

南華大學科技學院自然生物科技學系自然療癒碩士班

碩士論文

Master's Program in Natural Healing Sciences

Department of Natural Biotechnology

College of Science and Technology

Nanhua University

Master Thesis

免澆水土耕蔬菜栽培箱開發

The Development of a Watering-Free, Soil-Based
Vegetable Cultivation Box

蔡朝宗

Chao-Zong Cai

指導教授：吳浩群 博士

Advisor: How-Chiun Wu, Ph.D.

中華民國 111 年 12 月

December 2022

南華大學

自然生物科技學系自然療癒碩士班

碩士學位論文

免澆水土耕蔬菜栽培箱開發

The development of a watering-free, soil-based vegetable
cultivation box

研究生：蔡朝宗

經考試合格特此證明

口試委員：王星海

羅俊智

吳浩群

指導教授：吳浩群

系主任(所長)：陳嘉民

口試日期：中華民國 111 年 12 月 28 日

致謝

在南華生科大學部到療癒所這趟六年的旅程，感謝吳浩群老師在這段期間的細心陪伴與耐心指導之下，促成了我完成畢業論文。回憶起在實驗室的時光，吳老師宛如父親般不斷的指導與鞭策我，讓我感受到這六年學習到許多事物，卻也深刻感受自己還有更多要進步的空間，非常感謝吳浩群老師這段期間的指導，相處的感動無法完全用筆墨描繪，老師您的身教與言教我會銘記在心繼續往前。

在學期間感謝同實驗室的蕭如翔、施秉承、郭秉睿、許嘉城同學們的陪伴與包容，並且協助我實驗的部分，還有感謝李呈禕、鄭芸湘、陳威仁、陳冠宇學長姐們實驗上的指導與建議。

感謝口試委員—王昱海老師與羅俊智老師指導與建議，使這篇論文更臻完善。

感謝我的家人、朋友、生技系的同學、療癒所的學長姐們陪伴與支持，帶給我鼓勵與信心。

蔡朝宗 謹誌

中華民國 2022 年 1 月 9 號於南華大學

摘要

一般民眾在栽培時，對植物所需水量之概念較不足，時常澆水過量或缺乏，以及事情繁忙忘記澆水，導致植物脫水、枯萎及生長不良等等問題，甚至造成植物死亡，因此研究目的針對無園藝背景之民眾開發一種從播種到採收無需澆水之蔬菜土耕栽培方式，使用紅萵苣(*Lactuca sativa* cv. Hong-Cui)作為栽培對象，並探討此栽培方式對紅萵苣生理與生長之影響。使用四種肥料處理分別為尿素溶於水中稀釋 500、1000 倍 (U500、U1000)及全、半濃度霍格蘭培養液 (Hoagland's solution) (全 HS、半 HS)，搭配三種土(S)水(W)比例介質處理(S1:W1、S1:W2、S2:W1)，將肥料及土水混合後透過洋菜粉(15 g.L⁻¹)凝固形成洋菜混合介質，共十二種實驗處理。

研究結果顯示，紅萵苣在全濃度 HS 肥料搭配三種土水介質生長最佳，其葉片數、葉面積、總鮮重皆顯著高於其它處理，僅有 U1000 處理搭配 S2:W1 土水比例之紅萵苣總乾重數值與全 HS 肥料處理無顯著差異；使用 U500 肥料搭配 S1:W2 介質處理之紅萵苣葉片數、葉面積、總鮮重及總乾重皆顯著低於其它處理。本研究結果發現紅萵苣總葉綠素之數值在 U500 肥料 S1:W1 最高並與其他處理有顯著性差異，而半 HS 肥料 S1:W2 土水比例之數值最低。U500 肥料 S1:W2 介

質及全 HS 肥料 S1:W1 介質紅萵苣之硝酸鹽含量顯著高於其它處理，反之半 HS 肥料 S1:W1 處理硝酸鹽含量最低，与其它處理有顯著性差異。研究中發現紅萵苣在尿素處理可得最高鈣、鈉離子含量，且顯著高於 HS 肥料處理，相反的栽培於 HS 肥料的紅萵苣鉀離子含量顯著高於尿素處理。

本次研究中所有處理從播種到採收期間紅萵苣亦無脫水之情形，因此本研究成功開發出一種從播種到採收 28 天無需澆水之土耕栽培方式，為首次無搭配自動化設備亦可達成無需澆水栽培植物，可謂創新之土耕栽培方式。

關鍵字:土耕栽培、洋菜、萵苣、霍格蘭培養液、尿素

Abstract

A common problem with growing plants by individuals who are not professionally trained is the lack of knowledge in terms of the amount of watering needed. Overwatering, underwatering, or forgetting to water plants are a common occurrence. This may lead to wilting, poor growth or even plant death. The aim of this study was to develop a soil-based vegetable cultivation method that requires no watering from seed sowing to harvesting for individuals with no horticulture background. Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Hong-Cui) was used to investigate how its growth and physiology were affected using this method of cultivation. Four nutrient solution treatments were used, which included 2 g.L⁻¹ urea (500x dilution; U500) and 1 g.L⁻¹ urea (1000x dilution; U1000), as well as Hoagland's solution (HS) (full strength and half strength). In addition, three soil:water ratios were studied: S1:W1, S1:W2, and S2:W1. After the fertilizer and soil were mixed, agar powder (15 g.L⁻¹) was dissolved in the soil-water solution to create a gel-like medium, on which the lettuce plants were grown.

Results of the study showed that, regardless of the soil:water ratio, the lettuce grew best in the soil-agar medium supplemented with full-

strength HS. Their leaf numbers, leaf area, and leaf fresh weight were significantly higher than lettuce grown in the other treatments. Only the dry weight of lettuce cultivated in the S2:W1 soil-agar medium containing U1000 urea was similar to those grown in the full-strength HS treatment. On the other hand, lettuce grown in the S1:W2 soil-agar medium enriched with 2 g.L⁻¹ urea (U500) produced the lowest number of leaves, leaf area, fresh weight, and dry weight, which were significantly lower than the other treatments. Results also showed that the total chlorophyll content of lettuce grown was significantly higher in the S1:W1 soil-agar medium supplemented with 2 g.L⁻¹ urea than those cultivated in other treatments. In contrast, lettuce grown in S1:W2 containing half-strength HS had the lowest chlorophyll content.

Lettuce cultivated in S1:W2 and S1:W1 soil-agar medium containing 2 g.L⁻¹ urea and full-strength HS, respectively, were found to produce a significantly higher amount of NO₃ than those in other treatments. On the contrary, the lowest NO₃ content was detected in the S1:W1 soil-agar medium enriched with half-strength HS. With regard to calcium and sodium content of lettuce leaves, a significantly higher amount was found in the soil-agar media supplemented with urea fertilizer than those

containing HS fertilizer. The opposite was true for the potassium content of lettuce leaves.

Wilting of lettuce plants was not evident in any of the treatments from seed sowing to harvesting. This study successfully developed an innovative method of growing lettuce in soil without the need for watering throughout the 28 days of cultivation. This soil-based cultivation method does not require any mechanical components, and to the best of our knowledge, is one of a kind in vegetable cultivation.

Keywords: soil-based cultivation, agar, lettuce, Hoagland's solution, urea

目次

致謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	IV
目次.....	VII
表次.....	X
圖次.....	XI
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景及動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
第二章 文獻探討.....	4
2.1 無土栽培.....	4
2.1.1 浮板水培.....	4
2.1.2 養液薄膜技術.....	4
2.1.3 氣霧栽培.....	5
2.1.4 非循環水耕栽培.....	6
2.2 栽培介質.....	6

2.2.1 土壤.....	6
2.2.2 珍珠石.....	8
2.2.3 洋菜粉.....	8
2.3 植物營養元素.....	9
2.3.1 大量元素.....	9
2.3.2 微量元素.....	12
2.4 葛苴概述.....	14
2.5 預實驗.....	16
第三章 材料與方法.....	18
3.1 實驗材料及生長條件.....	18
3.1.1 試驗品種.....	18
3.1.2 試驗地點.....	18
3.1.3 試驗材料.....	18
3.1.4 試驗裝置.....	19
3.2 實驗方法.....	20
3.2.1 實驗處理.....	20
3.2.2 實驗步驟.....	21
3.3. 檢測項目.....	24
3.3.1 植物性狀調查.....	24

3.3.2 硝酸鹽、鉀離子、鈣離子及鈉離子之檢測	24
3.3.3 抗氧化能力之檢測.....	25
3.3.4 總多酚之檢測.....	25
3.3.5 總葉綠素及類胡蘿蔔素之檢測	26
3.3.6 統計分析.....	27
第四章 結果.....	29
4.1 紅萵苣生育之性狀.....	29
4.2 紅萵苣葉綠素及類胡蘿蔔素含量	44
4.3 紅萵苣抗氧化能力、總多酚含量	47
4.4 紅萵苣硝酸鹽、鉀離子、鈣離子、鈉離子含量	49
第五章 討論.....	53
第六章 結論.....	58
6.1 研究限制和未來方向	59
參考文獻.....	61
中文文獻.....	61
英文文獻.....	61

表次

表 2.1 植物微量元素之功能及缺乏症狀	13
表 4.1 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣總葉綠素及類胡蘿蔔素含 量影響.....	46
表 4.2 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣抗氧化能力、總多酚含量 之影響.....	48



圖次

圖 2.1 初期實驗紅萵苣栽培在不同種土水比例洋菜混合介質處理 第 28 天生長狀況	17
圖 3.1(A)裝置內側尺寸；(B)裝置外側尺寸	19
圖 3.2(A)栽培裝置上蓋；(B)栽培裝置實體	20
圖 3.3 洋菜混合介質上方鋪土層前(A)表面；(B)側面	22
圖 3.4 洋菜混合介質頗面內側	23
圖 3.5 洋菜混合介質(A)表面；(B)側面	23
圖 3.6 洋菜混合介質上方鋪培養土層後(A)表面；(B)側面	24
圖 3.7 無需澆水栽培裝置實驗流程圖	28
圖 4.1 紅萵苣栽培在 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質處理第 28 天 生長狀況.....	32
圖 4.2 紅萵苣栽培在 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質處理第 28 天 獨立單株圖.....	33
圖 4.3 紅萵苣栽培在全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水 比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質處理第	

28 天生長狀況 (HS = Hoagland's solution).....	34
圖 4.4 紅萵苣栽培在全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水 比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質處理第 28 天獨立單株圖 (HS = Hoagland's solution).....	35
圖 4.5 第 28 天 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、 S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之表面圖.....	36
圖 4.6 第 28 天全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質之表面圖(HS = Hoagland's solution)	37
圖 4.7 第 28 天 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、 S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之底部圖.....	38
圖 4.8 第 28 天全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之底部圖(HS = Hoagland's solution)	39
圖 4.9 第 28 天 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、 S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質之剖面圖.....	40
圖 4.10 第 28 天全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之剖面圖(HS = Hoagland's solution)	41
圖 4.11 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣葉片數之影響.....	42

圖 4.12 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣葉面積之影響	42
圖 4.13 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣總鮮重之影響	43
圖 4.14 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣總乾重之影響	43
圖 4.15 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣硝酸鹽含量之影響	51
圖 4.16 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣鉀離子含量之影響	51
圖 4.17 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣鈣離子含量之影響	52
圖 4.18 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣鈉離子含量之影響	52



第一章

緒論

近年來國民所得逐年提高，國人休閒時間增加，愈來愈注重生活品質，因此休閒活動成為國人生活安排中重要事項之一，眾多休閒活動類型之中，與自然相關的活動是許多現代人的首選。

許多國人透過園藝活動來更接近大自然，栽培出一朵漂亮的花或植物的過程中，感受到生命的變化，經由園藝活動得到生理、心理、社交的正面效益，可讓內心產生愉悅且感到紓壓，甚至可以得到心靈上的療癒。

1.1 研究背景及動機

普遍民眾在栽培時，對植物所需水量之概念較不足，時常澆水過量或缺乏，以及事情繁忙忘記澆水，導致植物脫水、枯萎及生長不良等等問題，甚至造成植物死亡。

即便照顧植物過程中最後失敗，但對於園藝的憧憬促使民眾再次購買新的植株重新照顧，但又因澆水或忙碌等問題導致植物死亡，變成一種惡性循環，使民眾漸漸地失去信心，累積的挫折感成為一種無形的壓力，原本想透過植物來舒緩壓力或療癒心靈卻造成

反效果。

即便市面上有許多自動水耕栽培相關之產品，免去澆水之問題，但水耕系統管理技術層面高，包含培養液酸鹼值(pH)、導電度(Electrical conductivity, EC 值)及營養鹽濃度和比例等管理技術，上述問題對於一般民眾而言是相當嚴重的缺點，而且在市場方面上，我國普遍民眾仍對水耕蔬菜有安全疑慮，在選擇上較偏向於土耕栽培的蔬菜為主，且土耕蔬菜在市場接收度也較高。

1.2 研究目的

本研究目的為開發一種以土壤介質為主的土耕栽培方式，使用此方式栽培過程中皆無需澆水，並且無需依靠任何自動澆水設備，使民眾在家亦可輕鬆種植植物，藉由此栽培方式讓民眾可透過觀察植物生長過程以及採收植物的成就感達到舒緩身心靈的壓力並且獲得心靈上之療癒。

本實驗藉由水耕栽培不需澆水之優點，克服土耕栽培頻繁澆水的缺點，並且利用土耕栽培中土壤緩衝能力，解決水耕管理技術需求高之問題，結合兩種栽培方式開發出適合一般民眾從「播種到採收皆無需澆水」的栽培方式。

本研究之目的為：

1. 開發一種從種子發芽到採收 28 天內皆無需澆水之土耕栽培方式，並探討此方式對紅萵苣生長之影響。
2. 設計針對無園藝背景之民眾：適合家庭室內栽培、無需使用大量空間，亦無需複雜管理技術及自動化澆水設備的栽培裝置。
3. 探討不同肥料與肥料濃度及土水比例對紅萵苣生長及生理之影響。
4. 觀察透過不同肥料與肥料濃度及土水比例對紅萵苣硝酸鹽、鉀離子、鈉離子、鈣離子含量之影響。

第二章

文獻探討

2.1 無土栽培

現階段無需澆水之栽培方式主要以無土栽培為主，分別為浮板水培、養液薄膜技術、氣霧栽培，皆需透過自動化設備控制達到無需澆水之目標，而無土栽培之培養液管理技術層面高，且該系統成本價格昂貴，導致無土栽培並非為民眾園藝休閒首選之一。

2.1.1 浮板水培

浮板水培技術又稱 FHT (Floating Hydroponics Technique)，指作物在海綿中育苗長出真葉後，定植到聚苯乙烯泡沫塑料浮板上，藉由浮板的浮力使作物漂浮在培養液的表面上讓植物之根系吸收水分及養分，設備包括栽培床、營養液循環系統、自動控制系統，主要種植為蔬菜類，初始栽培需要大量培養液以填滿栽培床，且培養液也需要定期更換(Savvas et al., 2018)。

2.1.2 養液薄膜技術

養液薄膜技術又稱 NFT (Nutrient Film Technique)，植物的根系

生長在一組塑料模槽或多數狹長通道中，培養液通過該通道不斷循環，從而提供植物必要的養分和水分，設備包括定植槽、培養液水槽、營養液循環系統，且養液薄膜技術具有許多優點，消除澆水方面的問題，也不需要對水量每日評估，且保證營養分供應的均勻性，更有效的利用培養液，但與水培浮板技術相同其培養液管理技術層面高，且此系統沒有緩衝能力，短時間內作物容易受影響造成產量降低，甚至是缺乏症出現(Burrage, 1997)。

2.1.3 氣霧栽培

氣霧栽培(Aeroponics)植物根系置於封閉容器中，並且懸掛曝露於空氣中，利用過濾處理後的營養液下通過霧化噴霧裝置在壓力作用下將營養液霧化為細小液滴，直接噴射到植物根系以提供植物生長所需之水分和養分的一種無土栽培技術，噴灑時間約為 30 至 60 秒，其頻率因植株種類、生長階段、日夜時間而異。設備包括霧化器、營養液回流管路、培養箱、自動控制系統(Osvald et al., 2001)。與土耕或水耕相比，該系統降低許多勞力成本，用水量減少 98%，化肥減少 60%，並使植物產量增加 40 - 75% (Stoner & Schorr, 1983)，但操作此系統需要具備大量熟練經驗，及先進的設備和營養液管理技術。

2.1.4 非循環水耕栽培

Kratky (2003)研發出非循環水耕栽培，將萵苣置於固植板上，植物根系浸泡在封閉性之培養箱中生長，且固植板與培養液之間有約 2-3 公分的潮濕空氣層來維持根系所需的氧氣，栽培期間無需澆水且 30 天即可採收，設備只需水箱、植物固植板、培養液即可，雖然此栽培方式不需要大量設備，但 Shah (2009)研究指出此栽培方式的產量並不理想，因植物生長過程中培養液的 pH 及 EC 值不做任何調整，約第 21 天後 EC 值偏高及 pH 值超過理想範圍內(5.5 - 6.5)，導致降低培養液的使用效率使植物生長緩慢。

2.2 栽培介質

2.2.1 土壤

土壤是大部分植物生長的重要介質之一，土壤是由水分(25%)、空氣(25%)、礦物質與有機質(50%)組成的一種鬆散混合物，能提供植物生長之所需(黃品錡，2019)，因此植物與土壤有著發育相關之牽連，進而影響作物之產量及品質。而土壤可依性質分為物理、生物、化學三種性質；物理性質亦是指土壤中的通氣、排水、黏性的物理現象，進而影響土壤供應水分和養分能力之因素；生物性質亦是指土壤中的許多微生物，會將土壤裡的有機質分解轉化成無機養

分型態供植物吸收使用，扮演著非常重要的角色；土壤化學性質是主要影響土壤肥力水平的重要因素之一，包含土壤鹽鹼度(pH 值)、土壤導電度(Electrical conductivity, EC 值)、養分吸附、降解、沉澱、聚合、溶解、氧化、還原等等。栽培方式為將植物種子或幼苗移植至土中，土壤提供植物生長所需之養分、水分及固定根系，使植物保持直立狀態生長(黃品錡，2019)。

在一般自然條件下，土壤具有抵抗土壤溶液中之 H^+ 或 OH^- 濃度改變的能力，使 pH 值維持在一定的範圍內，此特殊抵抗力，稱為緩衝能力(Buffering effect of soil)(Aitken, 1990)。土壤緩衝能力亦是指當少量的酸性或鹼性物質加入土壤後，土壤具有緩和其酸鹼反應變化的性能(Conyers, 1995)。土壤緩衝能力主要通過土壤膠體的離子交換作用、強鹼弱酸鹽的解離等過程的方式實現。而土壤緩衝能力的高低取決於土壤膠體的類型與總量、土壤中碳酸鹽、重碳酸鹽、矽酸鹽、磷酸鹽和磷酸氫鹽的含量等(Borggaard, 1983)。

由於土壤具有緩衝性，因而有助於緩和土壤酸鹼變化，創造比較穩定的環境，有助於植物生長和微生物活動。本實驗藉由土壤的緩衝能力以此改善培養液之 pH 值管理上的問題。

2.2.2 珍珠石

珍珠石(Perlite)為火山噴發之酸性熔岩，噴出後經過急速冷卻而成的玻璃質岩石。主要成分為二氧化矽，屬於中性無機物，具有無味、無毒、質量輕、密度低等特性。且珍珠石擁有 93%的高孔隙率，故排水性質極強(Kang et al., 2004)。而在土壤中添加珍珠石可促進土壤空氣流通以利植物根群之發育，改善土壤過濕缺氧的問題(Gao et al., 2010)。

2.2.3 洋菜粉

洋菜(Agar)是從海生特定紅藻類中萃取的多糖，洋菜的化學結構是由硫瓊膠和洋菜糖組成的混合物，而洋菜的凝膠特性是基於連續成膜能力。將洋菜粉在水中加熱溶解後，形成粘稠的液體，溫度下降至膠凝溫度(90-103°C)以下可形成熱可逆凝膠(Mohammed et al., 1998)，而洋菜的物理凝膠作用僅透過洋菜糖分子之間的氫鍵形成所產生(Scholten & Pierik, 1998)。在洋菜凝膠中形成洋菜糖雙螺旋網狀結構，透過其外部羥基團來聚集，使分子穩定架構。由於這種特殊的凝膠能力，洋菜凝膠可以在網狀結構內部保留住大量水分(Armisen & Gaiatas, 2009)，為組織培養製作固態培養基之重要材料之一。

2.3 植物營養元素

目前有 16 種養分為植物的必要性養分，這些養分供應源分別為空氣、土壤溶液、土壤礦物質、土壤有機質及各種化學肥料等(Uchida, 2000)，植物對於養分有最佳需求量及最低需求量，養分於最低需求量時會使植物出現缺乏症，反之過量的養分會引起植物中毒之現象造成發育不良，因此供應適當養份對植物而言不可或缺。

2.3.1 大量元素

氮元素為蛋白質、胺基酸、核酸、賀爾蒙、細胞分裂素及葉綠體組成重要元素之一(Hopkins & Huner, 2005)。植物體吸收氮元素主要分為硝酸根離子(NO_3^-)及銨根離子(NH_4^+)兩種形態。郭孚耀 (1998)研究表示植物葉柄及葉肉的硝酸鹽含量明顯隨著氮肥施用量提高而增加; Al-Redhaiman (2001)研究表明使用硝酸態氮搭配銨態氮以 1:1 之比例組成的氮肥，能提高蘿蔓萵苣 46%的乾重值。

植物缺氮時會抑制葉綠素合成引起葉片黃化，降低光合作用能力使植株生長不良且矮小，嚴重時葉片由黃化轉為褐化，並在莖部、葉柄及葉背產生花青素(anthocyanin)積累，最終使葉片自然脫落(Hopkins & Huner, 2005)。過量的氮會導致植物葉片矮小、葉色濃綠及根系生長不良，使植株發育緩慢，並且抑制鉀、鈣元素吸收，造成果實甜度下降且不耐儲存(張庚鵬、張愛華，1997)。在土壤中施用過多

的銨態氮之肥料時，會提高植物體中醃胺態氮濃度，引起植物銨離子中毒之現象(倪禮豐、鍾仁賜，2003)。

磷是屬於植物生長養分三要素之一，參與植物許多代謝反應，包括光合作用、核酸合成、呼吸作用、碳水化合物代謝及糖解作用等(Schulze et al., 2006；Vitousek et al., 2010)。磷在酸性土壤中易與鐵、鋁元素結合固定；在鹼性或石灰含量較高的土壤，容易與碳酸鈣產生反應進行沉澱，並降低其有效性及利用率(楊秋忠，2010)。

植物因磷的缺乏會限制葉面積的發育，減少葉片光合作用的面積，產生負面影響(Chaudhary et al., 2008；Sulieman et al., 2013)，因此植物會改變根部型態及生理狀況，從根部釋放羧酸鹽及有機酸鹽等，使土壤中有效性磷提高及根際層酸化，促進植物對磷的吸收能力(Nian et al., 2003)。

鉀是植物必要元素之一，土壤中鉀以四種型態存在分別為礦物鉀(含量最多，約占鉀總量 90-98%)、層狀矽酸鹽礦物鹽中的鉀(非交換性鉀)、交換性鉀和土壤溶液中的鉀；前兩者供應鉀的速率非常慢，需要經過許多時間才可釋出；後兩者是供應植物吸收所需鉀的主要來源(Tisdale et al., 1985)。而鉀離子參與植物體內 60 多種酵素反應、協調光合作用、葉片氣孔開關、維持細胞膨壓的滲透調節、控制植物體內養分移動、協助碳水化合物的運輸及儲藏、促進氮素吸收、蛋白質合

成及促進水分吸收等(Marschner, 2012)。植物對鉀的吸收率較高，容易影響其它陽離子元素吸收；當鉀離子的吸收提高亦會抑制其它陽離子；反之，若鉀離子的吸收減少，其它陽離子吸收量則會提高，例如氫離子(H⁺)、鈉離子(Na⁺)、鎂離子(Mg²⁺)及鈣離子(Ca²⁺)。

植物缺鉀時會出現葉片老化，造成葉綠素降解(Zhao et al., 2003)，並使光合產物失衡，導致同化產物減少，使果實發育受阻，造成果實品質與產量下降(Usherwood, 1985；Pettigrew, 2008)。在嚴重缺鉀情況下，植物葉片邊緣出現黃色灼燒或燒焦(黃化)，最終造成葉片脫落(Bagyalakshmi et al., 2017)。

鈣主要以兩價陽離子形式的 Ca²⁺ 吸收進入植物體內利用，是植物生長和發育必要元素之一，參與植物細胞生理調節(Liang & Zhang, 2018)、細胞訊息傳導(White, 2003)、維持細胞壁完整性 (Harholt et al., 2010)、酵素活化及分泌及賀爾蒙作用(Hopkins & Huner, 2005)。鈣離子可與細胞膜上之磷脂質(phospholipid)、磷酸鹽(phosphoric compound)及蛋白質羧基(carboxyl group) 形成鍵結，維持細胞膜穩定狀態性(Poovaiah, 1988；Epstein, 1989)。

當植物細胞缺乏鈣時，使細胞膜上之磷脂質分子可自由移動，造成細胞膜之結構受損及崩解(Poovaiah, 1988)，且鈣離子在植物體中屬不易移動之元素，故皆由幼葉或是新生組織開始褐化導致細胞死亡，

此現象稱「枝梢枯死」(dieback)；花或果實頂部則容易出現裂果、凹陷及褐化壞死，又稱「花端枯朽」(blossom-end rot)(Epstein, 1989)。

鎂為植物光合作用中最重要離子，植株葉綠體中鎂含量占比15%至35%，是組成葉綠素不可或缺營養元素之一(Rissler, 2022；Karley & White, 2009；Cakmak & Yazici, 2010)，此外鎂元素參與三磷酸腺苷酶(ATPase)、蛋白質合成和碳水化合物等重要代謝作用(Marschner, 2012；Shaul, 2002；Cowan, 2002)。

當栽培環境缺乏鎂之情況下，植物發育與生長皆會嚴重受到抑制，進而造成作物品質及生產力不利之影響，且植物鎂缺乏時會出現老葉葉脈之間葉肉組織色澤黃化，而葉脈保持綠色，嚴重時會導致葉片脫落(Verbruggen & Hermans, 2013)。

硫為植物蛋白質中重要關鍵元素之一，大部分蛋白質皆需硫元素之組成，此外亦參與維生素B合成、硫胺素及輔酶之代謝，且硫有助於種子形成、葉綠素合成、豆類植物根瘤形成及穩定蛋白質結構(Uchida, 2000)。

2.3.2 微量元素

氯、硼、鐵、錳、鋅、銅、鉬、鎳亦為植物之必要性之養分，依植物吸收量分類為微量元素，其功能及缺乏症狀如表 2.1 所示。

表 2.1 植物微量元素之功能及缺乏症狀

元素	功能	缺乏症狀
氯	參與光合作用反應、調節與維持植物體內 pH 值。	植物生長不良、葉片失綠、萎凋等症狀。
硼	為植物根部及新芽組織生長所需之重要元素，參與碳水化合物運輸及細胞分裂。	植物莖部頂端生長停滯，新芽組織發黑，葉片及葉柄脆化。
鐵	參與植物呼吸、光合作用及共生固氮酵素之活化劑。	植物新葉出現葉脈間黃化症狀。
錳	參與植物生長所需酵素之活化劑及合成葉綠素的觸媒。	葉肉失綠，葉脈仍為綠色，且葉脈間失綠部位為圓形小點。
鋅	控制植物生長調節劑之合成，為植物生長素度有關元素。	新葉葉片變小、變厚，葉色灰綠，老葉有燒焦之褐斑。

續上表

元素	功能	缺乏症狀
銅	參與多種酵素反應及維生素 A 合成。	葉片葉色深綠捲曲，並且在整片新葉或葉脈間萎黃，且葉子褪綠的區域可能產生小的壞疽斑點。
鉬	使植物體內之硝酸態氮還原稱氨態氮，以合成蛋白質。	植物老葉變黃，葉緣燒焦及葉片捲曲等症狀。
鎳	參與多種酵素含量及代謝作用。	使脲酶活性受到遏制，導致尿素累積於葉子或果實中，引起毒害，產生壞死。

資料來源: Uchida (2000)

2.4 萵苣概述

萵苣，學名：*Lactuca sativa* L.，科名：菊科，原產地：義大利，現今歐美洲各個家皆有種植。屬一年生植物，適合在涼爽多濕及光照充足的環境生長。根據全球農產品貿易組織報告，2021 年中全球萵苣

產量約有 2766 萬公噸，其中亞洲產量佔比高達 70%(Tridge, 2021)。而萵苣葉片時常用於沙拉、三明治及漢堡食品中，在歐美地區經常作為主食使用，屬於世界中重要糧食之一(Mou, 2008)。紅萵苣相較於綠色萵苣品種葉片多呈現紫色、紅色且紅萵苣有較高的花青素 (anthocyanin)含量、維生素 C(ascorbic acid)含量及總多酚(total phenol)含量(Llorach et al., 2008)。 Lee et al., (2009)指出在高脂食品、高膽固醇飲食中添加 8%的紅色生菜，可以有效降低老鼠血液中膽固醇和脂質的含量，有助於減少心血管疾病發生，而紅萵苣富含多酚、類胡蘿蔔素和維生素，屬於食品中的天然外源性抗氧化劑。具有抗氧化活性的最重要之維生素是維生素 E 和維生素 C，它們可以保護細胞免受活性氧和氧化損傷(Prior & Wu, 2013)，目前研究檢測出紅萵苣含有多種游離三萜和三萜酯(Choi et al., 2020)，三萜以游離態和共軛態存在，如三萜糖苷或三萜酯。植物中的三萜對食草動物具有化感作用、抗細菌、抗真菌、殺蟲和拒食活性(Battineni et al., 2018)，且具有消炎、止痛、幫助消化、刺激食慾等功效(Anilakumar et al., 2017)，也在傳統醫學中當作藥用植物之一(Battineni et al., 2018)。

2.5 預實驗

正式研究前，測試多種容器、土壤、介質、保水材料種類與品牌，目的為探討可長時間提供植物生長過程所需水分及養分的材料。為了提高介質含氧量，初步使用泥炭土與珍珠石以 2:1 比例混合，並添加硝磷基黑旺特 43 號複合肥料(0.4 g.L^{-1})使介質之養分提高以利植物生長發育，此外使土壤與水分能緊密凝固，測試不同洋菜粉品牌及濃度 ($5-15 \text{ g.L}^{-1}$)，目的為探討最佳洋菜濃度使介質軟硬度達到最佳狀態。

為了提供 28 天所需水分讓植物能夠正常生長並無脫水現象，透過預實驗測試不同土(S)水(W)比例處理，分別為 S1:W1、S1:W1.5、S1.5:W1、S1:W2、S2:W1、S1.5:W2、S2:W1.5。將水、培養土及洋菜粉三者混合後倒入栽培裝置裡攪拌均勻凝固成洋菜混合介質栽培紅萵苣。預實驗初期階段部分土水比例處理之紅萵苣生長過程不佳，且結果顯示第 28 天後紅萵苣植株明顯矮小，生長狀況並不理想(圖 2.1)，推測為養分不足，故本研究使用不同肥料種類及濃度處理使紅萵苣能夠達到正常生長之目的。



圖 2.1 初期實驗紅萵苣栽培在不同種土水比例洋菜混合介質處理第
28 天生長狀況



第三章

材料與方法

3.1 實驗材料及生長條件

3.1.1 試驗品種

本研究試驗材料為購買自農友種苗股份有限公司，2021 年生長的紅萵苣(*Lactuca sativa* cv. Hong-Cui)。

3.1.2 試驗地點

本研究地點位於植物工廠內進行試驗，室內溫度為 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，濕度約 70%，植物光源為白色發光二極體 (LEDs, 翊輝企業股份有限公司)，光合有效輻射 PAR (Photosynthetically active radiation) 為 $115\ \mu\text{mol}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ ，光週期為 14/10 小時(日/夜)。

3.1.3 試驗材料

1. 硝磷基黑旺特 43 號複合肥料(台灣肥料股份有限公司)，成份：全氮 15%、全磷酐 15%、全氧化鉀 15%、檸檬酸溶性氧化鎂 4%、有機質 3%。
2. 單質肥料—尿素(台灣肥料股份有限公司)，成份：全氮 46%。

3. 霍格蘭培養液 Hoagland's solution (HS) 配方(Hoagland and Arnon, 1950)。
4. 德國 Euflor 泥炭培養土(優福樂腐植質有限公司 EULOR HUMUSWERK GMBH)，成份：全氮 1%、全磷酐 0.1%、全氧化鉀 0.1%、有機質 90%。
5. 珍珠石(Perlite)
6. 洋菜粉(新光洋菜企業集團)

3.1.4 試驗裝置

裝置材料為木材訂製方形盒(圖 3.1)，其裝置內外側皆有黏上防水貼皮，外側尺寸為長 42 cm 寬 42 cm 高 7.6 cm，內側尺寸為長 40 cm 寬 40 cm 高 5.5 cm，總容量體積為 8.8 L，而裝置上蓋尺寸長 41.5 cm 寬 41.5 cm，上蓋挖孔(圖 3.2)為栽培孔直徑 3.5 cm，每孔間距 10 cm。

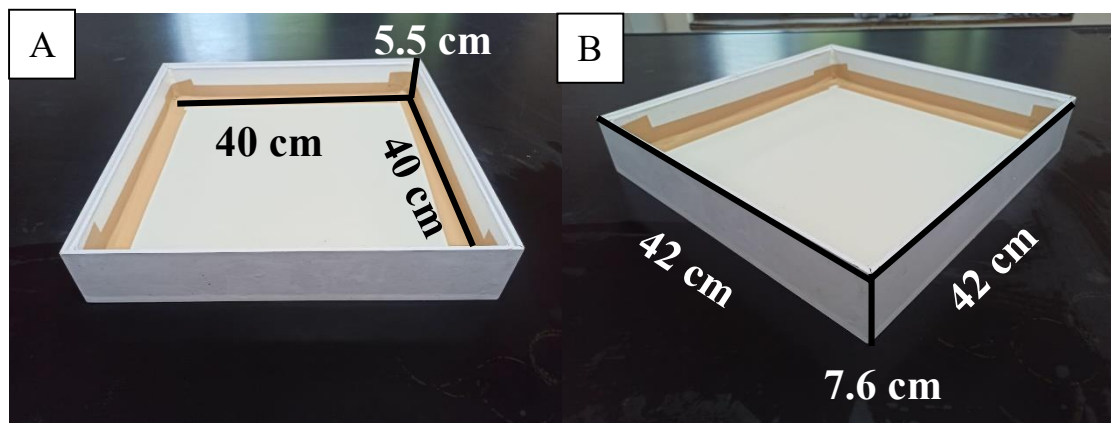


圖 3.1(A)裝置內側尺寸；(B)裝置外側尺寸

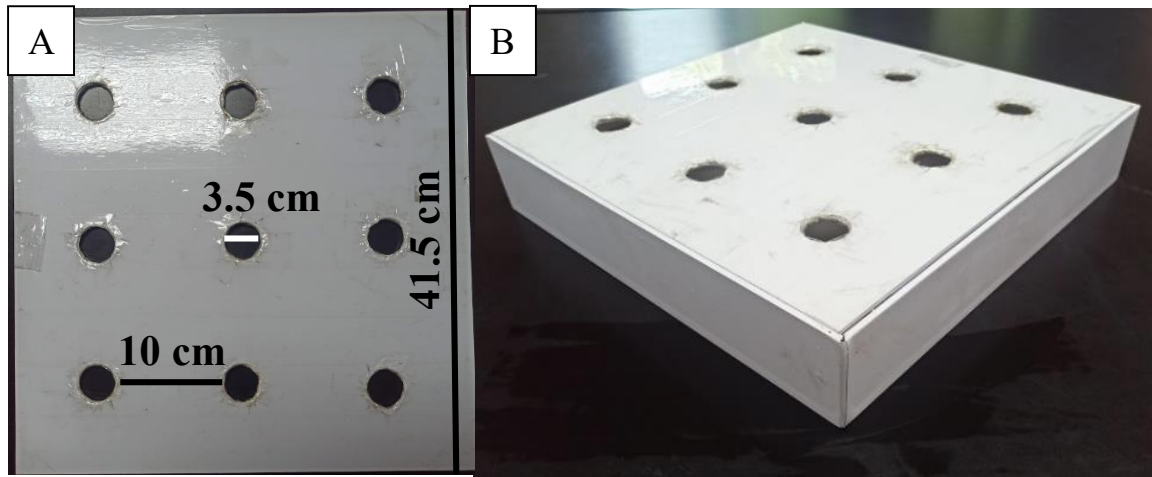


圖 3.2(A)栽培裝置上蓋；(B)栽培裝置實體

3.2 實驗方法

本實驗以水耕栽培及土耕栽培之兩者概念結合，將紅萵苣 28 天所需水分及養分加入土壤進行栽培，然而在加入大量水分及養分到土中會形成泥濘狀之土壤，進而出現土壤缺氧的狀況，導致植物根部發育不良，且處理初期加入大量水分亦會隨著時間流逝而蒸發，使植物中後期生長階段水分嚴重流失，將面臨缺水之問題。而本研究透過珍珠石提高介質之含氧量，使用洋菜將水分、養分及土壤凝固成洋菜混合介質，減少水分流失及固定植株生長。

3.2.1 實驗處理

預實驗結果發現無添加肥料造成紅萵苣生長不良，故本實驗使用二種肥料種類及濃度，其處理為尿素單質肥料溶於 RO 水 2 g.L^{-1} (500 倍)、 1 g.L^{-1} (1000 倍) 二種處理 (U500、U1000)，及霍格蘭培養

液(Hoagland's solution)使用全濃度 HS、半濃度 HS 二種濃度做為肥料處理。

本實驗全部處理所使用之培養土為泥炭土及珍珠石以 2：1 比例混合均勻再加入硝磷基黑旺特 43 號複合肥料($0.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)。

本研究使用培養土搭配尿素及 HS 肥料，處理組成三種土水比例處理(肥料溶於水中)，分別為 S1:W1、S1:W2、S2:W1 (S 代表培養土；W 代表水)，將不同肥料處理、水與培養土混合後透過洋菜粉凝固形成洋菜混合介質。

實驗栽培容器容量為 8.8 L (圖 3.1)，依土水比例處理分別為 4.4 L 培養土：4.4 L 水 (S1：W1)、5.86 L 培養土：2.93 L 水(S2：W1)、2.93 L 培養土：5.86 L 水 (S1：W2)。

實驗處理由 2 種肥料類型、各 2 種肥料濃度及 3 種土水比例互相搭配組成 12 種實驗處理，每處理有 2 箱，每箱 9 顆共 18 顆紅萵苣並於 28 天後結束實驗採收數據。

3.2.2 實驗步驟

1. 依處理配置肥料液並加入洋菜粉($15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 後倒入容器中攪拌均勻，再放入滅菌釜在 121°C 、 104 kPa 下高壓滅菌 45 分鐘。
2. 將滅菌過的肥料液處理與培養土加入栽培裝置(圖 3.1)後混合

攪拌均勻，此時測定混合介質之 pH 值均在 5.8 - 6.3 之間，等待降溫冷卻凝固完成(圖 3.3)，圖 3.4、圖 3.5 為凝固後洋菜混合介質之剖面圖，再鋪上一層厚度 0.5 公分(圖 3.6)培養土後蓋上蓋子(圖 3.2)。

3. 將萵苣種子播入容器上方培養土層 0.3 公分處，每穴播 4 顆萵苣種子，於實驗第 7 天子葉展開後進行疏苗，每孔僅留一顆，完成移植後將栽培裝置放置 LED 燈光源下並栽培至第 28 天時採收紀錄並且分析，圖 3.7 為本次實驗流程圖。

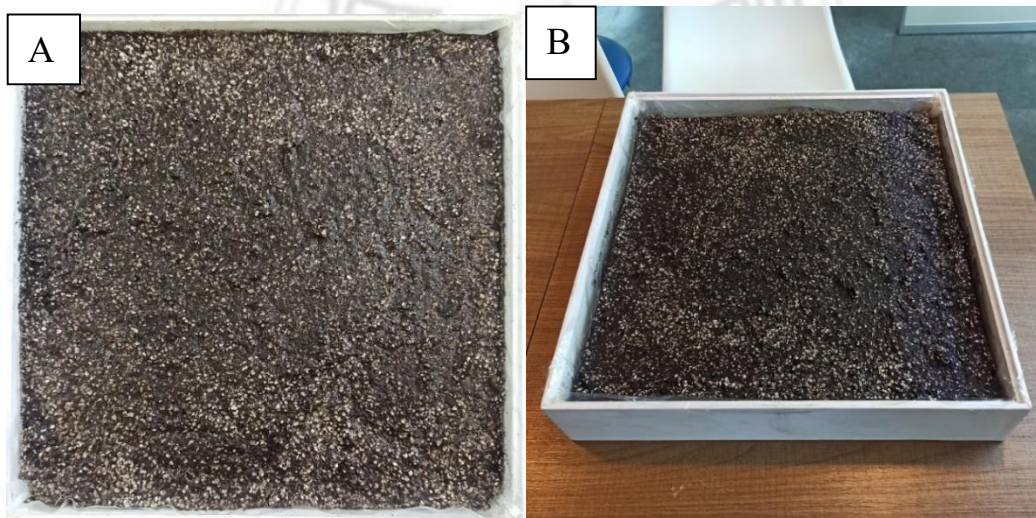


圖 3.3 洋菜混合介質上方鋪土層前(A)表面；(B)側面



圖 3.4 洋菜混合介質剖面內側

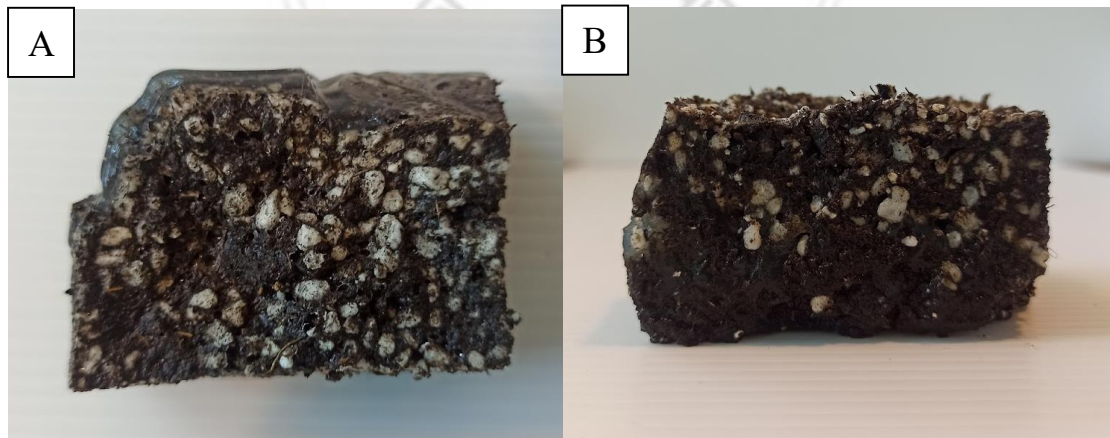


圖 3.5 洋菜混合介質(A)表面；(B)側面

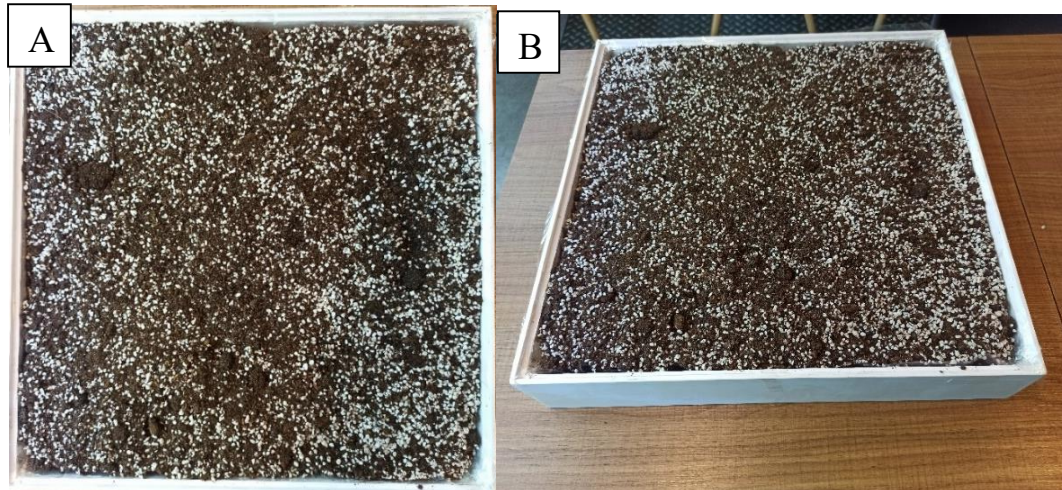


圖 3.6 洋菜混合介質上方鋪培養土層後(A)表面；(B)側面

3.3. 檢測項目

3.3.1 植物性狀調查

1. 植株鮮重：取植株之地上部測量重量，單位為公克(g)。
2. 植株乾重：取植株之地上部，置入 70°C 烘箱內 24 小時後秤量重量，單位為公克(g)。
3. 葉片數：植株之真葉完全展開數。
4. 葉面積：將植株之所有真葉完全展開放置平面上拍照，以 ImageJ (National Institutes of Health, USA)軟體計算照片中所有真葉之展開面積單位為平方公釐(mm²)。

3.3.2 硝酸鹽、鉀離子、鈣離子及鈉離子之檢測

取每處理之紅萵苣新鮮植株葉片序第四片之完全展開真葉，進

行硝酸鹽、鉀離子、鈣離子及鈉離子(Horiba LAQUA twin NO3-11、K-11、Na-11、Ca-11, HORIBA Advanced Techno, Co., Ltd, JP)之含量檢測，將新鮮葉片磨碎取其汁液，倒入離子感測器讀取儀器上之數值後記錄其數值。

3.3.3 抗氧化能力之檢測

採用 Chiu (2009)之方法，取植株置入 70°C 烘箱內乾燥 24 小時後，放入打粉機中進行打粉，精秤 1 g 植株樣品加入 10 mL 95% 乙醇中震盪 10 分鐘，於 25°C 下高速離心 2000 rpm 10 分鐘後取上清液作為萃取液，取萃取液 20 μ L 加入 730 μ L DPPH 試劑溶液 (0.1 mg 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl，1 L 95 % Ethanol)，再加入 250 μ L 95% 乙醇震盪均勻，靜置 30 分鐘後，以分光光度計 (Microplate Spectrophotometer, Biotek Instruments, Inc., U.S.A)於波長 517 nm 下測定吸收值變化，將其吸收值帶入公式計算抑制率。

抑制率(%)：【1 - (實驗組吸收值/對照組吸收值)】 x 100

3.3.4 總多酚之檢測

採用 Chen et. al (2012) 之方法，精秤 0.1 g 植株樣品加入 10 mL 純水中震盪 10 分鐘，於 25°C 下高速離心 2000 rpm 10 分鐘後

取上清液作為萃取液，總多酚含量以 Folin-Ciocalteu 比色法測定總多酚含量，取萃取液 150 μL 加入 150 μL Folin-Ciocalteu 試劑 (1 N) 混合震盪均勻，靜置 10 分鐘後，加入 150 μL 碳酸鈉 (20% Sodium carbonate) 震盪均勻，靜置 30 分鐘後，以分光光度計 (Microplate Spectrophotometer, Biotek Instruments, Inc., U.S.A) 於波長 730 nm 下測定吸收值變化。標準曲線以 0.5 mg/mL Gallic acid 配製。單位為 mg/g 表示。

3.3.5 總葉綠素及類胡蘿蔔素之檢測

採用 Maadane et al. (2015) 之方法，精稱植株樣品 0.05 g 加入 10 ml 95% 乙醇中震盪 1 分鐘放入 4°C 黑暗環境下避光靜置 30 分鐘後，於 4°C 下高速離心 2000 rpm 10 分鐘後取上液 200 μL 滴入 96-well 孔盤中，以分光光度計 (Microplate Spectrophotometer, Biotek Instruments, Inc., U.S.A) 於波長 664 nm、648 nm、470 nm 下測定吸收值變化。依下列公式計算葉片內之葉綠素 *a*、葉綠素 *b*、總葉綠素及類胡蘿蔔素含量。

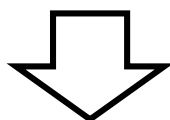
- Chlorophyll *a* ($\mu\text{g/mL}$) = $13.36 \times A_{644} - 5.19 \times A_{648}$
- Chlorophyll *b* ($\mu\text{g/mL}$) = $27.43 \times A_{648} - 8.12 \times A_{644}$

- Carotenoids ($\mu\text{g/mL}$) = $(1000 \times A_{470} - 2.13 \times Ca - 97.64 \times Cb) / 209$
- Chlorophyll $a+b = Ca + Cb$
- Chlorophyll $a/b = Ca / Cb$

3.3.6 統計分析

實驗所得之數據以 SPSS 套裝軟體第 17 版(SPSS v. 17) 統計分析所有試驗結果以變方分析(ANOVA)測驗其顯著性，並以鄧肯新多重差距檢定(Duncan's multiple range test)分析實驗數據，進行各處理間平均值之比較。

種子發芽
紅萵苣 *Lactuca sativa* cv. Hong-Cui



洋菜混合介質處理			
土水比例	S1:W1	S1:W2	S2:W1
尿素稀釋 500 倍、1000 倍		Hoagland's solution 100%、50%	



發芽第 7 天疏苗移植



第 28 天實驗結束
採收數據
葉片數、葉面積、鮮重、乾重、抗氧化能力、總多酚含量、總葉綠素含量、
類胡蘿蔔素含量、硝酸鹽離子含量、鉀離子含量、鈣離子含量、鈉離子含量

圖 3.7 無需澆水栽培裝置實驗流程圖

第四章

結果

4.1 紅萵苣生育之性狀

生育性狀為判斷蔬菜生長是否優良的重要指標之一，其內容包含葉片數、葉面積、鮮重、乾重等項目，依蔬菜品種、特性的不同以及環境、養分、水分、光照等影響，生育性狀亦會不同。

本實驗栽培紅萵苣在不同洋菜混合介質 28 天後採收植株並調查生育性狀，圖 4.1、圖 4.2 分別為紅萵苣栽培於尿素肥料處理之生長狀況及獨立單株圖，而圖 4.3、圖 4.4 分別為 HS 肥料處理之生長狀況及獨立單株圖，圖 4.5、圖 4.6 為各處理洋菜混合介質表面，觀察到半濃度 HS 的介質表面有明顯之根系(圖 4.6D1；D2；D3)，而其它肥料處理較不明顯(圖 4.5)，圖 4.7、圖 4.8 為各處理洋菜混合介質底部圖，兩種尿素濃度之土水比例 2:1 處理的底部下方佈滿明顯之根系(圖 4.7A3；B3)，而 1:2 及 1:1 處理較不明顯(圖 4.7A1；B1、A2；B2)，U1000 的所有土水比例處理根系比 U500 處理明顯茂盛(圖 4.7)，另外無論土水比例高低，HS 肥料處理之根系皆比尿素處理明顯(圖 4.7、圖 4.8)，圖 4.9、圖 4.10 為各處理洋菜混合介質剖面圖，可明顯看到所有肥料處理中的 1:1 及 2:1 介質之土壤與珍珠石混合均勻(圖 4.9A1；

A3 ; B1 ; B3、圖 4.10C1 ; C3 ; D1 ; D3)，而 1:2 介質處理水分較多故凝固時間較長，導致土壤與珍珠石明顯分層(圖 4.9A2;B2、圖 4.10C2; D2)。

紅萵苣栽培在不同肥料介質對葉片數之影響(圖 4.11)以三種全濃度 HS 肥料處理為最高值，且與其它處理有顯著性差異($P < 0.05$)；U500 肥料 S1:W2 處理葉片數顯著低於所有處理。四種肥料處理中的個別土水比例 1:1 及 2:1 處理之間葉片數皆無顯著性差異，而 U500 肥料三種土水比例中 S1:W2 處理顯著低於 S1:W1 與 S2:W1 處理，且 U1000 及半 HS 肥料處理亦有相同結果，但全 HS 肥料三種土水比例處理間無顯著性差異。霍格蘭培養液肥料處理方面以全濃度 HS 三種土水比例之葉片數皆顯著高於半濃度 HS 三種土水比例處理，而單質肥料尿素處理間在相同土水比例下 U1000 所有土水處理之葉片數分別高於 U500 三種土水比例介質，且達統計學意義。

在圖 4.12 葉面積項目中紅萵苣生長在全 HS 肥料三種土水介質處理顯著高於其它所有處理($P < 0.05$)，其中 S1:W2 表現最佳，S1:W1 為次等，S2:W1 表現最差，三者之間皆有顯著性差異，紅萵苣葉面積數值最低者為 U500 肥料 S1:W2 處理。土水比例方面 U500、U1000 及半 HS 肥料的 S1:W2 處理相較低於同肥料的 S1:W1、S2:W1 處理且有顯著性差異，與全 HS 肥料處理結果反之。另外，霍格蘭培養液

肥料中的葉面積結果與葉片數有相同趨勢，全 HS 個別土水比例處理皆顯著高於半濃度 HS 肥料，而單質肥料尿處理間 U500 三種土水比例分別低於 U1000 所土水比例，且達統計學意義。

本研究發現紅萵苣總鮮重與葉片數、葉面積結果相同，以全 HS 肥料三種土水比例處理表現最佳(圖 4.13)，並與其它所有處理有顯著性差異($P < 0.05$)，而 U500 肥料 S1:W2 介質處理栽培的紅萵苣生長情況偏差(圖 4.1A2、圖 4.2A2)，總鮮重數值皆低於其它所有處理(圖 4.13)，且達統計學意義。在土水比例方面發現半 HS 肥料的 1:1 及 2:1 處理之間無顯著性差異，但 S1:W2 處理顯著低於 S1:W1 及 S2:W1 處理，且 U500 與 U1000 處理亦有相同結果。

栽培在不同肥料介質之紅萵苣生長 28 天後，觀察到全 HS 肥料 S1:W2 介質處理的紅萵苣乾重數值為最高(0.81 g)，而在相同土水比例的 U500 肥料處理之紅萵苣乾重數值為最低(0.24 g)，前後兩者相差 3.37 倍(圖 4.14)。土水比例處理中 U500、U1000 及半 HS 肥料的 1:2 介質之乾重數值個別顯著低於 1:1 和 2:1 處理 ($P < 0.05$)，但全 HS 肥料 S1:W2 土水介質之紅萵苣總乾重值高於同肥料處理的 S1:W1 及 S2:W1 土水比例，與前三者處理反之。種植在 U1000 肥料 S2:W1 土水比例的紅萵苣之總乾種數值顯著高於其它尿素處理，甚至與表現最佳的全 HS 三種土水處理之間相比無顯著差異。



A1



B1



A2



B2



A3



B3

圖 4.1 紅萵苣栽培在 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1

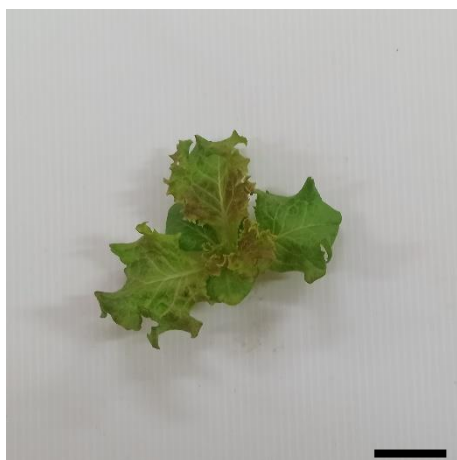
(1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質處理第 28 天生長狀況



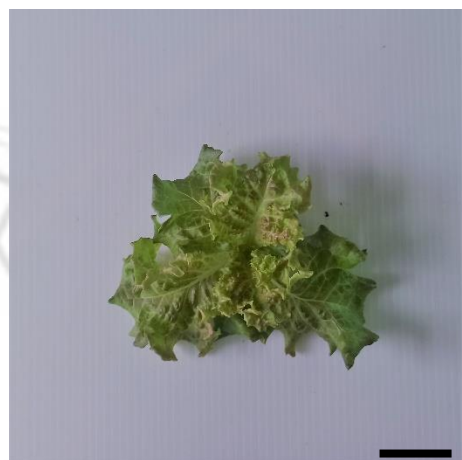
A1



B1



A2



B2



A3



B3

圖 4.2 紅萵苣栽培在 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1

(1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質處理第 28 天獨立單株圖

*圖中黑線為 5 cm 比例尺



C1



D1



C2



D2



C3



D3

圖 4.3 紅萵苣栽培在全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質處理第 28 天生長狀況 (HS = Hoagland's solution)

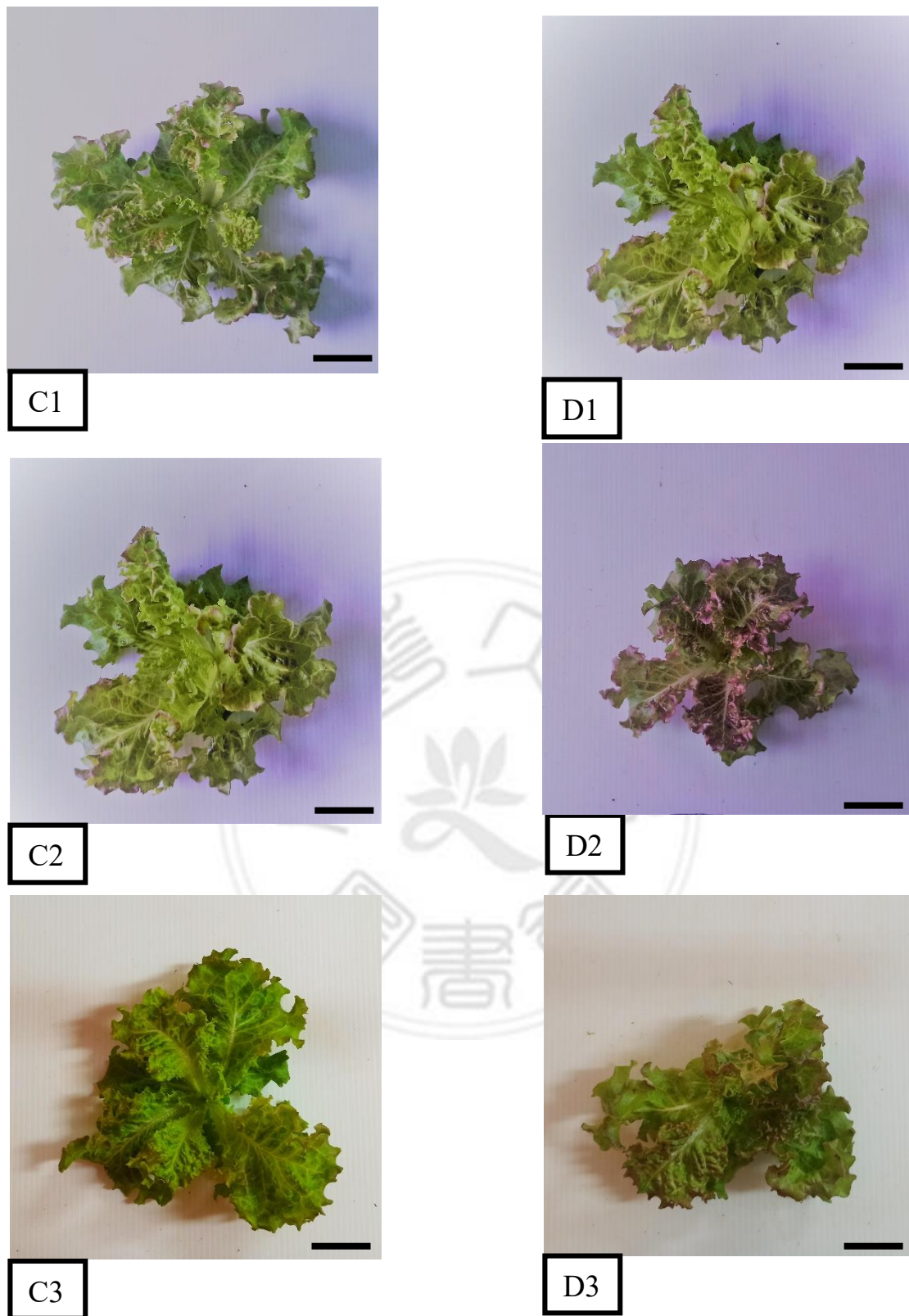


圖 4.4 紅萵苣栽培在全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質處理第 28 天獨立單株圖 (HS = Hoagland's solution) *圖中黑線為 5 cm 比例尺

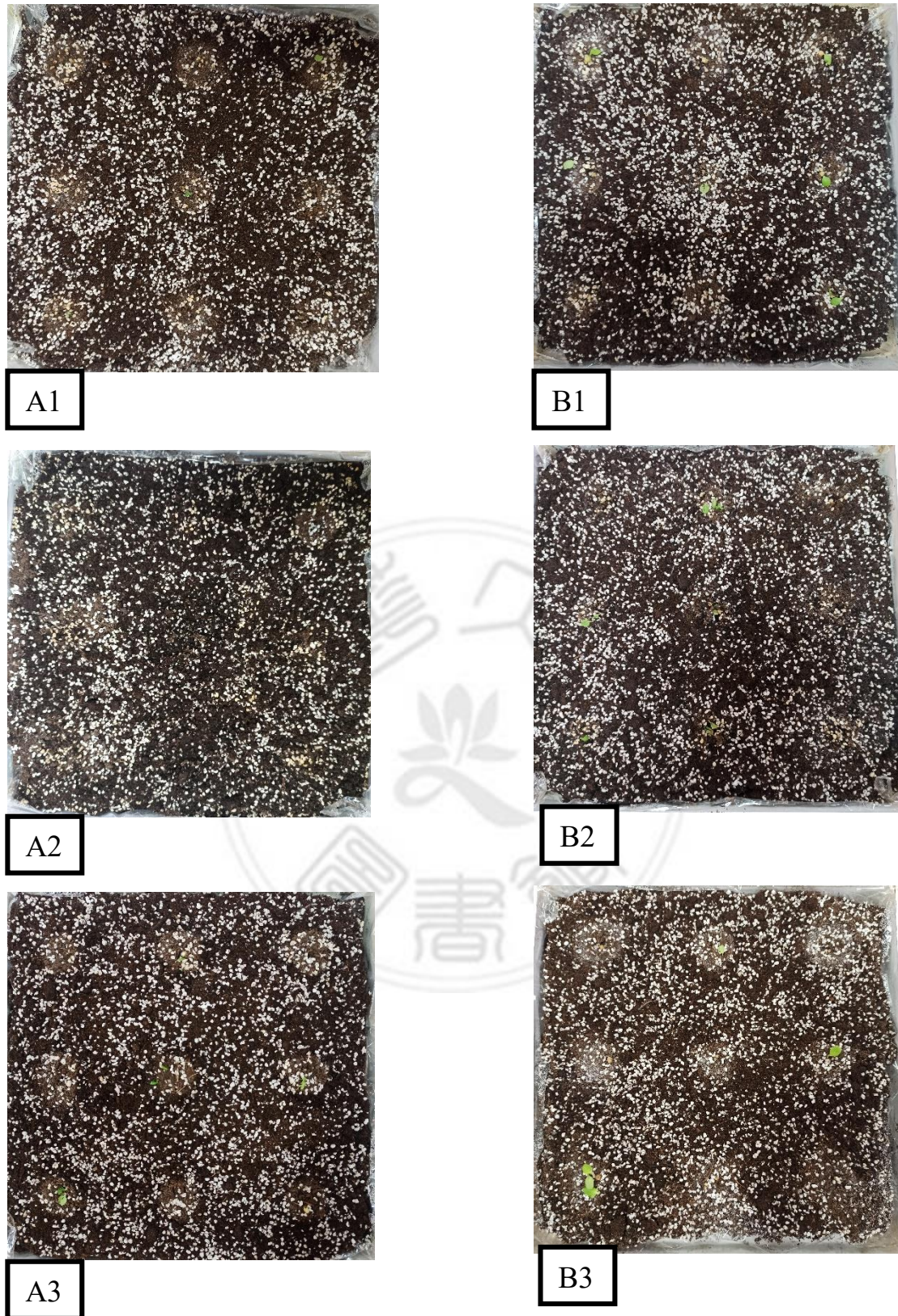
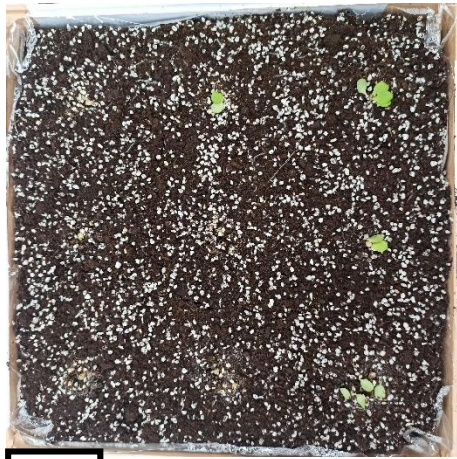
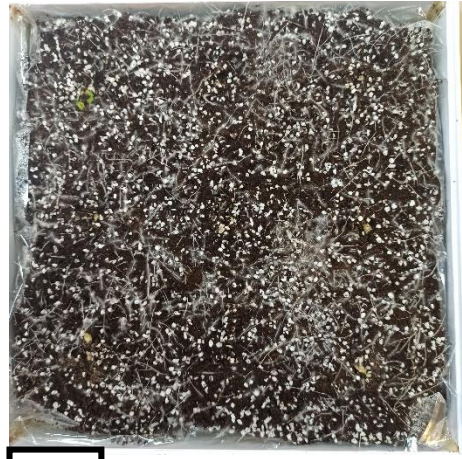


圖 4.5 第 28 天 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、
S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之表面圖



C1



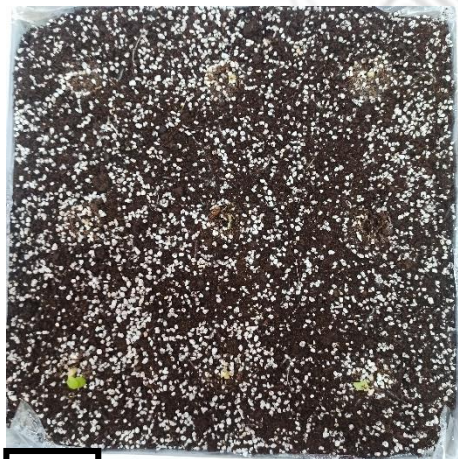
D1



C2



D2



C3



D3

圖 4.6 第 28 天全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例

S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質之表面圖(HS = Hoagland's solution)



A1



B1



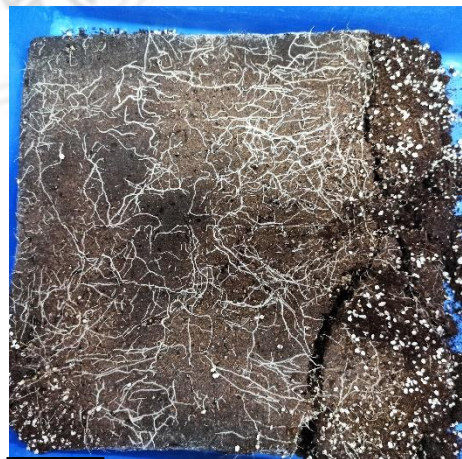
A2



B2

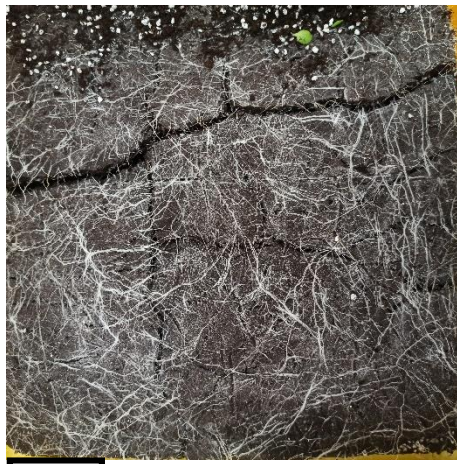


A3

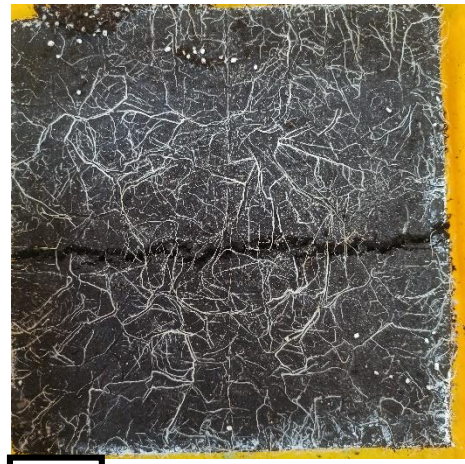


B3

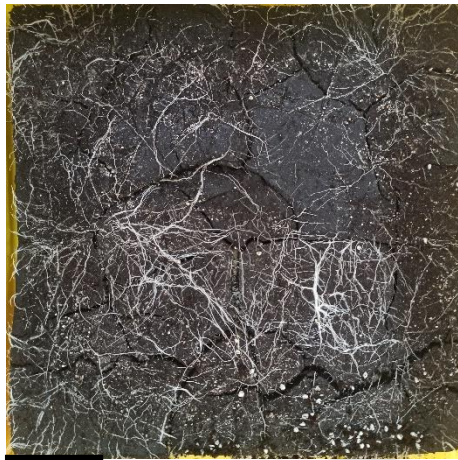
圖 4.7 第 28 天 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之底部圖



C1



D1



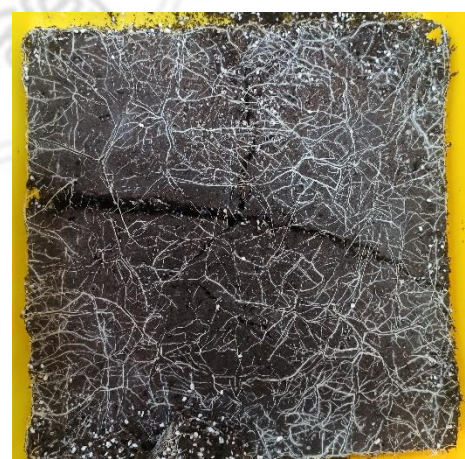
C2



D2



C3



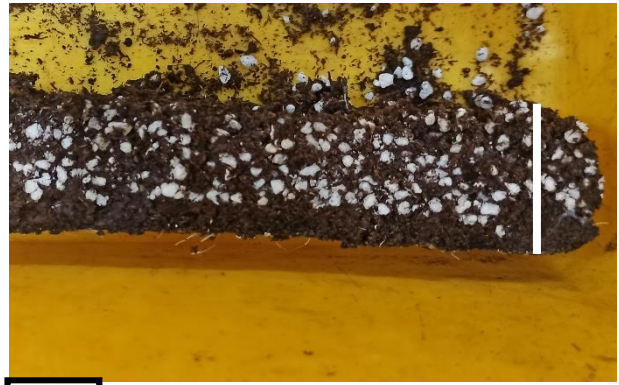
D3

圖 4.8 第 28 天全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例

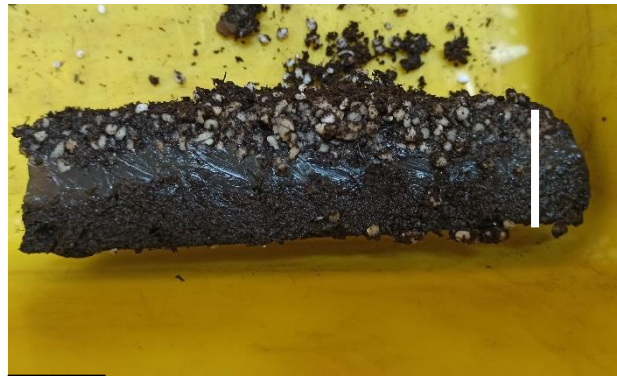
S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之底部圖(HS = Hoagland's solution)



A1



B1



A2



B2



A3



B3

圖 4.9 第 28 天 U500 (A)和 U1000 (B)及三種土水比例 S1:W1 (1)、
S1:W2 (2)、S2:W1 (3)洋菜混合介質之剖面圖

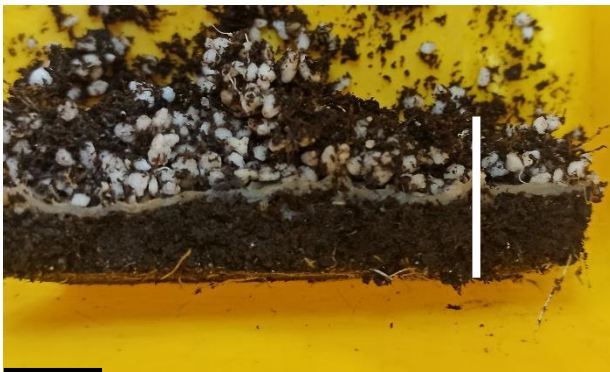
*圖中白線為 5 cm 比例尺



C1



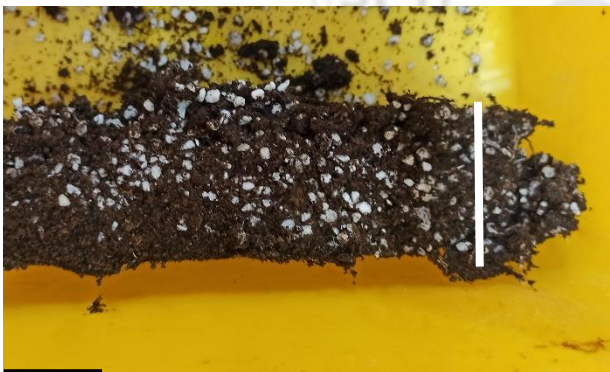
D1



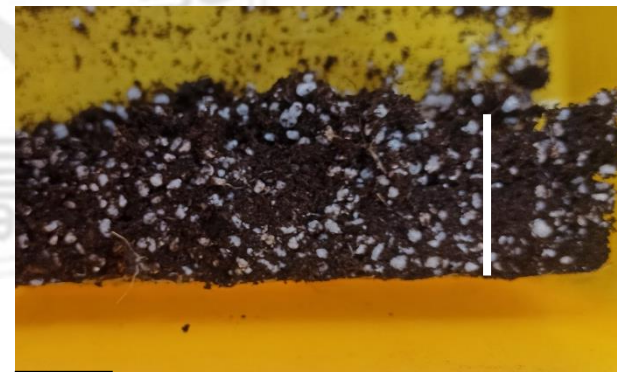
C2



D2



C3



D3

圖 4.10 第 28 天全濃度 HS (C)和半濃度 HS (D)及三種土水比例

S1:W1 (1)、S1:W2 (2)、S2:W1 (3) 洋菜混合介質之剖面圖(HS = Hoagland's solution)

*圖中白線為 5 cm 比例尺

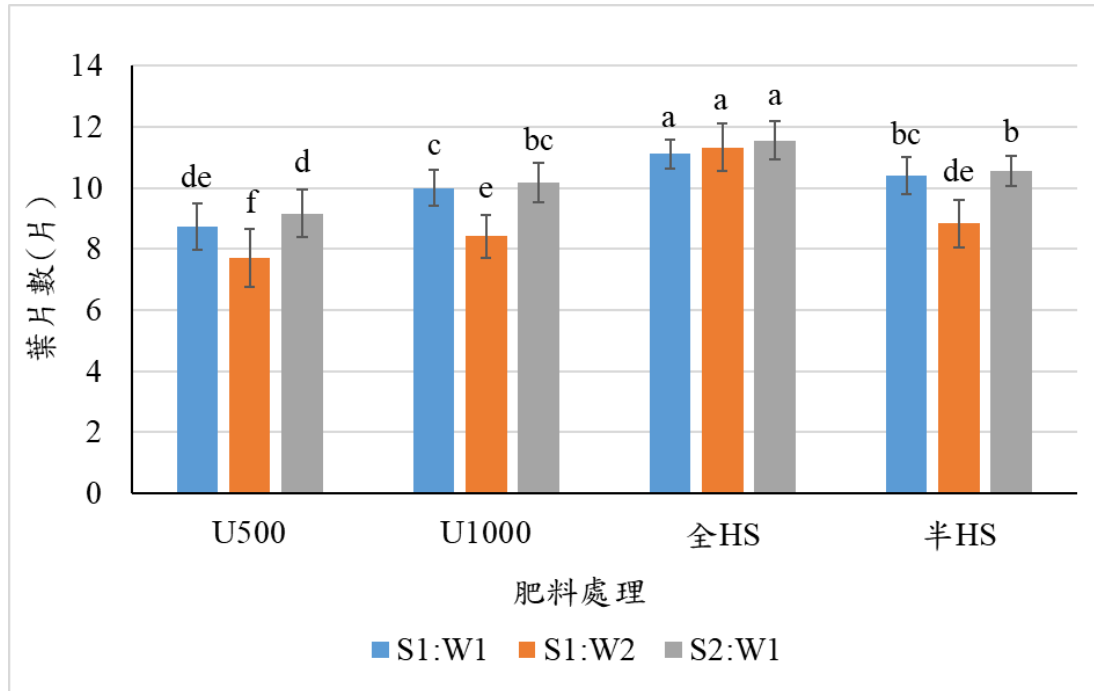


圖 4.11 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣葉片數之影響

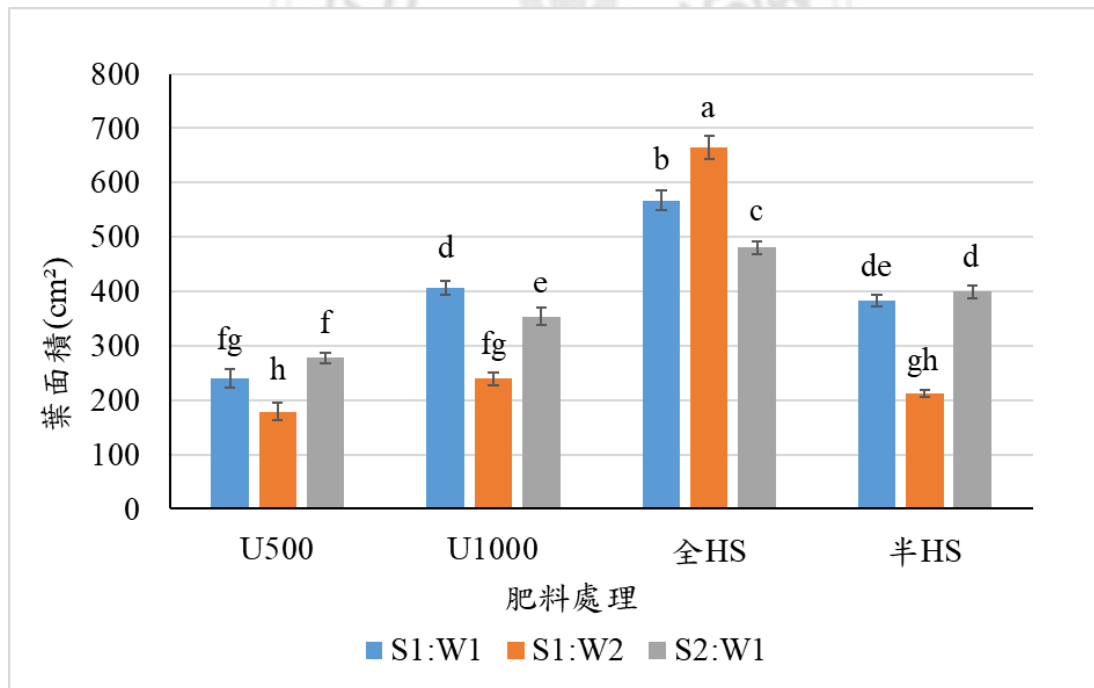


圖 4.12 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣葉面積之影響

*圖片內的不同字母以鄧肯新多重差距檢定(Duncan's multiple range test)P 值 < 0.05 表示顯著性差異。

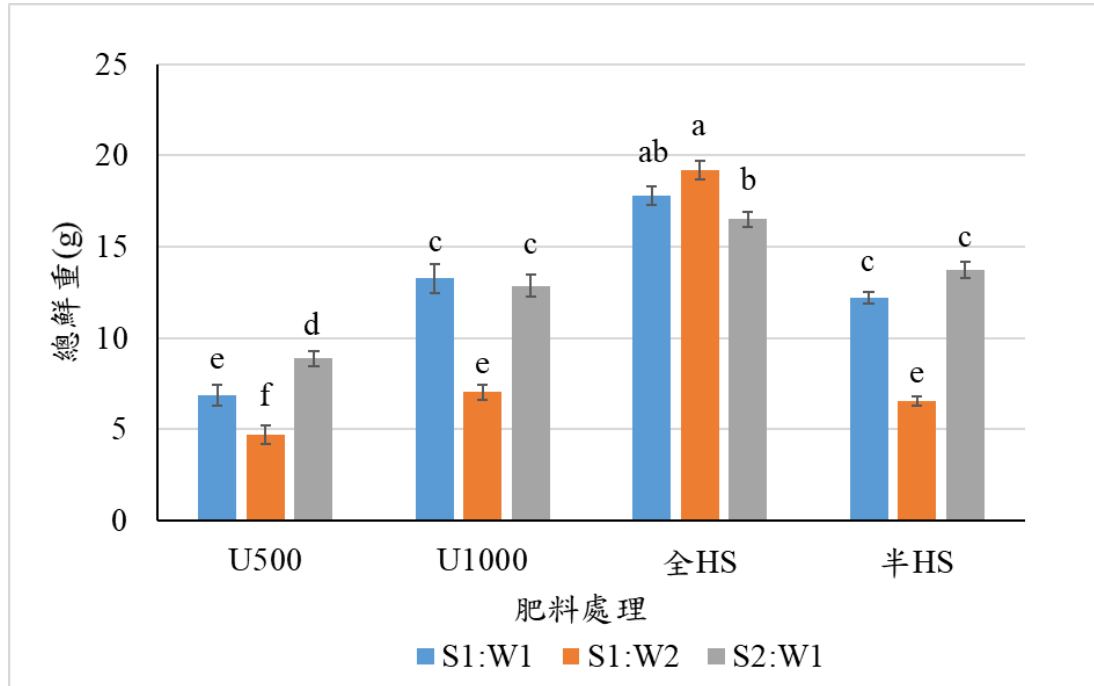


圖 4.13 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣總鮮重之影響

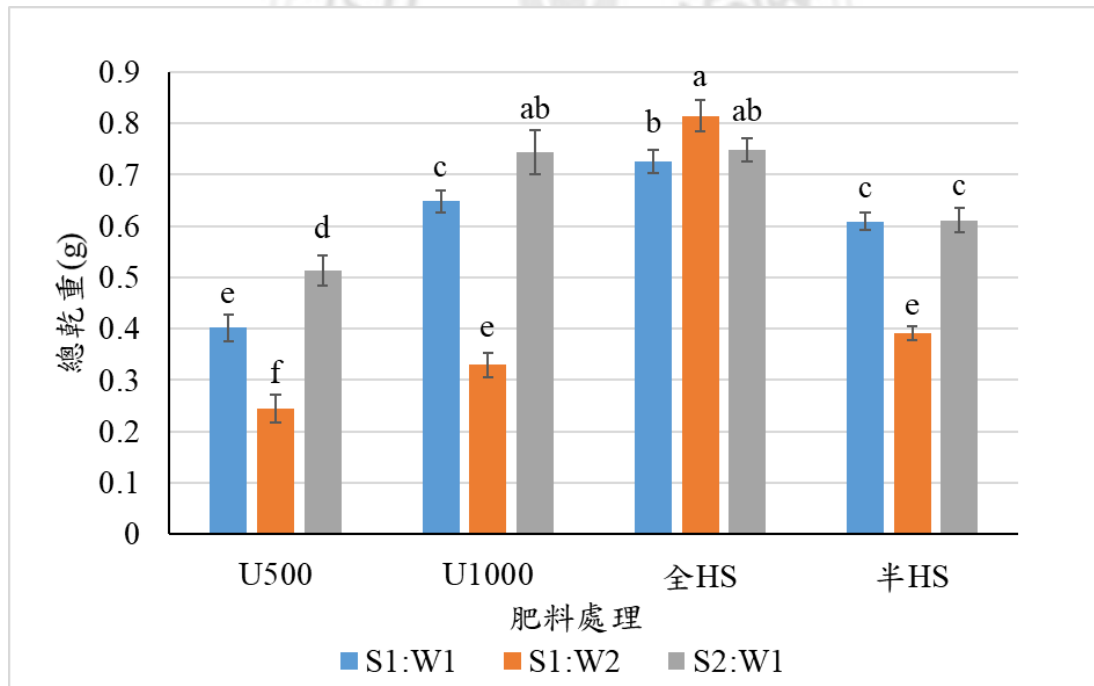


圖 4.14 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣總乾重之影響

*圖片內的不同字母以鄧肯新多重差距檢定(Duncan's multiple range test)P 值 < 0.05 表示顯著性差異。

4.2 紅萵苣葉綠素及類胡蘿素含量

紅萵苣之葉綠素 *a* 最高含量為 U500 肥料 S1:W1 介質處理，並與其它處理有顯著性差異($P<0.05$) (表 4.1)；半 HS 肥料 S1:W2 介質處理之葉綠素 *a* 顯著低於其它處理。土水比例方面全 HS 肥料三種處理之間 S1:W2 介質顯著低於 S1:W1 及 S2:W1 處理，且半 HS 肥料處理亦有相同結果。紅萵苣葉綠素 *b* 含量以 U500 肥料 S1:W1 及 S1:W2 介質處理表現最佳，且顯著高於其它處理但兩者之間無顯著性差異(表 4.1)；半 HS 肥料 S1:W2 介質處理葉綠素 *b* 含量最低，且顯著低於其它處理。所有肥料處理中僅全 HS 三種土水比例之間皆無顯著性差異，而觀察到單質肥料尿素之間在相同土水比例時 U500 的 1:1 及 1:2 顯著高於 U1000 同土水處理，但 2:1 之結果相反。霍格蘭培養液肥料處理間葉綠素 *b* 含量以全 HS 的 1:2 及 2:1 土水比例處理顯著高於半 HS，而兩者 HS 的 1:1 處理之間無顯著性差異。

在總葉綠素含量項目中(表 4.1)紅萵苣栽培在 U500 肥料 S1:W1 介質處理為最高值($22.05 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)，其值高於其它處理有達統計學意義($P<0.05$)，而半 HS 肥料 S1:W2 介質處理為最低值($10.81 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)與其它處理有顯著性差異($P<0.05$)，前後兩者相差 2.04 倍。尿素處理方面 U500 肥料 S1:W1 及 S1:W2 介質處理之總葉綠素含量皆顯著高於 U1000 肥料三種土水比例處理，但反之 U500 肥料 S2:W1 介質處皆顯

著低於 U1000 肥料三種土水比例處理，而 HS 處理方面全 HS 肥料三種土水比例皆高於半 HS 肥料相同的土水處理，並且有達統計學意義。整體而言除了土水比例 2:1($14.66 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)之外只要紅萵苣栽培在尿素處理其總葉綠素含量皆高於所有霍格蘭培養液肥料處理的任何土水比例介質。

栽培在不同介質處理的紅萵苣對類胡蘿蔔素含量影響(表 4.1)，以 U500 肥料 S2:W1 介質處理表現最佳($3.94 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)與其它處理有顯著性差異($P<0.05$)；半 HS 肥料 S2:W1 土水介質顯著低於其它處理($1.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) ($P<0.05$)，前後兩者相差 3.51 倍。在霍格蘭肥料方面全 HS 與半 HS 處理的紅萵苣以土水比例 1:1 介質表現最佳，1:2 為次等，而 2:1 表現最差，代表使用 HS 肥料以土水比例 1:1 栽培紅萵苣亦可促進類胡蘿蔔素含量的形成，而在尿素肥料處理發現紅萵苣栽培在 2:1 土水比例類胡蘿蔔素含量最佳皆比 1:1 及 2:1 高，與霍格蘭培養液肥料結果相反。

表 4.1 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣總葉綠素及類胡蘿蔔素含量影響

肥料處理	水土比例	葉綠素 <i>a</i> (mg.g ⁻¹)	葉綠素 <i>b</i> (mg.g ⁻¹)	葉綠素 <i>a+b</i> (mg.g ⁻¹)	類胡蘿蔔素 (mg.g ⁻¹)
U500	S1:W1	15.81±0.07 a	6.86±0.12 a	22.05±0.06 a	3.56±0.06 b
	S1:W2	13.79±0.03 b	6.62±0.06 a	20.41±0.07 b	3.12±0.01 c
	S2:W1	9.95±0.04 g	4.71±0.11 f	14.66±0.09 j	3.94±0.07 a
U1000	S1:W1	12.01±0.12 d	5.44±0.14 d	17.44±0.07 e	2.47±0.04 fg
	S1:W2	13.11±0.11 c	5.75±0.07 c	18.86±0.16 d	2.29±0.04 gh
	S2:W1	13.05±0.18 c	6.03±0.27 b	19.08±0.09 c	2.67±0.14 ef
全 HS	S1:W1	11.09±0.08 e	4.82±0.17 ef	15.92±0.09 g	3.03±0.09 cd
	S1:W2	10.67±0.36 f	4.86±0.25 ef	15.53±0.16 h	2.52±0.39 fg
	S2:W1	11.12±0.11 e	5.01±0.15 e	16.13±0.08 f	2.19±0.08 h
半 HS	S1:W1	10.59±0.11 f	4.65±0.06 f	15.24±0.16 i	3.54±0.47 b
	S1:W2	7.21±0.08 h	3.61±0.09 g	10.81±0.03 l	2.87±0.07 de
	S2:W1	9.84±0.04 g	4.62±0.09 f	14.47±0.1 k	1.12±0.02 i

*表中內列的不同字母以鄧肯新多重差距檢定(Duncan's multiple range test) P 值 <0.05 表示顯著性差異。

4.3 紅萵苣抗氧化能力、總多酚含量

在表 4.2 DPPH 抑制率項目中紅萵苣栽培在半 HS 肥料 S1:W2 介質處理數值最高與其它處理有顯著性差異($P<0.05$)，而 U500 肥料 S1:W1 介質處理抑制率為最低。U500 肥料三種土水介質之間 S1:W2 處理顯著高於 S1:W1 及 S2:W1 處理，且半 HS 肥料亦有相同結果，而 U1000 肥料處理三種土水比例處理之間皆無顯著性差。

紅萵苣總多酚含量以半 HS 肥料 S1:W2 介質處理數值為最高 ($187.61 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 與其它處理有顯著性差異($P<0.05$)，而 U1000 肥料 S1:W2 介質處理含量最低($53.01 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) (表 4.2)，且栽培在半 HS 肥料之三種土水比例的紅萵苣葉片色澤明顯偏紅尤其是 S1:W2 介質處理更為明顯(圖 4.3D2、圖 4.4D2)。紅萵苣栽培在 U500 所有土水比例處理之總多酚含量顯著高於 U1000 肥料所有土水介質；半 HS 肥料全部土水處理之總多酚含量大於全 HS 肥料處理，且兩者有達統計學意義。

表 4.2 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣抗氧化能力、總多酚含量之影響

肥料 處理	水土 比例	DPPH (%)	總多酚 (mg.g ⁻¹)
U500	S1:W1	26.67±1.41 f	71.39±0.46 f
	S1:W2	48.12±1.75 b	82.15±0.79 e
	S2:W1	42.49±1.67 c	80.39±1.26 e
U1000	S1:W1	41.01±1.29 c	56.02±1.89 h
	S1:W2	40.12±1.62 c	53.01±0.79 i
	S2:W1	42.49±1.67 c	64.39±0.72 g
全 HS	S1:W1	29.26±2.23 ef	63.88±0.76 g
	S1:W2	31.59±1.89 de	87.94±0.91 d
	S2:W1	27.39±1.93 f	69.51±0.79 f
半 HS	S1:W1	45.44±1.16 b	148.15±0.46 b
	S1:W2	51.51±1.12 a	187.61±2.65 a
	S2:W1	32.53±1.55 d	116.61±1.64 c

*表中內列的不同字母以鄧肯新多重差距檢定(Duncan's multiple range test) P 值 < 0.05 表示顯著性差異。

4.4 紅萵苣硝酸鹽、鉀離子、鈣離子、鈉離子含量

紅萵苣栽培在不同肥料介質處理對硝酸鹽含量之影響(圖 4.15)，以 U500 肥料 S1:W2 及全 HS 肥料 S1:W1 介質比例顯著高於其它所有處理($P<0.05$)，而半 HS 肥料 S1:W1 介質處理為最低值。研究結果顯示 U500 肥料 S1:W2 介質處理的硝酸鹽含量皆顯著高於全部尿素土水比例，在全 HS 肥料處理中紅萵苣之硝酸鹽含量以 S1:W1 土水比例表現最佳，S1:W2 表現為次等，S2:W1 表現最差，三種處理之間皆有顯著性差異，此外發現半 HS 肥料所有土水比例皆顯著低於其它所有肥料處理。

紅萵苣鉀離子含量以栽培在半 HS 肥料 S1:W1 及 S1:W2 介質處理表現最佳，而 U1000 肥料 S1:W1 與 S1:W2 土水比例最低 (圖 4.16)，另外本研究結果觀察到全 HS 及半 HS 處理的紅萵苣鉀離子數值皆顯著高於全部尿素處理($P<0.05$)。紅萵苣栽培在相同土水比例條件下 S1:W1 及 S1:W2 介質搭配半 HS 肥料之鉀離子數值皆高於其它肥料處理，而 S2:W1 處理搭配全 HS、半 HS 肥料之鉀離子含量表現最佳。

在圖 4.17 鈣離子項目中栽培在 U500 肥料 S1:W1 和 S1:W2 介質處理的紅萵苣數值顯著高於其它處理 ($P<0.05$)，而全 HS 及半 HS 肥料全部土水比例之鈣離子含量為最低，且與全部尿素處理有顯著性差

異。本研究中發現全 HS 肥料三種土水介質中以 S1:W1 處理的鈣離子數值為最高，S1:W2 為次等，S2:W1 為最差，三者之間無統計學意義，且半 HS 肥料亦有相同的趨勢，另外觀察到尿素所有土水比例之鈣離子含量皆顯著高於全 HS、半 HS 肥料處理，與鉀離子項目結果相反。

栽培在不同肥料介質之紅萵苣生長 28 天後，觀察到 U1000 肥料 S1:W2 及 S2:W1 介質處理的紅萵苣鈉離子含量表現最佳(圖 4.18)。研究結果顯示 U1000 肥料 S1:W1 處理、U500 肥料三種土水比例及半 HS 肥料 S1:W2 土水介質表現次等，五個處理之間無顯著差異，而栽培在全 HS 肥料三種土水比例、半 HS 肥料 S1:W1 及 S2:W1 介質處理的紅萵苣表現最差，此外發現栽培在所有尿素肥料處理的紅萵苣鈉離子含量皆高於全 HS 及半 HS 肥料處理，與鈣離子項目有著相同的趨勢，則與鉀離子項目反之。

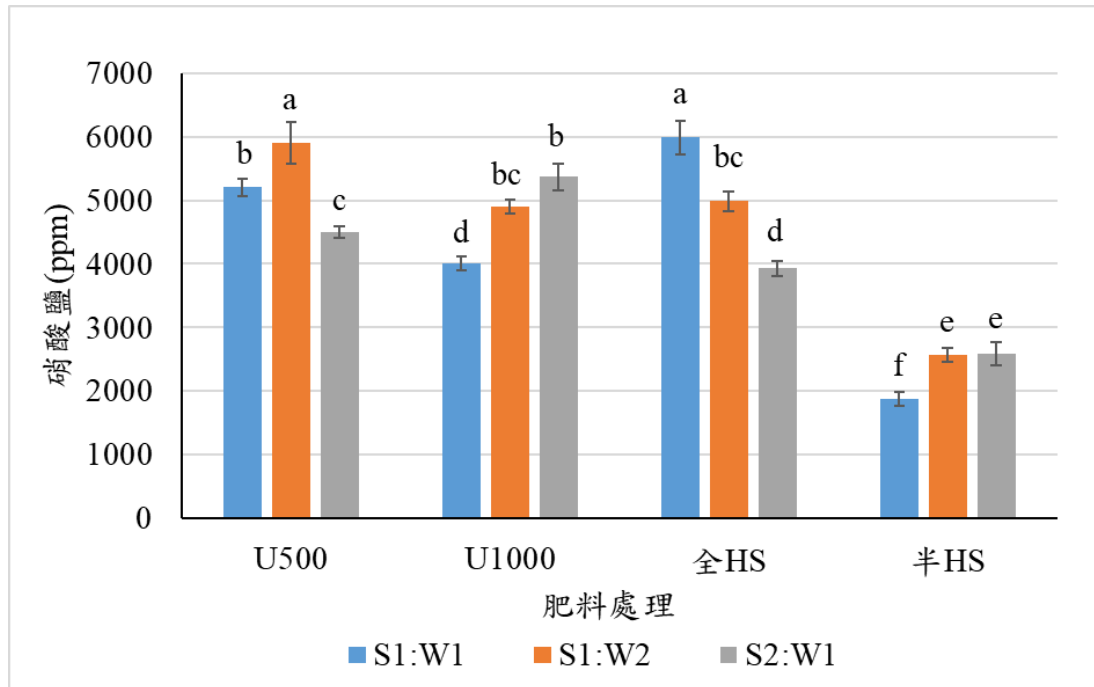


圖 4.15 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣硝酸鹽含量之影響

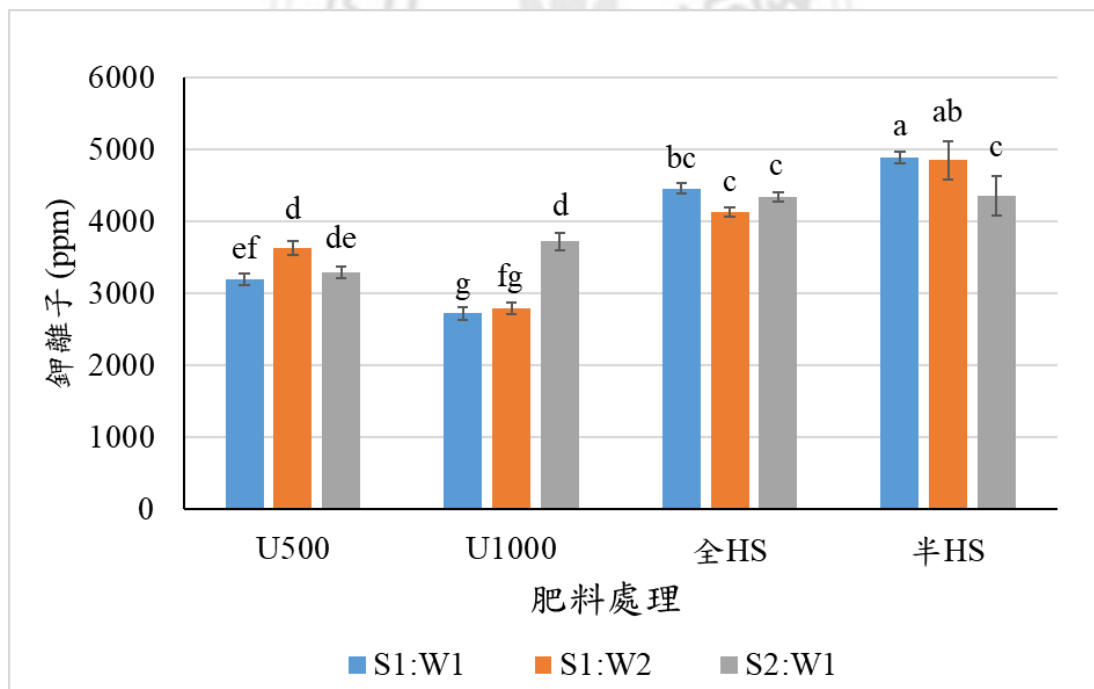


圖 4.16 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣鉀離子含量之影響

*圖片內的不同字母以鄧肯新多重差距檢定(Duncan's multiple range test)P 值 < 0.05 表示顯著性差異。

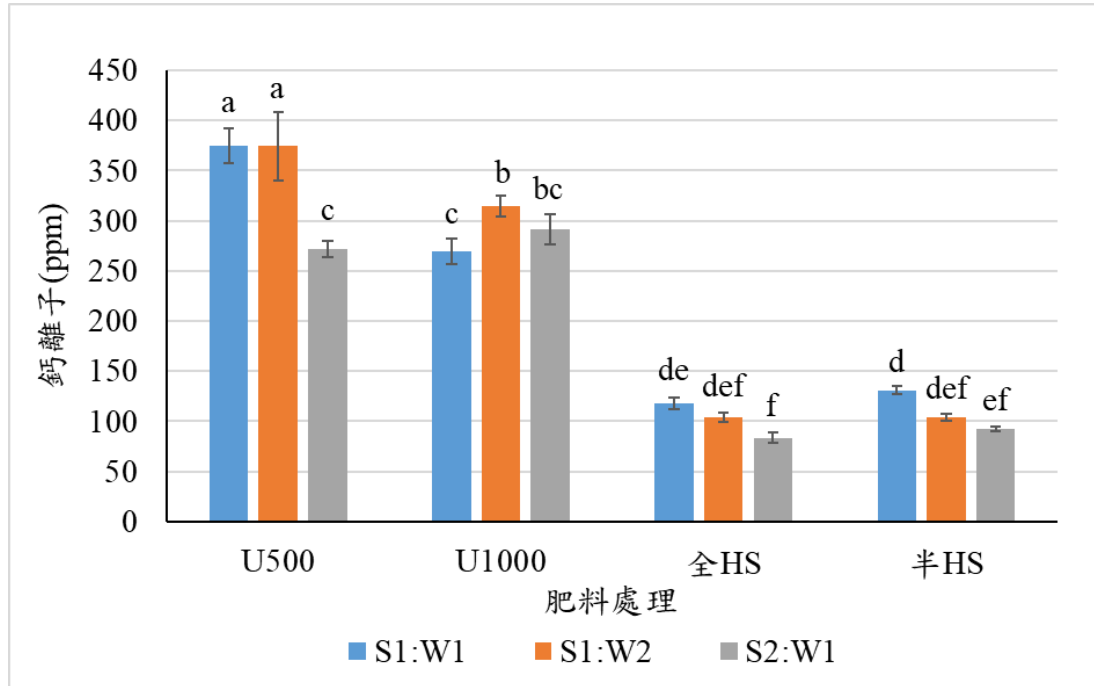


圖 4.17 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣鈣離子含量之影響

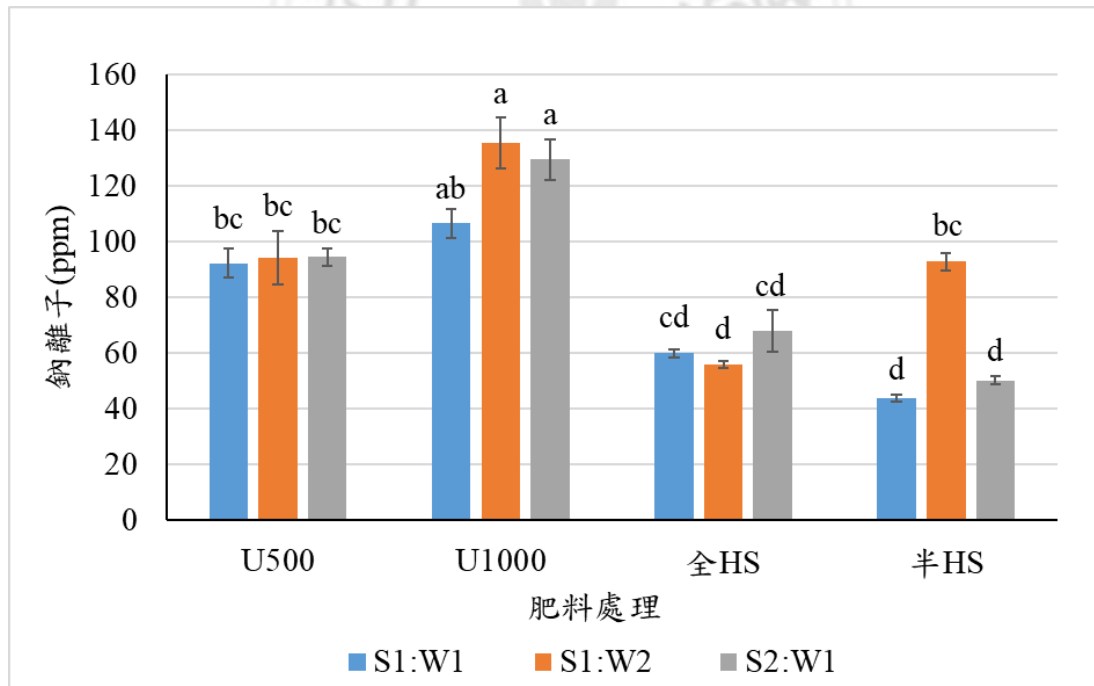


圖 4.18 不同肥料濃度及水土比例對紅萵苣鈉離子含量之影響

*圖片內的不同字母以鄧肯新多重差距檢定(Duncan's multiple range test)P 值 < 0.05 表示顯著性差異。

第五章

討論

本研究以紅萵苣作為試驗對象，使用不同濃度肥料及不同土水比例之介質作為實驗處理，將肥料、水分及土壤三者混合透過洋菜粉凝固成洋菜混合介質進行栽培，並且栽培過程無使用自動化設備，成功達到紅萵苣 28 天生長中無需澆水及施肥之目標。

實驗結果顯示紅萵苣生長在 U500 肥料 S1:W2(圖 4.1A2、圖 4.2A2) 介質處理中整體植株相較於其它處理明顯偏小(圖 4.1、圖 4.2、圖 4.3、圖 4.4)，在圖 4.7、圖 4.8 洋菜混合介質之底部圖中觀察到 U500 及 U1000 肥料 S1:W2 介質處理幾乎無根系生長至洋菜混合介質底部(圖 4.7A2; B2)，代表尿素處理搭配 S1:W2 土水介質會抑制紅萵苣根系發育，然而以全 HS 及半 HS 肥料搭配 S1:W2 處理紅萵苣並無出現根系發育不良現象(圖 4.8C2; D2)，表示紅萵苣即使在水分含量高的 S1:W2 處理搭配 HS 肥料可使根系正常生長。另外在葉片數(圖 4.11)、葉面積(圖 4.12)、總鮮重(圖 4.13)、總乾重(圖 4.14)項目中發現 U500 及 U1000 肥料的 S1:W2 介質顯著低於同肥料處理的 S1:W1 與 S2:W1 介質處理，證明植物根部發育不良會影響到植物的生育性狀，此外研究結果發現儘管半 HS 肥料搭配 1:2 土水比例之根系生長至洋菜介質底

部，然而葉片生長依舊不佳，其因可能是半 HS 肥料處理與 1:2 土水比例處理搭配不理想，導致葉片發育不良。

在肥料處理方面，結果顯示紅萵苣生長在全 HS 肥料三種土水比例處理中葉片數(圖 4.11)、葉面積(圖 4.12)及總鮮重(圖 4.13)數值皆高於其它肥料處理且有顯著性差異，而半 HS 肥料三種土水比例處理之葉片數、葉面積、總鮮重及總乾重(圖 4.14)皆顯著低於全 HS 肥料三種土水比例處理，有研究指出在不同濃度培養液處理下，萵苣在全濃度的 HS 培養液處理生長得更好 (Karimaei et al., 2004)，與 Safaei et al. (2015)研究中也有相同結果。

而生長在 U500 及 U1000 尿素肥料處理的紅萵苣葉片數(圖 4.11)、葉面積(圖 4.12)及總鮮重(圖 4.13)之數值顯著低於全 HS 肥料處理，其因尿素提供單一氮元素之養分，相較於 HS 提供的大量元素及微量元素等 17 種養分，明顯養分種類缺乏，導致萵苣生長方面較差。

另外紅萵苣在尿素肥料中發現 U1000 比 U500 處理之生長方面表現更佳，整體植株大小相差明顯(圖 4.1、圖 4.2)，其原因是 U500 尿素處理濃度過高導致紅萵苣生長方面受到抑制，雖然有研究表明萵苣在栽培過程中需要大量的氮肥(Carling et al., 1987; Hoque et al., 2010)，但也有研究指添加少量的氮肥方能達到最佳產量(Soundy & Smith, 1992)，而過多的氮肥會導致產量有負面的影響(Santamaria, 2006)。

土水比例處理結果顯示，紅萵苣栽培在 U500、U1000 及半 HS 肥料的 S1:W2 介質下，葉片數(圖 4.11)、葉面積(圖 4.12)、總鮮重(圖 4.13)、總乾重(圖 4.14)數值皆低於 S1:W1 及 S2:W1 處理且有顯著性差異，代表水分總量高於土壤總量時將明顯抑制紅萵苣性狀之生長(圖 4.1A2；B2、圖 4.2A2；B2)，但在全 HS 肥料 S1:W2 介質處理的紅萵苣生長量反而較高(圖 4.3C2、圖 4.4C2)，與其它肥料處理相反。推論其原因為本實驗中所使用全濃度 HS 培養液調配大量元素及微量元素之配方皆適合三種土水比例處理之紅萵苣生長，尤其在 S1:W2 處理下更為明顯。而在其它肥料處理中，例如半 HS 肥料處理所調配的大量元素及微量元素在 S1:W2 處理下明顯不足以紅萵苣生長。

不同肥料與土水比例處理組合中，全 HS 肥料搭配 S1:W2 介質的紅萵苣可得最佳之葉片數、葉面積、總鮮重數值(圖 4.11、圖 4.12、圖 4.13)，但是在總乾重項目中 U1000 肥料 S2:W1 處理與全 HS 肥料 S1:W2 介質無顯著性差異(圖 4.14)。推估是土壤本身就含有些許微量元素，因此土壤比例較高的 S2:W1 處理提供較多的微量元素，彌補尿素處理養分總類的不足，促進生物量的積累提高乾重之含量。

植物中的葉綠素主要由葉綠素 *a* 及葉綠素 *b* 所組成，兩者吸收光譜不相同，葉綠素 *a* 吸收波長範圍在 420-630 nm，而葉綠素 *b* 吸收波長範圍在 460-645 nm (Cinque et al., 2000)，且植物中葉綠素含量及組

成皆受到氮源的影響(Marschner, 2012; Stewart et al., 2005)。

在表 4.1 總葉綠素項目中 U500 肥料 S1:W1 介質處理數值為最高與其它處理有顯著性差異，其因尿素的含氮量為 46%，高濃度的氮使整體尿素處理的總葉綠素含量高於 HS 肥料處理。在 Jifon et al. (2012) 研究中指出充足的氮源能促進植物葉綠素合成，提高葉綠素總量。然而 U500 肥料 S1:W1 處理葉綠素含量最高，但研究結果發現此處理植物性狀並非最佳(圖 4.11、圖 4.12、圖 4.13、圖 4.14)。其原因可能為尿素營養種類缺乏的影響，導致植物發育受限，而胡蘿蔔素項目中以 U500 肥料 S2:W1 介質處理數值為最高(表 4.1)。Mozafar (1993)指出植物中胡蘿蔔素和維生素 B1 含量與氮肥濃度有正相關之影響，在 Barickman et al. (2009)研究中也有相同的結果。

植物受到乾旱、過濕、養分缺乏、光照稀少、高溫、重金屬等逆境影響會刺激植物防禦機制產生二次代謝產物 (Herms & Mattson, 1992)，進而累積一系列的抗氧化劑來抵抗逆境，而這類抗氧化劑包含有抗壞血酸、總多酚、類胡蘿蔔素等(Mckersie and Leshem, 1994)。DPPH 抑制率與總多酚項目中，栽培在半 HS 肥料 S1:W2 介質的紅萵苣數值為最高與其它處理有顯著性差異(表 4.2)。植株色澤與其它處理相比明顯偏紅(圖 4.3D2、圖 4.4D2)，且發現半 HS 肥料三種土水比例的 DPPH 抑制率與總多酚數值都有較高的趨勢。代表半 HS 肥料正

受到逆境影響，於保護機制下產生大量二次代謝產物，進而提高總多酚含量。

本研究結果發現栽培在半 HS 肥料處理的紅萵苣硝酸鹽數值皆較低(圖 4.15)，且與其它處理有顯著性差異。原因為半 HS 肥料提供的氮肥不足導致硝酸鹽含量降低。在 Petropoulos et al. (2008) 與 Chen et al. (2004)實驗中指出植體內硝酸鹽含量與土壤氮源有密切關係，當氮源不足時植物所吸收氮亦會減少，導致植物體內硝酸鹽含量下降，而養分不足的逆境造成紅萵苣啟動防禦機制，產出大量的二次代謝產物進而影響抗氧化能力及總多酚含量，氮缺乏會誘導甘藍及番茄中抗壞血酸、類黃酮、總多酚的累積 (Bongue-Bartelsman & Phillips, 1995 ; Kandlbinder et al., 2004 ; Stewart et al., 2001) ，且 Galieni et al. (2015)研究中指出萵苣體內的硝酸鹽含量過低，會提高總多酚含量，與本研究結果一致。

栽培在尿素肥料處理的紅萵苣之鈣離子以及鈉離子含量皆高於 HS 肥料處理(圖 4.17、圖 4.18)。其因為兩者肥料中的 HS 培養液含有鎂元素之養分，而鎂離子與鈣鈉離子在植物吸收過程中有拮抗作用 (Barta & Tibbitts, 2000)。因尿素處理的土壤中鎂濃度相較低於 HS 培養液處理，導致紅萵苣提高鈣離子與鈉離子的吸收，與 Karley & White (2009)研究中結果一致。

第六章

結論

本研究目的利用土耕栽培與水耕栽培兩種技術結合，透過二種肥料處理搭配三種土水比例介質，開發出一種從播種到採收 28 天內皆無需澆水的土耕栽培方式，並探討此栽培方式對紅萵苣生理與生長之影響。結果顯示紅萵苣在尿素處理可得較佳鈣、鈉離子含量，且顯著高於 HS 肥料處理。而栽培在 U500 肥料 S1:W1 介質處理的紅萵苣之葉綠素 *a*、葉綠素 *b* 及總葉綠素含量為所有處理中最高值。另外尿素肥料處理搭配土水比例 1:2 處理會出現紅萵苣根系發育不良之現象。紅萵苣栽培在 HS 肥料處理的鉀離子含量顯著高於尿素處理，在 DPPH 抑制率及總多酚含量項目中以半 HS 肥料 S1:W2 處理的紅萵苣表現最高，且與其它處理有顯著性差異，

整體而言，紅萵苣栽培在全 HS 肥料搭配 S1:W2 介質處理之葉面積、總鮮重及總乾重數值表現最佳，而 U500 肥料 S1:W2 介質之葉片數、葉面積、總鮮重、總乾重數值皆低於全部其它處理。所有土水處理中觀察到 U500、U1000 及半 HS 肥料三種土水例之間皆是 S1:W2 處理之紅萵苣表現最差，但全 HS 肥料則反之。全 HS 肥料三種土水比例之植物性狀皆高於半 HS 肥料所有土水比例，發現 HS 肥料濃度

減半，紅萵苣生長參數也隨之下降；在二種尿素濃度之間相同土水比例的 U1000 肥料處理之葉片數、葉面積、總鮮重、總乾重皆高於 U500 肥料處理，紅萵苣隨著尿素濃度下降，生長參數卻隨之提高。

本次實驗中所有處理從播種到採收期間紅萵苣亦無脫水之情形，代表本研究成功開發出一種播種到採收 28 天內無需澆水之土耕栽培方式，而此栽培方式製作過程容易亦無培養液管理之問題，使民眾可在家輕鬆種植植物，並以全 HS 肥料 S1:W2 洋菜混合介質方式栽培紅萵苣能得最高產量，讓民眾透過觀察植物生長過程以及採收植物之成就感來舒緩壓力，並且獲得心靈上之療癒，可謂創新之栽培方式具有可行性與前瞻遠景。

6.1 研究限制和未來方向

現階段有關於無需澆水土耕栽培的文獻非常稀少或無相關資料，即使有類似栽培方式，皆需搭配自動化設備，故開發初期最為艱辛，需測試許多處理，包含土與珍珠石之比例、洋菜粉添加量、洋菜粉種類、土與水之比例、肥料種類及肥料濃度等，方使植物正常生長。未來實驗建議使用霍格蘭培養液全濃度搭配土水比例 1:2 作為基礎介質配方，探討此栽培方式更多可行性。

由於本次研究位於植物工廠內進行實驗，光源、溫度、光週期及

濕度皆為固定參數，故未來將往不同環境相關參數調整測試，使此栽培方式更適用於不同環境。且現階段以紅萵苣作為試驗對象，未來將會栽培不同種類植物，並依照不同植物養分需求，調整肥料養分及濃度等配方，使此栽培方式之植物種類更為多元。



參考文獻

中文文獻

郭孚耀 (1998)。遮陰及氮肥對芥藍菜硝酸鹽累積之影響。臺中區農業改良場研究彙報，(58)，59-66。

倪禮豐、鍾仁賜 (2003)。有機物對青梗白菜生長及其硝酸態氮濃度的影響。花蓮區農業改良場研究彙報，(21)，57-65。

張庚鵬、張愛華 (1997)。(特 65 號) 蔬菜作物營養障礙診斷圖鑑。農業試驗所。

黃品錡 (2019)。魚菜共生系統、傳統土耕及盆式栽培生產效益研究。朝陽科技大學景觀及都市設計系碩士論文，台中市。

楊秋忠 (2010)。土壤與肥料。農業世界書叢。台中，台灣。

英文文獻

Aitken, R. L., Moody, P. W., & McKinley, P. G. (1990). Lime requirement of acidic Queensland soils. I. Relationships between soil properties and pH buffer capacity. *Soil Research*, 28(5), 695-701.

- Al-Redhaiman, K. N. (2001). Nitrate accumulation and metabolism in lettuce cultivars as influenced by ammonium: Nitrate ratio in recirculating nutrient solution. *Indian Journal of Agricultural Research*, 35(4), 219-225.
- Anilakumar, K. R., Harsha, S. N., & Sharma, R. K. (2017). Lettuce: A Promising Leafy Vegetable with Functional Properties. *Defence Life Science Journal*, 2(2), 178-185.
- Armisen, R., & Gaiatas, F. (2009). Agar. In *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 82-107). Woodhead Publishing.
- Bagyalakshmi, B., Ponmurugan, P., & Balamurugan, A. (2017). Potassium solubilization, plant growth promoting substances by potassium solubilizing bacteria (KSB) from southern Indian Tea plantation soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 12, 116-124.
- Barickman, T. C., Kopsell, D. A., & Sams, C. E. (2009). Impact of nitrogen and sulfur fertilization on the phytochemical concentration in watercress, *Nasturtium officinale* R. Br. *Acta Horticulturae*, 871, 479-481.
- Barta, D. J., & Tibbitts, T. W. (2000). Calcium localization and tipburn development in lettuce leaves during early enlargement. *Journal of*

the American Society for Horticultural Science, 125(3), 294-298.

Battineni, J. K., Koneti, P. K., Bakshi, V., & Boggula, N. (2018).

Triterpenoids: A review. *Int. J. Pharm. Pharm. Sci, 3(2),91-99.*

Bongue-Bartelsman, M., & Phillips, D. A. (1995). Nitrogen stress regulates gene expression of enzymes in the flavonoid biosynthetic pathway of tomato. *Plant Physiology and Biochemistry (Paris), 33(5), 539-546.*

Borggaard, O. K. (1983). Effect of surface area and mineralogy of iron oxides on their surface charge and anion-adsorption properties. *Clays and Clay Minerals, 31(3), 230-232.*

Burrage, S. W. (1997). The nutrient film technique (NFT) for crop production in the Mediterranean region. In *International Symposium Greenhouse Management for Better Yield & Quality in Mild Winter Climates, 491, 301-306.*

Cakmak, I., & Yazici, A. M. (2010). Magnesium: a forgotten element in crop production. *Better Crops, 94(2), 23-25.*

Carling, D. E., Michaelson, G. J., & Ping, C. L. (1987). *The effect of nitrogen fertilization rates on head lettuce yields: A preliminary report.* Agricultural and Forestry Experiment Station, School of Agriculture and Land Resources Management, University of Alaska-

Fairbanks.

Chaudhary, M. I., Adu-Gyamfi, J. J., Saneoka, H., Nguyen, N. T., Suwa, R., Kanai, S., ... & Fujita, K. (2008). The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30(4), 537-544.

Chiu, S.-H. (2009). Studies on Antioxidant Capacities and Phenolic Compounds of Perilla (*Perilla frutescens*) with Different Varieties and Growth Seasons. National Pingtung University of Science and Technology, Department of Plant Industry

Chen, B. M., Wang, Z. H., Li, S. X., Wang, G. X., Song, H. X., & Wang, X. N. (2004). Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables. *Plant Science*, 167(3), 635-643.

Chen, L. Y., Cheng, C. W., Wang, J. S., Lin, C. C., Chang, Y. L., Li, J. L., & Liang, J. Y. (2012). Effects of base-catalysis on determination of total polyphenols with Folin-Ciocalteu reagent MC-Transaction on *Biotechnology*, 4 (1), 10–19. Retrieved from Website.

Choi, H. S., Han, J. Y., & Choi, Y. E. (2020). Identification of triterpenes and functional characterization of oxidosqualene cyclases involved in

triterpene biosynthesis in lettuce (*Lactuca sativa*). *Plant Science*, 301, 110656-110656.

Cinque, G., Croce, R., & Bassi, R. (2000). Absorption spectra of chlorophyll a and b in Lhcb protein environment. *Photosynthesis Research*, 64(2), 233-242.

Conyers, M. K., Uren, N. C., & Helyar, K. R. (1995). Causes of changes in pH in acidic mineral soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(11), 1383-1392.

Cowan, J. A. (2002). Structural and catalytic chemistry of magnesium-dependent enzymes. *Biometals*, 15(3), 225-235.

Galieni, A., Di Mattia, C., De Gregorio, M., Specca, S., Mastrocola, D., Pisante, M., & Stagnari, F. (2015). Effects of nutrient deficiency and abiotic environmental stresses on yield, phenolic compounds and antiradical activity in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, 187, 93-101.

Gao, H. B., Zhang, T. J., Lv, G. Y., Zhang, G. H., Wu, X. L., Li, J. R., & Gong, B. B. (2010). Effects of different compound substrates on growth, yield and fruit quality of cucumber. *Acta Horticulturae*, (856), 173-180.

- Harholt, J., Suttangkakul, A., & Vibe Scheller, H. (2010). Biosynthesis of pectin. *Plant Physiology*, 153(2), 384-395.
- Herms, D. A., & Mattson, W. J. (1992). The dilemma of plants: to grow or defend. *The Quarterly Review of Biology*, 67(3), 283-335.
- Hoque, M. M., Ajwa, H., Othman, M., Smith, R., & Cahn, M. (2010). Yield and postharvest quality of lettuce in response to nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers. *HortScience*, 45(10), 1539-1544.
- Jifon, J., Lester, G., Stewart, M., Crosby, K., Leskovar, D., & Patil, B. S. (2012). Fertilizer use and functional quality of fruits and vegetables. *Fertilizing Crops to Improve Human Health: a Scientific Review*, 2, 191-214.
- Kandlbinder, A., Finkemeier, I., Wormuth, D., Hanitzsch, M., & Dietz, K. J. (2004). The antioxidant status of photosynthesizing leaves under nutrient deficiency: redox regulation, gene expression and antioxidant activity in *Arabidopsis thaliana*. *Physiologia Plantarum*, 120(1), 63-73.
- Kang, J. Y., Lee, H. H., & Kim, K. H. (2004). Physical and chemical properties of inorganic horticultural substrates used in Korea. *Acta Horticulturae*, 644, 237-241.

- Karimaei, M. S., Massiha, S., & Mogaddam, M. (2001). Comparison of two nutrient solutions' effect on growth and nutrient levels of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars. In *International Symposium on Growing Media and Hydroponics*, 644, 69-76.
- Karley, A. J., & White, P. J. (2009). Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 291-298.
- Kratky, B. A. (2003, February). A suspended pot, non-circulating hydroponic method. *Acta Horti*, 648, 83-89.
- Lee, J. H., Felipe, P., Yang, Y. H., Kim, M. Y., Kwon, O. Y., Sok, D. E., ... & Kim, M. R. (2009). Effects of dietary supplementation with red-pigmented leafy lettuce (*Lactuca sativa*) on lipid profiles and antioxidant status in C57BL/6J mice fed a high-fat high-cholesterol diet. *British Journal of Nutrition*, 101(8), 1246-1254.
- Liang, C., & Zhang, B. (2018). Effect of exogenous calcium on growth, nutrients uptake and plasma membrane H⁺-ATPase and Ca²⁺-ATPase activities in soybean (*Glycine max*) seedlings under simulated acid rain stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 261-269.
- Llorach, R., Martínez-Sánchez, A., Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., &

- Ferrerres, F. (2008). Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry*, 108(3), 1028-1038.
- Maadane, A., Merghoub, N., Ainane, T., El Arroussi, H., Benhima, R., Amzazi, S., ... & Wahby, I. (2015). Antioxidant activity of some Moroccan marine microalgae: Pufa profiles, carotenoids and phenolic content. *Journal of Biotechnology*, 215, 13-19.
- Marschner, H. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. (pp. 299-312). New York, Academic Press.
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659-668.
- Mckersie, B. D., & Leshem, Y. A. Y. (1994). Chilling stress. In *Stress and Stress Coping in Cultivated plants* (pp. 79-103). Springer, Dordrecht.
- Mohammed, Z. H., Hember, M. W. N., Richardson, R. K., & Morris, E. R. (1998). Kinetic and equilibrium processes in the formation and melting of agarose gels. *Carbohydrate Polymers*, 36(1), 15-26.
- Mou, B. (2008). Lettuce. In *Vegetables I* (pp. 75-116). Springer, New York, NY.

- Mozafar, A. (1993). Nitrogen fertilizers and the amount of vitamins in plants: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 16(12), 2479-2506.
- Muller, P., Li, X. P., & Niyogi, K. K. (2001). Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. *Plant Physiology*, 125(4), 1558-1566.
- Nian, H., Ahn, S. J., Yang, Z. M., & Matsumoto, H. (2003). Effect of phosphorus deficiency on aluminium-induced citrate exudation in soybean (*Glycine max*). *Physiologia Plantarum*, 117(2), 229-236.
- Osvald, J., Petrovic, N., & Demsar, J. (2001). Sugar and organic acid content of tomato fruits (*Lycopersicon lycopersicum* Mill.) grown on aeroponics at different plant density. *Acta Alimentaria*, 30(1), 53-61.
- Petropoulos, S. A., Olympios, C. M., & Passam, H. C. (2008). The effect of nitrogen fertilization on plant growth and the nitrate content of leaves and roots of parsley in the Mediterranean region. *Scientia Horticulturae*, 118(3), 255-259.
- Pettigrew, W. T. (2008). Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 670-681.
- Poovaiah, B. W. (1988). Molecular and cellular aspects of calcium action

in plants. *HortScience*, 23(2), 267-271.

Prior, R. L., & Wu, X. (2013). Diet Antioxidant Capacity: Relationships to Oxidative Stress and Health. *American Journal of Biomedical Sciences*, 5(2).

Rissler, H. M., Collakova, E., DellaPenna, D., Whelan, J., & Pogson, B. J. (2002). Chlorophyll biosynthesis. Expression of a second chl I gene of magnesium chelatase in *Arabidopsis* supports only limited chlorophyll synthesis. *Plant Physiology*, 128(2), 770-779.

Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 10-17.

Safaei, M., Panahandeh, J., Tabatabaei, S. J., & Motallebi Azar, A. R. (2015). Effects of different nutrients solutions on nutrients concentration and some qualitative traits of lettuce in hydroponics system. *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology*, 6(2), 1-8

Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry—A review. *Eur. J. Hortic. Sci*, 83(5), 280-293.

- Scholten, H. J., & Pierik, R. L. M. (1998). Agar as a gelling agent: chemical and physical analysis. *Plant Cell Reports*, 17(3), 230-235.
- Schulze, J., Temple, G., Temple, S. J., Beschow, H., & Vance, C. P. (2006). Nitrogen fixation by white lupin under phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 98(4), 731-740.
- Shah, A. H., & Shah, S. H. (2009). Cultivation of lettuce in different strengths of the two nutrients solution recipes in a non-circulating hydroponics system. *Sarhad Journal of Agriculture*, 25(3), 419-428.
- Shaul, O. (2002). Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals*, 15(3), 307-321.
- Soundy, P., & Smith, I. E. (1992). Response of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to nitrogen and phosphorus fertilization. *Journal of the Southern African Society for Horticultural Sciences*, 2(2), 82-85.
- Stewart, A. J., Chapman, W., Jenkins, G. I., Graham, I., Martin, T., & Crozier, A. (2001). The effect of nitrogen and phosphorus deficiency on flavonol accumulation in plant tissues. *Plant, Cell & Environment*, 24(11), 1189-1197.
- Stewart, W. M., Dibb, D. W., Johnston, A. E., & Smyth, T. J. (2005). The contribution of commercial fertilizer nutrients to food

production. *Agronomy Journal*, 97(1), 1-6.

Stoner, R., & Schorr, S. (1983). Aeroponics versus bed and hydroponic propagation [The process of propagating and growing plants in air]. *Florists' Review (USA)*.

Sulieman, S., Ha, C. V., Schulze, J., & Tran, L. S. P. (2013). Growth and nodulation of symbiotic *Medicago truncatula* at different levels of phosphorus availability. *Journal of Experimental Botany*, 64(10), 2701-2712.

Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (1985). Soil fertility and fertilizer, four Edition Mac Millan Publ. Co. *Inc. New*.

Tridge. (2021). Tridge global sourcing.

<https://www.tridge.com/intelligences/lettuce/production>

Uchida, R. (2000). Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. *Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils*, 4, 31-55.

Usherwood, N. R. (1985). The role of potassium in crop quality. *Potassium in Agriculture*, 489-513.

Verbruggen, N., & Hermans, C. (2013). Physiological and molecular

responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and Soil*, 368(1), 87-99.

Vitousek, P. M., Porder, S., Houlton, B. Z., & Chadwick, O. A. (2010). Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and Nitrogen – phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20(1), 5-15.

White, P. J., & Broadley, M. R. (2003). Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92(4), 487-511.

Zhao, D., Raja Reddy, K., Kakani, V. G., Read, J. J., & Carter, G. A. (2003). Corn (*Zea mays* L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. *Plant and Soil*, 257(1), 205-218.

Epstein, Emanuel. 編譯者(莊作權、譚鎮中). (1989). 植物營養學. p. 70, 198, 278, 281. 國立編譯館,台北.

Hopkins, W. G. and P. A. Huner. 編譯者(徐善德、廖玉琬). (2000). 植物生理學. 偉明圖書有限公司. pp. 304.