



創新魚菜共生系統之多元利用

黃德威、鍾永廷、劉恩良、楊順德

行政院農業委員會水產試驗所淡水繁養殖研究中心

摘要

一般魚菜共生系統為方便管理，多以養殖單一水產物搭配栽種短期葉菜類進行生產；但因系統生產物種過於單調，某一環節發生物種或數量變動，就可能使系統生態發生失衡。因此，本研究團隊進行下列相關研究：不同植栽密度、不同植栽組合及系統加養觀賞蝦類對系統生產與營養元素的影響等三項試驗，藉由這些試驗以探究魚菜共生系統多元化生產的可行性。上述三個試驗過程中，水體中含氮物的濃度均能維持在水產動物適合生長的範圍。在不同植栽密度試驗結果顯示，每單位飼料量所生產的萵苣產能，以每平方公尺栽種 38 棵組較 19 棵組高，且 38 棵組的水中氮和磷的濃度略低於 19 棵組。在不同植栽組合試驗之結果發現，系統加種絲瓜不會影響養殖魚類的生長，且對於水體中磷的吸收有較好的表現，同時可以提升植物生產量。由上述試驗結果可發現，多元栽種不同植栽可提高系統的營養鹽利用率並提升系統產能。另外，為增加養殖動物的豐度，在系統中養殖觀賞蝦，對於底泥中的有機物具有再利用效益，可降低底泥的蓄積。依據本文三個試驗結果顯示，魚菜系統中增加生物豐度，不會影響整個系統的運行，且有助於增加營養鹽的利用，此篇的結果可供魚菜共生愛好者參考運用。

關鍵詞：魚菜共生、養殖水耕、植栽組合、植栽密度、營養鹽再利用

前言

近年來全球人口增加，在有限的資源下，必須有效利用環境資源，如水資源方面，臺灣的年降雨量雖充足，但因地形陡峭、河川短淺，故能利用的水資源受到限制。而水產養殖業因技術發展與腹地有限的情況下，多採用高密度集約式養殖模式，但養殖密度越高，所需用水量就越大。近年來環保意識抬頭，為提高水資源的利用效率，逐漸發展出低（零）換水的養殖方式，如循環水養殖及魚菜共生（aquaponics）等，這

些方式皆能有效的利用水資源。其中魚菜共生系統中水蒸散率每日約 0.05–5%，不同的氣候溫度、養殖桶與植栽床的空間比例及栽種的植物皆會影響蒸散率，換言之，超過 95% 的水可循環利用；此外，魚菜共生用水量也較傳統的農業減少 10% (Maucieri et al., 2018)，因此不論就農業或者水產養殖而言，魚菜共生系統可顯著提升水資源的再利用率。

魚菜共生系統的原理，是利用水產養殖動物所排放的代謝物，經微生物轉化代謝後，將具有毒性的氨氮經亞硝化及硝化作用



轉變成硝酸鹽，再將系統水體導入植床，利用水培的方式種植蔬菜，硝酸鹽對於蔬菜而言是相當重要的肥分之一，富含硝酸鹽的水體經植物吸收後，淨化的水質再導回養殖池中。而根據本團隊先前的研究發現，在魚菜共生系統中，如果以飼料中的營養鹽當作唯一來源，其中氮和磷分別約 30–40% 可被水產養殖動物及作物吸收（圖 1；黃等，2017），如何以不同方式來提高系統中營養源的利用是值得探討的問題。例如：(1)固定投餵量，但增加投餵頻率，以少量多餐的方式投餵，發現魚成長可增加 4.9%，且菜收成可提高 11% (Liang and Chien, 2013)；(2)額外添加硝化菌 (Zou et al., 2016)；(3)介質的選擇 (Zou et al., 2016)；(4)降低 pH 值 (Zou et al., 2016)；(5)引進藻菌模式系統 (Fanga et al., 2017) 等方式，這些皆可增加整個系統的氮利用率。而在磷的利用上，也發現隨著系統運行時間增長，水中的磷酸鹽會不斷累積，雖然磷酸鹽對於植物來說，是生長所需的基礎營養元素，如根的發育及植物開花和結果皆與磷需求有關。本團隊先前的研究也發現在魚菜共生系統中，飼料中約 34% 和 5% 的磷可分別被養殖動物和葉菜類所吸收（圖 1；黃等，2017），其餘的會釋放於系統中，且磷不像氮源會被轉化成氣態散失，但會形成沉澱物，當系統定期清理時，會隨著底泥的清除被移除到系統外 (Rafiee and Saad, 2005)；Yogev 等 (2016) 也提及整體系統中的磷無法被有效利用，但仍視栽種的植栽以及系統的運作模式之差異，吸收效率會有所不同。不論是氮或磷，

在魚菜共生的相關研究仍處於起步階段，未來需進行更多有關不同類型動植物，諸如食用及觀賞用之魚蝦和草本、木本及藥用植物在系統栽種相關之研究，才更能提升系統的循環利用效能及多元化生產，以提升魚菜共生系統的產能。因此，本篇以不同植栽密度、不同植栽組合及增加物種豐度的情況下，探討系統中的營養鹽利用效率及系統的穩定性。

不同植栽密度對系統生產與營養元素的影響

為探討系統中栽種不同植栽密度對於系統之影響，利用養殖雜交種吳郭魚 (*Oreochromis aureus* × *O. niloticus*)，養殖密度為 20 kg/ton，搭配栽種不同密度 (38 與 19 棵/m²) 的福山萵苣 (*Lactuca sativa*) 進行為期 6 週的試驗。結果顯示，以單位栽種面積日投餌量 32 g 養殖吳郭魚，試驗結束時低植栽密度與高植栽密度組的菜收穫量分別為 82.3 與 147.6 kg，每公斤飼料可分別生產 2.1 與 3.6 kg 的萵苣，期間水質條件無明顯不良，但高植栽密度組水中氮和磷的濃度略低於低植栽密度組（表 1）。由每單位飼料量可生產的萵苣重量計算，高植栽密度組有較佳的生產效能。對於系統運作時須餵飼多少飼料，才能提供足量的營養鹽供植物正常成長，不同系統與生物組合所得建議值如下：以深水式系統養殖吳郭魚搭配香草、萵苣和其他作物 (29.3 棵植株/m²)，建議投餌量以 60–100 g/m²/day 為宜 (Rakocy et al.,



2006)；生產葉萵苣 (42 棵/m²) 與尼羅吳郭魚的深水式系統，以 56 g/m²/day 的給料量可維持系統穩定，但栽種密度降到 25–30 棵/m²時葉萵苣的品質較佳 (Al-Hafedh et al., 2008)；又有研究團隊建議葉菜類作物 (20–25 棵/m²) 適合的給料量為 40–50 g/m²/day，而果實類作物 (4–8 棵/m²) 的給料量則為 50–80 g/m²/day (Somerville et al., 2014)。

表 1 吳郭魚搭配不同栽種密度福山萵苣生產情形

萵苣栽種密度	19 棵/m ²	38 棵/m ²
魚隻放養總重(kg)	73.2	71.6
魚隻收成總重(kg)	104.0	99.0
魚隻增重(kg)	30.8	27.5
投餵飼料量(kg)	39.1	40.9
飼料效率(%)	78.8	67.2
植物收穫量(kg)	82.3	147.6
植物收穫量/飼料投餵量	2.1	3.6
水中總氮濃度(ppm)	20.2	18.6
水中總磷濃度(ppm)	9.4	7.1

系統配置為 1.2 公噸養魚槽 3 個、1.2 公噸沉澱槽與過濾槽各 1 個、深水式植栽床面積 28 m²

不同植栽組合對系統生產與營養元素的影響

本團隊過去的研究顯示，系統中氮及磷鹽類僅 30–40% 被水產動物與短期葉菜類所吸收 (圖 1)，其餘則以不同形態散布在系統中，在系統中多元化種植不同植栽，包括鹿角萵苣、青蔥、小白菜及紅繡葉萵苣，系統可穩定運作，植栽作物生長也不受影響 (圖 2)。另外，由於絲瓜的根群屬中等的淺根，耐濕性在瓜類最強，最適 pH 值在 5.8–6.8，雌花始花期後須肥量增加 (戴等，2006)，因此，可栽種於魚菜共生系統中，以提高對系統氮、磷之利用。為探究系統加種絲瓜的組合對於水中氮、磷等營養鹽之吸收情形，以養殖密度為 20 kg/ton 的雜交吳郭魚 (*O. aureus* × *O. niloticus*) 循環水體中所產生的營養鹽類種植小白菜 (*Brassica rapa* L. ssp. *chinensis* Jusl.) 與秋葵 (*Abelmoschus esculentus*)，試驗組加種絲瓜 (*Luffa cylindrica*) 進行為期 8 週試驗 (圖 3)。比較表 2 中兩組魚隻收成結果，試驗組

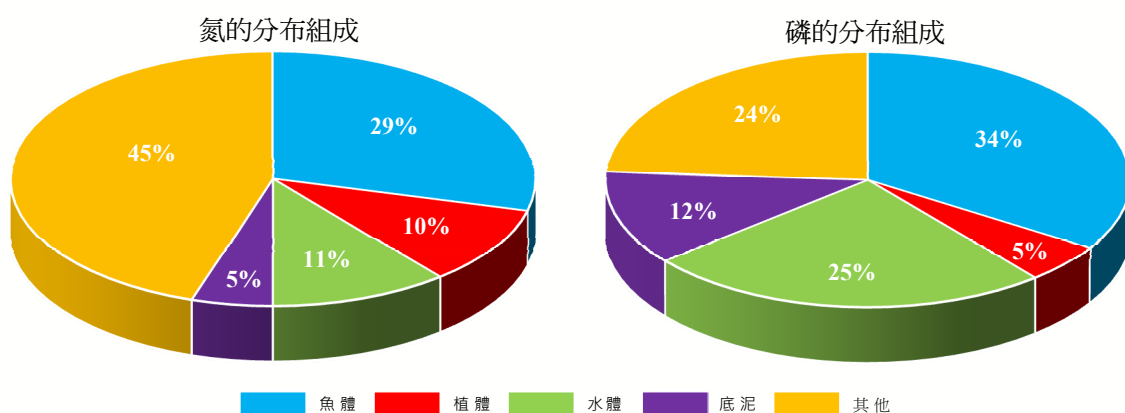


圖 1 飼料投入系統中的氮、磷分布組成





圖 2 魚菜共生系統中多元化種植的植栽



圖 3 魚菜共生系統中加種絲瓜



總增重與對照組差異不大，而兩組飼料效率約 60% 亦無差異，顯示系統加種絲瓜對於魚隻成長及飼料的吸收利用並無影響。又檢視整體植物收成量，試驗組平均 92.5 ± 11.6 kg 較對照組 58.9 ± 10.4 kg 高，且每單位飼料投餵量可收成之植物重量也是試驗組較高（試驗組 3.49 ± 0.4 ，對照組 2.48 ± 0.0 ），表示系統增加栽種絲瓜能提高系統植物收穫量。而在二者的水體中總氮濃度相差不多。一般魚菜共生系統中的磷多形成植物不易吸收利用的型式，這導致植物生長不良，而這也和系統的水質如 pH 值等有關 (da Silva Cerozi and Fitzsimmons, 2016)。本試驗總磷濃度則是試驗組低於對照組，顯示加種絲瓜對於系統中磷的吸收有較佳的表現。因此，系統中增加種植絲瓜，除可提升產量與增加系統生產種類的多元化，且對於水質穩定有不錯的表現。

系統加養觀賞蝦類對系統生產與營養元素的影響

如前言所述，系統中不管在氮或磷的利用率上，皆尚有可被利用的空間，如增加系統的生物多樣性後，提高物種間的交互作用，或許可使系統穩定性越高。另外，傳統魚菜共生系統在養殖魚種和植栽作物雖有不同的搭配組合，但其單位產值仍有限。因此，本次試驗在物種選擇上，考量到極火蝦 (*Neocaridina denticulate sinensis* var. red) 的生物特性，可清除水中的附著藻類以及殘餌，作為魚缸中的清道夫，藉此評估可否提升系統的穩定性。本次試驗養殖極火蝦以及種植水草小海帆 (*Echinodorus horizontalis*) 於魚菜共生系統中，藉此增加系統產值，並評估可否增加整體系統營養鹽的利用。本次試驗養殖雜交種吳郭魚 (*O. aureus* × *O.*

表 2 吳郭魚搭配不同植栽組合在魚菜共生系統收成量之比較

組別	栽種種類	
	小白菜、秋葵	小白菜、秋葵、絲瓜
魚隻放養總重(kg)	22.5±1.0	19.3±1.0
魚隻收成總重(kg)	36.8±1.2	35.7±1.1
魚隻增重(kg)	14.3±2.2	16.4±0.1
投餵飼料量(kg)	23.8±4.4	26.5±0.6
飼料效率(%)	60.3±2.1	62.0±1.9
植物總收成量(kg)	58.9±10.4	92.5±11.6
植物總收成量/飼料投餵量	2.48±0.0	3.49±0.4
水中總氮濃度(ppm)	5.7±2.7	6.0±1.7
水中總磷濃度(ppm)	5.2±4.8	3.7±1.5

系統配置為 1.2 公噸養魚槽 1 個，1.2 公噸沉澱槽及過濾槽各 1 個，植栽面積 28 m²



niloticus) 密度 20 kg/ton，為期 4 週，試驗期間魚隻無任何死亡，在系統的運作、水質的變化影響及養殖動物與作物生長方面，實驗組與對照組皆無差異（表 3），各組系統溶氧維持在 5–7.2 ppm，pH 值則維持在 6.5–7.8。而觀賞蝦放養密度 400 尾/ton 及 800 尾/ton，其觀賞蝦平均每尾增重分別為 68.8 ± 6.0 及 53.0 ± 9.2 mg（表 3）。測量植栽床的懸浮固體量和系統生成的底泥量，可發現有加養觀賞蝦的組別底泥蓄積量較低，尤其養殖觀賞蝦密度較高的 800 尾/ton 組，明顯低於對照組，另外，在底泥的含氮量及含磷量上，養殖 800 尾/ton 組顯著低於對照組，而養殖 400 尾/ton 組只有在含氮量上，顯著低於對照組（圖 4）。故在系統中養殖觀賞蝦，對底泥中的有機物具有再利用效益。Lima 等人（2019）在魚菜共生系統中養殖沼蝦（*Macrobrachium amazonicum*）並栽種萵苣進行效益評估，結果指出在適當的養殖密度下，系統養殖蝦類並不影響作物的生長。

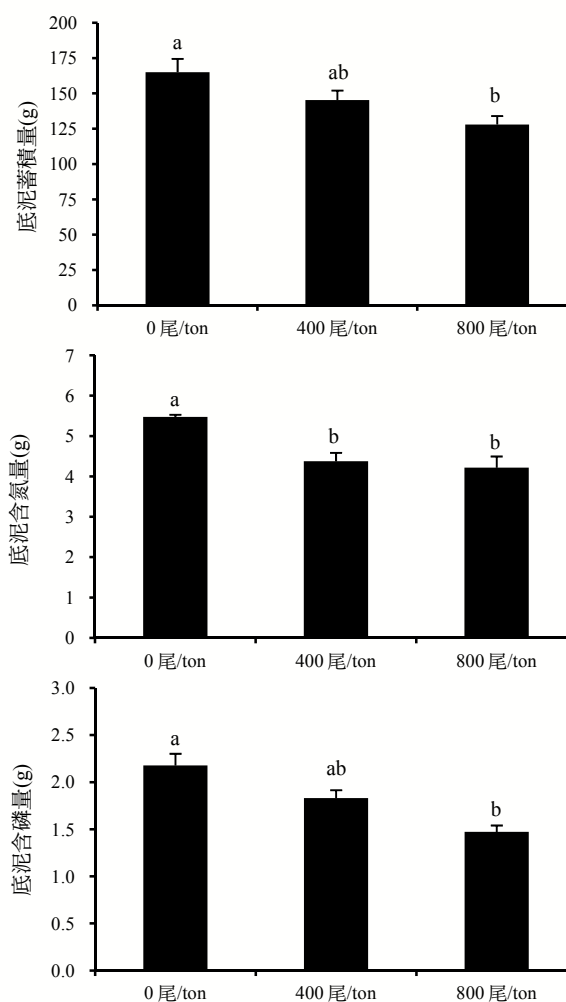


圖 4 系統加養觀賞蝦減少底泥、氮及磷的蓄積

表 3 吳郭魚、水草及觀賞蝦之魚菜系統的收成量比較

極火蝦放養密度	0 尾/ton	400 尾/ton	800 尾/ton
魚隻放養總重(kg)	10.5±0.4	10.3±0.2	10.3±0.1
魚隻收成總重(kg)	11.5±0.5	11.4±0.4	11.3±0.1
魚隻增重(kg)	1.0±0.1	1.1±0.2	1.0±0.1
飼料效率(%)	52.0±2.8	54.7±8.9	49.7±4.8
極火蝦放養總重(g)	-	31.3±1.6	57.6±4.5
極火蝦收成總重(g)	-	58.8±0.8	100.0±2.8
極火蝦增重(mg/尾)	-	68.8±6.0	53.0±9.2
水草總收成重(g)	3483.0±434.2	3364.5±914.3	3342.5±457.5
水草增重(g/棵)	33.1±3.7	31.2±8.3	31.2±3.9

系統配置為 500 L 養魚槽 1 個，200 L 沉澱槽及過濾槽各 1 個，植栽面積 2.8 m²





最近，Martins 等人 (2020) 則在系統中同時養殖尼羅吳郭魚 (*O. niloticus*) 和白蝦 (*Litopenaeus vannamei*)，控制水中的碳、氮比例，比較系統中有無添加生物絮團，對於養殖生物及植栽的收穫評估，結果顯示，系統中有效的控制碳、氮比，有助於養殖動物的生長，並且有添加生物絮團的組別，底泥的生成量減少，作者推測系統中的營養鹽被轉化成養殖動物能利用的形式，因此減少了底泥的蓄積。而系統中底泥再利用方面的研究，也有許多文獻提及，像是系統中厭氧或好氧處理，發現好氧環境下，底泥中的營養鹽更能有效的被釋出，如磷酸鹽類經好氧處理後，相較對照組，水中可溶性的磷增加 3.2 倍，且並不因好氧處理而降低水中硝酸鹽的濃度 (Monsees et al., 2017)，使得植栽更能利用這些營養鹽；Zhang 等人 (2020) 利用一些生物濾材，如陶瓷環、玉米秸稈及小麥秸稈混合，作為過濾介質，能有效的將魚菜系統中的固形物分離並轉化成營養鹽，如魚體排泄物中的鈣及鎂離子能有效的回收利用。綜合本試驗結果與近年來的研究文獻顯示，有許多方式皆可提高系統的營養鹽再利用率，往後可望整合各研究結果，優化傳統魚菜共生系統，提升系統的產能及產值，達到資源循環再利用的目的。

觀賞水族與香草植物之共生系統

觀察不同國家地區的飲食文化，西方國家食用生菜較食用魚普遍且頻率高，因此魚

菜共生以蔬菜為主產品，魚為副產品，魚菜共生所生產的食物，尤其是蔬菜，不論量與質都能與市場需求契合，這點對於產業的發展是有利的。而在華人的市場中，魚菜共生多是以植物淨化養魚的水為主要訴求，並不以蔬菜生產來獲利 (陳與梁，2016)。若要發展商業化需改變營運模式以多元運用提升系統產能與產值，可考慮產值較高的非食用性魚介類與植物，如觀賞魚、觀賞蝦、香草植物或藥用植物等。

魚蝦類不管是淡水或海水，可不可食用，只要可滿足觀賞與休閒之用途，即為觀賞魚蝦。因有別於食用之用途，其被附加其他療癒身心的功能，因此，價格往往較食用魚為高。例如常見的錦鯉 (圖 5 上)，因可作為庭院造景之用，其身價往往萬元起跳。而觀賞蝦類因顏色艷麗造型特殊 (圖 5 下)，且能協助清理水族箱中的有機碎屑與藻類，頗受觀賞水族界的歡迎，因個體小重量輕，若換算以重量計價，每公斤常高達數千元以上。魚菜共生系統除可以作為食物生產之外，同時可以作為休閒觀光與食農教育之用，利用觀賞魚蝦的特質，吸引群眾的目光，提升魚菜共生的附加價值。另外，植栽方面除了一般的葉菜類，也可種植具有香味的香草植物，一般具特殊香味的植物，其部分組織所含有之成分，可供人類作為食物添加之香料、藥用、美容效用或其他用途。例如歐洲常見種植於魚菜共生系統供作食材的薄荷、羅勒、紫蘇與金蓮花等 (Buzby and Lin, 2014; Shete et al., 2017; Ferrarezi and Bailey, 2019)。香草植物因具有芳香物質，





圖 5 魚菜共生系統可養殖觀賞魚蝦，例如錦鯉(上)、極火蝦(下)

可以舒緩身心，又因具有特殊風味，可以作為食品添加以提升食物附加價值。除部分種類因原生環境較乾燥，不適合種植於魚菜共生系統，多數皆可運用介質而栽植在魚菜共生系統中。某些植物含有益的成分，但因原生環境破壞與氣候變遷造成品質低下及污

染，以及人為採運致使用致使數量減少甚或消失(林等，2009)。可考慮在魚菜共生系統中栽植，利用其原生環境的需求，生產較高價位的水生藥用植物，如 Ferrarezi and Bailey (2019) 提及，香草植物具有廣泛的市場，除觀賞外還可當作藥材、烹飪香料或者提煉精油，以羅勒為例，羅勒品系超過 30 種，如甜羅勒、檸檬羅勒、灌木羅勒、紫葉羅勒和泰國羅勒等，不同種類具有不同的經濟價值，像是紫葉羅勒能夠提煉花青素，而花青素經濟價值高，具有抗氧化功能，因此以魚菜共生系統種植五種不同的羅勒，包括熱那亞羅勒、檸檬羅勒、紫葉羅勒、紅魯賓羅勒和辣球形羅勒，並養殖吳郭魚，評估在熱帶地區栽種羅勒的效益，結果發現依據實驗系統、地理位置及氣候環境，連續栽種兩個季節，其中熱那亞羅勒和辣球形羅勒具有最佳的收穫量。總結上述，本中心也嘗試養殖觀賞魚並種植香草植物，而大部分傳統魚菜共生系統的造型無法符合景觀農業的需求，因此，設計開發景觀與利用兼具的系統，模擬 DNA 雙股螺旋的外型(圖 6)，具有亮麗的外觀以及增加空間的可利用性，並養殖白玉蝴蝶鯉，種植百里香、迷迭香、羅勒及薰衣草，可擺設於大樓中廊、校園及醫院大廳等地方，供人觀賞，可符合景觀農業需求。

魚菜共生的複合式生產模式符合環境友善與生態和諧，但因相關資訊不足，使得整體發展緩慢，如何使其生產效能高於傳統或現有的生產系統，或是如何使產品在市場上產生區隔，將是後續研究的重點。





圖 6 DNA 雙螺旋魚菜系統

結論

氮在植物代謝與生長上扮演關鍵性的角色 (張, 1981; 柯, 2002), 但是對於水產動物而言, 水體中的氨氮與亞硝酸鹽類, 卻會造成毒性或生長緊迫。上述三個試驗過程中, 水體中含氮化合物質的濃度均能維持在水產動物適合生長的範圍。在不同植栽密度試驗結果發現, 改變福山萵苣的栽種密度, 可以提升系統產量, 但對水質影響不大, 是由於福山萵苣對於肥分需求較低 (楊, 2017), 就氮及磷鹽類而言, 系統種植福山萵苣的面積可再增加, 或選擇性搭配栽種中、高肥分需求之植栽。例如, 在不同植

栽組合試驗中, 發現加種絲瓜會使系統植物收成總量增加, 應與絲瓜會攀藤生長, 擴充植株生長的立體空間有關, 且此系統水中的磷鹽類濃度低於未種絲瓜組, 應與絲瓜開花時需較多磷肥有關, 然對於植物生長有關的其他微量元素是否充足, 需待日後進行相關試驗方能瞭解。而在系統增加養殖觀賞蝦的試驗結果發現, 系統中的觀賞蝦對底泥中的有機物有再利用效益, 可降低底泥的蓄積。經由以上這些魚菜共生循環系統的研究結果得知, 增加生物豐度, 不會影響整個系統的運行, 且有助於增加營養鹽的利用, 達到循環再利用的目標, 並創造更高的附加價值, 可提供未來一個新興的養殖技術及方向。

參考文獻

- 林宜信、黃冠中、張永勳 (2009) 臺灣水生藥用植物圖鑑。行政院衛生署中醫藥委員會, 131 pp。
- 柯勇 (2002) 植物生理學。藝軒圖書出版社, 762 pp。
- 張仲民譯、麻生末雄、麻生昇平、松崎敏英 (1981) 作物之營養與肥料。徐氏基金會, 188 pp。
- 陳瑤湖、梁榮元 (2016) 魚菜共生體系發展研究與展望。農業生技產業季刊, 46: 43-51。
- 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。
- 楊清富 (2017) 魚菜共生系統之原理與應用方法。臺中區農業改良場特刊, 第 133 號, 63-80。
- 戴順發、黃祥益、陳昱、陳明陷 (2006) 絲瓜栽培及病蟲害防治技術。高雄區農技報導, 第 73 期, 25 pp。
- Al-Hafedh, Y. S., A. Alam and M. S. Beltagi (2008) Food production and water conservation in a



- recirculating aquaponic system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. *J. World Aquac. Soc.*, 39: 510-520.
- Buzby, K. M. and L. S. Lin (2014) Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacult. Eng.*, 63: 39-44.
- da Silva Cerozi, B. and K. Fitzsimmons (2016) Use of *Bacillus* spp. to enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems. *Sci. Hortic.*, 211: 277-282.
- Fanga, Y., Z. Hua, Y. Zoua, J. Zhanga, Z. Zhua, J. Zhangb and L. Niec (2017) Improving nitrogen utilization efficiency of aquaponics by introducing algal-bacterial consortia. *Bioresour. Technol.*, 245: 358-364.
- Ferrarezi, R. and D. S. Bailey (2019) Basil performance evaluation in aquaponics. *HortTechnology*, 29(1): 1-9.
- Liang, J. and Y. Chien (2013) Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia–water spinach raft aquaponics system. *Int. Biodeter. Biodegr.*, 85: 693-700.
- Lima J. F., S. S. Duarte, A. M. Bastos and T. Carvalho (2019) Performance of an aquaponics system using constructed semi-dry wetland with lettuce (*Lactuca sativa* L.) on treating wastewater of culture of Amazon River shrimp (*Macrobrachium amazonicum*). *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26(13): 13476-13488.
- Martins, M. A., M. A. Poli, E. C. Legarda, I. C. Pinheiro, R. F. S. Carneiro, S. A. Pereira, M. L. Martins, P. Gonçalves, D. D. Schleder and F. do Nascimento Vieira (2020) Heterotrophic and mature biofloc systems in the integrated culture of Pacific white shrimp and Nile tilapia. *Aquaculture*, 514: 734517.
- Maucieri, C., C. Nicoletto, R. Junge, Z. Schmautz, P. Sambo and M. Borin (2018) Hydroponic systems and water management in aquaponics: a review. *Ital. J. Agron.*, 13: 1-11.
- Monsees, H., J. Keitel, M. Paul, W. Kloas and S. Wuertz (2017) Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. *Aquac. Environ. Interact.*, 9: 9-18.
- Rafiee, G. and C. R. Saad (2005) Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 244: 109-118.
- Rakocy, J. E., M. P. Masser and T. M. Losordo (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Southern regional aquaculture publication, No. 454.
- Shete, A. P., A. K. Verma, N. K. Chadha, P. Chandra, M. H. Chandrakant and K. K. T. Nuwansi (2017) Evaluation of different hydroponic media for mint (*Mentha arvensis*) with common carp (*Cyprinus carpio*) juveniles in an aquaponic system. *Aquacult. Int.*, 25: 1291-1301.
- Somerville, C., M. Cohen, E. Pantanella and A. Stankus (2014) Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical paper No. 589. FAO, Rome, Italy, 262 pp.
- Yogev, U., A. Barnes and A. Gross (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. *Water*, 8: 589; doi:10.3390/w8120589.
- Zhang, H., Y. Gao, H. Shi, C. T. Lee, H. Hashim, Z. Zhang, W. M. Wu and C. Li (2020) Recovery of nutrients from fish sludge in an aquaponic system using biological aerated filters with ceramsite plus lignocellulosic material media. *J. Clean. Prod.*, 258: 120886.
- Zou, Y., Z. Hu, J. Zhang, H. Xie, S. Liang, J. Wang and R. Yan (2016) Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 23(7): 6671-6679.

