

多溫層海水魚藻共生系統開發

黃侑勛、李沛珊、陳玉萍、謝易叡、何源興
行政院農業委員會水產試驗所東部海洋生物研究中心

摘要

本篇研究團隊自 2018 年開始建構多溫層海水魚藻共生系統，應用於具養殖潛力且具高經濟價值養殖物種之複合式生產，利用多種生物之最適養殖溫度不同與營養源不同之特性，形成一個互利的養殖系統，可減少在養殖過程中對環境的衝擊破壞，避免大量耗水和污染環境，達到生態養殖之目的。未來更希望可將更多種高經濟養殖生物引入本系統進行養殖生產，收集養殖相關基礎數據並探求本系統對各物種成長之影響效果。2020 年則應用多溫層海水魚藻共生系統，組合牙鯨 (*Paralichthys olivaceus*)、凡納對蝦 (*Litopenaeus vannamei*，俗稱白蝦)、石蓴 (*Ulva lactuca*) 及滌苔 (*U. linza*) 等高經濟水產生物以進行複合式養殖，建立室外養殖模式並評估其養殖效益，發展對環境友善之養殖系統，降低生產成本，提高養殖收益及產業競爭力。

關鍵詞：多溫層、海水魚藻共生系統、牙鯨、長莖葡萄蕨藻、葡萄藻、石蓴、滌苔、凡納對蝦(白蝦)

前言

近年來受到氣候變遷的影響，如何節約用水、提高水利用率為當前迫切且重要的課題。水產養殖業是國內重要產業，傳統水產養殖過程大多以換水的方式來維持水質，然而養殖用水往往未經妥善處理便排放至環境中，廢水中尤以養殖物的排泄物、溶失的飼料、藻菌團塊及其他富含氮、磷及碳水化合物等可再利用之物質為主，而導致以下問題：(1)天然棲地的破壞；(2)疾病的擴散；(3)降低生物多樣性；(4)污染地表水以及地下水，並且有可能導致水體優養化。另外水產養殖在追求產量的同時，可能造成水質惡

化、疾病頻傳、生物免疫力下降、甚至是過度用藥產生抗藥性菌株及藥物殘留對食物鏈末端的人類帶來病變等問題，使得近年來生態化水產養殖 (ecological aquaculture, 簡稱生態養殖) 的觀念逐漸被提倡且推行。生態養殖的實踐有幾個重要的面向，包含生產安全健康之產品、產出排放對環境友善、節能、節水、節電、綠色飼料之使用以減低對海洋魚粉的利用等，發展出複合式養殖的形式，而為了減少造成環境負擔之養殖廢水，此等複合式養殖之概念近年已應用在淡水之魚菜共生系統。魚菜共生 (aquaponics) 是結合水產養殖 (aquaculture) 及水耕栽培 (hydroponics) 而成之水產養殖模式，是一



種可以永續發展的養殖系統，而相較於淡水之魚菜共生系統已發展多年，海水的魚菜共生系統之相關研究則較少，與之相關的研究可以參考海藻與水生生物之混養模式。為了減少造成環境負擔之養殖廢水，海藻與水生生物之混養模式已被有效使用於改善養殖池環境，利用海藻過濾之方式，在養殖環境中建立一個小規模且可自行平衡之生態系統 (Chopin et al., 2001; Troell et al., 2003)，以人工飼料作為能量來源，除了可供水生生物營養需求，殘餌以及動物排放之糞便則可供應海藻作為直接或間接營養源利用，而海藻吸除營養鹽所形成的過濾、淨化水質效果，可減少養殖廢水對環境造成的影響，盡量降低養殖設施排放過多營養鹽導致周遭環境的污染情形 (Schuenhoff et al., 2003)。海藻生物過濾對養殖池廢水處理已被證明其功用 (Neori et al., 2003)，多位學者研究指出龍鬚菜 (Buschmann et al., 1994; Troell et al., 1999; Nelson et al., 2001; Jones et al., 2002)、石蓴 (*Ulva lactuca*) (Dvir et al., 1999; Neori et al., 2000) 與海帶 (Luning, 2002) 等海藻作為養殖池中之生物過濾系統，對無機物吸收效率相當高，例如石蓴與鮑魚混養，除了能減少養殖池中 80% 的總氮，且鮑魚將石蓴作為額外的食物來源，可使成長效果增加 1 倍 (Neori et al., 2000)；石蓴能降低金頭鯛 (*Sparus aurata*) 養殖池水中最高達 85% 的總氮 (Vandermeulen and Gordin, 1990)，冬季與夏季降低無機氮分別為 1.1 與 2.2 g/m²/day (Jiménez del Río et al., 1996)，而石蓴養殖密

度達 1 kg/m² 時，能降低養殖池水中高達 90% 的總氮 (Shpigel et al., 1993)。另外魚藻共生之相關應用還有中國山東以長牡蠣 (*Crassostrea gigas*)、扇貝 (*Chlamys farreri*) 及海帶 (*Laminaria japonica*) 混養，用海帶處理貝類排泄後之營養鹽 (Nunes et al., 2003)；智利將鮭魚 (*Salmo salar*) 與龍鬚菜 (*Gracilaria* sp.) 混養，利用龍鬚菜吸收鮭魚排放出來之氮等營養鹽以降低藻類和細菌等微生物生長，同時可收成龍鬚菜增加收入 (Troell et al., 2009) 等。

為了減少傳統養殖對環境的衝擊，目前水產養殖產業逐漸開始重視循環水養殖、生態養殖、魚菜共生養殖等對環境較為友善的方法進行養殖生產，以兼顧永續漁業之發展。水產試驗所東部海洋生物研究中心近年已完成多種高經濟價值之冷水性魚類及大型藻類之養殖技術，如牙鯡 (*Paralichthys olivaceus*) 繁養殖技術開發、條石鯛 (*Oplegnathus fasciatus*) 人工繁養殖技術開發及葡萄藻之培育及利用之研究。於牙鯡繁養殖技術開發，已完成牙鯡人工繁殖技術之建立及不同培育溫度與鹽度對仔稚魚成長之影響研究，目前正在進行不同養殖密度對牙鯡仔稚魚成長表現影響之試驗；於葡萄藻之培育及利用之研究，已完成不同光照強度及不同營養鹽來源對長莖葡萄蕨藻 (*Caulerpa lentillifera*) 及葡萄藻 (*Botryocladia leptopoda*) 成長表現之試驗。因此本研究運用複合式生態養殖與魚菜共生系統的概念下，結合臺東地區所取得的深層海水，以及多年來對於低溫性水產生物的





繁養殖研究成果，建立多溫層海水魚藻共生系統，進行海水高經濟價值之魚、蝦、貝類及藻類的複合式生產，期能有效利用養殖過程所產生之廢棄物，減少對水資源之需求並降低養殖廢水對周遭環境之污染，達到農業資源循環利用的目的。

材料與方法

一、室內型皺紋盤鮑、長莖葡萄蕨藻、牙鮚、葡萄藻及白蝦系統開發

於 2018 年開始在水產試驗所東部海洋

生物研究中心進行室內型多溫層海水魚藻共生系統之開發，工作項目為：建置多溫層海水魚藻共生系統以應用於水產養殖並進行養殖相關試驗，收集及分析生物成長數據，試驗生物包括皺紋盤鮑 (*Haliotis discus hannai*)、長莖葡萄蕨藻、牙鮚、葡萄藻及凡納對蝦 (*Litopenaeus vannamei*，俗稱白蝦)，系統概念如圖 1 所示。

在設備架設及試運轉完成後，開始於系統中投入皺紋盤鮑、長莖葡萄蕨藻、牙鮚、葡萄藻及白蝦等 5 種高經濟水產養殖生物(圖 2-6)，上述之物種經過馴養適應系統環境後開始進行養殖試驗，試驗期間為 6 週。

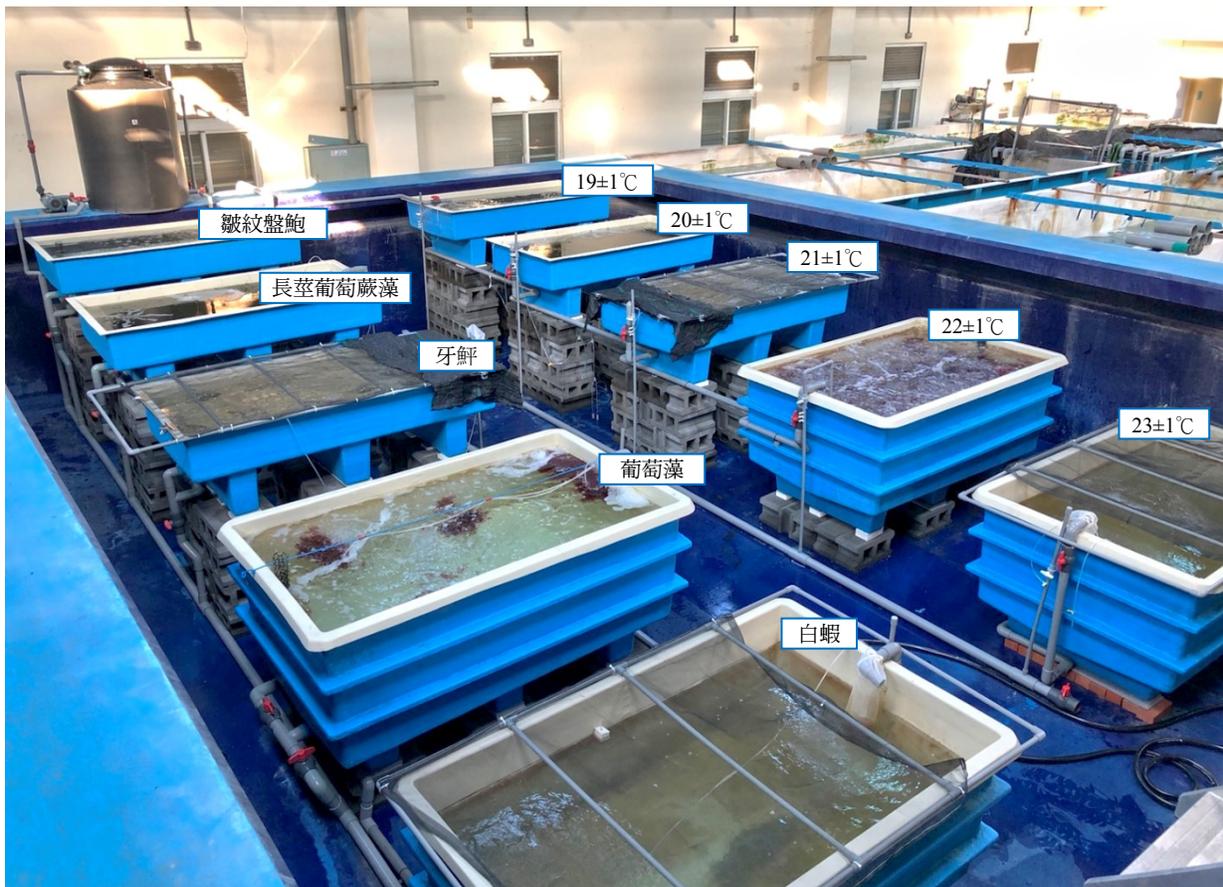


圖 1 室內型多溫層海水魚藻共生系統設計概念





圖 2 皺紋盤鮑



圖 3 長莖葡萄蕨藻



圖 4 葡萄藻



圖 5 白蝦



圖 6 牙鯧





二、室外型牙鯧、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻系統開發

在 2018 年完成室內型模組後，於 2019 年開始進行室外型多溫層海水魚藻共生系統之建置，並將原有之戶外貝類育苗池加以整建，修建後養殖設施與系統概念如圖 7 所示。每組串接養殖組包括魚類養殖池和大型藻類池，共 4 池，水流方向依序為牙鯧、長莖葡萄蕨藻、條石鯛（圖 8）及葡萄藻，試驗設計水溫為牙鯧飼育池之 $18 \pm 2^\circ\text{C}$ 、長莖葡萄蕨藻培育池之 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、條石鯛飼育池之 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ，最後葡萄藻培育池則為 $24 \pm 2^\circ\text{C}$ ，此即為多溫層之概念；各池養殖用水經簡易過濾後供下一池使用，希望將養殖動物後水中殘存之營養鹽供給藻類使用。串接養殖組共設立 3 組養殖系統，單獨養殖組則利用與試驗池相同面積與水體大小之養殖



圖 8 條石鯛

池分別進行牙鯧、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻之單獨養殖，以深層海水及表層海水混合調整溫度，使溫度控制與串接養殖組中相同物種之池水溫度相同，並調整進水量與串接養殖組之進水量相同，以比較串接養殖組與單獨養殖組之各物種成長效果。本試驗以牙鯧、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻等 4 種高經濟水產養殖生物進行複合式生產養殖測試。



室外多溫層海水魚藻共生養殖設施



牙鯧



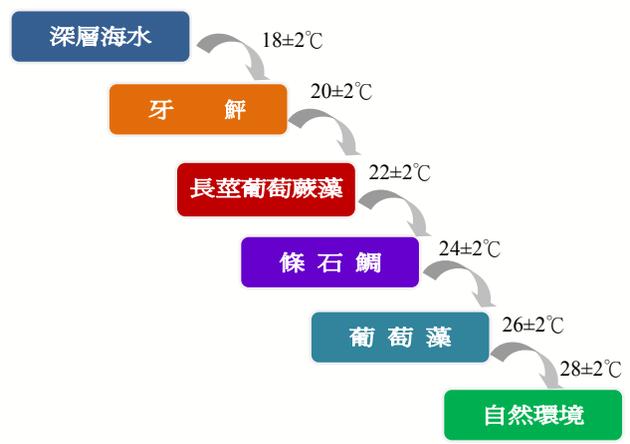
長莖葡萄蕨藻



條石鯛



葡萄藻



系統設計示意圖

圖 7 室外型多溫層海水魚藻共生系統設計概念



三、室外型牙鯨、石蓴、白蝦及滌苔系統開發

(一) 魚、藻類循環養殖系統的建構

以牙鯨、石蓴、白蝦及滌苔 (*U. linza*) 進行複合式養殖試驗，每組串接養殖組包括魚類養殖池和大型藻類池各 2 池，4 池為 1 組，水流方向依序為：牙鯨→石蓴→白蝦→滌苔，牙鯨養殖密度為 50 尾/m²，白蝦養殖密度為 80 尾/m²，藻類則分為 500、1,000 及 2,000 g/m²。水溫調整為牙鯨飼育池之 19 ± 2°C、石蓴培育池之 21 ± 1°C、白蝦飼育池之 23 ± 1°C，最後滌苔培育池則為 25 ± 1°C；串接養殖組各池養殖用水經簡易過濾後供下一池使用，串接養殖組共設立 3 組養殖系統。單獨養殖組則利用與試驗池相同面積養殖池，分別進行牙鯨、石蓴、白蝦及滌苔之單獨養殖，以深層海水及表層海水混合調整溫度，使溫度控制與串接養殖組中相同物種之池水溫度相同，並調整進水量與串接養殖組之進水量相同，試驗期間水交換率為每日 3—4 次。養殖試驗期間為 6 週，收集生物成長數據並進行統計分析，比較串接養殖組與單獨養殖組之成長效果，並探討藻類最適養殖密度及週期。

(二) 降低水交換率

2019 年進行試驗時之水交換率為 6—8 次/日，2020 年試驗設計將水交換率降低至 3—4 次/日，試驗結束後整理數據以進行統計分析，並與 2019 年結果比較，以探討水交換率降低時，串接養殖組與單獨養殖組及不同養殖密度對大型藻類之成長效果是否有差異，以期在不影響養殖生物成長表現的

情況下達到節水的目標。

結果與討論

一、室內型皺紋盤鮑、長莖葡萄蕨藻、牙鯨、葡萄藻及白蝦系統

2018 年試驗結果，試驗生物成長表現如圖 9 所示，以本系統進行皺紋盤鮑、長莖葡萄蕨藻、牙鯨、葡萄藻及白蝦等 5 種高經濟水產養殖生物之養殖試驗，結果各物種成長資料整理如下：皺紋盤鮑：初始體重為 2.06 ± 0.28 g 及 2.13 ± 0.18 g，6 週後串接養殖組與單獨養殖組之增重率無顯著差異 (經 *t* 檢定，*p* ≥ 0.05)；長莖葡萄蕨藻：初始重量均為 14 kg，6 週後串接養殖組藻片增重率為 51.79 ± 12.28%，單獨養殖組之增重率為 18.57 ± 1.96%，經 *t* 檢定分析後發現串接養殖組成長效果顯著優於單獨養殖組 (*p* < 0.05)；牙鯨：初始體重為 92.33 ± 1.41 g 及 121.83 ± 2.12 g，6 週後串接養殖組之增重率為 34.10 ± 8.96%，單獨養殖組之增重率為 31.58 ± 5.02%，各組間無顯著差異；葡萄藻：初始重量均為 6 kg，6 週後串接養殖組之增重率為 55.50 ± 1.89%，單獨養殖組之增重率為 33.54 ± 5.13%，串接養殖組成長效果顯著優於單獨養殖組；白蝦：初始體重為 0.60 g，6 週後串接養殖組之增重率為 525.00 ± 82.50%，單獨養殖組之增重率為 375.00 ± 82.50%，串接養殖組成長效果顯著優於單獨養殖組。綜合上述資料所示，除了皺紋盤鮑及牙鯨以外，兩種大型海藻及白蝦之成長效果均為串接養殖組顯著優於



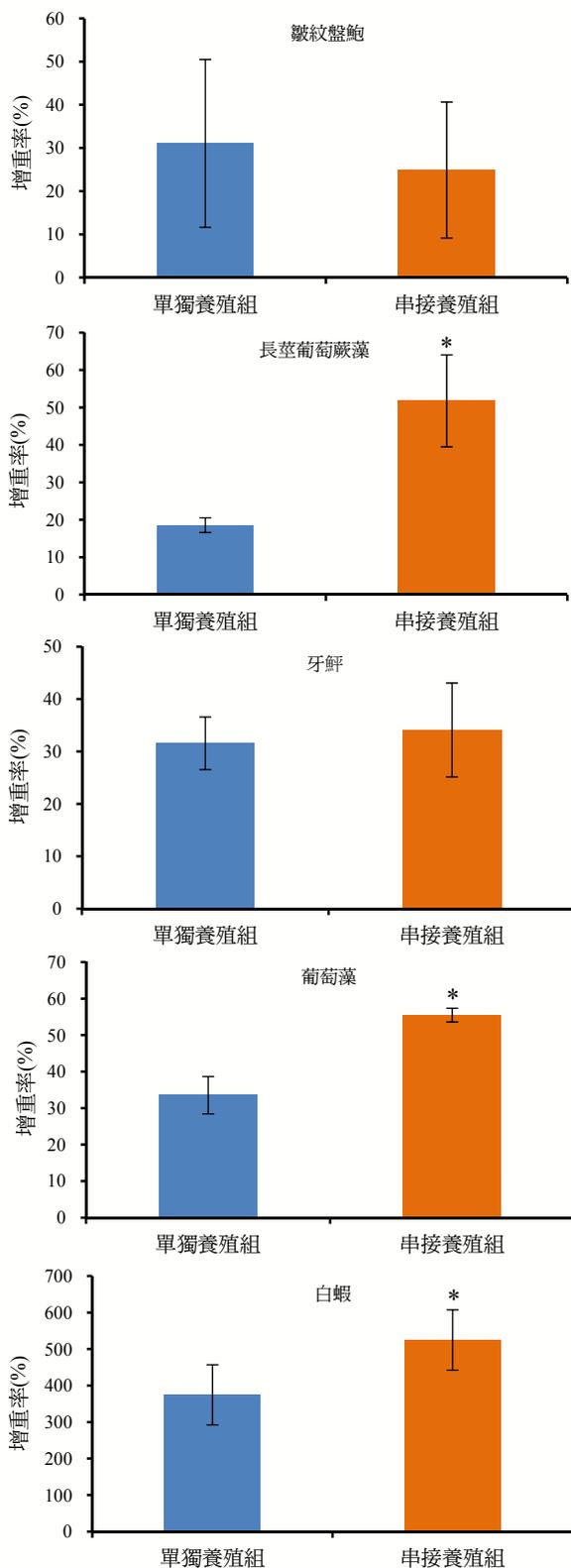


圖 9 室內型養殖系統皺紋盤鮑、長莖葡萄蕨藻、牙鮠、葡萄藻及白蝦之成長表現(*表示串接養殖組與單獨養殖組有顯著差異, $p < 0.05$)

單獨養殖組。

二、室外型牙鮠、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻系統

2019 年試驗生物成長表現結果如圖 10 及圖 11 所示，以牙鮠、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻等 4 種高經濟水產養殖生物進行複合式生產養殖試驗，成長數據經 t 檢定分析後，結果顯示長莖葡萄蕨藻 2,000 g/m^2 組、條石鯛及葡萄藻 500、1,000 與 2,000 g/m^2 組之增重率均為串接養殖組顯著優於單獨養殖組。綜合上述資料所示，除牙鮠以外，兩種大型海藻及條石鯛之成長效果均為串接養殖組顯著優於單獨養殖組。

應用本系統於高經濟價值之魚類及大型藻類複合式養殖（串接養殖組）生產所產生之節水效益，與單獨養殖組之養殖模式相較，以本次試驗養殖設施水體大小為例，養殖池每池水體約為 4 公噸 ($2.8 \times 2.3 \times 0.65 \text{ m}$)，以 4 池串連為一組養殖系統，水交換率為每日 6 次，即每日需要用水 $4 \times 6 = 24$ 公噸，而未利用本養殖系統之相同水體之單獨養殖用水量每日將為 $4 \times 4 \times 6 = 96$ 公噸，因此應用本系統進行高經濟價值之魚類及大型藻類複合式養殖，每日將可節省至少 72 公噸之海水用量，亦即可達 75% 之節水效率。

應用本系統對養殖生物產值增減之影響，經初步評估以長莖葡萄蕨藻及葡萄藻之產量差異做比較。長莖葡萄蕨藻以 2,000 g/m^2 組之串接養殖組成長效果顯著優於單獨養殖組，於養殖 6 週後，串接養殖組重量 ($3355.33 \pm 41.63 \text{ g}$) 較單獨養殖組 (2758.67



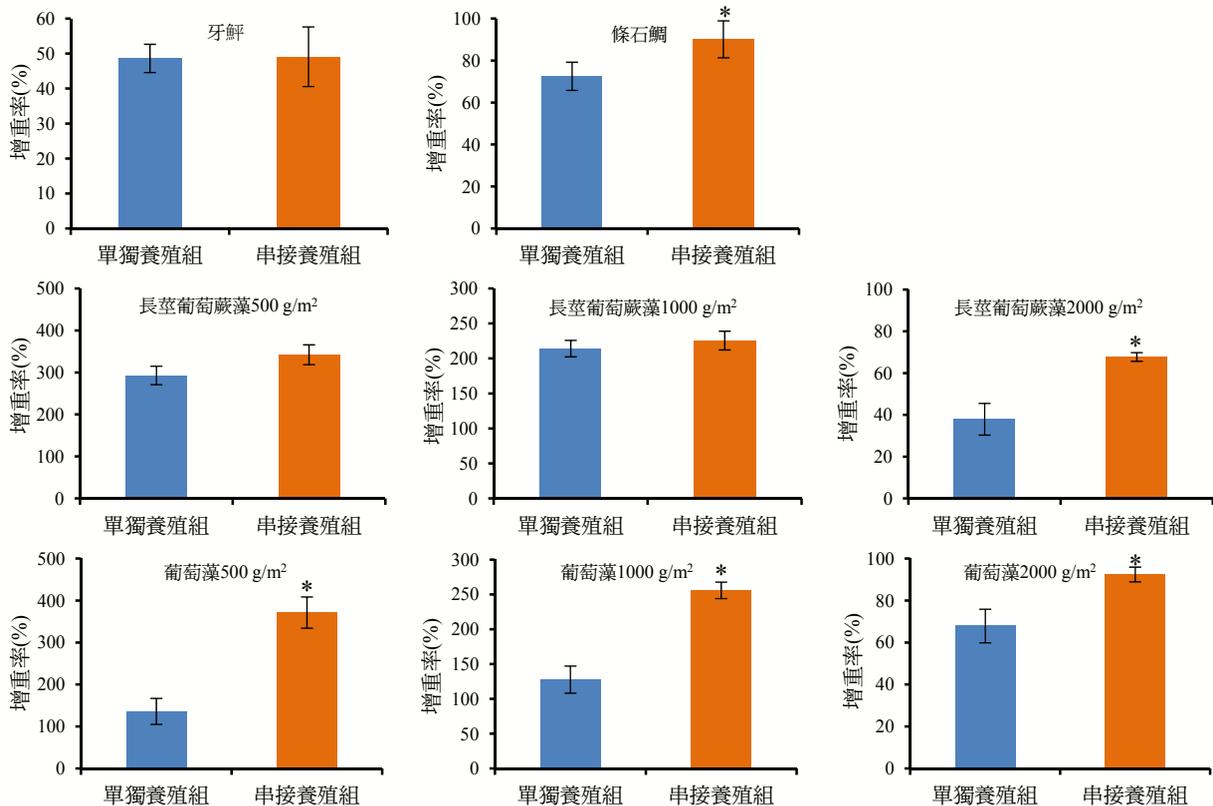


圖 10 室外型養殖系統牙鯻、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻之成長表現(*表示串接養殖組與單獨養殖組有顯著差異， $p < 0.05$)



圖 11 室外型牙鯻、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻系統養殖成果

± 151.77 g) 增加 596.66 g, 粗估應用本系統進行魚類及藻類之複合式養殖, 與單獨進行長莖葡萄蕨藻之養殖相較, 每年約可增加 5 kg/m² 之長莖葡萄蕨藻, 以本系統養殖池面

積計算, 單一養殖池底面積約為 6 m², 估計每年可增加 30 kg 之長莖葡萄蕨藻產量。葡萄藻各組成長數據均以串接養殖組顯著優於單獨養殖組, 以試驗期間 6 週之增重量比較, 500 g/m² 組串接養殖組較單獨養殖組增加 1,177 g、1,000 g/m² 組串接養殖組較單獨養殖組增加 1,283 g、2,000 g/m² 組串接養殖組較單獨養殖組增加 491 g, 因此以 1,000 g/m² 組為例進行計算, 粗估應用本系統進行魚類及藻類之複合式養殖, 與單獨進行葡萄藻之養殖相較, 每年約可增加 11 kg/m² 之葡萄藻, 以本系統養殖池面積計算, 單一養殖池底面積約為 6 m², 估計每年可增加 66 kg 之葡萄藻產量。





三、室外型牙鯧、石蓴、白蝦及滌苔系統

2020 年試驗生物成長表現結果如圖 12 所示，牙鯧、石蓴、白蝦及滌苔等 4 種高經濟水產養殖生物進行複合式生產養殖試驗，結果顯示試驗進行 6 週後，牙鯧、白蝦及石蓴 1,000 g/m² 組之增重率均為串接養殖組優於單獨養殖組，但無顯著差異。

結論

水產試驗所經多年試驗，將養殖、栽培、硝化過濾及水質監測等設備模組化，成功打造出以淡水養殖魚種搭配蔬菜作物的魚菜共生系統 (黃等, 2017)，並進一步將概念延伸到海水養殖，發展出高經濟海水魚蝦類與藻類的複合式海水養殖系統。參考本研究 2019 年之試驗結果，應用本系統進行水

產養殖之節水效率最高可達 75%，而以本系統養殖設施進行牙鯧、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻的複合式養殖，單一組複合式養殖設施面積約為 24 m²，每年可較單獨養殖牙鯧、長莖葡萄蕨藻、條石鯛及葡萄藻增加 30 kg 之長莖葡萄蕨藻與 66 kg 之葡萄藻之產量。以 2019 年試驗成果推論，利用多溫層海水魚藻共生系統進行冷水性高經濟價值水生物種的複合式養殖，確實可達到節水之目的，且可縮短長莖葡萄蕨藻及葡萄藻等大型藻類的養殖時間，並能有效利用養殖過程所產生之廢棄物，降低養殖廢水對周遭環境之污染，達到農業資源循環利用的目的。未來將繼續投入更多物種於本系統之養殖應用，期使本系統更臻完善，期可兼顧養殖產業之養殖收益與減少用水及排放廢水，而減少養殖廢水的產生即可減少因處理廢水所需能量及濾材之成本投入，達到節能之目的。

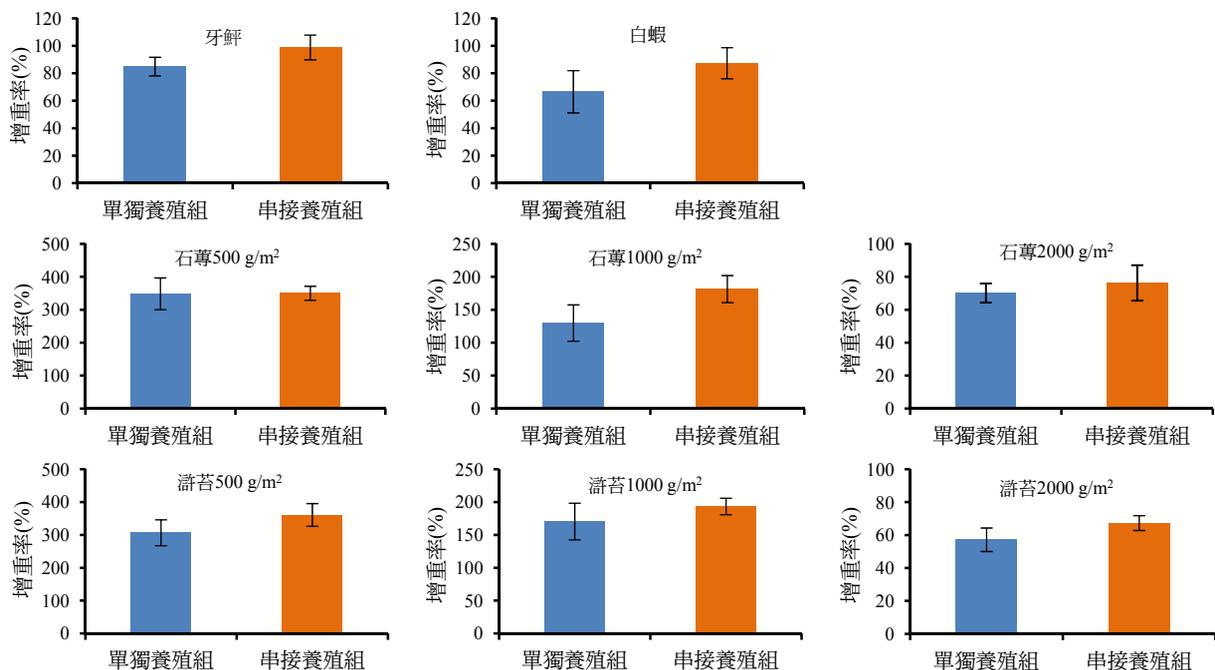


圖 12 室外型養殖系統牙鯧、石蓴、白蝦及滌苔之成長表現



參考文獻

- 黃德威、薛守志、劉于溶、楊順德 (2017) 養殖水耕—魚菜共生。水產試驗所技術手冊 11, 56 pp。
- Buschmann, A. H., O. A. Mora, P. Gómez, M. Böttger, S. Buitano, G. Retamales, P. A. Vergara and A. Gutierrez (1994) *Gracilaria chilensis* outdoor tank cultivation in Chile: use of land-based salmon effluents. *Aquacult. Eng.*, 13: 283-300.
- Chopin, T., A. H. Buschmann, C. Hallin, C. Troell, N. Kautsky, A. Neori, G. P. Kraemer, J. A. Zertuche-Gonzalez, C. Yarish and C. Neefus (2001) Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key towards sustainability. *J. Phycol.*, 37: 975-986.
- Dvir, O., J. V. Rijn and A. Neori (1999) Nitrogen transformations and factors leading to nitrite accumulation in a hypertrophic marine fish culture system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 181: 97-106.
- Jiménez del Río, M., Z. Ramazanov and G. García-Reina (1996) *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents. *Hydrobiologia*, 326: 61-66.
- Jones, A. B., N. P. Preston and W. C. Dennison (2002) The efficiency efficiency and condition of oysters and macroalgae used as biological filters of shrimp pond effluent. *Aquac. Res.*, 33: 1-19.
- Luning, K. (2002) SEAPURA: Seaweeds purifying effluents from fish farms: An EU project coordinated by the Wadden Sea Station Sylt. *Wadden Sea Newsletter 2001-2*, 20-21 pp.
- Nelson, S. G., E. P. Glenn, J. Conn, D. Moore, T. Walsh and M. Akutagawa (2001) Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system. *Aquaculture*, 193: 239-248.
- Neori, A., F. E. Msuya, L. Shauli, A. Schuenhoff, K. Fidi and M. Shpigel (2003) A novel three-stage seaweed (*Ulva lactuca*) biofilter design for integrated mariculture. *J. Appl. Phycol.*, 15: 543-553.
- Neori, A., M. Shpigel and D. Ben-Ezra (2000) A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. *Aquaculture*, 186: 279-291.
- Nunes, J. P., J. G. Ferreira, F. Gazeau, J. Lenceart-Silva, X. L. Zhang, M. Y. Zhu and J. G. Fang (2003) A model for sustainable management of shellfish polyculture in coastal bays. *Aquaculture*, 219: 257-277.
- Schuenhoff, A., M. Shpigel, I. Lupatsch, A. Ashkenazi, F. E. Msuya and A. Neori (2003) A semi-recirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed. *Aquaculture*, 221: 167-181.
- Shpigel, M., A. Neori, D. M. Popper and H. Gordin (1993) A proposed model for “environmentally clean” land-based culture of fish, bivalves and seaweeds. *Aquaculture*, 117: 115-128.
- Troell, M., A. Joyce, T. Chopin, A. Neori, A. H. Buschmann and J. G. Fang (2009) Ecological engineering in aquaculture - Potential for integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in marine offshore systems. *Aquaculture*, 297: 1-9.
- Troell, M., C. Halling, A. Neori, T. Chopin, A. H. Buschmann, C. Yarish, N. Kautsky and C. Yarish (2003) Integrated mariculture: asking the right questions. *Aquaculture*, 226: 69-90.
- Troell, M., N. Kautsky and C. Folke (1999) Applicability of integrated coastal aquaculture system. *Ocean Coastal Management*, 42: 63-69.
- Vandermeulen, H. and H. Gordin (1990) Ammonia uptake using *Ulva* (Chlorophyta) in intensive fishpond system: mass culture and treatment of effluent. *J. Appl. Phycol.*, 2: 363-374.

