

可调 LED 光源系统设计及其对菠菜生长的影响

刘晓英, 徐志刚, 焦学磊*, 陈卫平

(南京农业大学农学院, 南京 210095)

摘要: 为提供设施农业装备运用的人工光源, 进行了发光二极管(LED)光源系统的硬件及软件设计, 并通过以荧光灯为对照对 6 种柔性组合的 LED 光源, 进行了菠菜生长试验。研究发现该系统具有光质、光强、光周期及占空比柔性可调, 可以作为设施补光及光生物学研究的理想光系统。在该光系统下的菠菜生长试验发现, 菠菜在红蓝黄(RBY)光处理下叶柄长、叶面积、叶柄粗及根长都显著大于其他处理, 生长较其他处理健壮, 且 RBY 光处理菠菜光合色素质量分数显著高于其他处理, 表明在红蓝复合光的基础上添加黄光有利于光合色素的合成, 并显著地促进菠菜的生长, 同时也表明该 LED 光源系统对开展植物补光应用具有一定的现实意义和使用价值。

关键词: 光, 生长, 柔性结构, 菠菜, LED 光源

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.037

中图分类号: S475

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0208-05

刘晓英, 徐志刚, 焦学磊, 等. 可调 LED 光源系统设计及其对菠菜生长的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 208-212.

Liu Xiaoying, Xu Zhigang, Jiao Xuelei, et al. Design on LED flexible light system and its effect on growth of spinach[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 208-212. (in Chinese with English abstract)

0 引言

光对植物的形态建成、生理代谢、生长发育及产品质量有着广泛的调节作用^[1-3]。植物通过光受体感测光强、光质和光周期的变化影响植物的光形态变化, 影响植物的生长、控制植物的发育^[4]。随着设施农业的发展, 人工光源在设施生产中已成为必要的光调控手段, 目前设施补光及光生物学研究通常采用荧光灯、白炽灯、钠灯、镝灯等, 由于光能效的原因限制了其在设施中的有效使用。发光二极管(light emitting diodes, LED)是一种柔性的固体人工电光源, 具有寿命长、低功耗、光谱窄、光量和光质柔性可调、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^[5-7]。由于这些显著特征, LED 适合应用于可控环境中的植物培养或栽培, 如植物组培培养、工厂化育苗及航天生态生保系统。近年来, 吸引了众多科研人员采用 LED 进行植物光响应的研究^[8-15], 由于 LED 性能的提高及经济成本的下降有望替代传统设施的补光光源。前人在植物光生物学方面的研究中采用了 2~3 种波长组合的 LED 光源^[16-18], 该试验装置只能实现 2 种或 3 种组合光谱, 仍不能满足光生物学研究对多光谱和多辐射能参数组合的各种需求。迄今为止, 在相关的科学试验中, 由于无法获得光谱柔性可调的光源,

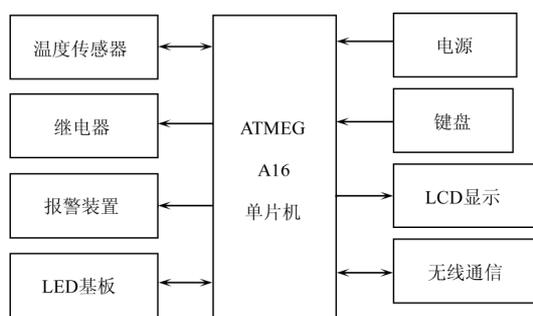
研究者仍不能精细地调控和设定试验过程所需要的光谱参数, 这制约着光生物学的精确定量研究和试验的深入开展, 多光谱动态柔性可调光源的研制具有十分重要的意义。

基于这一技术背景和科研需求, 本文介绍了 1 种光谱柔性可调的 LED 光源系统, 该光源系统可以对近紫外、紫、紫蓝、蓝、绿、黄绿、黄、橙、亮红、深红、远红和近红外等光色的任意波长 LED 进行精确组合调制, 能够对各种波长的光密度、光周期、工作频率实施定量调制, 以满足光生物学的科研和设施人工补光的需求。

1 LED 光源系统的设计

1.1 系统硬件的设计

光谱柔性可调的 LED 光源系统采用模块化设计, 主要由 LED 基板模块、单片机系统、温控模块、人机接口电路(包括键盘和液晶显示)及通讯模块组成, 其组成框图如图 1 所示。



注: LED 为发光二极管; LCD 为液晶显示。

图 1 LED 光源系统硬件框图

Fig.1 Hardware chart of LED light system

收稿日期: 2011-05-09 修订日期: 2011-11-16

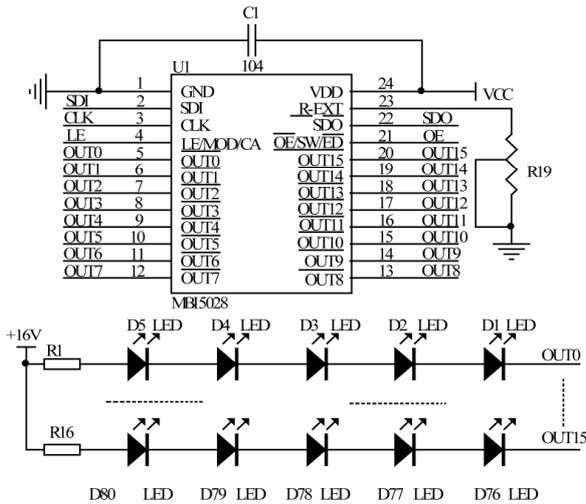
基金项目: 南京农业大学校青年基金(KJ 09001) 国家自然科学基金(30972035)、和国家科技支撑项目(2011BAE01B10 和 2011AA03A1)

作者简介: 刘晓英(1972-), 博士, 从事自动化和光生物学研究。南京 南京农业大学农学院, 210095。Email: liuxy@njau.edu.cn

*通信作者: 焦学磊(1981-), 讲师, 从事农业环境检测和控制研究。南京 南京农业大学农学院, 210095。Email: jiaoxl@njau.edu.cn

1.1.1 LED 基板模块

LED 基板模块主要包括 LED 阵列和 LED 的驱动单元。该模块根据 LED 的参数特性，将交流电变为 16 V 直流电为 LED 阵列供电，LED 采用串联和并联的混合布局方式（如图 2）；LED 的由 MBI5028 芯片驱动。该芯片有 16 路电流控制端，每端可接 1 组 LED，具有良好的恒流特性，且具有可编程电流输出调解功能，每一路都可以通过编程独立控制通断，该特性使 LED 柔性组合成为可能。16 路 LED 分别与 MBI5028 的 16 个输出端相连（图 2），另外，在每个 LED 基板上，都留有级联端，便于 LED 基板的级联，构建大规模 LED 光源。



注：GND 为接地端；VDD (VCC) 为电源端；SDI 为串行数据输入端；CLK 为时钟控制端；LE/MOD/CA 为片选端；R-EXT 为外接电阻输入端；SDO 为串行数据输出端；OE 为输出使能端；OUT 为恒流输出端。D1-D5 LED 元件标号；U1 MBI5028 元件标号；C1 电容元件标号；R1,16,19 电阻元件标号。

图 2 LED 基板模块
Fig.2 Module of LED panel

1.1.2 单片机系统

采用 CC2530 Zigbee 无线单片机，其内部内嵌 32 kB 的 flash 程序存储器，8kB 的 SRAM，A/D 和 Zigbee 无线通讯模块。本光源系统采用 CC2530 单片机减少了外围电路，增加了可靠性，降低了成本。该单片机具有多路脉宽调制 (pulse width modulation) 输出，特别适合本光源系统的频率和占空比的调控。

1.1.3 温控模块

LED 基板由于 LED 数量较多，在工作中会产生热量的积累，热量的积累会降低 LED 的发光性能，引起严重的光衰现象。为了保证 LED 的发光性能，在增加 LED 散热铝基板的同时，LED 基板上还设计了温控单元，对 LED 基板温度进行实时监控。温度传感器采用美国 Dallas 半导体公司生产的 DS18B20，该温度传感器，温度精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，采用单总线控制，在 1 条总线上可挂接 127 个该温度传感器，减少了线路的连接，控制方便，体积小，价格低，便于实现高效的测温网络。当温度高于设定温度时，由单片机控制继电器接通安装在基板上的风扇工作，实施对 LED 基板降温，使系统工作在安全的温度范围内。此外，为了防止由于风扇由于故障而影响降温措

施，本系统还设置了上限温度，当超过上限温度时，采用蜂鸣器报警，以便工作人员人工调控。

1.1.4 人机接口模块

人机接口模块包括键盘和液晶显示 LCD (liquid crystal display)，LED 光源系统的工作频率、占空比、可编程电流参数可通过键盘进行设置，并且利用 LCD 液晶实时显示系统的设定频率、占空比、可编程电流值、LED 基板实时温度。

1.1.5 通讯模块

本系统除可利用键盘进行参数的设定，也可与电脑进行实时通讯，单片机与 PC 通讯采用 Zigbee 无线通讯模式，光源系统工作参数也可通过 PC 机实时设定和监控单片机系统的工作，同时便于实现系统自动化管理和大规模的 LED 光源的调控。同时，为实现远程化监控和管理，预留了通用分组无线业务 (general packet radio service) 接口。

1.2 软件设计

1.2.1 单片机软件设计

软件的源程序在 IAR 软件开发环境下设计，运用单片机 C 语言编写。软件采用模块化设计思想，整个系统由以下子模块组成：主程序模块、时基调控模块、LED 基板驱动模块、温控模块、存储模块、键盘控制模块、显示模块、通讯模块。软件流程图如图 3 所示。

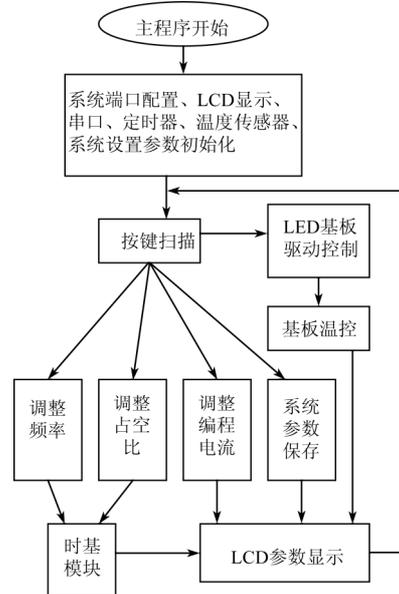


图 3 软件流程图

Fig.3 Flow chart of software

系统首先完成各模块的初始化，并进行系统设置参数的读取和显示，然后扫描键盘，若有键按下则进行相应功能设置，若无则直接进行 LED 基板控制和温度的实时监测，并把个参数显示在液晶屏上。其中时基模块是整个系统的核心，通过该模块完成各项参数的实时调整，该模块采用定时器控制。

在利用 PC 机进行光源系统控制时，软件采用无线中断方式接收和发送数据，并根据 PC 机的控制要求进行功

能函数的调用。

1.2.2 PC 机通信软件设计

PC 机软件通信软件采用 VC#语言编写, 界面友好, 易于操作。使用 MSCOMM (microsoft communications control) 控件通过 RS232 接口 Zigbee 模块连接, 实现与光源系统无线连接。在发送数据格式上采用了先发送指令, 再发送数据的编排方式, 通过给光源不同系统参数设置编码作为指令码, 数据发送到光源系统后, 由单片机串口中断程序进行处理, 然后根据指令码来调用调整系统参数的函数。光源系统实时参数的上传也采用此模式。

2 柔性可控 LED 光源下的菠菜生长试验

2.1 试验材料与光处理

试验材料为尖叶菠菜, 品种为“荷兰 3 号”。试验于 2008 年 11 月 1 日进行, 分别将刚出苗的各 30 株幼苗置于荧光灯 (对照, CK) 和由不同光色 LED 组合的 6 个光处理下照射 30 d, LED 光处理分别为: 红蓝黄绿紫 (Z)、红蓝黄紫 (RBYP)、红蓝绿 (RBG)、红蓝黄 (RBY)、红蓝紫 (RBP)、红蓝 (RB), 重复 2 次。LED 光源光通量密度均设为 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光周期为昼 14 h, 夜 10 h, 昼/夜温度设置为 $25^\circ\text{C}/15^\circ\text{C}$, 相对湿度为 60%~80%。生长光源为前述的 LED 系统光源, 分别按阵列方式排列红 (660 nm)、蓝 (470 nm)、黄 (590 nm)、绿 (525 nm)、紫色 (390 nm) LED, 光色配比为每 36 个为 1 单元, 各色 LED 分布如图 4 所示, 开闭单独控制, 生长系统按空间大小组合后置于顶部和侧面, LED 灯板位置可随植物生长高度柔性调节。光源占空比设置为 100%。

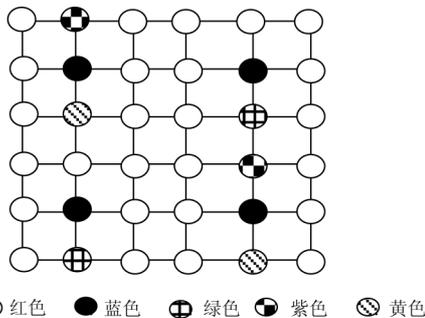


图 4 LED 光源阵列图

Fig.4 Different color LED distribution in light system

2.2 指标的测定方法

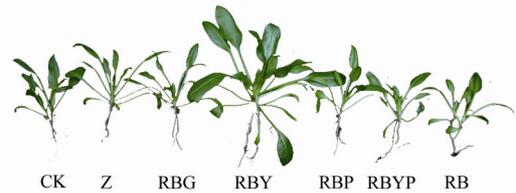
光处理 30 d 后, 用直尺测量叶柄长、根长, 用油标卡尺测量叶柄粗, 用叶面积仪测量倒 3 叶单叶叶面积, 用丙酮法提取光合色素, 用分光光度计测量并计算各色素含量。

3 结果与分析

3.1 不同 LED 光源对菠菜生长和形态影响

如图 5 与表 1 所示, 与对照相比, Z、RBG、RBP、RBYP 及 RB 处理菠菜幼苗的叶柄长、叶面积、叶柄粗、根长及外观形态无显著变化, 而 RBY 处理的叶柄长、叶

面积、叶柄粗、根长显著增大, 而外在形态显著不同于其他处理。与 RB 处理相比, Z、RBG、RBP、RBYP 处理上述指标无显著差异, 但添加其他光色的光后上述指标都有增大的趋势。



注: CK 为荧光灯; Z 为红蓝黄绿紫 LED; RBG 为红蓝绿 LED; RBY 为红蓝黄 LED; RBP 为红蓝紫 LED; RBYP 为红蓝黄紫 LED; RB 为红蓝 LED。
图 5 不同 LED 光源下菠菜幼苗形态图

Fig.5 Morphologic photo of spinach seedlings under LED light

表 1 不同 LED 光源对菠菜形态指标影响

Table 1 Effect of LED light on morphologic parameter of spinach seedlings

光处理	叶柄长/cm	单叶叶面积/ cm^2	叶柄粗/cm	根长/cm
荧光灯 CK	2.630b	3.232b	1.006b	4.933b
红蓝黄绿紫 Z	2.983b	2.628b	0.900b	4.870b
红蓝绿 RBG	3.093b	2.166b	0.867b	4.863b
红蓝黄 RBY	4.206a	8.075a	1.553a	7.213a
红蓝紫 RBP	3.146ab	2.887b	0.867b	4.483b
红蓝黄紫 RBYP	2.643b	2.829b	1.000b	5.036b
红蓝 RB	2.553b	1.524b	0.860b	4.363b

注: 同列中不同字母表示差异显著性 ($P < 0.05$), 下同。

3.2 不同 LED 光源对菠菜幼苗光合色素的影响

不同 LED 光处理下, 菠菜幼苗叶片中光合色素的含量显著不同。与 CK 处理相比, RBY 处理叶绿素 a、叶绿素总量、类胡萝卜素显著增大, 叶绿素 b 也增大, 但与 CK 处理的差异不显著; RBYP 处理的光合色素质量分数显著低于 CK 处理, 而 RBG 处理的光合色素质量分数大于 CK 处理, 但差异不显著; Z、RBP 和 RB 处理合色素的含量低于 CK 处理, 与其差异也不显著。叶绿素 a/b 在各处理间无显著差异。与 RB 处理相比, Z、RBG、RBP、RBYP 处理光合色素质量分数无显著差异, 但添加其他光色的光后光合色素有增大的趋势 (表 2)。

表 2 不同 LED 光源对菠菜幼苗光合色素质量分数影响

Table 2 Effect of LED light on photosynthetic pigments content of spinach seedlings

光处理	叶绿素 a/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	叶绿素 b/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	叶绿素 a/b	叶绿素 (a+b)/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	类胡萝卜素/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
荧光灯 CK	1.549b	0.626ab	2.477a	2.176b	0.568bc
红蓝黄绿紫 Z	1.394bc	0.554bc	2.516a	1.948bc	0.549bc
红蓝绿 RBG	1.593ab	0.647ab	2.460a	2.241ab	0.612b
红蓝黄 RBY	1.824a	0.746a	2.447a	2.570a	0.716a
红蓝紫 RBP	1.423bc	0.582bc	2.449a	2.005bc	0.566bc
红蓝黄紫 RBYP	1.201c	0.485c	2.480a	1.686c	0.487c
红蓝 RB	1.515b	0.636ab	2.399a	2.151b	0.599b

LED 柔性组合光源对菠菜进行光处理研究发现, 在红蓝光的基础上添加紫光、绿光、黄光+紫光复合光及黄光+紫光+绿光复合光可以略增大菠菜的叶柄长、叶面积、叶柄粗及根长, 但不能根本改变这些性状, 而添加单色的黄光却可以显著提升菠菜的生长, 这些表现与刘晓英^[15]在樱桃番茄上的研究结果相同, 说明红蓝组合光添加其他光色的光会促进菠菜的生长, 尤其是添加单色的黄光后其促进效应更加明显, 从复合光和单色光的表现不同可发现在红蓝光的基础上添加单色光和添加单色光的复合对菠菜生长的效应并不是单色光效应的简单叠加, 而是相互制约的关系。光合色素能够吸收、传递和转换光能, 为植物进行光合作用的提供能量基础, 光合色素质量分数与组成直接影响叶片的光合速率^[19], 进一步影响植物的生长。RBY 处理光合色素质量分数显著大于其他处理, 也许使其生长较其他处理旺盛的原因, 这与刘晓英对樱桃番茄研究的结果不同^[20], 各处理下光合色素 RBYP 处理要高, 这是因为樱桃番茄为茄果类蔬菜, 而菠菜是叶菜类植物, 它们对光照强度的需求不同, 樱桃番茄在光照强度为 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时造成了弱光胁迫, 而菠菜却没有产生弱光胁迫或者胁迫较弱。

4 结 论

本光源系统采用先进的发光二极管驱动技术设计硬件、采用单片机 C 语言设计软件, 通过菠菜的光质柔性组合生长试验验证:

1) 该光源系统能够按照各种光实验的设计方案对光质、光强、光周期等光参数进行柔性精确调控, 该光源系统能有效地为设施补光服务, 并可以为发光二极管光源对植物生长发育的影响的研究及设施补光提供良好的保障。

2) 通过菠菜用柔性组合发光二极管光源的试验研究发现, 在红蓝光的基础上添加黄光可以显著地提高光合色素的含量并促进菠菜的生长。

[参 考 文 献]

- [1] Ward J M, Cufir C A, Denzel M A, et al. The D of transcription factor OBP3 modulates phytochrome and cryptochrome signaling in arabidopsis[J]. *Plant Cell*, 2005, 17(2): 475—485.
- [2] Du H T, Liu S Q, Pu G B. Effects of light qualities on growth and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of color pepper seedling[J]. *J Acta Agriculturae Boreali Occidentalis Sinica*, 2005, 14(1): 41—45.
- [3] Zheng J, Hu M J, Guo Y P. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1619—1624.
- [4] Héraut Brona V, Robina C, Varlet Grancher C, et al. Phytochrome mediated effects on leaves of white clover: consequences for light interception by the plant under competition for light[J]. *Annals of Botany*, 2001, 88(4): 737—743.
- [5] Guo S, Liu X, Ai W, et al. Development of an improved ground-based prototype of space plant-growing facility[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(5): 736—741.
- [6] 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)
- [7] 邸秀茹, 焦学磊, 崔瑾, 等. 新型光源 LED 辐射的不同光质配比光对菊花组培苗生长的影响[J]. *植物生理学通讯*, 2008, 44(4): 661—664.
Di Xiuru, Jiao Xuelei, Cui Jin, et al. Effects of different light quality ratios of LED on growth of chrysanthemum[J]. *Plant Physiology Communications*, 2008, 44(4): 661—664. (in Chinese with English abstract)
- [8] Ohashi-Kaneko K, Matsuda R, Goto E, et al. Growth of rice plants under red light with or without supplemental blue light[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(4): 444—452.
- [9] Liu Xiaoying, Guo Shirong, Xu Zhigang, et al. Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of LEDs[J]. *Hortiscience*, 2011, 45(2): 1—5.
- [10] 陈文昊, 徐志刚, 刘晓英, 等. LED 光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(7): 1434—1440.
Chen Wenhao, Xu Zhigang, Liu Xiaoying, et al. Effect of LED light source on the growth and quality of different lettuce varieties[J]. *Acta Bot Boreal Occident Sin*, 2011, 31(7): 1434—1440. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王志敏, 宋非非, 徐志刚, 等. 不同红蓝 LED 光照强度对叶用莴苣生长和品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2011(16): 44—49.
Wang Zhimin, Song Feifei, Xu Zhigang, et al. Effect of red and blue LED light intensity on growth and quality of lettuce[J]. *China Vegetables*, 2011(16): 44—49. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘燕德, 彭彦颖, 高荣杰, 等. 基于 LED 组合光源的水晶梨可溶性固形物和大小在线检测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 338—343.
Liu Yande, Peng Yanying, Gao Rongjie, et al. Online detection of soluble solids content and size of crystal pear based on LEDs light source-detector[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 338—343. (in Chinese with English abstract)
- [13] Ryo M, Keiko O K, Kazuhiro F, et al. Effects of blue light deficiency on acclimation of light energy partitioning in PSII and CO₂ assimilation capacity to high irradiance in Spinach leaves[J]. *Plant Cell Physiology*, 2008, 49(4): 664—670.
- [14] 刘晓英, 常涛涛, 郭世荣, 等. 红蓝 LED 光全生育期照射对樱桃番茄果实品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2010(22): 22—27.
Liu Xiaoying, Chang Taotao, Guo Shirong, et al. Effect of irradiation with blue and red LED on fruit quality of cherry tomato during growth period[J]. *China Vegetables*, 2010(22): 21—27. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈强, 刘世琦, 张自坤, 等. 不同 LED 光源对番茄果实转色期品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 156—161.
Chen Qiang, Liu Shiqi, Zhang Zikun, et al. Effect of different light emitting diode sources on tomato fruit

- quality during color-changed period[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 156—161. (in Chinese with English abstract)
- [16] Jao R C, Fang W. An adjustable light source for photo-phyto related research and young plant production[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(5): 601—608.
- [17] 刘卫国, 宋颖, 邹俊林, 等. LED 灯模拟作物间作套种群体内光环境的设计与应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 288—292.
Liu Weiguo, Song Ying, Zou Junlin, et al. Design and effect of LED simulated illumination environment on intercropping population[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 283—292. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张海辉, 杨青, 胡瑾, 等. 可控 LED 亮度的植物自适应精准补光系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 153—158.
Zhang Haihui, Yang Qing, Hu Jin, et al. Self-adaptive and precise supplementary lighting system for plant with controllable LED intensity[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 153—158. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郑洁, 胡美君, 郭延平. 光质对植物光合作用的调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1619—1624.
Zheng Jie, Hu Meijun, Guo Yanping. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1619—1624. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 等. 不同光质 LED 弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(4): 645—651.
Liu Xiaoying, Xu Zhigang, Chang taotao, et al. Growth and photosynthesis of cherry tomato seedling exposed to different low light of LED light quality[J]. ACTA Botanica Boreali Occidentalia Sinica, 2010, 30(4): 645—651. (in Chinese with English abstract)

Design on LED flexible light system and its effect on growth of spinach

Liu Xiaoying, Xu Zhigang, Jiao Xuelei*, Chen Weiping

(College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to introduce effect of the light emitting diodes (LED) light system on growth and chlorophyll content of spinach, hardware and software of the flexible controlled LED light system were designed. The growth test of spinach under six different light quality LED and set fluorescence lamp as control was carried out. The result showed that light quality, light intensity, photoperiod and duty cycle the LED light system could be flexible controlled and were good light system for supplement light or researches of photobiology. The result of growth experiment in spinach under the light treatments showed that petiole length, leaf area, petiole and root length of the red, blue and yellow (RBY) LED treatment were significantly greater than those of other treatments, and more robust. Furthermore, photosynthetic pigment content of the RBY treatment was significantly higher than other treatments. Supplement yellow light on the basis of the red and blue composite light was benefit to synthesize photosynthetic pigments and significantly promote the growth of spinach.

Key words: light, growth, flexible structures, spinach, LED light system