

人工浮島種植園藝作物之水質改善回顧與分析

Review and analysis of water quality improvement by floating treatment wetlands planted with horticulture crops

國立臺北大學自然資源與環境管理研究

碩士生

助理教授

陳怡嘉

王之佑

Yi-Chia Chen

Chih-Yu Wang

摘要

人工浮島(floating treatment wetland, FTW)是一種基於自然為本解方(Nature-based Solutions)的新興技術之一，可用於水域中的點源和非點源污染控制，以改善水質。FTW是由人工搭建而成，主結構是由木筏或PVC管等具有浮力材質製成，植物可在其表面生長且根部可直接生長於水體中。通過植物及附生微生物在生長過程中分解、吸收水中的營養物質和其他污染物，FTW能有效去除水體中的氮、磷等營養元素，達到淨化水質的目的。這種模擬自然濕地的生態工程技術，充分利用了太陽能驅動及植物的淨化功能，為水質改善提供了一種永續的解決方案。然而，FTW之植物生長量控制與移除的永續管理策略相關研究仍相對有限。在FTW上種植並定期收穫具有價值的園藝作物，包括蔬菜和花卉等，具有提供經濟誘因並支持整個系統運作之潛力。在FTW上種植園藝作物的做法，不僅能充分利用植物的淨化功能，還能帶來經濟效益，實現生態效益與經濟效益的雙重目標。因此，在FTW引入園藝作物栽培是一種值得探索的可行性方案。

本研究採用系統性回顧法並結合統計分析，使用ScienceDirect資料庫，收集人工浮島種植園藝作物相關之水質改善文獻。透過彙整已出版之文獻，以獲取經濟作物運用在FTW的相關研究資料，包含水質以及系統設計參數。上述資料經由統計分析可進一步了解FTW種植園藝作物其水質處理效果及各參數相關性。本研究結果可為FTW應用及管理上提供更多永續經營的參考依據。

關鍵詞：人工浮島，園藝作物，水質改善，經濟可行性，永續發展

Abstract

Floating treatment wetlands (FTWs) are nature-based solutions to control both point

and nonpoint source pollution and improve water quality. The FTW is a kind of artificial wetlands built with buoyant materials such as wood rafts or PVC pipes. Plants can grow on the raft with their roots can be in permanent contact in the water directly. FTWs can effectively purify water by absorbing nutrients and other pollutants from the water through the growth of plants and epiphytic microorganisms. This helps in the removal of nutrients like nitrogen and phosphorus from the water, thereby improving water quality. This ecological engineering approach imitates natural wetlands and fully utilizes solar energy and plant purification functions, providing a sustainable solution for improving water quality. However, limited research exists on the sustainable management strategy for controlling and removing FTW plant growth. Cultivating and harvesting valuable horticulture crops, including vegetables and flowers, on FTW could provide financial incentive to supports the operation and maintenance of the system. The horticulture crops grown on FTW can not only remove pollution in water, but also provide economic benefits. Therefore, horticulture crops cultivation on FTW is a feasible solution with great potentials.

This study adopted a systematic review method combined with statistical analysis. ScienceDirect database is used to collect studies regarding water quality improvement related to the cultivation of horticulture crops on FTWs. By compiling the published studies, selected research data, including water quality and system design parameters, are collected. The aforementioned data can be used to further understand the water quality treatment effect and the correlation of various parameters through statistical analysis. The results of this study can provide more information about sustainable operation and management of FTWs.

Keywords: Floating treatment wetlands, Horticulture crops, Water treatment, Economic viability, Sustainable development

一、前言

湖泊、河流和池塘等地表水體在社會、環境和經濟活動中扮演著至關重要的角色，為人類提供多種資源和服務。然而，隨著近年來的高度城市化和工業化，以及經濟活動的快速發展，上述水體的污染問題愈發加劇，對公民健康生活與福祉構成危害[1]。因此，水質改善成為當前環境科學與生態工程領域的重要研究方向。

人為活動對地表水體的污染影響深遠，成為水質惡化的主要原因。廢水中過量的氮(N)、磷(P)及其他營養物質流入自然水體，會引發藻類的過度繁殖，造成水體優養化。這一現象會導致水中溶氧量下降、水質退化，並發出惡臭，最終影響水體的物種組成和豐富度，損害其生態系統服務功能[15]。其中，非點源污染(Non-point source Pollution, NPS)是地表水中氮和磷的主要來源[4]。與點源污染相比，非點源污染更具分散性和廣泛性，受到降雨特徵、地形、土壤類型和土地利用方式的影響，因而在識別和控制上相對困難。因此，非點源污染成為自然水體優養化的重要原因[13,25]。

傳統的水質治理方法往往需要大量資源和長時間的投入，而人工浮島(floating treatment wetland, FTW)作為一種新興的水質改善技術，能有效應對水體優養化問題。FTW 因其能有效地去除水體中的氮、磷等營養元素，達到淨化水質的目的，且不需占用任何土地面積而受到關注[21,9]。FTW 是由木筏或 PVC 管等具有浮力的材質搭建而成，可支持植物在其表面生長，並使根系直接延伸至水中。這些植物在生長過程中吸收水中的營養物質和其他污染物，從而降低水體的優養化程度。同時，植物根系提供較大的表面積，有助於附生微生物之生物膜(biofilm)拓殖(colonization)，進一步促進植物對水中營養物質的分解和吸收[18]。

FTW 系統通常使用常見的溼地植物作為主要植被。然而，將園藝作物如蔬菜和花卉納入 FTW 系統，不僅能有效改善水質，還能創造農業生產的機會，進而支持整體系統的永續運作。目前已有多項研究指出 FTW 系統上栽種具商業價值作物的潛力。例如，已有研究成功在 FTW 上培育開花植物，如美人蕉和鳶尾花，顯示出園藝作物作為切花販售和盆栽銷售之潛在市場機會[6,16]。定期收穫 FTW 上的植物進行銷售，不僅能實現循環經濟，還能降低植株死亡及其分解後釋放營養物質回水中的風險[7]，以實現生態效益與經濟效益的雙贏，達到永續管理之目標。

本研究採用統計分析方法，彙整 FTW 系統中種植園藝作物對水質改善的應用與成效，以及其與各種水質和設計參數之間的相關性，並評析 FTW 系統的主要植被種類及其對水質改善的影響。過去多聚焦於減少水體中營養物質的研究，而針對 FTW 種植園藝植物並進行收穫的永續管理策略之探討仍相對有限。因此，未來研究方向期望整合更多不同的研究成果，為 FTW 系統的永續經營提供更豐富的參考依據。

二、 研究方法

1. 資料收集與整理

本研究旨在收集 FTW 種植園藝作物相關之水質改善研究。以 ScienceDirect 為資料庫，使用「人工浮島(floating treatment wetlands, FTWs)」、「人工浮島(constructed floating wetlands, CFWs)」、「園藝作物(horticulture crops)」、「作物(crops)」、「水質改善(Water treatment)」、「營養物質移除(nutrient removal)」為關鍵詞搜尋，所收集的文獻詳列於表 1。然而，部分研究未提供本研究所需之實驗結果及資料，因此並非所有列於表 1 的文獻均可進行進一步的統計分析。本研究納入文獻需符合以下標準：(1)不包含回顧型文獻；(2)實驗設計中所使用的水體必須為污水、廢水或模擬的優養化水體；(3)文獻中需明確提供各項營養物質去除效率的資料。最終，經過篩選後，納入 12 篇符合上述標準的文獻進行後續的統計分析，其資料集如表 2 所示。

表 1 本研究收集之 FTW 研究摘要

研究	實驗規模	水體	植物種類	平均移除率(%)	國家
[12]	生態試驗箱	模擬優養化水體	<i>Tagetes erecta</i>	TN: 64.3; TP: 86.2	美國
[6]	生態試驗箱	高養分水體	<i>Iris ensata</i>	a	美國
[16]	生態試驗箱	製備灰水	<i>Canna sp.</i>	TN: 84.5; TP: 45.2; BOD5: 75.0; COD: 61.3	希臘
[16]	生態試驗箱	製備灰水	<i>Iris sp.</i>	TN: 65.5; TP: 41.9; BOD: 82.6; COD: 65.8	希臘
[16]	生態試驗箱	製備灰水	<i>Iris orientalis & Cyperus sp. & Acorus gramineus</i>	TN: 65.5; TP: 50.0; BOD: 78.3; COD: 79.6	希臘
[20]	生態試驗箱	河水	<i>Canna generalis</i>	TN: 83	越南
[2]	生態試驗箱	生活污水	<i>Canna indica & Chrysopogon zizanioides</i>	TN: 76.3; TP: 81.6; BOD: 94.0; COD: 92.1	印度
[2]	生態試驗箱	生活污水	<i>Canna indica & Hibiscus rosa-sinensis</i>	TN: 64.3; TP: 64.4; BOD: 70.6; COD: 71.5	印度
[2]	生態試驗箱	生活污水	<i>Chrysopogon zizanioides & Hibiscus rosa-sinensis</i>	TN: 65.1; TP: 73.8; BOD: 90.9; COD: 89.2	印度
[8]	生態試驗箱	生活污水	<i>Ipomoea aquatica</i>	TN: 25.5; BOD5: 52.1; COD: 45.8	泰國
[11]	生態試驗箱	河水	<i>Ipomoea aquatica</i>	NH4-N: 39.4; TN: 54.4; TP: 55.3	中國
[24]	生態試驗箱	河水	<i>Oenanthe javanica</i>	NH4-N: 94.5; TN: 91.3; TP: 57.5	中國
[28]	生態試驗箱	河水	<i>Oenanthe javanica</i>	NH4-N: 96.7; TN: 90.8; TP: 76.5; COD: 63.5	中國
[26]	批次處理	製備營養液	<i>Oenanthe javanica</i>	NH4-N: -3.7; TN: 43.5; TP: 11.2; COD: 29.2	中國
[17]	生態試驗箱	河水	<i>Canna sp.</i>	NH4-N: 100; TN: 50.4	中國
[3]	生態試驗箱	二級處理後的污水	<i>Canna sp.</i>	NH4-N: -36.0	土耳其
[23]	生態試驗箱	模擬優養化水體	<i>Canna flaccida & Juncus effusus</i>	TN: 70.8; TP: 60.2	美國
[9]	生態試驗箱	地下水	<i>Iris sp.</i>	TN: 98.0; TP: 92.0	荷蘭

a:缺乏數據

由於並非所有文獻均提供本研究所需之完整資料，因此本研究根據原始資料估算未說明之實驗設計參數。表 2 彙整收集文獻之植被覆蓋率、水深、水力停留時間(Hydraulic Retention Time, HRT)、水力負荷率(Hydraulic Loading Rate, HLR)以及 NH₄-N、TN、TP 的入流與出流濃度及其移除率資料。考慮到大多數實驗隨季節變化而進行，導致溫度範圍過寬，且在較暖的氣候下，FTW 上植物對養分的移除率通常較高。儘管移除效率會受到低溫的顯著影響，但當水溫高於 13°C 時，則此環境因子不再產生顯著影響[5]。因此，水溫或氣溫所造成的影響未納入本研究分析考量。

表 2 中之資料均直接來源於原始文獻。對於缺乏某些資料的情況，本研究將依據以下公式(1)&(2)進行運算[14]。針對未提供 HLR 的文獻，其資料使用以下公式進行計算：

$$HLR = \frac{V}{A \times HRT} \quad (1)$$

其中 V(m³)為水池體積，A(m²)為水池表面之面積，HRT(d)為水力停留時間。對於資料以入流和出流濃度(分別為 C_{in} 和 C_{out})表示之文獻，移除率(R)透過以下公式計算：

$$R(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

植被覆蓋率的計算方式為 FTW 面積佔水池總面積的百分比。然而，在文獻[8,9,17,26,27]中並未提供相關的植被覆蓋率資料。由於這些文獻的實驗設計中，水池邊界與 FTW 相連，因此在此情況下，假設植被覆蓋率為 100%表示。

2. 統計分析

本研究使用 RStudio 4.4.1 進行統計分析，以評估 FTW 種植園藝作物對水質改善的成效。所收集的資料均為連續性數據，且呈現非常態分配，因此採用斯皮爾曼(Spearman)相關係數分析來衡量兩個或多個變數之間的關聯性。為了量化 NH₄-N、TN 和 TP 濃度降低與設計參數之間的關係，首先排除各研究中的對照組資料，因其不符合本研究的探討目的。接著，研究生成 Spearman 相關係數矩陣，並進一步進行迴歸分析，以量化 NH₄-N、TN 和 TP 濃度降低與其他設計參數之間的關係。最後，採用逐步迴歸分析(stepwise regression analysis)篩選出與 NH₄-N、TN 和 TP 濃度降低最相關之自變數，並將其引入以下多元線性迴歸模型中：

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (3)$$

其中，Y 是因變數的預測值，X₁、X₂...X_n 是自變數。因變數是 NH₄-N、TN 或 TP 濃度降低量 $\Delta C = C_{in} - C_{out}$ (mg/L)，而自變數為：植被覆蓋率、深度(m)、入流濃度(mg/L)、HLR (m/d)和 HRT (d)。

表 2 本研究收集文獻之氮、總氮和總磷移除率數據彙整

研究 植物種類	植被 覆蓋 率	水深 (m)	HLR(m/d)	HRT(d)	NH ₄ -N			TN			TP		
					入流	出流	移除率	入流	出流	移除率	入流	出流	移除率
					(mg/L)	(mg/L)	(%)	(mg/L)	(mg/L)	(%)	(mg/L)	(mg/L)	(%)
[12] <i>Tagetes erecta</i>	0.85	0.76	0.011	84	a	a	a	38.57	13.77	64.31	5.84	0.81	86.16
[16] <i>Canna</i> sp.	0.50	0.3	0.040	7.5	a	a	a	8.70	1.90	78.16	3.1	1.90	38.71
[16] <i>Canna</i> sp.	0.80	0.3	0.040	7.5	a	a	a	8.70	0.80	90.80	3.1	1.50	51.61
[16] <i>Iris</i> sp.	0.50	0.3	0.040	7.5	a	a	a	8.70	3.40	60.92	3.1	2.00	35.48
[16] <i>Iris</i> sp.	0.80	0.3	0.040	7.5	a	a	a	8.70	2.60	70.11	3.1	1.60	48.39
[16] <i>Iris orientalis</i> & <i>Cyperus</i> sp. & <i>Acorus</i> <i>gramineus</i>	0.50	0.3	0.040	7.5	a	a	a	8.70	4.10	52.87	3.1	2.00	35.48
[16] <i>Iris orientalis</i> & <i>Cyperus</i> sp. & <i>Acorus</i> <i>gramineus</i>	0.80	0.3	0.040	7.5	a	a	a	8.70	1.90	78.16	3.1	1.10	64.52
[2] <i>Canna indica</i> & <i>Chrysopogon</i> <i>zizanioides</i>	0.59	0.56	0.019	30	54	44.50	82.4	38.00	9.99	73.7	8	1.90	76.2
[2] <i>Canna indica</i> & <i>Chrysopogon</i> <i>zizanioides</i>	0.59	0.56	0.019	30	54	a	a	38.00	8.02	78.9	8	1.05	86.9
[2] <i>Canna indica</i> & <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	0.59	0.56	0.019	30	54	42.23	78.2	38.00	11.13	70.7	8	3.41	57.4
[2] <i>Canna indica</i> & <i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	0.59	0.56	0.019	30	54	a	a	38.00	16.00	57.9	8	2.29	71.4
[2] <i>Chrysopogon</i> <i>zizanioides</i> & <i>Hibiscus</i> <i>rosa-sinensis</i>	0.59	0.56	0.019	30	54	45.47	84.2	38.00	18.51	51.3	8	1.71	78.6
[2] <i>Chrysopogon</i> <i>zizanioides</i> & <i>Hibiscus</i> <i>rosa-sinensis</i>	0.59	0.56	0.019	30	54	43.42	80.4	38.00	8.02	78.9	8	2.48	69
[8] <i>Ipomoea aquatica</i>	1	1.10	0.063	16	16.66	3.59	78.45	19.99	4.90	75.49	a	a	a
[8] <i>Ipomoea aquatica</i>	1	1.10	0.125	8	27.45	16.19	41.02	31.96	19.52	38.92	a	a	a
[8] <i>Ipomoea aquatica</i>	1	1.10	0.250	4	25.32	23.92	5.53	29.42	26.97	8.33	a	a	a
[8] <i>Ipomoea aquatica</i>	1	1.10	0.375	2.7	25.32	23.21	8.33	29.42	26.55	9.76	a	a	a
[8] <i>Ipomoea aquatica</i>	1	1.10	0.500	2	27.45	23.09	15.88	31.96	26.59	16.80	a	a	a
[8] <i>Ipomoea aquatica</i>	1	1.10	0.625	1.6	16.66	17.13	-2.82	19.99	19.23	3.80	a	a	a
[11] <i>Ipomoea aquatica</i>	0.14	1.8	0.160	7	2.16	1.13	47.69	5.15	1.96	61.94	0.97	0.4	62.89
[11] <i>Ipomoea aquatica</i>	0.14	1.8	0.220	5	2.16	1.3	39.81	5.15	2.29	55.53	0.97	0.4	55.67
[11] <i>Ipomoea aquatica</i>	0.14	1.8	0.370	3	2.16	1.5	30.56	5.15	2.8	45.63	0.97	0.5	47.42
[24] <i>Oenanthë javanica</i>	0.56	0.48	0.014	15	8.37	0.46	94.50	18.32	1.59	91.32	0.8	0.3	57.50
[28] <i>Oenanthë javanica</i>	1	0.38	0.035	35	9.33	0.31	96.68	12.58	1.16	90.78	0.68	0.2	76.47
[26] <i>Oenanthë javanica</i>	1	0.75	0.200	3	0.93	1.19	-27.96	3.76	2.59	31.12	1.25	1.2	6.40
[26] <i>Oenanthë javanica</i>	1	0.75	0.300	2	0.91	1.31	-43.96	4.57	2.95	35.45	1.35	1.2	14.07
[26] <i>Oenanthë javanica</i>	1	0.75	0.600	1	1.38	0.54	60.87	7.94	2.86	63.98	1.54	1.3	12.99
[17] <i>Canna</i> sp.	1	0.5	0.100	5	2.75	0	100.00	8.71	4.32	50.40	a	a	a
[23] <i>Canna flaccida</i> & <i>Juncus effusus</i>	0.95	0.51	0.190	3	a	a	a	0.85	0.14	83.53	0.08	0	75.00
[23] <i>Canna flaccida</i> & <i>Juncus effusus</i>	0.95	0.51	0.190	3	a	a	a	1.88	0.79	57.98	0.22	0.1	45.45
[9] <i>Iris</i> sp.	1	0.25	0.003	91	a	a	a	3.90	0.08	98.00	0.17	0.01	92.00

a:缺乏數據

三、結果與討論

FTW 系統的水質改善效率與其他污水處理技術一樣，會受到實驗設計參數的影響，包括植被覆蓋率、水深、水力停留時間(Hydraulic Retention Time, HRT)、水力負荷率(Hydraulic Loading Rate, HLR)以及 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、總氮(TN)和總磷(TP)的入流濃度。因此，量化 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 和 TP 濃度降低與設計參數之間的關係，對於進一步探討其相關性至關重要。

1. 總氮的移除

根據表 1 的數據，在 FTW 系統中，總氮(TN)的平均移除率為 52.1%，其最高移除率達 98%，而最低則為 3.8%。根據 Vymazal [22]對各類人工濕地營養物質移除效果的研究，FTW 的 TN 平均移除率為 54.8%。表 3 中的 Spearman 相關係數分析顯示，TN 濃度的降低與 HRT 之間存在高度正相關($r = 0.788$; $p = 0.00$; $n = 31$)，同樣地，與入流濃度也呈現高度正相關($r = 0.777$; $p = 0.00$; $n = 31$)。相對地，TN 濃度與 HLR 之間則顯示出高度負相關($r = -0.753$; $p = 0.00$; $n = 31$)。根據逐步多元迴歸分析方法，篩選出 HLR 和入流濃度作為自變數引入迴歸模型中，推導出以下方程式：

$$\Delta C_{\text{TN}} = 4.371 - 22.52 \text{ HLR} + 0.504 C_{\text{in}}$$

$$(r^2 = 0.790; n = 31; p = 0.00) \quad (4)$$

其中， $\Delta C_{\text{TN}} = C_{\text{in}} - C_{\text{out}}$ 為 TN 降低之濃度(mg/L)， C_{in} 和 C_{out} 分別為 TN 的入流與出流濃度(mg/L)，HLR 為水力負荷率(m/d)。

TN 濃度的降低與 HRT 之間存在高度正相關，表示延長 HRT 有助於提高養分移除效率，較長的 HRT 使水體中的養分有更多時間與植物根系和微生物接觸，從而增加總氮移除量。另外，在統計分析結果中雖顯示 HRT 比入流濃度有著更高度的正相關，但 [8,26]的研究中顯示出，在提高 TN 移除率方面，入流濃度的增加比 HRT 的增長具有更大的影響。

表 3 TN 濃度降低有關之 Spearman 相關係數

	植被覆 蓋率	水深(m)	HLR(m/d)	HRT(d)	入流濃度(mg/L)	降低之濃度 (mg/L)
植被覆蓋率	Spearman's r 1 Sig. (<0.005)					
水深(m)	Spearman's r -0.002 Sig. (<0.005)	1				
HLR(m/d)	Spearman's r 0.327 Sig. (<0.005)	0.537	1			
HRT(d)	Spearman's r -0.344 Sig. (<0.005)	-0.168	-0.835	1		
		0.050	0.350	0.000		

入流濃度(mg/L)	Spearman's r	-0.015	0.163	-0.425	0.515	1	
	Sig. (<0.005)	0.935	0.380	0.017	0.003		
降低之濃度 (mg/L)	Spearman's r	-0.261	-0.207	-0.753	0.788	0.777	1
	Sig. (<0.005)	0.156	0.263	0.000	0.000	0.000	

註:粗體表示有高度相關

2. 總磷的移除

根據表 1 所示，FTW 系統中總磷(TP)的移除率範圍介於 6.4%至 92%之間，平均移除率為 52.6%，這一數值高於 Vymazal [22]所報告 FTW 之 TP 平均移除率 42.1%。

關於 TP 的 Spearman 相關係數分析如表 4 所示，TP 濃度的降低與入流濃度之間存在非常高度的正相關($r = 0.911$; $p = 0.00$; $n = 24$)，而與 HRT 則呈中度正相關($r = 0.617$; $p = 0.001$; $n = 24$)，與 HLR 則顯示出中度負相關($r = -0.576$; $p = 0.003$; $n = 24$)。基於逐步多元迴歸分析方法，可以推導出以下方程式：

$$\Delta C_{TP} = -0.618 + 0.012 \text{ HRT} + 0.75 C_{in}$$

$$(r^2 = 0.948; n = 24; p = 0.00) \quad (5)$$

其中， $\Delta C_{TP} = C_{in} - C_{out}$ 為 TP 降低之濃度(mg/L)， C_{in} 和 C_{out} 分別為 TP 的入流與出流濃度(mg/L)，HRT 為水力停留時間(d)。

在研究[2,11,23]中，當入流的 TP 濃度較高時，FTW 系統中植物根系及其附生微生物的吸收能力會顯著增強，從而提升植物對磷的吸收率，因此入流濃度與 TP 濃度的降低之間存在著非常高度的正相關性。另外，水體中的磷主要通過植物根部進行吸收，而磷的吸收量與植物的生長密切相關，隨著時間的推移，植物對磷的吸收量會不斷增加[27]。因此，能證明 HRT 的增加與 TP 濃度的降低之間確實呈現出正相關性。

表 4 TP 濃度降低有關之 Spearman 相關係數

		植被覆 蓋率	水深(m)	HLR(m/d)	HRT(d)	入流濃度 (mg/L)	降低之濃 度(mg/L)
植被覆蓋率	Spearman's r	1					
	Sig. (<0.005)						
水深(m)	Spearman's r	-0.002	1				
	Sig. (<0.005)	0.993					
HLR(m/d)	Spearman's r	0.327	0.537	1			
	Sig. (<0.005)	0.063	0.001				
HRT(d)	Spearman's r	-0.344	-0.168	-0.835	1		
	Sig. (<0.005)	0.050	0.350	0.000			
入流濃度(mg/L)	Spearman's r	-0.248	0.058	-0.430	0.439	1	

	Sig. (<0.005)	0.242	0.789	0.036	0.032		
降低之濃度(mg/L)	Spearman's r	-0.364	-0.014	-0.576	0.617	0.911	1
	Sig. (<0.005)	0.080	0.949	0.003	0.001	0.000	

註:粗體表示有高度相關

3. 氨氮的移除

如表 1 所示,在 FTW 系統中,氨氮(NH₄-N)的平均移除率為 44.1%,最高值達 100%,而最低值則為-43.96%。根據先前對 FTW 系統的研究,NH₄-N 的移除率範圍通常介於-45%至 75%之間[10,19]。

根據表 5 所示之 Spearman 相關係數,NH₄-N 的濃度降低與入流濃度之間存在高度正相關 (r=0.801;p=0.00;n=21),與 HLR 之間則顯示出高度負相關(r=-0.718;p=0.00;n=21),而與水深(r=-0.551;p=0.01;n=21)則為中度負相關。基於逐步多元迴歸分析,得出以下方程式:

$$\Delta C_{\text{NH}_4\text{-N}} = -0.937 + 0.328 C_{\text{in}}$$

$$(r^2 = 0.790; n = 21; p = 0.00) \quad (6)$$

其中, $\Delta C_{\text{NH}_4\text{-N}} = C_{\text{in}} - C_{\text{out}}$ 為 NH₄-N 降低之濃度(mg/L), C_{in} 和 C_{out} 分別為 NH₄-N 的入流與出流濃度(mg/L)。

本研究結果顯示,NH₄-N 的濃度降低與入流濃度之間存在高度正相關。在 [2,11,26,27]研究中,當入流的 NH₄-N 濃度增加時,能有效促進 FTW 系統中附生微生物的繁殖與活性,以提升其硝化作用,將 NH₄-N 轉化為亞硝酸鹽(NO₂-N)和硝酸鹽(NO₃-N)等植物可吸收的形式,從而提高植物對 NH₄-N 的吸收率。此外,根據[17]的研究,實驗初期較高的溶氧量(DO)促使硝化菌順利進行硝化反應,導致 NH₄-N 濃度快速下降,因此才能在實驗結束前達到 100%的移除率。

表 5NH₄-N 濃度降低有關之 Spearman 相關係數矩陣

		植被覆 蓋率	水 深 (m)	HLR(m/d)	HRT(d)	入 流 濃 度(mg/L)	降低之濃度 (mg/L)
植被覆蓋率	Spearman's r	1					
	Sig. (<0.005)						
水深(m)	Spearman's r	-0.002	1				
	Sig. (<0.005)	0.993					
HLR(m/d)	Spearman's r	0.327	0.537	1			
	Sig. (<0.005)	0.064	0.001				
HRT(d)	Spearman's r	-0.344	-0.168	-0.835	1		
	Sig. (<0.005)	0.050	0.350	0.000			

入流濃度	Spearman's r	0.069	-0.442	-0.509	0.205	1
(mg/L)	Sig. (<0.005)	0.766	0.045	0.018	0.374	
降低之濃度	Spearman's r	0.066	-0.551	-0.718	0.405	0.801
(mg/L)	Sig. (<0.005)	0.777	0.010	0.000	0.069	0.000

註:粗體表示有高度相關

四、結論與建議

本研究通過回顧 FTW 系統中種植園藝作物對水質改善成效的相關文獻，對納入的 12 篇文獻進行統計分析。整體而言，FTW 系統對 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 和 TP 濃度的降低均顯示出顯著效果。在 TN 和 TP 的去除效率方面，有著相似的結果；然而，在 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除效率上則顯示出較低的成效。造成此結果的原因在於 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度的降低受到入流濃度的顯著影響，當入流濃度過低時，可能導致移除效果的負成長，進而影響整體統計結果的表現。在相關係數分析中，可以觀察到 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 和 TP 濃度的降低與其入流濃度之間存在高度相關性。此外，在方程式中，入流濃度作為參數被納入，這也顯示出入流濃度在量化植物對水中營養物質吸收成效中的重要性。

定期對 FTW 系統中的植物進行收穫對水中營養物質的完全去除及後續的維護管理具有重要意義。Zhang et al. [27] 研究指出，定期收穫 FTW 中的植物可顯著提高整體系統的水質淨化效率，因為在植物腐敗之前進行收穫能有效避免已吸收的營養物質重新釋放回水中。此外，本研究所探討的園藝作物在去除水中 TN 和 TP 方面，與先前在 FTW 中種植濕地植物的研究相比[12,14]，顯示出相當的效果。由於園藝作物具備商業價值，定期的持續收穫可幫助抵銷 FTW 管理中的常規成本支出，從而實現 FTW 系統的可持續運作。

儘管過去的文獻主要集中於降地水體中營養物質的研究，針對 FTW 中種植園藝植物及其收穫的可持續管理策略的相關研究仍相對有限。因此，本研究旨在整合不同的研究成果，評析此技術的成效，以提供更多關於可持續經營及管理的參考依據。

五、參考文獻

- [1] Almasoudi, S. and B. Jamoussi., "Desalination technologies and their environmental impacts: A review." Sustainable Chemistry One World 1: 100002, 2024
- [2] Arivukkarasu, D. and R. Sathyanathan., "A sustainable green solution to domestic sewage pollution: Optimizing floating wetland treatment with different plant combinations and growth media." Water Cycle 5: 185-198, 2024
- [3] Ayaz, S. Ç. and O. Saygin., "Hydroponic tertiary treatment." Water Research 30(5): 1295-1298, 1996

- [4] Carpenter, S. R., et al., "Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen." *Ecological Applications* 8(3): 559-568, 1998
- [5] Dunqiu, W., et al., "Effect of Artificial Aeration, Temperature, and Structure on Nutrient Removal in Constructed Floating Islands." *Water Environment Research* 84(5): 405-410, 2012
- [6] Garcia Chance, L. M., et al., "Viability assessment for the use of floating treatment wetlands as alternative production and remediation systems for nursery and greenhouse operations." *Journal of Environmental Management* 305: 114398, 2022
- [7] Garcia Chance, L. M., et al., "Short- and long-term dynamics of nutrient removal in floating treatment wetlands." *Water Research* 159: 153-163, 2019
- [8] Karnchanawong, S. and J. Sanjitt., "Comparative study of domestic wastewater treatment efficiencies between facultative pond and water spinach pond." *Water Science and Technology* 32(3): 263-270, 1995
- [9] Keizer-Vlek, H. E., et al., "The contribution of plant uptake to nutrient removal by floating treatment wetlands." *Ecological Engineering* 73: 684-690, 2014
- [10] Kyambadde, J., et al., "A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate." *Water Research* 38(2): 475-485, 2004
- [11] Li, X.-N., et al., "An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water." *Ecological Engineering* 36(4): 382-390, 2010
- [12] Locke-Rodriguez, J., et al., "Floating flowers: Screening cut-flower species for production and phytoremediation on floating treatment wetlands in South Florida." *Environmental Advances* 13: 100405, 2023
- [13] Meng, X. and F. Xu., "Spatial and temporal characteristics of non-point source pollution and risks in the drinking water source area: A case study of Heihe River in Xi'an." *Desalination and Water Treatment* 319: 100519, 2024
- [14] Pavlineri, N., et al., "Constructed Floating Wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis." *Chemical Engineering Journal* 308: 1120-1132, 2017
- [15] Smith, V. H., et al., "Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems." *Environmental Pollution* 100(1): 179-196, 1999
- [16] Stefanatou, A., et al., "Use of ornamental plants in floating treatment wetlands for greywater treatment in urban areas." *Science of The Total Environment* 912: 169448, 2024

- [17] Sun, L., et al., "Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna." *Ecological Engineering* 35(1): 135-140, 2009
- [18] Urakawa, H., et al., "The uniqueness and biogeochemical cycling of plant root microbial communities in a floating treatment wetland." *Ecological Engineering* 108: 573-580, 2017
- [19] Van de Moortel, A. M. K., et al., "Effects of Vegetation, Season and Temperature on the Removal of Pollutants in Experimental Floating Treatment Wetlands." *Water, Air, & Soil Pollution* 212(1): 281-297, 2010
- [20] Vo, T.-D.-H., et al., "Floating treatment wetlands to improve the water quality of the Hang Bang canal, Ho Chi Minh City, Vietnam: Effect of plant species." *Chemosphere* 362: 142786, 2024
- [21] Vo, T.-K.-Q., et al., "Pilot and full scale applications of floating treatment wetlands for treating diffuse pollution." *Science of The Total Environment* 899: 165595, 2023
- [22] Vymazal, J., "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands." *Science of The Total Environment* 380(1): 48-65, 2007
- [23] White, S. A. and M. M. Cousins., "Floating treatment wetland aided remediation of nitrogen and phosphorus from simulated stormwater runoff." *Ecological Engineering* 61: 207-215, 2013
- [24] Xin, Z.-j., et al., "Effect of Stubble Heights and Treatment Duration Time on the Performance of Water Dropwort Floating Treatment Wetlands (FTWS)." *Ecological Chemistry and Engineering S* 19(3): 315-330, 2012
- [25] Xue, R., et al., "Dynamic analysis of non-point source pollution in the Sanhekou Reservoir watershed: Implications for sustainable water management." *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2024
- [26] Yang, Z., et al., "Purification of nitrate-rich agricultural runoff by a hydroponic system." *Bioresource Technology* 99(17): 8049-8053, 2008
- [27] Zhang, L., Z. Sun, J. Xie, J. Wu and S. Cheng., "Nutrient removal, biomass accumulation and nitrogen-transformation functional gene response to different nitrogen forms in enhanced floating treatment wetlands." *Ecological Engineering* 112: 21-25, 2018
- [28] Zhou, X. and G. Wang., "Nutrient concentration variations during *Oenanthe javanica* growth and decay in the ecological floating bed system." *Journal of Environmental Sciences* 22(11): 1710-1717, 2010