

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

光波長與光週期對菠菜(*Spinacia oleracea* L.)生理及生長影響之探討
The Effects of Light Wavelength and Photoperiod on the Physiology and
Growth of Spinach (*Spinacia oleracea* L.)

施秉誠

Bing-Cheng Shi

指導教授：吳濤群 博士

Advisor: How-Chiun Wu, Ph.D.

中華民國 112 年 6 月

June 2023

南 華 大 學

自然生物科技學系自然療癒所碩士班 碩 士 學 位 論 文

光波長與光週期對菠菜(*Spinacia oleracea* L.)生理及生長影響之探討
The Effects of Light Wavelength and Photoperiod on the Physiology
and Growth of Spinach (*Spinacia oleracea* L.)

研究生： 施秉誠

經考試合格特此證明

口試委員： 王星海

吳游群

羅俊智

指導教授： 吳游群

系主任(所長)： 

口試日期：中華民國 112 年 6 月 21 日

摘要

菠菜是一種高經濟價值的蔬菜，屬耐寒的冷季節長日照作物，其生長和發育容易受到光質及光照因素影響使作物品質改變，進而可能導致植株提前開花結果。本研究目的為探討不同光波長及光週期對菠菜在室內栽培生長表現和生理的反應。

本研究光照設備採用 LED，以白光(對照組)、紅光、藍光、紅藍光共四組光波長處理，以及長光週期(14 h)和短光週期(10 h)等條件因素，共計 8 種處理栽培菠菜。後收集植株的生長和開花參數及葉綠素螢光 F_v/F_m 、養分離子含量、葉綠素、類胡蘿蔔素、總酚含量及 DPPH 自由基清除效力等指標，加以判斷菠菜植株於各處理下的生長及生理影響。研究結果顯示在 14 h 光週期的紅光波長下，能有效提高菠菜的鮮重、乾重、葉面積，相反的以單藍光 14 h 栽培的菠菜則會顯著降低其鮮重、乾重、葉面積。於菠菜的第 35 天開花率結果中，可發現在 10 h 的短光週期處理下，其開花率均顯著低於 14 h 的開花率。其中紅光及紅藍光 10 h 兩組的開花率均達到完全抑制開花的效果，相反的在藍光 10 h 處理下卻會促進其菠菜開花率，且與其它 10 h 處理有顯著差異。當菠菜在 14 h 光週期條件下無論光波長處理為何皆有開花跡象，然而紅光及紅藍光之開花率顯著低於其它 14 h 處理。

此外菠菜在藍光波長下栽培能有效提升其總葉綠素含量，如藍光

10 h 的總葉綠素含量最高，除了同為藍光波長的光週期 14 h 處理無顯著差異外，皆顯著高於其它處理組別。於菠菜營養成份中，光週期 10 h 的藍光處理硝酸鹽含量顯著最高，而當在光週期 14 h 藍光處理下其硝酸鹽含量則顯著最低，由此得知菠菜的硝酸鹽含量在藍光栽培下易受光週期影響，使其含量差異甚大。而菠菜的鈉及鉀的最高含量則可分別在白光 14 h 光週期和紅光 10 h 光週期兩組組別中觀察到，均顯著高於其它處理含量。針對多酚含量，結果發現在同光波長處理下，光週期 14 h 處理的總多酚積累均顯著高於 10 h 處理，其中的紅藍光無論是在 10 h 或 14 h 兩種光週期處理下，其含量分別和其它光波長處理相比均顯著最高。

由本研究的實驗結果可發現，光波長和光週期不只可以影響菠菜的生長，亦能改變其成份多寡。

關鍵字：室內栽培、發光二極體、長日照植物、植物工廠、總酚

Abstract

Spinach is a high-value, long-daylength crop that thrives under cool conditions. Its growth and development can be adversely affected by light quality and photoperiod, which can directly result in poor crop quality and early flowering. The aim of this study was to investigate the effects of light wavelength and photoperiod on the growth and physiology of spinach plants grown indoors.

Four light-emitting diode (LED) treatments were used: white LEDs (control), red LEDs, blue LEDs and red+blue LEDs. In addition, the spinach plants were grown under two photoperiod treatments: 10 h and 14 h. Data for vegetative growth, flowering, chlorophyll inflorescence (Fv/Fm), nutrient content, chlorophyll content, carotenoid content, total phenols, and DPPH activity were collected. Results showed that red LEDs with a 14-h photoperiod increased the fresh weight, dry weight, and leaf area of spinach, whereas these growth parameters were significantly reduced in spinach grown under blue LEDs with a 14 h photoperiod. With regard to flowering at day 35, results showed that regardless of the light wavelength, the flowering percentage of spinach was significantly lower

in the 10 h photoperiod than those grown under a 14-h photoperiod. In particular, red LEDs and red+blue LEDs under a 10-h photoperiod were able to completely inhibit flowering. In contrast, flowering of spinach plants was stimulated in the blue LED treatment with a 10-h photoperiod, which was significantly higher than those cultivated in the other 10-h photoperiod treatments. Irrespective of the light wavelength, flowering was present in spinach plants when grown under the 14-h photoperiod treatment, however, those in the red and red+blue LED treatments produced significantly lower numbers of flowers.

Results also showed that chlorophyll content of spinach increased when grown under blue LEDs. This was evident in the significantly higher chlorophyll content in spinach grown under both 10-h and 14-h photoperiods under blue LEDs, compared to the other LED treatments.

Analysis of the nutrient composition of the spinach plants showed that when grown under blue LEDs with a 10-h photoperiod, the nitrate content was significantly higher than other treatments, however, when grown in the 14 h photoperiod under the same wavelength, their nitrate levels were the lowest of all treatments. This finding clearly demonstrated that, when

grown under blue LEDs, the photoperiod is the key factor affecting nitrate levels in spinach. Furthermore, the highest sodium and potassium levels were found in the white LED treatment (14 h photoperiod) and red LED treatment (10 h photoperiod), respectively, which were significantly higher than all the other treatments. Analysis of the total phenol content revealed that under the same wavelength treatment, spinach grown under a 14-h photoperiod possessed a significantly higher total phenol content than those cultivated in a 10-h photoperiod. Moreover, the total phenol content of spinach exposed to red+blue LEDs in both the 10 h and 14 h photoperiods were significantly higher than all the other treatments in their respective photoperiods.

The findings reported in this study demonstrated that not only are the growth and development of spinach plants affected by different light wavelength and photoperiod treatments, but their chemical composition is also significantly influenced.

Keywords: Indoor cultivation, Light-emitting diode, Long-day plant, Plant factory, Total phenol

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	VI
表次.....	IX
圖次.....	X
第一章 前言.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	3
第二章 文獻探討.....	4
2.1 菠菜概述.....	4
2.2 人工光源光質.....	5
2.2.1 紅光波長.....	6
2.2.2 藍光波長.....	7
2.3 光週期對植物影響.....	8
2.4 植物營養元素.....	9
2.5 葉綠素螢光.....	11
第三章 材料與方法.....	13
3.1 試驗植物及生長條件.....	13

3.1.1 試驗品種.....	13
3.1.2 菠菜種子發芽環境及栽培介質和容器	13
3.1.3 LED 處理	15
3.1.4 栽培架及設備.....	16
3.2 植株檢測項目及調查方法	20
3.2.1 生長參數.....	20
3.2.2 葉綠素螢光 Fv/Fm 值測定：	21
3.2.3 離子測定.....	21
3.2.4 葉綠素及類胡蘿蔔素測定.....	21
3.2.5 多酚含量測定.....	22
3.2.6 DPPH 自由基清除效力之測定	23
3.3 統計分析.....	24
第四章 結果.....	26
4.1 光波長及光週期對菠菜生長質量的影響	26
4.2 不同光波長及光週期對菠菜的開花影響	28
4.3 不同光波長及光週期對菠菜類胡蘿蔔素和葉綠素含量影響	35
4.4 不同光波長及光週期對菠菜元素離子含量影響	37
4.5 不同光波長及光週期對菠菜的葉綠素螢光 Fv/Fm、DPPH 自 由基清除活性、總多酚影響	40

第五章 討論.....	44
第六章 結論.....	51
研究限制及未來方向	52
參考文獻.....	53
中文文獻.....	53
英文文獻.....	53



表次

表 4.1 不同光波長及光週期，照射栽培菠菜 35 天，對其生長之影響	27
表 4.2 不同光波長及光週期照射栽培菠菜 35 天，對總葉綠素和類胡 蘿蔔素含量之影響.....	37
表 4.3 不同光波長及光週期，照射栽培菠菜 35 天，對其離子成分之 影響.....	40



圖次

圖 3.1 土耕栽培容器	14
圖 3.2 幼苗移植至容器	15
圖 3.3 發光二極體 (LED) 各光源組合照射下之分析圖譜	17
圖 3.4 植株栽培架之環境 (白光 LED)	18
圖 3.5 植株栽培架之環境 (藍光 LED)	18
圖 3.6 植株栽培架之環境 (紅光 LED)	19
圖 3.7 植株栽培架之環境 (紅藍 LED)	19
圖 3.8 實驗流程圖	25
圖 4.1 不同光波長及光週期，照射栽培對菠菜開花數之影響	31
圖 4.2 不同光波長及光週期對菠菜 35 日後的抽苔長度之影響	32
圖 4.3 菠菜以四種光波長及光週期 10 H 組合，土耕栽培生長後 35 天 情況	33
圖 4.4 菠菜以四種光波長及光週期 14 H 組合，土耕栽培生長後 35 天 情況	34
圖 4.5 不同光波長及光週期對菠菜 Fv/Fm (DARK-ADAPTED) 之影響	42
圖 4.6 不同光波長及光週期對菠菜 DPPH 自由基清除活性之影響 ..	42
圖 4.7 不同光波長及光週期對菠菜的總酚含量之影響	43

第一章

前言

1.1 研究背景與動機

現今的農業技術雖較以往的發展成熟許多，但傳統農業依然無法輕易克服天候的變化等不穩定因素所帶來的影響，進而影響著傳統農業的產量。而台灣屬亞熱帶氣候地區，四面環海降雨量充足，夏季不僅炎熱且濕度高，且病蟲害嚴重。地理位置靠近西太平洋，夏至秋季容易受颱風侵襲，帶來豪雨等災害。且近年來全球在氣候變遷下帶來的極端氣候不減反增，每年不斷刷新高溫紀錄。而高溫下帶來的影響不止危害人體，也會影響農作物的生產，為此需深入探討國內應對極端氣候的農業發展方向。

為更有效的利用每一寸土地，以及應對外在環境下種植植物生長之不利因素，而衍生出的新農業模式「植物工廠」。「植物工廠」此一概念最早出現於 1957 年，位於丹麥由克里斯滕森所經營的農場，用人工光源以栽培水芹。雖最後此家農場因成本高於收入導致收支不平衡而停運，但對農業而言無疑是項創新。可根據栽培的農作物所需生長環境，使用自動化環控設

備加以改變光、水分、溫度、濕度、二氧化碳濃度等項目，使農作物能以高效率且全年有計畫性的產出。

全球的葉菜類種類繁多，其中菠菜最常被亞洲人廣泛種植。菠菜 (*Spinacia oleracea* L.) 藜科菠菜屬，一年生草本植物，屬於一種耐寒的冷季節長日照作物，對高溫抵抗力較弱。在台灣炎熱的夏季種植菠菜時，容易造成菠菜抽苔及開花的問題；冬天栽培則因為日照短且氣溫較低反而不易抽苔及開花，而菠菜出現抽苔和開花表現，勢必會嚴重影響菠菜的生長品質，所以菠菜通常選在秋及冬季時期播種，春季時採收。但近年來由於氣候變遷及全球暖化的因素，春夏、秋冬等季節之間的界線越發模糊，冬季變短且更晚到來；夏季變長且更加炎熱，進而影響室外耕種的菠菜生長。雖解決這個問題的其中一個辦法是種植對光週期和溫度不太敏感的品種，如夏季菠菜等較耐熱的品種，但這也同時限制了在春夏期間可以供應到市場的菠菜品種數量。

於文獻中，發現有許多文獻探討菠菜在不同 LED 光波長處理栽培之研究(Yorio, Goins, Kagie, Wheeler, Sager, 2001； Ohashi-Kaneko, Takase, Kon, Fujiwara, Kurata, 2007； Agarwal, Gupta, Barman, Mitra, 2018； Dung, Huguen, Jang, Kim, Thach, 2022； Nguyen, Jang, Tran, Nguyen, Kim, Hoang, Vu, 2021)，以及探討光週期對菠菜影響(Ali, Khandaker, Oba, 2009)，此外亦有改變光強度對菠菜生長及生理影響

(Gao, He, Ji, Zhang, Zheng, 2020)等文獻，然而目前較無研究以同時探討不同光波長及光週期之處理，對菠菜的生長、開花及生理變化之影響。

1.2 研究目的

本實驗在可環控的室內環境，透過控制人工光源發光二極體 (Light-emitting diode, LED)，以白光、紅光、藍光、紅藍光及光週期 10 h 和 14 h 照射栽培菠菜。

本研究之目的為：

1. 觀察不同光波長及光週期各處理組合對室內栽培菠菜生長表現及生理之影響。
2. 使用不同光波長及光週期組合照射栽培菠菜，探討可抑制菠菜開花效果之處理。
3. 探討不同光波長及光週期處理對菠菜硝酸鹽、鉀離子、鈉離子含量影響。
4. 以菠菜的 DPPH 自由基清除活性、多酚含量、葉綠素及類胡蘿蔔含量、葉綠素螢光等數值，判斷植株的生理反應。

第二章

文獻探討

2.1 菠菜概述

菠菜，學名：*Spinacia oleracea* L.，科名：藜科菠菜屬，原產地：西南亞地區，今世界各地區皆有種植，而中國為主要的菠菜種植國家。屬一年生植物，具有明顯的營養階段和繁殖期。而菠菜為長日照植物類型，光照長度若超過臨界日照則會使其開花，會因夏天的溫暖環境和長日照影響使其抽苔，因此菠菜透過生長出花梗以開始它們的繁殖階段(Krarup, Moreira, Contreras, Matte, & Rodriguez, 1998)。菠菜是一種高經濟價值的蔬菜，所富含抗氧化劑成分包括類黃酮、對香豆酸衍生物和尿苷，可透過在新鮮、冷凍、煮沸後食用等方法攝取(Cho, Howard, Prior, & Morelock, 2008)。且其中也包含大量的酚類化合物，這些化合物會作為植物的次級代謝物，用以應對紫外線輻射、低溫、病原體及缺乏營養等逆境時產生(Issa, Volate, & Wargovich, 2006)。而酚類化合物通常用作抗氧化劑、信號分子、抗菌劑、抗病毒等，各研究中均表示菠菜的抗氧化劑成分可對生物帶來許多好處，如 Ko 等(2014)指出，在有高脂血症表現的老鼠體內及體外給予菠菜提取物，其抗氧化活性有效改善了因高膽固醇飲食而引起的氧化應激。

另外菠菜也是維生素(Vitamin)A、C、E、K、B₂、B₆、B₉、葉酸、礦物質(Mn、Mg、Fe、K、Ca、Se)及膳食纖維的良好來源(Kunicki, Grabowska, Sękara, & Wojciechowska, 2010)。其中的類黃酮成分還具有抗過敏、抗炎、抗血栓形成、抗癌和抗病毒作用，這在一定程度上可能與其清除自由基的特性有關(Middleton, Kandaswami, & Theoharides, 2000)。此外菠菜的水溶性提取物已被證明在生物系統中具有抗誘變效果，Edenharder, Krieg, Kötting, 與 Platt (2003)指出菠菜成分在老鼠的研究中對致癌物具有保護作用。由此可知，人們對菠菜的需求不僅只有食用方面，其植株內含的多種成份更是有利於醫學相關研究，值得我們深入探究菠菜其它的可能性。

2.2 人工光源光質

於植物成長過程中，光照對植物生長有著相當的重要性，尤其對於光合作用的進行更是不可或缺。在光合作用的過程中，利用光能和無機物 CO₂ 與 H₂O 形成的有機物，不僅為植物的生命活動提供了必需的能量，且也為碳、氮、磷、硫等元素的一系列代謝活動提供了物質上基礎(許大全，2013)。然而農作物於自然環境下生長勢必會受到天候的影響，如自然光因受到雲、雨等因素影響而減少其光強度，更甚至夏季的強烈光照也會使植物受到光脅迫影響造成作物產量減少。

相反，在可受控的室內設施，補充人工光源栽培作物，可以促進更高的產量和優質產品(Wang et al., 2016)。室內栽培普遍使用發光二極體 (Light-Emitting Diode, LED) 作為光源，與傳統光源相比，LED 具有使用壽命長、屬固態設備不易損壞、不含螢光燈等有害物質、不會直接輻射熱量、能量轉換效率高之優點(Bourget, 2008)。且由於 LED 燈是冷光，因此它可以在不會受到高溫的影響下以更近的距離照射植物，從而提高了空間的使用效率 (Jones, 2018)。此外 LED 包含豐富的單色光波長，且其波長與植物形態發生的光譜範圍一致(Manivannan et al., 2017)，使 LED 燈能夠依照不同光波長，從而提供特定的單獨波長給予各類植物生長之所需。

2.2.1 紅光波長

LED 光譜中的紅光約在波長 600 nm ~ 700 nm 之間，為植物行光合作用最有效的可見光譜。如 McCree 曲線表明紅光波長能被植物色素有效吸收(Sager & McFarlane, 1997)，使紅光波長普遍作為植物的生長光源之一。且紅光在控制植物的葉綠體、莖和葉柄生長以及生殖系統功能上，有著相對重要的作用(Li, Tang, Xu, Liu & Han, 2012)。且在以萵苣栽培的相關研究中觀察到，植物可以在單紅光下維持正常的生長活動及光合作用，同時增加其生物量(Tarakanov et al., 2012 ; Li &

Kubota, 2009)。但在植物的生理上，使用紅光栽培不利於葉綠素的生物合成，因為它會減少四吡咯的前驅物 5-氨基乙酰丙酸，此前驅物對植物的光合作用有著重要的影響(Sood, Gupta & Tripathy, 2005; Fan et al., 2013)。但紅光對植物的生理影響也會因應不同種植物而有不同的表現，如對十字花科植物照射紅光會使氣孔導度增加，以紅光照射葫蘆科植物則會顯著降低其氣孔導度(Lee, Ha, Oh, & Cho, 2014)。此外，植物即使在同為紅光波長範圍內生長，僅些許的差異變化亦會使植物產生不同生理影響。如萵苣分別受紅色 LED (640 nm)及深紅色 LED (660 nm)照射，其深紅色的發射峰更加接近葉綠素 a 的吸收峰，與紅色 LED 相比使用深紅色波長能提高萵苣的生長及營養價值(Pinho, Jokinen, & Halonen, 2017)。

2.2.2 藍光波長

另一普遍作為植物生長光源的藍光，波長約在 400 nm ~ 500 nm 之間。藍光廣泛參與植物的生理作用，包含向光性、光型態發生、氣孔開放和葉片光合功能(Whitelam & Halliday, 2007)。其中類胡蘿蔔素在藍光波長範圍內吸收強烈，最大峰值分別出現在 448 nm 和 454 nm (Hopkins & Hüner, 2003)。於另一研究中發現藍光在激活隱花色素系統與匹配葉綠素及類胡蘿蔔素吸收光譜上對綠色植物來說有著重要

的影響(Yanagi, Okamoto, & Takita, 1996)，可顯著提升植物的營養價值。而不同種類的植物受藍光照射所受到的生理反應與影響各不相同，藍光照射菊科植物會減少葉面積和枝條乾重，但卻對茄科植物有相反的效果(Sabzalian et al., 2014；Vu, Kim, Kang, & Kim, 2014)。

2.3 光週期對植物影響

光週期是指一天 24 小時中光期和暗期的配置，且不同經緯度的地區光週期配置各不相同，如在緯度為零的赤道地區，光週期固定為 12 小時的白天及 12 小時的黑夜。且越靠近南、北兩極，光週期的晝長與黑夜差異也就越大，而在地球的兩極地區，於一年中的特定時間會出現 24 小時永晝及 24 小時永夜的光週期現象(楊純明、李裕娟，2009)。對植物而言，為繁衍後代而演化出依據光週期的光、暗期長短變化而開花的機制，其主要有三種光週期反應類型。短日照植物，當光週期短於臨界日長時植物引起反應；長日照植物，當光週期超過臨界日長時長日照植物會引起反應；中性日長植物，該種植物類型對於光週期的日長變化無任何特別反應(楊純明、李裕娟，2009；Jackson, 2009)。從這三種類型可發現臨界日長是光週期從非感應轉換到引起反應的重要點，且不同植物或同種植物在不同環境下的臨界日長差異不小，其臨界日長可能小於或大於 12h，主要重點在於臨界日長的超

過或不足，如短日照植物 *Xanthium strumarium* (蒼耳)，此植株的臨界長約為 15.5 h，因此當日長少於 15.5 h 即可誘導光週期反應而開花 (Thomas & Vince-Prue, 1997)。

2.4 植物營養元素

植物生長過程中除了水、光照、溫度、濕度等要素之外，養分亦是不可或缺的因素，當中約有 16 種必要元素以供植物完整的生命週期所需。植物需要這些營養元素主要是為了幫助其能正常地生長，可當任一營養元素超出或低於該植物的所需範圍時(不同植物所需營養元素之量各不相同)，便會導致作物健康狀況下降及產量減少，如當必要元素之量不足需求時，植物就會出現缺乏症；反之必要元素超過其需求的量時，就會對植物產生毒性(McCauley, Jones, & Jacobsen, 2009)。

硝酸鹽是許多自然環境及種植農業中可用的礦物質，對植物而言也是氮元素獲取的主要來源(Wang et al., 2004)。由於植物無法直接利用空氣中的氮元素，進而透過固氮作用及硝化作用使氮元素來轉變為銨鹽或硝酸鹽，才可被植物吸收利用(高德錚，2010)。除了作為營養物質的作用之外，硝酸鹽處理還會觸發植物局部和系統的信號網路，用以調節植物的基因表達、代謝作用、生理及生長發育過程(Ho, Lin,

Hu, & Tsay, 2009)。大多數硝酸鹽積累在葉片中，尤其是葉肉部分，且由於硝酸鹽完全以木質部運輸，所以水果和種子的硝酸鹽含量非常低(Pate, 1980)。另外高德錚(2010)也表示植物中的硝酸鹽積累多寡會受到多種因素影響，如栽培時的光照、溫度或植株本身硝酸鹽吸收、輸送、生長速度等因素。

鈉的重要性通常與土壤鹽度有關，大多是和 NaCl 相關，通常情況下植物對鈉含量較無需求，只需微量便可，且過高的鈉離子濃度對植物是有毒的(Zhang, Flowers, & Wang, 2010)。雖一般陸生植物對鈉離子沒有需求，但低含量的鈉不僅是無害的，還可以幫助缺乏鉀離子的植物進行代謝作用，其原因在於鈉及鉀離子在水合形式下化學及結構上非常相似(Amtmann & Sanders, 1999)。

鉀是植物必須的重要元素之一，為植物細胞中最豐富的陽離子。由於鉀在植物中不會被代謝成有機化合物，大多數以陽離子的形式存在(Jones, Brady & Speirs, 1979)。且在短距離運輸(單個細胞和相鄰組織之間)以及通過植物木質部和韌皮部的長距離易位中有著高流動性(Marschner, Kirkby, & Cakmak, 1996)。在土壤中共有四種不同的鉀來源，最多的成份是長石、雲母等礦物質，約 90%-98%，較少鉀源可供植物利用；第二種為非交換性鉀，約 1%-2%，與黏土礦物以 2:1 伴生，作為儲備源；第三種為可交換鉀源，約 1%-2%，與非交換性鉀供應鉀

的速率非常慢；而第四種鉀源是有機質及土壤微生物群中包含的鉀，該土壤所能提供的鉀非常少(Prajapati & Modi, 2012)。此外鉀還參與了許多植物的生理功能，如水關係、酶激活、氣孔調節、光合作用、硝酸鹽運輸等(Oosterhuis, Loka, Kawakami & Pettigrew, 2014)。

2.5 葉綠素螢光

植物葉片在受到光照後，其光能會進入葉綠體中的光系統 I (PSI) 和光系統 II (PSII) 反應中心(Ritchie, 2006)。而當 PSII 中的葉綠素吸收了能量光子時，其電子將被提升至更高的能量狀態。此狀態下被電子受體捕獲並轉移至 PSI 中，而在 PSI 中光化學過程會產生 NADPH，將二氧化碳轉化為糖變為可儲存的化學能。可當葉綠素 a 電子未被電子受體捕獲，它們將會衰變回基態，在這衰變過程中會損失能量並且放出螢光，而此螢光正是被測量的葉綠素螢光。測量葉綠素螢光前需將植物置於黑暗數分鐘(暗適應)，使電子傳輸鏈去除所有激發電子並清空受體池，而後使用飽和光脈衝照射植物細胞，在以葉綠素螢光計測量細胞釋放的最小及最大的螢光數值(Govindje, 1995)。

植物於黑暗處理後，此時的葉片為最小螢光值，表示為 F_0 ，而後施加光脈衝時，螢光數值最大，表示為 F_m (Schoefs, 2005)。 F_v 稱為

可變螢光，為 F_0 與 F_m 之間的數值差異(Bjorkman & Demmig 1987)。
而葉綠素螢光測量之 F_v/F_m 值的正常範圍為 0.7 到 0.83 之間，代表
光合系統相對高效，且具有季節及晝夜穩定性而作為穩健的損害指標
(Ritchie, 2006)。當中的 F_v/F_m 值代表衡量植物的最佳量子效率，為對
植物的光合裝置狀態的估計(Genty, Briantais, & Baker, 1989)。



第三章

材料與方法

3.1 試驗植物及生長條件

3.1.1 試驗品種

本次研究中的菠菜 (*Spinacia oleracea* L.)，選自為農友種苗公司的在來菠菜「農友 398」品種，經多次種植測試後符合本研究所需，易開花之菠菜品種實驗要素，而該菠菜品種介紹概略如下：

在來菠菜「農友 398」為葉長橢微尖淡綠色，葉柄較長，缺刻淺少，品質細嫩，栽培適溫：15~25°C。

3.1.2 菠菜種子發芽環境及栽培介質和容器

菠菜種子於黑暗環境中浸泡於水 24 小時用於催芽，而後種子發芽於每格直徑約 4.5 cm 深約 3.5 cm 的格穴盤中，一孔洞 2 顆。種子發芽及後續栽培之介質皆使用水蘇泥炭土 (EUFLOR HUMUSWERK 公司生產，德國) 與珍珠石以 3:1 比例混合而成的栽培土壤。播種深度約 0.5 cm，生長於室內植物工廠中，空氣濕度約在 60%~80%，溫度控制在 $26 \pm 2^\circ\text{C}$ 。發芽期間使用白光 LED 做為菠菜的生長光，其

PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density) 為 $150 \pm 10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，光週期 14 h。

發芽 7 日後，將菠菜幼苗移植至土耕栽培容器中生長，其容器大小為長：17.1 cm、寬：13.4 cm、高：5 cm；內長：16 cm、內寬：12 cm、內高：3 cm（圖 3.1），且為預留植株生長空間，容器的栽培孔洞間各相互空一洞，每箱種植 8 株（圖 3.2）。其在栽培土壤均加入複合化學肥料（N:P:K = 15:15:15）4 g 及混和 880 mL 水拌入土壤中，使其充分混和均勻。



圖 3.1 土耕栽培容器



圖 3.2 幼苗移植至容器

3.1.3 LED 處理

本實驗使用的發光二極體採購自磊輝企業股份有限公司（彰化縣，台灣），使用可攜式光譜量測儀（International Light Technologies; ILT900, USA）量測 LED 光譜分布與光量大小，四種 LED 光質條件的光譜波長檢測如圖 3.3。

研究方法以白光 LED（W）做對照組，以及紅光 LED（R）、藍光 LED（B）、紅藍 LED（RB）共四組光波長處理，而光波長處理再各自分為光週期 10h 及 14h 組別，共分成 W10、W14、R10、R14、

B10、B14、RB10、RB14 八組實驗處理，每組處理組別的光強度均為 $150 \pm 10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.1.4 栽培架及設備

種植菠菜植株的土箱則放置於植物栽培架上生長，為避免外部光源影響實驗處理並維持良好通風，因而使用鋁箔紙和紙板構築成百葉窗的形式，用以遮擋外部光源；每組 LED 實驗處理的栽培架上共放置 6 箱土箱（圖 3.4；圖 3.5；圖 3.6；圖 3.7），共計 48 株菠菜。而生長環境的溫度控制在 $26 \pm 2^\circ\text{C}$ ，此外各組培架使用小型風扇以每小時吹 45 分鐘後停 15 分鐘的週期方式，保持栽培空間通風。整體實驗從播種至發芽 7 日後，再移植至各 LED 處理的栽培架上生長 28 日，開始至結束共計 35 天後收取植物樣本生長參數及生理數值。

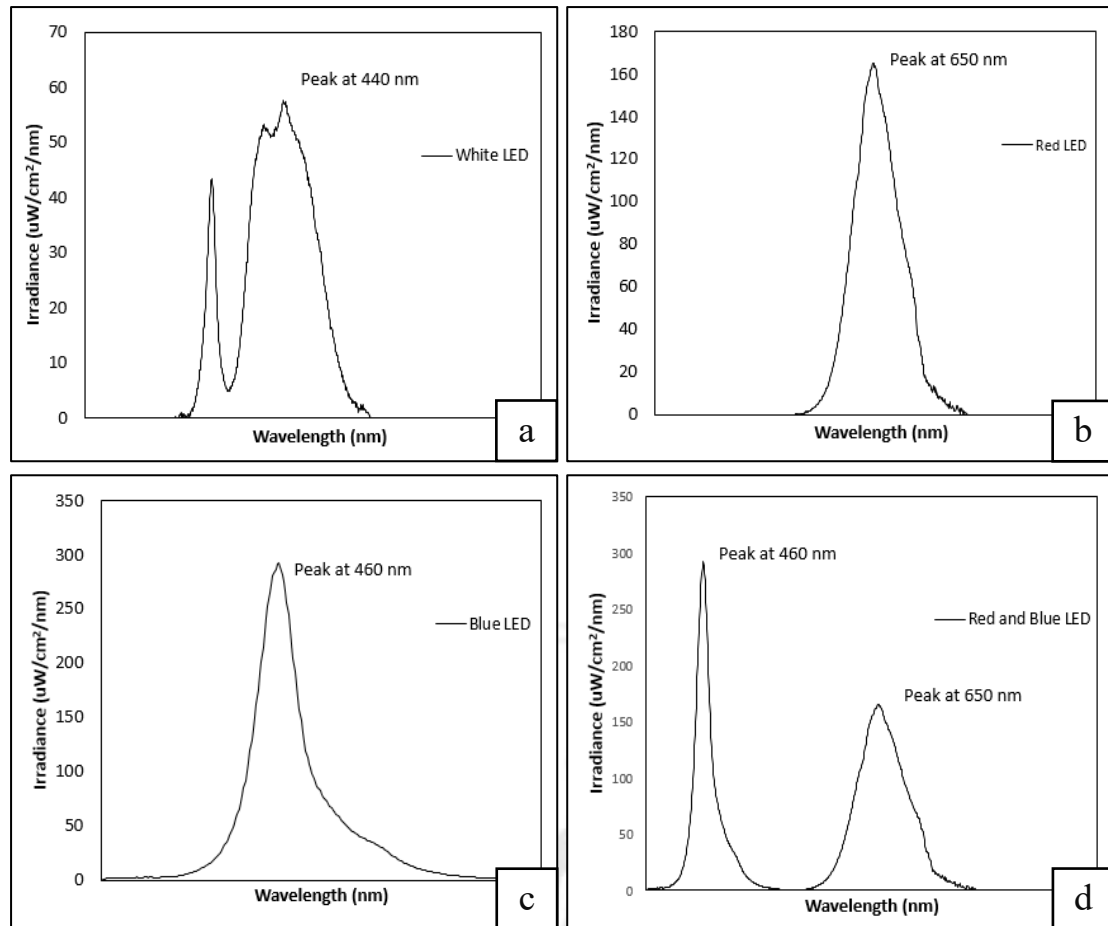


圖 3.3 發光二極體 (LED) 各光源組合照射下之分析圖譜

(a)白光波長(b)紅光波長(c)藍光波長(d)紅藍光波長



圖 3.4 植株栽培架之環境（白光 LED）



圖 3.5 植株栽培架之環境（藍光 LED）



圖 3.6 植株栽培架之環境（紅光 LED）



圖 3.7 植株栽培架之環境（紅藍 LED）

3.2 植株檢測項目及調查方法

3.2.1 生長參數

本研究菠菜種植參數收集數據為：

- (1)葉片數：自植株第一片本葉到每植株所有已展開之葉片數量。
- (2)植株鮮重 (Fresh mass)：自土壤表面切取植株基部生長點上部分，以電子天秤測量其重量，單位為 g。
- (3)抽苔長：自植物基部生長點到花莖頂端的垂直高度，單位為 cm。
- (4)葉面積：將採取之植株除去葉柄及子葉部分，其餘葉片部分做葉面積測量。使用 A4 白紙當背景及在白紙上畫一 5 cm 直線做比例尺，放上葉片後再使用透明玻璃壓平葉片，拍照存取進電腦後再使用 Image J(National Institutes of Health, USA)圖像處理軟體得出總面積，單位為 mm²。
- (5)植株乾重 (Dry mass)：將植株切取部分，以鐵盤上隔紙盛裝實驗樣本放入烘箱，溫度設定為 65°C，烘乾 12 小時後取出，以電子天秤測量其重量，單位為 g。
- (6)開花數：每日觀察及記錄各 LED 處理處理菠菜的開花總數。

3.2.2 葉綠素螢光 Fv/Fm 值測定：

以手持式螢光計 (FluorPen FP100, PSI, Czech Republic) 測量菠菜植株葉綠素螢光的 Fv/Fm 值。葉片經暗適應一小時後，在完全黑暗環境中進行測量。取植株上方算起第三片已展開之葉片進行測量，在葉片無葉脈處以儀器的感應端部分，夾住並貼合葉片進行測量，獲取葉綠素螢光讀數。每株實驗樣本之葉片，於葉片三處不同位置各測量一次，取其 Fv/Fm 平均值並加以探討，而測出的 Fv/Fm 值，代表植物的逆境水平和光合效率。

3.2.3 離子測定

取測定菠菜植株樣本上方算起第四片已展開之本葉，研磨成均質後以試紙吸取，再分別以 LAQUAtwin 硝酸鹽離子計、鉀離子計、鈉離子計 (HORBIA Advanced Techno, Co., Ltd, Japan) 測量其所含硝酸鹽、鉀離子、鈉離子值，單位為 ppm。

3.2.4 葉綠素及類胡蘿蔔素測定

採用 Maadane et al. (2015) 之方法，將烘乾葉片樣本磨粉後秤取 0.05 g 添加 10 ml 95% 乙醇，經震盪機震盪 1 分鐘直至均質化後，於

黑暗環境下避光且冷藏於 4°C 下靜置 30 分鐘。30 分鐘後取上清液至微量離心管，以離心機 4°C 及 1000 rpm 離心 10 分鐘後取上清液 200 μ L 至孔盤，以全光譜吸收光判讀儀 (BMG LABTECH Pty, Ltd, Germany) 分別測 664 nm、648 nm、470 nm 吸收值，將測出吸收值代入公式並計算其葉綠素 *a* 含量、葉綠素 *b* 含量、總葉綠素含量、類胡蘿蔔素含量，計算公式如下：

$$\text{葉綠素 } a \text{ 含量}(\mu\text{g/mL}) = 13.36 \times A_{664} - 5.19 \times A_{648}$$

$$\text{葉綠素 } b \text{ 含量}(\mu\text{g/mL}) = 27.43 \times A_{648} - 8.12 \times A_{664}$$

$$\text{總葉綠素含量}(\mu\text{g/mL}) = C_a + C_b$$

$$\text{類胡蘿蔔素含量}(\mu\text{g/mL}) = (1000 \times A_{470} - 2.13 \times C_a - 97.64 \times C_b)/209$$

3.2.5 多酚含量測定

總酚含量用的 Folin-Ciocalteu (1N) 試劑，使用 Sato et al. (1996) 描述之方法配置。另外使用不同濃度的沒食子酸 (Gallic acid) 用於製作標準曲線，而計算總酚含量之方式，參考自 Chung et al. (2005) 修改後之方法。配置 50、40、30、20、10 μ g/mL 等不同濃度的沒食子酸標準液，添加標準液 150 μ L、Folin-Ciocalteu (1N) 試劑 150 μ L 至 1.5 mL 微量離心管混和，且各濃度三重複。靜置 5 分鐘後再添加 200 μ L NaCO_3 等候反應 10 分鐘後，以離心機離心 1 分鐘，取上清液 200 μ L 至孔盤。

以全光譜吸收光判讀儀測 730 nm，得出吸光值。將吸光值拉平均數作標準曲線，得出標準品公式。

而樣本萃取液製作方法，將測試烘乾葉片樣本以粉碎機打成粉末狀，秤取 0.1 g 樣本粉末及 10 mL 的 RO (Reverse Osmosis) 水，並放置於 50 mL 離心管以試管震盪器震盪 1 分鐘使其混和。再放入離心機以 1000 rpm，10 分鐘離心，取其上清液後再以濾紙過濾，得其樣本萃取液。以相同實驗方法，將樣本萃取液 150 μ L 與 Folin-Ciocalteu (1N) 試劑 150 μ L 混和，靜置 5 分鐘後再添加 NaCO_3 200 μ L 等候反應 10 分鐘後，離心 1 分鐘，取上清液 200 μ L 至 96 孔盤，以全光譜吸收光判讀儀測 730 nm 測其吸收值之變化。測出樣本吸收值後，將其樣本吸收值代入標準液曲線公式得出該樣本的多酚含量。

3.2.6 DPPH 自由基清除效力之測定

DPPH(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl) 自由基清除效力之測定參考自 Yamaguchi et al. (1998) 修改後之方法。而實驗樣本萃取液製作方法，將測試烘乾葉片樣本以粉碎機打成粉末狀，秤取 0.5 g 樣本粉末及 5 mL 的 95% 乙醇，於離心管以試管震盪器震盪 1 分鐘使其混和。再放入離心機以 1000 rpm，離心 10 分鐘，取其上清液後再以濾紙過濾，得其樣本萃取液。再分別以添加 95% 乙醇 250 μ L、DPPH 試劑(0.1 mg

1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl ，1 L 95 % Ethanol) 750 μ L 做對照組溶液；及樣本萃取液 20 μ L、95%乙醇 230 μ L、DPPH 試劑 750 μ L 為實驗組。於微量離心管中並以震盪機震盪 1 分鐘後，在黑暗環境中靜置 30 分鐘。後取上清液 200 μ L 至 96 孔盤，以全光譜吸收光判讀儀測 517 nm 吸光值，得出對照組吸收值及實驗組吸收值，並以公式算出樣本抑制率：

$$\left[1 - \left(\frac{\text{實驗組吸收值}}{\text{對照組吸收值}}\right)\right] \times 100 = \text{抑制率} (\%)$$

3.3 統計分析

菠菜在四種光波長及各兩種光週期處理下栽培生長，共計八種實驗處理組別（圖 3.8），每組各有 48 棵樣本（每箱種植 8 株菠菜，每層栽培架 6 箱）。35 天後，採集以下生長參數及生理數值：鮮重、乾重、葉面積、葉片數、開花數、抽苔長、葉綠素螢光 Fv/Fm 值；NO₃、Na⁺、K⁺離子含量。而化學分析部分，進行分析程序（DPPH 自由基清除活性、葉綠素含量、類胡蘿蔔素含量）的處理組別樣本各重複三次。試驗設計採完全隨機設計(Completely Randomized Design)，以統計軟體 PASW Statistics 18 進行統計分析，結果以變方分析(ANOVA)和鄧肯氏新多變域分析(Duncan's multiple range test)測驗其各處理間平均值的顯著性差異(P<0.05)。

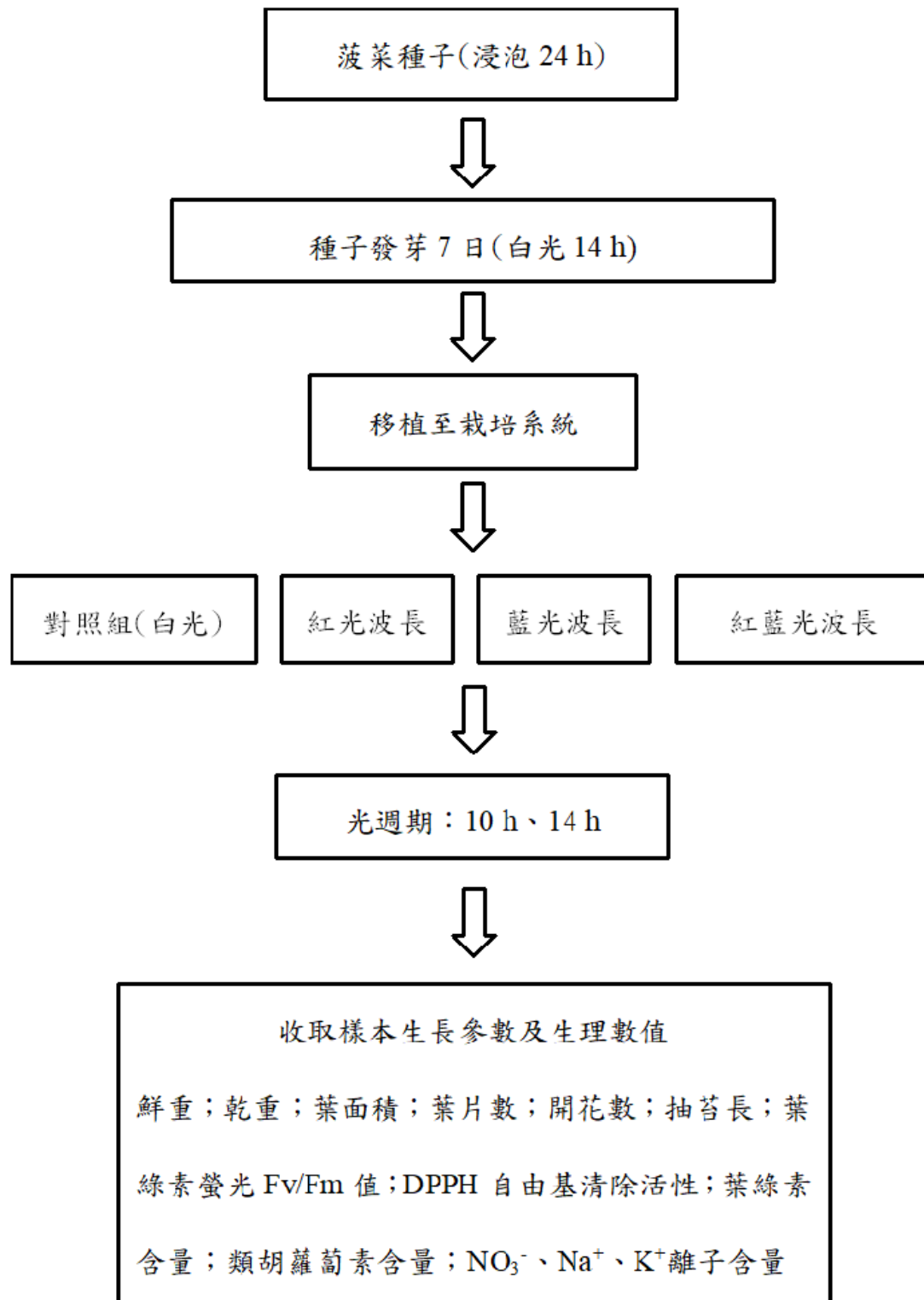


圖 3.8 實驗流程圖

第四章

結果

4.1 光波長及光週期對菠菜生長質量的影響

白光照射栽培下的菠菜，W10 處理的鮮重 (5.28 g) 及葉面積 (115.31 cm²)，均分別顯著高於 W14 處理的鮮重 (4.38 g) 和葉面積 (82.69 cm²) (表 4.1)。乾重部分在白光兩組間無顯著差異，葉片數則是 W14 顯著高於 W10 (分別為 13.52 和 10.31)。以單紅光波長栽培下，光週期較長的 R14 處理，在鮮重、乾重、葉面積、葉片數等生長質量上，皆顯著高於 R10 組，且其中鮮重及乾重顯著高於其它處理。單藍光波長照射栽培的菠菜，B14 的鮮重及乾重顯著高於 B10，而 B10 鮮重及乾重則顯著低於其它處理。而以紅藍光波長組合的 RB10 及 RB14 兩組，其鮮重、乾重及葉面積均無顯著差異，至於葉片數生長表現部分則是 RB14 顯著高於 RB10 處理；RB14 和 RB10 的葉片數表現分別為 12.25 和 8.77 (表 4.1)。

光週期 10h 條件下以不同光波長照射栽培，R10、B10、RB10 三組與全光波長的 W10 對照組做比較 (表 4.1)，三組在鮮重、乾重、葉面積等生長表現均低於 W10 處理的菠菜且有顯著差異。在葉片數表現上，W10 和 B10 組別的結果相近，葉片數分別為 10.31 和 10.85。

而在紅光的 R10 與 RB10 兩組，兩者間的葉片數表現均無顯著差異，分別為 7.77 和 8.77，但 R10 與 RB10 兩組葉片數顯著低於 W10 和 B10 兩組（表 4.1）。

表 4.1 不同光波長及光週期，照射栽培菠菜 35 天，對其生長之影響

處理	鮮重 (g)	乾重 (g)	葉面積 (cm ²)	葉片數
W10	5.28 ± 2.41 ^b	0.42 ± 0.19 ^b	115.31 ± 51.66 ^a	10.31 ± 3.66 ^c
W14	4.38 ± 2.76 ^c	0.41 ± 0.27 ^b	82.69 ± 48.24 ^{bc}	13.52 ± 5.43 ^a
R10	4.31 ± 1.34 ^{cd}	0.30 ± 0.10 ^c	91.34 ± 27.05 ^b	7.77 ± 1.24 ^d
R14	6.35 ± 2.32 ^a	0.52 ± 0.23 ^a	121.29 ± 42.02 ^a	12.17 ± 2.62 ^{ab}
B10	2.46 ± 0.86 ^e	0.22 ± 0.09 ^d	61.93 ± 24.22 ^d	10.85 ± 3.79 ^{bc}
B14	3.55 ± 1.12 ^d	0.34 ± 0.11 ^c	76.23 ± 27.09 ^{bcd}	11.56 ± 2.48 ^{bc}
RB10	3.51 ± 1.39 ^d	0.29 ± 0.11 ^c	77.58 ± 30.90 ^{bcd}	8.77 ± 1.70 ^d
RB14	3.55 ± 1.62 ^d	0.32 ± 0.15 ^c	74.04 ± 32.24 ^{cd}	12.25 ± 3.13 ^{ab}

註：W= 白光 LED；R= 紅光 LED；B= 藍光 LED；RB= 紅藍光 LED；10= 光週期 10 h；14= 光週期 14 h

^z表內同一列不同英文字母以根據鄧肯氏新多變域檢定而呈現顯著差異(P<0.05)

光週期 14 h 的 R14 組在其鮮重、乾重、葉面積生長表現，顯著高於 W14 對照組、B14、RB14 三組，且 W14、B14、RB14 三組處理間的葉面積無顯著差異，此外 W14 (13.52)的葉片數顯著高於 B14

(11.56)，而 W14 和 RB14 之間無顯著差異。

4.2 不同光波長及光週期對菠菜的開花影響

在各光波長及光週期處理下栽培的菠菜，於生長的第 21 天、28 天、35 天之紀錄樣本總開花數。在菠菜生長後的第 21 天（圖 4.1A），W10、R10、R14、RB10、RB14 均無開花跡象。全光譜白光處理則是光週期較長的 W14 組有著 4.2%開花率，而 B10 與 B14 組分別有 20.8%和 14.6%開花率，結果顯示短日照處理的 B10 菠菜在此階段，開花率與光週期較長的 B14 組無顯著差異（圖 4.1A）。

在第 28 天時（圖 4.1B），W10 與 W14 開花數分別為 10.4%和 54.2%，在此階段的 W14 開花率顯著高於 W10。R10 組的菠菜依然無開花跡象，而 R14 組開花率在此期間從 0%提高到 16.7%，由此可觀察到以紅波長處理的菠菜與其它組相比，開花速度較為緩慢。B10 和 B14 的開花數分別為 50%和 60.6%，B14 組的開花棵數在這階段多過 B10 組處理的菠菜，且 W14、B10、B14 三組間均無顯著差異。RB10 組處理的菠菜在第 28 天時依然開花數為 0%，而 RB14 組則在一周內從 0%增加到至 41.7%，且 RB14 顯著低於 B14 的開花率。

第 35 天採收日（圖 4.1C），W10 和 W14 開花數分別為 29.2%和 83.4%。此外 R10 的開花數依然為 0 棵，而 R14 的開花率則從原本

16.7%增加至 45.8%。B10 及 B14 開花數分別為 72.9%和 89.5%，B10 開花率增加了 22.9%；B14 則提高 29.1%。至於 RB10 組，直到採收日當天開花數依然保持為 0 棵，而 RB14 組開花率則在一周的時間內提升了 14.6%，RB14 與 R14 組相比這階段的開花率增長速度較慢並無顯著差異。本實驗發現 W14 及 B14 兩組的開花率最高並無顯著差異，但顯著高於其它處理。此外，在光週期 10 h 處理中 B10 的菠菜開花率最高並且超過 70%，而 R10 及 RB10 處理有著最低的開花率，且均顯著低於其它有開花的處理。

在菠菜抽苔長長度結果中，發現全光譜的 W10 和 W14 兩組間雖無顯著差異，但結果數值上 W10 較 W14 稍高；抽苔長分別為 5.28 cm 和 4.38 cm (圖 4.2)。單紅光栽培的菠菜，光週期較長的 R14 組高於 R10 處理組別且有顯著差異，而藍光則與之相反，B10 (8.66 cm) 顯著高於 B14 (3.35 cm) 處理組別，而紅藍光波長 RB10 (3.51 cm) 和 RB14 (3.55 cm) 兩組的抽苔長結果相近，無顯著差異。由結果得知無論光週期是 14 h 或 10 h，以紅藍光波長照射栽培的菠菜，抽苔長的差異就不明顯。在光週期 10 h 的生長條件下，B10 處理的抽苔長皆高於 W10、R10、RB10 三組，且差異顯著(圖 4.2)。其中 R10 和 RB10 有加強紅光波長的兩組，在抽苔長表現上相近，且均顯著低於 W10 組處理。而在光週期 14 h 的生長條件下，R14 皆顯著高於 W14、B14、

RB14 三組，且此三組間無顯著差異；W14、B14、RB14 的抽苔長分別為 4.38cm、3.35 cm、3.55 cm，雖無顯著差異但 W14 組的抽苔長微高於其它兩組（圖 4.2）。



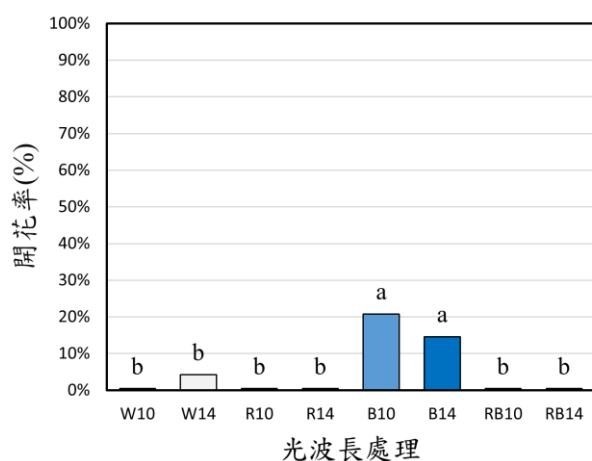
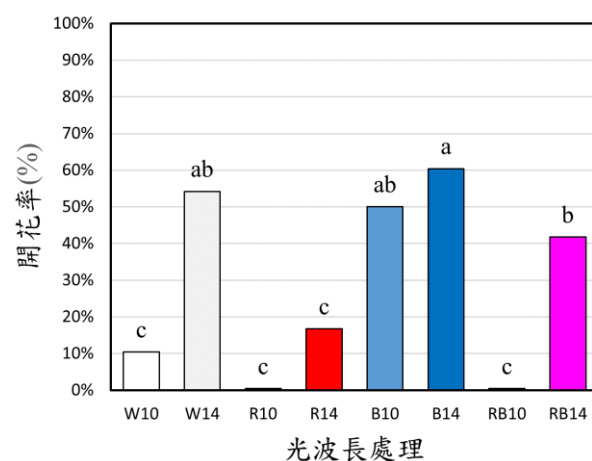
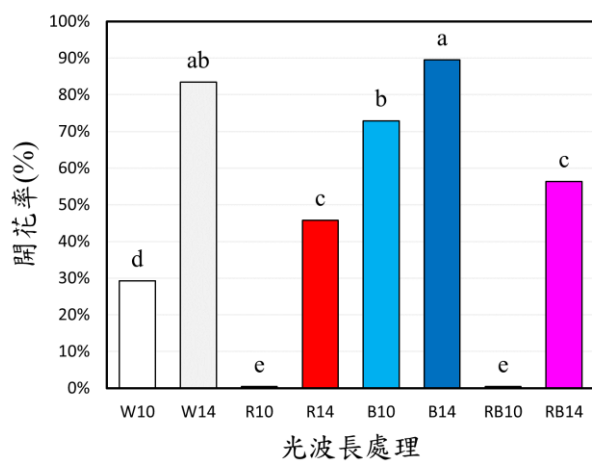
A**B****C**

圖 4.1 不同光波長及光週期，照射栽培對菠菜開花數之影響

菠菜於各處理下生長之(A)第 21 天(B)第 28 天(C)第 35 天

^z 圖中不同英文字母以根據鄧肯氏新多變域檢定而呈現顯著差異(P<0.05)

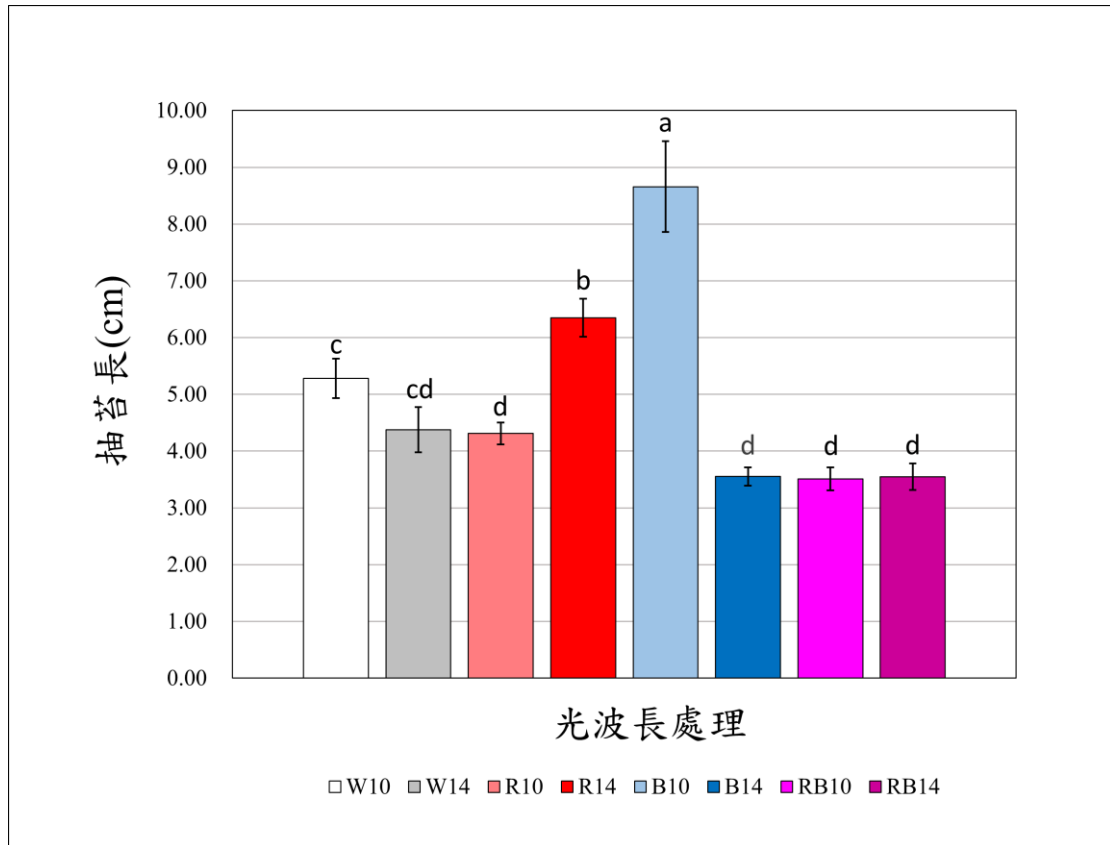


圖 4.2 不同光波長及光週期對菠菜 35 日後的抽苔長度之影響

^z圖中不同英文字母以根據鄧肯氏新多變域檢定而呈現顯著差異($P < 0.05$)

光週期 10 h 下各光波長組別的菠菜生長 35 天後之表現(圖 4.3)，其中 B10 處理之菠菜植株小於其它處理且有部分開花(圖 4.3C)。光週期 14 h 下各光波長組別的菠菜生長 35 天後之表現(圖 4.4)，而 R14 處理之葉片表現較大，且較少出現開花表徵(圖 4.4B)。



圖 4.3 菠菜以四種光波長及光週期 10 h 組合，土耕栽培生長後 35 天
情況 (A) 白光 (W10) (B) 紅光 (R10) (C) 藍光 (B10) (D) 紅
藍光 (RB10)



圖 4.4 菠菜以四種光波長及光週期 14 h 組合，土耕栽培生長後 35 天情況。(A) 白光 (W14) (B) 紅光 (R14) (C) 藍光 (B14) (D) 紅藍光 (RB14)

4.3 不同光波長及光週期對菠菜類胡蘿蔔素和葉綠素含量影響

在類胡蘿蔔素含量表現方面，化學分析表明無論何種實驗光波長(白光、紅光、藍光、紅藍光)照射栽培菠菜，光週期較短的 10h 組別類胡蘿蔔素含量皆分別高於 14h 組別(表 4.2)。當中僅 RB10 和 RB14 間皆無差異顯著，RB10 和 RB14 的胡蘿蔔素含量分別為 $3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.91 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。以光波長比較結果得出，B10 和 R10 無顯著差異，其中 B10 的含量微高 R10 處理，且兩組皆顯著高於 W10 和 RB10。而 14h 相關處理的類胡蘿蔔素含量，B14 顯著高於 W14、R14 及 RB14，且 W14 和 R14 之間無顯著差異，紅藍光波長的 RB14 則顯著低於其它組別(表 4.2)。

葉綠素 *a* 部分，B10 與 B14 無顯著差異，且 B10 葉綠素 *a* 含量高於其它處理；RB14 則是顯著低於其它處理。另外葉綠素 *b* 含量多寡的趨勢和葉綠素 *a* 相似，B10 與 B14 及 R10 處理間皆無差異，並顯著高於其它處理，且 RB14 顯著低於其它組別(表 4.2)。此外結果也表明，以白光、紅光、紅藍光照射栽培的菠菜，光週期 10h 的葉綠素 *a* 和葉綠素 *b* 含量顯著高於光週期 14h 處理；另外結果顯示僅在藍光照射栽培下的菠菜，光週期對葉綠素 *a*、*b* 的含量無顯著影響(表 4.2)。而在總葉綠素含量 ($a+b$) 方面，菠菜在光週期較短的 10h 的

處理下色素成分皆分別高於 14 h 的處理。其中藍光 10 h 光週期處理下的菠菜總葉綠素含量最高，除同為藍光波長的光週期 14 h 處理無顯著差異外，皆顯著高於其它處理組別。B10 和 B14 兩組間雖無顯著差異，但在數值比較上 B10 微高於過 B14 的葉綠素含量；B10 和 B14 的總葉綠素含量分別為 $31.1 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $30.39 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (表 4.2)。其中光週期 10 h 的紅光處理，其總葉綠素含量與 B14 組別相近且沒有顯著性差異，表示菠菜在紅光波長下以短光週期栽培處理，也可能使總葉綠素含量達到與藍光處理相近的效果。紅藍光 14 h 光週期處理的總葉綠素含量最低，且顯著低於其它處理。而另一紅藍光 10 h 光週期處理僅高於 RB14 菠菜的總葉綠素含量，且與 W10 無顯著差異。(表 4.2)。

表 4.2 不同光波長及光週期照射栽培菠菜 35 天，對總葉綠素和類胡蘿蔔素含量之影響

處理	類胡蘿蔔素 (mg·g ⁻¹)	葉綠素 (mg·g ⁻¹)		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>
W10	4.63 ± 0.16 ^c	16.30 ± 0.19 ^c	7.38 ± 0.05 ^b	23.67 ± 0.22 ^c
W14	3.64 ± 0.16 ^d	13.22 ± 0.06 ^e	6.19 ± 0.08 ^c	19.41 ± 0.13 ^e
R10	6.06 ± 0.39 ^{ab}	19.57 ± 0.16 ^b	9.89 ± 0.51 ^a	29.46 ± 0.66 ^b
R14	3.41 ± 0.27 ^{de}	14.26 ± 0.69 ^d	6.78 ± 0.28 ^{bc}	21.04 ± 0.74 ^d
B10	6.22 ± 0.43 ^a	20.66 ± 0.65 ^a	10.44 ± 0.89 ^a	31.10 ± 1.49 ^a
B14	5.66 ± 0.23 ^b	20.19 ± 0.10 ^{ab}	10.21 ± 0.21 ^a	30.39 ± 0.25 ^{ab}
RB10	3.00 ± 0.23 ^{ef}	12.74 ± 0.16 ^e	6.24 ± 0.45 ^c	18.98 ± 0.30 ^e
RB14	2.91 ± 0.07 ^f	11.46 ± 0.05 ^f	5.35 ± 0.20 ^d	16.81 ± 0.24 ^f

註：W = 白光 LED；R = 紅光 LED；B = 藍光 LED；RB = 紅藍光 LED；10 = 光週期 10 h；14 = 光週期 14 h

^a表內同一列不同英文字母以根據鄧肯氏新多變域檢定而呈現顯著差異(P<0.05)

4.4 不同光波長及光週期對菠菜元素離子含量影響

菠菜的 NO₃⁻含量，在光週期 14 h 處理中以單紅、藍光照射栽培的菠菜，R14 (1395.08 ppm) 和 B14 (1112.5 ppm) 兩組均顯著低於其它處理組別；RB14 和 W14 處理之間無明顯差異，且均顯著高於 R14 和 B14 組別 (表 4.3)。紅光及藍光處理下的菠菜 NO₃⁻含量，光

週期 14 h 的處理降低至 10 h 後其含量均獲得顯著提升，此現象在藍光處理下特別明顯，菠菜在藍光 10 h 光週期(B10)栽培下其硝酸鹽含量顯著最高，反之在 14 h 光週期(B14)的硝酸鹽含量則為最低，兩者分別皆與其它處理有顯著差異，而以對照組和紅藍光波長照射栽培的菠菜，改變光週期對 NO_3^- 含量並無顯著影響(表 4.3)。

Na^+ 含量方面，在 W14 栽培下的菠菜 (240 ppm) 與短光週期處理的 W10 (200.83 ppm) 菠菜相比， Na^+ 含量顯著提升了許多。光週期 10 h 與 14 h 的紅光相比較，R14 的 Na^+ 含量(168.33 ppm)顯著高於 R10(113.5 ppm) (表 4.3)。相反的以藍光波長處理增加光週期後，菠菜的 Na^+ 含量反而顯著減少。至於 RB10、RB14 兩組，紅藍光在增加光週期或減少光週期的情況下， Na^+ 含量皆無顯著變化，RB10 與 RB14 的 Na^+ 含量分別為 182.92 ppm 和 179.58 ppm (表 4.3)。菠菜在光週期 10 h 條件下的 Na^+ 含量，W10、B10、RB10 均顯著高於 R10 處理的 Na^+ 含量；在光週期 14 h 條件下，W14 顯著高於 R14 (168.33 ppm)、B14 (138.54 ppm) 和 RB14 (179.58 ppm) 組別，且 R14 和 RB14 間無顯著差異，B14 的 Na^+ 含量最低，並顯著低於其它光週期 14 h 處理 (表 4.3)。

在菠菜 K^+ 含量中，除紅藍光處理外與 Na^+ 含量結果相反，將白光及紅光波長照射栽培的菠菜光週期處理減少至 10 h 後，如 R10 的 K^+

含量 (7516.67 ppm) 高於 R14 (6779.17 ppm) 的處理，且有顯著差異；W10 的 K⁺含量 (6816.67 ppm) 高於 W14 (5358.33 ppm) 的處理，且有顯著差異。而藍光波長處理的結果為，光週期較長的 B14 (6591.67 ppm) 組顯著高於 B10 (5245.83 ppm) 的 K⁺含量 (表 4.3)。

在紅藍光的照射下其 K⁺含量亦不受到光週期改變的影響，10 h 和 14 h 之 K⁺含量分別為 6854.17 ppm 和 6766.67 ppm (表 4.3)。生長於光週期 10 h 的菠菜 K⁺含量，R10 顯著高於 W10、B10 及 RB10，W10 (6816.67 ppm) 及 RB10 (6854.17 ppm) 之間無顯著差異；B10 的 K⁺含量為最低，與其它處理有顯著差異。光週期 14 h 的菠菜，R14、B14、RB14 三組的 K⁺含量(分別為 6779.17 ppm、6591.67 ppm、6766.67 ppm) 皆無顯著差異，且均高於對照組 W14 (表 4.3)。

表 4.3 不同光波長及光週期，照射栽培菠菜 35 天，對其離子成分之影響

處理	NO ₃ ⁻ (ppm)	Na ⁺ (ppm)	K ⁺ (ppm)
W10	3112.50 ± 177.06 ^c	200.83 ± 12.33 ^b	6816.67 ± 104.72 ^b
W14	3325.00 ± 168.14 ^c	240.00 ± 17.31 ^a	5358.33 ± 179.97 ^c
R10	2116.67 ± 106.27 ^d	113.50 ± 5.22 ^c	7516.67 ± 108.29 ^a
R14	1395.08 ± 76.04 ^e	168.33 ± 8.02 ^b	6779.17 ± 158.45 ^b
B10	5491.67 ± 140.90 ^a	172.50 ± 6.66 ^b	5245.83 ± 94.02 ^c
B14	1112.50 ± 82.57 ^e	138.54 ± 8.05 ^c	6591.67 ± 78.92 ^b
RB10	3945.83 ± 338.58 ^b	182.92 ± 8.24 ^b	6854.17 ± 111.15 ^b
RB14	3600.00 ± 116.10 ^{bc}	179.58 ± 12.78 ^b	6766.67 ± 111.91 ^b

註：W = 白光 LED；R = 紅光 LED；B = 藍光 LED；RB = 紅藍光 LED；10 = 光週期 10 h；14 = 光週期 14 h

²表內同一列不同英文字母以根據鄧肯氏新多變域檢定而呈現顯著差異(P<0.05)

4.5 不同光波長及光週期對菠菜的葉綠素螢光

Fv/Fm、DPPH 自由基清除活性、總多酚影響

如圖所示，同光波長處理內的光週期 10 h 的 Fv/Fm 值皆高於 14 h 處理的菠菜 (圖 4.5)。在光週期 10 h 處理下的菠菜 Fv/Fm 值表現，RB10 處理最高且顯著高於其它組別，其次為單紅光的 R10 處理，最後則是對照組 W10 的 Fv/Fm 值最低。至於光週期 14 h 下載培的菠

菜，各光波長處理的 F_v/F_m 值以 R14 及 RB14 為最高，兩組均無顯著差異，其次為 B14 和 W14 兩組，且兩組間無顯著差異（圖 4.5）。

菠菜的 DPPH 自由基清除活性（%抑制）結果表明，在光週期 10 h 和 14 h 處理間的菠菜皆無顯著差異。本研究各光波長處理的菠菜在相同光週期條件下，除了白光對照組處理外皆無顯著差異，而 W10 之 DPPH 值則為最低（圖 4.6）

總多酚方面，以全光譜白光、紅光、藍光、紅藍光等照射栽培下的菠菜，光週期較長的 14 h 處理分別顯著高於 10 h 處理（圖 4.7）。由實驗結果可觀察到總多酚含量和藍光波長有所相關，B10 總多酚含量顯著高於對照組的 W10，而 R10 和 W10 總多酚含量最低且兩者之間無顯著差異。在光週期 14 h 的藍光高於對照組 W14 及 R10，W14 則顯著高於 R14，至於紅藍光 14 h 處理的菠菜，其總多酚含量與其它光波長處理相比皆為最高並有顯著差異（圖 4.7）。

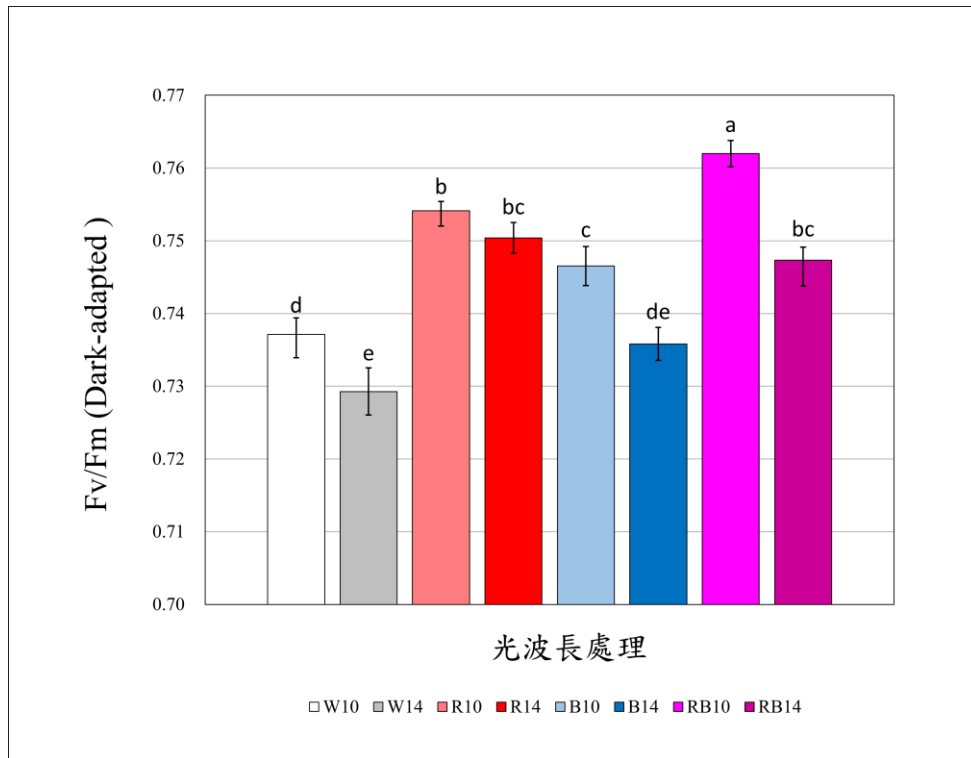


圖 4.5 不同光波長及光週期對菠菜 Fv/Fm (Dark-adapted) 之影響

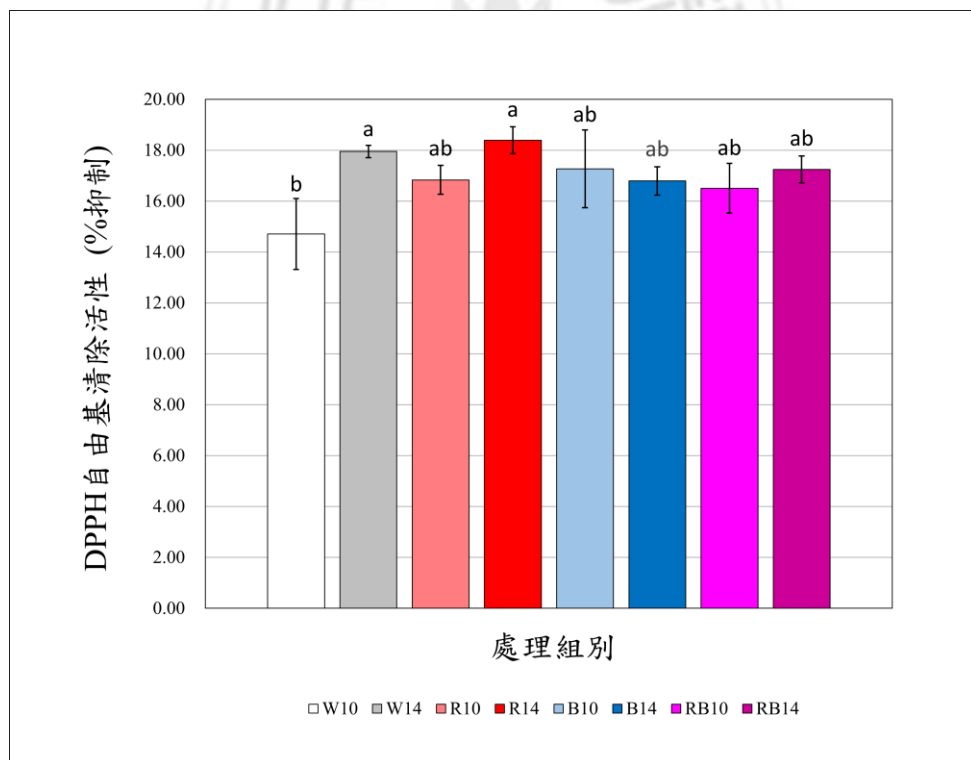


圖 4.6 不同光波長及光週期對菠菜 DPPH 自由基清除活性之影響

^z圖中不同英文字母以根據鄧肯氏新多變域檢定而呈現顯著差異(P<0.05)

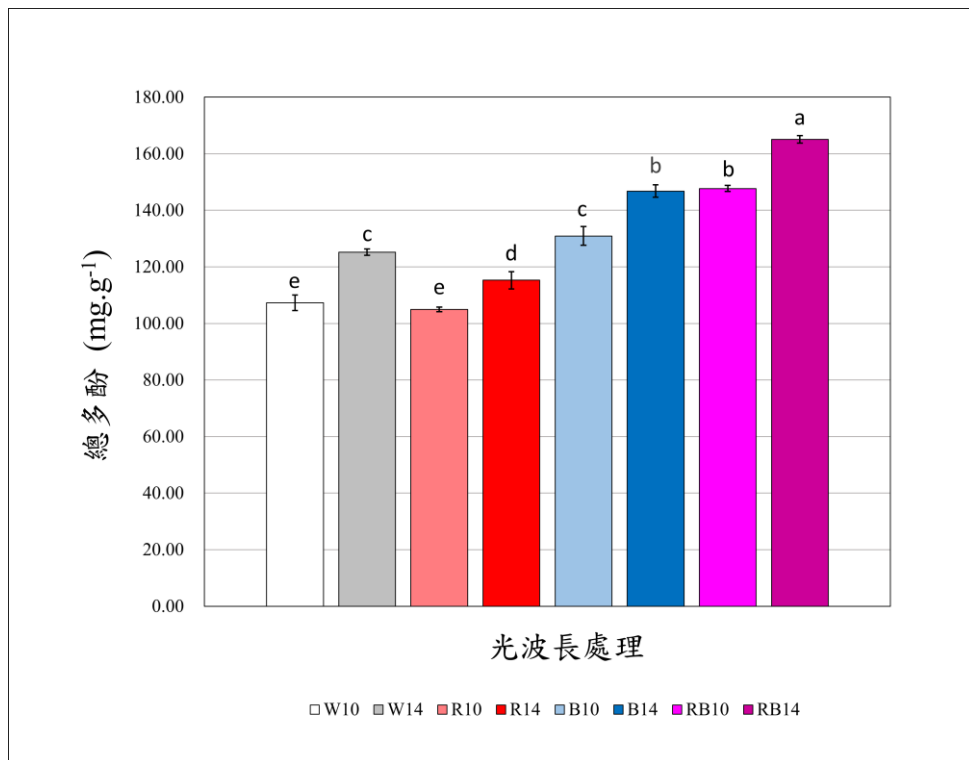


圖 4.7 不同光波長及光週期對菠菜的總酚含量之影響

^z 圖中不同英文字母以根據鄧肯氏新多變域檢定而呈現顯著差異(P<0.05)

第五章

討論

本研究結果發現在紅光 14 h 的處理下的菠菜(R14)鮮重及乾重均為最高 (表 4.1)。此結果與 Nguyen 等人(2021)在光週期 12 h 以紅、藍、綠 LED 栽培菠菜之研究相似，發現紅光比例較高的處理其鮮、乾重最高，且同時也觀察到菠菜葉子的厚度會隨著紅光比例增加而增厚(Nguyen et al., 2021)，從上述結果可推論紅光波長搭配光週期 12 h 以上時能增加植株的質量。然而對菠菜而言，影響其生長之因素，不僅限於光質和光週期，從他人研究中發現其它環境因素會使其生長改變。然而 Ohashi-Kaneko 等人(2007)的研究結果中發現儘管使用光週期 12 h 並以單紅光栽培菠菜，但其乾重及葉面積無顯著高於白光，原因可能為菠菜受到其它環境因素影響，如該實驗使用較低溫度(20°C)和較高的光強度(300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (Ohashi-Kaneko, Takase, Kon, Fujiwara, & Kurata, 2007)。具上述推論光強度對菠菜亦有極大影響，且在 Agarwal 等人(2018)研究中發現，使用低光強度(60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)單紅光處理下導致菠菜發育不良，其鮮重、葉面積、葉片數与其它不同比例的紅藍光、白光處理相比顯著較低 (Agarwal, Gupta, Barman, & Mitra, 2018)。

針對紅藍光比例組合的重要性，本研究結果發現使用紅光 50%及藍光 50%的紅藍光組合(RB10、RB14)不利於菠菜生長(表 4.1)。而在 Tang 等研究中表明萵苣會隨著紅藍光譜中的藍光比例多寡而影響其生長，當藍光增加至 5%~20%時，萵苣的生物量獲得了提升(Tang et al., 2009)；當藍光比例逐漸增加到 25%~50%後，鮮重、葉長和葉面積等生物量也會逐漸減少，此表現符合本研究菠菜在 RB10 與 RB14 兩組實驗中生長下的生物量低於紅光及白光(對照組)之處理。藉由他人結果推測本研究 RBLED 實驗處理的菠菜生長不符合預期，其原因在於實驗所使用的 RBLED 中藍光比例為 50%，對該菠菜而言屬高比例藍光，Agarwal 等人(2018)指出藍光會增加葉綠體光氧化，對植物光合作用裝置造成傷害導致植物生長不佳。

此外當紅藍光組合比例以 100%藍光 0%紅光(B10、B14)栽培菠菜時，會導致其生長不佳(表 4.1)，並且菠菜在光週期 10 小時且以全藍光的生長條件下，對其抑制生長的效果更加顯著，此現象可在該處理的最低鮮重及乾重中發現。

在圖 4.1 的各組開花率比較中可發現菠菜在種植後第 21 天，通常在此階段生長的菠菜是不會開花的，然而於本研究 B10 與 B14 兩組處理中發現提前開花一周之現象，此提前開花表現亦可在其它植物研究中觀察到，Piovene 等人發現藍光占主要比例時，草莓植物的開

花預計會提前一周，而光照中藍色比例較高的杜鵑花植物的開花也會發生同樣的情況(Piovene et al., 2015)。除使用藍光波長影響植株開花的研究發現外，藍光波長也可能會對植物的生長造成的加速效果，如在白色 LED 光譜的基礎上透過調整光源設備以使用不同的色溫，進而分為冷光和暖光來影響菠菜之生長研究中，亦發現藍光比例較高的冷光處理影響了菠菜生長期，冷光相比其它組別的菠菜提前一周出現了戟狀葉(Burattini, Mattoni, & Bisegna, 2017)。

如前言所述菠菜屬於長日照作物，一旦所受光照時間超過臨界的日長便會使植株開花或提早開花。本研究發現菠菜在光週期 14 h 的條件下開花數均高於 10 h 處理（圖 4.1），其結果在第 28 天及 35 天的 W14、R14、B14、RB14 均符合長日照植物在長光週期下的開花表現。然而在 B10 光照下，儘管其處理屬於短日照，但菠菜開花率在第 28 及 35 天皆與 W14 和 B14(屬長日照條件)處理相近，此結果表示全藍光可能具有誘導菠菜開花之效果。另一 R14 組屬長日照處理，其開花數卻明顯低於其它光週期 14 h 處理，由此推測全紅光波長具有抑制菠菜開花之效果。且在第 35 天的光週期 10h 處理中，可發現同時具有 50%紅光波長與 50%藍光波長的 RB10 組合，實驗開始至結束依然無出現任何開花跡象，進而推測菠菜在紅藍光組合條件下，紅光抑制開花的效果高於藍光促進開花的效果，而使其不開花(圖 4.1)。

紅光與藍光分別能抑制及促進菠菜開花之效果和 Gautam, Terfa, Olsen, 與 Torre (2015)的研究結果相似，其結果發現使用紅光會減少矮牽牛花開花的數量，而藍光則會促進開花。同樣於菊花的研究中亦發現，在光週期 14 h 藍光下約有 80%~90%的植物開花，且在紅光、白光下所有的植物皆被完全抑制開花，當中也表明了比起藍光或白光處理，全紅光的抑制開花效果最佳 (Nissim-Levi et al., 2019)。此外本研究發現，在紅光栽培下光週期 14 h 的抽苔長顯著高於 10 h 的抽苔長 (圖 4.2)，而藍光正好相反。另外菠菜在紅藍光的照射下無論光週期是 10 h 或 14 h，對抽苔長的生長均無顯著影響。

在色素表現方面 (表 4.2)，光週期較短的 10 h 菠菜總葉綠素及類胡蘿蔔素之含量有著高於 14 h 處理的趨勢。此結果和 Ali, Khandaker, 與 Oba (2009)的研究結果相似，將紅菠菜光週期 6 h 延長至 12 h 時，總葉綠素會依照光週期的增加也隨之提升其含量，且在 12 h 時下紅菠菜的總葉綠素到達最高含量，但將光週期延長至 18h 至及 24 h 後則開始逐步減少。此外於不同植物的光週期研究中，延長光週期(16 h - 24 h)和缺乏營養的條件下會對浮萍(*Landoltia punctata*)的葉綠素合成及光合速率產生負面影響(Liu et al., 2018)；反之杉木(*C. lanceolata*)若暴露於長光週期 16 h 的條件下，其葉綠素 *a*、葉綠素 *b*、總葉綠素含量，在大多數光質下顯著高於短光週期 8 h 處理(Xu, Yang, Cheng,

Liu, & Liang, 2020)。藉由他人研究可得知，光週期對植物的影響會因不同種植物及光質而有所不同，對本研究的菠菜而言，長日照條件較不利於白光、紅光、及紅藍光的類胡蘿蔔素及葉綠素積累。另外本研究菠菜在四種光波長處理的葉綠素含量比較下(表 4.2)，可觀察到單藍光均顯著高於其它處理，此一結果符合 Tang 等(2009)的萵苣生長在不同紅藍光比例下，藍光比例越高葉綠素及類胡蘿蔔素含量也越高，表明藍光有利於萵苣及菠菜葉綠素與類胡蘿蔔素合成的趨勢。

於菠菜的硝酸鹽離子濃度中可觀察到紅光、藍光處理的光週期 14 h 顯著低於 10 h 含量(表 4.3)，尤其在藍光處理下差異甚大，菠菜在光週期 10 h 及 14 h 的硝酸鹽含量則分別為最高及最低。其原因可能是藍光波長促進可溶性蛋白合成，導致酶和 NADPH 的供應增加，而這些酶和 NADPH 用於減少葉片中硝酸鹽含量(Fan et al., 2019)，所以植物經長時間藍光照射後(如 B14)，硝酸鹽濃度會有較大幅度下降之表現，而該現象並無發現在較短光週期 10 h 中(B10)。另外縮短光週期導致硝酸鹽含量提高之現象在 Cantliffe 的研究也可觀察到，其蔬菜生長在添加氮肥的條件下縮短光週期(12 h 或更短)，可以有效增加植株的硝酸鹽含量(Cantliffe, 1972)。由此推測菠菜的硝酸鹽含量在藍光栽培下更易受光週期影響，使其含量差異甚大。而 RB 處理下的 10 h 與 14 h 光週期對於菠菜的硝酸鹽含量影響則是收效甚微，且對照組

(白光)的光週期對硝酸鹽之含量也與 RB 光相似，這兩種光源中均含有紅、藍波長，推測菠菜在含有紅、藍光的生長下，硝酸鹽含量不受光週期變化的影響，僅在單紅、藍光的光週期變化較會影響菠菜的硝酸鹽含量。單紅光、藍光在光週期 14 h 的硝酸鹽含量均顯著低於 W14，且 RB14 與 W14 的硝酸鹽含量無顯著差異，該結果與 Ohashi-Kaneko 等人(2007)研究中相似，結果發現在光週期 12 h 的紅色或藍色光波長下種植的菠菜，比在白光所獲得的硝酸鹽還要少。

在菠菜的鈉及鉀含量分析結果發現白光及紅光處理的光週期 10 h 鈉含量顯著低於 14 h 光週期 (表 4.3)，鉀含量則為光週期 10 h 均顯著高於 14 h 光週期，可觀察到兩光波長處理在延長光週期後使鈉和鉀含量分別顯著增加及減少；而菠菜在藍光處理下的鈉和鉀含量則與白、紅光相反，延長光週期會使鈉含量顯著降低且同時增加其鉀含量。此外光週期對菠菜生長於紅藍光下的鈉和鉀含量並無顯著影響。

本研究菠菜之葉綠素螢光 F_v/F_m 值均介於正常範圍內 0.7~0.83。其中 W14、B14、W10 三組處理的 F_v/F_m 值最低 (圖 4.5)，並與其它處理有顯著差異且最接近 0.7 值，可推測菠菜生長在這三種處理下較受到逆境的影響，其中 B14 處理較受到逆境影響與 Agarwal 等(2018)指出菠菜在單藍光下生長受到嚴重脅迫之結果相似。此外本研究的單紅光處理(R10、R14)並無受到逆境影響，但與 Tang 等(2009)和 He, Qin,

與 Soon Chow 等人(2019)指出發現萵苣使用紅光生長後，PS II 的最大量子效率(Fv/Fm 值)最低且抑制其光合性能之結果相反。

菠菜在同光週期下不同光波長的 DPPH 自由基清除活性均無顯著差異(圖 4.6)，於相關的研究中指出西洋菜的癒合組織在不同光照條件下抗氧化能力並無顯著差異(Klimek-Szczykutowicz et al., 2021)。如圖 4.7 可觀察出菠菜在同波長的 14 h 光週期總多酚含量皆顯著高於 10 h，此趨勢與 Ali 等(2009)紅菠菜在 6 h 延長光週期至 12 h 後，總多酚含量增加之結果相似。此外菠菜生長於紅藍光處理下在光週期 14 h 的總多酚含量均顯著高於其它處理，符合他人研究中指出藍光 LED 與紅光 LED 的相結合照射，相比只使用單藍光、單紅光，紅藍光會進一步加速誘導萵苣中的酚類化合物及抗氧化劑積累(Johkan, Shoji, Goto, Hashida, & Yoshihara, 2010)。另外藍光也分別在光週期 10 h 或 14 h 中，除紅藍光外亦均高於其它組別，且在相關研究中指出萵苣的多酚濃度和抗氧化能力會隨著 LED 藍光比率的增加而提升(Son, & Oh, 2013)。藉由以上結果推測，菠菜多酚含量生成較受到藍光波長的影響，且在藍光添加紅光的條件下會使酚類化合物更進一步積累。

第六章

結論

本研究藉由調整人工光源中可見光的波長，以此探討菠菜在特定波長(紅、藍、白、紅藍)下的變化之外，同時也測試在兩種光週期(10、14h)下菠菜的生理與生長反應。並從各式栽培處理中，找出能降低菠菜開花數之方法，亦同時能使菠菜的生長品質最佳化的組合。

菠菜在單獨紅光波長與光週期 14 h 的條件下(R14)，有著最高的鮮重、乾重，結果表明 R14 有利於增加菠菜的質量。然而使用單藍光和光週期 10 h (B10)處理，菠菜鮮重、乾重及葉面積最低並與其它處理相比有顯著差異。研究發現在菠菜栽培的第 35 天，其開花率在長日照 R14 及 RB14 處理下有抑制開花現象，相反的在短日照 10 h 單藍光(B10)處理下具有促進開花的效果。雖藍光波長在菠菜的質量和開花率上表現不佳，但從植物分析結果中可發現菠菜受到 10 h 或 14 h 光週期的藍光照射後能提升總葉綠素含量，且在光週期 10h 處理下的藍光(B10)更是顯著高於其它處理(W10、R10、RB10)。此外在多酚結果中亦發現，在同光週期條件下比起使用單紅光處理，單藍光更能提高總多酚含量，且當藍光添加紅光後，紅藍光的處理會更進一步提高菠菜的多酚含量。

研究限制及未來方向

從結論得知菠菜在 14 h 光週期下使用單紅光能有效抑制開花和增加質量，但卻相對減少了菠菜的營養成分，單藍光則與之相反。予菠菜最佳生長的光波長處理，應在紅、藍光波長之間的比例分配，建議他人未來研究中可使用更多混和紅、藍光的光源組合，使菠菜能更有效利用光質達到最佳的生長品質之目的。另外，本研究中施肥的處理，於各栽培容器中僅使用肥料 4 g (N:P:K=15:15:15) 與泥炭土混和，其過程中直至採收前均無再添加任何肥料，他人研究亦可施予其它肥料，如添加氮肥從而提高菠菜的生長。

參考文獻

中文文獻

高德錚. (2010). 影響蔬菜中硝酸鹽含量之探討. *臺中區農業改良場特刊*, 234-239.

許大全 (2013)。光合作用學。北京：科學出版社。

楊純明、李裕娟(2009)。從植物之光週期看發光二極體在農業生產上之應用潛力。作物，環境與生物資訊。

英文文獻

Agarwal, A., Dutta Gupta, S., Barman, M., & Mitra, A. (2018).

Photosynthetic apparatus plays a central role in photosensitive physiological acclimations affecting spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth in response to blue and red photon flux ratios. *Environmental and Experimental Botany*, 156, 170-182.

Ali, M. B., Khandaker, L., & Oba, S. (2009). Comparative study on functional components, antioxidant activity and color parameters of selected colored leafy vegetables as affected by photoperiods. *J.*

Food Agric. Environ, 7(3-4), 392-398.

Amtmann, A., & Sanders, D. (1998). Mechanisms of Na⁺ uptake by plant cells. In *Advances in botanical research* (Vol. 29, pp. 75-112). Academic Press.

Bjorkman, O. & Demmig, B. (1987). Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins, *Planta*, 170, 489-504

Bourget, C. M. (2008). An introduction to light-emitting diodes. *HortScience*, 43(7), 1944-1946.

Burattini, C., Mattoni, B., & Bisegna, F. (2017). The Impact of Spectral Composition of White LEDs on Spinach (*Spinacia oleracea*) Growth and Development. *Energies*, 10(9).

Cantliffe, D. J. (1972). Nitrate accumulation in vegetable crops as affected by photoperiod and light duration1. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 97(3), 414-418.

Cho, M. J., Howard, L. R., Prior, R. L., & Morelock, T. (2008). Flavonoid content and antioxidant capacity of spinach genotypes determined by high-performance liquid chromatography/mass spectrometry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(6), 1099-1106.

- Chung, Y. C., S. J. Chen, C. K. Hsu, C. T. Chang, and S. T. Chou. 2005. Studies on the antioxidative activity of *Graptopetalum paraguayense* E. Walther. *Food Chem.* 91:419–424.
- Edenharder, R., Krieg, H., Köttgen, V., & Platt, K. L. (2003). Inhibition of clastogenicity of benzo [a] pyrene and of its trans-7, 8-dihydrodiol in mice in vivo by fruits, vegetables, and flavonoids. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 537(2), 169-181.
- Fan, X. X., Xue, F., Song, B., Chen, L. Z., Xu, G., & Xu, H. (2019). Effects of blue and red light on growth and nitrate metabolism in pakchoi. *Open Chemistry*, 17(1), 456-464.
- Fan, X. X., Xu, Z. G., Liu, X. Y., Tang, C. M., Wang, L. W., & Han, X. L. (2013). Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Scientia horticultrae*, 153, 50-55.
- Gao, W., He, D., Ji, F., Zhang, S., & Zheng, J. (2020). Effects of daily light integral and LED spectrum on growth and nutritional quality of hydroponic spinach. *Agronomy*, 10(8), 1082.

- Gautam, P., Terfa, M. T., Olsen, J. E., & Torre, S. (2015). Red and blue light effects on morphology and flowering of *Petunia*× *hybrida*. *Scientia Horticulturae*, 184, 171-178.
- Genty, B., Briantais, J. M., Baker, N. R. (1989). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta*, 990:87-92.
- Govindjee (1995). Sixty-three years since Kautsky: Chlorophylla fluorescence. *Aust J Plant Physiol*, 22:131-160.
- Halliday, K., & Whitlam, G. C. (2007). *Light and Plant Development*. Oxford: Blackwell.
- He, J., Qin, L., & Soon Chow, W. (2019). Impacts of LED spectral quality on leafy vegetables: Productivity closely linked to photosynthetic performance or associated with leaf traits? *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(6), 16-25.
- Ho, C. H., Lin, S. H., Hu, H. C., & Tsay, Y. F. (2009). CHL1 functions as a nitrate sensor in plants. *Cell*, 138(6), 1184-1194.
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. (2003). *Introduction to Plant Physiology*

3 rd ed. John Willey and Sons. *Inc. USA*, 731.

Issa, A. Y., Volate, S. R., & Wargovich, M. J. (2006). The role of phytochemicals in inhibition of cancer and inflammation: New directions and perspectives. *Journal of Food Composition and Analysis*, *19*(5), 405-419.

Jackson, S. D. (2009). Plant responses to photoperiod. *New Phytologist*, *181*(3), 517-531.

Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S. N., & Yoshihara, T. (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience*, *45*(12), 1809-1814.

Jones, R. W., Brady, C. J., & Speirs, J. (1979). Ionic and osmotic relations in plant cells. RG, Wyn Jones.

Jones, M. A. (2018). Using light to improve commercial value. *Horticulture Research*, *5*.

Krarup, C., Moreira, I., Contreras, P., Matte, M., & Rodriguez, M. (1998). Hortalizas de estación fría. *Biología y diversidad cultural*. P. Universidad Católica de Chile, VRA, Facultad de Agronomía e

Ingeniería Forestal, Santiago, Chile. Disponible desde Internet en:

http://www.puc.cl/sw_educ/hort0498 (con acceso 05/11/2014).

Klimek-Szczykutowicz, M., Prokopiuk, B., Dziurka, K., Pawłowska, B.,

Ekiert, H., & Szopa, A. (2021). The influence of different

wavelengths of LED light on the production of glucosinolates and

phenolic compounds and the antioxidant potential in in vitro cultures

of *Nasturtium officinale* (watercress). *Plant Cell, Tissue and Organ*

Culture (PCTOC), 149(1-2), 113-122.

Ko, S. H., Park, J. H., Kim, S. Y., Lee, S. W., Chun, S. S., & Park, E.

(2014). Antioxidant effects of spinach (*Spinacia oleracea* L.)

supplementation in hyperlipidemic rats. *Preventive nutrition and*

food science, 19(1), 19-26.

Kunicki, E., Grabowska, A., Sękara, A., & Wojciechowska, R. (2010).

The effect of cultivar type, time of cultivation, and biostimulant

treatment on the yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Folia*

Horticulturae, 22(2), 9-13.

Lee, Y. J., Ha, J. Y., Oh, J. E., & Cho, M. S. (2014). The effect of LED

irradiation on the quality of cabbage stored at a low temperature.

Food Science and Biotechnology, 23, 1087-1093.

Li, Q., & Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 59-64.

Liu, Y., Wang, X., Fang, Y., Huang, M., Chen, X., Zhang, Y., & Zhao, H. (2018). The effects of photoperiod and nutrition on duckweed (*Landoltia punctata*) growth and starch accumulation. *Industrial Crops and Products*, 115, 243-249.

Maadane, A., Merghoub, N., Ainane, A., El Arroussi, H., Benhima, R., Amzazi, S., Bakri, Y., Wahby, I. (2015). Antioxidant activity of some Moroccan marine microalgae: Pufa profiles, carotenoids and phenolic content. *J Biotech*, 215:13-19.

Manivannan, A., Soundararajan, P., Park, Y. G., Wei, H., Kim, S. H., & Jeong, B. R. (2017). Blue and red light-emitting diodes improve the growth and physiology of in vitro-grown carnations ‘Green Beauty’ and ‘Purple Beauty’. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 58, 12-20.

Marschner, H., Kirkby, E. A., & Cakmak, I. (1996). Effect of mineral

nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. *Journal of experimental botany*, 47(Special_Issue), 1255-1263.

McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Plant nutrient functions and deficiency and toxicity symptoms. *Nutrient management module*, 9, 1-16.

Middleton, E., Kandaswami, C., & Theoharides, T. C. (2000). The effects of plant flavonoids on mammalian cells: implications for inflammation, heart disease, and cancer. *Pharmacological reviews*, 52(4), 673-751.

Nguyen, T. P. D., Jang, D. C., Tran, T. T. H., Nguyen, Q. T., Kim, I. S., Hoang, T. L. H., & Vu, N. T. (2021). Influence of green light added with red and blue LEDs on the growth, leaf microstructure and quality of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Agronomy*, 11(9), 1724.

Nissim-Levi, A., Kitron, M., Nishri, Y., Ovadia, R., Forer, I., & Oren-Shamir, M. (2019). Effects of blue and red LED lights on growth and flowering of *Chrysanthemum morifolium*. *Scientia Horticulturae*, 254, 77-83. doi:10.1016/j.scienta.2019.04.080

- Ohashi-Kaneko, K., Takase, M., Kon, N., Fujiwara, K., & Kurata, K. (2007). Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environmental Control in Biology*, 45(3), 189-198.
- Oosterhuis, D. M., Loka, D. A., Kawakami, E. M., & Pettigrew, W. T. (2014). The physiology of potassium in crop production. *Advances in agronomy*, 126, 203-233.
- Pate, J. S. (1980). Transport and partitioning of nitrogenous solutes. *Annual Review of Plant Physiology*, 31(1), 313-340.
- Pinho, P., Jokinen, K., & Halonen, L. (2017). The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. *Lighting Research & Technology*, 49(7), 866-881.
- Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., & Gianquinto, G. (2015). Optimal red:blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, 193, 202-208. doi:10.1016/j.scienta.2015.07.015
- Prajapati, K., & Modi, H. A. (2012). The importance of potassium in plant growth—a review. *Indian Journal of Plant Sciences*, 1(02-03), 177-186.

Ritchie, G. A. (2006). Chlorophyll fluorescence: What is it and what do the numbers mean. *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2005*, 34-42.

Sabzalian, M. R., Heydarizadeh, P., Zahedi, M., Boroomand, A., Agharokh, M., Sahba, M. R., & Schoefs, B. (2014). High performance of vegetables, flowers, and medicinal plants in a red-blue LED incubator for indoor plant production. *Agronomy for sustainable development*, 34, 879-886.

Sato, M., Ramarathnam, N., Suzuki, Y., Ohkubo, T., Takeuchi, M., & Ochi, H. (1996). Varietal differences in the phenolic content and superoxide radical scavenging potential of wines from different sources. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(1), 37-41.

Sager, J. C., & McFarlane, J. C. (1997). Radiation. *Plant growth chamber handbook*, (340), 1-29.

Schoefs, B. (2005). Plant Pigments: Properties, Analysis, Degradation. *Adv Food Nutr Res*, 49:41-91

Son, K. H., & Oh, M. M. (2013). Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various

combinations of blue and red light-emitting diodes. *HortScience*, 48(8), 988-995.

Sood, S., Gupta, V., & Tripathy, B. C. (2005). Photoregulation of the greening process of wheat seedlings grown in red light. *Plant molecular biology*, 59(2), 269-287.

Tang, Y. K., Guo, S. S., Ai, W. D., & Qin, L. F. (2009). *Effects of red and blue light emitting diodes (LEDs) on the growth and development of lettuce (var. Youmaicai)* (No. 2009-01-2565). SAE Technical Paper.

Tarakanov, I., Yakovleva, O., Konovalova, I., Paliutina, G., & Anisimov, A. (2012, October). Light-emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production. In *VII International Symposium on Light in Horticultural Systems 956* (pp. 171-178).

Thi-Phuong-Dung, N. G. U. Y. E. N., Ngoc-Thang, V., QUANG-THACH NGUYEN, T. T. H., & TRAN, P. B. (2022). Growth and quality of hydroponic cultivated spinach (*Spinacia oleracea* L.) affected by the light intensity of red and blue LEDs. *Sains Malaysiana*, 51(2), 473-483.

Thomas, B., & Vince-Prue, D. (1997). *Photoperiodism in plants* (2th ed.).

Academic Press, London. 428pp.

Vu, N. T., Kim, Y. S., Kang, H. M., & Kim, I. S. (2014). Influence of

short-term irradiation during pre-and post-grafting period on the

graft-take ratio and quality of tomato seedlings. *Horticulture,*

Environment, and Biotechnology, 55, 27-35.

Wang, R., Tischner, R., Gutiérrez, R. A., Hoffman, M., Xing, X., Chen,

M., Coruzzi, G., & Crawford, N. M. (2004). Genomic analysis of the

nitrate response using a nitrate reductase-null mutant of Arabidopsis.

Plant physiology, 136(1), 2512-2522.

Wang, S., Wang, X., Shi, X., Wang, B., Zheng, X., Wang, H., & Liu, F.

(2016). Red and blue lights significantly affect photosynthetic

properties and ultrastructure of mesophyll cells in senescing grape

leaves. *Horticultural Plant Journal*, 2(2), 82-90.

Xu, Y., Yang, M., Cheng, F., Liu, S., & Liang, Y. (2020). Effects of LED

photoperiods and light qualities on in vitro growth and chlorophyll

fluorescence of *Cunninghamia lanceolata*. *BMC Plant Biology*,

20(1), 1-12.

- Yamaguchi, T., H. Takamura, T. Matoba, and J. Terao. 1998. HPLC method for evaluation of free radical-scavenging activity of foods by using 1,1,-diphenyl-2-picrylhydrazyl. *Biotechnol. Biochem.* 62:1201–1204.
- Yanagi, T., Okamoto, K., & Takita, S. (1996, August). Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. In *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems 440* (pp. 117-122).
- Yorio, N. C., Goins, G. D., Kagie, H. R., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2001). Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience*, 36(2), 380-383.
- Zhang, J. L., Flowers, T. J., & Wang, S. M. (2010). Mechanisms of sodium uptake by roots of higher plants. *Plant and soil*, 326, 45-60.