

· 专题论坛 ·

LED照明对植物体内功能性化学物质积累的影响

林魁, 徐永*

福建农林大学光电子农业工程与技术研究中心, 福州 350002

摘要 LED照明对植物生长发育作用的研究已进行了多年, 但之前学者们多从植物形态学角度进行研究。近年来, 该项研究已逐步转向LED照明对植物体内功能性化学物质积累的影响这一领域。该文就这方面研究的最新进展进行了评述, 并指出了目前存在的问题及今后研究的思路和可能方向, 以供生产和研究部门科研人员参考。

关键词 LED照明, 叶绿素, 类胡萝卜素, 花青素, 精油

林魁, 徐永 (2015). LED照明对植物体内功能性化学物质积累的影响. 植物学报 50, 263–271.

在各种环境因素中, 光是影响植物生长发育和功能性化学物质积累的最重要因素之一(Kopsell and Kopsell, 2008; Pérez-Balibrea et al., 2008)。植物的生长发育和生理指标都受到光的重要影响(McNellis and Deng, 1995)。光对高等植物的影响主要表现在以下2方面: (1) 提供植物光合作用所需的能量; (2) 通过接收光信号来调节植物自身的生长、分化和代谢(Wang et al., 2001)。不同的光质和光强对植物的影响也不相同。1990年, 发光二极管(light-emitting diode, LED)第1次被用于植物的研究(Bula et al., 1991), 并被证明是一种比传统光源更为有效的替代光源(Morrow, 2008)。由于其具备低功耗、窄光谱和低发热等优点(Massa et al., 2008; Morrow, 2008; Watanabe, 2011; Goto, 2012), 2000年后, LED作为一种更高效的光源被迅速引入植物工厂。通过调节LED光谱的分布来控制植物开花和叶片形态形成的方法不仅简单, 而且还可促进植物中功能性化学物质浓度的增加(Goto, 2012)。

从历史上看, LED对植物影响的研究最初是从植物形态学上开始的, 国内研究人员在此方面也做了很多有价值的工作。近年来, 国内外的科研人员开始将研究目标转向LED对植物体内功能性化学物质积累的影响, 并在多个领域取得了较大的进展。该方面的研究对于在人工光源的照射下生产出具有可控输出的各种功能性和药用性植物都具有非常重要的意义。

本文就有关的最新研究成果进行了评述, 以供生产和研究部门的科研人员参考, 同时也期待我国在这方面的研究能够取得更多更好的成果。

1 LED及其在植物照明中的应用

LED是半导体二极管的一种特殊类型。根据所用半导体材料的不同, LED发出光的波长可以从紫外线C (~250 nm)到红外线(~1 000 nm)广泛的区间范围(Bourget, 2008), 并且每个LED发出光的波长范围可以很窄。因而, 它是一种真正具有频谱控制能力的且非常有效的植物照明光源。

与金属卤化物光源、荧光灯和高压钠灯不同, LED所用的固态照明系统具有一些非常独特的优势。它们不仅重量轻、体积小、使用寿命长, 而且具有波长和光谱组成可控、带宽窄、发光面温度低、发热小、亮度高、辐射低及效率高等优点(Steranka et al., 2002; Narendran and Gu, 2005; Spiazzi et al., 2005; Tamulaitis et al., 2005; Cheng et al., 2006; Cheng and Cheng, 2006; Bourget, 2008; Massa et al., 2008; Morrow, 2008; Jang et al., 2012, 2014a, 2014b; Liu et al., 2014; Rodríguez-Vidal et al., 2014; Wu et al., 2014)。LED的这些优势, 尤其是其光谱的可调控性、技术的不断创新和成熟以及使用量的日益增加(因而价格日益降低), 使其成为植物照明

收稿日期: 2014-05-05; 接受日期: 2014-08-06

基金项目: 福建省科技重大专项“现代智能设施农业系统关键技术与示范”(No.2014NZ0002-2)

* 通讯作者。E-mail: emailyxu@gmail.com

光源的首选。与此同时,LED的发光效率也在不断提高。例如,2006年蓝色LED灯的发光效率只有11%,到2011年,达到了49% (Mitchell et al., 2012)。随着技术的不断进步和工艺水平的不断提高,未来LED的光谱控制将会更加灵活,其制造和使用成本也会越来越低,其优越性也将得到更充分的体现(Massa et al., 2008; Morrow, 2008; Yeh and Chung, 2009; Vänninen et al., 2010)。

上述诸多优点也使得LED正逐渐取代传统照明光源的地位(Jang et al., 2014a, 2014b),并被广泛地用于各领域,如显示器、装饰、背景照明、通信、指示牌、普通照明和城市夜景照明等(Tsao, 2004; Narendran and Gu, 2005; Shur and Zukauskas, 2005; Cheng and Cheng, 2006; Brodrick, 2007; Fu et al., 2009; Juntunen et al., 2014; Ning et al., 2014)。

在植物照明方面,LED能够将合适的光波范围匹配到植物的光接收器,并影响植物的形态和组成成分(Morrow, 2008)。对于在受控环境下培养的植物,LED的优越性也使之成为首选光源(Folta et al., 2005; Ilieva et al., 2010)。在植物组织培养方面,LED的使用已取得了卓越的成就(Gupta and Jatothu, 2013)。

由于LED照明对植物形态学方面的影响已有大量的研究(Bula et al., 1991; Folta et al., 2005; Massa et al., 2008; Yeh and Chung, 2009; Ilieva et al., 2010; Johkan et al., 2010; Watanabe, 2011; Jeong et al., 2012; Cope and Bugbee, 2013; Gupta and Jatothu, 2013; Kobayashi et al., 2013),本文将重点评述LED照明对植物体内功能性化学物质积累的作用,以期引起国内同行的关注。

2 LED对植物体内功能性化学物质积累的影响

不同光强和光质的LED照明对植物体内功能性化学物质积累的影响表现在多个方面。近年来,国内外的科研人员主要研究了用不同光强和光质的LED照射植物对其体内功能性化学物质积累的影响,并通过实验观察不同条件下植物体内功能性化学物质的积累情况来研究LED对植物体内生理活性的影响。所观察和检测的功能性化学物质的种类很多,包括多酚

类、各种类胡萝卜素、叶绿素、花青素、精油及各种其它酸苷等。下文将对这些方面的研究进展进行评述。

2.1 多酚类

酚类化合物被认为具有直接的抗氧化功能,或者具有促进人体内其它抗氧化性化合物产生的作用(Connor et al., 2005)。许多研究表明,植物多酚有助于人类健康,具有延缓机体衰老、预防心血管疾病和防癌等功效(黄海智等, 2011)。Johkan等(2010)用不同光谱成分的LED灯(主要包括蓝光、红光和蓝光与红光3种光组合)照射红叶生菜植株,经过不同光质与光强的配比处理后,在蓝色LED光照处理播种17天后,发现生菜的多酚含量和总抗氧化能力高于用荧光灯培养的植株。该实验表明在蓝光下培育幼苗对种植后的生菜植株多酚含量的积累具有促进作用。Jeong等(2012)将菊花放于补充的蓝光、绿光、红光和白光LED下,以研究LED对其叶多酚物质合成的影响。实验结果表明,菊花叶中的木犀草素-7-o-葡萄糖苷在绿光照射下浓度达到最大,柚(苷)配基-7-o-葡萄糖苷和芹菜苷配基-7-o-葡萄糖苷在红光下浓度最大,表明菊花中多酚物质的合成受光质的影响。

2.2 类胡萝卜素

植物中花和果实所呈现出的、用于吸引传粉者并进行种子传播的颜色(黄色、橙色和红色)由类胡萝卜素决定(Howitt and Pogson, 2006)。类胡萝卜素在植物的生理过程中起着重要作用,诸如辅助植物在光合作用过程中捕获光,在光氧化过程中起光保护作用及稳定脂膜等(Frank and Cogdell, 1996; Havaux, 1998; Ledford and Niyogi, 2005)。类胡萝卜素又是人体所必需的营养物质,是一种影响身体健康的微量营养素(Mactier and Weaver, 2005)。研究表明,蔬菜水果中所富含的类胡萝卜素对于癌症、心血管病、黄斑变性、白内障等疾病以及由紫外线导致的皮肤损伤等都能起到很好的辅助治疗作用(Ziegler, 1991; Gaziano and Henneckens, 1993; Mayne, 1996; Giovannucci, 1999)。新鲜蔬果中类胡萝卜素含量的增加可以提高其营养价值(Keyhaninejad et al., 2012)。

因此,如何增加植物中类胡萝卜素的含量就成了人们感兴趣的研究内容。Li和Kubota (2009)用紫外线

A、蓝光、绿光、红光和远红光LED照明灯管来培育幼叶生菜,实验结果表明,与在白色光控制下的植物相比,经补充的蓝光处理后,类胡萝卜素增加了12%;经补充的红光作用后,酚类浓度增加了6%。实验表明,补充蓝光能增加类胡萝卜素的浓度,补充红光能增加酚类物质的浓度。受控光质在使用合适的蓝光或红光作为白光的补充光源后,可能会提高植物功能性化学物质的浓度并增加其干重。

Tuan等(2013)研究了影响类胡萝卜素合成的最佳光谱波段,他们将苦蕒芽菜(*Fagopyrum tataricum*)在白光、蓝光和红光LED的环境中培养,经过一段时间后,发现总类胡萝卜素积累最丰富的是白光照射下的芽菜实验组,这些芽菜所积累的总类胡萝卜素比在蓝光和红光中培养的实验组更多。另有实验表明,咖啡中的类胡萝卜素在蓝光照射下也会有所增加(Ramvalho et al., 2002)。

此外,叶黄素和 β -胡萝卜素是生菜中2种主要的类胡萝卜素(Hart and Scott, 1995)。叶黄素可以防止因年龄引起的黄褐斑变性等问题(Goto, 2012)。Li等(2011)在不同光质条件下测试了4个菠菜品种,结果表明,在 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光合有效量子辐射下,运用蓝色LED灯可以显著提高菠菜干重及其鲜重中 β -胡萝卜素和叶黄素的浓度。将豌豆(*Pisum sativum*)苗进行类似的培养后,发现在红色LED下培养的豌豆苗,其内部的 β -胡萝卜素成分比在其它光质下培养的都高(Wu et al., 2007)。甘蓝(*Brassica oleracea*)中的叶黄素在波长为640 nm时达到最大, β -胡萝卜素在440 nm时浓度达到最大(Lefsrud et al., 2008)。

2.3 叶绿素

叶绿素能够捕捉光并能将其能量重新导向,这一点对于光合生物是必不可少的(Stenbaek and Jensen, 2010),并且叶绿素合成一般只能通过依赖光的途径进行(季宏伟等, 2001)。Kobayashi等(2013)研究了不同光源对水培生菜(*Lactuca sativa*)中叶绿素合成的影响。他们将这些生菜放在3种不同的光质(蓝光LED、红光LED和荧光灯)中培养,结果发现生菜叶中叶绿素含量在蓝光和荧光灯照射下高于红光。Galdiano等(2012)在培养基中放入不同浓度的活性炭并在2种不同光谱下培育卡特兰苗,结果表明,叶绿素的总含量、叶绿素a和类胡萝卜素的浓度在白光处理

下更高,而红光可以极大地促进叶绿素b的合成。若用3种不同比重的蓝色LED来研究光对生长中的萝卜(*Raphanus sativus*)、大豆(*Glycine max*)和小麦(*Triticum aestivum*)的生物效应就会发现,随着蓝光比重的增加,每单位面积的叶绿素浓度也会随之增加(Cope and Bugbee, 2013)。

2.4 花青素

花青素苷是决定被子植物花、果实和种皮等颜色的重要色素之一(胡可等, 2010)。在具有抗氧化作用的物质中,总抗氧化能力越高,越有利于降低癌症的威胁(Pyo et al., 2004)。类黄酮和花青素是一组黄酮化合物,具有很好的抗氧化作用(Duan et al., 2007)。Ebisa等(2008)和Kojima等(2010)均通过实验发现蓝光可以诱导类黄酮和花青素的积累。Giliberto等(2005)也证实了蓝光可以增加番茄(*Solanum lycopersicum*)中花青素的浓度。在蔓越莓中,红光对其体内花青素的积累更为有效(Zhou and Singh, 2002)。相反,降低红光和远红光的比率,或者提高远红光对红光的比率,很多种类的植物均会降低其内部花青素的积累(Yanovsky et al., 1998; Ramvalho et al., 2002; Alokam et al., 2002)。Goto等(2012)使用红色和蓝色LED光研究了二者在相同光合有效量子辐射下,对红叶生菜花青素的积累作用。实验结果表明,花青素的浓度随着蓝光比重的增加而增加,说明蓝光照射能够有效促进红叶生菜功能性化学物质的合成。此外,草莓(*Fragaria ananassa*)中的花青素浓度在蓝光处理下也会显著增加,但红光对其影响相对较小(Kurata et al., 2000)。

紫背天葵(*Gynura bicolor*)富含铁、锰、维生素A和类黄酮,具有很高的营养价值。研究表明,紫背天葵相比其它蔬菜具有更高的抗氧化性(Maeda, 2006),因此常被用于食疗和抗人类HL60白血病细胞并诱导其活性凋亡(Hayashi et al., 2002)。Ren等(2014)将紫背天葵放于不同浓度的二氧化碳和LED光质条件下,以研究其抗氧化剂在二氧化碳和光合成代谢反应中的变化。实验结果表明,在常态及更高浓度(约3倍于常态)的二氧化碳下,增强蓝光有利于花青素和总黄酮量的积累,同时提取物的总抗氧化能力也会随之增加。

与维生素C和维生素E相比,绿原酸具有更高的抗氧化能力(Rice-Evans et al., 1997)。实验表明蓝光

同样可以增加绿原酸的浓度(Awada et al., 2001)。Goto等(2012)的实验也表明将紫外线A增加到3.0 W, 紫外线B增加到1.5 W后, 黄麻属叶子中的绿原酸浓度也将会增加; 而且, 绿原酸浓度随着紫外线B增加的量比紫外线A多。

2.5 精油

薄荷油常被用作食物, 但因其具有镇痛、抗菌和冷却作用, 又被广泛运用于调料和医药领域(Hajlaoui et al., 2009)。Hikosaka等(2010)研究了紫外线对日本薄荷(*Mentha arvensis* var. *piperascens*)的影响。他们用白光、紫外线A和紫外线B荧光灯3种不同的混合光照射植物。与单纯在白光照射条件下培养的植株相比, 日本薄荷在白光混合紫外线B以及白光混合紫外A、紫外B的条件下, *l*-薄荷醇和柠檬烯的浓度以及叶片的抗氧化能力均有显著提高。实验表明长时间用紫外线B照射日本薄荷, 可以提高单株的精油产量。Nishioka等(2008)测得相同光合有效量子辐射下彩色荧光灯对日本薄荷叶干重的影响, 结果表明其叶干重在红光照射下是蓝光照射的1.3倍, 是绿光照射的1.2倍。在红光处理下, *l*-薄荷醇含量比蓝光和绿光处理下高1.4倍。这一结果表明可以通过控制光环境来提高日本薄荷中精油的含量(Goto, 2012)。与白色、绿色和红色LED照射下相比, 甜罗勒(*Ocimum basilicum*)精油含量在蓝色LED照射下更高(Amaki et al., 2011)。甜罗勒的菊苣酸含量在连续荧光灯照射下也会增加, 并且会高于白光、蓝光以及红光照射下的含量(Shoji et al., 2011)。

2.6 其它酸苷

传统意义上的甘草甜素被广泛用作天然的甜味剂和调味添加剂。最近研究发现, 具有抗肿瘤活性的甘草酸在人体细胞中能够有效地抗击各种恶性肿瘤和癌细胞的蔓延(Fu et al., 2004), 能高活性地抑制HIV-1病毒(Reichling, 1999)以及与SARS相关病毒的复制(Cinatli et al., 2003)。此外, 甘草甜素也具备其它一些药理作用, 如祛痰、抗炎、抗溃疡、抗过敏、抗凝血和抗氧化等(Fujisawa and Tandon, 1994)。Afreen等(2005)研究了受控环境下不同光谱组合对甘草品种的影响, 结果表明, 无论是水培还是盆栽植株的根组织中, 甘草酸浓度在红光照射下都达到最高。同时,

增强或者减弱紫外线B的照射都可增加根部甘草酸的浓度。该实验表明, 与野外生存条件相比, 植物在受控条件下生长得更好。Shoji等(2010)研究了红光和蓝光对红叶生菜花青素积累及花色素苷合成基因表达的影响, 结果表明混合的蓝光和紫外线B照射都可促进花色素苷的合成。当蓝光的光强增加后, 花色素苷的积累也会有所提高。

3 结语

综上所述, 尽管国内外科研人员在LED对植物体内功能性化学物质积累的影响研究方面取得了一定的进展。但笔者发现在研究过程中仍存在不少问题, 亟待澄清和解决。

(1) 现有的文献对所用光源的定义和描述不够准确。在我们查到的几乎所有的文献中, 作者一般只用红光或者蓝光来描述, 并没有给出所用光源的中心波长, 更没有给出光源的谱线分布。这些参数对实验结果的准确性和可重复性非常重要。因为即使是同一批标称波长一样的LED光源, 每个LED灯的中心波长和谱线结构都会有所不同; 且同一个LED灯在不同的工作状态下(如不同亮度或温度), 其中心波长也会有所漂移。因此, 如果文献中没有给出当时实验条件下LED的中心波长和谱线结构, 后人就很难对这一实验进行重复, 况且即使波长差别不大的光所产生的效果有时也会有很大的不同。例如, Galdiano等(2012)的研究表明, 红光可以促进叶绿素b的合成。但由于叶绿素a和叶绿素b的峰值波长(660和643 nm)只有很小的差异, 都属于红光的范围。因此, 用峰值波长为660 nm或643 nm的LED对植物进行照射所得到的叶绿素a和叶绿素b的相对含量比值有可能完全相反。因此, 在实验中给出所用LED的光谱分布十分必要。

(2) 有许多作者没有给出LED的准确通量值及照射的时间长度。这2个量对植物的生长发育和功能性化学物质的积累都非常重要, 且关键是有些实验在一定范围内这2个量可以互易(即通量值增加1倍时, 照射时间可以减半), 但另一些实验中它们又不可互易。因此, 如果没有给出LED的通量值和照射时间, 后人就很难重复该实验。另外, LED的通量值应该以 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为光合有效量子辐射的单位, 而不能用其它的单位(如勒克斯等)。

(3) 现有的研究多从实验的表观现象中得到结果, 而没有从光与植物相互作用的机理、植物体内功能性化学物质形成的过程、不同光谱成分对植物体内功能性化学物质形成的促进作用, 或不同化学成分的光谱吸收分布对此种作用的影响等方面去做深入探讨。这一方面导致实验的结果不太准确和稳定; 另一方面使有些结果表面上看起来不太一致。例如, Jeong等(2012)的实验结果表明, 菊花叶中的木犀草素-7-o-葡萄糖苷在绿光照射下浓度达到最大, 柚(苷)配基-7-o-葡萄糖苷和芹菜苷配基-7-o-葡萄糖苷则在红光照射下浓度最大。在此研究中作者并未解释为什么葡萄糖苷的积累过程在2种不同的植物中会由不同的波长触发, 这样的结果看起来有一定的随意性, 今后应用起来会有难度。再如, 在类胡萝卜素合成的实验中, Li和Kubota (2009)的实验结果表明, 经补充的蓝光处理后, 幼叶生菜中类胡萝卜素增加了12%; Tuan等(2013)的研究结果则表明, 在白光照射下苦蕒芽菜中类胡萝卜素的积累最丰富。文献中有不少类似的结果, 如果不从植物内部作用的机理及定量的光照等方面去研究就很难得出具有说服力的结论。

(4) 由于缺乏对所用光源光谱分布的精确描述以及对实验结果的合理、有效解释, 有些文献中的结果很难重复, 更谈不上对每种功能性化学物质在合成过程中所需光强、光谱及照射时间的精确优化。上述数据的缺失将会增加今后的工作难度。

总之, 迄今为止研究人员在LED对植物体内功能性化学物质积累的影响方面进行了大量研究, 并取得了一些进展, 但在研究过程中还有一些问题需要进一步的精确化和精细化。我们期望今后科研人员在研究一种植物或功能性化学物质时, 能通过实验较为精确地确定在什么生长状态下、用什么波长的光、光强是多少、照射多长时间能得到最佳的结果, 并对结果给出适当的理论解释。虽然这一过程需要投入大量的时间和精力, 但找到这种最优化的实验条件后, 就可以进行大规模推广, 实现真正意义上的工厂化生产, 并产生极大的经济和社会效益。

可见, 用光照的方式促进植物的生长和有效物质的积累与传统的转基因、杂交和施用化肥等方法有着本质的区别。如果将这些传统的方法比喻成西医治疗方法, 它们都是通过某种手术或加大药量来解决问题, 会带来不少副作用。如为了提高产量就必须牺牲

口味和营养等。同时, 转基因方式还存在有关食品安全和生态环境方面的顾虑。但植物光调控技术却有着本质的不同, 它通过对外部条件的控制, 利用各种不同光谱成分的组合和光强调控技术来促进植物的生长, 从而达到增产、增收、增质和增效的作用。这种方法由于没有在生物体内动手术, 因而安全可靠, 目前还没有发现任何副作用。同时, 通过在不同的生长阶段使用不同光波谱段的组合, 还可以找到哪些谱段的光促进植物的生长, 哪些谱段的光有利于植物功能性化学物质的积累, 并将这些谱段的光波组合在一起对植物进行照射, 从而生产出高产且营养价值高的作物。综上, 光调控技术相当于一种中医性质的综合治理方法, 可以根据植物生长的不同时期和需求进行对症下药, 生产出品质好且产量高的作物。在此我们希望我国科技工作者今后能积极开展植物光调控技术在改善植物品质方面的研究, 将我国设施农业的理论和推技术推向一个新的高度, 以促进我国现代高新技术农业产业的发展。

参考文献

- 胡可, 韩科厅, 戴思兰 (2010). 环境因子调控植物花青素苷合成及呈色的机理. 植物学报 **45**, 307–317.
- 黄海智, 孙玉敬, 刘东红, 叶兴乾 (2011). 多酚的基本生物化学作用机制. 生物技术进展 **1**, 334–341.
- 季宏伟, 李良璧, 匡廷云 (2001). 莲胚芽叶绿素合成对光照的依赖性. 植物学报 **43**, 693–698.
- Afreen F, Zobayed SMA, Kozai T (2005). Spectral quality and UV-B stress stimulate glycyrrhizin concentration of *Glycyrrhiza uralensis* in hydroponic and pot system. *Plant Physiol Biochem* **43**, 1074–1081.
- Alokam S, Chinnappa CC, Reid DM (2002). Red/far-red light mediated stem elongation and anthocyanin accumulation in *Stellaria longipes*: differential response of alpine and prairie ecotypes. *Can J Bot* **80**, 72–81.
- Amaki W, Yamazaki N, Ichimura M, Watanabe H (2011). Effects of light quality on the growth and essential oil content in sweet basil. *Acta Hort* **907**, 91–94.
- Awad MA, Wagenmakers PS, de Jager A (2001). Effects of light on flavonoid and chlorogenic acid levels in the skin of 'Jonagold' apples. *Sci Hort* **88**, 289–298.
- Bourget CM (2008). An introduction to light-emitting diodes. *HortScience* **43**, 1944–1946.
- Brodrick J (2007). Next-generation lighting initiative at the

- U.S. department of energy: catalyzing science into the marketplace. *J Display Technol* **3**, 91–97.
- Bula RJ, Morrow RC, Tibbitts TW, Barta DJ, Ignatius RW, Martin TS** (1991). Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience* **26**, 203–205.
- Cheng YJ, Xu GW, Zhu DP, Zhu WJ, Luo L** (2006). Thermal analysis for indirect liquid cooled multichip module using computational fluid dynamic simulation and response surface methodology. *IEEE T Compon Pack T* **29**, 39–46.
- Cheng YK, Cheng KWE** (2006). General study for using LED to replace traditional lighting devices. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications. Hong Kong: IEEE. pp. 173–177.
- Cinatl J, Morgenstern B, Bauer G, Chandra P, Rabenau H, Doerr HW** (2003). Glycyrrhizin, an active component of liquorice roots, and replication of SARS-associated coronavirus. *Lancet* **361**, 2045–2046.
- Connor AM, Finn CE, Alspach PA** (2005). Genotypic and environmental variation in antioxidant activity and total phenolic content among blackberry and hybridberry cultivars. *J Am Soc Hortic Sci* **130**, 527–533.
- Cope KR, Bugbee B** (2013). Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: absolute versus relative amounts of blue light. *HortScience* **48**, 504–509.
- Duan XW, Jiang YM, Su XG, Zhang ZQ, Shi J** (2007). Antioxidant properties of anthocyanins extracted from litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) fruit pericarp tissues in relation to their role in the pericarp browning. *Food Chem* **101**, 1365–1371.
- Ebisawa M, Shoji K, Kato M, Shimomura K, Goto F, Yoshihara T** (2008). Supplementary ultraviolet radiation B together with blue light at night increased quercetin content and flavonol synthase gene expression in leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Environ Control Biol* **46**, 1–11.
- Folta KM, Koss LL, McMorro R, Kim HH, Kenitz JD, Wheeler R, Sager JC** (2005). Design and fabrication of adjustable red-green-blue LED light arrays for plant research. *BMC Plant Biol* **5**, 17.
- Frank HA, Cogdell RJ** (1996). Carotenoids in photosynthesis. *Photochem Photobiol* **63**, 257–264.
- Fu XY, Liu XJ, Wu Y** (2009). Research and analysis of the design development and perspective technology for LED lighting products. In: Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. Wenzhou: IEEE. pp. 1330–1334.
- Fu Y, Hsieh TC, Guo JQ, Kunicki J, Lee MYWT, Darzynkiewicz Z, Wu JM** (2004). Licochalcone-A, a novel flavonoid isolated from licorice root (*Glycyrrhiza glabra*), causes G2 and late-G1 arrests in androgen-independent PC-3 prostate cancer cells. *Biochem Biophys Res Commun* **322**, 263–270.
- Fujisawa K, Tandon BN** (1994). Therapeutic approach to the chronic active liver disease: summary of a satellite symposium. In: Nishioka K, Suzuki H, Mishiro S, Oda T, eds. Viral Hepatitis and Liver Disease. Tokyo: Springer-Verlag. pp. 662–665.
- Galdiano Júnior RF, Mantovani C, Lopes Pivetta KF, de Macedo Lemos EG** (2012). *In vitro* growth and acclimatization of *Cattleya loddigesii* Lindley (*Orchidaceae*) with activated charcoal in two light spectra. *Ciência Rural* **42**, 801–807.
- Gaziano JM, Hennekens CH** (1993). The role of β -carotene in the prevention of cardiovascular disease. *Ann NY Acad Sci* **691**, 148–155.
- Giliberto L, Perrotta G, Pallara P, Weller JL, Fraser PD, Bramley PM, Fiore A, Tavazz M, Giuliano G** (2005). Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiol* **137**, 199–208.
- Giovannucci E** (1999). Tomatoes, tomato-based products, lycopene, and cancer: review of the epidemiologic literature. *J Natl Cancer Inst* **91**, 317–331.
- Goto E** (2012). Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. *Acta Hortic* **956**, 37–50.
- Gupta SD, Jatothu B** (2013). Fundamentals and applications of light-emitting diodes (Leds) in *in vitro* plant growth and morphogenesis. *Plant Biotechnol Rep* **7**, 211–220.
- Hajlaoui H, Trabelsi N, Noumi E, Snoussi M, Fallah H, Ksouri R, Bakhrouf A** (2009). Biological activities of the essential oils and methanol extract of two cultivated mint species (*Mentha longifolia* and *Mentha pulegium*) used in the Tunisian folkloric medicine. *World J Microbiol Biotechnol* **25**, 2227–2238.
- Hart DJ, Scott KJ** (1995). Development and evaluation of an HPLC method for the analysis of carotenoids in foods, and the measurement of the carotenoid content of vegetables and fruits commonly consumed in the UK. *Food Chem* **54**, 101–111.
- Havaux M** (1998). Carotenoids as membrane stabilizers in chloroplasts. *Trends Plant Sci* **3**, 147–151.
- Hayashi M, Iwashita K, Katsube N, Yamaki K, Kobori M**

- (2002). Kinjiso (*Gynurci bicolor* DC.) colored extract induce apoptosis in HL60 leukemia cells. *Nippon Syokuhin Kagaku Kogaku Kaishi* **49**, 519–526.
- Hikosaka S, Ito K, Goto E** (2010). Effects of ultraviolet light on growth, essential oil concentration, and total antioxidant capacity of Japanese Mint. *Environ Control Biol* **48**, 185–190.
- Howitt CA, Pogson BJ** (2006). Carotenoid accumulation and function in seeds and non-green tissues. *Plant Cell Environ* **29**, 435–445.
- Ilieva I, Ivanova T, Naydenov Y, Dandolov I, Stefanov D** (2010). Plant experiments with light-emitting diode module in Svet space greenhouse. *Adv Space Res* **46**, 840–845.
- Jang D, Park SJ, Yook SJ, Lee KS** (2014a). The orientation effect for cylindrical heat sinks with application to LED light bulbs. *Int J Heat Mass Tran* **71**, 496–502.
- Jang D, Yook SJ, Lee KS** (2014b). Optimum design of a radial heat sink with a fin-height profile for high-power LED lighting applications. *Appl Energ* **116**, 260–268.
- Jang D, Yu SH, Lee KS** (2012). Multidisciplinary optimization of a pin-fin radial heat sink for LED lighting applications. *Int J Heat Mass Tran* **55**, 515–521.
- Jeong SW, Park S, Jin JS, Seo ON, Kim GS, Kim YH, Bae H, Lee G, Kim ST, Lee WS, Shin SC** (2012). Influences of four different light-emitting diode lights on flowering and polyphenol variations in the leaves of chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*). *J Agric Food Chem* **60**, 9793–9800.
- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida S, Yoshihara T** (2010). Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience* **45**, 1809–1814.
- Juntunen E, Tapaninen O, Sitomaniemi A, Jamsa M, Heikkinen V, Karppinen M, Karioja P** (2014). Copper-core mcpcb with thermal vias for high-power cob LED modules. *IEEE Transactions on Power Electronics* **29**, 1410–1417.
- Keyhaninejad N, Richins RD, O'Connell MA** (2012). Carotenoid content in field-grown versus greenhouse-grown peppers: different responses in leaf and fruit. *HortScience* **47**, 852–855.
- Kobayashi K, Amore T, Lazaro M** (2013). Light-emitting diodes (LEDs) for miniature hydroponic lettuce. *Opt Photonics J* **3**, 74–77.
- Kojima M, Nakano Y, Fujii H** (2010). Light stimulation triggered expression of genes coding for vacuolar proton-pump enzymes V-ATPase and V-PPase in buckwheat. *Biosci Biotechnol Biochem* **74**, 1507–1511.
- Kopsell DA, Kopsell DE** (2008). Genetic and environmental factors affecting plant lutein/zeaxanthin. *Agro Food Ind Hi Tech* **19**, 44–46.
- Kurata H, Mochizuki A, Okuda N, Seki M, Furusaki S** (2000). Intermittent light irradiation with second- or hour-scale periods controls anthocyanin production by strawberry cells. *Enzyme Microb Technol* **26**, 621–629.
- Ledford HK, Niyogi KK** (2005). Singlet oxygen and photo-oxidative stress management in plants and algae. *Plant Cell Environ* **28**, 1037–1045.
- Lefsrud MG, Kopsell DA, Sams CE** (2008). Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *HortScience* **43**, 2243–2244.
- Li J, Hikosaka S, Goto E** (2011). Effects of light quality and photosynthetic photon flux on growth and carotenoid pigments in spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Acta Horti* **907**, 105–110.
- Li Q, Kubota C** (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ Exp Bot* **67**, 59–64.
- Liu LX, Niu Y, Zou J, Zhu ZM, Yang YT** (2014). A novel monolithic white LED driver with dual dimming mode. *Analog Integr Circ S* **79**, 37–44.
- Mactier H, Weaver LT** (2005). Vitamin A and preterm infants: what we know, what we don't know, and what we need to know. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed* **90**, F103–F108.
- Maeda G** (2006). Anti-oxidation activity of Okinawa traditional vegetables. *Bull Okinawa Agric Res Cntr* **8**, 65–70.
- Massa GD, Kim HH, Wheeler RM, Mitchell CA** (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* **43**, 1951–1956.
- Mayne ST** (1996). β -carotene, carotenoids, and disease prevention in humans. *FASEB J* **10**, 690–701.
- McNellis TW, Deng XW** (1995). Light control of seedling morphogenetic pattern. *Plant Cell* **7**, 1749–1761.
- Mitchell CA, Both AJ, Bourget CM, Burr JF, Kubota C, Lopez RG, Morrow RC, Runkle ES** (2012). LEDs: the future of greenhouse lighting. *Chron Horticult* **52**, 6–12.
- Morrow RC** (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience* **43**, 1947–1950.
- Narendran N, Gu Y** (2005). Life of LED-based white light sources. *J Display Technol* **1**, 167–171.
- Ning N, Tong ZX, Yu DJ, Wu SY, Chen WB, Feng CY** (2014). Highly AC voltage fluctuation-resistant LED driver with sinusoid-like reference. *J Power Electron* **14**, 257–264.

- Nishioka N, Nishimura T, Ohyama K, Malayeri SH, Goto E, Sumino M, Inagaki N, Morota T (2008). Light quality affected growth and contents of essential oil components of Japanese mint plants. *Acta Hort* **797**, 431–436.
- Pérez-Balibrea S, Moreno DA, García-Viguera C (2008). Influence of light on health-promoting phytochemicals of broccoli sprouts. *J Sci Food Agric* **88**, 904–910.
- Pyo YH, Lee TC, Logendra L, Rosen RT (2004). Antioxidant activity and phenolic compounds of Swiss chard (*Beta vulgaris* subspecies *cycla*) extracts. *Food Chem* **85**, 19–26.
- Ramvalho JC, Marques NC, Semedo JN, Matos MC, Quartín VL (2002). Photosynthetic performance and pigment composition of leaves from two tropical species is determined by light quality. *Plant Biol* **4**, 112–120.
- Reichling J (1999). Plant-microbe interactions and secondary metabolites with antiviral, antibacterial and antifungal properties. In: Wink M, ed. *Functions of Plant Secondary Metabolites and their Exploitation in Biotechnology*, Annual Plant Reviews. Sheffield: Sheffield Academic Press Ltd. pp. 187–273.
- Ren J, Guo SS, Xu CL, Yang CJ, Ai WD, Tang YK, Qin LF (2014). Effects of different carbon dioxide and LED lighting levels on the anti-oxidative capabilities of *Gynura bicolor* DC. *Adv Space Res* **53**, 353–361.
- Rice-Evans AC, Miller NJ, Paganga G (1997). Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends Plant Sci* **2**, 152–159.
- Rodríguez-Vidal E, Otaduy D, Ortiz D, González F, Moreno F, Saiz JM (2014). Optical performance of a versatile illumination system for high divergence LED sources. *Optik* **125**, 1657–1662.
- Shoji K, Goto E, Hashida S, Goto F, Yoshihara T (2010). Effect of red light and blue light on the anthocyanin accumulation and expression of anthocyanin biosynthesis genes in red-leaf lettuce. *J SHITA* **22**, 107–113.
- Shoji K, Goto E, Hashida S, Goto F, Yoshihara T (2011). Effect of light quality on the polyphenol content and antioxidant activity of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Acta Hort* **907**, 95–99.
- Shur MS, Zukauskas A (2005). Solid-state lighting: toward superior illumination. *Proc IEEE* **93**, 1691–1703.
- Spiazzi G, Buso S, Meneghesso G (2005). Analysis of a high-power-factor electronic ballast for high brightness light emitting diodes. In: IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Recife: IEEE. pp. 1494–1499.
- Stenbaek A, Jensen PE (2010). Redox regulation of chlorophyll biosynthesis. *Phytochemistry* **71**, 853–859.
- Steranka FM, Bhat J, Collins D, Cook L, Craford MG, Fletcher R, Gardner N, Grillot P, Goetz W, Keuper M, Khare R, Kim A, Krames M, Harbers G, Ludowise M, Martin PS, Misra M, Mueller G, Mueller-Mach R, Rudaz S, Shen YC, Steigerwald D, Stockman S, Subramanya S, Trottier T, Wierer JJ (2002). High power LEDs-technology status and market applications. *Physica Status Solidi (a)* **194**, 380–388.
- Tamulaitis G, Duchovskis P, Bliznikas Z, Breive K, Ulinskaite R, Brazaityte A, Novičkovas A, Žukauskas A (2005). High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. *J Phys D: Appl Phys* **38**, 3182–3187.
- Tsao JY (2004). Solid-state lighting: lamps, chips, and materials for tomorrow. *IEEE Circuits and Devices Magazine* **20**, 28–37.
- Tuan PA, Thwe AA, Kim YB, Kim JK, Kim SJ, Lee S, Chung SO, Park SU (2013). Effects of white, blue, and red light-emitting diodes on carotenoid biosynthetic gene expression levels and carotenoid accumulation in sprouts of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.). *J Agric Food Chem* **61**, 12356–12361.
- Vänninen I, Pinto DM, Nissinen AI, Johansen NS, Shipp L (2010). In the light of new greenhouse technologies. 1. Plant-mediated effects of artificial lighting on arthropods and tritrophic interactions. *Ann Appl Biol* **157**, 393–414.
- Wang YC, Zhang HX, Zhao B, Yuan XF (2001). Improved growth of *Artemisia annua* L hairy roots and artemisinin production under red light conditions. *Biotechnol Lett* **23**, 1971–1973.
- Watanabe H (2011). Light-controlled plant cultivation system in Japan—development of a vegetable factory using LEDs as a light source for plants. *Acta Hort* **907**, 37–44.
- Wu MC, Hou CY, Jiang CM, Wang YT, Wang CY, Chen HH, Chang HM (2007). A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. *Food Chem* **101**, 1753–1758.
- Wu SJ, Hsu HC, Fu SL, Yeh JN (2014). Numerical simulation of high power LED heat-dissipating system. *Mater Lett* **10**, 497–502.
- Yanovsky MJ, Alconada-Magliano TM, Mazzella MA, Gatz C, Thomas B, Casal JJ (1998). Phytochrome A affects stem growth, anthocyanin synthesis, sucrose-phosphatase activity and neighbour detection in sunlight-grown potato. *Planta* **205**, 235–241.
- Yeh N, Chung JP (2009). High-brightness LEDs-energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant

cultivation. *Renew Sust Energ Rev* **13**, 2175–2180.

Plant Growth Regul **38**, 165–171.

Zhou Y, Singh BR (2002). Red light stimulates flowering and anthocyanin biosynthesis in American cranberry.

Ziegler RG (1991). Vegetables, fruits, and carotenoids and the risk of cancer. *Am J Clin Nutr* **53**, 251S–259S.

Effect of LED Illumination on the Accumulation of Functional Chemicals in Plants

Kui Lin, Yong Xu*

Center of Excellence for Research in Optoelectronic Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract The effect of LED illumination on plant growth and development has been investigated for years. However, most of the works focused on plant morphology. Recently, investigations have shifted to the effect on the accumulation of plant functional chemicals. This paper reviews the latest research in this area and the problems encountered. Some research ideas and possible future directions are discussed.

Key words LED illumination, chlorophyll, carotenoids, anthocyanins, essential oil

Lin K, Xu Y (2015). Effect of LED illumination on the accumulation of functional chemicals in plants. *Chin Bull Bot* **50**, 263–271.

* Author for correspondence. E-mail: emailyxu@gmail.com