

不同补光光质对温室番茄生长及产量和品质的影响

王翠丽, 陈志国, 杨世梅, 杨义荣

(甘肃省农业工程技术研究院 兰州 730000)

摘要:以番茄品种 1848 为材料,共设置 4 个处理,分别为 L0(植物补光灯,光照度为 $37.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、L1(红光:蓝光=3:2,光照度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、L2(红光:蓝光:白光=2:2:1,光照度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和对照(CK,不补光),研究不同补光灯对番茄生长及果实产量和品质的影响。结果表明,L1 处理的株高、叶绿素 a 含量、总叶绿素含量均最高,较 CK 分别提高 9.31%、30.00%和 29.66%。L2 处理的茎粗、净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度均最高,较 CK 分别显著提高 14.17%、20.77%、29.05%和 89.80%。L2 处理的可溶性蛋白、可溶性糖含量均最高,较 CK 分别显著提高 65.78%、27.74%;对产量分析发现,L2 处理的单果质量、单株果质量和产量均最高,较 CK 分别显著提高 64.37%、76.32%和 37.77%。综上,L2 处理在改善果实品质及提高产量方面效果最好,可在当地温室番茄生产中推广应用。

关键词:番茄;补光;光合作用;品质;产量

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)06-144-05

Effects of different supplementary light waves on the growth, yield and quality of tomato in solar greenhouse

Wang Cuili, Chen Zhiguo, Yang Shimei, Yang Yirong

(Gansu Academy of Agricultural Engineering & Technology, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Tomato cultivar 1848 was used as the material, four treatments were established: L0 (supplemental plant light with a photosynthetic photon flux density of $37.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), L1 (red light:blue light = 3:2, $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), L2 (red light:blue light:white light = 2:2:1, $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), and the control group (CK, no supplemental light). Effects of different light supplementation on the growth and development, photosynthesis and quality yield of tomato cultivated were studied. The results showed that L1 treatment had the greatest plant height, chlorophyll a content and total chlorophyll content, which increased by 9.31%, 30.00% and 29.66% respectively compared with CK. L2 treatment produced the maximum stem diameter, net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration and stomatal conductance, with significant increases of 14.17%, 20.77%, 29.05% and 89.80% relative to CK. L2 also exhibited the highest content of soluble protein and soluble sugar, rising significantly by 65.78% and 27.74% than CK. In terms of yield, L2 achieved the largest single fruit mass, fruit mass per plant and total yield, which were significantly higher than CK by 64.37%, 76.32% and 37.77%, respectively. In conclusion, L2 treatment performs best in improving fruit quality and increasing yield, and is recommended for popularization and application in greenhouse tomato production in local area.

Key words: Tomato; Supplemental light; Photosynthesis; Quality; Yield

番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 在全世界的栽培面积高达 505.20 万 hm^2 , 产量高达 1.87 亿 $\text{t}^{[1]}$, 作为设施蔬菜主要的栽培作物,在我国南北各蔬菜种植区广泛种植。番茄生长对光照要求较高,尤其在果实着色期,设施内合理的光环境在番茄生长发

育过程中起非常重要的作用。光照为番茄生长提供所需要的能量,同时在生长调节和光形态建成中发挥着信号传递的作用^[2]。但在设施番茄栽培生产过程中,由于北方地区冬季光照时间较短,阴天、雨雪天气较为集中,且温室骨架结构、覆盖材料及植

收稿日期:2025-09-12;修回日期:2026-03-17

基金项目:兰州市科技计划项目(2025-2-118);武威市科技计划项目(WW2101031)

作者简介:王翠丽,女,副研究员,主要从事蔬菜育种及高效栽培研究。E-mail:wangcl1116@163.com

通信作者:杨义荣,男,副研究员,研究方向为农业资源与利用。E-mail:37531259@qq.com

株间和叶片间的相互遮掩等问题,使设施内光线较弱,番茄生长光照不足,导致幼苗易发生徒长、发育不良、产量降低及品质变差等问题^[3]。目前,人工补光已成为提高设施番茄品质和产量的关键技术手段之一。研究发现,红蓝组合光可以促进番茄幼苗生长,提高净光合速率^[4]。补光可以促进番茄幼苗生长,并且补充白光和红光组合可以增加番茄幼苗株高^[5];不同比例的LED红蓝组合光可以有效调控黄瓜幼苗的株高和茎粗^[6];另有研究表明,红蓝组合光为7:3时,番茄幼苗生长最适合^[7]。生菜幼苗生长研究发现,R(红光):B(蓝光)=7:3时,生菜幼苗快速生长,壮苗指数高,有利于培育壮苗^[8]。除红蓝光外,白光对植物生长发育也有显著影响,在红蓝光的基础上增加白光,有利于促进植物生长,提高作物光合作用效率,积累光合产物^[9]。研究表明,黄瓜的RuBP羧化酶活性和光合速率在白光处理下有所升高^[10]。在设施番茄栽培时,补光可以缓解光照时间不足,通过补光,促进作物生长发育,提高光合作用效率,从而改善果实品质^[11]。因此,通过人工补充光源,改善设施内光照环境,为设施番茄生长提供必要的光照条件,是番茄优质高产的必要条件。目前,关于不同光质组合对番茄生长及果实品质和产量影响方面的研究较少。鉴于此,笔者以番茄为研究对象,探究不同光质组合对番茄生长发育、光合特性、品质和产量的影响,以期为设施番茄的优质高效生产提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料及设备

供试番茄品种为1848,由甘肃武威百利种苗有限公司提供。LED补光灯由山东贵翔光电有限公司提供,由红光(610~720 nm)、蓝光(400~510 nm)和白光(450~465 nm)3种光质组合,LED补光灯光照度为 $100\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,植物补光灯(紫光,380~450 nm)由杭州佳遇公司提供,额定功率为36 W,光照度为 $37.5\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设置4个处理,分别为对照(CK,不补光)、L0(植物补光灯)、L1(红光:蓝光=3:2)、L2(红光:蓝光:白光=2:2:1)。补光时间为17:00—21:00。种植前将温室进行高温闷棚,采用单垄双行栽培模式,滴灌,垄宽60 cm,株距40 cm,行距40 cm,各小区种植面积为 30m^2 ,每处理3次重复,随机区组排列,各处理间设置保护行4行,避

免不同补光灯之间的干扰。从植株定植后第20天开始补光,补光灯高度随着植株生长高度进行调整,距植株生长点上侧20 cm处,拉秧期前一周结束补光。

试验于2024年9月至2025年3月在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃省农业工程技术研究院基地日光温室内进行。番茄于2024年9月10日定植,2025年2月20日拉秧,5穗果时打顶,其他栽培管理措施同当地。温室白天平均温度 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间平均温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间采用增温块增加棚内温度。基肥施有机肥 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、硫酸钾 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,开花期开始追施大量元素水溶肥平衡肥(N-P-K=20-20-20),果实膨大期开始追施高钾肥(15-5-30+微量元素),每10 d随水追施1次。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标测定 于生长末期在拉秧前测定生长指标。每个处理随机选择番茄植株10株,用卷尺测定番茄茎基部至生长点的长度为株高,用数显游标卡尺测定茎基部第一节处的茎粗。

1.3.2 光合参数及叶绿素含量测定 在番茄盛果期,每个处理选取番茄植株10株,于晴天的08:30—11:00,使用Li-6400便携式光合仪(美国LI-COR公司)测定番茄叶片的净光合速率(P_n)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)。选取自生长点下数第3~4片完全展开、生长良好的叶片进行测定,测定光照度为 $1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $380\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,相对湿度为75%。

在番茄开花结果初期测定叶绿素含量。每个处理选取长势均匀一致的9株番茄,从顶部向下同一方向的第3片功能叶片进行测定。参照Arnon^[12]的方法分别测定叶绿素a含量、叶绿素b含量、总叶绿素含量和叶绿素a/b。

1.3.3 果实品质 在番茄盛果期测定果实品质指标。采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[13];采用考马斯亮蓝G-250溶液法测定可溶性蛋白含量^[14];采用2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素C含量^[15];采用酸碱滴定法测定有机酸含量^[16]。

1.3.4 产量 每个处理选取10株长势相对一致的番茄,对整个生育期番茄产量进行统计,并计算单果质量、单株果数、单株果质量及总产量。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2020软件处理试验数据;采用SPSS20.0软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同补光组合对番茄株高和茎粗的影响

由表 1 可知,不同补光条件处理下,番茄株高和茎粗均存在显著差异,L1 和 L2 处理的株高无显著差异,但均显著高于 CK,其中 L1 处理的株高最大,较 CK 显著提高 9.31%;3 种补光处理的茎粗无显著差异,其中 L2 处理茎粗最大,与 CK 相比,显著增加 14.17%。3 种补光条件下,L0 处理的株高和茎粗均最低,说明 LED 补光可以促进番茄植株生长。

2.2 不同补光组合对番茄叶绿素含量的影响

由表 2 可知,不同补光处理对番茄叶绿素 a 和总叶绿素含量无显著影响,其中 L1 处理的叶绿素 a 和总叶绿素含量最高,较 CK 分别提高 30.00%和 29.66%。L0 和 L1 处理的叶绿素 b 含量无显著差

表 1 不同补光组合对番茄株高和茎粗的影响

Table 1 Effects of different supplementary light combinations on tomato plant height and stem diameter

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm
CK	175.33±16.77 b	10.00±0.91 c
L0	180.50±59.56 b	12.77±1.26 ab
L1	191.67±12.07 a	13.13±0.71 ab
L2	189.67±26.20 a	14.17±0.61 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 small letters in the same column indicate significant difference between treatments($P<0.05$). The same below.

异,但显著高于 CK 和 L2 处理,L0 处理的叶绿素 b 含量最高,较 CK 显著提高 39.13%。与 CK 相比,L0、L1、L2 处理的总叶绿素含量和叶绿素 a/b 均无显著差异。其中,总叶绿素含量表现为 L1>L0>L2>CK,叶绿素 a/b 表现为 L1>L2>CK>L0。

表 2 不同补光组合对番茄叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of different supplementary light combinations on chlorophyll content in tomato

处理 Treatment	w(叶绿素 a) Chlorophyll a content/(mg·g ⁻¹)	w(叶绿素 b) Chlorophyll b content/(mg·g ⁻¹)	w(总叶绿素) Total chlorophyll content/(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b Chlorophyll a content/ Chlorophyll b content
CK	1.90±0.09 a	0.46±0.05 b	2.36±0.06 a	4.13±0.03 a
L0	2.30±0.02 a	0.64±0.08 a	2.94±0.09 a	3.59±0.09 a
L1	2.47±0.02 a	0.59±0.01 a	3.06±0.02 a	4.18±0.08 a
L2	2.16±0.03 a	0.52±0.02 b	2.68±0.02 a	4.15±0.03 a

2.3 不同补光组合对番茄光合作用的影响

不同补光对番茄光合作用的影响见表 3,各补光处理(L0、L1 和 L2)的番茄叶片净光合速率均显著高于 CK,其中 L2 处理最高,较 CK 显著提高了 20.77%,L1 处理次之,较 CK 显著提高了 13.35%,表

明不同补光光质均可以提高番茄叶片的净光合速率。L2 处理的胞间 CO₂ 浓度最高,与 L1 处理无显著差异,但较 CK 显著提高了 29.05%。气孔导度出现最大值的是 L2 处理,显著高于其他 3 个处理,较 CK 显著提高了 89.80%。各处理的蒸腾速率无显著

表 3 不同补光组合对番茄光合作用的影响

Table 3 Effects of different supplementary light combinations on tomato photosynthesis

处理 Treatment	P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	C_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	G_s /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_r /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CK	23.06±0.67 c	330.16±10.42 b	0.49±0.01 b	6.08±0.37 a
L0	24.68±0.43 b	348.43±11.72 b	0.69±0.07 b	6.02±0.22 a
L1	26.14±0.56 ab	361.01±9.61 ab	0.50±0.05 b	5.93±0.31 a
L2	27.85±0.31 a	426.08±8.91 a	0.93±0.06 a	5.82±0.50 a

差异,表现为 CK>L0>L1>L2。

2.4 不同补光组合对番茄品质的影响

从表 4 可以看出,补光可以显著提高番茄果实

的维生素 C 含量,其中,3 种补光处理相比,L1 处理最高,L2 处理次之,L0 处理最低,较 CK 分别显著提高了 52.53%、23.43%和 17.27%。L2 处理的可溶

表 4 不同补光组合对番茄品质的影响

Table 4 Effects of different supplementary light combinations on tomato quality

处理 Treatment	w(维生素 C) Vitamin C content/(mg·kg ⁻¹)	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	w(有机酸) Organic acid content/%
CK	170.67±0.50 c	0.38±0.08 c	3.93±0.03 b	1.64±1.46 c
L0	200.14±0.11 b	0.49±0.01 b	4.16±0.13 a	2.88±2.78 a
L1	260.33±0.41 a	0.42±0.02 b	4.48±0.05 a	2.87±2.06 a
L2	210.67±0.32 b	0.63±0.07 a	5.02±0.04 a	2.35±1.96 b

性蛋白和可溶性糖含量均最高,其中可溶性蛋白含量显著高于其他处理,较 CK 显著提高了 65.78%。3 种补光处理的可溶性糖含量无显著差异,均显著高于 CK。L0 处理的有机酸含量最高,为 2.88%,与 L1 处理无显著差异,但二者显著高于 CK 和 L2 处理。

2.5 不同补光组合对番茄产量的影响

由表 5 可知,L2 处理的单果质量最高,显著高于其他处理,较 CK 显著提高了 64.37%,3 种补光

处理相比,L0 处理的单果质量最小,为 75.69 g。补光处理相比显示,各处理之间的单株果数无显著差异,但均显著高于 CK,其中 L1 处理最多,较 CK 显著增加了 30.08%。L2 处理的单株果质量最大,较 CK 显著提高了 76.32%,且显著高于其他 3 个处理。L2 处理的产量最高,为 52 936 kg·hm⁻²,较 L0 和 L1 处理分别增加 7522 kg·hm⁻² 和 2087 kg·hm⁻²,较 CK 显著提高了 37.77%。

表 5 不同补光组合对番茄产量的影响

Table 5 Effects of different supplementary light combinations on tomato yield

处理 Treatment	单果质量 Single fruit mass/g	单株果数 Number of fruit per plant	单株果质量 Fruit mass of single plant/kg	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
CK	63.01±5.18 c	25.00±1.15 c	1.90±0.19 c	38 423±575.65 c
L0	75.69±2.42 bc	30.33±0.88 a	2.29±0.05 b	45 414±452.22 bc
L1	83.28±6.74 b	32.52±0.76 a	2.51±0.17 b	50 847±530.37 b
L2	103.57±4.03 a	30.03±1.45 a	3.35±0.24 a	52 936±706.25 a

3 讨论与结论

光照在植物生长发育过程中具有重要作用,尤其在蔬菜生长中,光照是不可或缺的环境因素之一^[17]。补光时间和光质都会影响蔬菜的生长发育,研究发现,黄瓜苗期延长补光时间 4 h 可以促进幼苗株高、茎粗和干鲜质量的增加,且红蓝光比例为 7:3 时,可提高黄瓜幼苗根系活力和地上部生长^[18]。延长补光时间 3 h,番茄植株的干鲜质量和全株干质量均显著增加^[19]。蓝光主要促进蔬菜植株横向生长,提高作物茎的生长量,红光促进植物株高和根系生长^[20],在红蓝光为 8:2 时,可以有效促进白掌组培苗的生长,显著提高白掌各生长指标^[21]。补光时间和光质之间存在显著的互作效应。本试验中,延长光照时间,LED 组合光红:蓝=3:2 处理,番茄株高最大,LED 组合光红:蓝:白=2:2:1,茎粗最大,但与 LED 组合光红:蓝=3:2 处理之间无显著差异。该结果与刘慧莲等^[22]对番茄补光研究的结果一致,说明 LED 组合光红:蓝:白=2:2:1 补光有利于促进番茄植株茎粗的生长,同时也抑制植株徒长,利于培育壮苗。

作物通过光合作用积累干物质,因此研究不同补光光质对作物光合作用的影响至关重要。光照度也会影响作物净光合速率、胞间二氧化碳浓度和气孔导度^[23]。研究发现,高压钠灯与 LED 灯相比,更有利于提高番茄的净光合速率^[24]。本试验发现,采用 LED 补光,有利于提高番茄叶片净光合速率、胞间二氧化碳浓度,而且净光合速率、胞间二氧化

碳浓度都高于植物补光灯处理。LED 组合光红:蓝:白=2:2:1 处理的净光合速率、胞间二氧化碳浓度和气孔导度效果最佳,说明设施番茄栽培过程中适当增加人工补光措施,有利于促进番茄的光合作用,与黄松等^[25]在番茄研究上的结果相似。

光照对番茄果实着色起至关重要的作用,直接影响果实产量和品质^[26]。在设施番茄栽培时,进行人工补光可以有效缓解光照不足,调控设施光照环境,提高植株光合作用效率,达到高产优质的目的^[27]。本试验选用植物补光灯和 LED 补光灯,冬季日光温室闭棚后 4 h 进行补光,结果发现,不同补光光质对番茄品质有显著影响,植物补光灯和 LED 补光灯处理的维生素 C、可溶性蛋白、可溶性糖和可滴定酸含量均显著高于对照。其中 LED 组合光红:蓝=3:2 处理(L1)的维生素 C 含量最高,较 CK 显著提高 52.53%;这与 Tamaoki 等^[28]的研究结果一致。LED 组合光红:蓝:白=2:2:1 处理(L2)的可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著高于 CK。研究发现,对草莓进行红黄蓝 3 种组合光照射,可以改善草莓品质^[29]。在作物生长期,进行蓝光的补充,有利于促进果实成熟,提前达到果实成熟期。本研究发现,3 种补光情况下都可以显著提高番茄单株果数和单株果质量,其中,LED 组合光红:蓝:白=2:2:1 处理的单果质量和单株果质量均最高,较 CK 分别显著提高 64.37%和 76.32%。可能原因是红蓝白组合光促进植株横向和纵向生长,并提高光合效率,促进干物质积累,从而提高产量。

综上所述,补光可以有效促进设施番茄的植株

生长,提高光合作用效率及产量,并改善品质。其中LED组合光红:蓝:白=2:2:1在促进番茄植株生长及提高果实品质和产量方面效果最好,可在当地温室番茄生产中推广应用。

参考文献

- [1] 刘思恬,祝秀梅,张婧,等.不同类型番茄果实营养品质分析与综合评价[J].江西农业大学学报,2023,45(3):564-574.
- [2] Wahidin S, Idris A, Shaleh S R M. The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis* sp.[J]. Bioresource Technology, 2013, 129(2):7-11.
- [3] 李晓慧,王一迪,班甜甜,等.LED补光对番茄幼苗形态特征及相关生理特性的影响[J].北方园艺,2020(4):1-6.
- [4] 孙娜,魏珉,李岩,等.光质对番茄幼苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J].园艺学报,2016,43(1):80-88.
- [5] Zhang G, Li Z X, Cheng J, et al. Morphological and physiological traits of greenhouse-grown tomato seedlings as influenced by supplemental white plus red versus red plus blue LEDs[J]. Agronomy, 2022, 12(10):2450.
- [6] 徐文栋,刘晓英,焦学磊,等.不同红蓝配比的LED光调控黄瓜幼苗的生长[J].植物生理学报,2015,51(8):1273-1279.
- [7] 刘凯,姚凤珍,孙士景,等.不同LED光配方对番茄幼苗生长调控的研究[J].中国照明电器,2021(9):20-26.
- [8] 林魁,黄枝,徐永.光质对生菜种子萌发及幼苗生长的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2018,38(8):32-39.
- [9] Lin K H, Huang M Y, Huang W D, et al. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 150:86-89.
- [10] Wang H, Gu M, Cui J X, et al. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll fluorescence quenching, expression of calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology Biology, 2009, 96(1):30-37.
- [11] Li Q, Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1):59-64.
- [12] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in beta vulgaris[J]. Plant Physiology, 1949, 24(1):1-15.
- [13] 叶尚红,张志明,陈疏影,等.植物生理生化实验教程[M].昆明:云南科技出版社,2004.
- [14] 张志良.植物生理学实验指导[M].2版.北京:高等教育出版社,1990.
- [15] 陈艺易.缓释肥替代普通化肥对蒜苗生长生理,品质,养分吸收及土壤酶活性的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
- [16] 高俊凤.植物生理学实验技术[M].北京:世界图书出版公司,2000.
- [17] 王翠丽,赵旭,赵鹏,等.不同补光灯对日光温室辣椒生长发育及品质的影响[J].福建农业学报,2019,34(9):1047-1052.
- [18] 闫晓花,郁继华,颜建明.补光时间及光质对黄瓜幼苗生长及根系活力的影响[J].核农学报,2016,30(6):1211-1217.
- [19] 王舒亚,吕剑,郁继华,等.不同补光时长对日光温室番茄生长、产量及品质的影响[J].中国蔬菜,2018(10):35-39.
- [20] 曲溪,叶方铭,宋杰琼,等.LED灯在植物补光领域的效用探究[J].灯与照明,2008(2):41-45.
- [21] 陈星星,邵秀丽,何松林.LED光源不同光质比对白掌组培苗生长的影响[J].北方园艺,2015(6):86-89.
- [22] 刘慧莲,姜倩倩.不同LED光质对番茄幼苗生长的影响[J].北方园艺,2020(18):38-42.
- [23] 石凯,李泽,张伟建,等.不同光照对油桐幼苗生长、光合日变化及叶绿素荧光参数的影响[J].中南林业科技大学学报,2018,38(8):35-42.
- [24] Gajc-wolska J, Kowalczyk K, Metera A, et al. Effect of supplementary lighting on selected physiological parameters and yielding of tomato plants[J]. Folia Horticulturae, 2013, 25(2):153-159.
- [25] 黄松,刘勇鹏,孙凯乐,等.不同LED光照度补光对日光温室越冬番茄生长及产量品质的影响[J].山东农业科学,2023,55(6):62-68.
- [26] Fan X X, Xu Z G, Liu X Y, et al. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under on a combination of red and blue light[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 153:50-55.
- [27] 韩文.LED补光对番茄幼苗生长调控的研究[D].新疆石河子:石河子大学,2018.
- [28] Tamaoki M, Mukai F, Asai N, et al. Light-controlled expression of a gene encoding *L*-galactonoyl-lactone dehydrogenase which affects ascorbate pool size in *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant Science, 2003, 164(6):1111-1117.
- [29] 刘庆,连海峰,刘世琦,等.不同光质LED光源对草莓光合特性、产量及品质的影响[J].应用生态学报.2015,26(6):1743-1750.