

不同配比红蓝 LED 光对黄瓜果实产量和品质的影响

刘晓英, 徐文栋, 焦学磊, 徐志刚^①

(南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 以荧光灯为对照, 研究不同配比红蓝 LED 光处理[包括 100% 红光、75% 红光-25% 蓝光(R31)、50% 红光-50% 蓝光(R11)、25% 红光-75% 蓝光(R13)和 100% 蓝光]对黄瓜(*Cucumis sativus* Linn.)果实性状、产量及营养品质的影响。结果表明:100% 红光处理组黄瓜植株生长缓慢, 果实发育异常, 果实单株产量及 V_c 、可溶性糖和可溶性蛋白质的含量均低于其他处理组。100% 蓝光处理组的果实发育正常, 果实单株产量显著低于红蓝 LED 光组合处理组, 而果实中可溶性糖、蔗糖、游离氨基酸和可溶性固形物的含量总体上显著高于其他处理组, 可溶性蛋白质含量也较高。R31 处理组黄瓜果实的单果鲜质量显著高于其他处理组; R31 和 R11 处理组的果实单株产量显著高于其他处理组, R11 处理组的黄瓜果实中 V_c 和可溶性蛋白质含量明显高于其他处理组。上述研究结果显示: 黄瓜果实的单株产量和营养品质受红蓝光协同作用的影响, 设施栽培黄瓜生产的较适宜光照比例为 50% 红光-50% 蓝光。

关键词: 黄瓜; 红蓝 LED 光; 果实; 单株产量; 营养品质

中图分类号: S625.5⁺2; S642.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2016)02-0080-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.02.10

Effect of different proportions of red and blue LED lights on yield and quality of fruit of *Cucumis sativus* LIU Xiaoying, XU Wendong, JIAO Xuelei, XU Zhigang^① (College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2016, 25(2): 80-84

Abstract: Taking fluorescent lamp as the control, effect of different proportions of red and blue LED lights [including 100% red light, 75% red light-25% blue light (R31), 50% red light-50% blue light (R11), 25% red light-75% blue light (R13) and 100% blue light] on traits, yield and nutritional quality of fruit of *Cucumis sativus* Linn. were researched. The results show that in the treatment group of 100% red light, seedling of *C. sativus* grows slowly, development of fruit is abnormal, and yield per plant and contents of V_c , soluble sugar and soluble protein in fruit are lower than those in other treatment groups. In the treatment group of 100% blue light, development of fruit is normal, fruit yield per plant is significantly lower than that in the combined treatment groups of red and blue LED lights, while contents of soluble sugar, sucrose, free amino acids and soluble solid in fruit are generally significantly higher than those in other treatment groups, and soluble protein content is also high. Fresh weight per fruit of *C. sativus* in R31 treatment group is significantly higher than that in other treatment groups, fruit yield per plant in R31 and R11 treatment groups is significantly higher than that in other treatment groups, and also, contents of V_c and soluble protein in fruit in R11 treatment group are significantly higher than those in other treatment groups. It is suggested that yield per plant and nutritional quality of fruit of *C. sativus* is affected by synergistic effect of red and blue lights, and more suitable light proportion for culturing *C. sativus* in greenhouse is 50% red light-50% blue light.

Key words: *Cucumis sativus* Linn.; red and blue LED lights; fruit; yield per plant; nutritional quality

收稿日期: 2015-02-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA103003); 国家农业部公益性行业(农业)科研专项(201303108)

作者简介: 刘晓英(1972—),女,新疆奇台人,博士,副教授,主要从事植物光生物学与环境调控研究。

^①通信作者 E-mail: xuzhigang@njau.edu.cn

光谱能量分布显著影响植物的生长发育、光合作用、形态建成及产量品质^[1]。波长 640 ~ 660 nm 的红光与波长 430 ~ 450 nm 的蓝紫光是植物进行光合作用和光形态建成的主要光谱^[2]。其中,由红橙光辐射吸收的光能约占植物生理辐射光能的 55%,由蓝紫光辐射吸收的光能约占植物生理辐射光能的 8%^[3]。红蓝复合光能明显促进辣椒 (*Capsicum annuum* Linn.)^[4]、南非醉茄 [*Withania somnifera* (Linn.) Dunal.]^[5]、菊花 [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tzvel.]^[6]、黄瓜 (*Cucumis sativus* Linn.)^[7-8] 和东方百合 (*Lilium oriental hybrid 'Pesaro')*^[9] 等植物的生物量积累,红蓝光已成为设施栽培植物全人工光照或补光的主要作用光谱^[10]。

人工补光及光环境精准调控是设施作物产量和品质提高的重要技术之一。LED(light-emitting diode)能柔性调制光谱,而适合的光谱能促进植物生长,提高产量和品质。香蕉 (*Musa acuminata* Colla) 试管苗在光密度 $60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的红蓝复合光(光密度比 4:1)下,芽和根鲜质量较高^[11];菊花幼苗在红蓝光(光密度比 1:1)的复合 LED 光下叶片的净光合速率、干质量和鲜质量均最高^[6];光密度比 2:1 的红蓝复合光对赤桉 (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) 幼苗的生长有显著促进作用^[12]。上述研究结果表明,植物对红光和蓝光的需求量因种类不同而存在一定的差异。

黄瓜是葫芦科 (Cucurbitaceae) 重要的蔬菜作物之一,也是设施栽培的主要蔬菜之一,因果实具有丰富的营养价值和预防保健功能深受消费者的青睐。曹刚等^[13]认为,光密度比 8:2 的红蓝复合光有利于黄瓜幼苗的生长;Hao 等^[14]研究认为,在温室中采用 LED 补光能明显提高黄瓜的感观品质,并且显著增加黄瓜结果初期的产量。但有关全生育期光照对黄瓜产量和品质影响的研究还比较少见,LED 所提供的光环境虽与自然光环境有所差异,但可以研究精确调控光环境下植物的生长反应,揭示植物的生长机制^[15],因而,目前研究者多采用 LED 模拟光照进行相关研究。

本研究中,作者调制红蓝 LED 的光谱能量分布对黄瓜进行全生育期照光,旨在探明不同配比红蓝 LED 光对黄瓜果实性状和产量以及维生素 C (V_C)、可溶性固形物、可溶性糖、蔗糖、可溶性蛋白质和游离氨基酸的含量等品质指标的影响,以期寻找设施生产高效优质黄瓜的光调控参数。

1 材料和方法

1.1 材料和实验设计

实验在南京农业大学 LED 植物光源研究中心进行,以黄瓜品种‘露丰’(‘Lufeng’)为实验材料。种子催芽 5 d 后,于 2014 年 3 月 5 日播种于直径 20 cm 的营养钵中,采用蔬菜栽培专用基质育苗。待长至两叶一心时进行光照处理,以荧光灯(CK)为对照,分别置于 5 种不同配比的红蓝 LED 光组合下,光密度设为 $(300 \pm 5) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。LED 光源处理分别设置为:100% 红光(R)、75% 红光-25% 蓝光(RB31)、50% 红光-50% 蓝光(RB11)、25% 红光-75% 蓝光(RB13)和 100% 蓝光(B)。红光主峰波长 660 nm,半波宽 20 nm;蓝光主峰波长 445 nm,半波宽 20 nm。栽培环境为昼温 $(28 \pm 1) ^\circ\text{C}$,夜温 $(18 \pm 1) ^\circ\text{C}$,空气相对湿度 60% ~ 80%,光照时间 $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$;生长过程进行精细管理。每处理栽植 9 株,3 次重复。3 月 5 日至 4 月 30 日为黄瓜的幼苗期和初花期,5 月份为结果初期,6 月份为结果中期,7 月份为结果后期。各个时期分别取样,进行各指标的测定。

1.2 测定指标与方法

单果鲜质量用 Sartorius BSA124S 天平称量;单果长与单果直径用游标卡尺测量;单株产量为各时期单果鲜质量总和;果实中 V_C 含量采用分光光度法^{[16]248}进行测定;可溶性固形物含量使用 WYT-32 型手持式折射计(糖量计)(福州泉州光学仪器厂)进行测定;可溶性糖和蔗糖含量使用蒽酮比色法^{[16]195}进行测定;可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝法^{[16]184}进行测定;游离氨基酸含量采用水合茚三酮比色法^{[16]192}进行测定。各指标均重复测定 3 次,结果取平均值。

1.3 数据处理

采用 EXCEL 2003 和 SPSS 16.0 软件进行数据分析,然后进行方差分析(ANOVA),并采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果和分析

2.1 不同配比红蓝 LED 光对黄瓜果实性状及产量的影响

不同配比红蓝 LED 光对黄瓜果实性状及产量的影响见表 1。由表 1 可见:各红蓝 LED 光组合处理组

黄瓜单果鲜质量和单株产量高于100%红光、100%蓝光和对照(荧光灯)处理组。100%红光处理组黄瓜的植株弱小,果实发育异常,单果鲜质量、单株产量、果实长和果实直径总体上显著低于其他处理组;100%蓝光处理组的黄瓜单果鲜质量和单株产量均低于红蓝LED光组合处理组;75%红光-25%蓝光(RB31)

处理组黄瓜的单果鲜质量显著高于其他处理组,RB31与50%红光-50%蓝光(RB11)处理组的黄瓜单株产量显著高于其他处理组。在3个红蓝LED光组合处理组中,随着红光比例的降低,黄瓜的单果鲜质量和果实长呈逐渐下降的趋势,而果实直径和单株产量呈先升后降的趋势,以50%红光处理组最高。

表1 不同配比红蓝LED光对黄瓜果实性状及产量的影响($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

Table 1 Effect of different proportions of red and blue LED lights on fruit traits and yield of *Cucumis sativus* Linn. ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

处理 Treatment	单果鲜质量/g Fresh weight per fruit	果实长/cm Fruit length	果实直径/cm Fruit diameter	单株产量/g Yield per plant
100% 红光 100% red light (R)	178.62±6.63c	22.74±0.82b	2.67±0.22c	386.81±18.42d
75% 红光-25% 蓝光 75% red light-25% blue light (RB31)	296.51±1.55a	41.08±2.81a	3.35±0.36b	1 227.24±21.65a
50% 红光-50% 蓝光 50% red light-50% blue light (RB11)	264.31±2.25b	39.92±1.94a	4.32±0.35a	1 318.15±12.37a
25% 红光-75% 蓝光 25% red light-75% blue light (RB13)	248.56±1.42b	32.63±2.72a	3.82±0.37ab	1 179.61±15.32b
100% 蓝光 100% blue light (B)	229.63±2.43bc	34.66±1.03a	3.41±0.56b	907.33±10.27c
荧光灯 Fluorescent lamp (CK)	200.62±2.71c	33.52±0.94a	4.81±0.15a	861.54±12.83c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatments ($P<0.05$).

2.2 不同配比红蓝LED光对黄瓜果实营养品质的影响

不同配比红蓝LED光对黄瓜果实营养品质的影响见表2。

2.2.1 对 V_c 和可溶性固形物含量的影响 由表2可见:50%红光-50%蓝光(RB11)处理组的黄瓜果实 V_c 含量显著高于其他处理组,100%蓝光和75%红光-25%蓝光(RB31)处理组的 V_c 含量也较高;100%红光处理组的黄瓜果实 V_c 含量最低,但与25%红光-75%蓝光(RB13)和对照(荧光灯)处理组间无显著差异。100%蓝光处理组的黄瓜果实中可溶性固形物含量显著高于其他处理组,RB31和RB11处理组的可溶

性固形物含量也较高;100%红光和对照处理组的可溶性固形物含量显著低于其他处理组(RB13处理组除外);RB13处理组的可溶性固形物含量与100%红光和对照处理组无显著差异。

2.2.2 对可溶性糖和蔗糖含量的影响 由表2还可见:100%蓝光处理组的黄瓜果实中可溶性糖含量最高,显著高于其他处理组;100%红光处理组的黄瓜果实中可溶性糖含量最低,但与对照组无显著差异。100%蓝光和RB31处理组的黄瓜果实中蔗糖含量较高,显著高于其他处理组;100%红光、RB11和RB13处理组的黄瓜果实中蔗糖含量次之,且3个处理组间无显著差异;对照组的黄瓜果实中蔗糖含量最低,显

表2 不同配比红蓝LED光对黄瓜果实营养品质的影响($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

Table 2 Effect of different proportions of red and blue LED lights on fruit nutritional quality of *Cucumis sativus* Linn. ($\bar{X}\pm SE$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	V_c 含量/ $mg\cdot g^{-1}$ V_c content	可溶性固形物 含量/% Soluble solid content	可溶性糖 含量/ $mg\cdot g^{-1}$ Soluble sugar content	蔗糖含量/ $mg\cdot g^{-1}$ Sucrose content	可溶性蛋白质 含量/ $mg\cdot g^{-1}$ Soluble protein content	游离氨基酸 含量/ $mg\cdot kg^{-1}$ Free amino acid content
R	18.11±0.54c	1.51±0.12c	0.60±0.07c	0.52±0.02b	0.21±0.05c	293.3±22.5c
RB31	41.62±0.71b	3.92±0.15b	1.57±0.04b	0.70±0.04a	0.60±0.06b	535.1±13.1b
RB11	57.55±0.72a	3.63±0.14b	1.70±0.05b	0.64±0.02b	0.77±0.02a	601.2±19.3b
RB13	38.91±0.81bc	2.92±0.09bc	1.73±0.02b	0.50±0.03b	0.45±0.03b	379.2±15.2c
B	46.68±0.69b	4.64±0.13a	2.06±0.02a	0.71±0.03a	0.72±0.04a	714.1±14.2a
CK	25.85±0.66c	2.25±0.11c	1.42±0.04bc	0.27±0.04c	0.37±0.02c	483.2±15.3bc

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different treatments ($P<0.05$).

²⁾ R: 100% 红光 100% red light; RB31: 75% 红光-25% 蓝光 75% red light-25% blue light; RB11: 50% 红光-50% 蓝光 50% red light-50% blue light; RB13: 25% 红光-75% 蓝光 25% red light-75% blue light; B: 100% 蓝光 100% blue light; CK: 荧光灯 Fluorescent lamp.

著低于其他处理组。

2.2.3 对可溶性蛋白质和游离氨基酸含量的影响
由表2还可见:100%蓝光和RB11处理组的黄瓜果实中可溶性蛋白质含量较高,显著高于其他处理组;RB13和RB31处理组的黄瓜果实中可溶性蛋白质含量次之;100%红光和对照处理组的黄瓜果实中可溶性蛋白质含量较低,显著低于其他处理组。100%蓝光处理组的黄瓜果实中游离氨基酸含量最高,显著高于其他处理组;RB31和RB11处理组的黄瓜果实中游离氨基酸含量次之;100%红光、RB13和对照处理组的黄瓜果实中游离氨基酸含量较低。

3 讨论和结论

植物产量与光环境密切相关,设施补光能明显促进植物的光合作用和生长发育,提高果实的产量和品质^[17]。由于红光和蓝光的光谱能量分布与叶绿素吸收光谱峰值区域一致^[18],因此对植物的生长发育能产生有益作用。本研究结果表明:单一红光(100%红光)处理组的黄瓜植株弱小、生长缓慢、果实发育异常、单果鲜质量小、单株产量低,这可能是由于单一红光使叶片光合机构功能紊乱^[15],不利于植株生长所致。Yanagi等^[19]的研究结果显示:蓝光能增强叶绿素和类胡萝卜素的捕光能力,刺激植物体内隐花色素的活性,从而促进植物的光合作用和生长发育。本研究也有类似的现象:单一蓝光(100%蓝光)下黄瓜植株生长正常,果实发育良好,单果鲜质量和单株产量均高于对照。这也与蓝光能够提高蔬菜作物的抗氧化水平,提高类胡萝卜素^[20]、V_C^[21]和花青素^[22]等影响叶片着色因子的含量有关。红蓝组合光能显著促进生菜(*Lactuca sativa* Linn.)^[23]和甘蓝(*Brassica oleracea* Linn.)^[20]生物量的积累。本研究中,红蓝LED光组合处理能显著提高黄瓜果实的单株产量,但不同配比红蓝光处理对黄瓜果实单株产量的影响不同,其中在50%红光-50%蓝光处理下黄瓜果实的单株产量最高,单果鲜质量也较大。虽然不同植物光受体的种类一样,但每种光受体的数量不同^[24]。对于黄瓜而言,当红光比例在50%~75%之间时,红蓝复合光可能使蓝光受体和红光受体数量接近高效协同工作状态,因而光合效能高、单株产量较高。

不同配比红蓝光谱影响温室蔬菜的品质,适宜的红蓝光配比能有效提高蔬菜营养物质的含量^[25]。糖

是植物光合作用的直接产物,也是生菜营养品质最重要的评价依据^[21]。本研究中,100%红光处理组的黄瓜果实中可溶性糖和蔗糖含量较低,这可能与100%红光处理下黄瓜叶片的光合作用机能失调,无法大量合成光合产物有关^[15]。植物碳代谢和氮代谢过程对立统一:一方面,碳代谢为氮代谢提供能量和碳架^[26],有利于氨基酸的合成;另一方面,CO₂的同化和NO₃⁻的还原原因对光反应产物的竞争而相互抑制^[27]。本研究中,100%蓝光处理下黄瓜果实中可溶性糖、蔗糖、游离氨基酸和可溶性固形物含量都明显高于其他处理组,这可能是由于蓝光诱发了隐花色素和花青素等植物色素活性,从而促进了黄瓜的碳代谢和氮代谢,使代谢产物含量增加^[22]。通常蓝光有利于蛋白质的合成,但25%红光-75%蓝光处理组黄瓜果实中可溶性蛋白质含量却低于50%红光-50%蓝光处理组,推测在25%红光-75%蓝光处理下氨基酸合成量较少,阻碍了蛋白质的合成。光谱分布不仅影响碳氮代谢,还可通过提高可溶性碳水化合物含量而增加V_C含量^[28]。本研究中,50%红光-50%蓝光处理组的黄瓜果实中可溶性糖和蔗糖含量较高,V_C含量也显著高于其他处理组,提升了黄瓜的营养品质。

综上所述,红光比例为50%~75%的红蓝复合光有利于提高黄瓜的单株产量,红光比例为50%的红蓝复合光以及100%蓝光下黄瓜的营养品质较好。根据先高产优质的需求,设施栽培黄瓜推荐红光比例为50%的红蓝复合光,既可保证产量也能获得品质较好的商品黄瓜。不同配比红蓝光对黄瓜产量及品质的影响是一个复杂的过程,受到各方面因素的制约,需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] OLLE M, VIRŠILÉ A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality [J]. *Agricultural and Food Science*, 2013, 22: 223-234.
- [2] MASSA G D, KIM H H, WHEELER R M, et al. Plant productivity in response to LED lighting [J]. *HortScience*, 2008, 43: 1951-1956.
- [3] 徐凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(2): 369-375.
- [4] BROWN C S, SCHUERGER A C, SAGER J C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1995, 120: 808-813.
- [5] LEE S H, TEWARI R K, HAHN E J, et al. Photon flux density and

- light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania somnifera* (L.) Dunal. plantlets[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2007, 90: 141-151.
- [6] 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.
- [7] 王玲平, 周胜军, 朱育强, 等. 不同光质对水果黄瓜育苗的影响[J]. *浙江农业科学*, 2013(8): 976-978.
- [8] 王绍辉, 孔云, 程继鸿, 等. 补充单色光对日光温室黄瓜光合特性及光合产物分配的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 203-206.
- [9] LIAN M L, MURTHY H N, PAEK K Y. Effects of light emitting diodes (LEDs) on the *in vitro* induction and growth of bulblets of *Lilium oriental* hybrid 'Pesaro'[J]. *Scientia Horticulturae*, 2002, 94: 365-370.
- [10] MIZUNO T, AMAKI W, WATANABE H. Effect of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings[J]. *Acta Horticulturae*, 2011, 907: 179-184.
- [11] NHUT D T, TAKAMURA T, WATANABE H, et al. Efficiency of a novel culture system by using light-emitting diode (LED) on *in vitro* and subsequent growth of micropropagated banana plantlets[J]. *Acta Horticulturae*, 2003, 616: 121-127.
- [12] 诸葛强, 关亚丽, 施季森, 等. 组培新技术及其在桉树快繁中的应用[J]. *林业科技开发*, 2003, 17(6): 37-38.
- [13] 曹刚, 张国斌, 郁继华, 等. 不同光质 LED 光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(6): 1297-1304.
- [14] HAO X, ZHENG J M, LITTLE C, et al. LED inter-lighting in year-round greenhouse mini-cucumber production [J]. *Acta Horticulturae*, 2012, 956: 335-340.
- [15] HOGEWONING S W, TROUWBORST G, MALJAARS H, et al. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61: 3107-3117.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] HENDRIKS J. Supplementary lighting for greenhouses[J]. *Acta Horticulturae*, 1992, 312: 65-76.
- [18] 杨其长. LED 在农业与生物产业的应用与前景展望[J]. *中国农业科技导报*, 2008, 10(6): 42-47.
- [19] YANAGI T, OKAMOTO K, TAKITA S. Effect of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants [J]. *Acta Horticulturae*, 1996, 440: 117-122.
- [20] LI H, TANG C, XU Z, et al. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.) [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2012, 4: 262-273.
- [21] LEFSRUD M G, KOPSELL D A, SAMS C E. Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale[J]. *HortScience*, 2008, 43: 2243-2244.
- [22] STUTTE G W, EDNEY S, SKERRITT T. Photoregulation of bio-protectant content of red leaf lettuce with lighting-emitting diodes [J]. *HortScience*, 2009, 44: 79-82.
- [23] JOHKAN M, SHOJI K, GOTO F, et al. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce[J]. *HortScience*, 2010, 45: 1809-1814.
- [24] JIAO Y L, LAU O S, DENG X W. Light-regulated transcriptional networks in higher plants[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2007, 8: 217-230.
- [25] 闻婧, 魏灵玲, 杨其长. LED 在设施园艺中的应用系列(二): LED 在叶菜植物工厂中的应用[J]. *农业工程技术(温室园艺)*, 2009(6): 11-12.
- [26] HUPPE H C, TURPIN D H. Integration of carbon and nitrogen metabolism in plant and algal cells[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1994, 45: 577-607.
- [27] KOWALLIK W. Blue light effects on respiration[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 51-72.
- [28] TOLEDO M E A, UEDA Y, IMAHORI Y, et al. L-ascorbic acid metabolism in spinach (*Spinacia oleracea* L.) during postharvest storage in light and dark[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 28: 47-57.

(责任编辑: 张明霞)