

不同 LED 光质对番茄幼苗生长特性的影响

何诗行 何堤 许春林 赵立军 陈亚

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为保证设施番茄周年生产的壮苗供给,研究了人工气候环境下不同光质处理对番茄幼苗不同时期内生长特性的影响,以确定培育番茄壮苗的最佳人工光源。试验采用 LED 为光源,选取红蓝比分别为 3(RB3/1)、5(RB5/1)、7(RB7/1)和白光(W)4个处理对番茄幼苗进行为期 28 d 的照射,光周期为 12 h/12 h,自然光照射为对照,并利用综合评价方法分析不同 LED 光质对番茄幼苗不同时期内生长特性的影响。试验结果表明:光质对番茄苗期下胚轴、叶面积和根冠比的影响极显著($P < 0.01$);生长初期光质对幼苗生长株高、茎粗、根数、根长、生物量、壮苗指数和 G 值的影响不显著,而后变为显著($P < 0.05$),且不同时期内光质对各项指标的影响存在差异;依据不同生长期各项指标的综合评价结果,确定番茄苗期较优光照组合为出芽后两周内采用红蓝比为 RB7/1 光质,而后采用白光 LED 光质进行照射;红蓝比为 RB3/1 的光质不适宜单独作为照射光源用于培育番茄壮苗。

关键词: 番茄幼苗; LED 光质; 生长特性; 综合评价

中图分类号: S627 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)12-0319-08

Effect of Different LED Light Qualities on Growth Characteristics of Tomato Seedlings

HE Shihang HE Di XU Chunlin ZHAO Lijun CHEN Ya

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to ensure the supplement of healthy seedlings in tomato anniversary production, the effect of different light qualities on the growth characteristic of tomato seedlings was investigated during different periods in the artificial climate environment, and the optimal artificial light was confirmed for the seedlings. LED was chosen as the experimental light. Because the small size, durability, long lifetime, cool emitting temperature, and the specific wavelengths for a targeted cultivation made them more suitable than traditional light sources. Therefore, three treatments of mixed red and blue LED qualities of RB3/1, RB5/1 and RB7/1 and white LED (W) were used to illuminate the tomato seedlings with the photoperiod of 12 h/12 h and the natural light irradiation as the compared treatment. The comprehensive evaluation method was adopted to analyze the effect of different light qualities on the growth characteristic of the tomato seedlings during different periods. The results showed that the employment of white LED and the combination of red and blue LED as the single light source in an artificial climate system could meet the requirement of tomato seedlings growth. Light quality had extremely significant effect on the hypocotyls length, leaf area and ratio of root to shoot ($P < 0.01$). Light quality had no effect on plant height, stem diameter, number of roots, root length, biological mass, seedling index and G value during early period and then it was turned into significant level ($P < 0.05$). The influences of light quality on these indicators differed during different phases at the same time. According to the results of comprehensive evaluation method within each phase, the optimal light formula was determined: RB7/1 maintained for two weeks after germination and then was replaced by white LED for the next stage of cultivation. While the RB3/1 treatment, which got the lowest comprehensive evaluation score and was inferior to the control group, was not suitable as the single light for tomato seedlings growth obviously. This research provided references for both of the selection of artificial light source and a model of tomato seedlings cultivation for short-time cultivation tomatoes in greenhouse.

Key words: tomato seedlings; LED light qualities; growth characteristics; comprehensive evaluation

收稿日期: 2017-04-10 修回日期: 2017-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405078)、黑龙江省博士后项目(LBH-Z13022)和哈尔滨市科技局项目(2014DB6AN026)

作者简介: 何诗行(1989—),女,博士生,主要从事设施农业工程研究,E-mail: shh_he@126.com

通信作者: 何堤(1951—),男,教授,博士生导师,主要从事设施农业工程研究,E-mail: hedi4826@163.com

引言

番茄是我国设施园艺的主要作物之一,目前其栽培面积达 101.17 万 hm^2 ^[1-2]。采用大型设施周年生产番茄更需要大批量番茄壮苗供应。因此,由自然光平面育苗方式向人造光立体培育苗是必然趋势。与此同时培育壮苗作为设施番茄连续周年生产的基础环节,对于果实产量以及品质的保障发挥重要作用^[3]。在影响幼苗生长的诸多环境因素中,对于人工光环境的研究,能够降低连续阴雨天和雾霾等不利气候对其生长的制约,有利于标准化育秧,对于设施番茄规范化生产管理以及实现高效生产具有重要意义^[4-6]。

光质作为光环境中重要因素通过光受体调节植物的光形态建成和生长发育。Mc Cree 曲线表明植物吸收光波波段集中在 350 ~ 720 nm 的可见光部分^[7], 600 ~ 700 nm 之间的红光是植物最主要的吸收波段,约占被吸收的生理辐射光能的 85%, 400 ~ 500 nm 之间的蓝光约占 12%^[8],因此红蓝光是植物生长所必须的光质。红光主要用于生成同化物,积累生物量^[9], 蓝光是叶绿素合成和叶绿体形成的必要条件,通过控制气孔形态影响植物形态^[10]。在人工气候条件下,植物的光合作用所需的光能完全依靠人工光源提供,因此选择适宜的人工光源是十分必要的。

LED 光源是一种可以近距离照射植物的冷光源,可根据种植目的选用特定光谱波长,能量转化效率高^[11],在温室高湿环境下,其使用寿命仍远远超过其他光源^[12]。随着 LED 生产技术和制造成本的降低,越来越多的国内外学者关注于将其应用到设施农业照明领域,主要应用在温室补光和人工照明方面^[13-16]。前人研究多关注于照明以及补光光质对作物幼苗生长发育的影响,但在人工气候条件下,针对番茄幼苗生长不同时期内所需人工光源光质的研究相对较少。

本文旨在人工气候条件下,研究不同 LED 光源照射对番茄幼苗不同时期内生长特性的影响,通过综合评价方法筛选较优的光质组合,为设施番茄育苗过程中人工光源光质的合理和高效选择提供理论基础和科学依据,为设施番茄短程栽培提供新的育苗模式。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

以“佳人”番茄 (*Lycopersicon esculentum* Miller) 为试验材料,由东北农业大学园艺学院提供,育苗基

质采用泥炭:珍珠岩:蛭石体积比为 3:1:1 的混合基质,72 穴秧盘育苗。

试验在人工气候箱中进行,试验光源为 4 种不同光质的 LED 植物生长灯(深圳华宸节能照明有限公司),红蓝光质比值为 3 (RB3/1)、5 (RB5/1)、7 (RB7/1) 和白光 (W),其中红光峰值波长 630 nm,蓝光峰值波长为 460 nm,波长半宽为 20 nm。各处理采用 6 支功率为 9 W 的 LED 灯管作为照射光源,安装固定于秧苗上方,光照方向由上至下,高度可调。不同处理之间均粘贴遮光纸避免外界光源和不同光源间的影响。对照组为无人工光源照射的自然光照。

1.2 试验设计

试验于 2016 年 10—11 月进行。种子经过晾晒、选种、消毒后放至 28℃ 恒温培养箱中催芽,出芽后于 10 月 28 日播种,每穴 1 粒。芽出土后于 11 月 1 日开始光照处理,2 ~ 3 d 浇一次水,至 11 月 29 日试验结束,处理周期为 28 d。生长期通过调节苗盘与光源之间距离使各处理的光量子通量密度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。利用单片机控制各组处理光照时间为 06:00—18:00,保证明光期和暗光期为 12 h。试验期间明光期温度设定为 28 ~ 30℃,暗光期温度为 19 ~ 21℃,相对湿度为 50% ~ 70%。

1.3 测试指标与方法

1.3.1 幼苗形态指标的测定

每处理随机选取 10 株幼苗,从 11 月 1 日开始每 7 d 采集一次指标,用直尺测量番茄幼苗株高,用游标卡尺测量下胚轴长度、茎粗和根长,统计根数,用纸样称量法测定叶面积^[17]。壮苗指数、G 值和根冠比参照文献^[18]。

1.3.2 幼苗生物量指标的测定

用分析天平(精度为 0.000 1 g,美国奥豪斯 DV215CD 型电子分析天平)称量幼苗鲜质量,将地上部分与地下部分分离封于纸袋中 105℃ 下杀青 20 min,75℃ 下干燥至恒质量后称量地上和地下部分干质量,重复测量 3 次取平均值。

1.4 数据处理

Excel 软件处理数据,SPSS 17.0 软件进行方差分析,Duncan 新复极差法方法进行多重比较($\alpha = 0.05$),Origin 9 软件作图。

1.5 综合评价分析

采用综合评价法分析各评价指标。5 组处理 (m) 选取 11 个指标 (n) 构成决策矩阵 $\mathbf{X} = x_{n \times m}$,正、负向指标分别为

$$R_1 = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \alpha + 1 - \alpha \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \alpha + 1 - \alpha \quad (2)$$

式中 R_1, R_2 ——转化后的隶属函数值

x_{ij} ——原始指标

$\min(x_{ij})$ ——第 i 个处理中第 j 个指标最小值

$\max(x_{ij})$ ——第 i 个处理中第 j 个指标最大值

α ——功效系数, 取 0.6^[19]

由隶属度值构建隶属函数矩阵 R 。因各项指标对幼苗生长特性的作用不一致, 为消除评价指标量纲和数量级不同的影响, 采用熵值法获得权重, 得信息熵为

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij} \quad (3)$$

其中

$$r_{ij} = \frac{R'_{ij}}{\sum_{i=1}^m R'_{ij}} \quad (4)$$

某项指标值变异程度越大, 其熵值 H_j 越小, 该指标提供的信息量越大^[20]。利用信息熵 H_j 计算指标权重

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (5)$$

综合评价隶属度 U 由隶属函数矩阵 R 和权重分配集 W 确定, 即

$$U = RW$$

2 结果与分析

2.1 光质对不同时期番茄幼苗形态的影响

11 月 29 日试验结束时, 不同光质处理下长势一

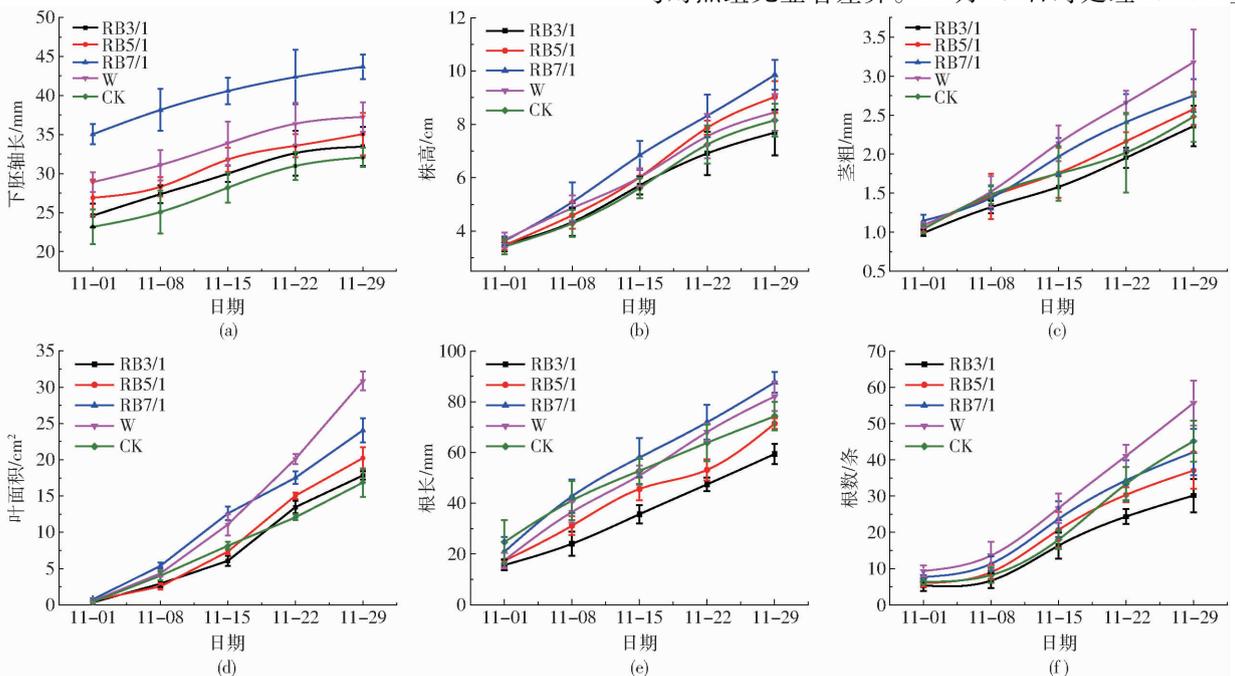


图 2 光质对番茄幼苗不同时期形态指标的影响

Fig. 2 Effect of light qualities on morphological index of tomato seedlings during different periods

致且具有代表性番茄幼苗生长情况如图 1 所示。



图 1 不同光质处理下番茄幼苗的生长情况

Fig. 1 Growth condition of tomato seedlings under different light qualities

下胚轴长度能够反应幼苗的徒长情况^[21], 光质处理对番茄幼苗不同时期下胚轴的影响如图 2a 所示, 达到极显著水平 ($P < 0.01$)。处理 RB7/1 下胚轴长度始终显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 处理 RB5/1、RB3/1 和 W 下胚轴长度差异不显著。11 月 29 日时, 处理 RB7/1 较对照组下胚轴长 36.16%, 差异显著 ($P < 0.05$), 其他组与对照组差异不显著。

株高和茎粗是反映植株营养生长状况的重要指标, 光质处理对番茄幼苗不同时期株高的影响如图 2b 所示。11 月 15 日之前, 不同处理间无显著差异, 11 月 22 日后光质对株高影响显著 ($P < 0.05$), 11 月 29 日时影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。此时, 处理 RB7/1 较对照组株高大 17.91%, 达到显著水平 ($P < 0.05$), 其他处理与对照组无显著差异。

光质处理对番茄幼苗不同时期茎粗的影响如图 2c 所示。11 月 15 日后光质对茎粗影响达到显著水平 ($P < 0.05$)。11 月 22 日时处理 RB7/1 与 W 茎粗显著大于对照组 ($P < 0.05$), 处理 RB5/1 与 RB3/1 与对照组无显著差异。11 月 29 日时处理 RB7/1 茎

粗比对照组大 23.38%，达到显著水平 ($P < 0.05$)，其他组与对照组无显著差异。

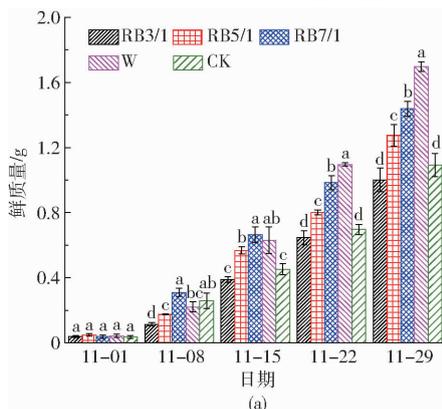
叶片是光合作用的主要场所，叶面积影响生物学产量的积累^[22-23]。不同光质处理对不同生长期番茄幼苗叶面积的影响如图 2d 所示，影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。11 月 8 日—15 日，处理 RB7/1 的叶面积最大，处理 W 次之，RB3/1 叶面积最小。11 月 22 日时，处理 W 的叶面积最大，处理 RB7/1 次之，这两组处理分别比对照组叶面积大 66.73% 和 45.25%，差异显著 ($P < 0.05$)。11 月 29 日时，处理 W、RB7/1 和 RB5/1 分别比对照组叶面积大 83.02%、42.68% 和 19.94%，差异显著 ($P < 0.05$)，处理 RB3/1 叶面积较对照组略大，但差异不显著。

根系的生长发育状况直接影响到地上部的生长和产量的形成^[24]，光质处理对番茄幼苗不同时期根长的影响如图 2e 所示。11 月 8 日后光质处理对根长影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。11 月 22 日时，处理 RB7/1 和 W 的根长与对照组无显著差异，处理 RB3/1 和 RB5/1 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。11 月 29 日时，处理 RB7/1 根长比对照组大 17.95%，差异显著 ($P < 0.05$)，处理 RB5/1 与 W 与对照组无显著差异，而处理 RB3/1 根长比对照组小 25.07%。

光质处理对番茄幼苗不同时期根数的影响如图 2f 所示。11 月 15 日前光质对番茄苗期根数的影响达到显著水平 ($P < 0.05$)，11 月 22 日后光质对该指标影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)，此时处理 W 的根数显著高于对照组 ($P < 0.05$)，处理 RB5/1 和 RB7/1 与对照组无显著差异。随着番茄苗生长，11 月 29 日时处理 W 根数比对照组多 23.71%，差异显著 ($P < 0.05$)，红蓝配比的 3 个处理与对照组无显著差异。

2.2 光质对不同时期番茄幼苗生物量的影响

不同光质处理对不同时期番茄幼苗生物量的影



响如图 3 所示 (图上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同)。由图 3a 可以看出, 幼苗初期, 各处理对幼苗鲜质量影响不显著, 11 月 8 日后光质对鲜质量影响达到极显著水平 ($P < 0.01$), 且鲜质量随着红蓝配比的增加而增加。11 月 15 日时, 处理 RB7/1 与 W 鲜质量显著高于对照组, 但前两者差异则不显著。11 月 29 日时, 处理 W 鲜质量最大, 此时处理 W、RB7/1 和 RB5/1 鲜质量分别比对照组大 55.48%、31.82 和 16.80%，差异显著 ($P < 0.05$)，处理 RB3/1 与对照组差异不显著。由图 3b 可以看出, 随着幼苗的生长光质处理对干质量的影响由前期的不显著到 11 月 8 日开始呈现显著影响 ($P < 0.05$)。从 11 月 15 日处理 W 下的幼苗干质量最大, 处理 RB7/1 次之, 至 11 月 29 日时, 处理 W、RB7/1 和 RB5/1 的幼苗干质量分别较对照组大 73.80%、27.37% 和 11.85%，差异显著 ($P < 0.05$)，处理 RB3/1 与对照组差异不显著。由此可知, 在番茄幼苗生长的中后期, 红蓝光质配比下的番茄幼苗鲜干质量均随着红光添加量的增加而增加, 且在此期间, 白光 LED 处理的番茄鲜干质量逐渐高于红蓝配比光。

2.3 光质对不同时期番茄幼苗壮苗指标的影响

光质处理对番茄幼苗壮苗指标的影响如图 4 所示, 由方差分析可知, 光质对初期番茄幼苗壮苗指标影响显著 ($P < 0.05$), 11 月 8 日后影响达到极显著水平 ($P < 0.01$)。11 月 8 日时处理 RB7/1 的壮苗指数最大, 处理 W 次之, 但该两组处理与对照组差异不显著。11 月 29 日, 处理 W 的壮苗指数比对照组提高了 70.51%，差异显著 ($P < 0.05$)，但红蓝配比光处理下的壮苗指数则与对照组差异不显著。

根冠比可以用来表征光合产物在植株体内的分配以及生长特性^[25]。光质对番茄幼苗根冠比的影响达到显著水平 ($P < 0.01$)。初期处理 W 根冠比

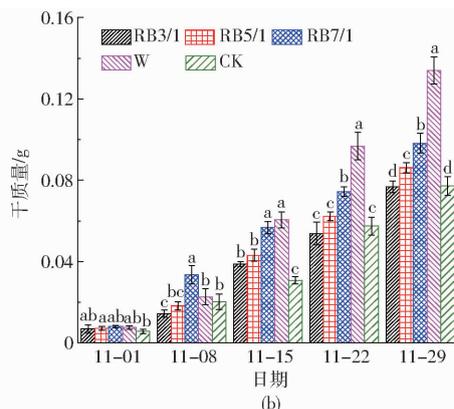


图 3 光质对番茄幼苗不同时期生物量的影响

Fig. 3 Effect of light qualities on biomass of tomato seedlings during different periods

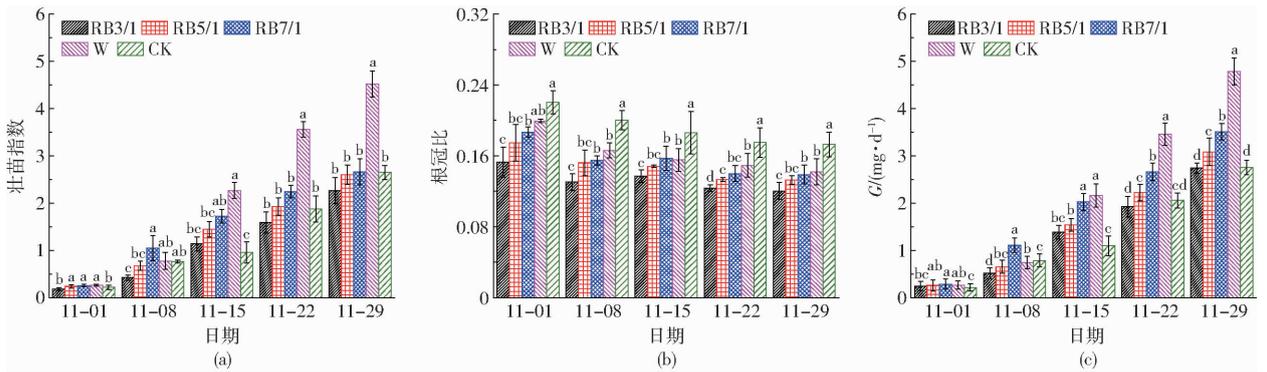


图 4 光质对番茄幼苗不同时期壮苗指标的影响

Fig. 4 Effect of light qualities on healthy seedling parameters of tomato seedlings during different periods

虽低于对照组,但差异不显著,11月8日后,对照组根冠比显著高于其他各处理($P < 0.05$),11月29日时,处理RB7/1和W的根冠比分别为对照组的80.38%和82.06%。

G 值能够反映出番茄幼苗干物质积累的速率。光质对初期番茄幼苗 G 值影响显著($P < 0.05$),11月8日后该影响达到了极显著水平($P < 0.01$)。幼苗生长前期,处理RB7/1干物质积累的速率较快,而11月22日开始,处理W的 G 值最大,处理RB7/1次之,11月29日时,处理W、RB7/1和RB5/1的 G 值较对照组分别大73.80%、27.36%和

11.84%,差异显著($P < 0.05$),处理RB3/1略低于对照组,但差异不显著。

2.4 光质对不同时期番茄幼苗指标的综合评价

光质处理对番茄幼苗不同时期内各项参数指标的影响存在差异,凭单一指标难以评判不同处理优劣,因此采用综合评价方法以确定番茄苗期的最优人工光源组合,如表1所示。

由表1综合排名可以看出,11月1日与11月8日各处理综合评分中、处理RB7/1条件下幼苗各项指标综合评分最高,处理W综合评分次之。由此可见,在此阶段内,最佳光质为红蓝配比RB7/1的

表 1 不同时期番茄幼苗指标隶属度与综合评价指标

Tab. 1 Dependence degree and indexes for comprehensive evaluation of tomato seedlings indexes during different periods

日期	评价单元	下胚轴长	株高	茎粗	根长	根数	叶面积	鲜质量	干质量	壮苗指数	根冠比	G	综合评分	排名
11-01	RB3/1	0.071 3	0.061 9	0.032 3	0.042 2	0.041 6	0.039 7	0.056 0	0.054 8	0.033 9	0.033 5	0.051 6	0.518 8	5
	RB5/1	0.062 3	0.061 9	0.051 6	0.054 0	0.052 0	0.078 3	0.102 5	0.062 0	0.068 9	0.049 6	0.060 5	0.703 6	3
	RB7/1	0.062 4	0.107 9	0.080 7	0.055 3	0.104 1	0.068 5	0.074 0	0.066 5	0.084 7	0.068 1	0.066 3	0.838 3	1
	W	0.030 7	0.100 6	0.069 2	0.078 8	0.078 1	0.099 2	0.051 5	0.076 3	0.080 2	0.058 7	0.078 4	0.801 6	2
	CK	0.076 8	0.043 2	0.061 3	0.105 6	0.057 2	0.048 6	0.041 0	0.030 5	0.056 9	0.083 8	0.031 4	0.636 4	4
11-08	RB3/1	0.065 7	0.061 7	0.031 0	0.034 6	0.037 6	0.046 9	0.033 6	0.036 6	0.029 6	0.032 8	0.034 6	0.444 6	5
	RB5/1	0.062 5	0.061 3	0.056 8	0.054 3	0.056 6	0.039 0	0.048 9	0.047 7	0.047 5	0.048 2	0.046 6	0.569 4	4
	RB7/1	0.029 3	0.153 3	0.063 1	0.086 5	0.075 6	0.097 6	0.083 9	0.091 4	0.074 0	0.050 1	0.086 5	0.891 3	1
	W	0.059 8	0.126 9	0.077 4	0.069 3	0.094 0	0.076 0	0.060 9	0.060 5	0.054 8	0.058 0	0.054 2	0.792 0	2
	CK	0.073 3	0.067 0	0.048 5	0.081 8	0.050 1	0.069 6	0.070 8	0.053 5	0.054 1	0.082 0	0.058 2	0.708 9	3
11-15	RB3/1	0.063 8	0.049 8	0.035 7	0.037 6	0.035 1	0.038 0	0.036 2	0.050 5	0.043 5	0.032 2	0.050 5	0.472 8	5
	RB5/1	0.055 8	0.050 2	0.053 4	0.070 6	0.057 2	0.049 1	0.071 4	0.058 4	0.056 4	0.043 1	0.058 4	0.624 1	3
	RB7/1	0.027 5	0.124 4	0.069 4	0.111 4	0.072 5	0.094 9	0.090 5	0.083 0	0.067 5	0.052 0	0.083 0	0.876 1	2
	W	0.055 8	0.074 4	0.089 2	0.088 2	0.087 8	0.081 6	0.083 7	0.090 0	0.089 9	0.050 3	0.089 9	0.880 8	1
	CK	0.068 8	0.055 7	0.045 2	0.094 1	0.045 3	0.056 0	0.048 5	0.036 0	0.036 0	0.080 5	0.036 0	0.602 1	4
11-22	RB3/1	0.063 7	0.043 8	0.041 0	0.032 8	0.026 1	0.062 0	0.037 8	0.038 2	0.036 7	0.031 5	0.038 2	0.452 0	5
	RB5/1	0.060 1	0.043 6	0.051 4	0.044 3	0.040 3	0.084 1	0.057 4	0.049 5	0.046 1	0.040 6	0.049 5	0.566 9	3
	RB7/1	0.026 5	0.072 5	0.066 6	0.082 0	0.049 7	0.118 7	0.080 4	0.065 7	0.054 9	0.046 8	0.065 7	0.729 5	2
	W	0.057 0	0.057 7	0.102 6	0.074 2	0.065 4	0.155 0	0.094 5	0.095 5	0.091 9	0.055 2	0.095 5	0.944 6	1
	CK	0.066 2	0.029 0	0.043 5	0.065 7	0.047 3	0.042 3	0.044 2	0.043 2	0.044 5	0.078 8	0.043 2	0.547 8	4
11-29	RB3/1	0.061 7	0.052 7	0.038 7	0.028 3	0.029 3	0.043 8	0.035 5	0.044 6	0.040 5	0.030 9	0.044 6	0.450 5	5
	RB5/1	0.056 2	0.052 9	0.042 7	0.046 3	0.041 3	0.054 0	0.056 4	0.055 7	0.049 5	0.041 9	0.055 7	0.552 5	4
	RB7/1	0.026 5	0.103 7	0.053 9	0.070 7	0.049 9	0.070 3	0.069 0	0.069 6	0.051 3	0.047 4	0.069 6	0.681 9	2
	W	0.055 7	0.090 0	0.096 7	0.062 4	0.073 3	0.099 3	0.088 7	0.111 4	0.101 2	0.050 0	0.111 4	0.940 0	1
	CK	0.066 4	0.041 5	0.061 7	0.050 6	0.055 0	0.039 7	0.042 4	0.045 0	0.050 9	0.077 3	0.045 0	0.575 4	3

光质处理。11月15日和11月22日的综合评价评分由大到小为W、RB7/1、RB5/1、CK、RB3/1,11月29日的综合评价评分由大到小为W、RB7/1、CK、RB5/1、RB3/1。由此可见,11月8日前处理RB7/1的综合评分排名最高,11月15日—29日期间处理W的综合评分排名最高,与此同时在番茄幼苗生长期处理RB3/1的综合评分最低,不适宜作为番茄苗期生长的人工光源。依据综合评价可知,在试验周期内,番茄

苗出芽后14d内采用光质RB7/1,生长至中后期采用白光LED光质处理为较优的人工光源组合。

2.5 验证试验

为了验证综合评价所得的最优光质组合,以番茄苗出芽后采用14d的RB7/1照射,然后置于白光LED照射14d的组合光质为试验组,以苗期完全白光照射为对照组,按上述方法进行2组试验,处理28d后试验结果如表2所示。

表2 组合光质与白光LED对番茄幼苗影响的对比

Tab.2 Comparison of combined light qualities and white LED on tomato seedlings

评价单元	下胚轴长/ mm	株高/ cm	茎粗/ mm	根长/ mm	根数/条	叶面积/ cm ²	鲜质量/ g	干质量/ g	壮苗指数	根冠比	G/ (mg·d ⁻¹)
白光 LED	35.07 ± 1.41	9.07 ± 0.34	3.05 ± 0.18	81.35 ± 4.49	48.6 ± 5.73	28.39 ± 3.17	1.6136 ± 0.07	0.1304 ± 0.0030	4.39 ± 0.29	0.20 ± 0.01	4.66 ± 0.11
	36.75 ± 1.32	9.34 ± 0.46	3.37 ± 0.36	85.02 ± 6.05	53.8 ± 4.82	33.93 ± 3.21	1.7203 ± 0.09	0.1350 ± 0.0027	4.84 ± 0.72	0.20 ± 0.01	4.82 ± 0.10

注:表中数据采用测量值±标准差表示。

对比两者的数据可知,组合光质的茎粗、叶面积、干质量和G值比白光分别高10.49%、19.52%、3.53%和3.43%,达到显著水平($P < 0.05$),其他指标差异不显著。由此可见,采用优化后的组合光质培育番茄幼苗优于全程使用LED白光。

3 讨论

试验发现光质处理对番茄苗期不同生长时期的各项指标影响存在差异,表现出一定的调控作用。与自然光对照组相比,红蓝配比光质和白光促进了番茄幼苗下胚轴的伸长以及叶面积的扩展,且影响程度存在着差异。除处理RB3/1外,试验结束期其他处理的株高、茎粗、鲜干质量均高于对照组。在根部形态方面,处理RB7/1与W比对照组利于生根,处理RB3/1下的幼苗根发育不良。在壮苗参数方面,处理RB7/1的壮苗指数和G值在幼苗初期存在优势,W处理在后期存在优势,在该2种条件下既满足地上部分生物量的积累又保证了根部的生长发育。

红光对番茄幼苗下胚轴和株高的伸长起促进作用,有利于叶面积扩展以及生物量积累,其原因是红光增加植物的光合速率^[26]和光合产物的形成与积累^[27],同时促进使光合产物较多的转运到叶片^[28]。

增加蓝光有利于控制徒长,这是由于光质通过调控植株内源生长激素的含量进而影响幼苗的形态特征^[29-30]。因此,不同红蓝光质配比对番茄幼苗生长的影响存在差异。由于番茄营养期较短,第2~3片真叶后即进行花芽分化,因此其生物量积累和叶面积的快速扩展可为后果实质量和品质提供了前提条件。

由于幼苗形态参数会受到诸多环境因素的共同影响,因此不同光环境因素与温、湿度等其他环境条件的交互作用对番茄秧苗生长影响则有待进一步研究与分析。

4 结论

(1)光质对番茄幼苗不同时期生长特性影响显著,且对不同指标的影响存在差异。红蓝配比为RB7/1和白光LED光质作为人工气候条件下的唯一光源能够满足番茄苗期的生长需求,各项指标优于自然光条件。但红蓝比为RB3/1的光质不适宜用于培育番茄幼苗。

(2)依据番茄幼苗不同时期各项指标的综合评价可知,出芽后两周内采用光质RB7/1,然后采用白光LED光质处理有利于培育优质壮苗,其效果优于育苗全程使用白光LED。

参 考 文 献

- 刘文科. 栽培工程化技术推进我国设施园艺现代化进程[J]. 农业工程, 2015, 5(5): 153.
- 霍建勇. 中国番茄产业现状及安全防范[J]. 蔬菜, 2016(6): 1-4.
- 辜松, 杨艳丽, 张跃峰, 等. 荷兰蔬菜种苗生产装备系统发展现状及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 185-194.
- GU Song, YANG Yanli, ZHANG Yuefeng, et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 185-194. (in

Chinese)

- 4 武荣盛, 吴瑞芬, 侯琼, 等. 内蒙古河套灌区春玉米苗期光温指标[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 241 - 248.
WU Rongsheng, WU Ruifen, HOU Qiong, et al. Light and temperature indices during the seeding stage of spring maize in Hetao irrigation district, inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 241 - 248. (in Chinese)
- 5 苏娜娜, 邹奇, 崔瑾. 光环境调控技术在蔬菜工厂化育苗中的应用及前景[J]. 中国蔬菜, 2013, 1(4): 14 - 19.
SU Nana, WU Qi, CUI Jin. Applications and prospects of light environment control technology for vegetable seedling cultivation in factory[J]. China Vegetables, 2013, 1(4): 14 - 19. (in Chinese)
- 6 常涛涛, 刘晓英, 徐志刚, 等. 不同光谱能量分布对番茄幼苗生长发育的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1748 - 1756.
CHANG Taotao, LIU Xiaoying, XU Zhigang, et al. Effects of light spectral energy distribution on growth and development of tomato seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(8): 1748 - 1756. (in Chinese)
- 7 GOTO E. Effects of light quality on growth of crop plants under artificial lighting[J]. Environment Control in Biology, 2003, 41(2): 121 - 132.
- 8 马旭, 林超辉, 齐龙, 等. 不同光质与光照度对水稻温室立体秧秧苗素质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 228 - 235.
MA Xu, LIN Chaohui, QI Long, et al. Effect of different lighting quality and intensities on quality of rice seedling by greenhouse stereoscopic nursing[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 228 - 235. (in Chinese)
- 9 MATSUDA R, OHASHIKANEKO K, FUJIWARA K, et al. Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light[J]. Plant & Cell Physiology, 2004, 45(12): 1870 - 1874.
- 10 MORTENSEN L M, STRØMME E. Effects of light quality on some greenhouse crops[J]. Scientia Horticulturae, 1987, 33(1 - 2): 27 - 36.
- 11 MASSA G D, KIM H H, WHEELER R M, et al. Plant productivity in response to LED lighting[J]. Hort Science, 2008, 43(7): 1951 - 1956.
- 12 FU Meijuan, YANG Lianqiao, ZHANG Jianhua. Study of light emitting diodes for the application of plant growth in green house [C]//International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging, 2011: 1 - 5.
- 13 崔瑾, 马志虎, 徐志刚, 等. 不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2009, 36(5): 663 - 670.
CUI Jin, MA Zhihu, XU Zhigang, et al. Effects of supplemental lighting with different light qualities on growth and physiological characteristics of cucumber, pepper and tomato seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(5): 663 - 670. (in Chinese)
- 14 HERNÁNDEZ R, KUBOTA C. Growth and morphological response of cucumber seedlings to supplemental red and blue photon flux ratios under varied solar daily light integrals[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 173: 92 - 99.
- 15 张欢, 徐志刚, 崔瑾, 等. 光质对番茄和莴苣幼苗生长及叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(4): 959 - 965.
ZHANG Huan, XU Zhigang, CUI Jin, et al. Effects of light quality on the growth and chloroplast ultrastructure of tomato and lettuce seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(4): 959 - 965. (in Chinese)
- 16 HOGEWONING S W, TROUWBORST G, MALJAARS H, et al. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of cucumis sativus grown under different combinations of red and blue light[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(11): 3107 - 3117.
- 17 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 18 王越, 王宇欣, 时光营. 纤维素保水剂对基质特性和黄瓜幼苗生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 162 - 169.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160121&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.021.
WANG Yue, WANG Yuxin, SHI Guangying. Effects of cellulose aquasorb on properties of substrate and growth of cucumber seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 162 - 169. (in Chinese)
- 19 申宝营, 李毅念, 赵三琴, 等. 暗期补光对黄瓜幼苗形态调节效果及综合评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 201 - 208.
SHEN Baoying, LI Yinian, ZHAO Sanqin, et al. Effect of dark period lighting regulation on cucumber seedling morphology and comprehensive evaluation analysis and comprehensive evaluation[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 201 - 208. (in Chinese)
- 20 于洋, 李一军. 基于多策略评价的绩效指标权重确定方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(8): 8 - 15.
YU Yang, LI Yijun. Research on giving weight for performance indicator based on the multi-strategy method[J]. System Engineering Theory and Practice, 2003, 23(8): 8 - 15. (in Chinese)
- 21 明村豪, 蒋芳玲, 胡宏敏, 等. 幼苗徒长程度对黄瓜植株生长发育及产量品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2011, 1(4): 29 - 34.
MING Cunhao, JIANG Fangling, HU Hongmin, et al. Effects of different leggy extent seedlings on cucumber growth, yield and quality[J]. Chinese Vegetables, 2011, 1(4): 29 - 34. (in Chinese)
- 22 邵光成, 张娟, 陈磊, 等. 时空亏缺灌溉对温室盆栽辣椒生理生态指标的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 96 - 100.
SHAO Guangcheng, ZHANG Juan, CHEN Lei, et al. Effect of space-time deficit irrigation on physiological and agronomic features of hot pepper in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 96 - 100. (in Chinese)
- 23 王新, 刁明, 马富裕, 等. 滴灌加工番茄叶面积、干物质生产与积累模拟模型[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 161 - 168.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140227&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.027.
WANG Xin, DIAO Ming, MA Fuyu, et al. Simulation of leaf area, dry matter production and accumulation of processing tomato with

- drip irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 161 - 168. (in Chinese)
- 24 熊静, 陈清, 王敬国, 等. 供液方式对番茄基质栽培盐分累积与养分利用率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 224 - 231. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170230&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.030.
- XIONG Jing, CHEN Qing, WANG Jingguo, et al. Effect of culture systems on salt accumulation in substrate and nutrient use efficiency of tomato[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 224 - 231. (in Chinese)
- 25 孟兆江, 段爱旺, 王晓森, 等. 调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 99 - 104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160414&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.014.
- MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, WANG Xiaosen, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root and shoot in cotton[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 99 - 104. (in Chinese)
- 26 蔡华, 杨振超, 王达菲, 等. 光质配比和营养液耦合对番茄生长的影响[J]. 北方园艺, 2016(10): 10 - 13.
- CAI Hua, YANG Zhenchao, WANG Dafei, et al. Effect of different light quality ratio and nutrient solutions on the growth of tomato [J]. Northern Horticulture, 2016(10): 10 - 13. (in Chinese)
- 27 LU N, MARUO T, JOHKAN M, et al. Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density[J]. Environmental Control in Biology, 2012, 50(1): 63 - 74.
- 28 MOE R, MORGAN L, GRINDAL G. Growth and plant morphology of cucumis sativus and fuchsia x hybrid are influenced by light quality during the photoperiod and by diurnal temperature alternations[J]. Acta Horticulturae, 2002, 580: 229 - 234.
- 29 高晓旭, 张志刚, 段颖, 等. 高浓度营养液对黄瓜和番茄下胚轴徒长的抑制作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1235 - 1243.
- GAO Xiaoxu, ZHANG Zhigang, DUAN Ying, et al. Inhibition effect of high strength nutrient solution on hypocotyl stretch of cucumber and tomato seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1235 - 1243. (in Chinese)
- 30 申宝营, 丁为民, 惠娜, 等. 夜间补光对黄瓜幼苗形态的调节与补光方式的确定[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 296 - 302. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140645&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.045.
- SHEN Baoying, DING Weimin, HUI Na, et al. Regulation of LED night lighting on growth and morphology of cucumber seedlings and process of night lighting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 296 - 302. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 310 页)

- 13 DALAI A K, AZARGOHAR R. Production of activated carbon from biochar using chemical and physical activation; mechanism and modeling[J]. ACS Symposium Series, 2007, 954: 463 - 476.
- 14 ABIOYE A M, ANI F N. The characteristics of oil palm shell biochar and activated carbon produced via microwave heating[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 695(3): 12 - 15.
- 15 罗亚楠, 于丽颖, 于晓洋. 磷酸-微波活化法制备秸秆基活性炭[J]. 广州化工, 2015(13): 82 - 84.
- LUO Yan'an, YU Liying, YU Xiaoyang. Preparation of straw active carbon in phosphoric acid-microwave method[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015(13): 82 - 84. (in Chinese)
- 16 YANG K B, PENG J H, SRINIVASAKANNAN C, et al. Preparation of high surface area activated carbon from coconut shells using microwave heating[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 6163 - 6169.
- 17 WILLIAMS P T, REED A R. Development of activated carbon pore structure via physical and chemical activation of biomass fibre waste[J]. Biomass & Bioenergy, 2006, 30(2): 144 - 152.
- 18 JONES D A, LELYVELD T P, MAVROFIDIS S D, et al. Microwave heating applications in environmental engineering—a review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 34(2): 75 - 90.
- 19 MA Y H. Comparison of activated carbons prepared from wheat straw via ZnCl<sub>2</sub> and KOH activation[J]. Waste & Biomass Valorization, 2016. DOI:10.1007/s12649-016-9640-z.
- 20 FOO K Y, HAMEED B H. Preparation and characterization of activated carbon from pistachio nut shells via microwave-induced chemical activation[J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35(7): 3257 - 3261.
- 21 郑庆福, 王永和, 孙月光, 等. 不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 962 - 966.
- ZHENG Qingfu, WANG Yonghe, SUN Yueguang, et al. Study on structural properties of biochar under different materials and carbonized by FTIR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(4): 962 - 966. (in Chinese)
- 22 CHIA C H, GONG B, JOSEPH S D, et al. Imaging of mineral-enriched biochar by FTIR, Raman and SEM - EDX[J]. Vibrational Spectroscopy, 2012, 62(9): 248 - 257.
- 23 MIMMO T, PANZACCHI P, BARATIERI M, et al. Effect of pyrolysis temperature on miscanthus (*miscanthus* × *giganteus*) biochar physical, chemical and functional properties[J]. Biomass & Bioenergy, 2014, 62: 149 - 157.