



园艺学报
Acta Horticulturae Sinica
ISSN 0513-353X, CN 11-1924/S

《园艺学报》网络首发论文

题目: 红蓝光质育苗对黄瓜定植后生长、光合特性以及产量的影响
作者: 苗妍秀, 陈青云, 曲梅, 高丽红, 侯雷平, 李斌
DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2018-0641
收稿日期: 2018-08-17
网络首发日期: 2019-03-13
引用格式: 苗妍秀, 陈青云, 曲梅, 高丽红, 侯雷平, 李斌. 红蓝光质育苗对黄瓜定植后生长、光合特性以及产量的影响[J/OL]. 园艺学报.
<https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2018-0641>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2018-0641

红蓝光质育苗对黄瓜定植后生长、光合特性以及产量的影响

苗妍秀^{1,2}, 陈青云^{3*}, 曲梅^{3*}, 高丽红³, 侯雷平^{1,2}, 李斌^{1,2}

(¹山西农业大学园艺学院, 山西太谷 030801, ²山西省设施蔬菜提质增效协同创新中心, 山西太谷 030801, ³中国农业大学园艺学院, 北京 100083)

摘要: 采用 LED 光源, 研究了白光 (对照)、红光、蓝光和红蓝组合光育苗对黄瓜定植后营养生长、光合特性、花芽分化和产量的影响。结果表明: 与白光相比, 红光处理的黄瓜幼苗在定植后生长缓慢, 光合效率降低, 净光合速率 (P_n)、PSII 有效光化学效率 (Φ_{II}) 显著降低, 而 PSII 处调节性 (Φ_{NPQ}) 和非调节性 (Φ_{NO}) 能量耗散的量子产量显著升高。快速叶绿素荧光诱导动力学曲线 (OJIP) 和 JIP-test 分析表明, 红光处理的叶片 J 和 I 阶段的相对荧光值 (V_J 和 V_I) 均显著升高, 而 PSII 最大光化学效率 (TR_o/ABS), 电子传递量子产额 (ET_o/ABS) 和传递效率 (ET_o/TR_o), PSI 受体侧末端电子还原的量子产率 (RE_o/ABS) 和还原效率 (RE_o/ET_o), 性能指数 (PI_{ABS}) 和综合性能指数 (PI_{total}) 均显著降低, 同时, 红光育苗延迟黄瓜第 1 朵雌花开花时间, 降低结果初期总产量和总瓜数; 添加蓝光即红蓝组合光能显著缓解红光在生长、光合特性和花芽分化方面的负面影响, 且显著增加结果初期的总产量; 蓝光处理的黄瓜株高和叶片数均显著降低, 叶片 PI_{ABS} 和 PI_{total} 显著升高, 第 1 朵雌花开花时间提前。综上所述, 与红光相比, 红蓝组合光育苗有利于黄瓜定植后营养生长, 提升叶片光合特性, 提前开花时间以及增加结果初期产量。

关键词: 黄瓜; 光质; 生长; 光合特性; 开花时间; 产量

Effects of Red and Blue Lights on Growth, Photosynthetic Characteristics and Yield of Cucumber Plants

MIAO Yan-xiu¹, CHEN Qing-yun^{2*}, QU Mei^{2*}, GAO Li-hong², HOU Lei-ping¹, LI Bin¹

(¹College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, ²Collaborative Innovation Center of Quality and Profit Improvement for the Protected Vegetables of Shanxi Province, Taigu, Shanxi 030801, ³College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: With LED light source, four light quality treatments (white light, red light, blue light, a combination of red and blue light) were carried out to investigate their effects on growth, photosynthetic characteristics and yield in cucumber plants. The results showed that compared to

收稿日期: 2018-08-17

修回日期: 2019-02-27

基金项目: 山西农业大学博士科研启动项目 (2016YJ08); 山西省重点研发计划重点项目子课题 (201703D211001-04-03); 国家自然科学基金 (31501806, 31501807)

*并列通讯作者 Author for correspondence (E-mail: caucqy@163.com, qumei@cau.edu.cn)

white light, red light significantly inhibited cucumber growth, declined photosynthetic characteristics, decreased CO₂ assimilation rate (Pn), electron transport rate in PSII (ETR_{II}) and effective PSII quantum yield (Φ_{II}), whereas increased quantum yield of light-induced (Φ_{NPQ}) and non-light-induced (Φ_{NO}) non-photochemical fluorescence quenching. In OJIP curve and JIP-test analysis, red light also enhanced relative fluorescence values of J and I phase (V_J and V_I), and reduced maximum quantum yield for PSII primary photochemistry (TR_o/ABS), quantum yield for PSII electron transport (ET_o/ABS), efficiency/probability that an electron moves further than Q_A⁻ (ET_o/TR_o), quantum yield for reduction of end electron acceptors (RE_o/ABS) and efficiency/probability with which an electron from the intersystem electron carriers is transferred to reduce end electron acceptors (RE_o/ET_o) at the PSI acceptor side, performance index (potential) for energy conservation from photons absorbed by PSII to the reduction of intersystem electron acceptors (PI_{ABS}) and PSI end acceptors (PI_{total}). Meanwhile, red light delayed flowering time of first female flower, decreased total yield and cucumber numbers in initial stage. These suboptimal plant growth, limited photosystems activity and low yield under red light were effectively alleviated by blue light addition (a combination of red and blue light). Blue light decreased plant height and leaf numbers, largely increased PI_{ABS} and PI_{total} and accelerated flowering time of first female flower. In conclusion, compared to red light, a combination of red and blue light benefited plant growth, promoted leaf photosynthesis, accelerated flowering time and increased initial yield.

Key words: cucumber; light quality; growth; photosynthetic characteristic; flowering time; yield

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 是我国重要的设施栽培蔬菜, 也是性型分化研究的重要模式植物。黄瓜幼苗对外部光环境变化敏感且可塑性强, 外界光环境变化易影响其花芽分化过程, 改变雌花数量和开放时间, 进而影响黄瓜产量 (梁永宏 等, 2010; 袁高峰, 2004)。光质是诱导植物成花的重要光环境因子之一 (Li et al., 2012; Srikanth & Schmid, 2011), 其中蓝光 (400-500nm) 和红光 (600-700nm) 是植物叶片主要吸收的可见光波段, 已成功应用于多种园艺作物育苗, 如生菜 (Wang et al., 2016; Yang et al., 2017)、黄瓜 (Zhang et al., 2016)、番茄 (Wollaeger Runkle, 2015; 孙娜 等, 2016)、辣椒 (Yang et al., 2017) 等。通过对花卉植物菊花、一品红和矮牵牛等花卉作物的研究表明, 蓝光促进花期提前, 增加单株花朵数; 红光抑制开花, 减少单株花朵数, 提升花头的观赏品质 (Fukuda et al., 2016; Nishidate et al., 2012; 江明艳&潘远智, 2006)。与红光相比, 红蓝组合光照射下的仙客来拥有花朵数更多, 并且花朵绽放时间更长 (Heo et al., 2003)。目前关于光质调控花芽分化方面的研究主要集中在花卉作物, 对蔬菜作物的花芽分化及果实产量方面的研究尚少。

光质主要通过光敏色素、隐花色素、向光素等光受体, 调控植物形态建成、叶绿体发育、气孔开放及开花诱导等生长发育过程 (Rehman et al., 2017; 杨有新 等, 2014)。蓝光有利于茎的伸长、叶绿体发育、叶绿素合成和气孔开放等, 蓝光照射下的植物一般在叶绿体层面呈现阳生植物的特性 (Terfa et al., 2013)。与红光相比, 蓝光长期照射能显著提高植株叶片净光合速率、气孔导度和叶绿素 a/b 值, 红蓝组合光照射下的植物拥有较高的叶片净光合速

率、光合色素、氮含量及植株干重 (Hogewoning et al., 2010; Savvides 等, 2012; 常涛涛 等, 2010)。然而, 目前国内外针对叶片光合特性影响的研究多集中在苗期, 在光质苗期育苗对后期植株叶片光合特性变化及其响应机制的研究方面仍然十分缺乏。

本试验在智能人工气候室内运用不同配比红蓝光质黄瓜育苗, 在日光温室进行定植试验, 旨在通过研究红蓝光质育苗对黄瓜定植后植株营养生长、光合特性、花芽分化及产量的影响, 全面反映红蓝光质育苗对黄瓜光合性能和产量的影响, 为提升设施蔬菜产量提供理论依据。

1 材料与方方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2015 年 8 月 11 日-12 月 18 日在中国农业大学西校区内进行。试验选用黄瓜品种“中农 26 号”, 黄瓜种子催芽后播种到营养钵 ($8\text{cm} \times 8\text{cm}$), 放到人工气候室内白光下进行培养。当黄瓜幼苗的子叶展开后, 开始光质处理。四种光质处理分别为白光 (CK)、红光 (660nm , R)、蓝光 (460nm , B) 以及红蓝组合光 (RB, 8: 1)。白光选用白色荧光灯, 购自日本松下公司, 红光、蓝光和红蓝组合光 LED 均购自深圳谊宇诚光电科技有限公司。灯具的光谱组成使用 LI-1800 便携式分光辐射仪 (美国 LI-COR 公司) 测定, 仪器光谱范围从 300 nm 到 1100 nm , 每隔 2 nm 测定一次, 光谱分布见图 1。试验期间, 人工气候室中光强为 $300\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, 光照 12 h d^{-1} , 白天/夜间温度为 $25/18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对空气湿度为 $60\% \sim 70\%$, CO_2 浓度为 $800 \pm 100\mu\text{mol mol}^{-1}$, 浇灌一倍剂量日本山崎黄瓜配方营养液。当黄瓜幼苗长到三叶一心时, 将其定植到日光温室。株行距为 $60\text{cm} \times 30\text{cm}$, 小区面积为 10m^2 , 3 次重复, 随机区组排列。采取温室日常管理和农艺措施。

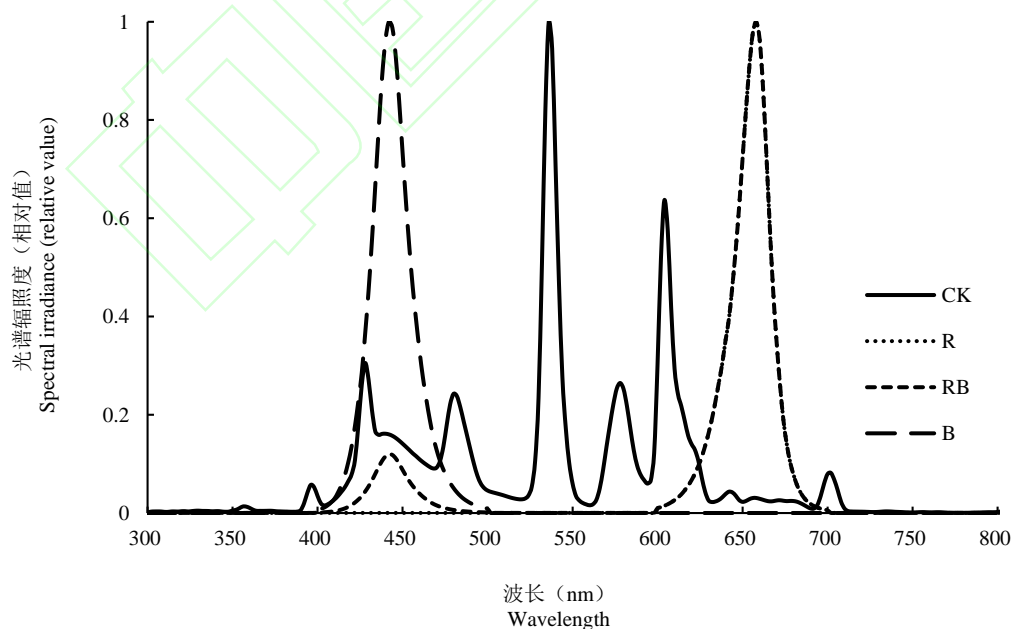


图 1 不同光质处理的光谱分布图

CK: 白光; R: 红光; RB: 红蓝组合光; B: 蓝光。下同。

Figure 1 Relative spectral distribution of light quality treatments

CK: White light; R: Red light; RB: A combination of red and blue light; B: Blue light. The same as blow.

1.2 测定项目与方法

1.2.1 营养生长

在定植前，测定黄瓜幼苗的总叶面积、全株干重和根冠比。在定植后的第 1、3、7、14、28、56 和 101 天，每个小区选取 3 株具有代表性的黄瓜植株，测定黄瓜植株的株高、叶片数、最大叶片的叶面积。株高是指地面到黄瓜植株生长点的距离，叶片数是植株全部真叶的数量，最大叶片的叶面积通过测量黄瓜植株最大叶片的长和宽，参考（裴孝伯 et al., 2005）的方法计算叶面积=长×宽×K（系数 K=0.743）。

1.2.2 叶片光合特性

在定植前，测定黄瓜幼苗最大叶片的气体交换参数。气体交换参数测定使用 LI-6400xt 便携式光合仪（美国 LI-COR 公司），设置光强 $300\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，叶温 25°C ， CO_2 浓度 $400\mu\text{mol mol}^{-1}$ 。在定植后第 1、3、7、14 和 28 天，每个小区选取 4 株具有代表性的黄瓜植株，测定最大叶片的气体交换参数和叶绿素荧光参数。气体交换参数测定使用 LI-6400xt 便携式光合仪，测定时间为晴天上午 9-11 时，控制光强 $1000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，叶温 25°C ， CO_2 浓度 $400\mu\text{mol mol}^{-1}$ 。叶绿素荧光测定参考 Klughammer 和 Schreiber（2008）的方法，使用 Mini-Pam 叶绿素荧光仪（德国 WALZ 公司）进行测定，黄瓜叶片经过半小时暗适应后，使用 2 个饱和脉冲先确定初始荧光（ F_0 ）、最大荧光（ F_m ），再用光强为 $324\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的红色光化光持续照射 8min，期间每 30s 提供使用一次饱和脉冲光，获得 PSII 最大光化学量子产量（ F_v/F_m ）、PSII 有效光化学效率（ Φ_{II} ）、PSII 处调节性能量耗散的量子产量（ Φ_{NPQ} ）、PSII 处非调节性能量耗散的量子产量（ Φ_{NO} ）和 PSII 电子传递速率（ ETR_{II} ）等叶绿素荧光参数。

在定植后第 1、3 和 7 天，每个小区随机选取 4 株黄瓜植株，使用 Handy PEA 植物效率分析仪（英国 Hansatech 公司）测定最大叶片的快速叶绿素荧光诱导动力学曲线（OJIP 曲线）。黄瓜叶片在 30min 暗适应后，使用 $3000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 饱和脉冲光诱导，以 $10\mu\text{s}$ 间隔记录 1s 内的荧光值。OJIP 曲线的相对可变荧光 $V_t=(F_t-F_0)/(F_m-F_0)$ 。 F_t 、 F_0 、 F_1 、 F_J 和 F_m 分别是 t 、0ms、2ms、30ms 和最大荧光值时对应的荧光强度。参考 Strasser et al.（2004）的方法对 OJIP 曲线进行 JIP-test 定量分析，所得荧光参数如下：PSII 最大光化学效率 $\text{TR}_0/\text{ABS}=\phi_{P_0}=1-(F_0/F_m)$ ，电子传递量子产额 $\text{ET}_0/\text{ABS}=\phi_{E_0}=[1-(F_0-F_m)](1-V_J)$ ，电子向质醌库的传递效率 $\text{ET}_0/\text{TR}_0=\psi_{E_0}=1-V_J$ ，PSI 受体侧末端电子还原的量子产率 $\text{RE}_0/\text{ABS}=\phi_{R_0}=[1-(F_0/F_m)](1-V_J)$ ，电子在 PSI 受体侧的还原效率 $\text{RE}_0/\text{ET}_0=\delta_{R_0}=(1-V_I)/(1-V_J)$ ，单位 PSII 叶绿素天线可还原 QA 的反应中心数量 $\text{RC}/\text{ABS}=\phi_{P_0}(V_J/M_0)$ ，光能从 PSII 吸收到还原电子受体的性能指数 $\text{PI}_{\text{ABS}}=\text{RC}/\text{ABS}\times[\phi_{P_0}/(1-\phi_{P_0})]\times[\psi_{E_0}/(1-\psi_{E_0})]$ ，光能从 PSII 吸收到还原 PSI 末端电子受体的性能指数 $\text{PI}_{\text{total}}=\text{PI}_{\text{ABS}}\delta_{R_0}/(1-\delta_{R_0})$ 。

1.2.3 花芽分化及产量

将黄瓜幼苗定植到日光温室后，每个小区选取 6 株具有代表性的黄瓜植株，记录第一朵雄花开花时间和节位，20 节以下的雌花开花时间和节位。跟踪记录小区内所有黄瓜植株的产量和瓜数，折合为每 m^2 的黄瓜产量和瓜数。

试验数据使用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件(美国 IBM 公司)单因素方差分析(one-way ANOVA)中 Tukey 方法进行多重比较显著性分析。

2 结果与分析

2.1 红蓝光质育苗对黄瓜幼苗质量的影响

表 1 红蓝光质育苗对黄瓜幼苗生长和叶片光合特性的影响

Table 1 Effects of light quality on plant growth and leaf gas exchange in cucumber plants

处理 Treatment	总叶面积(cm ²) Total leaf area	全株干重(g) Total dry weight		根冠比 root shoot ratio		净光合速率 Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	气孔导度 Gs ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	蒸腾速率 Tr ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				
		Total	dry	root	shoot								
CK	326.36±11.40 b	0.83±0.01	ab	0.06±0.00	a	11.54±0.21	a	0.39±0.05	a	403.90±5.96	b	5.09±0.36	a
R	297.98±8.03	b	0.52±0.02	c	0.05±0.00	2.99±0.36	c	0.15±0.01	b	433.10±8.54	a	2.79±0.17	b
RB	422.50±3.81	a	0.96±0.01	a	0.04±0.00	7.70±0.59	b	0.19±0.02	b	382.70±5.17	b	3.33±0.20	b
B	291.48±30.86 b	0.74±0.09	b	0.06±0.00	ab	12.35±0.42	a	0.41±0.07	a	386.20±6.31	b	5.21±0.46	a

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

Note: Different letters indicate significant differences at 0.05 level. The same as below.

红蓝光质育苗显著影响黄瓜幼苗的生长和叶片的光合特性。与白光相比，红光处理下黄瓜幼苗的全株干重、根冠比、净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)均显著降低(表 1); 红蓝组合光处理下黄瓜幼苗的根冠比、Pn、Gs 和 Tr 均显著降低，但总叶面积显著升高; 蓝光处理下没有显著变化。

2.2 红蓝光质育苗对黄瓜定植后营养生长的影响

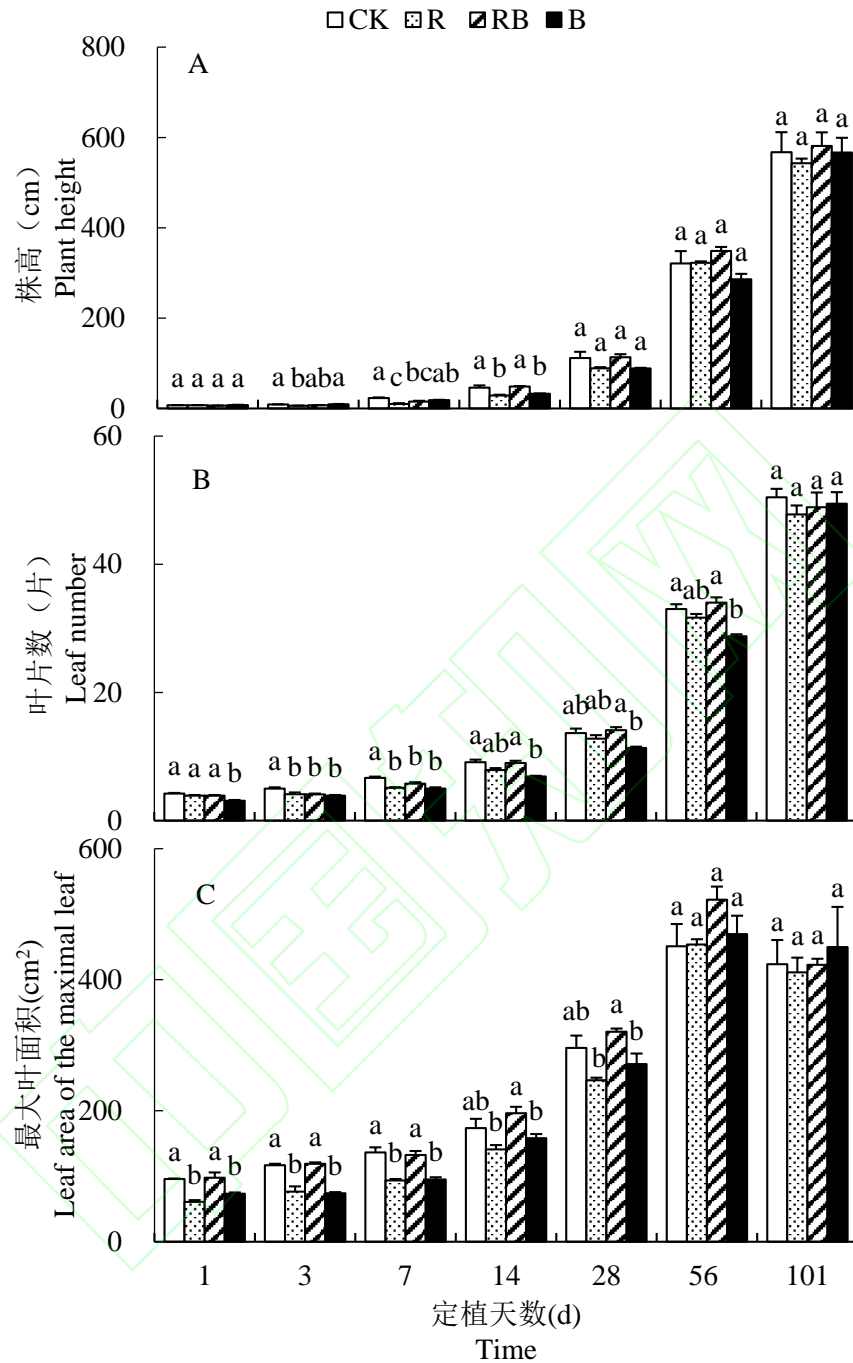


图 2 红蓝光质黄瓜育苗对株高 (A)、叶片数 (B) 和最大叶面积 (C) 的影响

不同小写字母表示在 0.05 水平存在显著性差异, 下同。

Fig. 2 Effects of light quality on plant height (A), leaf number (B) and leaf area of maximal leaf (C) in cucumber plants.

Different letters indicate significant differences at 0.05 level. The same as below.

红蓝光质育苗显著影响定植后黄瓜植株的营养生长。与白光相比, 红光处理在定植后 28 天内黄瓜生长缓慢, 其株高、叶片数和最大叶面积均显著降低, 随后恢复正常生长; 红蓝组合光处理在定植后 7 天内, 黄瓜株高和叶片数都显著降低; 蓝光处理在定植 56 天内, 黄瓜株高、叶片数和最大叶面积均显著降低, 随后恢复正常生长。

2.3 红蓝光质育苗对黄瓜定植后叶片光合特性的影响

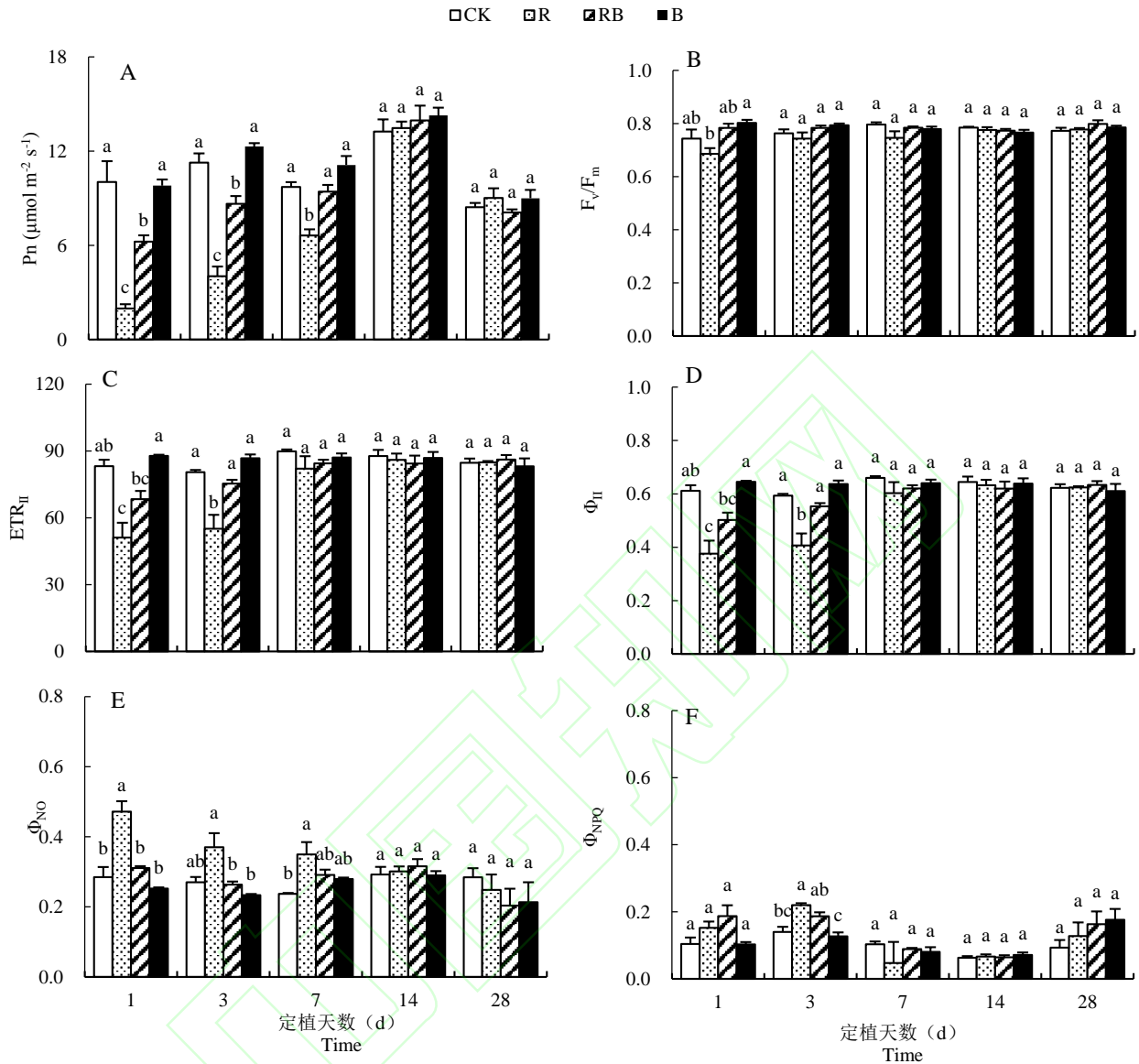


图3 红蓝光质黄瓜育苗对定植后叶片光合特性的影响。 F_v/F_m , PSII 最大光化学量子产量; ETR_{II} , 电子传递速率; Φ_{II} , PSII 有效光化学效率; Φ_{NO} , PSII 处非调节性能量耗散的量子产量; Φ_{NPQ} , PSII 处调节性能量耗散的量子产量。

Fig. 3 Effects of light quality on photosynthetic characteristics in cucumber plants. F_v/F_m , maximal photochemical quantum yield of PSII; ETR_{II} , electron transport rate of PSII; Φ_{II} , effective photochemical quantum yield of PSII; Φ_{NO} , quantum yield of non-light-induced non-photochemical fluorescence quenching in PSII; Φ_{NPQ} , quantum yield of light-induced non-photochemical fluorescence quenching in PSII.

整体而言, 定植后 7 天内, 不同光质处理黄瓜叶片的光合特性差异较大, 而 7 天后均能恢复到对照水平。由图 3 可知, 与对照相比, 红光处理下黄瓜叶片在定植后 7 天内光合作用受到一定程度的抑制, P_n 、电子传递速率 (ETR_{II})、PSII 有效光化学效率 (Φ_{II}) 均显著降低, 而 PSII 处非调节性能量耗散的量子产量 (Φ_{NO}) 和 PSII 处调节性能量耗散的量子产量 (Φ_{NPQ}) 显著升高; 红蓝组合光处理下黄瓜叶片的 P_n 在定植后 3 天内显著降低; 而蓝光处理下的叶片光合参数无显著变化。

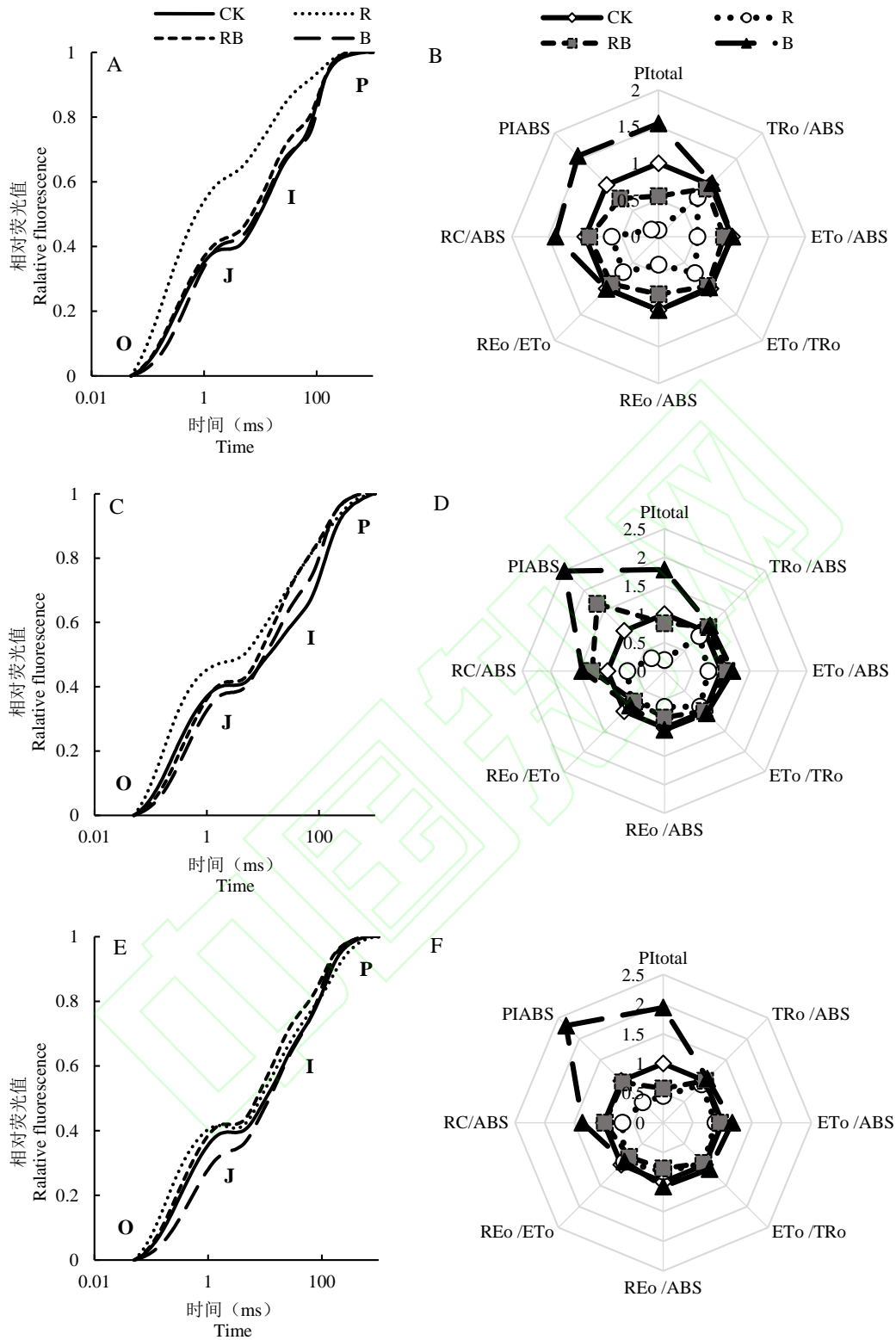


图4 红蓝光质处理黄瓜叶片的OJIP曲线(A、C、E)与JIP-test参数(B、D、F)。A和B在定植后第1天测定，C和D在定植后第3天测定，E和F在定植后第7天测定。 TR_o/ABS ，PSII最大光化学效率； ET_o/ABS ，电子传递量子产额； ET_o/TR_o ，电子向质醌库的传递效率； RE_o/ABS ，PSI受体侧末端电子还原的量子产率； RE_o/ET_o ，电子在PSI受体侧的还原效率； RC/ABS ，单位PSII叶绿素天线可还原 Q_A 的反应中心数量； PI_{ABS} ，光能从PSII吸收到还原电子受体的性能指数； PI_{total} ，光能从PSII吸收到还原PSI末端电子受体的性能指数。

Fig.4 Effects of light quality on OJIP curve (A, C and E) and JIP-test parameters (B, D and F) in cucumber plants

A and B were measured on Day 1, C and D were measured on Day 3, E and F were measured on Day 7. TR_o/ABS, maximum quantum yield for primary photochemistry; ET_o/ABS, quantum yield for electron transport; RE_o/ABS, quantum yield for reduction of end electron acceptors at the PSI acceptor side; ET_o/TR_o, efficiency/probability that an electron moves further than Q_A⁻; RE_o/ET_o, efficiency/probability with which an electron from the intersystem electron carriers is transferred to reduce end electron acceptors at the PSI acceptor side; RC/ABS, Q_A reducing RCs per PSII antenna Chl; PI_{ABS}, performance index (potential) for energy conservation from photons absorbed by PSII to the reduction of intersystem electron acceptors; PI_{total}, performance index (potential) for energy conservation from photons absorbed by PSII to the reduction of PSI end acceptors.

快速叶绿素荧光诱导动力学曲线（OJIP 曲线）进一步分析与探讨黄瓜叶片光合电子传递过程中的变化。由图 4 可知，不同光质处理下黄瓜叶片的叶绿素荧光值变化符合典型的 OJIP 曲线，在定植后 7 天内表现出不同状态。在定植后第 1 天，J 和 I 阶段相对荧光值（V_J 和 V_I）在红光处理叶片中最高，表明其光化学淬灭效率最低（图 4A）。在对应的 JIP-test 定量分析中，TR_o/ABS 表示光量子捕获能力，红光处理显著低于其他处理（图 4B）。ET_o/ABS 和 ET_o/TR_o 表示已捕获光能向电子传递链传递效率，两者在红光处理中显著降低，这与 V_J 升高相对应。RE_o/ABS 和 RE_o/ET_o 表示参与电子传递的能量用于还原光系统下游环节效率，两者在红光处理中最低，这与 V_I 上升有关。RC/ABS 表示光能捕获天线数量，PI_{ABS} 是叶片吸收光能用于电子传递的性能指数，PI_{total} 是叶片吸收光能到还原下游光受体的整体性能指数，这三个指标在红光处理中最低，白光和红蓝组合光处理其次，蓝光处理最高。

在定植后第 3 天，OJIP 曲线中 V_J 在红光处理中仍保持最高（图 4C）。通过 JIP-test 分析，红光处理的黄瓜叶片 ET_o/ABS 和 ET_o/TR_o 仍低于其他处理但差距不大，这与 V_J 升高有关（图 4D）。RC/ABS、PI_{ABS} 和 PI_{total} 在红光处理中最低，白光和红蓝组合光处理其次，蓝光处理最高。

在定植后第 7 天，OJIP 曲线在处理间没有显著变化（图 4E）。JIP-test 结果显示，蓝光处理中 PI_{ABS} 和 PI_{total} 均高于其他处理（图 4F）。

2.4 红蓝光质育苗对黄瓜开花和产量的影响

表 2 红蓝光质黄瓜育苗对开花时间和节位的影响

Table 2 Effect of light quality on flowering time and node in cucumber plants

处理 Treatment	第 1 朵雄花 The 1th male flower		第 1 朵雌花 The 1th female flower		第 2 朵雌 花节位 The 2nd female flower node	第 3 朵雌花 节位 The 3rd female flower node	第 4 朵雌花 节位 The 3rd female flower node	第 5 朵雌花 节位 The 3rd female flower node	前 20 节 雌花数 Female flower numbers
	开花时间 Flowering time (d)	节位 node	开花时间 Flowering time (d)	节位 node					
CK	16.9±0.1 b	2.9±0.2 a	18.8±0.5 c	8.9±0.4 a	11.8±0.5 a	14.6±0.6 a	17.0±0.3 a	—	3.3±0.5 a
R	22.2±1.4 a	3.8±0.8 a	26.8±0.2 a	8.9±0.4 a	12.5±0.8 a	14.4±0.8 a	16.6±1.8 ab	—	3.3±0.1 a
RB	17.0±0.2 b	2.2±0.1 a	21.0±0.5 b	6.9±0.3 b	9.9±0.6 ab	13.1±1.1 ab	15.6±0.8 ab	18.3	4.7±0.4 a
B	15.0±0.2 b	2.1±0.3 a	15.6±0.4 d	4.8±0.4 c	7.7±0.6 b	10.3±0.6 b	12.2±0.6 b	13.3	4.9±0.3 a

红蓝光质显著影响黄瓜植株花芽分化的时间及节位。白光处理下黄瓜植株第 1 朵雄花在定植第 17 天、第 3 节位开花；第 1 朵雌花在定植第 19 天、第 9 节位开花；前 20 个节位有

4 朵雌花 (表 2)。与白光相比, 红光处理的第 1 朵雄花和第 1 朵雌花的开花时间分别显著延后 5 天和 8 天; 红蓝组合光处理的第 1 朵雌花的开花时间显著延后 2 天, 节位降低 2 个, 前 20 节位有 5 朵雌花; 蓝光处理的第 1 朵雌花开花时间显著提前 3 天, 第 1-4 朵雌花节位均显著降低 4-5 个节位, 前 20 节位有 5 朵雌花。

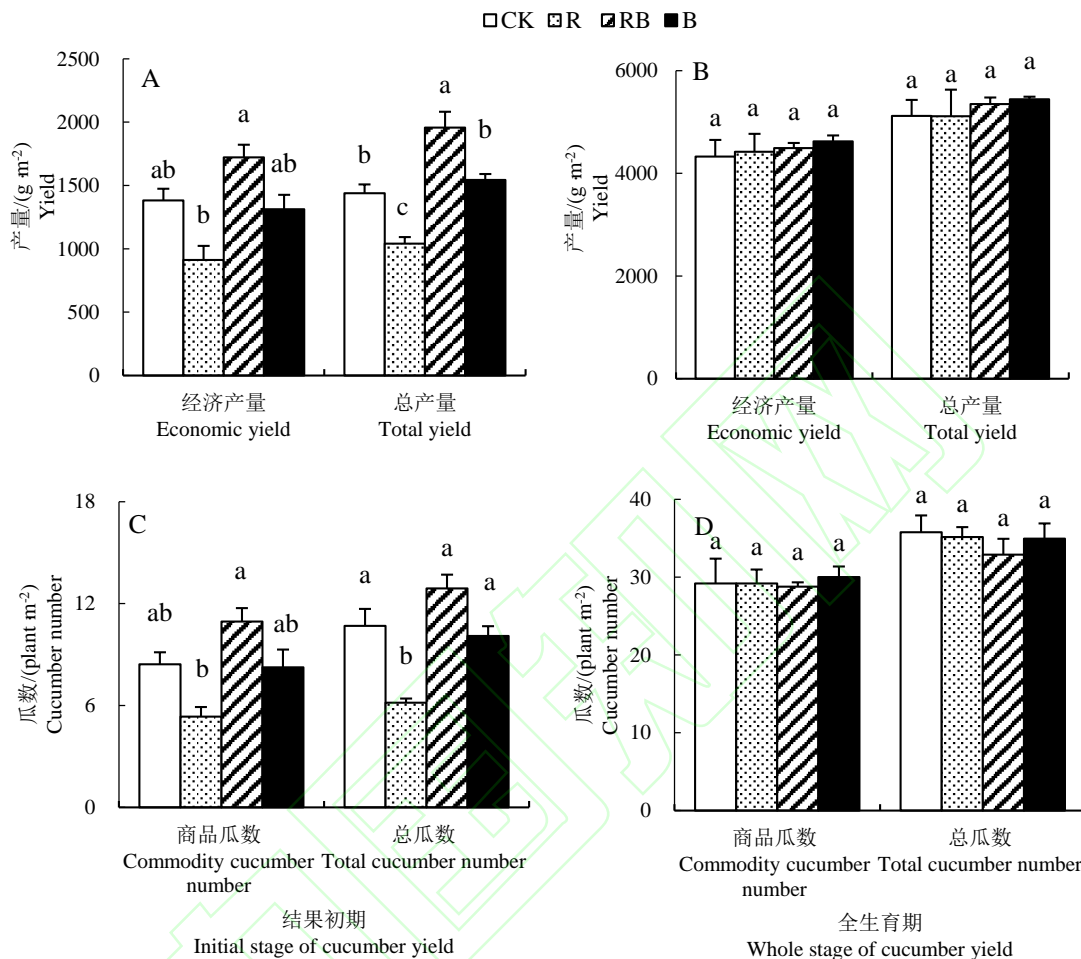


图 5 红蓝光质黄瓜育苗对结果初期 (A、C) 和全生育期 (B、D) 产量的影响

Figure 5 Effect of light qualities on initial (A and C) and whole (B and D) stage of cucumber yield

与白光相比, 不同光质育苗显著影响结果初期的黄瓜产量和瓜数 (图 5)。与白光相比, 红光处理中结果初期的总产量和总瓜数均显著降低, 红蓝组合光处理中结果初期的总产量显著增加。

3 讨论

3.1 红蓝光质育苗对黄瓜定植后叶片光合作用的影响

红蓝光质黄瓜育苗显著影响叶片光合效率, 红光短时间照射能提升叶片光合速率, 长时间照射植物则易造成叶片光合速率降低 (Hogewoning et al., 2010; Sun et al., 2012)。本试验中红光处理下黄瓜叶片的净光合速率, 定植前显著降低, 定植后逐步上升并恢复正常 (表 1, 图 3A), 定植前, 红光处理下黄瓜幼苗叶片的净光合速率降低, 可能是由于红光直接导

致黄瓜 Φ_{II} 活性降低, Φ_{NO} 升高 (图 3), 这与前人的研究结果基本一致 (Kim et al., 2004; Wang et al., 2009)。PSII 活性降低并且存在过剩光能, 易激发活性氧的过量产生, 进而损伤光合膜系统、破坏 PSII 反应中心的色素分子和蛋白质结构, 导致光合器官受损 (Tikkanen et al., 2014; 贾虎森 等, 2000)。本试验中, 红光严重抑制黄瓜叶片的光合电子传递性能 (图 4), 通过 JIP-test 方法对光合电子传递链具体受阻位点进行分析发现, 红光长期照射抑制叶片 PSII 天线色素光能捕获, 以及在一系列中间体 Q_A 、 Q_B 、PQ 库直至 PSI 受体的电子传递效率, 导致光合电子传递链性能降低。红光长期照射可能造成叶片栅栏组织细胞发育不良、叶绿体结构异常, 导致光合效率降低 (Kochetova et al., 2017; Liu et al., 2011)。定植后, 红光处理下黄瓜的净光合速率逐步上升并恢复正常, 可能由于太阳光照射下叶片 Φ_{II} 活性和电子传递链性能的提升 (图 3 和图 4), 这与蓝光和远红光等多种光质的综合效应密切相关。其中, 蓝光有利于提高光合电子传递性能, 促进气孔开放和叶绿体发育, 能有效缓解红光效应的负面影响 (Hogewoning et al., 2010; Trouwborst et al., 2015), 远红光在经光敏色素吸收后, 通过其状态改变可以逆转红光的作用 (Franklin & Quail, 2010)。

蓝光照射下植物叶片在叶绿体水平呈现阳生植物特征, 如较高光合效率 (Savvides et al., 2012)。本试验中, 与红光相比, 蓝光照射下黄瓜叶片光合效率在定植前、后一直保持较高水平, 这可能是由于蓝光照射下黄瓜拥有较高 Φ_{II} 活性 (图 3), 保证 PSII 天线色素对光能捕获、传递和转化过程的顺利进行。前期的研究表明, 蓝光促进 PSII 反应中心蛋白在基因水平上调, 提高其合成速率, 增强 PSII 反应中心内部结构的稳定性, 从而提升光合效率 (Miao et al., 2016)。此外, 蓝光增加 PI_{ABS} 和 PI_{total} , 提升从 PSII 到 PSI 受体侧的电子传递的整体性能, 保障光反应阶段的顺利进行 (图 4); 与红光相比, 蓝光提高叶片气孔导度, 有利于提升光合效率 (表 1), 蓝光经光受体隐花色素 (phytochrome, PHY) 和向光素 (phototropin, PHOT) 吸收后, 启动一系列蓝光介导的信号转导过程, 促使质膜 H^+ -ATPase 磷酸化, 气孔开放 (倪俊霞 等, 2010)。

3.2 红蓝光质育苗对黄瓜开花和产量的影响

黄瓜的花芽分化从苗期开始, 性型分化易受光环境的影响。本试验中, 红蓝光质影响黄瓜植株的开花时间和节位, 红光大大幅度推迟开花时间, 添加蓝光即红蓝组合光略微推迟开花时间, 单色蓝光促进开花时间提前 (表 2), 这与前人在花卉植物中的研究结果基本一致 (Fukuda et al., 2016; Heo et al., 2006)。大量研究表明, 植物通过光受体感受光环境信号变化来调控植物开花, 红光通过光敏色素 B、光敏色素 D 和光敏色素 E (PHYB/ D/ E) 抑制植物开花, 而蓝光主要通过光敏色素 A (PHYA) 和隐花色素 1 和隐花色素 2 (CRY1/2) 促进开花 (Lin, 2000; 宋佳丽 等, 2017)。黄瓜属于雌雄同株异花植物, 第 1 朵雌花开花节位是重要的农艺性状指标 (史建磊 等, 2016), 前人的研究表明, 蓝光和红蓝组合光能增加平均单株开花数目 (Heo et al., 2006; Li et al., 2012; 魏胜林 等, 1998)。本试验中, 蓝光和红蓝组合光中第 1 朵雌花节位均显著降低, 前 20 节均增加 1 朵雌花, 这可能是由于两个处理下黄瓜叶片光合效率高, 植株生长旺盛, 能为花芽分化和后期发育提供充足的能量和细胞结构成分, 然而具体的分子机制还有待进一步研究。

红蓝光质影响植株同化产物的积累和分配, 红光促进同化产物向营养器官分配, 而蓝光

促进向生殖器官分配（刘张垒，2014）。在菠菜、萝卜和生菜的研究证明，红蓝组合光比单一红光更有利于产量积累（Wang et al., 2016; Yorio et al., 2001）。本试验中，定植前，与红光相比，蓝光和红蓝组合光照射下的黄瓜幼苗叶片光合效率较高，促进干物质积累，全株干重显著升高（表 1）。定植后，红光育苗显著降低结果初期黄瓜总产量和总瓜数（图 5），这可能是由于红光育苗抑制黄瓜植株生长和光合作用，开花时间延迟，从而导致产量偏低（图 2、图 3 和表 2）。而红蓝组合光育苗显著增加结果初期黄瓜总产量，这可能是由于红蓝组合光下黄瓜雌花的开花时间较早，并且叶片光合效率高，能为果实发育提供充足的同化产物，保证产量形成。

综上所述，红光育苗抑制黄瓜定植后植株生长和光合作用，延后开花时间，降低结果初期黄瓜总产量和总瓜数，而添加蓝光即红蓝组合光育苗能有效减轻这些负面效应，并且显著增加结果初期的黄瓜总产量，同时单一蓝光育苗也有利于黄瓜定植后叶片光合作用，提前开花时间。

References

- Chang Tao-tao, Liu Xiao-ying, Xu Zhi-gang, Yang Yang. 2010. Effects of Light Spectral Energy Distribution on Growth and Development of Tomato Seedlings. *Scientia Agricultura Sinica*, 43(08), 1748-1756. (in Chinese)
- 常涛涛, 刘晓英, 徐志刚, 杨 杨. 2010. 不同光谱能量分布对番茄幼苗生长发育的影响. *中国农业科学*, 43(08), 1748-1756.
- Franklin K A, Quail P H. 2010. Phytochrome functions in *Arabidopsis* development. *Journal of Experimental Botany*, 61(1), 11-24.
- Fukuda N, Ajima C, Yukawa T, Olsen J E. 2016. Antagonistic action of blue and red light on shoot elongation in petunia depends on gibberellin, but the effects on flowering are not generally linked to gibberellin. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 102-111.
- Heo J, Lee C, Chakrabarty D, Paek K. 2002. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). *Plant Growth Regulation*, 38(3), 225-230.
- Heo J W, Lee C W, Murthy H, Paek K Y. 2003. Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen persicum* Mill. cv. 'Dixie White'. *Plant Growth Regulation*, 40(1), 7-10.
- Heo J W, Lee C W, Paek K Y. 2006. Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants. *Journal of Plant Biology*, 49(4), 286-290.
- Hogewoning S W, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, Van Ieperen W, Harbinson J. 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61(11), 3107-3117.
- Jia Hu-sen, Li De-quan, Han Ya-qin. 2000. Advances in studies on photoinhibition in photosynthesis of higher plants. *Chinese Bulletin of Botany*, 17(03), 218-224. (in Chinese)
- 贾虎森, 李德全, 韩亚琴. 2000. 高等植物光合作用的光抑制研究进展. *植物学通报*, 17(03), 218-224.
- Jiang Ming-yan and Pan Yuan-zhi. 2002. Effects of light quality on the photosynthetic characteristics and growth of poinsettia. *Acta Horticulturae Sinica*. 33(2), 338-343. (in Chinese)
- 江明艳, 潘远智. 2006. 不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响. *园艺学报*, 33(2), 338-343.
- Kim S J, Hahn E J, Heo J W, Paek K Y. 2004. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of *chrysanthemum* plantlets in vitro. *Scientia Horticulturae*, 101(1), 143-151.
- Klughammer C, Schreiber U. 2008. Saturation pulse method for assessment of energy conversion in PS I. PAM Application Notes, 1, 11-14.
- Kochetova G V, Belyaeva O B, Gorshkova D S, Vlasova T A, Bassarskaya E M, Zhigalova T V, Avercheva O V. 2017. Long-term acclimation of barley photosynthetic apparatus to narrow-band red and blue light. *Photosynthetica*, 56(3), 851-860.

- Li Hui-min, Tang Can-ming, Xu Zhi-gang, Liu Xiao-ying, Han Xue-lin. 2012. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *Journal of Agricultural Science*, 4(4), 262-273.
- Liang Yong-hong, Li Guang-lin, Guo tao, Wei Qiang. 2010. The molecular mechanism of sexual differentiation in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 22(11), 1177-1183. (in Chinese)
- 梁永宏, 李广林, 郭 韬, 魏 强. 2010. 黄瓜性型分化的分子机制. *生命科学*, 22(11), 1177-1183.
- Lin Chen-tao. 2000. Plant blue-light receptors. *Trends in Plant Science*, 5(8), 337-342.
- Liu Xiao-ying, Guo Shi-rong, Xu Zhi-gang, Jiao Xue-lei, Tezuka Takafumi. 2011. Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves, and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of light-emitting diodes. *Hortscience*, 46(2), 217-221.
- Liu Zhang-lei. 2014. Effect of light quality on growth, physiological characteristics, yield and quality of cucumber [M. D. Dissertation]. Taian: Shandong Agricultural University. (in Chinese)
- 刘张垒. 2014. 光质对黄瓜生长、生理特性、产量及品质的影响[硕士论文]. 泰安: 山东农业大学.
- Miao Yan-xiu, Wang Xiao-zhuo, Gao Li-hong, Chen Qing-yun, Qu Mei. 2016. Blue light is more essential than red light for maintaining the activities of photosystem II and I and photosynthetic electron transport capacity in cucumber leaves. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(1), 87-100.
- Ni Jun-xia, Yan Xue-bing, Wang Cheng-zhang, Wu Peng-ju. 2010. Research progress of light receptors in plants, 27(7), 94-104. (in Chinese)
- 倪俊霞, 严学兵, 王成章, 吴鹏举. 2010. 植物光受体分子生物学研究进展. *草业科学*, 27(7), 94-104.
- Nishidate K, Kanayama Y, Nishiyama M, Yamamoto T, Hamaguchi Y, Kanahama K. 2012. Far-red light supplemented with weak red light promotes flowering of *Gypsophila paniculata*. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 81(2), 198-203.
- Pei Xiao-bo, Li Shi-cheng, Zhang Fu-man, Cai Run. Study on leaf area calculation and its correlation with plant height of cucumber in greenhouse. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 21(8), 80-82. (in Chinese)
- 裴孝伯, 李世诚, 张福曼, 蔡 润. 2005. 温室黄瓜叶面积计算及其与株高的相关性研究. *中国农学通报*, 21(8), 80-82.
- Qu Bo, Zhang Wei, Chen Xu-hui, Li Nan, Cui Na, Li Tian-lai. 2010. Research progress of flower bud differentiation mechanism of plant. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 26(24), 109-114. (in Chinese)
- 曲 波, 张 微, 陈旭辉, 李 楠, 崔 娜, 李天来. 2010. 植物花芽分化研究进展. *中国农学通报*, 26(24), 109-114.
- Rehman M, Ullah S, Bao Y, Wang B, Peng D, Liu L. 2017. Light-emitting diodes: whether an efficient source of light for indoor plants? *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(32), 1-10.
- Savvides A, Fanourakis D, van Ieperen W. 2012. Co-ordination of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves. *Journal of Experimental Botany*, 63(3), 1135-1143.
- Shi Jian-lei, Chen Xian-zhi, Huang Zong-an, Wang Yan, Wang Ke-lei, Xu Jian. 2016. Genetic diversity evaluation on main agronomic traits in south china ecotypic cucumber. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 30(10), 1914-1924. (in Chinese)
- 史建磊, 陈先知, 黄宗安, 王 燕, 王克磊, 徐 坚. 2016. 华南型黄瓜主要农艺性状遗传多样性评价. *核农学报*, 30(10), 1914-1924.
- Song Jia-Li, Liu Hou-Cheng, Song Shi-Wei, Zhang Yi-Ting, Hao Yan-Wei, Su Wei, Sun Guang-Wen, Chen Ri-Yuan. 2017. Advances in regulation of light quality on flowering time and sex differentiation in plant. *Plant Physiology Journal*, 53(11), 1938-1946. (in Chinese)
- 宋佳丽, 刘厚诚, 宋世威, 张轶婷, 郝彦伟, 苏 蔚, 孙光闻, 陈日远. 2017. 光质调控植物开花时间和花性分化研究进展. *植物生理学报*, 53(11), 1938-1946
- Srikanth A, Schmid M. 2011. Regulation of flowering time: all roads lead to Rome. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 68(12), 2013-2037.
- Strasser R, Tsimilli-Michael M, Srivastava A. 2004. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. Berlin: Springer Netherlands:321-362
- Sun Na, Wei Min, Li Yan, Wang Xiu-feng, Yang Feng-juan, Shi Qing-hua. 2016. Effects of light quality on carbon and nitrogen metabolism and enzyme activities in tomato seedlings. *Acta Horticulturae Sinica*, 43(1), 80-88. (in Chinese)
- 孙 娜, 魏 珉, 李 岩, 王秀峰, 杨凤娟, 史庆华. 2016. 光质对番茄幼苗碳氮代谢及相关酶活性的影响. *园艺学报*, 43(1),

- Sun Wei, Ubierna Nerea, Ma Jian-ying, Cousins Asaph B. 2012. The influence of light quality on C4 photosynthesis under steady-state conditions in *Zea mays* and *Miscanthus × giganteus*: changes in rates of photosynthesis but not the efficiency of the CO₂ concentrating mechanism. *Plant Cell and Environment*, 35(5), 982-993.
- Terfa M T, Solhaug K A, Gislerød H R, Olsen J E, Torre S. 2013. A high proportion of blue light increases the photosynthesis capacity and leaf formation rate of *Rosa × hybrida* but does not affect time to flower opening. *Physiologia Plantarum*, 148(1), 146-159.
- Tikkanen M, Mekala N R, Aro E-M. 2014. Photosystem II photoinhibition-repair cycle protects Photosystem I from irreversible damage. *Biochimica Et Biophysica Acta-Bioenergetics*, 1837(1), 210-215.
- Trouwborst G, Hogewoning S W, van Kooten O, Harbinson J, van Ieperen W. 2015. Plasticity of photosynthesis after the 'red light syndrome' in Cucumber. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 75-82.
- Wang Hong, Gu Min, Cui Jin-xia, Shi Kai, Zhou Yan-hong., Yu Jing-quan. 2009. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology*, 96(1), 30-37.
- Wang Jun, Wei Lu, Tong Yu-xin, Yang Qi-chang. 2016. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*, 7, 250.
- Wei Sheng-lin, Wang Jia-bao, Li Chun-bao. 1998. Effects of blue light and red light on *dendranthema* growth and flowering. *Acta Horticulturae Sinica*, 25(2), 203-204. (in Chinese)
- 魏胜林, 王家保, 李春保. 1998. 蓝光和红光对菊花生长和开花的影响. *园艺学报*, 25(2), 203-204.
- Wollaeger H M, Runkle E S. 2015. Growth and acclimation of impatiens, salvia, petunia, and tomato seedlings to blue and red light. *HortScience*, 50(4), 522-529.
- Yang You-xin, Wang Feng, Cai Jia-xing, Yu Jing-quan, Zhou Yan-hong. 2014. Recent advances in the role of light quality and phytochrome in plant defense resistance against environmental stresses. *Acta Horticulturae Sinica*, 41(9), 1861-1872. (in Chinese)
- 杨有新, 王峰, 蔡加星, 喻景权, 周艳虹. 2014. 光质和光敏色素在植物逆境响应中的作用研究进展. *园艺学报*, 41(9), 1861-1872.
- Yang Zhen-chao, He Wei, Mou Sun-tao, Wang Xiao-xu, Chen Dan-yan, Hu Xiao-ting, Chen Le-han, Bai Jing-yu. 2017. Plant growth and development of pepper seedlings under different photoperiods and photon flux ratios of red and blue LEDs. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33(17), 173-180.
- Yorio N C, Goins G D, Kagie H R, Wheeler R M, Sager J C. 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *Hortscience*, 36(2), 380-383.
- Yuan Gao-feng. 2004. Sexual differentiation in cucumber plants. [M. D. Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University. (in Chinese)
- 袁高峰. 2004. 黄瓜性别分化的研究[硕士论文]. 杭州: 浙江大学.
- Zhang Zi-shan., Jin Li-qiao., Li Yu-ting., Tikkanen Mikko, Li Qing-ming., Ai Xi-zhen., Gao Hui-yuan. 2016. Ultraviolet-B radiation (UV-B) relieves chilling-light-induced PSI photoinhibition and accelerates the recovery of CO₂ assimilation in cucumber (*Cucumis sativus* L.) leaves. *Scientific Reports*, 6, 34455.