

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物環境系統工程學研究所



碩士論文

Department of Bioenvironmental Systems Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

狐尾藻淨化畜牧三段式廢水處理系統放流水之研究

**Study of Purifying Effluent of Three Stages Wastewater**

**Treatment System by Aquatic Plants—*Myriophyllum verticillatum***

阮柏勳

Po-Hsun Roan

指導教授：侯文祥 博士

謝正義 博士

Advisor: Wen-Shang Hou, Ph.D.

Cheng-I Hsieh, Ph.D.

中華民國 108 年 7 月

July, 2019

## 誌謝



六年來的台大生活終於要告一段落了，在這些日子遇到了太多必須感謝的人事物，讓我在台大日子過得十分多采多姿，課裡課外也都收穫良多，並且最後在研究所畫上了一個完美的句點。

首先當然要感謝侯文祥老師的指導。我在大四的專題研究開始跟隨了侯文祥老師，一路跟進了研究所，三年下來的各種上山下海使我實作經驗滿滿，並在實驗期間給了我許多建議和指導，使我順利的完成論文。除了實作和學業上的指導，我覺得侯文祥老師教給我更珍貴的是，對於任何事物都要勇於和樂於嘗試，辛苦流汗又如何?結果不盡理想又如何?只要肯嘗試就一定會有所收穫。未來還有好長的路要走，而這樣的處事態度是足夠我一輩子受用的。

感謝兩位口試委員謝正義老師和胡明哲老師和專題討論的許少瑜老師，除了平時課堂的教導，在研究所的最後也都為我的論文了提供了許多寶貴的建議和幫助。

最後感謝我的家人和所有研究所、生工系幫助過我的各位學長姐、同學、學弟妹與系辦人員，沒有你們的幫助我一定早就被生活上和研究上的各種困難所擊倒，沒有你們的陪伴我台大六年的時光一定不會如此精采、快樂。

希望在未來能維持與你們的緣分，我也變得更好更有能力，以報答、回饋這些日子的恩情，並將此研究成果獻給以上曾幫助過我的人。

阮柏勳 誌於

國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所

中華民國一零八年七月

## 中文摘要



台灣畜牧業廢水主要以三段式廢水處理系統進行淨化再排放。然而，季節環境變化、操作不當或設備老舊等原因，使得畜牧廢水常在處理過後，仍有多項指標無法符合環保署之排放標準。超標的畜牧廢水不僅影響環境，行政院環保署自 109 年起，也將開始收取全額的畜牧業水污染防治費。故業者急需一個低成本的水質淨化工法，彌補三段式廢水處理系統的不足，減少廢水對於排放環境的負擔。而利用種植水生植物吸收水體的營養鹽之生物水質改善方法，具有低成本、高效率且友善環境之特點，非常適合用於畜牧廢水的淨化。

故本研究選擇校園水池常見且生長快速、繁殖容易、耐污力高的粉綠狐尾藻作為研究目標生物，以建立針對台灣冬、夏季氣候環境下，粉綠狐尾藻去除營養鹽速率的數據，並探討不同廢水氨氮殘留濃度對水生植物鮮重、密度、存活狀況與淨化效果之影響。

研究結果顯示粉綠狐尾藻在種植的前 7 日有極高氨氮去除率。每天每公斤的鮮重植物能去除 191.54~542.17mg 的銨離子。針對畜牧廢水中磷之營養鹽，粉綠狐尾藻每日每公斤約能去除 7.18~39.76mg 之總磷。對於生化需氧量的降低也有一定的功效。搭配曝氣設備，更能夠幫助植物提升、維持硝酸鹽、氨氮和總磷的去除率。根據研究結果，將粉綠狐尾藻種植於三段式廢水處理系統中合適的處理階段水池，應有助於減輕廢水處理系統的負擔並改善放流水水質。另外植物在生長 7 日之後便會開始出現枯萎、衰亡的情況，在應用、管理上必須注意，避免死亡植株再次污染水質。

關鍵字：水生植物、水質淨化、粉綠狐尾藻、畜牧廢水、營養鹽吸收

## ABSTRACT



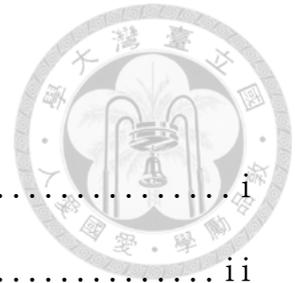
In Taiwan, three-stage wastewater treatment system is widely used in farm management to purify livestock wastewater before discharged into the rivers. However, discharged water usually do not fit the standard of Taiwan pollution policy implemented recently, which is caused by improper operation of treatment system, antique equipment or environment change. For protecting environment and avoiding punishment, planting aquatic plants in three-stage wastewater treatment system to remove excessive nutrients is an inexpensive method which could make up for the shortage of the treatment system and improve the environment.

In this study, *Myriophyllum verticillatum* was taken as a research subject because it not only grows rapidly but also owns high purify ability and the tolerance of polluted water. The experiments were conducted to study the purify ability of *Myriophyllum verticillatum*. Various nutrients' concentrations of water were poured into plastic containers with *Myriophyllum verticillatum*. Recorded the variations of nutrients' concentrations regularly to estimate the purify ability.

According to the result, *Myriophyllum verticillatum* could remove 191.54 to 542.17 mg ammonium and 7.18 to 39.76 mg total phosphorus per kilogram per day . *Myriophyllum verticillatum* would be planted at appropriate tanks of three-stage wastewater treatment system to reduce the load of treatment system and improve the quality of discharged water.

Keywords : aquatic plants, water purification, *Myriophyllum verticillatum*, livestock wastewater, nutrient absorption

# 目錄



誌謝 .....	i
中文摘要 .....	ii
ABSTRACT .....	iii
目錄 .....	iv
圖目錄 .....	viii
表目錄 .....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 研究目的.....	2
1.4 研究流程.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 畜牧廢水.....	5
2.1.1 三段式廢水處理系統.....	5
2.1.2 畜牧廢放流水標準.....	8
2.2 水生植物.....	9
2.2.1 水生植物淨化水質.....	9
2.2.2 水生植物的選用.....	10
2.2.3 粉綠狐尾藻( <i>Myriophyllum aquaticum</i> ).....	10
2.3 國內研究文獻整理.....	11

2.4	研究設計.....	13
第三章	研究方法.....	14
3.1	實驗環境.....	14
3.2	實驗材料.....	14
3.2.1	粉綠狐尾藻( <i>Myriophyllum aquaticum</i> ).....	14
3.2.2	畜牧廢水.....	16
3.2.3	塑膠整理箱.....	17
3.2.4	LED 燈管.....	17
3.2.5	溫控設備.....	18
3.2.6	打氣馬達.....	19
3.3	實驗儀器.....	19
3.3.1	電子秤.....	19
3.3.2	濁度計.....	20
3.3.3	pH 計.....	20
3.3.4	導電度計.....	20
3.3.5	溶氧計.....	21
3.3.6	比色計.....	21
3.3.7	分光光度計.....	21
3.4	實驗方法.....	23
3.4.1	高、低水溫植物吸收營養鹽實驗.....	23
3.4.2	營養鹽吸收效率驗證與提升實驗.....	24
3.4.3	水體濁度和營養鹽濃度關係實驗.....	26



3.4.4	植物死亡影響水質之植物管理實驗.....	26
3.5	資料整理法.....	27
3.5.1	植物鮮重.....	27
3.5.2	植物覆蓋率.....	27
3.5.3	濁度.....	29
3.5.4	酸鹼值.....	29
3.5.5	導電度.....	30
3.5.6	生化需氧量(BOD).....	30
3.5.7	化學需氧量(COD).....	30
3.5.8	硝酸鹽( $\text{NO}_3\text{-N}$ ).....	30
3.5.9	亞硝酸鹽( $\text{NO}_2\text{-N}$ ).....	31
3.5.10	氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ ).....	31
3.5.11	總磷.....	31
第四章	結果與討論.....	33
4.1	植物鮮種變化.....	33
4.2	植物覆蓋率變化.....	42
4.3	植物生長與排放水水質指標項目變化.....	45
4.3.1	濁度.....	46
4.3.2	酸鹼值.....	52
4.3.3	導電度.....	54
4.3.4	生化需氧量(BOD).....	56
4.3.5	化學需氧量(COD).....	58



4.4	植物吸收與營養鹽濃度變化.....	62
4.4.1	硝酸鹽( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) .....	62
4.4.2	亞硝酸鹽( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) .....	66
4.4.3	氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) .....	67
4.4.4	總磷(TP).....	74
4.5	濁度干擾營養鹽濃度之可能性.....	77
4.6	植物死亡影響水質之植物管理實驗方法.....	78
4.7	文獻比較.....	78
第五章	結論與建議.....	80
5.1	結論.....	80
5.2	建議.....	81
	參考文獻 .....	83



# 圖目錄



圖 1.4.1	實驗流程圖 .....	4
圖 2.1.1.1	傳統三段式廢水處理系統流程圖 .....	6
圖 2.1.1.2	傳統型和創新型三段式廢水處理系統簡易流程比較圖 .....	6
圖 3.2.1.1	臺灣大學法律學院弄春池 .....	14
圖 3.2.1.2	臺灣大學法律學院弄春池粉綠狐尾藻之採集 .....	15
圖 3.2.1.3	粉綠狐尾藻培養與備用 .....	16
圖 3.2.3.1	以 12 個塑膠整理箱作為種植植物之容器 .....	17
圖 3.2.4.1	架設 2 支 LED 燈管提供植物光照.....	18
圖 3.2.5.1	石英加熱棒放入塑膠整理箱中加熱水體、保持水溫 .....	18
圖 3.2.6.1	利用打氣馬達保持實驗水體流動並增加水中溶氧 .....	19
圖 3.3.1	實驗儀器圖 .....	22
圖 3.4.1.1	高、低水溫植物吸收營養鹽實驗設置示意圖 .....	23
圖 3.4.2.1	營養鹽吸收效率驗證與提升實驗設置示意圖 .....	25
圖 3.5.1.1	將植物靜置於排水墊上去除水重 .....	27
圖 3.5.2.1	ImageJ 步驟 2.介面圖 .....	28
圖 3.5.2.2	ImageJ 步驟 3.介面圖 .....	28
圖 3.5.2.3	ImageJ 步驟 4.介面圖 .....	29
圖 4.1.1	植物在低水溫不同氨氮濃度之鮮重變化 .....	36
圖 4.1.2	植物在低水溫不同氨氮濃度之生長率 .....	37
圖 4.1.3	植物在高水溫不同氨氮濃度之鮮重變化 .....	38

圖 4.1.4	植物在高水溫不同氨氮濃度之生長率 .....	39
圖 4.1.5	不同種植天數的植物在不同氨氮濃度廢水之鮮重變化率 .....	41
圖 4.2.1	低水溫不同濃度氨氮廢水之植物覆蓋率變化 .....	44
圖 4.2.2	高水溫不同濃度氨氮廢水之植物覆蓋率變化 .....	44
圖 4.3.1.1	低水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之濁度變化 .....	48
圖 4.3.1.2	高水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之濁度變化 .....	49
圖 4.3.1.3	植物吸收營養鹽效率驗證與提升實驗曝氣組與濁度變化 .....	50
圖 4.3.1.4	植物吸收營養鹽效率驗證與提升實驗無曝氣組與濁度變化 .....	51
圖 4.3.5.1	化學需氧量-濁度之關係圖 .....	61
圖 4.4.1.1	硝酸鹽-濁度之關係圖 .....	65
圖 4.4.3.1	低水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之氨氮濃度變化 .....	69
圖 4.4.3.2	高水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之氨氮濃度變化 .....	70
圖 5.2.1.	種植建議區域示意圖 .....	81



# 表目錄



表 2.1.1.1 傳統型和創新型三段式廢水處理系統各階段廢水處理結果(ppm).....	7
表 2.1.2.1 畜牧業廢水排放標準(ppm).....	9
表 2.1.2.2 排放水質濃度優惠 .....	9
表 4.1.1 高、低水溫不同濃度氨氮廢水之植物鮮重 .....	33
表 4.1.2 高、低水溫不同濃度氨氮廢水之植物重量變化 .....	34
表 4.2.1 高、低水溫不同濃度氨氮廢水之植物覆蓋率變化 .....	42
表 4.3.1.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與濁度變化 .....	46
表 4.3.2.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與酸鹼值變化 .....	52
表 4.3.3.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與導電度變化 .....	54
表 4.3.4.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與生化需氧量變化 .....	56
表 4.3.5.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與化學需氧量變化 .....	58
表 4.4.1.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與硝酸鹽變化 .....	62
表 4.4.1.2 營養鹽吸收效率驗證與提升實驗之植物硝酸鹽去除率 .....	64
表 4.4.2.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與亞硝酸鹽變化 .....	66
表 4.4.3.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與氨氮變化 .....	67
表 4.4.3.2 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物氨氮去除率 .....	71
表 4.4.3.3 高水溫植物吸收營養鹽實驗之植物氨氮去除率驗證 .....	73
表 4.4.4.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與總磷變化 .....	74
表 4.4.4.2 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物總磷去除率 .....	76
表 4.5.1 水體濁度和營養鹽濃度關係實驗之營養鹽平均 .....	77

# 第一章 緒論



## 1.1 前言

台灣畜牧產業自民國 79 年開始大力推廣、輔導養豬場採用三段式廢水處理系統。然而，由於季節環境變化、農民操作不當或設備老舊等原因，使得畜牧廢水在經過三段處理之後，多項指標可能仍未符合排放標準。不符合環保署制定生化需氧量 80ppm 以下、化學需氧量 600ppm 以下、懸浮固體 150ppm 以下等重要項目標準的排放水，包含了大量的營養鹽，進入河川中將會導致水體優養化，使藻類大量繁殖、降低水體中的溶氧，進而造成水中生物生存危機，破壞生態環境等現象。散發的惡臭亦會影響周遭環境的空氣品質。若要改善此情形，可藉由更新廢水處理系統設備(郭等人，2008)或延長水力停留時間(蘇，2007)，使排放水到達標準。不過此舉將會造成農民廢水處理成本上升，在沒有政府補助政策的推動下，很少農民會願意進行排放水水質的改善行動。

不過近年來環保意識抬頭，環境保護越來越受到重視，政府也開始增訂、修正相關法規來防治長年以來的各種環境污染行為。行政院環保署自 106 年開始，針對未達標畜牧業者徵收畜牧業水污染防治費，採逐年提高費額的方式來進行宣導、減少產業衝擊。且自 109 年起，開始全額收費。業者若能改善畜牧排放水的水質使其符合排放標準，甚至優於排放標準，政府也將以優惠費額收取水污染防治費。

水質改善主要可分物理、化學和生物方法，生物方法雖相較另外兩者不普及，不過其友善環境、成本低廉的特色使生物方法逐漸受到關注。利用種植水生植物來吸收水體的營養鹽，進而淨化改善水質便是其中一種方法(楊，2008)。



## 1.2 研究動機

隨著畜牧業水污染防治費開徵，業者急需一個低成本的水質淨化工法，使他們有能力去彌補三段式廢水處理系統的不足，減少廢水對於排放環境的負擔。近三年來，個人曾參與過臺大侯文祥老師團隊多項水質改善計畫，也與同學組團隊執行過 107 年度教育部大專生永續校園計畫，改善校園景觀池之水質。多次利用水生植物吸收營養鹽的生物方法作為改善水質的手段，累積了些許經驗。因此希望能夠將水生植物淨化水質的方法應用到畜牧廢水淨化，為業者提供一個低成本、高效率且友善環境的生物淨水工法。

## 1.3 研究目的

本實驗選擇校園水池常見且耐污力高的粉綠狐尾藻作為水生植物淨化畜牧廢水的研究目標生物。此植物在中國和歐美國家已有相關的淨化研究，不過在實際應用上仍缺乏明確的環境條件和淨化速率之數據。由於畜牧場的全年經營，畜牧廢水也全年被排放，因此本實驗希望能夠建立針對台灣冬、夏季氣候環境下，粉綠狐尾藻去除營養鹽速率的數據。並提供實驗和量化方法作為參考，以利建立更多水生植物特性的資料庫，方便將水生植物應用於其他生物改善工法。

## 1.4 研究流程

研究流程如圖 1.4.1。

本研究參考國內外水生植物淨化效果的研究之設置，設計營養鹽吸收實驗探討狐尾藻在台灣冬、夏季環境，對台灣養豬三段式廢水處理系統中，各處理階段仍殘留不同氨氮濃度廢水的淨化效果。根據廢水殘留濃度和水生植物鮮重、密度和存活狀況，取得初步的植物淨化效果數據。再根據此數據分析是否有其他因素影響了植物的淨化效果，並以其他驗證實驗釐清。最後針對夏季營養鹽吸收實驗中、低濃度實驗中較不合理的淨化效果數據，進行驗證和效率提升的實驗，求出最終植物吸收速率的結果並以此研擬建議和應用方式。



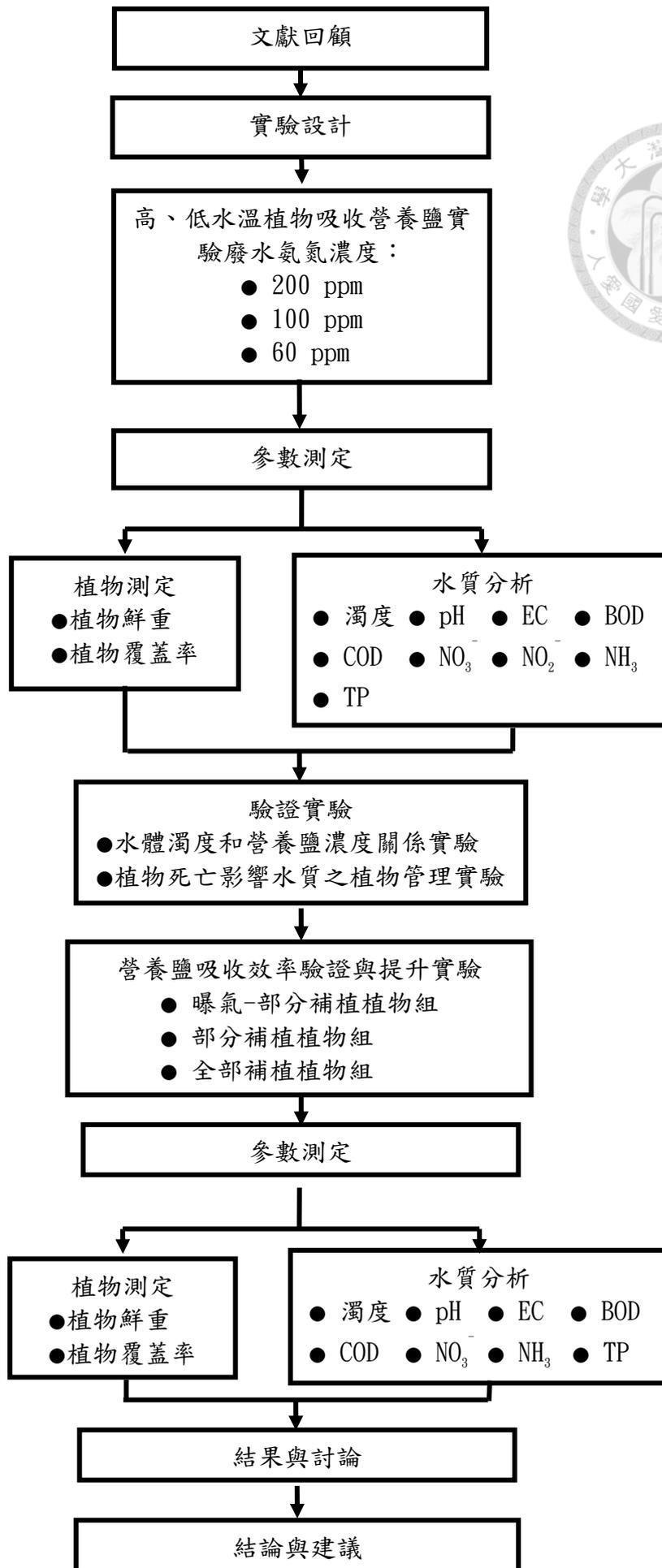


圖 1.4.1 實驗流程圖

## 第二章 文獻回顧



### 2.1 畜牧廢水

#### 2.1.1 三段式廢水處理系統

依據台灣「水污染防治法」，養豬農戶的飼養規模在 200 頭以上時，即必須裝設廢水處理設施。在政府宣傳、推廣下，自民國 79 年以來裝設率已達 95% 以上，且大部分的類型為三段式豬糞尿廢水處理系統(郭等人，2008)。

傳統型三段式廢水處理系統主要分為固液分離、厭氣發酵和好氧處理三個階段(圖 2.1.1)(行政院農委會，2012)。固液分離階段利用固液分離機直接取出混合糞水中的固形物豬糞，其去除效果 BOD 約 15~30%、SS 約 50%；厭氣發酵階段利用紅泥膠皮水封糞水來進行厭氣處理，其設計水力停留時間(HRT)為 10 天；好氧處理採用活性污泥法，利用好氧微生物進行有機物的分解，其 HRT 為 1~2 天(郭等人，2008)。

而近年正在試驗的創新型三段式廢水處理系統則是改良了傳統型三段式廢水處理系統的處理步驟，希望能提高廢水的淨化率和再利用率。以彰化東螺園區豬糞肥處理場為例，創新型與傳統型的不同之處在於創新型在糞水厭氣發酵完畢後，會再經過一次固液分離機的處理才進入好氧處理的階段；而好氧處理完畢的廢水會再依序進入密閉曝氣槽、生態池，才達排放的階段(圖 2.1.2)(彰化縣府委託台灣水利環科研發基金會執行，2014~2017)。

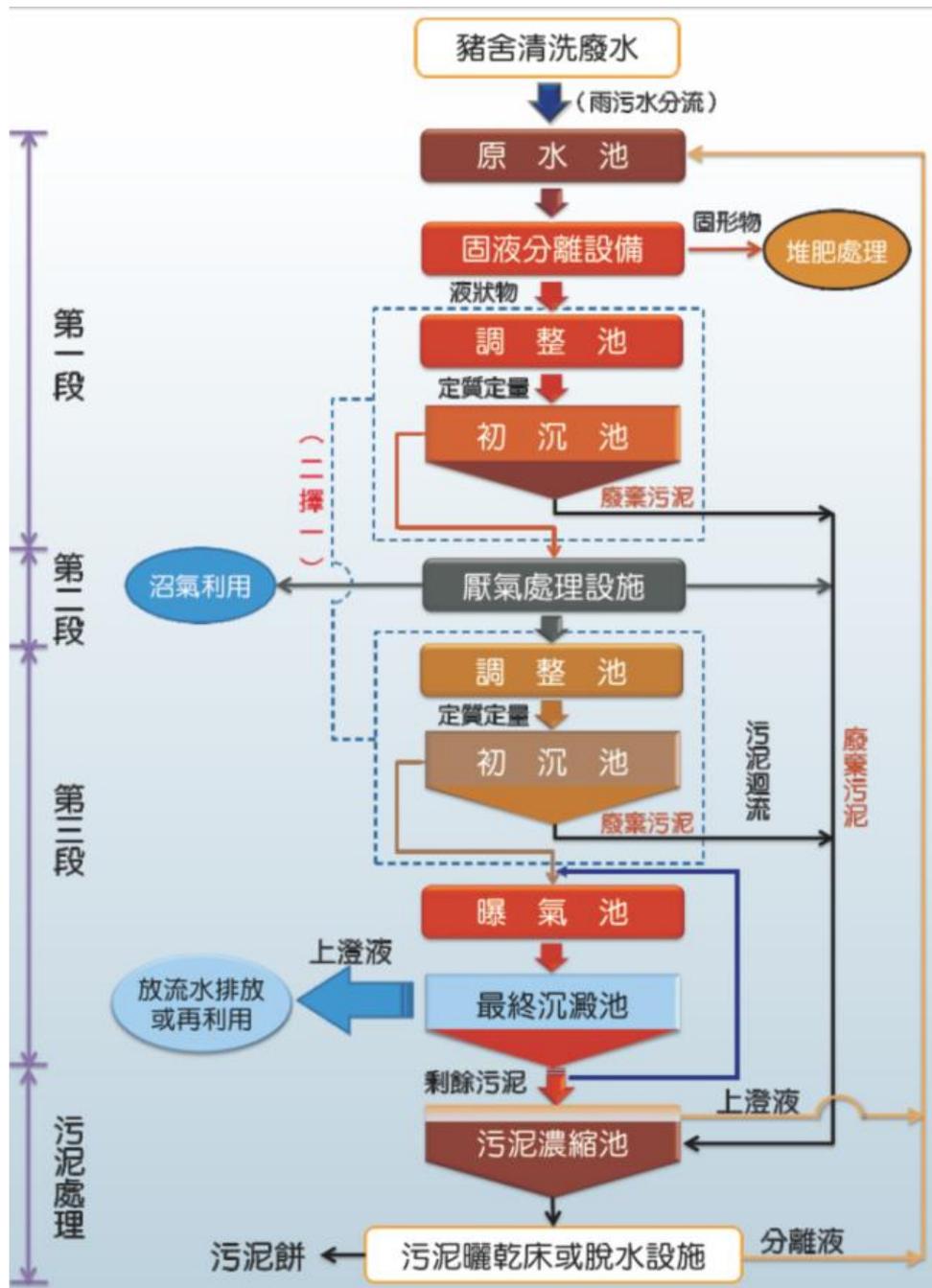
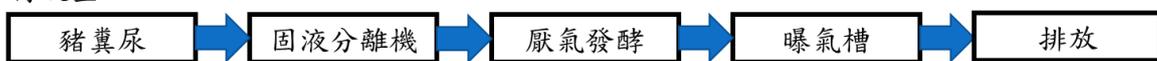


圖 2.1.1.1 傳統三段式廢水處理系統流程圖

傳統型：



創新型：

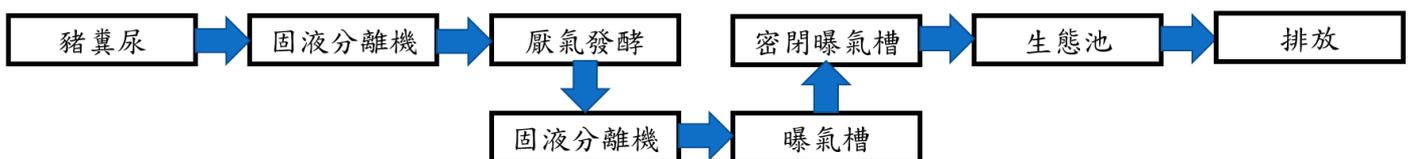


圖 2.1.1.2 傳統型和創新型三段式廢水處理系統簡易流程比較圖

另外整理了傳統型和創新型三段式廢水處理系統各階段廢水處理結果(表 2.1.1.1)，以供研究參考比較(郭等人，2008) (彰化縣府及台灣水利環科研發基金會，2014)。



表 2.1.1.1 傳統型和創新型三段式廢水處理系統各階段廢水處理結果(ppm)

			SS	COD	BOD	NH3-N	TN	TP
傳統型	一般養豬示範戶(民國90年)	原廢水	3092±2328	6111±4285	1791±1532	-----	-----	-----
		厭氣槽出流口	258±236	724±551	148±107	-----	408±193	54±28
		放流水	68±56	305±205	79±56	-----	229±183	36±27
	畜產試驗所(民國88~92年)	固液分離	3767±2208	8912±4998	3461±2416	-----	-----	-----
		厭氣槽出流口	53.5±21.6	485±158	108±59	-----	-----	-----
		放流水	14.7±11.2	155±57.2	42.7±31.5	-----	-----	-----
	環保署畜牧業排放水標準		150	600	80	-----	-----	-----
			SS	COD	BOD	NH3-N	TN	TP
創新型	彰化東螺園區(2014年)	厭氣槽入流口	4131	14014	4969	774.7	1183	102.1
		厭氣槽出流口	104.3	602.3	183.8	541.5	683.2	31.7
		曝氣槽入流口	109	470.4	153.5	474.7	550.2	22.8
		曝氣槽出流口	108.9	415.6	135.4	391.9	506.1	18.1
		生態池入流口	58.2	441.5	152.9	248.5	565.3	12.3
		生態池出流口(排放)	41.7	256.2	79.5	149.9	232.8	9.3
	環保署畜牧業排放水標準		150	600	80	-----	-----	-----

註：一般養豬示範戶調查於民國90年，針對84個設備正常管理操作之示範戶進行調查；畜產試驗所調查為民國88年10月至民國92年3月資料數據之平均；彰化東螺園區調查為2014年1月至2014年7月七筆月資料之平均。



## 2.1.2 畜牧廢放流水標準

根據民國 106 年環保署依據水污染防治法訂定的放流水標準，畜牧業廢水排放標準如表 2.1.2.1。而針對位於自來水水質水量保護區內之排放，未來將再增列氨氮和正磷酸鹽為管制項目。而畜牧業的水污染防治費也於民國 106 年 1 月 1 日起開徵，目前的徵收項目為化學需氧量(COD)與懸浮固體(SS)，其費率分別為 12.5 和 0.62(新台幣元/公斤)，每半年申報繳納 1 次。為了減低對於畜牧業的衝擊，開徵首年(民國 106 年)以費額 70%收取，逐年增加 10%，至 109 年起將全額收費。不過為了鼓勵業者污染減量，政府也會根據減量的比率給予費率上的優惠(表 2.1.1.2)。

目前環保署針對畜牧業廢水排放，僅在生化需氧量、化學需氧量和懸浮固體這三個項目進行規範。然而，畜牧業廢水包含的大量氮、磷營養鹽才是造成河川優養化的主因，本研究利用水生植物的吸收能力淨化畜牧廢水也是以氮、磷營養鹽的去除為主。所以本研究在設計實驗方法時，一同將氮、磷營養鹽列入檢測項目，以建立更完整的數據資料，在未來增訂相關排放標準項目後也能作為參考應用。



表 2.1.2.1 畜牧業廢水排放標準(ppm)(整理自環保署資料)

畜牧業		生化需氧量	化學需氧量	懸浮固體
	非草食性動物	80	600	150
草食性動物	80	450	150	

表 2.1.2.2 排放水質濃度優惠(整理自環保署資料)

排放比率	優惠費額
<10%	免繳
10~30%	15%
30~40%	40%
40~60%	60%
60~80%	80%
80%以上	100%

## 2.2 水生植物

### 2.2.1 水生植物淨化水質

淨化水質的方法依手段原理可大致分為物理方法、化學方法和生物方法，而運用水生植物的生物方法具有高效率、成本低和友善環境之特性（楊，2007)(William，2002)。水生植物淨化水質的主要原理即是透過吸收作用，吸收水體中的氮、磷營養鹽，減少藻類的孳生，並透過光合作用增加水體溶氧來達到改善水質的目標(楊等人，2007)(Li 等人，2018)。

綜合以上特性，以水生植物為主的生物方法可說是非常符合目前畜牧業者改善畜牧放流水之需求。



### 2.2.2 水生植物的選用

由於沉水型植物之根、莖、葉和表皮皆具有吸收作用，比起其他類型的水生植物，有較佳的營養鹽去除效果，因而最常被利用於水生植物水質改善的工程中(楊等人，2007)(張，2016)。

不過根據表 2.1.1.1，在厭氣後之曝氣槽出口或生態池出口兩處水質之氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )和總氮(TN)仍高達 150~392ppm 和 233~506ppm，如此高氨氮濃度將會限制了植物的選用。儘管對於大多數水生植物來說，較不耗轉換能量的銨態氮是氮源的首選，過高濃度的氨氮仍會導致水生植物中毒，成為水生植物衰亡的主因(Zhou 等人，2017)。相較於沉水植物整株皆浸泡於水中，漂浮植物和挺水植物具有位於水面上的葉，能避開高濃度氨氮的直接影響而不會直接枯萎，導致整體植物的衰亡，因此普遍來說沉水植物的氨氮耐受力是較其他種水生植物差的(Monselise 和 Kost，1993)(Arunothai 和 Hans，2009)。因此在選擇水生植物種類時就必須同時考量其營養鹽吸收效率和高濃度氨氮下的生存力。

### 2.2.3 粉綠狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)

粉綠狐尾藻屬於沉水植物，卻同時具有挺水、漂浮植物之特徵，具備水面上之莖、葉，因此比起典型的沉水植物，粉綠狐尾藻具有較高氨氮耐受力，因此同時具備高吸收力和高耐受力的優點(Polomski，2008)(Saunkaew，2011)。並且根據文獻指出，粉綠狐尾藻可能為一種超耐氨的水生植物，對銨態氮的耐性可達 210ppm(劉，2017)

粉綠狐尾藻非常容易繁殖且生長快速，於熱帶、副熱帶地區之水溝、溪流、池塘等水域皆能生長，方便繁殖利用的同時，卻也具有著侵入其他生態、散播的

風險存在，因此工程應用上比較適合在可控制的環境中利用(Liu 等人，2013) (Liu 等人，2016)。



## 2.3 國內研究文獻整理

收集整理國內外水生植物之於淨化水質或在不同水體環境生長情況的相關研究，作為本研究設計實驗之參考，了解多有研究項目缺失、未明確討論情況，導致難以沿用其相關研究方法與成果。常見的不足項目有植物的使用量、水體營養鹽濃度和使用量、空白組比對等。

李(2010)研究以不同水生植物淨化畜牧廢水，在植物覆蓋度 50% 下時，不同植物對於廢水各項水質指標的去除率，並於實地現場運用時有明顯之落差。其研究並未描述實驗和實地現場之廢水濃度、使用量、水力停留時間等相關數據，覆蓋度也並非準確具體之植物使用量之描述，其去除效果僅以去除率表示，而無空白組作為比較，因此很難清楚了解各植物對於淨化廢水的實質效益。

Liu 等(2016)研究提到，採集的豬糞水起始濃度為 416.8ppm，分別以原濃度和稀釋 50% 之 15 公升豬糞水倒入長 50 公分\*寬 40 公分\*高 50 公分之塑膠容器，種植 20 公分長、總鮮重約 90g 之粉綠狐尾藻進行吸收氮氮營養鹽之實驗，並在 14 日後發現兩者去除率皆達 97% 以上。其研究缺少了空白組的對照而不清楚植物本身對於去除營養鹽的貢獻量。

劉等(2017)研究提到，從野外取得 20~30 公分之新鮮粉綠狐尾藻植物株，配養 10 日左右後，採集 10~12 公分且生長健壯、大小一致之植株。設置氮氮濃度 70、210 和 420ppm 之營養液來種植狐尾藻，每箱 8 公升，每箱 20 穴，每穴 3 株植物。得出不同氮氮濃度環境下，植物的生長率和氮、磷吸收率。在種植 21 日後，表明

粉綠狐尾藻在氨氮濃度 70~210ppm 下，莖高和淨生物質量皆有增加，且在氨氮濃度 420ppm 以下皆能有效吸收氮、磷營養鹽。其研究提出植物有效生長和吸收營養鹽之環境氨氮濃度，可作為本實驗設計之參考。不過未詳述起始配置之植物種量、容器形狀和營養液濃度變化，而不確定植物在實驗過程的生長環境條件。

劉等(2010)研究以植物種植面積來描述多種植物之使用量，並定期檢測、比較植物組和空白水面試驗前後的水體營養鹽濃度差異，以單位面積去除量( $\text{mg}/\text{m}^2$ )表示植物之去除率。其實驗設計整體而言十分完善，唯設定種植面積，在種植密度不清楚的情況下，對於植物的使用量上仍有些疑慮。

吳(2018)研究提到，選擇葉子帶有光澤、長勢良好之穗花狐尾藻，剪取頂枝 10~12 公分且外型一致枝條進行培養。培養於直徑 36 公分、高 40 公分之塑料桶，並倒入 5% 濃度沼液進行培養與實驗。並每日更換定量沼水以求狐尾藻在不同水力停留時間下的生長情況。文中並未檢測及更換後和空白組日後的水質數值，不確定是否有其他因素影響了其生長條件。

Zhou 等(2017)研究提到，剪取經培養 14 日、長約 8 公分無分枝、無爛枝且為頂枝之粉綠狐尾藻進行實驗，平均鮮重為  $0.5 \pm 0.093$  克。取 20 株放入長 30 公分\*寬 25 公分\*高 20 公分之塑膠箱中，塑膠箱裝有 7 公升不同濃度之氨氮溶液，底部鋪設石英砂以覆蓋固定植株，並以光通量  $100\text{mmol}/\text{m}^2\text{s}$ 、每日光照時數 14 小時、日夜均溫分別是  $25^\circ\text{C}$  和  $20^\circ\text{C}$  之環境進行植物的培養，每 7 日進行一次採樣與檢測，直到第 21 日為止，探討植物在氨氮濃度分別為 0、20、40、80 和 120ppm 之營養液中的生長情況。在種植 21 日後，植物的生物質量在營養液氨氮濃度為 0~40ppm 時有所增加；在 40~120ppm 時，則有所減少。在前 14 日，所有組別的植物之組織總含氮量( $\text{mg}/\text{g}$ )皆有所上升，並在第 21 日有所下降。其實驗設計、各項

設置和環境條件敘述得非常完整，可作為本研究的實驗設計之重要參考。



## 2.4 研究設計

根據前人研究經驗，本實驗的設計著重於以下 4 點，詳細研究方法敘述於第三章。

1. 清楚描述各項實驗環境條件以利他人參考和結果應用。
2. 詳述植物鮮種、植物覆蓋率和植物株數，以準確說明實驗植物的使用量。
3. 固定實驗水體並記錄各項水質數據，並與植物使用量比較，取得植物實際的去除效果。
4. 設立無種植植物之空白組來更精準呈現植物之功效。

## 第三章 研究方法



### 3.1 實驗環境

本實驗於台大校內生工系入滲儀實驗室進行。實驗室以鐵皮搭建，地面為泥土地，四周環境植物生長茂密。為了避免實驗進行中，植物的生長受到天氣變化的影響，故選擇此室內實驗進行實驗。

### 3.2 實驗材料

#### 3.2.1 粉綠狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)

原產南美洲，為多年生草本淡水挺水或沉水植物，葉為4到6枚輪生之羽狀葉，長約1.7~4公分，寬約0.4~1.2公分，每1枚羽葉有25到30枚線形羽片，幾乎所有的粉綠狐尾藻植物都是雌株，粉綠狐尾藻主要是利用營養器官繁殖，其碎裂的植物碎片能快速的生根，因此粉綠狐尾藻能快速的生長、散播(李，2007)(全球入侵種資料庫，2011)。



圖 3.2.1.1 臺灣大學法律學院弄春池

本實驗使用的粉綠狐尾藻採自臺灣大學法律學院的弄春池(如圖 3.2.1.1)。根據文獻，選擇健康、葉形完整且無分枝之植物每段剪取約 10~12 公分(如圖 3.2.1.2)，再將剪下的植物株置於清水中 2 日使其適應後，再加入極少許的畜牧糞水使植物能夠生根、生長 7 日後再置於清水中保存備用(如圖 3.2.1.3)(劉等人，2017)(Zhou 等人，2017)(吳，2018)。



圖 3.2.1.2 臺灣大學法律學院弄春池粉綠狐尾藻之採集



圖 3.2.1.3 粉綠狐尾藻培養與備用

### 3.2.2 畜牧廢水

實驗廢水取自台大動科系。選用三段式廢水處理系統中，經厭氣發酵後的養豬廢水出流水。2019.03.14 採取的廢水原水  $\text{NH}_3^+$  濃度約為 195ppm；2019.04.19 採取的廢水原水  $\text{NH}_3^+$  濃度約為 144ppm；2019.04.26 採取的廢水原水  $\text{NH}_3^+$  濃度為 143ppm；2019.05.23 採取的廢水原水  $\text{NH}_3^+$  濃度為 156ppm。

$\text{NH}_3^+$  濃度範圍在 144~195ppm 之間，遠低於彰化東螺園區創新型三段式廢水處理系統之厭氣發酵出流口的 541.5ppm。推測是台大動科系飼養規模不及一般畜牧業者，且工作人員有較佳的管理操作所導致。最高 195ppm 正好接近文獻實驗中，粉綠狐尾藻所能生存的最高濃度 210ppm(劉等人，2017)，故直接設為本實驗的高濃度組指標。另外，2019.03.14 採廢水原水時，一同檢測了曝氣槽內的  $\text{NH}_3^+$  濃度約為 60ppm，並以此設為本實驗的低濃度組指標。

### 3.2.3 塑膠整理箱

準備 12 個塑膠整理箱作為種植植物之容器。塑膠箱長 30cm，寬 25cm，深度 15cm，並在底部鋪設半面紗網，方便秤重並供植物附著、生長(Zhou 等人, 2017) (圖 3.2.3.1)。

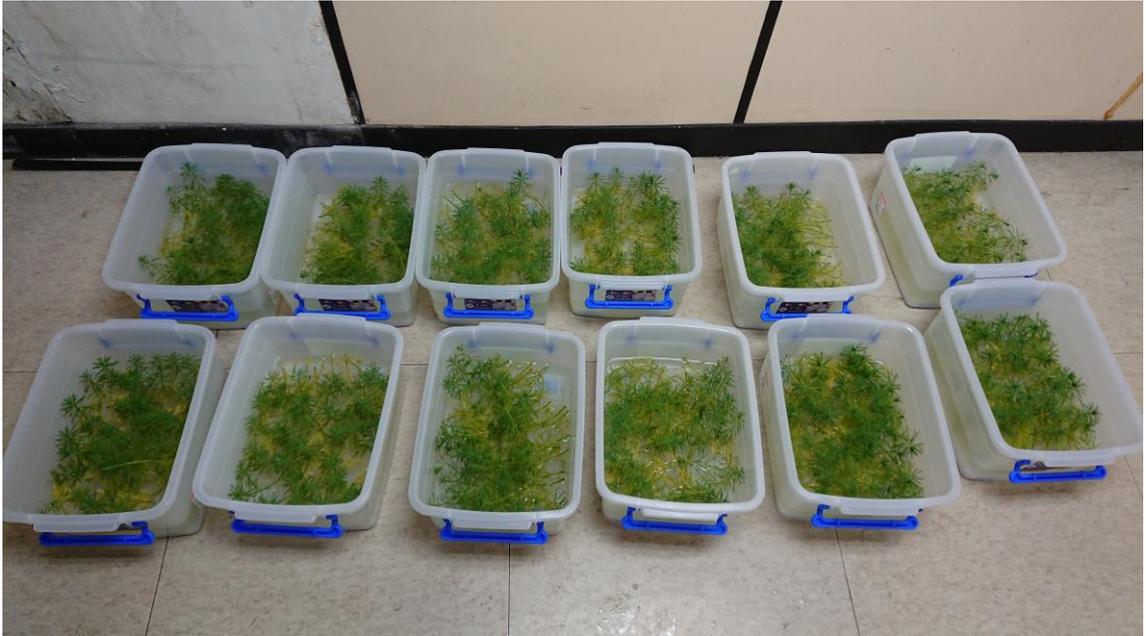


圖 3.2.3.1 以 12 個塑膠整理箱作為種植植物之容器

### 3.2.4 LED 燈管

於地面上方約 30cm 架設 2 支 20W LED 燈管作為植物光照來源，以定時開關控制光照時間，每日光照時數：黑暗時數=12：12 小時 (Zhou 等人, 2017)。如圖 3.2.4.1。



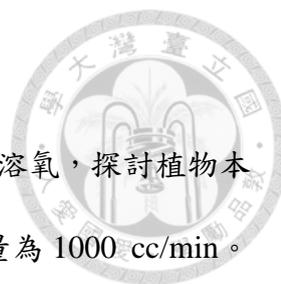
圖 3.2.4.1 架設 2 支 LED 燈管提供植物光照

### 3.2.5 溫控設備

本實驗使用 12 支 50W 的石英加熱棒搭配溫度控制裝置，用來加熱實驗水體溫度，夏季保持在 28°C，冬季保持在 20°C。模擬台灣夏冬氣候環境。如圖 3.2.5.1。



圖 3.2.5.1 石英加熱棒放入塑膠整理箱中加熱水體、保持水溫



### 3.2.6 打氣馬達

本實驗利用 TEION 打氣馬達保持實驗水體流動並增加水中溶氧，探討植物本體在流動水體和止水環境時的營養鹽吸收效率差異。馬達出氣量為 1000 cc/min。

如圖 3.2.6.1。



圖 3.2.6.1 利用打氣馬達保持實驗水體流動並增加水中溶氧

## 3.3 實驗儀器

### 3.3.1 電子秤

本試驗使用的電子秤設備由 Sartorius 公司所生產，其型號為 Practum 3102。用以測量植物鮮重。可讀值為 0.01g；最大秤重為 3100g；再現性 $\leq 0.01g$ ；線性誤差 $\pm 0.02g$ ；穩定時間 1.5s。



### 3.3.2 濁度計

本實驗使用的濁度計設備由 Hanna 公司所生產，其型號為 HI-98703。用以檢測水樣之濁度。將 10mL 的水樣倒入樣品槽，並以拭鏡紙將樣品槽表面擦拭乾淨即可直接放入濁度計進行檢測、讀值。檢測範圍 0.00~9.99; 10.0~99.9; 100~1000 NTU。準確度在水溫 25°C 時為 $\pm 2\%$ ；再現性 $\pm 1\%$ 或 0.02NTU。

### 3.3.3 pH 計

本試驗使用的 pH 計設備由 Suntex 公司所生產，其型號為 SP-2100。用以檢測水樣之酸鹼值。設定水溫後將感測頭插入水樣後，由顯示螢幕上讀值即可得知水樣酸鹼值，並且在每次測量前先以去離子水清洗感測頭。使用完畢後將感測頭以去離子水清洗，再放入含保存液的保護套中保存。檢測範圍-2.00~+16.00 pH；準確度 $\pm 0.01$  pH。

### 3.3.4 導電度計

本實驗使用的導電度計設備由 Suntex 公司所生產，其型號為 SC-170。用以檢測水樣之導電度。將感測頭插入水樣後，由顯示螢幕上讀值即可得知水樣導電度，並且在每次測量前先以去離子水清洗感測頭。使用完畢後將感測頭以去離子水清洗，再以沾吸的方式擦乾並放入保護套中保存。檢測範圍 0.00 $\mu$ ~+2000ms/cm；準確度在導電度 $\leq 50$ ms/cm 時為 $\pm 1\%$ 。



### 3.3.5 溶氧計

本實驗使用的溶氧計設備由 YSI 公司所生產，其型號為 DO200A。用以檢測水樣之溶氧度。將感測頭插入水樣後，由顯示螢幕上讀值即可得知水樣溶氧度，並且在每次測量前先以去離子水清洗感測頭。使用完畢後將感測頭以去離子水清洗，再放入含有濕潤海綿的保護套中保存。溶氧檢測範圍 0~20ppm；溫度適用範圍 0~50 °C。

### 3.3.6 比色計

本實驗使用的比色計設備由 HACH 公司所生產，其型號為 DR900。用以分析生化需氧量、氨氮、硝酸鹽和亞硝酸鹽實驗所產生的檢驗數值。選擇相應檢驗模式，以空白樣品進行歸零後，即可開始檢驗欲檢驗之水樣。盛裝水樣之樣品槽應先以拭鏡紙將樣品槽表面擦拭乾淨才得以放入比色計進行檢測、讀值。

### 3.3.7 分光光度計

本實驗使用的分光光度計設備由 Hitachi 公司所生產，其型號為 U-3000。設定光波長後，以標準液繪製檢量線，即可檢測相應之樣品數值。盛裝水樣之樣品槽應先以拭鏡紙將樣品槽表面擦拭乾淨才得以放入分光光度計進行檢測、讀值。波長範圍 190~900 nm。



圖 3.3.1 實驗儀器圖

- 註： 1. A 為電子秤，B 為濁度計，C 為 pH 計，D 為導電度計，E 為溶氧計，F 為比色計，G 為分光光度計
2. A-F 儀器示意圖片皆取自產品生產公司之官方網站，G 儀器示意圖為實際拍攝。



### 3.4 實驗方法

#### 3.4.1 高、低水溫植物吸收營養鹽實驗

本實驗在不同氨氮濃度的畜牧廢水中種植粉綠狐尾藻，並利用溫控設備將實驗分為高水溫組和低水溫組。以求得在台灣夏季與冬季的氣候環境下，植物吸收營養鹽速率和淨化畜牧廢水的效率。實驗設置示意簡圖如圖 3.3.1.1。

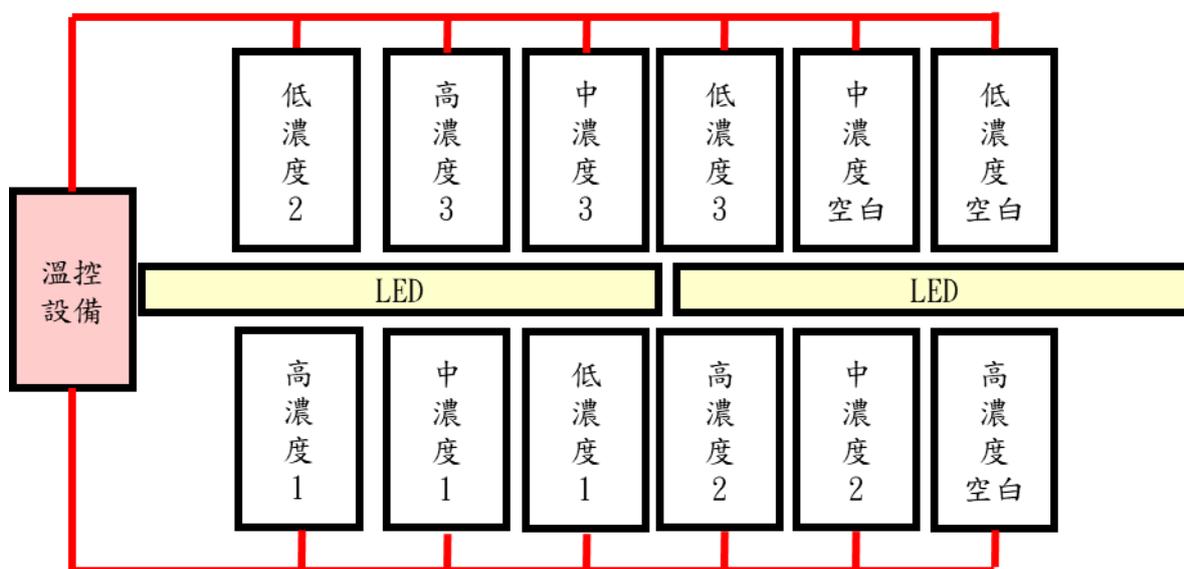


圖 3.4.1.1 高、低水溫植物吸收營養鹽實驗設置示意圖

先在收集來的畜牧廢水原水中加入固形物糞便或蒸餾水以提升或稀釋廢水氨氮的濃度，調配出三種實驗需求隻高、中、低濃度氨氮（約 200、100、60ppm）畜牧廢水，每組調製 20L。

再將實驗用畜牧廢水平均倒入塑膠整理箱中並以貼紙標記水位，每種氨氮濃度各 4 箱，每箱各 5L，其中 3 箱分別種植 20 株狐尾藻作三重複實驗，剩餘 1 箱作為空白對照組，共 12 箱。每個塑膠整理箱放入 50W 石英加熱棒 1 支，搭配溫度控制設備來保持實驗用畜牧廢水的水溫。台灣冬季水溫約為 20°C，故將低水溫組設定為 20°C；由於畜牧廢水水面具有大量懸浮固體，夏季水溫上升較緩慢，水溫

常維持在 28°C 左右，故將高水溫組設定為 28°C。

在地面上方約 30cm 架設 2 支 20W LED 燈管作為植物光照來源，並以定時器控制光照時數，設定每日連續光照 12 小時；黑暗 12 小時。

依據文獻，設定實驗持續 21 天，在第 0、7、14、21 日進行檢測(Zhou 等人，2017)(劉等人，2018)。每次採水樣 50mL。檢測項目包括：植株鮮重、植物覆蓋率、濁度、酸鹼值(pH)、導電度(EC)、生物需氧(BOD)、化學需氧量(COD)、硝酸鹽( $\text{NO}_3^-$ )、亞硝酸鹽( $\text{NO}_2^-$ )、氨氮( $\text{NH}_3$ )、總磷(TP)等。

第一次實驗從 2019 年 3 月 20 日至 2019 年 4 月 10 日，為冬季-高、中、低濃度氨氮廢水組，起始氨氮濃度分別為 195ppm、103ppm、58ppm。

第二次實驗從 2019 年 4 月 19 日至 2019 年 5 月 10 日，為夏季-中、低濃度氨氮廢水組，起始氨氮濃度分別為 102ppm、59ppm。

第三次實驗從 2019 年 5 月 1 日至 2019 年 5 月 22 日，為夏季-高濃度氨氮廢水組，起始氨氮濃度為 208ppm。

### 3.4.2 營養鹽吸收效率驗證與提升實驗

以高、低水溫植物吸收營養鹽實驗所得到的吸收效率數據為基礎，調整夏季植物吸收營養鹽實驗的設計，將植物的種植方式改為每 7 日替換枯死植物株或全部植物株，驗證並追求更佳的植物營養鹽吸收效率。另外，實驗以打氣馬達來推動水體和增加水中溶氧，探討是否能用此物理方法提高植物的生存率和生長率，進而達到提高營養鹽的吸收效率。實驗設置示意簡圖如圖 3.3.2.1。

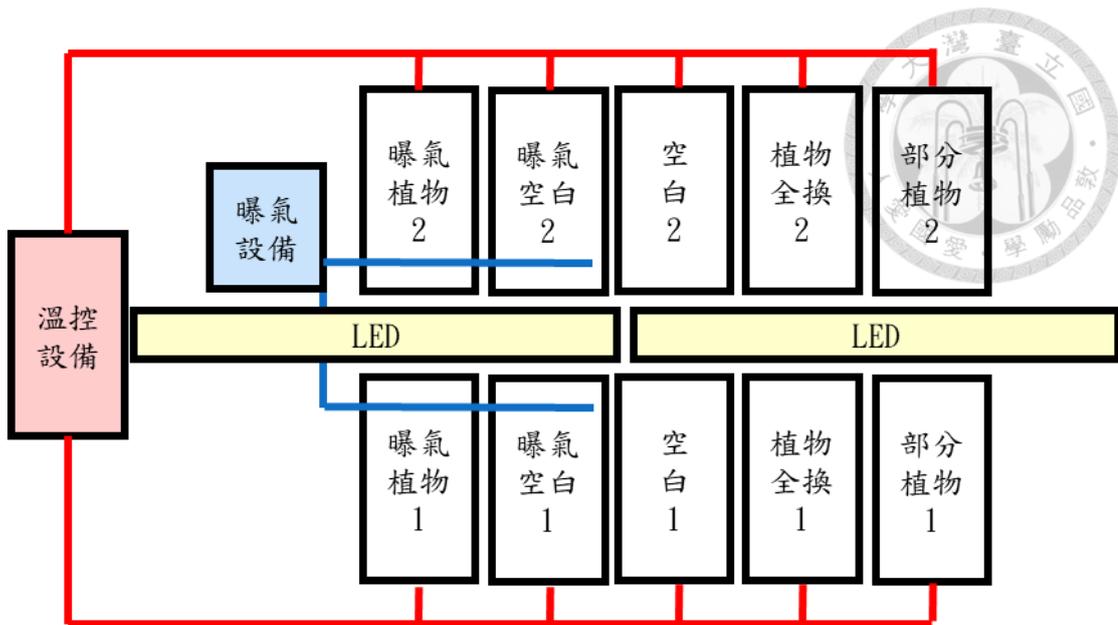


圖 3.4.2.1 營養鹽吸收效率驗證與提升實驗設置示意圖

本次實驗從 2019 年 6 月 3 日至 2019 年 6 月 24 日。實驗共分 5 組，分別為曝氣-部分補植植物組、曝氣空白組、部分補植植物組、全部補植植物組和空白組，每組二重複，共 10 組。

先在收集來的畜牧廢水原水中加入固形物牛糞便以提升廢水氮氮的濃度，調配出高濃度氮氮實驗用廢水 50L。起始氮氮濃度為 208.33ppm。將配置好的濃度氮氮實驗用廢水平均倒入 10 組塑膠整理箱中，每箱各 5L。挑選 6 組種植植物，每組分別種植 20 株狐尾藻；剩餘 4 組為空白組。再挑選 2 組植物組和 2 組空白組裝設打氣馬達，出氣功率為 1000cc/min，並以定時器設定馬達每運作 45 分鐘休息 15 分鐘。

每個塑膠整理箱放入 50W 石英加熱棒 1 支，搭配溫度控制設備來保持實驗用畜牧廢水的水溫為 28°C。

在地面上方約 30cm 架設 2 支 20W LED 燈管作為植物光照來源，並以定時器控制光照時數，設定每日連續光照 12 小時；黑暗 12 小時。

依據文獻，設定實驗持續 21 天，在第 0、7、14、21 日進行檢測(Zhou 等人，2017)(劉等人，2018)。每次採水樣 50mL。檢測項目包括：植株鮮重、植物覆蓋率、濁度、pH、EC、BOD、COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>3</sub>、TP 等。另外在第 17 日多檢測一次植物鮮重和 NH<sub>3</sub>。

### 3.4.3 水體濁度和營養鹽濃度關係實驗

由於高中低濃度廢水原液中仍很多固形物廢污，在取樣檢測水樣中殘留營養鹽濃度時，可能因為採得水樣中之固態營養鹽數量差異造成數據誤差，因此需要探討採取水樣計測水質時，水樣中的固型物濃度採得量變化是否會造成營養鹽檢測值的誤差，因此藉由本實驗測試水樣中濁度與營養鹽濃度之間的關係。

取 100mL 水樣以 200 目的濾網進行過濾取得過濾清液。再將殘留濾網上大於 75 $\mu$ m 的固體重新溶入去離子水中並定量至 100mL，取得過濾物溶液。檢測原液、過濾清液和過濾物溶液的濁度、氨氮濃度和總磷濃度，以探討濁度和營養鹽濃度之間的關係。

### 3.4.4 植物死亡影響水質之植物管理實驗

探討植物在實驗期間死亡而無法持續吸收營養鹽之後，水體中的植物殘體是否會對淨化水質的過程反而造成負面的影響。

將實驗過後的死亡的株狐尾藻殘骸以去離子水沖洗後進行秤重。再將植物殘骸投入 5L 的去離子水中。於第 0 日和第 7 日取 50mL 的水樣來檢測氨氮濃度，探討死亡的植物殘株是否會造成水體氨氮的上升。

實驗從 2019 年 6 月 17 日至 2019 年 6 月 24 日，投入 13 株的狐尾藻殘骸，重

36.79g。



## 3.5 資料整理法

### 3.5.1 植物鮮重

將植物連同紗網自塑膠整理箱中取出，靜置於排水墊上 10 分鐘以上(如圖 3.6.1.1)，以電子秤(Practum 3102)測得紗網與植物的總重，再扣除空紗網重即可求得植物鮮重。



圖 3.5.1.1 將植物靜置於排水墊上去除水重

### 3.5.2 植物覆蓋率

相機從塑膠整理箱上方、鏡頭垂直水面拍攝植物的分布情況。再以影像分析軟體 ImageJ 進行植物覆蓋率的計算。

操作步驟：

1. 開啟軟體匯入欲分析的照片。

2. 圈選水體的面積範圍後擷取該畫面。

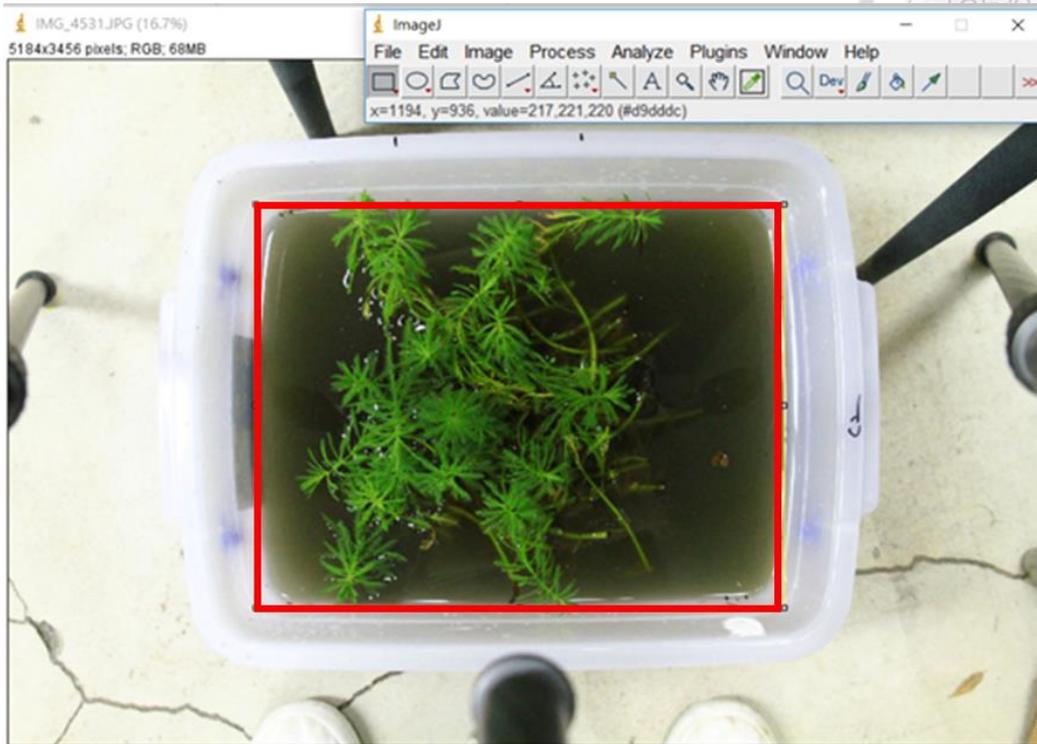


圖 3.5.2.1 ImageJ 步驟 2.介面圖

3.開啟 Threshold Color，照片紅色部分為欲計算的面積。從 Hue 中選取植物包含的顏色區間。

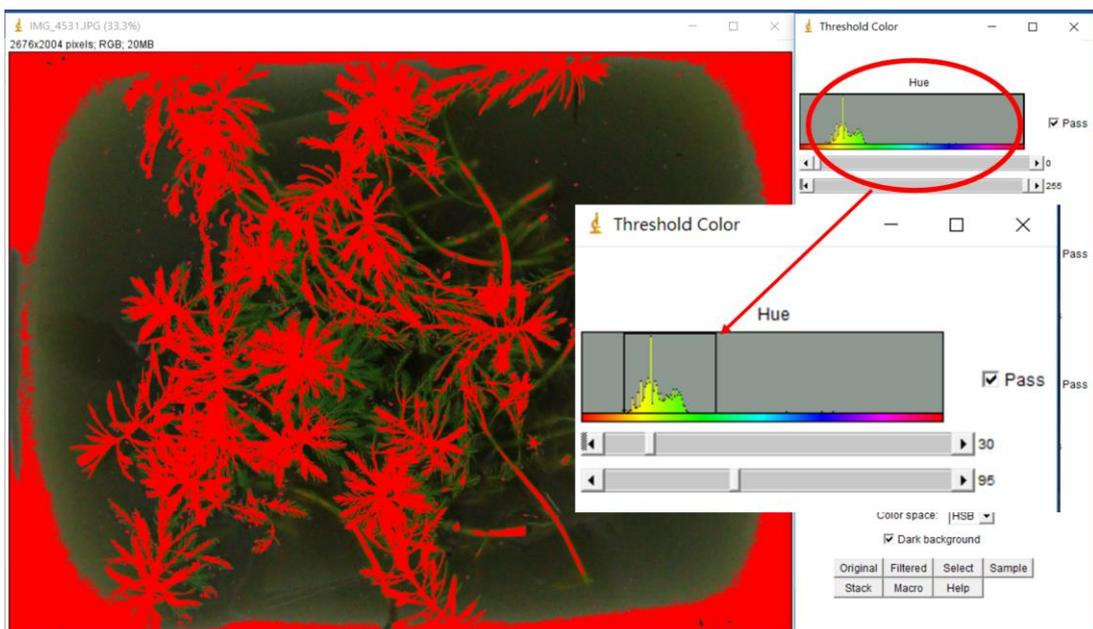


圖 3.5.2.2 ImageJ 步驟 3.介面圖

4.調整 Saturation 和 Brightness，去除塑膠整理箱、水體和水體反光的部分，並填滿植物體的部分。

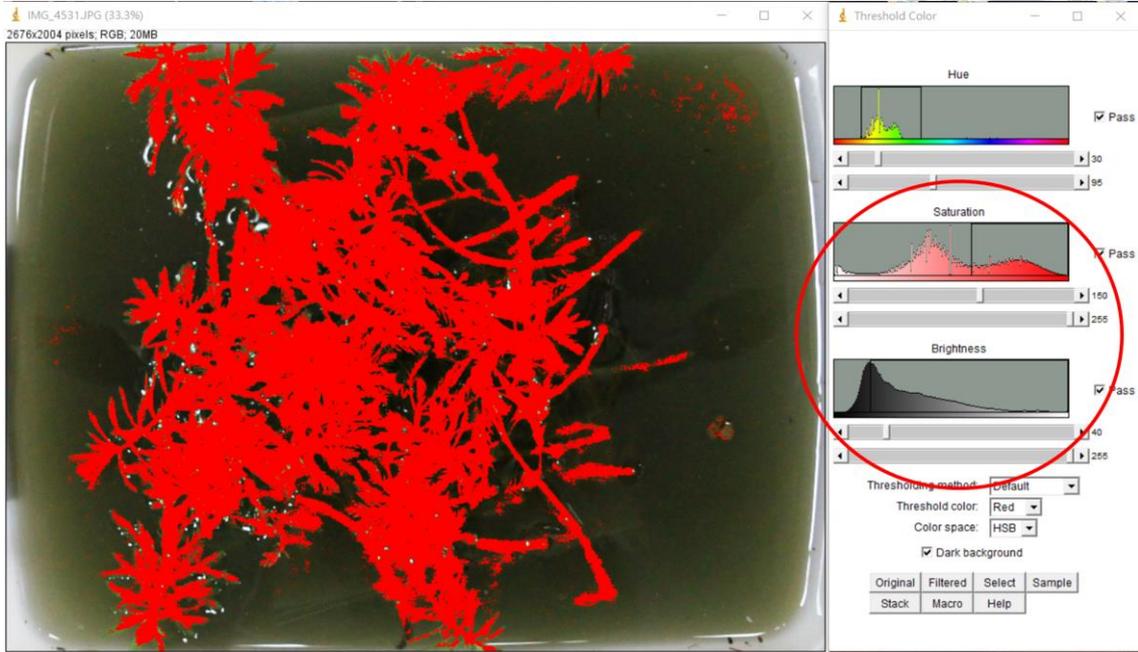


圖 3.5.2.3 ImageJ 步驟 4.介面圖

5.選定植物體範圍後利用 Analyze Particles 求得植物體面積比率，即為覆蓋率。

### 3.5.3 濁度

取 10mL 的水樣，利用濁度計(HI-98703)測量水樣之濁度。量測單位為 NTU。

### 3.5.4 酸鹼值

利用 pH 計(SP-2100)，設定水溫後將感測頭插入水樣即可測量酸鹼值。測量單位為 pH。每次測量前先以去離子水清洗感測頭。



### 3.5.5 導電度

利用導電度計(SC-170)，將感測頭插入水樣即可測量導電度。測量單位為  $\mu\text{S}/\text{cm}$  或  $\text{mS}/\text{cm}$ 。每次測量前先以去離子水清洗感測頭。

### 3.5.6 生化需氧量(BOD)

參考水中生化需氧量檢測方法 (NIEAW 510.54B)，將水樣加入 BOD 瓶並以稀釋水稀釋後，以溶氧計(DO200A)量測水樣，測得溶氧量  $D_1$ 。量測完畢的水樣以水封法隔離空氣再放入恆溫培養箱中 5 天。恆溫培養箱溫度控制在  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。5 天後再次測量水樣溶氧量，測得溶氧量  $D_2$ 。 $(D_1-D_2)$ \*稀釋倍率即可求得生化需氧量，單位為 ppm。

稀釋水的製備：每 1L 蒸餾水加入磷酸鹽緩衝溶液、硫酸鎂溶液、氯化鈣溶液及氯化鐵溶液各 1 mL。再以打氣機打氣 24 小時提高稀釋水之溶氧。

### 3.5.7 化學需氧量(COD)

參考 HACH USEPA Reactor Digestion Method 8000，取 2.0mL 的水樣加入 COD 試劑 HR 之試管中，並另外取 2.0mL 的去離子水加入 COD 試劑 HR 之試管中作空白組。鎖緊試管蓋並搖晃混和均勻後，將試管以  $150\text{ }^\circ\text{C}$  加熱消化 2 小時。加熱完畢後，待試管冷卻至室溫後以比色計(DR900)進行測量求得化學需氧量，單位為 ppm。

### 3.5.8 硝酸鹽( $\text{NO}_3\text{-N}$ )

參考 HACH Cadmium Reduction Method 8039，將 NitraVer5 硝酸鹽試劑加入 10mL 的空白組去離子水和水樣後，搖晃 1 分鐘使其均勻混合。等待 5 分鐘後以比

色計(DR900)進行測量求得硝酸鹽，單位為 ppm。



### 3.5.9 亞硝酸鹽(NO<sub>2</sub>-N)

參考 HACH USEPA Diazotization Method 8507(371)，將 NitriVer3 亞硝酸鹽試劑加入 10mL 的空白組去離子水和水樣後，搖晃均勻等待 20 分鐘，再以比色計(DR900)進行測量求得亞硝酸鹽，單位為 ppm。

### 3.5.10 氨氮(NH<sub>3</sub>-N)

參考 HACH Salicylate Method 10023，取 2.0mL 的水樣加入 AmVer 試劑試管中，並另外取 2.0mL 的去離子水加入 AmVer 試劑試管中作空白組。每支試管再加入水楊酸(Salicylate)和三聚氰酸(Cyanurate) 試劑粉末。鎖緊試管蓋並搖晃混和均勻後等待 20 分鐘，再以比色計(DR900)進行測量求得氨氮，單位為 ppm。

### 3.5.11 總磷

參考水中磷檢測方法—分光光度計／維生素丙法(NIEA W427.53B)，取稀釋水樣 50mL 加入 0.4g 過硫酸銨後，以加熱板將水樣緩慢煮沸消化直至殘留約 10mL 液體。消化過的水樣冷卻後，以氫氧化鈉溶液將水樣調整至 pH7 ±0.2，再用去離子水將水樣增加到 50mL。最後添加 8mL 的混合試劑，混合均勻後，在 10~30 分鐘內以分光光度計(U-3000)於波長 880 nm 處讀取吸光度，並由檢量線求得磷濃度，單位為 ppm。

混合試劑的調製：依次均勻混合 50 mL 5N 硫酸溶液，5 mL 酒石酸銻鉀溶液，15 mL 鉬酸銨溶液及 30 mL 維生素丙溶液使成 100 mL 混合試劑。酒石酸

銻鉀溶液是將 1.3715 g 酒石酸銻鉀溶於去離子，再定量至 500mL。鉬酸銨溶液是將 20 g 鉬酸銨溶於於去離子水中，再定量至 500 mL。維生素丙溶液是將 1.76 g 維生素丙溶於試劑水中，再定量至 100 mL。

檢量線的調製：配製 0、0.05ppm、0.1ppm、0.2ppm、0.3ppm 和 0.5ppm 的磷標準溶液。添加 8mL 的混合試劑，混合均勻後，在 10~30 分鐘內以分光光度計(U-3000)於波長 880 nm 處讀取吸光度，以此繪製吸光度與磷濃度之檢量線。

## 第四章 結果與討論



### 4.1 植物鮮種變化

表 4.1.1 高、低水溫不同濃度氨氮廢水之植物鮮重

廢水標本環境條件				植物鮮種(g)						
				氨氮濃度		第0日(t0)	第7日(t1)		第14日(t2)	
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)		74.82±0.8	95.55±13.9		77.79±2.1		49.21±0.7	
		中(B)濃度 (102ppm)		50.43±1.3	47.56±4.3		40.11±5		35.88±4.1	
		低(C)濃度 (59ppm)		50.1±1.3	46.05±1.4		37.98±1.5		33.12±0.6	
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)		-----	-----		-----		-----	
		中(B)濃度 (102ppm)		-----	-----		-----		-----	
		低(C)濃度 (59ppm)		-----	-----		-----		-----	
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)		34.11±3	39.51±6.4		26.3±0.7		18.19±1.9	
		中(B)濃度 (103ppm)		32.94±1.1	46.15±4.2		25±0.6		20.66±0.5	
		低(C)濃度 (58ppm)		33.56±1.8	46.68±4		37.35±4.2		27.49±0.9	
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)		-----	-----		-----		-----	
		中(B)濃度 (103ppm)		-----	-----		-----		-----	
		低(C)濃度 (58ppm)		-----	-----		-----		-----	
					補植前	補植後	補植前	補植後		
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	部分補植	高濃度 (208.33ppm)	70.38±0.1	105.01±13.6	101.15±17.6	68.17±8.6	61.69±17.8	50.82±4.5
			空白組		-----	-----		-----		-----
		部分補植	69.15±0.1		79.67±1.6	71.92±0.7	68.68±1.5	51.42±0	52.14±0.6	
		全部補植	69.95±0.2		79.04±3.6	68.74±13.9	67.62±1.2	66.6±6.1	58.91±2	
		無植物空白組	-----		-----		-----		-----	

註：1. 模擬夏季：高水溫 28°C；冬季：低水溫 20°C。

2.  $\bar{t}_a$ ：每周植物平均重量(n=3)，a：周次(a=1~3)。



表 4.1.2 高、低水溫不同濃度氮氮廢水之植物重量變化

廢水標本環境條件			植物重量變化(%)				
氮氮濃度			t0~t1	t1~t2	t2~t3		
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	+27.71	-18.59	-36.74		
		中(B)濃度 (102ppm)	-5.69	-15.67	-10.53		
		低(C)濃度 (59ppm)	-8.10	-17.53	-12.80		
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	-----	-----	-----		
		中(B)濃度 (102ppm)	-----	-----	-----		
		低(C)濃度 (59ppm)	-----	-----	-----		
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	+15.83	-33.44	-30.83		
		中(B)濃度 (103ppm)	+40.12	-45.83	-17.36		
		低(C)濃度 (58ppm)	+39.07	-19.98	-26.39		
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	-----	-----	-----		
		中(B)濃度 (103ppm)	-----	-----	-----		
		低(C)濃度 (58ppm)	-----	-----	-----		
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	部分補植	+49.21	-32.61	-17.62
		空白組		-----	-----	-----	
		部分補植		+15.22	-4.51	+1.40	
		全部補植		+12.99	-1.64	-11.55	
		無植物空白組		-----	-----	-----	



註：1. 模擬夏季：高水溫 28°C；冬季：低水溫 20°C。

2. 每周間植物重量變化(%)= $\frac{\bar{t}_a - \bar{t}_{a-1}}{\bar{t}_{a-1}} * 100\%$

$\bar{t}_a$ ：每周植物平均重量(n=3)，a：周次(a=1~3)。

+值表植物增重，-值表植物因枯萎或死亡減重。

3. 植物補植管理組之 $\bar{t}_a$ 為補植前重量， $\bar{t}_{a-1}$ 為補植後重量。

比較冬、夏季吸收植物營養鹽實驗結果，不論低水溫之三種濃度組或高水溫高濃度組，植物在前 7 日的生長情況良好，植物增重明顯，增長率達 15.83~40.12%。至第 14 日起，所有組別植物皆開始枯萎、死亡。低水溫之高、中濃度組之植物鮮重皆已低於起始重量；低水溫低濃度組和高水溫高濃度組之植物鮮重雖仍高於起始重量，但增重速率已自第 1 周之 39.07%和 27.71%降至-19.98%和-18.95%，。至實驗結束的第 21 日為止，所有實驗組的植物重量皆低於起始的種植重量，減少率約為-10.53~-36.74%。

高水溫之中、低濃度組之植物植物鮮種從實驗開始開始呈現負成長。至第 7 日為止，所有組植物鮮重僅略微減少。第 14 日開始至實驗結束，所有組別植物鮮重快速減少。

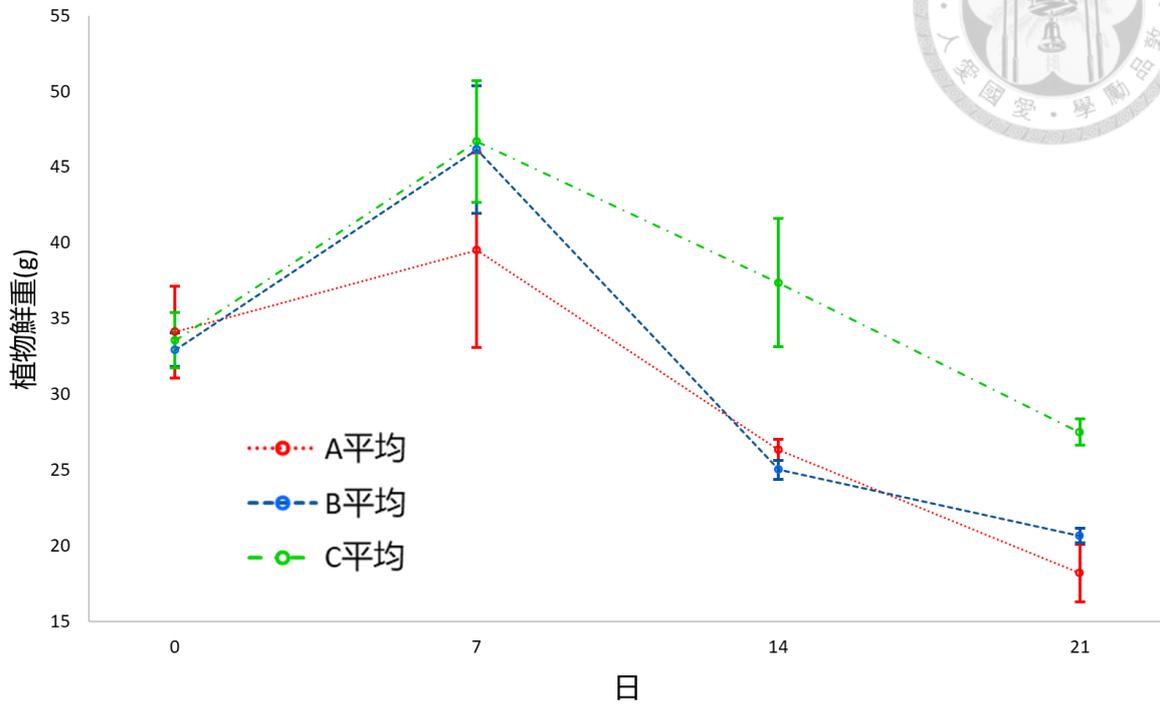


圖 4.1.1 植物在低水溫不同氨氮濃度之鮮重變化

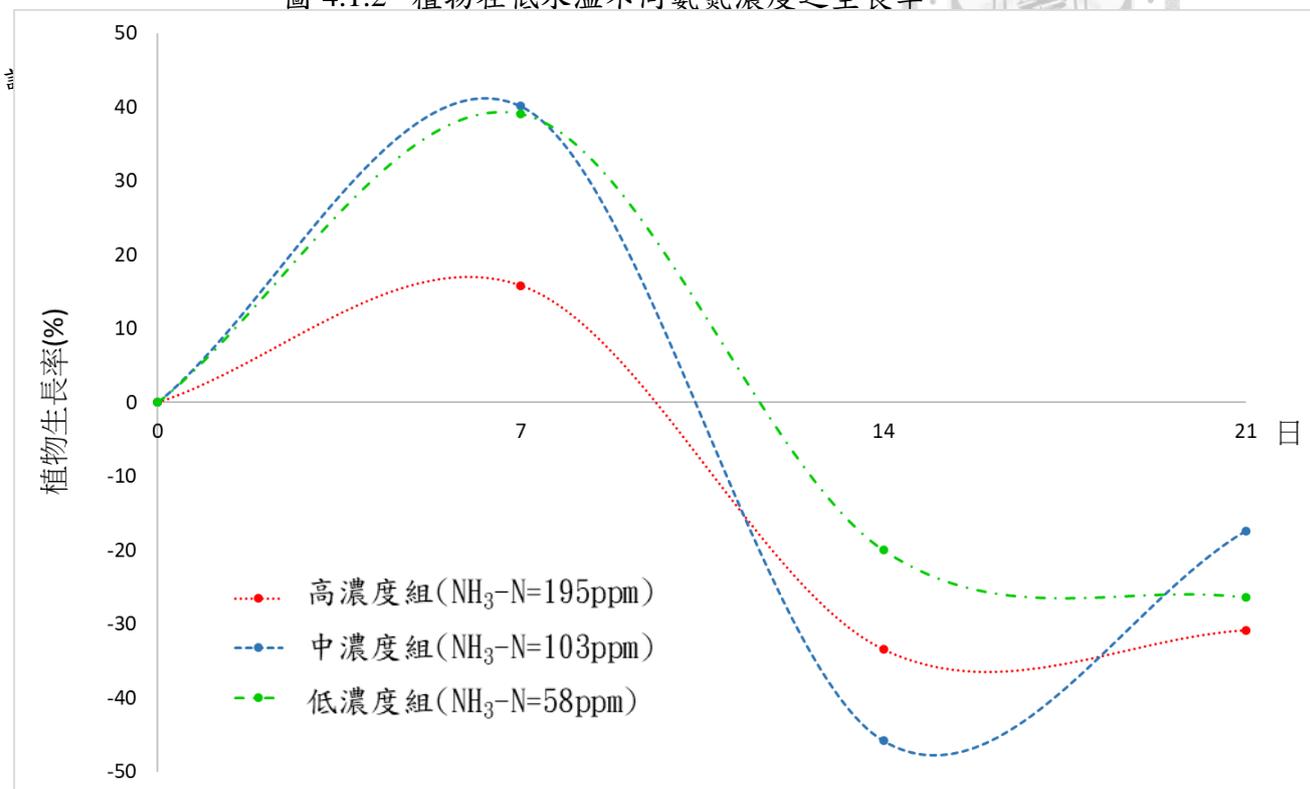
註：A 為高濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=195\text{ppm}$ )之平均鮮重( $n=3$ )

B 為中濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=103\text{ppm}$ )之平均鮮重( $n=3$ )

C 為低濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=58\text{ppm}$ )之平均鮮重( $n=3$ )



圖 4.1.2 植物在低水溫不同氨氮濃度之生長率



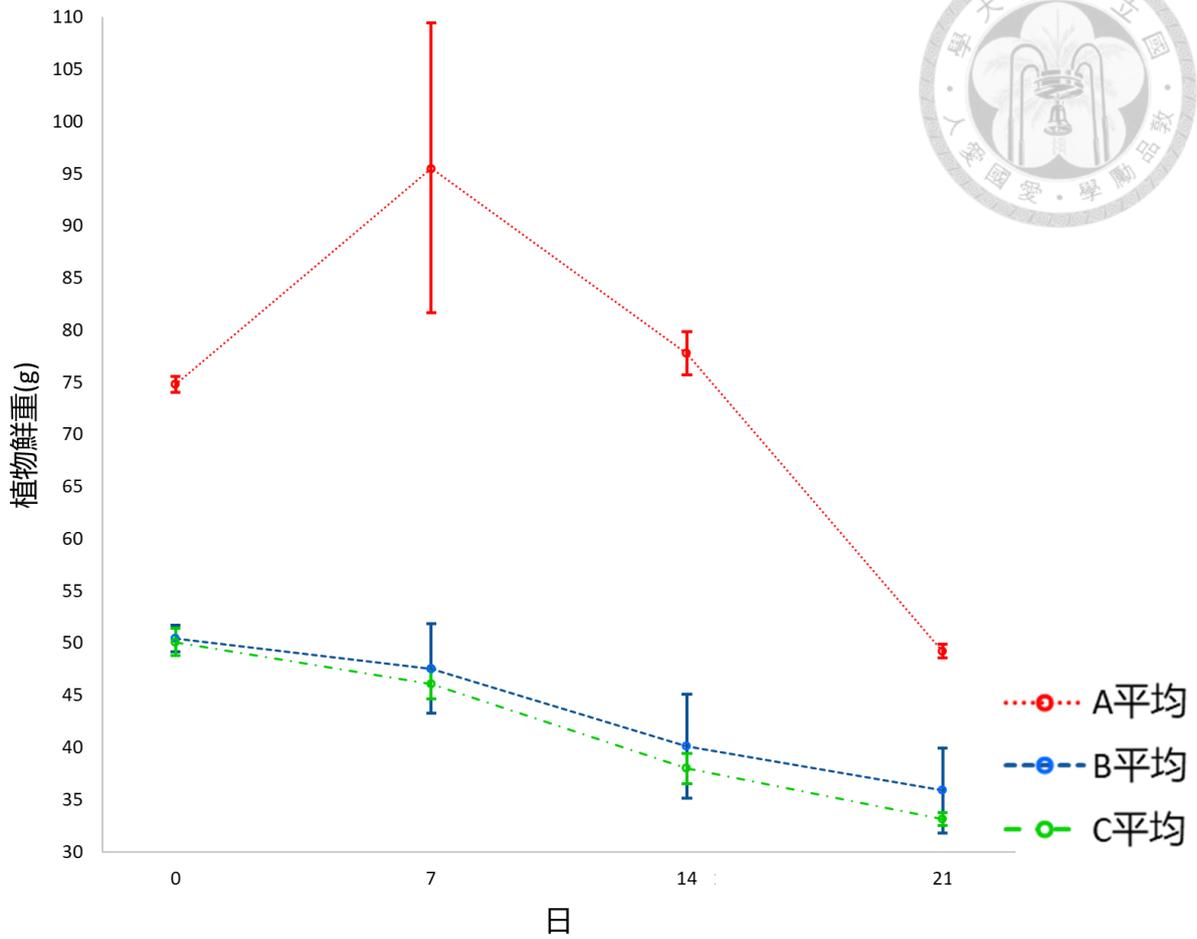


圖 4.1.3 植物在高水溫不同氨氮濃度之鮮重變化

註：A 為高濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=208\text{ppm}$ )之平均鮮重( $n=3$ )

B 為中濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=102\text{ppm}$ )之平均鮮重( $n=3$ )

C 為低濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=59\text{ppm}$ )之平均鮮重( $n=3$ )

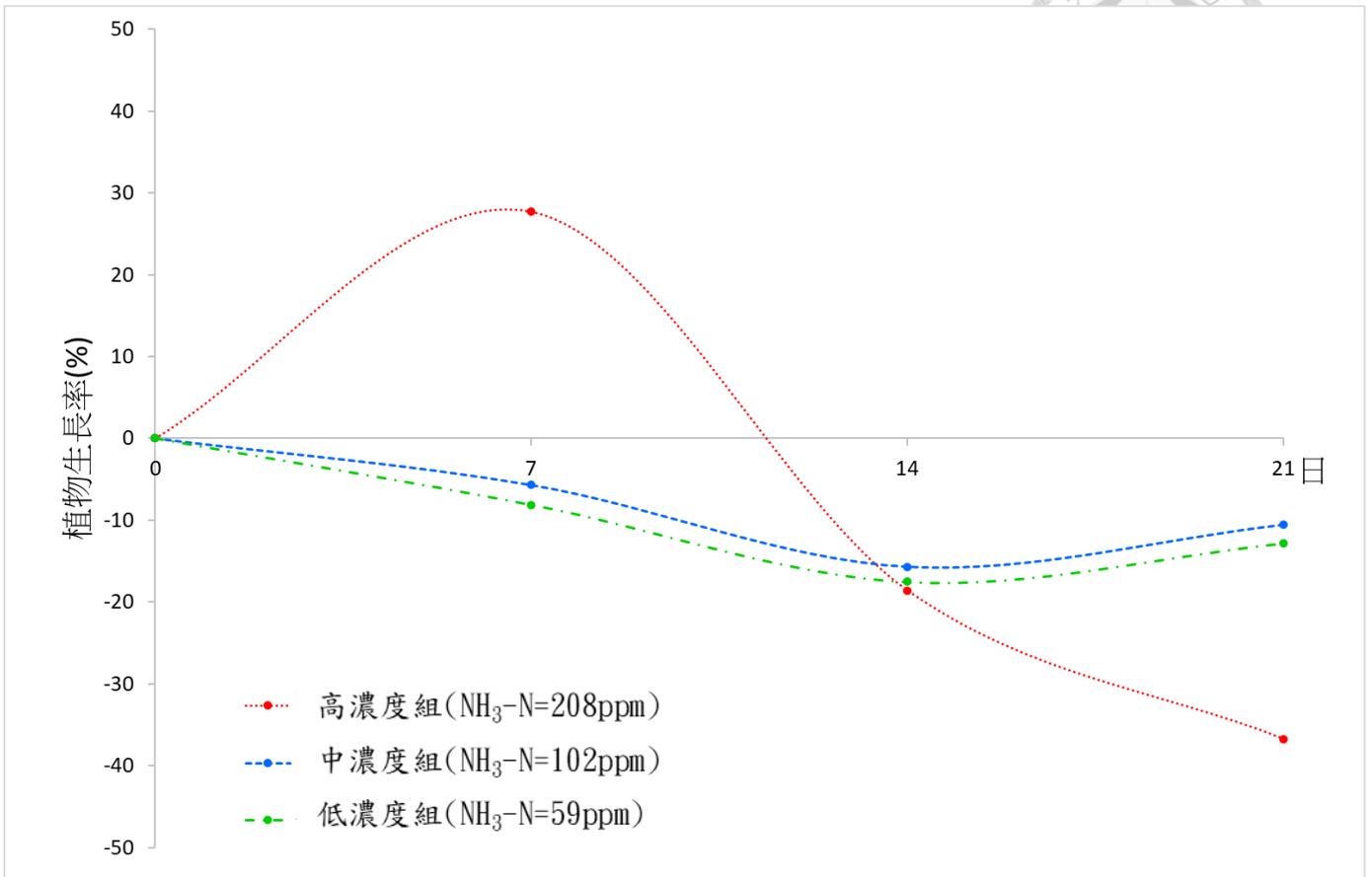


圖 4.1.4 植物在高水溫不同氨氮濃度之生長率

註：生長率(%)= $\frac{\bar{t}_a - \bar{t}_{a-1}}{\bar{t}_{a-1}} * 100\%$

$\bar{t}_{na}$ ：每周植物平均重量(n=3)，a：周次(a=1~3)。

+值表植物增重，-值表植物因枯萎或死亡減重。



高溫組前 7 日的鮮重變化現象也可在營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中的全部補植植物組中得到驗證。根據表 4.1.1，廢水氨氮起始濃度為 208.33ppm，從第 0 日到第 7 日為止，植物鮮重有明顯的增加，由 69.15g 提升至 79.67g，生長率為 15.2%。然而，在第 7 日和第 14 日的廢水氨氮濃度分別降至 99.5ppm 和 51ppm 時，7 日後的植物生長率分別為-4.5%和 1.4%。與夏季植物吸收營養鹽實驗做比較，高、中、低氨氮起始濃度分別為 208ppm、102ppm、59ppm 下，第 0 日到第 7 日的生長率分別為 27.7%、-5.7%、-8.1%。說明了與高濃度氨氮組的情況相比，中、低濃度氨氮組的植物成長情況明顯較差。

比較營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中的曝氣組和無曝氣組。在替換死亡和枯萎植物的情況下，以前 7 日補植完畢後的植物鮮重作為起始重量計算生長率。曝氣組第 7 日生長率為 49.2%，第 14 日生長率則為-32.6%；一般組第 7 日生長率為 13%，第 14 日生長率則為-1.6%。植物鮮重增減趨勢與低水溫之三種濃度氨氮廢水組和高水溫高濃度氨氮廢水組相似，不過曝氣組的生長率變化幅度非常大。

比較兩種不同水溫吸收植物營養鹽實驗和營養鹽吸收效率驗證與提升實驗，在三周實驗期間，每周間各組別之植物平均鮮重變化率，可得到不同種植天數的植物在不同廢水氨氮濃度的生長情形，用以探討種植天數和廢水氨氮濃度對於粉綠狐尾藻的生長影響。

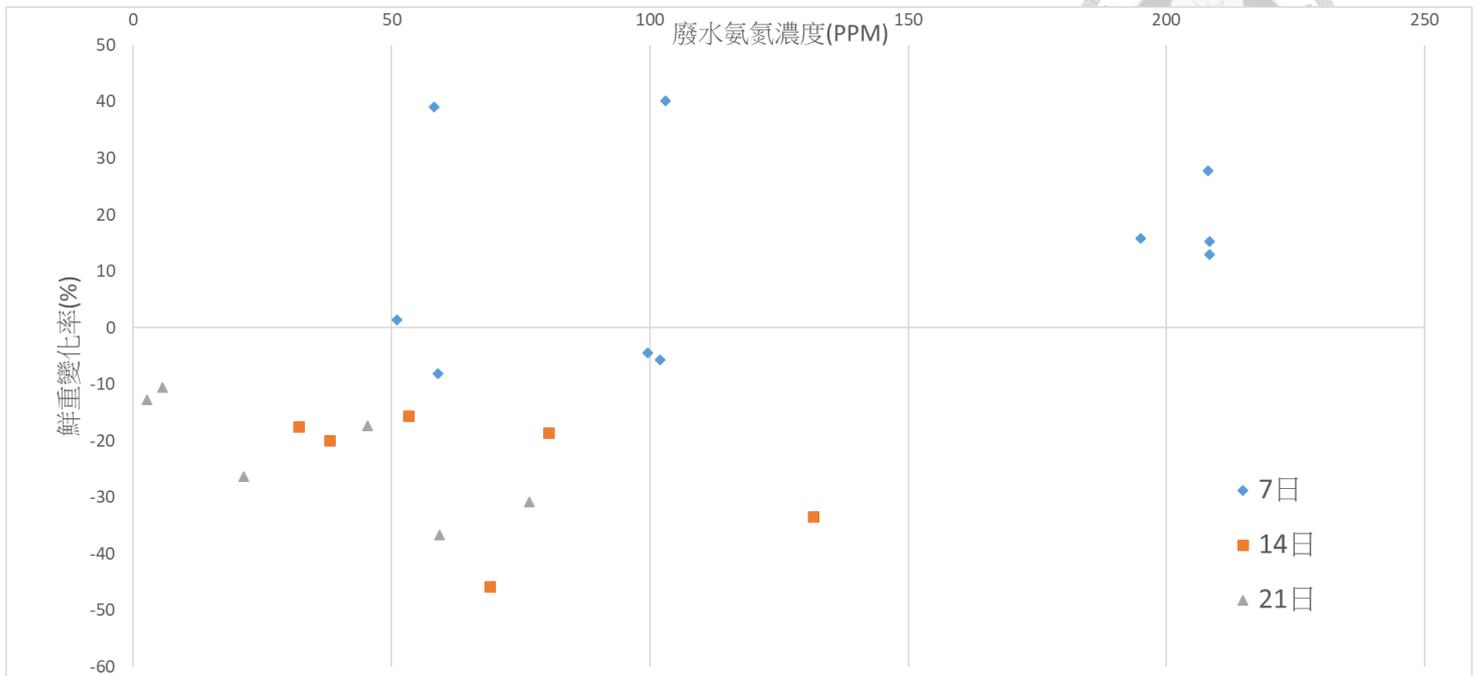


圖 4.1.5 不同種植天數的植物在不同氨氮濃度廢水之鮮重變化率

註：+值表植物增重，-值表植物因枯萎或死亡減重。

由圖 4.1.5 可發現，鮮重增加的組別皆是僅種植 7 日之植物；而種植 14 日和 21 日之植物的鮮重變化率皆為負值，且減少率隨著廢水氨氮濃度增加而上升。

與文獻比較， Zhou 等(2017)研究植物在氨氮濃度 40ppm 以上時，種植 21 日後植物生物質量有所減少；而劉等(2018)研究植物在氨氮濃度 70~210ppm 時，種植 21 日後植物生物質量有所增加。本研究實驗之植物生長情形與 Zhou 等(2017)研究結果較相符，而不及劉等(2018)研究結果。



## 4.2 植物覆蓋率變化

表 4.2.1 高、低水溫不同濃度氨氮廢水之植物覆蓋率變化

廢水標本環境條件				植物覆蓋率(%)					
氨氮濃度				第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)		
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)		10.94±1.2	7.71±4.6	5.33±2.3	2.22±0.3		
		中(B)濃度 (102ppm)		20.42±4.1	19.31±2.9	14.35±3	9.3±0.5		
		低(C)濃度 (59ppm)		23.36±3	19.97±2.2	12.72±5.3	11.83±6.8		
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)		-----	-----	-----	-----		
		中(B)濃度 (102ppm)		-----	-----	-----	-----		
		低(C)濃度 (59ppm)		-----	-----	-----	-----		
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)		26.57±2.1	24.13±4.2	21.59±2.5	13.06±3.4		
		中(B)濃度 (103ppm)		29.92±1.4	23.16±0.4	24.47±1.5	19.59±2.6		
		低(C)濃度 (58ppm)		30.38±1	25.52±2.4	30.12±1.8	20.99±3.1		
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)		-----	-----	-----	-----		
		中(B)濃度 (103ppm)		-----	-----	-----	-----		
		低(C)濃度 (58ppm)		-----	-----	-----	-----		
				補植前	補植後	補植前	補植後		
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	部分補植空白組	22.91±4.8	19.82±3.8	26.11±2.4	20.44±5.9	25.11±0.1	20.37±0.6
			-----	-----	-----	-----	-----		
		全部補植	高濃度(208.33ppm)	23.27±0.3	21.8±2.25	37.39±0.4	44.7±1.1	28.19±1.4	23.4±1.6
			26.77±1.7	24.17±2.23	24.12±1.1	28.7±1.1	32.13±0.5	28.18±1.2	
		無植物空白組	-----	-----	-----	-----	-----		

註：1. 模擬夏季：高水溫 28°C；冬季：低水溫 20°C。

2.  $\bar{t}_a$ ：每周植物平均覆蓋率(n=3)，a：周次(a=1~3)。



分析兩種水溫之植物營養吸收養鹽吸收實驗結果，將植物覆蓋率與實驗時間進行作圖，比較三週實驗期間之覆蓋率變化。

由圖 4.2.1 和圖 4.2.2，可以發現兩種水溫之植物覆蓋率都是隨著漸減。植物覆蓋率的多寡主要取決於植物的葉面積，說明在實驗的過程，植物的葉是逐漸枯萎、衰亡。而根據文獻指出，粉綠狐尾藻的莖比葉更能夠有效的控制、管理氮離子，因此在高氮氮的環境下，葉是比莖更容易受到影響而枯萎、死亡(Zhou, 2017)。本實驗的植物在低水溫之三種濃度和高水溫高濃度氮氮下的前 7 日，植物鮮重皆有增加，植物覆蓋率反而下降，說明植物莖仍在生長的時候，葉已經開始枯萎、衰亡，符合文獻之研究結果。

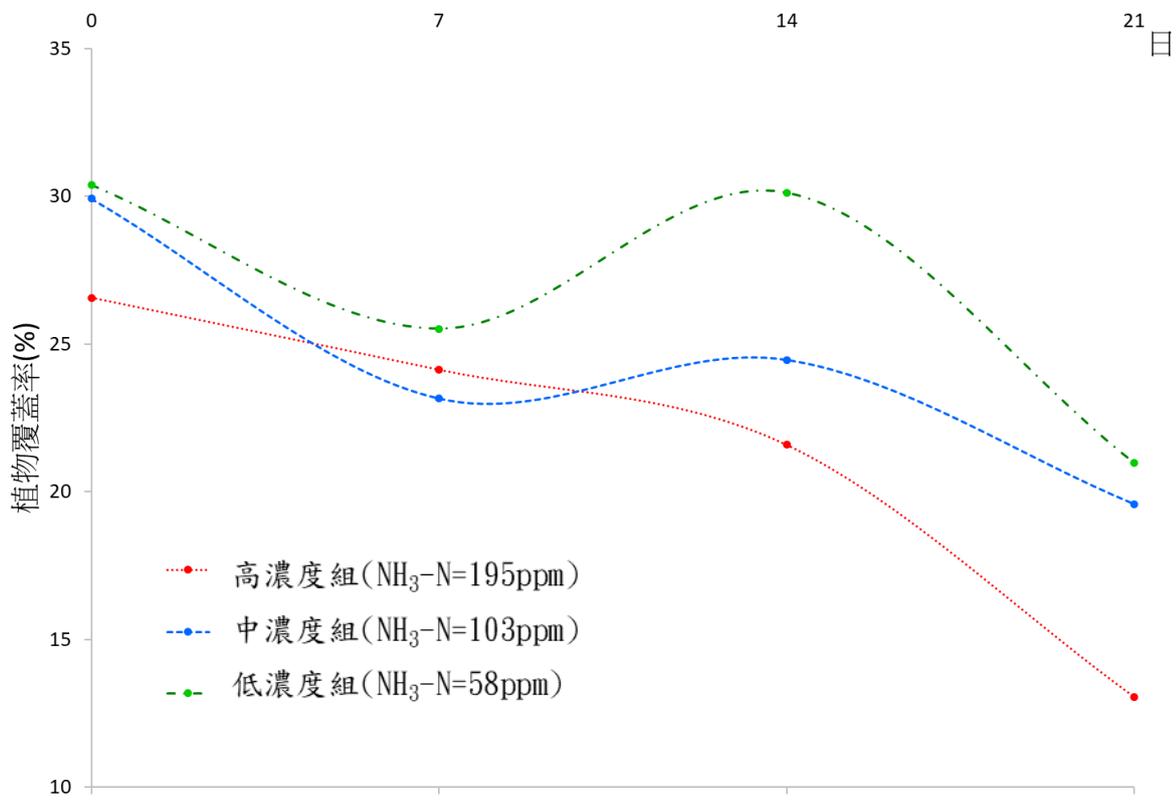


圖 4.2.1 低水溫不同濃度氨氮廢水之植物覆蓋率變化

註：各點為每周植物平均平均覆蓋率(n=3)

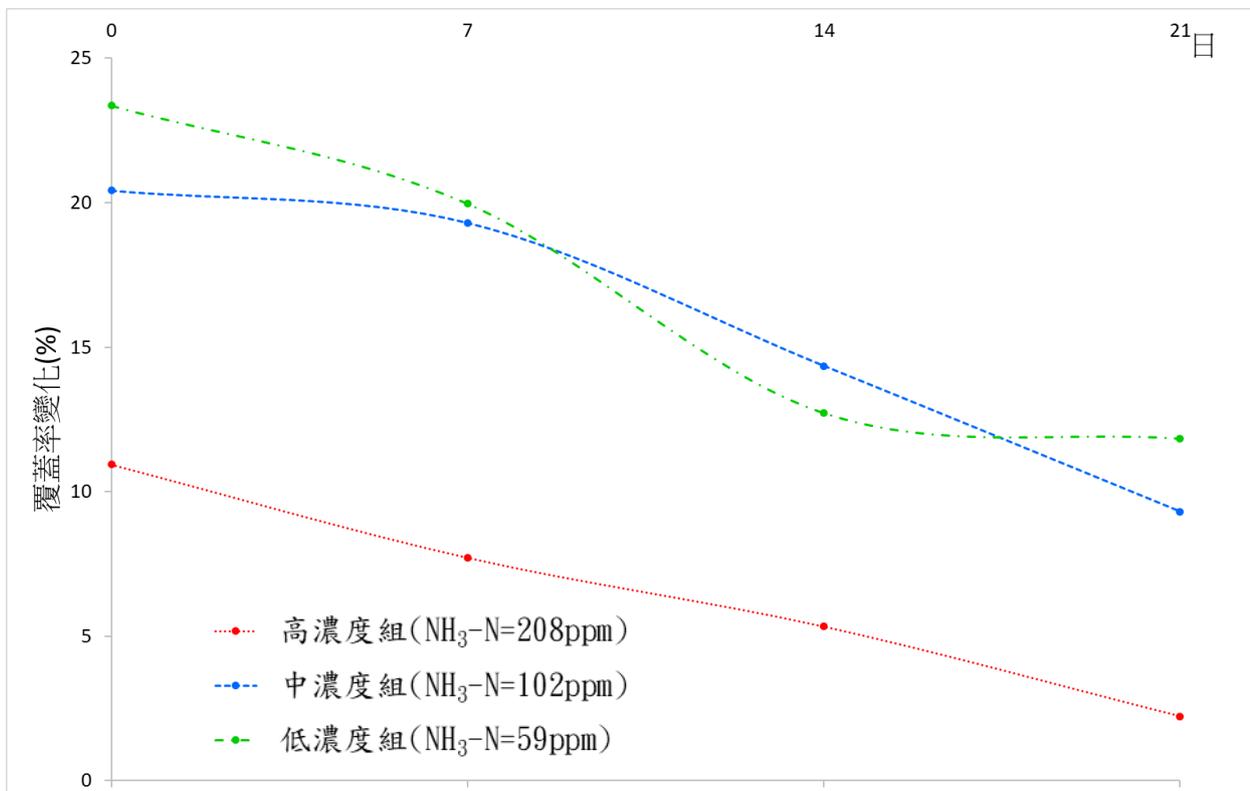


圖 4.2.2 高水溫不同濃度氨氮廢水之植物覆蓋率變化

註：各點為每周植物平均平均覆蓋率(n=3)



根據表 4.2.1，營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中，大部分的組別覆蓋率也都是下降的，植物組之全部補植組和部分補植組在第 7 日更換完植物後到第 14 日之間才有明顯增加。有可能是這兩組實驗的植物在替換過程擺放不當或植物需要更長的時間來恢復至自然狀態，導致在拍攝覆蓋率分析照片時有所誤差，影響分析結果。

### 4.3 植物生長與排放水水質指標項目變化

由於本實驗使用的廢水在各項水質檢測項目中，數值常高於儀器或實驗檢測方法可偵測範圍的情況，因此必須將水樣稀釋再進行檢驗。廢水中還包含了大量且顆粒大小不一的懸浮固體和沉澱物，在實驗設置和採樣的過程很難確保不同周別多次採樣水體是完全均勻的。以上因素都可能導致誤差產生，在後續討論時會敘述可能有較大誤差數值並推論。

### 4.3.1 濁度

表 4.3.1.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與濁度變化



廢水標本環境條件			濁度(NTU)				
氨氮濃度			第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)	
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	6500	1911.67± 789.6	3863.33± 1778.6	6793.33± 2075.9	
		中(B)濃度 (102ppm)	685	80.77±4	256.33±40.9	134.33±20.4	
		低(C)濃度 (59ppm)	504	74.2±6.2	109.73±26.5	120±14.4	
	無植物 空白組	高(A)濃度 (208ppm)	6500	1165	2470	6130	
		中(B)濃度 (102ppm)	685	325	291	115	
		低(C)濃度 (59ppm)	504	62.9	75.4	122	
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	1030	998±39	1055.67± 117.9	581±37.7	
		中(B)濃度 (103ppm)	998	871.67±79.7	1085±15	707.33±77.9	
		低(C)濃度 (58ppm)	1100	1033±77	972.5±11.5	555±119.5	
	無植物 空白組	高(A)濃度 (195ppm)	1030	441	406	706	
		中(B)濃度 (103ppm)	998	963	249	788	
		低(C)濃度 (58ppm)	1100	908	771	843	
高水溫 28°C	植物 補植 管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	13006.67± 3014.7	10190±1210	5677±4923	2700±1350
		空白組			10690±710	5600±3420	6340±3340
		部分 補植			13200	9935±765	2635±1005
		全部 補植			10580±720	6160±1130	6325±2975
		無植物 空白組			9790±4210	8330±1510	8985±2415

- 
- 註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。
2.  $\bar{\tau}_a$ ：每周水樣平均濁度(n=3,植物補植管理組 n=2)；a：周次(a=1~3)。
3. 數據修正：低水溫中濃度組平均刪除第 14 日 B1=353NTU 之數據；低水溫低濃度組平均刪除第 7 日 C1=104NTU 和第 14 日 C2=196NTU 之數據；植物補植管理部分補植組刪除第 7 日 C2=19600NTU 之數據。

根據表 4.3.1.1，選擇變化趨勢較穩定的低水溫低濃度組為指標，可發現第 14 日以前，植物組和空白組數值僅些微下降且相近。至第 21 日，植物組才有表現出較好的濁度去除效果。而植物補植管理組中之植物組和空白組，在前 14 日皆穩定下降且數值差距皆維持在一定範圍，曝氣組數值較低。至第 21 日，植物組之部分補植組明顯低於空白組，全部補植組則無此現象。綜合以上現象推論，植物需要種植超過 14 日才有去除濁度的效果。

在其餘組別可發現，雖然是作為對照的空白組水質淨化效果仍佳，可知在每次製作樣本的過程可能混雜了無法一致化的懸浮固體量，造成在三週期間，四次計量的結果仍不易找出趨勢。

而利用李(2005)研究結果，將表 2.1.1.1 之懸浮固體數值換算為濁度。環保署畜牧業排放水標準之懸浮固體(SS) 150ppm 約為濁度 90NTU，本研究實驗結果多數未達標。而三段廢水處理系統厭氣槽出流口處和放流水水質之懸浮固體(SS) 約為 54~258ppm 和 15~68ppm，換算濁度約為 32~152NTU 和 9~40ppm，與本研究實驗



的廢水濃度相比低上許多。說明本研究實驗使用的廢水濁度偏高，淨化至規定標準之下有一定的難度。

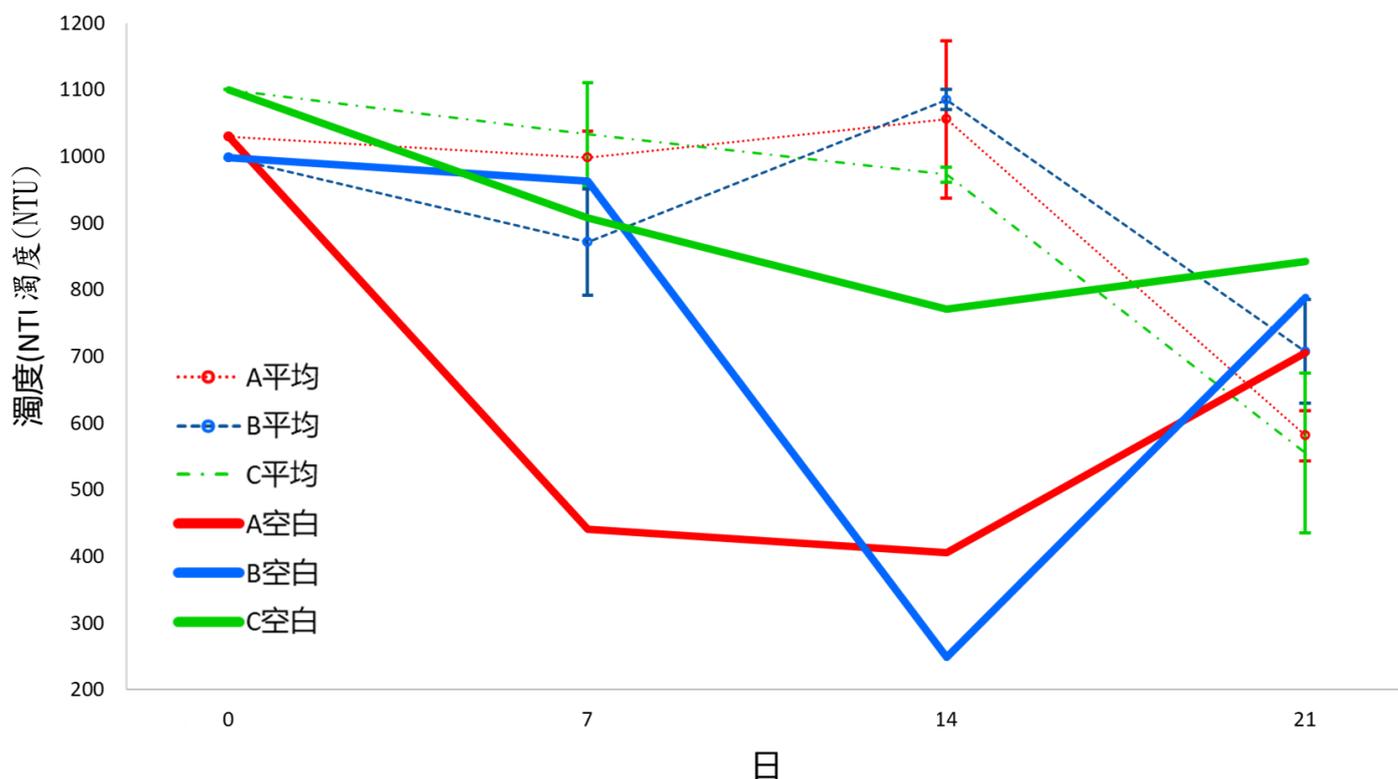
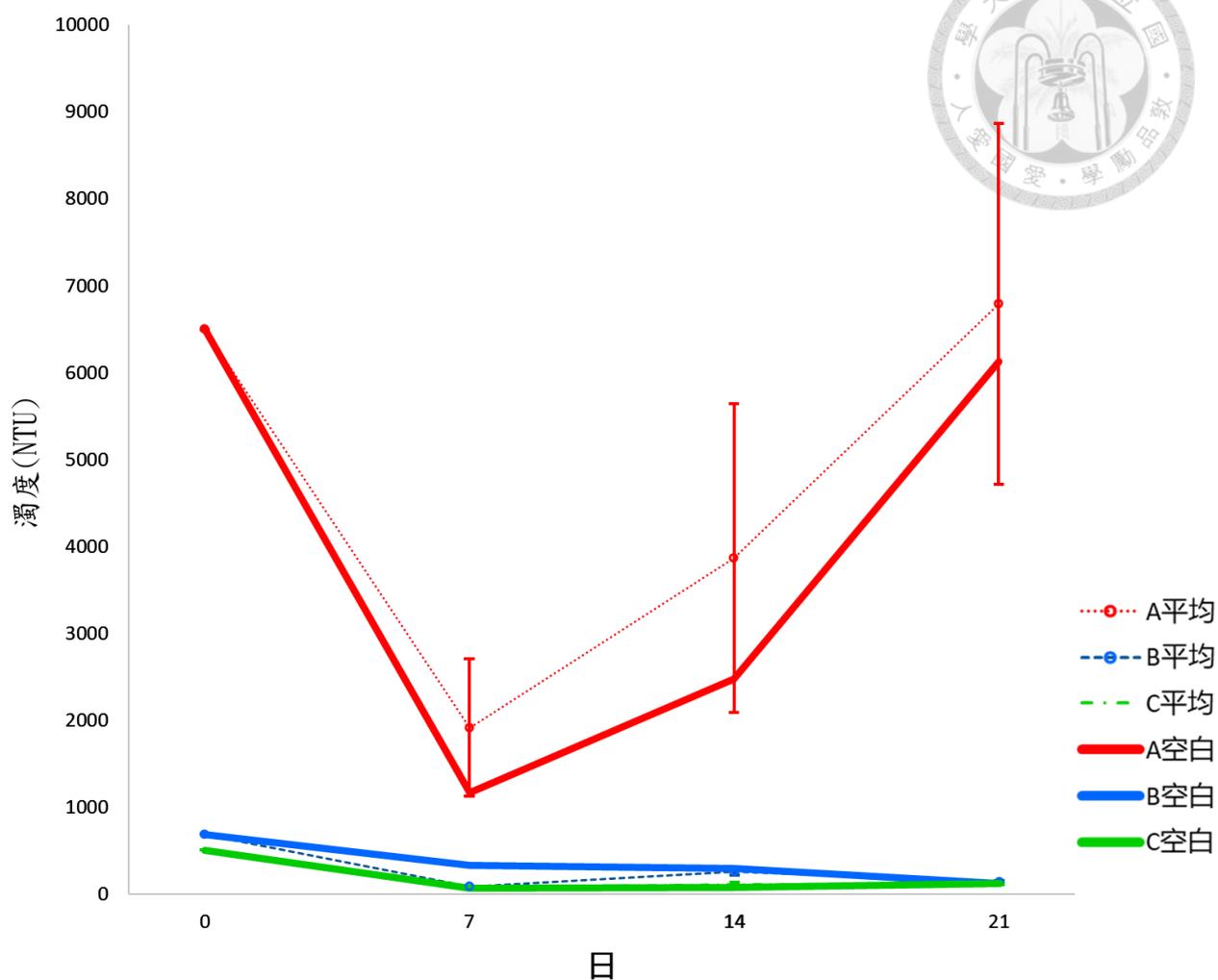


圖 4.3.1.1 低水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之濁度變化

註：A 為高濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=195\text{ppm}$ )之平均濁度( $n=3$ )

B 為中濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=103\text{ppm}$ )之平均濁度( $n=3$ )

C 為低濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=58\text{ppm}$ )之平均濁度( $n=3$ )



#### 4.3.1.2 高水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之濁度變化

註：A 為高濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=208\text{ppm}$ )之平均濁度( $n=3$ )

B 為中濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=102\text{ppm}$ )之平均濁度( $n=3$ )

C 為低濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=59\text{ppm}$ )之平均濁度( $n=3$ )

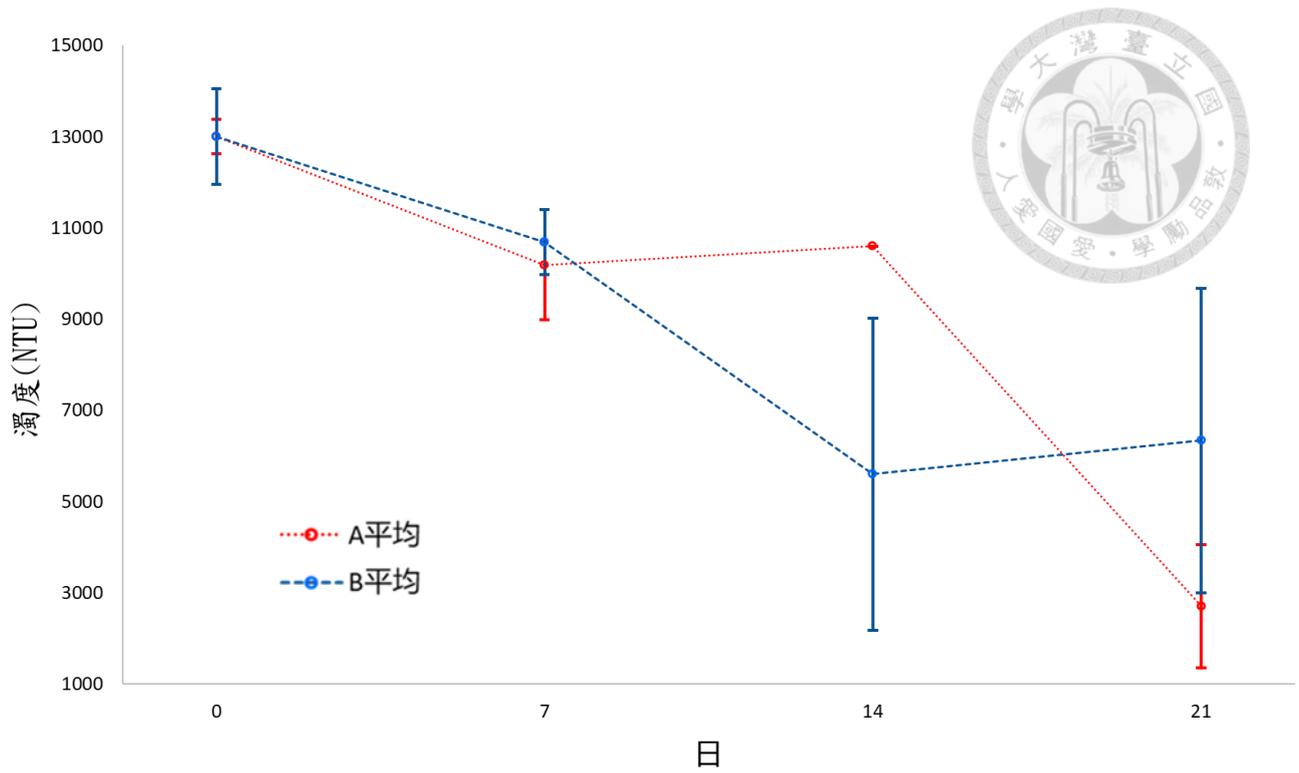


圖 4.3.1.3 植物吸收營養鹽效率驗證與提升實驗曝氣組與濁度變化

註：A 為曝氣-部分補植植物組之平均濁度(n=2)

B 為曝氣空白組之平均濁度(n=2)

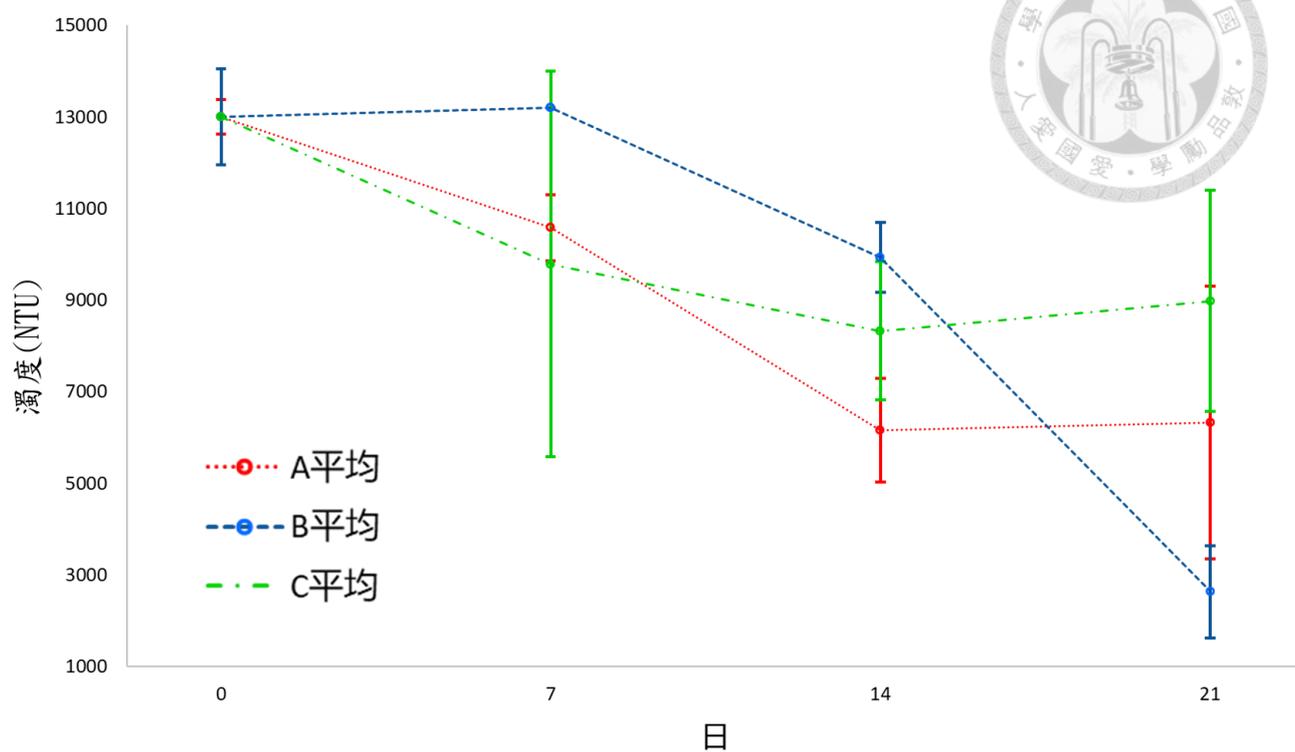


圖 4.3.1.4 植物吸收營養鹽效率驗證與提升實驗無曝氣組與濁度變化

註：A 為全部補植植物組之平均濁度(n=2)

B 為部分補植植物組之平均濁度(n=2)

C 為空白組之平均濁度(n=2)

### 4.3.2 酸鹼值

表 4.3.2.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與酸鹼值變化



廢水標本環境條件			酸鹼值				
氨氮濃度			第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)	
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	6.70	7.06±0.06	6.95±0.06	6.96±0.06	
		中(B)濃度 (102ppm)	7.35	7.39±0.28	7.26±0.25	7.29±0.15	
		低(C)濃度 (59ppm)	7.26	7.55±0.14	7.16±0.17	7.18±0.25	
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	6.70	7.02	6.86	7.02	
		中(B)濃度 (102ppm)	7.35	7.81	7.50	7.52	
		低(C)濃度 (59ppm)	7.26	7.64	7.35	7.16	
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	6.30	7.45±0.2	8.44±0.06	8.21±0.04	
		中(B)濃度 (103ppm)	6.29	7.17±0	8.17±0.04	8.07±0.04	
		低(C)濃度 (58ppm)	6.51	7.04±0.1	7.77±0.06	7.68±0	
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	6.3	7.13	8.50	8.38	
		中(B)濃度 (103ppm)	6.29	7.24	8.10	7.98	
		低(C)濃度 (58ppm)	6.51	7.05	8.15	7.98	
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	7.37±0.05	7.65±0.06	7.68±0.06	7.72±0.13
		空白組			7.58±0.02	7.68±0.02	7.64±0.04
		部分補植			7.47±0.08	7.45±0.09	7.60±0.08
		全部補植			7.53±0.02	7.62±0.03	7.55±0.1
		無植物空白組			7.54±0.02	7.63±0.06	7.44±0.03



註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，  
B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補  
植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。

2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均酸鹼值(n=3,植物補植管理組 n=2)，a：周次(a=1~3)。

酸鹼值在所有實驗組中變化不太大，有些微上升的趨勢，以低水溫植物吸收  
營養鹽實驗中上升最為明顯。而根據文獻，由於沉水植物進行光合作用將產生大  
量碳酸氫根離子與氫氧根離子，使水質酸鹼值上升(張，2016)。本實驗結果與其相  
符。

### 4.3.3 導電度

表 4.3.3.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與導電度變化



廢水標本環境條件		導電度(μS/cm)					
		氨氮濃度	第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)	
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	1646	826.33±28.4	674±4.3	647.33±23.3	
		中(B)濃度 (102ppm)	1292	914.33±48.3	631±58.4	558.67±23	
		低(C)濃度 (59ppm)	803	610.67±18.5	445.67±31.6	404.67±43.6	
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	1646	845	746	602	
		中(B)濃度 (102ppm)	1292	752	583	477	
		低(C)濃度 (59ppm)	803	493	376	410	
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	2190	1614±89.9	1089.33±65.5	860.33±55.8	
		中(B)濃度 (103ppm)	1206	983.33±85.4	646.67±28	601.33±38.3	
		低(C)濃度 (58ppm)	649	532.67±15.2	374.33±47.3	376±22.2	
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	2190	1679	1212	874	
		中(B)濃度 (103ppm)	1206	880	524	451	
		低(C)濃度 (58ppm)	649	605	545	497	
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	1900±29.4	1170.5±52.5	977.5±3.5	920.5±26.5
		部分補植 空白組			1323.5±42.5	1079±5	981±12
		部分補植			1391±58	1091.5±33.5	995±19
		全部補植			1271±56	1040.5±3.5	909±40
		無植物空白組			1293.5±33.5	1029±0	1035±22



註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。

2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均導電度(n=3,植物補植管理組 n=2)，a：周次(a=1~3)。

根據表 4.3.3.1，導電度在所有實驗組別都有明顯減少，代表廢水中的離子濃度有所降低。在高、低水溫植物吸收營養鹽實驗中，相同廢水濃度和裝置配置下，不論是否有種植植物，導電度的下降趨勢都十分的相似。在營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中，比較曝氣空白組和無曝氣空白組可發現打氣裝置的有無對於導電度的下降也沒有太大的影響；植物組中，曝氣-部分補植植物組有最佳的表現，不過以最終結果來說，在經過 21 日後，全部補植植物組也有一樣好的效果。

綜合以上實驗結果，僅種植植物或裝設打氣設備對於導電度的影響都十分有限。若能搭配一同使用則有較佳的降低導電度效果。

### 4.3.4 生化需氧量(BOD)

表 4.3.4.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與生化需氧量變化



廢水標本環境條件			生化需氧量(ppm)					
氨氮濃度			第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)		
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	490.5	-----	-----	306±44.9		
		中(B)濃度 (102ppm)	235	-----	-----	61.67±8.8		
		低(C)濃度 (59ppm)	117	-----	-----	41±16.4		
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	490.5	-----	-----	206		
		中(B)濃度 (102ppm)	235	-----	-----	71		
		低(C)濃度 (59ppm)	117	-----	-----	49		
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	568	323.33±10.4	257±60.2	124.33±37.4		
		中(B)濃度 (103ppm)	334	308±12	244.33±24.2	93.33±42.8		
		低(C)濃度 (58ppm)	205	244.67±54.2	201.33±31.9	77.67±16.8		
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	568	493	326	116		
		中(B)濃度 (103ppm)	334	428	199	103		
		低(C)濃度 (58ppm)	205	323	171	128		
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	639.52±28.6	部分補植	-----	-----	135±119
		空白組			-----	-----	436±108	
		部分補植			-----	-----	217±121	
		全部補植			-----	-----	134±0	
		無植物空白組			-----	-----	553±133	

- 
- 註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。
2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均生化需氧量(n=3,植物補植管理組 n=2)，a：周次(a=1~3)。
3. 僅有低水溫低濃度組有在第 7 日和第 14 日進行檢測。
4. “-----“ 表示未測。

根據表 4.3.4.1，生化需氧量在營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中，植物組與空白組有較明顯的差異。經過了 21 日，植物組比空白組降低了 307~417ppm，曝氣空白組又較無曝氣空白組低了 117ppm。

由於生化需氧量實驗本身就有許多誤差，在計量的結果有限的情況下，此實驗結果僅供參考。

根據表 2.1.1.1，環保署畜牧業排放水標準之生化需氧量(BOD)為 80ppm 以下，而三段式廢水處理系統厭氣槽出流口處和放流水水質之生化需氧量(BOD)約為 108~183ppm 和 43~80ppm。本研究高水溫中、低濃度植物組之實驗起始濃度和結果分別是 117~235ppm 和 41~62ppm。說明本實驗植物在高溫組中、低濃度環境條件下，不僅能將廢水淨化至標準之下，效果還更優於傳統型和創新型三段式廢水處理系統。

### 4.3.5 化學需氧量(COD)

表 4.3.5.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與化學需氧量變化

廢水標本環境條件			化學需氧量(ppm)			
氨氮濃度			第0日(t0)	第21日(t3)		
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	12370	11660±1550		
		中(B)濃度 (102ppm)	1410	855±278.35		
		低(C)濃度 (59ppm)	660	485.67±103.4		
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	12370	11890		
		中(B)濃度 (102ppm)	1410	491		
		低(C)濃度 (59ppm)	660	391		
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	3200	1358.33±185.2		
		中(B)濃度 (103ppm)	2745	1798.33±233		
		低(C)濃度 (58ppm)	2845	1445±65		
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	3200	1515		
		中(B)濃度 (103ppm)	2745	2625		
		低(C)濃度 (58ppm)	2845	3070		
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	18233.33 ±2362.7	部分補植	3500±2300
		空白組			3900±2500	
		部分補植			6100±3300	
		全部補植			7650±3150	
		無植物空白組			10850±2450	

- 
- 註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。
2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均化學需氧量(n=3,植物補植管理組 n=2)，a：周次(a=1、3)。
3. 數據修正：低水溫低濃度組第 21 日 C2 數據缺失，平均僅以 2 筆數據計算；高低水溫高濃度組第 7 日 A1 數據缺失平均僅以 2 筆數據計算。

第 21 日的數據中，多數植物組的數值是接近或大於空白組的數值。在營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中，全部補植平均和部分補植平均雖明顯低於空白平均，極大的標準偏差也代表了這兩組數據很有可能被誤差嚴重影響。因此推測植物在高化學需氧量的環境中，是無助於化學需氧量降低的。再比較曝氣組與未曝氣組可發現曝氣組的數值是明顯低於未曝氣組的。儘管曝氣組的標準偏差也十分的大，不過仍可推測相較於種植植物，裝設打氣設備是更有助於廢水化學需氧量降低的。

根據表 2.1.1.1，環保署畜牧業排放水標準之化學需氧量(COD)為 600ppm 以下，而三段廢水處理系統厭氣槽前原廢水、厭氣槽出口處和放流水水質之化學需氧量(COD)約為 6111~14014ppm、485~724ppm 和 155~305ppm。本研究實驗結果除高水溫低氨氮濃度在第 21 日組可達標外，其餘並未達標，說明本實驗植物在化學需氧量方面，僅能應用於傳統型和創新型三段式廢水處理系統之厭氣槽出口階段。

實驗過程曾經嘗試將水樣過濾後再進行生化需氧量檢測，並會發現數值會低於檢測範圍導致無法測量，代表了化學需氧量與廢水中的懸浮固體和沉澱物有很大的關聯性。文獻也有提到除去的污泥量與化學需氧量是有高度正相關的(郭等人，2008)。

在廢水中的懸浮固體和沉澱物大量且顆粒不一的情況下，實驗設置和採樣不均勻的誤差將直接導致各組化學需氧量數據可能會有過大的標準偏差。尤其是添加固形物糞便的夏季-高濃度組和營養鹽吸收效率提升實驗的所有組別，不僅起始數值遠高於其他組別，同組數值的標準偏差也十分的大。

而本研究所有實驗組別數據之化學需氧量與濁度繪製關係圖，可得圖 4.3.5.1。其線性回歸公式  $y=1.513x+894.6$  關係係數  $R^2=0.9088$ 。顯示化學需氧量確實與濁度有極大的相關性。郭等(2008)研究則是以污泥產量和總固體濃度(TS)去與化學需氧量進行回歸，線性回歸公式分別為  $y=-42.373+5.854x$ ，( $R^2=0.979$ )； $y=-5.6519+8.1198$ ，( $R^2=0.956$ )。

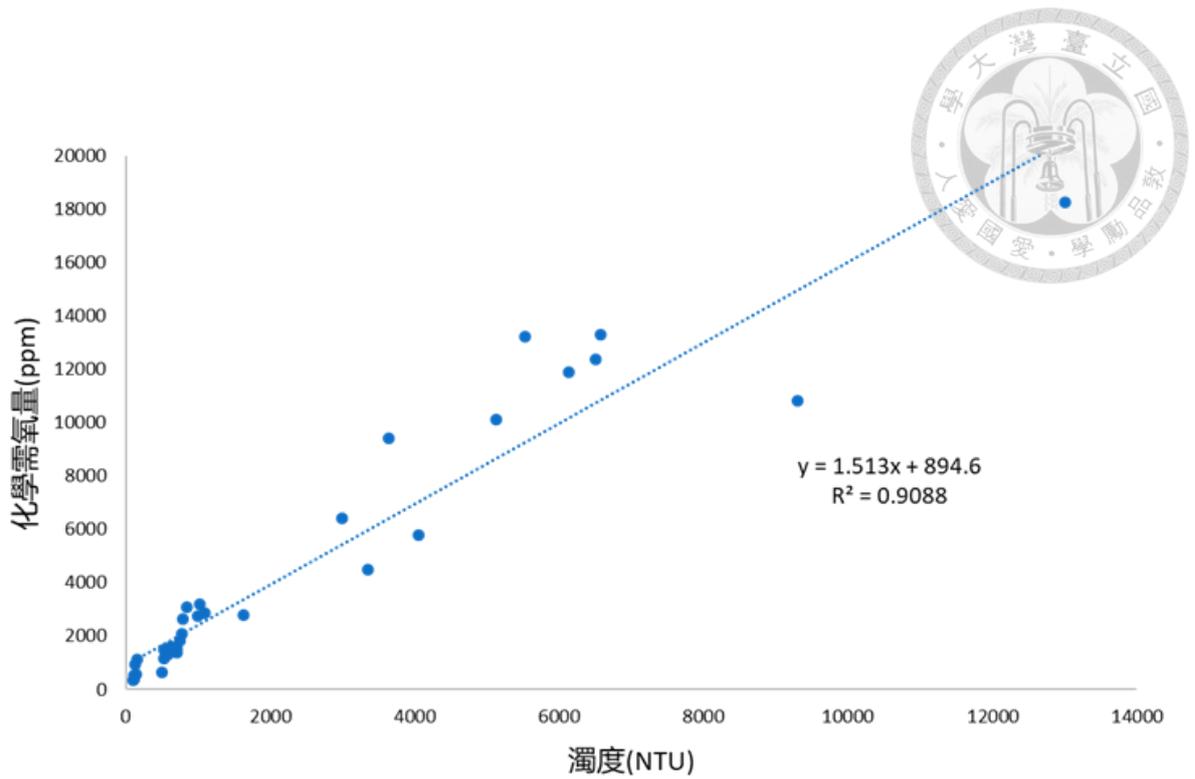


圖 4.3.5.1 化學需氧量-濁度之關係圖

註：此關係圖刪除了濁度(NTU)數值大於化學需氧量(ppm)之組別數據。



## 4.4 植物吸收與營養鹽濃度變化

### 4.4.1 硝酸鹽(NO<sub>3</sub>-N)

表 4.4.1.1 高、低水溫三種濃度氮氮廢水之植物吸收與硝酸鹽變化

廢水標本環境條件		硝酸鹽(ppm)						
		氮氮濃度	第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)		
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	830	-----	-----	481.67± 206.3		
		中(B)濃度 (102ppm)	59	-----	-----	14±2.2		
		低(C)濃度 (59ppm)	32	-----	-----	12.33±2.5		
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	830	-----	-----	425		
		中(B)濃度 (102ppm)	59	-----	-----	9		
		低(C)濃度 (59ppm)	32	-----	-----	15		
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	60	-----	-----	21.33±4.7		
		中(B)濃度 (103ppm)	55	-----	-----	24±1.4		
		低(C)濃度 (58ppm)	45	-----	-----	29±2		
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	60	-----	-----	23		
		中(B)濃度 (103ppm)	55	-----	-----	19		
		低(C)濃度 (58ppm)	45	-----	-----	46		
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	1270±176.82	部分補植	800±190	258±192	201.5±87.5
		空白組			860±50	337±163	485±165	
		部分補植			1060	535±45	174.5±42.5	
		全部補植			825±65	435±35	412.5±177.5	
		無植物空白組			770±410	540±170	1115±275	



- 註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。
2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均硝酸鹽濃度(n=3,植物補植管理組 n=2)，a：周次(a=1~3)。
3. 僅有植物補植管理組有在第 7 日和第 14 日進行檢測。
4. “-----”表示未測。
5. 數據修正：無曝氣-部分補植組平均刪除第 7 日 C1=19600ppm 之數據。

在高、低水溫植物吸收營養鹽實驗中，高水溫高濃度組在投入固形物糞便的情況下，硝酸鹽起始值是遠高於其他組別，且在第 21 日時，植物組硝酸鹽濃度比空白組高了 56.67ppm，其餘組別無明顯差別。

推測在硝酸鹽起始值很高的情況下，硝酸鹽的變化在植物吸收營養鹽中是必須列入考量的。於營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中的第 7 日和第 14 日增加檢測次數，並發現植物組有明顯低於空白組。根據表 4.4.1.2，曝氣-部分補植植物組之植物有持續維持硝酸鹽的正去除率。不過許多組別的標準偏差都很大，說明檢驗的過程受到誤差嚴重影響。推測原因與化學需氧量相同，故取營養鹽吸收效率提升實驗各組的硝酸鹽與濁度繪製關係圖，可得圖 4.4.1.1。線性回歸公式  $y=0.0691x+5.6294$  關係係數  $R^2=0.8528$ 。顯示硝酸鹽與濁度有相當的關連性，易受樣本製作過程的影響。

張(2016)研究中，沈水植物之水蘊草  $\text{NO}_3^-$  去除率為 4.095~6.425mg/kg/day，且營養鹽濃度越高，吸收速率越快。與本研究結果相比，本研究實驗營養鹽濃度高出張(2016)研究許多，其粉綠狐尾藻  $\text{NO}_3^-$  去除率也確實遠高於水蘊草。不過兩研究

種植物種不同，且本實驗在硝酸鹽濃度的檢測上受誤差嚴重影響，兩者比較僅作為參考。



表 4.4.1.2 營養鹽吸收效率驗證與提升實驗之植物硝酸鹽去除率

廢水標本環境條件			硝酸鹽去除率(mg/kg/day)			
氮氮濃度			0~7日	7~14日	14~21日	
高 水 溫 28 °C	植 物 補 植 管 理	曝氣 部分 補植	高濃度 (208.33 ppm)	608.98	1073.37	393.71
		部分 補植		-568.164	1589.07	-4695.23
		全部 補植		-2961.3	3065.38	5453.67

註：1. 硝酸鹽去除率(mg/kg/day)=

(植物組硝酸鹽濃度變化-空白組硝酸鹽濃度變化)\*水量/天數/起始植物重；

2. 以補植後的重量作為起始植物重

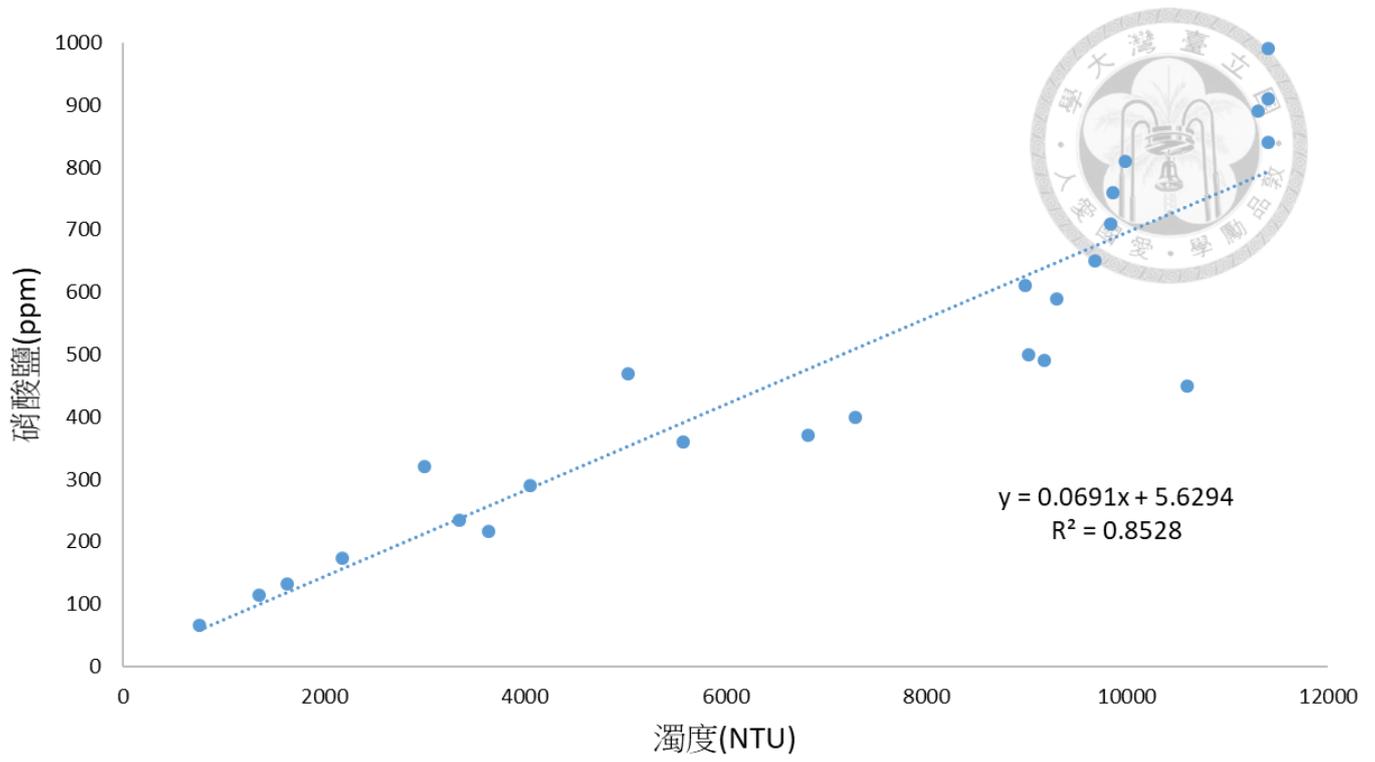


圖 4.4.1.1 硝酸鹽-濁度之關係圖

註：此關係圖刪除硝酸鹽 ppm 數值大於 1000ppm 之組別數據。

#### 4.4.2 亞硝酸鹽(NO<sub>2</sub>-N)

表 4.4.2.1 高、低水溫三種濃度氮氮廢水之植物吸收與亞硝酸鹽變化

廢水標本環境條件		亞硝酸鹽(ppm)		
氮氮濃度		第0日(t0)	第21日(t3)	
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	2.29	2.14±0.85
		中(B)濃度 (102ppm)	0.43	0.08±0
		低(C)濃度 (59ppm)	0.25	0.14±0.1
	無植物 空白組	高(A)濃度 (208ppm)	2.29	1.92
		中(B)濃度 (102ppm)	0.43	0.05
		低(C)濃度 (59ppm)	0.25	0.05
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	0.6	1.2±0.7
		中(B)濃度 (103ppm)	0.5	0.66±1
		低(C)濃度 (58ppm)	0.45	0.29±0.1
	無植物 空白組	高(A)濃度 (195ppm)	0.6	0.59
		中(B)濃度 (103ppm)	0.5	0.28
		低(C)濃度 (58ppm)	0.45	0.31

註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g

，B=32.94g，C=33.56g；空白組無植物，廢水靜置。

2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均亞硝酸鹽濃度(n=3)，a：周次(a=1、3)。

亞硝酸鹽各組差距不大，差距範圍在 0.2~0.61ppm 之間。因此亞硝酸鹽的變化在植物吸收營養鹽中選擇忽略不計。並在營養鹽吸收效率驗證與提升實驗中取消了此項目的檢測。

#### 4.4.3 氨氮(NH<sub>3</sub>-N)

表 4.4.3.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與氨氮變化



廢水標本環境條件			氨氮(ppm)					
氨氮濃度			第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)		
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	208	80.33±3.4	59.33±8.3	23.67±3.9		
		中(B)濃度 (102ppm)	102	53.33±4.7	5.67±1.7	3.53±0.5		
		低(C)濃度 (59ppm)	59	32±9	2.67±13.8	2.17±6.4		
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	208	109	79	26		
		中(B)濃度 (102ppm)	102	42	7	2.2		
		低(C)濃度 (59ppm)	59	20	2	1.7		
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	195	131.67±9	76.67±13.8	19.5±6.4		
		中(B)濃度 (103ppm)	103	69±2.9	45.33±4.2	16.67±2.5		
		低(C)濃度 (58ppm)	58	38±4.6	21.33±8.7	6.93±0.7		
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	195	150	82	14		
		中(B)濃度 (103ppm)	103	94	18	4.3		
		低(C)濃度 (58ppm)	58	47	47	17		
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	208.33±16.1	部分補植	86.5±9.5	48±7	37.5±1.5
		空白組			129±8	59.5±4.5	51±5	
		部分補植			109±14	54.5±2.5	58±0	
		全部補植			99.5±3.5	51±2	38±2	
		無植物空白組			138±3	63.5±1.5	36.5±5.5	



註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，  
B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補  
植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。  
2.  $\bar{\tau}_a$ ：每周水樣平均氨氮濃度(n=3,植物補植管理組 n=2)，a：周次(a=1~3)。

低水溫之三種濃度組和高水溫高濃度組在前 7 日，植物組的氨氮數值皆是低於空白組的。至第 21 日，只有低水溫低濃度組和高水溫高濃度組之植物組始終保持較佳的去除率。高水溫中、低濃度組在前 7 日，空白組的氨氮數值低於植物組的，並在第 14 日起，所有組別的氨氮數值都已非常的低，氨氮去除率皆近 100%，難以探討植物去除氨氮的效果。若單以植物組的氨氮變化率來看，高水溫之氨氮去除率在第 14 日約為 71~95%，第 21 日則皆在 89% 以上；低水溫之氨氮去除率在第 14 日約為 56~63%，第 21 日則約為 84~90%。

不過低水溫中濃度組和高水溫低濃度組中，在氨氮濃度在約 50ppm 左右時都有快速下降的跡象，推測空白組本來就有優異的氨氮去除率。故在營養鹽吸收效率驗證與提升實驗的第 17 日多一次氨氮的檢測來觀察驗證。

比較 Lui 等(2016) 研究，其結果表示植物在氨氮濃度 209 和 417ppm 中，14 日後的去除率皆達 97% 以上。本研究在高、低高濃度下，第 14 日去除率約為 72% 和 61%，低於 Lui 等(2016) 研究結果。不過在實驗環境不同、植物用量不同和缺乏廢水用量與空白對照組的情況下，兩者比較僅供參考。

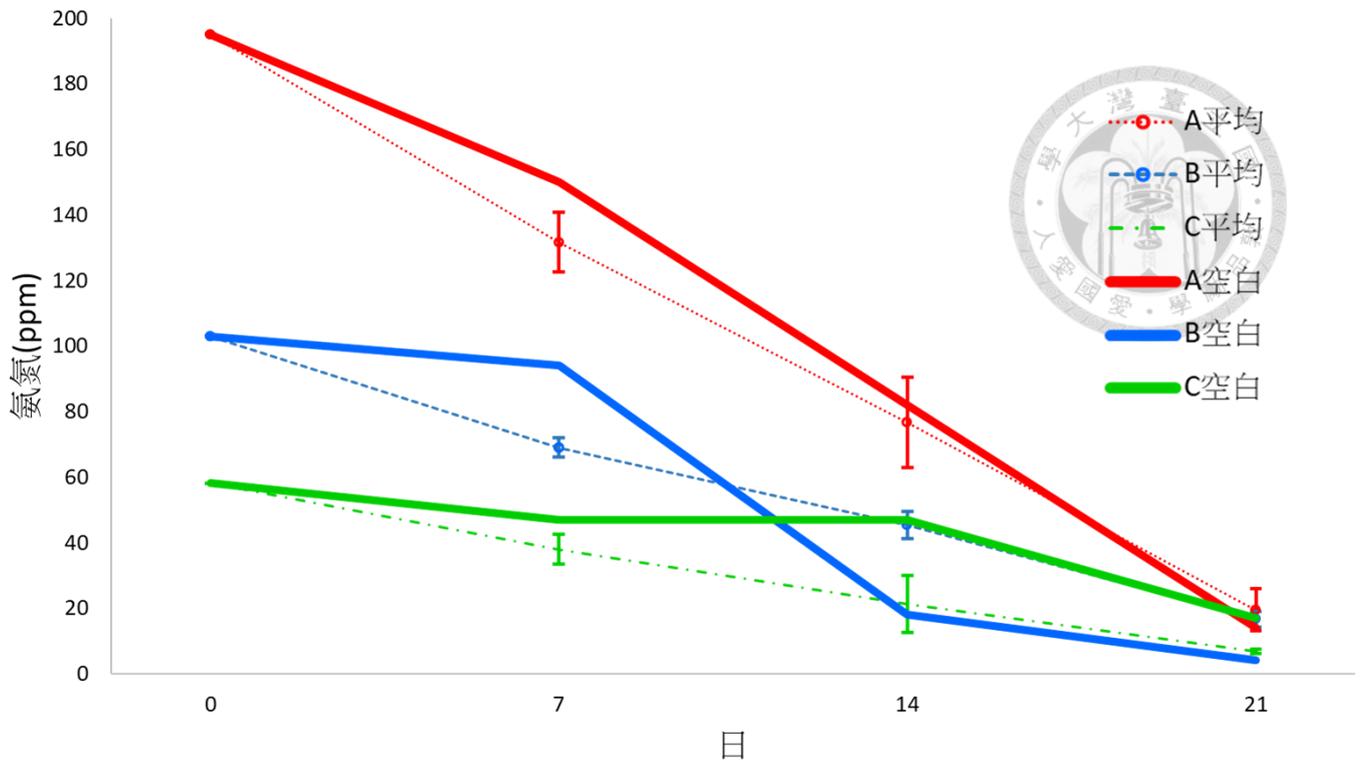


圖 4.4.3.1 低水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之氨氮濃度變化

註：A 為高濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=195\text{ppm}$ )之氨氮平均濃度( $n=3$ )

B 為中濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=103\text{ppm}$ )之氨氮平均濃度( $n=3$ )

C 為低濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=58\text{ppm}$ )之氨氮平均濃度( $n=3$ )

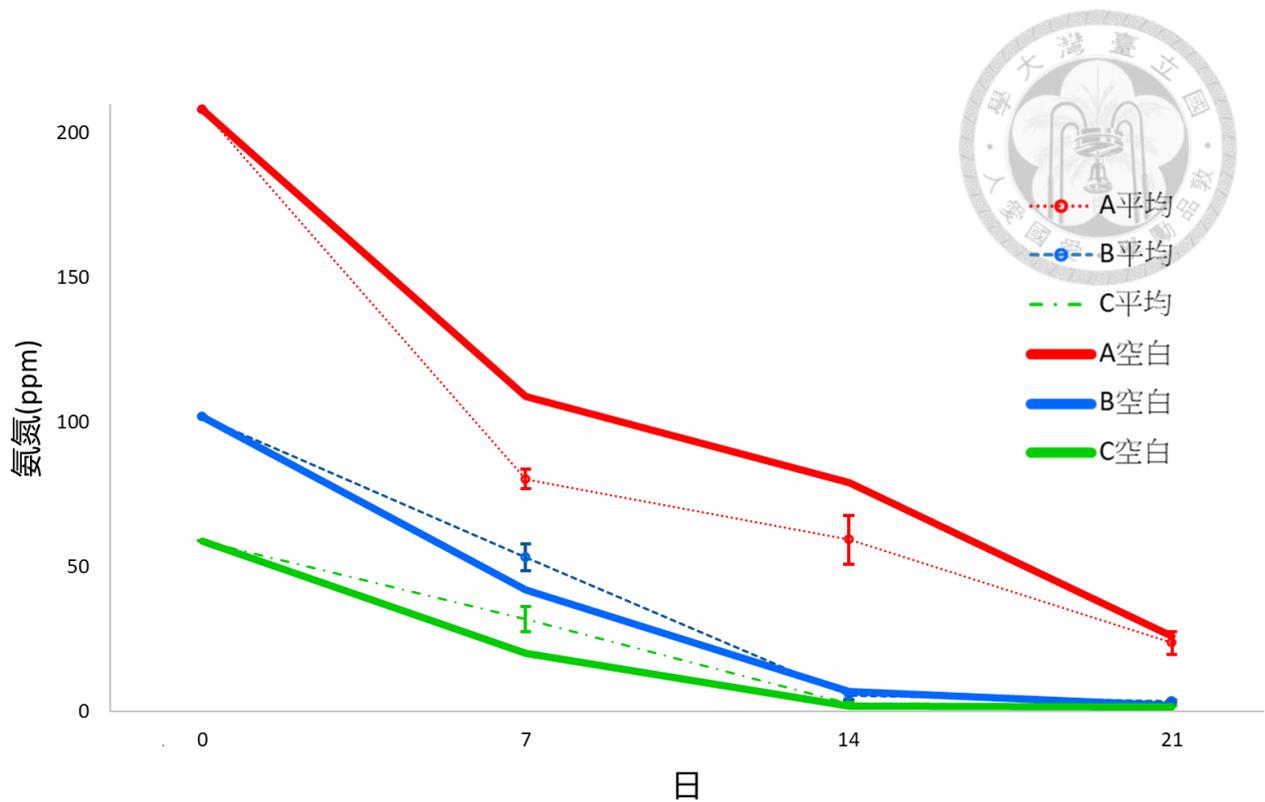


圖 4.4.3.2 高水溫三種濃度植物吸收營養鹽實驗之氨氮濃度變化

註：A 為高濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=195\text{ppm}$ )之氨氮平均濃度( $n=3$ )

B 為中濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=103\text{ppm}$ )之氨氮平均濃度( $n=3$ )

C 為低濃度組( $\text{NH}_3\text{-N}=58\text{ppm}$ )之氨氮平均濃度( $n=3$ )

利用高、低水溫植物吸收營養鹽實驗氨氮濃度的變化減植物組的起始鮮重與氨氮數值，可以換算出在不同種植時間下，以每公斤的植物能在每天吸收多少毫克的氨氮來計算去除率。如表 4.4.3.2。

表 4.4.3.2 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物氨氮去除率

廢水標本環境條件			氨氮去除率(mg/kg/day)			
		氨氮濃度	前7日	前14日	前21日	
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	273.68	73.51	7.14	
		中(B)濃度 (102ppm)	-160.52	10.01	-7.92	
		低(C)濃度 (59ppm)	-171.08	-5.17	-2.93	
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	383.91	135.59	-49.80	
		中(B)濃度 (103ppm)	542.17	-211.53	-117.78	
		低(C)濃度 (58ppm)	191.54	196.39	64.17	
高水溫 28°C	植物組	氨氮濃度	t0~t1	t1~t2	t2~t3	
		高(A)濃度 (208ppm)	273.68	-67.28	-159.17	
		中(B)濃度 (102ppm)	-160.52	190.24	-47.49	
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	383.91	-60.26	-556.83	
		中(B)濃度 (103ppm)	542.17	-809.99	427.62	
		低(C)濃度 (58ppm)	191.54	255.05	-298.34	
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣				
		部分補植	高濃度 (208.33 ppm)	431.36	-218.91	23.16
		部分補植		397.71	-258.22	-194.48
全部補植	296.13	-207.82		-327.11		

註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。

2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均氨氮濃度(n=3)，a：周次(a=1、3)。

3. 去除率(mg/kg/day)=

(植物組氨氮濃度變化-空白組氨氮濃度變化)\*水量/植物起始鮮種/天數

+代表植物有助於氨氮去除；-代表植物有礙氨氮去除。

根據表 4.4.3.2，低水溫之三種濃度組和高水溫高濃度組在前 7 日皆有較佳的去除率，範圍約在 191.4~542.17mg/kg/day。高水溫中、低濃度組效果不佳，中濃度組在前 14 日植物才有些微去除的效果。若以單週去除率來看，高水溫中、低濃度和低水溫低濃度之植物組在第 2 周最佳去除率，其餘組別則是在第 1 周有最佳去除率。故推論除了水體氨氮濃度，植物的氨氮去除率還會受到種植天數影響。

曝打氣-部分補植植物組在 0~7 日和 14~21 日皆有正去除率且效率更優於無曝氣組，推論藉由打氣擾動水體、增加溶氧是有助於植物對於氨氮去除率的提升。

張(2016)研究中，沈水植物之水蘊草銨離子(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)去除率為 11.081mg/kg/day。與本研究結果相比，粉綠狐尾藻有較佳的去除率。不過兩研究種植物種不同，且實驗氨氮濃度不同，兩者比較僅供參考。

利用表 4.4.3.2 之去除率，代入以營養鹽吸收效率驗證與提升實驗之設定，推算理論上的氮氮濃度變化，再與實際氮氮濃度變化比較。結果如表 4.4.3.3。

表 4.4.3.3 高水溫植物吸收營養鹽實驗之植物氮氮去除率驗證

		氮氮(ppm)		
		第7日	第14日	第21日
實際值	部分補植	109.00	54.50	58.9
	全部補植	99.50	51.00	38.00
理論值	部分補植	111.20	59.04	41.49
	全部補植	111.51	53.17	38.48
	無補植	111.20	49.10	34.39

理論值與實際值十分接近而得到以下幾點推論：

1. 種植天數會影響粉綠狐尾藻的氮氮去除率；
2. 高、低水溫植物吸收營養鹽實驗之植物氮氮去除率有一定的準確度；
3. 在高水溫高濃度的情況下，不補植物可以得到最佳的去除效率。

另外，營養鹽吸收效率驗證與提升實驗之空白組在第 17 日和第 21 日之氮氮濃度分別為 55.5 和 36.5ppm，有發生快速降低的情形。說明在空白組的環境下，廢水氮氮濃度約 50ppm 時，空白組的氮氮去除率確實有可能會優於種植植物的組別。

#### 4.4.4 總磷(TP)

表 4.4.4.1 高、低水溫三種濃度氨氮廢水之植物吸收與總磷變化



廢水標本環境條件			總磷(ppm)				
氨氮濃度			第0日(t0)	第7日(t1)	第14日(t2)	第21日(t3)	
高水溫 28°C	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	116	88.1±13.5	83.4±13.1	81.73±2.2	
		中(B)濃度 (102ppm)	20.2	17.05±0.5	21.51±1.8	16.63±2	
		低(C)濃度 (59ppm)	16.6	14.86±0.8	14.23±2	11.82±1.2	
	無植物空白組	高(A)濃度 (208ppm)	116	90.7	92.7	90	
		中(B)濃度 (102ppm)	20.2	15.6	15.7	18.2	
		低(C)濃度 (59ppm)	16.6	12.7	11.3	14	
低水溫 20°C	植物組	高(A)濃度 (195ppm)	23.2	19.8±1.8	20.93±1.8	22.3±2	
		中(B)濃度 (103ppm)	22.7	21.87±0.9	17.67±1.7	17.13±2	
		低(C)濃度 (58ppm)	20.5	19.4±2.1	17.67±1.5	15.47±1.5	
	無植物空白組	高(A)濃度 (195ppm)	23.2	26.6	23.2	28	
		中(B)濃度 (103ppm)	22.7	22.1	22.6	29.6	
		低(C)濃度 (58ppm)	20.5	22.6	22	19.1	
高水溫 28°C	植物補植管理	曝氣	高濃度 (208.33ppm)	105.9±0	108.9±11.9	74.35±25.1	70.55±12.8
		空白組			115.25±0.1	84.7±4.9	110.95±8.4
		部分補植			159.95±13.9	98.2±1.2	82.05±12.3
		全部補植			114.4±6.8	98.8±5	96.05±10.8
		無植物空白組			125.9±4.7	94.7±17	115.3±9.6

註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。

2.  $\bar{t}_a$ ：每周水樣平均總磷濃度(n=3,植物補植管理組 n=2)，a：周次(a=1~3)。

根據表 4.4.4.1 和表 4.4.4.2，總磷濃度數值在本實驗中變動十分的大，推論低水溫低濃度為較理想情況，空白組變化平緩而能明顯看出植物總磷濃度有所下降。高水溫三種濃度組在第 21 日的總磷濃度變化量相當符合低水溫低濃度組的趨勢，故高水溫組和低水溫低濃度組前 21 日的總磷去除率應為較準確的結果。而低水溫高、中濃度組之空白組在第 21 日總磷濃度突升導致去除率異常，其前 14 日的總磷去除率應為較準確的結果。得知，每公斤植物每日約能去除 7.18~39.76mg 之總磷。

而在營養鹽吸收效率驗證與提升實驗，單以第 21 日結果數值來看，曝氣的有無對於空白組的影響應該不大，曝氣組和無曝氣組之總磷濃度分別為 110.95 和 115.3ppm；植物組數值則都明顯低於空白組，尤其曝氣-部分補植植物組低於打氣空白組約 40.40ppm，優於全部補植和部分補植的 19.25 和 33.25ppm，推論曝氣有助於植物對於總磷去除率的提升。

張(2016)研究中，沈水植物之水蘊草  $\text{PO}_4^{3-}$  去除率為 5.315~125.351mg/kg/day。與本研究結果相比，水蘊草應有較佳的磷營養鹽去除率。不過兩研究種植物種不同，且實驗磷營養濃度不同，兩者比較僅供參考。



表 4.4.4.2 高、低水溫三種濃度氮氮廢水之植物總磷去除率

廢水標本環境條件		總磷去除率(mg/kg/day)		
高水溫 28°C	氮氮濃度	前7日	前14日	前21日
	植物組	高(A)濃度 (208ppm)	8.27	29.60
中(B)濃度 (102ppm)		-7.08	-27.53	7.18
低(C)濃度 (59ppm)		-10.31	-13.92	10.31
高(A)濃度 (195ppm)		47.47	15.85	39.79
中(B)濃度 (103ppm)		1.66	35.64	90.14
低(C)濃度 (58ppm)		22.70	30.72	25.75

註：1. 植物起始重量：高水溫：A=74.82g，B=50.43g，C=50.1g；低水溫：A=34.11g，B=32.94g，C=33.56；植物補植管理：曝氣-部分補植=70.38g，無曝氣-部分補植=69.95g，無曝氣-全部補植=69.15g；空白組無植物，廢水靜置。

2. 去除率(mg/kg/day)=

(植物組總磷濃度變化-空白組總磷濃度變化)\*水量/植物起始鮮種/天數

+代表植物有助於總磷去除；-代表植物有礙總磷去除。



## 4.5 濁度干擾營養鹽濃度之可能性

表 4.5.1 水體濁度和營養鹽濃度關係實驗之營養鹽平均

	原液	過濾清液	過濾物溶液
濁度(NTU)	1560	522	691
氨氮 (ppm)	188±7	195±3.7	10±2.2
總磷 (ppm)	27.19±0.3	21.29±0.1	22.57±0.1

- 註：1. 過濾清液：以 200 目濾網(75 $\mu$ m)過濾 100mL 原液之清液。
2. 過濾物溶液：將濾網上直徑大 75 $\mu$ m 之過濾物溶入去離子並定量至 100mL 之溶液。
3. 氨氮：針對溶液進行三重複檢測，刪除 A1=164ppm 求得之平均氨氮濃度 (n=2)。
4. 總磷：針對溶液進行三重複檢測求得之平均總磷濃度 (n=3)

根據表 4.5.1，原液和過濾清液氨氮濃度接近，過濾物溶液溶液氨氮濃度遠低於原液和過濾物溶液，推測濁度的高低與氨氮濃度無關聯，製作樣品的濁度誤差應不會影響到氨氮濃度的檢測。

而三種溶液之總磷濃度皆十分接近，推測清液應有一基本濃度。而原液檢測出的總磷濃度會隨著檢驗時水樣中粒徑 75  $\mu$ m 以上的懸浮固體和沉澱物的多寡而有所增減。推論總磷濃度應會受到製作樣品的濁度誤差影響。



## 4.6 植物死亡影響水質之植物管理實驗方法

實驗將 36.79g 的死亡植株浸泡於 5L 之去離子水，在第 0、7、14 日測得水樣氨氮濃度分別為 0.09、0.69、4.16ppm。雖然不確定在高氨氮濃度下是否也有相同的結果，不過可推論死亡的植株在短期內並不會對水體造成二次污染；若浸泡達兩週則有可能造成水體的氨氮再次上升。建議再兩週內清理死亡的植株，避免水體氨氮濃度再次上升。

## 4.7 文獻比較

本研究實驗在長 30cm，寬 25cm，深度 15cm 之塑膠整理箱進行。實驗用廢水固定在 5L，氨氮濃度分為 200、100 和 60ppm 三種。高水溫設定在 28°C；低水溫設定在 20°C。以架設於地面上方 30cm 之 20W LED 燈管 2 支作為光照來源，光照：黑暗時數=12：12 小時。種植植物固定為 20 株並檢測、記錄植物鮮種與覆蓋率作為其他植物使用量之依據。在第 0、7、14 和 21 日進行採樣，檢測、觀察植物量和水質各項數據的變化，能比較植物與水質數據變化的關係，並利用空白對照組，以每日每公斤植物的營養鹽去除量，來更精準呈現植物去除營養鹽之功效。

國內外研究文獻，因實驗物種、環境、方法、目的和結果呈現方式等皆不盡相同，難以直接進行比較。故本研究以張(2016)、Liu 等(2016)、Zhou 等(2017)、劉等(2018)之研究和國內訂定標準與處理設施實測數據為主要進行比較對象。

本研究粉綠狐尾藻的成長情形與 Zhou 等(2017)研究結果較相符，在氨氮濃度 40ppm 以上時，經歷 21 日的種植，植物重量皆呈現負成長。Zhou 等(2017)研究則表示粉綠狐尾藻在氨氮濃度 70~210ppm 間，在種植 21 日後植物重量皆有所增加。



推測是其他環境因素的不同才造成此差異。

與國內畜牧業廢水排放標準和三段式廢水處理系統之數據相比。本研究三種濃度組別的濁度之淨化結果皆無法符合排放標準，不過本實驗廢水濁度起始值高於三段式廢水處理系統不少，或許在降低濁度起始值的情況下，植物能有所發揮；除了高水溫低濃度組，其餘組別的化學需氧量之淨化結果尚無法符合排放標準，說明僅能應用於三段式廢水處理系統之厭氣槽出口階段。在高水溫中、低濃度的情況下，植物組的生化需氧量結果不僅符合國內排放標準，效果更優於傳統型和創新型三段式廢水處理系統。以上研究結果顯示，粉綠狐尾藻降低濁度和化學需氧量的效果有限，而在降低生化需氧量方面較能有貢獻。

張(2016)研究同樣以每日每公斤植物的營養鹽去除量呈現植物對營養鹽的去處率，且有同樣為沉水植物之水蘊草做比較對象，故營養鹽去除的比較以張(2016)研究為主。在  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  的去除率上，本研究的粉綠狐尾藻有較佳的表現； $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率則是水蘊草表現較佳。不過兩者實驗物種不同且實驗營養鹽濃度有很大的差異，故此比較結果僅供參考。而在  $\text{NH}_4^+$  的去除率方面，Liu 等(2016)研究同樣使用了粉綠狐尾藻，且氨氮濃度在約 200~400ppm 之間，與本實驗設置較相近，不過實驗裝置和植物用量還是有所不同，也無空白組而去除率僅能以  $\text{NH}_4^+$  的減少比率呈現。第 14 日時，粉綠狐尾藻在約 200 和 400ppm 兩種濃度下的氨氮去除率皆達 97% 以上，優於本實驗的 61~72%，不過在部分實驗條件不同或不清楚的情況下，兩者比較結果也是僅供參考。

## 第五章 結論與建議



### 5.1 結論

1. 粉綠狐尾藻在低水溫 20°C 環境時，能種植於氨氮濃度約 60~200ppm 的養豬廢水之中，並在種植的前 7 日都有極高氨氮去除率。每天每公斤的鮮重植物能去除 191.54~542.17mg 的銨離子；粉綠狐尾藻在高水溫 28°C 環境時，種植於高氨氮濃度(約 200ppm)的廢水中時，在種植的前 7 日每天每公斤的鮮重植物能去除 273.68 mg 的銨離子；若種植於氨氮濃度 60~100ppm 的養豬廢水濃度，植物並不能立即發揮去除功效，在種植後的 7~14 天才能有較佳的去除率。
2. 若僅以植物組氨氮變化量計算氨氮去除率，高水溫在第 14 日約為 71~95%，第 21 日在 89% 以上；低水溫在第 14 日約為 56~63%，第 21 日則約為 84~90%。
3. 粉綠狐尾藻每日每公斤約能去除 7.18~39.76mg 之總磷。
4. 在高水溫的情況下，粉綠狐尾藻可種植於三段式廢水處理系統厭氣出流口後之曝氣槽內，幫助生化需氧量和化學需氧量的降低。
5. 種植粉綠狐尾藻或曝氣設備皆能幫助生化需氧量的降低；對於化學需氧量則是曝氣設備比植物具去除效果。若以 1000 cc/min 出氣量之曝氣設備，與約 50~100g 植物搭配使用，則能夠幫助植物提升、維持硝酸鹽、氨氮和總磷的去除率，若單獨使用則沒有太大的效益。
6. 在養豬廢水氨氮濃度 60~200ppm 之間，不論將粉綠狐尾藻種植於何種濃度下，均僅在前 7 日有增重成長，之後便會開始枯萎、衰亡，且在越高氨氮濃度環境下，衰亡速度越快。因此在種植 7 日後得注意植物存活狀況，依狀況補植植株、移除殘株，以維持去除效果並避免營養鹽回流。



7. 養豬廢水中，其濁度與化學需氧量和硝酸鹽濃度有明顯正相關。檢測廢水時，能以濁度的測量快速的推測其化學需氧量和硝酸鹽濃度，其線性回歸公式分別為  $y=1.513x+894.6$  ( $R^2=0.9088$ ) 和  $y=0.0691x+5.6294$  ( $R^2=0.8528$ )。

8. 傳統型三段式廢水處理系統並去除廢水之氮、磷營養鹽之設計。利用種植粉綠狐尾藻的方式，能在低成本且不變更原有處理系統設計的情況下，進行畜牧廢水中的氮、磷營養鹽去除，達到改善放流水水質、維護環境之目的。

## 5.2 建議

1. 建議將粉綠狐尾藻放置於曝氣槽或生態池等開放池中，方便進行種植、管理。曝氣槽水力停留時間約為 1~2 日，且不同位置將有不同的營養鹽濃度，種植狐尾藻時可視生長狀況，調整種植的密度，並在約 7~14 日之間進行植物的更換、補植，以維持營養鹽的去除效率。

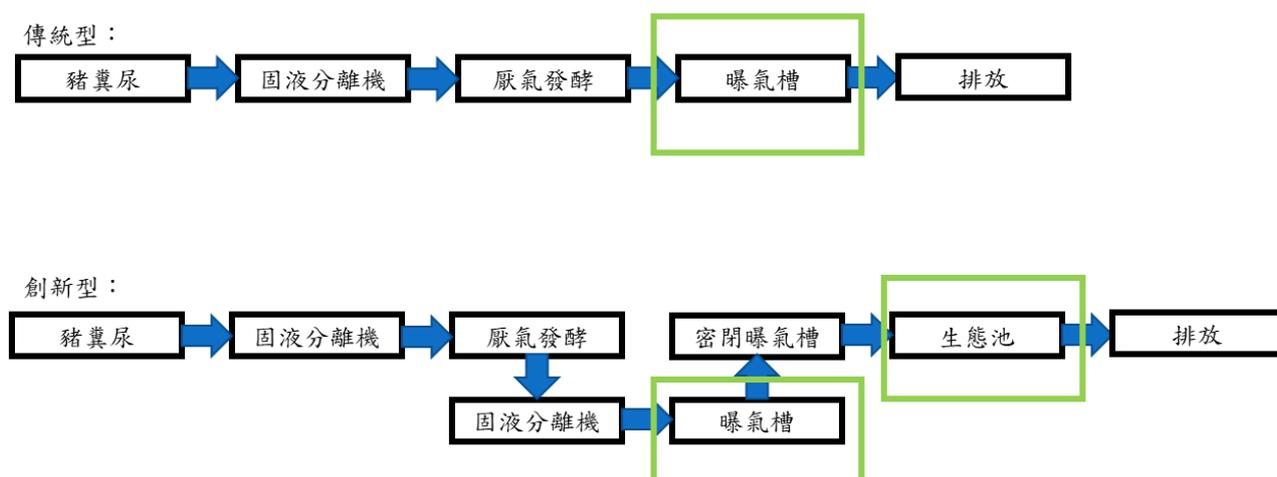


圖 5.2.1 種植建議區域示意圖

- 
2. 後續實驗建議選擇更多種耐氮水生植物進行去除營養鹽能力的檢測，以建立資料庫，供未來應用時能夠針對不同成分組成的廢水提供選擇參考。本研究外有以白頭天胡荽進行簡單實驗。在低濃度低水溫的情況下，前 7 日每天每公斤的鮮重植物能去除約 96.4mg 的銨離子。
  3. 可嘗試同時種植多種植物進行組合，利用不同植物之各項去除能力的搭配、互補，追求更佳的水質淨化效果。

## 參考文獻



1. 李怡賢 (2005). "以資訊系統推估淨水設備處理高濁度原水之系統負荷."
2. 李松柏 (2007). "台灣水生植物圖鑑." P96-97
3. 李秋華 (2010). "利用水生植物淨化淨化畜牧廢水之研究.", 崑山科技大學
4. 吳曉梅, 葉美鋒, 吳飛龍, 黃 薇, 林代炎. (2018). "狐尾藻淨化生豬養殖場沼液的研究." . 農業環境科學學報, 2018, 37(4) : 796-803
5. 郭猛德, 蕭庭訓, 王政騰 (2008). "養豬三段式廢水與污泥處理."
6. 張鴻開 (2016). "不同水生植物吸收營養鹽之研究.", 臺灣大學
7. 楊旻, 吳小剛, 張維昊, 方 濤 (2007). "富營養化水體生態修復中水生植物的應用研究."
8. 劉少博, 冉 彬, 曾冠軍, 李寶珍, 朱紅梅, 劉鋒, 肖潤林, 吳金水 (2017). "高銨條件下綠狐尾藻的生理與氮磷吸收特徵." 環境科學, 2017, 38(9)3731-3737
9. 劉玉雪, 吳浚霖, 陳秀美, 鍾惠珠 (2010). "本土性水生植物對水中污染質之去除成效研究." "農業工程學報" 第56卷第4期, 2010, P55-69
10. 韓瀟源, 宋志文, 李培英 (2008). "高效淨化氮磷污水的濕地水生植物篩選與組合." 湖泊科學, 2008, 20(6): 741-747
11. 蘇忠楨 (2007). "台灣養豬場廢水處理與操作管理實務." "今日養豬業" P43-46
12. 行政院農業委員會 (2012) "畜牧廢水處理設施操作維護宣導手冊"
13. 彰化縣府委託台灣水利環科研發基金會執行 (2014) "東螺創新增值園區第二階段增值深化與推廣作業期中報告書"

14. Hongfang Li, Feng Liu, Pei Luo, Guixian Xie, Runlin Xiao, Wei Hu, Jianwei Peng, and Jinshui Wu (2018). "Performance of integrated ecological treatment system for decentralized rural wastewater and significance of plant harvest management."

Ecological Engineering **124**: 69-76.

15. Feng Liu, Runlin Xiao, Yi Wang, Yong Li, Shulan Zhang, Qiao Luo, and Jinshui Wu (2013). "Effect of a novel constructed drainage ditch on the phosphorus sorption capacity of ditch soils in an agricultural headwater catchment in subtropical central China."

Ecological Engineering **58**: 69-76.

16. Feng Liu, Shunan Zhang, Yi Wang, Yong Li, Runlin Xiao, Hongfang Li, Yang He, Miaomiao Zhang, Di Wang, Xi Li, and Jinshui Wu (2016). "Nitrogen removal and mass balance in newly-formed *Myriophyllum aquaticum* mesocosm during a single 28-day incubation with swine wastewater treatment." J Environ Manage **166**: 596-604.

17. Arunothai Jampeetong, and Hans Brix (2009). "Effects of  $\text{NH}_4^+$  concentration on growth, morphology and  $\text{NH}_4^+$  uptake kinetics of *Salvinia natans*." Ecological Engineering **35(5)**: 695-702.

18. William J. Mitsch, Jean-Claude Lefeuvre, and Virginie Bouchard (2002). "Ecological engineering applied to river and wetland restoration." Ecological Engineering **18(5)**:529-541.

19. Qingyang Zhou, Jingqing Gao, Ruimin Zhang, and Ruiqin Zhang (2017). "Ammonia stress on nitrogen metabolism in tolerant aquatic plant-*Myriophyllum aquaticum*." Ecotoxicology and Environmental Safety **143**:102-110.

20. Edna Ben-Izhak Monselise (1993). "Different ammonium-ion uptake, metabolism and detoxification efficiencies in two Lemnaceae - A  $^{15}\text{N}$ -nuclear magnetic resonance study." Department of Chemistry, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel.

21. Robert F. Polomski, Milton D. Taylor, Douglas G. Bielenberg, William C. Bridges, Stephen J. Klaine, and Ted Whitwell (2008). "Nitrogen and Phosphorus Remediation by Three Floating Aquatic Macrophytes in Greenhouse-Based Laboratory-Scale Subsurface Constructed Wetlands." Clemson University, Clemson, USA and InsectiGen, Inc., Athens, USA.

22. Piyanart Saunkaew, Prasit Wangpakapattanawong, and Arunothai Jampeetong (2011). "Growth, morphology, ammonium uptake and nutrient allocation of *Myriophyllum brasiliense* Cambess. under high  $\text{NH}_4^+$  concentrations." Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University, Meuang, Thailand.