

發光二極體在植物栽培上的應用

方煒¹ 饒瑞估²

螢光燈管與高壓鈉燈是現階段農業生產上最普遍的人工光源，前者常見於植物組織培養室，後者常見於高緯度地區溫室。如何補光、如何提高補光均勻度、如何調整光質與研發更高效率的人工光源一直是學界研究的重點。

近年來光電技術的進步大幅提昇了發光二極體 (Light-Emitting Diode, LED) 的亮度與效率，使得利用此種光源在農業生產上變得可行。LED 具有高光電轉換效率、使用直流電、體積小、壽命長、波長固定與低發熱等幾項優點，相較於使用螢光燈或高壓鈉燈的系統而言，LED 具有光量可調整、光質 (紅/藍光比例或紅/遠紅光比例) 可調整、冷卻負荷低與允許離植株距離近，可提高單位空間的栽培量等優點，因此對有環控功能的封閉式農業生產環境 (植物組織培養室、植物生長箱等) 是一種非常適合的人工光源，美國太空總署首創LED應用於太空農業上。

LED 的相關產品在1963年已經問世，由於光強度低且沒有全彩化，所以應用上侷限於標示或觀賞用途。拜光電科技進步之賜，1980年代中期發展出高亮度LED，1993年日本日亞公司(Nichia)更成功開發出高亮度藍光LED，使全彩化的LED產品得

以實現，也拓展了其用途：包括汽車、通訊產品、資訊產品、交通號誌、照明及生物產業等，後者包括情緒治療、青春痘與皮膚病變治療、柔光回春與光動力療法等都是近年來相當熱門的領域。本文旨在針對近年來高亮度發光二極體在植物栽培上的應用做一回顧。

一、光與植物栽培

在太陽輻射電磁波中有三區段的輻射對植物生長發育有決定性的影響，除了可見光 (380~780nm) 外，尚有紫外線(UV, 100~380nm) 和紅外線(780~10⁵ nm)。此主要是由於植物的三套受光系統所致，葉綠素吸收近於660nm 波長進行光合作用，光敏素吸收660、730nm波長控制許多形態發生的反應；而類胡蘿蔔素吸收450 nm波長引起屈光性以及高能量光形態發生。

植物是唯一能夠把太陽光能量轉化為質量的生物，植物的光合作用是地球上一切生命的基礎。光合作用需要波長範圍在400~700nm之間(可見光部分)的光，但是光對植物的影響除了提供光合作用所需之外，尚包括光週期(photoperiod)的調節，另外，光質 (紅、藍光比例，紅、遠紅光比例等) 對植物的型態發生亦有決定性

¹國立臺灣大學生物產業機電工程學研究所教授

²私立建國科技大學資訊管理系助理教授

的影響。

組織培養是在室內快速且大量繁殖植物種苗的方法，一般使用螢光燈為人工光源（圖1）。然而，基於燈管的壽命、發光效率不夠理想與發熱大，用於照明與降溫的耗電成本頗高。研發較低散熱與較高效率的人工光源以降低量產成本為業界所需。



超高亮度LED研發成功後，基於價位的考量與適當波長的取得不易，早期只限於太空農業的相關研究。超高亮度紅光與藍光LED的售價在1994年分別高達1美元與8美元1顆，在台灣尚無法小額採購。後續，隨著光電科技的進步，光量更增，價位更降與取得容易的結果，造成全球性應用超高亮度LED於作物栽培的研究正方興未艾。台灣光電產業界的急起直追到如今的產量執世界牛耳，其努力與實力令人感動。1998年2月在台灣的單價分別為10元台幣與40元台幣1顆；1999年8月已分別降至3元台幣與26元台幣1顆；2002年6月分別降至3元與9元台幣1顆；2004年初分別降

至2元與8元台幣1顆。

LED已被應用於許多植物光生理領域的研究或植物栽培上，例如藻類培養生物反應器、葉綠素合成研究、光型態發生及光合作用等研究上。在作物種類上許多作物或花卉已經被證實可成功的應用LED來栽培，包括有：萵苣、胡椒、胡瓜、小麥、菠菜、虎頭蘭、草莓、馬鈴薯、蝴蝶蘭、白鶴芋、彩色海芋及藻類等。其中，在藻類栽培上證實只需要紅光LED即可，但是對其他植物而言，除紅光外，藍光與遠紅光光量大小同時會影響生長及型態發生。不同紅、藍與遠紅光組合光源光譜也可以影響並控制某些植物病原菌的發生。

因為LED使用直流電源，因此同時具有光量、頻率與工作比可調整的特性，進而可產生出連續光源或間歇光源的變化，Lee和Palsson (1994)，Hans等(1996)與Ladislav等(1996)就使用LED所產生的間歇光源來促進藻類的生長與生產；Iwanami等(1992)透過使用LED補充紅光或遠紅光光量來改變光質，進而討論控制馬鈴薯組培苗莖長度與生長狀況；Yanagi等(1996)使用紅光與藍光LED來探討光質與光量對萵苣生長與光型態發生之影響，Nhut等(2000, 2001)使用LED作為草莓與白鶴芋組培苗生長的人工光源可提高其在馴化階段之存活率與用電效率。

以下介紹本實驗室近五年來的相關研究成果：

使用紅光與藍光高亮度LED建立可調

整光量、光質、給光頻率(Frequency)與工作比(Duty Ratio)的人工光源，可視需要提供連續無閃爍的光或高頻閃爍的光。在不影響植物生長速率下，工作比可調進一步提供省電空間。此設備可作為植物光生理研究者的研究工具。

使用高頻閃爍的紅、藍光LED為光源，發現可在不提高耗電成本下提高馬鈴薯組培苗的生長速率。使用不閃爍的紅、藍光LED栽培蝴蝶蘭種苗，發現與螢光燈下栽培除了葉長之外並無明顯差異，證實LED可用來栽培蝴蝶蘭組培苗，亦適用於做為光型態發生基礎研究之人工光源(圖2)。



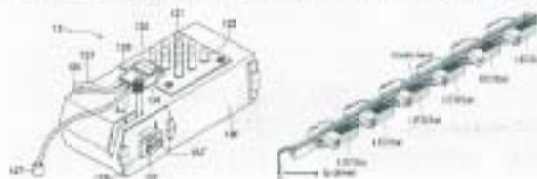
使用不閃爍的紅、藍光LED為光源，探討在總累計光量不變(5.67 mol/m^2 ，紅光總計佔40%，藍光總計佔60%)與光週期不變(16/8 hrs 明期/暗期)的情況下，同時給紅、藍光(各1單位光量，各16小時)與交替給紅、藍光(各2單位光量，各8小時)時，對馬鈴薯組培苗生長的影響。結果顯示同時提供紅、藍光者有最高生長速

率；總累計光量相同時，低光量、長光照時間優於高光量、短光照時間；當給藍光時間(譬如8 hrs)短於給紅光時間(譬如16 hrs)時，最佳的給光時機是一開始就同時提供紅光與藍光。

藍光參與了彩色海芋組培苗株高與葉綠素發育的調控，使用全紅光LED來進行彩色海芋組培苗子瓶階段的栽培是可行的，同時也證實並不會影響後續的球莖形成。以成本考量，使用交流電來驅動LED是優於透過驅動器使用直流電者。如果選擇以直流電來驅動LED，40 Hz可以比自然或驅動器產生的60Hz更省電。結果顯示使用交流供電的全紅光LED來進行彩色海芋組培苗栽培是可行的，與使用螢光燈管或是紅光+藍光LED為光源的比較，在後續於溫室內球莖形成階段的栽培上並沒有顯著的差異。

二、燈具改良與儀器研發

除了在植物生理與植物栽培應用上的研究外，許多學者也投入LED光源本身特性及燈具改良與研發上的研究。Takita等(1996)發展LED光源光量與光譜分佈模擬模式，將LED當作點光源並配合光量倒平方法則來建立模式，協助預測及計算使用LED為光源時栽培平面上之光量與光質(B/



R Ratio) 分佈狀況。

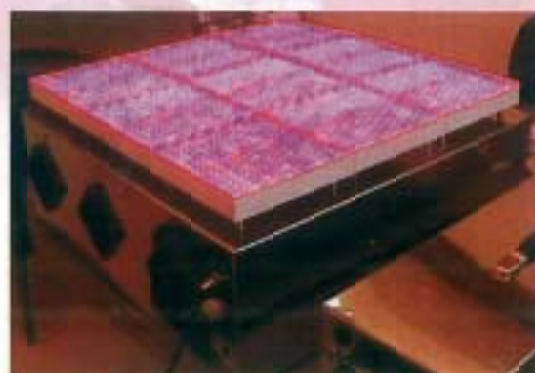
Okamoto等(1996)發展使用LED為光源的栽培盒，方法是將LED封裝在培養盒(11 cm x 11cm x 14 cm)的蓋子上當作光源，總共使用9顆藍光LED與36顆紅光LED(此部份另稱為LEDCAP)，並將此設備命名為UNIPACK，之後許多類似設備但命名不同的產品也相繼由相同團隊研發完成，包括有LED PACK, BICLED及COMPACT等。一套使用LED為光源，適合教學與植物光生理研究的設備—Photo-Manipulation-Boxes也在2000年間世(Williams, 2000)，並應用此設備進行一系列莖莖種子發芽光生理之研究。除上述偏重研究用途之設備外，市面上也已經開始販售使用LED為光源並搭配有人機操作介面的植物生長箱(Ryusho Industrial Co., Japan; Quantum device, USA; 金合田, 中華民國)。上述設備都同時搭配有紅光(660nm)、藍光(470nm)與遠紅光(735nm)三種光譜波段之LED光源，而這符合大部分植物在光生理與光合作用中光敏素與葉綠色之吸收光譜，這種選

擇光譜的特性是傳統人工光源所無法達成的。

應用高等植物葉片內葉綠素a, b對不同光譜有不同吸收能力的特性，亦有廠商研發葉綠素偵測儀器(Misolta SPAD 502, Spectrum Technologies, U.S.A.)，該儀器內主要使用650與940nm波長的紅光與紅外光LED，量測前者的穿透率可間接求出吸收率，650nm的波長極接近葉綠素a與b吸收光譜的兩個峰值之一；量測後者的穿透率則可作為校正基準。然而，此設備無法區分葉綠素a, b為其缺失。陰性植物葉綠素a/b比值通常低於3，陽性植物則通常高於3(Chang and Troughton, 1972)，Dale和Causton(1992)認為葉綠素a/b比值可作為植物適應光環境的指標。目前尚無可分別量測葉綠素a與b或量測葉綠素a/b比值的儀器。

本實驗室使用LED為光源發展一套適用於組培苗與種苗栽培的光源設備LEDSet，主要包含4顆高亮度藍光LED及9顆高亮度紅光LED、一個驅動器、一個控制器及一支由市售一公尺長電軌改良的裝置。透過控制器可調整光量、光質、頻率與工作比。此控制設備與光源已獲得中華民國、中國與美國之專利(圖3)，後續做了一些改良並完成技術轉移，相通技術亦擴展至植物生長箱新型光源之設計與製造。圖4與5所示為國產的植物生長箱內使用的LED光盤，採模組化設計，單一模組如圖4所示，九塊模組可組合成更大的光盤(圖5)





。圖6所示為配備LED光盤百分百由國人自製的植物生長箱。

LED 做為作物栽培的光源，可提供高度的彈性，譬如：LED 可提供各種色光，常用的為藍光(450nm)，紅光(660nm)與紅外光(730nm)。LED具光量可調的特性允許模擬一天中太陽光強度的變化；給光頻率與工作比可調的特性，允許提供高頻間歇給光模式，有利於探討光合作用中光反應與暗反應的相關機制，並允許進一步節省用電；紅光配合藍光LED 的使用能提供一適當的光質；紅光與紅外光LED 搭配可探討兩者對光型態發生的影響，進而了解光敏素的機制。

結論

LED 光源在目前多屬研究機構所用，然而，隨著科技的進步，LED 光度的增加與因量產、競爭與達成投資回收所造成價格的降低，LED 取代日光燈光源應用在量產規模的組培苗栽培及作物栽培上已是指日可待，只用紅光LED 且採用交流供電的

給光模式可用於栽培彩色海芋組培苗的研究發現，在降低成本上跨了一大步，使得現階段直接應用LED 於組培苗栽培已具經濟上的吸引力。然而，不是所有作物都適用此種給光模式。

LED 在生物產業範圍內的應用甚廣，除了在環控農業領域取代傳統人工光源使用之外，在作物栽培模式與儀器研發上都有發展空間。紅光與紅外光可抗發炎，促進傷口癒合，此特性應用於植物嫁接組織的快速恢復可能具發展潛力；不同光譜應用於植物組織培養癒傷組織的誘導分化，組培苗出瓶時機與出瓶後馴化存活機率；高頻閃爍給光可促進組培苗生長並兼具省電效果應該頗具商業價值；凡此種種都可做進一步探討。現階段使用儀器只能量測葉片內葉綠素整體的含量，無法區分葉綠素a或b，更無法求出葉綠素a/b 比值，後者可做為植物適應光環境的指標，可透過不同波長的LED進一步研發相關儀器，

