

## 光质对立体浮盘培育烟苗叶片光合特性及根系生长的影响

林叶春<sup>1</sup> 陈伟<sup>1</sup> 薛原<sup>2</sup> 潘文杰<sup>1\*</sup> 贾蒙骞<sup>1,3</sup> 张庆平<sup>4</sup> 姚国娇<sup>4</sup>

(1. 贵州省烟草科学研究院, 贵阳 550081; 2. 安顺市烟草公司平坝县分公司, 贵州 安顺 561100;  
3. 中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100193; 4. 云南农业大学 烟草学院, 昆明 650201)

**摘要** 为研究光质对立体浮盘培育烟苗叶绿体色素、光合响应和根系发育的影响, 试验设置白光(对照)、红光、蓝光和 LED 光 4 个处理。结果表明: 与其他光质比较, 蓝光光质下烟苗叶绿素 a 含量显著( $P < 0.05$ )提高 16.13%~28.57%、叶绿素 b 显著提高 30.00%~36.84%, 此外, 类胡萝卜素含量比红光光质下显著提高 18.18%; 不同光质条件下烟苗叶片最大净光合速率( $P_{max}$ )的大小关系为蓝光 > 白光 > LED 光 > 红光, 且蓝光光质下烟苗光饱和点最高; 红蓝光质下, 烟苗根系长度、根系表面积、根系平均直径和根系体积均显著( $P < 0.05$ )增加, 以蓝光下烟苗根系发育最好, 其烟苗 4 叶 1 心时根系长度达 98.11 cm、根系表面积 22.78 cm<sup>2</sup>、根系平均直径 0.74 mm 和根系体积 0.42 cm<sup>3</sup>。本研究结果表明, 采用蓝光光质更适用于烤烟立体育苗, 有利于培育壮苗。

**关键词** 光质; 烤烟; 育苗; 生长; 光合作用

**中图分类号** S 625.5<sup>+</sup>2

**文章编号** 1007-4333(2014)01-0087-06

**文献标志码** A

## Effects of light qualities on the photosynthetic responses of tobacco seedling and root growth in a float system

LIN Ye-chun<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, XUE Yuan<sup>2</sup>, PAN Wen-jie<sup>1\*</sup>,  
JIA Meng-ao<sup>1,3</sup>, ZHANG Qing-ping<sup>4</sup>, YAO Guo-jiao<sup>4</sup>

(1. Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, China;

2. Pingba Tobacco Company of Anshun Corporation, Anshun 561100, China;

3. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

4. College of Tobacco and Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract** Light qualities of white (CK), red (RL), blue (BL) and LED (LL) were set up in this study in order to demonstrate effects of light qualities on the chloroplast pigment, light response and root development for tobacco seedlings in a three-dimensional float system. Results showed that BL significantly ( $P < 0.05$ ) improved the content of chlorophyll a of tobacco seedling leaves by 16.13% – 28.57% and improved the content of chlorophyll b by 30.00% – 36.84% compared with other light qualities; otherwise, BL significantly ( $P < 0.05$ ) increased the carotenoid content by 18.18% compared with RL. For the maximum net photosynthetic rate ( $P_{max}$ ) of tobacco leaf, the relationship of different light qualities displayed as BL > CK > LL > RL; moreover, the light saturation point (LSP) was maximum under the condition of BL compared with other light qualities. BL and RL significantly ( $P < 0.05$ ) increased the root length, root surface area, average root diameter and root volume of the tobacco seedlings, especially in BL. As for the tobacco seedlings in BL, at the stage of 4 leaves and 1 heart, the root length, root surface area, root average diameter and root volume were 98.11 cm, 22.78 cm<sup>2</sup>, 0.74 mm and 0.42 cm<sup>3</sup> respectively. The preliminary analysis indicated that the blue light quality may be more suitable for flue-cured tobacco seedlings in the three-dimensional float system.

**Key words** light quality; flue-cured tobacco; seedling; growth; photosynthesis

收稿日期: 2013-07-10

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合 J 字[2013]2196 号); 国家烟草专卖局科技重大专项(Ts-02-20110015); 中国烟草总公司科技重点项目(110200902064)

第一作者: 林叶春, 助理研究员, 主要从事烤烟栽培及生理生态研究, E-mail: linyechun@cau.edu.cn

通讯作者: 潘文杰, 研究员, 主要从事烤烟栽培研究, E-mail: wenjiepan@163.com

烤烟是一种喜光作物,贵州地处云贵高原,在2—4月份烤烟育苗期间的月平均日照时数仅约95 h,寡照天气致使日光大棚培育的烟苗发育迟缓<sup>[1]</sup>。通过研究不同光质的烤烟立体育苗技术,对提高烤烟育苗效率、实现快速育成高素质烟苗具有现实意义。20世纪80年代,美国烤烟生产中逐步推行漂浮育苗技术,中国在20世纪90年代引进了这项育苗技术,当前烤烟生产中主要以漂浮育苗为主<sup>[2]</sup>。贵州省烤烟漂浮育苗技术推广应用涉及全省63个县(市、区)、794个乡镇、5759个行政村,自2009年,贵州省烤烟种植区推广漂浮育苗技术覆盖率达100%。漂浮育苗技术促进了烤烟生产,还在辣椒<sup>[3]</sup>、西红柿<sup>[4]</sup>、西瓜<sup>[5]</sup>和棉花<sup>[6]</sup>等作物生产上获得广泛应用,带来了巨大的社会和经济效益。目前,烤烟生产中主要推行日光大棚集约化漂浮育苗技术,育成烟苗素质较高、生长整齐度较好,但育苗效率低下,且育苗成本高,受不利自然条件的限制作用大,鉴于此,烤烟生产中正逐步尝试性发展立体育苗技术。光是影响作物生长发育的重要环境因素之一,而自然条件下作物主要利用一定波长范围的红蓝光<sup>[7]</sup>。作物对不同光质的生物学响应存在显著差异<sup>[8-9]</sup>。研究表明,不同光质对烟草的生长发育、形态建成、光合特性等有显著影响<sup>[10-11]</sup>。立体育苗技术明显提高了一定空间内的育苗效率,但烟苗素质受制于育苗环境内光照条件。目前,光质对立体培育烟苗的生理影响尚不清楚。本研究通过设置不同光质的灯管,分析光质对立体浮盘培育烟苗叶片叶绿体色素、光合响应和根系发育特征的影响,旨在为发展烤烟和其他作物立体育苗技术提供理论参考。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验设计

以6层立体培育烟苗为研究对象,漂浮育苗盘规格:57 cm×36 cm×6 cm,160孔。设置4类光质:红光(RL,4根红光灯管+8根日光灯管);蓝光(BL,4根蓝光灯管+8根日光灯管);LED光(LL,4根LED灯管+8根日光灯管);对照(CK,12根日光灯管)。试验共设4个处理,每个处理为一个小型育苗池,包括12个漂浮育苗盘,布置12根灯管,日光照时长12 h(08:00~20:00)。其他管理措施同普

通大棚育苗。

### 1.2 测定项目与方法

#### 1.2.1 干物质量

于4叶1心期,取整盘烟苗洗净培养基质后分割为根系和茎叶,经105℃杀青30 min后60℃下烘干至恒重,得出单株烟苗根系和茎叶干物质量,并计算根冠比。

#### 1.2.2 根系发育

取4叶1心烟苗,先将根系经自来水初洗,再用蒸馏水洗净,并剔除非根物质。用根系扫描仪EPSON Twain PRO(32 bit)和根系分析系统WINRhizo对烟苗根系长度、根系直径、根系表面积和根系体积等参数进行分析。

#### 1.2.3 光合色素

取4叶1心烟苗新鲜叶片,擦净叶片表面污物,去除叶片主脉,剪碎。称取剪碎的新鲜叶片0.2 g,每个处理3次重复,分别放入研钵中,各加入少量石英砂、碳酸钙和2~3 mL 95%乙醇,研磨成匀浆,再加入10 mL 95%乙醇至匀浆发白;静止5 min后过滤,滤液用95%乙醇定容至25 mL。将滤液在波长665、649和470 nm下测定其吸光值,根据公式计算叶绿素a、叶绿素b、和类胡萝卜素含量<sup>[12]</sup>。

#### 1.2.4 光响应曲线

采用开放式气路,设定叶室温度为25℃,由LI6400-2B LED光源探头(Li-cor, USA)提供一系列光合有效辐射(PAR,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )。分别在PAR为400、200、150、100、50、20和0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , CO<sub>2</sub>注入系统设定值为400  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时,测定烟苗完全展开叶的光合参数。以净光合速率( $P_n$ ,  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  CO<sub>2</sub>)和PAR拟合光响应曲线,得出初始量子效率( $\alpha$ )、最大净光合速率( $P_{\text{max}}$ )和暗呼吸速率( $R_d$ ),光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)由基于Farquhar模型设计的“光合助手”拟合。

### 1.3 数据处理与分析

采用Excel2010进行数据整理,OriginPro 8(OriginLab, USA)绘制图形,利用SPSS 17.0和SAS v8(SAS Institute, USA)进行迭代计算和Duncan比较法进行差异显著性分析( $P < 0.05$ )。烟苗叶片光合作用对光的响应曲线及响应参数用非直角双曲线模型拟合<sup>[13-14]</sup>:

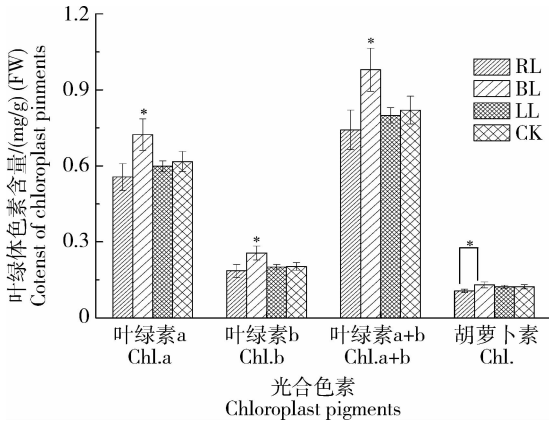
$$P_n = \frac{\alpha \cdot \text{PAR} + P_{\text{max}} - \sqrt{(\alpha \cdot \text{PAR} + P_{\text{max}})^2 - 4\alpha \cdot \text{PAR} \cdot P_{\text{max}}}}{2k} - R_d$$

式中： $k$  为光响应曲线曲率， $0 < k < 1$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 光质及烟苗叶片光合色素

光质对烟苗叶片叶绿体色素含量的影响存在差异(图 1)。不同光质条件下,烟苗叶片叶绿素 a 含量的大小关系是 BL(蓝光) $>$ CK(白光) $>$ LL(LED光) $>$ RL(红光),BL 条件下烟苗叶片叶绿素 a 含量为 0.72 mg/g(FW),分别显著( $P < 0.05$ )高于 CK、LL 和 RL 16.13%、20.00% 和 28.57%;叶绿素 b 同叶绿素 a 变化趋势相似,BL 条件下烟苗叶片叶绿素 b 含量为 0.26 mg/g(FW),分别显著( $P < 0.05$ )高于 CK、LL 和 RL 30.00%、30.00% 和 36.84%;总叶绿素(a+b)含量变化趋势与叶绿素 a 和 b 一致,



\* 在 0.05 水平达显著性差异  
\* Significant difference at 0.05 level

图 1 光质对烟苗叶片叶绿体色素含量的影响

Fig.1 Effects of the light quality on the content of chloroplast pigments in tobacco seedling leaves using a float system

BL 分别高于 CK、LL 和 RL19.51%、22.50% 和 32.43%;BL 条件下,烟苗叶片类胡萝卜素含量最高为 0.13 mg/g(FW),比 RL 显著( $P < 0.05$ )提高 18.18%,但与 LL 和 CK 差异不显著。

### 2.2 光质及烟苗叶片光响应

立体育苗室内各类光质光源提供的光合有效辐射(PAR)水平较低,测定烟苗叶片光响应曲线时设定的 PAR 水平不高,但不同光质条件下随着 PAR 水平的提高,烟苗叶片净光合速率( $P_n$ )增加的幅度并不一致(图 2)。PAR $<$ 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,不同光质条件下烟苗叶片净光合速率的差异小;当 PAR $>$ 100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,不同光质条件下烟苗净光合速率的大小关系表现为 BL $>$ CK $>$ LL $>$ RL。

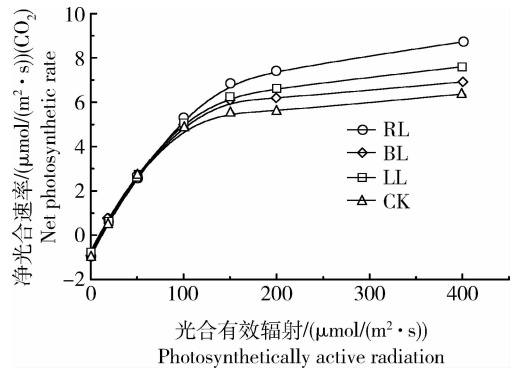


图 2 立体培育烟苗叶片对光质的光响应

Fig.2 Photosynthetic responses of tobacco seedling leaves using a float system to light quality

通过 SPSS 软件迭代拟合得到图 2 中的光响应曲线,并进一步分析获得光响应拟合参数(表 1)。RL 条件下,烟苗叶片初始量子效率( $\alpha$ )最高为 0.086,但与其他光质差异不大。不同光质条件下

表 1 立体培育烟苗叶片对光质的光响应拟合参数

Table 1 Effects of the light quality on the fitting parameters of tobacco seedling leaves using a float system

光质 Light quality	$\alpha/(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})/(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})))$	$P_{\text{max}}/\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})(\text{CO}_2)$	$R_d/\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	LSP/ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	LCP/ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	$R^2$
RL	0.086	7.45	0.90	276.40	5.59	0.998
BL	0.081	10.49	0.96	418.60	5.61	0.999
LL	0.084	8.11	0.85	320.99	5.60	0.999
CK	0.081	8.86	0.73	343.45	5.59	0.999

注:RL 为红光光源;BL 为蓝光光源;LL 为 LED 光源;CK 为白光光源。 $\alpha$  为初始量子效率; $P_{\text{max}}$  为最大净光合速率; $R_d$  为暗呼吸速率;LSP 为光饱和点;LCP 为光补偿点。下同。

Note:RL-Red Light;BL-Blue Light;LL-LED Light;CK-White Light; $\alpha$ -initial quantum efficiency; $P_{\text{max}}$ -maximum net photosynthetic rate; $R_d$ -apparent dark respiration rate;LSP-light saturation point;LCP-light compensation point. The same as below.

$P_{max}$ 的大小关系为  $BL > CK > LL > RL$ , BL 条件下烟苗叶片最大净光合速率 ( $P_{max}$ ) 最高为  $10.49 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \text{CO}_2$ 。红、蓝和 LED 光源下烟苗叶片暗呼吸速率 ( $R_d$ ) 分别比对照全白光处理 (CK) 增强 23.29%、31.51% 和 16.44%。不同光质条件下烟苗叶片光饱和点 (LSP) 的大小关系为  $BL > CK > LL > RL$ ; BL 条件下, 烟苗叶片光饱和点最大为  $418.60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 分别比 RL、LL 和 CK 提高了 51.45%、30.41% 和 21.88%。不同光质条件下烟苗叶片光补偿点差异较小。

### 2.3 光质与烟苗根系发育

通过根系扫描可以观察不同光质条件下烟苗根系发育的外观形态 (图 3)。根系外观形态分析表明: 与对照比较, 红、蓝光光质条件下烟苗根系发育水平高, 烟苗根系量大; LED 光光照条件下烟苗根系发育水平低, 根系量较少。

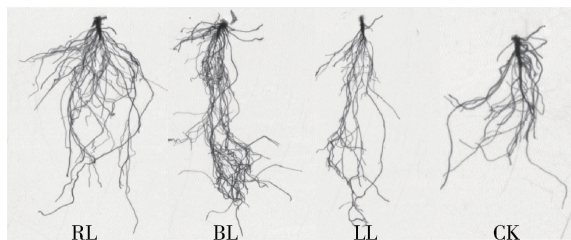


图 3 不同光质的烟苗根系形态

Fig. 3 Effects of the light quality on the root morphology of tobacco seedlings using a float system

通过根系扫描系统分析了不同光质条件下烟苗根系长度、根系表面积、根系平均直径和根系体积等生理性状 (图 4)。与对照 (CK) 比较, 不同光质条件下烟苗根系长度均显著 ( $P < 0.05$ ) 增长, 其中 RL (红光)、BL (蓝光) 和 LL (LED 光) 分别提高了 137.39%、162.75% 和 97.35%。蓝光光质条件下,

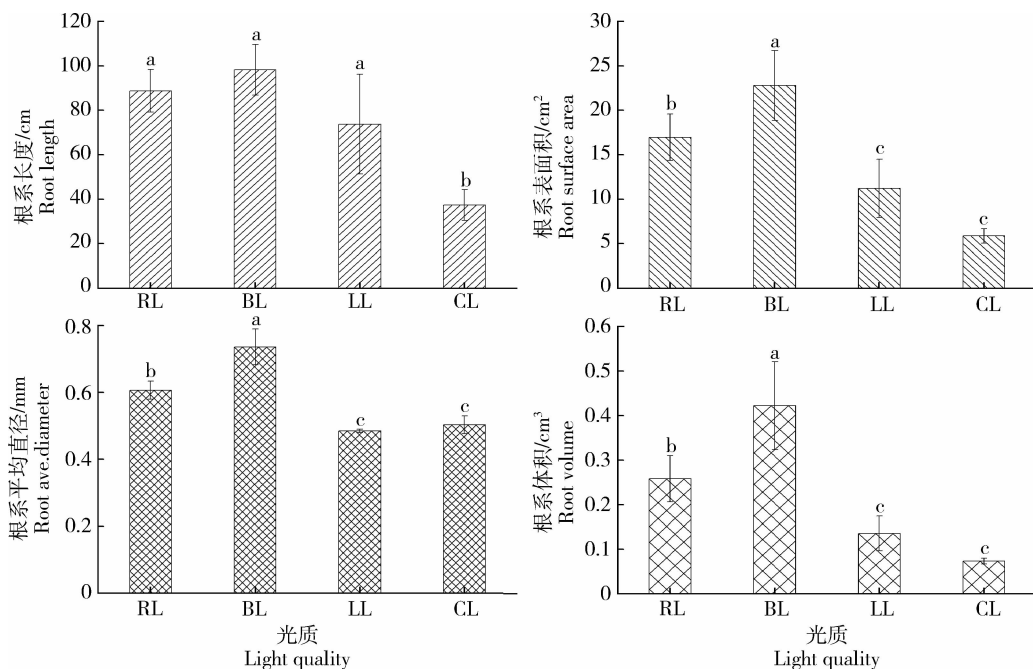


图 4 光质对烟苗根系主要生物学性状的影响

Fig. 4 Effects of the light quality on the biological characters of tobacco seedling roots

烟苗根系表面积最大为  $22.78 \text{ cm}^2$ , 分别比 RL、LL 和 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 增大 34.40%、103.21% 和 288.74%; 红光光质条件下烟苗根系表面积分别较 LL 和 CK 显著增大了 51.2% 和 189.25%。蓝光光质条件下, 烟苗根系平均直径最大为 0.74 mm, 分

别比 RL、LL 和 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 增大 21.31%、51.02% 和 48.00%, RL 分别较 LL 和 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 增大 24.49% 和 22.00%。烟苗根系体积与根系表面积的变化趋势一致, BL 分别较 RL、LL 和 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 增加 61.54%、200.00%

和 500.00%, RL 分别比 LL 和 CK 显著 ( $P < 0.05$ ) 增加 85.71% 和 271.43%。

### 3 讨论

#### 3.1 光质对烟苗光合色素的影响

植物对可见光的吸收波长主要集中在 400~510 nm 的蓝紫光区和 610~720 nm 的红橙光区, 光质可以调控植物叶片光合器官的发育水平, 包括叶绿体色素含量以及叶片光合产物合成速率<sup>[15]</sup>。叶绿体色素能够吸收、传递和转换光能, 是植物进行光合作用的物质基础, 其含量高低直接影响叶片光合速率<sup>[16-17]</sup>。在本研究中, 蓝光光质显著提高了烟苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝卜素含量, 而红光光质和 LED 光源对烟苗叶片叶绿体色素含量的影响不显著。这种效应说明蓝光对烟苗叶片叶绿体色素的合成具有促进作用, 此外, 蓝光还促进烟苗叶片类胡萝卜素的合成。以上研究结果与其他研究者的研究结果一致<sup>[15, 18-20]</sup>。

#### 3.2 光质对烟苗叶片光合作用的调控

烟苗在蓝光下生长, 光响应曲线拟合参数最大净光合速率 ( $P_{max}$ ) 最高, 光饱和点 (LSP) 也最高, 而红光下最大净光合速率和光饱和点均最低。本研究与在姜<sup>[18]</sup>、豇豆<sup>[21]</sup>等作物上的同类研究结果并不一致, 这可能与作物种类和生态环境等因素有关。引起这种差异的原因还可能是, 蓝光下叶片叶肉细胞中淀粉粒积累较少<sup>[22]</sup>, 这主要因为红光抑制了光合产物从叶片中输出, 增加了叶片的淀粉积累, 而淀粉大量积累不利于增强叶片光合作用<sup>[23]</sup>。

#### 3.3 光质与烟苗生长发育的关系

光质调控植物叶片光合色素含量和光合能力, 影响植物茎叶量, 同时也调控根系的发育水平。蓝光条件下烟苗根系长度、根系表面积、根系平均直径和根系体积均显著高于其他光质, 这与前人的研究结果一致<sup>[24-26]</sup>。蓝光可以提高植物幼苗根系活力、总吸收面积和活跃吸收面积<sup>[27]</sup>, 幼苗发根数增多、根系粗壮、根系量增加, 蓝光有利于作物根系的生长发育。蓝光光质促进烟苗根系发育, 同时, 提高了茎叶生物量, 增大了烟株根冠比 (图 5), 这与蓝光下烟苗光合作用最强是一致的。

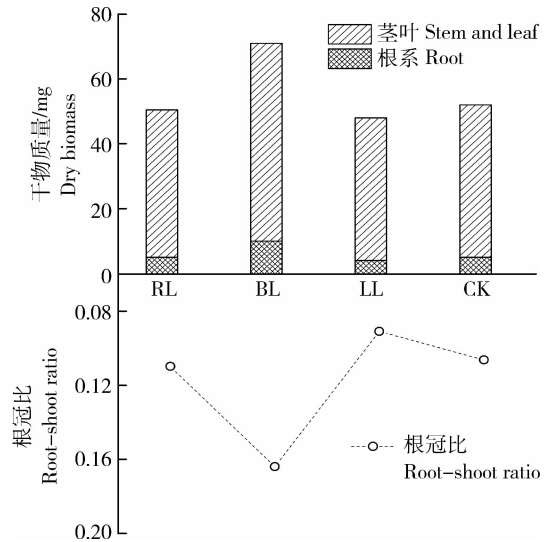


图 5 光质对烟苗干物质量和根冠比的影响

Fig. 5 Effects of light quality on dry biomass per plant and root-shoot ratio of tobacco seedling

### 4 结论

研究结果表明, 蓝光光质有利于提高立体培育烟苗叶片叶绿体色素含量, 特别是提高了叶绿素 b 的含量。蓝光光质下, 烟苗叶片最大净光合速率增强, 光饱和点提高, 叶片光合能力增强, 有利于促进烟苗生长。蓝光光质条件下, 烟苗根系长度、根系表面积、平均根系直径和根系体积等均增加 (大), 促进烟苗根系发育。蓝光光质促进了烟苗干物质积累, 提高根冠比水平, 有利于育成壮苗。因此, 蓝光光质可能更适于烤烟立体育苗。

### 参 考 文 献

- [1] 郑奕, 郑小波. 贵阳市近 50 年来日照变化特征分析[J]. 贵州气象, 2005, 29(1): 7-8
- [2] 白岩, 刘好宝, 史万华, 等. 论烟草集约化轻简育苗及其发展方向[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 138-141
- [3] 杨红, 姜虹. 辣椒漂浮育苗技术的研究及应用[J]. 长江蔬菜: 学术版, 2011(20): 31-33
- [4] Jim E W. Tomato transplant production using the float system and cupric hydroxide[J]. HortTechnology, 1998, 8(3): 366-369
- [5] 齐选民, 刘海荷, 陈金湘, 等. 漂浮育苗对西瓜苗农艺性状及其生理特性影响的研究[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(5): 778-782
- [6] 唐海明, 陈金湘. 漂浮育苗移栽棉花的产量构成及生理特性初探[J]. 棉花学报, 2008, 20(2): 148-150
- [7] 时向东, 蔡恒, 焦枫, 等. 光质对作物生长发育影响研究进展

- [J]. 中国农学通报, 2008, 124(6): 226-230
- [8] Leong T Y, Goodchild D J, Anderson J M. Effect of light quality on the composition, function, and structure of photosynthetic thylakoid membranes of *Asplenium australasicum* (Sm) Hook[J]. *Plant Physiology*, 1985, 78: 561-567
- [9] Carmona R, Vergara J J, Lahaye M, et al. Light quality affects morphology and polysaccharide yield and composition of *Gelidium sesquipedale* (Rhodophyceae)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1998, 10: 323-331
- [10] 柯学, 李军营, 李向阳, 等. 不同光质对烟草叶片生长及光合作用的影响[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(5): 512-520
- [11] 陈伟, 蒋卫, 邱雪柏, 等. 光质对烟叶光合特性、类胡萝卜素和表面提取物含量的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(22): 6877-6885
- [12] 张志良. 作物生理学实验指导 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 154-156
- [13] Prioul J L, Chartier P. Partitioning of transfer and carboxylation components of intracellular resistance to photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation: A critical analysis of the methods used[J]. *Ann Bot*, 1977, 41: 789-800
- [14] Marshall B, Biscoe P V. A model for C3 leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance I. Derivation [J]. *J Exp Bot*, 1980, 31: 29-39
- [15] 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
- [16] 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, 9(7): 1619-1624
- [17] 姜英, 林叶春, 许和水, 等. 两种 C<sub>4</sub> 作物不同叶位光合及叶绿素荧光特性比较[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(3): 34-42
- [18] 张瑞华, 战琨友, 徐坤. 有色膜覆盖对姜叶片色素含量及光合作用的影响[J]. *园艺学报*, 2007, 34(6): 1465-1470
- [19] 崔振伟. 不同氮源和光质对烤烟氮代谢相关酶活性的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2007
- [20] 刘文科, 杨其长, 邱志平, 等. LED 光质对豌豆苗生长、光合色素和营养品质的影响[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(4): 500-504
- [21] 林碧英, 张瑜, 林义章. 不同光质对豇豆幼苗光合特性和若干生理生化指标的影响[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(2): 235-239
- [22] Saebo A, Krekling T, Appelgren M. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets *in vitro* [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 1995, 41: 177-185
- [23] Bondada B R, Syvertsen J P. Leaf chlorophyll, net gas exchange and chloroplast ultra structure in citrus leaves of different nitrogen status [J]. *Tree Physiology*, 2003, 23: 553-559
- [24] 倪文. 光对稻苗根系生长及其生理活性的影响[J]. *作物学报*, 1983(3): 199-204
- [25] 李韶山, 潘瑞焱. 蓝光对水稻幼苗生长效应的研究[J]. *中国水稻科学*, 1994, 8(2): 115-118
- [26] 刘志民, 杨甲定, 刘新民. 青藏高原几个主要环境因子对植物的生理效应[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 309-313
- [27] 蒲高斌, 刘世琦, 刘磊, 等. 不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J]. *园艺学报*, 2005, 32(3): 420-425

责任编辑: 苏燕