

水產養殖溫室氣體排放之研究進展

劉于溶^{1、2}、謝淑秋¹、許晉榮¹、盧福翊²

¹ 水產試驗所海水養殖研究中心、² 國立成功大學生物科技與產業科學系

前言

溫室氣體排放所帶來的氣候遷對環境造成許多負面效應。因意識到減少溫室氣體排放的重要性，或者期待未來成為碳交易之籌碼與商機，愈來愈多研究積極投入碳捕捉與封存的產業應用技術開發。然而，水產養殖的碳收支評估方法仍在起步階段，尚待釐清影響水產養殖的碳排量的關鍵，據以研擬緩解策略。

全球溫室氣體排放趨勢與氣候變遷對養殖漁業的影響

全球暖化來自大氣中溫室氣體濃度的增加，這些氣體具有捕捉輻射熱能的能力，使地球的大氣保持相對高溫的現象。來自人為因素的溫室氣體對全球暖化的影響超過 90%，主要種類為二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 和氧化亞氮 (N₂O)。不同溫室氣體對全球暖化的影響程度有所差異，各溫室氣體相對於二氧化碳的影響程度經量化為全球暖化潛勢 (global warming potential)，其中氧化亞氮的全球暖化潛勢為二氧化碳的 298 倍，甲烷的全球暖化潛勢為二氧化碳的 25 倍，因此除了二氧化碳，其它溫室氣體排放亦值得重視。

聯合國政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 於 2021 年提出第 6 次氣候變遷評估報告 (Sixth Assessment Report, AR6)，自工業革命後人類活動排放的溫室氣體已使全球升溫 1°C，若以目前升溫的速度推估，在 2030—2052 年全球可能會升溫超過 1.5°C。全球升溫使海平面上升，除了淹沒部分沿岸地區減少水產養殖生產面積，也增加發生強降雨、乾旱的極端氣候強度與頻率，造成養殖漁業的天然災害損失。此外，氣候變遷已影響海洋洋流與營養鹽的推送，影響海洋浮游生物生產，導致海洋生態系統受到干擾，並使海洋資源量與分布發生變化，波及捕撈漁業，亦會衝擊水產養殖產業所依賴的魚粉原料來源。

水產養殖產業成長與溫室氣體排放

水產品是人類的重要的蛋白質來源，由於海洋漁業受到氣候變遷及過漁的影響，使得漁業整體捕獲量不斷下降，水產養殖產量現階段已超越海洋漁業。預估全球水產養殖產量到 2030 將增加 1.06 億噸，較 2020 年增長 22% (FAO, 2022)。水產養殖的重要性隨著世界人口攀升與日俱增，然而，水產養殖產

業擴增也帶來棲地破壞、水污染、耗費水土資源、疾病控制與溫室氣體排放等問題 (Zhang et al., 2022)。

由 FAO 統計資料與相關研究數據綜合分析，全球水產養殖排放量在 2017 年時，在魚類、貝類與甲殼類部分約達到全球人為氣體排放的 0.49% (MacLeod et al., 2018)。預估養殖產業的碳排約 39—57% 來自飼料，而非飼料的部分則包含能源使用等。其中飼料的碳排放比例較高，主要來自飼料原料與飼料加工累積能源消耗產生 (Bohnes et al., 2018)。此外，養殖生物的生產過程產生的二氧化碳，主要排放自水中生物的呼吸作用以及異營菌分解有機物，其分解效率與氣溫、水溫、酸鹼度、藻類對二氧化碳的利用率等因子相關。而甲烷主要出現在池底等缺氧區域，由甲烷菌分解溶解有機碳產生，其排放量主要受溫度與溶氧影響。氧化亞氮則是由細菌的硝化 (nitrification) 與脫氮作用 (denitrification) 產生，其排放量主要受水中環境酸鹼值所變動 (Raul et al., 2020)。

全球水產養殖溫室氣體排放研究趨勢

研究全球水產養殖溫室氣體的排放，並找出減少溫室氣體排放的措施，對於減緩全球氣候變化具有重要意義。此研究領域自 1992—2008 年尚處於萌芽階段，而自 2009 年起水產養殖溫室氣體研究進入指數型的快速增長期 (圖 1)，目前投入最多的國家為中國，其次為美國、英國與澳洲 (表 1)。研究方向也從淡水養殖逐漸轉變以海水養殖為

多，同時也有研究嘗試探討如何恢復沿岸生態以增加碳匯的措施 (Chen et al., 2023)。

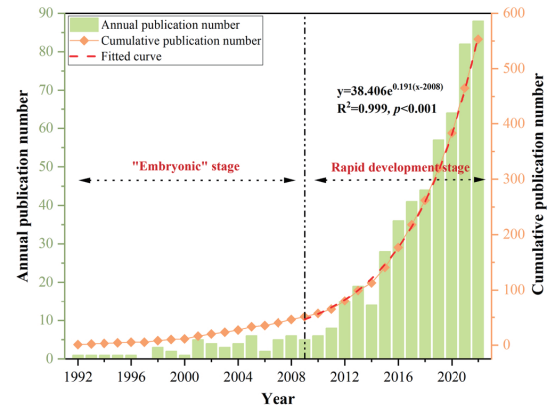


圖 1 水產養殖溫室氣體排放的研究發表趨勢 (1993-2022 年) (摘錄自 Chen et al., 2023)

表 1 水產養殖溫室氣體研究發表前 10 名的國家 (摘錄自 Chen et al., 2023)

Countries	Publications	Degree	Betweenness centrality
China	204	32	0.25
the United States	107	39	0.36
the United Kingdom	56	34	0.25
Australia	53	29	0.16
India	36	15	0.06
Canada	28	27	0.12
the Netherland	25	22	0.12
Brazil	24	12	0.01
Spain	23	25	0.12
Sweden	22	16	0.01

水產養殖產生的溫室氣體，受到生物、水質環境與管理操作等眾多因素交互影響。由彙總分析中國 132 個陸上魚塢的報告數據，分析的魚塢數據篩選條件為具有整個養殖週期的報告來源、具有監測二氧化碳或甲烷的實測數據，養殖種類包含魚、蝦、蟹與混養，數據顯示樣本的平均通量變化為 $-382.45 - 551.88 \text{ g CO}_2\text{-C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 和 $-0.03 - 565.09 \text{ g CH}_4\text{-C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，其數據變動範圍廣可能與研究評估方法與養殖操作差異有關。整體趨勢為混養較單養有較低的碳排量，沿海養殖池碳排略低於內陸養殖池，水深者也

較水淺池有較低的碳排，另外水中溶氧與葉綠素甲濃度為浮游藻的指標參數，其與碳排量呈現反比關係。養殖密度可能涉及生物量、養殖管理差異或其它因素而影響碳排 (Zhang et al., 2022) (圖 2)。然而，養殖池中的浮游藻類對養殖池二氧化碳的影響，受到藻類種類數量與晝夜變化的代謝作用，評估數據應注意研究採樣時間與方法。

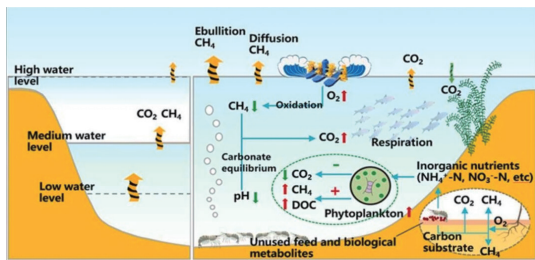


圖 2 影響養殖池溫室氣體排放的因子 (摘錄自 Zhang et al., 2022)

中國是全世界最大的養殖漁業生產國，經由近 10 年 (2011–2020 年) 主要養殖物種的統計資料，進行評估中國水產養殖生產的碳足跡。結果顯示飼料原料生產佔養殖產業溫室氣體的排放比例最高 (52%)。在物種的比較部分，整體溫室氣體排放係數以養殖蝦類最高，因使用飼料與大量能源進行曝氣與抽水，而排放係數次高者為魚類，貝類則最低，因貝類養殖可不投餵飼料且養殖所需能源較低 (MacLeod et al., 2020; Xu et al., 2022)。

藻類與貝類養殖的碳匯潛力

海藻能利用二氧化碳行光合作用，因而被許多學者認為具有碳匯的潛力 (Zhang et al., 2017; Gao et al., 2022; Li et al., 2022)。然而，由於追蹤與測量海藻的碳通量較為不

易，驗證海藻的碳匯能力尚無標準的國際方法化，尚待更多研究投入。而藻類的生產與加工亦是需要考量的，目前有研究嘗試將養殖藻類加工為低碳足跡的食品或飼料原料。此外，對於部分研究建議將養殖海藻類沉入深海，以形成沉積封存碳的作法，則有學者呼籲應先審慎進行相關生態影響評估 (Ross, et al., 2023)。

貝類有能力利用水體中移除有機碳與無機碳，從而改變養殖水體的碳化學特性 (Morris and Humphreys, 2019)。貝殼成分中有 90–99% 為碳酸鈣 (Alonso et al., 2021)。目前貝類養殖歸屬於碳源或是碳匯，尚有不同說法而仍有爭議。主要的癥結點包括應以個體或生態系統尺度來計算，以及需考慮納入哪些生物代謝過程，例如在個體尺度來說，貝殼的鈣化作用 (calcification) 在形成碳酸鈣 (CaCO_3) 的同時會釋放出二氧化碳，而貝類的呼吸作用也會向水體釋放二氧化碳。另一方面，貝殼的碳酸鈣是由吸收碳酸氫根 (HCO_3^-) 所合成，有助加速二氧化碳溶解於水體 (Morris and Humphreys, 2019)。有學者將貝殼合成碳酸鈣的過程視為固定二氧化碳 (Jansen and Bogaart, 2020)，也有其它學者抱持反對的看法，認為貝類合成貝殼的碳酸鈣不等於固定二氧化碳，因鈣化作用所移除的為無機碳，並非減少大氣中的二氧化碳。

此外，若以生態系統尺度考量，貝類攝取環境中的有機碳有助於減少從水體中二氧化碳 (Morris and Humphreys, 2019)。貝類所排糞便中的有機碳若埋入底泥，可移除系統的二氧化碳 (Carlsson et al., 2010)。是否納入這些代謝過程與養殖環境條件以及養殖管理

操作，都可能影響貝類的生長而影響碳收支的結果 (Filgueira et al., 2015; Fuentes-Santos et al., 2019)。其它爭議點更延伸至水產業者收穫與消費者食用後的貝殼處理方式。因此亦有學者建議應妥善處理與管理貝殼，使貝類養殖產業有機會形成碳匯。

養殖生物的季节性生長變化

海藻養殖在多數研究中認為是碳匯，不過最近在中國福建桑溝灣的研究中發現，海帶 (*Saccharina japonica*) 在快速成長期間，其海域所測得的二氧化碳分壓 ($p\text{CO}_2$) 相較大氣下降 $17-73 \mu\text{atm}$ ，而在海帶成長後期，所測得的海域二氧化碳分壓則較大氣上升 $20-37 \mu\text{atm}$ ，由數據顯示海帶在快速生長期為碳匯，而成長後期則反而成為碳源。此外，研究也發現海帶在老化階段，養殖區域量測到海水出現酸化和缺氧現象，溶解性有機碳釋放量也顯著增加，導致微生物豐度和呼吸作用增強，使二氧化碳的排放量超過光合作用中的二氧化碳吸收量。因此研究建議養殖海帶應在成熟時適時收穫，才能充分發揮其碳匯功能和環境效益 (Xiong et al., 2024)。

西班牙加利西亞河海灣養殖的地中海殼菜蛤 (*Mytilus galloprovincialis*) 以吊掛在海灣的棚架的方式，依靠湧升流所帶來的營養鹽進行養殖，該地區的研究團隊分別於 4 月或 9 月放養貝苗、收穫殼長為 50 mm 或 75 mm，共 4 個處理。同時收集當地的水文資料、物種的生化成分與代謝生理文獻，利用前人建立的地中海殼菜蛤的動態淨生產方法 (dynamic net production approach) 模式

(Fuentes-Santos et al., 2019)，估算殼菜蛤養殖到收穫期間個體的碳收支情形。結果發現放養時間與收穫規格會影響碳收支的計算結果。其中 4 月放養者相較 9 月放養者有碳排較低的趨勢，而收穫規格 75 mm 相較 50 mm 有碳排較低的趨勢。收穫每噸殼菜蛤可從殼移除 365 kg 二氧化碳，但貝肉生長所排出的二氧化碳則從 92–578 kg 不等，而使貝類隨著生長環境條件與養殖方式造成碳收支結果存在變動 (Alvarez-Salgado et al., 2022)。

貝類成長出現季節性變化而影響碳收支的現象，也出現在義大利威尼斯潟湖的菲律賓簾蛤 (*Ruditapes philippinarum*) 養殖研究，該試驗將簾蛤分成 4 組並分別養殖於 4 個位置，進行為期 1 年的監測 (2019 年 5 月至 2020 年 5 月)，期間測量總濕重、殼長、軟組織乾重與殼乾重等形質資料。同時納入相關水質與環境因子調查數據，以環境強制函數 (environmental forcing functions) 進行計算。結果發現不同地點的簾蛤所建出的模型略有差異，整體評估發現養殖過程的碳收支呈現季節性變化，在夏季為碳匯而在冬季則為碳源，但以整年度來說仍歸屬於碳匯 (Bertolini et al., 2021)。因此探討貝類適合的放養期與收穫規格，有助於提供減碳或增加碳匯養殖管理策略。倘未來貝類養殖納入碳市場，亦需考量季節性成長的差異。

養殖管理操作影響

研究指出目前多數文獻僅計算溫室氣體在水面與大氣交界擴散通量的測量，經常忽略養殖期間的進排水中的甲烷與氧化亞氮排

放，以及沉積物產生的甲烷等。有學者呼籲為求更精準評估水產養殖所產生的碳排，提醒未來的研究應儘可能將養殖操作與相關因素納入計算 (Kosten et al., 2020)。池底沉積物主要來自於累積的殘餌、糞便與死亡生物遺骸，這些沉積物中的有機物經降解後會產生甲烷。經由位於中國福建省白蝦養殖池的採樣分析發現，養殖池底產生的甲烷佔養殖池排放甲烷 90% 以上，而排放強度主要與投餌的飼料量與溫度有關，研究發現鄰近投餌區的甲烷量較其它區域高，約佔整體排放的 49.7–71.8%，池底排放甲烷量更呈現季節變化 (Yang et al., 2020)。養殖池進行排水曬池為常見於冬季收穫後進行的養殖管理操作，有研究比較中國福建的魚蝦混養池，評估養殖池有無排乾水池進行曬池對於溫室氣體排放的影響，現場測量有排水養殖池與未排水養殖池，結果顯示有排水池中溫室氣體排放量為 739.18 mg CO₂-eq/(m²·hr)，高於未排水池 26.46 mg CO₂-eq/(m²·hr) (Yang et al., 2018)。

溫室氣體評估方法

由於水產養殖的溫室氣體評估方法學仍在發展當中，目前常見的研究方法包括為由生物量轉換碳匯的材料質量評估法，或考量養殖漁業對環境影響與貢獻的生命週期評估法，以及將養殖池假設為生態系統，經由現場溫室氣體測量數據、生物量與相關因子估算，綜合推算養殖池的碳輸入與輸出的碳收支。

材料質量評估方法

材料質量評估方法 (material quality assessment method) 為簡易評估碳匯的方法。例如中國由材料質量評估方法評估 2003–2019 年的貝類與藻類養殖碳匯，推測每年平均約產生 110 萬噸的碳匯，其中貝類與藻類的碳匯轉換率各為 8.37% 與 5.2% (Lai et al., 2022)。由近三十年間的數據分析，貝類和藻類的養殖產量持續增加，貝類和藻類養殖的碳匯自 1991–2020 年已自 44 萬噸提升至 499 萬噸 (Xu et al., 2023)。

生命週期評估法

生命週期評估法 (life-cycle assessment, LCA) 可評估某些產品和服務的碳足跡在整個生命週期中釋放的溫室氣體總量 (Williams, 2009)。生命週期法又可依據使用情境劃分計算邊界，計算全生命週期或部分生命週期的情形。

臺灣研究利用生命週期評估法，並參照 ISO 14067 標準計算嘉義縣義竹鄉的生態養蝦場碳排放情形。結果顯示每公斤的收穫生產過程中總碳排放量為 6.9389 kg CO₂ e/kg，主要碳排來源依序為電力 (2.0093 kg CO₂ e/kg，29.39%)、飼料 (1.6395 kg CO₂ e/kg，23.98%)、間接原料 (1.4782 kg CO₂ e/kg，21.62%)、廢棄物處理 (0.7783 kg CO₂ e/kg，11.40%) 以及運輸和冷媒 (0.7524 kg CO₂ e/kg，11.01%) (Chang et al., 2017)。

義大利學者利用生命週期評估法評估於義大利亞得里亞海潟湖養殖的花蛤 (*Venerupis philippinarum*) 與近海養殖的地中海殼菜蛤對二氧化碳的影響。評估結果顯

示完成收穫及包裝的花蛤與地中海殼菜蛤，每公斤的收穫生產過程中所形成的殼各能捕捉 254 與 146 g CO₂，而扣除在養殖生產過程中各排放了 22 與 55 g CO₂，換算每公斤鮮重產品花蛤與地中海殼菜蛤的淨碳捕獲能力分別為 233 與 91 g CO₂，因此認為此 2 種貝類養殖具有碳匯功能 (Tamburini et al., 2022)。

此外，同樣以採用生命週期評估法，進行義大利亞得里亞海潟湖養殖的菲律賓簾蛤的評估，研究數據主要根據 2020 年冬季對 119 名貝類養殖戶的查訪估算得出的，調查項目包括整個養殖階段之種苗、設備、材料、電力、燃料和水的使用等。結果指出每噸貝收穫可固定 444.55 kg 二氧化碳、1.54 kg 氮、0.31 kg 磷 (Turolla et al., 2020)。研究結果指出貝類養殖不但具有碳匯潛力，對於降低水中的氮、磷與淨化環境水質亦有相當貢獻。

碳收支法

碳收支法 (carbon budget) 的概念為將養殖池假設為單生態系統，將系統之碳輸入 (input) 減去碳輸出量 (output)，即為累積於系統中之碳交換量。部分研究採用本方法評估調查養殖漁業碳收支情形 (David et al., 2021; Flickinger et al., 2020; Zhang et al., 2020)。依據養殖生產過程納入溫室氣體排放、生物代謝、進排水、飼料、收穫與池底沉積等系統碳輸入與輸出的分析項目。

由碳收支評估方法分析白蝦 (*Litopenaeus vannamei*) 在 3 個中國土池的養殖生產。結果顯示池塘主要的碳輸入來源為浮游生物的初級生產力 (58.5—61.8%)，其次是商業飼料

(31.9—35.3%)，而主要碳輸出來自浮游生物的呼吸作用 (44.0—53.6%) 和沉積 (18.0—21.7%)。二氧化碳與甲烷排放到大氣中則比例不高 (0.8—1.6%) (Yang et al., 2022)。

由碳收支法評估淡水亞馬遜河蝦 (*Macrobrachium amazonicum*) 和尼羅吳郭魚 (*Oreochromis niloticus*) 混養系統。結果顯示在系統碳輸入部分，碳主要經由飼料 (~58—63%)、進水 (~29—34%) 和溶解的氣體 (~5—7%) 進入養殖池系統；而在系統碳輸出部分，多數積累在沉積物中 (~42—70%) 或由排水移出系統 (~12—13%)，在漁獲部分由吳郭魚蓄積 (~12%) 與河蝦蓄積 (~1%) (David et al., 2021)。

巴西研究分析養殖大鰓蓋巨脂鯉 (*Colossoma macropomum*) 和亞馬遜河蝦。實驗過程中收集養殖生物、雨水、水、飼料、土壤、溫室氣體、總懸浮固體、沉澱固體和累積底泥。結果顯示，整體系統中有機碳多以固體有機物 (~55—84%) 和養殖生物體 (~4—18%) 的形式累積。碳排藉由收穫移出 (~6—8%)，以及二氧化碳和甲烷氣體的形式排放 (~1—5%) (Flickinger et al., 2020)。

結語

目前可能減少碳排的調整方向包含降低飼料生產的碳排放、提高飼料效率、使用節能設施或再生能源等，相關減排措施的效果與經濟效益亦應一併評估，期待能在兼顧養殖場合理收益的前提下，透過減少養殖溫室氣體排放的措施，實現追求糧食生產和環境永續的目標。