

# 從植物之光週期看發光二極體在農業生產上之應用潛力

楊純明\*、李裕娟

行政院農委會農業試驗所作物組

## 摘要

植物的春化作用意指植物需要經過曝露於冬季的低溫後才能在隨後的春季中開花，而存在於植物、動物乃至於真菌類生物的光週期現象，則泰半相關於發育反應。透過春化作用，自然界中的植物即可在漸暖且較合適的春天裡進入生殖生長期，進行果實或種子的生產來完成一世代循環。而光週期的形成與光週期反應亦為生物長期演化的結果，藉由日長變化作為發育階段歷程演進的適當指標，使得生物能夠持續往前生長與發育，歷經生活史的各個發育階段終於完成一個世代。發光二極體(LED)可以作為大自然中太陽光的替代光源，從農作栽培的觀點確實在縮短生育期、調節生產期、提高產量或提升品質等方面具有可行性，值得投入探討及系統研發。

**關鍵詞：**光週期現象、春化作用、發光二極體、農業生產、植物工廠。

## Applicability of Light-Emitting Diode on Agricultural Production Processes from Viewpoint of Photoperiod in Plants

Chwen-Ming Yang\* and Yuh-Jyuan Lee

Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

---

\* 通信作者, cmyang@tari.gov.tw  
作物、環境與生物資訊 6:192-200 (2009)  
Crop, Environment & Bioinformatics 6:192-200 (2009)  
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

## ABSTRACT

The vernalization requirement has been found existed in plants through which plants acquire the competence to flower in the spring after experiencing a period of low temperature in winter. Photoperiodism (or photoperiodicity) occurs in plants, animals and even fungi, and is the physiological reaction for these organisms to changes of daylength, mostly the developmental responses. Plants may initiate or accelerate the flowering process after the vernalization and then produce seeds in better environmental conditions to complete their life cycle. The response to photoperiod has evolved because daylength is a reliable indicator of the time of the year that enables developmental events proceeding as scheduled to fulfill a generation. The light-emitting diode (LED) can be used as a substitute of solar radiation under structure or in field, providing radiation and energy for the growth, development and reproduction of a plant. Many studies have proved the feasibility and applicability of using LED to shorten growth duration, adjust production timing, increase yield and promote quality of harvested products. With such a multifunctional application advantages, researches on establishing systems incorporating LED as a light source are greatly encouraged.

**Key words:** Photoperiodism, Vernalization, Light-emitting diode (LED), Agricultural Production, Plant factory.

## 前言

非如春化作用(vernalization)目前僅發現於植物，意指植物需曝露於冬季的低溫後才能在隨後的春季中開花，光週期現象(photoperiodism)則存在於植物、動物乃至於真菌類生物，且泰半相關於發育反應。許

多溫帶植物具有春化需求，必須經過寒冷冬天的低溫刺激以啟動或促進開花流程，抑或如許多果樹需要低溫來打破芽體休眠以達到開花階段。透過此一春化作用，自然界中的植物即可在漸暖的春天裡進入生殖生長期，在合適的氣象環境中進行果實或種子的生產，完成一世代循環。而光週期的形成亦為生物長期演化的結果，由於日長(daylength)的變化忠實地代表每一年的時間週期進展，可以作為發育階段歷程演進的適當指標，因此光週期(photoperiod)即被生物選擇作為進入特定環境狀況的門檻。諸如開花、分枝(株)、出芽等發育事件，都是由光週期誘導的植物發育過程(developmental processes)。經深入探究其可能的分子機制發現，這些由光週期所控制的發育反應具有共同的部分，卻也另有差異明顯的調節機制相配合(Jackson 2009)。換言之，不同的發育事件各有其特定的光週期誘導，蘊涵不同的運轉機制來完成發育進展。

當植物被栽種於非原生地的光週期環境時，將可能導致其生長發育的改變、時序的錯亂，而偏離幅度愈高則變化範圍就愈大。Yamazaki (1947)觀察蕎麥在不同日期栽培後的生長與產量表現後，認為其中必有控制因素存在於栽植環境，隨後又有許多相關的研究報導(Uehara and Tahuchi 1955, Nagatomo 1961, Sugawara 1973)。Inoue *et al.* (1998)研究指出，日長乃影響蕎麥受粉花朵與成熟種子數目的主要因子。Michiyama *et al.* (2003)的試驗結果進一步顯示，當被種植於長日照(15-16 h)季節時，蕎麥植株將提高第一朵花出現節位、延遲抽穗、減緩開花速率、增加莖節數與花叢之花朵數及延長主桿之伸長期，並降低著實率(seed-setting ratio)與種子數。而不同的蕎麥品種具有不等的臨界日長，且日長效應在抽穗前、後又有

不同的作用(Sugawara 1958, Hagiwara *et al.* 1998, Michiyama *et al.* 2003)，因此栽植於合適的生長季節是最佳的栽培策略。這是彰顯「適地適時適作」重要性的一標準案例，也反應了光週期對植物生育的深遠影響，農業操作者欲獲得正常的農作生產時不可不慎。

自然界中亦有植物的發育進展同時受到春化作用及光週期現象的雙重效應，如小麥的抽穗(或指抽穗前的發育速率)即必須同時經歷春化作用及光週期現象，才會有所感應(Miralles and Slafer 1999)。設若在非自然環境下，則可能另外受到其他因素影響。例如在連續光照與定溫環境，小麥的抽穗日期將受到不同光輻射波段的不等影響，尤以輻射光譜(250-1,000 nm)中的綠光(500-550 nm)及紅光(600-700 nm)對抽穗的促進效果最為顯著(Kasajima *et al.* 2007)。事實上，太陽光輻射的波長差異也會影響光形態反應(photomorphogenic responses)的表現，譬如種子發芽(seed germination)及植株向光性(phototropism)等皆是眾所周知光質有關的發育行為，甚至開花即可因為特定光質對光敏素(phytochrome)的刺激而受到促進(Vince-Prue 1983, Fitter and Hay 2002)。此外，在阿拉伯芥(*Arabidopsis*)的研究也發現，藍光可以調節其花芽生成及外觀形態(Eskins 1992)，顯見阿拉伯芥存在光週期以外另一種可由光質調節開花時間的生理路徑(Cerdan and Chory 2003)。

回顧目前在植物的研究結果，顯示自然環境中的溫度、光週期及光質等因子在植物生長發育上扮演重要角色，吾人若能充分瞭解其來龍去脈即可利用這些現象於作物栽培管理用途。本文藉由引介光週期的意涵，帶入現代化科技光電產品「發光二極體(LED)」的簡介，期以延廣其在農業生產上的多元利用，助益於農業與現代化科技的結合和應用。

## 光週期的重要性

所謂「光週期」係指光(明)期(即白天; daylength or daytime)與暗期(即夜晚; nightlength or nighttime)在一天 24 小時中的配置(比例),因自然界中的明暗變化與循環而發現。在緯度為零度的赤道地帶,光週期為固定的 12 小時白天與 12 小時的夜晚,惟因地球長軸往太陽方向的傾斜,使日夜的時間比例隨著緯度的升高(即分往南、北兩極行進)而改變,愈近兩極則比例愈趨極端。在南、北兩極,一年中的某段期間,將會出現 24 小時永晝或 24 小時恆夜。由於地球環繞著太陽公轉,使得赤道以外的地區(緯度)之明暗比例在一年當中隨著時間改變,夏季的白天較長(尤其夏至)而冬季的白天較短(尤其冬至),然而大致上光週期的周年循環每年皆相同;如北半球的上半日長由短漸長(即由短日變為長日),夏至為 6 月 20 或 21 日,下半年日長由長縮短(即由長日變為短日),冬至為 12 月 21 或 22 日。也因為光週期有固定的周年循環,成為一項可靠的時間與季節指標,相較於溫度的季節變化更為穩定而值得信賴。

在植物界中隨處可見植物針對光週期現象作出的對應反應。以植物的開花為例,植物為了繁衍後代,乃演化出依據光週期指標而開花的機制。當同一種或同一屬植物在相同期間一起開花時,由於受粉機會的大幅增加,提升了著實率(稔實率),進而提高種子生產數量。再者,因為特定光週期的到來及預定進入一新環境中,植物乃會自身調節其生理代謝和外觀形態,以準備適應每一年此時期新情境的變化。再以北半球的季節變化為例,秋季日長逐漸縮短提供的訊號(cue),提示植物必須準備妥當以進入低溫的冬季。植物此時可能開始進行低溫健化(cold hardiness)、預備芽體休眠或調整生理代謝等

作為,裝備自身來應付即將到來的酷寒冬季與短日長環境。有些低等植物可能經短日誘導在早春即開花結實,在高等植物抽出新葉建構完成植冠之前便已建立新的植體,強先取得競爭優勢(Thomas and Vince-Prue 1997)。

對植物或農作物而言,光週期作用的重要性在於跨越過此一情境之後,植(作)物將自身調節(self-coordination)產生新的發育階段,同時也確保可以在此一特定且合適的新環境中完成此一發育事件。因為一年當中某一特定光週期的發生或降(來)臨,即表示一新周遭環境的到來,如此便可提供有利的生育條件讓植物能夠有機會完成新的發育進展。這樣的情境循環不斷地出現與重複,植物於是能夠持續通過新的情境而往前生長與發育,歷經生活史的各個發育階段,終於完成一個世代。如此情節,脆弱的植物後代幼株才能夠平安渡過逆境或困境,獲得機會存活於難關之後,逐漸地一步一步成長。從另一方面來說,光週期是一種物競天擇的關卡,可以演化出跨越門檻機制者才能夠幸運的生存下來。植物必須產生感應(或偵測)光週期的機制,耐受光週期前後的顯著差異及潛在逆(困)境,克服生理代謝的轉換,具備一系列機能來適應新情境與新環境才能存活。

## 植物光週期的類型

大致上可以將存在於植物的光週期劃分為三種主要類型,分別為(1)短日植物(short-day plants)、(2)長日植物(long-day plants)及(3)中性日長植物(day-neutral plants)。短日植物可感應短日光週期,即當光週期縮短至某一臨界日長(critical daylength; CDL)時,短日植物將會感應並誘導出因應的光週期反應。長日植物可感應長

日光週期，即當光週期延長至某一臨界日常時，長植物將會感應並誘導出因應的光週期反應。至於中性日長植物，則對日長變化並無感應亦無特別反應。但是，短日植物感應的短日光週期未必小於 12 小時日長，而長日植物感應的長日光週期未必大於 12 小時日長，切勿混淆短日光週期及長日光週期代表的意涵。

因此，臨界日長為啟動感應機制的鑰匙，從此發動一系列相關機制與作用使得植物得以因應新情境與新環境。不同種植物、同一種植物之不同變型或不同植株，甚至同一植株在不同環境或年齡下，都可能會有不等的臨界日長，而所謂的臨界日長可能小於或大於 12 小時(Thomas and Vince-Prue 1997)。如上述提醒的短日植物與長日植物定義，重點在於臨界日長的超過或不足。例如，短日植物如 *Xanthium strumarium* 的臨界日長為 15.5 小時，因此日長少於 15.5 小時即可誘導光週期反應；長日植物如 *Lolium perenne* 及 *Lolium temulentum*，當日長大於 9 小時即可誘導出光週期反應(Thomas and Vince-Prue 1997)。必須要藉由臨界日長才能誘導出光週期反應之短日植物或長日植物，其光週期反應特別稱為強制型或義務型光週期反應(obligate photoperiod response)，而光週期反應可以由其他光週期誘引者則稱為功能型光週期反應(facultative photoperiod response)。具有誘引效果的光週期有時可能僅數十分鐘而已，由此可見植物似乎能夠計數時間，準確的反應光週期的長短變化(Borchert *et al.* 2005)。此一計數時間的功能其實非常重要，因為倘若未能準確感應光週期並做出適當的反應，將可能造成提前或延後光週期反應，導致無法收拾的災難發生。實際上植物確實存在內生的計時機制(endogenous time-keeping mechanism)，稱

為 24 小時週期時鐘(the circadian clock)。

光週期的形成或變化，可以是自然時序的光環境改變，也可以由調節周遭人工光源來誘引，但是都得植物生育已達可被誘導的發育階段。而且光輻射的強度、光質及光照時間長短均需滿足臨界門檻，並藉由光感應蛋白質「光敏素(phytochromes, red and near-infrared photoreceptors; 紅光及近紅外光光子接收者)」及「暗敏素(cryptochromes, blue light photoreceptors; 藍光光子接收者)」的媒介才行。多數植物及全部高等植物含有光敏素，暗敏素存在於植物和動物。少數植物另有向光素(phototropins)，一種感應紫外光(ultra-violet)及藍光的色素蛋白質，與植物的向光性有關。吾人由這些訊息與機制的瞭解，就可以利用人工光源(如 LED)於農業的生產管理，發揮人工光源的經濟利益。

### LED 光源照明

LED 是由半導體材料所製成之發光元件，在其兩個電極端子之間施加電壓並通入極小的電流，經由電子電洞之結合可將剩餘能量以光的形式激發釋出。因為具有體積小、壽命長、耗電量低等特性，LED 已普遍應用於 3C 產品(如指示器與顯示裝置)。目前 LED 是國內光電產業中最具競爭力的產品之一，再加上紅、綠、藍三原色 LED 的研發成功得以合成彩色(即真實顏色)，使得 LED 在產業的應用範圍大幅延廣。更由於生產良率日益提高，單位製造成本降低，LED 的需求和前景無可限量。

自從 LED 燈泡(具)問世以來，LED 光源照明在臺灣已逐漸普遍化與實用化，比較 LED 燈泡(具)與傳統白熾鎢絲燈泡，在同等亮度單位(lux)下前者較後者節省 40%或以上的電能。因此，近幾年來世界各先進國家莫

不積極扶植 LED 產業，並宣布節能減碳政策與措施，加強宣導 LED 技術於各應用領域及產業界的導入。目前從家庭照明、交通號誌、車輛、招牌到公共通道兩旁的路燈，LED 燈泡(具)已漸被民眾接受與採用(近日尤以炫爛的 LED 路燈最令人驚艷)，不久將來或許會成為戶內與戶外照明的主流。

在路燈照明方面，傳統上採用的燈泡類型包括白熾鎢絲燈、高壓鈉燈、水銀燈、金屬鹵化物燈、螢光燈及節能燈等，其中最廣泛使用的高壓鈉燈具有高發光效率、節能、色溫適中等優點，使用壽命亦高，係主要交通幹道(如高速公路、快速道路)最常採用者。一般道路多使用四百瓦水銀路燈，其連續使用 12 小時將消耗約 5 度電量，耗電量較高。白熾鎢絲燈則使用於巷弄小道，價格雖然便宜、拆卸簡易，卻有耗電缺點。專家指出每年各式路燈之電費約 20 幾億，公共路燈主管機關每年都必須編列龐大預算支付電費，若能採用低耗電量路燈，將可節省大筆公帑。相較於上述傳統照明光源，LED 可在光源分散與節能方面提供更好的照明能力，比高壓鈉燈更具省電的優勢。LED 燈泡確實也改變了一般業界對於高品質光源使用上的認知，因為它提供了光源色彩的多樣選擇，加上使用壽命長、低電源消耗率及較低維護費用等優點，已成為現今最具有高商業價值的新興照明燈具。雖然 LED 燈泡與燈具的初始成本仍高，隨著硬體設備的開發與進展，價格終將獲得普遍接受，相信未來 LED 光源照明將有無窮應用潛力。

### LED 燈泡與光源之特色

目前 LED 光源可為單波段(長)或多波段，而依照發光波段又可概分為可見光 LED (波長 450~680 nm)與非可見光 LED (波長 850~1550 nm)兩大類。若以常用磊晶層材質

區分，可將之分為二元化合物(如 GaAs、GaSb、GaN 等)、三元化合物(如  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ 、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  等)、四元化合物(如  $\text{AlInGaP}$ 、 $\text{InAlGaAs}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  等)及 GaN 系化合物等四類別。現行較高亮(照)度之 LED 是指以四元化合物及 GaN 系化合物所製成者，提供較高亮度及光輻射強度，以後可能會陸續出現新的材質提供更理想的光源。若依其驅動電流大小，另可分為標準型(standard)、高電流型(high-current)與高功率型(high power)等三種。在可預見的未來 LED 燈泡將趨於規格化，在商品規格的規範下，將會有固定與穩定的波段、亮度及強度，使得無論照明、農業生產或其他產業利用目的都有可依循的標準。

LED 光源所放射出的光譜可依照需求端製造，其光輻射放射角度也隨光電技術的精進日益加大，而製造生產品質的提升更延長了燈泡(具)的使用壽命。若能再提高光電轉換效率，減少使用時產生的熱量，並降低生產成本，則 LED 光源的廣泛應用將指日可待。為符合農業生產上的應用需要，吾人可將不同波段與數量的 LED 燈泡組合成特殊(定)光源系統，放射出各種波段比例的光輻射，或不等光強度，甚至是不同頻率與相別的光照，以滿足特定的生長與發育需求。亦可以訂製各種放射角度的燈泡(具)，讓光輻射照射在限定的面積範圍，以免影響周遭其他植株。這些特色都是傳統燈泡與光源無法做到的，傳統光源大多為同時存在的多波段或連續性波段光譜，通常具有固定的輻射強度，部分燈泡(具)還會散發高熱。為了特定用途，又可組合 LED 與傳統光源，兼顧其他特殊考量。

### LED 光源利用於農業生產之背景

一如前述，農作物的生產會受到栽植環境的影響，雖然氣象與土壤為栽植地的原生

條件，藉由合適的栽培管理措施與策略，仍能調節或改善不良的栽植環境，扭轉不利的條件為正面的契機。其中，生育期間的氣象環境變異是大自然的正常現象，惟因為文明的進展和社會的都市化結果，使得農作物周遭的氣象環境開始遭受非自然的人為干擾。諸如都市熱島效應(heat island effect)帶來的異常高溫，樓房街道夜間照明造成的光害(illumination hazard)，以及溫室化氣體排放與石化能源消耗引發的全球溫暖化(global warming trend)等，種種人類活動直接或間接引起環境的非常態變化和負向變遷，已明顯衝擊農作物的生產。

其次，除了溫室效應(greenhouse effect)、環境污染(environmental pollution)與生態破壞(ecological deterioration)等環境危機之外，人類面臨最大的困境就是能源短缺(energy shortage)。撇開即將匱乏的石化燃料(fossil fuel)，人類各樣活動對電能(electrical power)的消耗亦十分驚人，因此節約能源與新能源開發乃吾人當前的重大課題，對人類未來的生活與生存關係重大。由於照明消耗大量能源，「照明節能」已成為民眾首要的節能守則，也是未來節能科技最重要的發展方向之一。檢視現行省電照明燈具及光源，逐漸實用化、低價化的發光二極體光源(照明)，對於資源有限的臺灣誠然是最有利的選擇。若能夠配合取之不絕的太陽能或其他低價天然能源，組合成更有效率的發電與供電系統，必將能大幅提升能源與照明的轉換效能，獲得最大的能源利用效益。

LED 光源利用於農業生產相關流程已近十年，從早期的光能補充角色於生長促進，屬於『量化』的作用，邁向生理代謝及發育進展屬於『質化』的功能，再進步至『植物工廠(plant factory)』全面性機能的多樣應用。因此，無論小至組織培養瓶罐空間或大

至設施與田間栽培，LED 燈泡(具)都可以提供所需的光輻射強度及品質，保證達到預期(定)的效果。成功的關鍵在於對影響農作物生長發育光環境的充分瞭解，以及牽涉其中各種運轉機制的完全理解，如此才能建構出最佳的光環境及相配合的其他條件。透過選用合適的 LED 光源於人工栽培管理系統，包括健康種苗的健化、蔬果的長期儲運、果實與花卉產期的調整、機能作物特殊成分的提高、作物履帶式生產等均可達成。

### 植(作)物對光的敏感性—合適 LED 的選擇

有研究指出，即使光亮度在 4–10 lux 的微明情況下(如清晨的曉光，黃昏的暮光)，植(作)物仍然會有反應。縱使利用燈罩來防止燈光的直射，卻未能抑制光源的漫射或反射，只是強度及影響的程度較小罷。夜晚時經由室內燈、路燈、招牌燈等光源直射，或者透過路面、牆面等反射於戶外(或農田)的光輻射，隨然光強度遠低於太陽光，野外(或農地)生長的植物(或作物)仍可感受額外的光照(餘光)。對於光敏感性較高的植(作)物(即合適短日照長夜照者)，夜間光照可能會破壞植(作)物原來的光敏感週期致使生長失序，發生諸如營養生長期延長、花期失調、花不結果、果不結實等情事。這些現象對於農作物而言，將會帶給農民和政府部門許多困擾及糾紛。

常態環境下每天的日長和夜長(以及兩者比例)控制著植物的生長、休眠、開花或結球等生育現象，運轉著所謂的光週期效應。這樣的節奏一旦被干擾或打破，即可能引發連串異常的生理生化作用，進而改變遺傳控制的生育流程或原有環境觸發的生育步驟。農業操作者在選用作物及品種，或者擬選擇 LED 作為替代光源時，如前述應當審慎考量

農作物對光的敏感性，包括光強度、光質與光照時間。

### 植(作)物對光的利用—LED 的應用價值

植物是地球上唯一能夠把輻射光‘能量’轉化為‘質量’的生物，植物的光合作用可說是地球上一切生命的基礎。目前所知光合作用需要波長範圍 400-700 nm 的光輻射能，但是光對植物的效應除了光合作用之外，還包括光週期的調節及光質(如紅、藍光比例及紅、遠紅外光比例等)對植物型態發生的影響。太陽光輻射電磁波中之三個區段的輻射對植物生長發育具有決定性的影響，除了可見光(400-700 nm; VIS)之外，尚有紫外線(100-400 nm; UV)和近紅外線(700-1050 nm; NIR)。除了光敏素、暗敏素及向光素，植物體內另存有針對此三波段的感(受)光系統，葉綠素系統吸收近於 660 nm 波長之光輻射能來進行光合作用，光敏素系統感應 660、730 nm 波長光輻射來控制許多形態有關的反應，而類胡蘿蔔素系統則接受 450 nm 波長以下光輻射刺激引起屈光性及高能量光形態作用(photomorphogenesis)。

LED 燈泡的特定光波長已經被利用於許多植物光生理學及農作物栽培上，文獻資料甚多，諸如藻類培養(Lee and Plasson 1994)、葉綠素生合成(Tripathy and Brown 1995)、光型態發生(Hoenecke *et al.* 1992, Goins *et al.* 1997)、光合作用(Tennessen *et al.* 1994, Tennessen *et al.* 1995)及作物栽培(Tripathy and Brown 1995, Yanagi and Okamoto 1996, Goins *et al.* 1997, Okamoto *et al.* 1997, Jao and Fang 2003)等。在任何種形式的應用之前，必先確定光環境的各種條件，再搭配其他氣象因子與營養元素的供給。

針對光環境的異常，吾人可分從「調適(adaptation)」及「緩解(mitigation)」二種人

為栽培管理方式予以解決“光害或光污染”問題。在調適作法上，可以選擇對光照反應較不明顯的作物品種，因此可在栽植之前篩檢各作物或選定作物各品種之感光性，擇一使用去適應無法改變的光環境。舉例言，臺灣地區栽植的短、中、晚熟型稻種一般多屬於短日照型植物，通常在稻株營養生長期間(稻種發芽至幼穗形成期)其生長環境的日照長度必須短於臨界日長，才會促使幼穗及花芽的形成。因此，夜間額外的光照具有縮短夜長效果，將可能延緩或延長其生長，甚至於造成抽穗及成熟期的拖延。除此之外，植物於白天利用光輻射能生產簡單光合產物，再於夜晚進行暗反應及二次反應，將白天的初級光合產物轉為生長發育所需的次級產物。若因夜間光照混淆時序，即可能發生異常生長發育現象，如路旁稻田所見之稻株生育遲緩及開花抽穗延長。

在緩解作法上，可藉由改變或更換光源組成，抑或施以反向作用光源照射來減輕、反饋或避免夜間光照的效應，以滿足或補償作物應有的暗期需求。此時 LED 光源就成了最佳的選擇，一方面避開作物感應的光波段，另一方面組合互補的光波段。即使是為了照明緣故不得不維持光源，亦可採用虛擬白光的組合光波段，達到照明及緩解光污染(或光害)雙贏目的。儘管如此，吾人可另由反向思考夜間或額外光照的正面功用，利用夜間光輻射引發的效應於作物生產之調節與生長之促進，或栽植合適的作物充分利用此一特定光環境等，正面應用於作物生產管理與規劃。

### 結語

雖然潛在原因多種，光照對植物的影響肇始於植物對光的敏感性，而光週期則在植物世代循環中扮演『承先啟後』的關鍵地位。

本文綜合前述背景說明，引介了 LED 光源在農業生產流程上的多元應用基礎。從農作栽培的觀點，LED 光照處理確實在縮短生育期、調節生產期、提高產量或提升品質等方面具有可行性，值得投入探討及系統研發。期盼本文的介紹，能夠助益於未來 LED 光源在農業生產上的研究與應用，為現代化農業開啟一扇明窗。

### 引用文獻

- Borchert R, SS Renner, Z Calle, D Navarrete, A Tye, L Gautier, R Spichiger R, P von Hildebrand (2005) Photoperiodic induction of synchronous flowering near the Equator. **Nature** 433:627-629.
- Cerdan PD, J Chory (2003) Regulation of flowering time by light quality. **Nature** 423:881-885.
- Dechaine JM, G Gardner, C Weinig (2009) Phytochromes differentially regulate seed germination responses to light quality and temperature cues during seed maturation. **Plant Cell Environ.** 32:1297-1309.
- Eskins K (1992) Light-quality effects on Arabidopsis development. Red, blue, and far-red regulation of flowering and morphology. **Physiol. Plant.** 86:439-444.
- Fitter AH, RKM Hay (2002) **Environmental Physiology of Plants.** p.42. Academic Press, London.
- Goins GD, NC Yorio, MM Sanwo, CS Brown (1997) Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. **J. Exp. Bot.** 48:1407-1413.
- Hagiwara M, N Inoue, T Matano (1998) Variability in the length of flower bud differentiation period of common buckwheat. **Fagopyrum** 15:55-64.
- Hoenecke ME, RJ Bula, TW Tibbitts (1992) Importance of 'blue' photon levels for lettuce seedlings grown under redlight-emitting diodes. **HortSci.** 27:427-30.
- Inoue N, M Hagiwara, HY Kim, T Matano (1998) A preliminary study of modeling seed production in common buckwheat. **Fagopyrum** 15:35-41.
- Jackson SD (2009) Plant responses to photoperiod. **New Phytol.** 181:517-531.
- Jao RC, W Fang (2003) An adjustable light source for photo-phyto related research and young plant production. **Appl. Eng. Agric.** 19:601-608.
- Kasajima S, N Inoue, R Mahmud, K Fujita, M Kato (2007) Effect of light quality on development rate of wheat under continuous light at a constant temperature. **Plant Prod. Sci.** 10:286-291.
- Lee CG, B Palsson (1994) High-density algal photobioreactors using light-emitting diodes. **Biotech. Bioeng.** 44:1161-1167.
- Michiyama H, M Arikuni, T Hirano, H Hayashi (2003) Influence of day length before and after the start of anthesis on the growth flowering and seed-setting in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). **Plant Prod. Sci.** 6:235-242.
- Miralles DJ, GA Slafer (1999) Wheat Development. p.13-43. In: **Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination.** EH Satorre, GA Slafer (eds.) Food Products Press, New York.
- Nagatomo T (1961) Studies on physiology of reproduction and some cases of inheritance in buckwheat. (in Japanese with English summary) **Report of Breeding Science Laboratory, Faculty of Agriculture, Miyazaki Univ.** 1:1-212.
- Okamoto K, T Yanagi, S Kondo (1997) Growth and morphogenesis of lettuce seedlings raised under different combinations of red and blue light. **Acta Hort.** 435:149-157.
- Sugawara K (1958) On the injury of buckwheat pistil. Retardation of pistil growth as influenced by day-length. (in Japanese with English summary) **Proc. Crop Sci. Soc. Jpn.** 26:269-270.
- Sugawara K (1973) **Studies on Buckwheat.** (in Japanese) p.1-96. Koryoshuppan, Morioka.
- Tennessen DJ, EL Slingsaas, TD Sharkey (1994)



- Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. **Photosynth. Res.** 39: 85-92.
- Tennessen DJ, RJ Bula, TD Sharkey (1995) Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation. **Photosynth. Res.** 44:261-269.
- Thomas B, D Vince-Prue (1997) **Photoperiodism in Plants**. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, London. 428pp.
- Tripathy BC, CS Brown (1995) Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light. **Plant Physiol.** 107: 407-411.
- Uehara S, R Tahuchi (1955) Influences of different daylengths upon the growth and reproduction of the buckwheat grown in different seasons. (in Japanese with English summary) **Bull. Fac. Text. Series, Shinshu Univ.** 5:31-35.
- Vince-Prue D (1983) Photomorphogenesis and flowering. p.457-490. *In: Encyclopedia of Plant Physiology*. New Series. WJ Shrophire, H Mohr (eds.) Springer-Verlag, Berlin.
- Yamazaki Y (1947) Buckwheat. (in Japanese) **Nogyo.** 778:16-32.
- Yanagi T, K Okamoto, S Takita (1996) Effects of blue and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. **Acta Hort.** 440:117-122.