

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

LED 植物工廠自動調整系統之研究

The Study of Auto-Regulating System for LED Plant Factory

計畫類別：任務型計畫 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-103 電子-5

執行期間：103 年 1 月 1 日至 103 年 9 月 30 日

計畫主持人：趙守嚴

共同主持人：王派祥、溫炯亮

計畫參與人員：郭人榮、鄭志玄

處理方式：公開於校網頁

執行單位：電子工程系

中 華 民 國 103 年 10 月 31 日

明新科技大學校內專題成果報告

公開授權書

(提供本校辦理紙本與電子全文授權管理用)

本授權書為明新科技大學校內專題研究計畫成果報告授權人：趙守嚴在
明新科技大學 工學院 電子工程系所 103 年度校內專題研究計畫。

研究計畫編號：MUST-103 電子-5

研究計畫名稱：LED 植物工廠自動調整系統之研究

計畫類型：個人計畫

執行期限：103 年 1 月 1 日 至 103 年 9 月 30 日

茲同意將授權人擁有研究之上列成果報告：紙本授權全文公開陳列於本校圖書館，為學術研究之目的以各種方法重製，或為上述目的再授權他人以各種方法重製，不限地域與時間，惟每人以一份為限；成果報告之電子檔（含摘要），本校圖書館保留以供文獻典藏使用，但可依使用權限授權於網路公開，提供讀者非營利性質之免費線上檢索、閱覽、下載或列印。

成果報告之電子檔案使用權限授權，請勾選下列一項：

- 校內外立即公開全文(含摘要)
- 校內外立即公開摘要，校內立即公開全文，一年後校外公開全文
- 校內外僅於公開摘要，校內立即公開全文，校外永不公開全文

授權人：



(請親筆正楷簽名)

E-Mail：shouyen@must.edu.tw

中 華 民 國 103 年 10 月 31 日

摘要

植物工廠為台灣精緻化農業的未來趨勢，植物工廠具備了無農藥的使用需求、低硝酸鹽殘留、循環式水資源利用、積體化種植增加產量...等優點。但多數的研究皆著重在人工光源的部分，尤其是在 LED 的部份特別顯著，事實上於植株培育的過程中，營養液的調控也是很重要的一環。

營養液是提供植物生長的物質，由無機鹽類所組成，包含十六種必需元素，營養液的濃度、酸鹼值、含氧量及水溫...等皆會直接造成對植株培育的質量。

本研究使用多變數分析，建立營養液對植物育苗及育成之優化條件，使種植作業標準化。避免傳統農業憑藉著過往經驗或是直覺的耕作方式，造成不穩定的產品品質。

結果顯示不論在育苗或育成階段，其生長因子的影相趨勢均相同，其中以光量及照射週期的影響最為顯著，24 小時全日照射，則可有效解決 LED 應用在植物工廠上功率不足的問題，同時降低營養液的濃度亦能對降低成本有所改善。

關鍵詞：植物工廠、營養液調控、多變數分析。

Abstract

Plant factory is the trend of Taiwan's future dedicated agriculture. The advantages of plant factory include pesticide-free, low-residual nitrate, economic water usage, and integrated cultivation for productivity increase, etc. Most of researches are focus on the efficiency of LED light. Even though the nutrient regulate is also an important factor in the plant process.

The study is using Multi-Regress analysis to quickly and correctly build the standardization of best planting process. However, the following status may be avoided that the previous experiments or instinctive planting methods were immersed the plant productivity in unsteady state.

The results is shown that the changing tendency for planting factories are similarly , but the obvious influences are Photoperiod and Light Intensity. Dial Light Integral for 24 hours may improve the expenses of power supply for LED plant factory. Reduce the consistency of nutrient is also decreasing the cost.

Keywords : LED Plant Factory , Automatic Nutrient Regulation , Multi-Regression Analysis.

目錄

摘要-----	I
Abstract -----	II
目錄-----	III
表目錄-----	V
圖目錄-----	VI
符號說明-----	VIII
一、緒論-----	1
1-1 前言-----	1
1-2 植物工廠各類型人工光源的比較-----	2
1-3 研究目的-----	3
1-4 研究架構-----	5
二、文獻回顧-----	8
2-1 植物人工光源種類(Light Type)之探討-----	8
2-2 光量(Light Intensity)對植物生長之影響-----	12
2-3 光質(Light Quality)對植物生長之影響-----	14
2-4 光週期(Light Photoperiod)對植物生長之影響-----	16
2-5 研究動機-----	19
三、實驗方法與討論-----	20
3-1 實驗目的-----	20
3-2 實驗設備與材料-----	20
3-3 實驗步驟-----	22
3-4 育苗 L9 田口實驗數據整理及分析-----	26
3-5 植株成長實驗步驟-----	28
3-6 L9 田口育成實驗數據整理及分析-----	30
3-7 L9 生長實驗數據分析與探討-----	32

3-8 育成實驗數據變異數分析(ANOVA)-----	34
四、結論 -----	38
參考文獻-----	39

表目錄

表 2.1.1 本研究參考文獻中植株種類整理表-----	7
表 2.1.2 本研究參考文獻中人工光源種類之整理表(依年份排序)-----	8
表 2.1.3 Bula 等人與 Hammer 等人之萵苣比較表(Bula et al.,1991)-----	11
表 2.1.4 Hoenecke 等人以不同光量光質整理表(Hoenecke et al.,1992)-----	11
表 2.2.1 白鶴芋於不同光量下培育六十天比較結果(Nhut et al.,2005)-----	13
表 2.2.2 三種不同生長光量需求之植物種類整理-----	14
表 2.2.2 表 2.2.3 紅、藍光 LED 單位轉換常數表(Fang & Jao,2000)-----	14
表 2.3.1 最佳生長條件之紅、藍光比例及相關文獻-----	16
表 3.2.1 田口實驗設計法中之設備及材料-----	21
表 3.3.1 培育健康幼苗之 L9 田口實驗設計表-----	23
表 3.4.1 育苗 L9 實驗記錄表及實驗數據-----	27
表 3.4.2 育苗 L9 田口實驗植株重量因子反應表-----	27
表 3.5.1 植株育成之 L9 田口實驗設計表-----	28
表 3.6.1 植株育成 L9 田口實驗記錄表及實驗數據-----	30
表 3.6.2 植株成長 L9 田口實驗植株重量因子反應表-----	31
表 3.8.1 植株育成實驗紀錄數據-----	35
表 3.8.2 植株育成時，組間對組內變異量分析-----	36
表 3.8.3 植株育成時，各生長因子的變異量分析-----	37

圖目錄

圖 1.1.1 植物工廠系統架構圖-----	1
圖 1.3.1 本研究自動化 LED 植物工廠的五項需求示意圖-----	2
圖 1.3.2 植株生長空間保留產生之光源問題示意圖-----	4
圖 1.4.1 LED 植物工廠研究架構圖-----	5
圖 2.1.1 LED 應用於植物人工光源之演進(Morrow, 2008)-----	9
圖 2.1.2 LED 相較於其他人工光源之效率比較(Bourget, 2008)-----	10
圖 2.1.3 LED 相較於其他人工光源之使用壽命比較(Bourget, 2008)-----	10
圖 2.2.1 葛氣孔傳導率光及合作用與光量趨勢圖(Tennessen et al.,1994)-----	12
圖 2.2.2 萵苣葉片數於高、低光量培育下之比較(Yanagi et al.,1996)-----	12
圖 2.2.3 萵苣乾重於高、低光量培育下之比較(Yanagi et al.,1996)-----	13
圖 2.3.1 典型植物葉綠體色素吸收光譜圖-----	15
圖 2.3.2 光透過葉綠體後，綠光之穿透及反射示意圖-----	15
圖 2.4.1 草莓葉片上及下之光譜分佈比較圖(Takeda et al.,2008)-----	18
圖 2.4.2 紅光 LED 於草莓葉面下進行補光示意圖(Takeda et al.,2008)-----	18
圖 2.4.3 補光法及黑暗中斷法之控制示意圖-----	19
圖 3 本研究之整體實驗架構流程圖-----	20
圖 3.2.2 本實驗之紅光(Red)及藍光(Royal Blue)LED 光譜分佈圖-----	22
圖 3.2.3 本實驗之紅光(Red)及藍光(Royal Blue)LED 操作電壓及電流-----	22
圖 3.3.1 以田口實驗法建立生長資料庫之整體實驗步驟流程圖-----	23
圖 3.3.2 育苗 L9 田口實驗法之實際硬體架構圖-----	24
圖 3.3.3 育苗 L9 田口實驗法之樣品培育位置圖-----	25
圖 3.3.4 育苗 L9 田口實驗法之組別與樣本放置圖-----	25
圖 3.3.5 依據 L9 田口實驗之設定，培育十天之幼苗上視圖-----	26
圖 3.3.6 依據 L9 田口實驗之設定，培育十天之幼苗全貌-----	26
圖 3.4.1 幼苗 L9 田口實驗植株重量因子反應圖-----	28

圖 3.4.2 依據幼苗 L9 優化因子所培育之育成 L9 樣本-----	28
圖 3.5.1 依據 L9 田口實驗之設定，育成十四天之植株側視圖-----	29
圖 3.5.2 依據 L9 田口實驗之設定，育成十四天之植株全貌-----	30
圖 3.6.1 植株成長 L9 田口實驗植株重量因子反應圖-----	31
圖 3.7.1 育苗及育成植株重量因子反應比較圖-----	33
圖 3.7.2 育苗及育成植株因子修正建議圖-----	34

符號說明

DAQ：數據擷取(Data Acquisition Card)

DLI：日累積光量(Daily Light Integral)，單位： mole/m^2

EC：電導度(Electrical Conductivity)，單位： $\mu\text{S/cm}$ ($S=1/\Omega$)

fc：呎燭光，照度單位

L9：田口實驗設計法其中之一種

LED：發光二極體(Light-Emitting Diode)

Lux：勒克司，照度單位

nm：波長單位

PPF：光合作用光量子通量(Photosynthetic Photo Flux)

$\mu\text{mole/m}^2/\text{s}$ ：光合作用之光量單位($1\text{mole}=6.02\times 10^{23}$ photons)

一、緒論

1-1 前言

近年來植物工廠(Plant Factory)一詞已慢慢的融入我們的生活中。植物工廠係指於密閉環境內，採用人工調控生長因子，達到高量產及高品質之作物收成。一般而言，植物工廠組成系統可概分為三個主要架構而構成(如圖 1.1.1 所示)，分別為：

1. 水耕養液系統：包含肥料濃度、酸鹼度及溶氧量...等。
2. 人工光源系統：包含光質、光量及光週期...等。
3. 環境調控系統：包含溫度、溼度及二氧化碳濃度...等。

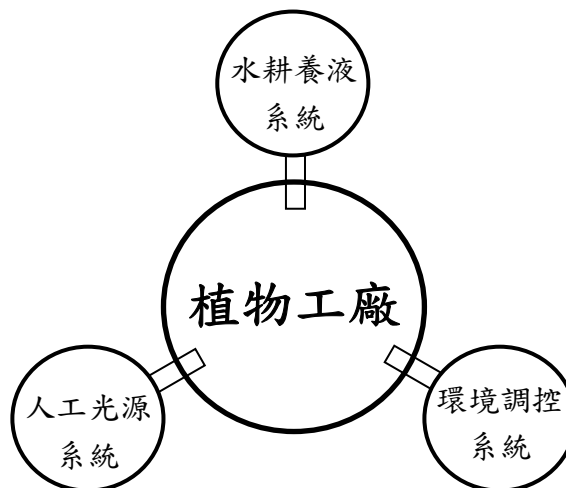


圖 1.1.1 植物工廠系統架構圖

植物工廠為台灣精緻化農業的未來趨勢，植物工廠具備了無農藥的使用需求、低硝酸鹽殘留、循環式水資源利用、積體化種植增加產量...等優點。但多數的研究皆著重在人工光源的部分，尤其是在 LED 的部份特別顯著，事實上於植株培育的過程中，營養液的調控也是很重要的一環。

1-2 植物工廠各類型人工光源的比較

植物工廠所使用的人工光源包含白熾燈(Incandescent)、T5/T8 螢光燈管(Fluorescent)或 HPS/LPS 高強度放電燈(HID: High Intensity Discharge)...等。但目前

較新的植物工廠使用發光二極體(Light-emitting Diode, LED)為生長燈源，除建置成本高外，其優點如下：

1. 使用直流電：方便與數位控制系統整合，藉由電壓電流的調控可模擬日出/日中/日落等不同的光質及光量。
2. 高光電轉換效能：根據美國能源局 2010 年的數據顯示 LED 效率可達每瓦 102 流明 (102 lm/W)的效率。
3. 使用壽命長：根據美國能源局 2011 年的數據顯示 LED 的使用壽命可達 35,000~50,000 小時。
4. 特定的發光波長：易於調控不同光譜成分。
5. 環保：無水銀成分的使用需求。
6. 安全：無需傳統光源設備所須的玻璃外罩。
7. 體積小、低發熱量。

1-3 研究目的

基於目前植物工廠之優缺點，本研究之目的以建置「自動化 LED 植物工廠」之五項主要需求為終極完成的目標，其架構如圖 1.3.1 所示。而其前期工作首推種植作業標準化，它亦是 LED 植物工廠成功與否的關鍵，現就其五項主要需求分述如下：

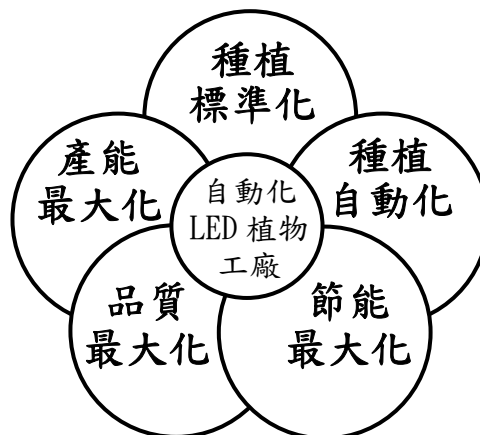


圖 1.3.1 本研究自動化 LED 植物工廠的五項需求示意圖

1. 種植作業標準化：(Growth SOP)

一個全方位的植物工廠須蘊藏豐富的植物生長資料庫，本研究將應用田口實驗設計法(Taguchi Methods)，以最低資源運用，快速及正確的建立植物育苗及育成優化之條件以達成種植作業標準化，不再像傳統農業般往往得憑藉過往經驗或是直覺耕作，造成人因問題而有不穩定的產品品質問題。

2. 種植產量最大化

台灣地處環太平洋地帶加上特有的地貌形態，因此颱風每每造成台灣農業的極大損失。根據農委會 2009 年「莫拉克颱風」農業災情損失統計，莫拉克颱風對農產損失約 49 億新台幣，農田損失約 47 億新台幣；而農委會 2011 年第二季發布的乾旱危機，再再凸顯農業受限於季節及氣候等的因素之影響導致收成不佳或無法連續穩定供應。本研究將應用 3D 積體化種植，利用有限的空間，使產能達到穩定及最大化。

3. 種植品質最大化

本研究以水耕搭配 3D 積體化種植達成產量最大化，但是植物工廠的管理不應只是重量而不重質。雖然沒有農藥使用顧慮，但是植株中的硝酸鹽含量亦是另一層面的隱憂，故基於食用安全的考量，將它不同生長階段性自動化養液調控的方法降低硝酸鹽含量，使其達到安全食用之規範。

4. 種植自動化

本研究將應用市售商用之圖形化程式設計軟體，整合各項優化生長參數，達成自動化 LED 植物工廠之光質、光量、水耕養液電導度及酸鹼值之全面性自動化整合及調控，達成人力成本的降低。

5. 種植節能最大化

現行 LED 植物工廠的建置，為達到光量及光質在強度與均勻度上的需求，其所使用的人工燈源皆為數十至數百顆 LED 所組成的固定式陣列，且植株成長空間的保留及燈源設備皆固定。因此於成株前，產生了照射光源之浪費(大部分的光源

皆浪費於植株承載板上)及過大的燈源與植株間距致使光量不足的兩個問題(如圖 1.3.2 所示), 導致須耗費更多的電能以改善光量不足的問題。本研究將建立一 LED 光源資料庫, 輔以自動化燈源高度調節器, 以最少之 LED 使用量培育植株, 輔以循環式水耕養液系統, 水資源上的使用不浪費, 藉以達成能源及降低成本。

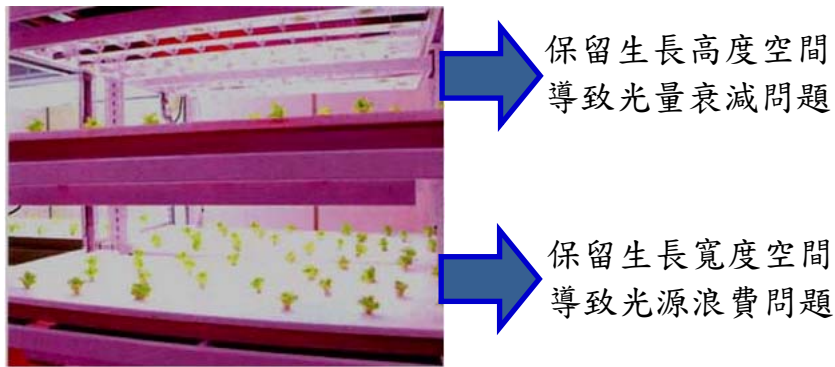


圖 1.3.2 植株生長空間保留產生之光源問題示意圖

1-4 研究架構

本研究希望從對構成植物工廠的三大系統進行探討，進而找出可再加以改善的策略(如圖 1.4.1 所示)。首先就水耕養液系統部分，只對濃度及酸鹼值調控，其次在人工光源系統方面，希望能從 LED 光源的使用條件進行改善並找出最具經濟效益之燈源配置模式。

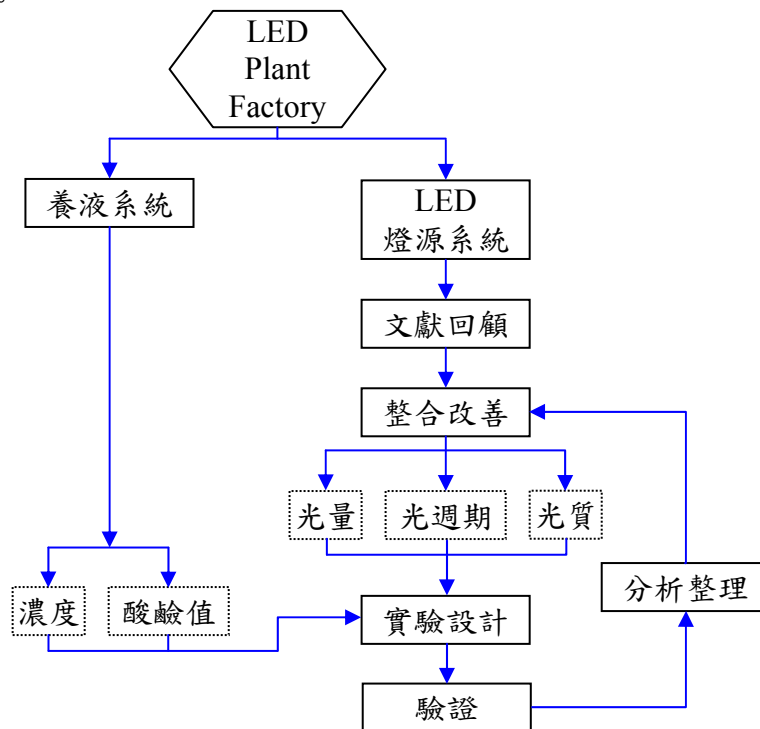


圖 1.4.1 LED 植物工廠研究架構圖

研究過程中透過多變數分析，以最低資源運用，快速及正確的建立植物育苗及育成優化之條件，以達成種植作業標準化。不像傳統農業般往往得憑藉過往經驗或是直覺去耕作，造成人因問題而有不穩定的產品品質問題。待營養液資料庫建立後，再應用市售商用之圖形化程式設計軟體 Lab View，整合各項優化生長參數，以建構出循環式營養液自動調控系統，期能達成精準調控營養液、節省水資源、改善物料成本及降低人力需求。

茲因植物栽培期間營養液呈現一動態的變化，隨著植株成長的過程及外界的變化，營養液之濃度、酸鹼值、含氧量及水溫...等皆會變動進而造成對植株培育成效產生變化。現就每一因子於植株培育上的影響說明如下：

a. 營養液濃度：

營養液濃度會影響滲透壓，濃度過高則根系不易吸收，且有鹽害的危險，過低則營養不良。

b. 營養液酸鹼值：

植株栽培生長過程營養液之酸鹼值(pH 值)的變化是一動態的必須時時監控，例如栽培萵苣類時，其生長特性為優先吸收 NH_4^+ ，致使養液中陰離子較多而 pH 降低；若生長特性屬於優先吸收 NO_3^- ，則養液中陽離子較多使 pH 上升。例如 pH 高於 7 則易造成營養液間的離子產生反應而沉澱下降，將使濃度下降及相關所需元素的缺乏。

c. 營養液含氧量：

溶氧量是養液栽培時影響根系生長的重要因子，氧氣不足時，根部無法呼吸產生能力量，會褐化而死。

d. 營養液溫度：

一般而言植物根部對於溫度變化的忍受力遠低於葉片，因此根部溫度控制有其重要性，而水耕植物，缺乏土壤保溫，水溫變化較大，易對生長產生不良影響。熱帶地區常因溫度過高而使水中溶氧量下降，高溫使植物呼吸率上升，相對的需氧量也提高，含氧量下降但需求量增加常造成植物缺氧而死。而溫帶地區冬季低溫，水耕會使植物根部因水份而更低溫，進而影響植物生長。因此溫帶地區水耕植物需要加熱系統來提高水溫，熱帶地需就需要降溫，或利用打氣設備增加含氧量，同時降低水溫。

二、文獻回顧

植物生長由十七世紀中葉古希臘哲學家亞里士多(Aristoteles)提出腐植質說(Humus Theory)，認為生長的營養來自於土壤。歷經長時代的研究，終於確認光合作用對於植物的生長作用。對此，本章將針對應用於植物培育之人工光源種類(Light Type)、光量(Light Intensity)、光質(Light Quality)以及光週期(Photoperiod)對於植物之生長影響進行整理與探討。

近二十年來，已有許多文獻針對應用 LED 於不同植物光生理作用進行研究與探討，經綜整後如表 2.1.1 所示，依其應用目的歸納出如下列幾點整理：

1. 低光照之葉菜類作物培育，如萵苣及菠菜。
2. 高技術性之幼苗培育，如草莓、白鶴芋及葡萄。
3. 利用植物光生理學特性達到提前或延後開花，如草莓及秋葵。

表 2.1.1 本研究參考文獻中植株種類整理表

作者	年份	種類	作者	年份	種類
Goins et al.	1997	小麥	Jao and Fang	2004	馬鈴薯
Nhut et al.	2005	白鶴芋	Samuolienė et al.	2009	馬鬱蘭、萵苣及青蔥
Lefsrud et al.	2008	羽衣甘藍	Avercheva et al.	2009	高麗菜
Yanagi and Okamoto	1997	菠菜	Jao et al.	2005	海芋
Yorio et al.	2001	菠菜、櫻桃蘿蔔及萵苣	Li et al.	2010	棉花
Nhut et al.	2002	香蕉	Bula et al.	1991	萵苣
Nhut et al.	2003		Hoenecke et al.	1992	
Schuerger et al.	1997	胡椒	Yanagi et al.	1996	
Brown et al.	1995		Okamoto et al.	1997	
Hamamoto and Yamazaki	2009	秋葵	Johkan et al.	2010	
Stutte and Edney	2009	紅葉萵苣	Poudel et al.	2008	
Nhut et al.	2003	草莓	Ying et al.	2011	櫻桃番茄
Takeda et al.	2008				
Remark	排列順序依照培育植株名稱之第一字筆劃				

2-1 植物人工光源種類(Light Type)之探討

以人工光源取代陽光對植物進行培育已行之有年，本小節以參考文獻中所採用之人工光源，依照種類按照年份排序，經整理後如表 2.1.2 所示，歸納之要點如下：

1. 螢光燈及金屬鹵素燈為最普遍之植物工廠人工光源的種類。
2. 於 1996 年以前，以藍色螢光燈為藍色人工光源之來源。
3. 直至 1996 年後，藍光 LED 開始被用來成為植物工廠人工光源研究。
4. 隨 LED 技術成熟，2008 年後其他顏色，如綠光或橘光開始進行研究。

表 2.1.2 本研究參考文獻中人工光源種類之整理表(依年份排序)

作者	年份	發光二極體 (LED)					其他燈源種類				種類	
		紅	藍	綠	橘	紅外	藍色 螢光燈	白熾 燈	白色 螢光燈	金屬 鹵素燈		三色 燈管
Bula et al.	1991	✓					✓					萵苣
Hoenecke et al.	1992	✓					✓					萵苣
Brown et al.	1995	✓				✓	✓			✓		胡椒
Yanagi et al.	1996	✓	✓						✓			萵苣
Okamoto et al.	1997	✓	✓									萵苣
Yanagi and Okamoto	1997	✓							✓			菠菜
Schuerger et al.	1997	✓	✓			✓				✓		胡椒
Goins et al.	1997	✓					✓		✓			小麥
Yorio et al.	2001	✓					✓		✓			菠菜、櫻桃蘿蔔 及萵苣
Nhut et al.	2002	✓	✓						✓			香蕉
Nhut et al.	2003	✓	✓						✓			香蕉
Nhut et al.	2003	✓	✓						✓			草莓
Jao and Fang	2004	✓	✓						✓			馬鈴薯
Jao et al.	2005	✓	✓						✓			海芋
Nhut et al.	2005	✓	✓						✓			白鶴芋
Lefsrud et al.	2008	✓	✓	✓		✓						羽衣甘藍
Takeda et al.	2008	✓										草莓
Poudel et al.	2008	✓	✓						✓			葡萄
Avercheva et al.	2009	✓	✓					✓				高麗菜
Hamamoto and Yamazaki	2009	✓	✓	✓								秋葵
Stutte and Edney	2009	✓	✓	✓		✓					✓	紅葉萵苣

Samuolienė et al.	2009	V										馬鬱蘭、萵苣及青蔥
Johkan et al.	2010	V	V						V			萵苣
Li et al.	2010	V	V						V			棉花
Ying et al.	2011	V	V	V	V					V		櫻桃番茄
Remark	a.	V	表示該研究所使用之燈源種類									
	b.	順序依照年份排列										

Morrow(2008)將不同年代使用 LED 為植物光源之情況，整理出整個 LED 在植物應用的演進史，如圖 2.1.1 所示。Bourget(2008)以 LED 的發光效率及使用壽命為指標，對比於一般植物人工光源如：白熾燈、螢光燈、高強度放電燈(HID：High Intensity Discharge)之效果，指出(比較結果如圖 2.1.2 及圖 2.1.3 所示)，LED 具有更佳效率及更長的壽命。

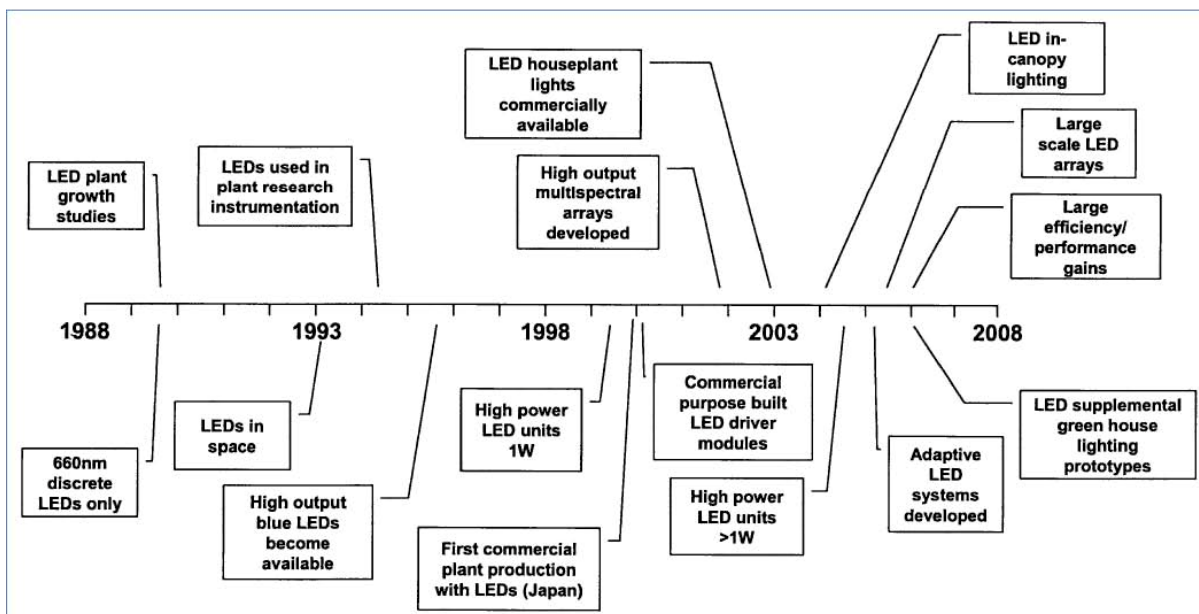


圖 2.1.1 LED 應用於植物人工光源之演進(Morrow, 2008)

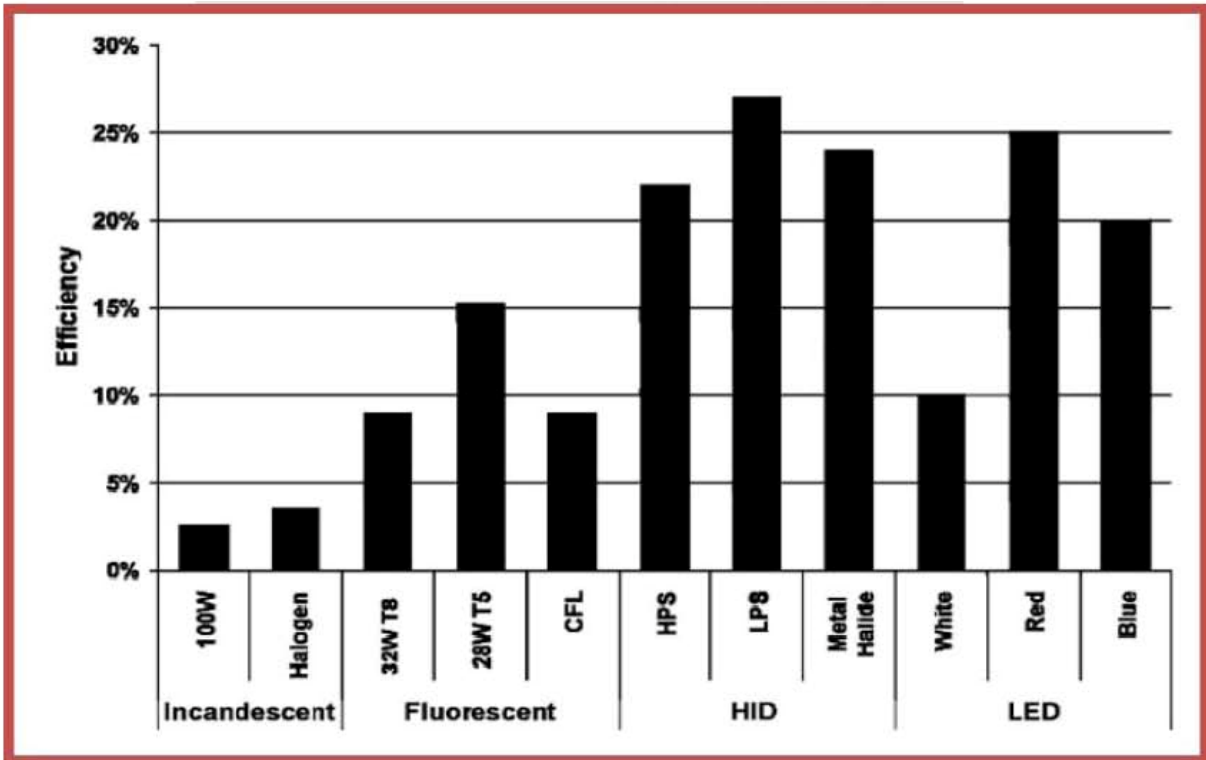


圖 2.1.2 LED 相較於其他人工光源之效率比較(Bourget, 2008)

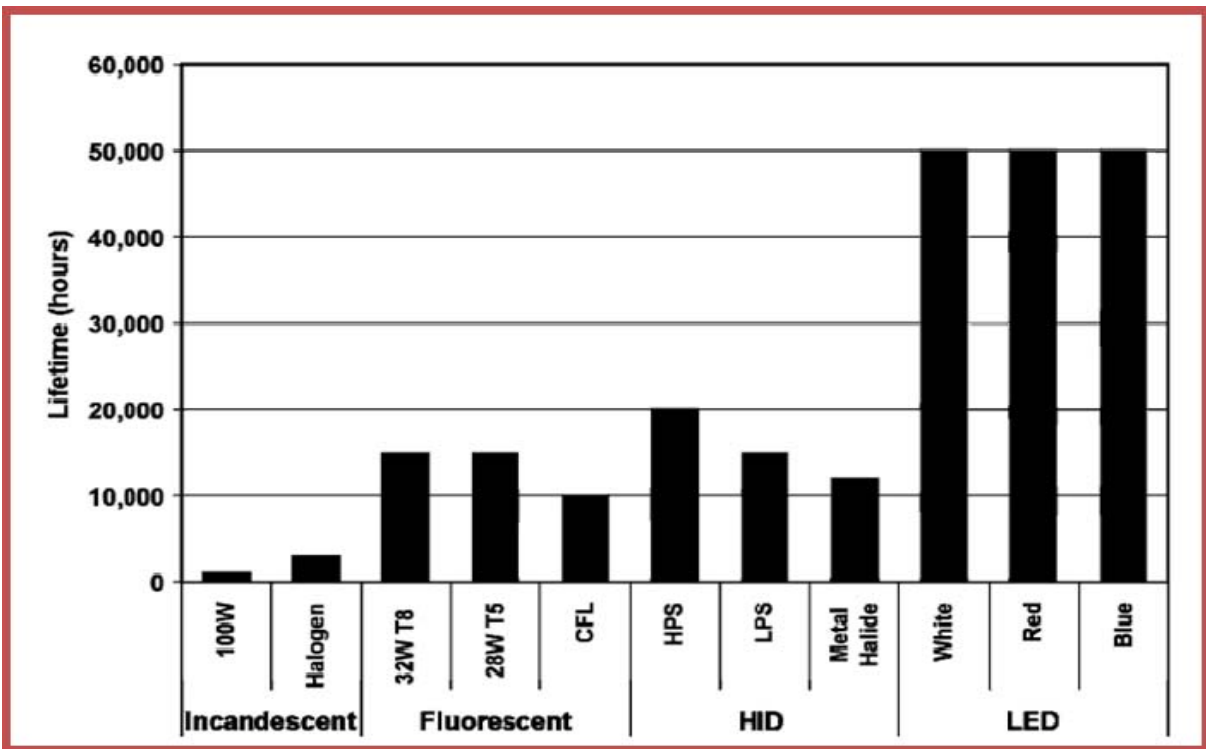


圖 2.1.3 LED 相較於其他人工光源之使用壽命比較(Bourget, 2008)

Bula 等人(1991)利用總光量 $325\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ ($295\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ 紅光 LED 和 $30\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ 藍色螢光燈)於 21 天之種植成功培育了萵苣，並與 Hammer 等人(1978)

使用螢光燈搭配白熾燈培育之萵苣比較，於鮮重、乾重及外部特徵上並無顯著的不同，如表 2.1.3 所示。但是在能源的耗用上，螢光燈搭配白熾燈系統卻是紅光 LED 搭配藍色螢光燈光源系統的兩倍。

表 2.1.3 Bula 等人與 Hammer 等人之萵苣比較表(Bula et al.,1991)

Year	1991	1978
	Bula et al.	Hammer et al.
Plant characteristic	LED system ^z (mean±SE)	Cool-white fluorescent + Incandescent lamps ^y
Fresh weight (g)	19±2.76	16.7
Dry weight (g)	1.11±0.16	0.97
Stem length (mm)	9.3±0.63	10.2
Number of nodes with leaves > 1 cm long	11.0±1.73	9.6
Length of fifth leaf (mm)	111.7±6.6	123.3
Width of fifth leaf (mm)	117.7±11.5	117.5
^z Data are mean values of two plants from each of three separate growth periods.		
^y Data from Hammer et al. (1978). SE values not available.		

Hoenecke 等人(1992)利用紅光 LED 搭配藍色螢光燈調控不同的光量及光質，成功的針對萵苣育苗的因子作研究及探討，如表 2.1.4 所示；同時提出當未來紅、藍光 LED 價格下降且發光強度提升時，可應用在商業化行為上。

表 2.1.4 Hoenecke 等人以不同光量光質整理表(Hoenecke et al.,1992)

Lamp type	Spectral region(nm)		Lamp type	Spectral region(nm)	
Red LED & Blue fluorescent	400-500	600-700	Red LED & Blue fluorescent	400-500	600-700
	Photosynthetic photon flux (μmole/m ² /s) ^z			Photosynthetic photon flux (μmole/m ² /s) ^z	
Total 300 μmole/m ² /s	60.0(20.0)	240.0(80.0)	Total 150 μmole/m ² /s	60.0(40.0)	90.0(60.0)
	52.5(17.5)	247.5(82.5)		52.5(35.0)	97.5(65.0)
	37.5(12.5)	262.5(87.5)		45.0(30.0)	105.0(70.0)
	30.0(10.0)	270.0(90.0)		37.5(25.0)	112.5(75.0)
	22.5(7.5)	277.5(92.5)		30.0(20.0)	120.0(80.0)
	15.0(5.0)	285.0(95.0)		22.5(15.0)	127.0(85.0)
	10.0(3.3)	290.0(96.7)		15.0(10.0)	135.0(90.0)
	7.5(2.5)	292.5(97.5)		10.0(6.7)	140.0(93.3)
	4.0(1.3)	296.0(98.7)		7.5(5.0)	142.5(95.0)

	0.0(0.0)	300.0(100.0)		4.0(2.7)	146.0(97.3)
	--	--		0.0(0.0)	150.0(100.0)
Remark	² Percentage of total photosynthetic photon flux in parentheses				

2-2 光量(Light Intensity)對植物生長之影響

Tennessen 等人(1994)以葛為研究對象，針對人工光源之光量作探討。結果顯示於光飽和點以下時氣孔傳導率及光合作用速率與光量成正比(如圖 2.2.1)。

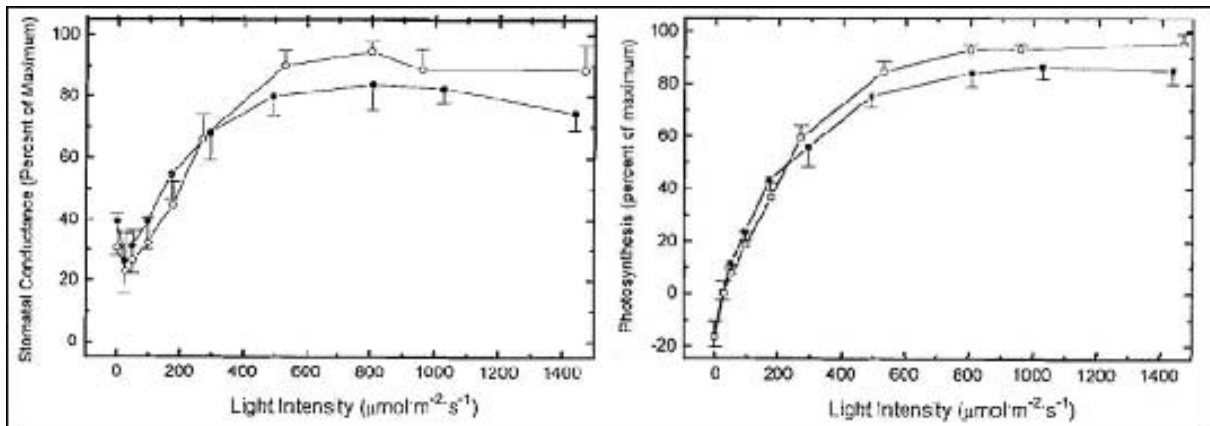


圖 2.2.1 葛氣孔傳導率光及合作用與光量趨勢圖(Tennessen et al.,1994)

Yanagi 等人(1996)使用螢光燈(FL)、紅光 LED 及藍光 LED 三種光源搭配兩種不同的光量分別為 $85\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ (Low PPF; Photosynthetic Photo Flux, 光合作用光通量)及 $170\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ (High PPF)針對葛苣進行二十天的培育。實驗結果顯示植株的葉片數量(圖 2.2.2)及植株乾重(圖 2.2.3)，無論在何種光源配置之下，高光量 $170\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ 組皆大於低光量 $85\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ 組。

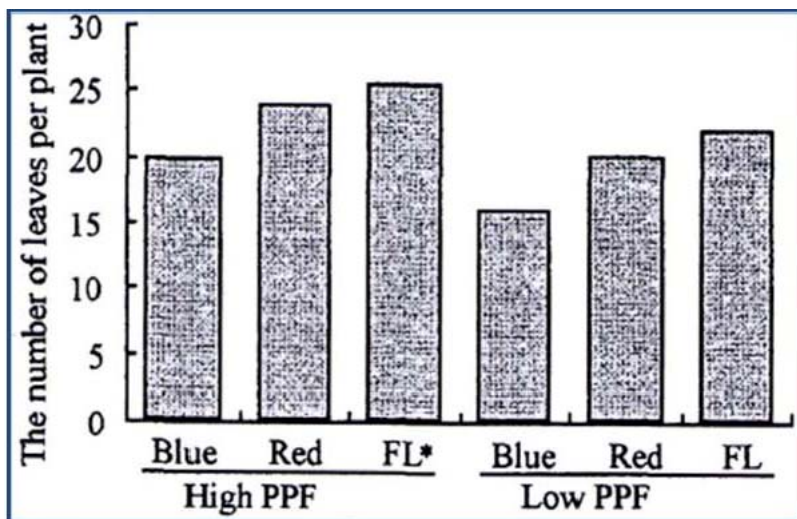


圖 2.2.2 萬苳葉片數於高、低光量培育下之比較(Yanagi et al.,1996)

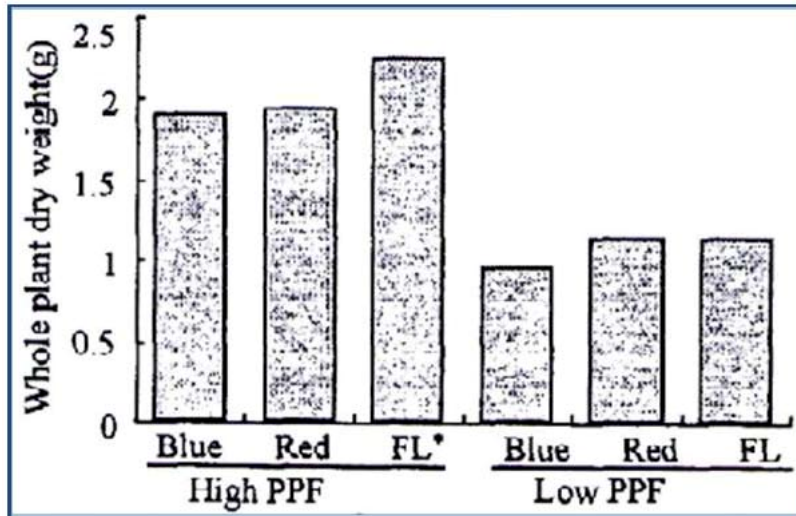


圖 2.2.3 萬苳乾重於高、低光量培育下之比較(Yanagi et al.,1996)

Nhut 等人(2005)使用 40、60 及 75 $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ 三種光量對白鶴芋種苗進行六十天的培育實驗，結果顯示植株的整體鮮重以 60 $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ 為最重，如表 2.2.1 所示。由其研究結果得知，光量對於植株生長為必要之因子，但過多或不及皆會對植株的生長有影響。

表 2.2.1 白鶴芋於不同光量下培育六十天比較結果(Nhut et al.,2005)

Irradiation level ($\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$)	Fresh weight (mg)		
	Top	Root	Total
40	321.2	132.7	456.9
60	416.1	111.9	530
75	341.9	100.2	445.5

光量對於植株生長，分為低、中及強光作物三種，其分類如表 2.2.2 所示，對不同植株種類，須要給予相對適當的光量，才是最佳的生長條件。光合作用之光量單位非視覺空間上的呎燭光(fc) 或勒克司(Lux)，而是以波長範圍 400~700 nm 之每秒每平方公尺有多少光子量為強度單位($\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$)。本實驗則使用照度計(單位為 Lux)，搭配 Fang and Jao(2000)整理出之紅、藍光 LED 單位轉換常數表(如表 2.2.3 所示)，進而換算出實驗所需光合作用之光量強度。

表 2.2.2 三種不同生長光量需求之植物種類整理

(資料來源：蔡尚光，室內陽台的水耕綠化，1988)

區分	光度	種類
強光作物	4 萬 Lux 以上	洋香瓜、番茄、西瓜、南瓜、胡瓜、青椒、茄子及甘藷等。
中光作物	2~4 萬 Lux	碗豆、菜豆、蕪菁、波菜、蘆筍、甘藍菜、蔥、青江菜、芹菜類及小松菜等。
低光作物	1 萬 Lux 以上	三葉菜、香菜類、萵苣、細蔥、茼蒿及薑等。

表 2.2.3 紅、藍光 LED 單位轉換常數表(Fang & Jao,2000)

Manufacturer (Color)	mcd ^{*1}	mW ^{*2}	Quantum ^{*3} , μmole/m ² /s	Photometric ^{*4} Lux	μmole/m ² /s per lux	mW per μmole/m ² /s
Hewlett Packard (Red)	3230	37	11.03	374.4	0.029	3.35
Excellence, Taiwan (Red)	5878	45.8	11.08	479.6	0.023	4.13
Everlight, Taiwan (Red)	2207	37	10.27	135.1	0.076	3.6
Hewlett Packard (Blue)	1899	64.2	10.41	195.3	0.053	6.2
Excellence, Taiwan (Blue)	1670	70.4	4.83	99.6	0.048	14.57
Everlight, Taiwan (Blue)	205.6	80	1.09	14.9	0.073	73.39
Nichia, Japan (Blue)	3460	68	6.27	188.3	0.033	10.84

Remark:
 *1. Measured using photometer (J17) with J1805 LED head (TekLumaColor, Inc.).
 *2. Forward current at 20mA.
 *3. Measured 10 cm away using LICOR 190SB quantum sensor.
 *4. Measured 10 cm away using photometer (J17) with J1811 Luminance head (TekLumaColor, Inc.).

2-3 光質(Light Quality)對植物生長之影響

典型的植物葉綠體色素吸收光譜在 450 nm 的藍光區及 660 nm 的紅光區上，如圖 2.3.1 所示。故葉綠體中的色素分子將陽光中的紅、藍光吸收，並讓綠光反射或透射而出，這就是我們一般常見的葉片看起來都是綠色的緣故(如圖 2.3.2 所示)。

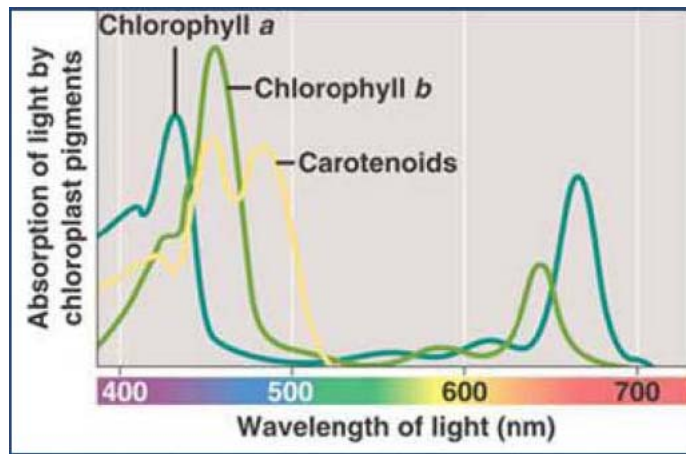


圖 2.3.1 典型植物葉綠體色素吸收光譜圖
(Campbell & Reece, Biology, 6th ed)

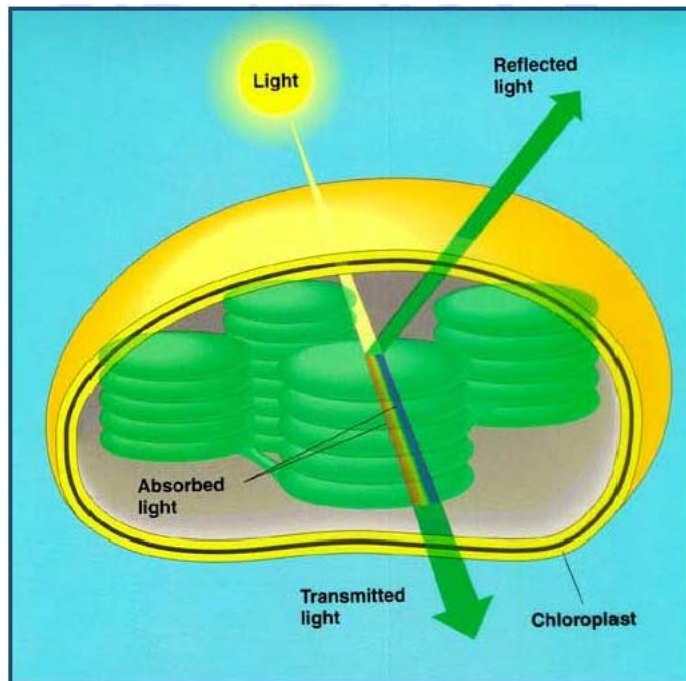


圖 2.3.2 光透過葉綠體後，綠光之穿透及反射示意圖
(Campbell & Reece, Biology, 6th ed)

縱然大部分的植物葉綠體吸收光譜在紅、藍光區域內，但是紅、藍光比例卻是隨著不同的植物種類而有著不同最佳生長比例。因此許多研究者常藉由 LED 能發出特定波長之特性(Specific & Narrow Wavelength)，對不同植物種類之最佳生長紅、藍光比例進行研究，其結果如表 2.3.1 所示。

表 2.3.1 最佳生長條件之紅、藍光比例及相關文獻

研究種類 (優化組合)	紅光光量 (單位:μmole/m ² /s)	藍光光量 (單位:μmole/m ² /s)	總光量 (單位:μmole/m ² /s)	紅藍光比	出處
萵苣	295	30	325	9.83	Bula et al., 1991
櫻桃蘿蔔	269	31	300	8.68	Neil et al.,1995
菠菜	253	30	283	8.43	Neil et al.,1995
萵苣	265	30	295	8.83	Neil et al.,1995
小麥	320	30	350	10.67	Goins et al., 1997
萵苣	64	16	80	4	Okamoto et al., 1997
香蕉	54	6	60	9.00	Nhut et al., 2003
草莓	42	18	60	2.33	Nhut et al., 2003
白鶴芋	36	9	45	4.00	Nhut et al., 2005
高麗菜	350	50	400	7	Avercheva et al., 2009
棉花	25	25	50	1	Li et al., 2010

附註：表列順序依照年份排序

由表 2.3.1 所呈現之數據得知，紅光配合藍光對於植物的生長扮演著重要的角色。從植株重量來看，Bula 等人(1991)針對萵苣、Neil 等人(1995)針對櫻桃蘿蔔、萵苣及菠菜、Goins 等人(1997)針對小麥、Nhut 等人(2002, 2005)分別針對香蕉、白鶴芋及 Li 等人(2010)針對棉花的研究顯示，結合藍光生長條件下之植株重量相較於單純於只有紅光的生長條件下來的重。此外，Lefsrud 等人(2008)針對羽衣甘藍成分做研究，指出β-胡蘿蔔素於440nm的藍光LED下成分最高；Stutter 和 Sharon(2009)針對紅葉萵苣的研究中提出植株之抗氧化素成份提升主要由藍光主導。

2-4 光週期(Light Photoperiod)對植物生長之影響

除了前已討論的光量及光質外，植物的生長亦會受到晝夜長短的影響。植物所接收到的每日照光長度會由其臨界日長所決定，進而影響其是否從由營養階段轉變為生殖階段(開花)，而非光照強度。不同的植物種類其臨界日長也各不相同，一般分為三類：

1. 長日植物(Long-day Plant)：每日照光長度高於臨界日長，就會開花。

如：碗豆、甜菜、青江菜及菠菜...等。

2. 短日植物(Short-day Plant)：每日照光長度低於臨界日長，就會開花。

如：菊花、牽牛花、杜鵑花及聖誕紅...等。

3. 中性日常植物(Day-neutral)：不受每日照光長度影響，由基因控制。

如：玫瑰、鳳仙花、秋海棠及三色堇等。

實際上對開花有影響的是黑暗期而非照光期，植物內有一種色素稱為光敏素(Phytochrome)。此色素以兩種形態存在，一種為吸收紅光(波長 660 nm)後轉變成活性的形式 P660，而另一形式對紅外光(波長 730 nm)有最高吸收能力，於吸收紅外光後會轉變成非活性形式 P730；此二型態稱之為可逆性的光敏素系統，常可使用 $P660 \leftrightarrow P730$ 的符號加以代表。若把活性 P660 的光敏素放黑暗中，則活性減弱，因此植物常藉此兩種形式的比例影響是否開花。

Takeda 等人(2008)發現草莓葉面下的光質只存在大於 700 nm 的光成份，而小於 700 nm 的光，則皆被草莓葉片吸收或反射掉(如圖 2.4.1 所示)。於是他們利用紅光 LED 於草莓葉面下進行補光，進而達成 $P660 \leftrightarrow P730$ 的比例調控，其架構如圖 2.4.2 所示。其結果達成欺騙草莓生物週期，導致其延遲開花而造成產期拉長，達到一年可有連續兩季的收成技術，讓非草莓季節時也能有草莓產出，提升草莓賣出的價錢。

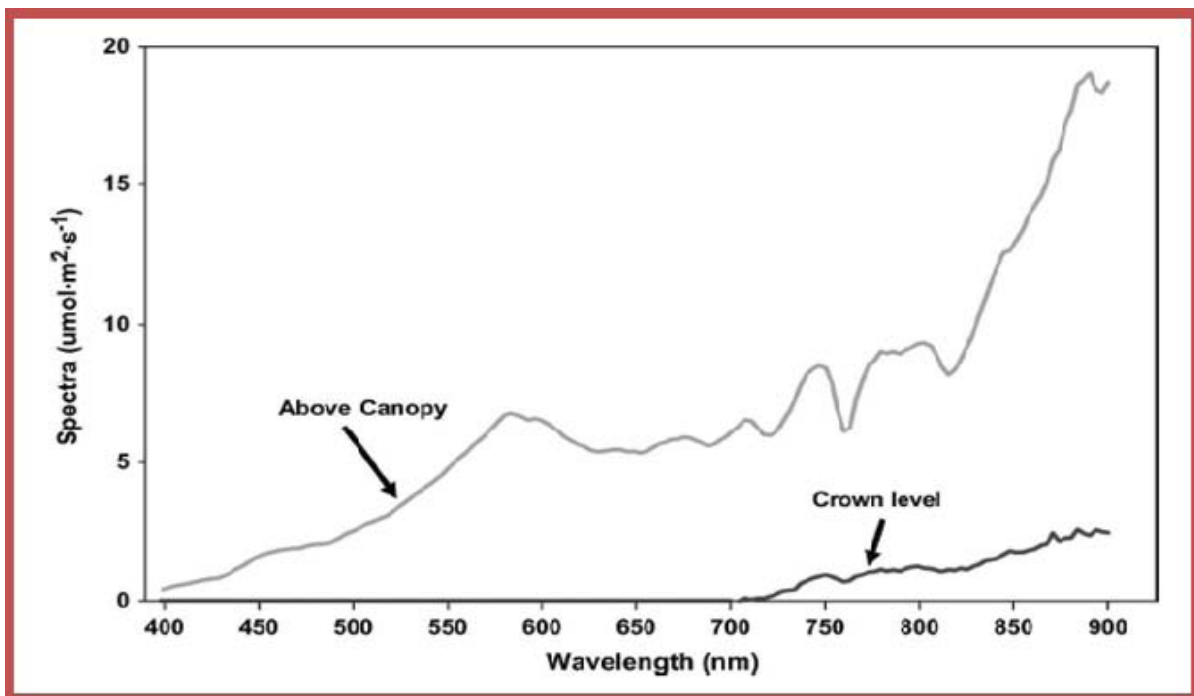


圖 2.4.1 草莓葉片上及下之光譜分佈比較圖(Takeda et al.,2008)

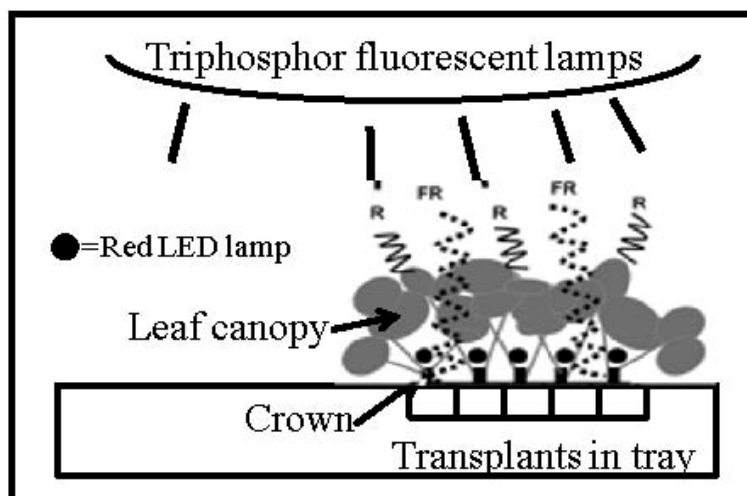


圖 2.4.2 紅光 LED 於草莓葉面下進行補光示意圖(Takeda et al.,2008)

Hamamoto 和 Yamazaki(2009)使用 470 nm 的藍光、520 nm 的綠光及 650 nm 的紅光，讓它們以補光法及黑暗中斷法兩種方式，對三種不同種類的秋葵做研究，其補光時序如圖 2.4.3 所示。由補光的實驗結果顯示，紅光對於開花的抑制效果最佳；黑暗中斷法的實驗結果則顯示，紅光的效果為最佳，綠光次之，藍光則成效最差。

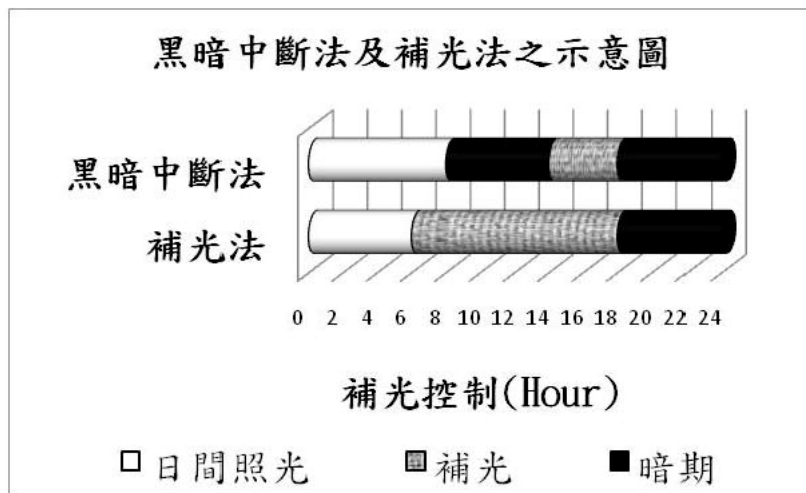


圖 2.4.3 補光法及黑暗中斷法之控制示意圖

2-5 研究動機

經由相關文獻分析後，本研究期望藉由田口實驗設計法，改變不同的光量或是光質比例，並且量化光量、光週期、養液酸鹼度及養液濃度等四項指標，再輔以植株之重量或高度等生長特性為量化指標來完成結果分析

三、實驗方法與討論

本研究規劃如下之二個階段，期能藉由前章所提出之實驗設計法，達成之種植作業標準化。實驗架構如圖 3 所示。爾後待營養液資料庫建立後，再應用市售商用之圖形化程式設計之軟體 Lab View，整合各項優化生長參數，以建構出循環式營養液自動調控系統。期能達成精準調控營養液、節省水資源、改善物料成本及降低人力需求。

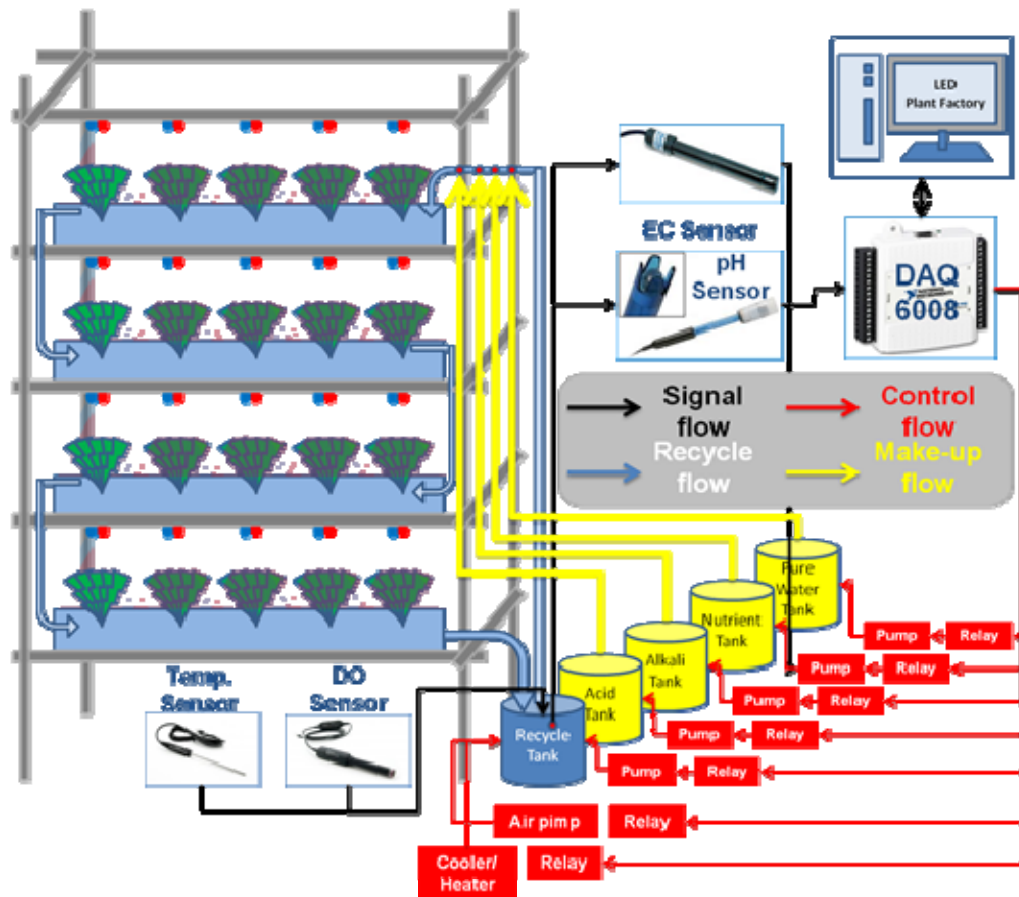


圖 3 本研究之整體實驗架構流程圖








3-1 實驗目的

一個全方位的植物工廠須蘊藏豐富的植物生長資料庫，本研究應用田口實驗設計法(Taguchi Methods)，以萵苣為例，在最低的成本、時間及資源運用上，快速且正確的建立育苗及育成優化參數。

3-2 實驗設備與材料

1. 田口實驗所需之實驗設備及材料，其說明如表 3.2.1 所示。

表 3.2.1 田口實驗設計法中之設備及材料

品名	實際圖片	功能	操作範圍	誤差	製造商/型號
直流電源 供應器		供給LED 直流電源	電壓:0-30V 電流:0-5A (可定電壓/流)	±0.1%	兆信電子 (中國) (PS-305D)
紅光 LED		人工光源 來源	FV:2.2~2.5V FC:Max:700mA W:620~630nm	Flux:±7%	Cree (美國) XR-C-3W
藍光 LED		人工光源 來源	FV:3.3~3.9V FC:Max:1000mA W:450~465nm	Flux:±7%	Cree (美國) XR-E-5W
數位式 照度計		光源強度 之量測	0~50000 (Lux)	±4%	佳信儀器 (中國) LX-1010B
酸鹼值 量測計		水耕液 pH量測	0~14	±0.005 (12 bit)	Vernier (美國) pH sensor
電導度 量測計		水耕液 EC量測	200-2000 (μ S/cm)	±1 (12 bit)	Vernier (美國) EC sensor
數位式 電子天秤		秤取樣本 重量	0-100 (g)	±0.001	(中國) ES-103HA
葉萵苣 種子		樣本來源	發芽適溫:15-20度 生長適溫:15~30度	<50%	農友種苗股份 有限公司(台灣) V-155

2. 本實驗之人工光源，採用美國 Cree 生產之紅光 LED (XR-C-Red-3W)及藍光 LED(XR-E-Royal Blue-5W)，紅光發射光譜為 620~630 nm，藍光發射光譜為 450~465 nm 如圖 3.2.2 所示，而其操作電壓及電流如圖 3.2.3 所示。

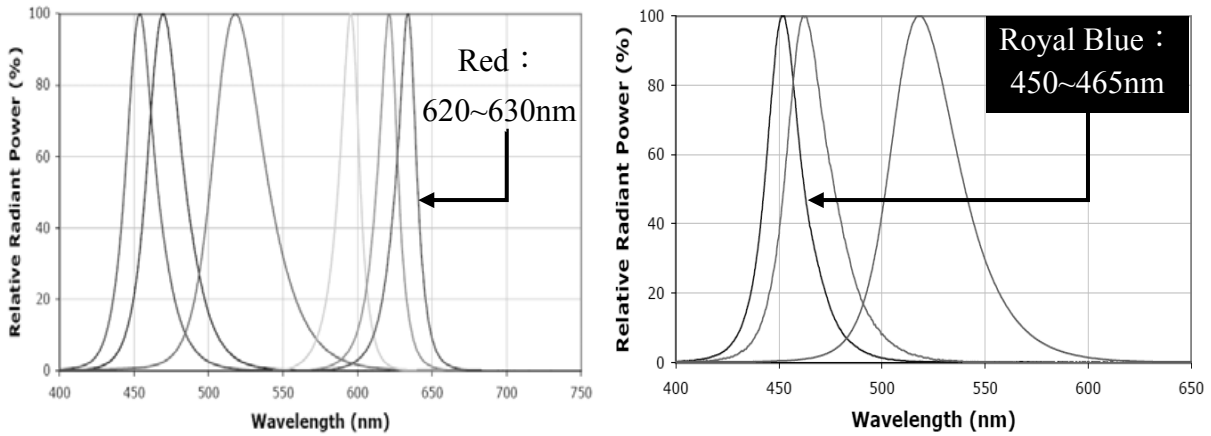


圖 3.2.2 本實驗之紅光(Red)及藍光(Royal Blue)LED 光譜分佈圖

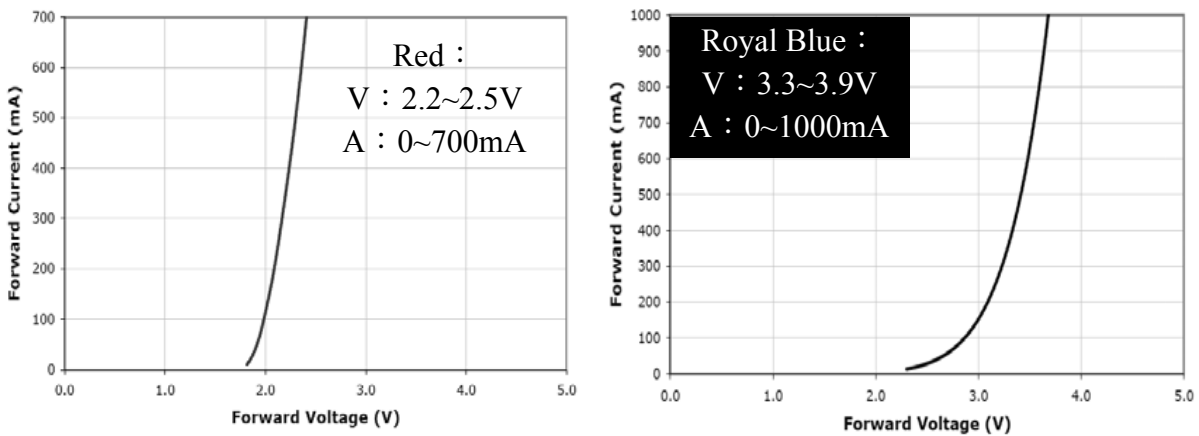


圖 3.2.3 本實驗之紅光(Red)及藍光(Royal Blue)LED 操作電壓及電流

(資料來源：http://www.cree.com/products/xlamp_xrc.asp&

http://www.cree.com/products/xlamp7090_xre.asp)

3-3 實驗步驟

應用田口實驗設計法(Taguchi Methods)，使用葉萵苣為實驗對象，以兩次 L9 實驗分別針對育苗及育成計算出優化生長條件，並以最終培育之植株鮮重為量化指標進行分析。希望藉由上述實驗設計法，可快速並確實的建立植物生長資料庫，進而達到種植標準化的目的。整體實驗步驟如圖 3.3.1 所示。

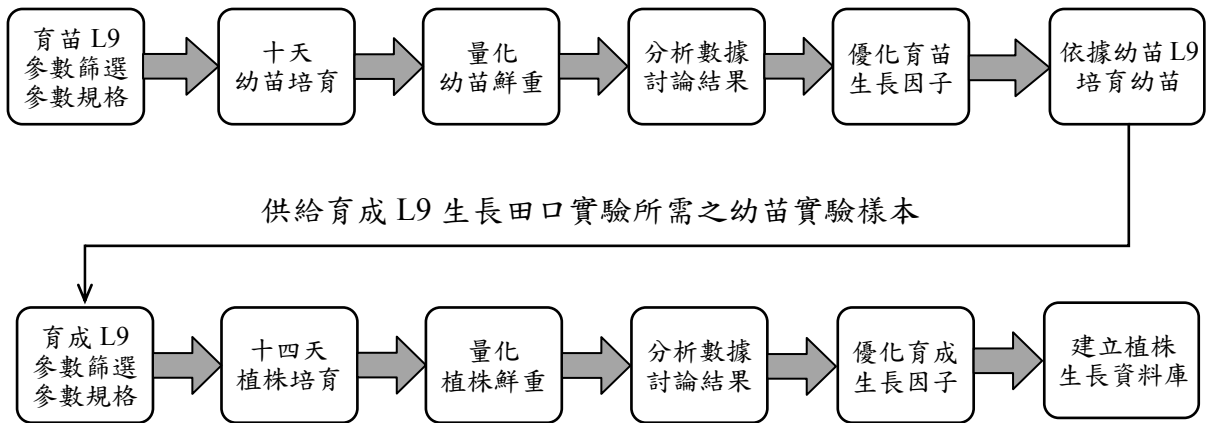


圖 3.3.1 以田口實驗法建立生長資料庫之整體實驗步驟流程圖

本小節實驗流程之各項次說明依序為：

1. 依研究架構之光源及養液系統以光量、光週期、營養液濃度及酸鹼度為 L9 之四項因子，並分別訂定三種水準建構出實驗設計如表 3.3.1 所示。

表 3.3.1 培育健康幼苗之 L9 田口實驗設計表

培育健康植株幼苗-L9 田口實驗設計表				
L9 Exp	照射光量 (PPF)	照射週期 (hr/day)	營養液濃度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	營養液酸鹼度 pH 值
L1	85	12	1400	6
L2	85	16	1800	7
L3	85	24	2200	8
L4	115	12	1800	8
L5	115	16	2200	6
L6	115	24	1400	7
L7	130	12	2200	7
L8	130	16	1400	8
L9	130	24	1800	6

2. 依照幼苗 L9 田口實驗設計表，架構出實驗硬體設備，其中光源系統之照射光量藉由燈源與幼苗間的高度距離做調控，照射週期以電路系統調控，養液部分為依據每一組別的設定分別配置，整體如圖 3.3.2 所示。

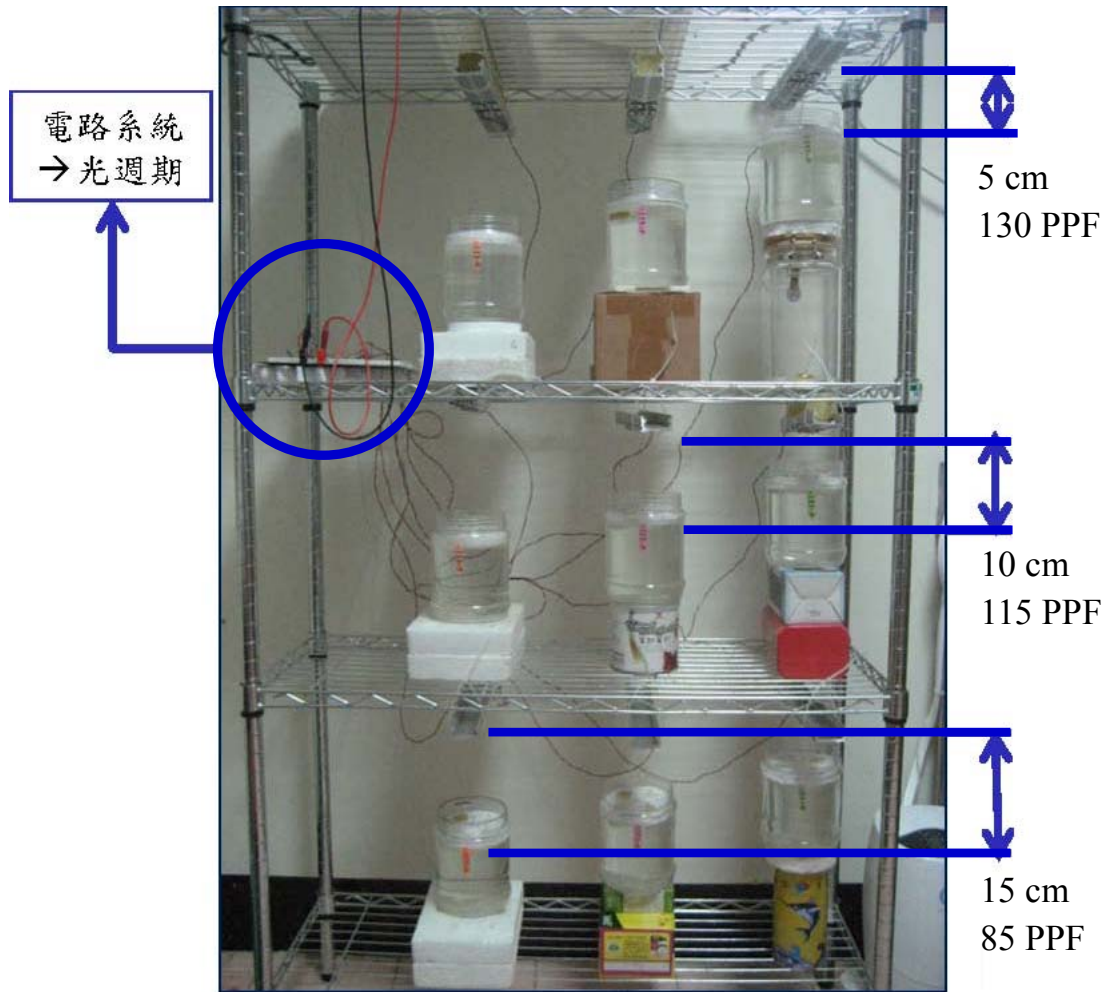


圖 3.3.2 育苗 L9 田口實驗法之實際硬體架構圖

3. 本 L9 田口實驗每組以一直徑 10.5 公分、高度 12 公分及容量為 1.5 公升之醃梅子罐為養液裝填容器，並於其中以邊長為 2.2 公分之正立方體海綿為植株載體，培育五棵葉萵苣幼苗為樣本如圖 3.3.3 所示。於實驗第一天將每一組種植情形拍照，如圖 3.3.4 所示。

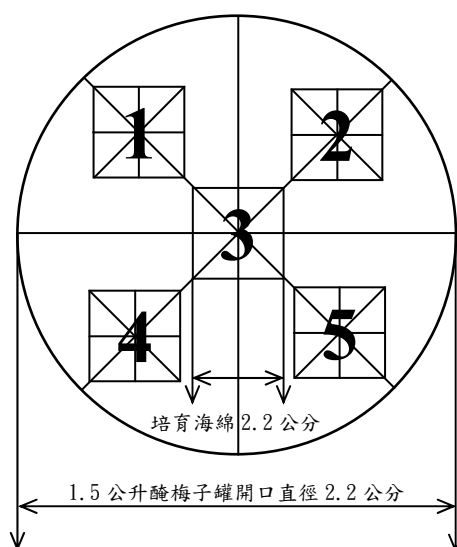


圖 3.3.3 育苗 L9 田口實驗法之樣品培育位置圖

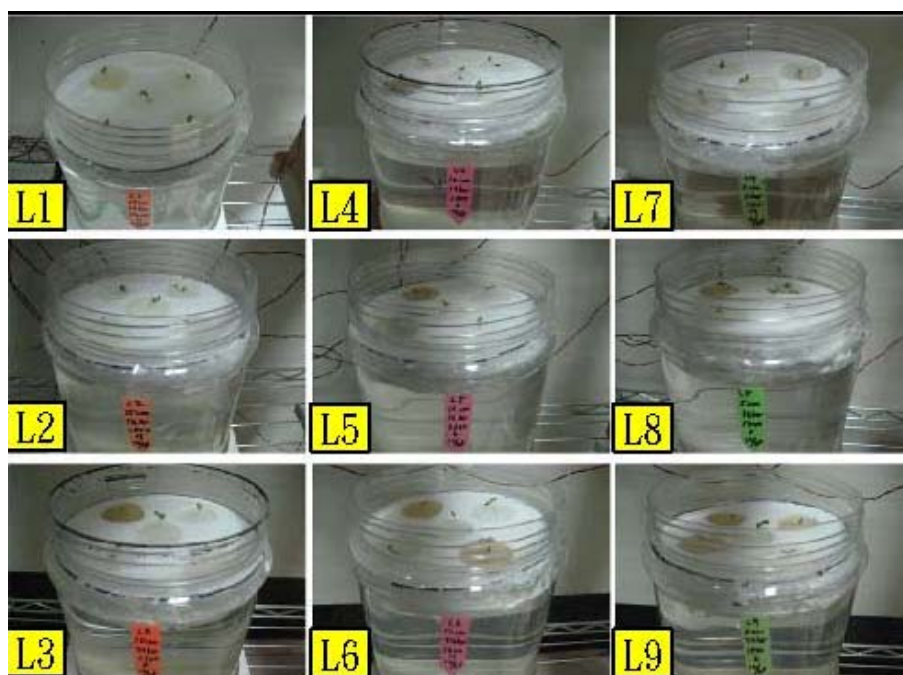


圖 3.3.4 育苗 L9 田口實驗法之組別與樣本放置圖

4. 培育十天後，將每組種植情形拍照整理，如圖 3.3.5 所示，並將樣本取出拍照整理如圖 3.3.6 所示，其中第五組第一植株發生生長異常問題(如圖紅圈處所示)，將於數據分析時將該筆資料去除以確保資料之正確性。

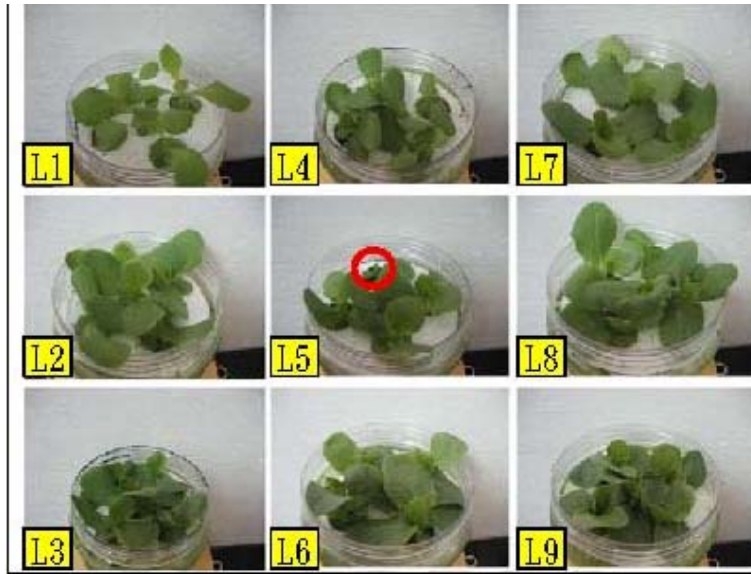


圖 3.3.5 依據 L9 田口實驗之設定，培育十天之幼苗上視圖

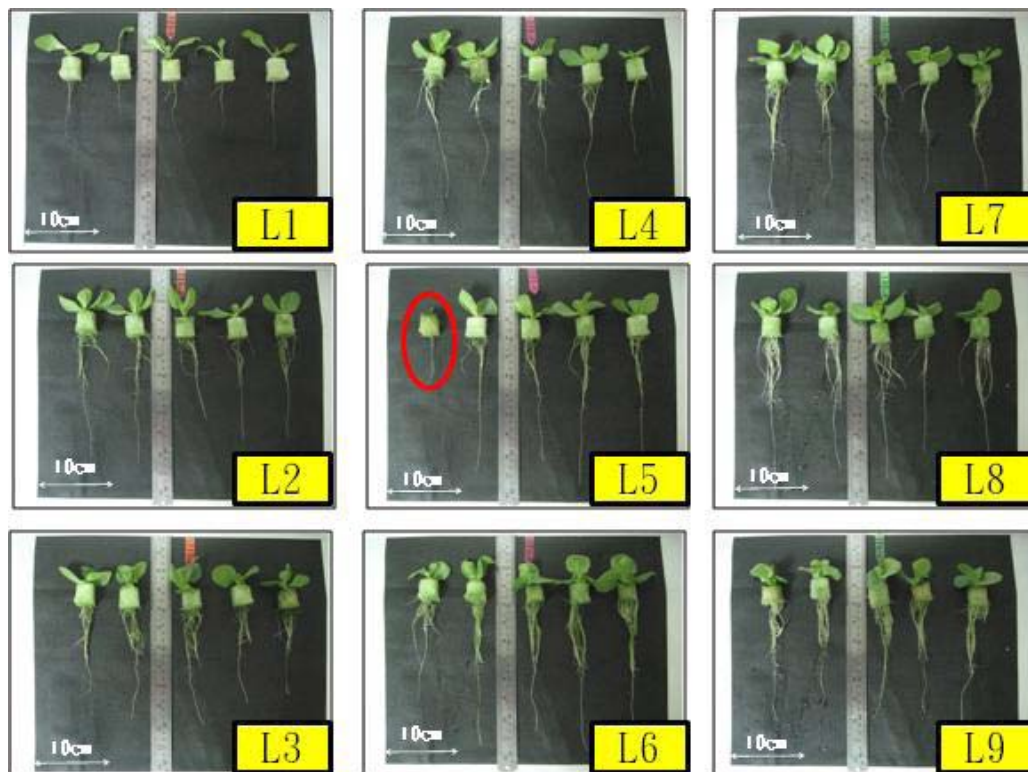


圖 3.3.6 依據 L9 田口實驗之設定，培育十天之幼苗全貌

3-4 育苗 L9 田口實驗數據整理及分析

1. 九組的實驗執行十天後，每組實驗測量各五株葉萵苣之鮮重，其數據(單位是公克)如表 3.4.1 所示，其中於第五組第一植株因生長異常之因素，於之後數據分析中將於予濾除以確保資料之正確性。

表 3.4.1 育苗 L9 實驗記錄表及實驗數據

幼苗 L9 Exp	Fresh Weight(g)	第一植株	第二植株	第三植株	第四植株	第五植株	平均值	標準偏差
1	L1	0.87	0.81	0.74	0.98	0.83	0.84	0.087
2	L2	1.60	1.18	1.31	1.44	1.47	1.40	0.161
3	L3	1.35	1.44	1.43	1.72	2.20	1.63	0.349
4	L4	0.80	0.99	1.22	1.49	1.45	1.19	0.295
5	L5	Cleaned	1.30	1.29	1.82	1.51	1.48	0.248
6	L6	1.50	2.87	3.83	2.56	2.69	2.69	0.832
7	L7	1.08	1.31	1.53	1.83	2.08	1.57	0.397
8	L8	1.13	1.46	2.08	1.97	1.74	1.67	0.384
9	L9	2.02	2.31	2.26	2.64	2.64	2.37	0.267
Remark	Cleaned	因該植株生長異常因素，濾除該筆數據確保資料分析之正確性						

2. 依每個因子在三種水準設定下，將濾除完之數據整理成重量因子反應表，如表 3.4.2 所示。再將因子反應值之最大與最小值差(Range)由大至小排列，依據「一半準則」以照射週期及光量為優化育苗之兩重要因子。

表 3.4.2 育苗 L9 田口實驗植株重量因子反應表

Levels/Factors	照射光量 (PPF)	照射週期 (hr/day)	營養液濃度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	營養液酸鹼度 (pH值)
Level-1	1.29	1.20	1.74	1.56
Level-2	1.79	1.52	1.65	1.88
Level-3	1.87	2.23	1.56	1.50
E 1-2	0.50	0.32	-0.08	0.32
E 2-3	0.09	0.71	-0.10	-0.39
Range	0.58	1.03	0.18	0.39
Rank	2	1	4	3
Significant?	yes	yes	no	no

3. 最後依據每個因子在三種水準設定下，以濾除完之數據整理成重量因子反應圖，如圖 3.4.1 所示。由反應圖中可清楚的判斷出光量、照射週期及營養液濃度三項因子有可再優化的趨勢，但照射週期已達一日二十四小時上限，所以可藉由照射光量的提升及營養液濃度的降低兩部分著手，進行第二次的幼苗 L9 田口實驗，以優化更佳的生長條件給予幼苗之培育。

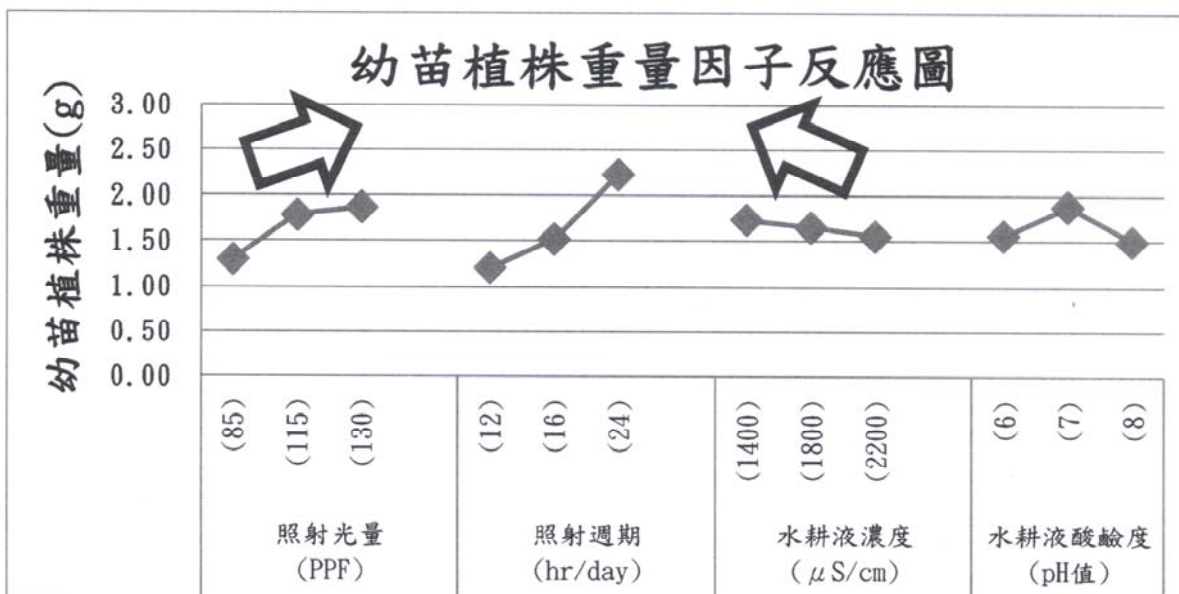


圖 3.4.1 幼苗 L9 田口實驗植株重量因子反應圖

4. 依據幼苗 L9 實驗之優化生長參數，對葉萵苣進行十天之培育，結果如圖 3.4.2 所示。此幼苗將為下一階段植株育成 L9 田口實驗樣本的來源。

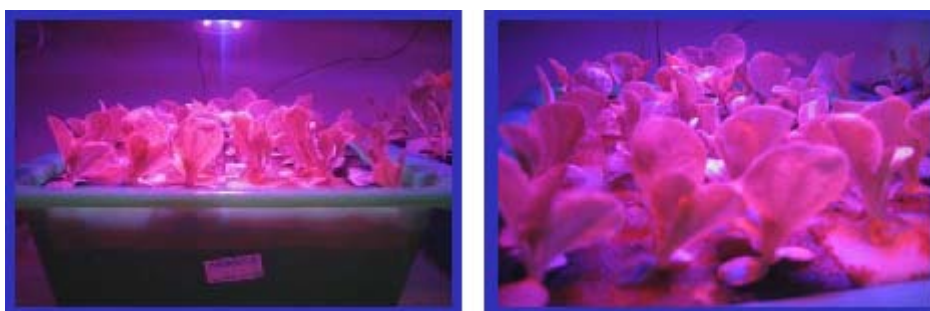


圖 3.4.2 依據幼苗 L9 優化因子所培育之育成 L9 樣本

3-5 植株成長實驗步驟

1. 延續幼苗實驗之四項因子，加以調整建構植株育成 L9 實驗設計，如表 3.5.1 所示。實驗設備及種植規畫與幼苗實驗一致。

表 3.5.1 植株育成之 L9 田口實驗設計表

植株育成-L9田口實驗設計表				
L9 Exp	照射光量 (PPF)	照射週期 (hr/day)	營養液濃度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	營養液pH值
L1	115	12	1600	6.5
L2	115	16	1800	7
L3	115	24	2000	7.5

L4	125	12	1800	7.5
L5	125	16	2000	6.5
L6	125	24	1600	7
L7	130	12	2000	7
L8	130	16	1600	7.5
L9	130	24	1800	6.5

2. 培育十四天後，將每組種植情形拍照整理，如圖 3.5.1 所示，並將樣本取出拍照整理，如圖 3.5.2 所示。

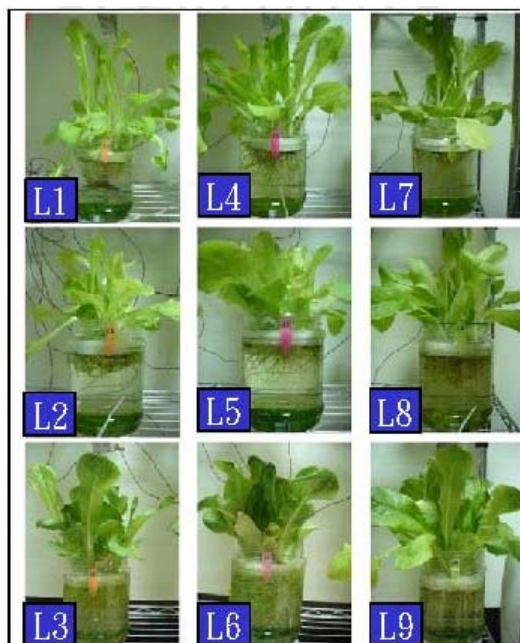


圖 3.5.1 依據 L9 田口實驗之設定，育成十四天之植株側視圖

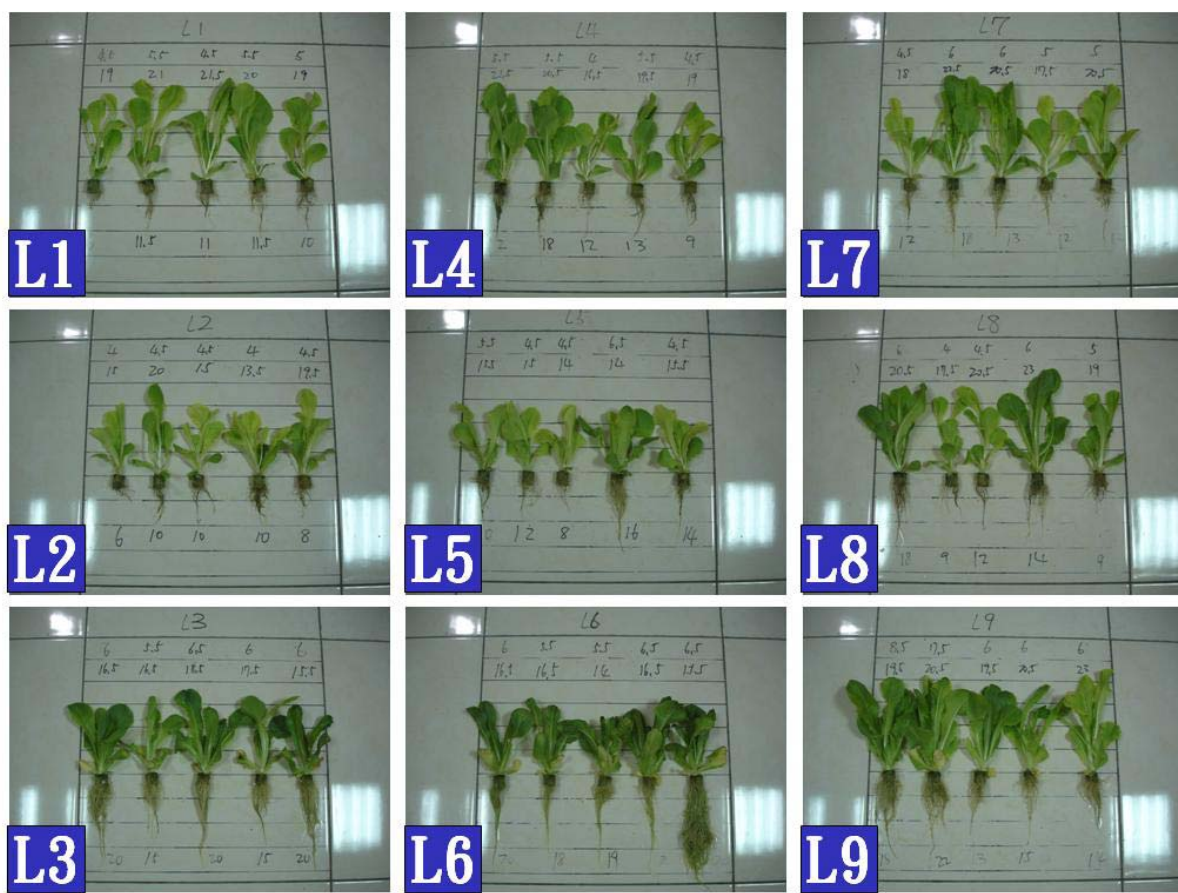


圖 3.5.2 依據 L9 田口實驗之設定，育成十四天之植株全貌

3-6 L9 田口育成實驗數據整理及分析

1. 執行了九組的實驗十四天後，每組實驗測量各五株葉萵苣之鮮重，其數據(單位：公克)如表 3.6.1 所示。

表 3.6.1 植株育成 L9 田口實驗記錄表及實驗數據

幼苗 L9 Exp	Fresh Weight(g)	第一植株	第二植株	第三植株	第四植株	第五植株	平均值	標準偏差
1	L1	7.60	7.68	4.77	7.92	6.57	6.91	1.30
2	L2	6.83	9.32	6.99	6.01	5.68	6.97	1.43
3	L3	16.15	17.37	10.69	16.17	10.29	14.13	3.37
4	L4	6.44	8.67	9.70	4.87	9.98	7.93	2.21
5	L5	6.72	6.21	5.42	14.25	7.47	8.01	3.57
6	L6	23.11	14.88	29.94	13.15	11.88	18.59	7.71
7	L7	9.32	6.25	6.50	11.68	11.59	9.07	2.64
8	L8	4.84	11.88	7.28	14.03	4.83	8.57	4.19
9	L9	14.10	13.40	25.03	24.00	15.63	18.43	5.62

2. 依每個因子在三種水準設定下，將數據整理成重量因子反應表，如表 3.6.2 所示。再將因子反應值之最大與最小值差(Range)由大至小排列，依「一半準則」以照射週期及光量為優化育苗兩重要因子。

表 3.6.2 植株成長 L9 田口實驗植株重量因子反應表

Levels/Factors	照射光量 (PPF)	照射週期 (hr/day)	營養液濃度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	營養液酸鹼度 (pH值)
Level-1	9.33	7.97	11.36	11.12
Level-2	11.51	7.85	11.11	11.54
Level-3	12.02	17.05	10.40	10.21
E 1-2	2.18	-0.12	-0.25	0.42
E 2-3	0.51	9.2	-0.70	-1.33
Range	2.689	9.202	0.952	1.330
Rank	2	1	4	3
Significant?	yes	yes	no	no

3. 依據每個因子在三種水準設定下，將數據整理成重量因子反應圖，如圖 3.6.1。由圖中可清楚的判斷出光量、照射週期及營養液濃度三項因子有可再優化的趨勢，但照射週期已達一日二十四小時上限，同樣可藉由照射光量的提升及營養液濃度的降低兩部分著手，進行第二次的幼苗 L9 田口實驗，以優化更佳的生長條件給予幼苗之培育。

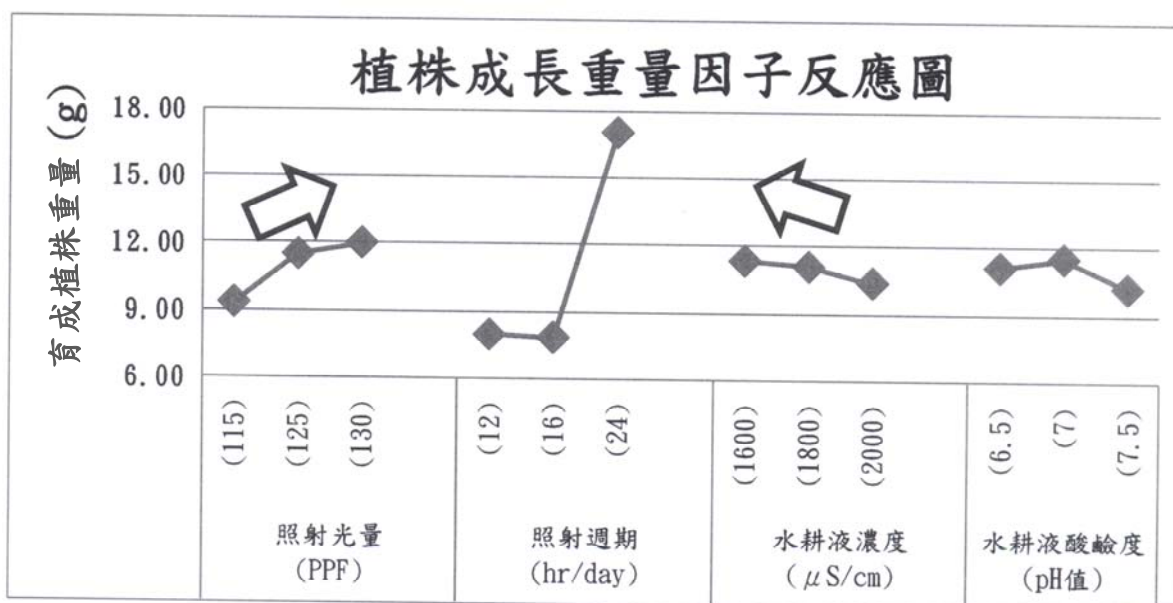


圖 3.6.1 植株成長 L9 田口實驗植株重量因子反應圖

3-7 L9 生長實驗數據分析與探討

1. 由育苗及育成的兩個 L9 田口實驗比較(如圖 3.7.1 所示)，不論在育苗階段或是成長階段其生長因子的趨勢皆相同，尤其以照射週期為最重要的影響因子。實際上植物之光合作用效率是以每日每秒所照射之光量累加起來的，亦即日累積光量(DLI: Daily Light Integral, 單位: mole/m²)來計算的。因此我們可以利用此特性，以延長照射時間來減低光源設備的建置成本、無需將 LED 開啟至大功率而可解決散熱問題、延長 LED 使用壽命及降低生產過程中耗能的問題；但同時也得考慮到長日作物或短日作物的特性，不然在作物還未收成前，即面臨到作物由營養階段轉為生殖階段而中斷生長進而開花的問題。

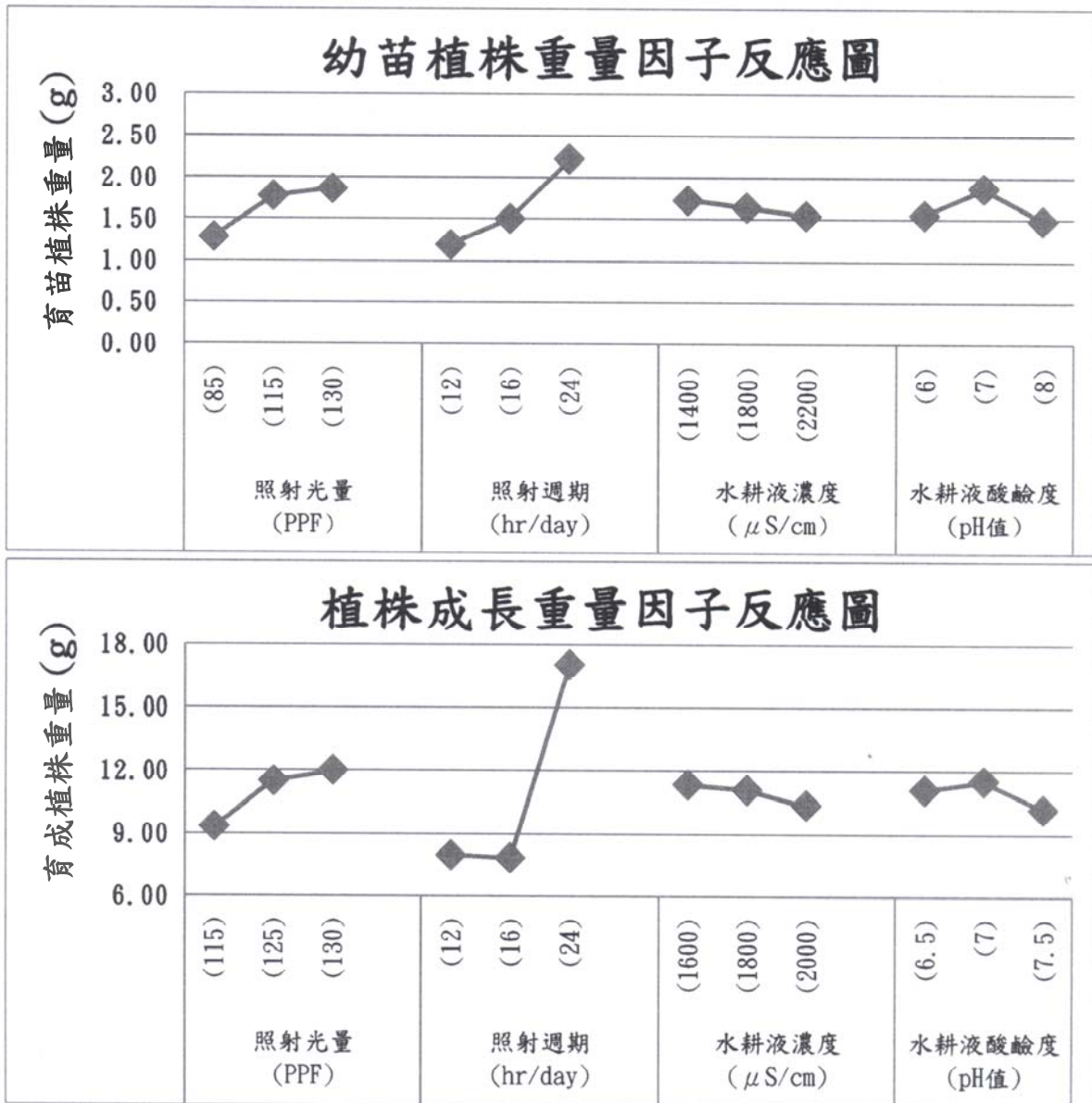


圖 3.7.1 育苗及育成植株重量因子反應比較圖

- 由本研究之幼苗及植株成長的兩個 L9 田口實驗中，可以再針對增強照射光量及降低營養液濃度兩部分著手，如圖 3.7.2 黑色箭頭所示，進行第二次的田口實驗進而修正此次的生長因子設定，以達到更佳之育苗及成長條件。

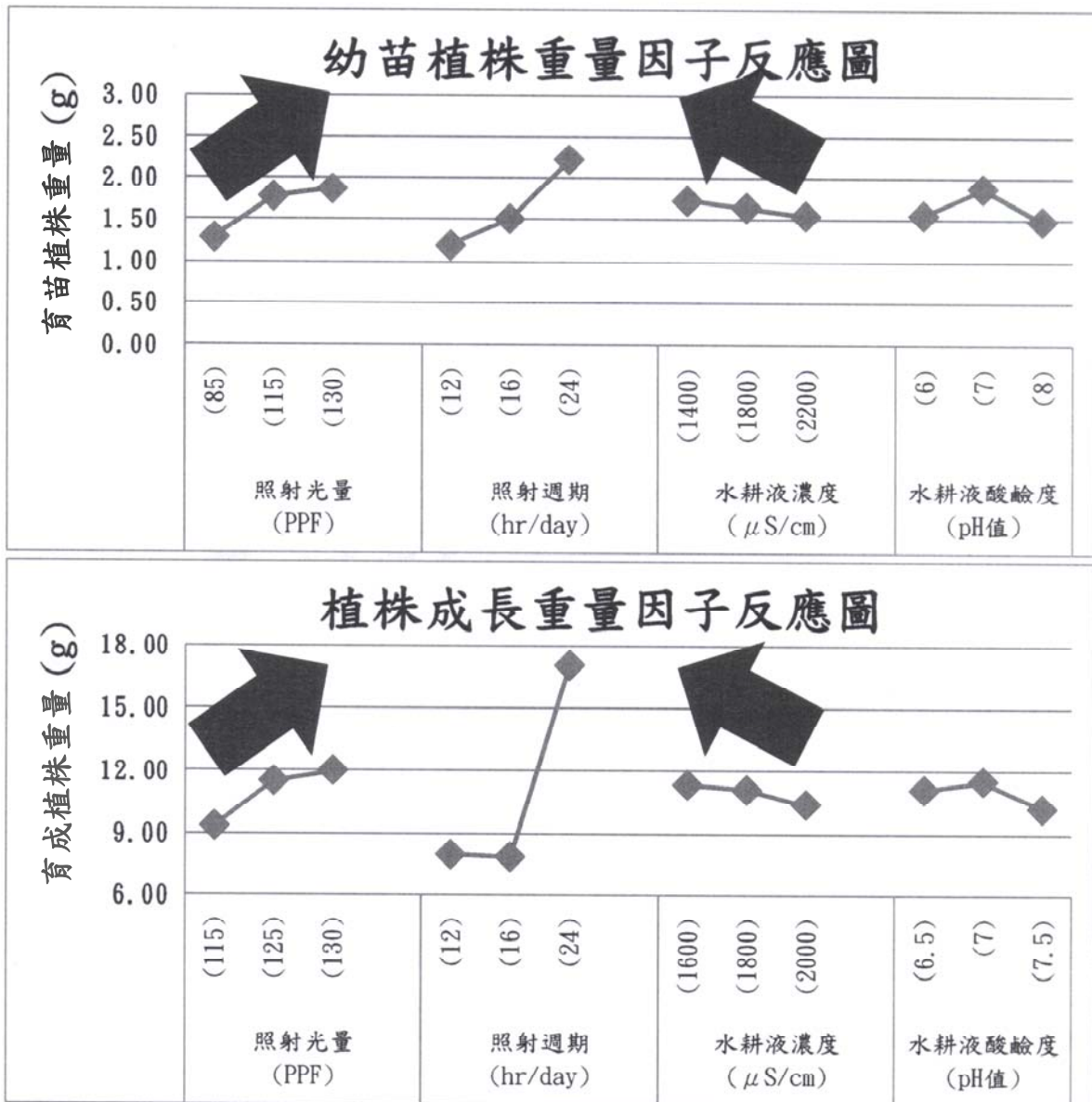


圖 3.7.2 育苗及育成植株因子修正建議圖

3. 生長因子設定於實際上之運用，並非一定得達到最優化的生長環境控制，實際上可搭配市場需求或是生產成本上的考量，靈活的加以調控。
4. 於水耕營養液的部分僅須對濃度及酸鹼值再加以調控後，可採用循環再使用的方法，達到節省水資源及生產成本的經濟考量。

3-8 育成實驗數據變異數分析(ANOVA)

為確認上述田口品質分析的結果，也期盼了解生長因子對葉萵苣育成影響的顯

著性，現將 54 株葉萵苣在 14 天的育成時期，受照射光量、照射週期、營養液濃度及酸鹼度等不同生長因子條件下，其各株鮮重的實驗紀錄(如表 3.8.1 所示)做變異數分析。

照射光量 (PPF)	照射週期 (hr/day)	營養液濃度 (μ S)	營養液酸鹼度 (pH 值)	Fresh Weight(g)
115	12	1600	6.5	7.597
115	12	1600	6.5	7.678
115	12	1600	6.5	4.767
115	12	1600	6.5	7.921
115	12	1600	6.5	6.567
115	12	1600	6.5	6.91
115	16	1800	7	6.827
115	16	1800	7	9.32
115	16	1800	7	6.988
115	16	1800	7	6.009
115	16	1800	7	5.682
115	16	1800	7	6.9652
115	24	2000	7.5	16.15
115	24	2000	7.5	17.372
115	24	2000	7.5	10.685
115	24	2000	7.5	16.169
115	24	2000	7.5	10.287
115	24	2000	7.5	14.1326
125	12	1800	7.5	6.439
125	12	1800	7.5	8.667
125	12	1800	7.5	9.697
125	12	1800	7.5	4.867
125	12	1800	7.5	9.975
125	12	1800	7.5	7.929
125	16	2000	6.5	6.724
125	16	2000	6.5	6.209
125	16	2000	6.5	5.419
125	16	2000	6.5	14.251
125	16	2000	6.5	7.465
125	16	2000	6.5	8.0136
125	24	1600	7	23.105
125	24	1600	7	14.88
125	24	1600	7	29.937
125	24	1600	7	13.149
125	24	1600	7	11.881
125	24	1600	7	18.5904
130	12	2000	7	9.317
130	12	2000	7	6.247

130	12	2000	7	6.498
130	12	2000	7	11.678
130	12	2000	7	11.592
130	12	2000	7	9.0664
130	16	1600	7.5	4.841
130	16	1600	7.5	11.878
130	16	1600	7.5	7.279
130	16	1600	7.5	14.032
130	16	1600	7.5	4.827
130	16	1600	7.5	8.5714
130	24	1800	6.5	14.102
130	24	1800	6.5	13.404
130	24	1800	6.5	25.032
130	24	1800	6.5	23.995
130	24	1800	6.5	15.634
130	24	1800	6.5	18.4334

表 3.8.1 植株育成實驗紀錄數據

	自由度	SS(總變異量)	MS(平均變異量)	F	P(顯著值)
組間	4	976.1251103	244.0312776	16.63781	1.12E-08
組內	49	718.6964135	14.66727374		
總和	53	1694.821524			

表 3.8.2 植株育成時，組間對組內變異量分析

由表 3.8.2 的結果得知，從組間的總變異量得知其平均變異量為 244.03，而組內的平均變異量也可依上述的方法算出 14.67，再將兩平均變異量相除得到 16.64，最後再換算出顯著值為 1.12E-08。因其值小於 0.05，表示組間的差異性大而組間各生長因子的差異性小，表示所取各生長因子交互影響葉萵苣的生長小。表 3.8.3 為葉萵苣植株育成時，各生長因子的變異分析。從表上的結果得知，照射週期的 t 統計值為 7.785，所換算的 P 值為 4.08E-10 遠小於 0.05，是四個生長因子影響葉萵苣最為顯著。其次為照射光量，其 t 統計值為 2.211，所換算的 P 值為 0.032 也小於 0.05。至於營養液濃度及酸鹼度所換算的 P 值均大於 0.05，表示其對葉萵苣的育成影響不明顯。由以上變異數分析結果再次證實田口分析的真實性。

	係數	標準誤差	t 統計	P(顯著值)	下限 95%	上限 95%
照射光量 (PPF)	0.18475619	0.083572819	2.210721	0.031754075	0.016810326	0.352702055
照射週期 (hr/day)	0.81325119	0.104466024	7.784839	4.08067E-10	0.60331886	1.023183521
營養液 濃度 (μ S)	-0.002379333	0.00319149	-0.74552	0.459516244	-0.008792872	0.004034205
營養液 酸鹼度 (pH 值)	-0.906666667	1.276595896	-0.71022	0.480933019	-3.47208212	1.658748786

表 3.8.3 植株育成時，各生長因子的變異量分析

四、結論

1. 不論在育苗階段或是成長階段其生長因子的影響趨勢皆相同，其中以照射週期為最重要的影響因子。
2. 延長照射時間可以減低光源設備的建置成本、生產過程中無需將 LED 開啟至大功率即可解決散熱及耗能的問題。
3. 對植物生長影響較小的營養液特性，可由降低濃度來進行成本改善。
4. 需考慮長日作物或短日作物的特性，不然在作物還未收成前，即面臨到作物由營養階段轉為生殖階段而中斷生長進而開花的問題。

參考文獻

- 【1】李輝煌 (民 99)。田口方法-品質設計的原理與實務。第三版。高立圖書有限公司。
- 【2】李學勇 (民 76)。基礎植物學。國立編譯館。
- 【3】林安秋 (民 85)。作物之光合作用。台灣商務印書館。
- 【4】蔡尚光 (民 77)。室內陽台的水耕綠化。百通圖書股份有限公司。
- 【5】鍾楊聰、張立雪、徐歷鵬、黃璧祈 (民 94)。生物學。第六版。偉明圖書有限公司。
- 【6】O. V. Avercheva, Yu. A. Berkovich, A. N. Erokhin, T. V. Zhigalova, S. I. Pogosyan and S. O. Smolyanina, “Growth and photosynthesis of Chinese Cabbage plants grown under light-emitting diode-based light source,” *Russian Journal of Plant Physiology*, vol. 56, pp. 14-21, 2009.
- 【7】C. M. Bourget, “An introduction to light emitting diodes,” *HortScience*, vol. 43, pp. 1944-1946, 2008.
- 【8】C. S. Brown, A. C. Schuerger and J. C. Sager, “Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting,” *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 120, pp. 808-813, 1995.
- 【9】R. J. Bula, R.C. Morrow, T. W. Tibbits and D. J. Barta, “Light-emitting diodes as a radiation source for plants,” *HortScience*, vol. 26, pp. 203-205, 1991.
- 【10】G. D. Goins, N. C. Yorio, M. M. Sanwo and C. S. Brown, “Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting,” *Journal of Experimental Botany*, vol. 48, pp. 1407-1413, 1997.
- 【11】H. Hamamoto and K. Yamazaki, “Reproductive response of okra and native rosella to long-day treatment with red, blue, and green light-emitting diode lights,” *HortScience*, vol. 44, pp. 1494-1497, 2009.
- 【12】J. Heo, C. Lee and K. Paek, “Characteristics of growth and flowering on some bedding plants grown in mixing fluorescent tube and light-emitting diode,” *Acta Horticulturae*, no. 580, pp. 177 - 181, 2002.
- 【13】M. E. Hoenecke, R. J. Bula and T. W. Tibbits, “Importance of blue photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes,” *HortScience*, vol. 27, pp. 427-430, 1992.
- 【14】R. C. Jao and W. Fang, “Effects of frequency and duty ratio on the growth of potato plantlets in vitro using light-emitting diodes,” *HortScience*, vol. 39, pp. 375-379, 2004.
- 【15】R. C. Jao, C. C. Lai, W. Fang and S. F. Chang, “Effects of red light on the growth

- of *Zantedeschia* plantlets in vitro and tuber formation using light-emitting diodes,” *HortScience*, vol. 40, pp. 436-438, 2005.
- 【16】 M. Johkan, K. Shoji, F. Goto, S. Hashida and T. Yoshihara, “Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce,” *HortScience*, vol. 45, pp. 1809-1814, 2010.
- 【17】 M. G. Lefsrud, D. A. Kopsell and C. E. Sams, “Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in Kale,” *HortScience*, vol. 43, pp. 2243-2244, 2008.
- 【18】 H. M. Li, Z. G. Xu and C. M. Tang, “Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets in vitro,” *Plant Cell Tissue Organ Cult.*, vol. 103, pp. 155-163, 2010.
- 【19】 R. C. Morrow, “LED lighting in horticulture,” *HortScience*, vol. 43, pp. 1947-1950, 2008.
- 【20】 D. T. Nhut, L. T. A. Hong, H. Watanabe, M. Goi and M. Tanaka, “Growth of banana plantlets cultured in vitro under red and blue light-emitting diode(LED) irradiation source,” *Acta Horticulturae*, no. 575, pp.117-124, 2002.
- 【21】 D. T. Nhut, T. Takamura, H. Watanabe and M. Tanaka, “Efficiency of a novel culture system by using light-emitting diode (LED) on in vitro and subsequent growth of micropropagated banana plantlets,” *Acta Horticulturae*, no. 616, pp. 121-127, 2003.
- 【22】 D. T. Nhut, T. Takamura, H. Watanabe, K. Okamoto and M. Tanaka, “Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs),” *Plant Cell Tissue Organ Culture*, vol. 73, pp. 43-52, 2003.
- 【23】 D. T. Nhut, T. Takamura, H. Watanabe and M. Tanaka, “Artificial light source using light-emitting diodes (LEDS) in the efficient micropropagation of spathiphyllum plantlets,” *Acta Horticulturae*, no. 692, pp. 137-142, 2005.
- 【24】 D. T. Nhut, T. Takamura, H. Watanabe and M. Tanaka, “Artificial light source using light-emitting diodes (LEDS) in the efficient micropropagation of spathiphyllum plantlets,” *Acta Horticulturae*, no. 692, pp. 137-142, 2005.
- 【25】 K. Okamoto, T. Yanagi and S. Kondo, “Growth and morphogenesis of lettuce seedlings raised under different combinations of red and blue light,” *Acta Horticulturae*, no. 435, pp. 149-157, 1997.
- 【26】 P. R. Poudel, I. Kataoka and R. Mochioka, “Effect of red- and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes,” *Plant Cell Tissue Organ Culture*, vol. 92, pp. 147-153, 2008.
- 【27】 G. Samuolienė, A. Urbonavičiūtė, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, P. Vitta and A. Zukauskas, “Decrease in nitrate concentration in leafy vegetables under a solid-state illuminator,” *HortScience*, vol. 44, pp. 1857-1860, 2009.

- 【28】 A. C. Schuerger, C. S. Brown and E. C. Stryjewski, “Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light,” *Annals Botany*, vol. 79, pp. 273-282, 1997.
- 【29】 K. S. Shin, H. N. Murthy, J. W. Heo and K. Y. Paek, “Induction of betalain pigmentation in hairy roots of red beet under different radiation sources,” *Biologia Plantarum*, vol. 47, pp. 149-152, 2003.
- 【30】 G. W. Stutte and S. Edney, “Photoregulation of bioprotectant content of red leaf lettuce with light-emitting diodes,” *HortScience*, vol. 44, pp. 79-82, 2009.
- 【31】 F. Takeda, D. M. Glenn and G. W. Stutte, “Red light affects flowering under long days in a short-day strawberry cultivar, *HortScience*, vol. 43, pp. 2245-2247, 2008.
- 【32】 D. J. Tennessen, E. L. Singsaas and T. D. Sharkey, “Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research,” *Photosynthesis research*, vol. 39, pp. 85-92, 1994.
- 【33】 T. Yanagi, K. Okamoto and S. Takita, “Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants,” *Acta Horticulturae*, no. 440, pp.117-122, 1996.
- 【34】 T. Yanagi, and K. Okamoto, “Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth,” *Acta Horticulturae*, no. 418, pp. 223-228, 1997.
- 【35】 L. X. Ying, G. S. Rong, X. Z. Gang, J. X. Lei and T. Tezuka, “Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves, and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of light-emitting diodes,” *HortScience*, vol. 46, pp. 217-221, 2011.
- 【36】 N. C. Yorio, G. D. Goins, H. R. Kagie, R. M. Wheeler and J. C. Sager, “Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation,” *HortScience*, vol. 36, pp. 380-383, 2001.
- 【37】 行政院農委會，歐盟蔬菜硝酸鹽限量新規範。
(<http://www.coa.gov.tw/view.php?catid=7631>，Date:2011/05/20)
- 【38】 行政院農委會，「莫拉克颱風」農業災情損失概況。
(<http://www.coa.gov.tw/view.php?catid=20173>，Date:2011/05/20)
- 【39】 行政院農委會，98年農業統計年報。
(<http://www.coa.gov.tw/view.php?catid=21711>，Date:2011/05/20)
- 【40】 行政院農委會，100年新聞與公報。
(http://www.coa.gov.tw/show_news.php?cat=show_news&serial=coa_diamond_20110512202933&showtype，Date:2011/05/20)
- 【41】 台大生物產業機電工程系網站，紅、藍光 LED 單位轉換常數表。
(<http://www.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/lab551/review-light.htm>，Date:2011/05/20)

【42】美國能源局， Solid-State Light。
(http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/sslbasics_whyssl.html，
Date:2011/05/20)

明新科技大學 103 年度 研究計畫執行成果自評表

計畫類別： <input type="checkbox"/> 任務導向計畫 <input type="checkbox"/> 整合型計畫 <input checked="" type="checkbox"/> 個人計畫 所屬院(部)： <input checked="" type="checkbox"/> 工學院 <input type="checkbox"/> 管理學院 <input type="checkbox"/> 服務學院 <input type="checkbox"/> 人文社會科學院 執行系別：工學院 計畫主持人：趙守嚴 職稱：助理教授 計畫名稱：LED 植物工廠自動調整系統之研究 計畫編號：MUST-103 電子-5 計畫執行時間：103 年 1 月 1 日至 103 年 9 月 30 日					
計畫執行成效	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center; vertical-align: middle;">教學方面</td> <td style="padding: 5px;"> 1.對於改進教學成果方面之具體成效： <u>a.設置完成的實驗設備可以提供學生建構 LED 植物工廠所需的實務訓練。</u> <u>b.計畫成果可以作為光電系統應用之輔助教材。</u> 2.對於提昇學生論文/專題研究能力之具體成效： <u>讓學生對有關資訊蒐集、系統設備建構、LED 光量、光週期與營養液調控，以及對多變數分析能力有基本的養成。</u> 3.其他方面之具體成效：_____ </td> </tr> <tr> <td style="width: 15%; text-align: center; vertical-align: middle;">學術研究方面</td> <td style="padding: 5px;"> 1.該計畫是否有衍生出其他計畫案 <input type="checkbox"/>是 <input checked="" type="checkbox"/>否 計畫名稱：_____ 2.該計畫是否有產生論文並發表 <input type="checkbox"/>已發表 <input checked="" type="checkbox"/>預定投稿/審查中 <input type="checkbox"/>否 發表期刊(研討會)名稱：_____ 發表期刊(研討會)日期：____年____月____日 3.該計畫是否有要衍生學合作案、專利、技術移轉 <input checked="" type="checkbox"/>是 <input type="checkbox"/>否 請說明衍生項目：_____ </td> </tr> </table>	教學方面	1.對於改進教學成果方面之具體成效： <u>a.設置完成的實驗設備可以提供學生建構 LED 植物工廠所需的實務訓練。</u> <u>b.計畫成果可以作為光電系統應用之輔助教材。</u> 2.對於提昇學生論文/專題研究能力之具體成效： <u>讓學生對有關資訊蒐集、系統設備建構、LED 光量、光週期與營養液調控，以及對多變數分析能力有基本的養成。</u> 3.其他方面之具體成效：_____	學術研究方面	1.該計畫是否有衍生出其他計畫案 <input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否 計畫名稱：_____ 2.該計畫是否有產生論文並發表 <input type="checkbox"/> 已發表 <input checked="" type="checkbox"/> 預定投稿/審查中 <input type="checkbox"/> 否 發表期刊(研討會)名稱：_____ 發表期刊(研討會)日期：____年____月____日 3.該計畫是否有要衍生學合作案、專利、技術移轉 <input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 請說明衍生項目：_____
教學方面	1.對於改進教學成果方面之具體成效： <u>a.設置完成的實驗設備可以提供學生建構 LED 植物工廠所需的實務訓練。</u> <u>b.計畫成果可以作為光電系統應用之輔助教材。</u> 2.對於提昇學生論文/專題研究能力之具體成效： <u>讓學生對有關資訊蒐集、系統設備建構、LED 光量、光週期與營養液調控，以及對多變數分析能力有基本的養成。</u> 3.其他方面之具體成效：_____				
學術研究方面	1.該計畫是否有衍生出其他計畫案 <input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否 計畫名稱：_____ 2.該計畫是否有產生論文並發表 <input type="checkbox"/> 已發表 <input checked="" type="checkbox"/> 預定投稿/審查中 <input type="checkbox"/> 否 發表期刊(研討會)名稱：_____ 發表期刊(研討會)日期：____年____月____日 3.該計畫是否有要衍生學合作案、專利、技術移轉 <input checked="" type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 請說明衍生項目：_____				
成果自評	<p>計畫預期目標：藉由多變數分析法，改變不同的光量或光質比例，並且量化光量、光週期、營養液濃度及酸鹼度四項指標，再輔以植株之重量或高度等生長特性來完成結果分析，以建立植物生長的資料庫。</p> <p>計畫執行結果：1.不論在育苗或成長階段，其生長因子(光量、光週期、營養液濃度及酸鹼度)的影響趨勢皆相同。但以照射週期為最重要的影響因子，光量則次之。 2.延長照射時間可以降低光源曾大功率的設備建置成本。並可解決散熱及耗能的重大問題。 3.對植物生長影響較小的營養液特性，可由降低濃度來進行成本改善。</p> <p>預期目標達成率：90%</p> <p>其它具體成效：</p>				

明新科技大學 103 年度校內專題研究計畫 運用於教學成果記錄表

計畫類型	■個人型□整合型□任務導向型		計畫編號	MUST-103 電子-5	
計畫名稱	LED 植物工廠自動調整系統之研究				
計畫主持人資料	姓名	趙守嚴		職稱	助理教授
	學院	工學院		系所	電子工程系
聘用助理	系科班級	學號	姓名	聘僱起訖時間	工作內容
	碩子一甲	C02030013	林建良	102.01.01~04.30	資料蒐集、實驗校正及量測
	碩子二甲	C01030015	李朝旺	102.04.01~07.31	資料蒐集、實驗校正及量測
	碩子二甲	C01030004	楊捷閔	102.06.01~09.30	資料蒐集、實驗校正及量測
融入課程	開課班級	課程名稱		修課人數	課程內容概述
指導專題或碩士論文	指導班級	專題(論文)名稱		分組人數	專題(論文)內容概述
	四機四甲、乙	LED 接面熱阻值之估算與分析		3 組共 10 人	首先量測出 LED 溫度與接腳端電壓之 K 曲線。其次從熱傳定理計算 LED 接面熱阻值。最後再計算不同顏色光源 LED 接面熱阻值，並分析其結果的可靠度。
指導學生參與活動或競賽	活動或競賽名稱			參與人數	活動或競賽成果概述
製作教材	教材與教具名稱			教材與教具概述	

與教具		
其他促進 教學之成 果說明	<p>a.設置完成的實驗設備可以提供學生建構 LED 植物工廠所需的實務訓練。</p> <p>b.計畫成果可以作為光電系統應用之輔助教材。</p>	

明新科技大學 校內專題研究計畫 成果報告

【四】植物工廠自動調整系統之研究

趙守嚴

一〇三年度