/g N	8.07 g VSS/g N
碳源	7.05 g Alk/g N	15.17 g carbohydrate/g N ; 3.57 g Alk/g N
能量來源	氧化無機氮化合物	分解有機物
影響因子	氨氮與亞硝酸氮濃度、碳氮比、溶氧、pH、溫度、鹼度、鹽度	氨氮濃度、碳氮比、溶氧、pH、溫度、鹼度、鹽度

VSS: Volatile Suspended Solids; ALK: Alkalinity

吸收游離在水中的氨氮，並將氨氮轉化成微生物性蛋白質供養殖生物利用。

何謂生物膠羽 (bioflocs)

一般細菌大小約 1 μm ，養殖生物無法直接攝食，但當細菌量夠多，族群夠龐大時，細菌間彼此聚集，此聚集物可達到 0.1 到數 mm，其中除了細菌外，也包含藻類、原生動物、浮游生物、輪蟲及以上生物的屍體與有機碎屑等，此類聚集物統稱生物膠羽，其形成與穩定性一方面受有機物表面的多醣體、蛋白質、腐植質等具黏著性物質影響，另一方面則是物質間短程吸引力 (short range attractive force) 與靜電排斥力 (electrostatic repulsive force) 的平衡關係。此外，絲狀生物 (藻類、真菌或細菌) 也可協助連結生物膠羽的組成物質 (Avnimelech, 2009)。生物膠羽質輕且具多孔性，此特性有利於在水體中懸浮，也有利於水流的穿透，異營性細菌附著於膠羽中，一方面容易獲得氧氣與營養源，另一方面可躲避原生動物等天敵的捕食。當生物膠羽的粒徑達 0.1—3 mm 時，許多種類魚蝦即可攝食。

生物膠羽的營養成分

分析施行生物膠羽技術的蝦類養殖場中的懸浮顆粒，其中蛋白質含量介於 34—43%，接近或甚至超出原先投餵的飼料蛋白質含量。脂質介於 0.61—12.5%，變異較大。灰分介於 26.0—30.2%，其中的礦物元素以磷的比例相對較飼料高 (1.44%)。氨基酸的含

量在不同的報告中差異較大 (McIntosh, 2001; Tacon, 2000)。微生物細胞的組成會因環境條件而異，若環境中碳氮比低於 10 時，有利於提高細菌蛋白質含量；碳氮比較高時，有利於提高藻類、細菌與霉菌的脂質含量，以及在細菌體內累積 PHB (poly- β -hydroxybutyrate) (Litchfield, 2000)。添加不同的碳水化合物種類 (葡萄糖、醋酸、甘油或甘油 + 桿菌) 會導致生物膠羽中脂肪酸組成及鏈的長短的差異 (Crab, 2010)。在不同環境下生物膠羽的組成物質也不同，如養殖密度較低的池水藻類較多，而形成較久的生物膠羽則含有較多的原生動物，因此生物膠羽整體的營養成分也有所差異 (Avnimelech, 2009)。除了上述營養成分外，生物膠羽也含有維他命 (Tacon, 2000) 及益生菌 (probiotic)，能提高養殖生物的酵素活性及抑制病菌 (Moss, 2001)。不過儘管生物膠羽含有豐富營養，目前的研究報告均指出生物膠羽仍無法當作養殖生物唯一的營養來源，只能搭配飼料使用或當作飼料成分 (Avnimelech, 2009; Crab et al., 2010)，作為從事水產養殖的輔助工具。

形成生物膠羽的條件

養殖池產生生物膠羽的條件包括：(1) 養殖過程零換水或少量換水，避免異營性細菌流失；(2) 高密度養殖，以產生足量有機物與氨氮供異營性細菌利用；(3) 養殖池充分曝氣與攪拌，避免懸浮顆粒沉澱形成厭氧層，當懸浮顆粒過多時，以中央排污或虹吸方式移除；(4) 養殖池須為水泥池或內襯 HDPE 材質

塑膠布，以利於沉積物排出；(5)使用粗蛋白含量較低的配合飼料 (C/N 較高)，並添加有機碳；(6)異營性細菌來自天然族群，不需另外培養菌種 (Avnimelech, 2003, 2009)。

生物膠羽技術在水產養殖上的應用

生物膠羽技術約在 90 年代中期分別由以色列的 Yoram Avnimelech 與美國的 Steve Hopkins 同時進行研發，而最早應用這項技術從事商業性生產的是貝里斯 (Belize) 的水產養殖有限公司，該公司養殖池面積介於 650 m^2 — 1.6 ha ，平均深度 1.8 m ，全都內置塑膠布，搭配 28 — 60 hp/ha 的水車強力曝氣與攪拌水體，以避免有機物沉澱。白蝦後期幼苗的放養密度為 125 — 140 尾/m^2 ，初期使用的飼料以含粗蛋白 18% 的穀類為主，目的在促使生物膠羽的形成，1 個月後才逐漸提高飼料蛋白質含量，並添加糖蜜作為有機碳源。收成產量介於 1.1 — 1.5 kg/m^2 ，最大產量達 2.7 kg/m^2 (Hargreaves, 2006)。有了貝里斯的成功經驗後，印尼、澳洲與馬來西亞也陸續應用生物膠羽技術從事白蝦的商業生產。在印尼於 0.25 — 0.6 ha 的池塘中以密度 100 — 300 尾/m^2 放養白蝦，應用生物膠羽技術搭配間補 (partial harvest) 策略，得到 1.9 — 4.9 kg/m^2 的產量 (Taw et al., 2008)。此外，生物膠羽技術也應用在室內白蝦超高密度渠道式養殖系統，產量達 9 kg/m^3 以上 (Samocha, 2009)。

生物膠羽技術應用在水產養殖主要有以下三個利基點：

- (一) 水質處理，去除無機氮化合物。養殖池即為水質處理池，不需額外裝設過濾設備，只須以成本低廉的有機碳調整碳氮比，異營性細菌即可吸收固定氮，降低硝酸鹽的累積。
- (二) 形成微生物蛋白質，做為餌料，降低飼料成本。飼料蛋白質中的氮約有 75% 未能在第一時間被養殖生物利用，經由生物膠羽技術可再次被養殖生物吸收，提高飼料效率，增加產量與收益 (Megahed, 2010; Schryver et al., 2008; Taw, 2010)。生物膠羽因含高量蛋白質 (40% 左右)，亦可當作飼料原料，減少魚粉與大豆粉的用量 (Kuhn et al., 2010)。
- (三) 具抑菌效果，增加活存率。生物膠羽中的微生物含有聚合物 PHB，在養殖生物腸內可釋出抗菌物質丁酸 (Schryver et al., 2008)。此外，生物膠羽可降低 *Vibrio harveyi* 的群感效應 (quorum sensing)，達到抗菌效果 (Crab et al., 2010)。

結語

生物膠羽技術應用在高密度零換水養殖模式，除了可達到生物安全防疫，充分利用土地與水資源，還可將有毒氨氮廢棄物轉換利用，成為養殖生物的餌料，或取代部分魚粉成為飼料原料，降低生產成本，增加收益，而且兼顧環境保護與水產養殖的永續發展，相較於目前採用的大量換水或循環水的養殖模式所引發的諸多問題，應有導正之效，值得繼續研發與應用。