

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.033

设施农业可调光质精确补光系统*

张海辉 胡瑾 杨青 代建国 赵斌 田威

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 针对环境温度、光质和光强对农作物光合作用的影响,提出结合实时环境检测、特定波段补光与定量决策的精确补光方法,设计了基于反馈控制机制的定量决策算法。以单片机为核心控制器件,设计了可调光质的精准补光系统,可根据温度及红蓝光目标光强与实时光强的差值精确计算补光量,通过 PWM 占空比调整 LED 输出光强。实验结果证明系统可实现按需补光;采用的 LED 光源较白炽灯节能 54%,较荧光灯节能 83%;在相同 LED 光源时,较常规 LED 补光系统的节能率在不同光质阈值和气候条件下具有一定波动,平均节能在 30% 以上。

关键词: 设施农业 发光二极管 精确补光 可调光质

中图分类号: S123; S625.5⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0181-06

Realization of Light Quality Adjustable Precise Light Compensating Method in Greenhouse Agriculture

Zhang Haihui Hu Jin Yang Qing Dai Jianguo Zhao Bin Tian Wei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

A precise light compensating method integrated with real-time environmental monitoring, specific wavelength light complementing and quantitative decision-making was proposed. Based on feedback control mechanism, a quantitative decision-making algorithm was put forward. Using a single chip as the central control unit, the light complementing value was accurately calculated based on the environmental temperature and the difference between target and real-time values of light intensity of red and blue light. Light intensity output of LED was adjusted by PWM duty cycle to meet the demand of light complementing. Experimental results show that the system has achieved quantitative multi-waveband light complementing. And it realized the energy saving of 54% and 83% respectively to filament lamp and fluorescent. With the same LED, the system has an average energy saving ability of 30% or more compared to the existed LED light compensating system, and the energy saving rate fluctuated at different light quality thresholds and environment conditions.

Key words Greenhouse agriculture, LED, Precise light compensating, Light quality adjustable

引言

光合作用是植物能量合成的源泉^[1-3],对农作物产量与品质具有重要作用,人工补光技术近年来得到了广泛研究与应用^[4-5]。随着半导体技术发

展,新一代 LED 光源具有热量较低、中心波长选择性强、输出光谱谱线窄等特点,可避免传统光源的常见问题,植物 LED 补光系统成为近期研究热点^[6-8]。现有 LED 补光系统通常采用固定红、蓝光光强和光强比不变的模式实现植物补光,主要存在

收稿日期: 2011-05-19 修回日期: 2011-12-08

* 核高基重大专项(2010ZX01045-001-004)、陕西省科学技术研究发展计划项目(2010K01-21)和以大学为依托的农业科技推广模式建设项目(XTG2010-2)

作者简介: 张海辉,副教授,博士,主要从事农业智能系统、嵌入式计算、网络计算研究,E-mail: zhanghh@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 杨青,教授,博士生导师,主要从事精准农业研究,E-mail: yangtin@nwsuaf.edu.cn

人工手动补光、自动定时补光以及自动监控补光 3 种方式。采用前两种方式的设备结构简单,但人为经验和外界环境变化等因素对系统工作效果影响很大,系统存在灵活性差和补光效果差异大的缺点;第 3 种模式采用了自动检测外界实时光强、自动控制补光灯组开关,可一定程度实现闭环自动补光,但控制粗糙,未能实现定量、精确和按需补光,造成补光不足或补光过剩,影响植物生长和光能利用效率^[9]。

本文在分析植物光合作用机理的基础上,以提高补光效率、降低耗能为目标,提出可调光质精确补光方法,并设计一套设施农业 LED 精确补光系统。

1 光合作用机理与补光方法分析

植物光合作用效率与光的吸收效率、当前环境温度等因素密切相关^[10-12]。作物对光的吸收效率取决于自身色素对光的吸收能力,研究发现,植物光能吸收的主要吸收峰集在 400 ~ 500 nm 和 600 ~ 700 nm 这 2 个波段,因此如果采用传统全波段光照检测或只检测 400 ~ 700 nm 区域辐射波段信号,其测试结果不能精确表征植物实际可利用的光能^[13]。同时,植物在冷害温度或高温条件均可造成光合速率降低,且下降幅度可达 90%,即使在中、低光强条件下也会存在光抑制,甚至光破坏现象,造成不可逆的损害。因此,本文提出了一种与光合作用机理相适应的补光方法,包括光合作用中特定波段光强、环境温度监测以及特定波段补光阵列与定量决策技术。

(1)多环境因子的精准检测方法。实时环境信息获取是定量补光的基础条件,根据光合作用敏感的有效光波波长范围,提出选择 400 ~ 500 nm 和 600 ~ 700 nm 的硅光电池为敏感芯片,设计独立监测这 2 个波段光强的光敏传感器,实现分波段实时检测;同时加入温度检测模块,根据实时温度判断是否进行补光。本方法不仅能提高光的利用率,同时更可避免由于温度胁迫条件下过度补光造成光损害。

(2)特定波段补光阵列。光合作用中,红光为光系统 I、光系统 II 提供能量,完成植物内部淀粉等物质积累;蓝光提供叶绿素形成、气孔开启以及光合节律等生理过程调控所需的能量。由于不同光合色素吸收光谱峰值具有差异性,光合色素对红光吸收峰值在 625 ~ 643 nm,蓝光吸收峰值在 420 ~ 475 nm,可涵盖不同作物不同吸收光谱峰值,提出采用中心波长为 660 nm、半波带宽度为 40 nm 的 LED 作为红光光源,中心波长为 450 nm、半波带宽度为 40 nm 的 LED 作为蓝光光源,半波带

宽度与光合作用有效能量范围相适应。

(3)定量决策方法。相关研究发现不同光谱范围对植物生理影响不同,植物需光量和光质比例在不同生长阶段差异明显^[11-12],固定光质、光强的补光模式难以满足不同阶段差异性需求。且作物在不同阶段的光补偿点和光饱和点具有差异性,补光系统营造的小环境光强应不超过光饱和点,以避免能量无效消耗和光胁迫。本文提出具有适应性变化的定量按需补光决策方法,支持用户分阶段补光参数设置,可根据种植作物各阶段的光饱和点和光补偿点设置不同光质目标量,并通过周期监测得到的当前值与阶段目标值计算下一周期补光值,以此控制补光阵列完成反馈调节,实现光强按需输出的工作模式。

2 定量补光决策算法

算法原理是根据用户预先设定的温度、红蓝光不同光质的目标光强,动态采集 3 类环境因子实时参数,通过计算当前值与目标值之间的差值,利用反馈控制补光灯输出亮度,实现以用户预设值为目标的受控灯组自动控制功能,控制逻辑如图 1 所示。

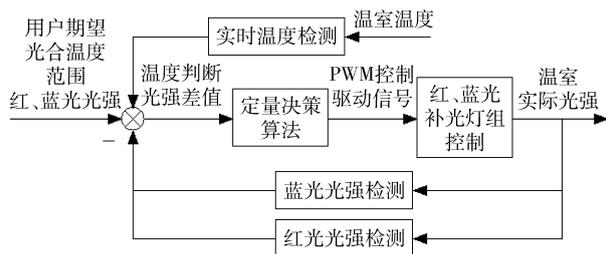


图 1 动态反馈控制机制

Fig. 1 Dynamic feedback control mechanism

算法实现过程分别包含传感器解析函数、用户配置管理函数、定量决策函数、PWM 信号控制函数、键盘中断程序等部分。处理器上电之后,将检测是否已经初始化,若没有初始化,则首先进行 3 类监测参数阈值设置,初始化完成后进入反馈控制逻辑,算法伪代码如下:

```
定义红蓝光目标值为 redLimit, blueLimit; 红蓝光补光输出为 redOut, blueOut; 补光阵列的红蓝光最大补光量为 redMax, blueMax;
```

```
While( 循环补光标志为 true ) {
```

```
    获取当前红、蓝光与温度值 redValue, blueValue, airTemp;
```

```
    如果 airTemp 超出光合作用合理温度范围, 则结束本次循环;
```

```
    if ( redValue > redLimit ) { // 即监测值大于目标值
        当前补光灯关闭时继续关闭, 否则计算下一次
```

补光量 $redOut = redOut - (redValue - redLimit)$;

当 $redOut$ 小于零时,关闭补光灯,否则调用 PWM 信号控制函数,根据 $\theta = redOut/redMax$ 产生占空比为 θ 的方波;}

else { // 监测值小于等于目标值

当前正在补光时,根据差额计算下一次补光量:
 $redOut = redOut - (redValue - redLimit)$,如果待补光量超过最大补光能力,即 $redOut > redMax$,产生声光报警,否则产生与 $redOut$ 相应占空比 θ 的控制方波;

若当前补光灯尚未开启,则启动补光灯,并输出 PWM 控制方波;}

如果持续 5 次不能达到补光目标值,即 $redValue - redLimit > 0.2 \times redLimit$,则认为由于 220 V 市电断电导致补光灯失效,产生声光报警信号;

蓝光处理类似于红光处理过程;

休眠指定周期 T;

}

3 精确补光系统设计

根据以上方法,设计了一套精确补光系统,完成光合作用相关因子的精确监测、特定波长 LED 的控制。系统主要包括电源模块、专用光温检测模块、专用补光阵列、核心控制模块以及用户交互模块,整体系统框图如图 2 所示。

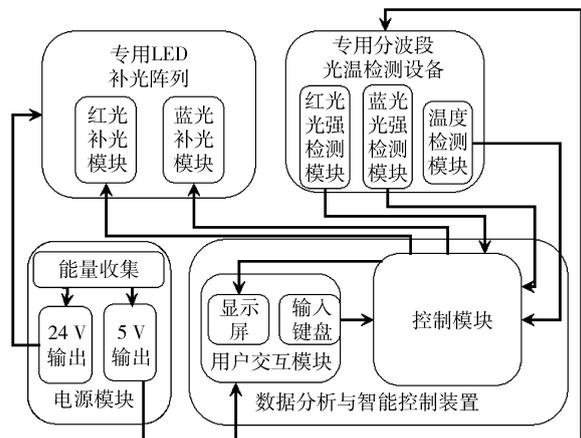


图 2 精确补光系统硬件框图

Fig. 2 Hardware structure of precise light compensating system

其中,电源模块利用太阳能为整个系统供电,通过 LM317 及其外围标准电路稳压后对 24 V 蓄电池充电,同时利用稳压变压模块进行稳压、变压后输出稳定电压 24 V 和 5 V。

用户交互模块由液晶显示屏和 4 × 4 矩阵键盘构成,用户可根据不同作物,设置不同阶段、不同光

质的目标光强和光合作用有效温度范围。系统支持多个阶段参数的存储管理,提高了系统的灵活性和实用性。

3.1 光合作用专用光温检测设备

检测模块分为温度检测、红光光强检测、蓝光光强检测 3 部分,其电路如图 3 所示。温度检测模块由温度传感器 DS18B20 及其标准调理电路组成,实现温度采集。由于硅光电池的短路电流正比于外界光强,在光照检测中采用波长范围在 600 ~ 700 nm 的红光 2DU6 和波长范围在 400 ~ 500 nm 的蓝光 2DU6,作为分波段光强检测的敏感元件,采用 4 路运算放大器 LM324,应用小信号标准 I/V 转换电路和滤波电路对检测到的 2 路硅光电池的短路电流进行转换和放大,经过调理后的 2 路模拟信号分别接入具有 ADC 功能的 I/O 口,实现分波段光强检测。系统采用不同阻值的采样电阻,保证红、蓝光的检测输出电压均为 0 ~ 5 V。

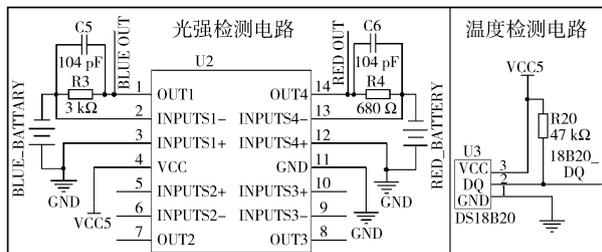


图 3 检测模块电路

Fig. 3 Monitoring module schematic

3.2 专用 LED 补光阵列

专用补光阵列包括补光灯组及其驱动电路,采用红蓝补光灯组独立工作模式,驱动电路为 PT4115 模块,电路图如图 4 所示。采用额定功率为 1 W、中心波长为 660 nm 的窄带红光 LED,额定功率为 1 W、中心波长为 450 nm 的窄带蓝光 LED,分别通过串联方式组成红光 LED 阵列和蓝光阵列。根据驱动芯片 PT4115 的工作特性,2 路驱动芯片均采用 24 V 供电。

根据不同植物红、蓝光最大需光量,每个补光灯组可包含若干同色 LED 阵列,补光灯组最大输出光强应满足最大补光需求。由于红、蓝 LED 额定驱动电流不同,根据理论计算和试验修正得到不同驱动电路的调节电阻,保证占空比为“1”时 LED 输出额定功率。单片机输出 2 路 PWM 信号分别与 PT4115 的 DIM 控制端相连,通过改变 PWM 信号占空比,使红蓝光驱动芯片输出电流发生变化,从而使 LED 阵列的输出光强在零与最大值之间定量变化。

3.3 核心处理器与外围电路

选用工作电压 3.3 ~ 5.5 V 的 STC12C5A60S2

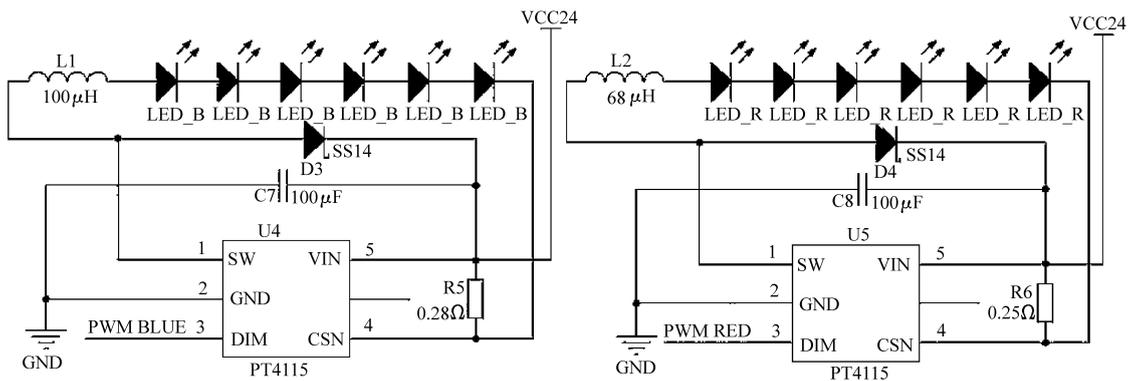


图4 单个LED驱动阵列电路

Fig.4 Single LED driver schematic

作为核心处理器,5 V 电源供电。其中 P1.1 接入红光检测信号、P1.2 接入蓝光检测信号、P1.0 接入温度检测信号、P4.2 输出蓝光 PWM 信号、P4.3 输出红光 PWM 信号。由于单片机晶振频率为 12 MHz,直接产生的 PWM 信号频率大于 PT4115 接收范围,系统采用分频技术将输出频率降至 3 kHz,实现对 PWM 信号频率的控制。进而通过软件计算 2 个波段补光量和 PWM 占空比,定量控制补光输出强度,实现按需精确控制。

4 实验与结果分析

系统在 2010 年 12 月份开始进行了实际生产环境验证实验。实验中采用日光温室作为补光场所,根据温室的实际面积确定 LED 灯组数,测试过程中,每个 LED 灯组内红、蓝光 LED 灯比例为 5:1,红光阈值预设 3 000 lx,蓝光阈值预设 600 lx。设定有效温度范围为 10 ~ 35℃,图 5 所示为 2011 年 2 月 22 日测试的补光曲线。

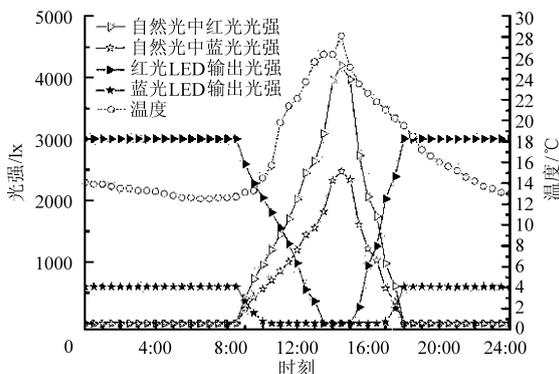


图5 系统测试结果

Fig.5 System experimental results

从图 5 可发现环境温度全天维持在 12 ~ 28℃ 之间,满足温度阈值约定,可进行全天定量补光。管理员通常在每天上午 8:30 ~ 9:00 开棚透光,下午 17:30 ~ 18:00 关棚保温,在关棚期间,棚内光强为零,其余时间棚内自然光强经历前升再降的过程,在

中午 14:00 光照强度最强,与图 5 中检测到的光照曲线一致。由于补光量为需光量与实际光强间的差值,因此当自然光光强为零时需补光量为阈值,并随着自然光强变化过程,补光量经历了先降低再升高的反过程,其中当自然光强大于阈值时补光量为零,也与图 5 中曲线规律一致。

在实验过程中,将本文研发的专用 LED 光源与现有非 LED 光源进行节能对比。在同一设施环境下,将补光阵列放置在 0.5 m 高处,传感器距离中心位置 0.5 m,利用同一组红蓝光传感器进行测量,数据如表 1 所示。可得专用 LED 补光阵列单位功率输出光强最大,由节能归一化数据可知,补光阵列比白炽灯节能 54%,比荧光灯节能 83%。

表 1 3 种补光光源节能对比

Tab.1 Energy saving experimental comparison for three lights compensating equipment

补光灯类型	补光		单位功率 输出光强 /lx·W ⁻¹	节能归 一化值
	灯功 率/W	输出光强/lx		
LED 补 光阵列	红	28	1 060	42.26
	蓝	11.75	620	
白炽灯	红	100	1 750	19.37
	蓝	100	187	
荧光灯	红	72	260	7.36
	蓝	72	270	

2011 年 10 月起将系统与常规 LED 补光设备的耗能和工作情况对比实验,两者均采用窄带红光 LED 灯和蓝光 LED 灯作为光源,其光源的单位功率输出光强基本一致,以此测试提出的智能补光方法的有效性。采用日光温室作为补光场所,测试过程中每个 LED 灯组内红、蓝光 LED 灯比例为 5:1,两组设备最高输出光强为红光的阈值 3 000 lx,蓝光的阈值 600 lx,有效温度范围为 10 ~ 35℃,表 2 为 11 月 19 日测试结果。其中常规 LED

系统采用普通光照传感器检测全波段光强,且控制只有全开和全闭两种状态。实验测得外界全波段光强大于 27 000 lx 时,满足实验中智能系统所设置红蓝光阈值,无需补光。因此实验中常规 LED 系统阈值设置 27 000 lx,即低于此值保持全开状态,反之保持全闭状态。由于关棚后棚内自然光强接近零,因此两系统均保持最高输出光强工

作,耗能相当。但在开棚后外界光强随时间变化,两系统的光强检测值、输出补光量和输出功率数据如表 2 所示。实验证明,在本次阈值设置、外界光强变化的条件下,智能系统较常规 LED 系统节能 63%,通过多次对比实验,在不同阈值和气候条件下节能率具有一定波动,平均节能在 30% 以上。

表 2 智能补光系统与常规补光系统节能对比

Tab. 2 Experimental comparison between the intelligent and the conventional light compensating system

时刻	温度/℃	光强检测结果/lx		LED 输出光强/lx		输出功率/W		
		常规	智能	常规	智能	常规	智能	
9:00	14.3	6 465	红光	725	3 000	2 275	90.54	63.65
			蓝光	410	600	190		
10:00	15.2	10 660	红光	1150	3 000	1 850	90.54	48.84
			蓝光	659	600	0		
11:00	20.5	14 860	红光	1 680	3 000	1320	90.54	34.85
			蓝光	985	600	0		
12:00	23.1	21 854	红光	2 415	3 000	585	90.54	15.44
			蓝光	1 421	600	0		
13:00	25.7	27 547	红光	3 054	0	0	0	0
			蓝光	1 805	0	0		
14:00	27.5	37 514	红光	4 187	0	0	0	0
			蓝光	2 445	0	0		
15:00	26.1	24 410	红光	2 780	3 000	220	90.54	5.81
			蓝光	1 605	600	0		
16:00	23.8	15 576	红光	1 795	3 000	1 205	90.54	31.81
			蓝光	1 013	600	0		

实验证明本文提出的补光方式可行,在温度适宜时将温室内的红、蓝光光照强度维持在阈值范围之内,满足了植物光合作用的生长需求,并有效提高了能量利用效率。

5 结束语

在分析植物光合作用机理的基础上,针对不同植物各阶段对温度和光强的不同需求,提出了与光合作用相匹配的特定波段光强、环境温度检测、特定波段补光以及定量决策方法。基于该方法,采用

STC12C5A60S2 单片机作为处理模块,开发了 LED 植物精确补光设备,弥补了现有补光设备的不足,实现了农作物的精确补光。实验证明系统可根据外界环境变化动态调整补光量,避免了不同阶段补光不足和过量的问题;采用的 LED 光源与白炽灯和荧光灯相比分别节能 54% 和 83%;在相同 LED 光源时,较固定补光方式的 LED 补光系统的节能率在不同光质阈值和气候条件下会有一定波动,平均节能在 30% 以上。

参 考 文 献

- 1 Ramalho J C, Marques N C, Semedo J N, et al. Photosynthetic performance and pigment composition of leaves from two tropical species is determined by light quality [J]. *Plant Biology*, 2002, 4(1):112 ~ 120.
- 2 洪宇,童哲. 光敏色素在植物个体发育中的作用[J]. *植物生理学通讯*, 1998, 34(6):417 ~ 422.
Hong Yu, Tong Zhe. Roles of diverse phytochromes during plant development [J]. *Plant Physiology Communications*, 1998, 34(6): 417 ~ 422. (in Chinese)
- 3 陈逢岩,任守静. 光的波长对光合作用的影响[J]. *北京农学院学报*, 1996, 11(1):124 ~ 128.

- Chen Fengyan, Ren Shoujing. Research on effect with wavelength of light in photosynthesis [J]. Journal of Beijing Agriculture College, 1996, 11(1): 124 ~ 128. (in Chinese)
- 4 徐志刚,丁为民,崔瑾,等. 组培室补光光源应用分析与评价[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 62 ~ 64.
Xu Zhigang, Ding Weimin, Cui Jin, et al. Analysis and evaluation of electrical lights in tissue culture works [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 62 ~ 64. (in Chinese)
- 5 曲溪,叶方铭,宋杰琼,等. LED灯在植物补光领域的效用探究[J]. 灯与照明, 2008, 32(2): 41 ~ 45.
Qu Xi, Ye Fangming, Song Jieqiong, et al. The research on the effects of LED in the realm of supplementary lighting on plants [J]. Light & Lighting, 2008, 32(2): 41 ~ 45. (in Chinese)
- 6 Tennessen D J, Singasaas E L, Sharkey T D. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research [J]. Photosynthesis Research, 1994, 39(1): 85 ~ 92.
- 7 Hahn E J, Kozai T, Paek KY. Blue and red light-emitting diodes with or without sucrose and ventilation affects in vitro growth of *Rehmannia glutinose* plantlets [J]. J. Plant Biol., 2000, 43(4): 247 ~ 250.
- 8 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.
- 9 史宏志,韩锦峰,官春云,等. 红光和蓝光对烟叶生长、氮代谢和品质的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(2): 215 ~ 220.
Shi Hongzhi, Han Jinfeng, Guan Chunyun, et al. Effects of red and blue light proportion on leaf growth, carbon-nitrogen metabolism and quality in tobacco [J]. Acta Agronomica Sinica, 1999, 25(2): 215 ~ 220. (in Chinese)
- 10 Saebo A, Kreking T, Appelgrren M. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in vitro [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 1995, 41(2): 177 ~ 185.
- 11 蒲高斌,刘世琦,张珍. 不同光质对番茄幼苗生长及抗氧化活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(5): 971 ~ 975.
Pu Gaobin, Liu Shiqi, Zhang Zhen. Effect of light quality on the growth and antioxidant enzyme activities of tomato seedlings [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2004, 32(5): 971 ~ 975. (in Chinese)
- 12 王绍辉,孔云,陈青君,等. 不同光质补光对日光温室黄光产量与品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 119 ~ 121.
Wang Shaohui, Kong Yun, Chen Qingjun, et al. The effects of different light qualities on cucumber fruit quality and yield in greenhouse [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2006, 14(4): 119 ~ 121. (in Chinese)
- 13 胡永光,李萍萍,邓庆安,等. 温室人工补光效果的研究及补光光源配置设计[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版, 2001, 22(3): 37 ~ 40.
Hu Yongguang, Li Pingping, Deng Qing'an, et al. Study on the effect of artificial lighting in greenhouse and disposition design of light source [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science, 2001, 22(3): 37 ~ 40. (in Chinese)