

红、蓝双通道滤光膜对植物生长的影响

欧浪情^{1*}, 何子力^{2*}, 刘路青^{2*}, 钱大憨², 张放心², 李明², 张昕昱², 张智深², 王慧超¹, 高俊山^{1,**}, 刘文^{2,**}

¹安徽农业大学生命科学学院, 合肥230036; ²中国科学技术大学物理学院, 合肥230026

摘要: 为了评估新型光伏农业系统中在滤光膜下的植物生长是否会受到影响, 在玻璃温室条件下, 采用土培盆栽的方法种植生菜(*Lactuca sativa*)、黄瓜(*Cucumis sativus*)和空心菜(*Ipomoea aquatica*), 设置植物上方有膜和无膜两组进行对照, 测试分析了滤光膜对不同植物生长与品质的影响。结果表明, 与无膜处理相比, 滤光膜处理的植株在形态、光合和品质指标上均表现更加优异, 表明在滤光膜下的植株生长更好, 品质更优。

关键词: 光伏农业; 滤光膜; 植物生长; 形态指标; 光合指标; 品质指标

光伏农业是将太阳能光伏发电与现代化农业生产相结合的一种新型农业, 在有效利用太阳能资源、产出清洁绿色能源的同时, 开启了现代生态农业的一种新型发展模式(杨月梅等2015)。本课题组研发的光伏农业系统由聚光光伏发电系统和农业大棚两部分组成, 系统原理示意图如图1所示: 在聚光器上贴双带通滤光膜, 将适合植物生长的红、蓝波段光透过供给植物生长而剩下的辐射能经反射聚光用于晶体硅聚光光伏发电, 这种新型光伏农业系统消除了传统光伏农业系统中发电对种地的负面影响。光伏农业大棚不仅可以有效利用太阳能资源发电, 为大棚中植物补光、滴灌等现代农业技术提供电力, 还解决了我国人口密集地区建设光伏系统用地紧张的问题。推广光伏农业系统有助于提高农民收入和农业生产率, 发展新能源, 改善自然环境, 有力推动我国农业现代化进程(房裕东等2015)。

植物在光合作用过程中吸收光谱的光合色素是叶绿素, 高等植物叶绿素主要有叶绿素 a 和叶绿素 b , 还包括类胡萝卜素(蔡庆生2011)。叶绿素 a 和叶绿素 b 光谱吸收曲线如图2所示, 叶绿素 a 和叶绿素 b 在红光区和蓝紫光区都有明显的吸收(卢东昱等2006)。波长为610~720 nm的红、橙光辐射有促进植物体内干物质积累的作用, 约占被吸收的生理辐射光能的85%; 波长为400~510 nm的蓝、紫光辐射可延迟植物开花、促进营养器官生长, 约占被吸收的生理辐射光能的12%; 而植物对波长为510~610 nm的黄、绿光辐射吸收很少(刘彤等2014), 因此植物生长过程中的光能利用率并不高。本课题组研发的双通道滤光膜透射光谱图如

图3所示, 透射光谱与叶绿素吸收谱吻合较好, 理论上可以满足植物生长需求, 同时通过分频利用太阳能提高光能利用率。

只用红、蓝光LED光源进行植物栽培已经在植物工厂中实现并大规模应用(刘水丽2007; 闻婧2009), 但是使用带通滤光膜后, 植物在透射光谱环境下的生长相比无膜时是否会受到影响, 发电与种地是否矛盾, 这些都缺乏相关研究, 这一点对于使用滤光膜的光伏农业技术是否实际可行意义重大。本研究采用有膜与无膜对照的方式对温室内多种植物生长情况进行对比, 考察使用滤光膜对植物生长可能存在的影响, 为光伏农业技术的应用提供支持和参考。

材料与方法

1 实验材料

带通滤光膜: 一种可以用于光伏农业的对红、蓝光高透射, 其他波段高反射的薄膜。透射波段设计成约为400~520和610~720 nm, 与叶绿素光谱响应波段相吻合。

供试植物品种:

‘皇冠’生菜(*Lactuca sativa* L.), 由意大利引进的生菜品种, 极早熟, 耐热性好, 苗期25~30 d, 由北京吉利德丰种子有限公司提供。

收稿 2016-08-04 修订 2016-11-25

资助 国家自然科学基金(31672497和31572468)、安徽省自然科学基金(1408085MKL02)和安徽省生物学重点学科(2014SWQJ009)。

* 并列第一作者。

** 共同通讯作者(E-mail: gaojsh@ahau.edu.cn; wenliu@ustc.edu.cn)。

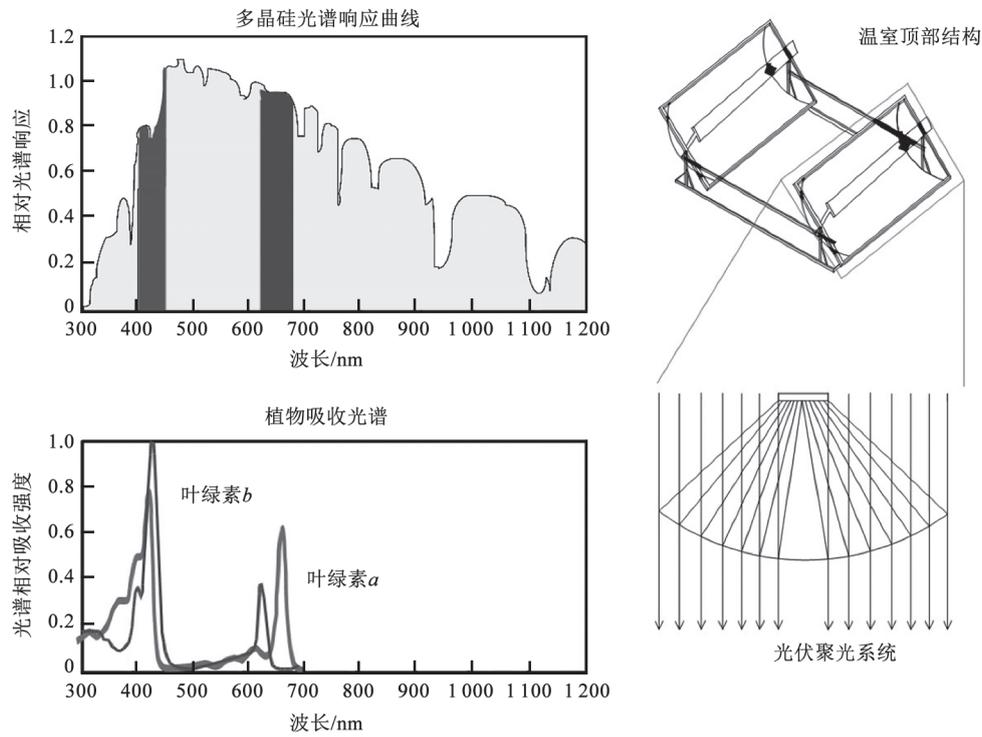


图1 光伏农业系统原理示意图

Fig.1 Principle diagram of photovoltaic agricultural system

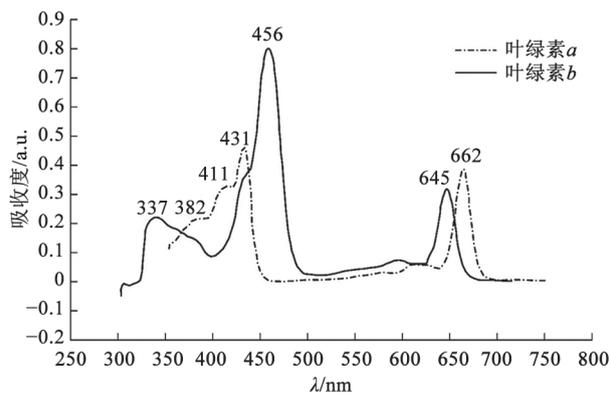


图2 叶绿素a和b光谱吸收曲线图

Fig.2 Absorption spectra of chlorophylls a and b in acetone

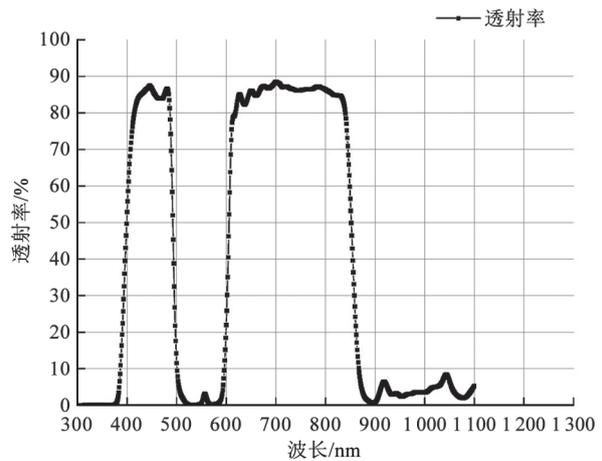


图3 双通道滤光膜透射光谱图

Fig.3 Transmission spectrum of dual-channel optical filter

‘研四’黄瓜(*Cucumis sativus* L.), 为杂交一代选育品种, 中早熟, 苗期35 d, 由山东省鲁阳种子有限公司提供。

‘柳叶’空心菜(*Ipomoea aquatica* Forssk.), 常规种, 耐热, 耐旱, 20~35 d长成, 由贵州省大洋种苗提供。

实验设施概况: 实验于2016年4~5月在玻璃温

室内进行, 温室位于117°7'E 31°50'N; 植物采用种植箱进行种植, 种植箱尺寸为40 cm×40 cm×26 cm; 土壤类型为掺有粪肥的种植土壤。实验装置实物如图4所示, 种植箱分别置于贴有滤光膜和无膜的拱形亚克力板下, 亚克力板前端撑起形成一定倾斜角以便太阳光垂直透过滤光膜。

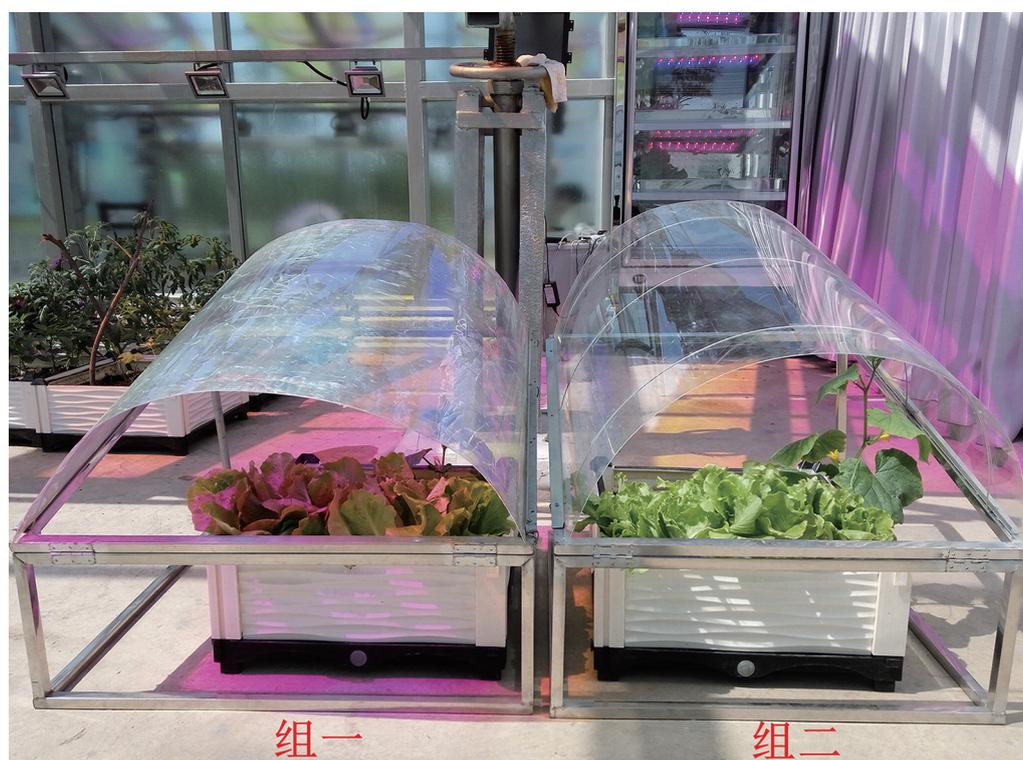


图4 实验装置实物图

Fig.4 Physical map of the experimental facility

2 实验设计

实验中种植两组植物, 每组分黄瓜、生菜、空心菜3种植物, 组一置于有膜的模型下, 组二置于无膜的透明模型下。实验在同一个温室内进行, 两组中空心菜于2016年4月3日同时发苗, 生菜与黄瓜于2016年4月7日选取同一批幼苗同时分别移植到实验种植箱中。培养期浇灌完全营养液。5月1日至5月4日取样测定各项指标, 此外, 在5月11日, 对植物叶片温度变化进行测量。

3 观测项目及方法

3.1 形态指标

在5月1日对3种植物分别进行株高和叶片数的测定。用直尺测量植株根长和株高; 用电子天平称量鲜重和干重, 将鲜重减去干重计算含水量, 含水量=(幼苗叶片鲜重-幼苗叶片干重)/幼苗叶片鲜重 $\times 100\%$; 采用数格子法测定叶面积, 沿着叶子的形状将其画在坐标纸上, 然后数格子, 边缘超过半格的计为1, 不足半格不计数, 格子长宽各为0.5, 面积为0.25, 以此计算叶片面积数; 比叶面积用单叶面积/单叶干重来计算。

3.2 光合指标

从两个对照组中各取3种植物的成熟植株若干进行光合指标的测定。根据叶绿体色素提取液对可见光谱的吸收, 利用分光光度计在某一特定波长测定其吸光度, 然后用公式可以计算出叶绿素含量, 所以只需测定该提取液在3个特定波长下的吸光度 A_1 、 A_2 和 A_3 , 并根据叶绿素 a 、 b 及类胡萝卜素在该波长下的吸光系数即可求出叶绿素含量。采用北京力高泰科技有限公司提供的LI-6400XT便携式光合测试仪测定植株的净光合速率(photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(stomatal conductance, G)、胞间 CO_2 浓度(intercellular CO_2 concentration, C_i)和蒸腾速率(transpiration rate, T_r), 每种植株取3片叶片, 每片叶片测3次取平均值, 以3片所测数据之和作为参考数据, 当天室温 30.1°C , 相对湿度为40%。

3.3 品质指标

品质指标包括地下根系活力、可溶性糖、可溶性蛋白和丙二醛含量。植物根系是活跃的吸收器官和合成器官, 根的生长情况和活力水平直接

影响地上部的营养状况及产量水平。采用甲烯蓝法测定根系活力。采用考马斯亮蓝G-250法测可溶性蛋白,考马斯亮蓝G-250在游离状态下呈红色,在稀酸溶液中当它与蛋白质的疏水区结合后变为青色,前者最大光吸收在465 nm,后者在595 nm,在一定蛋白质浓度范围内(1~1 000 μg)蛋白质与色素结合物在595 nm波长下的吸光度与蛋白质含量成正比,故用于蛋白质的定量测定。可溶性糖含量采用蒽酮法测定,糖在浓硫酸作用下,可经脱水反应生成糠醛或羟甲基糠醛,生成的糠醛或羟甲基糠醛可与蒽酮反应生成蓝绿色糠醛衍生物,在一定范围内,颜色的深浅与糖的含量成正比,故用于糖的定量测定。

3.4 叶片温度

在5月11日上午9:00~11:30对两组中植株叶片测量温度,每30 min测量一次,当天为晴天。

3.5 统计分析

采用Excel 2007进行数据整理,利用无重复性双因素进行差异显著性分析,显著水平为0.05。

实验结果

1 滤光膜对植物形态指标的影响

由表1可知,滤光膜处理对植物的根长、株高和生物量的积累等形态及生长指标具有一定的影响。组一和组二中植株的叶片数和根长无显著差异,但组一中生菜株高显著更高,黄瓜、空心菜略高于组二中的植株。鲜重部分,组一中生菜和黄瓜显著高于组二中的植株,空心菜略高,但不显著;干重部分,组一中的植株均略高于组二中的植株,但差异不显著,所以组一中的生菜和黄瓜含水量显著更高,空心菜略高;叶面积和比叶面积部分,组一中的植株显著高于组二中的植株。以上结果说明组一中植物的形态指标全面优于组二中的植物,滤光膜处理有利于改善植物形态指标。

2 滤光膜对植物光合指标的影响

由表2可知,组一中植株的叶绿素a、b的含量均比组二中的更高,表明组一中3种植株的光合能力更强。对于生菜和空心菜,组一中植株的 P_n 、 G

表1 滤光膜处理对植物生长形态指标的影响

Table 1 Effect of optical filter on morphological indexes of plants

形态指标	生菜		黄瓜		空心菜	
	组一	组二	组一	组二	组一	组二
株高/cm	17.50 ^a	12.83 ^b	15.5 ^a	15.0 ^a	12.67 ^a	11.16 ^a
根长/cm	10.8 ^a	10.5 ^a	9.1 ^a	8.5 ^a	17.5 ^a	16.0 ^a
鲜重/g	24.719 ^a	19.382 ^b	13.416 ^a	10.626 ^a	5.135 ^a	4.6155 ^a
干重/g	0.3973 ^a	0.3804 ^a	1.2499 ^a	1.0131 ^a	1.1902 ^a	0.9729 ^a
含水量/g	24.3217 ^a	19.0016 ^b	12.1661 ^a	9.6129 ^a	3.9448 ^a	3.6426 ^a
叶片数	11 ^a	10 ^a	9 ^a	9 ^a	9 ^a	8 ^a
叶面积/cm ²	78.5 ^a	52.5 ^b	57.75 ^a	35.00 ^a	12.25 ^a	10.50 ^a
比叶面积/cm ² ·g ⁻¹	634.63 ^a	523.02 ^a	496.56 ^a	419.16 ^a	561.93 ^a	530.30 ^a

表中数据为平均值($n=3$),同一种植物的同一指标用不同小写字母标识表示差异显著($P<0.05$),表2和3同。

表2 滤光膜处理对植物光合指标的影响

Table 2 Effect of optical filter on photosynthetic indexes of plants

光合指标	生菜		黄瓜		空心菜	
	组一	组二	组一	组二	组一	组二
叶绿素a含量/mg·g ⁻¹	0.464 ^a	0.289 ^b	1.204 ^a	1.022 ^a	1.321 ^a	1.287 ^a
叶绿素b含量/mg·g ⁻¹	0.294 ^a	0.188 ^b	0.469 ^a	0.376 ^a	0.46 ^a	0.397 ^a
$P_n/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	20.31	19.87	9.25	17.46	24.28	19.41
$G/\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	0.070	0.067	0.052	0.093	0.069	0.038
$C_i/\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	282.19	336.36	267.29	227.16	681.68	1 284.50
$T_r/\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	3.07	2.94	2.25	3.90	2.99	1.82

以及 T_r 均更大, 空心菜尤为明显, 而 C_i 趋势相反, 组一的更小, 表明组一的生菜和空心菜光合能力更强。对于黄瓜, 组一的 P_n 、 G 以及 T_r 远小于组二, C_i 更大, 表明测试的组二中黄瓜叶片的光合能力更强, 这与植株的叶片状态关系很大。

3 滤光膜对植物品质指标的影响

由表3可知, 组一中3种植物的可溶性蛋白含量均略高于组二的, 表明滤光膜对植物中可溶性蛋白是有利的, 但变化不明显。而组一中植物葡萄糖含量均明显高于组二的, 表明有无滤光膜对

植物中可溶性糖含量是有影响的, 滤光膜下植株的可溶性糖含量明显高于无膜下植株的可溶性糖含量。组一植物的根系活跃吸收面积均明显更高, 表明有无滤光膜对植物根的活跃吸收面积是有影响的, 且滤光膜下植株根的活跃吸收面积明显大于无膜下植株根的活跃吸收面积。

4 滤光膜对植物叶片温度的影响

由表4可知, 组一中植株叶片温度均比组二中的低约2~4°C, 且到中午时候组二中叶片最高温度超过30°C。

表3 滤光膜处理对植物品质指标的影响

Table 3 Effect of optical filter on quality indexes of plants

品质指标	生菜		黄瓜		空心菜	
	组一	组二	组一	组二	组一	组二
可溶性蛋白含量/mg·ml ⁻¹	0.102 ^a	0.094 ^a	0.150 ^a	0.127 ^a	0.140 ^a	0.107 ^a
可溶性糖含量/mg·g ⁻¹	4.979 ^a	1.508 ^b	4.071 ^a	3.163 ^a	16.842 ^a	9.578 ^{ab}
根活跃吸收面积/%	90.13 ^a	78.42 ^b	69.58 ^a	61.58 ^a	87.55 ^a	53.94 ^b

表4 滤光膜处理对植物叶片温度的影响

Table 4 Effect of optical filter on leaf temperature of plants

时间	叶片温度/°C					
	生菜		黄瓜		空心菜	
	组一	组二	组一	组二	组一	组二
9:00	16.0	22.9	18.8	24.3	12.7	14.8
9:30	20.6	24.7	19.8	24.7	12.7	14.8
10:00	16.5	19.9	17.4	19.2	21.0	21.2
10:30	21.4	26.9	21.8	24.1	22.4	27.7
11:00	20.7	22.5	22.5	23.2	22.5	25.9
11:30	25.3	27.7	25.0	26.1	28.2	30.5

讨 论

本文以探究用于光伏农业的滤光膜对植物生长的影响为目的, 通过设计有膜遮挡和无膜遮挡两组对照实验来测试植物在生长一段时间后各项指标的差异, 以此来判断滤光膜对植物生长的影响程度, 为光伏农业产业发展提供参考。

实验结果表明, 在组一中滤光膜遮挡下生长的生菜、黄瓜、空心菜3种植物在绝大多数的形态指标、光合指标、品质指标中优于组二中无膜下生长的植物。其中对于黄瓜的光合指标, 组二远优于组一, 出现这一现象的原因可能是黄瓜本身大片的可

测试叶片数量少、叶片之间面积差异很大且叶片存在黄斑等因素影响测试。实验中对植物叶片温度测量结果表明滤光膜使得其下植株叶片温度降低, 无膜情况下, 由于高温导致叶片蒸腾作用加剧, 呼吸作用增强, 因而植物净光合速率下降(张其德1989), 这也是大多数大棚在夏天需要使用遮阳布降温的原因。同时, 滤光膜只透射太阳光谱中有效光合辐射的成分, 其他成分的光被反射利用, 避免植物接收绿光等可能抑制植物生长的光, 从而改善植物生长环境, 提升作物品质。因此可以得到以下结论: 在3~5月份等光照充足的时期使用滤光膜对农作物生长有好处, 可以实现作物增收、改善作物品质等。

本实验表明在夏季农业生产中使用滤光膜覆盖作物对农业生产增收有益处,使用新型光伏农业系统在利用耕地进行光伏发电同时不会对农作物生产产生负面影响,而光伏组件发电又可以产生显著经济效益、提升农业科技化水平。实验的结果为新型光伏农业系统的推广提供示范和支持,为光伏农业产业发展提供参考。

参考文献

- Cai Q (2011). Plant Physiology. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese) [蔡庆生(2011). 植物生理学. 北京: 中国农业大学出版社]
- Fang Y, Huang S, Qin S, Shen W, Wei D, Yang M, Zheng B, Li Y (2015). Analysis of development status and prospect of photovoltaic agriculture. *J Changjiang Veg*, (18): 35–40 (in Chinese) [房裕东, 黄绍华, 秦树香, 沈文杰, 魏端, 杨美娴, 郑博, 李育军(2015). 光伏农业发展现状和前景分析. *长江蔬菜*, (18): 35–40]
- Liu S (2007). Study on artificial lighting used in the closed plant factory (Master's thesis). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese with English abstract) [刘水丽(2007). 人工光源在闭锁式植物工厂中的应用研究(硕士论文). 北京: 中国农业科学院]
- Liu T, Liu W, Ma J (2014). Distribution design method for LED plant light source with tunable ratio of red/blue photons. *Transact Chin Soc Agric Eng*, 30 (1): 154–159 (in Chinese with English abstract) [刘彤, 刘雯, 马建设(2014). 可调红蓝光光子比例的LED植物光源配光设计方法. *农业工程学报*, 30 (1): 154–159]
- Lu D, Cui X, Huang J, Zhao F (2006). Investigation on absorption spectrum of chlorophyll. *Coll Phys*, 25 (1): 50–53 (in Chinese) [卢东昱, 崔新图, 黄镜荣, 赵福利(2006). 叶绿素吸收光谱的观测. *大学物理*, 25 (1): 50–53]
- Wen J (2009). Influence of wave crest and R/B of red and blue LED on crop growing in the closed plant factory (Master's thesis). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese with English abstract) [闻婧(2009). LED红蓝光波峰及R/B对密闭植物工厂作物的影响(硕士论文). 北京: 中国农业科学院]
- Yang Y, Cao Y, Wang M (2015). Impact analyses of photovoltaic agricultural greenhouses power projects on the ecological agriculture. *Energy Energy Conserv*, (2): 73–75 (in Chinese with English abstract) [杨月梅, 曹艳芳, 王淼(2015). 光伏农业大棚发电项目对生态农业的影响浅析. *能源与节能*, (2): 73–75]
- Zhang Q (1989). Effects of temperature on plant photosynthesis. *Plants*, (3): 28–30 (in Chinese) [张其德(1989). 温度对植物光合作用的影响. *植物杂志*, (3): 28–30]

Effect of dual-channel red/blue optical filter on the growth of plants

OU Lang-Qing^{1,*}, HE Zi-Li^{2,*}, LIU Lu-Qing^{2,*}, QIAN Da-Han², ZHANG Fang-Xin², LI Ming², ZHANG Xin-Yu², ZHANG Zhi-Shen², WANG Hui-Chao¹, GAO Jun-Shan^{1,**}, LIU Wen^{2,**}

¹School of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; ²School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: To evaluate the effect of optical filter on the growth of plants in new photovoltaic agricultural system, lettuce (*Lactuca sativa*), cucumber (*Cucumis sativus*) and water spinach (*Ipomoea aquatica*) were grown in the pot in the glass greenhouse. Two groups were designed to contrast with one under the optical filter and the other blank, and the effect of optical filter on the growth and quality of different plants were tested and analyzed. The results suggest that compared to the blank group, the plants under the optical filter have better performance in morphological, photosynthetic and quality indexes, and the plants under the optical filter grew faster and had better quality.

Key words: photovoltaic agriculture; optical filter; plant growth; morphological indexes; photosynthetic indexes; quality indexes

Received 2016-08-04 Accepted 2016-11-25

This work was supported by the National Science Foundation of China (Grant Nos. 31672497 and 31572468), Natural Science Foundation of Anhui Province (Grant No. 1408085MKL02), and the Biology Key Subject Construction of Anhui (Grant No. 2014SWQJ009).

*Co-first authors.

**Co-corresponding authors (E-mail: gaojsh@ahau.edu.cn; wenliu@ustc.edu.cn).