

不同光譜補光處理對紅葉萵苣育苗品質之影響¹

游之穎²、鍾雨橋³、林立⁴

摘要

紅葉萵苣於設施內育苗常有紅色呈色不佳之情形。尤其宜蘭地區秋冬季天氣常處於低光高溼狀態，更易使設施內育苗之紅葉萵苣呈現綠葉狀態，並產生避陰綜合症 (shade-avoidance syndrome; SAS)，出現莖部細弱、葉片減少與根系生長緩慢等問題，導致育苗時間延長與苗株品質下降，影響後續生長和產量。本研究探討紅葉萵苣‘紅奶油’育苗期以不同光譜 (R:B=1:0、R:B=9:1、R:B=7:1、R:B=5:1、R:B=4:1、R:B=3:1、R:B=2:1) 進行補光處理，對紅葉萵苣幼苗生長與品質之影響，並以玻璃溫室內自然光源為對照組。試驗結果顯示，補光處理能顯著改善紅葉萵苣苗株之生長表現，其中 R:B=4:1 補光處理之苗株莖徑較對照組增加 93%，葉數增加 66%，壯苗指數為對照組 9.68 倍，絕對生長速率為對照組 5.24 倍，為使用補光處理提升紅葉萵苣‘紅奶油’育苗品質及生長速率效果最佳之紅藍光比例。

關鍵字：避陰綜合症、LED、紅光、藍光

-
1. 農業部花蓮區農業改良場研究報告 312 號。
 2. 農業部花蓮區農業改良場蘭陽分場助理研究員。
 3. 農業部花蓮區農業改良場蘭陽分場專案研究助理。
 4. 農業部花蓮區農業改良場作物環境科副研究員。

前言

宜蘭地區秋冬季因東北季風容易滯留，而當氣流西進遇山後由於爬坡效應，水氣上升凝結使得雲雨量明顯增多，相對日照量也隨之減少（徐與曾，2007）。而近年氣候變遷，宜蘭地區秋冬季連續降雨及強降雨等極端氣候頻繁發生，使栽培設施內光照長期不足。當植物生長於遮陰或光照不足的環境下，光質呈低R/FR、低藍光及低UV等，會促進生長素（auxin）、激勃素（gibberellin, GA）及莖苔素內酯（brassinolide, BR）的信號傳導及反應；抑制茉莉酸（jasmonic acid, JA）及水楊酸（salicylic acid, SA）的信號傳導及反應，使植物產生形態與生理變化（Ballaré and Pierik, 2017; Shafiq *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2019），這系列反應統稱為避陰綜合症（Shade avoidance syndrome, SAS）。避陰綜合症又稱避陰反應、避陰效應、避陰迴避、遮蔽效應等，避陰綜合症包含下胚軸過度生長、莖強度變弱、節間和葉柄快速伸長、葉片偏下生長（hyponasty）、葉片老化加速；作物頂端優勢和向光性增強，抑制分枝數；植株地上部與地下部之資源分配改變，使根系生長受到限制；植物免疫系統減弱，易感病蟲害等表現（Ballaré and Pierik, 2017; Courbier and Pierik, 2019; Fittinghoff, 2008; Formisano *et al.*, 2022; Lin, 2002; Liu *et al.*, 2021; Morelli and Ruberti, 2000）。宜蘭地區因秋冬季長期的低光高濕環境，栽培設施內光強度下降及光質比例變化，加劇蔬菜育苗避陰綜合症產生，蔬菜苗株莖部徒長細弱、下胚軸過長、根系生長遲緩等問題，延長蔬菜成苗時間且使苗株品質降低。

額外補光能改變設施內光強度與光質，減輕或避免幼苗出現避陰綜合症，改善幼苗品質與育苗時間。如補光可顯著增加苦瓜幼苗的葉面積、提高葉綠素含量、降低株高、增加莖徑，能有效抑制苦瓜苗徒長，有利於在早春低溫陰雨期間培育苦瓜壯苗（童等，2018）。白色螢光燈與發光二極體（LED, light-emitting diode）為常見的補光光源，LED為一種半導體光源，具有效率高、壽命長、不易破損等優點，相較於傳統光源（高壓鈉燈、金屬鹵化物燈）在低光度下能量轉換效率高，及較省電等優點（許，2013）。前人研究顯示使用特定光色LED補光的效果較白色螢光燈佳。如相同光強度下，與白色螢光燈照明相比，三種蔬菜在藍色和紅色LED光下的葉子數量顯著增加。紅葉萵苣在較低光強度（ $270 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）的白色螢光燈處理下，葉片可吸收的波長（PAR）較高光強度（ $570 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）減少30%（Cammarisano *et al.*, 2021）。在相同產量下，紅葉萵苣使用LED（ λ P: 451、634和665 nm）處理所需的能量為白色螢光燈的一半（Cammarisano *et al.*, 2021）。與白色螢光燈相比，紅藍光LED處理下的萵苣和甜椒的芽長和根頸直徑（root collar diameter）顯著更大，萵苣幼苗的芽生長速度較快，胡瓜幼苗的根長、根乾物質和迪克森品質指數（Dickson quality index, DQI）顯著增加，萵苣和胡瓜幼苗的芽乾重和總乾重更高（Silva *et al.*, 2016）。以全紅光LED照射的萵苣幼苗的地上部鮮重比白色螢光燈增加25%（Hernández-Adasme *et al.*, 2022）。

不同補光光質對作物性狀有所差異，許多研究顯示紅光和藍光改善作物生長或品質的效果較佳。如比較紅光、藍光、黃光和綠光LED照射，藍光處理的幼苗光合速率顯著增加，紅光處理的幼苗的葉片數量和葉綠素含量增加。黃、綠光處理的幼苗則矮小且新葉黃化（Su *et al.*, 2014）。藍光下生長的胡瓜幼苗的Rubisco生物合成、*rca*、*rbcS*和*rbcL*的表達、Fv/Fm和PSII電子傳遞的量子產率均較白光顯著增加（Su *et al.*, 2014）。紅光LED處理能顯著增加鳳仙花莖徑，藍光LED處理則能顯著提升鳳仙花和百日草葉片數量，以及顯著增加矮牽牛的莖徑（Akbarian *et al.*, 2016）。兩個水稻品種IR1552（紫葉）和TS10（綠葉）幼苗以LED照射14 d，紅光和綠光照射下會誘導地上部伸長，而藍光會抑制地上部伸長，使其健康指數[（莖直徑/株高）×生物量]最高（Chen *et al.*, 2014）。藍色LED刺激番茄幼苗中總酚類、抗氧化劑和總黃酮類化合物的生物合成（Kim *et al.*, 2014）。相同光強度 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 下，由於有效光子通量密度降低，紅藍紫光（RBP）、紅藍綠光（RBG）和紅藍加遠紅光（RBF）處理之萵苣地上部鮮重和乾重均顯著低於紅藍光（RB）處理（Li *et al.*, 2021a）。補充UV-A和遠紅光使辣椒幼苗高度增加，而藍光則降低。藍光和UV-A處理提高了幼苗的緊實度和幼苗指數，而遠紅光處理有明顯的抑制作用（Liu *et al.*, 2022）。

此外，研究指出紅光與藍光組合處理之效果會更佳。如相較於紅光處理，紅葉萵苣以紅藍光處理有較高的地上部鮮重、葉片較深紅，以及較高的花青素和抗壞血酸含量，總體偏好度最高 (Lee *et al.*, 2023)。萵苣葉綠素 a/b 比值和類胡蘿蔔素含量在含藍光 LED 照射下增加 (Johkan *et al.*, 2010)。櫻桃番茄幼苗以白色螢光燈為對照、紅光 LED (R)、藍光 LED (B)、綠色 LED (G) 單色或組合處理，RB 和 RBG 處理的植株比對照組的植株較為矮小且強壯，含有藍光之 B、RB 和 RBG 處理的碳水化合物含量較高，且葉片淨光合作用、電子傳輸速率、光系統 II 光化學量子效率和 F_v/F_m 明顯高於其他處理 (Liu *et al.*, 2012)。紅光 LED 和藍光 LED 聯合處理胡瓜，能降低莖的伸長，增加乾物質、苗株緊實度、葉面積、葉重和 SPAD 值，與螢光燈相比，50%紅光與 50%藍光組合補光能提高乾物質、乾葉重與總葉面積比，以及緻密度 (地上部乾重 (mg)/株高 (cm)) (Jeong *et al.*, 2020)。水稻幼苗葉片中花青素的含量以紅藍光組合處理最高，但在全紅光 and 全藍光處理中含量較低 (Chen *et al.*, 2014)。不同紅藍光比對作物之影響也有差異，前人研究以全藍光、50%紅光 50%藍光、30%紅 70%藍光照射皆能增加胡瓜幼苗莖直徑，其中 50%紅光 50%藍光與 30%紅光 70%藍光增加地上部鮮乾重，而全藍光照射則會使苗高增加，導致緻密度下降。三者以處理 50%紅光 50%藍光之幼苗品質最佳 (Jeong *et al.*, 2020)。以 75%紅光 25%藍光處理可降低大多數植物的下胚軸和芽高度，並增加根鮮重和根長度，有助於產生優質幼苗 (Akbarian *et al.*, 2016)。萵苣葉片中葉綠素 a、葉綠素 b 和類胡蘿蔔素的含量隨著紅光比例的減小而增加，萵苣葉片中葉綠素和類胡蘿蔔素含量以 0%紅光 (100%藍光) 處理最高，100%紅光處理最小，顯示藍光在葉綠素和類胡蘿蔔素的合成中發揮著重要作用 (Chen *et al.*, 2021)。此外，光質的影響會受品種不同而異，白光添加藍光處理萵苣 'Red Butter' 的植株鮮乾重、地上部鮮乾重與地下部鮮乾重顯著較低，而白光添加藍光處理僅抑制萵苣 'Yanzhi' 的根乾重 (Li *et al.*, 2021b)。Chen 等人 (2021) 指出不同指標下植物對紅光和藍光比例的反應有所不同。因此選擇紅光和藍光的最佳比例之前，需要確定最優先的指標。

為改善宜蘭地區秋冬季有機蔬菜在低光環境育苗時間長，苗株容易徒長和細弱等影響苗株品質問題。本研究利用紅藍可調式 LED 燈管作為補光光源，探討補光與不同紅藍光比例 (R:B=1:0、R:B=9:1、R:B=7:1、R:B=5:1、R:B=4:1、R:B=3:1、R:B=2:1) 處理，對設施內紅葉萵苣育苗之品質影響與改善效果。

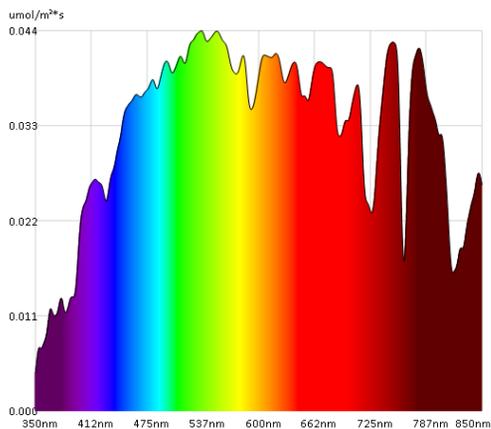
材料與方法

一、試驗材料

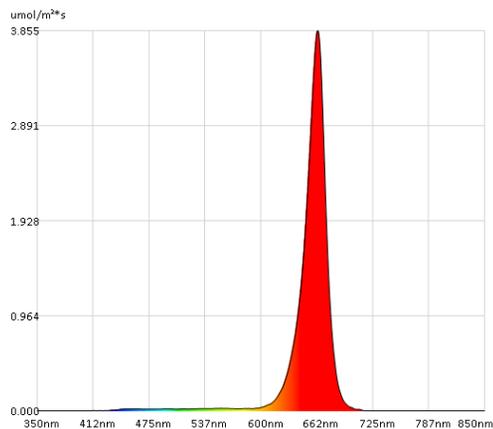
1. 供試品種：本試驗以農友種苗公司出產的萵苣 '紅奶油' 為供試品種。
2. 育苗介質：栽培介質為紐荷仕泥炭土 (登記字號：進輔 0565005)。

二、試驗處理

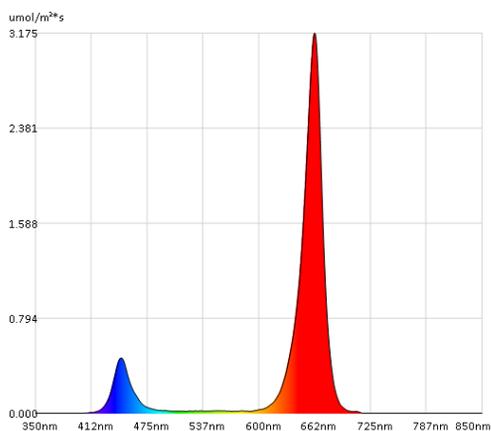
種子播種於 128 穴盤並放至 4°C 環境 2 d 後，置於蘭陽分場玻璃溫室內植床上進行栽培管理。試驗處理使用紅藍可調式 LED 燈管 (Red 660 nm, Blue 450 nm, 宏鑫光電科技股份有限公司, 臺灣) 設置不同紅藍光比 (R:B)，分別為 R:B=1:0、R:B=9:1、R:B=7:1、R:B=5:1、R:B=4:1、R:B=3:1、R:B=2:1 (光質波長分布如圖一)。於每日 08:00-18:00 進行 21 d 補光處理。對照組為未無外補光之玻璃溫室內自然光源 (光質波長分布如圖一)。試驗設計為 RCBD，每處理 6 重複，每重複 64 株。各補充處理之光強度 (PPFD) 大致相近，約在 83-101 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，實際光強度與光質分布詳如表一。



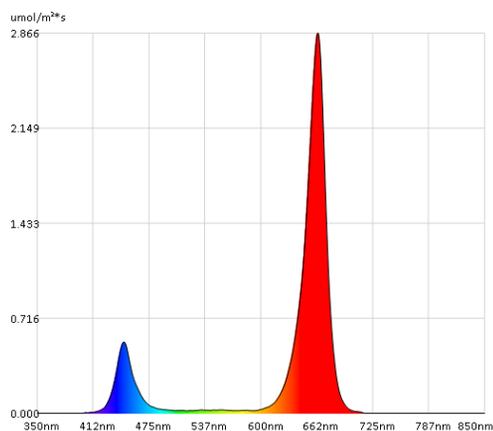
對照組



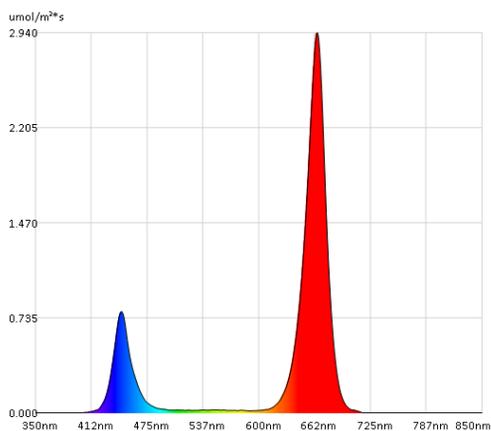
R:B=1:0



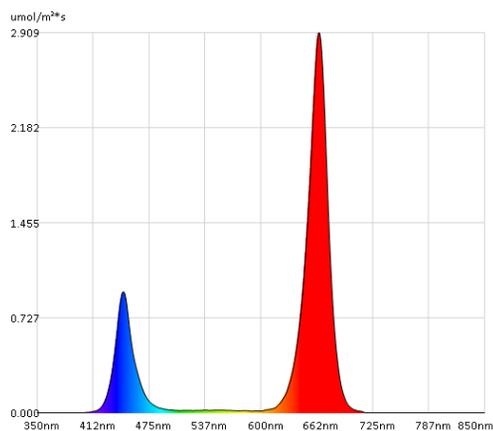
R:B=9:1



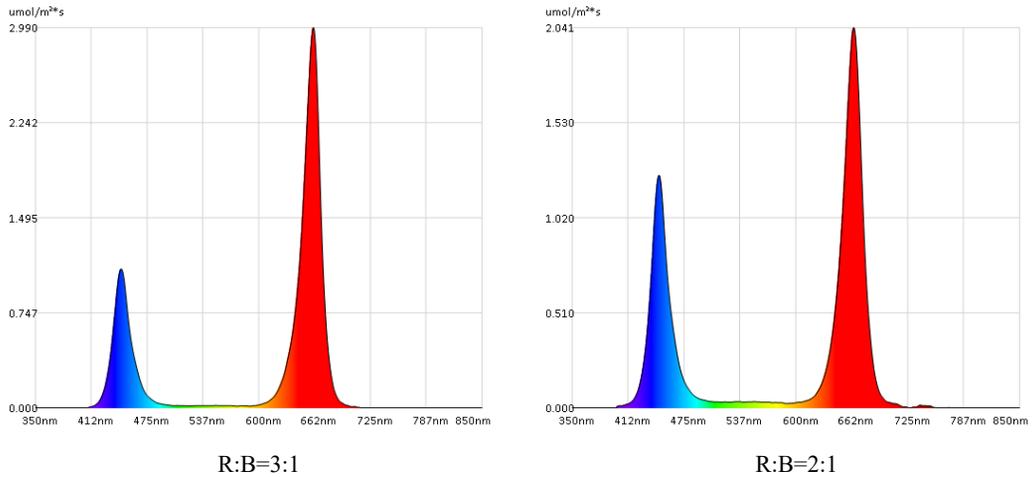
R:B=7:1



R:B=5:1



R:B=4:1



圖一、不同光譜補光處理之光質波長分布

Fig. 1. The wavelength distribution of LED tube of different artificial lighting treatments.

表一、各處理實際光強度與光質分布

Table 1. Actual light intensity and light quality distribution of each treatment.

Treatment	PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	IR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Red ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Green ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Blue ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R/B	R/IR
Control	12.57	4.72	4.06	4.25	3.46	1.18	0.9
R:B=1:0	96.47	0.32	92.55	2.39	1.53	62.47	301.5
R:B=9:1	85.45	0.28	72.70	2.20	10.55	6.88	273.9
R:B=7:1	83.18	0.30	68.92	2.25	12.00	5.75	251.7
R:B=5:1	96.78	0.39	79.49	2.07	18.81	4.22	209.3
R:B=4:1	93.40	0.34	70.76	1.89	20.75	3.40	217.5
R:B=3:1	101.06	0.11	73.36	1.68	26.01	2.82	678.7
R:B=2:1	89.94	0.72	55.83	3.02	31.09	1.79	87.6

三、 調查與分析

於播種後第 21 d 以量尺量測株高、下胚軸長、葉長、葉寬。以游標尺量測莖長、莖徑。計算每株葉片數，將植株地上部與地下部去除介質清潔後，以電子天平分別量測鮮重。之後取下所有苗株葉片測量總葉面積。將植株於 50°C 烘乾 48 h 後量測乾重。其量測方式如下：

株高：將植株壓平測量根莖交接處至葉片頂端的長度。

下胚軸長：將植株壓平測量基部至子葉基部的長度。

葉長：取目測葉面積最大的葉片，將葉片壓平後利用量尺測量葉片最長的長度（含葉柄）。

葉寬：取目測葉面積最大的葉片，將葉片壓平後利用量尺測量葉片最寬的寬度。

葉片數：完全展開且長度 1 cm 以上之葉片數量。

莖長：利用游標尺測量子葉節至頂芽節之長度。

莖徑：利用游標尺量測莖之最大寬度。

葉面積：將苗株所有葉片分離後，把所有葉片壓平夾於透明軟墊，並利用葉面積測量儀（LI-3000C Area Meter, LICOR, USA）量測總葉面積。

地上部、地下部鮮重：以電子天平量測每株鮮重。

地上部、地下部乾重：於 50°C 烘乾植體 48 h 後以電子天平量測每株乾重。

壯苗指數：採用方與張（2007）文獻之穴盤苗壯苗指數計算公式： $[\text{莖徑 (cm)} / \text{株高 (cm)} + \text{地下部乾重 (g)} / \text{地上部乾重 (g)}] \times \text{全株乾重 (g)}$ 。

絕對生長速率（absolute growth rate：AGR）：採用戴等（2002）文獻之計算公式 $\text{全株乾重 (g)} \times 100 / \text{生育日數}$ 。

統計分析方法：試驗採完全隨機設計（Completely randomized design, CRD），以 CoStat 6.4 (CoHort Software, Monterey, CA) 統計軟體，進行變方分析及最小顯著差異分析（Least significant difference, LSD）比較各處理間是否具有顯著差異（ $P < 0.05$ ）。

結 果

一、不同光質補光處理之萵苣‘紅奶油’苗株生育性狀調查

萵苣‘紅奶油’未經補光處理之對照組株高為 4.78 cm，補光處理中 R:B=1:0、R:B=9:1 和 R:B=7:1 處理之株高皆顯著高於對照組，分別為 5.39、5.57 和 5.36 cm。R:B=5:1、R:B=4:1 和 R:B=3:1 則與對照組無顯著差異，R:B=2:1 處理之株高 4.20 cm 顯著低於對照組（表二）。莖長方面，除了 R:B=2:1 為 3.24 mm 與對照組無顯著差異之外，其他光質處理之莖長皆顯著高於對照組（表二）。莖徑部分，所有補光處理皆顯著高於對照組之莖徑 1.97 mm，其中以 R:B=4:1 處理之莖徑 3.81 mm 顯著最高（表二）。上述結果顯示以紅藍光補光能增加萵苣‘紅奶油’之株高、莖長與莖徑，但其效果會受紅藍光比例影響。

表二、萵苣‘紅奶油’苗株在不同紅藍光比例補光處理下植株生長情形

Table 2. The growth performance of ‘Red Butter’ lettuce seedlings supplemented with different ratios of red and blue light.

Treatment	Plant height (cm)	Stem length (mm)	Stem thickness (mm)
Control	4.78 b ^z	2.83 c	1.97 c
R:B=1:0	5.39 a	3.60 ab	3.39 b
R:B=9:1	5.57 a	3.37 ab	3.27 b
R:B=7:1	5.36 a	3.74 a	3.33 b
R:B=5:1	4.83 b	3.50 ab	3.41 b
R:B=4:1	4.77 b	3.63 ab	3.81 a
R:B=3:1	4.42 bc	3.51 ab	3.40 b
R:B=2:1	4.20 c	3.24 bc	3.22 b
Significance ^y	***	**	***

^z Means within each column followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ by the LSD test.

^y ** and *** represent significant at $P < 0.01$ and $P < 0.001$.

二、不同光質補光處理之萵苣‘紅奶油’苗株葉片性狀調查

萵苣‘紅奶油’葉片性狀部分，R:B=1:0、R:B=9:1、R:B=7:1 處理之葉長顯著高於對照組 4.44 cm，其中以 R:B=9:1 處理之葉長 5.17 cm 最高，而 R:B=2:1 葉長為 3.91 cm 顯著低於對照組，補光處理對葉寬則無顯著影響（表三）。所有補光處理之葉數與葉面積皆顯著高於對照組的 4.22 和 14.44 cm²，兩項皆以 R:B=4:1 處理最高，分別為 7.00 和 42.63 cm²，分別較對照組增加 66%和 195%（表三）。

表三、不同紅藍光比例補光處理之萵苣‘紅奶油’苗株葉片性狀調查

Table 3. The leaf trait of ‘Red Butter’ lettuce seedlings supplemented with different ratios of red and blue light.

Treatment	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Numbers of leaves (No.)	Leaf area (cm ²)
Control	4.44 c ^z	3.77	4.22 c	14.44 d
R:B=1:0	4.97 ab	3.13	6.33 b	35.75 bc
R:B=9:1	5.17 a	3.40	6.78 ab	40.11 ab
R:B=7:1	5.08 a	3.26	6.56 ab	38.35 abc
R:B=5:1	4.51 bc	3.17	6.44 b	33.21 c
R:B=4:1	4.40 cd	3.24	7.00 a	42.63 a
R:B=3:1	4.16 cd	3.41	6.78 ab	37.99 abc
R:B=2:1	3.91 d	2.89	6.33 b	33.69 c
Significance ^y	***	ns	***	***

^z Means within each column followed by the same letter are not significantly different at $P < 0.05$ by the LSD test.

^y ns and *** represent nonsignificant and significant at $P < 0.001$.

三、不同光質補光處理之萵苣‘紅奶油’苗株地上部及地下部生物量調查

所有補光處理之萵苣‘紅奶油’每株地上部鮮重和地上部乾重顯著高於對照組的 0.317 g 和 0.0150 g，補光處理中以 R:B=4:1 地上部鮮重和地上部乾重 1.144 g 和 0.0734 g 最高，分別較對照組增加 261%和 389%（表四）。補光處理之也顯著較對照組的地下部鮮重 0.039 g 和地下部乾重 0.0021 g 高，地下部鮮重與地下部乾重以 R:B=2:1 處理最高，分別為 0.289 g 和 0.0193 g，較對照組增加 641%和 819%（表四）。此外，地上部鮮乾重與地下部鮮乾重大抵有隨處理紅光比例下降（藍光增加）而上升的趨勢。

表四、不同紅藍光比例補光處理之萵苣‘紅奶油’苗株鮮重與乾重

Table 4. The fresh weight and dry weight of ‘Red Butter’ lettuce seedlings supplemented with different ratios of red and blue light.

Treatment	Shoot fresh weight (g)	Shoot dry weight (g)	Root fresh weight (g)	Root dry weight (g)
Control	0.317 d ^z	0.0150 e	0.039 e	0.0021 d
R:B=1:0	0.938 bc	0.0554 cd	0.149 d	0.0086 c
R:B=9:1	0.999 bc	0.0577 bcd	0.176 cd	0.0097 c
R:B=7:1	0.955 bc	0.0587 bcd	0.164 cd	0.0093 c
R:B=5:1	0.876 c	0.0547 d	0.158 d	0.0113 c
R:B=4:1	1.144 a	0.0734 a	0.231 b	0.0161 b
R:B=3:1	1.016 ab	0.0676 ab	0.215 bc	0.0144 b
R:B=2:1	0.897 bc	0.0649 abc	0.289 a	0.0193 a
Significance ^y	***	***	***	***

^z Means within each column followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$ by the LSD test.

^y *** represent significant at $P < 0.001$.

四、不同光質補光處理之萵苣‘紅奶油’苗株之壯苗指數及絕對生長速率調查

各補光處理之萵苣‘紅奶油’壯苗指數皆顯著高於對照組 0.0098，其中以 R:B=4:1、R:B=3:1 和 R:B=2:1 壯苗指數顯著較高，分別為 0.0949、0.0819 和 0.0903，為對照組的 9.68 倍、8.36 倍和 9.21 倍（表五）。對照組絕對生長速率 0.061 顯著低於各補光處理，補光處理中又以 R:B=4:1 為 0.320 顯著最高，為對照組的 5.24 倍，其次為 R:B=2:1 為 0.301，是對照組 4.93 倍（表五）。此外，萵苣‘紅奶油’在不同光質處理下第 21 d 之苗株生長情形，請參閱圖二和圖三。

表五、不同紅藍光比例補光處理之萵苣‘紅奶油’苗株壯苗指數及絕對生長速率

Table 5. Seedling indexes and absolute growth rate of ‘Red Butter’ lettuce seedlings supplemented with different ratios of red and blue light.

Treatment	Seedling index ^z	Absolute growth rate
Control	0.0098 c ^y	0.061 d
R:B=1:0	0.0504 b	0.228 c
R:B=9:1	0.0514 b	0.241 c
R:B=7:1	0.0554 b	0.234 c
R:B=5:1	0.0610 b	0.236 c
R:B=4:1	0.0949 a	0.320 a
R:B=3:1	0.0819 a	0.266 bc
R:B=2:1	0.0903 a	0.301 ab
Significance ^x	***	***

^z Seedling index : [Stem thickness (cm)/ Plant height(cm)+ Root dry weight (g)/ Shoot dry weight(g)]×Whole plant dry weight (g). Absolute growth rate : Whole plant dry weight (g)×100/Days.

^y Means within each column followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$ by LSD test.

^x *** represent significant at $P < 0.001$.



圖二、萵苣‘紅奶油’在不同紅藍光比例補光處理下第 21 d 之苗株生長情形側視圖

Fig. 3. Side view of ‘Red Butter’ lettuce seedlings supplemented with different red (R) and blue (B) light ratios for 21 days.



圖三、萵苣‘紅奶油’在不同紅藍光比例補光處理下第 21 d 之苗株生長情形俯視圖

Fig. 3. Top view of ‘Red Butter’ lettuce seedlings supplemented with different red (R) and blue (B) light ratios for 21 days.

討 論

一、不同紅藍光比補光對株高性狀之影響

萵苣‘紅奶油’未經補光的對照組株高與 R:B=5:1、R:B=4:1 和 R:B=3:1 處理無顯著差異，但對照組莖徑顯著小於各補光處理，顯示低光環境對萵苣‘紅奶油’主要影響是造成其幼苗細弱（表二）。在各處理中，紅光比例較高（R:B=7:1 以上）之處理能顯著增加‘紅奶油’之株高，R:B=5:1 以下處理則無增加株高之效果（表二），此與前人研究以紅藍光補光，萵苣幼苗株高隨紅光比例上升而增加，其中 100%紅光處理之平均株高生長率達 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ，比 0%紅光（100%藍光）處理提高 61.5%（Chen *et al.*, 2021）結果相似。此外，以紅藍光 LED 補光能改善萵苣‘紅奶油’低光環境下莖長與莖徑減少之情形，所有補光處理皆可增加‘紅奶油’莖徑，其中以 R:B=4:1 效果最佳（表二）。除 R:B=2:1 以外的補光處理皆可顯著增加‘紅奶油’莖長（表二）。

二、不同紅藍光比補光對葉片性狀之影響

在低光環境植物因避陰綜合症，會出現葉柄的伸長，葉片擴張被抑制等情形（Ballaré and Pierik, 2017）。本研究結果顯示於所有補光處理皆能有效增加‘紅奶油’的葉數與葉面積，其中以 R:B=4:1 效果最佳，且顯著大於全紅光處理（表三），以上結果也說明低光環境抑制萵苣‘紅奶油’苗木葉數與葉面積。前人研究指出萵苣以全紅光或較高紅光比例種植能增加其幼苗葉片數（Hernández-Adasme *et al.*, 2022）。而全藍光處理之萵苣葉片數最少，隨著紅光比例的增加，葉片顏色變淺，葉片數量增多，其中以 70%紅光（30%藍光）、80%紅光（20%藍光）、90%紅光（10%藍光）處理之葉片數最大（Chen *et al.*, 2021）。然萵苣葉片數對光質的反應會因品種而異，白光添加紅光處理能顯著增加‘Prunai’（紅葉皺葉）和‘Quintus’（深綠葉）之葉數，而‘Ferrado’（淺綠葉）和‘Skyphos’（紅綠葉）兩個奶油品種則以白光添加藍光處理之葉數最高（Frańczak and Kula-Maximenko., 2021）。葉面積部分，結果顯示所有補光處理皆能有效增加，其中也以 R:B=4:1 效果最佳（表三）。根據前人研究萵苣‘Aleppo’、‘Ferrado’、‘Prunai’、‘Quintus’和‘Skyphos’皆以白光添加藍光照射處理較白光添加紅光更能有效增加葉面積（Frańczak and Kula-Maximenko., 2021）。以白色螢光燈照射為對照組，萵苣幼苗期以全紅光 LED 照射之葉面積增加 33%，紅藍光（50%紅光與 50%藍光）照射與對照組無顯著差異，全藍光照射之葉面積則減少 45%（Johkan *et al.*, 2010）。亦有許多研究指出，使用人工光源紅藍混合光照射，紅光比例越高，葉面積越大，而藍光比例越高，葉面積越小（張等，2009；Hernández and Kubota, 2014; Son and Oh, 2013）。綜合以上，顯示 LED 紅光照射能有效增加萵苣幼苗葉片數和葉面積，而高比例紅光添加藍光效果更佳。而在葉長方面，紅光比例較高（R:B=7:1 以上）之處理葉長顯著增加（表三），與前人研究結果顯示萵苣以全紅光或紅光比例較高的照射的萵苣葉長會增加相似（Hernández-Adasme *et al.*, 2022）。補光處理對葉寬較無影響（表三）。

三、不同紅藍光比補光對生物量之影響

環境光強度會直接影響光合作用及生物量累積，在低光環境下，則會增加對地上部的資源分配，莖向上徒長，根系生長減少（洪與宋，2013; Morelli and Ruberti, 2000）。試驗結果顯示所有補光處理均能增加萵苣‘紅奶油’地上部鮮乾重與地下部鮮乾重（表四），王等（2015）研究顯示補光對育苗有促進作用，可增加植株之全株鮮重及地下部乾重，對根系活力也有顯著影響。而補光處理增加生物量之效果因紅藍光比例而異，結果顯示在紅光為主要補光光質條件下，地下部鮮乾重隨紅光比例下降（即藍光比例上升）

而增加，地上部亦有此趨勢（表四）。地上部鮮乾重以 R:B=4:1 處理最高，而地下部鮮乾重以 R:B=2:1 處理提升效果最佳，其次為 R:B=4:1 處理，顯示萵苣‘紅奶油’地下部達到最高生長量所需之藍光比例較地上部高（表四）。前人研究顯示紅光與藍光皆能增加萵苣生長量，如以低光度紅光處理能使萵苣幼苗鮮重增加（Hernández-Adasme *et al.*, 2022），因紅光光質有利於光合作用並可促進葉片生長，增加葉面積，利於碳水化合物之累積，增加苗株鮮重（Azad *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012）。而藍光照射則能增加萵苣幼苗的乾重與乾物質百分比（Hernández-Adasme *et al.*, 2022）。地下部方面，紅光能通過改變生長素極性運輸影響煙草幼苗側根生長（Meng *et al.*, 2015），而藍光有助於抑制徒長及促進地下部根系生長強壯（Johkan *et al.*, 2010）。試驗結果顯示，紅光添加一定比例藍光比全紅光更有利於萵苣幼苗生長（表四），此與前人研究結果 90%紅光處理生產 1 g 萵苣乾重所需光子數 2.92 mol 和電量 1.67 MJ 最少，且電利用效率和光利用效率最高，分別為 3.64 和 1.20%相似（Chen *et al.*, 2021）。

四、不同紅藍光比補光’壯苗指數與絕對生長速率之影響

補光處理能顯著提升‘紅奶油’的壯苗指數與絕對生長速率，其中壯苗指數隨藍光比例上升而增加，以 R:B=4:1 處理最高，其次為 R:B=2:1 處理（表五）。R:B=4:1 處理之壯苗指數較高主要是由於莖徑較粗且全株乾重較重，而 R:B=2:1 處理是因其株高較小與地下部乾重較重。絕對生長速率亦有相似的趨勢，同樣以 R:B=4:1 處理最高，R:B=2:1 處理其次（表五）。相較於白色螢光燈與紅色 LED 燈，藍色 LED 燈處理的萵苣幼苗形態較為緊實，能提高移植方便性（Johkan *et al.*, 2010）。

五、不同紅藍光比補光萵苣‘紅奶油’葉色之影響

萵苣‘紅奶油’為紅葉萵苣，富含花青素與酚類等抗氧化物（Charles, 2003; Kim *et al.*, 2018）。此次試驗觀察未經補光之對照組萵苣幼苗葉色幾乎為全綠，而全紅光處理僅小區域出現紅色；而有添加藍光之處理紅色部分明顯增加（圖二、圖三），推論可能是因花青素增加的緣故。前人研究已指出藍光能增加萵苣花青素等多酚產物，如迷你紅葉萵苣以藍光 LED 處理的花青素反射指數（ARI）比紅光 LED 處理高 20 倍（Lee *et al.*, 2023）。萵苣‘Carmoli’幼苗以低光度（50 PPF）藍光或藍光比率高處理之葉片花青素含量較其他處理高（Hernández-Adasme *et al.*, 2022）。藍光 LED 燈照射之萵苣幼苗多酚含量和總抗氧化狀態（TAS）高於用螢光燈處理（Johkan *et al.*, 2010）。白光添加藍光（紅藍光比值 1.9）處理之萵苣‘Yanzhi’和‘Red Butter’的葉色更紅，葉綠素 a、葉綠素 b 和花青素等色素含量顯著升高，且明顯增加兩個萵苣品種中維生素 C、維生素 A、總酚化合物、總黃酮的積累（Li *et al.*, 2021b）。Johkan 等人（2010）指出用藍光處理育苗能促進移栽後萵苣植株的生長，可能是因為移栽前萵苣幼苗的地上部和地下部生物量高、光合色素含量高以及抗氧化活性高。本試驗結果亦顯示補光處理可能有助於萵苣‘紅奶油’花青素之呈色，苗株明顯較紅，有利於萵苣生菜料理配色（圖二、圖三）。

結 論

宜蘭地區秋冬季受到東北季風與地形因素，呈長時間的低光高溼環境條件，不利於作物光合作用生長發育，並產生避陰綜合症，導致設施育苗易出現徒長、下胚軸伸長、根系生長緩慢等問題。而萵苣‘紅奶油’幼苗在低光環境生長之主要表現為莖徑變細、葉數減少、總葉面積減少、地上部鮮乾重與地下部鮮

乾重下降，以及葉部紅色表現不明顯。使用紅藍可調式 LED 燈管補光能顯著改善萵苣‘紅奶油’幼苗之性狀表現，其中以 R:B=4:1 處理效果最佳，能同時增加萵苣‘紅奶油’苗株莖徑、葉數、總葉面積、地上部鮮乾重、地下部鮮乾重、壯苗指數與絕對生長速率，並使葉片明顯較紅，顯著改善宜蘭秋冬季紅葉萵苣育苗時長與苗株品質。

參考文獻

1. 王芳、高芳雲、呂順、夏玲、劉建平、鄭漢文、莊華才、李洪波、陳麗娜 2015 不同比例紅藍 LED 燈對蔬菜育苗的補光效應 熱帶作物學報 36(8):1,398-1,402。
2. 方怡丹、張武男 2007 ‘銘星’甜椒壯苗指數與苗株性狀之相關性分析 植物種苗 9:29-46。
3. 洪明谷、宋妤 2013 光強度對‘瑞喜’結球白菜種苗生長之影響 興大園藝 38:27-38。
4. 徐天佑、曾鴻陽 2007 臺灣地區有關太陽能日照量之環境時空因素研究探討 環境教育學刊 6:21-32。
5. 張歡、徐志剛、崔瑾、郭銀生、谷艾素 2009 不同光質對蘿蔔芽菜生長和營養品質的影響 中國蔬菜 10:28-32。
6. 許謙信 2013 LED 照明對植物生長及發育之影響 臺中區農業改良場特刊 116:243-246。
7. 童輝、彭瑩、殷武平、袁祖華 2018 LED 燈補光對早春苦瓜幼苗生長的影響 上海蔬菜 4:4,142。
8. 戴振洋、蔡宜峰、張隆仁、邱建中 2002 不同介質與育苗盤對紫錐花幼苗品質之影響 臺中區農業改良場研究彙報 77:1-9。
9. Azad, M.O.K., I.J. Chun, J.H. Jeong, S.T. Kwon and J.M. Hwang. 2011. Response of the growth characteristics and phytochemical contents of pepper (*Capsicum annuum* L.) seedling with supplemental LED light in glass house. J. Bio-Environ. Con. 23:182-188.
10. Akbarian, B., M. Matloobi and M. Nasser. 2016. Effects of LED light on seed emergence and seedling quality of four bedding flowers. J. Ornamental Plants. 6:115-125.
11. Ballaré, C.L. and R. Pierik. 2017. The shade-avoidance syndrome: multiple signals and ecological consequences. Plant Cell Environ. 40:2,530-2,543.
12. Caldwell, C.R. 2003. Alkylperoxyl radical scavenging activity of red leaf lettuce (*Lactuca Sativa* L.) phenolics. J. Agric. Food. Chem. 51:4,589-4,595.
13. Cammarisano, T.L., I.S. Donnison, and P.R.H. Robson. 2021. The effect of red & blue rich LEDs vs fluorescent light on lollo rosso lettuce morphology and physiology. Front. Plant Sci. 12:603,411.
14. Chen, C.C., M.Y. Huang, K.H. Lin, S.L. Wong, W.D. Huang, and C.M. Yang. 2014. Effects of light quality on the growth, development and metabolism of rice seedlings (*Oryza sativa* L.). Res. J. Biotech. 9:15-24.
15. Chen, X.L., Y.L. Li, L.C. Wang, and W.Z. Guo. 2021. Red and blue wavelengths affect the morphology, energy use efficiency and nutritional content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). Sci. Rep. 11:8,374.
16. Courbier, S. and R. Pierik. 2019. Canopy light quality modulates stress responses in plants. iScience 22:441-452.
17. Fittinghoff, K. 2008. Functional analysis of the SPA gene family in *Arabidopsis thaliana*. PhD Thesis. Universität zu Köln. Germany.
18. Formisano, L., B. Miras-Moreno, M. Ciriello, L. Zhang, S.D. Pascale, L. Lucini and Y. Roupael. 2022. Between light and shading: morphological, biochemical, and metabolomics insights into the influence of blue photoselective shading on vegetable seedlings. Frontiers Plant Sci. 13:890,830.

19. Fra, szczak, B. and M. Kula-Maximenko. 2021. The preferences of different cultivars of lettuce seedlings (*Lactuca sativa* L.) for the spectral composition of light. *Agronomy*. 11:1,211.
20. Hernández, R. and C. Kubota. 2014. Growth and morphological response of cucumber seedlings to supplemental red and blue photon flux ratios under varied solar daily light integrals. *Sci. Hort.* 173:92-99.
21. Hernández-Adasme, C., H. Silva, and V. Escalona. 2022. In-door germination and seedling growth of green and red lettuce under LED-light spectrum and subsequent effect on baby leaf lettuce. *Ital. J. Agron.* 17:1,982.
22. Jeong, H.W., H.R. Lee, H.M. Kim, H.M.K, H.S. Hwang, and S.J. Hwang. 2020. Using light quality for growth control of cucumber seedlings in closed-type plant production system. *Plants* 9:639.
23. Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida, and T. Yoshihara. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *Hortscience* 45:1,809-1,814.
24. Kim, D.E., X. Shang, A.D. Assefa, Y.S. Keum, and R.K. Saini. 2018. Metabolite profiling of green, green/red, and red lettuce cultivars: Variation in health beneficial compounds and antioxidant potential. *Food Res. Int.* 105:361-370.
25. Kim, E.Y., S.A. Park, B.J. Park, Y. Lee, and M. M. Oh. 2014. Growth and antioxidant phenolic compounds in cherry tomato seedlings grown under monochromatic light-emitting diodes. *Hort. Environ. Biotechnol.* 55:506-513.
26. Lee, J.H., Y.B. Kwon, Y.H. Roh, I.L. Choi, J. Kim, Y. Kim, H.S. Yoon, and H.M. Kang. 2023. Effect of various LED light qualities, including wide red spectrum-LED, on the growth and quality of mini red romaine lettuce (cv. breen). *Plants* 12:2,056-2,072.
27. Li, H.M., C.M. Tang, Z.G. Xu, X.Y. Liu, and X.L. Han. 2012. Effects of different light sources on the growth of non-heading chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *J. Agr. Sci.* 4:262-273.
28. Li, J., T. Wu, K. Hu, Y. Liu, M. Liu, and J. Wang. 2021a. Effect of LED spectrum on the quality and nitrogen metabolism of lettuce under recycled hydroponics. *Front. Plant Sci.* 12:678,197.
29. Li, Y., L. Wu, H. Jiang, R. He, S. Song, W. Su, and H. Liu. 2021b. Supplementary far-red and blue lights influence the biomass and phytochemical profiles of two lettuce cultivars in plant factory. *Molecules* 26:7,405.
30. Lin, C. 2002. Blue light receptors and signal transduction. *Plant Cell* 14:207-225.
31. Liu, N., F. Ji, L. Xu, and D. He. 2022. Effects of LED light quality on the growth of pepper (*Capsicum* spp.) seedlings and the development after transplanting. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 12:44-50.
32. Liu, X., S. Guo, T. Chang, Z. Xu, and T. Takafumi. 2012. Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED). *African J. Biotechnol.* 11:6,169-6,177.
33. Liu, Y., F. Jafari, and H. Wang. 2021. Integration of light and hormone signaling pathways in the regulation of plant shade avoidance syndrome. *aBIOTECH* 2:131-145.
34. Meng, L., W. Song, S. Liu, J. Dong, Y. Zhang, C. Wang, Y. Xu, and S. Wang. 2015. Light quality regulates lateral root development in tobacco seedlings by shifting auxin distributions. *J. Plant Growth Regul.* 34:574-583.
35. Morelli, G. and I. Ruberti. 2000. Shade avoidance responses. Driving auxin along lateral routes. *Plant Physiol.* 122:621-626.

36. Shafiq, I., S. Hussain, B. Hassan, A. Raza, I. Ahmad, M.A. Asghar, Z. Wang, T. Tan, S. Li, X. Tan, A. Ghafoor, A. Manaf, A. Ansar, F. Yang, and W. Yang. 2021. Crop responses and management strategies under shade and drought stress. *Photosynthetica*. 59(4):664-682.
37. Silva, E.M., G.G. S. Costa, A.F. Andrade, H.C.P. Ferreira, and F. Steiner. 2016. Light spectral quality on production of lettuce, cucumber and sweet pepper seedlings. *Sci. Agrar. Parana*. 15:446-452.
38. Son, K.H. and M.M. Oh. 2013. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *Hortscience* 48:988-995.
39. Song, J.L., K. Cao, Y.W. Hao, S.W. Song, W. Su, and H.C. Liu. 2019. Hypocotyl elongation is regulated by supplemental blue and red light in cucumber seedling. *Gene* 707:117-125.
40. Su, N., Q. Wu, Z. Shen, K. Xia, and J. Cui. 2014. Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings. *Plant Growth Regul.* 73:227-235.