

農業推廣手冊61

淡水長臂大蝦繁殖 與養殖技術

郭信威、李政穎、劉力維、許嘉合、陳怡瑄、鄭文騰
編著

國立屏東科技大學農業推廣委員會 印行
農業部經費補助

中華民國一十四年十二月

農業推廣手冊
61

淡水長臂大蝦繁殖與養殖技術

國立屏東科技大學農業推廣委員會

廣告



9 786267 682104



農業推廣手冊61

淡水長臂大蝦繁殖 與養殖技術

郭信威、李政穎、劉力維、許嘉合、陳怡瑄、鄭文騰
編著





目錄

序言 2

第一章、淡水長臂大蝦介紹與生理特性 4

第二章、淡水長臂大蝦繁殖技術 10

第三章、淡水長臂大蝦養殖與池塘管理 22

第四章、水質變化對水生生物的影響 30

第五章、水產養殖感測技術與智慧化應用 40

第六章、農業副產物作為永續水產養殖生產
之應用潛力 52

第七章、結語 60

第八章、參考文獻 62



序言



序言

在台灣的水產養殖史中，淡水長臂大蝦並不是最早登場的主角，卻在時代推動下成為備受矚目的重要物種，我國發展出成熟的人工繁殖、苗種生產與養殖技術，其背後凝聚著無數研究者與養殖戶的經驗累積與技術革新，這本專書的編寫，正是在這樣的歷史脈絡與產業需求中誕生。伴隨著釣蝦文化興起，推動市場需求，更在活蝦料理、餐飲文化與在地飲食記憶中，淡水長臂大蝦扮演不可取代的角色。本書以科學研究為基礎，系統性介紹其生活史、食性、脫殼生理、環境適應等核心知識，使讀者能透徹理解此物種在自然環境及人工養殖條件下的需求與限制，延續歷史脈絡，深入探討人工繁殖技術的發展、瓶頸與突破，到現代化繁殖方法的形成，逐步建構完整的理論與實務內容。我們希望此書能成為養殖戶提升管理能力的教材，教學者與學生瞭解淡水蝦類生物學與技術的知識來源，產業永續發展的知識基礎。

國立屏東科技大學 科技農業進修學士學位學程

郭信威 謹識

114年12月





第一章

淡水長臂大蝦介紹 與生理特性

第一章、淡水長臂大蝦介紹與生理特性

國立屏東科技大學 科技農業進修學士學位學程

郭信威 助理教授

1. 前言

淡水長臂大蝦 (*Macrobrachium rosenbergii*)，俗稱泰國蝦 (圖1)、泰國長臂大蝦、大頭蝦、羅氏沼蝦，是全球最重要的淡水甲殼類經濟物種之一。其天然分佈範圍極廣，主要集中於南亞、東南亞與澳洲北部水域，包括孟加拉、柬埔寨、印度、印度尼西亞、爪哇、馬來西亞、緬甸、菲律賓、新加坡、斯里蘭卡、泰國、越南與澳大利亞等地區，皆可見到天然族群的足跡，因其成長快速、肉質佳與繁殖技術相對成熟，近數十年陸續被人為引進至非洲、北美洲與南



圖1 淡水長臂大蝦

美洲，使其成為跨洲際廣泛養殖的淡水蝦種之一 (Sulit & Aldon, 2006)。這些資料充分顯示淡水長臂大蝦的環境適應性強，能生存於河川、湖泊、沼澤、淡水與半鹹水交界地帶等多變的水域環境，使其在全球水產養殖領域占有重要地位。

在台灣，淡水長臂大蝦之所以被稱為「泰國蝦」，與其引進背景密切相關。雖然名稱讓人誤以為該物種為泰國特有，但事實上其廣泛分佈於整個南亞及東南亞地區，並非僅限於泰國。然而由於在臺灣繁殖技術開發的種源確實來自泰國，因此在民間及產業中逐漸形成「泰

國蝦」一名。歷史上，在 1970 年，我國派駐聯合國糧農組織的林紹文博士自泰國引進，之後由廖一久博士將這批親蝦帶至屏東水產試驗所東港分所，並與漁業局烏山頭水庫試驗站合作，成功建立了人工繁殖與養殖技術體系，使其成為台灣水產養殖業的重要物種之一（資料來源：農傳媒－繁養殖技術突破與改進 開創臺灣釣蝦產業的泰國蝦），正因為這段關鍵的技術建立歷程，這種蝦在台灣被普遍稱作「泰國蝦」。

2. 淡水長臂大蝦產業發展

淡水長臂大蝦（俗稱泰國蝦）於 1970 年由「淡水蝦養殖之父」林紹文博士展開相關繁養殖技術的研究，1971 年即成功完成國內首例人工繁殖，奠定日後產業發展的重要基礎，由於當時草蝦養殖風氣正盛，淡水長臂大蝦的養殖技術雖已成熟，但仍乏人問津。直到 1987 年草蝦產業因病原感染而遭受重創，養殖戶開始尋求替代品種，淡水長臂大蝦的養殖產業才逐漸受到重視並快速興起，淡水長臂大蝦在台灣的養殖始於 1980 年代初期，當時市場需求不高，僅用於廟會供品與婚宴等特定場合，1981 年全台掀起釣蝦娛樂風潮，帶動活蝦需求急速增加，至 1984 年，餐廳陸續推出淡水長臂大蝦料理，使消費市場快速擴大，為因應需求提升，自 1986 年起淡水長臂大蝦的養殖開始普及，並在全台形成具規模的養殖產業鏈。

台灣的釣蝦文化與活蝦消費習慣密切結合，是活蝦需求持續強勁的主要推力之一。釣蝦場遍布全台，提供「自己釣、馬上吃」的體驗，加上現場烹調的胡椒蝦、蒜頭蝦、鹽烤蝦等料理，強調新鮮、Q 彈與甜美口感，使消費者對活體蝦有高度偏好。這種飲食文化深深影響了市場結構，使冷凍或加工蝦品難以取代活蝦的消費定位。台灣的活蝦供應鏈也極具特色與效率，泰國蝦通常於清晨自屏東地區的蝦塢現撈，經挑選與分級後，迅速送上活蝦運輸車，維持運輸過程中的水質、溶氧與溫度，以確保蝦子保持活力。這些活蝦會在數小時內配送至全台釣蝦場與活蝦餐廳，有些甚至可在中午前上桌，真正達成「清晨還在游泳，中午就成為餐桌美味」的快速供應模式，這種高效率的活蝦運輸技術與深植在地的飲食文化彼此結合，促成台灣淡水長臂大蝦產業的蓬勃發展，並使其至今仍為國內水產養殖的重要物種之一。

3. 淡水長臂大蝦生理特徵

在生理與生態層面，淡水長臂大蝦屬雜食性，兼具捕食與底棲拾食特性，其攝食餌料會依生長階段與棲息環境顯著變化。於天然水域中，蚤狀幼體主要依賴小型浮游動物為食，隨著生長進入後期幼體及成蝦階段，食性逐漸轉變得更加多樣化，會攝食水生昆蟲、藻類、水草、穀類、小型軟體動物、動物殘渣等天然餌料，亦常因生長密度或餌料不足而產生自相殘食行為。在人工養殖環境中，其食性與投餵方式則更具管理性，蚤狀幼體常以豐年蝦無節幼蟲、蒸蛋或高營養人工配方餌料作為主要食物，進入後期幼體或成蝦階段後，則以人工配合



飼料為主，但仍可能因密度、壓力或脫殼時的脆弱狀態而出現自相殘食。這些現象代表淡水長臂大蝦餌料攝取行為的彈性及其強烈的營養需求，對管理者而言，也意味著需依其生長階段調整餌料種類、投餵量與投餵頻率。

淡水長臂大蝦的生長與發育過程中，脫殼是極其重要且無法避免的生理現象。由於蝦類屬節肢動物，體表被堅硬的外骨骼所覆蓋，外骨骼雖能提供支撐與防禦功能，卻無法如脊椎動物的皮膚般隨身體成長而伸展。因此蝦類必須透過週期性的脫殼來更換外骨骼，使身體能擴大並進一步發育。對淡水長臂大蝦而言，一生至少需進行數十次以上的脫殼，每一次脫殼都伴隨著顯著的生理變化與能量消耗，並受到環境、水質、營養與內分泌調控等多重因素的影響。

脫殼的主要目的可分為三大類：生長脫殼、生殖脫殼與緊迫脫殼。生長脫殼為最基本且最常見的脫殼形式。淡水長臂大蝦的外骨骼由甲殼素與碳酸鈣組成，是固定且缺乏伸縮性的結構，為容納身體組織的生長，幼蝦與亞成蝦階段會以固定週期進行脫殼，脫殼後的外骨骼在尚未完全硬化時，蝦體會吸水膨脹，使體積迅速增加，待外骨骼硬化後，即完成一次體型上的成長。這也是淡水長臂大蝦生長曲線呈階梯狀的原因之一，每一次脫殼即代表一次體重與體長增加。生殖脫殼則多發生於性成熟期的個體，尤其是將進行交配的母蝦。蝦類在交配時需要使外生殖器官暴露且保持柔軟，以利雄蝦將精莖順利附著於母蝦腹部，因此在雌蝦交配前後常會發生脫殼，使其外骨骼處於柔軟狀態，進而增加繁殖成功率。此外部分研究也指出脫殼前後的生殖內分泌活動會明顯增加，顯示脫殼與生殖週期存在一定程度的生理連動性。緊迫脫殼屬於異常脫殼，通常是環境或生理壓力造成，當蝦子遭遇劇烈的水質變化、外傷、病原感染、或是某些化學物質刺激時，內分泌系統可能被迫進入不正常的脫殼程序，使個體提前脫殼，這類脫殼往往伴隨著高死亡風險，因為蝦體在脫殼後外骨骼尚未硬化，抵抗力低，且若脫殼能量不足還可能發生「脫殼不全」、肢體殘缺或死亡，因此在養殖管理中，避免環境緊迫、維持水質穩定、適當投餌與減少刺激，是降低異常脫殼的關鍵。

淡水長臂大蝦的脫殼過程可分為數個明確的階段，每一階段皆代表其外骨骼更新及生理狀態的變化。一般可依照脫殼生理特徵區分為 A、B、C、D、E 五大階段 (Peebles, 1979):

A 階段：剛脫殼期 (Postmolt)

- 蝦子剛從舊殼中脫出，體表極為柔軟。

- 由於新殼尚未鈣化，蝦子幾乎不活動、不攝食。
- 此階段對外界環境刺激極度敏感，是最容易受傷或遭受捕食的時期。

B 階段：硬殼初期 (Early Intermolt)

- 外骨骼開始逐漸鈣化，身體硬度略提升。
- 活動力稍微增加，但仍未完全開始攝食。
- 生理狀態仍屬脆弱。

C 階段：硬殼成熟期 (Intermolt)

- 外骨骼完成大部分的鈣化，體表變硬而具保護性。
- 活動力強，開始正常攝食。
- 為生長最穩定、可承受環境變動的階段。

D 階段：脫殼前期 (Premolt)

- 新的外骨骼在舊殼內逐漸形成。
- 蝦子會降低活動力，攝食量下降。

E 階段：脫殼準備期 (Early Premolt)

- 蝦子完成新殼的形成並開始吸水，使體積膨脹推開舊殼。
- 活動力下降，進入脫殼的關鍵準備狀態。







第二章 淡水長臂大蝦 繁殖技術

第二章、淡水長臂大蝦繁殖技術

國立屏東科技大學 研究總中心
鄭文騰 特聘級研究員

1. 前言

淡水長臂大蝦的人工繁殖技術，是台灣水產史上極具代表性的里程碑，而此一技術的奠基者，正是被譽為「淡水蝦養殖之父」的林紹文博士。在泰國蝦尚未普及養殖的早期階段，人工繁殖面臨極大挑戰，尤其是蚤狀幼體期的成活率極低，當時國際間也缺乏有效的技術參考，林博士於取得母蝦所產下的蚤狀幼體後，曾投入大量時間進行餌料與飼育方法的嘗試，包括以魚漿、蒸蛋、牛奶、豆漿等各式高營養且易取得的物質作為餌料，然而這些嘗試皆以失敗告終，所有蚤狀幼體都無法順利存活，讓他一度以為國外引進的技術與台灣環境條件不相容。然而一次看似偶然的事件，卻成為台灣泰國蝦人工繁殖技術突破的關鍵，原本認為可能是餌料種類差異導致的結果，但深入思考後推測真正的原因並非營養，而是淡水長臂大蝦的蚤狀幼體並不能在純淡水中存活，而必須在含鹽度的水環境中完成早期生活史。這項發現與後續的野外觀察相互印證，野生母蝦會在河川下游的河海交界處產卵，使其蚤狀幼體得以在半鹹水環境中順利發育。這對繁殖技術的建立意義深遠，林博士據此調整育苗流程，逐步建立起完整的母蝦成熟管理、抱卵培育、蚤狀幼體孵育、鹽度控制與後期幼體培育等環節。

2. 種蝦選育與條件判定

成功繁殖的第一步，即是挑選健康且具繁殖能力的種蝦。優良種蝦可大幅提升抱卵率、孵化率及幼苗品質，因此在選育時必須遵循以下標準：

2.1 健康無病徵的種蝦來源

應選擇來自無疾病紀錄的養殖池，且種蝦需具備：

- 體型健壯、外觀飽滿
- 色澤明亮、蝦體乾淨無附著物
- 無外傷或爛肢情形
- 游動積極、反應敏捷、攝食正常

2.2 附肢完整性的重要性

淡水長臂大蝦的附肢具有：

- 交配功能
- 感覺與平衡功能
- 運動與逃生能力
- 攝食能力
- 防禦作用

附肢缺損會導致交配失敗、攝食降低，甚至因傷口感染而死亡。因此在捕撈與搬運種蝦時需格外謹慎，避免高落差、壓迫與長時間離水等操作。

2.3 公母交配比例配置

繁殖池中的雌雄比例對交配成功率具有決定性影響。一般建議：

- 公蝦：母蝦 = 1：2.5-3
- 若以面積計算，每分地
 - 公蝦放養 100 斤
 - 母蝦放養 300 斤

此比例能讓成熟公蝦有效完成交配，同時避免公蝦之間的競爭壓力過大，造成無謂的能量消耗。

2.4 母蝦抱卵的發育與成熟管理

母蝦交配後，其受精卵會附著於腹部游泳足上，形成明顯的抱卵狀態。卵的顏色會隨時間變化，在溫度 28°C 的狀況下，約 18-21 天可由淡橘色轉化為黑色（圖 2）：

- 初期：黃色或淡橘色
- 中期：逐漸轉深，呈橘紅色
- 後期：卵眼可見，顏色較深，接近孵化



在此期間，母蝦需要穩定的水質與低干擾環境，以避免因緊迫導致脫卵。抱卵母蝦通常不宜長時間搬動，且育成池需維持：

- 適當溶氧量
- 弱光環境
- 適度遮蔽



圖2 母蝦抱卵的發育與成

2.5 幼苗孵化與早期育成條件

母蝦所孵化出的幼生屬於浮游性大型幼體，必須在半淡鹹水中才能存活。

成功育苗通常需依照以下條件：

1. 適當鹽度：10–15 ppt
2. 溫度維持：29–31° C
3. 自然光照

4. 循環水流，使幼體能維持漂浮狀態
5. 餌料來源：豐年蝦無節幼蟲為必備主食，於後期輔以蒸蛋及粉狀人工飼料

2.6 蝦苗淡化

幼體經過 11 次脫殼後，會轉變為類似成蝦外型的 post-larvae，此時可逐步降低鹽度，使其淡化至全淡水環境：

- 每日降低鹽度 1-2 ppt
- 逐步過渡 5-7 天完成淡化
- 避免瞬間變化造成緊迫壓力而死亡

3. 脫殼期數判斷

淡水長臂大蝦自卵孵化至進入稚蝦階段，必須經歷多次形態與生理的轉變，其中「脫殼」是其完成生長階段轉換的核心機制。蝦苗自孵化後會以極高的頻率進行脫殼，其目的在於快速提升體長、增厚外骨骼並逐漸發展出完整的附肢功能。一般而言，淡水長臂大蝦的幼生必須歷經約十一個脫殼階段（表 1），才能逐步由漂浮性、依賴水流的浮游生活形態，轉變為能主動控制身體進行「正游」的稚蝦。這一階段的達成，代表蝦苗的游泳肌群、附肢結構、外骨骼硬化程度及神經控制能力已趨成熟，生存能力與覓食效率大幅提升。因此穩定水質、適當鹽度與充足營養供應，在這十一個脫殼階段中至關重要，任何環境波動都可能造成脫殼失敗與大量死亡，影響整批蝦苗的培育成功率。蝦苗生產者須每日使用顯微鏡觀察蝦苗的體態變化，以判斷其期數，每一期的蝦苗皆有許多體態變化，本書挑選幾處較為明顯變化之特徵提供做為參考（圖 3-13）。

表1 蝦苗養殖天數對應脫殼期數

期數	第一期	第二期	第三期	第四期		第五期			第六期	
天數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
期數	第六期	第七期		第八期		第九期		第十期	第十一期	
天數	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
期數	第十一期		第十二期							
天數	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30





第一期蝦苗

- 無眼柄
- 無額角背齒
- 無尾肢
- 無第三至第五步足

圖3 蝦苗第一期體態特徵



第二期蝦苗

- 眼柄發育
- 第三至第五步足已發育
- 步足分節、末端具剛毛



圖4 蝦苗第二期體態特徵

第三期蝦苗

- 額角背齒 1 齒
- 尾肢發育具剛毛



圖5 蝦苗第三期體態特徵

第四期蝦苗

- 額角背齒 2 齒
- 尾肢發育分化內外



圖6 蝦苗第四期體態特徵





第五期蝦苗

- 第五步足外側具三根剛毛



圖7 蝦苗第五期體態特徵



第六期蝦苗

- 泳足萌芽



圖8 蝦苗第六期體態特徵

第七期蝦苗

- 泳足發育成雙肢型



圖9 蝦苗第七期體態特徵

第八期蝦苗

- 泳足外側具剛毛



圖10 蝦苗第八期體態特徵





第九期蝦苗

- 螯發達



圖11 蝦苗第九期體態特徵



第十期蝦苗

- 額角背齒 9 齒



圖12 蝦苗第十期體態特徵



第十一期蝦苗

● 額角背齒 11



圖13 蝦苗第十一期體態特徵







第三章

淡水長臂大蝦養殖 與池塘管理

第三章、淡水長臂大蝦養殖與池塘管理

國立屏東科技大學 水產養殖系
李政穎 博士

1. 前言

淡水長臂大蝦的年度養殖時程，自蝦苗生產至收穫，通常為 6 至 8 個月，並依蝦苗生長速度與季節環境變化進行階段性管理。本書以自三月開始進行養殖為例，三月上旬至三月底為蝦苗繁養殖期，此階段的重點在於讓蝦苗順利完成多次脫殼、逐漸發育為能自行游動與攝食能力，因此需要穩定的水質、合適的鹽度與高營養密度的餌料。進入四月上旬至五月中旬，蝦苗已開始正游，開始進入成蝦養成的第一階段，生長速度明顯加快，對水質波動較為敏感，管理重點在於密度調控與持續提供高品質飼料。五月中旬至七月上旬為第二階段的中蝦養成期，蝦體逐漸增大、攝食量增加，需要加強日常巡檢並維持優質水色，以避免因水質惡化而影響成長。自七月中旬至十月中旬則進入成蝦第三階段，也是生產的關鍵期，大蝦接近商品規格，對溶氧需求與空間占用增加，需加強池水循環與增氧設備管理，以確保生長速度穩定並提升存活率（表 2）。

表2 蝦養殖進度總覽(自3月起為例)

月份	階段	預計天數	蝦體密度或規格
3月上旬~3月底	蝦苗繁養殖	30天	約1000尾/克（孵化後早期育苗）
4月上旬~5月中旬	成蝦第一階段(小蝦)	45~60天	450~550尾/台斤（約0.8~1g/尾）
5月中旬~7月上旬	成蝦第二階段(中蝦)	45~60天	70~80尾/台斤（約7~8g/尾）
7月中旬~10月中旬	成蝦第三階段(大蝦)	100~120天	15~20尾/台斤（約30g以上）

2. 淡水長臂大蝦養殖戶的一日工作流程與管理實務

淡水長臂大蝦的養殖管理是依賴經驗、觀察力與即時判斷的工作。由於長臂大蝦對水質、溶氧、餌料攝取與環境變化敏感，養殖戶必須在每日的固定時段進行周全的巡檢與紀錄，以確保蝦體健康、生長順利並降低疾病風險。本章將完整呈現蝦農在一天中不同時段的主要工作內容，從清晨到深夜的巡池、餵食、設備檢查到日誌紀錄，看似日常的步驟，實際上構成整體養殖管理體系的核心要素。

2.1 清晨作業 (06:00-09:00) (表 3)

清晨是蝦池環境最敏感、最需要監控的時段之一，夜間植物性浮游生物光合作用停止，溶氧下降，蝦類活動受水溫影響，可能出現攝食力下降行為。因此清晨的檢查不僅是例行性工作，更是評估整池健康的重要指標。

a. 第一次餵食：依蝦齡與天氣精準判斷

蝦農會在日出後不久進行當日的第一次餵食，餌料的種類與量需依據蝦齡、季節水溫、天氣狀況與前一天的攝食反應進行判斷。例如天氣晴朗、水溫穩定時，蝦隻攝食旺盛，餵食量可適度增加，若遇到低溫或水質異常，則需減量甚至停餵。這樣的微調，是避免殘餌腐敗、維持水質的重要手段。

b. 巡池：從水面到池底的全面觀察

巡池是蝦農最基本但最重要的工作。清晨巡池尤其關鍵，必須觀察：

- 是否出現蝦浮頭現象
- 池邊是否有蝦死亡或脫殼碎片
- 水色是否偏濃、偏淡或呈異常顏色

c. 水質測量：建立每日的基準值

表3 淡水長臂大蝦養殖清晨作業 (06:00-09:00)

項目	說明
第1次餵食	依據蝦齡與天氣調整餵食量
巡池	檢查蝦池水面狀況、整理環境
測量水質	記錄水溫、溶氧、pH、透明度、氨氮、亞硝酸等指標
拍照記錄	定點拍攝水色與蝦況，供日後比對
設備巡檢	確認增氧機、水車、感測設備正常運作



蝦農會在此時進行第一輪水質檢測，項目包括：

- 水溫
- 溶氧
- pH
- 透明度
- 氨氮 ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$)
- 亞硝酸 (NO_2^-)

這水溫與溶氧為每日必測的水質項目，其他因子則定期檢測即可。

d. 拍照記錄：累積視覺化資料

固定拍攝水色、池況與蝦隻分布情形，是現代養殖紀錄的一部分。這些照片日後能用來比對水色變化、藻相變動或環境異常，是建立專業養殖日誌的重要資料來源。

e. 設備巡檢：確保所有系統正常運作

清晨的設備巡檢包括：

- 增氧機是否正常打氣
- 水車是否運轉無異音
- 水泵、水閘、水管是否漏水

若清晨設備失效，加上夜間失氧風險，可能造成重大損失，因此這項工作格外重要。

2.2 上午作業 (09:00–12:00) (表 4)：確認蝦況與完成日常紀錄

上午是觀察蝦隻攝食量與池水變化的第二個重要時段。

a. 巡池：觀察攝食反應

此時餌料大多已被蝦隻攝取，蝦農可藉由餌料盤或池底觀察了解蝦隻的實際攝食量。若餌料殘留較多，可能表示：

- 水質不佳

- 天氣突變
- 環境緊迫壓力
- 蝦病初期徵兆

因此上午巡池是調整下午餵食量的重要依據。

b. 日誌紀錄：養殖管理的核心文件

蝦農會在上午整理以下紀錄：

- 今日餵食量
- 水質測量結果
- 池況觀察
- 是否有異常行為或死亡
- 是否使用任何水質調整劑

這些資料累積後能作為下一批蝦的管理參考，亦能提升管理精準度。

c. 拍照與環境紀錄

上午再度拍攝池色變化、蝦群活動狀況，有助於確認水質是否穩定或是否有突發性變化。

d. 設備巡檢：確保白天運轉穩定

白天是光合作用旺盛的時段，水質會快速變化，因此需再次確保增氧與水循環設備保持正常，以避免水色突濃或溶氧劇烈波動。

表4 淡水長臂大蝦養殖上午作業 (09:00-12:00)

項目	說明
巡池	觀察攝食情形
紀錄日誌	填寫今日餵食量、水質、異常觀察或藥物使用紀錄
拍照記錄	定點拍攝水色與蝦況，供日後比對
設備巡檢	確認增氧機、水車、感測設備正常運作



2.3 下午作業 (14:00–17:00) (表 5)：生長關鍵期的再管理

下午氣溫上升，蝦隻活動力提高，是另一次重要餵食與管理時段。

a. 第二次餵食：補充能量、促進生長

下午餵食更能反映蝦隻的真實攝食能力，此時水溫穩定、活動旺盛，是促進生長的最佳時段。蝦農會根據：

- 上午攝食量
- 水質狀態
- 天氣預報
- 蝦齡
- 型態與密度

調整餵食量，避免殘餌造成有機質累積。

b. 第二次水質測量：確認日間變化

下午的水質與清晨差異通常最大，尤其：

- DO 在下午最高
- pH 可能因藻類光合作用而上升
- 水色可能變濃

因此下午測量可掌握「日間變化曲線」，是水質管理的重要依據。

c. 紀錄日誌：補充下午資料

蝦農會把下午餵食量、水質狀況及池水變化紀錄入冊，使管理資料更完整。

d. 拍照比對

再度拍攝池況，可比對日間水色變化，例如有無出現「午後變濃」、藻相惡化、泡沫異常等現象。

e. 設備巡檢：避免傍晚突發問題

傍晚氣溫下降前，需再次確認增氧機、水車、感測器在夜間能正常提供監控與氧氣供應。

表5 淡水長臂大蝦養殖下午作業 (14:00-17:00)

項目	說明
第2次餵食	依據蝦齡與天氣調整餵食量
測量水質	記錄水溫、溶氧、pH、透明度、氨氮、亞硝酸等指標
紀錄日誌	填寫今日餵食量、水質、異常觀察或藥物使用紀錄
拍照記錄	定點拍攝水色與蝦況，供日後比對
設備巡檢	確認增氧機、水車、感測設備正常運作

2.4 夜間作業 (18:00-24:00) (表 6)：防止低溶氧與夜間異常

夜間是蝦類養殖最危險、也最需要專業經驗的時段。藻類停止光合作用、池水氧氣下降，加上溫度變化，常導致蝦類行為異常或死亡，因此夜間巡檢是蝦農不可或缺的任務。

a. 夜間水質巡查：掌握溶氧最低點

夜間特別關注溶氧值，因其通常在凌晨達到最低點。

- 使用攜帶式 DO 機測量
- 檢查水車是否正常轉動
- 必要時增加增氧或提升水流

若夜間失氧，整池損失可能在數小時內發生，因此每夜巡查是避免災害的第一道防線。

b. 夜間攝食與活動觀察

利用探照燈觀察：

- 蝦是否集中於某處
- 是否呈現躁動或不活動
- 有無翻白或行為異常
- 底部是否乾淨、是否有死蝦或殘餌堆積

夜間的行為觀察是診斷疾病或水質問題的最快方式。

c. 整理當日紀錄：建立翌日管理基礎



夜間也是整理所有數據、準備隔日管理計畫的時間。蝦農會綜合當日紀錄，包括：

- 餵食量與攝食反應
- 水質曲線
- 異常事件
- 設備狀態

這些資料有助於第二天的調整與長期累積管理經驗。

d. 設備巡檢：夜間運轉安全確認

最後蝦農會再次巡查各項馬達機具的運作狀況，確保夜間持續穩定，不讓任何設備故障成為潛在風險。

表6 淡水長臂大蝦養殖夜間作業 (18:00-24:00)

項目	說明
晚上水質巡查	晚上是溶氧最低點，須特別監控 DO 值，必要時增氧
夜間攝食觀察	利用探照燈觀察蝦隻攝食、活動與底部狀態
記錄	整理當日紀錄，為隔日判斷與管理做準備
設備巡檢	確認增氧機、水車、感測設備正常運作



第四章

水質變化對 水生生物的影響

第四章、水質變化對水生生物的影響

國立屏東科技大學 研究總中心
許嘉合 助理教授級研究員

1. 前言

水質條件對水生生物的生存和發展至關重要。水質的概念本身是人類建構的，其評估必須從生態系統使用者的角度出發，而非僅僅是人類的需求 (Dallas & Day, 2004)。水質條件的變動會引發水生生物個體的各种生理與行為反應。近年來，由於氣候變遷和人類活動，全球不同類型水域（淡水、海水與河口）的水質正發生顯著變化 (Roman et al., 2024)。主要的水質變化因素包括水溫上升、溶氧量下降、酸鹼度改變（如海洋酸化）以及各類污染物的增加等。為了系統性探討這些影響，本文將水質條件大致區分為三類屬性：物理因子、化學因子（又分為一般化學參數及各類污染物或毒性物質）和生物因子。本文從個體生理與行為反應出發，討論各種重要水質參數變化對水生無脊椎動物和魚類的影響。

2. 水質物理因子

2.1 溫度

大多數水生動物是變溫生物，水溫升高可加速其代謝速率，但也可能超出其生理耐受範圍，導致緊迫反應甚至死亡。高水溫促使生物耗氧量與代謝速率增高，也會產生較多的排泄物，間接導致水質惡化。淡水無脊椎動物對溫度升高的反應多樣，包括加速個體生長和縮短發育週期，以及改變繁殖力和變態時間等，而族群的組成、物種豐富度與地理分布也會隨之改變 (Bonacina et al., 2023)。

對魚類而言，適度變暖可能提高幼魚的生長速度，但長期下來卻可能導致早熟和體型變小，族群中大型個體的比例下降 (Lindmark et al., 2023)。因升溫使魚類新陳代謝加快，同時水中可利用資源卻因環境容量下降而減少，雖促進個體生長卻降低了大型個體的存活與整體繁殖族群（產卵群體）規模縮減的結果。此外，溫度超過物種的耐受閾值時會引發熱休克、免疫功能抑制甚至死亡。而對於適應冷水的魚類，如鮭魚和鱒魚類，在河川水溫升高時可能出現行為改變，例如：尋找冷水棲息地或延遲洄游 (Berman & Quinn, 1991)。

2.2 濁度與懸浮固體

濁度與懸浮固體增加會降低水體透明度與光線穿透，抑制附著藻類與水生植物的光合作用與初級生產 (Lloyd et al., 1987)。當懸浮顆粒在水中時，會阻塞與磨損魚類鰓絲等體表結構，沉降後則細化底質、填塞礫石間孔隙，降低許多敏感底棲無脊椎與魚類產卵棲地的適宜性，進而導致多樣性下降與物種轉變 (Dallas & Day, 2004; Newcombe & MacDonald, 1991)。對魚類而言，濁度與沉積物不僅會損害鰓功能、增加生理壓力與疾病風險，也會因視覺受限而降低覓食效率與成長，並升高卵與仔魚的死亡率。不過在某些情況下，濁水亦可能提供抵禦視覺型掠食者的遮蔽效益 (Lloyd et al., 1987; Cavanagh et al., 2014)。此外，水中的懸浮顆粒會像「載體」一樣，把營養鹽、重金屬和農藥等污染物吸附在表面並一併帶著走，改變這些物質被生物接觸與利用的方式與位置。因此，濁度不只改變棲地的物理環境，也會影響化學毒物的分布與作用，成為關鍵壓力因子，進一步影響水生生物與整體食物網結構 (Dallas & Day, 2004; Sahoo et al., 2023)。

3. 水質化學因子

3.1 鹽度

鹽度雖常透過導電度等物理量換算取得，其本質反映的是水體溶解離子組成與滲透壓環境，因此在此歸類為化學因子。鹽度指一公斤的水中所含鹽類的公克數，單位上以 g/kg 或 ‰ 來表示，與總溶解固體 (total dissolved solids, TDS) 及導電率 (electrical conductivity, EC) 密切相關。總溶解固體 (TDS) 量測水中所有溶解的物質總量，包括無機與有機、帶電與不帶電的溶質。導電率 (EC) 量測水體導電能力，主要反映溶液中帶電粒子 / 離子的數量。由於天然水體中的 TDS 主要由 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 與 SO_4^{2-} 等幾種離子構成，這些離子既決定了水體的滲透壓與鹽度，也同時貢獻了導電能力，因此在多數情況下 TDS 與 EC 呈現高度正相關 (Hem, 1985; WHO, 2017)。在多數天然水體中，EC 可作為 TDS 的替代指標。鹽度則是將主要溶解離子的總濃度換算為總鹽分的概念，多用於描述海水、河口與鹽化淡水的離子強度 (Hem, 1985; Hounslow, 1995)，一般海水的鹽度範圍落在 34–35‰ 間。

依據生物對鹽類適應範圍的寬廣程度，可分為狹鹽性與廣鹽性：狹鹽性常見於內陸、遠洋、深海動物，廣鹽物種則多分布在河口。不論狹鹽性或廣鹽性物種，水生動物的生長與代謝通常呈現「最適鹽度區間」：在適中鹽度下，滲透調節成本較低，有利於維持正常生長與生理功能；一旦偏離物種耐受範圍，則會出現攝食下降、代謝失衡與生長受抑等現象 (Boeuf & Payan, 2001; Liu et al., 2023)。

外界鹽度的變化首先會改變環境滲透壓與離子梯度，進而牽動能量分配，包含生長、



繁殖與免疫反應等一連串生理機制。魚類等脊椎動物透過鰓、腎臟與腸道主動輸送離子，以維持血漿滲透壓在狹窄範圍內。這樣的滲透調節往往需耗費相當比例的能量預算，早期估計高達 20–50% 的總能量預算 (Boeuf & Payan, 2001)，而較新基於鈉鉀幫浦酶活性 ($\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$) 與代謝量的估算則多落在約 10%、整體範圍約 1–30% 之間，且具有顯著的物種與方法差異 (Heuer & Grosell, 2016)。早期生活史階段（如卵與幼生）對鹽度變動尤其敏感，多數魚類與淡水無脊椎在鹽度過高或過低時，其孵化與存活率明顯下降 (Boeuf & Payan, 2001; Kefford et al., 2007)。此外，鹽度變動會伴隨應激荷爾蒙與免疫指標的調整；高於耐受上限的鹽度會引起血漿離子與皮質醇升高、抗氧化與非特异性免疫指標改變，長期可造成肝臟與鰓組織病變及感染風險增加 (Boeuf & Payan, 2001; Liu et al., 2023)。

氣候變遷也正改變鹽度分布，進一步影響水生生物。全球暖化導致蒸發增加、極端乾旱與降雨，以及冰川融化與海平面上升，造成某些區域（如乾旱與半乾旱內陸水域、三角洲）淡水鹽化與沿海河川鹽度入侵加劇，使原本適應低鹽環境的魚類與無脊椎面臨超出耐受範圍的鹽度壓力 (Muruganandam et al., 2023)。同時，在海洋與河口系統中，溫度上升與降雨改變，正造成局部鹽度梯度與日常波動幅度異常。溫度與鹽度成為影響魚類等水生動物生理的兩個關鍵因子 (Agarwal et al., 2024)。

3.2 溶氧 (dissolved oxygen, DO)

溶氧為溶於水中的氧分子，濃度單位以 ppm 計。會受到水溫、大氣壓、水中光合作用和生物耗氧量影響。夜晚時段，由於無法行光合作用，水中溶氧會降低。溶氧濃度高時，會促進水生生物食慾並提高生長速率；缺氧 (<3 ppm) 或低氧 (<2 ppm) 時，水生動物會啟動生理調節機制來應對。許多無脊椎動物在缺氧條件下會降低代謝率以節省能量，出現代謝改變與活性氧化物質 (ROS) 累積，誘發抗氧化防禦酶系統表現，同時調節免疫反應，並透過激活缺氧誘導因子 (HIF-1 α) 相關基因來適應低氧環境 (Lee et al., 2023)。某些物種還會提高血液中血紅蛋白或血藍蛋白以提高攜氧能力。然而，並非所有生物都有相同的分子途徑應對缺氧，部分無脊椎動物缺乏 HIF-1 α 基因，可能依賴其他未知機制耐受低氧。

缺氧同時會引發行為上的改變，許多魚類會出現煩躁不安並試圖游離低氧區域（迴避行為），或者更頻繁地進行鰓呼吸或到水面換氣。如果缺氧嚴重且無法逃避，魚類可能進入休眠狀態或降低活動量以減少耗氧。

氣候暖化不僅直接提高水溫，也常使缺氧問題雪上加霜：水溫升高時水中氧氣溶解度下

降，而魚類等變溫動物的耗氧率上升，導致原本正常含氧的水域也出現缺氧狀況，水生動物承受更大生理壓力 (Roman et al., 2024)。當高溫與缺氧同時發生時，對個體的生存挑戰呈協同增強效應，更易引發魚蝦的大規模死亡事件。

3.3 酸鹼值 (pH 值) 與鹼度

pH 值反映水體的酸鹼性；鹼度則代表水體中和外加酸的能力，主要由重碳酸鹽與碳酸鹽離子所貢獻，同時也反映了系統抵抗酸鹼變動的緩衝能力 (Hem, 1985; Stumm & Morgan, 1996)。在多數天然水體中，酸鹼值受到二氧化碳濃度影響，平衡主要由碳酸鹽系統控制，其來源與水域基岩性質、風化作用及植被覆蓋密切相關 (Hem, 1985; McKenzie, 2017)。相較之下，人為活動如工業廢水排放以及二氧化硫與氮氧化物所造成的酸雨，則可能顯著改變水體的 pH 與鹼度，削弱其緩衝能力並導致區域性酸化 (Dallas & Day, 2004)。

pH 值的劇烈變化本身就會透過干擾體表離子交換與滲透壓平衡造成生物生理壓力，而在酸雨與酸化水體情境下，鋁釋放與累積，則會進一步損害魚類鰓功能與離子調節能力，往往是導致水生生物毒性效應的關鍵共伴因子之一 (Dallas & Day, 2004; Gensemer & Playle, 1999)。由於 pH 會強烈影響多種溶質的存在形態與毒性，一旦酸鹼條件改變，水體的化學風險也會隨之調整：例如鋁在 pH 6–8 時溶解度較低，但在較酸的條件下 (約 pH < 5–5.5)，鋁會以更易溶、更具生物可利用性的三價鋁及其水解物存在 (Al^{3+} 、 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 等)，顯著提高毒性 (Gensemer & Playle, 1999)。在酸化淡水系統中，鋁被視為重要的鰓毒物，可在魚類鰓部累積，干擾離子調節與氧氣交換，引起黏液分泌增加、鰓上皮增生與「呼吸性與離子調節型缺氧」，特別是對早期生活史階段的魚類與兩棲類格外不利 (Gensemer & Playle, 1999; Taghizadeh et al., 2013)。

海洋酸化 (大氣二氧化碳升高引起的海水 pH 值下降) 對許多海洋動物的生理產生深遠影響。對於具骨骼或殼的無脊椎動物 (如珊瑚、蛤類)，環境酸化會干擾它們形成骨骼或殼體的能力。在較低 pH 條件下，這些無脊椎動物往往優先維持基本代謝平衡，但為了對抗外界酸化壓力需要消耗額外能量，導致分配到鈣化作用的能量減少，因而殼體生長和強度受到限制，長期將危及生物的健康與存活 (Medeiros & Souza, 2023)。例如，雙殼類在酸化水域中殼體變薄、易碎，珊瑚礁的礁體生長速率也顯著下降。

魚類相對而言對環境 pH 變化有較強的體內酸鹼調節能力，但低 pH 環境仍可能影響其神經系統和行為。在實驗室研究中，暴露於高二氧化碳濃度的海洋魚類出現了神經傳導受損和感官行為異常的現象。酸化條件會干擾魚類大腦中的神經傳遞物質受體功能，導致魚類表現出異常的膽小或大膽行為、嗅覺辨識錯誤以及反應遲鈍等 (Sourisse et al., 2025)。不過，不



同魚種對酸化的敏感性差異很大。對幼體或胚胎階段的魚類而言，酸化仍可能造成發育異常和早期存活率降低，例如：鮭魚稚魚的短期死亡率增加數倍。

pH 改變對個體層面的影響包括了生理負荷增加（維持體內酸鹼平衡需耗費能量）、鈣化受阻、感官與行為改變，這些效應在無脊椎動物和魚類身上皆有體現，只是程度和具體機制有所不同。此外，pH 不僅影響金屬如鋁的溶解度與形態，也間接調控氨、硫化氫等含氮與含硫毒性物種的有效濃度與生物可利用性，進一步放大或緩和其對水生生物的影響。

3.4 總氨氮 (Total Ammonia Nitrogen, TAN)

總氨氮是水中未解離氨 (NH_3) 與銨離子 (NH_4^+) 之總和，主要來源包括魚類與其他水生動物的代謝排泄、有機物分解及含氮廢水排放。真正高度毒性的主要是未解離氨 (NH_3)， NH_3 與 NH_4^+ 的比例受 pH 與水溫控制：pH 與溫度愈高， NH_3 所佔比例愈大，因此在夏季、鹼性水體中，同樣 TAN 濃度的水體中，毒性會顯著升高 (Emerson et al., 1975)。

在生理層次上， NH_3 可穿透細胞膜進入血液與組織，干擾鰓部的排氨與離子交換，造成滲透壓失衡、代謝性鹼中毒與神經毒性，並誘發氧化壓力與組織病變，包括鰓絲充血與增生、呼吸困難、煩躁游動與食慾下降 (Randall & Tsui, 2002; Levit, 2010)。長期暴露於僅約 0.05–0.1 mg/L NH_3 中，即可觀察到生長遲緩、肝腎與鰓部組織病理變化、免疫功能受抑以及繁殖能力下降等慢性效應 (Levit, 2010)。因此，在養殖與生態監測中，TAN 通常會依據 pH 與溫度換算成 NH_3 濃度，以評估實際毒性風險，並作為管理操作的重要依據。

3.5 亞硝酸鹽 (NO_2^-) 與硝酸鹽 (NO_3^-)

亞硝酸鹽 (NO_2^-) 與硝酸鹽 (NO_3^-) 是水體氮循環中的中間與終端氧化形態。在好氧條件下，氨氮經硝化作用依序被氧化為 NO_2^- 與 NO_3^- ；在缺氧或反硝化條件下， NO_3^- 又可還原為氮氣返回大氣。亞硝酸鹽通常在硝化不完全、負荷過高或短期缺氧時累積，而硝酸鹽則是相對穩定且水溶性高、在河川與地下水中普遍存在的形態 (Lewis & Morris, 1986)。亞硝酸鹽對魚類與許多無脊椎動物具有中高度急性毒性。其主要機制為 NO_2^- 透過鰓進入血液後，將血紅素中的 Fe^{2+} 氧化為 Fe^{3+} 形成高鐵血紅素，導致血液攜氧能力下降，引發「棕血症」與組織缺氧，同時也會干擾氯離子與其他電解質的平衡 (Lewis & Morris, 1986; Jensen, 2003)。長期暴露在較低濃度下亦會造成紅血球指標改變、免疫抑制與生長率下降 (Jensen, 2003)。硝酸鹽的急性毒性相對較低，長期以來常被視為相對「安全」的氮形態，但近年的研究顯示，長期高濃度 NO_3^- 暴露仍會對魚類與無脊椎造成明顯的慢性影響，包括生長受抑、飼料利用率下降、肝腎組織病變、免疫及抗氧化系統受損等 (Yang et al., 2019)。在生態系尺度， NO_2^-



與 NO_3^- 的高輸入還會促進優養化，間接引發藻華與缺氧事件，進一步放大對水生生物與棲地品質的壓力。

3.6 硫化氫 (Hydrogen Sulfide, H_2S)

硫化氫 (Hydrogen Sulfide, H_2S) 是水體與沉積物中硫循環的關鍵還原形態之一，主要在缺氧或厭氧、富含有機質的環境中，由硫酸鹽還原菌利用 SO_4^{2-} 作為電子受體分解有機物而產生 (Smith et al., 1976)。水中總硫化物可在未解離形態 H_2S 與離子形態 HS^- 、 S^{2-} 之間轉換，其中未解離態 H_2S 的毒性遠高於 $\text{HS}^-/\text{S}^{2-}$ ，而 H_2S 所占比例受 pH 強烈控制：pH 越低， H_2S 比例越高，因此在微酸至中性且缺氧的底層水體與底泥中，硫化氫毒性風險特別高 (Anzecc, 2000)。對水生生物而言， H_2S 是典型的呼吸毒物，可穿透細胞膜進入細胞，抑制電子傳遞鏈中細胞色素 c 氧化酶 (cytochrome c oxidase) 的活性，直接阻斷有氧呼吸。同時會損傷鰓上皮與黏膜，導致黏液分泌增加、鰓絲黏合與氣體交換效率下降 (Smith et al., 1976)。

在卵、仔魚與無脊椎幼生階段，即使在低 H_2S 濃度下 (0.04–0.1 mg/L)，也已觀察到游泳能力下降、發育異常與高死亡率 (FAO, 1990)。在自然與養殖環境中， H_2S 常與優養化並存。當底部水體缺氧、底泥大量產生 H_2S ，一旦因風浪或水體翻轉將底水中的硫化氫帶入上層水體，即可能在短時間內引發大規模魚貝類暴斃事件。因此，多數水質與生態風險指引均將 H_2S 列為優先監測與嚴格控制的有毒物質 (Anzecc, 2000; Smith et al., 1976)。

3.7 水質化學因子—污染物與毒化物

各類人為污染物進入水體後，會對水生動物個體造成直接毒性或亞致死性壓力。重金屬例如汞、鎘、鉛等可以在魚類和無脊椎動物體內累積，干擾酵素系統與細胞功能，引起氧化損傷與免疫抑制 (Jeong et al., 2023)。不同金屬之間交互作用或與其他污染物及環境因子（如溫度）交互作用時，可能出現加乘或拮抗效應，導致毒性表現高度變動 (Jeong et al., 2023)，對水生無脊椎動物的生理與生化指標造成多方面傷害。

有機污染物：農藥（如有機磷殺蟲劑）與工業化學品（如多氯聯苯 PCBs、塑化劑等）常以內分泌干擾物 (endocrine-disrupting chemicals, EDCs) 的形式存在，即使在低濃度下也能阻斷生物體內激素作用，擾亂魚類的下丘腦–腦下垂體–性腺軸功能。環境雌激素、某些重金屬與殺蟲劑皆可造成魚類生殖內分泌失調，導致性腺發育不良、配子產生減少與產卵行為異常等一系列效應 (Socha et al., 2024)。

藥物與個人護理品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs) 殘留也是近



年關注的新興污染物。雖然環境濃度多半很低，但長期暴露可能改變魚類行為與風險感知。例如：抗憂鬱藥 fluoxetine 已被證實會削弱小型魚類的反掠食行為，使其更快進入掠食者攻擊範圍、減少躲避反應，進而增加被捕食風險 (Martin et al., 2017)。

總之在個體層次上，污染物造成的效應不只包括急性毒性導致的死亡，也涵蓋慢性亞致死效應，如生長遲緩、繁殖受抑或行為異常等，這些改變會直接降低個體存活與繁殖適合度，為族群與群聚層次的長期影響埋下伏筆。

4. 水質生物因子 – 微生物組成

在天然水體中，水質條件與微生物組成之間存在明顯的雙向關係：溶氧、營養鹽、有機碳與污染物等水質因子決定哪些微生物能存活與增殖，而微生物群落又透過有機質礦化、養分再礦化與污染物降解等過程，不斷改變溶氧、氮磷濃度與溶解有機碳型態，因此水質變化往往會先反映在微生物組成上，反過來再影響初級生產與能量流動 (Paerl et al., 2003; Huang et al., 2022)。河川與湖泊研究顯示，當流量恢復或營養鹽輸入降低時，細菌多樣性與群落功能指標會同步調整，並伴隨生態系呼吸與初級生產的變化，凸顯微生物組成是水質與棲地恢復的重要早期指標 (Huang et al., 2022)。

此外，魚類與其他水生脊椎動物的腸道、皮膚與鰓部微生物群也與水質高度耦合，扮演連結環境與宿主健康的橋樑。這些宿主相關微生物除參與消化與營養吸收外，亦在免疫成熟與病原防禦中扮演關鍵角色，而水體理化條件與棲地型態是塑造其組成的重要驅動因子 (Sehna et al., 2021; Kim et al., 2021)。污染物、抗生素殘留、鹽度與溫度變動等水質壓力常導致腸道微生物多樣性下降、有益菌減少與機會致病菌增加，引發餌料利用效率降低、免疫抑制與疾病風險升高 (Liu et al., 2022; Sharma et al., 2025)。在水產養殖中，水體與底泥微生物與魚蝦腸道微生物常呈高度相似，環境微生物失衡往往會同步反映在養殖動物健康上；相對地，透過水質管理與投餵益生菌、益生質來調控環境與腸道微生物，已被視為提升生長表現並降低疾病與藥物使用的重要工具 (Chen et al., 2022; Sehna et al., 2021)。

微生物組成不僅是水質與環境壓力的敏感指標，也是調節養分循環、溶氧狀態與宿主健康的主動參與者。水質變動若導致微生物群落結構與功能改變，常會透過影響溶氧、營養鹽與病原壓力，進一步影響水生生物族群與整體生態系統功能。

5. 結語

水質變化對水生生物的影響具有廣泛且深遠的意涵，涵蓋從細胞與個體層級的生理壓力反應，到族群結構與生態系統功能的改變。水溫、鹽度、溶氧、酸鹼度、營養鹽與污染物等物理與化學因子，以及微生物組成等生物因子，在變動水環境中均扮演關鍵角色。這些因子往往彼此交互作用，形成複雜的環境壓力組合，加深水生生物的適應挑戰。

在氣候變遷與人類活動加劇的背景下，未來水生生物面臨的壓力將更頻繁且極端。水生動物對水質改變的反應不僅取決於其物種特性與發育階段，也與因子之間的交互關係與變動速率密切相關。因此，生態管理與水質監測須採用整合性思維，重視多重因子的聯合效應與早期預警指標（如微生物與生理生化反應），並結合長期監測與實驗研究，以更有效地預測水質惡化對生物與生態系的影響。

透過對水質各項指標與水生生物反應的深入理解，不僅有助於維持生態系健康與功能穩定，也為永續水產養殖與水資源管理提供了科學依據。未來的挑戰在於如何跨領域整合知識與技術，建立更具韌性與適應力的水域管理策略。







第五章

水產養殖感測技術 與智慧化應用

第五章、水產養殖感測技術與智慧化應用

國立科學工藝博物館 展示組
劉力維 助理研究員

1. 前言

近年來，極端氣溫波動、降雨型態改變與乾旱頻率增加，不僅削弱農業產能，也使水產養殖暴露於更高程度的不穩定性，並降低養殖生產力 (Rosalia & Mulyaningsih, 2023)，若缺乏有效調適策略，可能使得糧食缺乏情形加劇 (Badolo, 2024)，水產養殖被視為穩定動物性蛋白供給的重要來源，許多養殖場至今仍主要依賴人工巡檢與經驗管理，在缺乏即時監控工具的情況下，易導致決策延遲與資源分配效率不佳，以及如過度餵食、水質不佳與疾病發生，造成飼料利用效率低落與死亡率偏高 (Gleiser & Moro, 2023)，進一步削弱水產養殖產業在面對氣候與市場波動時的韌性 (Prapti et al., 2021)。在近年半導體與感測技術蓬勃發展情況下，物聯網 (Internet of Things, IoT)、智慧感測與人工智慧 (Artificial Intelligence, AI) 技術逐漸被視為改變水產養殖管理模式的關鍵工具，例如能減少 20–30% 的飼料浪費、提升 15–50% 的產量與飼料轉換率，並降低死亡率 20–40%，同時減少水與能源消耗 (Tamim et al., 2022; Wibisono & Jayadi, 2024; Sasikumar et al., 2024; Lal et al., 2024; Wang et al., 2024)。透過在養殖場部署多參數感測器網路，結合低功耗通訊、雲端與邊緣運算架構，養殖戶得以持續蒐集水溫、溶解氧 (DO)、酸鹼值 (pH)、氨氮、濁度與鹽度等資料，並將其轉化為可操作的決策資訊 (Valencia-Arias et al., 2024)，以下針對感測技術與物聯網智慧系統在水產養殖中之應用進行討論，並進一步分析其效益。

2. 水質感測技術

2.1 溫度感測器

溫度變化直接影響魚類的代謝速率、免疫功能與成長速度，因此，溫度感測器是水產養殖中最基本也是最關鍵的感測元件之一。常見的溫度感測器如熱電偶與電阻溫度檢測器 (RTD)，透過電壓或電阻變化回應水溫變化，能提供穩定且解析度足夠的即時水溫資訊 (Gleiser & Moro, 2023)。例如，大西洋鮭與銀鮭在最適溫度範圍內飼養時，生長速度與 FCR 可提升高達 20%，而當產生溫度壓力時，會使幼魚存活率下降約 15% (Kolman et al., 2018; Reverter et al., 2017; Gentry et al., 2016; Wu et al., 2017)。在亞洲鱸魚試驗中，尚未達到最適生長範圍前，水溫每升高 1°C，日增重可增加約 0.5g (Is-Haak et al., 2022)，顯示

微小溫差之累積可能使得產量產生差異。整體而言，在循環水產養殖系統 (RAS) 與開放式養殖場中，維持水溫於物種適宜範圍的 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 內，被證實是避免熱緊迫與維持正常代謝的基本條件 (Engle & Senten, 2022)。

當溫度監測與控制嵌入 IoT 架構時，其效益更為突出。例如在 RAS 系統導入物聯網式溫度監測與自動控制後，FCR 提升至約 1.7，飼料浪費減少約 30%，魚群存活率提高約 25% (Cai & Leung, 2024; Yang et al., 2023; Tamim et al., 2022)，另外像是在開放水域養殖場中，若能嚴格遵守溫度操作規範，可增加羅非魚等物種之產量高達 40%，甚至在導入進階溫度監測後，年產量平均增加約 15% (Falconer et al., 2023; Kumar et al., 2024)。這些結果顯示，溫度感測不僅是管理標的，更是精準控制成長表現的基礎。

2.2 pH 感測器

pH 感測器主要透過玻璃電極或離子選擇性電極 (ISE) 偵測氫離子活性，以電位差換算酸鹼值。由於 pH 容易受溫度與化學反應影響，因此有必要定期使用標準緩衝液進行多點校準，以確保精度 (Muthmainnah et al., 2024)。對多數魚類與甲殼類而言，適宜 pH 範圍集中在 6.5–8.5。長期偏離此範圍會導致酸鹼中毒、離子調節失衡與免疫功能下降。Lemos et al. (2018) 指出，當 pH 穩定在世和環境 ± 0.3 範圍內時，亞馬遜鯰死亡率可降低約 15–25%，生長速度則提升 10–18%，類似結果亦見於其他淡水與海水魚種 (Li et al., 2023)。

在 IoT 架構下，基於 pH 感測的自動加藥與換水系統能預防劇烈酸鹼波動。Kustija and Andika (2021) 設計之池塘自動化系統可連續監測 pH、DO 與溫度，並遠端回傳資料，以支援即時管理。Dhinakaran (2023) 則結合 pH 感測與機器學習決策支援，示範如何在降低人工巡檢頻率的同時，維持水質穩定。

2.3 溶解氧感測器

溶解氧 (DO) 是評估水體是否適合密集養殖的核心指標。光學 DO 感測器利用螢光猝滅機制量測氧與染料間作用變化，具有不消耗氧氣與漂移較小等優勢；電化學感測器則以氧化還原反應產生與 DO 濃度成正比的電流，成本較低且佈建容易 (Li et al., 2015a; Zhao et al., 2022; Xia et al., 2022)。大多數養殖魚種在 DO 低於 5–8 mg/L 時即陷入缺氧壓力，長期暴露會導致攝食下降、成長停滯與死亡率上升 (Shehata et al., 2020; Islam et al., 2021)，而引入連續 DO 感測後，缺氧相關死亡率可降低 30–50%，FCR 提升約 12–22% (Yuan et al., 2022; Wibisono & Jayadi, 2024; Zhao et al., 2022)。



當 DO 資料與時間序列模型結合時，其用途更由偵測擴展到預測。Mijuskovic et al. (2021) 與 Li & Zou (2021) 分別利用 LSTM 等模型預測日夜 DO 變化與短期缺氧風險，透過分析潮汐、氣溫與曝氣策略之間的關聯，在 DO 接近臨界值前發出警示。

2.4 氨與硝酸鹽感測器

氨 ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) 與硝酸鹽 (NO_3^-) 是水產養殖中與毒性與富營養化高度相關的兩類含氮化合物。離子選擇性電極 (ISE) 可針對特定離子產生電位反應，分光光度法則以顏色反應吸光度反推濃度，兩者在水產氮監測上各有應用 (Su et al., 2020; Butinyac et al., 2023)。

非離子氨 (NH_3) 對魚類極具毒性，一般建議濃度不得超過 0.02 mg/L，超過此值即被視為急性毒性門檻 (Turcios & Papenbrock, 2014)。在導入即時氨氮監測與控制系統後，多數案例指出氨峰值可降低約 40–60%，疾病爆發率則減少約 20–35% (Paul & Hall, 2021; Rajeev et al., 2024)。某些 RAS 系統報告總氮濃度下降約 70%，魚類健康狀況與生長速率亦同步改善 (Ibrahim et al., 2022)。

在蝦類養殖中，無線感測器網路與碳源管理結合，使氨氮濃度能在數天內下降 90% 以上 (Deng et al., 2021; Kokkuar et al., 2021)。Rustini et al. (2024) 則以氮濃度等指標評估火山湖養殖適宜性，顯示即時氮監測對於判斷水域是否符合養殖環境的重要性。

2.5 鹽度、ORP 與濁度

鹽度影響滲透調節與能量分配，是海水與鹹淡水養殖的核心參數。電導率鹽度感測器可在 1–100 ppt 範圍內提供線性響應 (Li et al., 2023)。以白蝦 (*Litopenaeus vannamei*) 為例，生長階段適宜鹽度範圍 5–35 ppt，維持在最佳鹽度可使存活率提升 20–30%，生長效率提升 15–25% (Li et al., 2015b; Gil-Núñez et al., 2020; Madrigal et al., 2019; Pattusamy et al., 2022; Rao et al., 2019)。

氧化還原電位 (ORP) 則反映消毒效果與有機物負荷。ORP 高於 +350mV 通常表示消毒作用有效，低 ORP 則可能指示有機污染偏高 (Stiller et al., 2020)。維持適當 ORP 水平有助於強化生物過濾效率，例如，在最佳 ORP 條件下魚蝦生長速度可提高約 15–20%，部分案例疾病爆發率下降約 25% (Putri et al., 2023; Halla et al., 2023; Siskandar et al., 2022)。

濁度則透過雷射散射與紅外偵測評估懸浮顆粒濃度。當濁度超過 25–70NTU 時，魚蝦攝食率顯著下降；將濁度維持在 50NTU 以下，可使蝦類生產力提高約 25%(Qu et al., 2018; Amijar et al., 2024)。在 RAS 中，維持 10–20NTU 可降低壓力指標並促進梭鱸生長 (Ende et al., 2021; Mota et al., 2022)。若能將濁度資料與餵食控制以 IoT 系統結合，能透過即時回饋調整餌料投放與曝氣，減少高達 40% 的飼料浪費 (Jayaraj et al., 2023; Mahmud et al., 2023; Gleiser & Moro, 2023)。

3. 水產物聯網系統

3.1 資料收集與邊緣運算架構

在智慧水產養殖物聯網架構中，感測器網路與嵌入式系統構成資料收集的核心。例如在實際案場中，多個感測節點可每分鐘回報一次水質狀態，使整體系統每週累積超過 10,000 筆以上的水質資料點。這種高解析度資料有助於察覺 DO、pH、氨氮的細微差異，並透過現場低功耗微控制器如 ESP32 與 STM32 進行即時資料初階處理，以降低後續分析時的雜訊與資料量 (Xu et al., 2023)。

在資料收集後，由於養殖環境常伴隨流速變化、氣泡與生物附著，為確保資料品質，需針對資料進行濾波與自動校準 (Liu et al., 2023; Vo et al., 2021)，例如可結合雲端運算與邊緣運算架構，即可在養殖場現地快速辨識 DO 突降或氨氮累積 (Vo et al., 2021; Islam et al., 2024; Kaur et al., 2023)。

3.2 通訊技術與協定

感測資料必須透過適當的通訊技術才能送達雲端或管理端。LoRaWAN 與 NB-IoT 為低功耗廣域網路代表，前者於 868/915 MHz 等頻段運作，功耗低於 100mW，傳輸距離可達 10 km (Marini et al., 2022)；後者利用授權蜂巢頻段，在約 55kbps 的資料速率下提供服務 (Pointl & Fuchs-Hanusch, 2021)，這兩種技術適合用於大面積池塘或偏遠場域。而在 5G 或相似技術部分，雖能提供毫秒級延遲與高頻寬，但其部署成本較高且於農村覆蓋有限，較適合高價值、資料密集型場域 (Alqurashi et al., 2023)。Wi-Fi 與 Zigbee 則多用於 RAS 或室內系統，能提供較高資料率，但範圍通常小於 100m (Marini et al., 2022; Alqurashi et al., 2023)。因此，實際選擇通訊技術時必須在距離、功耗與頻寬之間取得平衡。



在通訊協定層面，MQTT 以輕量級的發布訂閱機制，在頻寬受限或連線不穩情境中特別適用；CoAP 為受限設備與網路設計，可有效協調感測器與伺服器之間的簡化互動；HTTP 則在與既有 Web 服務整合方面具有優勢 (Singh et al., 2022; Abhijna et al., 2022; El-Basioni & El-Kader, 2020)。不同協定的組合，使系統能同時滿足低功耗與高相容性的需求。

3.3 雲端與 AI 分析

雲端物聯網平台（如 AWS IoT、Google Cloud IoT 等）提供設備註冊、連線管理與資料流處理等模組，可支援多場域養殖場的集中監控 (Pierleoni et al., 2020; Barros et al., 2022; Chakraborty & Aithal, 2023)。儀表板與警示機制使養殖者得以在單一介面上掌握不同養殖池與養殖模式的水質與飼養狀態。在資料處理部分，通常由串流管線負責，透過無伺服器運算（如 AWS Lambda）與資料串流服務（如 Kinesis）支援即時監測與通知。後續分析階段則結合 TensorFlow、PyTorch 等 AI 框架，例如 LSTM 可預測 DO 日夜變化，使曝氣策略得以提前調整 (Mijuskovic et al., 2021; Li & Zou, 2021)；CNN 可辨識攝食反應與異常游行為，支援自動投餵系統依魚群需求調整投餵量，減少餌料浪費並改善 FCR (Kim et al., 2023; Liu et al., 2023)。異常偵測演算法則用於識別氨氮飆升或 pH 急變等情境，觸發增氧、換水或藥浴等緊急處置 (Li & Zou, 2021; Esmaili et al., 2022)。

3.4 自動執行與控制

在感測與分析之後，可透過自動化控制與執行器將決策轉化為操作。常見架構包含感測器模組、MCU 控制單元以及投餵器、增氧機、水泵與排放閥等設備 (Fang-an, 2021; Martins et al., 2022; Sasikumar et al., 2024)。雖然傳統 PID 控制在溫度與 DO 等連續變數控制上仍十分常見，但對於高度非線性的水質與生物反應環境，AI 等適合複雜環境之技術逐漸展現優勢 (Gupta et al., 2023)。研究成果顯示，結合 DO、溫度與濁度資料的智慧投餵系統，可使飼料浪費減少約 15–30%，降低約 25% 勞務成本，並將營養鹽排放量降低 70% 以上 (Lal et al., 2024; Silalahi et al., 2023; Sasikumar et al., 2024; Ragavi et al., 2024)。

4. 統整與比較

為綜合分析水產養殖導入感測技術與智慧化應用在不同的環境、經濟和政策條件下之具體效益，以下將綜整智慧水產養殖的整體效益，並以 PEST 分析（政治 Political、經濟 Economics、社會 Social、科技 Technology）、4P 分析（產品 Product、價格 Price、通路 Place 和促銷 Promotion）以及價值主張分析等方式，跨領域整合多層次視角。

4.1 智慧水產養殖的整體效益

(1) 提升資源利用效率

結合 DO、溫度、濁度與魚群行為的智慧投餵系統，使投餵量得以依實際攝食反應動態調整，避免過度投餵與餌料沉積。多項案例顯示，飼料浪費可減少約 20–30%，FCR 提升約 10–25% (Wibisono & Jayadi, 2024; Sasikumar et al., 2024; Silalahi et al., 2023; Tamim et al., 2022)。透過氨氮與硝酸鹽感測優化換水策略與生物過濾運轉，部分 RAS 系統可實現 90% 以上水再利用與顯著能源節約 (Deng et al., 2021; Kimothi et al., 2023; Lal et al., 2024)。

(2) 降低生物風險與死亡率

持續監測 DO、pH 與氨氮，使養殖場得以在缺氧或毒性物質濃度接近臨界值前主動干預。相關研究指出，導入此類監測與預警系統後，死亡率可降低約 20–40%，對於密集養殖與極端氣候事件尤為重要 (Xia et al., 2022; Esmaili et al., 2022; Islam et al., 2024; Vijayaram et al., in press)。另外如結合影像辨識與生物感測，AI 模型能及早偵測攝食下降或異常游動，進而減少抗生素依賴並提升食品安全 (Kaur et al., 2023; Islam et al., 2024; Gidiagba et al., 2024)。

(3) 提升環境永續與社會信任

利用 NO_3^- 、ORP 與濁度監測搭配控制系統，可優化排放管理與沉積物處理，部分研究報告營養鹽排放減少達 70% (Turcios & Papenbrock, 2014; Kimothi et al., 2023; Lal et al., 2024)。在氣候變遷情境下，即時溫度與 DO 管理亦有助於提高熱浪期間魚類存活率約 25% (Islam et al., 2021; Mothoka et al., 2024; Wang et al., 2024)，使環境感測不僅能作為控制決策，也能提升飼養成績，進一步強化消費者對養殖產品安全之信任度。

4.2 PEST 分析

在政治面 (P)，日益嚴格的水質與排放標準，以及對抗生素使用的管制，使自動水質監測與資料保存成為進入高端市場的必要條件 (Gidiagba et al., 2024; Zhao et al., 2022)。物聯網感測系統可提供持續且可追溯的監測紀錄，支持監管單位與國際買家對環境與食品安全的要求。

在經濟面 (E)，雖然智慧水產養殖需要較高初始投資，不過研究普遍顯示，由於能減少飼料浪費約 30%、提升產量 20–50%、降低死亡率 20–40%，在數個生產週期內即可收回成



本，長期投資報酬具有正向效益 (Prasad et al., 2019; Tamim et al., 2022; Sasikumar et al., 2024; Begum et al., 2024; Kumar et al., 2024)。

在社會面 (S)，減少抗生素應用與污染風險有助於提升養殖產品品質與消費者信任，亦可增強產業在永續飲食與健康議題上的正面形象 (Gidiagba et al., 2024; Kimothi et al., 2023; Lal et al., 2024)。

在科技面 (T)，感測與 IoT 技術的成熟使預警系統得以降低疾病相關死亡率約 20–40%，但感測器故障與模型不確定性仍是高度依賴資料驅動決策時不可忽視的風險 (Esmaili et al., 2022; Xia et al., 2022; Islam et al., 2024; Dauda et al., 2024)。

4.3 4P 與價值主張

進一步從管理與市場視角觀察，4P 與價值主張有助於理解智慧水產養殖方案如何在不同規模與類型養殖戶中定位。

在產品面，智慧水產養殖主要由水質感測器 (如 DO、pH、氨氮)、自動投餵系統與整合型監控平台構成 (Tamim et al., 2022; Vijayaram et al., in press; Xia et al., 2022)。這些子系統組合形成具擴充性的技術套件，可依場域規模與需求選配。

在價格面，雖前期投資較高，但藉由減少餌料與能源浪費、降低死亡率與疾病損失，其長期成本結構具有優勢 (Xia et al., 2022; Wibisono & Jayadi, 2024)。

在通路面，物聯網系統可跨越池塘、RAS 與孵化場等多種養殖場域，並支援遠端管理與集中決策 (Islam et al., 2024)。

在推廣面，可藉由公私協作與區域示範場域建立進行推廣，透過示範效益與技術移轉降低導入風險 (Lal et al., 2024; Gidiagba et al., 2024)。

而在價值主張部分，智慧水產養殖對養殖戶的功能性價值多樣，包括生產率提升 20–50%、飼料浪費減少、存活率提高 (Tamim et al., 2022; Vijayaram et al., in press; Zhao et al., 2022)。差異化價值則在於整合多感測器達成即時水質監測與疾病預防，讓小規模養殖者也能具備原本只有大型企業才有能力採用的精準管理工具 (Xia et al., 2022; Islam et al., 2024; Kim et al., 2023)。無形價值方面，智慧養殖透過減少抗生素使用與環境污染，強化產業的永續形象與公共健康貢獻 (Lal et al., 2024; Gidiagba et al., 2024; Kimothi et al., 2023)。

5. 討論與反思

5.1 技術層面

從技術觀點來看，智慧水產養殖的主要優勢在於即時監測、預警與控制能力。然而，這些優勢高度依賴感測器可靠性與資料品質。以 DO 與 pH 感測器為例，長期浸泡於養殖池水中經常遭受生物污膜與沉積物干擾，導致每週約 0.05–0.15 mg/L 的量測偏移，必須透過頻繁校準與維護才能維持精度 (Xia et al., 2022; Su et al., 2020)。若養殖場缺乏規律維護計畫，感測器漂移不僅影響單次判讀，更會累積至預測模型與自動化控制，造成曝氣或投餵策略錯誤 (Islam et al., 2024; Vijayaram et al., in press)。進階感測技術如光學 DO 與高穩定性 ISE 確實能降低漂移與維護負擔，但其設備成本較高，對中小養殖戶而言仍屬重要門檻 (Kim et al., 2023; Lal et al., 2024)。因此，未來感測技術發展一方面需提升耐用性與抗污損設計，另一方面也需考量成本結構，使其能在不同規模與經濟條件下被實際採用。

資料品質部分，不僅受硬體影響，也與資料處理與模型設計有關。自動校準、誤差偵測與預測性維護模型可部分降低感測器資料漂移問題 (Esmaili et al., 2022; Preden et al., 2015; Liu et al., 2019)。然而，在極端氣候事件或快速變化環境中，資料中斷與異常仍可能導致預測模型失準，因此所發展之管理模型需具備對不確定性資料的處理能力 (Kaur et al., 2023; Islam et al., 2024)。

在 AI 整合方面，雲端運算與邊緣運算各有優勢與限制。雲端可提供強大運算資源與集中管理，但仰賴穩定網路；邊緣運算則能在網路不穩時維持核心功能，卻受到硬體算力與功耗限制 (Dauda et al., 2024)。未來發展關鍵在於設計適合邊緣設備的輕量模型與分層架構，將即時反應需求高的功能放在現地，其餘則由雲端負責長期分析與優化。

5.2 經濟與商業模式

經濟面上，智慧水產養殖的整體效益雖然明顯，但導入過程中仍面臨高初始投資與維護成本。精密感測器、通訊設備、雲端平台與電力基礎設施等成本疊加，對資金有限或規模較小的養殖戶而言是一項重大負擔 (Preden et al., 2015)。再加上感測器汰換與維護可能使年度營運支出增加 10–20%，在市場價格波動較大的情況下，將增加業者對投資回收的不確定性 (Xia et al., 2022; Zhao et al., 2022)。此外，研究顯示，多數導入案例在兩到數個生產週期內即可透過飼料節省與產量提升收回成本，長期投資回報為正 (Roberson et al., 2021; Wibisono & Jayadi, 2024; Begum et al., 2024; Kumar et al., 2024)。這種「短期負擔與中長期收益」的獲益方式，需要透過適當的財務工具與商業模式來協助養殖戶。



而在 IoT/AIoT 的即時服務 (as-a-service) 部分，提供了風險分攤的可能性。透過租賃或訂閱方式，由專業服務供應商負責設備維護、資料平台與模型更新，養殖戶以月費或按產量支付費用，降低一次性資本支出 (Li et al., 2015a; Preden et al., 2015; Gupta et al., 2023)。然而這類模式同樣需要穩定的法規框架與信任關係支撐，並非所有地區都能迅速導入。未來研究有必要針對不同國家與養殖模式，評估此類商業模式的可行性與風險。

5.3 實務與社會層面

即便技術與經濟面具備一定可行性，實務落地仍受到操作能力與數位落差限制。對許多養殖戶而言，如何從大量的感測資料與複雜儀表板中萃取可執行的決策，往往比硬體採購更具挑戰 (Prasad et al., 2019; Prapti et al., 2021)。若沒有對應的教育訓練與顧問輔導，智慧系統反而可能增加操作壓力，甚至被簡化為執行與否的粗略判讀，降低了資料應有的價值。此外，偏遠沿岸與漁村地區在通訊與電力基礎建設上仍存缺口，使得 IoT 系統難以穩定運作 (Sharma et al., 2017; Dauda et al., 2024)。在這些地區，智慧養殖若缺乏基礎設施與在地技術支援，容易落入示範場效益難以擴散之困境。

而從社會角度來看，智慧水產養殖若減少抗生素使用與環境污染，有助於提升消費者信任與社會對養殖產業支持 (Gidiagba et al., 2024; Kimothi et al., 2023; Lal et al., 2024)。然而若資料管理與隱私保護不足，養殖戶對雲端平台或第三方服務的信任可能受損，進而降低採用意願 (Rajeev et al., 2024; Esmaili et al., 2022)。

5.4 政策與制度

政策與制度面既是推動智慧水產養殖的強大助力，也是目前最明顯的限制之一。正面來說，透過強化水質監測與排放標準，能使養殖業者在合規上更依賴即時感測與資料紀錄 (Zhao et al., 2022; Liu et al., 2021)。另一方面，缺乏通用通訊與資料格式標準，使不同設備與平台之間難以互通，增加系統整合與長期維護的成本 (Sharma et al., 2017; Preden et al., 2015)。在資料管理方面，如何界定養殖資料的所有權、使用權與共享規則，仍是尚待釐清的議題。分散式學習等聯邦學習技術能使資料保留在現場端的情況下進行模型訓練，但若缺乏對資料安全與責任分配的制度設計，其實務推廣仍有限 (Sharma et al., 2017; Esmaili et al., 2022; Rajeev et al., 2024)。

基礎建設投資則是另一個關鍵。若沿岸與漁村地區在通訊與電力基礎設施上長期落後，即便提供補助或貸款，智慧養殖方案仍難以穩定運作。專項投資用於改善寬頻與公共通訊服

務，將有助於縮小智慧技術在城鄉間的採用差距。最後，建立清楚且透明的設備認證規範，針對感測器耐用性、量測精度與資安要求提出標準，有助於降低養殖戶在採購設備時之不確定性 (Sharma et al., 2017; Lal et al., 2024; Liu et al., 2022)。

6. 結論

綜整前述討論可看出，智慧水產養殖在資源效率、生物風險與環境永續方面具有一致且明確的量化優勢。導入即時水質監測與智慧投餵系統後，飼料浪費普遍可減少約 20–30%，水與能源消耗合計可降低 30–50%；單位產量與 FCR 多數案例提升 15–50%；持續追蹤 DO、氨氮與 pH 等關鍵參數，則可使死亡率降低約 20–40%。此外，藉由精準管理排放與水再利用，部分系統可達 90% 以上水再利用率與營養鹽排放減少 70%，在氣候變遷與資源受限的情境下，能維持水產供應與產業韌性。

然而在實際應用上仍受到許多挑戰，例如感測器漂移、生物污損與故障使資料品質易受影響，需頻繁校準與維護。高階感測器雖能改善問題，但成本較高，對中小養殖戶形成阻礙。經濟上，精密感測器、通訊設備與雲端平台的前期投資，以及每年 10–20% 的維護成本增加，使多數養殖戶對投資回收期與市場風險感到猶豫。制度上，通訊與資料格式標準化不足、資料治理與隱私規範尚未完善，以及偏遠地區通訊與電力基礎建設落後，皆限制了智慧養殖的擴散。但若能透過 IoT/AIoT as-a-service、設備租賃與成果分享型契約等工具協助中小養殖戶分擔前期投資與技術風險，以及加強沿岸與漁村基礎建設投資，建立清楚的資料治理與隱私保護框架，推動通訊與資料標準化，並發展設備性能與資安認證機制等措施，應可適度減緩水產養殖在感測技術與智慧化應用推動上之挑戰。





第六章

農業副產物作為永續 水產養殖生產之應用潛力



第六章、農業副產物作為永續水產養殖 生產之應用潛力

國立屏東科技大學 研究總中心
陳怡瑄 講師級研究員

1. 前言

農業生產活動在全球食品供應體系中占據核心地位，其影響範圍不僅涵蓋人類的日常飲食，也延伸至工業原料、能源供應以及生態系統服務。從種子播種、田間管理到收成與後續加工，每一個環節都是現代社會運作不可或缺的環節。然而，伴隨作物栽培、採收以及採後處理程序而產生的各類副產物，長期以來卻多被視為價值有限、甚至可以忽略的「副產物」。這些所謂的農業副產物，廣義上指的是在主要農產品生產過程中所生成的附帶生物性物料，舉例來說，穀物作物如稻米與小麥，其生產過程中會產生大量的莖稈、葉與穀殼；果樹修剪枝條及果實加工後的果皮與果核往往被丟棄；蔬菜類作物根部與葉片在收穫或加工過程中也會成為副產物；而在林業生產中，木材加工過程中剝落的樹皮、鋸屑、枝葉等，同樣屬於這一類副產物。這些副產物的生成量龐大，且因其形態多樣、成分複雜，長期以來在農場管理與整個農業產業鏈中，往往未被納入可再利用資源的範疇 (Rao et al., 2024)。

由於這些副產物未被充分開發與利用，在全球多數地區形成了龐大的環境治理負擔。傳統農業社會中，部分副產物可用於牲畜飼料、簡單堆肥或燃料，但隨著現代農業規模化、密集化的發展，這些簡單的應用已難以消化日益增加的副產物量。當代農業在科技進步與全球化推動下，逐步邁向高效率、高密度的生產模式，例如使用高產種作物、現代化灌溉與施肥技術、機械化收割，以及精準農業管理系統等措施。這些改進雖大幅提升了糧食與農業原料的供應能力，確保了人類社會對食物與原材料日益增長的需求，但同時也帶來了新的挑戰：伴隨單位產量提升而急速增加的副產物量，對環境的潛在壓力逐漸顯現 (Rashwan et al., 2023)。

在缺乏完善管理與資源化處理技術的情況下，農業副產物常被棄置於田間、任意堆放，或以簡單掩埋方式處理。這些處理方法雖然短期內降低了農民的勞動與經濟成本，但長期而言可能在環境中引發一連串連鎖反應。部分農業副產物若長期積存，可能成為病原微生物或害蟲的溫床，增加作物病害傳播的風險，對農業生產安全與公共衛生均構成威脅 (Sarangi et

al., 2023; Vásquez et al., 2019)。因此如何將農業副產物從「剩餘物」轉化為可再利用的資源，已成為全球農業可持續發展、循環經濟與生態環境保護的重要課題。

2. 農業副產物的多樣性與已知可利用性

農業副產物的來源極為廣泛，涵蓋從作物的根、莖、葉、花、果皮到果殼，乃至林木生產過程中產生的枝條、樹皮及鋸屑等各類生物性物料。這些副產物本質上屬於天然生物材料，其化學成分組成複雜且多樣，包括纖維素、半纖維素、木質素、多酚化合物、類黃酮、萜類、天然抗氧化劑與生物鹼等，這些化學成分賦予農業副產物極高的再利用潛力 (Vásquez et al., 2019)。過去由於缺乏有效的開發技術與商業模式，農業副產物長期被視為無價值的廢棄物，經常被隨意丟棄或低效利用。然而，近十年來隨著生物技術、綠色化學與材料科學的快速發展，學術界與產業界逐漸揭示出農業副產物在醫療保健、能源開發、農業循環利用以及材料科學等多個領域的重要應用潛能。

在醫療與健康領域，許多植物副產物被證實含有豐富的自然抗氧化化合物，這些化合物在體內能清除自由基，減少氧化壓力，從而降低心血管疾病、糖尿病、代謝症候群及慢性炎症相關疾病的風險 (Zhao et al., 2021; Kumar et al., 2022; Medeiros et al., 2022)。例如柑橘類果皮中的類黃酮、葡萄籽與果渣中的多酚，以及茶葉與香草植物的萜類成分，均展現出顯著的抗氧化、抗發炎與免疫調節作用。此外，特定果皮、種仁與葉片所含的生物活性成分，已被研究用於天然抗菌劑、食品防腐添加物以及植物來源的藥物輔助材料，其應用潛力正在逐步實現。這些研究證明，農業副產物不僅是低成本的天然化合物來源，更可能成為疾病預防、功能性食品及健康產業的重要原料 (Li et al., 2022, Liu et al., 2021, Ji et al., 2024)。

在能源與環境領域，富含纖維素、半纖維素與木質素的農業副產物，如稻桿、玉米莖稈、甘蔗渣、棉花莖葉及林木鋸屑，具有極佳的生質燃料開發潛力，可用於生物質發電、生物乙醇生產及固體燃料製備。這些副產物經過適當的前處理、酶解或熱化學轉化後，不僅可替代部分化石能源，降低碳排放，還能促進能源生產的地方化與循環化。從永續農業與循環經濟的角度來看，這類能源化利用不僅減少了廢棄物對環境的壓力，也為農民與地方社區創造額外經濟收益，形成「廢棄物—資源—價值」的閉環模式 (Jayakumar et al., 2023)。

此外農業副產物還可在農業本身循環利用中發揮關鍵作用。例如，部分富含營養元素與有機質的副產物可製作成高效有機肥料或土壤改良劑，提升土壤肥力、改善土壤結構，並降低化學肥料使用量，促進土壤生態系統的健康；木質素與纖維素材料則可作為農業覆蓋物、防水材料或動物飼料添加劑，進一步實現資源化與多重利用。

綜上所述，農業副產物本質上並非「廢物」，而是一個被長期忽視的天然資源庫。透過現代生物技術、綠色化學及材料科學的加值開發，這些副產物可被轉化為醫療健康資源、可再生能源、功能性材料及農業循環利用的關鍵原料。從環境保護、產業創新到社會經濟效益的多重角度來看，農業副產物的資源化不僅具有科學研究價值，更是推動永續農業與循環經濟的重要戰略支點，其開發與應用前景極為廣闊，值得全球農業與工業界投入長期探索與實踐，並有以下益處：

2.1 環境負荷減輕

農業副產物若未經妥善處理，常被隨意焚燒或掩埋，這不僅造成資源浪費，也對環境帶來顯著負荷。焚燒過程中會釋放大量煙塵、二氧化碳及其他有害氣體，如一氧化碳、氮氧化物及揮發性有機物，進一步加劇大氣污染和溫室氣體排放問題，對氣候變遷及公共健康構成威脅。另一方面，將副產物直接掩埋或長期堆放，雖能暫時清理田間，但隨著有機物分解，易導致土壤養分過度累積或不均衡，改變土壤酸鹼值，甚至促進有害微生物和病原體的繁殖，增加作物病害及農業生產風險。透過適當的資源化處理，例如堆肥化、有機質轉化、酶解或熱化學轉換，不僅可減少空氣與土壤污染，還能有效抑制病原滋生，實現農業副產物的環境友善化利用。這種循環利用模式，有助於農業系統的永續發展，同時降低社會與政府在環境治理上的負擔。

2.2 新型產品的開發潛力

農業副產物富含多種生物活性成分，如多酚、類黃酮、萜類、纖維素、木質素及天然抗氧化物質，這些成分為高附加值產品開發提供了豐富的原料來源。透過科學萃取與加工技術，副產物可轉化為醫藥原料與天然保健品，用於心血管疾病、代謝症候群、糖尿病及慢性炎症的輔助治療。同時這些生物活性成分也可應用於農業植保，如天然抗菌劑、植物免疫促進劑或生物農藥，替代部分化學合成藥劑，降低環境負荷。此外富含纖維與木質素的副產物還可用於生質能源生產，包括生物乙醇、固體生質燃料及生質氣體，為能源轉型與低碳策略提供支持。由此可見，農業副產物並非單一用途的材料，而是可跨領域應用的多功能原料，其開發潛力隨科技進步而不斷擴大，具有顯著的經濟價值與社會效益。

2.3 促進農業與其他產業鏈的整合

農業副產物資源化不僅可提升單一產業價值，還能促進農業與能源、化工、生技及材料產業的深度整合。以果蔬加工副產物為例，其多酚和類黃酮成分可提供食品加工業、保健品

產業及化妝品產業的重要原料；林業副產物如鋸屑與木質纖維，則可供應生物材料或建材加工企業，用於生物複合材料、生質塑料或生質能源生產。透過這種跨領域資源鏈結，不僅形成農業—工業—生技的循環經濟模式，也可建立多層次的價值鏈，促進產業創新、技術研發及市場擴張，最終提升整體社會資源利用效率，降低對天然資源的依賴，實現可持續發展目標。

2.4 提升農民所得與農村經濟活力

將農業副產物轉化為具有市場價值的產品，能為農民開啟全新的收入來源，改變傳統農業僅依靠主要作物銷售的單一收益模式。舉例而言，果蔬加工副產物可生產功能性食品、營養補充品或天然保健品；稻桿、玉米莖稈與甘蔗渣等可用於生質能源或生物肥料開發。這些多元化的產品開發，不僅增加農民的直接經濟收益，也能帶動農村加工業、能源業及創新產業的發展，活化地方經濟。同時，副產物的價值化利用還有助於提升農業生產效率與資源管理，促進農業從傳統生產模式向高附加值、循環利用及可持續發展方向轉型，形成農業、產業與地方經濟三者互利共生的良性循環。

3. 農業副產物作為水產免疫刺激物之潛力

隨著全球對永續農業、循環經濟以及低環境衝擊生產模式的關注日益增強，研究者開始重新審視農業副產物的價值，尤其是在水產養殖中的潛在應用。傳統上，果皮、葉片、根莖、果殼等副產物常被視為農業生產過程中的廢棄物或剩餘物，通常以焚燒、掩埋或低效利用的方式處理，既浪費資源，也可能對環境造成負面影響。然而，隨著植物化學與生物技術的進步，越來越多研究表明，這些副產物其實是天然生物活性化合物的寶庫。

農業副產物中含有豐富的多酚、類黃酮、揮發性有機化合物、天然抗氧化劑以及多種抗菌成分。這些化合物在動物體內可發揮多重生物功能，包括抗氧化、抗炎、免疫調節以及對病原微生物的抑制作用。若能透過科學萃取技術將其有效分離與純化，這些天然化合物可作為低毒性、功能性免疫刺激物應用於水產養殖系統中。與傳統化學免疫促進劑相比，農業副產物來源的天然免疫刺激物具有環境友善、可再生以及對水產生物健康影響較小的優勢，為養殖業提供了一條兼顧生態與經濟效益的新途徑。

多項國內外研究已證實，農業副產物萃取物對水產動物具有顯著的免疫調節作用。例如，柑橘類果皮萃取物中的類黃酮與多酚，可提高魚類和甲殼類血液中抗氧化酵素如超氧化物歧化酶、過氧化氫酶及谷胱甘肽過氧化物酶的活性，從而增強其對氧化壓力的抵抗能力。此外，某些果殼或葉片中的萜類與揮發性化合物對魚類腸道菌群具有調節作用，能促進有益菌生長、

抑制致病菌，改善腸道健康，最終提升成長速率與存活率。研究也指出，這類萃取物可增強水產生物對常見病毒、細菌以及寄生蟲的免疫防禦能力，顯示其具有廣泛的免疫促進效果 (Lee et al., 2024; Jahazi et al., 2020; Li et al., 2022, Liu et al., 2021, Ji et al., 2024)。

值得注意的是，農業副產物作為水產免疫刺激物的應用，不僅具有生物學效益，也具備環境與經濟價值。透過將廢棄物轉化為功能性原料，不僅減少了廢棄物對土壤與水體的負面影響，降低養殖過程中的環境壓力，也能為農民與水產養殖業者創造新的附加收益。總結來說農業副產物在水產養殖中的應用潛力巨大。它們不僅是一種可再生、天然且低環境衝擊的免疫刺激來源，也為水產業提供了一種兼具生物效益、環境永續與產業附加值的新策略。隨著相關萃取技術、生物製劑開發以及應用模式的不斷成熟，農業副產物的資源化利用有望成為未來水產養殖可持續發展的重要支柱之一，為全球養殖業提供兼顧環境保護與經濟效益的創新解決方案。

4. 免疫刺激物應用須與環境管理並行

在水產養殖管理中，免疫刺激物雖被證實能提高魚類與蝦類動物的免疫反應、抗氧化能力及疾病抵抗力，但其本質上仍應被視為「輔助性工具」，而非單獨依賴的核心手段。水產動物的健康狀態主要取決於養殖環境的品質與管理措施的完善程度。若環境條件惡劣或管理不到位，無論添加多少免疫刺激物，其提升抵抗力的效果都會大打折扣，甚至可能因動物壓力增加而導致疾病爆發。因此免疫刺激物的應用必須與良好的基礎養殖管理緊密結合，形成系統性、整合化的健康管理策略。

水質管理是養殖環境的核心要素之一。水體中氨氮、亞硝酸鹽、pH 值、溶氧、溫度與水流速度等關鍵參數直接影響水產動物的生理狀態與免疫功能。高濃度的氨氮或亞硝酸鹽會造成毒性壓力，抑制免疫系統活性，增加病原體感染的風險；溶氧不足則會導致呼吸困難與生長遲滯，進一步削弱免疫防禦能力。因此，透過定期監測水質、維持良好換水與過濾系統運行，以及使用自動監控設備，即可有效控制這些環境變數，為水產動物提供穩定且適宜的生長條件。

適當的放養密度對動物健康至關重要。過高的養殖密度會增加個體之間的競爭與緊迫反應，使動物免疫力下降、疾病發生率上升，甚至引發大規模感染事件。根據研究，適當降低放養密度不僅能減少壓力與傷害，還有助於改善行為表現、提高飼料轉換效率與成長速率。因此科學制定每個養殖單元的密度標準，是免疫刺激物發揮最大效果的前提條件。

良好的飼料管理同樣不可忽視。飼料營養必須均衡，確保蛋白質、脂質、維生素與微量元素滿足水產動物的生長與免疫需求；同時需避免過量投餵造成的殘餌累積，這些未消化的飼料會分解產生有害物質，污染水體，增加病原微生物的滋生風險。透過精準投餵、定期清池與營養調控，可減少養殖環境壓力，提升免疫刺激物在體內的功能發揮。

嚴謹的生物安全措施是維護水產動物健康的基礎。這包括對苗種進行檢疫，確保無攜帶病原；對設備、工具與養殖設施進行定期消毒；管理訪客及操作人員的進出；以及跨池操作的嚴格控制，以防止病原擴散。只有將這些生物安全管理落實到位，免疫刺激物的輔助效果才能真正轉化為提升養殖績效與疾病防控能力的實際成果。

當上述基礎管理措施得到充分落實後，免疫刺激物可被有效整合至日常飼料、飲水添加或週期性保健方案中。例如，將植物萃取物或天然多酚類化合物混入飼料，可在日常攝食中持續刺激免疫系統；在緊迫事件或季節性疾病高發期，則可採用強化劑量或特定療程的免疫刺激策略，進一步提升抵抗力與存活率。這種「環境管理 × 生物安全 × 免疫刺激」的三軸策略，不僅將水產動物健康管理系統化，也為疾病預防提供了全方位的保障，被視為未來水產養殖可持續發展的主要方向之一。透過這種整合式策略，養殖業者不僅能降低疾病發生率與藥物使用量，還能提升養殖效率、產品品質與經濟效益，同時兼顧環境保護與資源永續利用。





A large, stylized illustration of a shrimp, rendered in a light blue color against a darker blue background. The shrimp is positioned horizontally, facing right. Its body is segmented, with a large head, a long tail, and several legs. The text '結語' is centered on the shrimp's head.

結語

第七章、結語

隨著淡水長臂大蝦養殖產業的快速發展，科學化、系統化與智慧化管理已成為提升生產效率與養殖效益的關鍵。從生物學特性、繁殖管理到日常養殖操作與水質控制，每一環節均對蝦的生長、健康及免疫力具有直接影響。良好的養殖環境與嚴格的生物安全管理，是防止疾病爆發、保障養殖穩定的重要基礎。同時現代水產養殖正逐漸整合先進的感測技術與智慧化系統，利用即時數據監控、物聯網設備及自動化管理，提高決策的精準性與反應速度，使養殖者能在高密度養殖環境下更有效地控制水質、投餌及健康管理。天然來源的農業副產物與生物活性萃取物，在提升免疫力、抗病能力及促進生長方面展現了巨大的應用潛力，並提供了一種環境友善、可持續的養殖策略。養殖成功的關鍵依然離不開環境管理、飼料策略與疾病防控等基本要素，整合現代科技、科學管理與天然資源的應用，不僅可提升水生生物的健康與生長表現，也能促進養殖系統的永續發展。總體而言，本書提供了一套從理論到實務、從傳統管理到現代科技應用的完整知識體系，為淡水長臂大蝦養殖的高效化、永續化與智能化提供了科學依據與實務指引，並對未來水產養殖產業的持續創新與發展具有重要參考價值。

A large, stylized illustration of a shrimp, rendered in a light blue color against a darker blue background. The shrimp is positioned horizontally, facing right. Its body is segmented, with a large head, a long tail, and several legs. The illustration is composed of simple, clean lines and shapes, giving it a modern, graphic appearance. The text '參考文獻' is centered over the shrimp's body.

參考文獻

第八章、參考文獻

1. Abhijna, K. C., Prasanna, R., Ganavi, G. S., & Ghosh, D. (2022). Sensors, internet and cloud computing-based smart agriculture. *International Journal of Engineering Research in Computer Science and Engineering*, 9, 62–65.
2. Agarwal, A., Singh, D. K., & Verma, P. (2024). Combined impacts of warming and salinity changes on fish physiology: An emerging perspective. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 57(1), 21–34.
3. Alqurashi, H., Bouabdallah, F., & Khairullah, E. F. (2023). SCAP SigFox: A scalable communication protocol for low-power wide-area IoT networks. *Sensors*, 23, 3732.
4. Amijar, M. I. S. M., Ramli, N. M., Nurulhuda, K., & Aziz, S. A. (2024). Portable spectrophotometer for water quality monitoring in recirculating aquaculture systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1359, 012028.
5. Anzecc, A. (2000). Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Volume 1: The guidelines. Canberra, ACT: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand.
6. Badolo, M. (2024). The Badolo FoodResilience scientific framework for advancing food security resilience to climate change in Sub-Saharan Africa. Center for Open Science.
7. Barros, T. G. F., Eronides, F. d. S. N., Neto, J. A., Andre, G. M. D. S., Aquino, V. B., & Teixeira, E. S. (2022). The anatomy of IoT platforms—a systematic multivocal mapping study. *IEEE Access*, 10, 72758–72772.
8. Begum, S. S., Mashl, H., Karthikeyan, B., & Alanazi, F. Z. (2024). A prediction of heart disease using IoT based ThingSpeak basis and deep learning method. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 47, 166–179.
9. Berman, C. H., & Quinn, T. P. (1991). Behavioural thermoregulation and homing by spring Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in the Yakima River. *Journal of Fish Biology*, 39(3), 301–312.
10. Boeuf, G., & Payan, P. (2001). How should salinity influence fish growth? *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 130(4), 411–423.
11. Bonacina, L., Fasano, F., Mezzanotte, V., & Fornaroli, R. (2023). Effects of water temperature on freshwater macroinvertebrates: A systematic review. *Biological Reviews*, 98(1), 191–221.
12. Butinyac, M. G., Montañó, V. A., Downes, J., Ruane, N. M., Ryder, E., Egan, F., Staessen, T., Paull, B., & Murray, E. (2023). Continuous nitrite and nitrate monitoring of recirculating aquaculture systems using a deployable ion chromatography-based analyser. *Aquaculture International*, 32, 1013–1026.
13. Cai, J., & Leung, P. (2024). Popularity and parity assessment for more inclusive and balanced aquaculture development. *Scientific Reports*, 14, 25317.

14. Cavanagh, J. E. (2014). Effects of fine sediment on freshwater aquatic organisms: A review of the literature. Wellington, NZ: Department of Conservation.
15. Chakraborty, S., & Aithal, P. S. (2023). Let us create an IoT inside the AWS cloud. *International Journal of Case Studies in Business, IT, and Education*, 7, 211–219.
16. Chen, W., Ai, Q., & Ma, H. (2022). Exploring the interactions between the gut microbiome and the surrounding environment in fish: a review. *Aquaculture Research*, 53(3), 1158–1170.
17. Dallas, H. F., & Day, J. A. (2004). The effect of water quality variables on aquatic ecosystems: A review (Report No. TT 224/04). Pretoria, South Africa: Water Research Commission.
18. Dauda, A., Flauzac, O., & Nolot, F. (2024). A survey on IoT application architectures. *Sensors*, 24, 5320.
19. de Medeiros, T. D. M., Dufossé, L., & Bicas, J. L. (2022). Lignocellulosic substrates as starting materials for the production of bioactive biopigments. *Food Chemistry: X*, 13, 100223.
20. Deng, M., Dai, Z., Song, K., Wang, Y., & He, X. (2021). Integrating microbial protein production and harvest systems into pilot-scale recirculating aquaculture systems for sustainable resource recovery: Linking nitrogen recovery to microbial communities. *Environmental Science & Technology*, 55, 16735–16746.
21. Dhinakaran, D. (2023). IoT-based environmental control system for fish farms with sensor integration and machine learning decision support. *International Journal of Recent Innovation in Trends in Computing and Communication*, 11, 203–217.
22. El-Basioni, B. M. M., & El-Kader, S. M. A. (2020). Laying the foundations for an IoT reference architecture for agricultural application domain. *IEEE Access*, 8, 190194–190230.
23. Emerson, K., Russo, R. C., Lund, R. E., & Thurston, R. V. (1975). Aqueous ammonia equilibrium calculations: Effect of pH and temperature. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 32(12), 2379–2383.
24. Ende, S. S., Larceva, E., Bögner, M., Lugert, V., Slater, M. J., & Henjes, J. (2021). Low turbidity in recirculating aquaculture systems (RAS) reduces feeding behavior and increases stress-related physiological parameters in pikeperch (*Sander lucioperca*) during grow-out. *Translational Animal Science*, 5, txab223.
25. Engle, C. R., & Senten, J. V. (2022). Resilience of communities and sustainable aquaculture: Governance and regulatory effects. *Fishes*, 7, 268.
26. Esmaili, P., Cavado, F., & Norgia, M. (2022). Liquid level sensor based on phase-shifting of radio-frequency wave. *IEEE Sensors Journal*, 22, 11144–11152.
27. Falconer, L., Ytteborg, E., Goris, N., Lauvset, S. K., Sandø, A. B., Hjøllø, S. S., & Gentry, R. R. (2023). Context matters when using climate model projections for aquaculture. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1198451.
28. Fang-an, D. (2021). Some new properties of WD-fuzzy implication algebras. *Mathematics Letters*, 7, 25–30.
29. FAO. (1990). Water quality and fish health. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.



30. Gensemer, R. W., & Playle, R. C. (1999). The bioavailability and toxicity of aluminum in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(4), 315–450.
31. Gentry, R. R., Lester, S. E., Kappel, C. V., White, C., Bell, T. W., Stevens, J., & Gaines, S. D. (2016). Offshore aquaculture: Spatial planning principles for sustainable development. *Ecology and Evolution*, 7, 733–743.
32. Gidiagba, J. O., Nwaobia, N. K., Biu, P. W., Ezeigweneme, C., & Umoh, A. A. (2024). Review on the evolution and impact of IoT-driven predictive maintenance: Assessing advancements, their role in enhancing system longevity, and sustainable operations in both mechanical and electrical realms. *Computer Science & IT Research Journal*, 5, 166–189.
33. Gil-Núñez, J. C., Martínez-Córdova, L. R., Servín-Villegas, R., Magallón-Barajas, F. J., Bórquez-López, R. A., González-Galavíz, J. R., & Casillas-Hernández, R. (2020). Production of *Penaeus vannamei* in low salinity, using diets formulated with different protein sources and percentages. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 48, 396–405.
34. Gleiser, M., & Moro, S. (2023). Implementation of an IoT-based water quality monitoring system for aquaculture. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4, 1449–1452.
35. Gupta, D., Wadhwa, S., Rani, S., Khan, Z., & Boulila, W. (2023). EEDC: An energy efficient data communication scheme based on new routing approach in wireless sensor networks for future IoT applications. *Sensors*, 23, 8839.
36. Halla, P. T. H. B., Lalel, H., & Santoso, P. (2023). Comparison of the water environment aspects and production of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) between biofloc and conventional aquaculture systems in tropical dryland region. *International Journal of Tropical Drylands*, 7, 102–107.
37. Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254.
38. Heuer, R. M., & Grosell, M. (2016). Elevated CO₂ increases energetic cost and ion movement in the marine fish intestine. *Scientific Reports*, 6, 34480.
39. Hounslow, A. W. (1995). *Water quality data: Analysis and interpretation*. CRC Press.
40. Huang, W., Wang, Z., Liu, X., Zhu, D., Wang, Y., & Wu, L. (2022). The microbial community and functional indicators response to flow restoration in gradient in a simulated water flume. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1051375.
41. Ibrahim, H., Yin, S., Satyanarayana, M., Zhu, Y., Castellano, M. J., & Dong, L. (2022). In planta nitrate sensor using a photosensitive epoxy bioresin. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14, 25949–25961.
42. Is-Haak, J., Koydon, S., Iampichai, Y., & Ngamphongsai, C. (2022). Effects of ammonia, temperature and their interaction on oxygen consumption rate of Asian seabass (*Lates calcarifer*) juveniles. *Agriculture and Natural Resources*, 56, 917–924.
43. Islam, M. J., Kunzmann, A., & Slater, M. J. (2021). Responses of aquaculture fish to climate change-induced extreme temperatures: A review. *Journal of the World Aquaculture Society*, 53, 314–366.

44. Islam, S. I., Ahammad, F., & Mohammed, H. H. (2024). Cutting-edge technologies for detecting and controlling fish diseases: Current status, outlook, and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 55, e13051.
45. Jahazi, M. A., Hoseinifar, S. H., Jafari, V., Hajimoradloo, A., Van Doan, H., & Paolucci, M. (2020). Dietary supplementation of polyphenols positively affects the innate immune response, oxidative status, and growth performance of common carp, *Cyprinus carpio* L. *Aquaculture*, 517, 734709.
46. Jayakumar, M., Gindaba, G. T., Gebeyehu, K. B., Periyasamy, S., Jabesa, A., Baskar, G., John, B. I., & Pugazhendhi, A. (2023). Bioethanol production from agricultural residues as lignocellulosic biomass feedstock's waste valorization approach: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 879, 163158.
47. Jayaraj, K., Saravanan, P., & Bhowmick, G. D. (2023). Performance evaluation of aquaponics-waste-based biochar as a cathode catalyst in sediment microbial fuel cells for integrated multitrophic aquaculture systems. *Energies*, 16, 5922.
48. Jensen, F. B. (2003). Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 135(1), 9–24.
49. Jeong, H., Byeon, E., Kim, D.-H., Maszczyk, P., & Lee, J.-S. (2023). Heavy metals and metalloids in aquatic invertebrates: A review of single/mixed forms, combination with other pollutants, and environmental factors. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114959.
50. Ji, W., Chen, F., Chen, Z., & Jiang, H. (2024). Research in advances in the bioactivity of plant polyphenols. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(11), 8037–8044.
51. Kaur, G., Adhikari, N., Krishnapriya, S., Wawale, S. G., Malik, R. Q., Zamani, A. S., Falcón, J. P., & Osei-Owusu, J. (2023). Recent advancements in deep learning frameworks for precision fish farming: Opportunities, challenges, and applications. *Journal of Food Quality*, 2023, 4399512.
52. Kefford, B. J., Fields, E. J., Clay, C., & Nuggeoda, D. (2007). Salinity tolerance of riverine microinvertebrates from the southern Murray–Darling Basin. *Marine and Freshwater Research*, 58(10), 1019–1027.
53. Kim, J., Park, E., Cho, S., Kwon, K.-W., & Ko, Y. G. (2023). Probabilistic modeling of fish growth in smart aquaculture systems. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 17, 2259–2277.
54. Kim, P. S., Shin, N. R., Cho, S., Kim, J., & Whon, T. W. (2021). Host habitat is the major determinant of the gut microbiome of fish. *Microbiome*, 9(1), 166.
55. Kimothi, S., Thapliyal, A., Singh, R., Rashid, M., Gehlot, A., Akram, S. V., & Javed, A. R. (2023). Comprehensive database creation for potential fish zones using IoT and ML with assimilation of geospatial techniques. *Sustainability*, 15, 1062.
56. Kokkuar, N., Li, L., Srisapoome, P., Dong, S., & Tian, X. (2021). Application of biodegradable polymers as carbon sources in ex situ biofloc systems: Water quality and shift of microbial community. *Aquaculture Research*, 52, 3570–3579.

57. Kolman, R., Khudiyi, O., Kushniryk, O., Khuda, L., Prusińska, M., & Wiszniewski, G. (2018). Influence of temperature and Artemia enriched with ω -3 PUFAs on the early ontogenesis of Atlantic sturgeon (*Acipenser oxyrinchus*). *Aquaculture Research*, 49, 1740–1751.
58. Kumar, G., Hegde, S., Senten, J. V., Engle, C. R., Boldt, N. C., Parker, M., Quagraine, K. K., Posadas, B. C., Asche, F., & Dey, M. M. (2024). Economic contribution of U.S. aquaculture farms. *Journal of the World Aquaculture Society*, 55, e13091.
59. Kumar, P. S., Mohanakrishna, G., Hemavathy, R. V., Rangasamy, G., & Aminabhavi, T. M. (2022). Sustainable production of biosurfactants via valorisation of industrial wastes as alternate feedstocks. *Chemosphere*, 312, 137326.
60. Kustija, J., & Andika, F. (2021). Control–monitoring system of oxygen level, pH, temperature and feeding in pond based on IoT. *Reka Elkomika: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2, 1–10.
61. Lal, J., Vaishnav, A., Verma, D. K., Jana, A., Jayaswal, R., Chakraborty, A., Kumar, S., Devati, Pavankalyan, M., & Sahil. (2024). Emerging innovations in aquaculture: Navigating towards sustainable solutions. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14, 83–96.
62. Lee, T. H., Kim, K. T., Oh, H. Y., Park, S. Y., Lee, G. J., Kim, H. S., & Kim, H. S. (2024). Effect of blood orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) peel waste as a feed additive on the growth performance, digestive enzyme activity, antioxidant Capacity, and immune response in juvenile black rockfish (*Sebastes schlegelii*). *Antioxidants*, 13(12), 1452.
63. Lee, Y., Byeon, E., Kim, D.-H., Maszczyk, P., Wang, M., Wu, R. S. S., Jeung, H. D., Hwang, U. K., & Lee, J.-S. (2023). Hypoxia in aquatic invertebrates: Occurrence and phenotypic and molecular responses. *Aquatic Toxicology*, 263, 106685.
64. Lemos, C. H. P., Chung, S., Sampaio, R. C. P. V., & Copatti, C. E. (2018). Growth and biochemical variables in Amazon catfish (*Pseudoplatystoma reticulatum* ♀ × *Leiarius marmoratus* ♂) under different water pH. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, 3573–3581.
65. Levit, G. Y. (2010). A literature review of effects of ammonia on fish. Bozeman, MT: Center for Science in Public Participation.
66. Lewis, W. M., Jr., & Morris, D. P. (1986). Toxicity of nitrite to fish: A review. *Transactions of the American Fisheries Society*, 115(2), 183–195.
67. Li, E., Wang, X., Chen, K., Xu, C., Qin, J. G., & Chen, L. (2015a). Physiological change and nutritional requirement of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* at low salinity. *Reviews in Aquaculture*, 9, 57–75.
68. Li, F., Wei, Y., Chen, Y., Li, D., & Zhang, X. (2015b). An intelligent optical dissolved oxygen measurement method based on a fluorescent quenching mechanism. *Sensors*, 15, 30913–30926.
69. Li, H., Zhang, J., Ge, X., Chen, S., & Ma, Z. (2023). The effects of short-term exposure to pH reduction on the behavioral and physiological parameters of juvenile black rockfish (*Sebastes schlegelii*). *Biology*, 12, 876.

70. Li, P., Yao, X., Zhou, Q., Meng, X., Zhou, T., & Gu, Q. (2022). Citrus peel flavonoid extracts: Health-beneficial bioactivities and regulation of intestinal microecology in vitro. *Frontiers in Nutrition*, 9, 888745.
71. Li, X., & Zou, B. (2021). An automated data engineering pipeline for anomaly detection of IoT sensor data. *arXiv*, arXiv:2109.13828.
72. Lindmark, M., Audzijonyte, A., Blanchard, J. L., & Gårdmark, A. (2022). Temperature impacts on fish physiology and resource abundance lead to faster growth but smaller fish sizes and yields under warming. *Global Change Biology*, 28(21), 6239–6253.
73. Liu, C.-S., Chen, X.-T., Shih, W.-Y., Lin, C. C., Yen, J.-H., Huang, C.-J., & Yen, Y.-T. (2023). Smart water quality monitoring technology for fish farms using cellphone camera sensor. *Sensors and Materials*, 35, 3019–3036.
74. Liu, D., Zhang, Z., Song, Y., Yang, J., Lu, Y., Lai, W., Wu, Z., Zhao, D., Lin, H., Zhang, Y., Zhang, J., & Li, S. (2023). Effects of salinity on growth, physiology, biochemistry and gut microbiota of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Aquatic Toxicology*, 258, 106482.
75. Liu, F., Huang, Z., & Wang, L. (2019). Energy-efficient collaborative task computation offloading in cloud-assisted edge computing for IoT sensors. *Sensors*, 19, 1105.
76. Liu, L.-W., Ismail, M. H., Wang, Y.-M., & Lin, W.-S. (2021). Internet of Things based smart irrigation control system for paddy field. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 43, 378–389.
77. Liu, L.-W., Lu, C.-T., Wang, Y.-M., Lin, K.-H., Ma, X., & Lin, W.-S. (2022). Rice (*Oryza sativa* L.) growth modeling based on growth degree day (GDD) and artificial intelligence algorithms. *Agriculture*, 12, 59.
78. Liu, S., Zhang, P., Li, J., & Liu, H. (2022). Environmental stress-induced gut microbiota dysbiosis and its effects on fish health: a review. *Aquaculture International*, 30(8), 4241–4256.
79. Liu, Y., Benohoud, M., Yamdeu, J. H. G., Gong, Y. Y., & Orfila, C. (2021). Green extraction of polyphenols from citrus peel by-products and their antifungal activity against *Aspergillus flavus*. *Food Chemistry: X*, 12, 100144.
80. Lloyd, D. S., Koenings, J. P., & LaPerriere, J. D. (1987). Effects of turbidity in fresh waters of Alaska. *North American Journal of Fisheries Management*, 7(1), 18–33.
81. Madrigal, I. E. V., Valenzuela-Quiñónez, W., Esparza-Leal, H. M., Quiroz, G. R., & Noriega, E. A. A. (2019). Effects of ionic composition on growth and survival of white shrimp *Litopenaeus vannamei* culture at low-salinity well water. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52, 103–112.
82. Mahmud, H., Rahaman, M. A., Hazra, S., & Ahmed, S. (2023). IoT-based integrated system to monitor the ideal environment for shrimp cultivation with Android mobile application. *European Journal of Information Technology & Computer Science*, 3, 22–27.
83. Marini, R., Mikhaylov, K., Pasolini, G., & Buratti, C. (2022). Low-power wide-area networks: Comparison of LoRaWAN and NB-IoT performance. *IEEE Internet of Things Journal*, 9, 21051–21063.
84. Martin, J. M., Saaristo, M., Bertram, M. G., Lewis, P. J., Coggan, T. L., Clarke, B. O., & Wong, B. B. M. (2017). The psychoactive pollutant fluoxetine compromises antipredator behaviour in fish. *Environmental*



Pollution, 223, 592–599.

85. Martins, J. A., Azevedo, A. M., Almeida, A. C. d., da Silva, L. C. R., Fernandes, A. C. G., Valadares, N. R., & Aspiazú, I. (2022). Fuzzy logic is a powerful tool for the automation of milk classification. *Acta Scientiarum. Technology*, 44, e57860.
86. McKenzie, J. (2017). pH, alkalinity and buffering capacity of natural waters (Lecture notes, EPSC 220). McGill University.
87. Medeiros, A. F., & Souza, A. T. (2023). Ocean acidification impacts on calcifying marine invertebrates: energy allocation, shell integrity, and survival. *Marine Ecology Progress Series*, 703, 1–16.
88. Mijuskovic, A., Ullah, I., Bemthuis, R., Meratnia, N., & Havinga, P. (2021). Comparing apples and oranges in IoT context: A deep dive into methods for comparing IoT platforms. *IEEE Internet of Things Journal*, 8, 1797–1816.
89. Mota, V. C., Striberny, A., Verstege, G. C., Difford, G. F., & Lazado, C. C. (2022). Evaluation of a recirculating aquaculture system research facility designed to address current knowledge needs in Atlantic salmon production. *Frontiers in Animal Science*, 3, 876504.
90. Mothoka, M., Ouko, K. O., Mboya, J. B., Ndambuki, M. N., Outa, N., Ogello, E., Obiero, K., Ogola, R. J. O., Midamba, D. C., & Njogu, L. (2024). Socio-economic impacts of climate change and adaptation actions among smallholder fish farmers in Sub-Saharan Africa. *Aquaculture and Fisheries*, 4, e182.
91. Munif, M. M., Nasir, H. J. A., & Ahmad, M. I. (2024). Optimizing ant colony system algorithm with rule-based data classification for smart aquaculture. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33, 261–270.
92. Muruganandam, M., Rajamanickam, S., & Pande, R. K. (2023). Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystems: threats to fisheries and aquaculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(29), 77785–77799.
93. Muthmainnah, M., Nashirudin, W., Sasmitaninghidayah, N., Chamidah, A., & Mulyono, I. (2024). The development of an IoT-based automated temperature and pH monitoring system to enhance the management of gourami fish ponds. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 19, 294–300.
94. Newcombe, C. P., & MacDonald, D. D. (1991). Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *North American Journal of Fisheries Management*, 11(1), 72–82.
95. Paerl, H. W., Pinckney, J. L., Fear, J. M., & Peierls, B. L. (2003). The internal nutrient budget of an oligotrophic estuary: implications for nutrient loading and reduction strategies. *Estuaries*, 26(1), 96–107.
96. Pattusamy, A., Hittinahalli, C. M., Chadha, N. K., Sawant, P. B., Krishna, H., & Verma, A. K. (2022). Water budgeting for culture of *Penaeus vannamei* in earthen grow-out ponds using inland saline groundwater. *Aquaculture Research*, 53, 4521–4530.
97. Paul, D., & Hall, S. (2021). Biochar and zeolite as alternative biofilter media for denitrification of aquaculture effluents. *Water*, 13, 2703.

98. Pierleoni, P., Concetti, R., Belli, A., & Palma, L. (2020). Amazon, Google and Microsoft solutions for IoT: Architectures and a performance comparison. *IEEE Access*, 8, 5455–5470.
99. Pointl, M., & Fuchs-Hanusch, D. (2021). Assessing the potential of LPWAN communication technologies for near real-time leak detection in water distribution systems. *Sensors*, 21, 293.
100. Prapti, D. R., Shariff, A. R. M., Man, H. C., Ramli, N. M., Perumal, T., & Shariff, M. (2021). Internet of Things (IoT)-based aquaculture: An overview of IoT application on water-quality monitoring. *Reviews in Aquaculture*, 14, 979–992.
101. Prasad, J., Bhatnagar, V., & Chandra, R. (2019). Soil moisture sensors for sustainable irrigation: Comparison and calibration. *International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics*, 5, 25–39.
102. Preden, J., Kaugerand, J., Suurjaak, E., Astapov, S., Motus, L., & Pahtma, R. (2015). Data to decision: Pushing situational information needs to the edge of the network. In *2015 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision* (pp. 158–164).
103. Peebles, J. B. (1979). Molting, movement, and dispersion in the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 36(9), 1080-1088.
104. Putri, F. R., Budiyanoto, I. R., & Afauly, R. A. P. (2023). Is water oxidation–reduction potential (ORP) value relevant for aquaculture applications in shrimp farming? *E3S Web of Conferences*, 442, 02015.
105. Qu, X., Xia, W., Wang, R., Zhang, Y., Xie, Z., Trushenski, J., & Chen, Y. (2018). Effects of aquaculture on lakes in the Central Yangtze River Basin, China, II: Benthic macroinvertebrates. *North American Journal of Aquaculture*, 80, 369–378.
106. Ragavi, R., Ramya, A., Sowndharya, G., & Sunmathy, S. (2024). Hybrid power source in fish farming with help of IoT technology. *International Research Journal of Interdisciplinary Science and Technology*, 8, 61–70.
107. Rajeev, M., Jung, I., Kang, I., & Cho, J. C. (2024). Genome-centric metagenomics provides insights into the core microbial community and functional profiles of biofloc aquaculture. *mSystems*, 9, e0078224.
108. Randall, D. J., & Tsui, T. K. N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1–12), 17–23.
109. Rao, C. V., Chari, N. V. H. K., & Muralikrishna, R. (2019). The impact of shrimp pond effluent on water quality of Vasishta Godavari estuary with respect to brackishwater aquaculture, east coast of India. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 23, 245–255.
110. Rao, M. M., Botsa, S. M., Rao, T. P., Goddu, S. R., & Vijayasanthi, C. (2024). A comprehensive review on agricultural waste production and onsite management with circular economy opportunities. *Discover Sustainability*, 5(1), 288.
111. Rashwan, A. K., Bai, H., Osman, A. I., Eltohamy, K. M., Chen, Z., Younis, H. A., Al-Fatesh, A., & Yap, P. S. (2023). Recycling food and agriculture by-products to mitigate climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(6), 3351–3375.

112. Reverter, M., Tapissier-Bontemps, N., Sasal, P., & Saulnier, D. (2017). Use of medicinal plants in aquaculture. In P. T. K. Woo (Ed.), *Diagnosis and control of diseases of fish and shellfish* (pp. 223–261). Wiley-Blackwell.
113. Roberson, T. L., Badzmierowski, M. J., Stewart, R. D., Ervin, E. H., Askew, S. D., & McCall, D. S. (2021). Improving soil moisture assessment of turfgrass systems utilizing field radiometry. *Agronomy*, 11, 1960.
114. Roman, M. R., Altieri, A. H., Breitburg, D., Ferrer, E. M., Gallo, N. D., Ito, S., Limburg, K., Rose, K., Yasuhara, M., & Levin, L. A. (2024). Reviews and syntheses: Biological indicators of low-oxygen stress in marine water-breathing animals. *Biogeosciences*, 21(11), 4975–5004.
115. Rosalia, A. C. T., & Mulyaningsih, T. (2023). Climate change impact on food security: A review. *Sustinere Journal of Environment and Sustainability*, 6, 227–238.
116. Rustini, H. A., Sapei, A., Riani, E., Machfud, Sunaryani, A., Santoso, A. B., Nomosatryo, S., Setiawan, F., & Rahmadya, A. (2024). Suitability assessment of a volcanic endorheic lake for aquaculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1359, 012121.
117. Sahoo, P. K., Kim, K., Hong, G.-H., & Cho, J. (2023). Conceptualizing turbidity for aquatic ecosystems in the context of sustainable development goals. *Environmental Science: Advances*, 2(9), 1220–1234.
118. Sarangi, P. K., Vivekanand, V., Gunda, M., Pattnaik, B., Muddapur, U., & Aminabhavi, T. M. (2023). Production of bioactive phenolic compounds from agricultural byproducts towards bioeconomic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137460.
119. Sasikumar, R., Lincy, L. L., Sathyan, A., & Chellapandi, P. (2024). Design, development, and deployment of a sensor-based aquaculture automation system. *Aquaculture International*, 32, 6431–6447.
120. Sehnal, L., Brammer-Robbins, E., Wormington, A. M., Blaha, L., Bisesi, J., Larkin, I., Martyniuk, C. J., Simonin, M., & Adamovsky, O. (2021). Microbiome composition and function in aquatic vertebrates: Small organisms making big impacts on aquatic animal health. *Frontiers in Microbiology*, 12, 567408.
121. Sharma, A., Gupta, S. K., & Patel, A. K. (2025). Impact of pollutants on fish gut microbiota and its link to health and disease: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103181.
122. Sharma, H., Shukla, M. K., Bosland, P. W., & Steiner, R. L. (2017). Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. *Agricultural Water Management*, 179, 81–91.
123. Shehata, N., Kandas, I., & Samir, E. (2020). In situ gold–ceria nanoparticles: Superior optical fluorescence quenching sensor for dissolved oxygen. *Nanomaterials*, 10, 314.
124. Silalahi, A. O., Sinambela, A., Panggabean, H. M., & Pardosi, J. T. N. (2023). Smart automated fish feeding based on IoT system using LoRa TTGO SX1276 and Cayenne platform. *Eureka: Physics and Engineering*, (3), 66–79.
125. Singh, R. K., Rahmani, M. H., Weyn, M., & Berkvens, R. (2022). Joint communication and sensing: A proof of concept and datasets for greenhouse monitoring using LoRaWAN. *Sensors*, 22, 1326.

126. Siskandar, R., Wiyoto, W., Hendriana, A., Ekasari, J., Kusumah, B. R., Halim, G., & Nugraha, I. J. (2022). Automated redox monitoring system (ARMS): An instrument for measuring dissolved oxygen levels using a potential redox sensor (ORP) in a prototype shrimp farming pond with an internet-based monitoring system. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 11, 238–246.
127. Smith, L. L., Jr., Oseid, D. M., Adelman, I. R., & Broderius, S. J. (1976). Effect of hydrogen sulfide on fish and invertebrates. Part I: Acute and chronic toxicity (EPA-600/3-76-062). Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
128. Socha, M., Chyb, J., Suder, A., & Bojarski, B. (2024). How endocrine disruptors affect fish reproduction on multiple levels: A review. *Fisheries & Aquatic Life*, 32(3), 128–136.
129. Sourisse, J. M., Tabarova, M., Romeo, D., & Chung, S. (2025). Acidification alters anxiety-like behaviour and brain gene expression in zebrafish. *Aquatic Toxicology*, 258, 106457.
130. Stiller, K. T., Kolarevic, J., Lazado, C. C., Gerwins, J., Good, C., Summerfelt, S. T., Mota, V. C., & Espmark, Å. M. O. (2020). The effects of ozone on Atlantic salmon post-smolt in brackish water—establishing welfare indicators and thresholds. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 5109.
131. Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters* (3rd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
132. Su, X., Sutarlie, L., & Loh, X. J. (2020). Sensors, biosensors, and analytical technologies for aquaculture water quality. *Research*, 2020, 8272705.
133. Sulit, V. T., & Aldon, E. T. (2006). Report of the third round table discussion on the development of genetically improved strain of *Macrobrachium*. Aquaculture Department, Southeast Asian Fisheries Development Center.
134. Taghizadeh, V., Nilsen, T. O., Maage, A., & Stefansson, S. O. (2013). Effects of acidic water and aluminum on early developmental stages of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Journal of Fish Biology*, 82(4), 1266–1284.
135. Tamim, A. T., Begum, H., Shachcho, S. A., Khan, M. M., Yeboah-Akouwah, B., Masud, M., & Al-Amri, J. F. (2022). Development of IoT-based fish monitoring system for aquaculture. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 32, 55–71.
136. Turcios, A. E., & Papenbrock, J. (2014). Sustainable treatment of aquaculture effluents—What can we learn from the past for the future? *Sustainability*, 6, 836–856.
137. Valencia-Arías, A., Dávila, J. R., Londoño-Celis, W., Palacios-Moya, L., Hernández, J. L., Agudelo-Ceballos, E., & Uribe-Bedoya, H. (2024). Research trends in the use of the Internet of Things in sustainability practices: A systematic review. *Sustainability*, 16, 2663.
138. Vijayaram, S., Mahendran, K., Ringø, E., Razafindralambo, H., Kannan, S., & Sun, Y. (2024). Biogenic dietary promoters in aquaculture: Nature-based solutions for enhancing growth, health, and sustainability. *Annals of Animal Science* (in press).



139. Vo, T. T. E., Ko, H., Huh, J. H., & Kim, Y. (2021). Overview of smart aquaculture system: Focusing on applications of machine learning and computer vision. *Electronics*, 10, 2882.
140. Vásquez, Z. S., de Carvalho Neto, D. P., Pereira, G. V., Vandenberghe, L. P., de Oliveira, P. Z., Tiburcio, P. B., ... & Soccol, C. R. (2019). Biotechnological approaches for cocoa waste management: A review. *Waste management*, 90, 72-83.
141. Wang, Z., Chen, X., Shi, L., Zhang, X., & Hu, Y. J. (2024). Productivity versus environmental sustainability: A broadscale assessment of freshwater aquaculture's technical efficiency and ecological efficiency in China's inland provinces. *Journal of the World Aquaculture Society*, 55, e13057.
142. WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
143. Wibisono, A. B., & Jayadi, R. (2024). Experimental IoT system to maintain water quality in catfish pond. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15, 393–399.
144. Wu, T.-H., Chen, C. H., Mao, N., & Lu, S.-T. (2017). Fishmeal supplier evaluation and selection for aquaculture enterprise sustainability with a fuzzy MCDM approach. *Symmetry*, 9, 286.
145. Xia, P., Zhou, H., Sun, H., Sun, Q.-F., & Griffiths, R. (2022). Research on a fiber optic oxygen sensor based on All-Phase Fast Fourier Transform (apFFT) phase detection. *Sensors*, 22, 6753.
146. Xu, Y. P., Jin, J., Zeng, S., Zhang, Y., & Xiao, Q. (2023). Development and evaluation of an IoT-based portable water quality monitoring system for aquaculture. *INMATEH Agricultural Engineering*, 70, 359–368.
147. Yang, Y., Good, C., & Summerfelt, S. T. (2019). Chronic nitrate exposure degrades health and inhibits growth of rainbow trout in recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, 511, 734215.
148. Yang, Z., Li, D., Song, J., Bao, E., Wang, Q., Qiu, Y., & Wu, Z. (2023). Numerical calculation and experimental analysis of thermal environment in industrialized aquaculture facilities. *PLoS ONE*, 18, e0290449.
149. Yuan, X., Wu, X., He, M., Lai, J. P., & Sun, H. (2022). A ratiometric fiber optic sensor based on CdTe QDs functionalized with glutathione and mercaptopropionic acid for on-site monitoring of antibiotic ciprofloxacin in aquaculture water. *Nanomaterials*, 12, 829.
150. Zhao, Y., Zhang, H., Jin, Q., Jia, D., & Liu, T. (2022). Ratiometric optical fiber dissolved oxygen sensor based on fluorescence quenching principle. *Sensors*, 22, 4811.
151. Zhao, Z., Jiang, J., Zheng, M., & Wang, F. (2021). Advancing development of biochemicals through the comprehensive evaluation of bio-ethylene glycol. *Chemical Engineering Journal*, 411, 128516.

淡水長臂大蝦繁殖與養殖技術

發行人：張金龍

著者：郭信威、李政穎、劉力維、許嘉合、陳怡瑄、鄭文騰

總編輯：彭克仲

執行編輯：王連勝

編輯顧問：林俊男、張嘉熒

出版者：國立屏東科技大學農業推廣委員會

地址：屏東縣內埔鄉學府路 1 號

推廣服務專線：(08)7703202 轉 7364 · 7782
(08)7740175(FAX)

出版日期：114 年 12 月

ISBN：978-626-7682-10-4 (平裝)

農業部 114 農再 -1.2.1-1.1- 輔 -001(9) 計畫補助