

光

可以產生視覺效果的 電磁波能量

按照這個定義，根本不存在 不可見光，說可見光也是多餘的

3

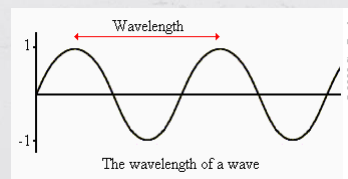
光的兩種特性

• 顆粒說

- light behaving like a “package” of energy
- **PHOTONS** - 光(量)子
 - 對作物非常重要
- **QUANTA**- 一個光子含有的能量

• 波動說

- 電磁波可有很短或很長的波長
- 能量與波長成反比
- $E = h C / \lambda$



4

電磁波如何產生

任何物體溫度在絕對零度以上都會輻射電磁波

- 輻射的電磁波能量取決於物體的溫度
- 提高物體溫度等於提高總輻射出去的能量
- Stephan-Boltzman Law 斯特凡-波茲曼定律

一個黑體表面單位面積在單位時間內輻射出的總能量（稱為物體的輻射度或能量通量密度） j^* 與黑體本身的熱力學溫度 T （又稱絕對溫度）的四次方成正比

$$j^* = \epsilon\sigma T^4$$

溫度為100 K的絕對黑體表面輻射的能量通量密度為5.67 W/m²，
1000 K的黑體為56.7 kW/m²，

5

溫度 vs. 波長 (λ)

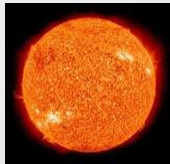
- 溫度與輻射出去的電磁波波長成反比
- 煒恩定律 (Wien's Law)：由物體輻射出去的電磁波波峰位置的波長與絕對溫度成反比

$$\lambda = 2897/T, \quad \lambda \text{ in } \mu\text{m}, T \text{ in K}$$

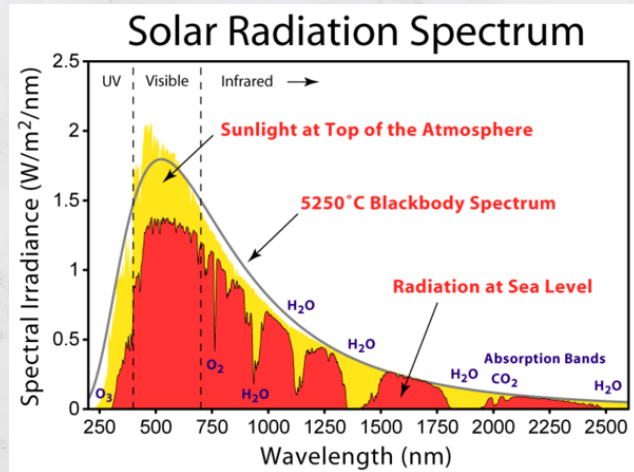
- 可以透過控制物體的溫度來控制光的顏色

6

太陽光的光譜

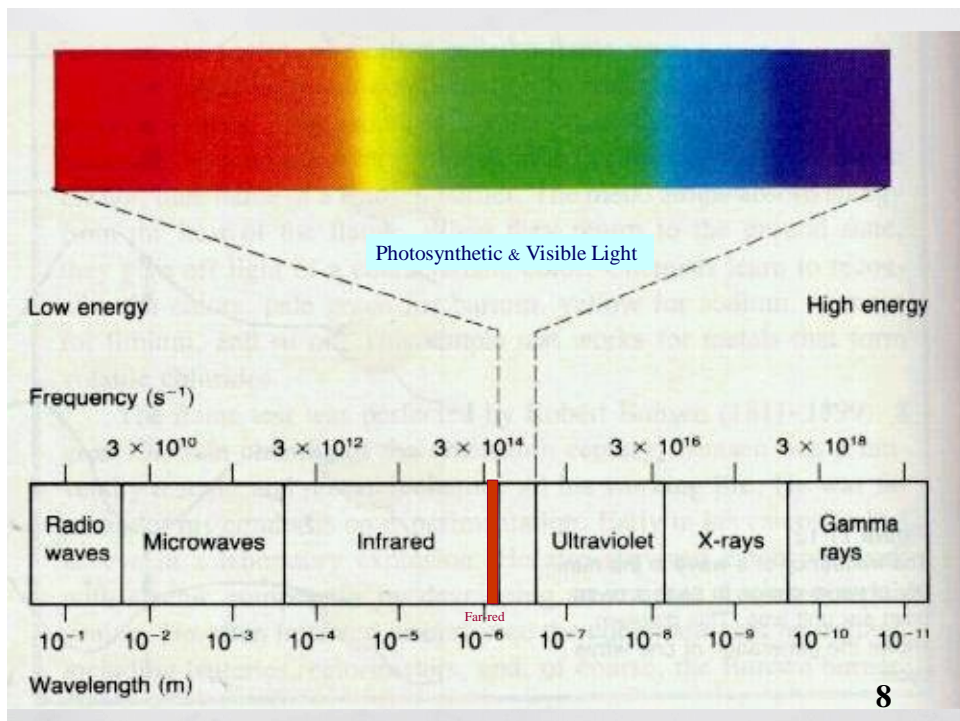


表面溫度：5,778 K



$$\lambda = 2897/5778 = 0.5 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}$$

7



8

光量量測



Light sensor

Photometric Method 照度量測

Photometer	Illumination, in <i>Lux</i>
------------	-----------------------------



Radiometric Method 輻射度量測

Pyranometer	Solar energy, in W/m^2
-------------	--------------------------



Quantum Method 光量量測

Quantum Sensor	Photosynthesis, in $\mu mol/m^2/s$
----------------	------------------------------------

Solar Radiation Sensor

ES Radiation sensor is a quantum sensor that is enclosed with a 20mA adaptor. The sensor may be purchased as part of a Meteorological station or as stand-alone sensor. As a quantum sensor it is designed to read velocities of radiation in the viewable spectrum: 400-700nm, which is the Photosynthetically-active radiation (mostly known as PAR). The 4-20mA adaptor is factory set to give a read of 4mA when there is no sense of radiation in the spectrum, and 20mA (full scale) at 2000 PAR. It needs DC power supply of 26-13V for its basic functionality.

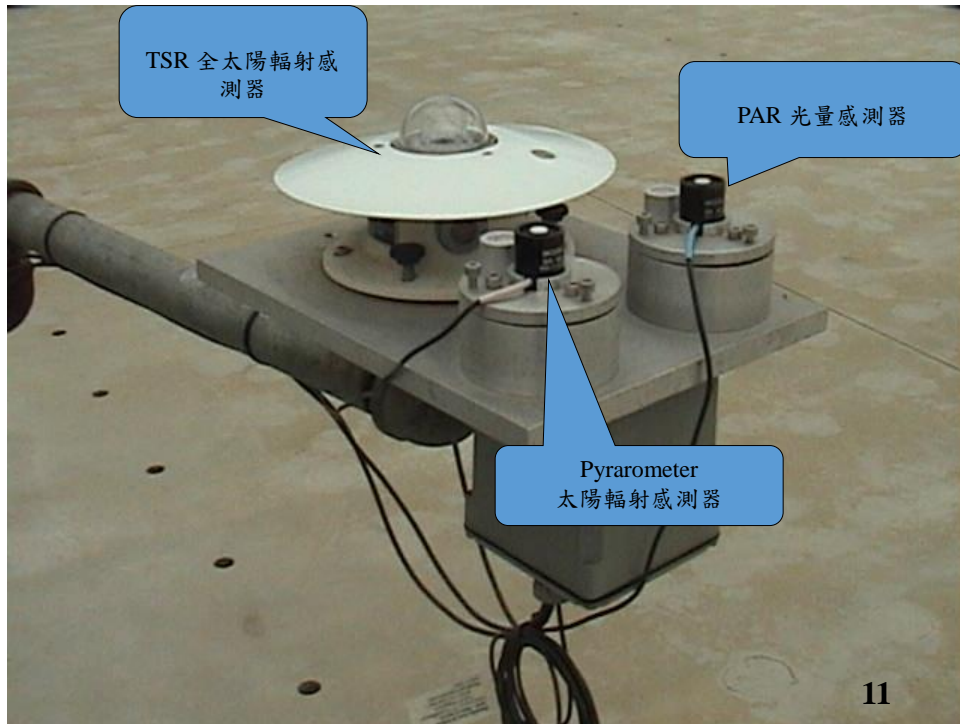


9

四種光感測器安裝於於溫室內



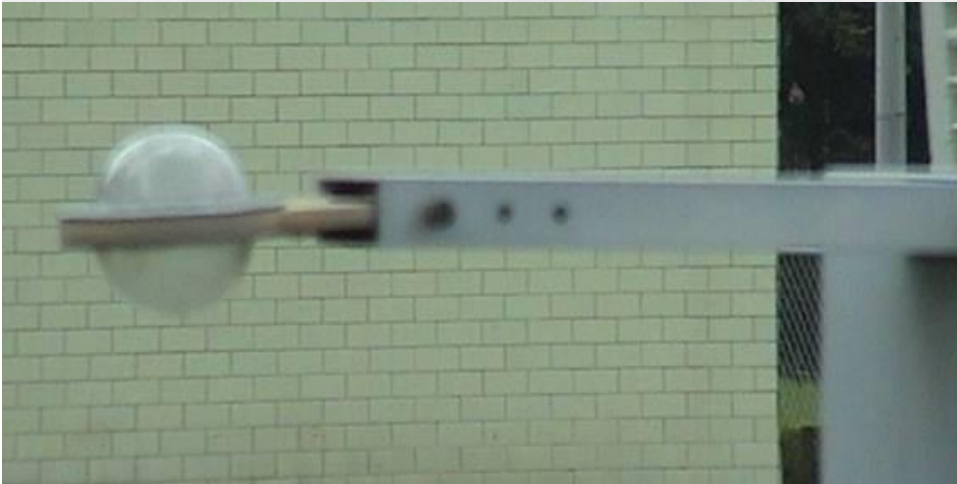
10



光感測器

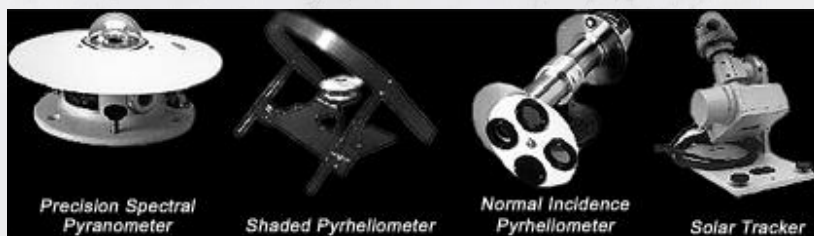
- Total Solar Radiation 全太陽輻射光譜，單位： W/m^2
- PAR (Photosynthetically Active Radiation)：光合作用有效光，400~700 nm 範圍內的光子數量，單位： $\text{umol}/\text{m}^2/\text{s}$
- Pyrarometer 輻射感測器，單位： W/m^2
- 所有光量感測器都必須水平擺放，一般會安置於可調整水平的座台上

淨輻射感測器 (上方扣除下方)



13

Other solar related sensors



Portable device

Suitable for 3 different units

LI-190: Quantum

LI-200: Pyranometer

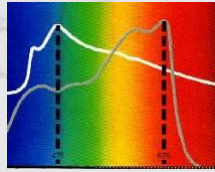
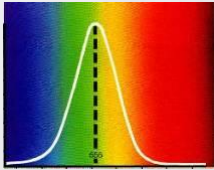
LI-210: Photometric meter



14

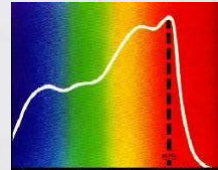
人眼與植物的敏感度曲線及太陽光譜 Various sensitivity curves

Human



Spectral irradiation vs.
sensitivity curve of
Plants

Plant



15

Photometric Method

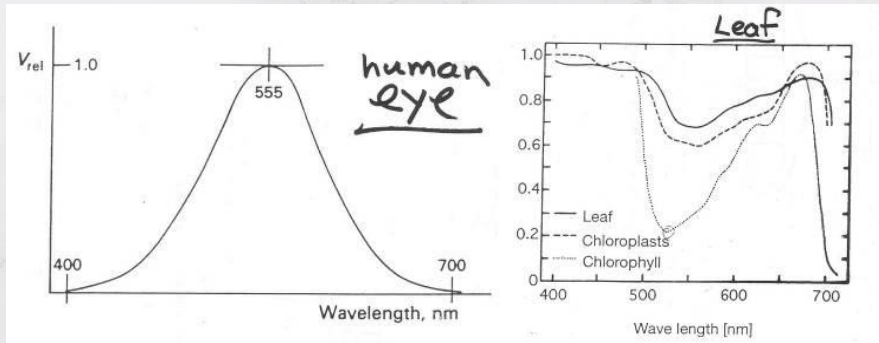
- 基於人眼對光線的敏感度
- 非常主觀，只適用於人眼相關場域
- 使用單位 1 foot candle (呎燭光，英制) = lumen/ft^2
lux (公制) = lumen/m^2

- ftc or fc: Amount of light given off from 1 candle at a distance of 1 foot



16

對光線的吸收光譜 人眼 vs. 葉片



17

Lux meter



感光器

轉換器



18

園藝業界改不過來的陋習

- 仍然使用Lux 或 fc 的照度單位
- 此單位只對空間照明有意義
- 涉及人類眼睛內的錐/柱狀體對光線的敏感度
- 由於植物感光機制與人眼不同，不宜使用此單位，但已積習難改
- 此類感測器稱為 photometric sensor

19

Radiometric Method

- 量測電磁波的能量 (太陽能)
- 常用單位 $\text{W/m}^2 = \text{J/s/m}^2$
- 缺點
 - 與波長不相關

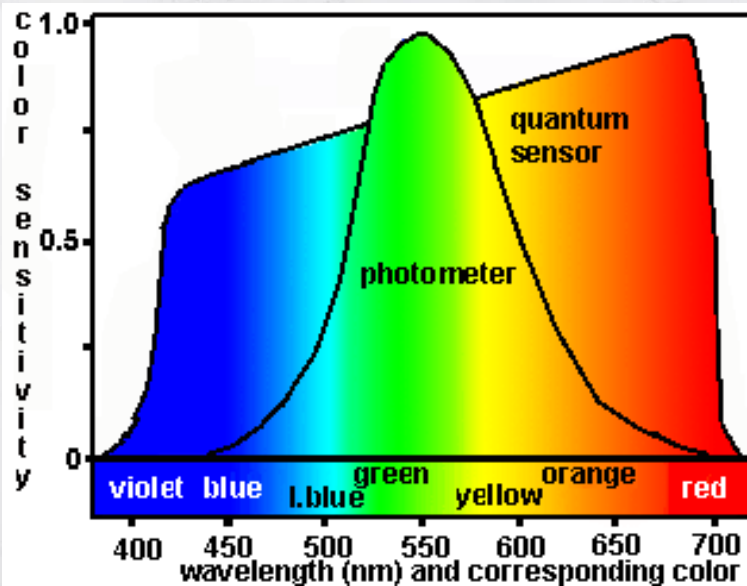
20

Quantum Method

- 量測光合作用光量子數 (400-700 nm)
Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD)
- mol = (6.02×10^{23}) 個光子
= $\mu\text{mol} = (6.02 \times 10^{17})$ 個光子
- 光合作用進行的速率與單位面積單位時間內植物體接收到的光子數量相關
- 使用單位： $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

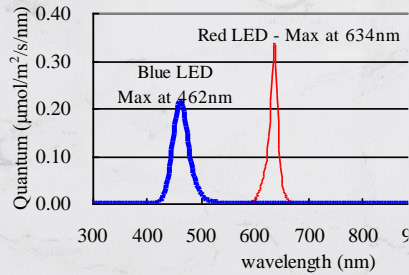
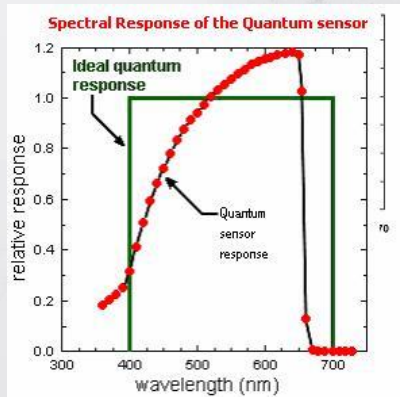
21

Sensitivity curves of sensors



22

Limitation of Quantum sensor



Quantum Sensor
can not be used to
measure red or blue LEDs
23

植物生長發育與環境因素的關係

	溫度	光	濕度	CO ₂	水/肥料
光合作用	+	+++	+	+++	
呼吸	+++				
養分/水分吸收	+	+++	+++	+	+++
蒸散	+	+++	+++	+	++
發育(葉或花的形成)	+++				
開花	++	++		+	
結果	++	++	++	+	
(糖分)分配	+++				
組織形成	++		+		++
細胞/器官的伸長	+++	++	+		+
果實的成熟	+++	++			

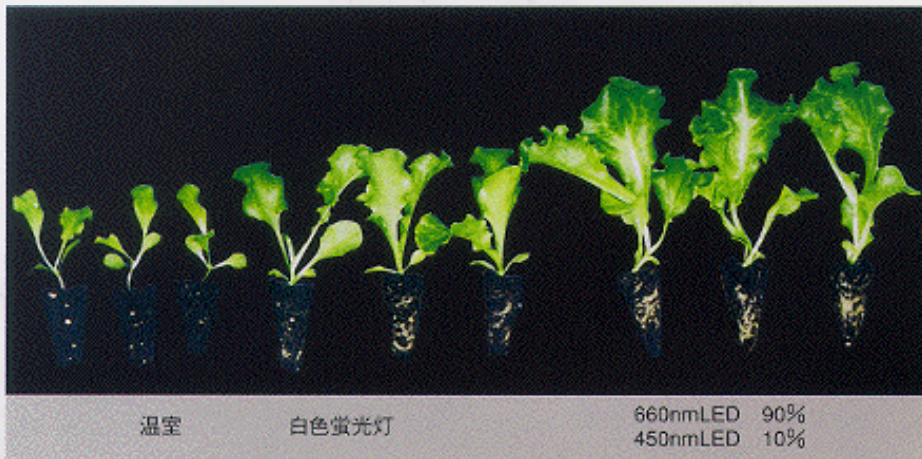
(Houter, 2006)

*: 影響度 +++: 大、++: 中、+: 小

*: 表的內容在15~30°C時為有效, 15°C以下或30°C以上則非此結果。

*: 溫度管理還包括針對其他原因(預防病害、節省能源)的管理。

陽光、螢光燈、LED



光源種類不是唯一原因

光在植物上的不同應用

- 光量 (強度)
- 光質 (波長-顏色)
- 光期 (光照累計時間)

光週期調控

photoperiodism



光合作用補光

photosynthesis

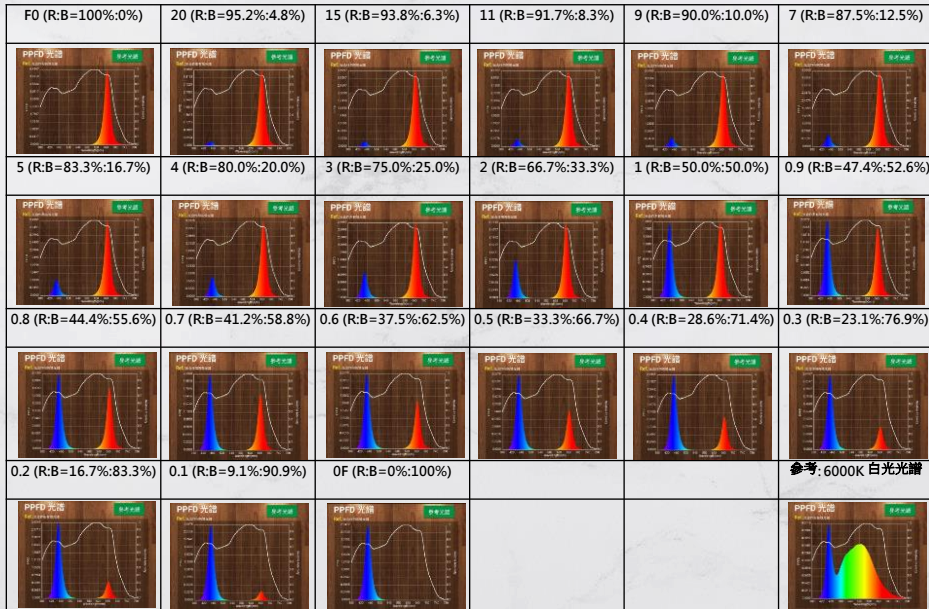


光型態發生

photomorphogenesis

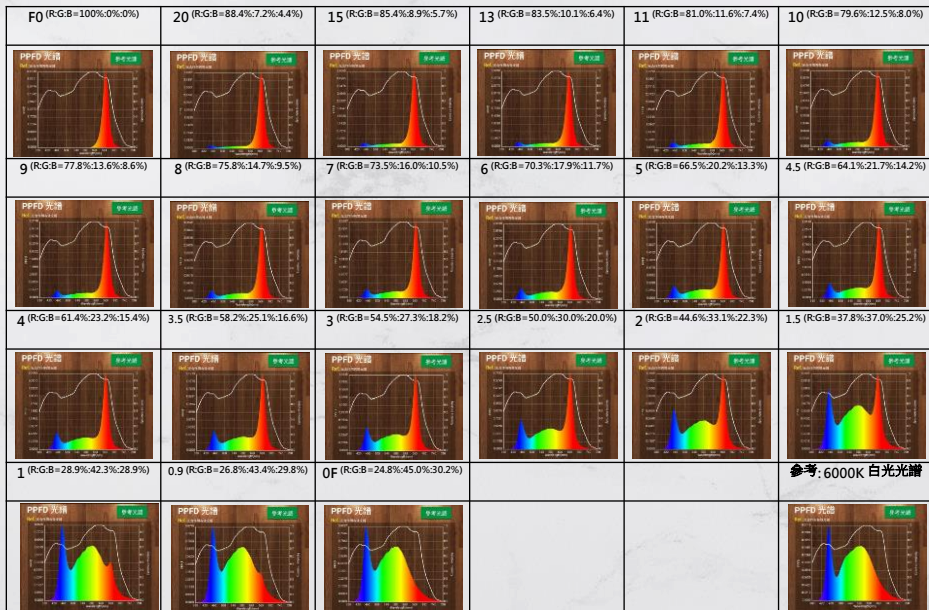


RB tunable LED



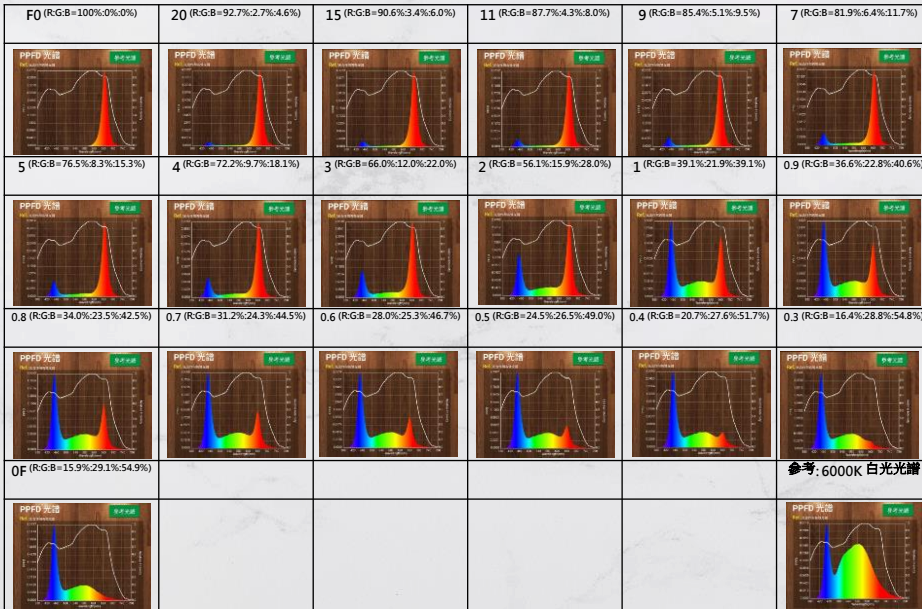
27

RW tunable LED



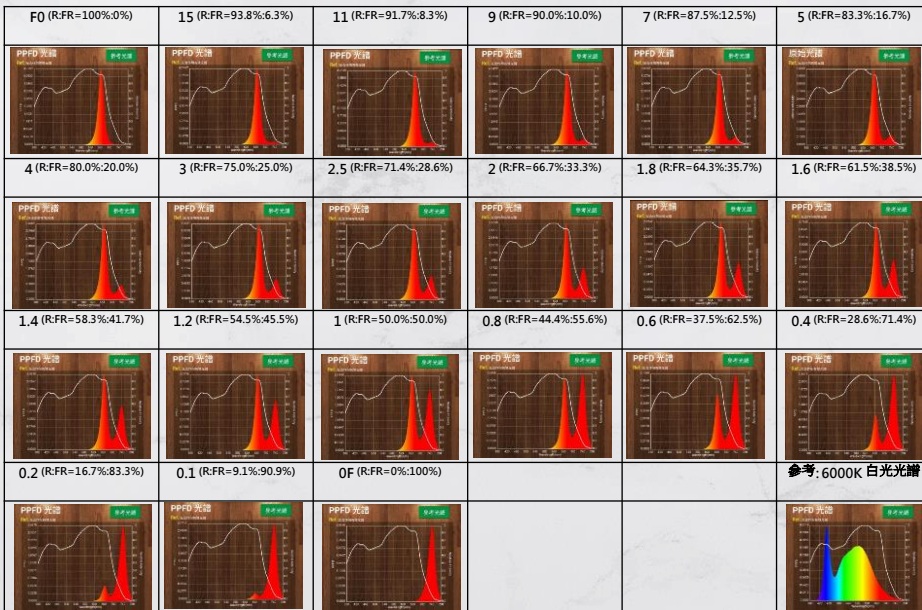
28

RWB tunable LED



29

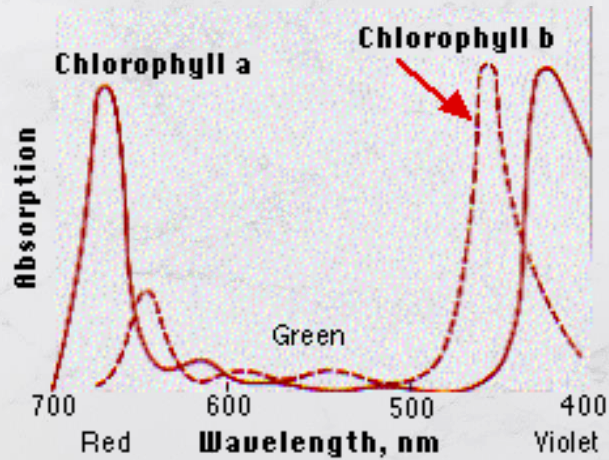
RFR tunable LED



30

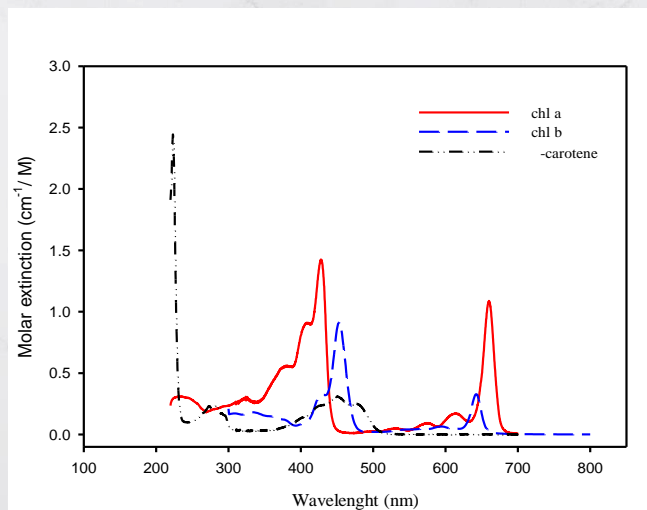
光的受體 -- 葉綠體

葉綠體 a, b 的吸收峰位於
紅光 (600~700 nm) 與藍光 (400~500 nm) 波段



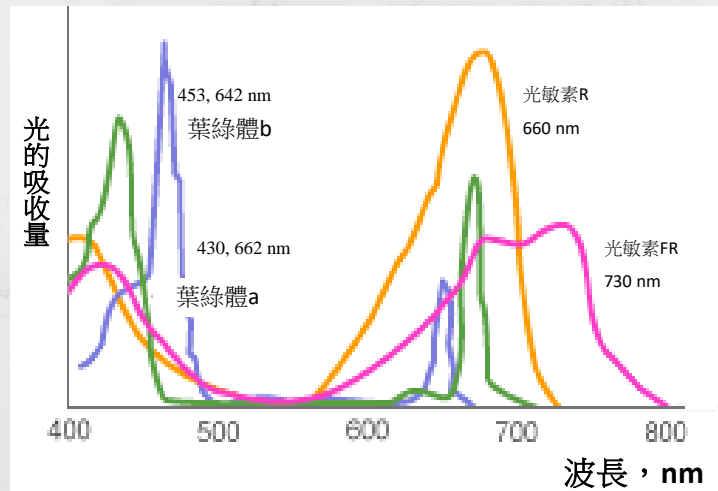
31

植物的感光受體-光合色素 葉綠體與類胡蘿蔔素



32

葉綠體a,b 與光敏素R, FR吸收光譜



33

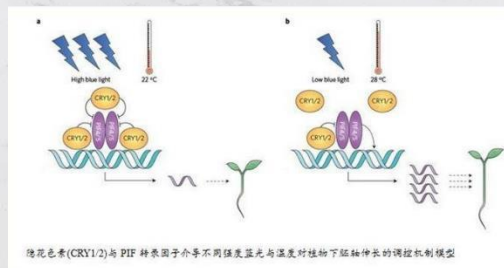
植物體內色素

色素	吸收	反射
葉綠素 Chlorophyll	紅、藍、紫	綠
類胡蘿蔔素 Carotenoids	藍	黃、橘
葉黃素 Xanthophyll	藍	黃、橘
黑色素 Melanin	可見光	
花青素 Anthocyanins	藍、UV	紅
酚類化合物 Phenolics	UV	
光敏素 Phytochrome	紅、紅外光	
隱花素 Cryptochrome	藍、UV	紅

34

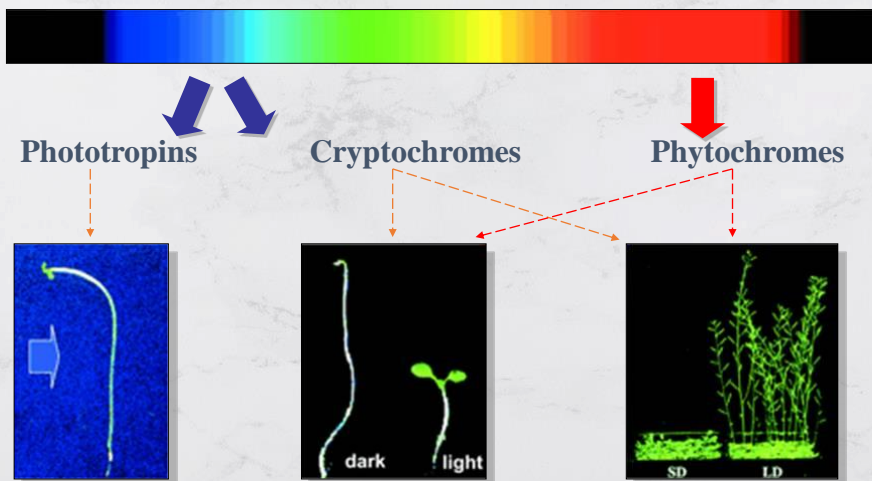
隱花素 (Cryptochrome, Cry)

- 隱花色素是藍光受體，主要吸收 320-500nm 的藍光和近紫外光 UV-A，吸收峰大致位于 375nm、420nm、450nm 和 480nm。
- 隱花色素主要參與植株體內的開花調控。此外，它還參與調控植株的向性生長、氣孔開張、保衛細胞的發育、根的發育



35

Photomorphogenesis 光形態發生



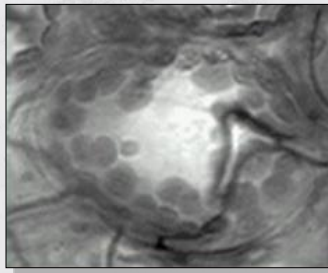
36

Blue Light

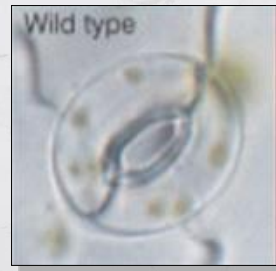
Photoreceptor : phototropins (flavin-containing)



向光性

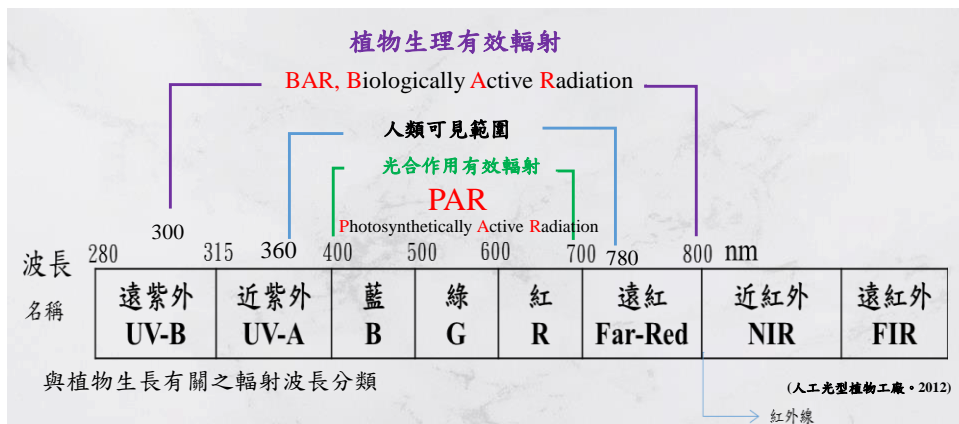


葉綠體移動



氣孔開閉

37



□光質：光譜、光配方

□光合作用相關 PAR：400 ~ 700 nm

□植物生理相關 BAR: 300 ~ 800 nm

UVB + UVA + PAR + FR

UVA, UVB

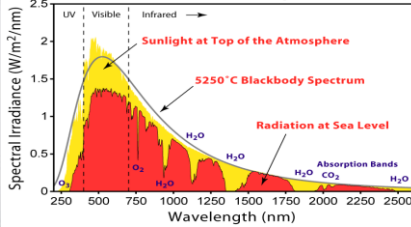
戶外種植紅皺葉萵苣



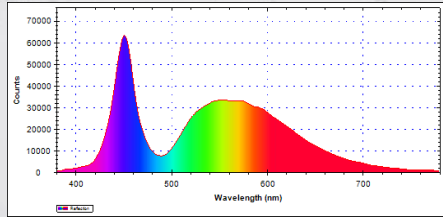
植物工廠種植紅皺葉萵苣(LED燈管)



Solar Radiation Spectrum



LED 6500K Spectrum



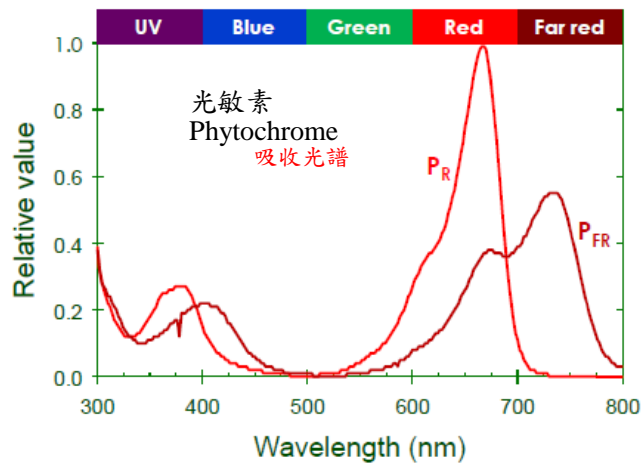
太陽光的分類與大氣層穿透



- UV 的波長短，能量強，對植物而言是一種光逆境
- 植物產生花青素來自保，花青素可吸收 UV，防止內部 DNA 的損害
- 光逆境下可累積較多的黃酮類及酚類物質 (Rozema *et al.*, 1997; Tevini and Teramura, 1989)

光敏素吸收光譜

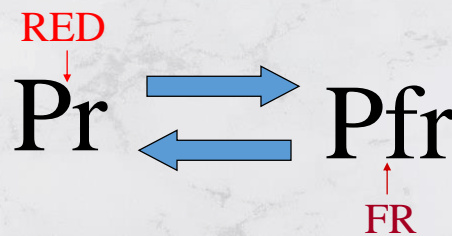
Phytochrome Absorption (P_R , P_{FR})



P_R and P_{FR} from Sager et al., 1988. Trans. ASAE 31:1882-1887.

41

光敏素 phytochrome (蛋白色素)



紅光吸收型 (Pr)、遠紅光吸收型 (Pfr)

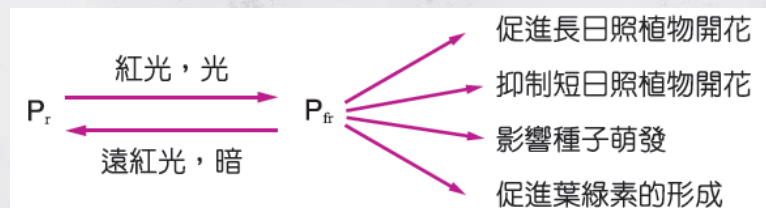
兩種形式都會誘導植物的某些反應

就看誰主導

42

照紅光，促進長日/抑制短日植物開花

光敏素 Phytochrome，兩種型態轉換



照遠紅光，促進短日/抑制長日植物開花

43

光敏素對種子發芽的影響

¥1950年代，美國 波史維克 & 亨得利斯的
高苳種子 (需要光照才能發芽) 實驗

光照	萌發率%
黑暗	9
R	98
R, FR	54
R, FR, R	100
R, FR, R, FR	43
R, FR, R, FR, R	99
R, FR, R, FR, R, FR	54
R, FR, R, FR, R, FR, R	98

44

光與種子發芽

- **好光性種子**
 - 有光線（紅光）才能發芽良好者
 - 紅外光會逆轉紅光的效果
 - 金魚草、矮牽牛、爆竹紅、萵苣等
- **嫌光性種子**
 - 在陽光下不能發芽或發芽不良者，
 - 飛燕草、虞美人、雞冠花、十字花科蔬菜等。

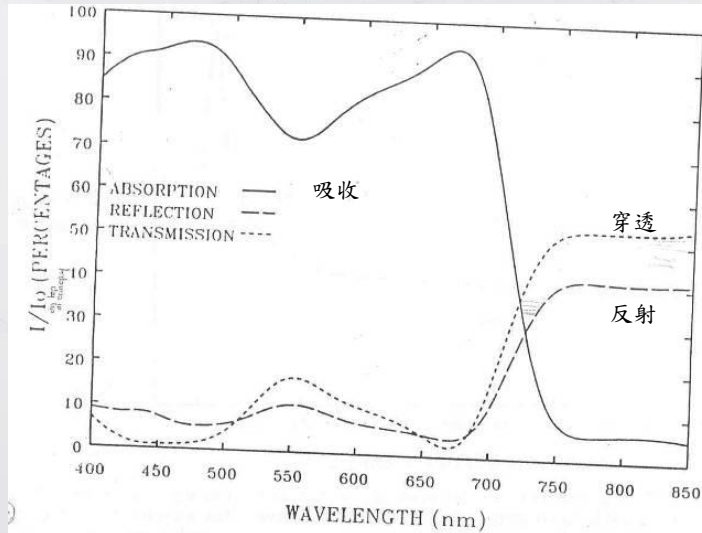
45

遮蔽反應 Shade Avoidance Response

- 葉片
 - 會吸收紅光、藍光
 - 會反射紅外光
 - 也允許紅外光穿透
- 栽培密度高（密植）時
 - 葉片偵測到R變少，FR不變或變多
 - R:FR 變小
 - Pr為主控的光敏素，引起遮蔽反應

46

葉片對不同波長的光線的吸收、反射與穿透



47

低 R:Fr 比值 (< 1) 高 R:Fr 比值 (> 1)

植物的反應

遮蔽反應

R 低或 Fr 高都可能造成

1. 節間拉長
2. 較少側芽
3. 較長葉柄
4. 較大較薄的葉片
5. 葉片數少，
造成總葉面積較小
6. 葉片呈淡綠色

R 高或 Fr 低都可能造成

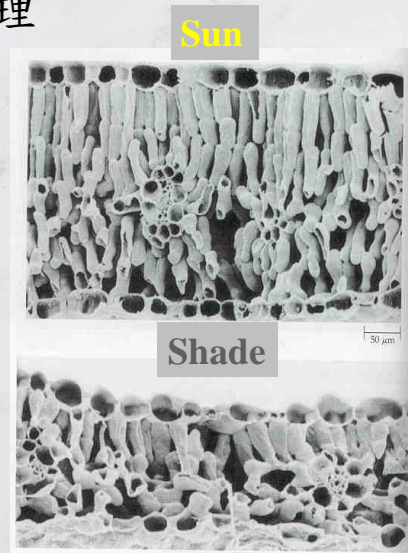
1. 節間長度縮短
2. 側芽多
3. 短葉柄
4. 較厚的小葉片
5. 較多葉片，
造成總葉面積較大
6. 葉片呈深綠色

48

低光狀態下的植物生理

1. 較長節間，伸長(突長)的莖
2. 較大的葉面積
3. 薄的葉片與莖
4. 薄的角質層
5. 單層的柵狀細胞

為了最大化光合作用
所做的調整



49

EOD – 偵測一天的結束，據此了解日長



50

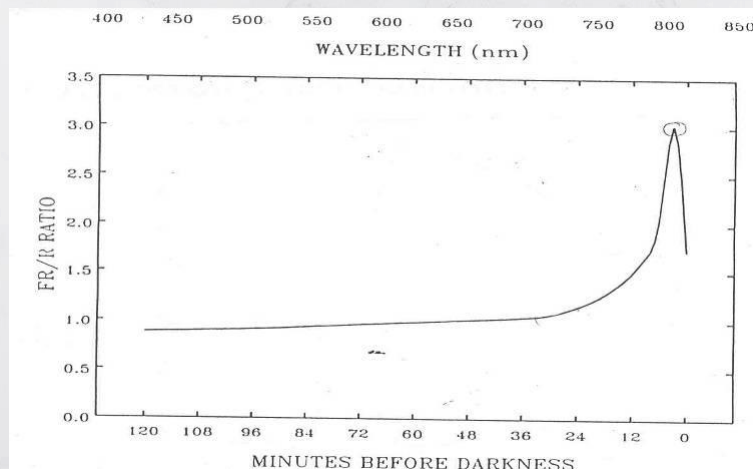
End of Day Response

- 短時間內有大幅度的 R/Fr 光量比值的變化
- 近黃昏時, 太陽光進入大氣層有較低的入射角, 較短波長 (紅光, R) 較易被散射, 紅光 (R) 光量降低, R/Fr 比值大幅下降 (Fr/R 比值大幅上升),



51

End of Day (EOD) Response



52

光期長度

植物偵測光期長短來判斷季節變動

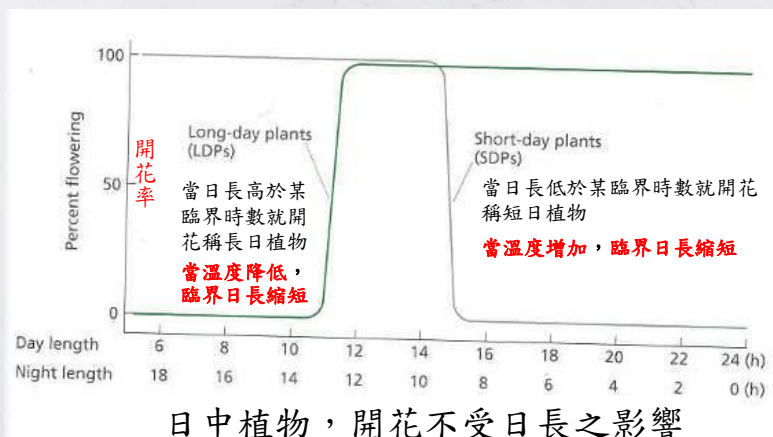
- 可自保來防患寒害
- 可自保以因應雨季或乾旱
 - 可準備何時該分化、繁衍後代

光週期 Photoperiodism -

植物偵測日長的能力並依此準備因應

53

植物依照其對光週期的反應 (Photoperiodic Response) 可分三類



日中植物，開花不受日長之影響

臨界時數不是12小時
植物主要是偵測夜間的長度

54

臨界日長與溫度的交感作用

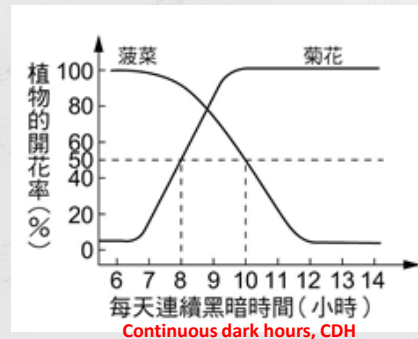
- **短日** 植物，當 **溫度增加**，**臨界日長縮短**
 - Mums 菊花、Poinsettias 聖誕紅 等
- **長日** 植物，當 **溫度降低**，**臨界日長縮短**
 - Fuchsia 倒吊金鐘、Spinach 菠菜 等

55

短日 VS. 長日植物

長日植物 (LD = SN 短夜植物)
 開花條件：連續黑暗 < 臨界夜長
菠菜、小麥 (CDH < CNP)

短日植物 (SD = LN 長夜植物)
 開花條件：連續黑暗 > 臨界夜長
菊花、草莓 (CDH > CNP)
 煙草、大麻

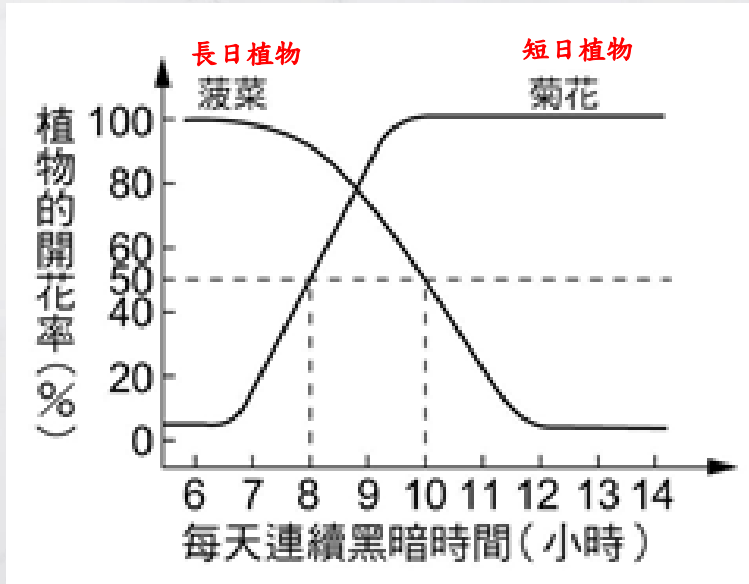


日中性植物 開花條件：植株成熟即開花

蒲公英、番茄、豌豆、胡瓜、南瓜、向日葵

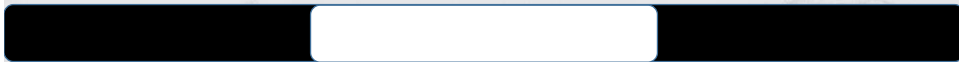
56

調節植物開花的機制 -- 夜間長度



57

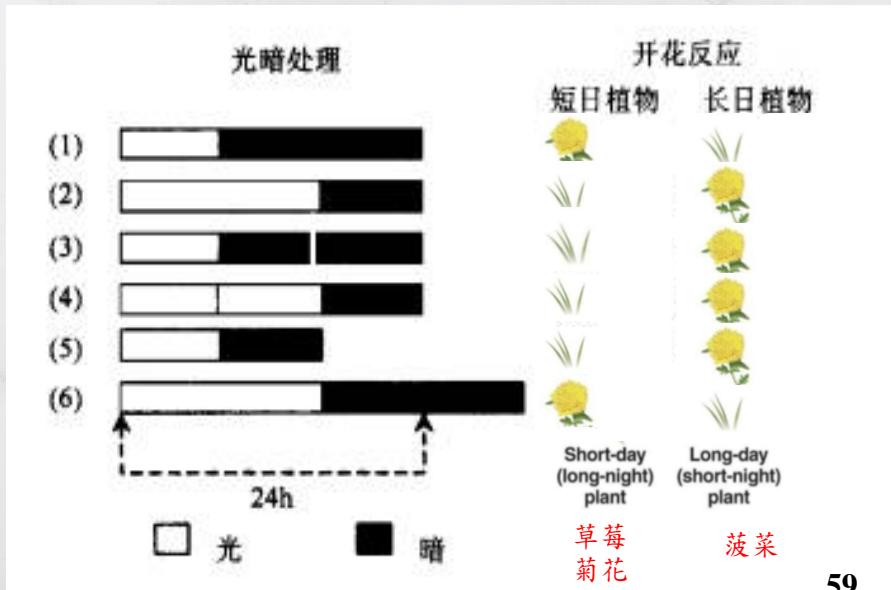
電照菊



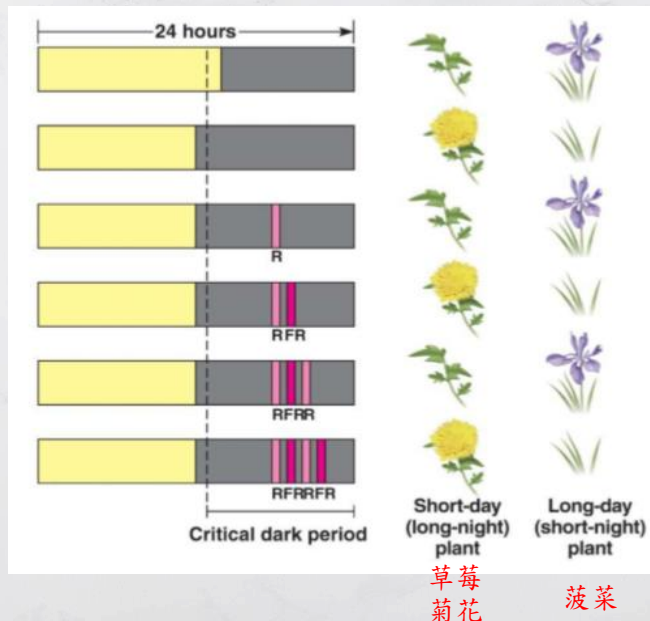
4 hr

58

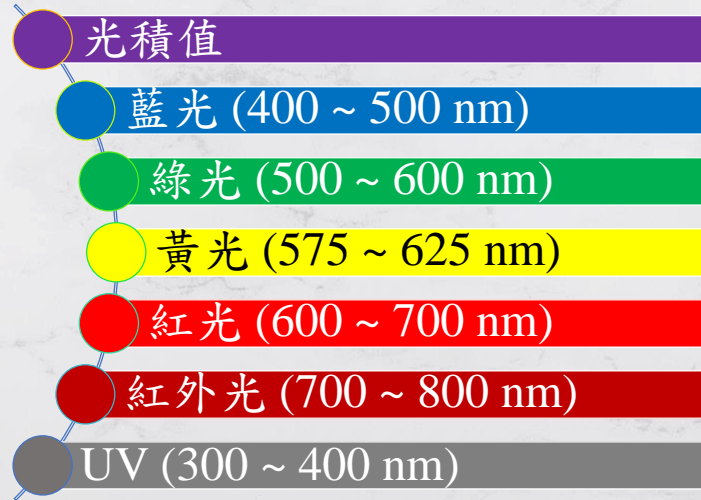
光週期對植物開花之影響



光敏素對植物開花之影響



細說從頭



61

光積值 (400-700 nm)

DLI, 光積值
計算

光合作用
產量、抽梗所
需天數

62

光積值與日累積光量

- **日累積光量** Daily Light Integral (DLI)
 - 單位： $\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
- 在設施內透過光的調控來控制植物生長，所依據的就是**光積值**，由一段日期的DLI累計
 - 單位： mol m^{-2}
- 在陽光下的 DLI 要即時量測並由日出累計到日落
- 在人工光源下 DLI 可用下式計算
 - $\text{DLI} = \text{PPFD} * \text{L} * 3.6/1000$
 - PPFD: in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - L: in hrs per day 每日給光時數(光期)

63



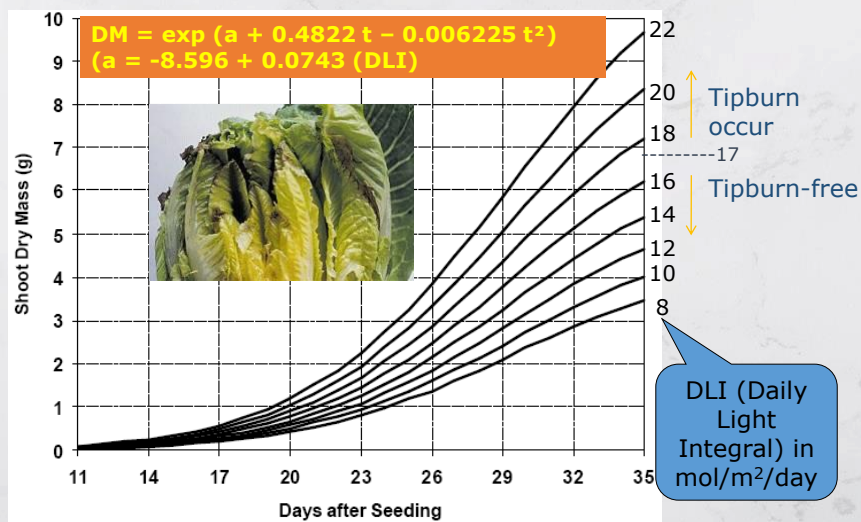
64

日總光量 (DLI, Daily Light Integral)

$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	HR:MN	DLI, mol/m^2
100	16:40	6
200	16:40	12
300	15:45	17
400	11:49	17
500	09:30	17

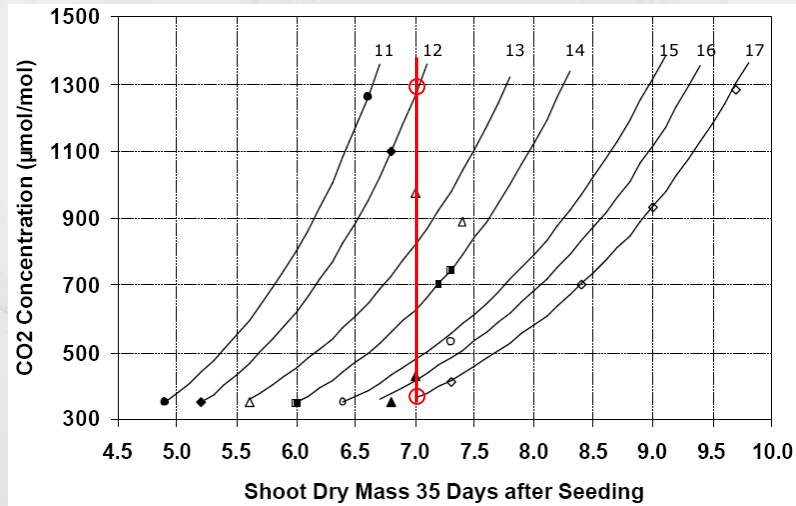
65

找出最佳的日總光量 (DLI)



66

CO₂ 施肥濃度與日總光量DLI影響產能



67

量產7 g 乾重的萵苣
所需的等效環控條件

光量	每日給光時間	每日累計光量 DLI	CO ₂ 濃度
μmol/m ² /s	hr:mn	mol/m ²	ppm
200	16:40	12	1300
300	15:45	17	345

68



單果串番茄栽培四階段

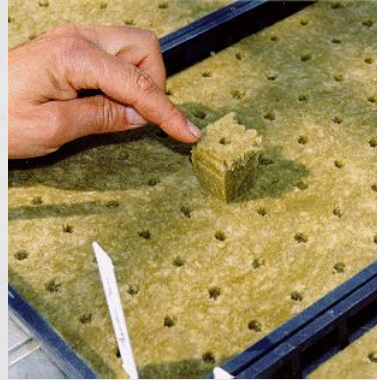
Stage		Spacing (plts/m ²)	Dates
Stage1 :	種苗生長	1550	7
Stage2 :	移植	97	21
Stage3 :	疏植	24	17-37
Stage4 :	二次移植(定植)	12	60

70

單果串栽培方式

1.Stage1 :

番茄種子在經過選種、清洗與消毒後，撒播在岩棉塊的凹穴中。經由良好的環境控制 25 °C 數日，此階段只以清水灌溉，並不提供養液供給。



71

2.Stage2 : 移植

成長至一定高度的小苗，移入 3-inch 的岩棉塊，並將這些岩棉塊置於溫室空間栽培床上，以淹灌水耕方式(ebb and flood)提供足夠養份。



72

3.Stage3：進一步疏植

隨著植株成長，必須調整其生長空間，疏散植株間的距離，使之發育良好。



73

- 3.1 在水耕的過程中，除了提供足夠的養液，也必須在養液的成份上監控，以維持良好的生長環境。
- 3.2 當植株成長到一定高度後，便需要提供支撐架，不單單避免植株傾倒，也可以提供番茄結果時支撐的問題。



74

4.Stage4：第一朵花開至收穫

當開花後，將多餘的側芽栽除，並利用蜜蜂進行受粉動作。



75

受粉後約 60 天，進入收穫階段。

番茄的重量決定於此階段有效光量的總量（光積值）。

受光總量越高，番茄的產量也相對提高。



76

光積值 vs. 番茄始花期長短

番茄生長至始花期所需栽培日數(Y, 日)：

$$Y = -0.049 X + 93$$

X: 植株接受的光積值，mol/m²

Y 的適用範圍 45 至 65 日

(Giniger, et al., 1988)

77

光積值 vs. 番茄產量

每一植株的番茄產量(Y, g/plant)：

$$Y = 0.821 X - 194$$

X: 番茄植株接受的光積值，mol/m²

X 的適用範圍 300~1200 mol/m²

(Giniger, et al., 1988)

78

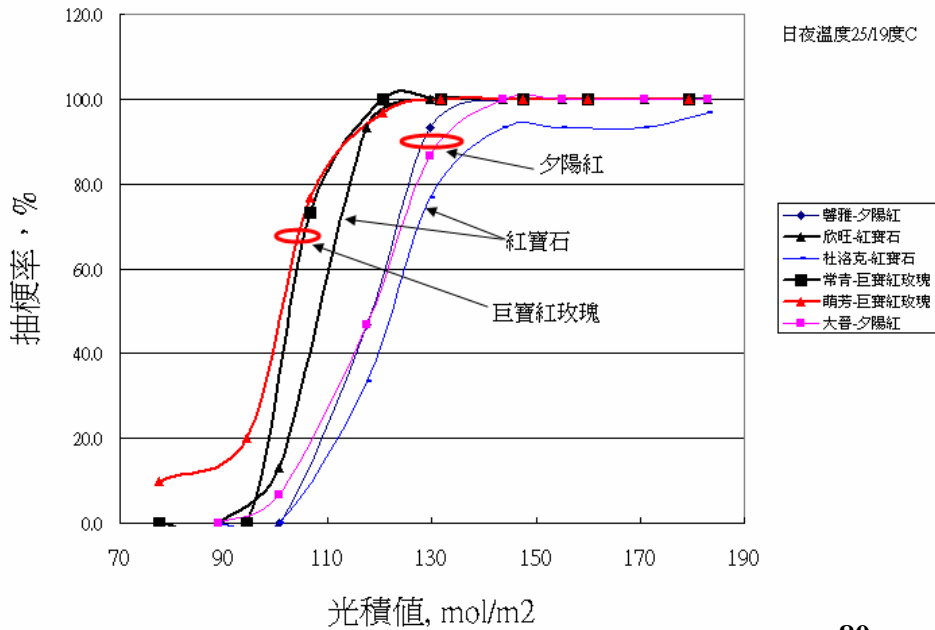
蝴蝶蘭抽梗

- 需要維持低溫
 - 台灣 25/19
 - 荷蘭 19/19

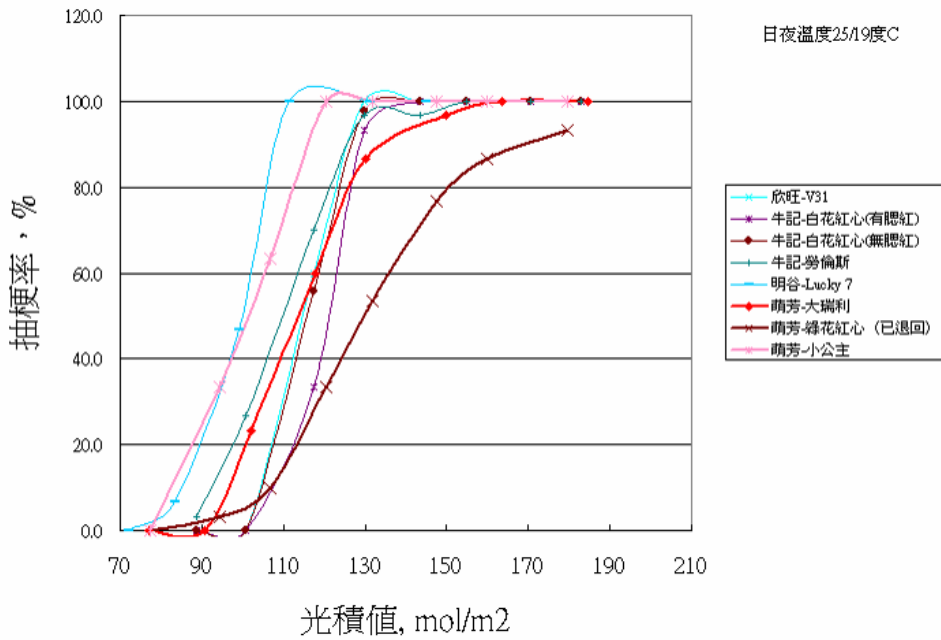


- 光積值決定
 - 抽梗率
 - 達100%抽梗所需天數

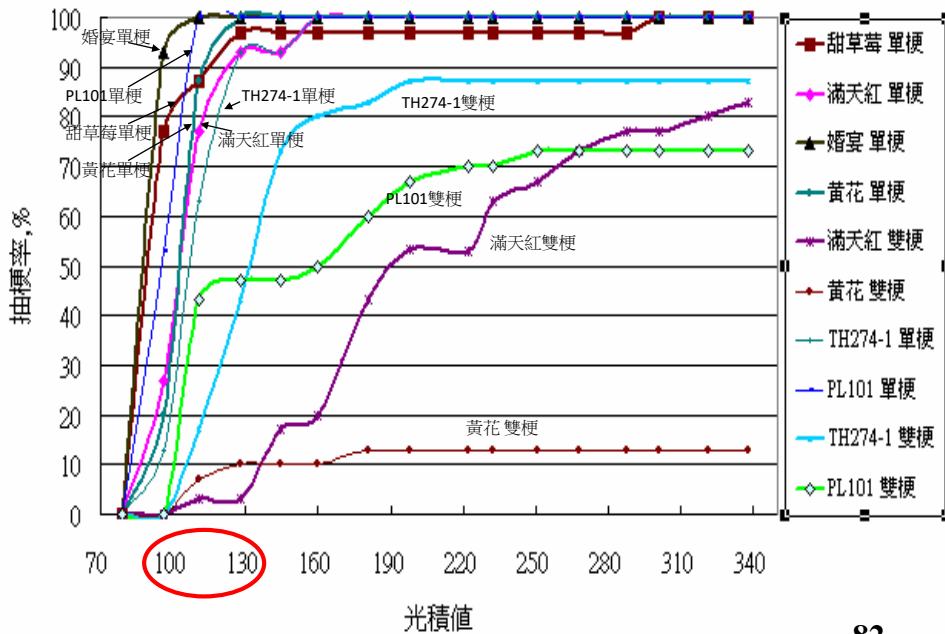
79



80



81



82

蝴蝶蘭 品系	抽梗率	光積值 mol/m ²	天數	平均日總 光積值	日總光積值= 5 mol/m ² 時 所需天數
夕陽紅*	100%	133	32	4.15	26.6
巨寶紅玫瑰*	100%	126	31	4.06	25.2
滿天紅*	100%	160	36	4.44	32
甜草莓	97%	128	29	4.41	25.6
黃花*	100%	128	29	4.41	25.6
婚宴	100%	111	26	4.27	22.2
PL-101*	100%	111	26	4.27	22.2
TH274-1*	93%	128	29	4.41	25.6

* 允許雙梗的品系

83

藍光 (400-500nm)

提高氣
孔導度

增加
花青素

增加二
次代謝
物

縮短節
間長度

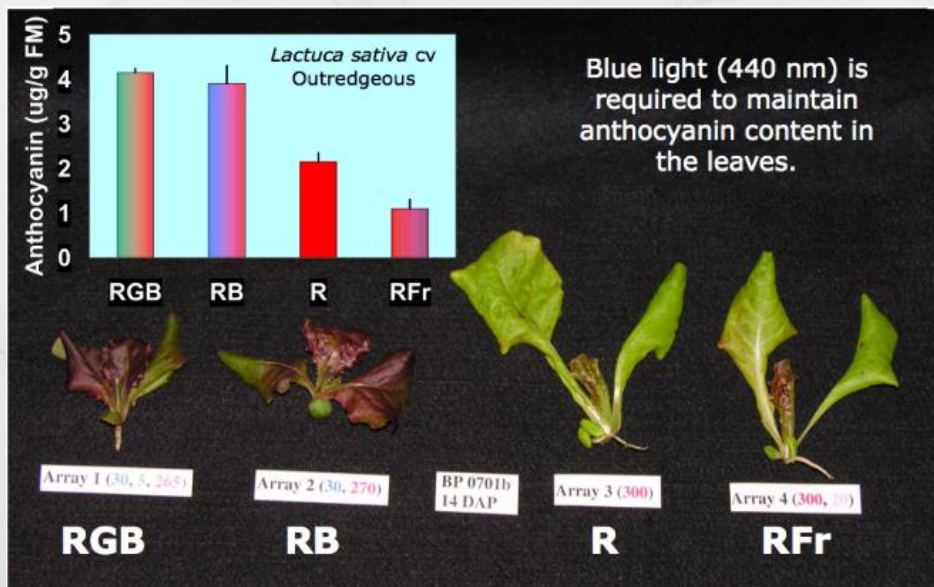
84

氣孔開閉 -- B:G or G:B

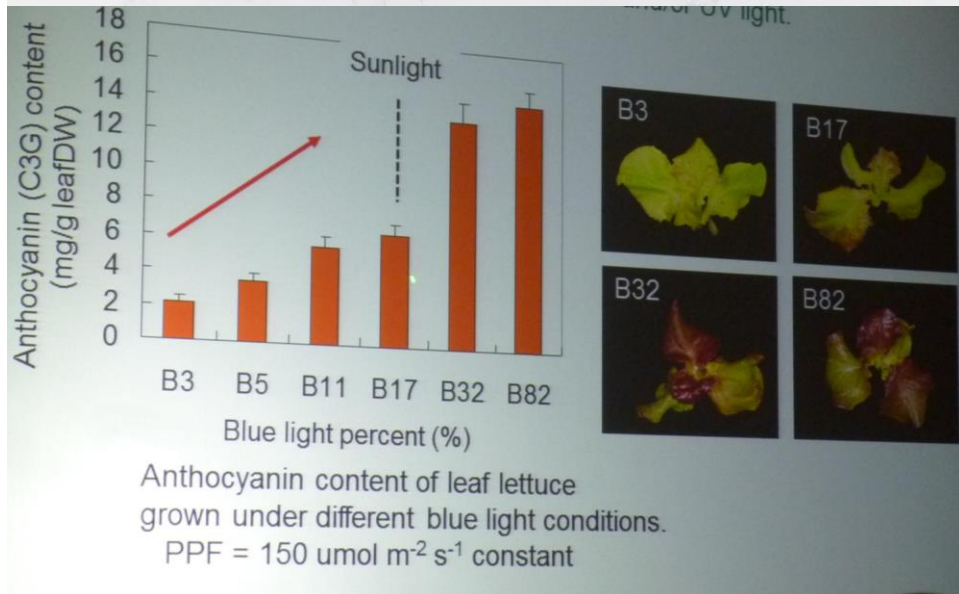
- 藍光有助於氣孔開啟，提高氣孔導度
- 主要藍光波峰為 450 nm，兩個相鄰小波峰在 420 nm and 470 nm (Karlsson, 1986 ; Kinoshita et al.,2001).
- 但當綠光是藍光的兩倍(含)以上時，綠光會逆轉藍光的效果 (Frechilla et al.,2000).
- 氣孔導度表示的是氣孔張開的程度，影響光合作用，呼吸作用及蒸騰作用。
- 氣孔導度與蒸騰作用成正比與氣孔阻力成反比。
- 植物會調節氣孔開啟使植物在損失水分較少的條件下獲取最多的CO₂。

85

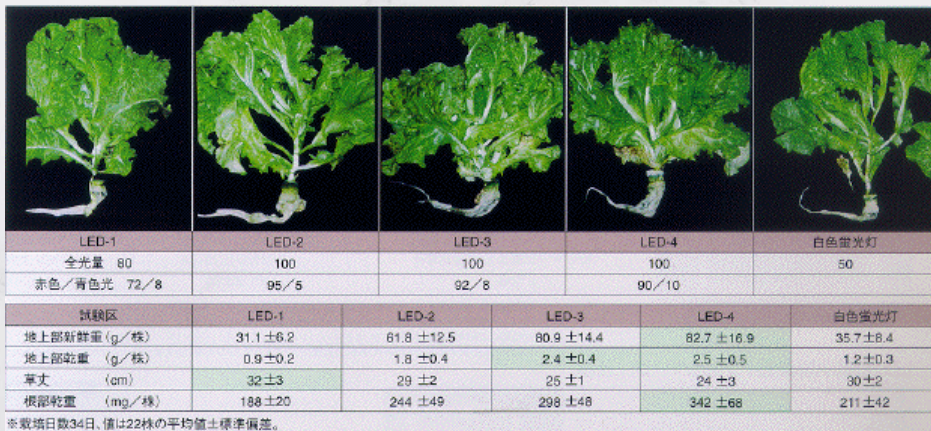
藍光促進花青素的形成

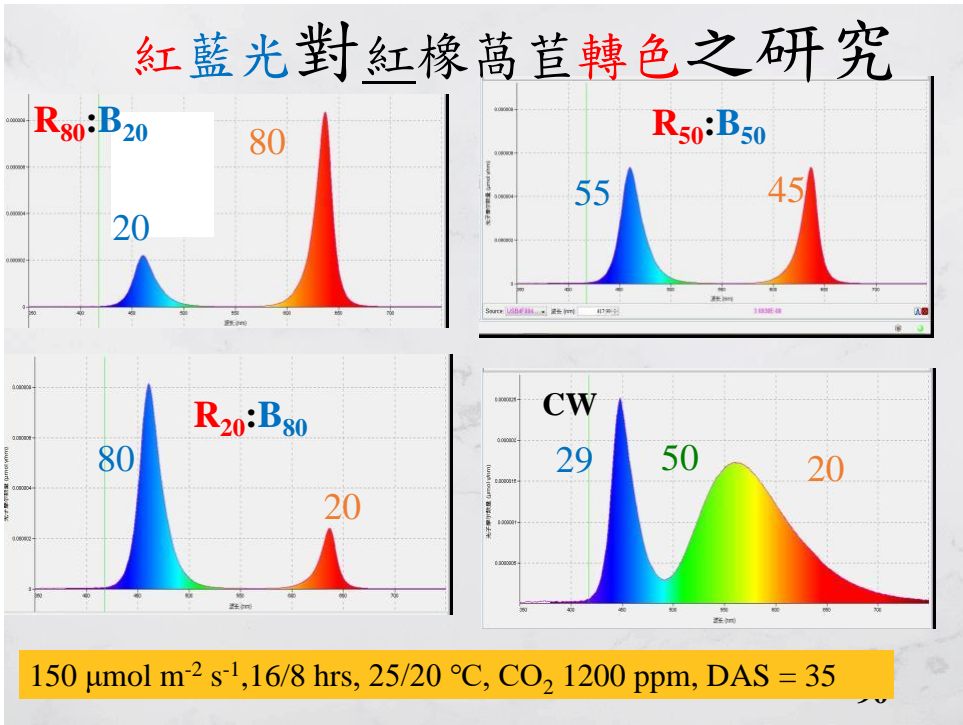


藍光促進花青素形成

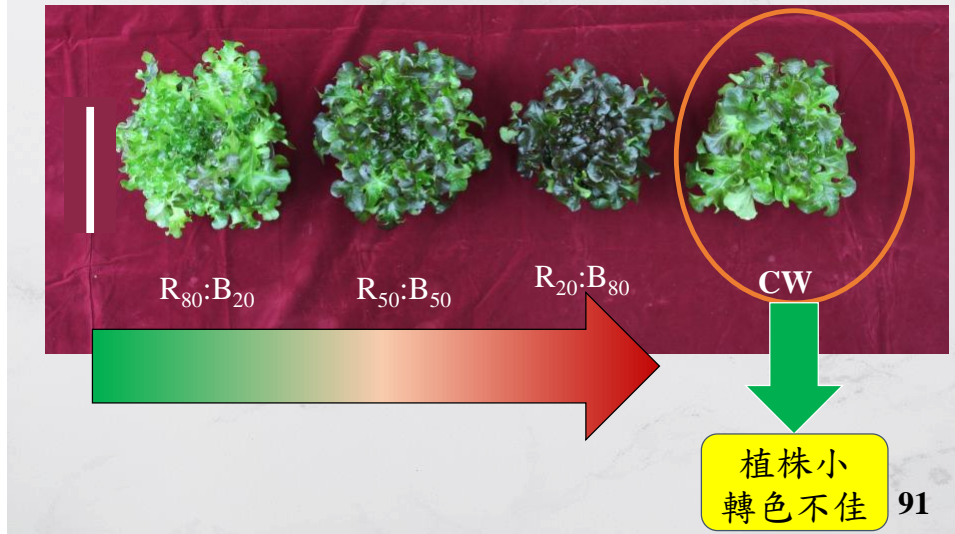


不同光質對萵苣生長的影響 -- R:B





不同光質下對紅橡萵苣生長之影響



不同光質對紅橡萵苣鮮重、花青素濃度與花青素含量之影響

處理	鮮重 (g)	AC (mg g ⁻¹)	TAC (mg/plant)	AY (mg m ⁻²)
R ₈₀ :B ₂₀	101.2 a	0.024 b	2.43 a	74.36
R ₅₀ :B ₅₀	78.6 b	0.026 b	2.02 b	61.81
R ₂₀ :B ₈₀	40.5 d	0.046 a	1.86 c	56.91
CW	65.8 c	0.017 c	1.12 d	34.27

Mean separation in columns by Duncan's multiple range test at $P \leq 0.05$ (only FW, $n=20$; others, $n=5$).

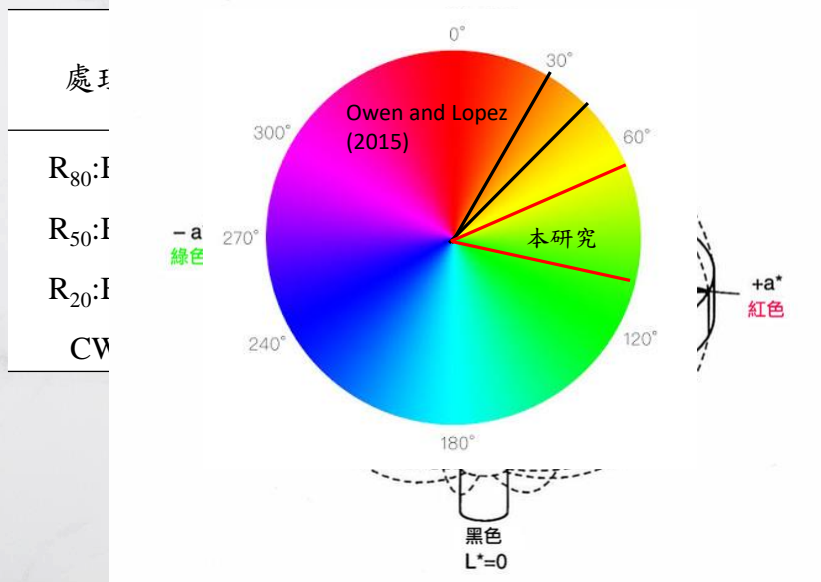
92

**R₅₀:B₅₀ 會提高紅椗萵苣光合色素的含量
CW 各項色素皆是最低**

處理	葉綠素 a (ppm)	葉綠素 b (ppm)	葉綠素 a/b	類胡蘿蔔 素(ppm)	葉黃素 (ppm)
R ₈₀ :B ₂₀	1.17 b	0.34 b	3.49	0.44 b	8.41 b
R ₅₀ :B ₅₀	1.31 a	0.49 a	2.74	0.50 a	11.80 a
R ₂₀ :B ₈₀	1.18 b	0.36 b	3.35	0.45 ab	9.87 ab
CW	1.04 c	0.29 b	3.65	0.38 c	8.37 b

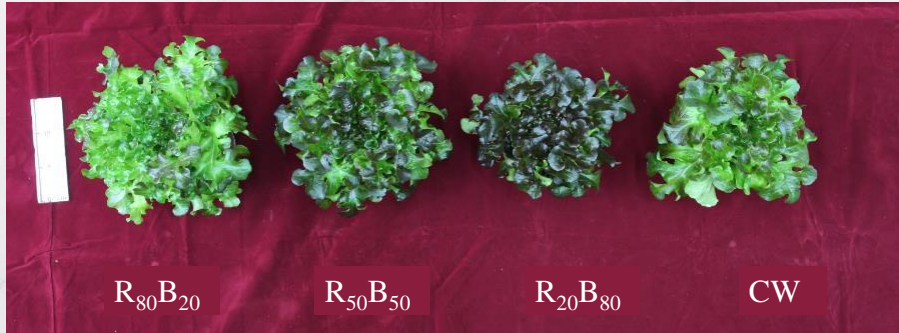
93

光質對紅椗萵苣葉片色差之影響



94

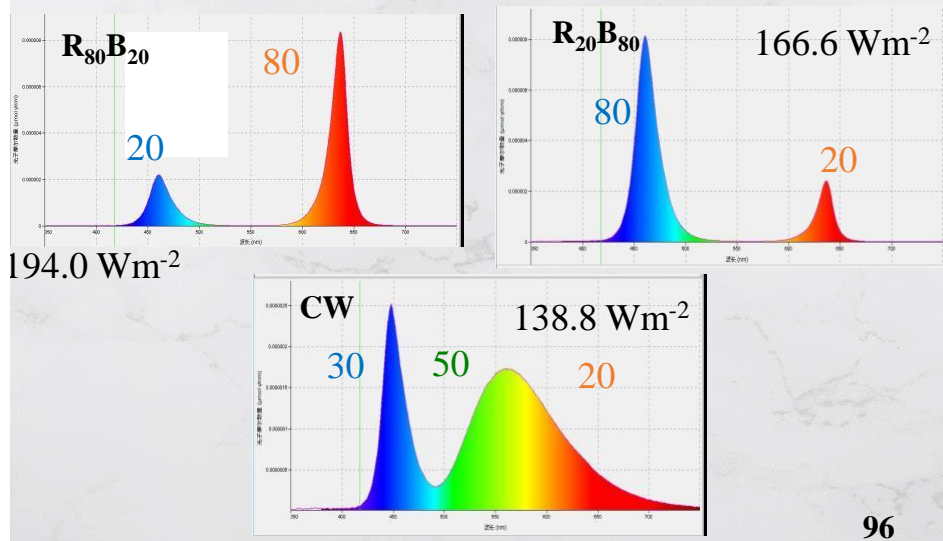
人工光對栽培紅色蔬菜技術未臻成熟



光為植物轉色重要因子之一

95

不同光譜處理 (皆為 LED 光源)



96

不同光配方處理與環境參數

處理	播種期 DAS 0-6	育苗期 DAS 7-20	育成期 DAS 21-42		
	1 week	2-3 week	4 week	5 week	6 week
	N1_E1.2_L150_ Pd667_H24_A20	N1_E1.2_L150_ Pd140_H16_A20/18	N1_E1.2_L150_ Pd30_H16_A20/18		
SR6	R ₈₀ :B ₂₀				
SR5SB1	R ₈₀ :B ₂₀				R ₂₀ :B ₈₀
SR4SB2	R ₈₀ :B ₂₀			R ₂₀ :B ₈₀	
SR3SB3	R ₈₀ :B ₂₀		R ₂₀ :B ₈₀		
SB6	R ₂₀ :B ₈₀				
CW (CK)	CW LED (R ₂₀ :G ₅₀ :B ₃₀)				

N_x : N 養液配方, N1 : 台大標準配方。E_x : E 養液電導度, x 電導度值, 單位: mS cm⁻¹。
 L_x : L 冷白 LED 燈管, x 光量, 單位: μmol·m⁻²·s⁻¹。H_x : H 開燈時數, x 小時數, 單位: 小時天⁻¹。
 Pdx : d 栽培密度, x 密度, 單位: plts m⁻²。
 A dT/nT : A 平均空氣溫度, dT/nT 日溫/夜溫, 單位: °C, 二氧化碳含量: 1200 ± 100 ppm

97

不同光配方對紅橡萵苣 生長與轉色之影響



Bar=15 cm

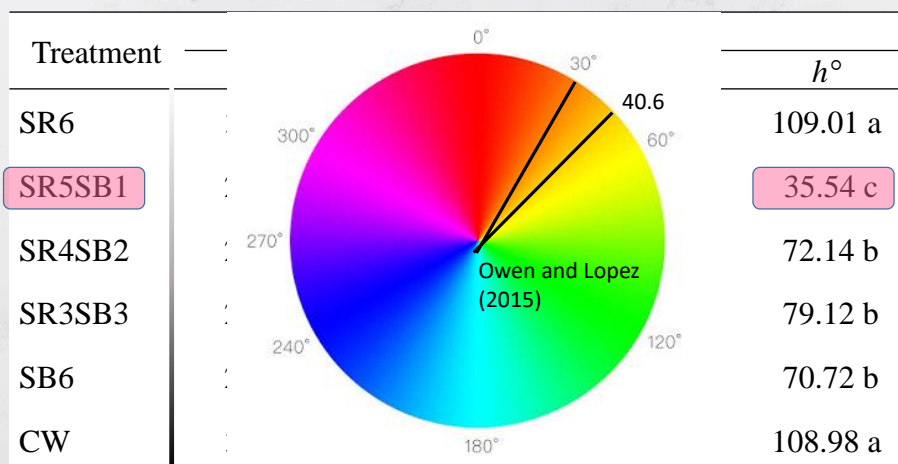
98

不同光配方對紅椗萬苳鮮重與花青素之影響

Treatment	FW (g/plant)	Anthocyanin content	
		AC (mg·g ⁻¹)	TAC (mg/plant)
SR6	108.3 a	0.024 c	2.56 b
SR5SB1	87.8 b	0.045 a	3.95 a
SR4SB2	88.7 b	0.038 b	3.34 b
SR3SB3	70.1 c	0.036 ab	2.54 c
SB6	43.2 d	0.045 ab	1.93 d
CW	65.8 c	0.017 d	1.12 e

紅光可顯著提高鮮重，藍光可顯著提高花青素含量
SR5SB1 可顯著提高總花青素含量

不同光配方對紅椗萬苳葉片顏色之影響



SR6 & CW 葉片顏色較淡

紅色，CW 最綠，紅色隨藍光比例增加

CW&SR6 葉片最黃

100

綠光 (500-600nm)

逆轉藍光的轉色效應, B:G

$$G+FR > G, \\ FR$$

較多
穿透，促進下位葉
光合作用

101

$$1+1 > 2$$

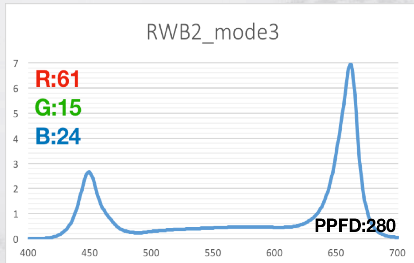
- 當 $R:Fr < 1$ ，會產生遮蔽反應
- 如果此時綠光也偏多，即綠光與紅外光並存時會加大遮蔽反應

102

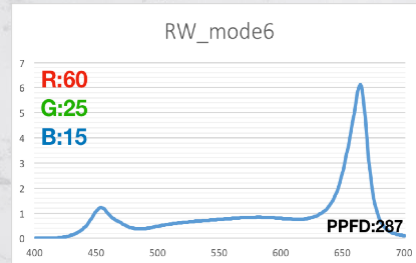
綠光逆轉藍光轉色

RWB (B₂₄:G₁₅:R₆₁)

RW (B₁₅:G₂₅:R₆₀)



B:G = 1.6
R:B = 2.54
R:PPFD = 61%



B:G = 0.6
R:B = 4.0
R:PPFD = 60%

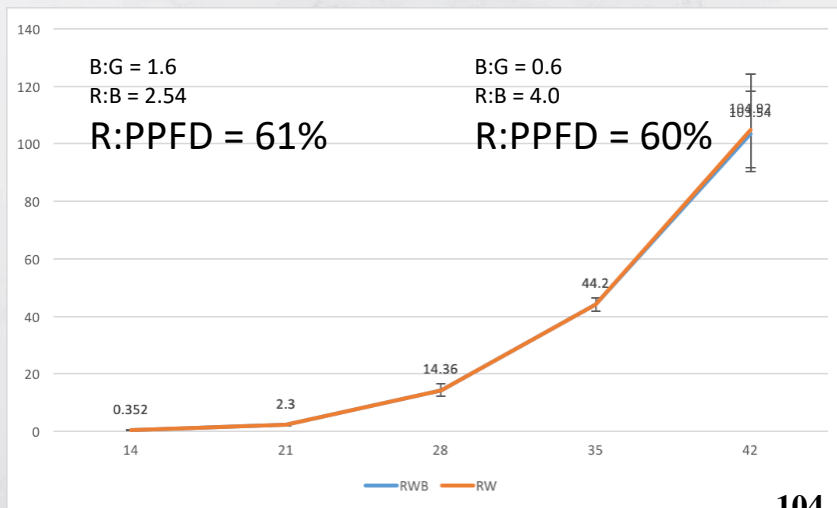
103

單株鮮重, g/plant

RWB (B₂₄:G₁₅:R₆₁)

V.S.

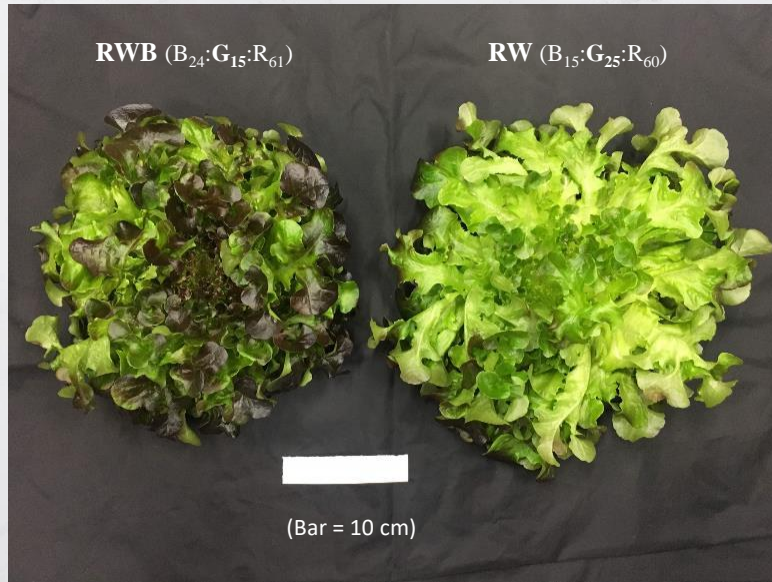
RW (B₁₅:G₂₅:R₆₀)



104

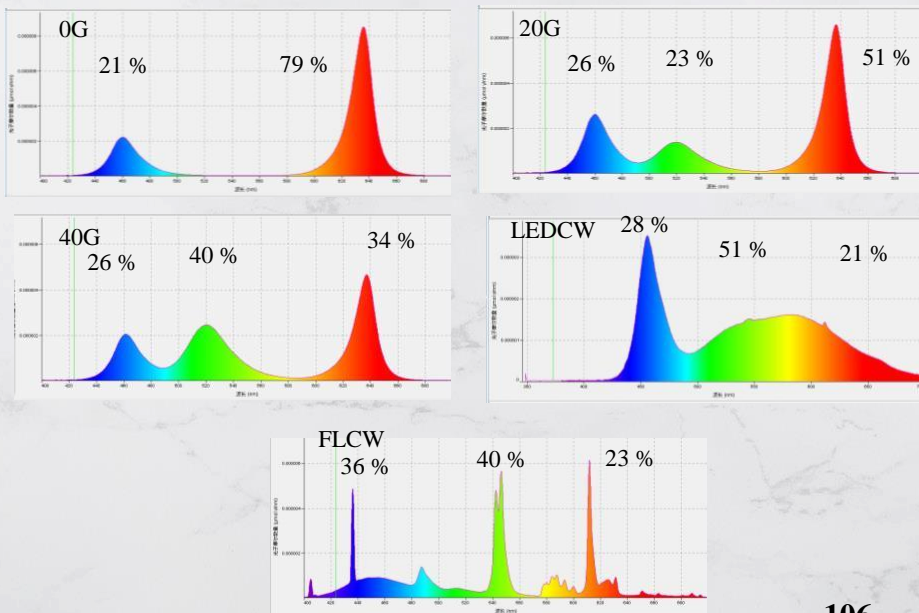
DAS=42

藍光有利於轉色，但會遭綠光逆轉
 RWB (B:G=1.6) 轉色優於 RW (B:G=0.6)



105

不同綠光比例 vs. 萵苣光合作用



106

不同綠光比例下栽培萵苣-分析項目



- 萵苣上下位葉
光合作用速率
- 萵苣葉片
光譜穿透率
- 萵苣鮮重
- 萵苣乾重

107

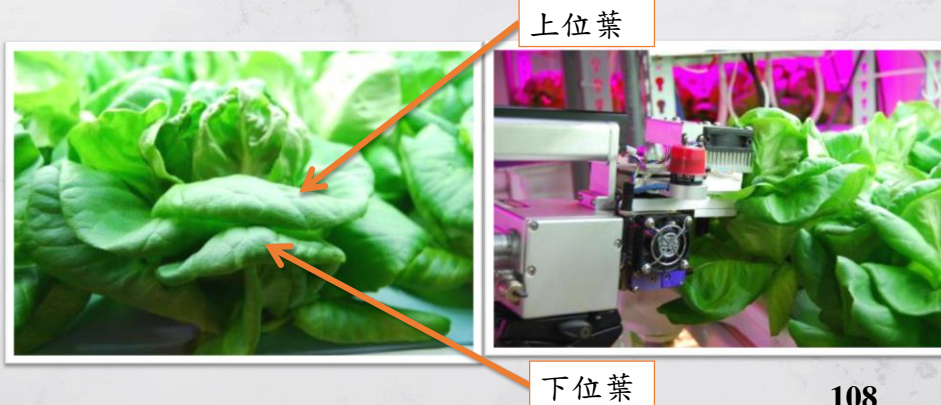
分析項目-萵苣上下位葉光合作用測定

使用可攜式光合作用測定儀 (LI-6400)

於早上 11 點~下午 2 點間量測 DAS=33 之波士頓萵苣

上位葉：萵苣完全展開成熟且直接受光之葉片

下位葉：上位葉遮蔽的下一層成熟葉片

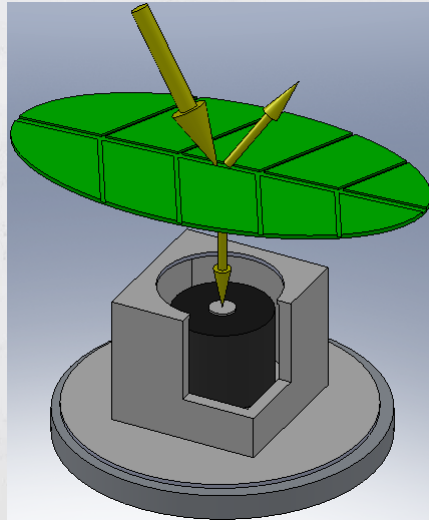


上位葉

下位葉

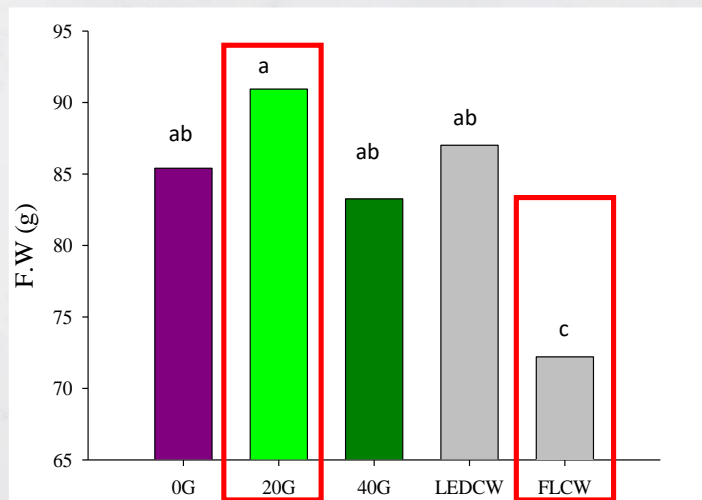
108

萵苣上下位葉光量與光譜量測



109

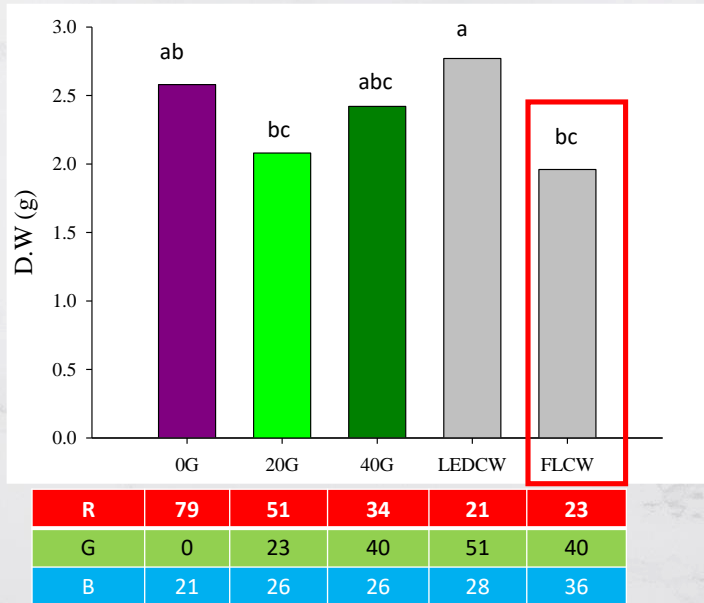
不同綠光比例 vs. 鮮重



R	79	51	34	21	23
G	0	23	40	51	40
B	21	26	26	28	36

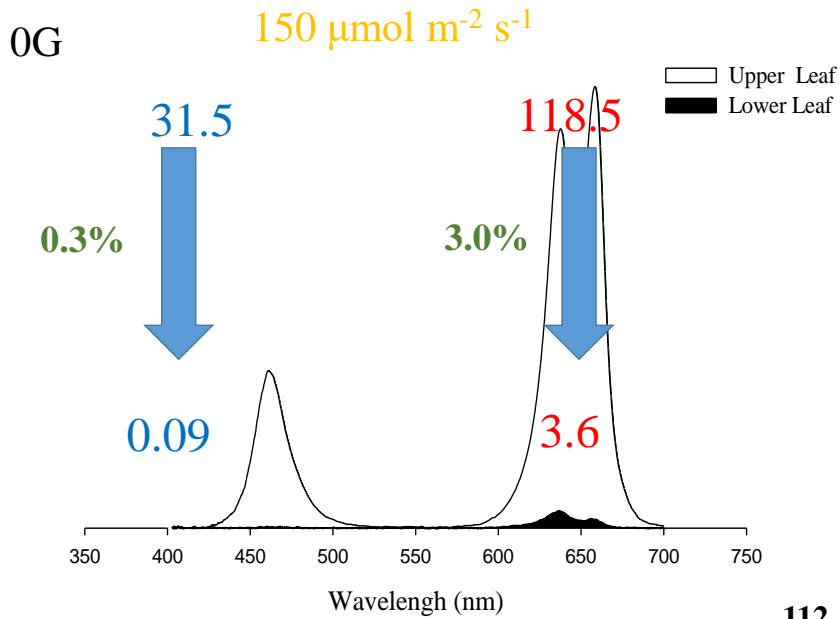
110

不同綠光比例 vs. 萵苣乾重

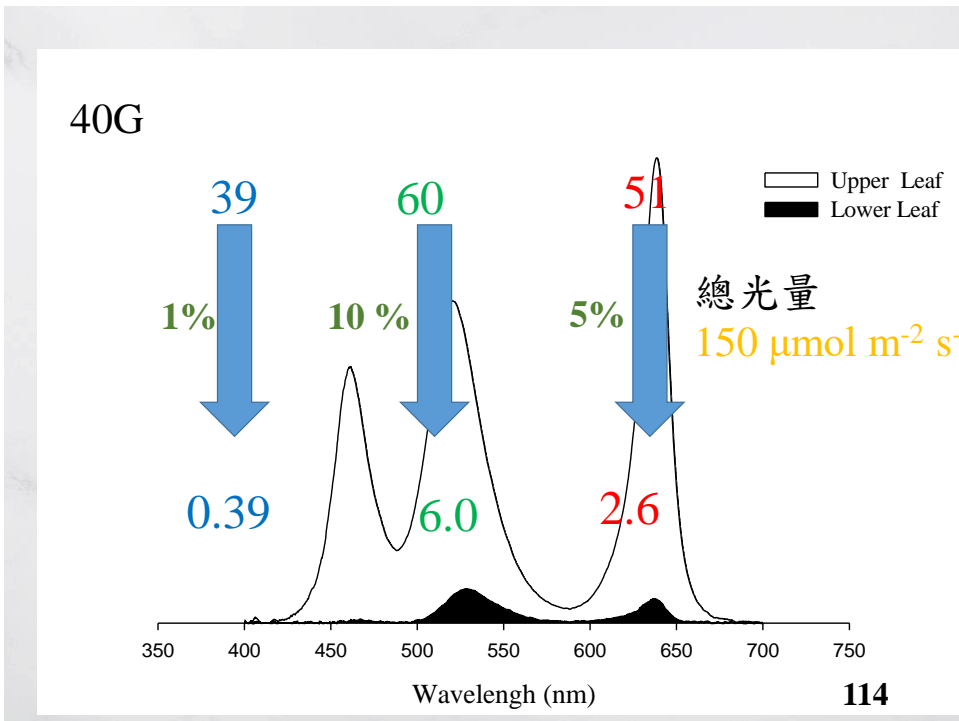
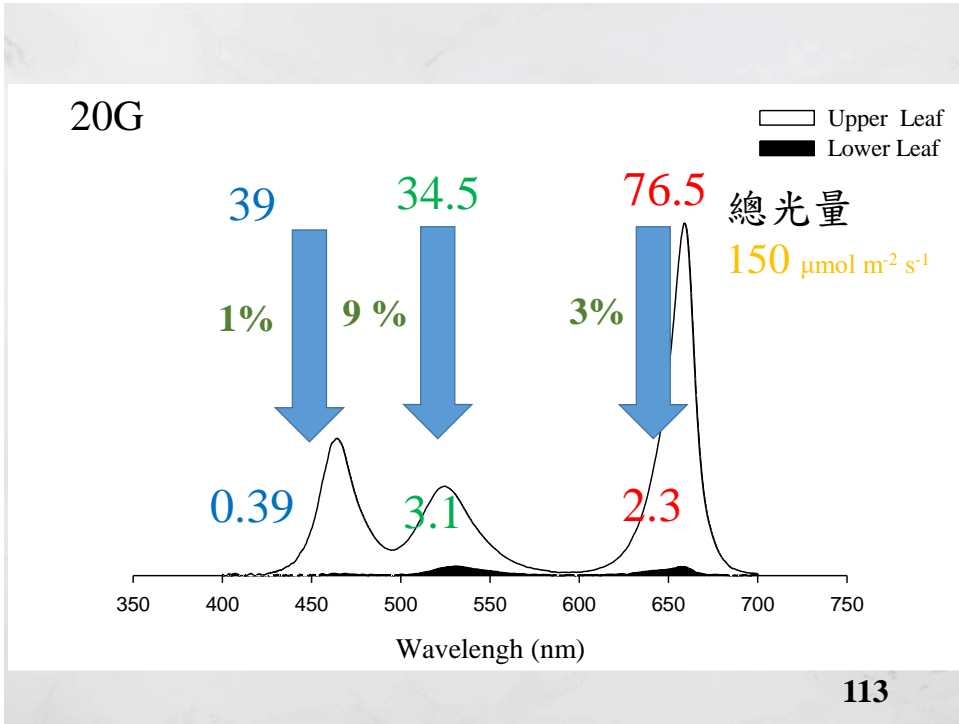


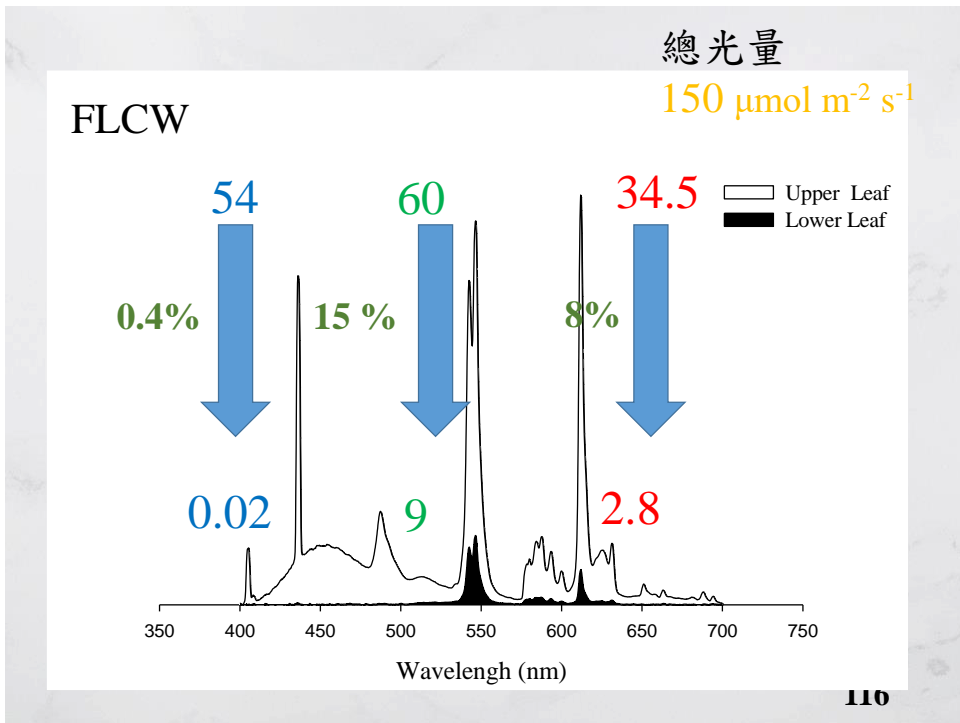
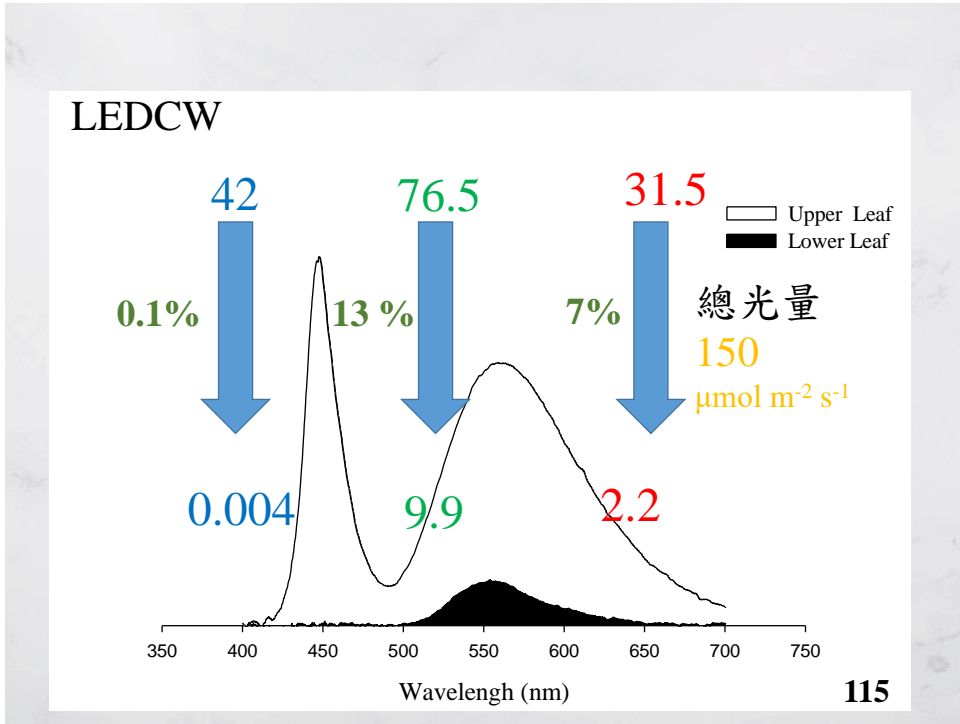
111

總光量



112





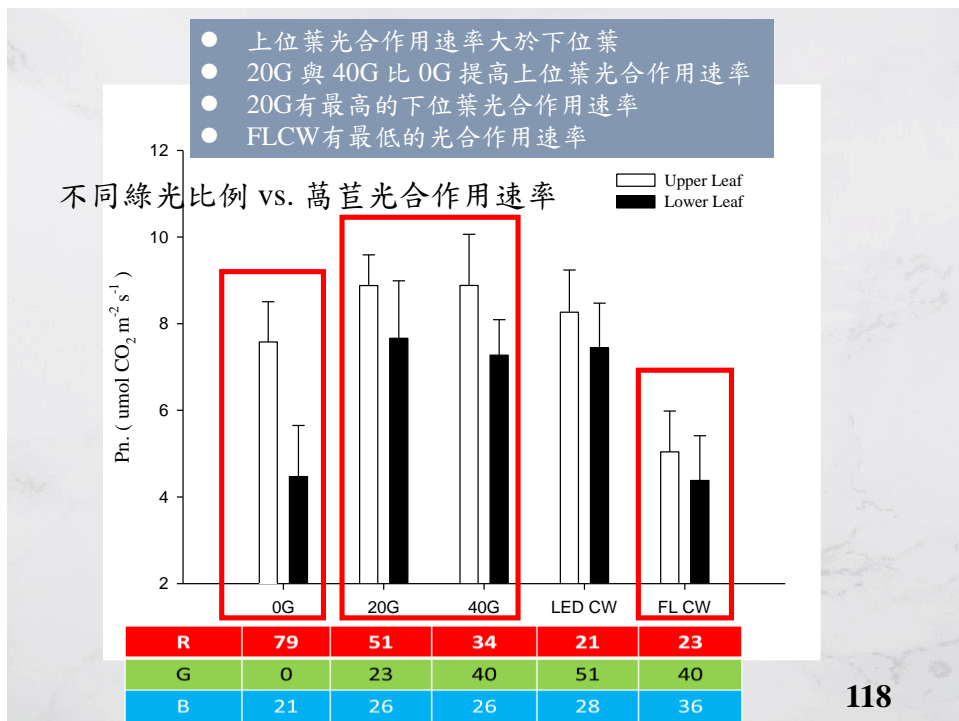
穿透率 (%) 與 PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

穿透率	B	G	R	PPFD _上	PPFD _下
0G	0.3	-	3	150	3.69
20G	1	9	3	150	5.79
40G	1	10	5	150	8.99
LEDCW	0.1	13	7	150	12.10
FLCW	0.4	15	8	150	11.82

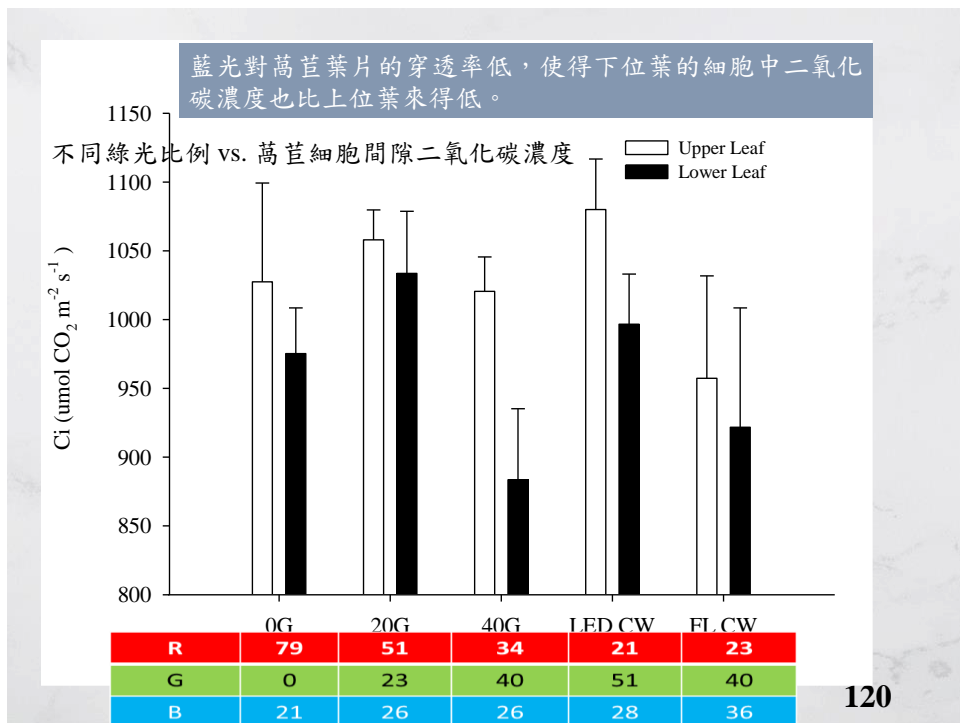
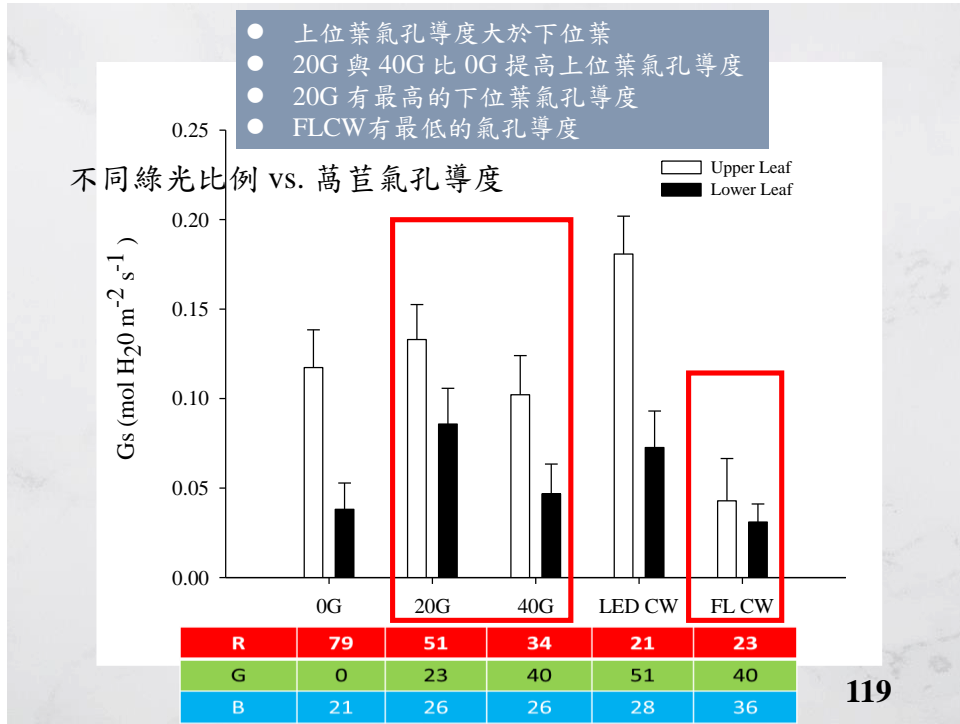
穿透率 $G > R > B$

綠光比例高的光源，下位葉的光量也較高

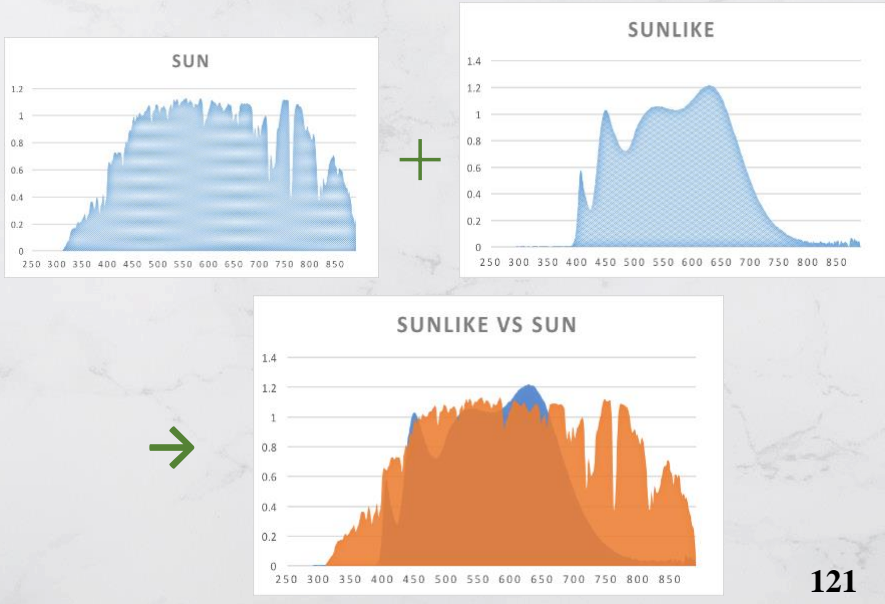
117



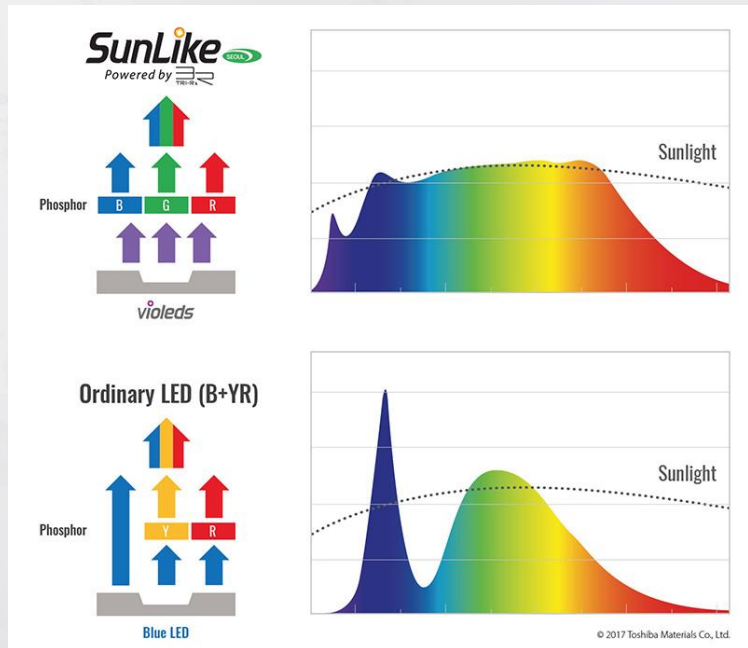
118



SUN vs. SunLike (首爾半導體)



121



<http://www.seoulsemicon.com/en/product/SunLike> 122

橡木葉紫萵苣



123

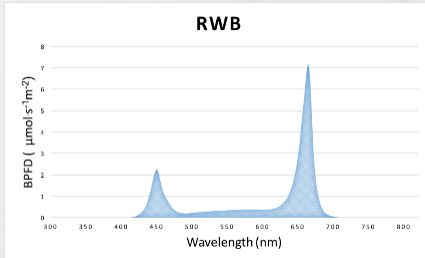
Spectral distributions

BPDF (300~800 nm) = 280 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

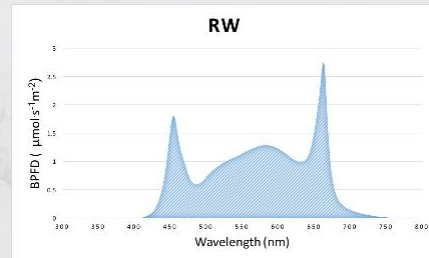
Treatment	Blue 401~500 nm	Green 501~600 nm	Red 601~700 nm	Far- Red 701~800 nm	B/G	G/R	R/Fr
RWB	23	13	64	0	1.64	0.222	-
RW	22	39	38	1	0.56	0.925	38
CW	26	48	24	2	0.54	2.000	12
SunLike	24	35	35	6	0.68	1.000	5.8

124

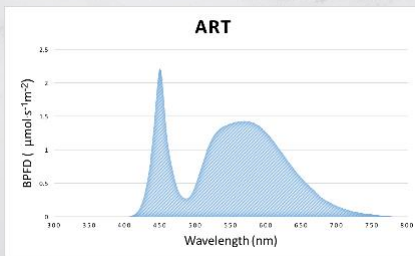
1 RWB ($B_{23}:G_{13}:R_{64}:FR_0$)



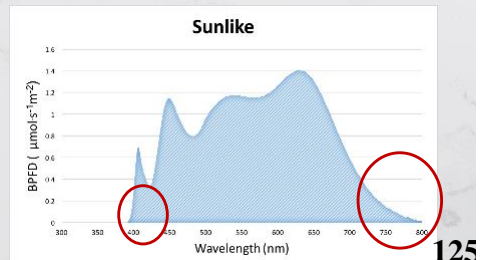
2 RW ($B_{22}:G_{39}:R_{38}:FR_1$)



3 ART ($B_{26}:G_{48}:R_{24}:FR_2$)



4 Sunlike ($B_{24}:G_{35}:R_{35}:FR_6$)



125

實驗栽培條件

處理組	播種期 (DAS = 0~3)	育苗期 (DAS = 4~14)	育成期 (DAS = 15~42)
RWB (宏鑫)		L1 ($B_{23}:G_{13}:R_{64}:FR_0$)	
RW (宏鑫)		L2 ($B_{22}:G_{39}:R_{38}:FR_1$)	
ART		L3 ($B_{26}:G_{48}:R_{24}:FR_2$)	
Sunlike		L4 ($B_{24}:G_{35}:R_{35}:FR_6$)	

註：播種期: N0_E0.1_L?_H24_d750_A25

育苗期: N1_E1.2_L?_H24_d750_A25/23

育成期: N1_E1.2_L?_H16_d37_A25/23

Cx: C 作物品項, C1: 橡木葉紫萵苣

Nx: N 養液配方, N0: 清水, N1: 康乃爾配方

Ex: E 養液電導度, x: 電導度值, 單位: $mS\ cm^{-1}$

Lx: L LED 燈管, x 光量, 單位: $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$

Hx: H 開燈時數, x 小時, 單位: 小時天⁻¹

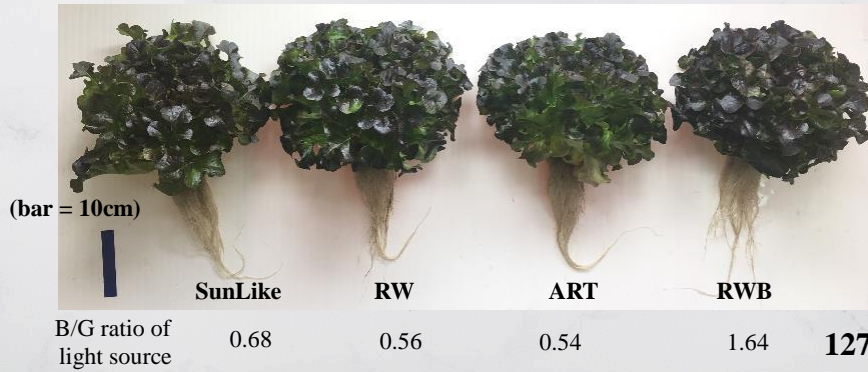
dx: d 栽培密度, x 單位: 株 m^{-2}

Ax/y: A 栽培溫度環境, x 日間溫度, y 夜間溫度, 單位: $^{\circ}C$

126

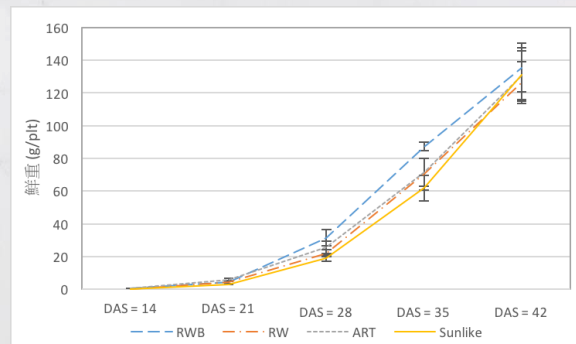
鮮重 (DAS = 42, sample = 5)

	SunLike	RW	ART	RWB
地上部鮮重 (g/plt)	131.2 ± 16.4 a	126.4 ± 12.8 a	130.8 ± 14.9 a	135.6 ± 15.1 a
地下部鮮重 (g/plt)	15.7 ± 2.6 a	15.8 ± 2.2 a	15.2 ± 2.7 a	13.9 ± 3.3 a
花青素 (mg·g ⁻¹)	2.1 ± 0.3 a	1.7 ± 0.5 a	1.8 ± 0.5 a	0.83 ± 0.4 b



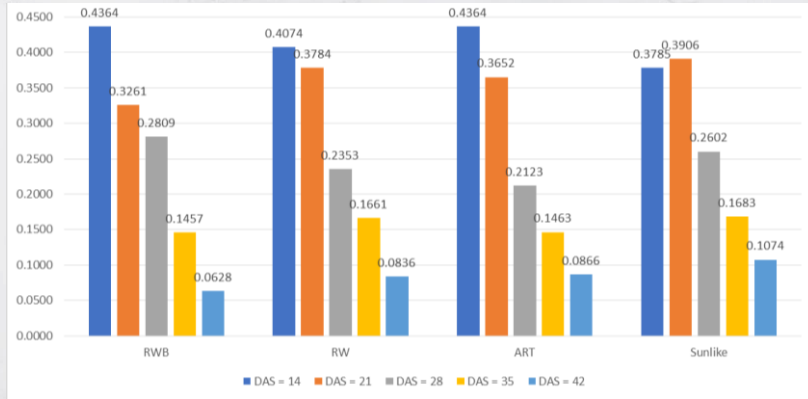
地上部鮮重 (g/plt, sample = 5)

	DAS = 14	DAS = 21	DAS = 28	DAS = 35	DAS = 42
RWB	0.45 ± 0.14 a	4.41 ± 0.87 b	31.50 ± 4.84 a	87.34 ± 2.54 a	135.6 ± 15.1 a
RW	0.30 ± 0.13 ab	4.24 ± 0.83 b	22.01 ± 2.24 bc	70.38 ± 9.51 b	126.4 ± 12.8 a
ART	0.45 ± 0.17 a	5.80 ± 1.06 a	25.63 ± 3.66 b	71.36 ± 8.53 b	130.8 ± 14.9 a
SunLike	0.20 ± 0.06 b	3.08 ± 0.22 c	19.04 ± 2.06 c	61.86 ± 7.93 b	131.2 ± 16.4 a



128

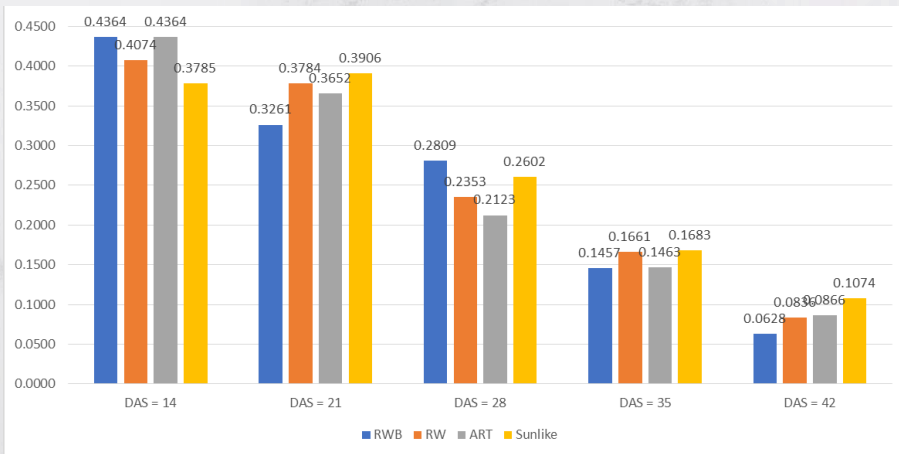
Daily Growth Rate, slope of Semi-Log



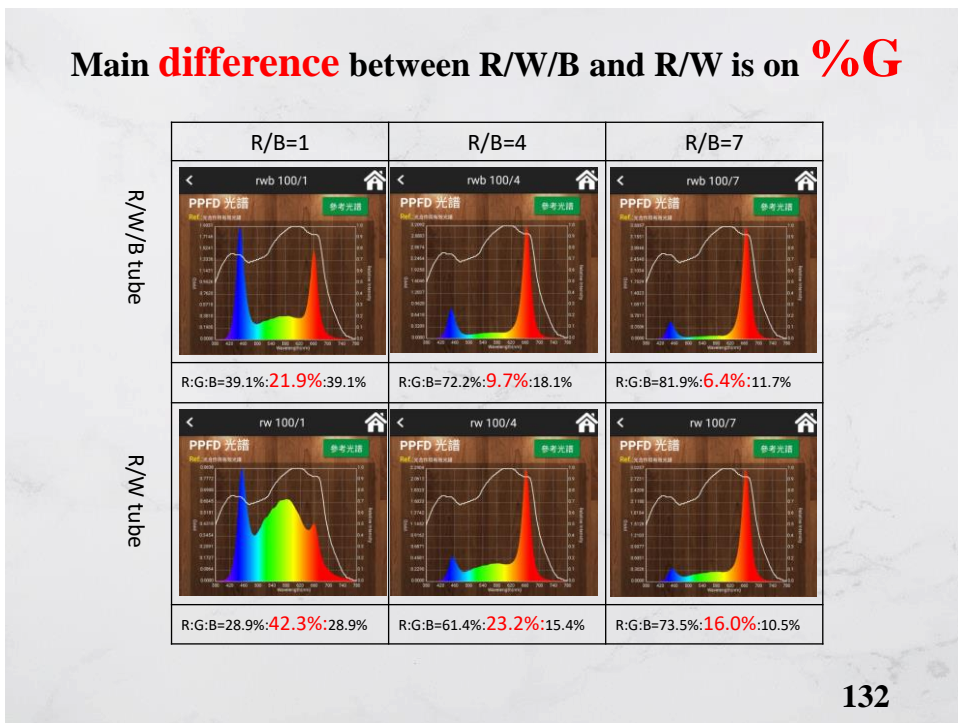
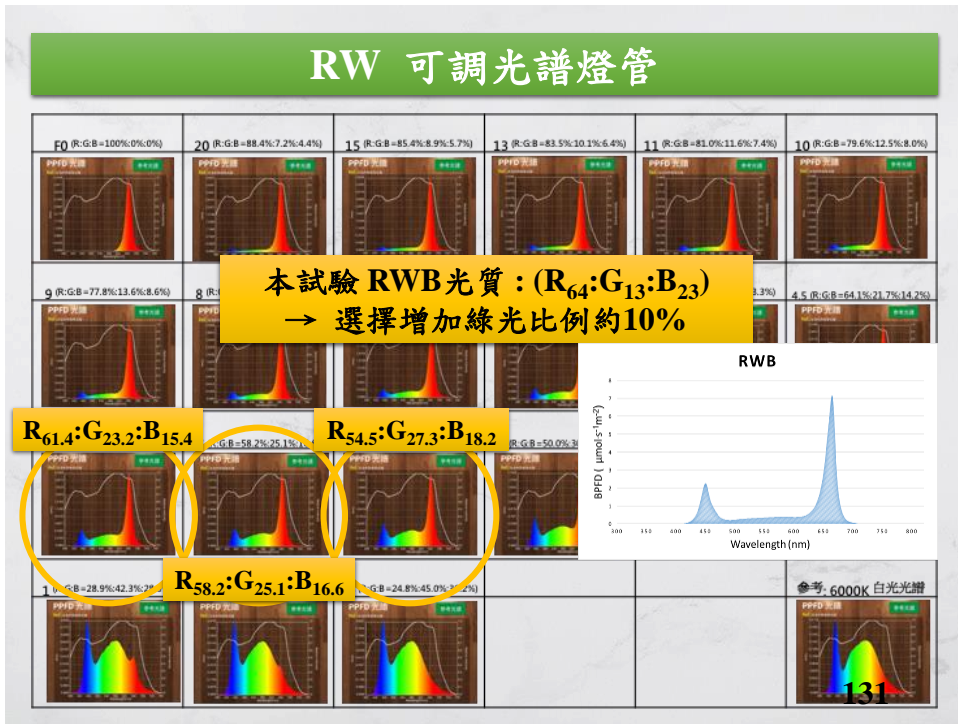
RWB	0.4364	0.3261	0.2809	0.1457	0.0628
RW	0.4074	0.3784	0.2353	0.1661	0.0836
ART	0.4364	0.3652	0.2123	0.1463	0.0866
Sunlike	0.3785	0.3906	0.2602	0.1683	0.1074

129

Daily Growth Rate, slope of Semi-Log



130



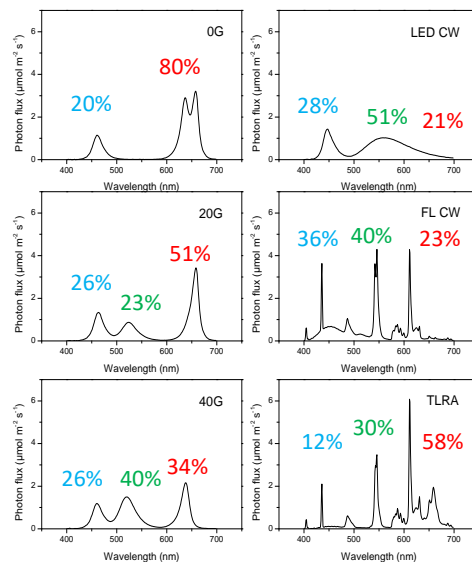
黃光 (575-625 nm)

對生長幫助最低

目前研究較少

133

不同光質 vs. 波士頓萵苣



134

黃綠光 (575-625 nm 對萵苣生長貢獻低)

Types of Light	400~475	475~525	525~575	575~625	625~700	FM (g/plt)
Range	75 nm	50 nm	50 nm	50 nm	75 nm	
0G	16.0 (%)	3.95	0.26	7.70	72.1	85.40
20G	18.6	15.8	12.3	2.16	51.1	90.94
40G	18.1	26.3	18.8	7.57	29.2	83.26
LED CW	24.2	9.41	30.7	24.3	11.4	87.01
FLCW	25.4	14.8	27.5	24.6	7.71	72.21
TLRA	6.73	5.72	20.1	32.9	34.6	78.33
Calculated results	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	R ²
Contributions	2.70E-3	2.90E-4	2.88E-2	-4.34E-3	1.34E-2	0.95
Relative Contributions	20.15	2.16	214.93	-32.39	100	

135

紅光 (600-700 nm)

促進
光合
作用

增加
葉綠
素

可溶
性糖

增加
節間

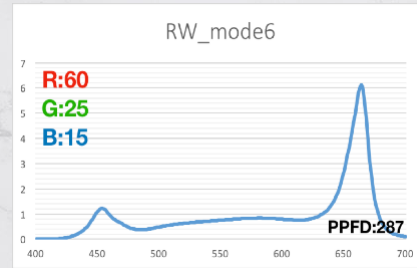
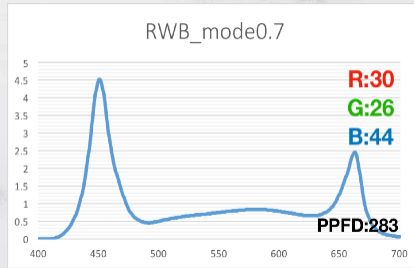
136

紅光促進光合作用

紅橡萵苣

RWB (B₃₀:G₂₆:R₄₄)

RW (B₁₅:G₂₅:R₆₀)

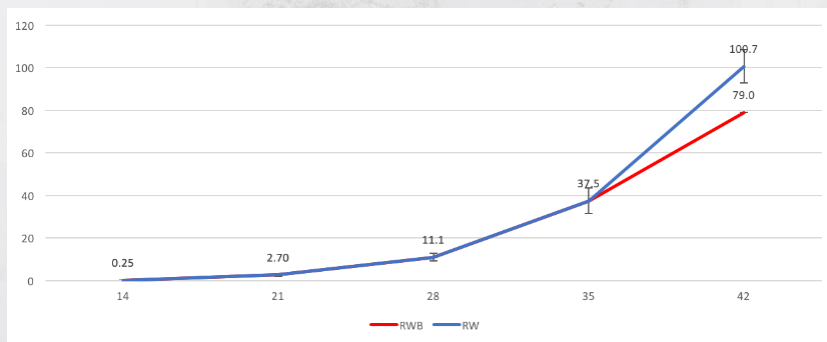


137

RWB (B₃₀:G₂₆:R₄₄)

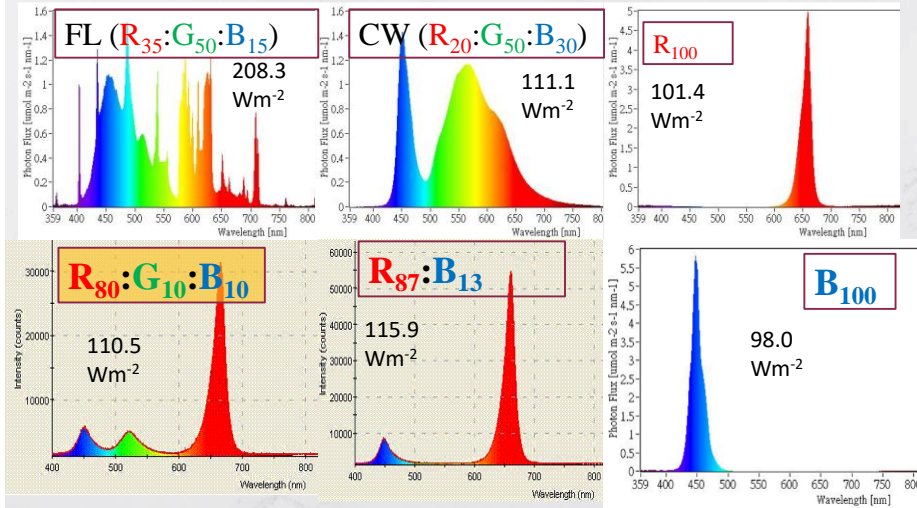
V.S.

RW (B₁₅:G₂₅:R₆₀)



138

蘿蔔嬰光譜與環境條件



120 μmol m⁻² s⁻¹, 12/12 hrs, 26/21 °C, CO₂ 1200 ppm, 綠化 3、5、7天
11500 plant/m² **139**

芽菜栽培容器



使用兩層式圓杯栽培
上層放種子
下層放養液

140

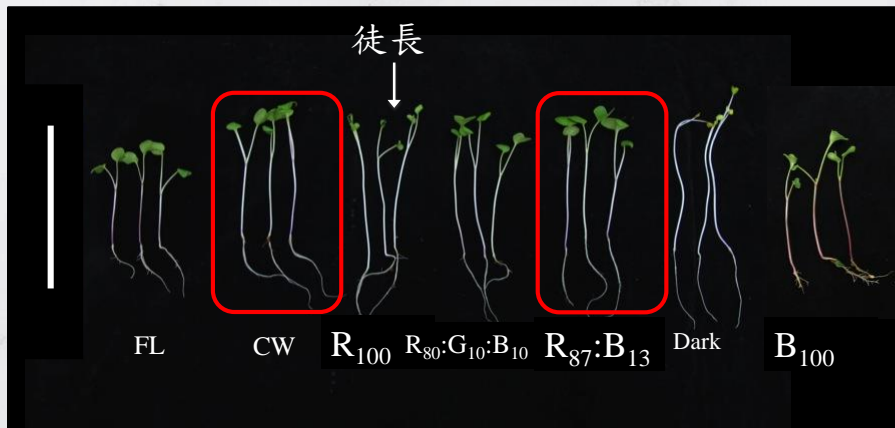
不同光環境對照光健化3天蘿蔔嬰生長情形



Bar= 15 cm

141

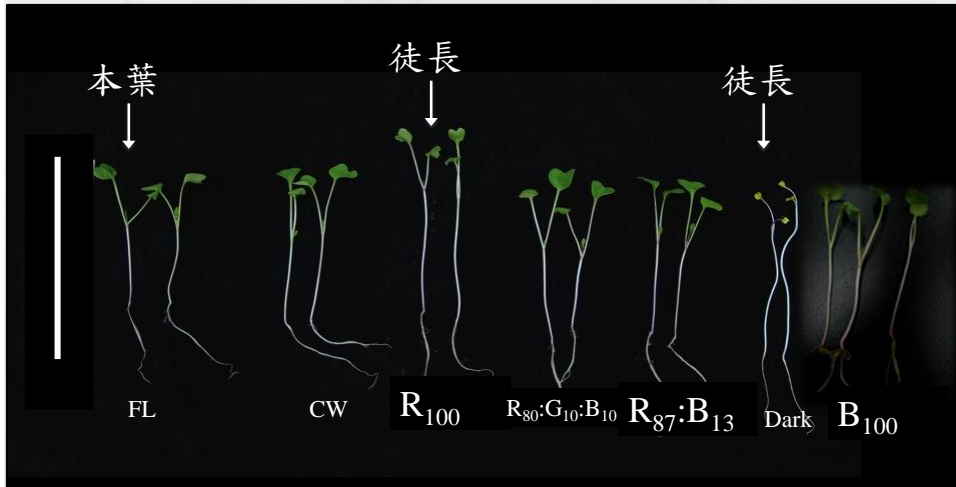
不同光環境對照光健化5天蘿蔔嬰生長情形



Bar= 15 cm

142

不同光環境對照光健化 7 天蘿蔔嬰生長情形



Bar= 15 cm

143

不同光環境與照光天數對蘿蔔嬰鮮重之影響

Light quality	Fresh weight /10 plants (g)		
	健化 3天	健化 5天	健化 7天
R ₁₀₀	1.44 b	2.57 a	2.84 a
R ₈₇ :B ₁₃	1.75 a	2.29 b	2.53 ab
R ₈₀ :G ₁₀ :B ₁₀	1.73 a	2.15 b	2.34 b
B ₁₀₀	1.09 c	1.91 bc	2.06 c
CW	1.76 a	2.15 b	2.75 a
FL	1.10 c	1.43 d	2.72 a
Dark	1.06 c	1.69 c	2.34 b
A (光質)		***	
B (時間)		*	
A*B		*	

Means followed by the different letters in each column are significantly different at 5% level by LSD Test. (n=5)

144

不同光環境與照光天數對蘿蔔嬰株高之影響

Light quality	Plant height (cm)		
	健化 3天	健化 5天	健化 7天
R ₁₀₀	6.6 a	12.6 a	12.8 a
R ₈₇ :B ₁₃	5.9 a	10.4 b	11.3 b
R ₈₀ :G ₁₀ :B ₁₀	6.2 a	10.5 b	11.2 b
B ₁₀₀	6.2 a	9.9 bc	11.4 b
CW	4.5 b	8.5 c	11.3 b
FL	2.7 c	7.2 d	10.4 b
Dark	6.0 a	12.5 a	12.7 a
A(光質)		***	
B(時間)		n.s	
A*B		***	

Means followed by the different letters in each column are significantly different at 5% level by LSD Test. (n=5)

不同光環境與照光健化時間對Vit. C 之影響

Light quality	Vit. C Content (mg·g ⁻¹)		
	健化 3天	健化 5天	健化 7天
R ₁₀₀	1.17 c	- 2%	0.84 c
R ₈₇ :B ₁₃	1.22 bc	1.39 a	1.19 ab
R ₈₀ :G ₁₀ :B ₁₀	1.21 bc	1.05 bc	1.17 ab
B ₁₀₀	1.28 bc	1.11 bc	1.03 bc
CW	1.30 b	- 13%	1.13 b
FL	1.71 a	- 29%	1.23 a
Dark	0.66 d	0.40 d	0.37 d
A(光質)		***	
B(時間)		n.s	
A*B		n.s	

Means followed by the different letters in each column are significantly different at 5% level by LSD Test. (n=5)

不同光環境與照光健化時間對蘿蔔嬰DPPH 清除率之影響

Light quality	DPPH 清除率(Vit. E_mg·g ⁻¹)		
	健化 3天	健化 5天	健化 7天
R ₁₀₀	0.046 b	0.048 b	0.041 c
R ₈₇ :B ₁₃	0.046 b	0.048 b	0.045 b
R ₈₀ :G ₁₀ :B ₁₀	0.046 b	0.048 b	0.045 b
B ₁₀₀	0.036 c	0.043 c	0.042 c
CW	0.045 b	0.047 b	0.045 b
FL	0.045 b	0.045 b	0.043 b
Dark	0.048 a	0.050 a	0.047 a
A(光質)		**	
B(時間)		*	
A*B		*	

Means followed by the different letters in each column are significantly different at 5% level by LSD Test. (n=5)

147

紅外光 (700–800nm)

FR+G >
FR, G

R+FR
R:FR

促進花
青素與
葉綠素
合成

影響乾
物質分
配與抗
病力

開
花
抑制/
促進

148

$$1+1 > 2$$

- Emerson (Enhancement) Effect **艾默生效應**
- 紅光與紅外光並存，有助植物生長
- 綠色植物在紅光（波長660nm）和紅外（波長>680nm）分別照射下，各有各的**光合成率**。但植物在這二種光同時的照射下，它們的光合成率遠大於這二種光單獨照射時的光合成率的總和。這種現象稱為艾默生效應。這個現象是羅伯特·艾默生於1957年發現的，故以他的名字命名。
- 艾默生根據他發現的效應，做出結論（假設）；植物的葉綠體存在二種化學反應；一種由紅光啟動；另一種由紅外光啟動；它們共同使效率增加，把光轉換成植物能吸收的能量。這種假設已得到實驗的證實。

149

FR 刺激 紅羽衣甘藍苗 花青素之累積



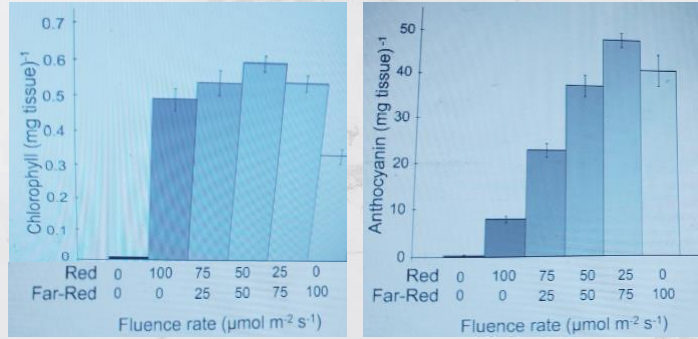
Red	100	75	50	25	0
Far-Red	0	25	50	75	100
Fluence rate ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)					

Sofia and Folta, 2014

150

FR 促進紅羽衣甘藍苗 葉綠素與花青素之累積

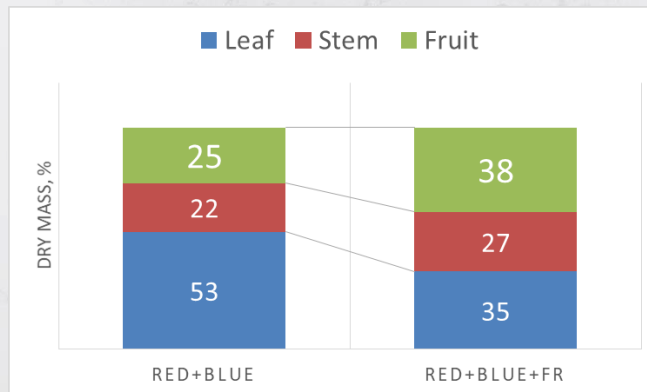
Red Russian Kale sprout



Sofia and Folta, 2014

151

FR 增加番茄果實的比例

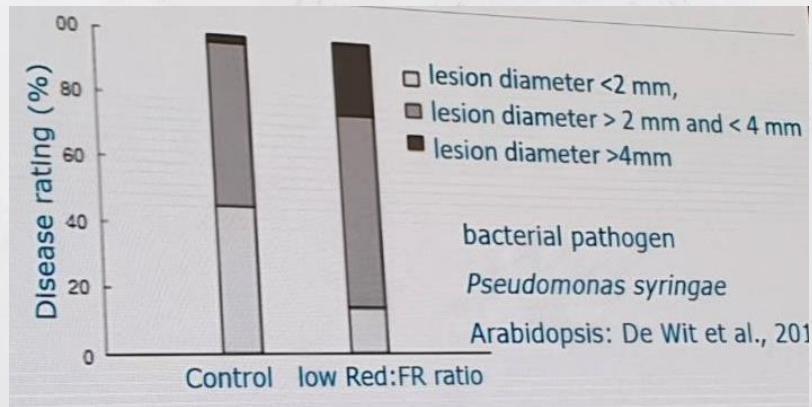


FR 在光期提供

Heuvelink and Marcelis, 2018, SIIPFS

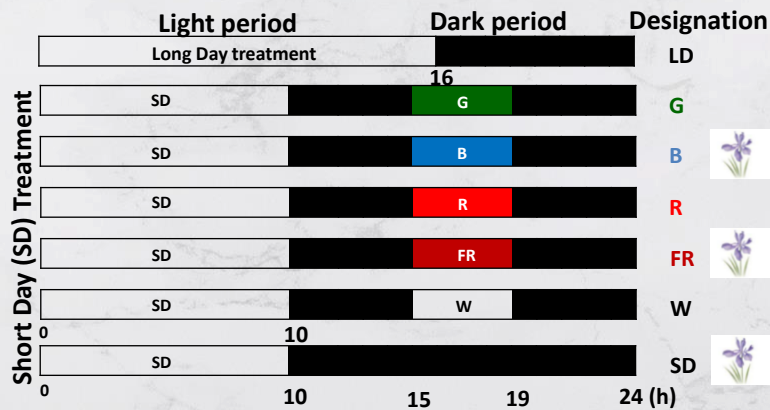
152

低 R:Fr 比值加重了病害的發生



Heuvelink and Marcelis, 2018, SIIPFS 153

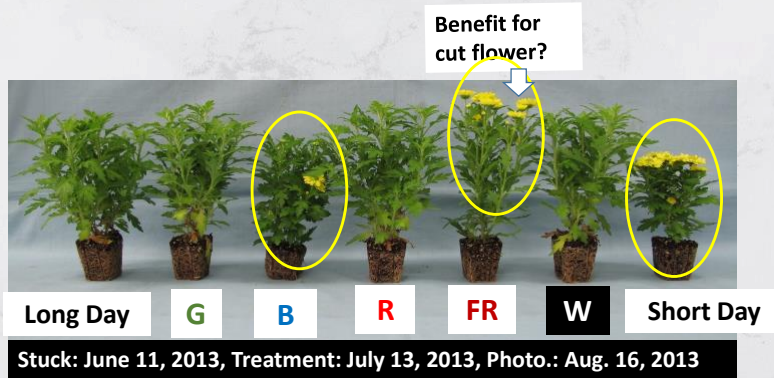
在 16 小時光週期中，分別使用 G、B、R、FR，進行暗期中斷對菊花開花的影響



Jeong, B. R., 2013

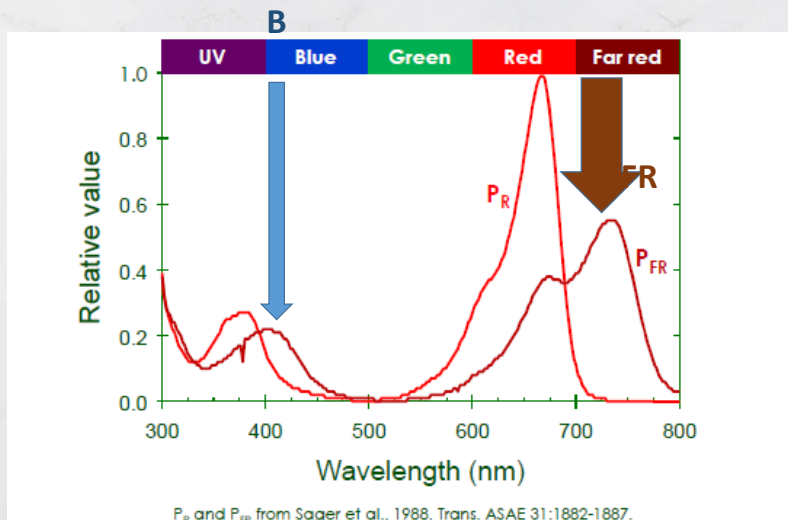
154

Effects of night interruption as affected by light quality



Jeong, B. R., 2013

155



156

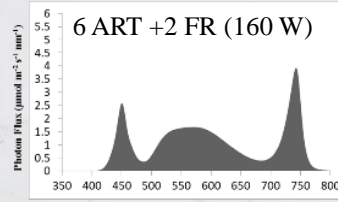
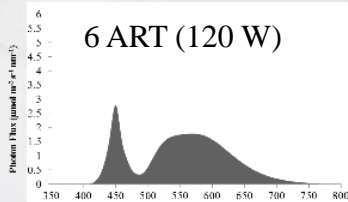
植物工廠中利用 FR 使長日植物不開花

菠菜 (美和)

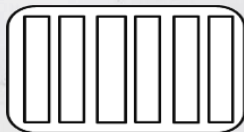
- 光期 = 12 h
 - 誘導開花
- 光期 = 11 h,
 - 鮮重低 (80 g/plant in DAS=32)

157

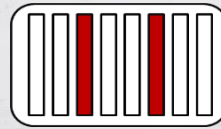
光譜處理



燈具代號	Red %	Green %	Blue %	FR % (700-800 nm)	R/B	R/FR
6 ART (120 W)	25	49	26	1.8	1.0	14.18
6 ART+2 FR (160 W)	25	48	26	37	1.0	0.667



6 ART (120 W)

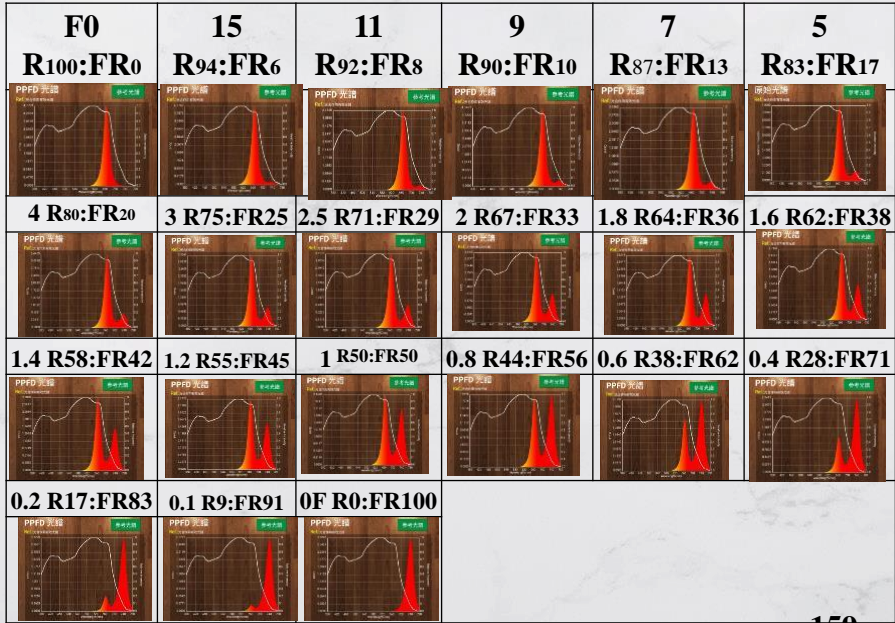


6 ART + 2 FR (160 W)

燈具代號	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 400-700 nm	FR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 700-800 nm	BPDF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 400-800 nm
6 ART (120 W)	306.4	5.4	311.8
6 ART+2 FR (160 W)	300.1	112.5	412.6

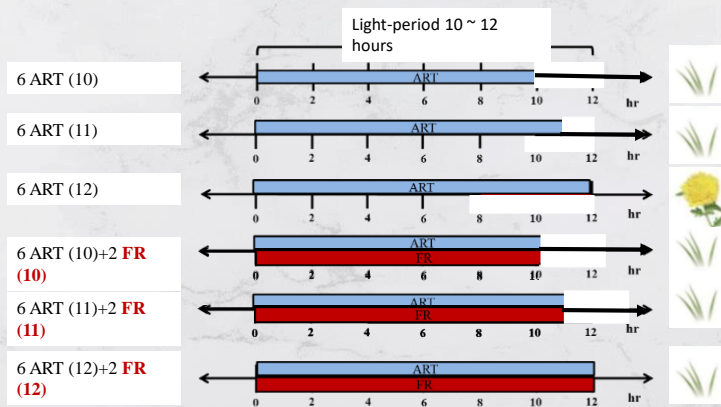
158

21 R/FR spectra in one LED tube



159

Applying concurrent FR during 10, 11 and 12 hours light period



160

採收後各處理組之外觀



161

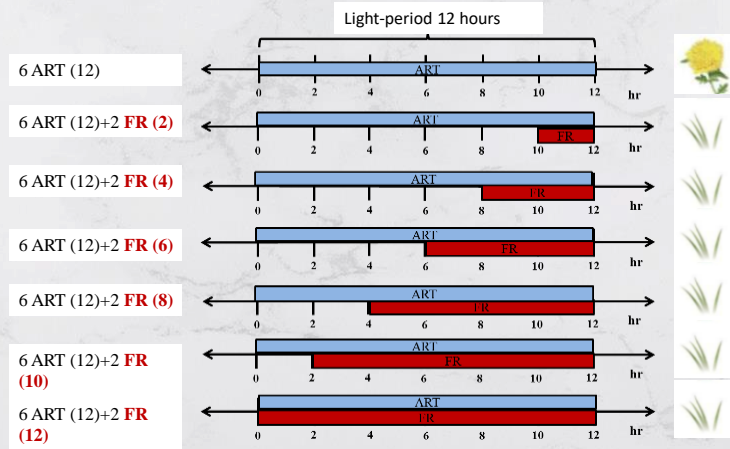
美和菠菜各處理組之鮮重、硝酸鹽與草酸鹽含量

rPC / rFW	Treatments	Shoot Fresh Weight	Nitrate	Oxalate
		地上部鮮重 (g plt ⁻¹)	硝酸鹽含量 (ppm)	草酸鹽含量 (mg/100g)
1.00 / 1.00	6 ART (10 hr)	91.12±2.58 c	2895.84±321.89 b	687.60±21.99 bc
1.10 / 0.97	6 ART (11 hr)	88.96±2.62 c	2873.49±554.84 b	756.88±83.64 ab
1.20 / 0.97	6 ART (12 hr)	88.40±3.99 c	2576.49±316.34 b	802.55±31.35 a
1.33 / 1.32	6 ART+2 FR (10 hr)	120.02±6.54 b	3764.20±146.68 a	638.78±48.01 c
1.46 / 1.23	6 ART+2 FR (11 hr)	111.76±4.83 b	2936.59±357.03 ab	688.12±21.78 bc
1.60 / 1.53	6 ART+2 FR (12 hr)	139.8±7.86 a	3085.89±361.24 ab	682.87±22.83 bc
		n=5	n=5	n=4

冷白光給光(明期)時間越長(10, 11, 12 h), 鮮重與硝酸鹽沒有顯著差別, 但草酸鹽濃度越高
 只給冷白光的明期 12 h 會開花, 顯然 12 h 已達臨界日長, 11 h 未達臨界日長
 明期同時給 FR, 可以抑制開花且鮮重顯著增加, 硝酸鹽隨之增加

162

Applying different hours of FR during the 12 hours light period



163

採收後美和菠菜



164

美和菠菜鮮重、硝酸鹽與草酸鹽含量

Treatments	Fresh weight 地上部鮮重 (g plt ⁻¹)	Nitrate 硝酸鹽含量 (ppm)	Oxalate 草酸鹽含量 (mg/100g)
6 ART (12)	88.40±3.99 d	2576.49±316.34 a	802.55±31.35 a
6 ART (12)+2 FR (2)	90.04±1.23 d	2708.94±382.73 a	609.39±30.87 c
6 ART (12)+2 FR (4)	99.64±1.18 c	2582.28±434.30 a	636.16±28.53 bc
6 ART (12)+2 FR (6)	103.88±1.47 bc	3277.04±437.46 a	657.15±22.42 bc
6 ART (12)+2 FR (8)	110.64±3.16 b	2873.45±597.00 a	679.20±24.03 bc
6 ART (12)+2 FR (10)	131.32±2.62 a	3057.86±213.17 a	685.50±23.54 bc
6 ART (12)+2 FR (12)	139.8±7.86 a	3085.89±361.24 a	682.87±22.83 b



Applying 2 h of FR during the light-period is enough to inhibit flowering and reduce Oxalate content
 4 h of FR during the light-period can increase FW, longer duration (4 h → 12 h) leads to bigger FW

165

Far-Red 抑制菠菜開花及增加鮮重

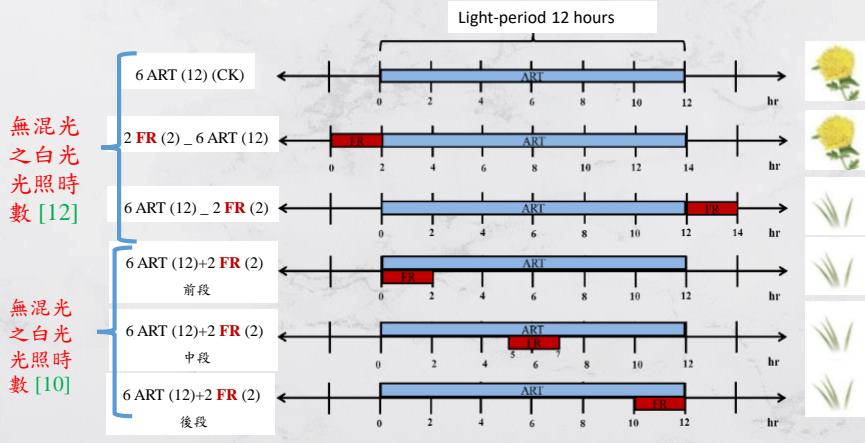
Treatments	Shoot FW (g plt ⁻¹)
6 CW (12hr) (CK) ★	88.40±3.99 d
6 CW (12)+2 FR (2hr)	90.04±1.23 d
6 CW (12)+2 FR (4)	99.64±1.18 c
6 CW (12)+2 FR (6)	103.88±1.47 bc
6 CW (12)+2 FR (8)	110.64±3.16 b
6 CW (12)+2 FR (10)	131.32±2.62 a
6 CW (12)+2 FR (12)	139.8±7.86 a



鮮重增加 58%

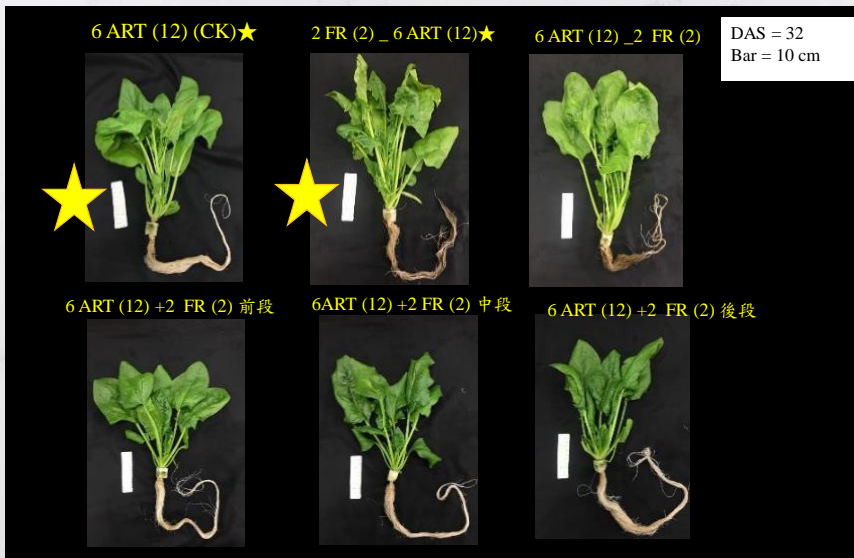
166

在光期 12 小時不同時段中添加 2 小時 FR



167

採收後美和菠菜



168

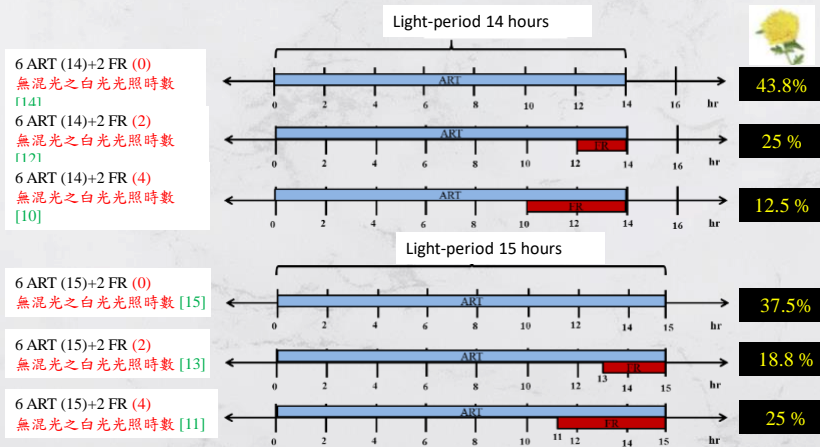
美和菠菜鮮重、硝酸鹽與草酸鹽含量

Treatments	開花率 (%)	地上部鮮重 (g plt ⁻¹)	硝酸鹽含量 (ppm)	草酸鹽含量 (mg/100g)
6 ART (12) (CK)	31.3 (A = 5)	90.5 ab	2952.3 ab	886.5 a
2 FR (2) _ 6 ART (12)	43.8 (A = 7)	92.8 a	3491.5 a	848.7 ab
6 ART (12) _ 2 FR (2)	0	92.1 a	2982.6 ab	777.9 ab
6 ART (12)+2 FR (2) 前段	0	83.6 b	2623.1 b	762.1 ab
6 ART (12)+2 FR (2) 中段	0	83.2 b	2791.8 ab	751.6 b
6 ART (12)+2 FR (2) 後段	0	88.2 ab	3096.0 ab	788.4 ab

註：開花率： $\frac{A}{16} \times 100\%$ ，A：開花株數

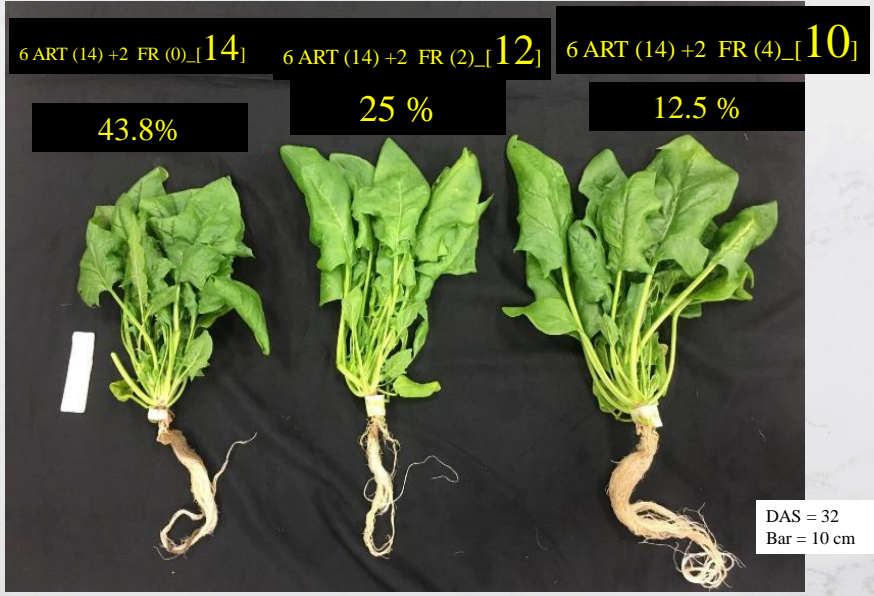
169

Applying FR in the 14 and 15 hours light period



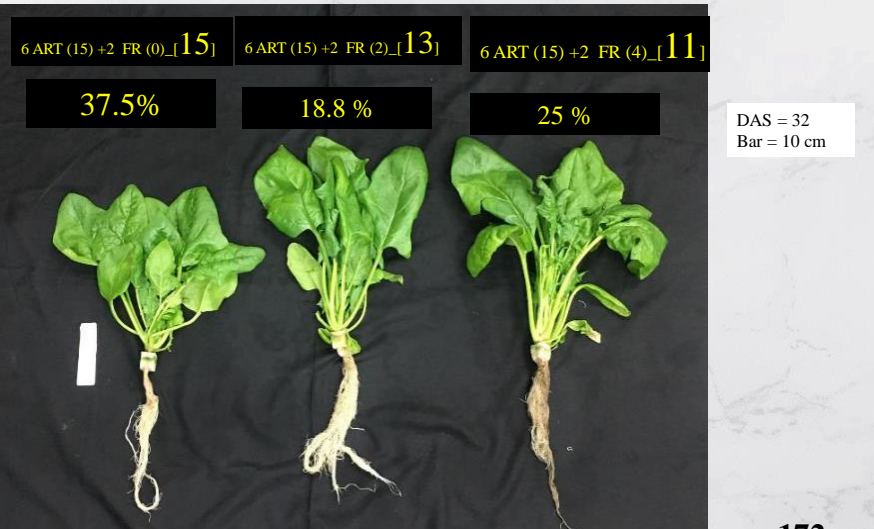
170

美和菠菜之白光與混光光照時數與開花率



171

美和菠菜白光與混光光照時數與開花率



172

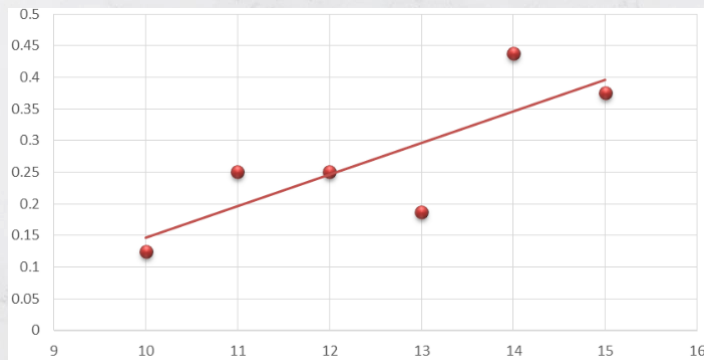
美和菠菜各處理組之鮮重、硝酸鹽與草酸鹽含量

Treatments	開花率 (%)	地上部鮮重 (g plt ⁻¹)	硝酸鹽含量 (ppm)	草酸鹽含量 (mg/100g)
6 ART (14)+ 2 FR (0) _ [14]	43.8 (A = 7)	108.5 c	3023.7 a	894.9 ab
6 ART (14)+ 2 FR (2) _ [12]	25.0 (A = 4)	133.3 b	3506.1 a	659.3 c
6 ART (14)+ 2 FR (4) _ [10]	12.5 (A = 2)	152.4 a	3049.9 a	942.7 a
6 ART (15)+ 2 FR (0) _ [15]	37.5 (A = 6)	106.0 c	3492.2 a	849.3 ab
6 ART (15)+ 2 FR (2) _ [13]	18.8 (A = 3)	125.5 b	3269.2 a	656.6 c
6 ART (15)+ 2 FR (4) _ [11]	25.0 (A = 4)	149.2 a	3671.7 a	785.8 bc

注：開花率： $\frac{A}{16} \times 100\%$ ，A：開花株數

173

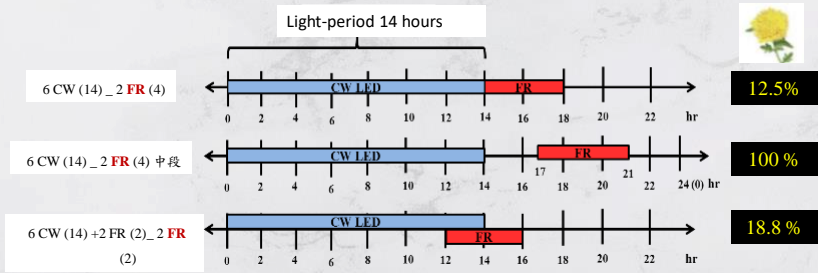
開花率 Flowering percentage



給光 14, 15 小時下無FR光之光照時數
Hours without FR during the 14, 15 hours of light period

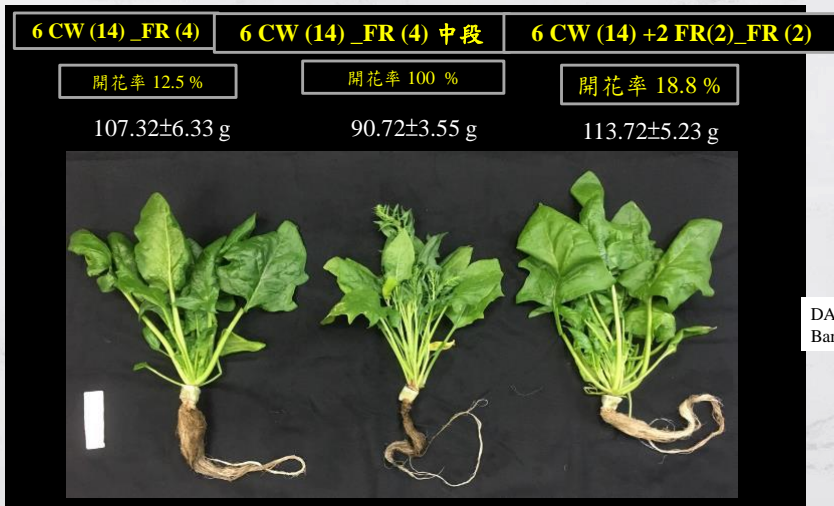
174

暗期補充FR的結果



175

採收後美和菠菜



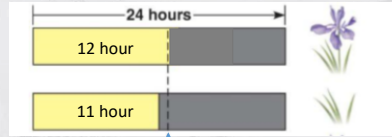
176

彙總

Light period (LP)

LP 12 h

LP 11 h



‘美和’菠菜

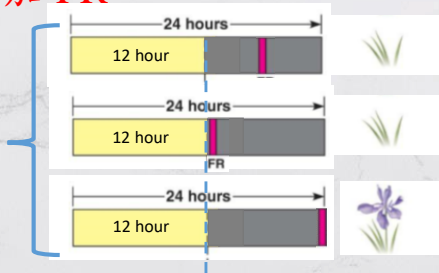
‘Mei-Ho’ Spinach

CDL (CNP) in between 11 and 12 h

在12hr暗期中添加 FR

LP 12 h _ FR 2 h

光期 12 h 接著暗期
2 h FR



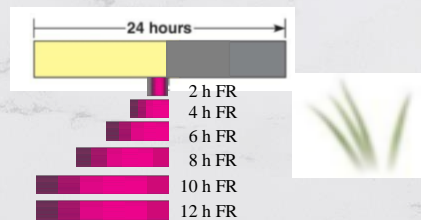
177

在12h光期中添加 FR

LP 12 h + FR 2 h
Light period 12 h
with
concurrent 2 h FR

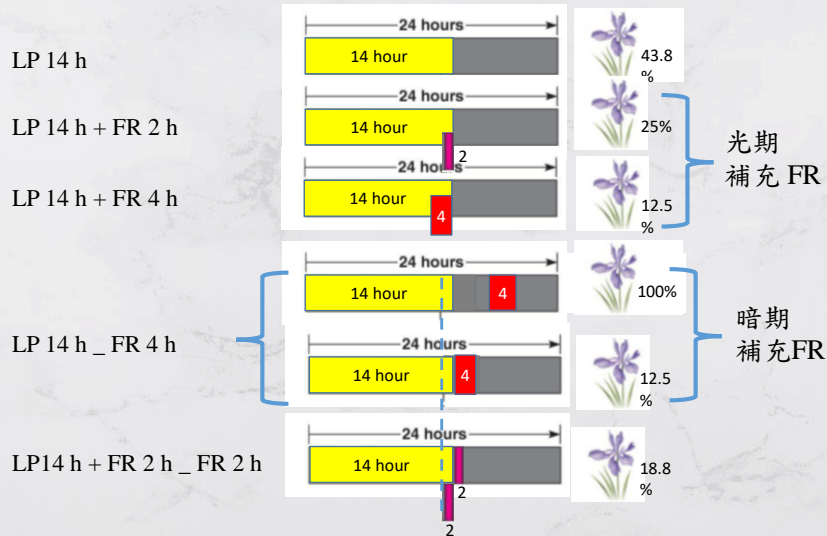


Light period 12 h
with concurrent FR
for 2 ~ 12 h



178

14h光期



考慮溫度的交感作用，溫度增加，臨界日長可延長
後續實驗應結合溫度增加與FR補光進行探討

179

小結-美和菠菜（長日植物）

- 給予搭配紅外光的長日光照可以抑制開花
同時增加鮮重 (由平均單株鮮重 90 g 提高到 150 g)
- 給光 12 小時情況下，在明期結束前/後只需 2 小時的紅外光
即可 100% 抑制開花
- 給光 14 小時情況下，在明期結束前/後只需 4 小時的紅外光，
開花率可由 100% 降低至 12.5%

180

UV光 (300-400nm)

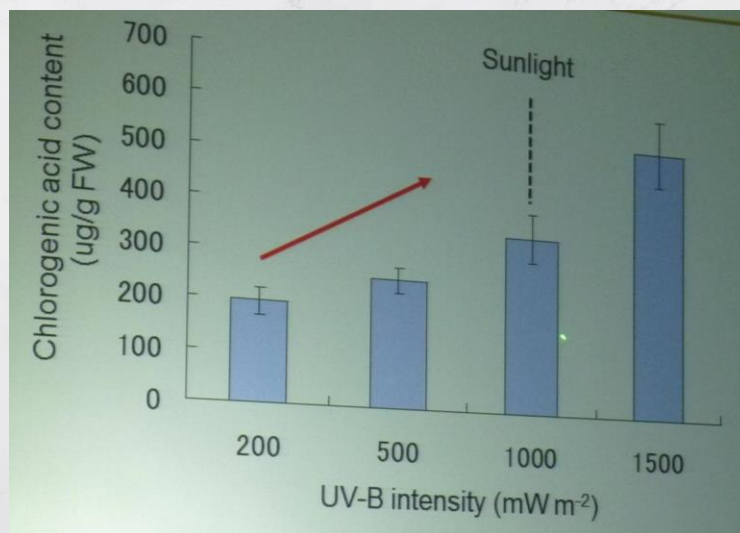
增加
花青素

增加二
次代謝
物

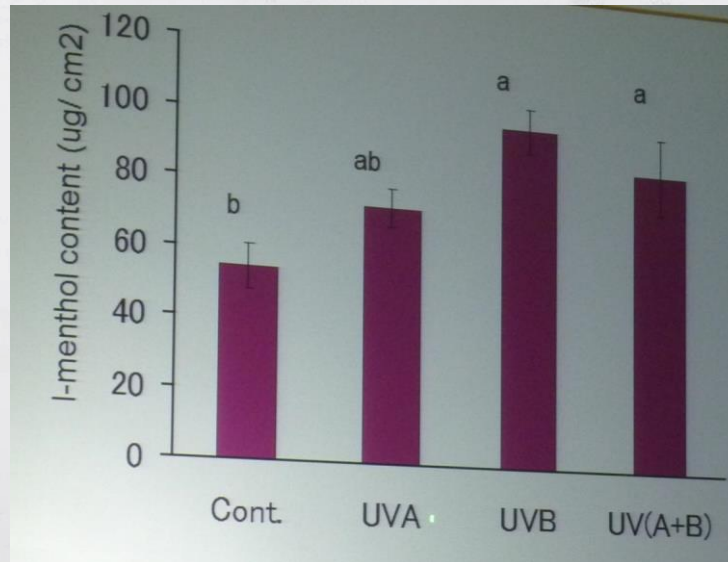
給多強
給多久

181

UVB 提升 綠原酸產量



UVB 比 UVA 可更有效促進 左旋薄荷產量



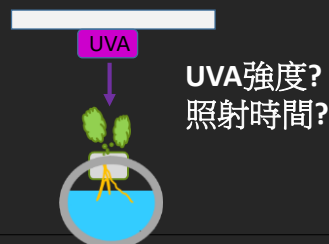
研究目的

Research purpose

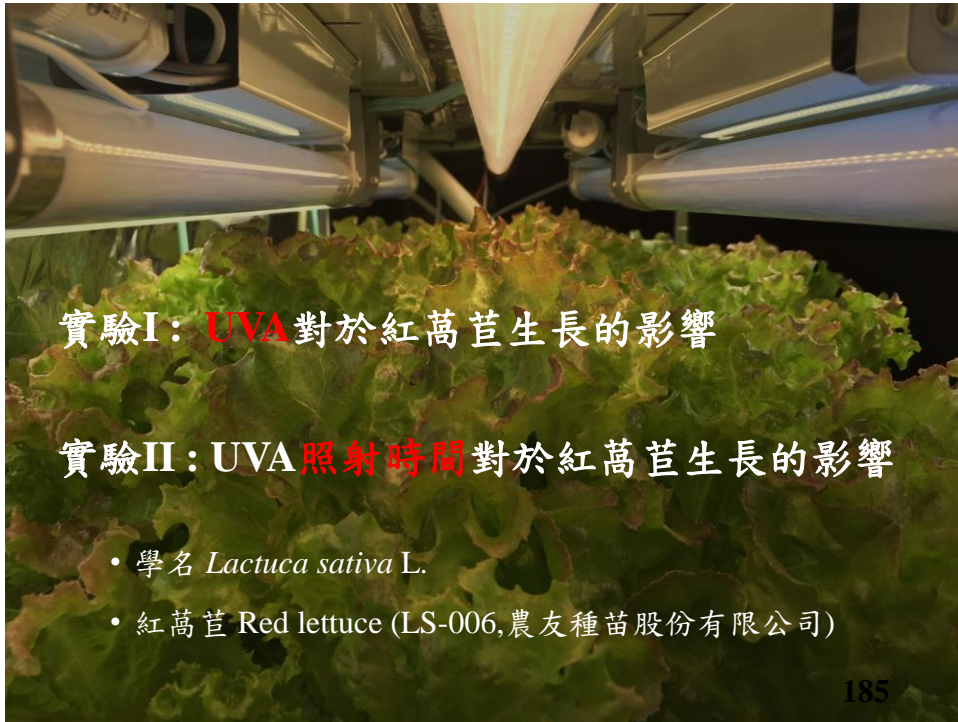
不影響紅萵苣鮮重的情況下

短期照射UVA增加花青素含量

提高植物工廠生產紅色萵苣的附加價值



184



環境



環境參數	數值
溫度 (日/夜) Temp.(D/N)	24/20 ± 2°C
相對溼度 Rel. Humidity	60~70%
二氧化碳濃度 CO ₂	1200 ± 200 ppm
養液 Nutrient solution	EC 1.2 mS cm ⁻¹ pH 6.1
種植密度 Density	18 pits/ 0.405 m ²

186

栽培條件

- 育苗期 14天

$100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (24hr 照射)

養液配方	花寶一號稀釋3000倍
EC	0.4 mS/cm
PH	6.8
CO2濃度	1000~1500 ppm



- 育成期 21天

$130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (16hr 照射)

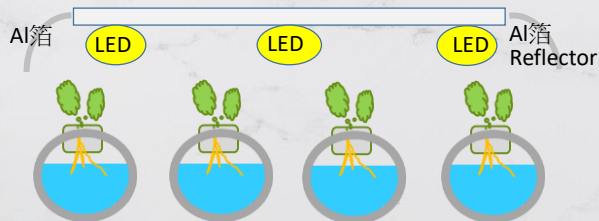
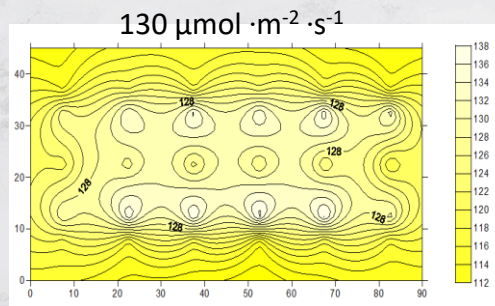
溫度：20/24 \pm 2 °C

養液配方	花寶一號稀釋1000倍
EC	1.21 mS/cm
PH	6.1
CO2濃度	1000~1500 ppm



187

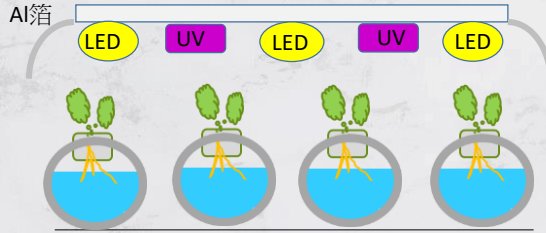
光源：T5 4呎 LED (18W 3000K)



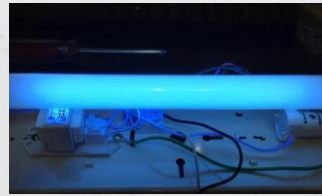
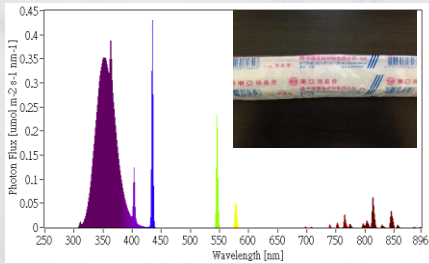
栽培期	光強度
育苗期 (14 d)	$100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
定植期 (21d)	$130 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

188

UV光源



UVA : 東亞捕蟲燈



距UVA燈下 15 cm量測 => 11 W/m² 189

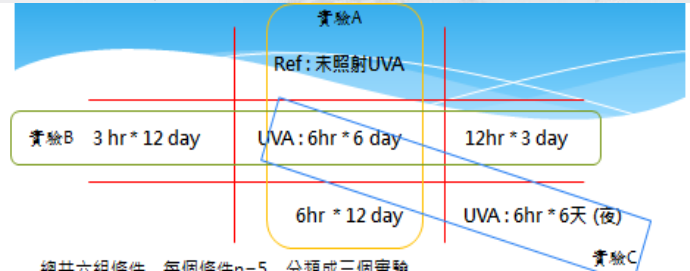
實驗 I

UVA光源對紅萵苣生長的影響

190

實驗設計

- 育苗14天後定植,第35天後採收
- 定植後根據以下條件開啟UVA燈管照射



總共六組條件,每個條件n=5,分類成三個實驗

實驗A: UVA不同累計能量: Ref // 6hr * 6 day // 6hr * 12 day

實驗B: UVA相同累計能量下,不同照射天數條件:
3 hr * 12 day // 6 hr * 6 day // 12 hr * 3 day

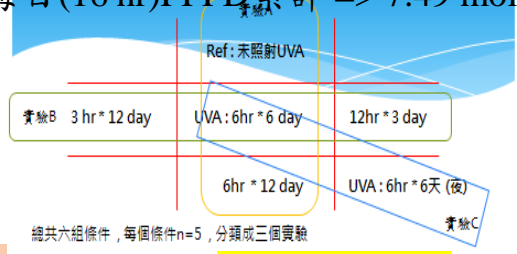
實驗C: 日夜比較:
Ref // 6 hr * 6 day(日) // 6 hr * 6 day(夜)



日累積光量計算

• 距LED燈下 15 cm量測 $\approx 130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

DLI: 每日(16 hr)PPFD累計 $\Rightarrow 7.49 \text{ mol m}^{-2}$



總共六組條件,每個條件n=5,分類成三個實驗

總累計UVA能量

每日UVA累計能量

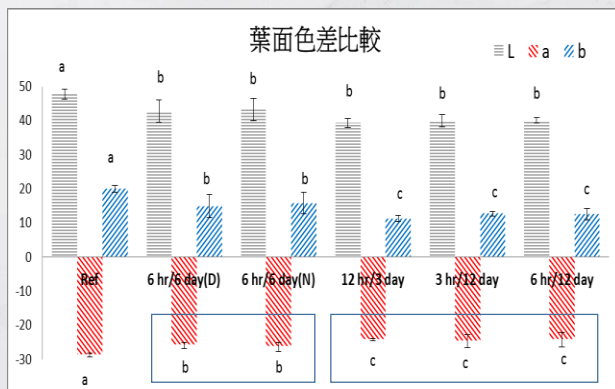
實驗	實驗A	實驗B	實驗C
實驗A	0 J/cm ²	0 J/cm ²	0 J/cm ²
實驗B	153.6 J/cm ²	12.8 J/cm ²	51.2 J/cm ²
實驗C	307.2 J/cm ²	25.6 J/cm ²	25.6 J/cm ²

紅萵苣外觀比較



193

葉色差



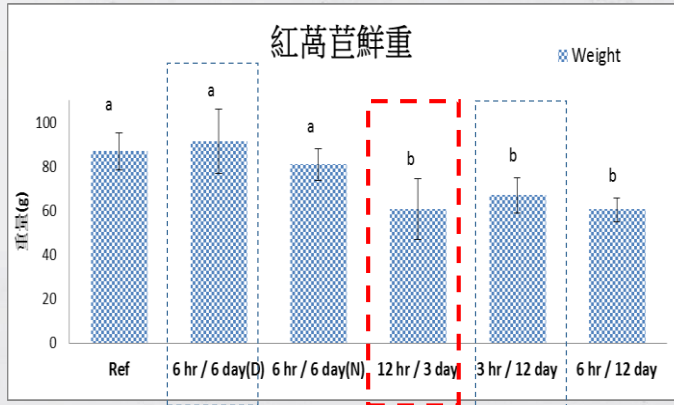
(t檢定 p<0.05 n=5)

照射UVA的紅萵苣葉片都有轉紅現象
檢定有顯著差異



194

紅萵苣鮮重



(t檢定 $p < 0.05$ $n=5$)

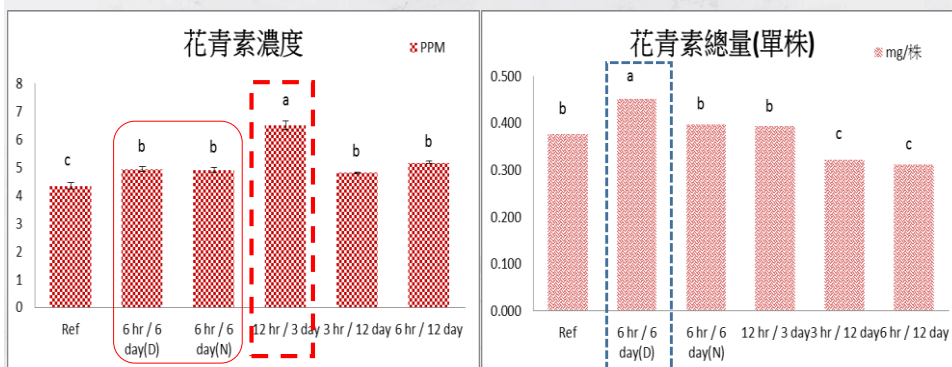
UVA總累積能量相同的情況下，日照射12hr 鮮重最低

UVA在日累積能量低不影響生長，日累積能量高時則成為光逆境

夜間照射UVA鮮重略低，檢定無明顯差異

195

花青素



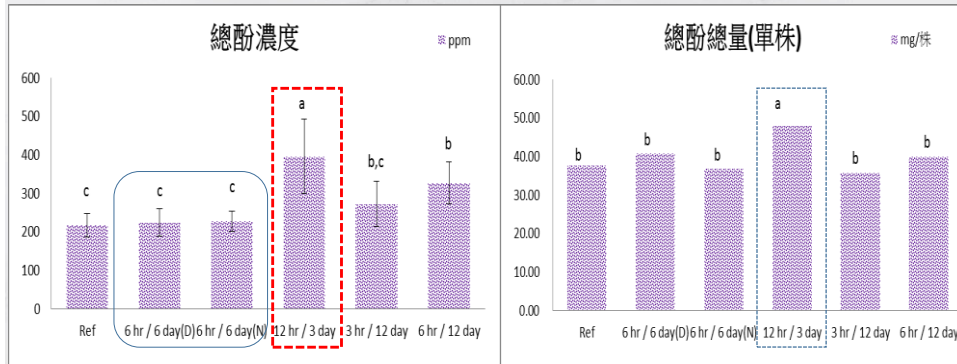
(t檢定 $p < 0.05$ $n=5$)

紅萵苣花青素濃度最高為日照射UVA 12hr/3day

若考慮單株花青素總量則為日照射UVA 6hr/6day 為佳
日夜照射UVA 花青素濃度無顯著差異

196

總酚



(t檢定 $p < 0.05$ $n=5$)

總酚濃度與總量 皆以12hr/3day照射為最大
日夜照射UVA 檢定有顯著差異

197

小結

A. 不同總累積UVA照射能量 (0 J/cm², 153.5 J/cm², 307 J/cm²)

- 紅萵苣只要照射UVA便可轉色並累積二次代謝物
- 照射總能量越大，鮮重越低，累積二次代謝物越高
- UVA照射時間低時，不影響紅萵苣生長

B. 相同總累積UVA能量，不同日照射能量 (12.8 J/cm², 25.6 J/cm², 51.2 J/cm²)

- 總累積UVA能量相同但不同日照射量可發現日照射量越高
- 萵苣的鮮重越低花青素與總酚累計越高
- UVA日照射累積能量為光逆境的主要因子

C. 相同UVA照射條件，不同照射時段(日間與夜間照射)

- 日夜照射UVA組，鮮重、花青素、總酚差異皆不顯著
- 夜間照射UVA與日間照射UVA差異不大

198



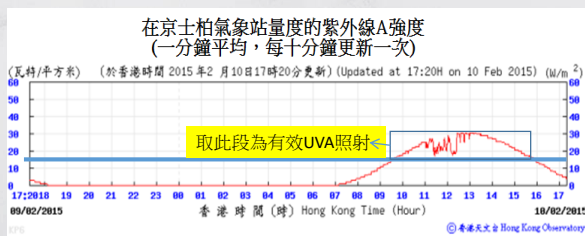
太陽光UVA估算

紅萵苣為短日植物,以冬季太陽計算
(香港天文台UVA統計 香港緯度與台灣高雄相近)

每日估UVA有效照射估 **6 h** (9:30~15:30)

6小時區間內 9:30與15:30的UVA 強度約**15 W/m²**

UVA照射累積大於 **32.4 J/cm²** 會與戶外栽培相近



200

實驗設計

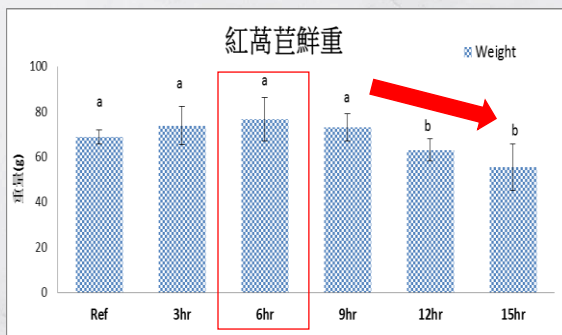
- 育苗14天
定植18天後 開啟 UVA照射3天
Ref(無照射), 每天照射 3, 6, 12, 15 h
確認哪個照射時間為光逆境的關鍵點

實驗日累計UVA能量

Ref	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h
0 J/cm ²	12.8 J/cm ²	25.6 J/cm ²	38.4 J/cm ²	51.2 J/cm ²	64 J/cm ²

201

紅萵苣鮮重

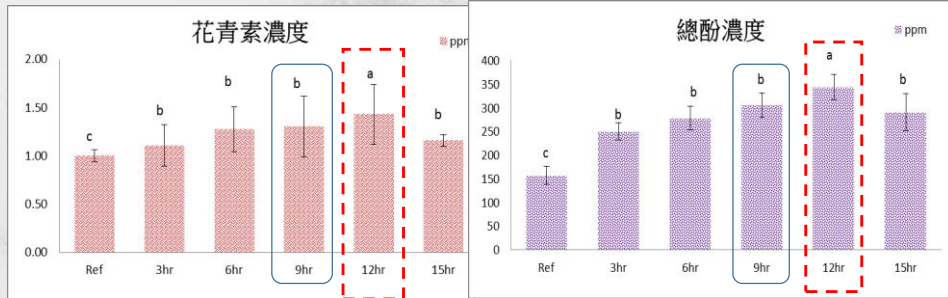


(t檢定 n=5, P<0.05)

UVA照射時間**12小時** 鮮重開始下降
若拉長至15小時,萵苣出現輕微脫水乾枯狀

202

二次代謝物



(t檢定 n=5, P<0.05)

UVA 照射12小時為較顯著的光逆境

UVA照射15小時,植物組織受損,二次代謝物含量反而下降

最適當的照射時間為9hr

203

UVA不同照射時間 vs. 紅萵苣

UVA 瞬時輻射能應大於 15 W/m^2

日累積照射能量需大於 32 J/cm^2

使用 UVA燈管，於採收前連續照射 **3天**，

每日照射

- **6 h**，日累積能量達 $25.6 \text{ J/cm}^2 < 32$
有最佳的鮮重
- **12 h**，日累積能量達 $51.2 \text{ J/cm}^2 > 32$
有最佳的二次代謝物含量
- **9 h**，日累積能量達 $38.4 \text{ J/cm}^2 > 32$
有最佳的鮮重與二次代謝物含量

204

結語

- **光質** 對植物生理影響的研究才剛開始
- **FR, UV** 為近期重點
 - 應用 FR 縮短開花所需天數 → 食用花
 - 應用 FR 抑制開花延長光期增加產能 → 沙拉用菠菜
 - 應用 UV / 藍光生產機能性作物 (養生食材、藥材)

205

