

# 生物絮技術在水產養殖的應用

陳瑤湖

國立臺灣海洋大學水產養殖學系

## 摘要

生物絮技術被認為是水產養殖業新的“藍色革命”。生物絮技術的概念是在養殖場域內建立並維護穩定的微生物聚落，以此聚落為養殖動物提供重要的生態服務，包括循環使用養殖過程產生的廢物，不但將過多的營養物質同化成微生物生質，豐富了天然食物鏈的基礎，而且將游離因而難以掌控的、潛在的污染源轉化或/及固化成有用的生物資源，同時又能排除環境中的毒性、抑制病原體滋生，為生物安全提供了更多的保障。生物絮技術在生態上的服務同時也為水產養殖生產帶來經濟效益，包括降低飼料成本、減少維護水質成本、節約水資源、提升活存率及成長率以及產量。本文將從：一、生物絮聚落在養殖系統中的動態，二、生物絮技術與水產養殖生產的互動，以及三、生物絮技術在水產養殖應用實務的三個層面來廣泛的回顧生物絮技術在水產養殖的應用。最後以生物絮技術研究的前景與展望作為總結。

**關鍵字：**生物絮技術、微生物聚落、零換水、氧動力學、碳氮比

## 前言

在約三十年以前，以生物絮為基礎 (biofloc-based) 的水產養殖系統就已引起了產業的興趣，因為這類系統較能提供生物安全，更能營造友好的環境，以及財務上能永續的進行水產養殖生產。只要養殖動物能應用上養殖環境中的自然生產力就能產生優勢，因此這類系統在全球能很

快的商業化拓展。越來越多學研機構針對各類養殖動物發展生物絮為基礎的應用。本文專注於各類生物絮的共通性及專一特性，同時就之間的差異，強調不同的管理策略。生物絮系統奠基於在水產養殖生產環境中培養微生物聚落的觀念。這聚落提供了重要的生態系統的服務，包括廢物的循環及提供養殖動物添加的營養。外的輸入包括飼料，以及多種狀況下多添加的

---

Received 18 February 2025; revised 14 April 2025; accepted 02 May 2025; available online 02 June 2025

\*通訊作者電子信箱：[yhchien@mail.ntou.edu.tw](mailto:yhchien@mail.ntou.edu.tw)

DOI: [10.29474/FER.202512.0106](https://doi.org/10.29474/FER.202512.0106)

碳，及/或碳酸來支應養殖動物的成長並且配合微生物聚落的需要。同時輸入的也包括因打氣或增氧及混合水體來維持懸浮的好氧微生物的聚集。經由輸入物、養殖動物的密度，及期作內或期作之間有機物質的氧化等等的適當的管理，養殖業者能獲致養殖場內生態系統服務的最大化。如此下來，可改善成本效率，穩定生產狀況，以及增加生產環境的永續力。

## 一、生物絮技術的概念與優點及其發展的緣起

### (一)生物絮技術的概念與優點

Bio-flocculation Technology (生物絮技術)，縮寫成 BioFloc Tech，可再簡寫成 BFT (生物絮技術)。BFT 技術的概念是在養殖場域內以極少換水、強氧化、調整水域中的碳氮比來建立並維護穩定的微生物聚落(microbial community)，以此聚落為養殖物種提供重要的生態服務，包括循環使用養殖過程所產生的廢物，不但將過剩的營養物質同化成微生物生質，豐富了天然食物鏈的基礎(Martínez-Córdova *et al.*, 2015)，而且將游離因而難以掌控的、潛在的污染源經轉化或/及固化成有用的生物資源，同時又能排除環境中的毒性，抑制病原體滋生，為生物安全提供了更多的保障(Emerenciano *et al.*, 2017)。BFT 在提供生態服務的同時，也為水產養殖生產帶來經濟效益，包括降低飼料成本、減少維護水質成本、節約水資源、提升活存率及成長率以及產量(Avnimelech, 2015)。

有據可查的是，由於大部分的養殖動物對於人工飼料的利用率不高，其代謝物進入圈養的水環境中會產生過多硝酸鹽和磷酸鹽形式的廢水。這些物質與有害藻華直接相關，藻華會崩潰並嚴重消耗溶氧，形成缺氧環境，產生還原態的毒性物質如氨、亞硝酸、硫化氫，進而危害養殖動物，導致死亡(Khan and Mohammad, 2013; Páez-Osuna *et al.*, 2003)。這些污染物，若排放到養殖場外，造成外在環境的負面衝擊也多有實據；然而若留在養殖現地(on site)進行排除其毒性的措施，如循環過濾，則又必須在設施及營運上多加負擔水質處理的成本。

與傳統水產養殖相比，BFT 有幾個優點，同時為上述問題提供了解決方案。已經證明，由於通過微生物回收營養物質，BFT 使得在生產週期中使用的水量顯著減少(Crab *et al.*, 2012)。通過 BFT 進行現地處理和將營養物質完全迴圈(recycle)回到微生物生質中，不僅有助於提高生物安全性，而且有助於降低飼料轉換率，從而降低飼料的總體生產成本。將水過濾費用減少約 30%是司空見慣的，而飼料占總成本的 40%-75%，因此在任何其他生產領域的節省都是非常有益的(Ansari *et al.*, 2021; Crab *et al.*, 2012; De Schryver *et al.*, 2008)。這些優點進一步說明如下：

#### 1、降低生產成本

水費用減少，因為以打氣來維護水質的成本通常低於交換(抽、運、排)水的成本，同時可因為保留下來水中的營養

所提供的自然生產力 (natural productivity) 的貢獻，而降低了飼料成本。密集養殖減少用水可以最大限度地降低土地和水的成本。對於海蝦養殖來說，減少對水交換的依賴可以為水資源較不充沛或使用上較易產生矛盾及衝突的沿海地區提供生產機會。

BFT 利用水中的微生物聚落來吸收含氮和磷的廢物，將這些物質轉化為微生物本身的生質，反而使之成為養殖動物多增加的替代食物的來源。Luo *et al.* (2014) 證明了這一點，當被養在 BFT 系統中時，吳郭魚的飼料轉化率 (FCR) 比傳統的循環水產養殖系統 (RAS) 下降了 18% (分別為 1.20 和 1.47)。在水交換率低，甚至近於零的生物絮系統，以 BFT 養殖南美白對蝦 (*Litopenaeus vannamei*) 與現有技術相比，BFT 大大減少了水的浪費 (Mishra *et al.*, 2008; Wasielesky *et al.*, 2006)。

## 2、增進整體生物安全

同時透過培育多樣化的微生物聚落，從而提高對危險病原體的競爭與排斥，控制病原體的引入，改善生物安全，增強了養殖動物的健康。BFT 還可以經由少交換水來減少病原進入養殖系統和避免養殖動物的逃逸，因而提高了養殖場的生物安全性 (biosecurity)。

## 3、減少生態足跡，有利於可持續發展

由於用水和排水的減少，同時又能加強生產，從而減少了每公斤產品生產的生態足跡，因此，這種經營方式對於

環境的可持續發展上是有利的。

## (二) 發展生物絮技術的緣起

幾個世紀以來，施肥就一直是提升池塘養殖生產的基本功。不論是有長遠養殖歷史的中國，或者是在近代早先發展科學化養殖的以色列，首先要達到增加產量的速簡作為，就是施肥，以此來增加水體中的養分，促進初級生產力 (primary productivity)，如植物浮游生物，進而次級生產力 (secondary productivity)，如動物浮游生物、原生動物，甚至於再上一營養階層面的小型掠食動物，使得養殖動物可獲得更大量且多種的天然餌料生物，因而能加速成長並增產。BFT 被認為是新的「藍色革命」，因為受益於最少或零的水交換，營養物質可以在養殖的水域中持續回收和再利用，類似將施肥的肥分做最大的發揮。

早在 20 世紀 60 年代，在台灣及以色列竟也不約而同地進行了多項施肥型式的試驗研究，如有機肥或無機肥，氮、磷、鉀肥不同配比，施放時間等與初級、次級生產力、以及不同混養動物食性與產量的動態關係。約在同一時期，從 Chien and Liao (2001) 的回顧論文中可追溯得到台灣在當時所進行有關施肥的研究成果。70 年代中期之後，隨著人工苗供應的豐富，因而帶動了放養密度的增加，以及配合飼料的餵養，使得養殖動物的代謝物及殘餌所附加的施肥效應已遠遠超越先前為增加水中養分刻意的施肥效應，甚至使得養殖後期池水產生富營養化 (eutrophication)、

藻華(algal bloom)、臭土味(mud odor)等問題。

70 年代末，以色列的一個團隊就研究了富含有機物質的魚類養殖系統的動態，發展了異營養食物網(heterotrophic food web)的概念(Wohlfarth and Schroeder, 1979; Hephher, 1985)。與此同時，另一團隊在密集的生物聚落的系統中商業化養殖吳郭魚和蝦。此團隊在將過程完成概念化之後，又發展了一家能減少對水交換的依賴的企業。此舉將養殖系統中的自然生產力極大化，養殖物可因此而受益。在太陽能水產養殖場的早期研究和商業化努力中，他們已展示了當今生物絮技術的一些概念，儘管這些概念從未在科普或科學文獻中呈現。

90 年代初，在以色列的理工大學和在美國南卡羅萊那州的瓦德爾海水養殖中心(Waddell Mariculture Center, WMC)各自獨立工作的兩個小組開始分別發表一系列論文，介紹吳郭魚和蝦的少換水甚至零換水(zero water exchange)生產技術的應用(Avnimelech, 2003)。這些研究顯示可透過硝化(nitrification)和脫氮(denitrification)的過程將水中過多的氮礦質化(mineralization)並經同化(assimilation)成為微生物的生質。大約在同一時間，夏威夷的海洋研究所(Oceanic Institute)進行了一系列的研究，報導了蝦密集養殖系統池中某些未知因素對於蝦的生長有增強效應(Avnimelech, 2003; Avnimelech et al., 1994; Hopkins et al., 1993; Hopkins et al.,

1995a)。事後那些未知成長因素(unknown growing factors)被認為與現今所謂的生物絮可能有關聯。爾後，商業養殖場開始採用和改進這些技術，例如中美洲的貝里斯水產養殖場確認了這技術在商業規模生產蝦的潛力(Boyd and Clay, 2002)。越來越多的文獻說明了在減少水交換和改進生產效率的同時又可有加強生產的機會。

在 90 年代後期，隨着全球水產養殖產業的起飛，生產方式的密集化，人們對於水產養殖操作中因換水而引起的負面衝擊有了更多的瞭解及警覺(Hopkins et al. 1995a)。其中包括乾淨的水資源越趨不足，無法及時供應密集式水產養殖的生產所需，養殖場的污水排放對於周邊環境水文狀況的負面衝擊，例如鹽度的改變、有機物負荷的增加、甚至生物相的改變等，特別是在養蝦方面(Browdy et al., 1997; Lotz, 1997; Stanley, 2000)。最被嚴重關切的是水交換對於生物安全的威脅。例如進水中含有病原及污染物，在進水排水系統未完整規劃的區域，病原容易在養殖場間傳佈而造成疾病大面積的爆發。因此，開始有人發展少換水，甚至於零換(及排放)水以防止病原入侵與傳佈，卻仍能維持安全水質並提高養殖效率的科技。

在 21 世紀初期，生物絮技術可以說是因應零換水或少換水而又要解決水域因富營養化衍生的困境，尤其是水質惡化，因而發展出來的一項現代技術。集約化或密集化(intensification)是世界水產養殖發展的趨勢，因為經濟效益可因而增

加。隨之而來的卻是生產過程中自家污染的程度也越趨嚴重。排除污染的威脅及傷害，解決之道不外乎將污染物經轉化(conversion)成無毒性、稀釋(dilution)成無安全之虞的低毒性、或隔離(isolation)使養殖動物免除了接觸到毒性的威脅(Chien and Liao, 1995)。在水產養殖操作中處理污染毒物最簡易的方式採稀釋，亦即換水，以乾淨安全的水來置換已惡化毒化的水。此方式使用的前提是水源要充沛，能及時提供給養殖場足量的水進行置換惡水，同時又要能將養殖場的排水稀釋到符合環保水平。如此雙重的要求條件使得換水成了高難度的挑戰。對於水資源有限、沙漠地理環境的以色列，換水極小化、水資源循環利用極大化成為發展水產養殖必然要走的路，尤其是他們傳統的淡水、吳郭魚養殖。雖然循環水養殖(RAS, Recirculated Aquaculture System)、魚菜共生(Aquaponics)、以及生物絮技術都是水充分重複使用的選項，對於室外池塘養殖，BFT 終究成了抉擇。在美國不論是在南卡羅萊那州或夏威夷州，養殖場水的排放受到環保當局及法規嚴厲的管控及違規處分。因此，零換水就成了水質管理的最高目標。有趣的是美國和以色列可謂不約而同，在水產養殖水的使用方面大約在同一時間研發了零換水 BFT。

## 二、生物絮聚落的形成與組成及其在養殖系統中的動態

生物絮是水產養殖生態系統中具體

而微的聚落。它的形成、成長或發展、衰亡或滅絕和圍繞着它的生態系的狀態息息相關，當然也和為了生產而經營這生態系的種種操作有亦步亦趨的協同關係。

### (一)生物絮聚落的形成與組成

要瞭解 BFT，可先從瞭解此技術的本體—生物絮(biofloc)開始。不管中文被稱作生物‘絮’、生物‘絮凝’、生物‘絮團’、或生物‘羽’，眾人都會同意生物絮是水中與生命(Bio)有關、具有鬆散、懸浮、飄動的物理性質的聚合物(aggregate)。此聚合物實際上是由各種微小生物(microbial organisms)與非生命物質所構成的獨立的聚落(community)。

在水產養殖系統中，水交換減少，高投入的養分，支援了密集的微生物聚落的建立。魚類和甲殼類動物只能使用飼料中有限的氮和碳，用於生長和代謝。蝦和魚對有機碳、氮和磷平均回收率的估計分別為飼料含量的 13%、29% 和 16% (Avnimelech and Ritvo, 2003)。其餘進入養殖系統的要麼是未食用的飼料，要麼是代謝後排泄的廢物。在一些循環水養殖系統中，一般會在養殖區之外設置人工基材，使得基材上得以形成微生物聚落，例如，以商業製造的塑膠顆粒(bead)裝填的過濾器讓微生物形成聚落，而以這微生物聚落負責循環利用剩餘的營養物質。在此類系統中，養殖所產生的有機顆粒物通常透過外部的過濾(如沈澱、渦流裝置和砂濾)來清除。然而，在生物絮系統中，這些顆粒卻被允許在養殖區內形成生物絮，而負責

營養循環利用的微生物聚落就成了生物絮的一部分。

隨着飼料的投入，在沒有換水的養殖系統中的藻類聚落會以對數型式快速增長，最終由於光線穿透的限制，在達到高原式的極限後增長就停滯下來。這藻類濃稠的狀態在吳郭魚養殖可以持續數天，在蝦養殖系統隨飼料輸入最多可持續十周，生產性能很大程度上取決於藻類聚落的組成以及附隨的 pH 和溶氧起伏的管理。在生產週期的這個階段，池塘和水箱系統通常會經歷從光合自營菌(photoautotroph)主導的聚落轉換成到細菌主導的聚落。經過適當的混合和打氣，藻類、細菌、浮游動物、飼料顆粒和糞便物質保持懸浮在有氧的水中，並自然地絮凝(flocculate)在一起，形成了生物絮，如圖 1。

這些絮狀物由物理化學力的吸引和由多醣、蛋白質和腐化複合物等化合物組成的聚合物聚集在一起 (Avnimelech, 2009)。絮狀顆粒是微生物和顆粒物的多種混合物，它們在生化成分和物理特性上可能因所使用的飼料類型、養殖動物、打氣類型、管理方式、物理和環境因素以及時間和空間變數而異，這些變數可能因地點、季節和與繁生相關的因素而變化(De Schryver *et al.*, 2008; Ray *et al.*, 2009)。生物絮聚落可以如同在養殖所使用的飼料，具有明顯而獨特的脂肪酸的特徵(Johnson *et al.*, 2008)，這顯示微生物聚落應已對應於環境而產生了生化性的變化。類似的顆粒發生在自然界中，通常被稱為海洋雪

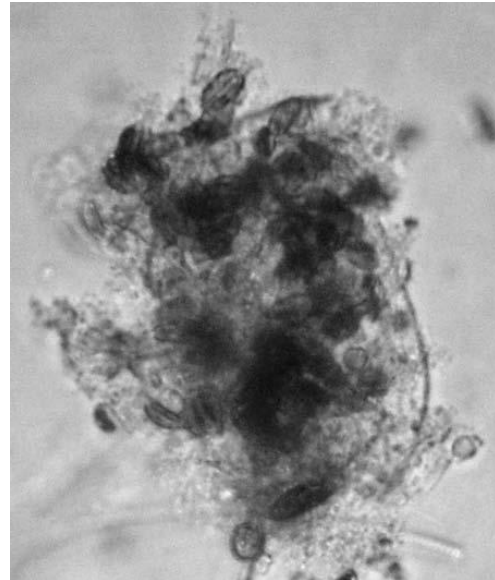


圖 1. 生物絮包含幾個藻類物種，可能含有多種細菌和真菌屬。這些微生物被浮游動物啃食。養殖動物及其幼生也許能夠攝食這些顆粒並從中獲得營養，從而降低飼料成本。

(marine snow) (Aldredge and Silver, 1988)。

生物絮本身代表著一個有趣的生態系統。水對於微生物是一個營養有限的環境資源，幾乎沒有營養或可用的有機基材。生物絮是嵌入在營養貧乏水中的營養豐富的微環境。這種密集的营养吸引各類生物，如原生動物、線蟲、纖毛蟲和其他在生物絮內或周圍啃食(grazing)的生物。生物絮的外部多醣 (external polysaccharides, EPS)塗層會吸收碎屑和獨立生存的微生物，因而增加了生物絮的營養價值。生物絮也提供大多數細菌所需的基質，並且可以提供一些庇護場所而不會被掠食(De Schryver *et al.*, 2008)。生物絮系統含有細菌、藻類、浮游動物、真菌和病毒。每團生物絮都包含可能對魚蝦養殖造成正面或負面影響的生物相的組合。一些

細菌，如屬於弧菌屬(*Vibrio*)的幾種細菌，被認為是蝦和魚的病原，常對水產養殖造成問題。雖然弧菌會發生在生物絮系統中，但研究仍在進行中，以確定它們是否對養殖動物構成任何風險。其他細菌對生物絮系統非常有益。硝化細菌最終將有毒的氨轉化為相對無毒的硝酸鹽化合物。許多異營養細菌可以直接吸收氨氮，因而從水中去除氨氮。

BFT 系統主要由自營微藻/大型藻類、異營需氧微生物和較大的浮游動物組成。生物絮系統中存在的微生物由在地的養殖環境(例如水箱、水和空氣)、養殖物種本身的微生物(例如腸道、皮膚、鰓和口腔中)以及任何啟始的添加物都會影響到 BFT 系統的組成，其中常見的例子是酵母菌屬(*Saccharomyces* sp.) 和 乳 酸 桿 菌 屬(*Lactobacillus* sp.)。隨著時間的流逝和以相對較高的碳氮比的進料的不斷輸入，系統水將從綠色變為棕色。這顯示大部分的生物絮體已從自營群聚轉變為異營群聚。這種群聚組成的變化也將增加溶氧需求、二氧化碳濃度和總懸浮固體(Total Suspended Solid, TSS)的量。後者將有利於細菌菌株，例如紅桿菌科(*Rhodobacteraceae* sp.)，它們傾向於利用懸浮固體作為生長的面積(Pilotto *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2016)，或也說明了水色轉為帶紅的棕色的原因。

生物絮中的微生物群落對於生長周期的成功形成至關重要。在 BFT 中，細菌-微藻和細菌-細菌之間經常發生共生和互

惠關係(commensal and mutualistic relationships)，它們主要表現在水箱的側壁或自由流動的生物絮的內部。異營微藻 *Schizochytrium* sp. 和 細菌 *Lactobacillus plantarum* 之間的互惠關係已被檢測和記錄(Hernández-Castro and Pacheco-Vega, 2015; Pacheco-Vega *et al.*, 2018)。這兩個物種之間的相互作用有效地促進了總氨氮、亞硝酸和硝酸的控制。此外，這些作者發現裂殖菌屬(*Schizochytrium* sp.)和植物乳桿菌(*L. plantarum*)限制了弧菌屬病原體的實例，特別是哈威弧菌(*Vibrio harveyi*)，因而提出假設這些微生物可以作為一次性起始劑量(one-off starter dose)添加到生物絮系統中。

## (二)生物絮聚落中的微小生物

### 1、細菌

細菌在生物絮系統中無處不在，在充分的氧合(oxygenation)和攝食下，異營細菌最終將在數量上佔優勢，這可在養殖水的顏色從綠色變為棕色看得出來。

重要的是要考慮生物絮系統中存在的細菌的種類及其生長需求。有了這些資訊，操作員就可以在有益細菌之間取得互惠或共生的平衡，同時將所有其他微生物考慮在內。在 BFT 系統中發現的最豐富的細菌的關鍵需求是：(1)以附著和共存形式聚集，以及(2)利用氮源或有機基質進行生長。據報導，BFT 和替代培養方法(如清澈的海水)之間產生了多種細菌種類，並且已經證明 BFT 可以

改變某些物種的腸道微生物群(如藍蝦、*Penaeus stylirostris*)，這進一步使人們相信 BFT 可以通過競爭性的排斥(competitive exclusion)對免疫力和疾病的控制提供更大的掌握，並向養殖動物輸送營養物質(Cardona *et al.*, 2016)。

變形菌(proteobacteria)通常代表淡水和鹹水環境中 BFT 系統內最豐富的細菌屬(Cardona *et al.*, 2016; Meenakshisundaram *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2020)。變形菌屬是革蘭氏陰性菌屬，其中許多物種是兼性厭氧菌，具有代謝碳水化合物和再利用有機廢物成為營養物質的能力，使它們非常適合 BFT 環境。化學自營細菌在變形菌屬中被歸類為 Betaproteobacteria 和 Gammaproteobacteria 類別。這包括硝化細菌，它們利用氧化將氨和亞硝酸鹽分解成毒性較小的硝酸鹽。在此過程中，硝化劑使用無機碳導致鹼度降低，這可能需要以碳酸氫鈉、氫氧化鈣或碳酸鈣的形式進行補充(Furtado *et al.*, 2011)。變形菌門、擬桿菌門和藍細菌通常構成三個最豐富的門，佔 BFT 系統中約 90%的活性細菌(Khanjani *et al.*, 2021)。

生物絮中的異營養細菌使用有機化合物作為碳源。這個聚落可以經由將氨吸收，形成細菌本身的生物質來盡量減少水體中的氨積累。在適宜條件下(溫度、碳：氮比、pH 值等)，細菌生長迅速。有研究顯示細菌在實驗室條件下，估計自由生存的異營菌的族群的世代

生成時間約為 2.5 小時(Leonard *et al.*, 2000)。

異營細菌利用糖、酒精和有機酸作為能量來源，但也有特定菌種能夠分解纖維素、木質素、幾丁質、角蛋白、碳氫化合物、酚和其他物質(Glazer and Nikaido, 2007)。異營細菌能夠在多種環境下繁生，它們常見於土壤、淡水和海水。它們於水生環境中負責回收大量的溶解性和顆粒性的有機物，是食物網中最重要的作用之一(Van and Meyer-Reil, 1982)。在生物絮中，異營細菌將糞便、黴菌、生物屍體和未攝食的食物聚集而繁殖，生成細菌本身的生質。這些細菌進而成為底層食性生物的食物(Avnimelech, 2015)。有研究評估七種海洋細菌的生化成分，蛋白質含量(乾重)為 29-49%，碳水化合物為 2.5-11.2%，脂質為 4-6%，此外，還有所有必需氨基酸的存在(Brown *et al.*, 1996)。

化學營養細菌(chemotrophs)聚落(即硝化細菌)透過氧化有毒氮化合物來獲得能量。硝化細菌透過現存的氨和亞硝酸鹽以及累積的絮凝物質(用作基材)而自然繁生(Glazer and Nikaido, 2007)。這些微生物所消耗的總鹼度必須由不同的來源(即碳酸氫鈉、碳酸鈣或氫氧化鈣)來回補(Furtado *et al.*, 2011)。在實驗室條件下，氨的氧化細菌的世代時間估計為 25 小時，亞硝酸鹽氧化細菌的世代時間估計為 60 小時(Leonard *et al.*, 2000)。

硝化細菌在多種環境中繁生 (Koops and Pommerening-Röser, 2001)。除了氧氣，進入生物絮系統的有毒氮化合物是主要關注點。氮的主要來源是養殖生物的排泄物和非生物物質(溶解和顆粒物)的分解。在 BFT 中，有三種氮轉化途徑用於去除氮：(a)藉藻類的光自營(photoautotrophic)活動去除，(b)自營細菌從氮轉化為硝酸鹽，(c)異營菌直接將氮轉化為微生物本身的生質 (Ebeling *et al.*, 2006)。從長遠來看，最有效的過程是自營(autotrophic)，其中涉及兩類細菌：(a)氮氧化細菌，透過將未解離氮代謝為亞硝酸鹽因而獲得能量，包括 *Nitrosomonas*、*Nitrosococcus*、*Nitrosospira*、*Nitrosolobus* 和 *Nitrosovibrio* 和(b)亞硝酸鹽氧化細菌，將亞硝酸鹽代謝成硝酸鹽，包括 *Nitrobacter*、*Nitrococcus*、*Nitrospira* 和 *Nitrospina* (Hagopian and Riley, 1998)。

## 2、真菌

真菌是一羣真核生物(eukaryotic organisms)，包括單細胞微生物，如酵母和黴菌，以及多細胞真菌。大多數酵母以有絲分裂進行繁殖，及許多其他酵母以不對稱分裂進行無性繁殖(Hartwell *et al.*, 1974)。它們直徑通常為 3-4 微米，廣泛分佈於淡水和海水。一些海洋物種存活的溫度低至-13°C，深達 4000 米；其他一些幾乎可以在飽和鹽水溶液存活。海水通常每升含有 10-100 個酵母，但在河口環境中，數量顯著增加

(Walker, 1998)。有研究評估了 7 種酵母的營養價值，發現含 25-37%的蛋白質、21-39%的碳水化合物和 4-6%的脂質，以及有完整組成的基本胺基酸(Brown *et al.*, 1996)。真菌，特別是酵母菌，完全是有機化學營養(chemoorganotrophic)微生物，需要有機形式的碳，這是相當多樣化的，包括醣，聚醇，有機酸和脂肪酸，及不同異環(heterocyclic)及聚合(polymeric)化合物。他們使用有機化合物作為能量來源。碳主要來自六角型糖，如葡萄糖和果糖 (Walker, 1998)。在吳郭魚的生物絮培養中，有報告指出在第五周當有酵母 *Rhodotorula sp.*出現在生物絮中，在養殖期結束時吳郭魚的生物量有較高的增加(Monroy-Dosta *et al.*, 2013)。

在水中，最常見的自然接觸的真菌類型是酵母菌(例如念珠菌屬、金黃色葡萄球菌屬、*Exophiala* 屬、紅景黴屬)和黴菌(例如曲霉屬、鐮刀菌屬) (Babic *et al.*, 2016)。以酵母菌株(例如酵母菌屬、克魯維酵母屬)作為 BFT 中的益生菌補充劑受到越來越多的關注。Gao *et al.* (2018) 評估了熱帶念珠菌與細菌 *Pseudomonas stutzeri* 在生物絮系統中的作用，發現熱帶念珠菌有效地同化了無機氮，並將其轉化為生物質。此外，念珠菌菌株有助於更快地配製更堅固的生物絮。由於其高蛋白質濃度和完整的必需氨基酸譜，酵母已被試驗作為魚和蝦飼料中魚粉和魚油的部分或完全替

代品。已有測試在淡水長臂蝦(*M. rosenbergii*)的日糧中以啤酒酵母(釀酒酵母)作為魚粉的替代品。

### 3、微藻

大多數藻類是光合自營生物。這些生物可以形成聚集體(aggregate)，導致生物絮的形成，但也能夠作為在水體中自由漂浮的活細胞。它們還可以吸收氨/銨、亞硝酸鹽和硝酸鹽的形式的廢氮，用於蛋白質同化(Dauda *et al.*, 2018)。據報導，許多種類的藻類對 BFT 系統有正面的影響。例如，Fimbres-Acedo *et al.* (2020)發現在尼羅吳郭魚(*Oreochromis niloticus*)的初期生長階段使用光合自營的微藻如小球藻 *Chlorella vulgaris* 和斜葉藻 *Scenedesmus obliquus*，顯著的提高了魚的生長率。在另一項實驗中，上述兩種微藻改善了吳郭魚的免疫系統反應，並作為幼吳郭魚的額外食物來源，降低了飼料轉換率(Jung *et al.*, 2017)。

一般來說，微藻是生物絮中常見的棲居生物，即使在以異營細菌為主的生物絮也是如此。在生物絮系統中可以發現各種形式的微藻(micro-algae)，偶爾還有巨藻(macro-algae)。有時，可以看到巨藻生長在水面附近或水中的結構物上，但如果蝦或魚能夠接觸到它，它們就會很快被吃掉。光自營聚落(微藻)在生物絮系統中扮演著重要角色。微藻主要同化氮和硝酸鹽，另外消費二氧化碳，產生氧氣。在生物絮培養的報告中提及微藻的分類有綠藻(Chlorophyta)、

金藻(Chrysophyta)和藍綠藻(Cyanophyta)。這些微生物捕獲太陽能，產生化學能(碳水化合物)，用於其代謝過程。

微藻存在於生物絮顆粒中如同獨立生存的細胞。綠藻門 chlorophytes (green algae)，如擬球藻屬(*Nanochloropsis* sp.)，經常集中在生物絮間。目前還不清楚綠藻是否提供任何營養價值，但像大多數藻類一樣，它們可以同化氮來製造細胞蛋白，並在光線照射下進行光合作用。

矽藻含有相對較高的必需脂肪酸如 EPA 和 DHA，為養殖動物提供了潛在的營養優勢。矽藻存在於生物絮顆粒內外，與改善蝦的生長有關。其他藻類，如隱藻(cryptophytes)和黃金藻或菊花藻(chrysophytes)偶爾會出現。藻類聚落似乎隨著時間而在生物絮系中發生豐度和組成的變化，這種變化的原因往往不清楚。

在生物絮的培養中，微藻可以是在水體中的自由細胞或形成聚合物。在某些情況下，金藻和藍藻的聚合物的大小高達 2 毫米的直徑(Bowling, 2009)。它們的大小變化很大，細胞可小於 10  $\mu\text{m}$  至大於 50  $\mu\text{m}$  (Decamp *et al.*, 2007)。生物絮系統中的許多藍藻，如聚球藻(*synechococcus* spp.)是微米(pico)大小(<2  $\mu\text{m}$ )，似乎包含在生物絮中的顆粒主要都是這種大小。去除生物絮的某些部分可以增加光的穿透和減少藍藻豐度，有

助於選擇對藍藻不利而有利於其他有益的藻類。

淡水中數量最多、種類最豐富的是綠藻，它們可以大量繁殖形成藻華，但是，與藍藻的差異，是無毒的。這類藻具有很高的可塑性，能夠在不同的棲息地增殖，它們是球形的或長方形的，可能有或沒有鞭毛(flagella) (Graham and Wilcox, 2000)。

對應於矽藻中的矽藻綱(Bacillariophyceae class)，金藻是最有代表性的生物，它分為中心型和五角型(Graham and Wilcox, 2000)。浮游態物種主要為中心型，五角型的一般是底棲。所有中心型的都是海洋物種，而大多數五角型的生活在淡水中(Graham and Wilcox, 2000)。在水產養殖中，矽藻被認為是有益的藻類，因為它們是大多數水生動物的食物和營養來源(García et al., 2012)。

藍藻被稱為最古老的光合成生物；它們具有很高的形態和結構變異性。在演化過程中，他們發展出各種生態生理適應策略，得以在極端環境條件下生存(López-Rodas et al., 2006)。鑒於藍綠藻能在不同環境中豐富繁生，此類藻對營養循環很重要，能將氮納入食物鏈，因而使它們成為基礎生產者或分解者。

任何水生系統都可能發生潛在的有毒藻類，生物絮系統也不例外。在生物絮中發現過有害藻華(HAB, Harmful algal bloom)，如噬魚費氏藻 *Pfiesteria*

*piscicida*，但沒有發現對蝦、魚或人類的負面影響。這些小型的、自由游泳的異營雙鞭毛藻(dinoflagellates)在生物絮系統中並不常見。更常見的一組潛在的有害藻類是藍藻(cyanobacteria)，也稱為藍綠色藻類。有證據顯示，這類藻阻礙了養殖系統中蝦的生長。在養殖池中，主要營養物質(氮和磷)濃度過高會導致不受控制的藻華，有時以藍綠藻為主，已知藍綠藻產生一些對水生動物有毒的化合物，並可能導致養殖物種中令人不快的味道(Pearl and Tucker, 1995)。有報導生物絮中有藍綠藻的存在，濃度因生物絮型而異。有報告說，在異營生物絮中，每毫升有  $2.1 \times 10^4$  個細胞，而在自營養生物絮中則有  $3.3 \times 10^6$  個細胞(Becerra-Dórame et al., 2011)。雖然藍藻可能變得有毒或有問題，有報告指出在用來養白蝦後期蝦苗的微生物鋪墊(mat)上發現有蝦苗啃食這些藻類的證據(Lezama-Cervantes and Paniagua-Michel, 2010)。

微藻被廣泛使用在水產養殖：它們的營養特性使得在實驗室裡能夠養殖甲殼類動物、魚類和軟體動物。有幾個因素可以促進微藻的營養價值，包括其大小和形狀，消化能力，生化成分，和具生物活性化合物如酶，維生素，抗氧化物等。生長到對數晚期生長階段的微藻通常含有 30-40%蛋白質、10-20%脂質和 5-15%碳水化合物；從微藻中提取的高度不飽合脂肪酸 PUFA(即 DHA、

EPA 和 AA)已知對各種養殖動物至關重要(Brown, 2002)。

一般來說，微藻是生物絮中常見的棲居生物，即使在以異營細菌為主的生物絮也是如此(Monroy-Dosta *et al.*, 2013)。有研究評估養吳郭魚所培養的生物絮中的微生物組成，指出第一次出現的微藻是綠藻，其次是矽藻，最後是藍綠藻，還提到矽藻的濃度最高，藍藻最低。在零換水中培養白蝦的某項研究中，與過去結果不同處，在於綠藻凌駕矽藻(Ray *et al.*, 2010b)。生物絮系統具有高度的動態性：有研究指出，在自然界中，某些種類如纖毛蟲和輪蟲有選擇地食用微藻，因此可能會影響其多樣性。物理化學參數也影響微藻的優勢狀況(Kuang *et al.*, 2004)。白蝦生物絮培養中觀察到鹽度在 2 ppt 綠藻佔優勢，而在 25 ppt，則是矽藻(Maicá *et al.*, 2012)。

對尼羅吳郭魚的進一步研究中檢視了使用大型藻類如梨形囊巨藻(*Macrocystis pyrifera*)和玉米(*Zea mays*)作為 BFT 系統中的生物絮的凝結核(nucleation sites) (Aparicio-Simón *et al.*, 2020)。報告說，使用梨形囊巨藻的飼料轉換率為  $1.16 \pm 0.14$ ，而使用玉米的飼料轉換率為  $1.32 \pm 0.34$ 。據推測，這可能是由於梨形囊巨藻生物絮的營養增加和蛋白質含量增加，顯示出海帶作為替代飼料來源的前景，有可能減少水產養殖中對穀物飼料的高需求。其他研究顯示，把裂片石蓴(*Ulva fasciata*)等大型

藻類物種的整合入飼料可提高 BFT 系統中氮和磷的回收率分別達 5.5%和 7.6%。此外，這些凝結核的加入將南美白對蝦和梭狀鯔(*Mugil liza*)的總生產力提高了 12.2% (Legarda *et al.*, 2020)。

#### 4、浮游動物

浮游動物是生物絮中的重要成員，因為它們同時消費細菌和藻類，然後可能又被蝦和魚食用。在生物絮中可發現各種各樣的浮游動物。自由游泳的浮游動物，如纖毛蟲(ciliates)和微鞭毛蟲(micro-flagellates)，可以看到以生物絮顆粒為食。在生物絮間通常觀察到的輪蟲和線蟲，會消費絮凝的物質。浮游動物是 BFT 系統中豐富的多樣化和重要的生物群聚，主要可分為五個組：

##### (1)原生動物

原生動物在營養等級之間的能量傳遞中起著重要的仲介作用，這在 BFT 系統中尤為適用。原生動物消耗微小的浮游微生物有機物，包括細菌和微藻顆粒，並且被較大的浮游動物(例如輪蟲和線蟲)捕食。因此，它是彌合生物絮生態系統中營養差距的重要羣體。原生動物的常見例子包括變形蟲、裸藻和草履蟲。原生動物可以通過運動方法進行分羣和分類，例如鞭毛、纖毛或阿米巴。雖然有些是病原體，例如 *Ichthyophthirius multifiliis*，它在各種魚類中引起白斑病。這種疾病的名字恰如其分，可以很容易地在受感染的魚身上看到，表現為白點的形式，這些白點穿

透了受感染魚的皮膚、鰓上皮和鰭。如果被忽視，這種疾病會導致高死亡率。

原生動物是 BFT 系統中最相關的微生物群之一。它們和細菌對於系統中的有機物的循環利用扮演至關重要的角色。這兩組微生物羣是能量向下一個層次轉移的“基礎”。原生動物有不同的身體形狀(球形，橢圓形和拉長形)，通常有一個或多個如鞭子的附肢稱為鞭毛(flagella)或許多短髮狀結構稱為纖毛(cilia)。原生動物在多種環境中非常豐富，經常出現在水下的岩石表面，自由地生活在水體中或聚生在泥中。纖毛蟲是大自然中最大的原生動物群，他們吃細菌(包括藍藻)和小浮游植物。有些是食肉動物，以浮游動物為食(Kobayashi *et al.*, 2009)。

在自然界中，纖毛蟲是包括小的無脊椎動物在內的水生動物的幼期十分重要的活餌來源。有研究對海水纖毛蟲進行分析，用來評估其生化成分及數種脂肪酸。水分、蛋白質、脂肪、碳水化合物和灰分含量分別為 86.66%、56.66%、36.66%、1%和 4%。氣相色譜分析顯示脂肪酸的存在，如油酸、棕櫚酸、棕櫚酸、亞油酸和硬脂酸(Pandey *et al.*, 2004)。

## (2) 輪蟲

輪蟲屬於較小的後生動物(metazoans)。大多數長 0.1-0.5 毫米。它們的體型因組別而變異很大：可以是球形的、圓柱形的或拉長的。身體可以是

柔軟的，也可以被殼(lorica)所覆蓋。輪蟲的嘴周圍的纖毛形成一個圓圈，稱為日環(corona)或輪器官(wheel organ)。輪蟲纖毛的快速運動形成了水流而得以游泳和攝食。輪蟲的食物包括微藻、細菌、酵母和原生動物(Ben-Amotz *et al.*, 1987)。

輪蟲是水生無脊椎動物，通常可在養殖環境中找到，它會消費分解的有機物。輪蟲以微藻、原生動物、酵母和細菌為食。Silva *et al.* (2021)在 BFT 系統內使用輪蟲進行了許多研究，他們發現使用額外的輪蟲可以提高南美白對蝦的生長速度，並提高整體微生物絮的含量。這些結果與 Brito *et al.* (2015)進行的類似研究相當。作者發現，與微藻 *Navicula* sp. 一起補充輪蟲(*Brachionus plicatilis*)的飼料轉換率( $0.92 \pm 0.06$ )比在標準生物絮中生長的蝦( $1.94 \pm 0.20$ )低兩倍。

在甲殼類和魚類的幼苗培養中，輪蟲可用來取代豐年蝦作為天然餌料。有研究分析實驗室培養的輪蟲的成分(乾重)如下：碳水化合物 15.9-22.7%、脂質 21.4-24.12%、蛋白質 45.7-61.3%和灰分 4.5-4.6% (Campaña-Torres *et al.*, 2012)。輪蟲可以分裂絮團並攝食細菌(Loureiro *et al.*, 2012)。輪蟲排泄物所產生的粘液(mucilage)促成了新的絮團形成(Pérez, 2010)。

## (3) 橈足類(Copepods)

橈足類動物是一種小型甲殼類動

物，屬於橈足亞綱 Copepoda，目前已知的種類超過 13,500 種。它們的大小從大約 1 到 2 毫米不等，並且具有分段的身體，這些身體被外骨骼包圍，外骨骼帶有用於游泳和進食的附肢(Williamson and Reid, 2009)。運動是通過快速拍打游泳的附肢來實現的，這導致了明顯的連續跳躍。橈足類動物在水產養殖中和 BFT 系統內，經由在各營養階層(trophic levels)上攝食，包括碎屑、微藻、細菌和小型原生動物，發揮著重要作用。然而，一些較大的橈足類動物可以捕食輪蟲、線蟲、大型原生動物，甚至蠓幼蟲(Thorp and Rogers, 2011)。除了在生物絮系統中充當重要的主要和/或次要消費者外，橈足類本身還具有高水準的長鏈多不飽和脂肪酸，如 EPA，二十碳五烯酸(C20:5n-3)和 DHA，二十二碳六烯酸(C22:6n-3)。此外，橈足類動物具有平衡的必需氨基酸組成，為養殖動物提供了系統內極好的額外食物來源(van der Meeren *et al.*, 2008)。

橈足蟲(Copepods)包括兩個主要群體：哲水蚤目(calanoïds)和劍水蚤目(cyclopoids)。哲水蚤橈足蟲有一個拉長的身體和第一對天線(antennae)是長的，而劍水蚤橈足蟲有一個強大的身體和第一對天線是短的。一般來說，兩者都使用頭部附近的附肢形成水流來過濾或收集食物。它們以細菌、浮游植物、底屑或任何其他有機物質為食(Kobayashi *et al.*, 2009)。橈足蟲的營養

成分會因所攝食的微藻的不同而不同：蛋白質含量為 39~42%，脂質為 16~19% (Farhadian *et al.*, 2009)。

#### (4)枝角類(Cladocerans)

枝角類(Cladocerans)身體被透明外殼所覆蓋，殼的顏色可能是黃色或棕色的。殼內有一對稱為胸腔成員的附肢，對於捕獲和轉移口腔中的食物顆粒非常重要。一般來說，枝角類吃各種各樣的浮游植物和懸浮物質。它們可以大大減少水體中浮游植物的豐度(Kobayashi *et al.*, 2009)。如同其他浮游動物，枝角類在自然食物網中有重要的角色。它們可以在培養的生物絮中提供大量的蛋白質。有研究分析兩種水蚤或魚蟲子(*Daphnia*)的元素組成(CHN)，結果如下：C，46.1%：H，6.5%：N，9.7%，和灰分，23.8%，由此可估計出蛋白質含量為 60.6% (Berberovic, 1990)。在生物絮系統中這羣生物常被報導(Emerenciano *et al.*, 2017)。Ferreira-Marinho *et al.* (2014)報導南美白蝦後期苗培養在零換水的系統中，枝角類的豐量每毫升可達 0.89~1.16 隻。

#### (5)雙甲類(Diplostraca)

雙甲類，這種濾食性的甲殼類動物通常生活在淡水環境中，通常被稱為水跳蚤(water fleas)，水蚤(*Daphnia*)和莫伊納(*Moina*)是目前主要的屬。這些生物以浮游植物和碎屑顆粒為食。在大量的情況下，它們能夠顯著降低浮游植物的密度。在生物絮系統中，由於可用於食物

的微藻數量較多，雙甲類更喜歡自營環境。然而，正如 [Castro-Mejia et al. \(2017\)](#) 所證明的那樣，水跳蚤（例如 *Ceriodaphnia dubia*）可以繼續以異營細菌為食，但存活的數量較少。因此，它們通常被認為是養殖魚類和蝦類的極好食物來源。由於不利的條件、競爭和成為養殖動物獵物的趨勢，BFT 系統中蛤蜊蝦的密度可能會隨著系統的成熟而減少。

### (6) 線蟲(Nematoda)

線蟲 (nematode)，俗稱蛔蟲 roundworm，長度通常為 2 毫米，體厚為 100 微米。一些自由生活的動物可以長到 5 釐米的長度，肉眼可見。線蟲可以進一步分為五個營養類群 (trophic groups)：

1. 雜食動物(omnivore)，以所有可用的食物來源為食。
2. 真菌動物(fungivore)，以微小的真菌顆粒為食，例如菌絲體(mycelia)或酵母。
3. 捕食者(predator)，捕食其他較小的線蟲、原生動物等。
4. 食草動物(herbivore)，消耗植物材料。
5. 食菌動物(bacteriavore)，消耗各種類型的細菌。

線蟲是生物絮中另一個重要群體。它的體型是完全圓柱形的，最外層由其底層表皮(epidermis)分泌的相對厚的非細胞的角質層(cuticle)所構成([Johnstone,](#)

[1994](#))。角質層主要由膠原蛋白(collagen)組成。他們不斷攝入細菌和其他微生物，幾乎所有適合口腔的粒子都被攝入，顯示著一種主要基於粒子大小的選擇機制。線蟲有六種餵食策略：(a)食量極少，(b)食纖毛蟲，(c)嚴格的沈澱物食者(deposit feeders *sensu stricto*)，(d)能行光合作用且能利用溶解無機營養而成長(epigrowth feeders)，(e)兼行植物掠食者(facultative predators)，以及(f)捕食者([Moens and Vincx, 1997](#))。線蟲在生物絮中的豐度與纖毛蟲的存在相關，這是因為線蟲以纖毛蟲為食物。有人發現在生物絮系統中成長的魚的胃含物中有線蟲，顯示線蟲是當地豐富的活餌來源([Loureiro et al., 2012](#))。

這些生物在水產養殖和生物絮系統中起著非常重要的作用，能夠佔據不同的營養階層並有助於營養能轉移。在 BFT 系統中，該過程有助於推動生物絮的開發和穩定性。[Ray et al. \(2010a\)](#) 顯示，線蟲經常與原生動物(protozoan)一起被觀察到，這意味著原生動物是線蟲的重要食物來源。線蟲通常是養殖環境中數量最少的微生物之一，可以推測線蟲很容易被系統中存在的其他捕食者食用，例如養殖的蝦或魚。

為了支援這一理論，[Focken et al. \(2006\)](#) 進行的一項研究顯示，南美白對蝦的幼蟲積極掠食線蟲 *Panagrellus redivivus*，使得餵養線蟲的蝦達到後期幼蟲階段的速度高於僅食用藻類的處

理。在 Reyes *et al.* (2011)進行的另一項研究中，作者證明，在孵化後長達 3 天的點帶石斑(*Epinephelus coioides*)幼蟲都可以用滋養(enrich)過的線蟲 *P. redivivus* 為餌料生物；然而，作者得出的結論是，如果不進行滋養，線蟲中所含的脂肪酸的組成並不足以被目前商業魚粉和魚油為基礎的飼料作為完全的替代品。簡而言之，生物絮系統中的線蟲為養殖生物提供了持續的補充餌料生物來源。

### 三、生物絮技術與水產養殖生產的互動

生物絮本體內的微生物之間可發生無數的相互作用，其中一些相互作用是互惠的(mutualistic)、共生的(commensal)和拮抗的(antagonistic)。舉例說明如下：

(一)互惠性：例如微藻小球藻屬(*Chlorella* sp.)和細菌芽孢桿菌(*Bacillus* sp.)之間的相互作用，其中一種的存在會刺激另一種細菌的生長速率提高，反之亦然(Nurarina *et al.*, 2019)。(二)共生性：在一廢水實驗中報告了共生性，其中生物絮本體中的黃桿菌 *Flavobacteria* 所消費的氨基酸是來自腐敗螺旋細菌水解的蛋白質(Ju and Zhang, 2014)。(三)拮抗作用：拮抗作用的記錄顯示紅桿菌科 Rhodobacteraceae 對弧菌科 *Vibrionaceae* sp.表現出抑制拮抗作用，弧菌科是在蝦類養殖中引起顯著死亡率的一種細菌(Cardona *et al.*, 2016)。

懸浮生物絮(懸浮固體)主要包含細

菌、線蟲和輪蟲群落，直接去除懸浮固體會對這些組織的數量產生重大影響。反之，懸浮固體的去除似乎對培養環境中微藻的總量影響不大。

生物絮的組成中微生物不但占比大，而且在 BFT 系統中產生關鍵作用，包括：(一)以吸收現地的氮化合物來生產微生物蛋白，因而也維護了水質；(二)以增加營養降低飼料轉化率和降低飼料成本來增加養殖效率；和(三)以與病原體的競爭來降低致病率。

BFT 在水產養殖操作中將水質、餵飼、健康等管理中某些條件的搭配與有系統的應用，可培養出穩定發展的生物絮，這就是所謂的生物絮技術。這技術成功的發揮，不但穩定了這生態系，而且有利於將之付諸生產，形成互利共生的關聯。除了透過以最少或零的水交換(zero water exchange)節約了水資源之外，而且還可以在養殖水域中持續回收和再利用營養物質。此外，由於生物絮是有機物、物化基質和多種微生物之間的複雜相互作用的產物，它成為一種豐富的蛋白質-脂質天然食物的來源，每天 24 小時就地供應。養殖生物食用生物絮已顯示出無數的好處，如成長率的提高、降低 FCR 以及飼料成本(Avnimelech, 2015)。這種自然生產力在回收養分和保持水質方面扮演重要角色作用。本節就主要的水質參數、氧的動力學、有機顆粒的管理、氮廢物的處理(碳氮的操縱)、飼料與餵飼的影響、水溫的影響、以及經濟的考量來闡述兩者之間的互動。

### (一)在養殖生產系統中營造生物絮聚落的主要水質參數

水質監測和維護是水產養殖要能成功的基本操作。溫度、溶氧、pH、鹽度、總氨氮(TAN)、固體(總懸浮固體(TSS)和沈降固體)、總鹼度和正磷酸鹽是一些應持續監測的參數。對水質參數及其在 BFT 中的相互作用的理解對於正確開發 BFT 和維持其生產至關重要。例如，pH 值、DO、TAN、固體和總鹼度的安全範圍將會導致 BFT 的健康成長並避免死亡。氮磷比率(N:P) (通常使用硝酸鹽和正磷酸鹽值)將影響到系統中自營聚落 (autotrophic community) (例如，綠藻相對於藍綠藻)的發生。現暫以南美白對蝦及吳郭魚為例，適合進行培養的環境條件或水質參數建議如下：

- 1、溶氧：不低於 4 ppm，或飽合溶氧的 60%；同時參考養殖動物的需求。
- 2、溫度：養殖動物的適溫，但不低於 20°C，否則影響微生物聚落的發展。
- 3、pH：6.8~8.0，低於 7.0 是正常的，但會影響到硝化作用。
- 4、鹽度：依養殖種類而定，0~50 ppt 都可培養出生物絮。
- 5、總氨氮(TAN)：理想值小於 1 ppm，其毒性受 pH 影響。
- 6、亞硝酸：理想值小於 1 ppm，關鍵而不易掌控的參數，尤其要注意飼料蛋白質含量、鹽度、總鹼度。
- 7、硝酸：0.5~20 ppm，此範圍內對於養殖生物一般都無毒性。

- 8、正磷酸鹽(Orthophosphate)：0.5~20 ppm，此範圍內對於養殖生物一般都無毒性。
- 9、總鹼度(Alkalinity)：大於 100 ppm，較高之數值有利於異營菌對氮的同化作用以及化學自營菌的硝化過程。
- 10、沈澱固體(Settling solids, SS)：以因何夫錐 Imhoff cones (圖 2)測得之含量 (mL/L)為標準。理想數值--蝦，5~15；吳郭魚苗，5~20；小至大的吳郭魚，20~50，高數值易導致異營菌聚落的高耗氧以及養殖動物的鰓阻塞。
- 11、總懸浮固體(Total suspended solids, TSS)；小於 500 mg/L，情況如 SS。



圖 2. 因何夫錐(Imhoff cone)常被用來衡量可沈澱固體、總懸浮固體、甚至浮游動物如涵蟲、橈足蟲、劍蚤等的濃度或密度(mL/L)。

### (二)氧動力學

溶氧(Dissolved Oxygen, DO)始終是水生生物栽培中需要監測的最關鍵的水質參數之一。在生物絮系統中培養生物尤其需要注意溶氧。除了正在養殖的蝦或魚對

氧氣有需求外，豐富的微生物聚落也以顯著的速度消耗溶氧。微生物聚落的溶氧消耗強度在很大程度上是養殖生物在其特定放養密度所需投餵的飼料的函數 (Boyd, 2009)。在一項對南美白對蝦所進行的養殖研究發現，微生物生物絮對系統的氧氣需求佔了很大的份量。在 235 立方米的溫室封閉的跑道養殖系統中，蝦的放養密度約為每立方米 500 尾蝦。微生物氧氣需求在生長期的前三分之一超過蝦的氧氣需求，到試驗結束時其氧氣需求仍占總氧氣需求的 35% 至 40% (Leffler *et al.*, 2010)。到生長期結束時，這種生物絮系統的總氧氣需求約為 5.6 毫克氧/升/小時。在其他蝦的研究也發現，在整個生產期間，微生物的氧氣需求量與蝦的氧氣需求量大致相當。

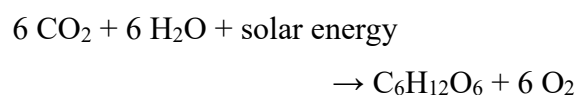
由以上得知，當應用 BFT 進行養殖生產，氧氣的供應不但要滿足養殖動物的氧氣需求，更要照顧到生物絮聚落的耗氧量，因為生物絮中充滿了微生物。因此，這種生產系統必須具備緊急備用的供氧系統，否則一旦例行供氧系統出問題，這種生產系統會以加倍的速度崩潰。

培養生物所需氧氣的簡單方程式就是一般有氧呼吸：



構成生物絮群聚的單細胞生物如細菌、真菌、藻類以及多細胞生物如微小無脊椎動物也都是循此方程式進行有氧呼吸。生物絮聚落中的微生物包含光合自營

(photoautotroph)、化學自營 (chemoautotroph) 和異營微生物自營 (heteroautotroph) 三大類。其中哪一個占主導地位取決於經由投飼料、投入其他有機碳以及從系統中除去生物絮顆粒後再進入系統等等的總有機負荷量。在養殖動物密度低時，所需飼料的投入相對較少。這意味著，相對較少的殘餌，糞便和更少的微生物可被用於形成生物絮中的固體。在這種情況下，給予足夠的溶解的無機營養物質，以綠藻和矽藻為主的光合作用聚落有可能蓬勃發展。在這些情況下，豐富的光合自營生物在白天可以根據光合作用的一般方程為系統提供相當大量的溶氧：



如果放養密度較低，經由光合作用所提供的溶氧可能足以滿足養殖動物和生物絮在白天的需求，剩餘的溶氧仍能持續到夜間而高於臨界水準。若在高放養密度和飼料負荷的情況下，在夜間或長時間的多雲期間，溶氧也必須以機械供應。隨著放養密度的增加，經由投餌所造成的養分載入率也因而增加，生物絮系統中細菌變得越來越占主導地位而光合自營聚落的重要性相形減少。根據一報告 Brune (2010)，隨著餵養同時也提供每天每平方米低於 9 克的有機碳的負荷率和充足的陽光，光自營聚落很可能占了主導地位。然而，隨著有機碳載入率超過 12.5 克/平方米，生物絮中藻類減少，系統越來越被細

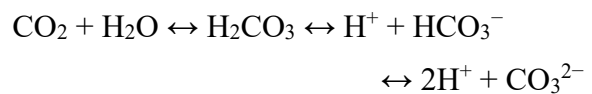
菌所主宰。

應用 BFT 的一大優點是生物絮聚落中的微生物能夠有效率的處理養殖動物所釋放的毒性物質。這優點讓放養密度可以增高因而帶來較高的經濟效益。然而，隨著放養密度的增加和飼料投量的增加，養殖動物和生物絮微生物的耗氧都增加了。在大多數的蝦和吳郭魚的池塘系統中，增氧可以經由水車或吸氣器(aspirator aerators)提供，這些增氧器同時也具有將有機物質攪動和重新懸浮的功能。

如前述有氧呼吸方程式所示，有氧呼吸每消耗一摩爾的氧，就會產生一摩爾二氧化碳。因此，一個超密集的生物絮系統，可能需要 5 毫克氧/升/小時，每小時也會產生同等數量的二氧化碳積累在水中。二氧化碳對大多數水產養殖生物有毒，因為它降低了血液和血淋巴輸送氧氣的能力。雖然高濃度對特定物種可能沒有殺傷力，但它們可能會影響養殖生物的活動、生長速度和抗病性。不同物種對溶解的二氧化碳的敏感性差異很大，但如果濃度是逐漸增加的，許多物種是有能力來適應高濃度二氧化碳(Timmons and Ebeling, 2007)。在低放養密度下，當打氣足以維持氧氣時，二氧化碳的積累可以通過物理現象脫氣到大氣中來抵消。然而，在超密集水缸或跑道的生物絮系統中發現有高動物生物量和高微生物氧氣需求時，必須直接將氧氣注入水中。在這種情況下，二氧化碳可能不會完全脫氣，並可能累積到不健康的水準。在二氧化碳濃度也很高時，溶氧水

準有可能在系統內仍然足夠高。在一超密集的蝦跑道養殖系統，測得 80 毫克/升的二氧化碳濃度，同時溶氧濃度一直仍能保持在 6 至 7 毫克/升之間。由於微生物和養殖生物的代謝活動量高，而且由於這種需求需要直接注氧，超密集的生物絮系統可能特別容易產生二氧化碳積累。

溶解在溶液中的二氧化碳也會影響化學平衡：



因此，二氧化碳的產生會將平衡推向右側，導致 pH (即  $\text{H}^+$  離子濃度增加) 降低。pH 值的下降可能會對養植物種的生長產生負面影響，如有必要，應進行監測和化學調整。二氧化碳的累積可能成為一個問題，特別是在封閉的建築物。這可能會在打氣不良、具有超密集生物絮系統的的建築物中引起對員工健康的關注。由於二氧化碳比空氣重，並且會從架高的養殖容器向下流動，因此溫室或建築物底部周圍的打氣應允許系統產生的二氧化碳逸出，並減少水和上面空氣中氣體的積聚。

### (三)有機顆粒的管理—重新懸浮、混合和污泥排除

水生系統的一個內在特徵是顆粒從水中沈澱到底部。水生系統富含有機顆粒(死藻、殘餌等)，其增加的速率與系統的有機負荷成正比。在水產養殖中，有機顆粒的豐富程度隨著系統的養殖強度而增加。有機顆粒沈澱到底部可以形成富含有機

物的沈積層，並伴隨着高的沈積物氧氣需求(sediment oxygen demand, SOD)。

在池塘中，氧氣從大氣中通過水層向下擴散到池塘底部是一個緩慢的過程。此外，氧氣在水中擴散時會消耗殆盡。由於典型的高 SOD 和氧氣供應緩慢，在湖泊、河流底部發生的缺氧環境也很可能會在養殖系統的沈積層中發展。缺氧環境下厭氧微生物的新陳代謝的效率明顯低於好氧或兼性好氧微生物，因此，與氧化的水層相比，沈積層中殘留物的回收速度較慢。此外，厭氧微生物代謝導致釋放還原性有毒的代謝物，如硫化物，還原的有機硫化合物，有機酸和氨。

為了確保適當的營養循環和進一步增加養殖產量，必須防止底層厭氧污泥的積累，其途徑有二：將污泥清除或使之重新懸浮起來(Hopkins *et al.*, 1994)。

在一項研究中，去除污泥解決了由飼料而帶入養殖系統的 67%的氮，從而改善了水質。然而，清除這些污泥會留下嚴重的後勤(運走)和處置(拋棄)的問題。環境和生物安全規定中限制或禁止以換水來排放污泥，而且如此做會導致高昂的抽水和/或處置成本。

在典型的循環養殖系統(Recirculating Aquaculture Systems, RAS)中，透過一系列的水處理來將懸浮的殘留物不斷地回收，污泥則被收集並傾倒掉。另一種方法是不斷地將顆粒重新懸浮，儘可能長時間地將顆粒留在打氣的水體內，防止造成厭氧沈積物的累積。後者即是 BFT 所採取的方

法，其中有機殘留物以有氧代謝方式，使進入有效的食物鏈並回收利用，同時又防止了有毒厭氧代謝物的產生。有一項研究(Hopkins *et al.*, 1994)追蹤養蝦池中氮的來龍去脈，過程中污泥被留在池塘中而不排除，且以打氣使之重新懸浮，在蝦收成時發現由飼料而進入池塘的氮，在水中都已找不到，顯示皆已轉換而揮發殆盡。另有一項研究顯示，即使池塘中存在少許的厭氧污泥堆，也可能影響水質和魚蝦的生長(Avnimelech, 2009)。在厭氧條件下，會形成極毒的硫化氫(H<sub>2</sub>S)。即使硫化氫濃度低，也會阻礙亞硝酸鹽(nitrite)的氧化，亦即硝化(nitrification)的第二階段，從而在水混合和重新懸浮效率低時，導致亞硝酸鹽濃度的升高。

為滿足養殖物種和微生物聚落的代謝需求必須進行打氣和氧化。減少微生物氧氣需求的一種方法是積極的從系統中收穫而取出生物絮固體。在大池塘中，這方法可以透過換水將固體從中央排水窠(central drain)沖走而達成，或在密集的水桶養殖系統中以沈澱池(settling chambers)、過濾(filtration)或泡沫分餾(foam fractionation)來實現。然而，必須小心謹慎的是，不要排除過多的生物絮而導致廢物同化和硝化過程的降低。有一項研究顯示有效的固體管理證明可提高生物絮系統中的蝦的生長和生產(Ray *et al.*, 2010a)。

要實現超密集的養殖，打氣及額外增氧是必須的。然而，打氣也用於實現幾個

相關目標：(1)向動物提供氧氣，以克服氧氣限制，從而提高放養密度、生長和產量；(2)水平和垂直地分配系統中的氧氣；(3)將水和沈積物、底泥-水介面混合；(4)控制污泥的覆蓋、位置和水排放。重要的是除了供應氧氣，要將打氣這動作的設計、部署和操作到能實現以上這些目標。

在池塘系統中，實現以上目標取決於正確選擇和規劃打氣的能力、打氣機類型、打氣機位置、操作模式以及適當的池塘設計。池塘的設計應允許在生長周期之間或生長週期內對污泥進行最佳排放。此外，由於污泥的產生難以避免，池塘的設計應能限制污泥的涵蓋面積及深度。池底及池堤內面鋪塑膠布越來越多被用於以生物絮為基礎的池塘系統，是以改善水的流動和控制污泥堆積，同時促進期作之間的污泥的氧化和清除。

在管理池塘和控制污泥堆積方面，特別是當換水減少或零換水時，打氣機的類型和放置位置至關重要。一種常見的放置模式是將打氣機定位到與堤防平行的位置。如此擺置使得堤防附近形成週邊流(peripheral flow)，而且在池塘中心產生無流量或流量非常有限的區域。有一項研究對這種徑向流或橢圓流(radial or elliptical flow)的物理方面進行了徹底分析和報告(Peterson *et al.*, 2001)。從質方面來看，沈澱的顆粒在水流快的區域被重新懸浮回水中。然而，在徑向流的中心區域並非如此。在這個區域，流速低，或不存在，沈澱物質不再重新懸浮，因而沈澱並積累。

有研究對這種情況進行了詳細分析(Calle-Delgado *et al.*, 2003)。結果發現，池塘的中心區域水停滯不前，打氣不良。該地區積聚的污泥和蝦的生活條件很差。重要的是盡量減少污泥堆的大小，並設計池塘，能有效地以排水伴隨污泥帶走。這可以經由池塘底部向一個適當大小的排水口(在中心徑向流動模式)傾斜，並通過打氣機正確的放置和選擇，以混合大部分池塘水來實現。

對於水箱或跑道型的超密集養殖系統，使生物絮持續懸浮在水中也至關重要。這些密集養殖系統中的水由氣石(air stones)、氣懸(airlift)、泵或這些的組合，所產生的湧升流或溫和的水流，使得顆粒維持懸浮在水中。非常高密度的魚或蝦本身所造成的生物渦流(bio-turbation)也有助於生物絮重新懸浮。

過多的懸浮物質和池塘底部污泥必須去除，因為它消耗大量的氧氣，在極高的濃度可能會堵塞鰓。沈積污泥誘發厭氧過程，會釋放有毒的厭氧產物(Avnimelech, 2009)。

與污泥處理有關的問題，在收穫前或收穫後排乾，需要注意。污泥含有高濃度的營養物質、活性有機物和具攻擊性的還原成分。淡水系統的污泥可用作高價值的土壤改良物質。來自海蝦池的污泥含有鹽，這排除了大多數污泥在陸上的應用。然而，有一項研究顯示仍可作為耐鹽植物，如花椰菜和甜椒的肥料(Dufault and Korkmaz, 2000; Dufault *et al.*, 2001)。

#### (四)氮廢物的處理(碳氮的操縱)

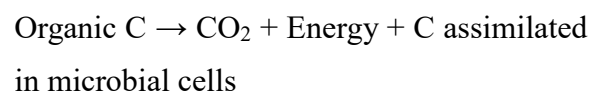
集約化水產養殖系統的一個內在特徵是水中無機氮的積累。魚和蝦飼料含有高濃度的蛋白質(20 至 45%)。提供給養殖動物的飼料中大約有 70%至 75%的蛋白質氮被釋放到水中，這些氮或者來自未食用的飼料被微生物分解，或者是代謝廢物分解。這種氮溶解到水中成為總氨氮(TAN)。水中未解離的氨(NH<sub>3</sub>)和解離的銨離子(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)之間的平衡，取決於 pH、鹽度和溫度。氨對大多數生物具有致命的毒性，即使低濃度也會阻礙生長。因此，必須盡可能降低其濃度。

生物絮系統非常適合處理氨，因為豐富的微生物聚落可以快速吸收排泄的總氨氮，防止其濃度上升到危險水準。三種不同的微生物可以通過不同的過程去除總氨氮：(1)通過光合微生物(藻類和藍藻)進行同化，(2)異營細菌的同化(heterotrophic assimilation)，(3)化學自營細菌硝化(chemoautotrophic nitrification)。通常，這三者都存在，並不同程度地活躍在生物絮中，這取決於放養密度、養殖階段、系統設計，特別是管理策略。隨著生產系統的密集化，氮廢物的控制變得越來越重要。

通常在新放養的養殖場域中藻類佔優勢，這是因為營養濃度過低，而致無法支持細菌的支配地位。光自營細菌的生物絮系統已成功地被用在氮廢物的管理(Brune *et al.* 2003)，但這種的生物絮系統需要相對較大的空間和低放養密度。隨着

較高的放養密度，投餌率相形提高，使得狀況有利於異營菌的同化作用及化學自營菌進行硝化作用。當每日投餵飼料量變高時，異營性(heterotrophy)成為主導(Chamberlain *et al.*, 2001)。由於生物量和飼料量較高，這種轉變在吳郭魚的池塘中發生得較養蝦要快得多。細菌的密集生長限制了藻類活動，因為光滲透率降低，所以只有一小部分水層接收到足夠的光進行光合作用。通過控制去除顆粒以提高水的清晰度，可以鼓勵生物絮組合中的光合自營活動。在生產的早期階段，藻類會吸收銨，並利用光合作用獲得的能量將其轉化為蛋白質。一旦從藻類主導的聚落演進到更基於細菌的系統，特別是如果系統以碳基質餵養，異營細菌幾乎具有無限的能力，能同化無機氮來構建微生物本身的蛋白。

在大多數生物絮系統中異營同化是重要的過程。異營細菌和其他微生物使用碳水化合物(糖、澱粉和纖維素)作為食物來產生能量和生長：



同化碳與代謝飼料碳的百分比被定義為微生物轉化效率(microbial conversion efficiency)，在 40 到 60%之間。氮是微生物細胞的重要構建基塊(building block)。因此，微生物利用有機碳的同時伴隨著無機氮的同化。這是一個基本的微生物過程，幾乎所有的微生物組合都執行它。減少銨

所需的碳水化合物補充劑量可以經由計算估計而得。假設添加的碳水化合物含有 50% 的碳，降低總氨氮濃度 1 毫克氮/升 (即 1 克氮/立方米) 所需添加的碳水化合物的量是 20 毫克 (20 克/立方米)。這種關係使管理者能夠在池塘中發現高氨氮濃度時 (例如在陰天之後，藻類大量死亡、高動物生物量等)，可以藉計算獲得必須添加多少碳水化合物的基材，來緩解本來會危險的情況。這種行動模式可被視為緊急事後模式 (an emergency, post factum mode)。這是管理者可在總氨氮或亞硝的濃度過度升高後所做出的反應。雖然異營細菌不能有效地同化亞硝，但碳水化合物的刺激會導致異營菌吸收氨氮，使得氨氮剩餘較少，不利於供化學自營細菌轉化為亞硝。

控制總氨氮的另一種方法是依靠硝化。硝化是一個兩步過程，其中一組細菌氧化總氨氮作為其主要能源，消費碳酸氫 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 離子作為碳源，並產生亞硝酸鹽離子 ( $\text{NO}_2^-$ ) 作為副產品。氨氧化細菌包括 *Nitrosomonas*、*Nitrosococcus*、*Nitrospira*、*Nitrosolobus* 和 *Nitrosovibrio*。這個過程產生的亞硝酸鹽比氨毒性更大，會改變血紅蛋白 (haemoglobin) 分子而阻礙氧氣的吸收。第二組細菌將亞硝酸鹽氧化到硝酸鹽 ( $\text{NO}_3^-$ ) 以獲得能量，再次消費碳酸氫離子和溶解的二氧化碳作為碳源。這些細菌通常屬於 *Nitrobacter*、*Nitrococcus*、*Nitrospira* 和 *Nitrospina* (Timmons and Ebeling, 2007)。這兩組化學合成細菌 (chemoautotroph) 都是絕對自營菌 (obligate

autotroph) 和絕對耗氧菌 (obligate aerobes)。通常，當一個新的生物絮系統啟動時，需要一些時間來建立硝化細菌。由於亞硝酸鹽是第一步的產物，因此在建立氨氧化菌群和亞硝酸鹽氧化菌群之間通常存在一段延滯。硝酸鹽是第二個程序的產物。它是相對無害的，即使濃度達到數百毫克/升，並且隨著硝化的進行在系統中繼續積累。在早期氨和亞硝酸鹽累積期，葡萄糖或其他簡單的碳水化合物來源可以添加到生物絮系統中，以抑制這些化合物的衝向峰值。

當氨氮從系統中被去除時，給細菌提供了能量，氧氣和碳酸氫離子也就被消耗了。所導致的結果是硝化細菌對於系統的氧氣需求，特別是鹼性消耗有顯著貢獻。為了保持硝化過程順利進行以及緩衝 pH 值的降低，必須定期添加鹼性物質，通常以碳酸氫鈉 ( $\text{NaHCO}_3$ ) 為之。為了保持鹼性，每去除一克氮，大約需要 7.05 克  $\text{HCO}_3^-$ 。總鹼度的需求量是支撐既定的放養密度的飼料投放所造成氮的載入速率 (nitrogen loading rate) 的直接函數。硝化過程還產生硝酸鹽和二氧化碳。如果硝酸鹽在整個生產週期中穩步增加，硝化是生物絮系統中是顯而易見的作用。這與硝酸鹽水準保持不變或下降的光自營和異營的同化過程是不同的。二氧化碳的產生可來自硝化作用及所有的有氧呼吸。

這兩種管理策略各有優缺點，可能或多或少適合不同的生物絮生產系統，具體係取決於養殖動物、放養密度等。必須指

出，氮同化和硝化都會在所有生物絮系統中發生。系統之間的區別在於添加的碳水化合物(或與使用低蛋白飼料等效)的使用率，而不是僅在總氨氮過高時才偶爾進行碳水化合物的添加。

由於硝化細菌從氧化總氨氮中獲得能量，因此無需額外的有機碳來驅動其新陳代謝。雖然簡單的碳水化合物相對便宜，但在較高的放養密度下，所需的數量可能會成為越來越重要的成本。在某些密集養殖系統中，添加碳水化合物的成本可直接被生物絮對養殖動物營養的貢獻，亦即提高了蛋白質的利用率而部分抵消。硝化作用比異營代謝消耗更多的鹼性，這需要在系統加入碳酸氫鹽離子，通常為  $\text{NaHCO}_3$ ，以維持 pH 和支撐這兩種機制的繼續運作。根據投餵率，使用打氣機和高二氧化碳的揮發可以抵消許多池塘系統中鹼性的下降。硝化的功能建立緩慢，也可能導致中間產物如亞硝的積累和硝酸鹽的產生，而在完全水循環再利用的密集養殖系統中，最終可能會成為問題。這兩個過程都需要大約相等的氧氣量；然而，異營同化每克總氨氮的去除，增加生產 65% 的二氧化碳，這可能是高放養密度的封閉系統中的一個重大問題。

然而，這兩個過程之間的一個顯著區別是異營同化所產生的固體數量，大約是硝化的四十倍。在碳水化合物大量輸入的驅動下，異營同化將氨氮沒收納入成細菌生物量。這些異營菌如果留在系統中，部分可能被養殖物種所吞噬；其餘的最終死

亡分解，並釋放總氨氮回水中。因此，隨著放養密度的上升，異營同化過程必須與固體去除機制相結合，否則氨氮仍將累積。這需要額外的工作和費用，一旦移除，又必須解決固體的處置問題。硝化產生相對較少的固體量。相反的，它把氨氮轉化為硝酸鹽，即使在相對較高的濃度下，對大多數養殖物種也是無害的。情況將發生在當生物絮的水被保留且重複使用於非常高放養密度的多次生產運行的情況下，硝酸鹽水準可能累積到須要關注水平。

## (五)飼料和餵飼

飼料和餵養對任何水產養殖作業都至關重要。飼料是運作生物絮系統變動成本中最重要的部分(Hanson *et al.*, 2009)，因為無論是直接對營養還是間接對水質的影響，飼料性能與養殖動物的生產成功有密切相關。在生物絮系統中培育動物時，系統內的自然生產力可以對營養平衡做出重要貢獻。許多參考文獻顯示，池塘水一般具有生長增強(growth-enhancing)作用，特別是在生物絮系統中養殖魚蝦(Leber and Pruder, 1988; Moss *et al.*, 1992; Wasielesky *et al.*, 2006)。有數項研究使用穩定的同位素技術對於南美白對蝦和吳郭魚直接消費生物絮的狀況進行探討(Burford *et al.*, 2004; Bianchi *et al.*, 1990; Avnimelech, 2007; Avnimelech *et al.*, 1994)。結果顯示生物絮脂肪酸成分的含量與商業飼料相當；蝦可以在生物絮系統中生長，使用不含補充維生素的飼料，而不會顯著地減少生長；生物絮已被證明含有重

要的礦物質和氨基酸(Avnimelech 2007; Tacon *et al.* 2002)。因此，生物絮可以提供重要的必需營養素，既可提高使用完整飼料時的性能，也可以利用生物絮對營養的貢獻而降低成本的配方提供新方向。Burford *et al.* (2004)的研究顯示，在以生物絮為基底的養蝦系統中，來自飼料來源的氮轉化效率可能會提高 18%至 29%。另一研究顯示吳郭魚的蛋白質吸收效率從 25%提高到生物絮為基底的養魚系統的 50%左右(Avnimelech *et al.*, 1994)。以上結果再再証實了生物絮在飼料營養方面的貢獻。生物絮中微生物對於廢氮的同化以及接著被養殖物種再攝食及消化，改善環境可持續性，並可能提高盈利能力。

在一已開發的蝦生產系統模型顯示，飼料輸入與打氣需求之間有直接的關係(Hopkins *et al.*, 1991; Boyd, 2009)。飼料利用效率對生物絮密度、微生物需氧量和污泥生產有直接影響。在管理生物絮系統中飼料輸入的文獻中可以找到兩種策略。一項策略側重於使用營養密集型高蛋白飼料，提供具有高度可消化成分的餵養策略，強調控制飼料轉化率(Kureshy and Davis, 2002; Browdy *et al.*, 2009)。目標是提供足夠的飼料，以保持略低於養殖動物最大的需求。第二項策略建議將較低蛋白飼料與以穀物為基底的添加物混合之後再餵蝦。此作為在於鼓勵異營生物絮的生產和廢物的同化(Avnimelech, 1999; McIntosh, 2001; Ebeling *et al.*, 2006)。選擇飼料配方策略可能取決於生物絮的細節。

例如，在低鹽度池塘以較低密度養蝦時，只要防止缺氧下有機物質的累積，高生物絮密度可能發生的危險，如氨和亞硝酸鹽毒性的緊張程度，不太會發生，甚至於零機率。在這種情況下，應考慮使用較低蛋白質飼料或投入更多的碳使環境條件更有利於提高生物絮的密度。另一方面，隨著高鹽度系統中蝦的養殖密度增加，控制生物絮密度和管理廢物堆積至關重要。在這種情況下，由於鹽度較高，並且更須依賴硝化來控制氨和亞硝酸鹽水準，因此在氨和亞硝酸鹽毒性水準方面須具有更大的系統韌性，此時，較高的蛋白質飼料和加強飼料利用效率的努力可以獲致蝦快速的生長和最少廢物的產生。同樣，吳郭魚的養殖和餵養可能與蝦大不相同，因為魚可以更有效地消費水中生物絮顆粒。對於該技術的任何具體應用，瞭解餵養行為與飼料利用效率以及養殖動物和微生物聚落氧氣需求之間的動態關係對於設計和管理生物絮系統效率(尤其是在密度較高的情況下)至關重要。

## (六)水溫的影響

在養殖系統中使用 BFT 在溫度方面是互利的，亦即相互之間是正向迴饋。養殖管理以零或少換水造就了培養生物絮的兩個有利條件：(1)水中營養的累積及(2)水溫的保溫及穩定；而條件(2)不但使養殖動物成長相對的比低溫為快，而且養殖動物較高量且穩定的代謝物，又提供了生物絮生產良好的營養來源。另外，水中生物絮的密集也提供了水中的潛在熱，因為生

物絮中的異營微生物在活動時轉化化學能為熱能也可能對升溫有利。

溫度對生物絮生產的影響與對傳統養殖動物的生產相似。溫度的最大影響是它與成長率的關係。在任何水產養殖系統中，溫度都與生長性能相關，因為所有養殖動物都是變溫(poikilothermic)動物。這一因子限制了某些地區的生長季節，影響了可供養殖的時間長短和生產周期數，以及過冬能力。在全年高溫的熱帶地區，生物絮系統的溫度效應與傳統非以生物絮為基礎的系統相似。然而，隨著人們向更邊緣的溫帶移動，水交換會顯著影響溫度。因此，不換水的培養能力具有允許更穩定的熱與溫度條件的優勢。在蝦養殖中，最致命的病毒性疾病之一，白斑病毒(WSSV)，已被證明與溫度高度相關(Vidal *et al.*, 2001)。在此發現之後，這種疾病的管理策略包括將池塘溫度保持在 29°C 及以上。這些戰略往往需要避免水交換，甚至將養殖池圍在溫室中。使用生物絮技術使養殖者能夠以排除水交換的需求來維持池塘溫度。

### (七)經濟的考量

與依賴水交換的傳統系統相比，基於生物絮的系統在經濟效益方面具有顯著優勢。就變動成本而言，早在 1990 年代中期，就有人建議，在池塘維持溶氧，水平打氣比垂直抽水更具成本效益(Hopkins *et al.*, 1995a)。使用打氣也允許增加放養密度和強化生產。也許蝦養殖盈利能力的最重要驅動因素是保持較高的存活率。在德克

薩斯州池塘養蝦的敏感性分析中，估計總變異的 90.9%可以透過活存率的變化來解釋(Moss and Leung, 2006)。因此，這並不奇怪，由依賴水交換的傳統系統轉變為生物絮系統的主要驅動力是後者具備較有效的疾病控制。在大多數蝦養殖系統中，管理策略優先考慮減少機會性細菌或病毒等的感染可排除因病原體造成的損失。在管理良好的生物絮系統中，生物絮技術以及更加多樣化的微生物聚落能夠減少水交換，從而實現生物安全，減少有害微生物佔據主導地位的機會，從而推動該系統走向更穩定的生存。

Sontakke and Haridas (2018)進行過在印度養殖虱目魚(*Chanos chanos*)的成本分析，生產週期涵蓋從育苗到手指規格的小魚，養殖系統包括清水(控制)系統、生物絮系統和室外池塘系統。考慮到魚苗、飼料、糞便(僅限池塘)、石灰(僅限池塘)、磷酸一鈣(僅限池塘)、硫酸銨(僅限生物絮)、碳源(僅限生物絮)、人工費用、收穫費用和雜項的所有必要成本專案，作者計算出生物絮系統的總淨利潤為 6,533 美元，而室外池塘系統為 4,468 美元，清水系統為 3,779 美元。

### (八)大環境變化下 BFT 在養殖生產上應靈活運用

室外的水池被用來進行水產養殖生產，這養殖池的生態系統遭受由外而內三個層次的影響：(1)大自然氣候(溫度、季節、降雨、氣壓、風向等)、土壤、水文等；(2)為生產而介入的人為操作，如池塘型

式、養殖生產之經營管理與操作；以及(3)池塘內隨時間以及上兩因素而醞釀出的聚落及其動態。本節(三、生物絮技術與水產養殖生產的互動)僅涉及(2)與(3)之間的互動，若再加上(1)則會產生更複雜的交互作用，當然會更加困難去掌握其變化，因而影響了生產。例如一場暴雨會直接影了海水養殖池水的鹽度及溫度。養殖場的操作人員對於水管理採取：降雨前，先抽海水入池；正在降雨時，排池塘表層水，這樣可防止了池水鹽度的突然下降，但仍免不了鹽度及溫度下降。溫鹽的降低以及水中營養的稀釋，使得原有的生物絮聚落由異營微生物主宰的狀態改變成浮游植物如綠藻、矽藻等光合自營微生物為主體。當然，對於養殖動物所排放的氮廢物的作用方式也不一樣了，從異營微生物的同化改變成化學自營的轉換了。若是海蝦養殖池，甚至表觀水色也從偏棕色轉成偏綠色。因此，BFT 在養殖生產的應用上，不能墨守成規而要深入瞭解後才能伺機靈活運用了。

#### 四、BFT 技術在水產養殖應用實務

本節從 BFT 應用在實務方面出發，首先界定適合應用 BFT 的水產養殖系統及其界定之原因。然後舉出可用來影響培養生物絮物理及生化特性的因素，尤其著重於如何在生物絮初始形成階段及後續維護階運用水中碳氮比的管理來操縱生物絮中微生物聚落的演變，同時佐以實例進行如何估計碳氮比計算與說明。所添加的

碳源的類型及其經濟考量、BFT 應用上的趨勢、以及展望和研究需要等等，皆一併敘述在內，以求 BFT 在水產養殖生產的可持續應用。

#### (一)適合應用 BFT 的水產養殖系統

**適用於 BFT 系統的養殖水生動物有哪些？**在過去幾年中，BFT 被廣泛的應用在吳郭魚(Avnimelech, 2007; Crab *et al.*, 2009)、鯉魚(Najdegerami *et al.*, 2016)、鯰魚(Yusuf *et al.*, 2015)、淡水蝦(Crab *et al.*, 2010; Pérez-Fuentes *et al.*, 2013)、海蝦(Burford *et al.*, 2003)等不同階段的養殖，如種魚催熟(Ekasari *et al.*, 2015)、培苗(Samocho *et al.*, 2007; Ballester *et al.*, 2010)、育苗(Emerenciano *et al.*, 2012a)、養成(Burford *et al.*, 2004)等。

BFT 被重視的優勢體現在泰國的養蝦界採用了該技術(FAO, 2022)。最近一篇 BFT 的綜述論文，El-Sayed (2021)也以該技術應用在養蝦為主題。這種關注也反映在研究出版物中，在科學網(Web of Science)檢索生物絮的綜述，65%的出版物以蝦為主題。在科學網生物絮的論文中，吳郭魚是下一個研究最多的動物，佔到 31%。目前尚不清楚 BFT 與蝦和吳郭魚將如何保持此密切的關聯。

目前的生物絮系統在某種程度上僅限於某些動物。在選擇適合生物絮技術的動物時，要考慮的關鍵因素如下：優先候選動物應能夠有效地過濾性的攝食或直接攝食生物絮，雜食性強，能適應高放養密度，能耐水體中高含量的固體/顆粒物，

並且能承受因細菌負荷(bacterial load)的改變和最少的水交換(接近於零到零)引起的環境變化。

考慮到這一點，BFT 系統中最常見的商業生產品種包括吳郭魚、鯉魚和蝦。然而，不適合 BFT 的動物的一個例子是條紋鱸魚，因為它們無法直接以生物絮為食或應對水體中高含量的懸浮顆粒物，因為這可能導致發育問題和嚴重的呼吸窘迫(Au *et al.*, 2004; Hargreaves, 2013)。

最近的研究顯示，商業生產的動物清單可以擴大，特別是針對一些具有特性的海洋或鹹水動物。這包括虱目魚(*C. chanos*) (Sontakke *et al.*, 2021)和橄欖比目魚(*Paralichthys olivaceus*)，它們對於病原體耐受性的優勢(Kim *et al.*, 2021)以及烏魚(*Mugil cephalus*)可以在生物絮中成功生長的能力(Haridas *et al.* 2021)。

最優條件和系統比較通常需要更多的研究來開發商業解決方案。例如，對在 BFT 和 RAS 系統中生長的丁鱸(*Tinca tinca*)和烏魚(*M. cephalus*)幼魚進行的一項研究發現，丁鱸在 BFT 系統中獲得了更好的條件因素(Condition Factor, CF) ( $2.22 \pm 0.25$ )，而在 RAS 系統中為  $2.16 \pm 0.15$  (註：CF 值越小，顯示魚體態越瘦長)；然而，烏魚在 RAS 系統中獲得了更好的 CF (Vinatea *et al.*, 2018)。作者認為，丁鱸幼魚可以在 BFT 系統中成功生長，但需要進一步研究高密度的粘液產生，這在低水交換系統或零水交換系統中可能存在問題。

在淡水中，有多種鯉魚種類可供探索

以 BFT 方式養殖，例如鯉魚(Cang *et al.*, 2019)。南美鯰魚 *Rhamdia quelen* 幼苗已在不同 TSS 的 BFT 系統中生長，包括清水控制(Poli *et al.*, 2015)。作者發現，鯰魚在 BFT 系統中實現了最佳的生長率，TSS 濃度高達 200 mg/L。此外，長在生物絮桶中的存活率更高(Poli *et al.*, 2015)。觀賞魚類也已在 BFT 中成功地被試驗養殖，例如淡水神仙魚(*Pterophyllum scalare*)。在生物絮中密度為每升 25 尾後期幼苗時，與傳統方法相比，生產力有所提高，因此盈利能力有所提高(Ueno-Fukura *et al.*, 2020)。

BFT 也可應用於各種規模的池塘、水箱或跑道(raceway)的養殖系統。在鋪塑膠布的池塘中進行以生物絮為基礎的蝦的密集生產，放養密度從每平方米 500 至 2000 尾，季節性生產從 10 至 20 噸/公頃(1 至 2 公斤/平方米)的例子都有。這類系統正變得相當普遍，並且正在迅速擴展。使用生物絮系統生產吳郭魚的產量一般比在密集養蝦池中的產量還要高得多，可達 10 至 30 公斤/平方米。該技術的第三個應用目標是在水箱或跑道上超密集地生產海蝦。這類系統的生產水準可以達到接近 10 公斤/平方米。

除了非常高的生產力，即單位面積或水體積高產量之外，BFT 也帶來諸多其他效益，使得 BFT 常被考慮用在水產養殖系統。然而並非所有的養殖系統都適合引用 BFT。從過去的例子歸納下來，BFT 所應用的水產養殖系統概述如下：(一)必須是一種集約化的養殖(每平方米至少有 300

克的生物量)，且換水率為零或儘量低 (Emerenciano *et al.*, 2012b)，這樣才能供應並維持足量的有機物質，經轉換成營養來支援自營及異營微生物的聚落；(二)整個水體的水需要持續擾動，並保持高水準的溶氧以誘導生物絮形成；(三)調配水中的營養物質的碳氮比為 12-20:1，使利於異營微生物聚落的形成和穩定；及(四)養殖環境穩定而且操作條件易於掌控，如此一來微生物相，生物絮的主角的發展才能如所預期。

## (二)用來影響生物絮物理特性的因素

### 1、打氣、水流和生物絮的大小及數量

生物絮顆粒的大小對養殖動物的營養的獲取很重要，因為成年魚蝦較幼小或苗期的魚蝦容易獲得大顆粒的生物絮。大多數系統的生物絮的大小都包含在毫米分數到幾毫米範圍內是容易可見的。有研究證明當顆粒直徑超過 5  $\mu\text{m}$  時，可提高蝦的產量 (Moss *et al.*, 1992)。生物絮顆粒的大小可能因培養系統而異。由於泵的葉片的切斷作用，抽水活動較多的系統似乎容易產生較小的顆粒。較依賴氣懸(airlift)機制或標準打氣的系統則可能產生較大的顆粒。粒子大小不僅會影響動物能否獲得粒子，而且如果要從系統中去除顆粒，它們的大小可能決定什麼去除技術是合適的。如果顆粒足夠大，則沈降容器可用於去除部分生物絮顆粒，但是，較小的顆粒可能需要泡沫分餾器 (foam fractionators)。

雖然生物絮顆粒對魚蝦有利，但在最密集的養殖系統中，粒子濃度可以建立到非常高的水準。由於密集的投飼料，如果不管理，粒子濃度超過 1000 毫克的 TSS/L 並不罕見。目前還不清楚生物絮顆粒最有利的濃度是什麼，但研究顯示，濃度的管理有利於蝦 (Ray *et al.*, 2010b) 和吳郭魚 (Rakocy, 1989) 的密集養殖。如下所述，高濃度的生物絮顆粒意味著與生物絮中相關的呼吸生物的濃度升高。過多的生物絮可能會增加氧氣需求，增加打氣/增氧的成本，並最終達到對養殖動物造成不安全水準的壓力 (Beveridge *et al.*, 1991)。過量的顆粒可能導致鰓堵塞，從而阻止養殖動物的氣體和離子交換 (Chapman *et al.*, 1987)。顆粒過多會遮蔽水體，不利於藻類的繁生，同時減少有益的生物的豐度 (Brune *et al.*, 2003; Hargreaves, 2006)。管理生物絮濃度可以降低微生物聚落的老化，促進更年輕、更有營養的生物聚落的存在 (Turker *et al.*, 2003)。此外，將氨氮同化成細胞結構的生物必須在某些時候從系統中去除，否則這些生物，不管是微生物、藻類、微小多細胞生物等在死亡後其屍體仍將分解，所含之氮化物仍將釋放返回水中，當轉化成氨氮或亞硝酸氮，仍然可對養殖動物構成風險。在養殖系統中，除了將生物，包括養殖及非養殖生物，從系統中移出(如收穫或篩除)之外，氮的累積幾乎是不可阻擋的趨勢。唯二的可行之途徑是將含硝酸鹽的

水，引流至非養殖且呈還原態的水域(註：溶氧值呈零及負；氧化還原潛能值(Oxidation-Reduction Potential, ORP 小於約 150mV)，經由脫硝作用將硝酸鹽還原成氮氣或氧化氮，以氣體揮發形式脫離系統。

## 2、通氣能力與生物絮可支援的生產力

據估計，每馬力的通氣能力(aeration capacity)可提高約 375 公斤的產量(Boyd, 2009)，但也有報導稱，能源效率可更高，可高達 1000 公斤/馬力(Avnimelech, 2009)。大多數商業蝦生物絮養殖池的面積在 1000 至 20000 平方米(0.1 至 2 公頃)之間。吳郭魚池塘通常較小，面積為 100 至 2000 平方米。水車和吸氣器(aspirator)用於對池塘進行打氣和攪混。吳郭魚池塘的打氣能力在 100 馬力/公頃之間，魚類生物量在 20 萬公斤/公頃左右，蝦塘的打氣能力在 20 至 60 馬力/公頃之間，所能支持的淨生產力的數據不多。小試驗規模的結果如下：

將蝦養在水桶和跑道系統中，蝦放養密度約為每立方米 300 尾，一般僅鼓風機和氣石即可提供足夠氧氣。有實例已經證明，在每立方米 450 尾放養密度下，經由打氣及生物絮系統可維持每立方米 7.5 公斤的蝦生物量。這是仔細監測、管理生物絮顆粒濃度的結果，而且每次餵食後偶爾補充 30 至 60 分鐘的純氧。在一跑道試驗中，每立方米放養 500 至 900 尾 1 克大小的蝦，並重複使用以

前營運過的生物絮水，發現在 16 周的生長期有必要從第 2 週起就開始連續提供純氧。

當需要將純氧引入生物絮系統時，它可以通過電氧發生器(electrical oxygen generator)、壓縮氧(compressed oxygen)或液氧(liquid oxygen)來提供。液氧，如果有供應且價格合理，通常是較受歡迎的。對於商業規模、高密度養殖操作，液氧比壓縮氧較經濟，而且可根據需求而可控地去供應(例如，餵養後立即提供)。氧氣發生器也可以符合經濟，但需要備用自動發電機，以防停電。氧氣可以通過各種設備引入水中，如沈流打氣錐(down flow bubble contractors)、擴散空氣管(diffusion aerators)，氣石(air stones)和文丘里噴氧器(Venturi's oxygen injectors)。文丘里設計(Venturi design)通常經濟且高效，已經常利用在抽水或其他目的，如循環或加熱。生物絮系統的水必須有很好地混合，以保持顆粒懸浮。如果系統混攪良好，儘管氧氣只能注射到幾個位置，然而在整個系統中溶氧仍能保持良好的水準。有關將純氧注入至循環水養殖系統的原理及工程，可參考 Timmons and Ebeling (2007)及 Timmons and Vinci (2007)的回顧論文。

## 3、BFT 中考慮的關鍵參數-照明

光照是管理生物絮系統時可以改變的環境參數之一。增加光照強度通常有助於生產，降低濁度和硝酸鹽濃度，

同時提高養殖動物的生長率(例如 Fleckenstein *et al.*, 2019)。光照的影響至少部分反映了初級生產者在養殖過程中的作用，經由光合作用導致釋放額外的氧氣。在 BFT 系統中，浮游植物在高光照強度下密度會急劇增加，白天氧氣濃度升高，夜間釋放二氧化碳(二氧化碳)。此外，浮游植物將迅速利用氮和其他氮源，導致高綠水(主要是光合自營微生物 photoautotrophic)的產生和每日 pH、溶氧和二氧化碳的波動(Avnimelech, 2015; Hargreaves, 2013)。

一項對南美白對蝦的研究顯示，在較高光照強度下生長的蝦獲得較佳的飼料轉換率和活存率(Khoa *et al.*, 2020)。此外，作者指出，生物絮顆粒的密度和尺寸越大，亞硝酸鹽和總氨氮(總氨氮)的濃度就越低。很明顯，某些種類的光合微生物對特定波長的光反應較好，這接着可能有利於也可能不利於養殖動物；例如，橢圓小球藻 *Chlorella ellipsoidea* 已被證明在藍光下生長最好(Baidya *et al.*, 2021)。南美白對蝦在綠光下的生物絮研究中生長得更好(黃光、藍光、紅光、綠光處理組和白光 [對照組])，與白光相比，飼料轉換率改善了 17%，活存率提高了 2.4% (Reis *et al.*, 2022)。作者認為這可能是由於不同的光譜導致細菌的潛在光敏性(photosensitivity)的不同；此外，綠燈可以促進對南美白對蝦有益的微生物的生長。

許多作者已經顯示，與特定的綠水或棕色水(主要是異營)生物絮系統相比，正確的光合自營生物和異營細菌(混合營養)的組合提供了最佳的養殖條件和最強大的系統風格(例如 Nurarina *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2016)。重要的是，一個系統既包含上述兩種類型的生物體，也包含第 4 節中概述的生物體，浮游動物。為什麼會出現這種情況的原因是，異營生物在廢水管理方面遠遠優於光合自營生物，而光合自營生物在白天產生氧氣，可以含有有價值的脂肪酸，如 omega-3 和 omega-6，並且通常比異營生物對能量的要求更低(Kim *et al.*, 2019)。

研究特定微生物群聚組成與生物絮系統內不同光譜的關係可能有助於揭示各種光譜如何促進或抑制特定微生物的生長的關聯特性以及和整個生物絮體內的後續關係。客製的照明體系的開發也可能取決於更廣泛的問題，例如任何具體實施的性能和成本之間的商業和能源權衡。

### (三)用來影響生物絮生化特性的因數-以添加碳來改變碳:氮(C:N)比率及其應用

對於水質的維護，BFT 主要是通過細菌聚落對自營微生物的控制，採用高碳氮比來實現的，因為氮的副產品很容易被異營菌所吸收。需要高碳氮比才能保證最佳的異營細菌生長，使用這種能量進行維護(呼吸、餵養、運動、消化等)，同時也用於

生長和產生新的細菌細胞。

生物絮中碳氮比的管理通常分為兩個階段：(一)初始形成階段，採用碳氮比為 12-20:1；(二)維護階段，根據總氨氮(TAN)值使用 6:1 的碳氮比(Emerenciano *et al.*, 2017)。

在培養時期開始時，水中的高碳氮比(12-20:1)是促進和穩定生物絮異營聚落的關鍵因素(Avnimelech, 2015)。高碳濃度會誘發異營細菌的氮副產品同化，並取代藻類的碳同化能力，因而促進細菌生長。有氧微生物能夠有效地將飼料轉化為新的細胞材料(40-60%的轉化效率)，而不像那些更高階的生物(如草、肉食性之微小生物及底屑食性之微小生物)花費大約 10-15%的轉化效率來增加體重。當懸浮固體達到至少 5 mL/L(使用 Imhoff 圓錐體測量)時，該系統則被認為是“成熟”(約經 30 至 50 天)，此時 TAN 和亞硝酸鹽峰值已經發生過了。為了加速水的“成熟”(生物絮平衡)，一旦衛生條件令人滿意，就可以使用以前所培養的生物絮來接種。

需要注意的是，只要生產週期開始進行，硝化(化學營養)細菌在氮化物的控制中扮演重要角色。此外，懸浮顆粒或固體(生物絮)也將隨著時間的推移而增加。考慮到這些資訊，碳添加可以減少(甚至停止)，防止培養系統中固體(生物絮)的過剩，導致溶氧的過度消耗(Vinatea *et al.*, 2010)和蝦/魚鰓的阻塞(Schweitzer *et al.*, 2013)。

在維護階段，總氨氮值 TAN 的監測

是水質維護的重要工具。當 TAN 值高於每升 1.0 毫克時，建議加入碳源，使碳:氮比達到 6:1 (Ebeling *et al.*, 2006)。在這種階段，由於細菌同化速度較快，因此 TAN 減少，建議使用富含單糖和寡糖的富含碳水化合物化合物的類型(如糖蜜和其他糖)。

以下是第一階段和第二階段的碳:氮比計算的示例(Emerenciano *et al.*, 2017) (表 1)。對於這兩個示例，預設條件或狀況如下：飼料的碳含量將被視為 50% (基於乾物質，或乾重)。對於碳源，選擇糖蜜(molasses) (Schneider *et al.*, 2006)，在這種情況下，其含量(乾重)也是 50%。需要注意的是，碳含量會根據乾物質的組成和碳源類型而變化。實際上，飼料的乾燥物質為 90%，或水含量不大於 10%。魚和蝦的同化效率分別假設為 30%和 20%。

示例 1：在吳郭魚養殖箱中，每天投餵 4000 克(公斤)的飼料(含 30%的粗蛋白質)。在生物絮初始和形成階段，調整碳:氮比，使之成為 20:1。

計算 1：從飼料經由吳郭魚攝食後進入水中的碳:氮比：

\*碳含量：4000 克飼料× 0.9 (90% 乾物質) × 0.5 (飼料的碳含量約 50%) × 0.7 (當吳郭魚同化效率為 30%，則有 70%的廢物留在水中)= 1260 克碳含量。

\*氮含量：4000 克飼料× 0.9 (90%乾物質) × 0.3 (飼料的粗蛋白含量約 30%) / 6.25 (蛋白質換算成氮含量的係數，定值) × 0.7 (當吳郭魚同化效率為 30%，則有 70%的廢物留在水中) = 121 克氮含

量。

結果顯示，經由吳郭魚攝食代謝後進入水中的碳:氮比為 10:1 = 1260 克碳含量/121 克氮含量。

計算 2：要添加多少碳於水中，擴大碳氮比使之成為 20:1：

我現在有 121 克的氮經由吳郭魚攝食代謝後進入水中 × 20 = 我總共要有 2420 克的碳，但我已經有 1260 克的碳。所以總共要有 2420 克的碳 - 1260 克已經有的碳=我需要另外添加 1160 克的碳。

如果糖蜜的碳含量為 50% (基於乾物質)，1 公斤糖蜜代表 500 克碳。因此，1160 克的碳的需求將代表 2320 克(2.3 公斤)的糖蜜(每天應用，直到生物絮成熟)。

示例 2：在南美白對蝦(*Litopenaeus vannamei*)養殖箱中(30 噸水量)，水中總氨氮(TAN)濃度為 20 毫克/升。如果我想要達到維護階段的碳:氮比的 6:1 要求，應如何處理？

計算：

\*氮含量，以總氨氮計之：30 噸水的總氨氮量= 20 毫克/升 × 1000 升/噸 × 30 噸 / 1000 毫克/克= 60 克總氨氮

\*碳需求量，以糖蜜為來源計之：60 克× 6 (碳:氮比為 6:1) = 我需要 360 克的碳。如果我的糖蜜有 50%的碳含量(基於乾物質)，1 公斤糖蜜代表 500 克碳。因此，360 克的碳需求量將代表 720 克(或 0.72 公斤)的糖蜜。

\*註：將 0.72 公斤的糖蜜一次潑撒，並在 2~3 天後測水中總氨氮，若濃度降低，顯示生物絮中異營菌的同化功能見效，當總氨氮值仍高於 1 毫克/升時，可依現存總氨氮濃度計算再次潑撒糖蜜、監測總氨氮，循此步驟直至濃度低於 1 毫克/升，則可停止潑撒。另外，此總氨氮 1 毫克/升的數值並非固定門檻的值，一般參考養殖物的種類、生命期的所謂“安全濃度”，然而仍須考量環境狀態的變化；穩定則可能升高，波動大則須降低。這部分則須從經驗中歸納而得。

表 1.1 公斤飼料(粗蛋白含量為 26%)的碳氮比，包括經維護調整後之計算值(基於 Emerenciano *et al.*, 2017 的計算)

	飼料重 (克)	乾物質 含量(%)	廢物 (%)	飼料碳 含量(%)	粗蛋白 含量(%)	粗蛋白 氮含量 (%)	總量 (克)
碳	1000	90	70	50*	無提供	無提供	315
氮	1000	90	70	無提供	26	16	26
碳氮比							12:1
維護調整 碳氮比	碳需求 (克)	玉米粉 (克)	黑糖蜜 (克)	米麩 (克)	大豆粉 (克)	麩粉 (克)	
8:1	12	26	32	28	18	29	
10:1	15	33	41	35	23	36	

#### (四)碳源的類型和經濟學

生物絮中使用的碳源通常是來自人類和/或動物食品行業的副產品，價格便宜，且可在當地獲得。廉價的碳水化合物來源，如糖蜜，甘油和植物粉(即小麥、玉米、大米、木薯等)可在放養苗前(施肥階段)和養成階段之前使用，目的是：(1)為生長的第一階段提供食物，以及(2)分別保持較高的碳:氮比率和控制培養桶中的氮化物的鋒值(N-compound peak) (Avnimelech, 1999)。

隨著所選擇的碳的來源，有機施肥可被視為生產成本的一個重要項目。應測試本地可用的來源，但細菌同化的特性肯定需要考慮。單糖和寡糖這類簡單而富含碳水化合物的類型(如富含葡萄糖、蔗糖的糖類等)與富含複合多糖類型(如澱粉和纖維素)將會導致不同的細菌的同化、營養價值和生長。已有研究評估了不同碳源對淡水長臂蝦後期蝦苗的影響。除了價格，不同的來源將導致不同的營養價值的生物絮。與葡萄糖和醋酸鹽相比，使用甘油時，觀察到 n-6 PUFA 的值較高(Crab *et al.*, 2010)。

對於每個階段(初始和形成階段或維護階段)，應根據價格和目的來選擇不同的來源。例如，右旋糖(高純糖)與糖蜜，精製糖與穀物副產品等。穀物和塊莖含有高濃度的碳(碳水化合物)，作為多糖。一些用作碳源的穀物還含有蛋白質和脂質。有研究將三種碳源用在同一吳郭魚養殖與生物絮的實驗並進行比較(García-Ríos, 2015)，

發現玉米粉含有 11.79%的蛋白質和 2.8%的脂質，小麥含有 15.5%的蛋白質和 3.73%的脂質。不含蛋白質和脂質的未精製糖(單糖)促進吳郭魚的最佳生長和組織最高蛋白質含量。糖的化學結構有可能對異營細菌具有很高的生物利用性，因此細菌生物量迅速增加。

魚類僅吸收飼料中約 20%-30%的氮形成其生質，其餘部分成為廢物以氨的形式排泄回系統中(Yogev *et al.*, 2017)。作為廢物產生的一個例子，Páez-Osuna *et al.* (1997)和 Casillas-Hernández *et al.* (2016)的報告說，使用土池和充分換水技術進行南美白對蝦(*Litopenaeus vannamei*)的池塘養殖，每生產出一噸蝦，同時釋出 28.6-73 公斤氮和 4.6-12 公斤磷。相比之下，da Silva *et al.* (2013)估計，BFT 系統中每生產一噸的南美白對蝦，廢物產量為 20 公斤氮和 4.1 公斤磷，皆低於前者之下限。

BFT 提供了控制某些病原體的發生和數量的可能性，例如弧菌，這可能導致蝦，尤其是南美白對蝦的重大疾病的問題(de Souza Valente *et al.*, 2020)。正如 Panigrahi *et al.* (2018)所證明的那樣，最佳的碳氮比可用於增強細菌聚落並擊敗致病菌。作者發現，碳氮比在 10 到 20 之間，可以在這方面顯示最好的結果。此外，作者指出，在所有碳氮比處理(5、10、15 和 20)中，亞硝酸鹽、硝酸鹽和總氨氮含量均有所降低。這是由於微生物對氮廢物的同化。

關於基於 BFT 的南美白對蝦培養物

的其他研究支持這樣一種觀點，即在高密度養蝦狀況下，主要由自營細菌和微藻組成的混合生物絮系統(也稱為混合營養系統)比異營細菌較高的系統實現了更高的飼料轉換率(Martinez-Porchas *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2016)。

BFT 系統中的吳郭魚養殖已經使用各種碳水化合物來源進行了試驗，如糖蜜、大麥粉、澱粉和玉米粉。使用過這些類型的碳源的研究人員發現，每種碳水化合物都在控制系統上得到了改善，降低了飼料轉換率，增強了身體成分，存活率以及肝臟和消化酶。作者指出，當使用簡單的碳源時，肝酶活性會增加，而當使用複雜的碳源時，消化酶活性會提高(Khanjani *et al.*, 2021)。

需要注意的是，除了將碳和氮添加到生物絮系統中外，還需要其他營養物質來確保微生物有效生長。例如，矽是微藻正常功能和生長的重要元素，尤其是在矽藻中。通過添加矽酸鹽，Martins *et al.* (2014) 顯示，在南美白對蝦(*L. vannamei*) BFT 系統中，像 *Amphora coffeaformis* 和 *Conticribra weissflogii* 這樣的矽藻可以保持在高細胞密度。因此，這為養殖蝦提供了不斷獲得富含長鏈多不飽和脂肪酸(例如二十碳五烯酸)的額外食物資源。

除了二氧化矽對生物絮系統產生積極影響外，可能還需要在生物絮系統中補充其他元素，例如營養重要的微量金屬，例如硒、碘、鋅和鈷。這種營養需求在高放養密度養殖水生動物、沒有水交換的封

閉系統、同一生物絮用於多個生產批次、僅使用單一來源的生物絮粉作為飼養養殖動物的食物來源、使用含有少量碳酸鹽和金屬的水開始養殖時，這種營養需求可能尤為明顯，或因蒸發而引起的補充水位(例如收集的雨水)。

此外，將無機金屬直接添加到生物絮中也有可能使它們更容易被養殖動物消化，因為它被生物絮中的微生物吸收並使其更具生物利用度(bioavailability)，例如，用硒滋養過的酵母和輪蟲(Ponce *et al.*, 2018; Yang and Yang, 2021)。

#### (五)橈足蟲-生物絮技術(BCf):很可用在密集式養蝦的技術

橈足蟲-生物絮(Biofloc-copefloc，簡稱 copefloc，或更簡稱 BCf)技術，是泰國將引進的生物絮技術(Biofloc Technology)，以生物絮為基礎，再結合橈足蟲的培養，以兩者的混合物作為蝦的天然餌料，所發展出的一種新的密集式的對蝦養殖技術；嚴格而言，不使用人工飼料。BCf 是迴圈養殖(circular aquaculture)系統的一種技術，在放養蝦後期幼蟲蝦苗入池前提供“橈足蟲類”的天然活餌料，有助於池塘水質的穩定，提高成活率，具有最快的生長速度，利潤高，完全可持續，不會對環境造成任何破壞(Santhanam *et al.*, 2015)。

眾所周知，BCf 技術在當前情況下非常重要，原因包括：在不顯著增加水和土地這些基本自然資源使用的情況下生產更多的水產養殖產品。發展不會破壞環境

的可持續水產養殖系統。建立提供公平的成本/效益比的系統，來支持經濟和社會可持續性。

### 1、BCf 的優勢

BCf 技術被認為是一種有效生物絮的替代系統，因為營養物質可以不斷回收和再利用。水中的游離氨被異營微生物中轉化為其本身的生質蛋白，聚集成為懸浮在水中的生物絮顆粒。這些生物絮提高了生物安全水準，降低了因換水而感染的風險，不污染環境，降低了食物、藥品和化學品的成本，因而更符合經濟效益。這技術雖然操作簡單，但因為完全不使用人工飼料，因此可將 10-12 天後期幼蟲蝦苗直接放養入池，而無需適應環境。這技術不需要定期換水，因而減少了抽水的能源成本，也降低了供水中傳染性病原侵入的風險。這技術也不需要任何類型的過濾系統，而過濾系統需要複雜的設備，運營成本和高技術能力。BCf 系統能夠改善環境，因為它產生了天然食物、生物物質，並藉着水生動物將廢棄的營養重複使用，這操作過程相當簡單。BCf 技術完全避免了化學品或抗生素的使用，從而提高了產品和商品的品質和安全性(Santhanam *et al.*, 2019)。

### 2、蝦的食物來源

該系統中使用的飼料主要是穀物和天然食物，如微藻、橈足類(copepod)和端足類(amphipod)動物。這些食物營養豐富，對於蝦的生長非常有益。橈足

類是魚蝦非常重要的餌料生物，尤其是在幼苗階段，而且微生物又可以將有機廢物轉化，使其蛋白質含量更高。

### 3、用 BCf 生產蝦食物的過程

將橈足類動物接種在水深 1.2-1.5 米的池塘中。以強曝氣 24-48 小時完成增氧。將每公頃 300 公斤的米糠與益生菌一起發酵後，裝在麻布袋中放入池底。為池塘中的橈足類動物創造有利的環境，曝氣連續進行 7-10 天。生物絮的引物溶液(primer solution)以 1 L 水，10 g 穀物(魚粉，豆粉等)和 10 mL 枯草芽孢桿菌(*Bacillus subtilis*)菌液(細菌密度為  $10^6$ /mL)的比例所製備的混合物經發酵完成。在強曝氣條件下進行 48 小時的發酵，溫度保持在 25-28°C，以添加 pH 緩衝液將 pH 值保持在 6.0-7.2。當微生物快速繁生時，會在水面上形成大氣泡，即可將此生物絮誘餌添加在池塘中餵予橈足類動物。

### 4、益生菌枯草芽孢桿菌的培養

益生菌枯草芽孢桿菌 *Bacillus subtilis* 的培養可根據 Zokaefar *et al.* (2012)的方法進行。枯草芽孢桿菌以 30°C 的震盪培養箱在溶原肉湯(Lysogeny broth)中生長 48 小時。然後將菌培養液在 4°C 下以 3000×g 離心 10 分鐘，丟棄上層清液後，將沈澱的細菌重新懸浮並在無菌生理鹽溶液(NSS，0.9%NaCl)中洗滌三次。懸浮液的細胞密度以 600nm 的分光光度計計算，並且還與使用擴散板(spread plate)技術的菌

落形成單位(CFU)的數目形成相關性。這些懸浮液將用作蝦池中大規模培養菌的接種物(inoculum)。

## 5、培養微藻

微藻的培養可根據 [Perumal et al. \(2015\)](#) 的方法來完成。簡言之，藻類種群培養可在一個特殊的空調房中進行。儲備培養物(stock culture)可保存在 1 L 或 2 L 培養瓶以及 5 L 或 15 L 塑膠容器中。先用過濾袋(1  $\mu\text{m}$ )將水過濾，並使用高壓滅菌器滅菌，冷卻後轉移到培養瓶中。培養瓶用棉花塞住或用鋁箔覆蓋。所有用於藻類培養的容器在使用前須正確消毒並在烤箱中乾燥。用於室內微藻蓄培的培養基依物種進行選擇。在生長期，將約 10 mL 的接種物轉移到培養瓶中，培養物以 1000 lux 的光照和 12:12 小時的光照和黑暗周期來培養。8-10 天後，將可達到最大指數相位(maximum exponential phase)。在整個培養期間，溫度和鹽度將分別保持在 23 至 25°C 和 28 至 30 ppt 之間。培養需提供連續曝氣。8-10 天後，當達到最大指數相位時，將光強度減少到 500 lux 以進一步生長。達到最大細胞密度所需的時間因物種而異。在受控的光照和溫度條件下，無論有沒有曝氣，藻類都會生長。在最大指數級生長階段，培養物的顏色變為深綠色。每個物種最多保留五個培養瓶作為原液培養。

微藻的大規模生產可使用玻璃纖維罐。為了藻類的有效生長，可添加商

業肥料，即硫酸銨、過磷酸鈣和尿素，比例為 10:1:1。每 100 L 水，可在培養罐中加入 2 L 接種物。對於培養物須提供持續和有利的曝氣，並且將培養物始終保持懸浮狀態。

## 6、橈足類動物的培養

橈足類動物的培養可參照 [Santhanam et al. \(2015\)](#) 的方法進行。橈足類動物用 158  $\mu\text{m}$  網目的浮游生物網從淡水、鹹水和海洋環境中收集。收集後，使用一組不同大小網目的疊加篩子(superimposed sieves)從大網目到小網目遞減篩選大小混合的浮游動物樣品。先將浮游動物樣品通過 500  $\mu\text{m}$  的網目粗略篩選，來去除魚和蝦幼蟲。然後，用 190  $\mu\text{m}$  網篩分樣品，以去除橈足類的輪蟲和無節幼蟲。最後，使用細刷、針頭和斯坦普爾移液器 Stempel pipette 在顯微鏡下收集主要包含成年、晚期橈足蟲和抱卵雌性橈足蟲的樣品。選擇雌性蟲的目的是使培養物單純且不受其他橈足類動物的污染。

將已知數量的橈足蟲，包括雄蟲和雌蟲或抱卵雌蟲，以細刷、針頭和斯坦普爾移液器進行分離。分離出的橈足蟲先放養在 250 mL 玻璃燒杯和錐形燒瓶中，無曝氣、含微藻。之後，將橈足蟲進行續代培養(sub-culture)直到裝滿 7 L 塑膠容器。續代培養要用過濾水並啟動劇烈曝氣。然後，橈足蟲將被轉移到一個橢圓形的平底玻璃纖維罐中，該罐中裝有 100 L 過濾水和用於大規模培養的

劇烈曝氣。建議查核的水質參數，如溫度、鹽度、pH 值和溶解氧，將分別保持在 26-30°C、28-32‰、7.5-8.5 和 5.0-7.5 mL/L 的範圍內。橈足蟲每天餵食混合微藻，包括小球藻 *Chlorella marina*、鹽鹼杜氏藻 *Dunaliella salina*、加爾巴納異綠藻 *Isochrysis galbana* 和納米綠藻屬 *Nannochloropsis sp.*，濃度為 25,000 個細胞/mL。

### 7、先導性規模的橈足蟲養殖

先導性規模(Pilot-scale)的橈足蟲的養殖要用到不同容量的 FRP 桶來完成。先將 FRP 桶用低殘留的實驗室洗滌劑(例如 Alconox 或 Sparkleen)和水清洗，然後徹底沖洗。接着，用 100%鹽酸(HCl)溶液處理 FRP 桶，再用過濾水徹底沖洗。桶要浸泡浸三次(每次 24 小時)，以去除製造過程中的所有水溶性殘留物。接著用過濾過的、紫外線處理過的水裝滿到桶的邊緣，並根據需要調整鹽度，水用每升 60 mL (0.2 mL/L)商用 10%次氯酸鹽溶液氯化。讓處理過的系統靜置 24 小時。此後，系統將用 60 mL 的硫代硫酸鹽儲備溶液進行脫氯。然後開始劇烈曝氣。一小時後，用「游離氯」試紙驗證「游離氯」殘留為零。將處理過的水曝氣至至少含 6 mg/L 溶解氧(DO)。在收集和處理之前，要檢查水的條件，例如鹽度，pH 值，DO，顏色和氣味(特別是 H<sub>2</sub>S 的“臭雞蛋”氣味)。水要通過 50、10 和 1 μm 網袋連續過濾，然後是砂濾，碳濾，生物篩檢，最後通過紫外

線滅菌器。濾袋要清洗，然後在正常使用情況下每週一次在次氯酸鹽溶液中消毒過夜。過濾後的、紫外線處理過的水才直接用於培養橈足蟲。過濾後的水用 0.2 mL/L 的 10%商業次氯酸鹽溶液處理，並在不曝氣的情況下靜置過夜。之後，這些水用硫代硫酸鹽溶液體積(v/v)以 0.2 mL/L 進行脫氯。脫氯水用於填充所有洗滌瓶、堆疊篩架、收穫樣品、蟲族群計數工具等。先導性規模的橈足蟲培養從乾淨的 FRP 桶、藻類和過濾的、紫外線處理過的水開始。首先將已知數量的抱卵雌蟲放養入桶。抱卵雌蟲會在 36-42 小時內釋放無節幼蟲。每天用與虹吸軟管連接的分級篩子(graded sieves)清除碎屑，以便將成蟲和無節幼蟲還回養殖桶。以 5-7 天的間隔開始連續分批培養，連續生產橈足蟲。用冷卻的、過濾的室內空氣來曝氣。所有曝氣要使用一次性、在管內(inline)的、孔徑 0.2 μm 的抗菌空氣篩。曝氣是要維持藻類培養、使二氧化碳飽和、pH 穩定和均勻混合。堆疊的篩架和洗滌瓶以培養桶同溫度下處理過的海水洗滌。以虹吸軟管連接虹吸頭和堆疊的篩子。橈足蟲收穫後過濾到濕的獨立式篩子上。隨著培養桶水位的下降，要經常沖洗以清除粘在側壁上的橈足蟲。每周要以新處理過的水來更換培養桶容積 30%的水。

### 8、端足類的養殖

端足類(Amphipod，另中譯片腳類)的培養可根據 [Baeza-Rojano et al. \(2013\)](#)

的方法來進行。養殖桶為 100L 的圓柱形桶。養殖桶須要有流動的海水，每小時完全換水一次。鹽度保持在千分之 37–39，溶解氧保持在 5–9 ppm。水溫隨自然波動在  $25 \pm 3^\circ\text{C}$  的範圍，並使用自然光週期，14 小時光照 10 小時暗。端足蟲每天要餵食豐年蝦無節幼蟲(500 毫升海水，密度為 1400 無節幼蟲/毫升)和微藻混合物，如 *I. galbana* 和 *Tetraselmis suecica* (2 升海水，平均密度分別為每升  $11.9 \times 10^6$  細胞和  $2.9 \times 10^6$  細胞)。豐年蝦餵食前可先以市售的合成營養物加強其營養。當豐年蝦和微藻被添加到培養桶時，減緩水流速來增加餌料生物的停滯時間 (Nakajima and Takeuchi, 2008)。端足蟲可自河口、沿海潮間帶、紅樹林地區和沼澤死水區採集得來。這些蟲可從底泥中分離出來，並通過曝氣與一些沈積物或牡蠣殼一起運送到實驗室。在培養桶內可放置數片  $30 \times 50 \text{ cm}$ 、三種不同網目的塑膠網作為端足蟲的人工棲居基質。端足蟲的養殖可從在養殖桶放養已知數量的種蟲(例如 125 隻雌性和 125 隻雄性)開始。放養種蟲三個月後，可將塑膠網收回，單獨的收集附網的種蟲。從這羣獨立分出的種蟲族群，可以擴大在大的水泥池或 FRP 桶進行量產，爾後再放養到蝦池。

## 9、操作

BCf 系統不會產生任何廢物，因此不須要幫浦系統進行廢物之收斂並收集。替代的，卻須要佈局曝氣系統來提

供更多的氧氣給池塘中的微生物、餌料生物以及蝦。BCf 養殖技術要設計底部曝氣系統，亦即在 PVC 管的側面鑽小孔，孔之間的距離約 25~30 cm，形成一個覆蓋池塘總面積 40% 的管路網路。蝦放養密度每平方米不多於 50 尾，在此密度下，蝦完全依賴天然餌料生物，卻也能成長良好。在養殖過程中，業者必須管理和維持天然餌料生物的數量和密度，即池塘中的生物絮的量體。為了每天要知道池塘中橈足蟲的密度，可使用水桶在池塘中不同位置取 50~100 升的水，然後通過網目 50~70  $\mu\text{m}$  的浮游生物網的過濾，將濾出物置入 600 mL 的小瓶中，再以 2~4% 的福馬林固定之。接著，吸取 1 mL 放在顯微鏡下以 10x 和 40x 的放大倍數，通過按座標移動方塊的方法來計數。接着計算橈足蟲的密度，並以之為基礎調整餵養橈足蟲所需培養的益生菌量，同時評估橈足蟲族群所每日所能支撐的蝦族群量。為了刺激生物絮的形成和維持其穩定性，應在培養系統添加及補充碳源。碳源可來自：穀物、糖蜜、甘蔗渣漿、秸稈、草。在生產週期中，生物絮的濃度應保持在 1 mL/L。

## 10、小結

如今，生物絮-對蝦的概念作為一種可持續的集約化對蝦養殖技術越來越受到關注。現在，這種技術可以實現高放養密度，該技術將生物絮-copefloc 技術與池塘中的天然活飼料生產相結合，

我們稱之為 copefloc 技術。copefloc 養殖場將提供一些關於養殖場設計和管理理念的最罕見的見解，如蝦類養殖的可持續替代方案，這些理念同樣適用於魚類集約化養殖。

## 總結—生物絮技術的研究前景與展望

### (一) BFT 基礎研究的期待

本節以羣組和總體基因組學(也稱元基因組學, metagenomics)對生物絮聚落的多樣性作更深與更廣的探討與瞭解。

浮游植物、自由細菌和附著細菌、有機物顆粒及其攝食的微生物群，如輪蟲、纖毛蟲、鞭毛藻、原生蟲、橈足蟲等生產者(自營生物)、消費者(異營生物)及分解者所組成的生物絮，已是很完整的聚落了。由於微生物在水產養殖的識別、瞭解、和使用上的須要，養殖場域中生物絮動態的研究在過去十年越受到矚目與重視(Moriarty, 1997)。長期以來，以培養基(culture media)為基礎的技術是被用來瞭解微生物聚落的主要戰略，包括微生物組成，生物膜和生物絮的生物相。然而當考慮到>80%的細菌中在任何環境中能茁壯成長已是容易培養的，或是根本無法培養的，這培養基為基礎的作法是一個非常膚淺的方法(Streit and Schmitz, 2004)。克服了這獨立培養技術，如變性梯度凝膠電泳(DGGE, denaturing gradient gel electrophoresis)，特別是高通量定序(下一代的定序)，增加了研究這些類型的集團微生物的多樣性的深度和覆蓋面(Xia *et al.*,

2005; Martínez-Córdova *et al.*, 2017)。

因此，總體基因組學是一個相對較新的基因組學的子學科，它已成為分析微生物聚落內所含複雜基因組合的有希望的科學工具。然而，在一些農產業學科(agro-industry)，如水產養殖中，這個子學科的應用並不常見。其原因可歸諸於這項技術的高成本；然而，在過去十年中，價格已經大幅下降，現在各個實驗室有可能使用高通量定序來進行總體基因組學研究。這項技術提供了可能性去揭示在任何生物絮中滋長的大多數的細菌。無論 BFT 的使用在現在是否是現實，而且有否希望成為革命性的戰略，透過新的基因組工具來研究他們的生物學仍然可提供這些生物聚落大量的資訊。

### (二)目前 BFT 在養殖水生動物中的特殊應用

理想情況下，BFT 生產的目標是通過微生物吸收代謝廢物來控制和維持良好的水質，同時減少廢物排放，並且為養殖動物提供額外的食物來源，從而降低昂貴、不必要的過濾系統的成本並減少飼料費用。

有據可查的是，使用流水式、池塘式和網箱/圍欄等傳統養殖系統進行生產會產生過多硝酸鹽和磷酸鹽形式的廢水。這些與有害藻華直接相關，藻華會崩潰並嚴重消耗溶氧，形成缺氧環境，產生還原態的毒性物質如氨、亞硝酸、硫化氫，進而危害養殖動物，導致死亡(Khan and Mohammad, 2013; Páez-Osuna *et al.*, 2003)。

BFT 的一個優點是在水生動物中產生具有味覺和嗅覺刺激作用的特定胺基酸。這樣可以提高生長速度，減少飼料浪費。已經證明，精胺酸、丙胺酸、甘胺酸和谷胺酸等胺基酸存在於生物絮中，這些化合物積極引起蝦對飼料的注意(Ju *et al.*, 2009; Nunes *et al.*, 2006)。此外，與使用水交換技術的標準再循環系統相比，南美白對蝦的高度集約化 BFT 養殖可有效提高氮及磷的吸收率分別提高 70%和 66% (da Silva *et al.*, 2013)。

如前所述，硝酸鹽和磷酸鹽等營養物質是經由代謝所產生的廢物，並在整個生物絮系統中再循環，在這個階段，它們被重新吸收並被同化成微生物的生質。儘管生物絮仍然是控制硝酸鹽和磷酸鹽水平的有效率的工具，但差遣這工具有好處也有挑戰，尤其當用在大商業規模上。因此，需要進行優勢、劣勢、機會和威脅分析，以確定它對相關商業養殖場是否可行(表

2)。在選擇使用 BFT 時要考慮的關鍵方面是針對個別農民的需求；然而，一些更具吸引力的決定因素可能是減少水浪費、降低飼料轉換率和提高生產力，這是由於水資源和可持續的飼料有短缺的潛在性。

### (三)BFT 應用上的趨勢

雖然從理論的推演、從試驗中機制的解明、從已具商業規模的養殖場經營結果的分析、甚至從水土能源等資源以及碳足跡的節約來評估，當水產養殖必然走向密集化的路上，BFT 的應用已贏得信心可使得這條路改善得更平坦、更寬廣。然而為何 BFT 仍未被廣泛的應用，在有些地方甚至尚未被接觸到。究其原因，不外乎現代水產養殖科學發展的歷史不到百年，而與 BFT 發展最須密切支援及參考的水中微生物生態學(Aquatic Microbial Ecology)非常複雜而且目前研究的涵蓋面卻甚小，尚不足以解答許多現場遭遇的問題。

表 2. 應用生物絮技術在水產養殖系統的 SWOT(優勢、劣勢、機會、威脅) 分析(McCusker *et al.*, 2023)。

<p><b>優勢</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 減少飼料浪費</li> <li>2. 降低飼料轉換係數(FCR)</li> <li>3. 有效的控制養殖物種代謝廢物</li> <li>4. 提升生物安全</li> <li>5. 更高的整體生產力</li> <li>6. 減少水的浪費</li> </ol>	<p><b>劣勢</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 生物需氧量(BOD)變高</li> <li>2. 能耗增加</li> <li>3. 產出更多二氧化碳</li> <li>4. 可能須要額外的固形物的過濾</li> <li>5. 並非適合所有的養殖物種</li> <li>6. 不適冷水環境</li> </ol>
<p><b>機會</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 增加當地就業機會與職訓</li> <li>2. 具商業合夥的機會</li> <li>3. 有能力提供優質產品</li> <li>4. 可持續水產養殖的作法帶來公共利益</li> </ol>	<p><b>威脅</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由於關注細菌和微生物而產生負面的公共式範</li> <li>2. 致病生物可能發展成一個不易維護的系統</li> <li>3. 若增氧出問題應該要有立即的反應及對應</li> <li>4. 有潛在可能某些微生物會產生臭土味的化合物</li> </ol>

即令如此，BFT 在應用上已顯現出以下的趨勢：

### 1、改善養殖設施促進生物絮的培養

使水質及生物絮的培養少受到天然狀況的影響可從改善養殖設施做起。至今 BFT 應用較多且成果較彰顯的例子其養殖設施大都屬於跑道式的，使得水流方向一致，流速、溶氧分佈、生物絮懸浮皆較均勻；池底鋪塑膠布的，使得水質不受到底泥的影響、污泥較不會粘黏累積在底部；有中央排汙系統的，使得池底較不會有廢物沈澱累積，形成局部缺氧，進而釋放還原性毒性物質；半封閉或全封閉狀況下部分或全部循環的養殖系統，使得養殖環境穩定、少受外在因數影響而產生不易掌握的變化；總而言之，較能管控的養殖環境，使得較易操作以培養生物絮[註：參考四、(一)、適合應用 BFT 的水產養殖系統一節所歸納的 BFT 所應用的水產養殖系統的四大狀態或條件。]

### 2、標的微生物聚落的生物絮的培養

培養出含有標的微生物聚落的生物絮的作法有二：

(1)將已適應於原養殖環境及生產操作的生物絮接種在新的養殖系統，使得生物絮聚落能提早加速建立，又能累積操縱培養最適此養殖環境及生產條件的生物絮聚落的寶貴經驗；

(2)接種並繼續注入經選擇的益生菌，使之發展出此類益生菌為優勢的生物絮聚落，細部的原因包括：(i)有助於

穩定異營微生物聚落，並與自營微生物(主要處於初始階段)競爭；(ii)有助於有機物的回收；(iii)控制懸浮固體和氨氮水準。

生物絮技術原理在世界許多地方被擴大應用，已更強化這種系統固有的潛在優勢，同時也提出了更多的問題和研究的需要，來克服問題並提高效率。也許最重要且需要的領域是加深對複雜的生物絮微生物聚落的瞭解，並開發管理技術，以指導和優化其建立、穩定和控制其結構和活動。這與系統中諸多水的使用的問題以及生產單位內及之間水再利用率有密切相關。還需要進行更多的研究，來更深入地瞭解影響生物絮系統污泥產生與其管理的因素，從而將飼料轉化為魚肉或蝦肉的效率極大化，同時也將廢物的產生極小化。池塘和水箱系統的工程和設計是這方面的重要研究領域，特別是在提高能源效率和減少碳足跡方面。基因選擇計劃已經產生了吳郭魚和蝦的改良品系，顯示了找出成長快且更強悍的族群的潛力。選出在生物絮為基底的系統中能發揮表現的族群，未嘗不是一個重大機遇。如前所述，發展專業飼料和改進飼料管理是重中之重，因為它們對經濟以及對水質和微生物聚落管理雙重的影響。繼續開發和應用生物經濟模型，建立與能源、水和其他資源利用有關的關鍵生產指標，也將有助於集中研究工作，從環境和經濟角度提高系統效率和

可持續性。

繼續採用和擴展基於生物絮的生產技術的未來前景是光明的，因為這代表著多個重要機會在擴大環境的可持續性的同時，又開闢了新的途徑，不但能降低生產成本而且提高一致性和盈利能力。生物絮技術可使水產養殖朝著環保和生物安全的方向發展。養殖生物消費 BFT 中的微生物可降低 FCR，從而降低飼料成本。此外，微生物群落能夠迅速利用養殖生物的代謝物和殘餌中浸出的溶解氮，並將其轉化為微生物蛋白，保持良好的水質。生物絮聚落中發生的物理、化學和生物之間的相互作用是複雜的；進一步的研究，尤其生物絮聚落中微生物的組成以及和外界環境變化之間的動態關係可以闡明特定現象及其可能應用於其他生物技術領域。

### 3、生物絮粉

生物絮的營養成分最近受到了各方面的關注。已經考慮到使用 BFT 系統中存在的固體將之乾燥成粉，稱為生物絮粉，作為某些飼料的補充或替代品。然而，生產過程通常涉及乾燥、碾磨和儲存，這可能會對生物絮粉的性質產生重大影響，在某些情況下，由於生物絮粉乾物質含量最高為 1.4%，可能會很困難(Avnimelech, 2007)。例如，Mabroke *et al.* (2019)進行了一項實驗，涉及用生物絮粉替代豆粉，作者發現高達 25%的替代不會影響生長指標。

另一項研究是針對南美白對蝦進行的，其中作者用生物絮粉代替傳統蝦粉中高達 15.6%的魚粉和大豆蛋白成分，結果令人震驚。在含有生物絮粉的每一種飼糧中，作者都注意到蝦的生長速度顯著增加的模式。例如，在對照實驗和 7.8%生物絮粉的飼糧添加實驗中，蝦的初始重量為 0.43 g。對照實驗的總增重為 4.42 g，膳食中含有 7.8%的生物絮粉時總增重為 8.18 g。此外，對照實驗的存活率為 93%，然而，使用 7.8%的生物絮粉則得到 100%的存活率。

在 15.6%生物絮粉的膳食添加和 7.8%的生物絮粉與魚油添加實驗中取得了類似的結果，顯示這種方法是可重複的(Kuhn *et al.*, 2009)。對紅沼澤小龍蝦(*Procambarus clarkia*)進行的另一項研究顯示，與現有飼料一起以 33%-66%的摻合率供應的生物絮粉可以提高生長率；然而，超過 66%的摻合率會降低生長速度，因為灰分含量增加，最終超過 14%的動物限制(Lunda *et al.*, 2020)。

### (四) BFT 未來的發展

展望未來，BFT 應該受到更多關注，因為與目前的水產養殖技術相比，BFT 具有許多積極的好處，包括接近零的水交換、對抗病性的積極好處、原位址(in situ)微生物廢物管理、降低生產成本，以及由於通過生物絮增加食物來源而降低 FCR。最初，使用久經考驗的品種(例如蝦和吳郭魚)的農民可以尋求轉換為 BFT，以提高生物安全性和生產率。BFT 將受益於對最終

產品質量的進一步研究，這可能會改善需求；例如，目前的研究顯示，BFT 可以提高養殖南美白對蝦最終產品中肌肉的硬度(Chan-Vivas *et al.*, 2018)。

在水產養殖中使用生物絮粉可能會帶來更大的推動力，以實現完全的可持續性，朝向生產閉環(close production loop)邁進。對生物絮粉的進一步研究顯示，約 20%-25% 膳食替代物，即生物絮粉的添加率在成長率上沒有顯著差異；然而，包含生物絮粉可以改善養殖生物體中的酶活性，在這種情況下，指的是蝦消化道的酶(Dantas *et al.*, 2014; Ruby *et al.*, 2017)。在上述每項研究中，作者都報告說生物絮粉中缺乏必需脂肪酸。在初始生產過程中，可以添加發酵劑並改變 C:N 比例，以促進富含脂肪酸的微生物(例如微藻)的生長。這可能導致在 LC-PUFAs 中產生一種生物絮粉，其中含有更多的二十二碳六烯酸(DHA)和二十碳五烯酸(EPA)，然後可以允許測試更高水準的膳食替代品，並可能進一步減少對魚粉和魚油飼料的依賴，以補充目前的植物性替代品。

對生物體進行的測序和宏基因組學，特別是對培養動物的生物絮和腸道微生物組中存在的細菌，應受到更多關注。儘管 Cardona *et al.* (2016) 和最近的 Meenakshisundaram *et al.* (2021) 進行了研究，但作者主要關注在微生物鑒定方面。因此，進一步的研究將有助於確定腸道微生物組和生物絮含量之間的特定關係，這將提高初始生產設定的便利性。這還應延

伸到水生生物鰓的外皮(皮膚和甲殼)微生物組(microbiome)和粘膜介面，以減輕疾病和病原體入侵。這對於評估它們對魚和蝦的全身免疫和內部防禦機制的一般影響將是有益的。積極的對宿主動物與水環境之間功能的關係進行理解，可為優化生物絮系統來實現集約化生產提供有趣的研究。系統組成和性能變數的標準化也將有助於養殖的比較和診斷。

BFT 有潛力為養殖業者帶來許多利益，尤其是減少其運營對環境的影響，降低生產成本和增加產量。在環境效益方面，BFT 在原地址將廢物進行處理與管理產生正面的影響，並通過減少換水量以最大程度地降低營養水平來減少用水需求。這無疑將使水產養殖活動在乾旱易發地區更加可行。其易於設置和低投資成本導致許多主要水產養殖區採用 BFT。然而，到目前為止，這項技術的使用僅限於熱帶和亞熱帶地區，這主要是由於需要高溫來維持微生物群落的快速生長速度。要將 BFT 水產養殖擴大，需要解決幾個方面的問題，特別是關於培訓、擴張到大型商業養殖場以及澄清有關產品健康和品質方面的錯誤資訊。應去偵測與收集可量化的生產數據，並使其更容易獲得，以便做出業務決策，這可能特別有利於獲得投資。當在溫帶地區使用 BFT 時尤其要得到加熱與生產的相關數據，因為加熱會對操作的可行性產生重大影響。還需要考慮採用其他技術，例如廢熱回收系統、絕緣、現場可再生能源發電、熱泵和高效的被動供

暖。

除了需要對 BFT 進行經濟評估外，還應進行徹底的生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)，以確保實現可持續性目標。其他懸而未決的問題需要解決，例如發酵劑的優化、生物絮凝聚的可重複性、生物絮的腸道微生物組改善特性、改進不同生物絮系統(例如淡水、鹹水和鹹水)中的碳氮比需求，以及養殖動物和生物絮凝聚的最佳飼料來源。BFT 對養殖動物的功能影響可以是益生菌和免疫刺激，並且可以減輕由於抗生素過度使用而引起的養殖系統中日益增長的抗微生物藥物耐藥性。雖然沒有一種技術可以解決所有問題，但 BFT 為可持續農業食品生產提供了一條途徑。總而言之，今後應解決以下幾點：1.運行 BFT 降低加熱成本的技術和設計，2.生物絮凝聚的可重複性，3.發酵培養的優化，4.不同 BFT 系統中的碳氮比需求的優化，5.飼料來源的優化，6.優化培訓資源的品質，7. BFT 產品健康和品質方面的錯誤資訊的更正，8.進一步研究能改善腸道微生物羣組的生物絮的特性，9.以生命週期評估法來研究以發展 BFT 的整體可持續性的畫面，以及 10.未來的研究旨在解決溫室氣體排放問題。

## 六、參考文獻

Allredge, A.L., M.W. Silver (1988) Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Progress in Oceanography* 20: 41-82.  
[https://doi.org/10.1016/0079-6611\(88\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0079-6611(88)90053-5)  
 Ansari, F.A., A. Guldhe, S.K. Gupta, I. Rawat, F. Bux

(2021) Improving the feasibility of aquaculture feed by using microalgae. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 43234-43257.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14989-x>  
 Aparicio-Simón, B., E. Real-Moreno, D. Espinosa-Chaurand, R. GarcíaMorales, R. Garza-Torres, A.D.J. Cortés-Sánchez, D. Lora-Sanchez, A.N. Maeda-Martínez (2020) Giant bladder kelp (*Macrocystis pyrifera*) and maize (*Zea mays*) meals as nucleation sites for biofloc formation. *Aquaculture Reports*, 16, 100289.  
<https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100289>  
 Au, D.W.T., C.A. Pollino, R.S.S. Wu, P.K.S. Shin, S.T.F. Lau, J.Y.M. Tang (2004) Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper *Epinephelus coioides*. *Marine Ecology Progress Series* 266: 255-264.  
 Avnimelech, Y. (1999) Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture* 176: 227-235.  
[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X)  
 Avnimelech, Y. (2003) Control of microbial activity in aquaculture systems: Active suspension ponds. *World Aquaculture* 34(4): 19-21.  
 Avnimelech, Y. (2007) Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bioflocs technology ponds. *Aquaculture* 264: 140-147.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.11.025>  
 Avnimelech, Y. (2009) *Biofloc Technology: A Practical Guidebook*. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, United States.  
 Avnimelech, Y. (2015) *Biofloc Technology - A Practical Guide Book*. 3rd ed. The World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, United States.

- Avnimelech, Y., G. Ritvo (2003) Shrimp and fish pond soils: Processes and management. *Aquaculture* 220: 549-567.  
[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00641-5](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00641-5)
- Avnimelech, Y., M. Kochva, S. Diab (1994) Development of controlled intensive aquaculture systems with a limited water exchange and adjusted carbon to nitrogen ratio. *Israeli Journal of Aquaculture - Bamidgeh* 46: 119-31.
- Babic, M.N., P. Zalar, B. Ženko, S. Džeroski, N. Gunde-Cimerman (2016) Yeasts and yeast-like fungi in tap water and groundwater, and their transmission to household appliances. *Fungal Ecology* 20: 30-39.  
<https://doi.org/10.1016/j.funeco.2015.10.001>
- Baeza-Rojano, E., P. Domingues, J.M. Guerra-García, S. Capella, E. Noreña-Barroso, C. Monsreal, C. Rosas (2013) Marine gammarids (Crustacea: Amphipoda): A new live prey to culture Octopus maya hatchlings. *Aquaculture Research* 44: 1602-1612.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03169.x>
- Baidya, A., T. Akter, M.R. Islam, A.K.M.A. Shah, M.A. Hossain, M.A. Salam, S.A. Paul (2021) Effect of different wavelengths of LED light on the growth, chlorophyll,  $\beta$ -carotene content and proximate composition of *Chlorella ellipsoidea*. *Heliyon*, 7, 34934841.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08525>
- Ballester, E.L.C., P.C. Abreu, R.O. Cavalli, M. Emerenciano, L. De Abreu, W. Wasielesky Jr. (2010) Effect of practical diets with different protein levels on the performance of *Farfantepenaeus paulensis* juveniles nursed in a zero exchange suspended microbial flocs intensive system. *Aquaculture Nutrition* 16: 163-172.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2009.00648.x>
- Becerra-Dórame, M.J., L.R. Martínez-Córdova, M. Martínez-Porchas, J.A. Lopez-Elías (2011) Evaluation of autotrophic and heterotrophic microcosm-based systems on the production response of *Litopenaeus vannamei* intensively nursed without Artemia and with zero water exchange. *Israeli Journal of Aquaculture - Bamidgeh*. 63: 1-7.  
<https://doi.org/10.46989/001c.20597>
- Ben-Amotz, A.D., R. Fishler, A. Schneller (1987) Chemical composition of dietary species of marine unicellular algae and rotifers with emphasis on fatty acids. *Marine Biology*. 95: 31-36.
- Berberovic, R. (1990) Elemental composition of two coexisting Daphnia species during the seasonal course of population development in Lake Constance. *Oecologia* 84: 340-350.  
<https://doi.org/10.1007/bf00329757>
- Beveridge, M.C.M., M.J. Phillips, R.M. Clarke (1991) A quantitative and qualitative assessment of wastes from aquatic animal production. In: Brune, D.E., Tomasso, J.R. (Eds). *Aquaculture and water quality*. World Aquaculture Society, Baton Rouge, USA. pp 506-533.
- Bianchi, M., E. Bedier, A. Bianchi, A.M. Domenach, D. Marty, (1990) Use of  $^{15}\text{N}$  labeled food pellets to estimate the consumption of heterotrophic microbial communities to penaeid prawns diet in closed-system aquaculture. In: *Microbiology in Poecilotherms*, edited by R. Lésel, Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam, 227-230.
- Bowling, L. (2009) Freshwater phytoplankton: diversity and biology. In: *Plankton: A Guide to*

- Their Ecology and Monitoring for Water Quality, edited by Suthers, I.M., D. Rissik, CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, 115-139.
- Boyd, C.E. (2009) Estimating mechanical aeration requirement in shrimp ponds from the oxygen demand of feed. In: The Rising Tide, Proceedings of the Special Session on Sustainable Shrimp Farming, edited by Browdy, C.L., D.E. Jory, World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, United States, 230-234.
- Boyd, C.E., J.W. Clay (2002) Evaluation of Belize Aquaculture, Ltd: A superintensive shrimp aquaculture system. Report prepared under the World Bank, NACA, WWF, and FAO Consortium Program on Shrimp Farming and the Environment.
- Brito, L.O., I.G.S. dos Santos, J.L. de Abreu, M.T. de Araújo, W. Severi, A.O. Gálvez (2015) Effect of the addition of diatoms (*Navicula* sp.) and rotifers (*Brachionus plicatilis*) on water quality and growth of the *Litopenaeus vannamei* postlarvae reared in a biofloc system. *Aquaculture Research* 47: 3990-3997.  
<https://doi.org/10.1111/are.12849>
- Browdy, C.L., A.D. Stokes, J. Hopkins, P. Sandifer (1997) Improving sustainability of shrimp pond water resource utilization. Proceedings of the Third Annual Ecuadorian Aquaculture Conference, CENAIM-ESPOL-CAN, Guayaquil, Ecuador.
- Browdy, C.L., J.A. Venero, A.D. Stokes, J. Leffler (2009) Superintensive biofloc production systems technologies for marine shrimp *Litopenaeus vannamei*: Technical challenges and opportunities. In: New Technologies in Aquaculture, edited by Burnell, G., G. Allan, Woodhead Publishing, Cambridge, 1010-1028.
- Brown, M.R. (2002) Nutritional value and use of microalgae in aquaculture. In: Avances en Nutrición Acuicola VI. Abstract of VI Internacional Simposium of Aquaculture Nutrition 3: 281-292.
- Brown, M.R., S.M. Barrett, J.K. Volkman, S.P. Nearhos, J.A. Nell, G.L. Allan (1996) Biochemical composition of new yeasts and bacteria evaluated as food for bivalve aquaculture. *Aquaculture* 143: 341-360.  
[https://doi.org/10.1016/0044-8486\(96\)01286-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(96)01286-0)
- Brune, D.E. (2010) Algae and aquaculture. In Abstracts, Aquaculture 2010, Annual Meeting of the World Aquaculture Society, March 2010, San Diego, California, p.143. World Aquaculture Society, Baton Rouge.
- Brune, D.E., G. Schwarz, A.G. Eversole, J.A. Collier, T.E. Schwedler (2003) Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems. *Aquacultural Engineering* 28: 65-86.  
[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(03\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00025-6)
- Burford, M.A., P.J. Thompson, R.P. McIntosh, R.H. Bauman, D.C. Pearson (2003) Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. *Aquaculture* 219: 393-411.  
[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00575-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00575-6)
- Burford, M.A., P.J. Thompson, R.P. McIntosh, R.H. Bauman, D.C. Pearson (2004) The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. *Aquaculture* 232:525-37.  
[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00541-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00541-6)
- Calle-Delgado, P., Y. Avnimelech, R. McNeil, D. Bratvold, C.L. Browdy, P. Sandifer (2003)

- Physical, chemical and biological characteristics of distinctive regions in paddlewheel aerated shrimp ponds. *Aquaculture* 217:235-48.  
[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00231-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00231-4)
- Campaña-Torres, A., L.R. Martínez-Córdova, M. Martínez-Porchas, J.A. López-Eliás, M.A. Porchas-Cornejo (2012) Productive response of *Nannochloropsis oculata*, cultured in different media and their efficiency as food for the rotifer *Brachionus rotundiformis*. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 81: 45-50.
- Cang, P., M. Zhang, G. Qiao, Q. Sun, D. Xu, Q. Li (2019) Analysis of growth, nutrition and economic profitability of gibel carp (*Carassius auratus gibelio* female x *C. carpio* male) cultured in zero-water exchange system. *Pakistan Journal of Zoology* 51: 619-630.  
<http://doi.org/10.17582/journal.pjz/2019.51.2.619.630>
- Cardona, E., Y. Gueguen, K. Magré, B. Lorgeoux, D. Piquemal, F. Pierrat, F. Noguier, D. Saulnier (2016) Bacterial community characterization of water and intestine of the shrimp *Litopenaeus stylirostris* in a biofloc system. *BMC Microbiology* 16: 157-166.  
<https://doi.org/10.1186/s12866-016-0770-z>
- Casillas-Hernández, R., F. Magallón-Barajas, G. Portillo-Clarck, F. Páez-Osuna (2016) Nutrient mass balances in semi-intensive shrimp ponds from Sonora, Mexico using two feeding strategies: Trays and mechanical dispersal. *Aquaculture* 258: 289-298.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.027>
- Castro-Mejia, J., G. Castro-Mejia, M.C.A. Monroy-Dosta, F. Davila-Sanchez, A.E. Castro-Castellion (2017) Population density comparison of *Ceriodaphnia dubia* fed with bacteria obtained from biofloc system. *Journal of Entomology and Zoology Studies* 5: 2009-2012.
- Chamberlain, G., Y. Avnimelech, R.P. McIntosh, M. Velasco (2001) Advantages of aerated microbial reuse systems with balanced C/N. I. Nutrient transformation and water quality benefits. *Global Aquaculture Advocate* 4: 53-56.
- Chan-Vivas, E., M. Edén, C. Maldonado, K. Escalante, G. Gaxiola, G. Cuzon (2018). Does biofloc improve the energy distribution and final muscle quality of shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1883)? *Journal of the World Aquaculture Society* 50: 460-468. Portico.  
<https://doi.org/10.1111/jwas.12522>
- Chapman, P.M., J.D. Popham, J. Griffin, D. Leslie, J. Michaelson (1987) Differentiation of physical from chemical toxicity in solid waste fish bioassay. *Water, Air, and Soil Pollution* 33: 295-308.
- Chien, Y.H., I.C. Liao (1995) Integrated approach to prawn growout system design. In: *Swimming Through Troubled Water*, edited by Browdy, C., S. Hopkins, Proc. Special Session on Shrimp Farming, World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, USA. 167-182.
- Chien, Y.H., I.C. Liao (2001) Pond management research in Taiwan. In: *Aquaculture and Fisheries Resources Management: Proceedings of the Joint Taiwan-Australia Aquaculture and Fisheries Resources and Management Forum (TFRI Conference Proceedings 4)*, 288 pp. edited by Liao, I.C., J. Baker, Taiwan Fisheries Research Institute, Keelung, Taiwan. 135-144.
- Crab, R, B. Chielens, M. Wille, P. Bossier, W. Verstraete (2010) The effect of different carbon

- sources on the nutritional value of bioflocs, a feed for *Macrobrachium rosenbergii* postlarvae. *Aquaculture Research* 41: 559-567.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02353.x>
- Crab, R., M. Kochva, W. Verstraete, Y. Avnimelech (2009) Bio-flocs technology application in over-wintering of tilapia. *Aquacultural Engineering* 40: 105-112.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.12.004>
- Crab, R., T. Defoirdt, P. Bossier, W. Verstraete (2012) Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. *Aquaculture* 356-357: 351-356.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.046>
- da Silva, K.R., W. Wasielesky Jr., P.C. Abreu (2013) Nitrogen and phosphorus dynamics in the biofloc production of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Journal of the World Aquaculture Society* 44: 30-41.  
<https://doi.org/10.1111/jwas.12009>
- Dantas Jr., E.M., B.C.S. Valle, C.M.S. Brito, N.K.F. Calazans, S.R.M. Peixoto, R.B. Soares (2014) Partial replacement of fishmeal with biofloc meal in the diet of postlarvae of the pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Nutrition*, 22: 335-342.  
<https://doi.org/10.1111/anu.12249>
- Dauda, A.B., A. Ajadi, A.S. Tola-Fabunmi, A.O. Akinwole (2018) Waste production in aquaculture: sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries* 4: 81-88.  
<https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.10.002>
- De Schryver, P., R. Crab, T. Defoirdt, N. Boon, W. Verstraete (2008) The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. *Aquaculture* 277: 125-137.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.02.019>
- de Souza Valente, C., A. Rodiles, M.R. Freire Marques, D.L. Merrifield (2020) White spot syndrome virus (WSSV) disturbs the intestinal microbiota of shrimp (*Penaeus vannamei*) reared in biofloc and clear seawater. *Applied Microbiology and Biotechnology* 104: 8007-8023.  
<https://doi.org/10.1007/s00253-020-10816-4>
- Decamp, O., L. Conquest, J. Cody, I. Forster, A.G.J. Tacon (2007) Effect of shrimp stocking density on size-fractionated phytoplankton and ecological groups of ciliated protozoa within zero-water exchange shrimp culture systems. *Journal of the World Aquaculture Society* 38: 395-406.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2007.00111.x>
- Dufault, R.J., A. Korkmaz (2000) Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertilizer in bell pepper production. *Compost Science & Utilization* 8: 310-319.  
<https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10702004>
- Dufault, R.J., A. Korkmaz, B. Ward (2001) Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertilizer for broccoli production. *Compost Science and Utilization* 9: 107-114.  
<https://doi.org/10.1080/1065657X.2001.10702024>
- Ebeling, J.M., M.B. Timmons, J.J. Bisogni (2006) Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* 257: 346-358.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019>
- Ekasari, J., M. Zairin, D.U. Putri, N.P. Sari, E.H. Surawidjaja, P. Bossier (2015) Biofloc-based reproductive performance of Nile tilapia

- Oreochromis niloticus* L. broodstock. *Aquaculture Research* 46: 509-512.  
<https://doi.org/10.1111/are.12185>
- El-Sayed, A.F.M. (2021) Use of biofloc technology in shrimp aquaculture: a comprehensive review, with emphasis on the last decade. *Reviews in Aquaculture* 13: 676-705.  
<https://doi.org/10.1111/raq.12494>
- Emerenciano, M.G.C., L.R. Martínez-Córdova, M. Martínez-Porchas, A. Miranda-Baeza (2017) Biofloc Technology (BFT): A Tool for Water Quality Management in Aquaculture. In: Chapter 5, Water Quality, edited by Tutu, H., B.P. Grover, Published by InTech, Rijeka, Croatia. 91-109.
- Emerenciano, M., E.L.C. Ballester, R.O. Cavalli, W. Wasielesky (2012a) Biofloc technology application as a food source in a limited water exchange nursery system for pink shrimp *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817). *Aquaculture Research* 43: 447-457.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02848.x>
- Emerenciano, M., E.L.C. Ballester, R.O. Cavalli, W. Wasielesky (2012b) Biofloc technology application as a food source in a limited water exchange nursery system for pink shrimp *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817). *Aquaculture Research* 43: 447-457.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02848.x>
- FAO (2022) Low water exchange shrimp farming: improvements in Thailand. Bangkok. FAO Regional Office for Asia and the Pacific.
- Farhadian, O., F.M. Yuso, S. Mohamed (2009) Nutritional values of *Apocyclops dengizicus* (Copepoda: Cyclopoida) fed *Chaetoceros calcitrans* and *Tetraselmis tetraathele*. *Aquaculture Research*. 40: 74-82.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2008.02066.x>
- Ferreira-Marinho, Y., L. Otavio-Brito, C.V.F. Silva, I.G.S. Santos, A. Olivera-Gálvez (2014) Effect of addition of *Navicula* sp. on plankton composition and postlarvae growth of *Litopenaeus vannamei* reared in culture tanks with zero water exchange. *Latin American Journal of Aquatic Research* 42: 427.  
<https://doi.org/10.3856/vol42-issue3-fulltext-4>
- Fimbres-Acedo, Y.E., P. Magallón-Servín, R. Garza-Torres, M.G.C. Emerenciano, R. Servín-Villegas, M. Endo, K.M. Fitzsimmons, F.J. Magallon-Barajas (2020) *Oreochromis niloticus* aquaculture with biofloc technology, photoautotrophic conditions and *Chlorella* microalgae. *Aquaculture Research* 51: 3323-3346.  
<https://doi.org/10.1111/are.14668>
- Fleckenstein, L.J., T.W. Tierney, J.C. Fisk, A.J. Ray (2019) Effects of supplemental LED lighting on water quality and Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) performance in intensive recirculating systems. *Aquaculture* 504: 219-226.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.01.066>
- Focken, U., C. Schlechtriem, M.V. Wuthenau, A. Garcia-Ortega, A. Puello-Cruz, K. Becker (2006) *Panagrellus redivivus* mass produced on solid media as live food for *Litopenaeus vannamei* larvae. *Aquaculture Research* 37: 1429-1436.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01578.x>
- Furtado, P.S. L.H. Poersch, W. Wasielesky Jr. (2011) Effect of calcium hydroxide, carbonate and sodium bicarbonate on water quality and zootechnical performance of shrimp *Litopenaeus vannamei* reared in bio-flocs technology (BFT) systems. *Aquaculture* 321: 130-135.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.08.034>

- Gao, F., S. Liao, S. Liu, H. Bai, A. Wang, J. Ye (2018) The combination use of *Candida tropicalis* HH8 and *Pseudomonas stutzeri* LZX301 on N removal, biofloc formation and microbial communities in aquaculture. *Aquaculture* 50: 50-56.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.041>
- García, N., J.A. López-Elías, A. Miranda, M. Martínez-Porchas, N. Huerta, A. García (2012) Effect of salinity on growth and chemical composition of the diatom *Thalassiosira weissflogii* at three culture phases. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 40: 435-440.  
<https://doi.org/10.3856/vol40-issue2-fulltext-18>
- García-Ríos, L (2015) Crecimiento, sobrevivencia y calidad de crías de Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivadas en biofloc con diferentes fuentes de carbono. Master's degree thesis. Sonora State University, Navojoa, Sonora, México. 42 pp.
- Glazer, A.N., H. Nikaido (2007) *Microbial Biotechnology: fundamentals of Applied Microbiology*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA.
- Graham, L.E., L.W. Wilcox (2000) *Algae*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Hagopian, D.S., J.G. Riley (1998) A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquacultural Engineering* 18: 223-244.  
[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(98\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00032-6)
- Hanson, T.R., B. Posadas, T.M. Samocha, A.D. Stokes, T. Losordo, C.L. Browdy (2009) Economic factors critical to the profitability of super-intensive biofloc recirculating production systems for marine shrimp *Litopenaeus vannamei*. In: *The Rising Tide, Proceedings of the Special Session on Sustainable Shrimp Farming*, edited by Browdy C.L., D.E. Jory, World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, 268-283.
- Hargreaves, J.A. (2006) Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural Engineering* 34: 344-63.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.009>
- Hargreaves, J.A. (2013) *Biofloc production systems for aquaculture*. Southern Regional Aquaculture Center (SRAC). Publication No. 4503.
- Haridas, H., N.K. Chadha, P.B. Sawant, A.D. Deo, M.P. Ande, K. Syamala, R. Sontakke, S.S. Lingam (2021) Growth performance, digestive enzyme activity, nonspecific immune response and stress enzyme status in early stages of grey mullet reared in a biofloc system. *Aquaculture Research* 52: 4923-4933.  
<https://doi.org/10.1111/are.15326>
- Hartwell, L.H., J. Culotti, J.R. Pringle, B.J. Reid (1974) Genetic control of the cell division cycle in yeast: A model to account for the order of cell cycle events is deduced from the phenotypes of yeast mutants. *Science* 183(4120): 46-51.  
<https://doi.org/10.1126/science.183.4120.46>
- Hepher, B. (1985) Aquaculture intensification under land and water limitations. *Geojournal* 10: 253-259.
- Hernández-Castro, J.E., J.M. Pacheco-Vega (2015) *Interacción mixotrófica de microalgas marinas y bacterias probióticas*. Editorial Académica Española, Madrid.
- Hopkins, J.S., A.D. Stokes, C.L. Browdy, P.A. Sandifer (1991) The relationship between feeding rate, paddlewheel aeration rate and expected

- dawn dissolved oxygen in intensive shrimp ponds. *Aquacultural Engineering* 10: 281-290.  
[https://doi.org/10.1016/0144-8609\(91\)90017-E](https://doi.org/10.1016/0144-8609(91)90017-E)
- Hopkins, J.S., P.A. Sandifer, C.L. Browdy (1995a) A review of water management regimes which abate the environmental impacts of shrimp farming. In: *Swimming Through Troubled Water*, edited by Browdy, C., S. Hopkins, Proc. Special Session on Shrimp Farming, World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, USA. 157-166.
- Hopkins, J.S., P.A. Sandifer, M.R. DeVoe, A.F. Holland, C.L. Browdy, A.D. Stokes (1995b) Environmental impacts of shrimp farming with special reference to the situation in the continental US. *Estuaries* 18: 25-42.  
<https://doi.org/10.2307/1352281>
- Hopkins, J.S., R.D. Hamilton II, P.A. Sandier, C.L. Browdy, A.D. Stokes (1993) Effect of water exchange rate on production, water quality, effluent characteristics and nitrogen budget of intensive shrimp ponds. *Journal of the World Aquaculture Society* 24(3): 304-320.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1993.tb00162.x>
- Hopkins, J.S., P.A. Sandifer, C.L. Browdy (1994) Sludge management in intensive pond culture of shrimp: effect of management regime on water quality, sludge characteristics, nitrogen extinction and shrimp production. *Aquacultural Engineering* 13: 11-30.  
[https://doi.org/10.1016/0144-8609\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)90022-1)
- Johnson, C.N., S. Barnes, J. Ogle, D.J. Grimes, Y.J. Chang, A.D. Peacock, L. Kline (2008) Microbial community analysis of water, foregut, and hindgut during growth of Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in closed-system aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society* 39: 251-258.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2008.00155.x>
- Johnstone, I.L. (1994) The cuticle of the nematode *Caenorhabditis elegans*: a complex collagen structure. *Bioessays*. 16: 171-178.  
<https://doi.org/10.1002/bies.950160307>
- Ju, F., T. Zhang (2014) Bacterial assembly and temporal dynamics in activated sludge of a full-scale municipal wastewater treatment plant. *The ISME Journal*, 9: 683-695.  
<https://doi.org/10.1038/ismej.2014.162>
- Ju, Z.Y., I.P. Forster, W.G. Dominy (2009) Effects of supplementing two species of marine algae or their fractions to a formulated diet on growth, survival and composition of shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture* 292: 237-43.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.04.040>
- Jung, J.Y., J.H. Damusaru, Y. Park, K. Kim, M. Seong, H.W. Je, S. Kim, S.C. Bai (2017) Autotrophic biofloc technology system (ABFT) using *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* positively affects performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Algal Research* 27: 259-264.  
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.09.021>
- Khan, M.N., F. Mohammad (2013) Eutrophication: challenges and solutions. In: Ansari, A., Gill, S. (Eds.) *Eutrophication: causes, consequences and control*. Oxford: Elsevier, pp. 1-15.
- Khanjani, M.H., M. Alizadeh, M. Mohammadi, H. Sarsangi Aliabad (2020) Biofloc system applied to Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) farming using different carbon sources: growth performance, carcass analysis, digestive and hepatic enzyme activity. *Iranian Journal of Fisheries Science* 20: 490-513.

- Khanjani, M.H., M. Alizadeh, M. Mohammadi, H. Sarsangi Aliabad (2021) The effect of adding molasses in different times on performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) raised in a low-salinity biofloc system. *Annals of Animal Science* 21: 1435-1454.  
<https://doi.org/10.2478/aoas-2021-0011>
- Khoa, T.N.D., C.T. Tao, L. Van Khanh, T.N. Hai (2020) Super-intensive culture of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in outdoor biofloc systems with different sunlight exposure levels: emphasis on commercial applications. *Aquaculture* 524: 735277.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735277>
- Kim, J-H., S. Sohn, S.K. Kim, S.-R. Kim, S-K. Kim, S.M. Kim, N.Y. Kim, Y.B. Hur (2021) Effects on the survival rates, hematological parameters, and neurotransmitters in olive flounders, *Paralichthys olivaceus*, reared in bio-floc and seawater by *Streptococcus iniae* challenge. *Fish Shellfish Immunology* 113: 79-85.  
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2021.03.013>
- Kim, J-H., S.K. Kim, Y.B. Hur (2019) Toxic effects of waterborne nitrite exposure on antioxidant responses, acetylcholinesterase inhibition, and immune responses in olive flounders, *Paralichthys olivaceus*, reared in bio-floc and seawater. *Fish and Shellfish Immunology* 97: 581-586.  
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.12.059>
- Kobayashi, T., R. Shiel, J.A. King, G.A. Miskiewicz (2009) Freshwater zooplankton: diversity and biology. In: *Plankton: A Guide to Their Ecology and Monitoring for Water Quality*, edited by Suthers, I.M., D. Rissik, CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, 157-179.
- Koops, H.P., Pommerening-Röser (2001) Distribution and ecophysiology of the nitrifying bacteria emphasizing cultured species. *FEMS Microbiology Ecology* 37(1): 1-9.  
<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2001.tb00847.x>
- Kuang, Q., Y. Bi, Y. Xia, Z. Hu (2004) Phytoplankton community and algal growth potential in Taipinghu reservoir, Anhui Province, China. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 9: 119-124.  
<https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2004.00238.x>
- Kuhn, D.D., G.D. Boardman, A.L. Lawrence, L. Marsh, G.J. Flick Jr. (2009) Microbial floc meal as a replacement ingredient for fish meal and soybean protein in shrimp feed. *Aquaculture*, 296(1-2): 51-57.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.07.025>
- Kureshy, N., D.A. Davis (2002) Protein requirement for maintenance and maximum weight gain for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 204(1-2): 125-43.  
[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00649-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00649-4)
- Leber, K.M., G.D. Pruder (1988) Using experimental microcosms in shrimp research: The growth-enhancing effect of shrimp pond water. *Journal of the World Aquaculture Society* 19: 197-203.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1988.tb00780.x>
- Leffler, J.W., J. Haveman, E. DuRant, A. Lawson, D. Weldon (2010) Oxygen demand, ecological energetics and nutrient dynamics in minimal exchange, superintensive, biofloc systems culturing Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. In: *Abstracts, Aquaculture 2010, Annual Meeting of the World Aquaculture Society, March 2010, San Diego, California, World Aquaculture Society, Baton Rouge,*

- Louisiana, 592.
- Legarda, E.C., D. da Silva, C.S. Miranda, P.K.M. Pereira, M.A. Martins, C. Machado, M.A. de Lorenzo, L. Hayashi, F. do Nascimento Vieira (2020) Sea lettuce integrated with Pacific white shrimp and mullet cultivation in biofloc impact system performance and the sea lettuce nutritional composition. *Aquaculture* 534: 736265.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736265>
- Leonard, N., J.P. Blancheton, J.P. Guiraud (2000) Populations of heterotrophic bacteria in an experimental recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering* 22: 109-120.  
[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(00\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00035-2)
- Lezama-Cervantes, C., J. Paniagua-Michel (2010) Effects of constructed microbial mats on water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* post-larvae. *Aquacultural Engineering*. 42(2): 75-81.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.12.002>
- López-Rodas, V., E. Maneiro, E. Costas (2006) Adaptation of cyanobacteria and microalgae to extreme environmental changes derived from anthropogenic pollution. *Limnetica*. 25(1-2): 403-410.  
<https://doi.org/10.23818/limn.25.28>
- Lotz, J.M. (1997) Special topic review: Viruses, biosecurity and specific pathogen-free stocks in shrimp aquaculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 13: 405-413.
- Loureiro, C.K., W. Wasielesky Jr., P.C. Abreu (2012) Utilização de protozoários, rotíferos e nematódeos como alimento vivo para camarões cultivados no sistema BFT. *Atlantica* 34: 5-12.
- Lunda, R., K. Roy, P. Dvorak, A. Kouba, J. Mraz (2020) Recycling biofloc waste as novel protein source for crayfish with special reference to crayfish nutritional standards and growth trajectory. *Scientific Reports*, 10: 19607.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-76692-0>
- Luo, G., Q. Gao, C. Wang, W. Liu, D. Sun, L. Li, H. Tan (2014) Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system. *Aquaculture* 422-423: 1-7.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.023>
- Mabroke, R.S., O.M. El-Husseiny, A. El-Naem, A.E.F.A. Zidan, A.-A. Tahoun, A. Suloma (2019) Floc meal as potential substitute for soybean meal in tilapia diets under biofloc system conditions. *Aquaculture and Fisheries* 37: 313-320.  
<https://doi.org/10.1007/s00343-019-7222-1>
- Maicá, P.F., M.R. de Borba, W. Wasielesky Jr. (2012) Effect of low salinity on microbial floc composition and performance of *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles reared in a zero water exchange super-intensive system. *Aquaculture Research* 43: 361-370.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02838.x>
- Martínez-Córdova, L.R., M. Emerenciano, A. Miranda-Baeza, M. Martínez-Porchas (2015) Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: an updated review. *Reviews in Aquaculture* 7(2): 131-148.  
<https://doi.org/10.1111/raq.12058>
- Martínez-Córdova, L.R., M. Martínez-Porchas, M.A. Porchas-Cornejo, T. Gollas-Galván, S. Scheuren-Acevedo, M.A. Arvayo, J.A. López-Elías, M.A. López-Torres (2017) Bacterial diversity studied by next-generation sequencing in a mature

- phototrophic *Navicula* sp-based biofilm promoted into a shrimp culture system. *Aquaculture Research* 48: 2047-2054.  
<https://doi.org/10.1111/are.13037>
- Martinez-Porchas, M., M. Ezquerro-Brauer, F. Mendoza-Cano, J.E. Chan-Higuera, F. Vargas-Albores, L.R. Martinez-Cordova (2020) Effect of supplementing heterotrophic and photoautotrophic biofloc, on the production response, physiological condition and post-harvest quality of the whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Reports* 16: 100257.  
<https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100257>
- Martins, T.G., C. Odebrecht, L.V. Jensen, M.G. D'Oca, W. Wasielesky Jr. (2014) The contribution of diatoms to bioflocs lipid content and the performance of juvenile *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) in a BFT culture system. *Aquaculture Research* 47: 1315-1326.  
<https://doi.org/10.1111/are.12592>
- McCusker, S., M.B. Warberg, S.J. Davies, C.S. Valente, M.P. Johnson, R. Cooney, A.H.L. Wan (2023) Biofloc technology as part of a sustainable aquaculture system: A review on the status and innovations for its expansion. *Aquaculture Fish and Fisheries* 3: 331-352.  
<https://doi.org/10.1002/aff2.108>
- McIntosh, R.P. (2001) High rate bacterial systems for culturing shrimp. In: *Proceedings from the Aquacultural Engineering Society's 2001 Issues Forum*, edited by Summerfelt, S.L., B.J. Watten, M.B. Timmons, Aquaculture Engineering Society, Shepherdstown, West Virginia, 117-129.
- Meenakshisundaram, M., F. Sugantham, C. Muthukumar, M.S. Chandrasekar (2021) Metagenomic characterization of biofloc in the grow-out culture of genetically improved farmed tilapia (GIFT). *Aquaculture Research* 52: 4249-4262.  
<https://doi.org/10.1111/are.15263>
- Mishra, J.K., T.M. Samocha, S. Patnaik, M. Speed, R.L. Gandy, A.-M. Ali (2008) Performance of an intensive nursery system for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, under limited discharge condition. *Aquacultural Engineering* 38(1): 2-15.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2007.10.003>
- Moens, T., M. Vincx (1997) Observations on the feeding ecology of estuarine nematodes. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 77(1): 211-227.  
<https://doi.org/10.1017/S0025315400033889>
- Monroy-Dosta, M.D.C., R.D. Lara-Andrade, J. Castro-Mejía, G. Castro-Mejía, M.G. Coelho-Emerenciano (2013) Composición y abundancia de comunidades microbianas asociadas al biofloc en un cultivo de tilapia. *Journal of Marine Biology and Oceanography* 48: 511-520.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-19572013000300009>
- Moriarty, D.J.W. (1997) The role of microorganisms in aquaculture ponds. *Aquaculture* 151(1-4): 333-349.  
[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01487-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01487-1)
- Moss, S.M., G.D. Pruder, K.M. Leber, J.A. Wyban (1992) The relative enhancement of *Penaeus vannamei* growth by selected fractions of shrimp pond water. *Aquaculture* 101: 229-239.  
[https://doi.org/10.1016/0044-8486\(92\)90027-I](https://doi.org/10.1016/0044-8486(92)90027-I)
- Moss, S.M., P.S. Leung (2006) Comparative cost of shrimp production: earthen ponds versus recirculating aquaculture systems. In: *Shrimp*

- Culture: Economics, Marketing and Trade, edited by Leung, P.S., C.R. Engle, Blackwell Publishing, Ames, Iowa, 291-300.
- Najdegerami, E.H., F. Bakhshi, F.B. Lakani (2016) Effects of biofloc on growth performance, digestive enzyme activities and liver histology of common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings in zero-water exchange system. *Fish Physiology Biochemistry* 42: 457-465.  
<https://doi.org/10.1007/s10695-015-0151-9>
- Nakajima, K., I. Takeuchi (2008) Rearing method for *Caprella mutica* (Malacostraca: Amphipoda) in an exhibition tank in the port of Nagoya public aquarium, with notes on reproductive biology. *Journal of Crustacean Biology* 28(1): 171-174.  
<https://doi.org/10.1651/06-2811R.1>
- Nunes, A.J.P., M.V.C. Sá, F.F. Andriola-Neto, D. Lemos (2006) Behavioral response to selected feed attractants and stimulants in Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 260: 244-254.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.027>
- Nurarina, A.G., H. Aini, L.H. Ying, I. Ahmad, I. Natrah (2019) Mutualistic interactions of green microalga *Chlorella* sp. with bacterial quorum sensing degrader *Bacillus* sp. isolated from biofloc and freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Journal of Environmental Biology* 41: 1126-1131.  
[https://doi.org/10.22438/jeb/41/5\(SI\)/MS\\_02](https://doi.org/10.22438/jeb/41/5(SI)/MS_02)
- Pacheco-Vega, J.M., M.A. Cadena-Roa, J.A. Leyva-Flores, O.I. Zavala-Leal, E. Pérez-Bravo, J.M.J. Ruiz-Velazco (2018) Effect of isolated bacteria and microalgae on the biofloc characteristics in the Pacific white shrimp culture. *Aquaculture Reports* 11: 24-30.  
<https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2018.05.003>
- Páez-Osuna, F., A. Gracia, F. Flores-Verdugo, L.P. Lyle-Fritch, R. Alonso Rodriguez, R. Roque, A.C. Ruiz-Fernández (2003) Shrimp aquaculture development and the environment in the gulf of California ecoregion. *Marine Pollution Bulletin* 46(7): 806-815.  
[https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(03\)00107-3](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(03)00107-3)
- Páez-Osuna, F., S.R. Guerrero-Galván, A.C. Ruiz-Fernández, R. Espinoza-Angulo (1997) Fluxes and mass balances of nutrients in a semi-intensive shrimp farm in north-western Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 34: 290-297.  
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(96\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(96)00133-6)
- Pandey, B.D., S.G. Yeragi, A.K. Pal (2004) Nutritional value of a heterotrichous ciliate, *Fabrea salina* with emphasis on its fatty acid profile. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences* 17: 995-999.  
<https://doi.org/10.5713/ajas.2004.995>
- Panigrahi, A., C. Saranya, M. Sundaram, S.R. Vinoth Kannan, R.R. Das, R. Satish Kumar, R. Rajesh, S.K. Otta (2018) Carbon: Nitrogen (C:N) ratio level variation influences microbial community of the system and growth as well as immunity of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in biofloc based culture system. *Fish and Shellfish Immunology* 81: 329-337.  
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.07.035>
- Pearl, H.W., C.S. Tucker (1995) Ecology of blue-green-algae in aquaculture ponds. *Journal of the World Aquaculture Society* 26: 109-131.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00235.x>
- Pérez, A.J.D. (2010) Aplicación y evaluación de un reactor de contactores biológicos rotativos (RBC o biodiscos), a escala de laboratorio como

- tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la Pradera. Master's degree thesis (Urban Engineering) Engineering Faculty. University of Medellínpp. 259 pp.
- Pérez-Fuentes, J.A., C.I. Pérez-Rostro, M.P. Hernández-Vergara (2013) Pond-reared Malaysian prawn *Macrobrachium rosenbergii* with the biofloc system. *Aquaculture* 400-401: 105-110.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.02.028>
- Perumal, P., B. BalajiPrasath, P. Santhanam, A. Shenbaga Devi, S. Dineshkumar, S. Jeyanthi (2015) Isolation and intensive culture of marine microalgae. In: *Advances in Marine and Brackish Water Aquaculture*, edited by Santhanam, P., A.R. Thirunavukkarasu, P. Perumal, Springer Publisher, New Delhi, India, 1-15.
- Peterson, E.L., L.C. Wadhwa, J.A. Harris (2001) Arrangement of aerators in an intensive shrimp growout pond having a rectangular shape. *Aquaculture Engineering* 25(1): 51-65.  
[https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(01\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00072-3)
- Pilotto, M.R., A.N.A. Goncalves, F.N. Vieira, W.Q. Seifert, E. Bachère, R.D. Rosa, L.M. Perazzolo (2018) Exploring the impact of the biofloc rearing system and an oral WSSV challenge on the intestinal bacteriome of *Litopenaeus vannamei*. *Microorganisms* 6(3): 83.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms6030083>
- Poli, M.A., R. Schweitzer, A.P. de Oliveira Nuñez (2015) The use of biofloc technology in a South American catfish (*Rhamdia quelen*) hatchery: effect of suspended solids in the performance of larvae. *Aquacultural Engineering* 66: 17-21.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.01.004>
- Ponce, M., I. Giraldez, S. Calero, P. Ruiz-Azcona, E. Morales, C. FernándezDíaz, I. Hachero-Cruzado (2018) Toxicity and biochemical transformation of selenium species in rotifer (*Brachionus plicatilis*) enrichments. *Aquaculture* 484: 105-111.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.10.040>
- Rakocy, J.E. (1989) Tank culture of tilapia. Southern Regional Aquaculture Center Publication 282. Texas Agricultural Extension Service, Texas A&M University, Texas, USA.
- Ray, A.J., A.J. Shuler, J.W. Leffler, C.L. Browdy (2009) Microbial ecology and management of biofloc systems. In: *The Rising Tide, Proceedings of the Special Session on Sustainable Shrimp Farming*, edited by Browdy, C.L., D.E. Jory, World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana, USA, 255-266.
- Ray, A.J., B.L. Lewis, C.L. Browdy, J.W. Leffler (2010a) Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal-exchange, superintensive culture systems. *Aquaculture* 299(1-4): 89-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.11.021>
- Ray, A.J., G. Seaborn, J.W. Leffler, S.B. Wilde, A. Lawson, C.L. Browdy (2010b) Characterization of microbial communities in minimal-exchange, intensive aquaculture systems and the effects of suspended solids management. *Aquaculture* 310(1-2): 130-138.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.10.019>
- Reis, W.G., P.C. Abreu, H. Brandao, W. Wasielesky, D. Krummenauer (2022) Colored LED lights can influence shrimp growth, water quality in biofloc culture. *Responsible Seafood Advocate*. Published on 18th April 2022.

- <https://www.globalseafood.org/advocate/colored-led-lights-can-influence-shrimp-growth-water-quality-in-biofloc-culture/>
- Reyes, O.S., M.N. Duray, C.B. Santiago, M. Ricci (2011) Growth and survival of grouper *Epinephelus coioides* (Hamilton) larvae fed free-living nematode *Panagrellus redivivus* at first feeding. *Aquaculture International* 19: 155-164.  
<https://doi.org/10.1007/s10499-010-9349-0>
- Ruby, P., S. Athithan, B. Ahilan, C.B.T. Rajagopalsamy, G. Sugumar (2017) Influence of biofloc meal on the growth performance of pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Biochemical and Cellular Archives* 17(2): 439-445.
- Samocha, T.M., S. Patnaik, M. Speed, A.-M. Ali, J.M. Burger, R.V. Almeida, Z. Ayub, M. Harisanto, A. Horowitz, D.L. Brock (2007) Use of molasses as carbon source in limited discharge nursery and grow-out systems for *Litopenaeus vannamei*. *Aquacultural Engineering* 36(2): 184-191.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.10.004>
- Santhanam, P., N. Jeyaraj, K. Jothiraj, S. Ananth, S.D. Kumar, P. Pachiappan (2019) Evaluation of the suitability of marine copepods as an alternative live feed in high-health fish larval production. In: *Basic and Applied Zooplankton Biology*, edited by Santhanam, P., A. Begum, P. Pachiappan, Springer, Singapore. 277-292.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-10-7953-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7953-5_11)
- Santhanam, P., S. Ananth, R. Nandakumar, T. Jayalakshmi, M. Kaviyaran, P. Perumal (2015) Intensive indoor and outdoor pilot scale culture of marine copepods. In: *Advances in Marine and Brackish Water Aquaculture*, edited by Santhanam, P., A.R. Thirunavukkarasu, P. Perumal, Springer. New Delhi. 33-42.
- Schneider, O., V. Sereti, E.H. Eping, J.A.J. Verreth (2006) Molasses as a C source for heterotrophic bacteria production on solid fish waste. *Aquaculture* 261(4): 1239-1248.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.08.053>
- Schveitzer, R., R. Arantes, P.F.S. Costódio, C.M. do Espírito Santo, L.V. Arana, W.Q. Seiffert, E.R. Andreatta (2013) Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange. *Aquacultural Engineering* 56: 59-70.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.04.006>
- Silva, D.A., P.C.M. de Lima, A.E.M. da Silva, P.R.C. de Oliveira Filho, S.M.B.C. da Silva, A.O. Gálvez L.O. Brito (2021) Effects of adding rotifers on the water quality, plankton composition and growth of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* juvenile, when cultured with biofloc technology. *Aquaculture Research* 52: 4380-4393.  
<https://doi.org/10.1111/are.15276>
- Sontakke, R., H. Haridas (2018) Economic viability of biofloc based system for the nursery rearing of milkfish (*Chanos chanos*). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7(8): 2960-2970.  
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.708.314>
- Sontakke, R., V.K. Tiwari, P. Kurcheti, B.R.A. Majeedkutty, M.P. Ande, H. Haridas (2021) Yam-based biofloc system improves the growth, digestive enzyme activity, bacterial community structure and nutritional content in milkfish (*Chanos chanos*). *Aquaculture Research* 52: 3460-3474.  
<https://doi.org/10.1111/are.15190>

- Stanley, D.L. (2000) The economics of the adoption of BMPs: The case of mariculture water management. *Ecological Economics* 35: 145-155. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00194-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00194-4)
- Streit, W.R., R.A. Schmitz (2004) Metagenomics - the key to the uncultured microbes. *Current Opinion in Microbiology* 7(5): 492-498. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2004.08.002>
- Tacon, A.G.J., J.J. Cody, L.D. Conquest, S. Divakaran, I.P. Forster, O.E. Decamp (2002) Effect of culture system on the nutrition and growth performance of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) fed different diets. *Aquaculture Nutrition* 8: 121-37. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2002.00199.x>
- Thorp, J.H., D.C. Rogers (2011) Copepods, fish lice, and seed shrimp. In: Thorp, J.H., Rogers, D.C. (Eds.) *Field guide to freshwater invertebrates of North America*. Boston: Academic Press, 139-146. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-381426-5.00016-8>
- Timmons, M.B., J.M. Ebeling (2007) *Recirculating Aquaculture*. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, New York USA.
- Timmons, M.B., B. Vinci (2007) Gas transfer. In *Recirculating Aquaculture*, edited by Timmons, M.B., J.M. Ebeling, Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, New York, USA. 397-438.
- Turker, H., A.G. Eversole, D.E. Brune (2003) Filtration of green algae and cyanobacteria by Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, in the partitioned aquaculture system. *Aquaculture* 215: 93-101. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00133-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00133-3)
- Ueno-Fukura, M., E. Aya-Baquero, L.F. Collazos-Lasso (2020) Biofloc application in larviculture of *Pterophyllum scalare* at different stocking densities. *AAACL Bioflux* 13(5): 3028-3036.
- van der Meeren, T., R.E. Olsen, K. Hamre, H.J. Fyhn, (2008) Biochemical composition of copepods for evaluation of feed quality in production of juvenile marine fish. *Aquaculture* 274: 375-397. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.041>
- Van, F.B., L.A. Meyer-Reil (1982) Biomass and metabolic activity of heterotrophic marine bacteria. In: *Advances in Microbial Ecology*. Plenum Press, New York, USA. 111-170.
- Vidal, O.M., C.B. Granja, F. Aranguren, J.A. Brock, M. Salazar (2001) A profound effect of hyperthermia on survival of *Litopenaeus vannamei* juveniles infected with white spot syndrome virus. *Journal of the World Aquaculture Society* 32: 364-72. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2001.tb00462.x>
- Vinatea, L., A.O. Gálvez, C.L. Browdy, A. Stokes, J. Venero, J. Haveman, B.L. Lewis, A. Lawson, A. Shuler, J.W. Leffler (2010) Photosynthesis, water respiration and growth performance of *Litopenaeus vannamei* in a super-intensive raceway culture with zero water exchange: interaction of water quality variables. *Aquacultural Engineering* 42: 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.09.001>
- Vinatea, L., J. Malpartida, R. Carbó, K.B. Andree, E. Gisbert, A. Estévez (2018) A comparison of recirculation aquaculture systems versus biofloc technology culture system for on-growing of fry of *Tinca tinca* (Cyprinidae) and fry of grey *Mugil cephalus* (Mugilidae). *Aquaculture* 482: 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.09.041>
- Walker, G.M. (1998) *Yeast physiology and biotechnology*. John Wiley & Sons. Chichester,

- UK.
- Wasielesky, W., H. Atwood, A. Stokes, C.L. Browdy (2006) Effect of natural production in a zero exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 258: 396-403.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.04.030>
- Williamson, C.E., J.W. Reid (2009) Copepoda. In Likens, G.E. (Ed.) *Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford: Academic Press, pp. 633-642.  
<https://doi.org/10.1016/b978-012370626-3.00146-0>
- Wohlfarth, G.W. G.L. Schroeder (1979) Use of manure in fish farming - a review. *Agricultural Wastes* 1(4): 279-299.  
[https://doi.org/10.1016/0141-4607\(79\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0141-4607(79)90012-X)
- Xia, S., F. Wang, Y. Fu, D. Yang, X. Ma (2005) Biodiversity analysis of microbial community in the chem-biofloculation treatment process. *Biotechnology and Bioengineering* 89(6): 656-659.  
<https://doi.org/10.1002/bit.20339>
- Xu, W., Y. Xu, H. Su, X. Hu, Y. Xu, Z. Li, G. Wen, Y. Cao (2020) Production performance, inorganic N control and bacterial community characteristics in a controlled biofloc-based system for indoor and outdoor super-intensive culture of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture* 531: 735749.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735749>
- Xu, W.-J., T.C. Morris, T.M. Samocha (2016) Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. *Aquaculture* 453: 169-175.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.021>
- Yang, J., H. Yang (2021) Recent development in se-enriched yeast, lactic acid bacteria and bifidobacteria. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 63: 411-425.  
<https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1948818>
- Yogev, U., K.R. Sowers, N. Mozes, A. Gross (2017) N and carbon balance in a novel near-zero water exchange saline recirculating aquaculture system. *Aquaculture* 467: 118-126.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.04.029>
- Yusuf, M.W., N.B.P. Utomo, M. Yuhana, Widanarni. (2015) Growth performance of catfish (*Clarias gariepinus*) in biofloc-based super intensive culture added with *Bacillus* sp. *Journal of Fisheries and Aquatic Science* 10(6): 523-532.  
<https://doi.org/10.3923/jfas.2015.523.532>
- Zokaeifar, H., J.L. Balcázar, C.R. Saad, M.S. Kamarudin, K. Sijam, A. Arshad, N. Nejat (2012) Effects of *Bacillus subtilis* on the growth performance, digestive enzymes, immune gene expression and disease resistance of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Fish and Shellfish Immunology* 33(4): 683-689.  
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2012.05.027>

# Application of Biofloc Technology on Aquaculture

Yew-Hu Chien

Department of Aquaculture, National Taiwan Ocean University

## Abstract

Biofloc technology is considered the new "blue revolution" in the aquaculture industry. The concept of biofloc technology is to establish and maintain a stable microbial community in the culture area, so that the settlement provides important ecological services for the cultured species, including the recycling of waste generated in the aquaculture process, which not only assimilates excess nutrients into microbial biomass, enriches the basis of the natural food chain, but also transforms and/or solidifies the free and therefore uncontrollable, potential pollution sources into useful biological resources, and at the same time eliminates toxicity in the environment, inhibits the proliferation of pathogens, and provides more assurance for biosecurity. The ecological services of biofloc technology also bring economic benefits to aquaculture production, including reducing feed costs, reducing water quality maintenance costs, saving water resources, and improving survival and growth rates, as well as yields. This paper will review the application of biofloc technology in aquaculture from three levels: (1) the dynamics of biofloc settlements in the aquaculture system, (2) the interaction between biofloc technology and aquaculture production, and (3) the application of biofloc technology in aquaculture. Finally, the prospect and prospect of biofloc technology research are summarized.

**Keywords:** Bio-flocculation Technology, microbial community, Zero water exchange, Oxygen Dynamics, Carbon Nitrogen Ratio(C/N)

---

Received 18 February 2025; revised 14 April 2025; accepted 02 May 2025; available online 02 June 2025

Corresponding Author's E-mail: [yhchien@mail.ntou.edu.tw](mailto:yhchien@mail.ntou.edu.tw)

DOI: [10.29474/FER.202512.0106](https://doi.org/10.29474/FER.202512.0106)

