

低碳養殖應用於四指馬鮫疫病控管之永續經營研究
The sustainable management of low-carbon aquaculture applications onto the
disease control of fourfinger threadfin

莊翔傑

國立高雄科技大學 水產養殖系 副教授

hcchuang@nkust.edu.tw

盧昆宏

國立高雄大學亞太工商管理學系 教授

log@nuk.edu.tw

劉育芬

國立高雄大學亞太工商管理學系 碩士在職專班 研究生

yufennuk@gmail.com

摘要

基於環境保育和永續發展日益受到重視，本研究探討低碳養殖管理技術之應用於四指馬鮫疫病管控之影響，藉由問卷調查與採用多變量排序性 Probit 模型進行統計分析，比較低碳與傳統養殖管理模式，實驗結果顯示應用低碳養殖管理技術於育成率、收成規格及單位面積生產量等均顯著優於傳統養殖模式，且養殖週期顯著縮短換水需求亦降低，且在疫病發生率統計分析顯示，應用低碳養殖管理技術之鏈球菌、弧菌與發光桿菌的發生次數顯著低於傳統養殖模式。本次研究結果發現於四指馬鮫之養殖週期內應用低碳養殖管理技術可有效地降低疾病發生次數，提升養殖效益兼顧水土資源保育及產業永續發展。

關鍵詞：低碳養殖管理技術、四指馬鮫、疾病控制、環境永續性

Keywords: low-carbon aquaculture management technique、fourfinger threadfin、disease control、Environmental Sustainability

一、前言

水產養殖業在全球糧食安全中扮演著關鍵角色，為人類提供豐富的蛋白質來源。而高密度養殖模式往往伴隨著二氧化碳的快速累積、養殖環境惡化與疫病頻發等問題(Guo et al.,2024；Cheng et al.,2024)對產業的永續發展構成威脅。在氣候變遷與資源日益匱乏的挑戰下，發展低碳之生態友善的養殖管理技術已成為全球共識，不僅能穩定糧食供應，更能有效降低對環境的負擔，進而實現永續發展的目標。

1.1 低碳養殖管理技術

根據「友善養殖管理技術」(Cheng et al.,2024)，複合光合菌(complex photosynthetic bacteria, CPSB)應用能有效減少換水量進而減低用電量，降低水資源需求與經營成本，進一步而言此技術因其能穩定養殖環境、減少碳排放量，因此可將定義為「低碳養殖管理模式」，此模式不但減少養殖過程中相關的碳排放，同時也減少對環境的影響，提升水產品的安全性與品質，從而促進養殖產業的經濟效益和水產品的市場競爭力。

近年來，益生菌在水產養殖上的應用日益受到重視，目前水產養殖常用之益生菌種類包含幾種：光合細菌(Photosynthesis Bacteria)、枯草桿菌(*Bacillus* spp.)、乳酸菌(*Lactobacillus* spp.)、希瓦氏菌(*Shewanella* spp.)和腸球菌(*Enterococcus* spp.)等(Cheng et al.,2024)。使用益生菌，最重要目標為改善養殖過程中水生動物及環境的整體狀況。然而環境的惡化亦是水產養殖中疾病爆發的主要原因之一，益生菌作為一種安全的添加劑，應用於水產養殖中可穩定水質、抑制潛在的病原微生物。根據研究表示，巨大芽孢桿菌加枯草桿菌，能促進水產養殖生態系中氮、磷化合物的轉化利用，減少致病菌，使養殖池中形成良好的微生物群落結構(Li et al., 2022)。此外，於 *Litopenaeus vannamei* (白蝦)養殖池內添加益生菌，其水中氨濃度呈下降趨勢(Hassan et al., 2022)，水質明顯改善且可降低因環境壓力引發的疾病風險。

光合細菌在地球的碳與硫循環中扮演著關鍵角色，其可分為氧合光合細菌 (oxygenic phototrophic bacteria) 與非氧合光合細菌 (anoxygenic phototrophic bacteria) (Imhoff, 2014a)。其中，非氧合光合細菌依其電子供體的不同，又可進一步分為紫色硫細菌 (Purple Sulfur Bacteria, PSB) 及綠色硫細菌 (Green Sulfur Bacteria, GSB) (Frigaard & Dahl, 2008)。紫色硫細菌(PSB)主要隸屬於 *Chromatiaceae*，其代表性物種包括 *Allochrochromatium vinosum*、*Chromatium* 及 *Thiocapsa* 等 (Imhoff, 2014b)。這些細菌通常棲息於湖泊、鹽沼、深海熱泉等光可穿透的厭氧環境 (Struk et al., 2023)。PSB 內含細菌葉綠素 (bacteriochlorophyll a 或 b) 及類胡蘿蔔素 (carotenoids)，能吸收遠紅外光波段，以支持低光環境下的光合作用 (Egger et al., 2020)。而本研究中著重於光合細菌 (Photosynthesis Bacteria)，特別是紫色硫細菌 (Purple Sulfur Bacteria, PSB) 可降低四指馬鮫疾病發生率方面的潛力以及提升養殖效益。

1.2 四指馬鮫 (*Eleutheronema tetradactylum*) 簡介

四指馬鮫(*Eleutheronema tetradactylum*)中文俗名：午仔魚、竹午、四絲馬鮫、英文俗名：Indian salmon、Fourfinger threadfin，為一種暖溫、廣鹽性魚類(呂，2017)，為臺灣重要的經濟魚種之一，因臺灣氣候適宜、成熟的養殖技術及內外銷市場成長等多種因素，四指馬鮫成為重要的養殖物種之一，除了冬季之外幾乎都可收購到四指馬鮫之魚苗，而業者們放養旺季坐落於清明節前後開始放苗進行飼養，由魚苗養殖至約 300-330 克/尾之規格所需時間約需 8-12

個月，一年一獲。根據聯合國糧食及農業組織(FAO)資料，臺灣水產養殖所生產之四指馬鮫長年於全球佔比皆高達90%以上，在最新統計資料中顯示臺灣於2022年生產量高達12,123公噸，佔全球生產量99%(圖1)，顯示出臺灣在四指馬鮫養殖產業中臺灣之重要性。而在臺灣，透過2024漁業統計年報資料得知屏東縣為台灣最主要之四指馬鮫生產區域，產量高達12,588公噸(87.1%)(圖2)，屏東縣藉由適合的氣候條件與環境優勢，成為了台灣四指馬鮫養殖重鎮。彙整中華民國財政部關務署海關進出口統計資料及漁業年報，在外銷方面，近年內外銷量亦呈現成長的趨勢，直至2019-2021年間穩定外銷約8,000公噸，產值高達8.5-9億上下(圖3)，此外在近三年疫情衝擊之下，冰鮮冷凍的四指馬鮫仍維持6,000-7,000公噸以上的外銷量。而在內銷端，依據漁產品全球資訊網統計，整體而言我國近10年國四指馬鮫總交易量呈現成長的趨勢，於2023年時達到約3,712公噸，為近年交易量之最高峰；市場價格方面，彙整漁產品全球資訊網近10年我國內銷平均價格約為193.4元/公斤(圖4)。四指馬鮫主要銷售地區以中國大陸、香港為主，兩地區囊括99%以上之外銷量，其他國家(美國、加拿大、新加坡、關島、南韓等)僅少量出口，然而在2022年底，四指馬鮫開始禁止輸出至外銷最大國家中國，外銷量減少50%以上，在外銷量大幅下降同時也大幅影響國內魚價，造成台灣地區產業重創(圖5)，而在禁輸同時外銷香港量有明顯的上升，推測目前仍有其市場需求，業者們仍嘗試透過其他管道進行販售。

然而，近年來，四指馬鮫養殖業持續受到疾病問題困擾，且集約化養殖模式已成為主流，在有限的空間內飼養大量魚隻，易造成水質惡化導致各種病原體(如細菌、病毒、寄生蟲等)的滋生與快速傳播，使得魚群經常爆發大規模的感染。這些疾病的發生不僅直接導致魚隻大量死亡，造成養殖戶巨大的經濟損失，亦可能通過食物鏈影響人類健康，並可能因為病原體的擴散污染周邊水域生態環境，破壞生物多樣性。若僅依賴化學藥物來控制疫情且長期使用不僅可能在魚體內殘留有害物質，造成食品安全危害，還可能促使病原體產生抗藥性，使得未來的防治更加困難，阻礙四指馬鮫養殖產業的健全發展，並損害消費者的權益。

臺灣具備成熟的水產養殖技術與適宜的養殖環境，為水產養殖產業的發展奠定了良好的基礎。然而，在養殖過程中，疾病的發生始終是業者需要面對的重要課題，於疾病發生方面，經田野調查與彙整相關四指馬鮫細菌性疾病研究包含：鏈球菌感染症、弧菌感染症、發光桿菌感染症(Chou et al., 2019; Andreoni & Magnani, 2014; Das et al., 2009)。水產養殖中疾病的發生為病原體、宿主與環境三種元素交互作用的結果(Kang et al., 2025)，現有研究多著重於疾病本身，然而對其對產業經濟影響的探討仍相對有限，因此本研究針對臺灣四指馬鮫產業進行深入研究，透過實地驗證、田野調查、病原分析及模型推論，評估低碳養殖技術於四指馬鮫疫病控管及產業永續經營中的應用。期望能為四指馬鮫養殖產業提供具體管理策略，降低疾病風險，同時提升產業經濟效益與環境永續性。

1.3 研究動機與目的

本篇主要研究目的如下：

- 1.透過多變量排序性 Probit 模型比較有無使用低碳養殖技術疫病控管之效果。
- 2.應用低碳養殖管理技術能否達到省水、省電效果。

本研究目的於評估低碳養殖技術是否降低四指馬鮫疫病之發生率。採用多變量排序性 Probit 模型，比較分析與未應用低碳養殖技術之養殖池，評估該技術對疫病控管效果的影響，探討其降低疾病發生率之效益。同時，分析低碳養殖管理技術於實際應用中的節水節電，透過數據分析其在降低水資源與電力消耗方面的潛力，進而評估其對養殖營運成本的貢獻。然再進一步探討應用低碳養殖管理技術後，養殖過程中所減少之二氧化碳等溫室氣體排放量，為臺灣四指馬鮫養殖產業的綠色轉型提供科學依據。

二、材料與方法

2.1 低碳養殖管理技術應用於田間大規模試驗

2.1.1 試驗業者選定

本研究選定30戶的屏東在地四指馬鮫養殖業者進行試驗，每位業者均會提供對照組及實驗組各一池作為研究樣本。

2.1.2 資料提供及應用技術輔導

本研究將定義實驗組為採用低碳養殖管理技術進行養殖管理，對照組則為採用傳統養殖模式。實驗為期 32 週，實驗組每四週添加一次 CPSB 添加濃度為 100 ppm，於實驗過程中提供業者所需之 CPSB 及表單進行紀錄。

2.1.3 問卷調查及訪談

於養殖收成後回收紀錄表單並透過訪問各業者對照組和實驗組之海水進水量、淡水進水量、養殖面積、放養量(尾)、放養密度(尾/m²)、養殖週期(月)、育成率(%)、魚體收成規格(g)等數據做為參考依據，結束後彙整相關資訊並換算成統一單位以利分析。為提升問卷有效性，調查經由通過個人訪談取得相關資訊，並再次確認問卷有效與否。研究問卷相關變數計算方式如下：

1. 放養密度(尾/m²)=放養量(尾)/放養面積(m²)
2. 收成量(kg)=放養量(尾)*育成率(%)*收成規格(g)/1,000
3. 育成時間(月)=四指馬鮫放養後至銷售養殖所需時間(月)
4. 單位放養面積生產量(kg/m²)=收成量(kg)/放養面積(m²)
5. 單位面積每月換水量(m³/月/m²)=每月換水量(m³/月)/放養面積(m²)

2.2 計量模型

本研究為探討多種魚類疾病間相互影響及共同風險因子之影響效果，採用多變量排序性 Probit 模型 (Multivariate Ordered Probit Model)，以同時估計多個變項發生頻率，進行更符合養殖現場情境之聯合分析。該模型可視為單變量排序性 Probit 模型延伸，特別適用於同時處理多個有序類別型態結果變數，並考量其潛在相關性。此模型在近似不相關回歸 (Seemingly Unrelated Regressions, SUR) 架構下，形成一組由 q 條方程式構成聯立方程式，估計不同疾病發生頻率（如鏈球菌、弧菌與發光桿菌）與影響因子（如是否使用 CPSB、養殖週期、池面積、放養密度與換水量等）之間關係。

$$\begin{cases} y_{i,1}^* = x_{i,1}\beta_1 + \varepsilon_{i,1} \\ \dots \\ y_{i,q}^* = x_{i,q}\beta_q + \varepsilon_{i,q} \end{cases} \quad (1)$$

對於個體 i ，每潛在變數 $y_{i,n}^*$ （如個體發生疾病 n 頻度）為獨立變數向量($X_{i,n}$)、參數向量($\beta_{i,n}$)與誤差項($\varepsilon_{i,n}$)函數，誤差項服從標準常態分佈 $\varepsilon_{i,n} \sim N(0,1)$ ，整體誤差向量則均值為零、共變異數矩陣為 R 的多變量常態分布：

$$\{\varepsilon_{i,1}, \dots, \varepsilon_{i,q}\} \sim N(0, R)$$

其中相關係數矩陣 R 為：

$$R = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1q} \\ \rho_{12} & 1 & \dots & \rho_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{1q} & \rho_{2q} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 $\rho_{nn'}$ 代表誤差項 $\varepsilon_{i,n}$ 和 $\varepsilon_{i,n'}$ 之間相關係數。該模型既考慮可觀察因素($X_{i,n}$)，也考慮不可觀察共同因素，而不可觀察共同因素決定誤差項 ($\varepsilon_{i,n}$) 之間相關性。在本研究中，資料中代表養殖戶之特定養殖池，並作為模型的應變項。自變項包含 CPSB 使用與否、養殖週期 (月)、池面積 (m²)、放養密度 (尾/m²)、換水量 (m³/月/m²) 等變數，並進一步設計 CPSB 使用與其他變數之交互作用項，以分析 CPSB 對於不同風險因子下疾病發生之相關效應。

三、結果

3.1 應用低碳養殖管理與傳統養殖管理之參數分析

經由問卷收集與調查後分析比較低碳養殖管理與傳統養殖管理對四指馬鮫養殖過程中各項養殖參數，並探討兩種管理模式在環境永續性上的差異。本次統計回收問卷有效問卷共 60 份，其中包含實驗組(應用低碳養殖管理技術)30 份及控制組 30 份(應用傳統養殖管理技術)，且經彙整問卷資料後，結果顯示實驗組相較於對照組，在養殖規模方面包括養殖面積、放養量與放養密度皆呈現不顯著，但在產量與其他效能指標方面具有顯著性之差異，包括在養殖週期、育成率、收成規格、單位面積生產量與單位面積抽換水量 (表 1)。

3.2 不同養殖管理模式下養殖四指馬鮫之疫病發生次數統計結果

結果顯示，四指馬鮫疫病發生次數統計中，應用低碳養殖管理技術之鏈球菌、弧菌與發光桿菌發生次數皆顯著低於傳統養殖管理技術 (表 2)。

3.3 低碳養殖管理技術應用於疾病控管之多變量排序性 Probit 模型之分析

3.3.1 應用低碳養殖管理技術(CPSB 之應用)對於疾病發生次數之結果

以多變量排序性 Probit 模型結果顯示，應用低碳養殖管理技術對「鏈球菌發生次數」呈負相關(-1.78706, $p < 0.01$)，表示與未應用低碳養殖管理技術之養殖池相比，應用低碳養殖管理技術之養殖池鏈球菌發生次數顯著較低；應用低碳養殖管理技術對弧菌發生次數不顯著(0.0263422, $p = 0.972$)，表示是應用低碳養殖管理技術與弧菌發生的次數無顯著關聯性；應用低碳養殖管理技術對發光桿菌發生次數呈負相關 (-1.06872, $p = 0.086$)，這表示低碳養殖管理技術之應用對發光桿菌發生次數會降低但不顯著 (表 3)。

3.3.2 養殖週期與疫病發生次數之結果

根據多變量排序性 Probit 模型結果顯示，養殖週期對鏈球菌發生次數與發光桿菌發生次數呈不顯著(0.0115601, $p = 0.933$ 、0.2054022, $p = 0.123$)，顯示養殖週期長短與鏈球菌、發光桿菌的發生次數無顯著關聯性；養殖週期對「弧菌發生次數」呈負相關(-0.2855753, $p < 0.05$)，這表示養殖週期越長，弧菌發生次數顯著較低 (表 3)。

3.3.3 養殖池面積與疫病發生次數之結果

根據多變量排序性 Probit 模型結果顯示，養殖池面積對於鏈球菌發生次數與發光桿菌發生次數皆呈不顯著(-7.12e-06, $p = 0.586$ 、-0.0000192, $p = 0.531$)，代表養殖池面積大小與鏈球菌、發光桿菌發生次數無顯著關聯性；養殖池面積對弧菌發生次數呈負相關(-0.0001471, $p = 0.067$)，這表示養殖池面積越大，弧菌發生次數較低但不顯著 (表 3)。

3.3.4 放養密度與疫病發生次數之結果

根據多變量排序性 Probit 模型結果顯示，放養密度對鏈球菌發生次數與發光桿菌發生次數皆呈不顯著(-0.1077203, $p = 0.216$ 、0.0188506, $p = 0.839$)，表示放養密度與鏈球菌、發光桿菌發生次數無顯著關聯性；放養密度對弧菌發生次數呈負相關(-0.239049, $p < 0.05$)，代表放養密度越高，弧菌發生次數顯著降低 (表 3)。

3.3.5 魚體收成規格與疫病發生次數之結果

根據多變量排序性 Probit 模型結果顯示，魚體收成規格對於三種疾病發生次數皆呈現不顯著(鏈球菌發生次數: 0.0035743, $p = 0.309$ ；弧菌發生次數: -0.0050903, $p = 0.227$ ；發光桿菌發生次數: 0.0042491, $p = 0.280$)，故表示魚體收成規格與疫病發生次數無顯著關聯性 (表 3)。

3.3.6 換水量與疫病發生次數之結果

根據多變量排序性 Probit 模型結果顯示，換水量對於鏈球菌發生次數呈不顯著(0.0067208, $p = 0.602$)，表示換水量與鏈球菌發生的次數無顯著關聯性；換水量對弧菌發生次數呈正相關(0.0413084, $p < 0.01$)，代表換水量越大，弧菌發生的次數顯著較高；換水量對發光桿菌發生次數亦呈正相關 (0.0275275, $p = 0.072$)，代表換水量越大，發光桿菌發生的次數較高但較不顯著 (表 3)。

3.4 共同因素與低碳養殖管理技術應用(CPSB 之應用)之交互效果

在不考慮共同因素與應用低碳養殖管理技術的交互效果下，模型估計顯示此技術的使用對於鏈球菌與發光桿菌發生次數具有顯著抑制效果。然而，進一步分析共同因素在是否應用低碳養殖管理技術條件下的效果時，估計結果得到以下幾項結果針對每個自變數及其與虛擬變數(dummy variable, D)的交互作用項對各因變數之影響：

3.4.1 是否應用低碳養殖管理技術與疫病發生次數之結果

根據結果顯示，應用低碳養殖管理技術對鏈球菌發生次數呈負相關 ($-10.16228, p < 0.001$)，表示應用低碳養殖管理技術顯著降低鏈球菌發生的次數；應用低碳養殖管理技術對弧菌發生次數呈不顯著 ($-7.698309, p = 0.321$)；應用低碳養殖管理技術對發光桿菌發生次數呈相關($10.6808, p < 0.01$)，表示應用低碳養殖管理技術顯著增加發光桿菌發生次數 (表 4)。

3.4.2 養殖週期與疫病發生次數之結果

根據結果顯示，養殖週期對鏈球菌發生次數呈不顯著 ($-1.1747936, p = 0.255$)；養殖週期對弧菌發生次數呈負相關 ($-0.6329787, p < 0.01$)，即養殖週期越長，弧菌發生的次數顯著降低；養殖週期對發光桿菌發生次數呈正相關 ($0.3827166, p < 0.016$)，表示養殖週期越長，發光桿菌發生次數顯著增加 (表 4)。

3.4.3 養殖週期(交互作用項)與疫病發生次數之結果

根據交互作用之結果顯示，養殖週期對鏈球菌發生次數與發光桿菌發生次數呈不顯著 ($0.437239, p = 0.114$ 、 $-0.4008678, p = 0.156$)；養殖週期對弧菌發生次數呈正相關($0.5751534, p = 0.091$)，結果表明，D 的存在可降低養殖週期對弧菌發生的負向影響 (表 4)。

3.4.4 養殖池面積與疫病發生次數之結果

根據結果顯示，養殖池面積對鏈球菌發生次數與發光桿菌發生次數皆呈不顯著 ($6.81e-06, p = 0.671$ 、 $-2.19e-06, p = 0.909$)；養殖池面積對弧菌發生次數呈負相關($-0.0006765, p < 0.013$)，養殖池面積越大，弧菌發生的次數顯著降低 (表 4)。

3.4.5 養殖池面積(交互作用項)與疫病發生次數之結果

根據交互作用之結果顯示，養殖池面積對鏈球菌發生次數與發光桿菌發生次數皆呈不顯著 ($-0.0001042, p = 0.153$ 、 $-0.0001184, p = 0.254$)；養殖池面積對弧菌發生次數呈正相關 ($0.0007202, p < 0.011$)，D 的存在可能改變養殖池面積對弧菌發生的負向影響，甚至可能導致正向影響 (表 4)。

3.4.6 放養密度與疫病發生次數之結果

根據結果顯示，放養密度對鏈球菌發生次數呈負相關($-0.1870376, p = 0.064$)，放養密度越高，鏈球菌發生的次數可能較低；放養密度對弧菌發生次數與發光桿菌發生次數皆呈不顯著($-0.4153719, p = 0.227$ 、 $0.0467211, p = 0.775$) (表 4)。

3.4.7 放養密度(交互作用項)與疫病發生次數之結果

根據交互作用之結果顯示，放養密度對於三種疾病發生次數皆呈不顯著(鏈球菌發生次數: $0.0300672, p = 0.850$ ；弧菌發生次數: $0.2542596, p = 0.475$ ；發光桿菌發生次數: $0.030612, p = 0.871$) (表 4)。

3.4.8 魚體收成規格與疫病發生次數之結果

根據分析之結果顯示，魚體收成規格對鏈球菌發生次數呈不顯著 ($0.0035592, p = 0.338$)；魚體收成規格對弧菌發生次數呈負相關($-0.0165801, p < 0.014$)，魚體收成規格越大，弧菌發生的次數顯著降低；魚體收成規格對發光桿菌發生次數呈正相關($0.0087466, p = 0.107$)，魚體收成規格越大，發光桿菌發生的次數可能較高 (表 4)。

3.4.9 魚體收成規格(交互作用項)與疫病發生次數之結果

根據交互作用之結果顯示，魚體收成規格對於三種疾病發生次數皆呈不顯著(鏈球菌發生次數: $0.0047406, p = 0.531$ ；弧菌發生次數: $0.0119105, p = 0.184$ ；發光桿菌發生次數: $-0.0111372, p = 0.132$) (表 4)。

3.4.10 換水量與疫病發生次數之結果

根據分析之結果，換水量對鏈球菌發生次數呈不顯著($-0.0267968, p = 0.125$)；換水量對弧菌發生次數與發光桿菌發生次數皆呈正相關 ($0.1555356, p < 0.001$ 、 $0.0904907, p < 0.001$)，代表換水量越大，弧菌發生的次數顯著增加 (表 4)。

3.4.11 換水量(交互作用項)與疫病發生次數之結果

根據交互作用之結果顯示，換水量對鏈球菌發生次數呈正相關(.0629938, $p < 0.014$)，D 的存在可能增強換水量對鏈球菌發生的正向影響；換水量對弧菌發生次數與發光桿菌發生次數皆呈負相關(-.1739143, $p < 0.001$ 、-.1041485, $p < 0.002$)，D 的存在顯著改變換水量對弧菌發生的正向影響 (表 4)。

3.5 低碳養殖管理技術對於能源、成本費用與碳排放量降低上之應用成效

調查結果顯示，應用低碳養殖管理技術後，四指馬鮫養殖每單位面積平均每月可降低抽換水量達 28.96 m³，每公頃養殖面積每月可減少 289,600 m³之換水量，此外，每公頃養殖面積在一個養殖週期（11 個月），預估可減少耗電量達 174,336.32 度，每度電費以新台幣五元計算，相當於每公頃可節省電費支出 871,681.6 元(表 5)。進一步分析碳排放量的降低效益（表 6），而低碳養殖管理技術應用於 13.40 公頃之四指馬鮫養殖池，依據 113 度電力排碳係數 0.474 公斤二氧化碳當量/度電計算，預估共可減少 1,107314.57 公斤之二氧化碳。

四、討論

在傳統養殖模式中，養殖生物經常反覆會受到疾病之感染而造成死亡率提高，從而影響整體之經濟效益，經常使用抗生素進行治療會增加水環境中具有抗藥性之細菌傳播 (Natrah et al., 2025)，為發展環境友善與提升養殖效益，益生菌應用技術為主要發展之項目，養殖過程中透過添加適量益生菌能為養殖物種帶來健康效益 (Hill et al., 2014)，益生菌應用於改善水質方面也發揮著至關重要作用 (Knipe et al., 2021; Nimrat et al., 2020)。本研究所使用之 CPSB 透過 NGS 分析發現以 Chromatiaceae 為主要菌相，藉此達到穩定水質與降低疾病爆發等目的，根據 Cheng 等人 (2024) 結果顯示，針對台灣四指馬鮫與石斑魚養殖之迴歸分析，應用友善養殖管理技術可顯著提高單位面積產量並降低能源消耗在四指馬鮫中其年產量提升 10.1 tons/ha、年產值增加 US\$ 5,031.8/ha 且用電量減少 257.18 (kWh/ha/month)，而石斑魚中其產量提升 18.6 tons/ha、年產值增加 US\$ 7,106.9/ha 用電量減少 1,510.45 (kWh/ha/month)，與本研究中應用於低碳養殖管理技術之降低換水量與減少能源消耗結果相呼應。

4.1 應用低碳養殖管理技術對於四指馬鮫之各項養殖參數影響

根據問卷調查資料統計結果顯示，實驗組（低碳養殖管理技術）與對照組（傳統養殖模式）在多項養殖參數上皆具顯著性差異，實驗組之育成率平均參數達 80.83 % 顯著高於對照組 67.83 %，此結果證實低碳養殖管理技術能降低疾病壓力並提升存活率與其他魚貝類實驗結果相符 (Cavalcante et al., 2024)。低碳養殖管理技術透過穩定水質、降低換水率來維持環境穩定性，進而減少病原菌增殖與感染次數 (Hoseinifar et al., 2018)，在收成規格方面，實驗組魚體之平均重量達 327.50 g 顯著高於對照組 300.83 g，顯示添加益生菌可優化魚體成長與飼料轉換率 (Yadav et al., 2025; Adineh et al., 2019)，疾病發生率降低表示魚體可將更多能量投入生長並維持正常之攝食率，底質中 Chromatiaceae 優勢族群之建立可透過硫化氫氧化與脫硝反應維持底質環境並穩定微生物結構 (Zhu et al., 2019)，在整體產能方面，實驗組單位面積生產量平均可達 3.18 kg/m²，顯著高於對照組之 2.43 kg/m²，顯示低碳養殖管理技術可有效減少養殖週期，養殖週期由 10.87 月縮短至 8.80 月，在資源使用效率方面，實驗組換水量僅需 8.64 (m³/month/m²)，遠低於對照組換水量之 42.97 (m³/month/m²)，符合永續養殖之發展方向 (Zhang et al., 2023)。

4.2 不同養殖管理模式對於四指馬鮫疫病發生次數之影響

統計結果顯示，採用低碳養殖管理技術之養殖池其鏈球菌、弧菌與發光桿菌之發生次數皆顯著低於傳統養殖技術 ($p < 0.05$)，由於於低碳養殖管理技術強調改善水質與底質策略，其中持續添加之 CPSB 能有效調控底質菌相結構與提升 Chromatiaceae 菌群，與 Cui 等人 (2020) 在養殖水體中添加 *Marichromatium gracile* YL28 增加益生菌之相對豐度進而改善水質結果相同，並藉由透過環境改善進而抑制潛在病原菌擴散 (Chumpol et al., 2017)，低碳養殖管理技術採低換水理念，相較於傳統養殖模式，可有效減少病原菌自外部水源導入之風險並維持養殖系統之微生態

平衡 (Boyd & Clay, 2002; Subasinghe et al., 2023)，鏈球菌之疾病發生在環境高水溫下更顯著，而弧菌與發光桿菌則偏好發於環境低水溫(Kayansamruaj et al., 2014)，低碳養殖管理技術透過穩定水質並降低魚體緊迫，同時減少三種病原菌之繁殖與傳播優勢。

4.3 低碳養殖管理技術應用於疾病控管之多變量排序性 Probit 模型之分析

根據多變量排序性 Probit 模型之結果顯示，CPSB 之使用可透過改善養殖環境之水質條件，間接影響鏈球菌與發光桿菌等病原菌增殖，其中對於鏈球菌之影響最為明顯，CPSB 添加至養殖池後，能有效促進水質與底質環境之優化，降低病原菌取得必要之生存條件或適當之生長環境，進而減少其在養殖池中之相對豐度與感染機會並降低疾病發生次數。而在一般認知中養殖週期延長與養殖密度提高將增加病原菌於養殖池中之累積與魚體感染機率，從而提高疾病發生風險 (Uma, 2025)，本研究透過多變量排序性 Probit 模型之分析結果顯示，養殖週期、養殖面積與養殖密度皆與弧菌發生率呈顯著負相關，即上述變項增加時弧菌發生次數反而降低，研究結果顯示當養殖戶採較長之養殖週期、擴大養殖池面積或提高放養密度等高風險策略時，會同時加強疾病防治與水質管理措施，進而有效控制弧菌之增殖與感染，如選擇延長週期養殖業者常具備更成熟之操作經驗，為應長時間養殖可能帶來之潛在疾病風險，業者也更傾向於使用水質消毒劑或底質改良劑等預防性資材，降低弧菌大量增殖之可能性，至於放養密度與弧菌發生率之負相關雖與傳統觀點相反，但實務上高密度養殖者更為重視風險控管，因此更積極實施換水管理、投餵調控及疾病監測並結合低碳養殖管理技術，進而有效降低弧菌發生之機率，養殖過程中提高養殖密度、延長養殖週期與擴大養殖面積等條件可能增加疾病風險，但實務操作中這些養殖策略多伴隨更謹慎之管理與預防措施，使得疾病發生次數反而降低，突顯出操作管理策略與疾病預防之重要相關性。結果顯示換水量與弧菌及發光桿菌感染次數之間呈顯著正相關，即換水量越高時，這兩種細菌性疾病發生次數越高，此結果與傳統養殖認為換水有助於稀釋水體中病原菌濃度與穩定水質之觀點不同，結果顯示在特定區域環境條件下換水過程反而成為疾病傳播之潛在因素，如台灣屏東地區為鏈球菌、弧菌及發光桿菌流行疫區，水源中即帶有病原菌，因此頻繁換水實質上會持續將病原菌引入養殖池 (Li et al., 2021)，大量換水可能使養殖池之溫度、鹽度與 pH 等水質參數產生急遽變化，對魚體造成緊迫壓力上升，進而提升疾病感染風險 (Zhang et al., 2025)，換水量與疾病發生次數呈現正相關之結果表示，水源存在病原菌之區域單純依賴換水作為環境管理方式並不足以達到預防效果，反而須特別強化水源本身之品質監測與控管以有效降低疾病感染風險。

4.4 共同因素與低碳養殖管理技術應用之交互效果

本研究結果顯示，隨著養殖週期延長無使用 CPSB 之養殖池弧菌發生可能性(-.6329787) 呈顯著負相關，養殖週期越長對於有使用 CPSB 養殖池之弧菌發生可能性(-.6329787+.5751534) 雖然也呈現負相關，但有使用 CPSB 之弧菌發生可能性高於無使用 CPSB 之養殖池，另一方面，養殖週期延長對無使用 CPSB 之養殖池發光桿菌發生可能性呈正相關 (0.3827166)，對於有使用 CPSB 養殖池發光桿菌發生之可能性 (.3827166- .4008678) 則是呈負相關，而其交互效果 (-.4008678) 並無顯著差異，此現象與當地養殖管理策略相關，無使用 CPSB 之對照組在養殖過程中會透過飼料添加抗生素來進行投餵作為疾病治療方式，因此與對照組相比有使用 CPSB 之實驗組弧菌發生率反而較高，而抗生素之使用也可能對養殖環境之微生物群落產生不利影響並導致病原菌抗藥性問題之衍伸 (Milijasevic et al., 2024)。當養殖池面積增加時無使用 CPSB 之弧菌發生率呈顯著下降 (-0.0006765)，而有使用 CPSB 其交互作用項呈正相關 (+0.0007202)，即有使用 CPSB 之養殖面積越大，弧菌發生次數反而上升，此現象顯示 CPSB 應用於大面積養殖環境時，可能存在複雜且不利之交互作用，CPSB 作用機制為調節養殖池水質與底質環境，然而其實際應用可能受到不同養殖模式與環境條件所影響導致結果差異 (Ren et al., 2025)，於大面積養殖池中水流分布不均勻容

易形成低流速區域，使病原菌於局部區域聚集進而增加感染風險，而 CPSB 於水體環境中之擴散作用可能受限 (Islam et al., 2024)，在大面積養殖池中樣本採集之空間代表性較難掌握，若弧菌呈現空間異質性分布，進而影響 CPSB 實際作用效益。本研究結果顯示，放養密度對鏈球菌發生次數呈負相關 (-0.1077203) 但不顯著，CPSB 與放養密度之交互作用後在無使用 CPSB 之對照組放養密度越高與鏈球菌發生率略呈負相關 (-0.1870376+0.0300672) 但不顯著，顯示 CPSB 應用並未顯著改變放養密度對於鏈球菌發生率之影響趨勢，CPSB 之作用原理與放養密度可能相對獨立兩者之間並無交互作用，本研究建立之交互項雖納入統計模型，但其效果量較低難以對鏈球菌感染風險產生顯著影響，樣本數亦可能影響統計數據之靈敏度，針對放養密度與使用 CPSB 間可能存在之互補效應，後續研究可考慮增加樣本數、延長觀察期間或進一步進行分層分析以提升模型檢出效能。當考慮 CPSB 之共同因素與其交互作用時，養殖過程中換水量增加對於無使用 CPSB 養殖池之弧菌與發光桿菌發生可能性呈現正相關 (.0904907)，但對於使用 CPSB 養殖池之弧菌與發光桿菌發生可能性 (.0904907-.1041485) 則呈現負相關，結果顯示有使用 CPSB 之養殖池換水量增加能降低弧菌與發光桿菌之發生率可能性，但鏈球菌發生率之可能性 (-0.0267968+.0629938) 呈現正相關，此現象與台灣屏東當地養殖管理方式有關，由於在季節性高水溫時，養殖業者會透過提高換水量來維持養殖池之水溫，但其中水源本身就會攜帶病原菌 (Li et al., 2021)，導致在季節性高水溫時期會因增加換水量而提升鏈球菌發生之可能性。

4.5 應用低碳養殖管理技術對於能源消耗與成本支出之效益影響

本研究進一步評估低碳養殖管理技術對於能源消耗與成本支出方面之潛在效益，結果顯示實驗組養殖池應用低碳養殖管理技術於單位面積（每平方公尺）1 個月平均可降低抽換水量達 28.96 m³/month/m²，若換算至每公頃規模則相當於 1 個月可減少抽水量 289,600 m³/month/ha，對於長期養殖管理其差異具實質意義，依據抽水馬達之基本規格（3HP、2,200W、出水量 0.67 m³/min），進一步推估顯示於 11 個月之完整養殖週期內，每公頃養殖池因抽水需求降低時，可減少用電量達 174,336.32 度電（kWh/ha/11month），若以每度電費新台幣 5 元計算等同於每公頃節省電費支出達新台幣 871,681.6 元，與 Cheng 等人（2024）減少能源消耗結果相同，顯示低碳養殖管理技術在能源與經濟效益上亦展現出顯著之經濟效益。

4.6 應用低碳養殖管理技術所對於碳排放量之影響

本研究結果顯示，四指馬鮫養殖應用低碳養殖管理技術後，於總計 13.40 公頃之養殖面積之完整養殖週期（11 個月）每公頃可減少用電量達 174,336.32 kWh，依據 113 年度台灣電力排碳係數（0.474 kgCO₂e/kWh）計算，推估整體減少碳排放量可達 1,107314.57 kgCO₂e，此結果顯示低碳養殖管理技術不僅在提升經濟效益與生產效率上具實質價值，其碳排放減量與環境效益之相當顯著，透過降低換水量及提升能源利用效率該技術可減少對碳排放之過程，進而為台灣水產養殖產業之碳足跡管理與溫室氣體減排目標作出重要貢獻，隨著全球碳中和與淨零排放目標推進，低碳養殖管理技術為未來水產養殖產業之轉型與減碳行動具體方法。

4.7 總結

本研究結果顯示四指馬鮫主要感染之病原菌，鏈球菌、弧菌與發光桿菌之發生並非彼此獨立，而是受到是否應用低碳養殖管理技術、養殖週期、養殖密度與換水量等多項共同因素影響，三種疾病發生次數之間亦存在連動效應，應用低碳養殖管理技術(CPSB 之應用)與傳統養殖管理技術之間在部分影響因素上之效應亦存在顯著差異，顯示 CPSB 主要透過優化養殖環境與改善菌相組成間接降低病原菌增殖與疾病風險，在養殖成效方面低碳養殖管理技術顯著提升生產效率並於能源使用與碳排放減量上展現出實質效益，對於四指馬鮫產業之永續發展與環境改善具有重要意義，低碳養殖管理技術不僅是有效疾病防控策略，亦為節能減碳之永續管理方案並符合聯合國永續發展目標

(SDGs) 展現出其產業實務與政策推動上之應用潛力。

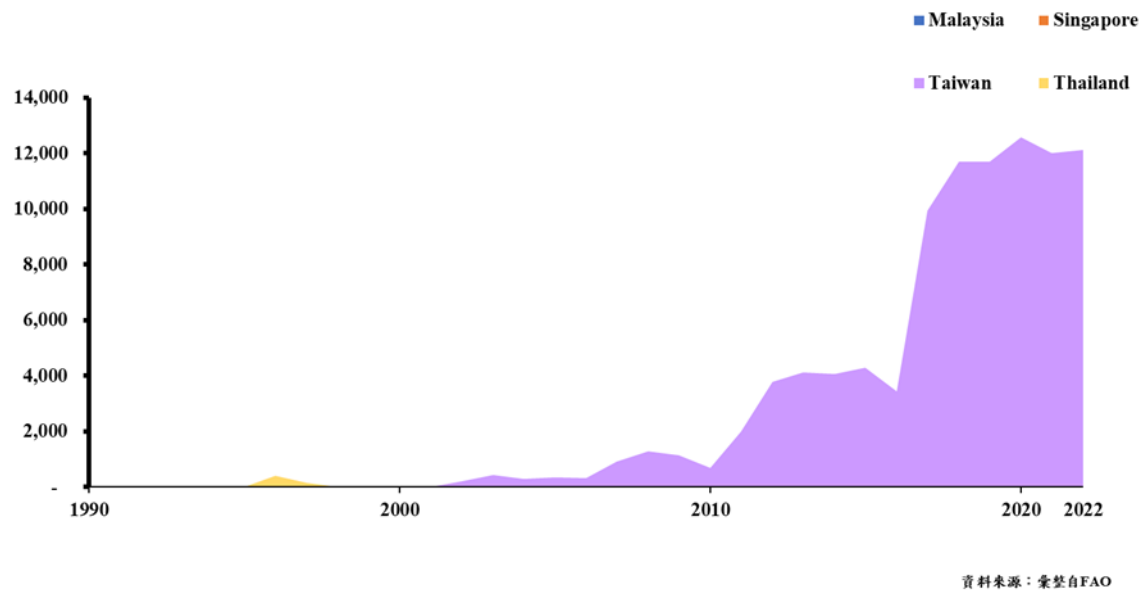


圖 1、近年全球四指馬鮫產量變化

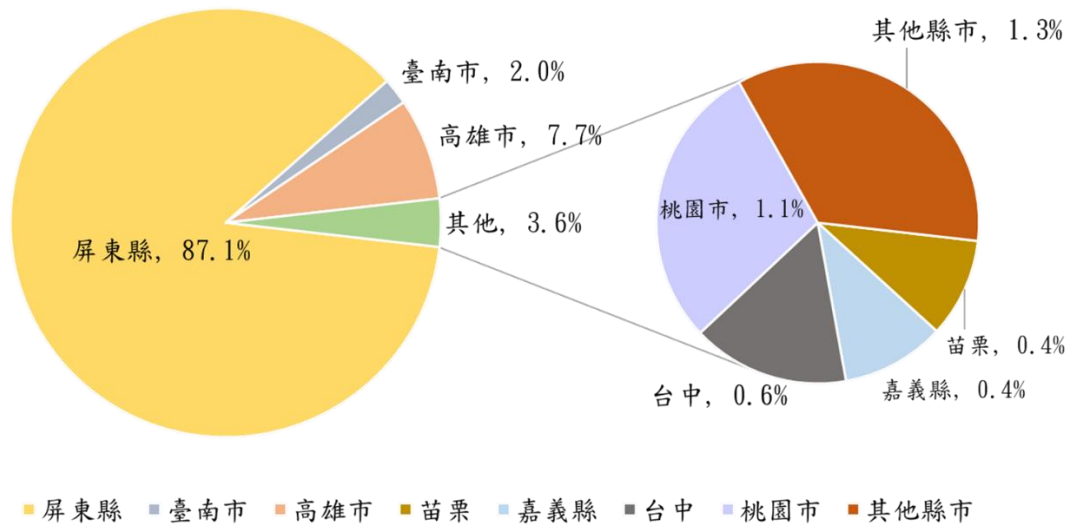
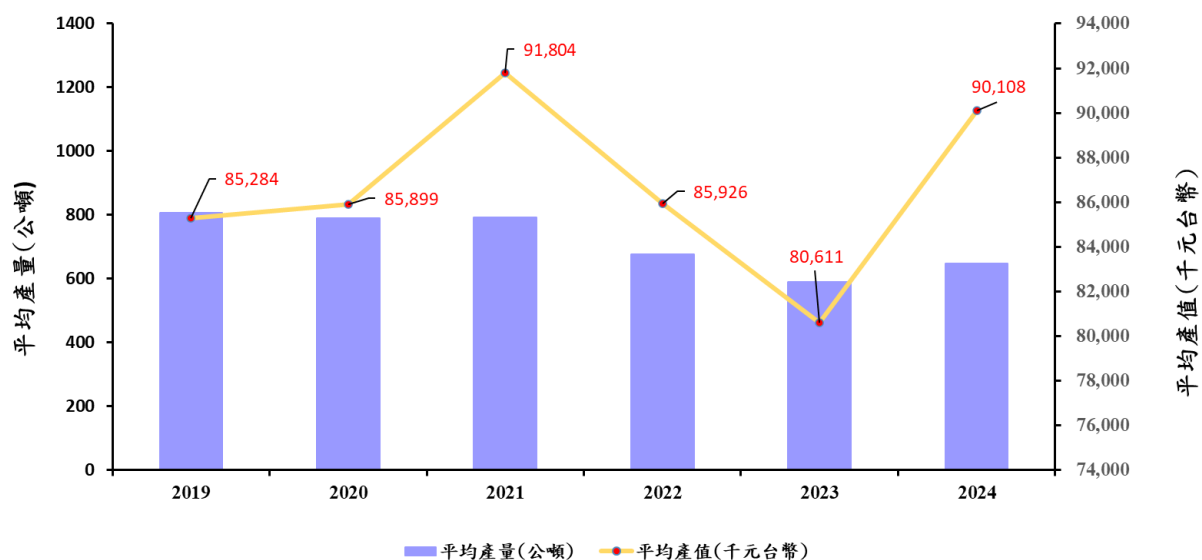
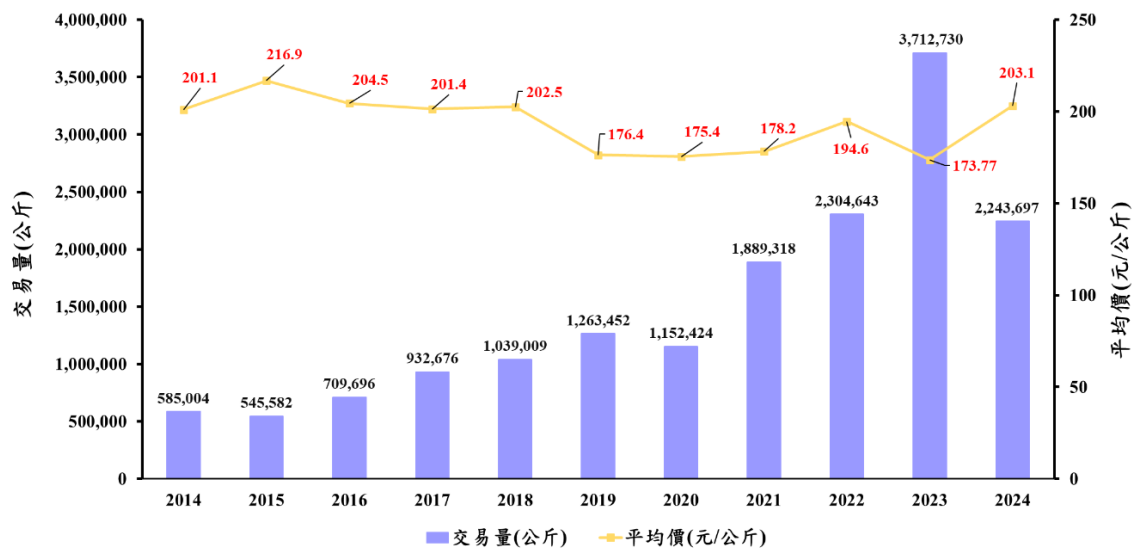


圖 2、113 年四指馬鮫主要產區產能



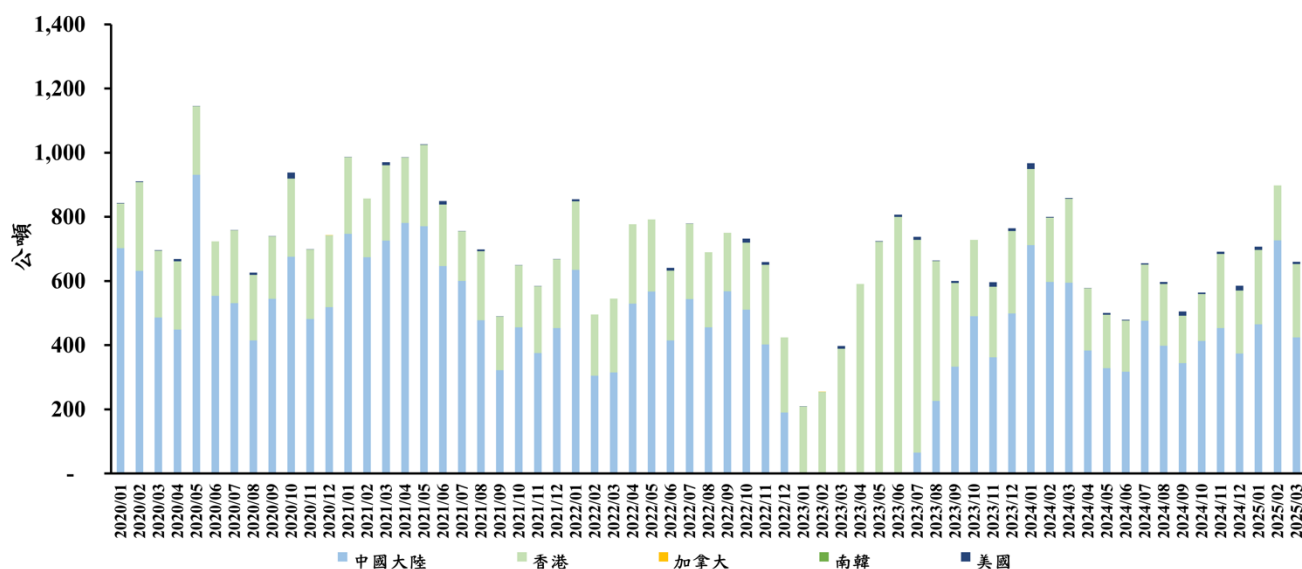
資料來源：彙整自中華民國財政部關務署海關進出口統計資料

圖 3、近年台灣四指馬鮫外銷平均產量與平均產值變化圖



資料來源：彙整自漁產品全球資訊網

圖 4、國內近年四指馬鮫交易量與平均交易價格



資料來源：彙整自中華民國財政部關務署海關進出口統計資料

圖 5、近年台灣四指馬鮫外銷量變化圖

表 1、應用低碳養殖管理技術後四指馬鮫之各項數值統計結果

調查物種：四指馬鮫	對照組	實驗組
	(n=30)	(n=30)
養殖面積(m ²)	4,587.71±4,811.38 ^a	4,468.08±2,018.50 ^a
放養量(尾)	53,866.67±59,166.47 ^a	55,400.00±30,410.52 ^a
放養密度(尾/m ²)	11.91±2.07 ^a	11.90±2.76 ^a
養殖週期(月)	10.87±1.31 ^a	8.80±1.16 ^b
育成率(%)	67.83±4.86 ^a	80.83±3.73 ^b
收成規格(g)	300.83±36.25 ^a	327.50±36.76 ^b
單位面積生產量 (公斤/m ²)	2.43±0.53 ^a	3.18±0.94 ^b
單位面積抽換水量 (m ³ /month/m ²)	42.97±8.23 ^a	8.64±9.95 ^b

平均值±標準差(n=30)，同一列的資料，如標著不同的字母，代表不同組間存在顯著差異($p < 0.05$)

表 2、不同養殖管理模式養殖四指馬鮫之疫病發生次數統計結果

物種: 四指馬鮫	鏈球菌	弧菌	發光桿菌
傳統養殖管理技術 n=30	7.23±0.97 ^a	1.37±1.13 ^a	2.90±0.96 ^a
低碳養殖管理技術 n=30	5.33±1.03 ^b	0.63±0.56 ^b	1.27±0.74 ^b

平均值±標準差(n=30)，同一欄的資料，如標著不同的字母，代表不同組間存在顯著差異($p < 0.05$)

表 3、多變量排序性 Probit 模型結果

	鏈球菌發生次數	弧菌發生次數	發光桿菌發生次數
是否應用低碳養殖管理 技術	-1.78706** (0.011)	.0263422 (0.972)	-1.06872* (0.086)
養殖週期(月)	.0115601 (0.933)	-.2855753** (0.045)	.2054022 (0.123)
輔導池面積(m ²)	-7.12e-06 (0.586)	-.0001471* (0.067)	-.0000192 (0.531)
放養密度(尾/m ²)	-.1077203 (0.216)	-.239049** (0.018)	.0188506 (0.839)
魚體收成規格(g)	.0035743 (0.309)	-.0050903 (0.227)	.0042491 (0.280)
換水量(m ³ /month/m ²)	.0067208 (0.602)	.0413084** (0.013)	.0275275* (0.072)

**表示($p < 0.05$)；*表示($0.05 \leq p < 0.10$)

表 4、共同因素與低碳養殖管理技術應用之交互效果

	鏈球菌發生次數	弧菌發生次數	發光桿菌發生次數
是否應用低碳養殖管理技術	-10.16228*** (0.006)	-7.698309 (0.321)	10.6808** (0.020)
養殖週期(月)	-.1747936 (0.255)	-.6329787** (0.026)	.3827166** (0.016)
D*養殖週期(月)	.437239 (0.114)	.5751534* (0.091)	-.4008678 (0.156)
輔導池面積(m ²)	6.81e-06 (0.671)	-.0006765** (0.013)	-2.19e-06 (0.909)
D*輔導池面積(m ²)	-.0001042 (0.153)	.0007202** (0.011)	-.0001184 (0.254)
放養密度(尾/m ²)	-.1870376* (0.064)	-.4153719 (0.227)	.0467211 (0.775)
D*放養密度(尾/m ²)	.0300672 (0.850)	.2542596 (0.475)	.030612 (0.871)
魚體收成規格(g)	.0035592 (0.338)	-.0165801** (0.014)	.0087466 (0.107)
D*魚體收成規格(g)	.0047406 (0.531)	.0119105 (0.184)	-.0111372 (0.132)
換水量(m ³ /month/m ²)	-.0267968 (0.125)	.1555356*** (0.000)	.0904907*** (0.001)
D*換水量(m ³ /month/m ²)	.0629938** (0.014)	-.1739143*** (0.000)	-.1041485*** (0.002)

*** (p < 0.001) ; ** (p < 0.01) ; * (p < 0.05) ; D=1 表示有使用益生菌 ; D=0 表示無使用益生菌

表 5、應用低碳養殖管理技術估計節省之能源與費用

調查	單位面積平均 降低之抽換水量 (m ³ /month/m ²)	每公頃減少每月換 水量(m ³ /month/ha)	每養殖週期每 公頃減少 耗電量 (kWh/ha /11 month)	每養殖週期每公頃減少 電費支出 (NT\$/ha/11 month) (每度電費：5 NT\$)
物種				
四指馬鮫	28.96	289,600	174,336.32	871,681.6

*抽水馬達基本資訊：3HP、2,200W、口徑：3inch、標準出水量：0.67cmm(m³/min)

表 6、應用低碳養殖管理技術所降低之碳排放量

調查	應用低碳養殖 技術之放養面積	每養殖週期每公頃 減少耗電量	113 年度 電力排碳係數	預估減少之排碳量
物種	(公頃)	(kWh/ha/11 month)	(kgCO ₂ e /度電)	(kgCO ₂ e)
四指馬鮫	13.40	174,336.32	0.474	1,107314.57

*113 年度電力排碳係數: 0.474 公斤 CO₂e /度

參考文獻

1. 呂鐸昕(2017)，以耳石分析台灣西部沿岸多鱗四指馬鮫幼魚之日周齡成長。國立臺灣海洋大學碩士論文。
2. Adineh, H., Naderi, M., Hamidi, M. K., & Harsij, M. (2019). Biofloc technology improves growth, innate immune responses, oxidative status, and resistance to acute stress in common carp (*Cyprinus carpio*) under high stocking density. *Fish & Shellfish Immunology*, 95, 440-448.
3. Andreoni, F., & Magnani, M. (2014). Photobacteriosis: prevention and diagnosis. *Journal of Immunology Research*, 2014(1), 793817.
4. Boyd, C. E., & Clay, J. W. (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. Work in progress for public discussion. Published by the Consortium, 17.*
5. Cavalcante, T., Guimarães, A. M., da Costa, F. A., & Martins, M. L. (2024). Promising probiotic candidates for sustainable aquaculture. *Animals*, 14(24), 3644.
6. Cheng, A. C., Yang, T. Y., Lai, C. H., Li, Y. S., Luo, Y. F., & Chuang, H. C. (2024). Economic benefit analysis of the application of eco-friendly aquaculture technology in the farming of groupers and the fourfinger threadfin. *Journal of Environmental Management*, 371, 123156.
7. Chou, C. C., Lin, M. C., Su, F. J., & Chen, M. M. (2019). Mutation in *cyl* operon alters hemolytic phenotypes of *Streptococcus agalactiae*. *Infection, Genetics and Evolution*, 67, 234-243.
8. Chumpol, S., Kantachote, D., Nitoda, T., & Kanzaki, H. (2017). The roles of probiotic purple nonsulfur bacteria to control water quality and prevent acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) for enhancement growth with higher survival in white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during cultivation. *Aquaculture*, 473, 327-336.
9. Cui, L., Zhu, B., Zhang, X., Chan, Z., Zhao, C., Zeng, R., Yang, S., & Chen, S. (2020). Effects of supplement of *Marichromatium gracile* YL28 on water quality and microbial structures in shrimp mariculture ecosystems. *Genes*, 12(1), 40.
10. Das, B., Manna, S. K., Sarkar, P., & Batabyal, K. (2009). Occurrence of *Vibrio parahaemolyticus* in different finfish and shellfish species. *Journal of Food Safety*, 29(1), 118-125.
11. Egger, F., Hülsen, T., Tait, S., & Batstone, D. J. (2020). Autotrophic sulfide removal by mixed culture purple phototrophic bacteria. *Water Research*, 182, 115896.
12. Frigaard, N.-U., & Dahl, C. (2008). Sulfur metabolism in phototrophic sulfur bacteria. *Advances in Microbial Physiology*, 54, 103-200.

13. Guo, T., Wang, Y., Li, J., Guo, X., Xu, S., Han, H., Yu, J., Li, J., & Liu, Q. (2024). Accumulated CO₂ affects growth, acid-base regulation, and ion balance of turbot (*Scophthalmus maximus*) in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 578, 740070.
14. Hassan, M. A., Fathallah, M. A., Elzoghby, M. A., Salem, M. G., & Helmy, M. S. (2022). Influence of probiotics on water quality in intensified *Litopenaeus vannamei* ponds under minimum-water exchange. *AMB Express*, 12(1), 22.
15. Hill, C., Guarner, F., Reid, G., Gibson, G. R., Merenstein, D. J., Pot, B., Morelli, L., Berni Canani, R., Flint, H. J., Salminen, S., Calder, P. C., & Sanders, M. E. (2014). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on the scope and appropriate use of the term probiotic. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 11
16. Hoseinifar, S. H., Sun, Y.-Z., Wang, A., & Zhou, Z. (2018). Probiotics as means of disease control in aquaculture: A review of current knowledge and future perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2429.
17. Iguchi, K. I., Ogawa, K., Nagae, M., & Ito, F. (2003). The influence of rearing density on stress response and disease susceptibility of ayu (*Plecoglossus altivelis*). *Aquaculture*, 220(1-4), 515-523.
18. Imhoff, J. F. (2014a). The family Chlorobiaceae. In *The Prokaryotes* (pp. 501-514). Springer, Berlin, Heidelberg.
19. Imhoff, J. F. (2014b). The family Chromatiaceae. In *The Prokaryotes* (pp. 151-178). Springer, Berlin, Heidelberg.
20. Islam, S. I., Ahammad, F., & Mohammed, H. (2024). Cutting-edge technologies for detecting and controlling fish diseases: Current status, outlook, and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 55(2), e13051.
21. Kang, G., & Roh, H. (2025). Vulnerability and epidemic spread on the Tongyeong coast: A spatiotemporal hybrid model comparison of disease transmission scenarios in aquaculture. *Aquaculture*, 742164.
22. Kayansamruaj, P., Pirarat, N., Hirono, I., & Rodkhum, C. (2014). Increasing of temperature induces pathogenicity of *Streptococcus agalactiae* and the up-regulation of inflammatory related genes in infected Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Veterinary Microbiology*, 172(1-2), 265-271.
23. Knipe, H., Temperton, B., Lange, A., Bass, D., & Tyler, C. R. (2021). Probiotics and competitive exclusion of pathogens in shrimp aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 324-352.
24. Kushkevych, I., Procházka, J., Gajdács, M., Rittmann, S. K. M., & Vítězová, M. (2021). Molecular physiology of anaerobic phototrophic purple and green sulfur bacteria. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(12), 6398.
25. Li, J., Fang, L., Liang, X. F., Guo, W., Lv, L., & Li, L. (2021). Influence of environmental factors and bacterial community diversity in pond water on health of Chinese perch through gut microbiota change. *Aquaculture Reports*, 20, 100629.
26. Li, X., Wang, T., Fu, B., & Mu, X. (2022). Improvement of aquaculture water quality by mixed *Bacillus* and its effects on microbial community structure. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(46), 69731-69742.
27. Merrifield, D. L., Dimitroglou, A., Foey, A., Davies, S. J., Baker, R. T. M., Bøgwald, J., Castex, M., & Ringø, E. (2010). The current status and future focus of probiotic and prebiotic applications for salmonids. *Aquaculture*, 302(1-2), 1-18.
28. Milijasevic, M., Veskovc-Moracanin, S., Milijasevic, J. B., Petrovic, J., & Nastasijevic, I. (2024). Antimicrobial resistance in aquaculture: Risk mitigation within the One Health context. *Foods*, 13(15), 2448.

29. Natrah, I., Muthukrishnan, S., Mohd-Padil, H., Mohamad, N., Alipiah, N. M., Shariff, M., Mohamed Yusoff, F., Md. Yasin, I. S., Devadas, S., Wan-Haiqal Wan Omar, W. H., Wan Nurfazira Wan Ibrahim, W. N., & Defoirdt, T. (2025). Antimicrobial resistance in Malaysian shrimp aquaculture and strategies to reduce its occurrence. *Reviews in Aquaculture*, 17(3), e70020.
30. Nimrat, S., Khaopong, W., Sangsong, J., Boonthai, T., & Vuthiphandchai, V. (2020). Improvement of growth performance, water quality and disease resistance against *Vibrio harveyi* of postlarval whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by administration of mixed microencapsulated *Bacillus* probiotics. *Aquaculture Nutrition*, 26(5), 1407-1418.
31. Ren, H., Xu, Y., Jing, L., Su, H., Hu, X., Cao, Y., & Wen, G. (2025). The effects of two different aquaculture methods on water quality, microbial communities, production performance, and health status of *Penaeus monodon*. *Fishes*, 10(3), 106.
32. Struk, M., Sepúlveda-Muñoz, C. A., Kushkevych, I., & Muñoz, R. (2023). Photoautotrophic removal of hydrogen sulfide from biogas using purple and green sulfur bacteria. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 130337.
33. Subasinghe, R., Alday-Sanz, V., Bondad-Reantaso, M. G., Jie, H., Shinn, A. P., & Sorgeloos, P. (2023). Biosecurity: Reducing the burden of disease. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(2), 397-426.
34. Uma, A. (2025). Pathogen and disease transmission in aquatic animals. In *Management of Fish Diseases* (pp. 19-55). Singapore: Springer Nature Singapore.
35. Wu, Z., Zhang, Q., Wang, X., & Li, A. (2025). Alterations and resilience of intestinal microbiota to increased water temperature are accompanied by the recovery of immune function in Nile tilapia. *Scientific Reports*, 15(1), 5094.
36. Yadav, N.K., Paul, S., Patel, A.B., Mahanand, S.S., Biswas, P., Choudhury, T.G., Baidya, S., Meena, D.K. (2025). The role of biofloc technology in sustainable aquaculture: Nutritional insights and system efficiency. *Blue Biotechnology*, 2, 7.
37. Zhang, K., Pan, L., Chen, W., & Wang, C. (2023). Optimized utilization of organic carbon in aquaculture biofloc systems: A review. *Fishes*, 8(9), 465.
38. Zhang, K., Ye, Z., Qi, M., Cai, W., Saraiva, J. L., Wen, Y., Liu, G., Zhu, Z., Zhu, S., & Zhao, J. (2025). Water quality impact on fish behavior: A review from an aquaculture perspective. *Reviews in Aquaculture*, 17(1), e12985.
39. Zhu, B., Chen, S., Zhao, C., Zhong, W., Zeng, R., & Yang, S. (2019). Effects of *Marichromatium gracile* YL28 on the nitrogen management in the aquaculture pond water. *Bioresource Technology*, 292, 121917.