

光源及光质调控在温室蔬菜生产中的应用研究进展

谢 景 刘厚诚* 宋世威 孙光闻 陈日远

(华南农业大学南方设施园艺研究中心, 广东广州 510642)

摘 要: 利用光质调控植株形态建成和生长发育是温室栽培领域的一项重要技术。近年来, 为克服温室蔬菜的光照不足现象, 多采用人工补光来改善温室内光照条件。本文综述了人工补光光源及光质调控在温室蔬菜生产中的应用研究进展, 包括人工光源的特征(传统人工光源以及 LED 光源)及其在温室蔬菜中的应用、光质对温室蔬菜生长发育和品质的影响等方面, 重点介绍了温室蔬菜侧面补光方面的应用进展。并对 LED 灯在我国温室蔬菜栽培领域的应用前景及侧面补光的应用进行了展望。

关键词: 光质; 温室; 蔬菜; LED 灯; 侧面补光; 综述

中图分类号: S63 文献标识码: A 文章编号: 1000-6346 (2012) 02-0001-07

Research Progresses in Application of Artificial Supplement Light Source in Greenhouse Vegetable Production

XIE Jing, LIU Hou-cheng*, SONG Shi-wei, SUN Guang-wen, CHEN Ri-yuan

(Institute of Protected Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: In recent years, in order to overcome the light deficiency in greenhouse, supplemental lighting is used to improve illumination condition in greenhouse. This paper expounds the research progresses in application of artificial supplement light source in greenhouse vegetable production, including the characteristics of artificial lighting (traditional artificial light and LED light source) and its application in greenhouse vegetable production. It also wraps up the effect of light quality on vegetable growth, development and quality. The paper lays its emphasis on introducing the progress made in interlighting application in greenhouse vegetable production, and prospects the application of LED light and interlighting in greenhouse vegetable cultivation.

Key words: Light quality; Greenhouse; Vegetables; LED light; Interlighting; Review

在温室的基本环境因素中, 光环境是核心条件, 对温室气候环境起主导作用。光是温室作物进行光合作用、形成温室内温度、湿度条件的能源。由于受温室方位、骨架结构、覆盖材料特性及其洁净程度等多种因素的影响, 温室内的光照状况要比露地差很多, 尤其在寒冷的冬季、早春季节或阴雪天, 透光率只有自然光的 50%~70%, 若覆盖材料不清洁或老化, 透光率甚至会降到自然光的 50%以下(邹志荣和邵孝侯, 2008)。温室内光照不足往往不能满足蔬菜生长的

收稿日期: 2011-06-27; 接受日期: 2011-10-20

基金项目: 广东高校科技成果转化重大项目(cgzhd0809)

作者简介: 谢景, 女, 硕士研究生, 专业方向: 设施蔬菜, E-mail: xcexh@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 刘厚诚, 男, 博士, 教授, 专业方向: 设施蔬菜, E-mail: liuhch@scau.edu.cn

需求,成为限制蔬菜产量的重要因素;而温室生产常常要求能够周年生产或出于商业目的考虑,要求在室外光照条件不利于作物生长的季节生产一些光敏性的作物(周长吉,2009),因此调节好温室内的光环境是实现温室作物高产优质的首要条件。温室光环境的调节主要包括光辐射量、光照时长和光质的调节(邹志荣和邵孝侯,2008),利用光质调控植株形态建成和生长发育是温室栽培领域的一项重要技术。近年来,生产上多采用人工光源补光来调控光质,改善温室内光照条件,提高作物的光合速率,增加叶面积,促进作物生长,达到增产、高效、优质、抗病的目的。本文综述了人工补光光源在温室蔬菜生产中的应用研究进展,并对LED灯在我国温室蔬菜栽培领域的应用前景及侧面补光的应用进行了展望,以期为人造补光光源调控光质在发展我国设施蔬菜栽培产业中发挥重要作用。

1 人工光源的特征及其应用

1.1 传统人工光源特性

常用的温室人工光源主要是白炽灯、荧光灯、高压钠灯、低压钠灯等。

白炽灯应用已有一百多年历史,能量分布中红外线比例较大,所以发光效率较低,但构造简单,价格便宜,目前在温室中一般用作维持光周期的照明光源。荧光灯的光谱能量分布与植物光合作用的光谱曲线相近,发光效率高,但单灯效率较小(邹志荣和邵孝侯,2008),常在人工气候室中作育苗和组织培养的补光光源。高压钠灯主要产生黄橙色光,发光效率极高,是目前温室中最常用的人工补光光源。低压钠灯发光光谱集中在589 nm的黄色光,通常只能与其他光源配合使用,而且由于产热量少,安装低压钠灯比高压钠灯离作物更近。金属卤化物灯的光色可随不同的金属卤化物成分而改变,一般在蓝-紫区域发出的光更多。氙灯可见光部分近于自然光,但红外成分比自然光强,寿命比一般金属卤化物灯高4~5倍,但成本高,热量大,光效不高(周长吉,2009)。

这些光源是热光源,导致温室冷却成本增加,同时提高发光效率、减少能耗是温室人工补光应用的重要课题。

1.2 LED光源特性

LED光源与白炽灯、荧光灯和高压钠灯等传统人工光源相比,具有明显的优点:①光谱可调性:LED光源的光质可调,可发出光波较窄的单色光,还可以根据不同需要任意组合,为植物提供最适宜的光环境参数;②冷光性:LED光源是低发热量的冷光源,热辐射很小,可近距离照射作物,光利用率高,可用于多层栽培立体组合系统,从而使植物的栽培层数和空间利用率大大提高,成倍提高单产,大幅度降低成本;③节能性:节能高效,耗电量仅为白炽灯的1/8,荧光灯的1/2(杨其长,2009);④环保性:LED光源为全固体发光体,不含汞、耐震、耐冲击、不易破碎,废弃物可回收;⑤便捷性:LED灯形状极小,可以制备成多种形状的器件,占用空间很小,使植物生产设施小型化,安装方便;⑥持久性:寿命长,可达50 000 h以上,是普通照明灯具的几十倍(杨其长,2009)。

LED光源因其为冷光源,具有寿命长、光谱纯、耗能低等优点而广泛应用于植物生长的研究中(刘晓英等,2010a)。目前,发达国家正积极研究将LED光源应用于植物设施栽培领域的技术和产品,而我国蔬菜设施栽培领域的LED光环境调控技术与机理研究还处于发展阶段(刘立功等,2009)。

1.3 人工光源在温室蔬菜中的应用

1.3.1 顶部补光 人工光源在温室中的应用,随着补光强度的提高,光合作用速率也提高,但成本也相应提高。育苗上只要光照强度达4 000 lx就能正常生长(胡永光等,2001),由于阴雨

天自然光强最低在 2 000 lx 左右, 净补光强度只需达 2 000 lx。补光量和补光时间要依据蔬菜种类及生长发育阶段设定, 一般补光量为饱和点减去自然光照的差值 (李彦荣 等, 2010)。补光时间即光周期的延长时间, 早晨补光时作物叶片的净光合速率比晚上大, 光合启动时间也长于晚上 (程瑞锋 等, 2004), 因此要更重视早晨补光。

在人工光源的安装方面, 为避免植株过热和较高光利用率, 白炽灯的悬挂高度一般为距离植株 40 cm (不低于 30 cm); 荧光灯的安装高度应距离植株 5 ~ 10 cm, 可沿植株行间布置; 高压钠灯的安装高度与植株的垂直距离保持 1 m 较合适; 为确保作物的补光强度, 应将灯尽可能地布置在作物行间的正上方 (王洪安, 2011)。为使光强分布均匀, 日色镉灯应布置在作物上方, 安装高度应与植株的垂直距离保持 1.2 m。LED 灯由于其冷光性, 可以近距离照射作物, 可将 LED 灯置于冠层上方, 也可穿插在植株之间进行照射; 目前在光照培养架 (张立伟 等, 2010)、水培层架 (李雯琳 等, 2010) 或可移动灯架 (吴家森 等, 2009) 等栽培环境下都将 LED 灯安装在作物冠层的正上方。

1.3.2 侧面补光 顶部补光这种方式可能不是最合适的方式, 由于大部分光线被最上部叶片截住, 使温室蔬菜受光区域不均匀, 低矮位置的叶片接收到的光照比上部叶片少 (Acock et al., 1978), 对净光合作用和产量的促进作用不大。而整个冠层均匀分布的照射对植物有益, 每片叶获得的光量都在光补偿点和饱和点之间 (Hovi et al., 2006); 增加冠层内穿透的自然光能提高产量 (Aikman, 1989)。部分侧面补光代替顶部补光在一定程度上能提高作物的产量和品质, 可能是由于顶部补光方式不能充分利用光合作用获得能量 (Gunnlaugsson & Adalsteinsson, 2006), 而侧面补光增加了垂直光的分布, 使低矮叶片具有积极的同化作用, 叶片更有效地利用补光光源。

在早期的试验中, 番茄 (Rodriguez & Lambeth, 1975; Grimstad, 1987)、大豆 (Johnston et al., 1969; Stasiak et al., 1998)、甜椒 (Grodzinski et al., 1999) 等蔬菜上应用荧光灯进行侧面补光。50%荧光灯侧面补光代替高压钠灯顶部补光, 与完全高压钠灯顶部补光相比, 提高了黄瓜品质 (Heuvelink et al., 2006); 用 25%高压钠灯侧面补光代替顶部补光与完全高压钠灯顶部补光相比, 黄瓜总果质量、第一级果质量、果实数、果实大小以及第一级果的百分率等都增加 (Hovi et al., 2004)。用 22%、45%高压钠灯侧面补光代替顶部补光, 番茄 Espero 品种在 45%侧面补光下产量最高 (Gunnlaugsson & Adalsteinsson, 2006), 完全高压钠灯顶部补光产量最低。用 50%高压钠灯侧面补光代替顶部补光, 与完全高压钠灯顶部补光相比 (Hovi et al., 2006), 不仅提高了甜椒产量, 还使光合光子通量 (PPF) 提高了 14%, 证实了当侧面补光和顶部补光共同进行时能增加甜椒的光合能力。与完全高压钠灯顶部补光相比, 24%、48%高压钠灯侧面补光提高了黄瓜产量 (一级果的质量均提高了 15%) 和全年光能利用率 (分别提高了 0.4%、3.1%) (Hovi & Tahvonen, 2008), 且增加了果皮总叶绿素含量 (分别增加了 8%、16%), 还延长了春季黄瓜采后货架期 (例如: 48%侧面补光比对照延长了 2 d), 侧面补光所占的比例越大, 越能提高品质。由于 LED 灯低发热、低压及坚固性等优点, 使其特别适用于侧面补光, 38%的 LED 灯 (80%红、20%蓝) 侧面补光与 62%的高压钠灯顶部补光组合及 100%高压钠灯相比, 黄瓜的叶面积、叶干质量分配比例及低层 (第三、四层) 叶总光合能力均显著提高了 23.4%、5.0%、36.1% (第三层) (Govert et al., 2010)。

2 光质对温室蔬菜生长发育、品质的影响

2.1 光质对温室蔬菜生长发育的影响

红光荧光灯处理下宝粉番茄幼苗叶片的叶绿素含量最高, 叶绿素 a/b 值最低, 光合速率最高 (蒲高斌 等, 2005a)。甜椒叶片的最大光合速率也以红色塑料薄膜处理最高 (刘寿东 等,

2010); 但黄光 LED 灯 $[(585 \pm 5) \text{ nm}]$ 处理下以色列虹丰和荷兰红粉番茄叶片叶绿素含量最大, 叶绿素 a/b 值最小 (崔瑾 等, 2009); 黄光荧光灯处理下叶用莴苣叶片叶绿素 a/b 值最高, 光合速率仍以红光处理最强, 黄光次之 (许莉 等, 2007)。蓝光荧光灯处理的宝粉番茄叶片叶绿素含量低, 叶绿素 a/b 值高 (蒲高斌 等, 2005a), 而张欢等 (2010) 发现蓝光 LED 灯 (460 nm) 处理显著提高了莴苣和江蔬 14 号番茄叶片的叶绿素 a 含量。可见不同蔬菜种类和品种对补充光质处理的叶绿素含量以及光合速率的反应存在较大差异, 这可能与光质的实现条件不同有关。

蓝光影响植物的向光性、光形态发生、气孔开放以及叶片的光合作用 (Whitelam & Halliday, 2007)。蓝光 LED 灯 (460 nm) 增大了叶用莴苣叶片气孔导度 (李雯琳 等, 2010); 与荧光灯相比, LED 光源对提高叶用莴苣叶片光合能力具明显优势。红蓝绿光 LED 组合灯处理下的叶用莴苣气孔导度低于白光荧光灯处理 (Kim et al., 2004), 但干物质积累却高于白光荧光灯处理, 表明气孔导度在这些光质条件下不会限制碳同化过程; 红蓝光 LED 组合灯下的气孔导度高于红蓝绿光 LED 组合灯处理, 这种绿光能逆转受蓝光刺激的气孔开放现象, 在蚕豆、豌豆、洋葱 (Talbot et al., 2002) 等蔬菜作物上得到同样结果。

在苗期补充照射红光 LED 灯 $[(658 \pm 5) \text{ nm}]$ 或红蓝组合光 LED 灯 $[(658 \pm 460) \text{ nm}]$, 使黄瓜、辣椒和番茄幼苗茎粗、干鲜质量、壮苗指数均显著高于自然光对照处理 (崔瑾 等, 2009)。与白光荧光灯 (310 ~ 750 nm) 相比, 红光 LED 灯 (658 nm) 处理下萝卜芽苗菜 (张欢 等, 2009)、香椿苗 (张立伟 等, 2010) 下胚轴长、子叶面积、植株干鲜质量均达到最大值, 且显著高于对照, 而且照射红光 $[(658 \pm 5) \text{ nm}]$ 或蓝光 $[(460 \pm 5) \text{ nm}]$ 处理均能促进幼苗的生长, 可见 LED 光质对芽苗菜的形态建成有一定的调控作用, 但光质对不同芽苗菜的影响不尽相同 (马超 等, 2010), 如豌豆苗在黄光处理下发生徒长, 而黑豆苗在蓝光处理下的营养品质优于红光处理。红光 (波长集中在 600 ~ 700 nm) 荧光灯处理 (红光、红蓝光、绿红光) 的紫苏幼苗 (Nishimura et al., 2009) 的干质量、叶片大小、叶片数均显著高于无红光荧光灯的处理 (蓝光、蓝绿光、绿光)。但黄光荧光灯处理叶用莴苣 (许莉 等, 2007) 各生长指标最好, 白光和黄光培养的彩色甜椒 (杜洪涛 等, 2005) 壮苗效果最好。这可能与不同的蔬菜种类对光质的反应不同有关。

在红光基础上补充蓝光可提高叶用莴苣的叶面积、干物质产量, 也能促进菠菜、萝卜和叶用莴苣的生长 (Yorio et al., 2001; Dougher & Bugbee, 2004)。Hogewoning 等 (2010) 用 7 个不同比例的红蓝光 LED 灯处理 (450 nm 蓝光分别占 0%、7%、15%、22%、30%、50%、100%) 黄瓜叶片, 7% 蓝光的光合能力 (A_{\max}) 是 100% 红光 (638 nm) 处理的 2 倍; 蓝光比例在 0 ~ 50% 间, 光合能力随着蓝光比例的增加而增加, 到 100% 蓝光时, 光合能力下降但光合作用正常; 且在 0 ~ 50% 之间光合能力的增加与叶面积、N 含量、叶绿素含量、气孔导度等增加是相关的; 认为蓝光不仅能够定性地满足黄瓜叶片正常的光合作用的需求, 而且定量地介导叶片对光照强度的响应。

在红蓝光 LED 灯处理上添加 24% 绿光 LED 灯 (500 ~ 600 nm) 处理 (Kim et al., 2006), 能促进叶用莴苣生长。在红 (660 nm) 蓝 (450 ~ 470 nm) LED 光组合基础上添加不同光色处理, 对樱桃番茄生物量有显著影响 (刘晓英 等, 2010b), 添加绿光 (525 nm)、黄光 (590 nm)、紫光 (380 ~ 410 nm) 和黄紫光处理有利于植株地上部生长; 添加不同光色处理也有利于植株光合色素的积累并提高光化学效率, 红蓝黄绿紫复合光处理下光合色素含量最高。

2.2 光质对温室蔬菜品质的影响

红光 LED 灯 (638 nm) 补光处理叶用莴苣 3 d 后, 比对照硝酸盐含量下降 30% (Samuolienė et al., 2009); VC 含量高于对照, 且处理 5 d 后, VC 含量保持平稳, 对照的 VC 含量急剧下降, 降幅达 30%, 也显著提高了可溶性糖尤其是蔗糖的含量。红光荧光灯处理有利于番茄幼苗干物

质积累(蒲高斌等, 2005a; 蔡鸿昌等, 2010)、显著提高了菠菜(齐连东等, 2007)可溶性糖含量; 用红光 LED 灯 $[(658 \pm 5) \text{ nm}]$ 处理黄瓜、辣椒、番茄幼苗(崔瑾等, 2009)、萝卜芽苗菜(张欢等, 2009)的可溶性糖含量也显著提高。张欢等(2010)研究发现在红光 LED 灯 $[(658 \pm 5) \text{ nm}]$ 处理中添加适量蓝光 LED 灯 $[(460 \pm 5) \text{ nm}]$ 更利于莴苣幼苗碳水化合物的积累。樱桃番茄(刘晓英等, 2010a)果实营养品质的累积最佳光源红蓝光比例存在一个阈值, 在一定范围内, 红蓝光比值对果实营养品质的影响无质的差异, 当蓝光 LED 灯 $[(450 \pm 20) \text{ nm}]$ 所占比例较大时, 有利于营养物质的积累; 蓝光占 60% 的红蓝组合光源可能是樱桃番茄果实品质相对较好的光源。

红光荧光灯还能显著地降低菠菜的硝酸盐和草酸含量(齐连东等, 2007), 但黄光荧光灯处理叶用莴苣的可溶性糖含量最高、硝酸盐含量最低(许莉等, 2010)。这种光质对蔬菜品质影响的差异性可能是由蔬菜种类以及光质的实现条件不同引起的。

用不同颜色的滤光膜覆盖, 以镝灯作为补充光源, 蓝膜处理下丰香草莓(徐凯等, 2006)、达赛莱克特草莓(胡阳等, 2010)可溶性固形物含量、抗坏血酸含量和固酸比最高; 抗坏血酸含量的高低与不同膜中的紫外/蓝紫光比例一致, 与红/蓝光比值相反。与对照的白光荧光灯处理相比, 蓝光或红蓝混合的荧光灯处理提高了叶用莴苣和小松菜的抗坏血酸含量(Ohashi-Kaneko et al., 2007), 降低了叶用莴苣的硝酸盐含量。

红光 LED 灯 $(606 \sim 657 \text{ nm}, 635 \text{ nm})$ 处理下, 萝卜愈伤组织中萝卜硫素的含量最高(刘浩等, 2010); 红光荧光灯处理番茄的番茄红素含量最高(蒲高斌等, 2005b), 红光是诱导马铃薯块茎糖苷生物碱积累的重要信号(季彦林等, 2010; 王旺田等, 2010); 红光荧光灯处理也能增加薄荷的薄荷醇含量(Nishioka et al., 2008), 红光荧光灯处理(红光、红蓝光、绿红光)的紫苏幼苗(Nishimura et al., 2009)的花青苷含量显著高于无红光荧光灯的处理(蓝光、蓝绿光、绿光)。

用不同颜色的滤光膜调控光质, 黄光处理不利于 03-6-2 草莓果实花青苷的积累, 但有利于类黄酮及总酚的积累, 对花青苷的影响效果为蓝光>绿光>白光>黄光>红光(赵淼等, 2008)。但丰香草莓果实花青苷含量从大到小依次为: 黄膜>绿膜>中性膜>蓝膜>红膜(王丽娟等, 2009); 酚类物质的含量变化则是蓝膜>绿膜>黄膜>中性膜>红膜, 由于研究者使用的材料品种以及试验环境不同, 使光质对同一种蔬菜次生代谢产物合成的影响也不同, 体现了光质调控次生代谢物的复杂性。

3 展望

将人工补光光源应用于温室蔬菜上, LED 光源较传统人工光源具有明显的优势以及良好的应用前景, LED 光源将在蔬菜工厂化育苗中发挥重要作用以及将广泛应用于植物工厂(刘立功等, 2009)。由于一次性投入太大, LED 光源的广泛应用还受到高成本的严重限制, 但作为未来设施领域最有前途、具有良好发展前景的人工光源, 相信随着 LED 光源制造成本的逐渐降低、技术的进步以及国家对节能工程的进一步重视, LED 光源会受到广泛应用。然而, 我国温室蔬菜 LED 光环境调控应用的研究还处于初步发展阶段, 尚缺乏实用系统性的研究, 在侧面补光方面, 国内还未引起重视。因此, 亟需借鉴国外研究成果, 以高效利用光能为目标, 探索温室主要作物适宜的光谱特性及 LED 光源的实用性研究为内容, 形成较为完善的理论体系, 为人工补光光源调控光质能够在发展我国蔬菜设施栽培产业中发挥重要作用提供理论依据。

参考文献

蔡鸿昌, 崔海信, 崔金辉. 2010. 不同光质对番茄穴盘苗质量的影响. 中国农业科技导报, 12(3): 114-118.

- 程瑞锋, 邹志荣, 王军. 2004. 外源补光状态下温室黄瓜光合作用的研究. 陕西农业科学, (3): 17-18.
- 崔瑾, 马志虎, 徐志刚, 张欢, 常涛涛, 刘海俊. 2009. 不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响. 园艺学报, 36(5): 663-670.
- 杜洪涛, 刘世琦, 张珍. 2005. 光质对彩色甜椒幼苗生长及酶活性影响. 华北农学报, 20(2): 45-48.
- 胡阳, 古松, 江莎, 张晓春, 李洁, 高玉葆, 乔艳丽. 2010. 不同光质对‘达赛莱克特’草莓果实品质的影响. 四川农业大学学报, 28(2): 164-168.
- 胡永光, 李萍萍, 邓庆安, 毛罕平. 2001. 温室人工补光效果的研究及补光源配置设计. 江苏理工大学学报: 自然科学版, 22(3): 37-40.
- 季彦林, 王旺田, 王蒂, 张金文, 王威, 李瑛, 张菲菲. 2010. 不同光质对马铃薯块茎糖苷生物碱积累的诱导效应. 江苏农业学报, 26(1): 40-45.
- 李雯琳, 郁继华, 张国斌, 杨其长. 2010. LED光源不同光质对叶用莴苣幼苗叶片气体参数和叶绿素荧光参数的影响. 甘肃农业大学学报, 45(1): 47-51.
- 李彦荣, 常瑛, 魏玉杰, 雒淑珍, 张梅秀. 2010. 克服弱光寡照障碍的技术研究. 安徽农业科学, 38(2): 687-690.
- 刘浩, 李胜, 马绍英, 罗丽媛, 薛冲, 方艳, 张真, 刘媛. 2010. LED不同光质对萝卜愈伤组织诱导、增殖和萝卜硫素含量的影响. 植物生理学通讯, 46(4): 347-350.
- 刘立功, 徐志刚, 崔瑾, 张欢. 2009. 光环境调控及LED在蔬菜设施栽培中的应用和前景. 中国蔬菜, (14): 1-5.
- 刘寿东, 杨再强, 苏天星, 费玉娟, 黄川容, 黄海静. 2010. 不同光质对温室甜椒光合特性的影响. 大气科学学报, 33(5): 600-605.
- 刘晓英, 常涛涛, 郭世荣, 徐志刚, 陈文昊. 2010a. 红蓝LED光全生育期照射对樱桃番茄果实品质的影响. 中国蔬菜, (22): 21-27.
- 刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 郭世荣. 2010b. 不同光质LED弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响. 西北植物学报, 30(4): 645-651.
- 马超, 张欢, 郭银生, 谷艾素, 崔瑾. 2010. LED在芽苗菜生产中的应用及前景. 中国蔬菜, (20): 9-13.
- 蒲高斌, 刘世琦, 刘磊, 任丽华. 2005a. 不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响. 园艺学报, 32(3): 420-425.
- 蒲高斌, 刘世琦, 杜洪涛, 刘磊. 2005b. 光质对番茄果实转色期品质变化的影响. 中国农学通报, 21(4): 176-178, 187.
- 齐连东, 刘世琦, 许莉, 于文艳, 梁庆玲, 郝树芹. 2007. 光质对菠菜草酸、单宁及硝酸盐积累效应的影响. 农业工程学报, 23(4): 201-205.
- 王洪安. 2011. 北方温室人工补光源特性及优化配置研究. 吉林农业, (1): 33-34.
- 王丽娟, 张学英, 徐金娥, 张广华, 葛会波. 2009. 不同光质对草莓果实花青苷、酚类物质及类黄酮物质的影响. 河北农业大学学报, 32(2): 54-57.
- 王旺田, 张金文, 王蒂, 陶士珩, 季彦林, 吴兵. 2010. 光质与马铃薯块茎细胞信号分子和糖苷生物碱积累的关系. 作物学报, 36(4): 629-635.
- 吴家森, 胡君艳, 周启忠, 郑军, 周国泉, 付顺华. 2009. LED灯补光对萝卜生长及光合特性的影响. 北方园艺, (10): 30-33.
- 徐凯, 郭延平, 张上隆, 戴文圣, 符庆功. 2006. 不同光质对丰香草莓生长发育的影响. 果树学报, 23(6): 818-824.
- 许莉, 刘世琦, 齐连东, 梁庆玲, 于文艳. 2007. 不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响. 中国农学通报, 23(1): 96-100.
- 许莉, 尉辉, 齐连东, 郝树芹, 梁庆玲, 于文艳, 刘世琦. 2010. 不同光质对叶用莴苣生长和品质的影响. 中国果菜, (4): 19-22.
- 杨其长. 2009. LED在设施园艺产业的应用现状与发展趋势. 太谷. 纪念中国农业工程学会成立30周年暨中国农业工程学会2009年学术年会(CSAE 2009)论文集.
- 张欢, 徐志刚, 崔瑾, 郭银生, 谷艾素. 2009. 不同光质对萝卜芽苗菜生长和营养品质的影响. 中国蔬菜, (10): 28-32.
- 张欢, 徐志刚, 崔瑾, 谷艾素, 郭银生. 2010. 光质对番茄和莴苣幼苗生长及叶绿体超微结构的影响. 应用生态学报, 21(4): 959-965.
- 张立伟, 刘世琦, 张自坤, 杨茹, 杨晓建. 2010. 不同光质下香椿苗的生长动态. 西北农业学报, 19(6): 115-119.
- 赵森, 林毅, 蔡永萍, 谢鸣, 蒋桂华, 吴延军. 2008. 不同光质对草莓果实成熟过程中色素类物质含量的影响. 浙江农业学报, 20(1): 64-66.
- 周长吉. 2009. 现代温室工程. 2版. 北京: 化学工业出版社: 282, 294-295.
- 邹志荣, 邵孝侯. 2008. 设施农业环境工程学. 北京: 中国农业出版社: 13, 32, 34-35.
- Acoc B, Charles-Edwards D A, Fitter D J, Hand D W, Ludwig L J, Warren Wilson J, Withers A C. 1978. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: an experimental examination of two canopy models. J Exp Bot, 111: 815-827.
- Aikman D P. 1989. Potential increase in photosynthetic efficiency from the redistribution of solar radiation in a crop. J Exp Bot, 40: 855-864.
- Dougher T, Bugbee B. 2004. Long-term blue light effects on the histology of lettuce and soybean leaves and stems. J Am Soc Hortic Sci, 129:

467–472.

- Govert T, Joke O, Sander W, Hogewoning, Jeremy H, Wim V L. 2010. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Planta Rum*, 138: 289–300.
- Grimstad S O. 1987. Supplementary lighting of early tomatoes after planting out in glass and acrylic greenhouses. *Sci Hort*, 33: 189–196.
- Grodzinski B, Schmidt J M, Watts B, Taylor J, Bates S, Dixon M A, Staines H. 1999. Regulating plant/insect interactions using CO₂ enrichment in model ecosystems. *Adv Space Res*, 24 (3): 281–291.
- Gunnlaugsson B, Adalsteinsson S. 2006. Interlight and plant density in year-round production of tomato at northern Latitudes. V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture, 711: 71–76.
- Heuvelink E, Bakker M J, Hogendonk L, Janse J, Kaarsemaker R, Maaswinkel R. 2006. Horticultural lighting in the Netherlands: new developments. *Acta Hort*, 711: 25–33.
- Hogewoning S W, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, Ieperen W V, Harbinson J. 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativu* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61 (11): 3107–3117.
- Hovi T, Näkkilä J, Tahvonen R. 2004. Interlighting improves production of year-round cucumber. *Sci Hortic*, 102: 283–294.
- Hovi T, Näkkilä J, Tahvonen R. 2006. Increasing productivity of sweet pepper with interlighting. *Acta Hortic*, 711: 165–169.
- Hovi T, Tahvonen R. 2008. Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Scientia Horticulturae*, 116: 152–161.
- Johnston T J, Pendleton J W, Peters D B, Hicks D R. 1969. Influence of supplemental light on apparent photosynthesis, yield and yield components of soybeans (*Glycine max* L.). *Crop Sci*, 9 (5): 577–581.
- Kim H H, Goins G D, Wheeler R M, Sager J C. 2004. Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. *Annals of Botany*, 94: 691–697.
- Kim H H, Wheeler R M, Sager J C, Gains G D, Naikane J H. 2006. Evaluation of lettuce growth using supplemental green light with red and blue light-emitting diodes in a controlled environment—a review of research at Kennedy Space Center. *Acta Horticulturae*, 711: 111–120.
- Nishimura T, Ohyama K, Goto E, Inagakic N. 2009. Concentrations of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of *Perilla* plants as affected by light quality under controlled environments. *Scientia Horticulturae*, 122: 134–137.
- Nishioka N, Nishimura T, Ohyama K, Sumino M, Malayeri S H, Goto E, Inagaki N, Morota T. 2008. Light quality affected growth and contents of essential oil components of Japanese mint plants. *Acta Hortic*, 797: 431–436.
- Ohashi-Kaneko K, Takase M, Kon N, Fujiwara K, Kurata K. 2007. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. *Environ Control Biol*, 45 (3): 189–198.
- Rodriguez B P, Lambeth V N. 1975. Artificial lighting and spacing as photosynthetic and yield factors in winter greenhouse tomato culture. *J Am Soc HortSci*, 100: 694–697.
- Samuolienė G, Urbonavičiūtė A, Brazaitytė A, Jankauskienė J, Duchovskis P, Bliznikas Z, Žukauskas A. 2009. The benefits of red LEDs: improved nutritional quality due to accelerated senescence in lettuce. *Sodininkystė Ir Darzininkystė. Mokslo Darbai*, 28 (2): 111–120.
- Stasiak M A, Cote R, Dixon M, Grodzinski B. 1998. Increasing plant productivity in closed environments with inner canopy illumination. *Life Support Biosph Sci*, 5 (2): 175–181.
- Talbott L D, Nikolova G, Ortiz A, Shmayevich I, Zeiger E. 2002. Green light reversal of blue-light-stimulated stomatal opening is found in a diversity of plant species. *American Journal of Botany*, 89: 366–368.
- Whitelam G, Halliday K. 2007. Light and plant development. Oxford: Blackwell Publishing.
- Yorio N C, Goins G D, Kagie H R. 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *HortScience*, 36 (2): 380–383.