

LED在植物设施栽培中的应用和前景

崔瑾¹, 徐志刚^{2*}, 邸秀茹²

(1. 南京农业大学生命科学学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学农学院, 南京 210095)

摘要: 该文综述了近年来发光二极管(LED)在植物设施栽培中的研究与应用, 内容包括: 应用于植物设施栽培的LED特征, LED在植物组织培养、设施园艺和航天生态生保系统等方面的研究, 以及LED应用于植物设施栽培领域的前景分析。

关键词: 发光二极管(LED); 植物; 设施栽培

中图分类号: S625.5⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0249-05

崔瑾, 徐志刚, 邸秀茹. LED在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 249-253.

Cui Jin, Xu Zhigang, Di Xiuru. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 249-253.(in Chinese with English abstract)

0 引言

随着半导体技术的飞速发展, 各种波长的发光二极管(light emitting diode, LED)被开发出来并被广泛应用于各行业。近年来, LED作为一种可应用于植物设施栽培的新型半导体光源, 具有一系列传统电光源技术无可比拟的优点而日益受到关注。目前LED在植物设施栽培中的应用正日益扩大并呈良好的发展前景。本文简要从以下几个方面对LED在植物设施栽培方面已做过的工作做一个总结, 并对它在该领域的应用前景做一个评估。

1 应用于植物设施栽培的LED特征

光是植物生长发育的基本因素之一。光质对植物的生长、形态建成、光合作用、物质代谢以及基因表达均有调控作用。通过光质调节, 控制植株形态建成和生长发育是设施栽培领域的一项重要技术。

作为第四代新型照明光源, LED具有节能环保、安全可靠、使用寿命长、响应时间短、体积小、重量轻、发热量少、易于分散或组合控制等许多不同于其他电光源的重要特点^[1]。传统植物设施栽培中使用的光源一般是荧光灯、金属卤化物灯、高压钠灯和白炽灯。这些光源是依据人眼对光的适应性所选择的, 其光谱有很多不必要的波长, 对植物生长的促进作用少^[2]。而随着光电技术革新和生产成本下降, LED因具备以下卓越性能成为植物设施栽培领域的首选光源: 光谱性能好, 可按照需要组合获得纯正单色光与复合光谱, 其波谱宽度小于±30 nm, 波长正好与植物光合成和光形态建成的光谱范

围吻合^[3]; 光能有效利用率可达80%~90%, 并能对不同光质和发光强度实现单独控制^[4]; 作为冷光源, 可以近距离照射植物, 大大提高空间的利用效率, 可用于多层栽培立体组合系统, 实现了低热负荷和生产空间小型化; 此外, LED耐冲击, 不易破碎, 不含汞, 无污染, 废弃物可回收利用, 使用寿命是普通光源的数十倍, 特强的耐用性也降低了运行成本。由于这些显著的特征, LED十分适合应用于可控设施环境中的植物栽培, 如植物组织培养、设施园艺和闭锁式植物工厂以及航天生态生保系统等^[5]。由于目前LED的价格较高, 在植物设施栽培领域的推广应用还需要有一个过程。但随着LED向高亮度、低价格的方向飞速发展, LED一定会在不久的将来广泛应用于植物设施栽培领域^[4]。

2 LED应用于植物设施栽培的研究

1964年世界首个红色LED研制成功, 之后黄色LED出现, 直到1994年蓝色、绿色LED才研制成功。但由于其亮度差、价格昂贵等条件的限制, 一直无法作为通用光源推广应用。近十年来, 随着人们对半导体发光材料研究的不断深入, LED制造工艺的不断进步和新材料的开发应用, LED的发展取得了突破性进展, 价格也大幅度下降, 其应用于植物设施栽培的研究逐渐被各国学者关注。尤其是在超高亮度LED开发成功后, 被广泛应用于植物生理或栽培领域的研究, 如光形态发生、光合作用及叶绿素合成研究等^[6]。

2.1 LED应用于植物组织培养的研究

在植物组织培养中, 光合光子通量密度(PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density)、光照周期和光谱分布对植物的光合作用和形态建成起重要作用^[6-8]。植物组织培养主要依靠电光源, 传统电光源对植物的生物能效极低、发热量大, 光照用电约占整个电费成本的65%^[9], 是植物组织培养中最高的人力成本之一^[10]。因此在植物组织培养中采用LED提供照明, 调控光质和PPFD, 不仅能够调控组培植物的生长发育和形态建成、缩短培养周期、

收稿日期: 2007-09-29 修订日期: 2007-12-22

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA03165)

作者简介: 崔瑾(1974—), 女, 江苏镇江人, 副教授, 博士, 主要从事植物生物技术与发育生物学研究。南京 南京农业大学生命科学学院, 210095。Email: cuijin@njau.edu.cn

*通讯作者: 徐志刚(1967—), 男, 江苏靖江人, 副教授, 博士, 主要从事设施农业工程研究。南京 南京农业大学农学院, 210095。

Email: xuzhigang@njau.edu.cn

提高品质,而且能够大大减少能耗,降低成本^[11]。

2.1.1 红光(620~660 nm)和远红光(710~740 nm)

LED对组培植物生长的影响

光谱中红光与远红光光通量的比值(R/FR)对植物形态建成、调节植株高度具有重要影响。R/FR 比值已成为控制植株形态的一个重要评价参数^[12]。

Fujiwara 等研究发现,LED光源中,红光LED和远红光LED光源比荧光灯更易影响组培苗的光形态建成和生长发育^[13]。Tanaka等研究发现红光LED促进兰花组培苗叶片生长但降低了叶绿素含量、茎和根的干重^[14]。Lian等研究表明:在单独红光LED照射下,百合离体培养鳞茎的生长指标和干物质积累较低,这与单独红光导致的低CO₂同化作用有关^[15]。这一结果印证了Goins 等将红光LED应用于小麦光合产量的研究结果^[16]。

然而,有关红光或远红光LED对组培植物生长影响的报道并不一致。Miyashita 等研究发现随着红光LED的PPFD增加,马铃薯组培苗茎伸长,叶绿素含量也增加,但叶面积和干重没有显著差异^[17]。Nhut 等的研究表明,在红光LED照射下,草莓组培苗叶片伸展、叶柄伸长、茎明显伸长,但叶绿素含量降低^[18]。Kim 等研究认为,单独红光LED或红光LED+远红光LED处理下,菊花组培苗茎过分伸长导致茎秆脆弱,其它重要生长指标也降低了,总体上不利于植物的正常生长发育^[2]。Hahn 等发现了红光LED对毛地黄组培苗茎生长的抑制作用^[19]。这些现象被认为是单色红光导致光系统I和II可利用的光能量分布不平衡,因此抑制茎的生长^[20]。

此外,在研究PPFD均为45 μmol/(m²·s)的不同光质LED对兰花原球茎小块照射处理的实验结果中,发现红光LED处理对从原球茎片段中诱导愈伤组织是最有效的^[21]。

2.1.2 蓝光(450~470 nm)LED对组培植物生长的影响

有报道认为蓝光直接或间接影响植物胚轴的伸长、酶的调节和合成、气孔的张开、叶绿体的成熟和光形态建成^[22,23]。但是有关单一蓝光LED显著影响组培苗生长发育的报道并不多见。

Appelgen 等曾报道蓝光强烈抑制天竺葵组培苗茎的延长^[24]。Nhut 等的研究表明,经单一蓝光LED处理的草莓组培苗叶片数目最少,根长最短,抑制草莓组培苗生长,但没有蓝光LED照射会导致草莓组培苗生长和发育不平衡^[18]。

在对马蹄莲组培苗光合兼养条件下生长效果的研究中发现,在LED处理之前,干质量和生长速率没有显著的差异,但是添加蓝光LED处理对叶绿素含量和株高指标有显著的正效应^[25]。Tanaka 等研究发现红光LED促进了兰花叶片的生长但降低了叶绿素的含量,然而蓝光LED却逆转这个效应^[14]。

2.1.3 红光与蓝光LED组合对组培植物生长的影响

迄今为止,有不少报道认为,红蓝LED组合对组培植物的生长发育产生积极影响,优于单色光处理。如Hahn

等研究发现,经单一红光LED或蓝光LED处理的毛地黄组培苗出现徒长现象,但是在红蓝LED复合光下生长健壮^[19]。还有研究发现,一种双蝴蝶属组培植物在红光LED下生根最好,在蓝光LED下生根最差;而在红蓝LED复合光照下,植物的根数、鲜重和叶绿素含量综合指标明显好于单色LED和荧光灯处理^[26]。

有研究认为红、蓝光LED组合可以通过增加净光合速率以提高植物的生长和发育是因为红光与蓝光的光谱能量分布与叶绿素吸收光谱一致^[16]。Kim等研究发现在红、蓝LED复合光照射下的菊花组培苗净光合速率最高,鲜质量、干质量和叶面积达到最大,气孔的数目最少,气孔开度最大^[2]。Tanaka 等报道指出在红、蓝LED复合光照射的兰花组培苗的鲜重和干重增加^[14]。Lian等对百合离体培养鳞茎进行实验得出,红、蓝LED复合光更适合鳞茎的生长,鳞茎的尺寸、鲜、干质量和根的数量最高^[15]。

但是有关红蓝LED组合的配比,不同组培植物作为试验材料所开展研究的报道结果并不一致。如Nhut等采用80%红光LED+20%蓝光LED组合对其对香蕉组培苗生长和驯化移栽有明显促进效果^[27]。而一项对于桉树组培苗的研究发现,同样的红蓝LED配比,并配合透气膜和岩棉基质能够实现其无糖培养^[28]。Nhut等后又研究发现在70%红光LED+30%蓝光LED照射下,草莓组培苗的叶片数、根数、根长、鲜重、干质量值最大,移栽到土壤中长势也最好^[17]。随后对白鹤芋组培苗的研究也得到了相似的结果^[29]。由此可见,不同的植物对光质配比的敏感性不同,表现出不同的适应性。

在对马铃薯组培苗的鲜/干质量积累量指标的研究结果中发现,协同光照控制优于交替间歇光照控制,45%红光LED+55%蓝光LED的处理对于马铃薯组培苗的生长效应是最佳的^[30]。此外,有研究发现在25%红光+75%蓝光LED组合下,从兰花原球茎小块中诱导的愈伤组织中能够获得最高发生率的原球茎体^[21]。

2.2 LED应用于设施园艺的研究

近十年来,中国设施园艺面积发展迅速,植物生长的光环境控制照明技术已经引起重视。设施园艺照明技术主要应用于两个方面:一、在日照量少或日照时间短的时候作为植物光合作用的补充照明;二、作为植物光周期、光形态建成的诱导照明^[31]。

2.2.1 LED作为植物光合作用补充照明的研究

Nichols 等研究发现温室内的传统人工光源产生太多热量,如采用LED补充照明和水培系统,空气能够被循环使用,过多的热量和水分可以被移除,电能能够被高效地转变为有效光合辐射,最终转化为植物物质^[32]。在应用LED为400 ms频率和50%占空比下,生菜的生长速率、光合速率都提高20%以上,该研究表明将LED用于植物工厂是可行的^[33]。

Yanagi等研究发现,与荧光灯相比,红光LED对菠菜生长效应不明显,加入蓝光LED后菠菜生长形态指标显著提高^[34]。Yorio 等研究发现,应用90%红光LED+10%蓝光LED作为补充照明,能够显著促进菠菜、萝卜和生菜的

生长发育^[35]。Shin等的研究发现,红蓝LED复合光照下生长的甜菜生物积累量最大,毛根中甜菜素积累最显著,并在毛根中产生最高的糖分和淀粉积累^[36]。

有报道指出同对照金属卤化灯相比,生长在红蓝LED复合光照下的胡椒茎、叶的解剖学形态发生显著的变化^[37]。Choi等的研究也有类似结论,在红蓝LED复合光照下生长的紫苏的茎、叶的解剖结构特征变化与在金属卤化灯下生长的紫苏有显著差异,并且随着PPFD提高,紫苏光合速率提高^[38]。Heo对万寿菊和鼠尾草进行显微结构观察发现,同单色的蓝光或红光LED相比,红蓝LED复合光照下两种植物的气孔数目增多^[39]。

2.2.2 LED作为植物光周期、光形态建成的诱导照明

Goins等研究发现红光LED可延迟拟南芥的开花时间^[40]。Heo等研究发现红光+蓝光LED对仙客来开花起诱导作用,10h光周期处理下,花芽数和开花数最高;单独的红光或蓝光LED照射降低了成花反应,调控了花梗长度和花期,有利于切花生产和上市。由此可见通过光质和光周期可以调控植物的开花和随后的生长^[41]。

Heo等研究结果表明:在荧光灯+蓝光LED、荧光灯+红LED、荧光灯+远红LED光照处理下,藿香蓟的干质量无显著差异;荧光灯和荧光灯+红LED光照处理下,藿香蓟和万寿菊的株高无显著差异,但是荧光灯+远红光处理下的两种植物株高最高;与单一荧光灯处理相比,荧光灯+红LED和荧光灯+远红LED复合光照处理显著提高万寿菊气孔的数量^[42]。

2.3 LED应用于航天生态生保系统的研究

目前国际上普遍认为,建立受控生态生保系统(Controlled Ecological Life Support System, CELSS)是解决长期载人航天生命保障问题的根本途径^[43-45]。而要建立好该系统,关键技术之一就是必须解决好其中的高等植物栽培技术,在空间进行高等植物栽培涉及到的关键问题之一就是光照技术^[46]。

基于空间环境的特殊要求,空间高等植物栽培中使用的光源必须具有发光效率高、输出的光波适合于植物光合作用和形态建成、体积小、重量轻、寿命长、高安全可靠性和无环境污染等特点。因此,近年来发光二极管在空间植物栽培中的应用倍受重视^[47,48]。研究发现氙气金卤灯和LED两种照明系统都能提供CELSS要求的光谱能量分布和均匀的照明,但是采用LED的照明系统的电能转换效率超过采用氙气金卤灯系统的5倍^[49]。

郭双生等研究发现,太空植株正常生长可采用红色和蓝色LED的一定组合,以90%红色+10%蓝色LED管更为适宜^[46]。Kim等研究发现,24%绿光+蓝光+红光(RGB)处理促进了生菜的生长,与冷白荧光灯处理组相比,RGB处理组的生菜光合产量显著提高^[50,51]。

3 LED应用于植物设施栽培的前景分析

21世纪将是生态农业的世纪,而物理农业是实现生态农业的主要途径之一,在众多的物理学科知识中,光学在其中起着至关重要的作用,因此,有学者认为“光的世纪”即将来临。如何在太阳光照不足情况下调控特定人

造光源对绿色植物实施不同“光肥”,不仅促进作物生长发育,还可以达到增产、高效、优质、抗病、无公害的目的,这对于促进中国现代农业的发展具有非常重要的现实意义。

LED以其固有的优越性正吸引着世界的目光,特别在全球能源短缺的忧虑再度升高的背景下。将LED应用于植物设施栽培领域具有很多优势:可提供多种纯正单色光和复合光谱,可根据不同作物及不同生长发育时期提供相应的光谱组合;具有PPFD可调的特性,可以模拟太阳光强度的变化;发光频率与占空比可调节的特性可以提供高频间歇给光模式,有利于探讨光合作用中明期和暗期的控制机理,并可以扩大节能空间^[4]。

LED在植物生理与植物栽培领域的应用研究已经引起全世界的广泛关注。以日本和美国为代表的发达国家不仅深入研究LED对植物生长发育的调控机理,更注重积极研究将LED广泛应用于植物设施栽培领域的技术和产品。美国NASA研究中心把LED补光设施作为宇宙基地等闭锁式生命维持系统的相关技术之一开展研究。日本的闭锁式LED植物工厂的研究已经进入实用化阶段;CCS公司制作的植物生长系统通过生长控制软件控制LED照明,能实现不同光质的自动控制;新型LED光源组培容器“Uni-PACK”也研制成功,具有提高组培空间利用率、有效波长利用率和照明效率,降低组培苗生产成本等优势^[4]。

迄今为止,中国植物设施栽培领域的LED应用机理研究还处于起步阶段。借鉴国外研究成果,进一步系统深入研究LED应用于中国设施栽培领域的基础理论十分必要。值得注意的是,不同植物不同生长时期所需的光谱组合、PPFD及光照周期存在一定差异,虽有一些国外文献报道应用红蓝LED等光谱组合对不同植物生长发育和形态建成影响的研究,但缺乏结合不同物种不同时期生长特性,分析植物对LED光质调控响应机理的研究,因此也未能给出不同植物在不同生育期中最佳LED光谱组成、PPFD及光照周期的可靠参数和系统资料。

此外,中国虽然是植物设施栽培面积大国,但在设施栽培领域具有自主知识产权的LED技术产品的研发基本还是空白,急需工程学科和植物学科的研究者共同合作,研制开发出符合中国生产实际的LED植物光源、照明自动控制系统、新型植物生长调控装置和大型植物工厂化育苗设施等。随着LED技术的发展与生产成本的逐年下降,特别是随着中国半导体照明工程的启动,相信在不久的将来,与LED相关的各种技术和产品将广泛应用于植物设施栽培的生产实践中。

[参 考 文 献]

- [1] 王声学,吴广宁,蒋伟,等. LED原理及其照明应用[J]. 灯与照明, 2006, 30(4): 32-35.
- [2] Kim S J, Hahn E J, Heo J W, et al. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 101: 143-151.
- [3] 刘再亮,马承伟,杨其长. 设施环境中红光与远红光比值

- 调控的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 270—273.
- [4] 魏灵玲, 杨其长, 刘水丽. LED 在植物工厂中的研究现状与应用前景[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 408—411.
- [5] Bula R J, Morrow R C, Tibbits T W, et al. Light-emitting diodes as a radiation source for plants[J]. Hortscience, 1991, 26(2): 203—205.
- [6] 石井雅久, 伊东正, 丸尾达. ことなる光周期の人工光源下で栽培したサラダナの生育生理的特性[J]. 生物环境调节, 1995, 33(2): 143—149.
- [7] Cui Y I, Hahn E J, Kozai T, et al. Number of air exchanges, sucrose concentration, photosynthetic photon flux, and differences in photoperiod and dark period temperatures affect growth of *Rehmannia glutinosa* plantlets in vitro[J]. Plant Cell Tiss. Org. Cult, 2000, 62: 219—226.
- [8] Kozai T, Kubota C, Jeong B R. Environmental control for large-scale production of plants through in vitro techniques[J]. Plant Cell Tiss. Org. Cult, 1997, 51: 49—56.
- [9] Standaert-de Metsenaere R E A. Economic considerations[A]. In: Debergh PC and Zimmerman RH (ed). Micropropagation [M]. The Netherlands Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 1991: 131—140.
- [10] Dooley J H. Influence of lighting spectra on plant tissue culture[A]. Presented at an ASAE(American Society of Agricultural Engineers) Meeting[C]. Chicago, Illinois, 1991.
- [11] Jordan K A, Ono E, Norikane J, et al. Control of LEDs to achieve light quality and intensity in tissue culture and micro-propagation studies[J]. Acta-Horticulturae, 2001, (562): 135—140.
- [12] Murakami K, Alga I, Horaguchi I. Red/far—red photon flux ratio used as an index number of morphological control of plant growth under artificial lighting conditions[J]. Acta Horticulturae, 1994, 2: 135—140.
- [13] Fujiwara K, Kozai T. Physical microenvironment and its effects[A]. In: Automation and Environmental Control in Plant Tissue Culture[M]. (ed. By Aitken—Christie J. Kozai T. Smith M A L). The Netherlands Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 1995: 319—369.
- [14] Tanaka M, Takamura T, Watanabe H, et al. In vitro growth of *Cymbidium* plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs) [J]. Journal-of-Horticultural-Science-and-Biotechnology, 1998, 73(1): 39—44.
- [15] Lian M L, Murthy H N, Paek K Y. Effects of light emitting diodes on the in vitro induction and growth of bulbets of *Lilium* oriental hybrid 'Pesaro' [J]. Sci Hort, 2002, 94: 365—370.
- [16] Goins G D, Yorino N C, Sanwo M M, et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under light emitting diodes (LEDs) with or without supplemental blue lighting[J]. J Exp Bot, 1997, 48: 1407—1413.
- [17] Miyashita Y, Kimura T, Kitaya Y, et al. Effects of red light on the growth and morphology of potato plantlets in vitro: using light emitting diodes(LEDs) as a light source for micropropagation[J]. Acta-Horticulturae, 1997, (418): 169—173.
- [18] Nhut D T, Takamura T, Watanabe H, et al. Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs)[J]. Plant Cell, Tiss and Org Cult, 2003, 73: 43—52.
- [19] Hahn E J, Kozai T, Paek K Y. Blue and red light-emitting diodes with or without sucrose and ventilation affects in vitro growth of *Rehmannia glutinosa* plantlets[J]. J Plant Biol, 2000, 43: 247—250.
- [20] Tennessen D J, Singasas E L, Sharkey T D. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research[J]. Photosynth. Res, 1994, 39: 85—92.
- [21] Tuong-Huan L V, Tanaka M. Effects of red and blue light-emitting diodes on callus induction, callus proliferation, and protocorm-like body formation from callus in *Cymbidium* orchid[J]. Environment Control in Biology, 2004, 42(1): 57—64.
- [22] Senger H. The effect of blue light on plants and microorganisms[J]. Phytochem. Photobiol, 1982, 35: 911—920.
- [23] Zeiger E. The biology of stomatal guard cells[J]. Ann. Rev. Plant Physiol, 1983, 34: 441—475.
- [24] Appelgren M. Effects of light quality in stem elongation of *Pelargonium* in vitro[J]. Sci Hort, 1991, 45: 345—351.
- [25] Jao R C, Lai C C, Fang W, et al. Effects of red light on the growth of *Zantedeschia* plantlets in vitro and tuber formation using light-emitting diodes[J]. Hortscience, 2005, 40(2): 436—438.
- [26] Moon H K, Park S Y, Kim Y W, et al. Growth of *Tsuru-rindo* (*Tripterispermum japonicum*) cultured in vitro under various sources of light-emitting diode (LED) irradiation[J]. Journal of Plant Biology, 2006, 49(2): 174—179.
- [27] Nhut D T, Hong L T A, Watanabe H, et al. Growth of banana plantlets cultured in vitro under red and blue light-emitting diode(LED) irradiation source[J]. Acta Hort, 2002, 575: 117—124.
- [28] Nhut D T, Takamura T, Watanabe H, et al. Sugar-free micropropagation of *Eucalyptus citriodora* using light-emitting diodes(LEDs) and film-rockwool culture system[J]. Environment-Control-in-Biology, 2002, 40(2): 147—155.
- [29] Nhut D T, Takamura T, Watanabe H, et al. Artificial light source using light-emitting diode(LEDs) in the efficient micropropagation of *spathiphyllum* plantlets[J]. Acta Hort, 2005, 693: 137—141.
- [30] Rueychi J, Wei F. Growth of potato plantlets in vitro is different when provided concurrent versus alternating blue and red light photoperiods[J]. Hort Science, 2004, 39(2): 380—382.
- [31] 王尔镇, 周启芳. 园艺照明技术的应用与发展[J]. 照明工程学报, 1996, 7(1): 28—35.
- [32] Nichols M, Christie C B. Towards a sustainable "greenhouse" vegetable factory[J]. Acta-Horticulturae, 2002, (578): 153—156.
- [33] Mori Y, Takatsuji M, Yasuoka T. Effects of pulsed white LED light on the growth of lettuce[J]. Journal-of-Society-of-High-Technology-in-Agriculture, 2002, 14(3): 136—140.
- [34] Yanagi T, Okamoto K. Utilization of super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth[J]. Acta-Horticulturae, 1997, (418): 223—228.
- [35] Yorino N C, Goins G D, Kagie H R, et al. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation[J]. HortScience, 2001, 36(2): 380—383.
- [36] Shin K S, Murthy H N, Heo J W, et al. Induction of betalain

- pigmentation in hairy roots of red beet under different radiation sources[J]. *Biologia-Plantarum*, 2003/2004, 47(1): 149—152.
- [37] Andrew C S, Christopher S B, Elizabeth C. Anatomical features of pepper plants(*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light[J]. *Annals of Botany*, 1997, 79: 273—282.
- [38] Choi Y W, Ahn C K, Kang J S, et al. Growth, photomorphogenesis, and photosynthesis of perilla grown under red, blue light emitting diodes and light intensities. *Journal of the Korean Society*[J]. *Horticultural Science*, 2003, 44(3): 281—286.
- [39] Heo J, Lee C, Chakrabarty D, et al. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a light-emitting diode (LED)[J]. *Plant Growth Regul*, 2002, 38: 225—230.
- [40] Goins G D, Yorio N C, Sanwo-Lewandowski M M, et al. Life cycle experiments with *Arabidopsis* grown under red light emitting diodes(LEDs)[J]. *Life Support and Biosphere Science*, 1998, 5: 143—149.
- [41] Heo J W, Lee C W, Murthy H N, et al. Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen persicum* Mill. cv. 'Dixie White' [J]. *Plant Growth Regulation*, 2003, 40: 7—10.
- [42] Heo J, Lee C, Paek K. Characteristics of growth and flowering on some bedding plants grown in mixing fluorescent tube and Light-Emitting Diode[J]. *Acta-Horticulturae*, 2002, (580): 77—82.
- [43] Kirty G M, Tri T O, Smith F D. Bioregenerative planetary life support systems test complex: facility description and testing objectives[R]. SAE Technical Paper Series, 1997, (23): 421.
- [44] Bartsev S I, Mezhevikin V V, Okhonin V A. Evaluation of optimal configuration of hybridlife support system for space[J]. *Adv Space Res*, 2000, 26(2): 3232—3261.
- [45] Penley N J, Schafer C P, Bartoe J D. The international space station as a micro gravity research platform[J]. *Acta Astronautica*, 2002, 50(11): 6912—6961.
- [46] 郭双生, 艾为党, 赵成坚, 等. 受控生态生保系统中植物生长光源的选择[J]. *航天医学与医学工程*, 2003, (16): 490—493.
- [47] Bula R J, Tibbitts T W, Morrow R C. Commercial involvement in the development of space based plant growing technology[J]. *Adv Space Res*, 1992, 12(5): 52—101.
- [48] Barta D J, Tibbitts T W, Bula R J. Evaluation of light emitting diode characteristics for a space based plant irradiation source[J]. *Adv Space Res*, 1992, 12(5): 1412—1491.
- [49] Cuello J L. Latest developments in artificial lighting technologies for bioregenerative space life support[J]. *Acta-Horticulturae*, 2002, (580): 49—56.
- [50] Kim H H, Goins G D, Wheeler R M, et al. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes[J]. *Hort Science*, 2004, 39(7): 1617—1622.
- [51] Kim H H, Wheeler R M, Sager J C, et al. Light-emitting diodes as an illumination source for plants: A review of research at Kennedy Space Center[J]. *Habitation*, 2004, 10(2): 71—78.

Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture

Cui Jin¹, Xu Zhigang^{2*}, Di Xiuru²

(1.College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2.College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The investigations and applications of light emitting diode (LED) in plant protected culture are summarized, which include the characteristics of LED applied in plant protected culture, the applications and prospects of LED in plant tissue culture, protected horticulture and controlled ecological life support system..

Key words: light emitting diode(LED); plant; protected culture