

不同 LED 光质对南瓜幼苗生长及田间性状的影响

郭林鑫^{1,2}, 刘振威^{1,2}, 乔丹丹^{1,2}, 孙丽^{1,2}, 李新峥^{1,2}

(1. 河南科技学院园艺园林学院 河南新乡 453003;

2. 河南省园艺植物资源利用与种质创新工程研究中心 河南新乡 453003)

摘要:以百蜜5号南瓜种子为材料,测定和分析了不同配比LED红蓝光源处理对南瓜幼苗的生长、生理特性及田间生长的影响,以期对南瓜育苗寻找最适光质配比提供理论依据。结果表明,单色红光处理下,南瓜幼苗的株高、茎长、根数和地上鲜质量、叶面积和碳氮比均最大;在一定比例的红蓝复合光源处理下,南瓜的可溶性蛋白含量、游离氨基酸含量、根系活力、茎粗、总鲜质量、总干质量、下胚轴长、壮苗指数等达最大值,分别为 $46.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $433.63 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $76.88 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 1.60 mm 、 4.53 g 、 0.34 g 、 30.62 mm 、 0.07 ,同时田间生长指标最佳,部分比例红蓝光源处理下的值小于CK;单色蓝光处理下南瓜幼苗的可溶性糖含量最高,田间净光合速率和气孔导度也最大。综上所述,与单色的红光、蓝光以及白光相比,红蓝复合光源更有利于南瓜的生长发育。

关键词:南瓜;光质;生长指标;生理指标;光合特性

中图分类号:S642.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2022)02-055-06

Effects of different LED lights on growth and field characteristics of the winter squash seedling

GUO Linxin^{1,2}, LIU Zhenwei^{1,2}, QIAO Dandan^{1,2}, SUN Li^{1,2}, LI Xinzheng^{1,2}

(1. School of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, Henan, China; 2. Henan Province Engineering Research Center of Horticultural Plant Resource Utilization and Germplasm Enhancement, Xinxiang 453003, Henan, China)

Abstract: An experiment was conducted using winter squash variety BaiMi-5 to understand the effects of different ratio of LED red and blue light on the growth, physiological characteristics and field growth of winter squash seedlings. The results show that the plant height, stem length, root number, ground fresh weight, leaf area and carbon-nitrogen ratio of the seedlings were the highest under monochrome red-light treatment. The soluble protein ($46.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), free amino acid ($433.63 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), root activity ($76.88 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), total fresh weight (4.53 g), total dry weight (0.34 g), hypocotyl length (30.62 mm) and seedling strength index (0.07) were the highest for the treatment with red and blue light combination, this treatment also produced the best growth indexes in the field. The soluble sugar content of the seedlings was the highest under monochrome blue light, the net photosynthetic rate and stomatal conductance were also the highest in the field with this light treatment. The stem diameter of the seedlings was the largest under white light. Compared with the monochrome red, blue and white light, the combination of red and blue light is more beneficial to the growth and development of winter squash seedlings.

Key words: Winter squash; Light quality; Growth index; Physiological index; Photosynthetic characteristics

南瓜为葫芦科(Cucurbitaceae)南瓜属(Cucurbita)植物,南瓜果肉粉质香甜、营养丰富,且具有多种重要保健功能,可作蔬菜、粮食、籽用、观赏和饲料等。前人对南瓜的研究主要集中在栽培技术以及生物育种等方面,而光质对南瓜影响的研究报道不多。光是植物获取能量的主要来源,对植物的生长

和产物积累非常重要^[1]。其中,光质在植物的生长、光合作用、形态建成、物质代谢中起着非常重要的调控作用^[2]。但不同的光质对植物的生物效应影响迥异^[3]。前人研究表明,红光可以促进茎的伸长、增加叶面积,提高植株地上鲜质量、干质量,有利于碳水化合物的合成^[4-6]。蓝光不仅对叶绿体的形成和

收稿日期:2021-01-04;修回日期:2021-04-16

基金项目:河南省重点研发与推广专项项目(202102110201)

作者简介:郭林鑫,男,在读硕士研究生,主要研究方向为南瓜新品种选育。E-mail:1258591450@qq.com

通信作者:孙丽,女,副教授,主要从事植物生理生态研究工作。E-mail:sunli0001977@126.com

叶绿素的合成影响较大,还可以促进根系增长,提高根系活力,也有利于蛋白质的合成^[4,7-8]。因此,可以通过调节光质来调控植物的形态建成和生长发育。近些年来,随着对 LED 光源技术的深入研究,人们逐渐发现,与传统光源相比,其具有波谱较窄、光谱性能好、光效率高、无污染、无任何噪音、使用寿命长等优势^[9-10]。

笔者旨在通过不同配比的红蓝光质对南瓜幼苗进行调控,从而探究不同光质对南瓜幼苗生长、生理特性以及田间生长、光合特性的影响,以期为找到适合南瓜生长的光质配比提供理论支撑和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2020 年 4—7 月在河南科技学院蔬菜实验室及南瓜试验基地进行。试验材料是由河南科技学院园艺园林学院南瓜课题组提供的百蜜 5 号南瓜种子。试验所用 LED 光源由河南智圣普电子有限公司生产,红光 LED 峰值波长为 660 nm,蓝光 LED 峰值波长为 440 nm。

1.2 试验设计

经过浸种催芽,将已露白的种子播于装有基质 ($V_{\text{草炭土}}:V_{\text{蛭石}}:V_{\text{珍珠岩}}=3:1:1$) 的塑料穴盘(每盘 32 穴)中,每个处理 1 个穴盘,3 个重复,每个重复 1 个穴盘。试验设置 7 个不同配比的红蓝光处理,以日光灯为对照,处理与对照的光强均为 $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (表 1)。光照处理时间为 $12 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ (8:00—20:00)。

表 1 LED 光质的不同配比

处理	光质	配比	处理	光质	配比
T1	红:蓝	10:0	T5	红:蓝	6:4
T2	红:蓝	9:1	T6	红:蓝	5:5
T3	红:蓝	8:2	T7	红:蓝	0:10
T4	红:蓝	7:3	CK	白光	

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生理指标 试验采用单因素完全随机处理。当南瓜幼苗长到 2 叶 1 心时开始测定生理指标,每个处理随机选 3 株南瓜幼苗,每个处理 3 次重复。可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定,可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,游离氨基酸含量采用茚三酮溶液显色法测定,MDA (丙二醛)含量采用硫代巴比妥酸法测定,根系活力采用 TTC 定量法^[14-15]测定。

1.3.2 农艺性状指标 南瓜幼苗农艺性状的测定

时间与生理指标测定时间一致。测定其株高、茎长、茎粗、下胚轴长、根数、叶面积、地下鲜质量、地上鲜质量、地下干质量、地上干质量,计算总鲜质量、总干质量、根冠比、壮苗指数等;当南瓜幼苗定植到大田经过缓苗期后开始测定田间农艺性状,分别在在缓苗后 0、7、14、21、28 d 对其田间株高、茎粗和开花节位进行观测。

1.3.3 光合指标 用 Li-6400 便携式光合测定仪 (LICOR Inc, USA) 对田间南瓜叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率指标进行测定,当南瓜幼苗定植到大田经过缓苗期后开始对其光合指标进行测定,分别测定其在缓苗期后 10、15、20、25、30 d 的光合数据。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 7.5 系统进行数据处理,差异显著性分析采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 不同 LED 光质对南瓜幼苗生理指标的影响

由表 2 可知,在所有处理中,T5 处理南瓜幼苗可溶性蛋白质含量 (w , 后同) 最高,达 $46.07 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,比 CK 提高 56.81%;仅 T5 处理南瓜幼苗可溶性蛋白质含量显著高于 CK,其他处理与 CK 无显著差异,且从 T5 处理开始可溶性蛋白质含量呈现出随着蓝光比例增大逐渐下降趋势。从 T2 处理开始南瓜幼苗可溶性糖含量呈现出随着蓝光比例增大逐渐升高趋势,以 T7 处理可溶性糖含量最高,为 1.051%,比对照显著提高 13.50%,其他处理可溶性糖含量均显著低于 CK。仅 T1 处理南瓜幼苗游离氨基酸含量显著低于 CK,其他处理游离氨基酸含量均显著高于 CK,其中,T3 处理游离氨基酸含量最高,为 $433.63 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,比对照提高 173.64%。所有 LED 光处理南瓜幼苗丙二醛含量均高于 CK,仅 T3、T6 处理与 CK 无显著差异,其他处理均显著高于 CK。在所有 LED 光处理中,T3 处理丙二醛含量最低,为 $1.82 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,比 CK 提高 20.53%。所有 LED 光处理南瓜幼苗根系活力均与 CK 无显著差异,仅 T1、T6 处理根系活力小于 CK。在所有处理中,T3 处理南瓜幼苗根系活力最大,达 $76.88 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,比对照提高 130.46%。T1 处理南瓜幼苗碳氮比显著大于 CK,其他处理均显著低于 CK。其中,T1 处理碳氮比最大,为 11.02,比 CK 提高 87.73%。

2.2 不同 LED 光质对南瓜幼苗生长指标的影响

表2 不同LED光质对南瓜幼苗生理指标的影响

处理	w(可溶性蛋白)/(mg·g ⁻¹)	w(可溶性糖)/%	w(游离氨基酸)/(μg·g ⁻¹)	b(丙二醛)/(μmol·g ⁻¹)	根系活力/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	碳氮比
T1	34.38±11.78 b	0.740±0.01 c	67.93±8.45 f	1.88±0.12 b	15.04±10.27 b	11.02±1.36 a
T2	28.10±2.03 b	0.340±0.01 f	324.00±45.25 c	2.64±0.07 a	52.85±41.43 ab	1.07±0.15 e
T3	36.06±4.99 ab	0.380±0.01 f	433.63±37.59 a	1.82±0.20 bc	76.88±25.40 a	0.87±0.07 e
T4	34.55±3.13 b	0.440±0.02 e	314.90±12.66 c	2.89±0.38 a	38.93±21.88 ab	1.40±0.03 de
T5	46.07±8.51 a	0.560±0.02 d	261.57±58.65 d	2.19±0.19 b	54.38±29.74 ab	2.20±0.45 d
T6	38.15±2.83 ab	0.570±0.04 d	379.43±11.17 b	1.84±0.04 bc	26.13±8.42 b	1.49±0.06 de
T7	33.38±4.29 b	1.051±0.10 a	257.40±4.20 d	2.03±0.24 b	41.46±17.18 ab	4.08±0.12 c
CK	29.38±1.63 b	0.926±0.04 b	158.47±13.82 e	1.51±0.12 c	33.36±8.49 ab	5.87±0.49 b

注:同列数据后不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

由表3可知,在不同LED光质处理下,T1处理南瓜株高、茎长、根数、地上鲜质量和叶面积最大,分别为19.18 cm、8.42 cm、18.67、3.51 g和29.35 cm²,分别比对照提高8.48%、15.03%、5.66%、8.00%和24.73%;下胚轴长的最大值为T5处理,达30.62 mm,

比对照提高89.60%;T3处理地上、地下鲜质量和总鲜质量均最大,分别为3.51 g、1.02 g和4.53 g,分别比对照提高8.00%、50.00%和15.27%;在T5处理下地上干质量和总干质量最大,分别比CK高了5.10%和8.40%;T4处理的根冠比最大,为0.31,比

表3 不同LED光质对南瓜幼苗生长指标的影响

处理	株高/cm	茎长/cm	茎粗/mm	下胚轴长/mm	根数	地上鲜质量/g	地下鲜质量/g
T1	19.18±0.36 a	8.42±0.43 a	1.34±0.10 a	19.87±5.48 b	18.67±2.52 a	3.51±0.68 a	0.56±0.12 c
T2	13.77±0.68 b	4.60±0.72 b	1.48±0.09 a	22.57±4.73 ab	18.33±8.02 a	3.32±0.12 a	0.86±0.07 ab
T3	12.80±0.58 bc	3.20±0.22 c	1.47±0.16 a	19.30±1.56 b	18.00±3.61 a	3.51±0.53 a	1.02±0.20 a
T4	10.90±0.79 cd	3.20±0.43 c	1.51±0.06 a	21.50±0.72 ab	15.33±3.51 a	3.05±0.65 a	0.91±0.21 ab
T5	9.40±0.20 d	3.23±0.59 bc	1.45±0.04 a	30.62±9.64 a	16.33±2.08 a	3.04±0.35 a	0.89±0.15 ab
T6	11.65±1.30 bcd	3.35±0.68 bc	1.48±0.06 a	16.67±5.84 b	16.67±4.16 a	3.33±0.21 a	0.97±0.10 a
T7	13.32±0.40 bc	4.00±0.35 bc	1.46±0.05 a	22.82±1.43 ab	18.67±3.06 a	2.92±0.55 a	0.76±0.17 abc
CK	17.68±1.26 a	7.32±0.15 a	1.54±0.12 a	16.15±2.68 b	17.67±2.52 a	3.25±0.20 a	0.68±0.10 bc
处理	总鲜质量/g	地上干质量/g	地下干质量/g	总干质量/g	叶面积/cm ²	根冠比	壮苗指数
T1	4.08±0.76 a	0.22±0.04 b	0.03±0.02 b	0.25±0.05 c	29.35±9.86 a	0.16±0.03 a	0.04±0.03 b
T2	4.18±0.18 a	0.23±0.02 ab	0.04±0.01 ab	0.26±0.03 bc	22.08±3.73 abc	0.26±0.01 a	0.05±0.01 ab
T3	4.53±0.53 a	0.27±0.03 ab	0.05±0.01 a	0.31±0.04 abc	24.03±2.19 ab	0.30±0.08 a	0.06±0.01 ab
T4	3.96±0.46 a	0.25±0.07 ab	0.05±0.02 a	0.31±0.06 abc	13.91±4.58 c	0.31±0.12 a	0.07±0.03 a
T5	3.93±0.50 a	0.29±0.01 a	0.05±0.01 a	0.34±0.02 a	17.46±1.52 bc	0.29±0.02 a	0.07±0.02 a
T6	4.30±0.15 a	0.28±0.02 ab	0.05±0.01 a	0.33±0.02 ab	15.40±5.10 bc	0.29±0.04 a	0.07±0.01 a
T7	3.68±0.65 a	0.26±0.04 ab	0.05±0.01 a	0.31±0.04 abc	22.84±0.55 abc	0.26±0.05 a	0.06±0.01 ab
CK	3.93±0.24 a	0.27±0.01 ab	0.04±0.01 ab	0.31±0.01 abc	23.53±3.78 ab	0.21±0.03 a	0.05±0.01 ab

CK高了50.20%。

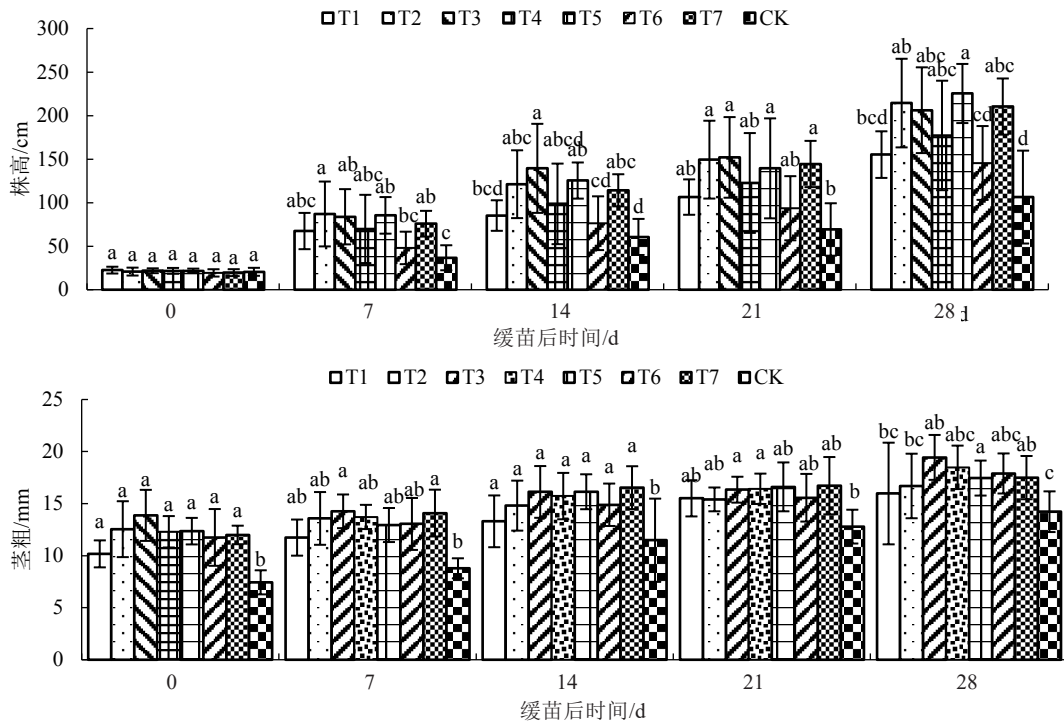
2.3 不同LED光质对南瓜田间生长指标的影响

由表4可知,经过不同LED光质处理后,南瓜第一雄花节位最低的是T4和T6处理,第一雄花节位均为3.20节,比CK降低27.27%;第一雌花节位最低的是T5处理,为9.20节,比对照降低26.98%。

由图1可以看出,对其缓苗后0、7、14、21、28 d的调查表明,各处理株高均呈现出随着时间变化逐渐增大,截至最后一次调查各处理株高均达到最大值。在缓苗期后28 d的调查中,T5处理株高值最

表4 不同LED光质对南瓜第一开花节位的影响

处理	第一雄花节位	第一雌花节位
T1	4.40±1.14 a	11.60±2.30 ab
T2	4.00±0.71 b	10.40±2.30 ab
T3	3.40±0.55 b	10.60±2.07 ab
T4	3.20±0.45 b	9.80±1.30 ab
T5	3.60±0.55 ab	9.20±1.92 b
T6	3.20±0.45 b	9.80±2.28 ab
T7	4.20±0.84 ab	12.20±2.28 a
CK	4.40±1.14 a	12.60±1.14 a



注:误差线代表平均值的标准差,小写字母代表不同处理的差异显著性,下同。

图1 不同LED光质对南瓜田间株高和茎粗的影响

大,为 225.40 cm,比 CK 提高 111.84%。各处理茎粗也呈现出随着时间推移缓慢增加趋势,到缓苗期后 28 d 调查时达最大值。其中,T5 处理茎粗最大,达 20.95 mm,比 CK 提高 41.08%。

2.4 不同LED光质对南瓜田间光合特性的影响

由图 2 可以看出,通过测定其缓苗后 10、15、20、25、30 d 的光合指标发现,T1 处理净光合速率最大值出现在缓苗后 20 d,T5 处理气孔导度最大值出现在缓苗后 30 d,除此之外,其他处理净光合速率和气孔导度均在缓苗后 25 d 达到最大值,且净光合速率和气孔导度均以 T7 处理为最大,分别为 $30.07 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.45 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,分别比 CK 提高 29.22%和 36.36%。除了 T1 处理胞间 CO_2 浓度最大值出现在缓苗后 25 d,其他处理最大值均出现在缓苗后 30 d,且此时 T5 处理胞间 CO_2 浓度最低,仅为 $276.42 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比 CK 降低 1.96%。T6 和 T7 处理蒸腾速率最大值出现在缓苗后 30 d,其他各处理蒸腾速率最大值均出现在缓苗后 20 d,此时 T5 处理蒸腾速率值最大,为 $14.72 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比 CK 提高 30.50%。

3 讨论与结论

红光可以促进植株生长和茎伸长^[4-5,16],还可以提高作物的碳水化合物积累量^[17],在红蓝复合光中

适当增加红光比例可以促进植株根系生长^[18],一定比例的红蓝组合光源综合了单色红光和蓝光的特点,从而促进植株生长,但具体的光质比例因植物种类而异^[19]。有试验表明,不结球白菜在红蓝比为 8:1、生菜在红蓝比为 1:1 下最有利于植株生长^[20-21]。本研究结果表明,单色红光有利于促进南瓜幼苗的生长和茎伸长,而蓝光则抑制了南瓜幼苗的生长;与对照相比,红蓝复合光源在一定比例下南瓜幼苗的下胚轴长,壮苗指数和根冠比大,根系活力高,总干质量和总鲜质量大。由此可见,红蓝复合光源对南瓜幼苗的生长发育起到了促进作用,有利于培育壮苗。这与前人在其他蔬菜上的研究结果一致。可能是由于红蓝光的光谱分布与叶绿素的吸收光谱峰值区基本一致,从而导致对植株的生长起到了促进作用^[22]。

可溶性蛋白质含量是与植物抗性密切相关的重要指标之一^[23]。本试验表明,红蓝光比为 6:4 时南瓜幼苗可溶性蛋白质含量最高,红蓝光比为 8:2 时南瓜幼苗游离氨基酸含量最高。这表明红蓝组合光源有利于南瓜幼苗蛋白质的合成以及游离氨基酸的积累。这与前人在番茄^[24]和烟草^[25]上的研究结果一致。可溶性糖对植物的生长非常重要^[26]。笔者试验表明,单色蓝光促进了南瓜幼苗可溶性糖含量的提高,这与高松等^[27]在青葱上的研究结果一致,

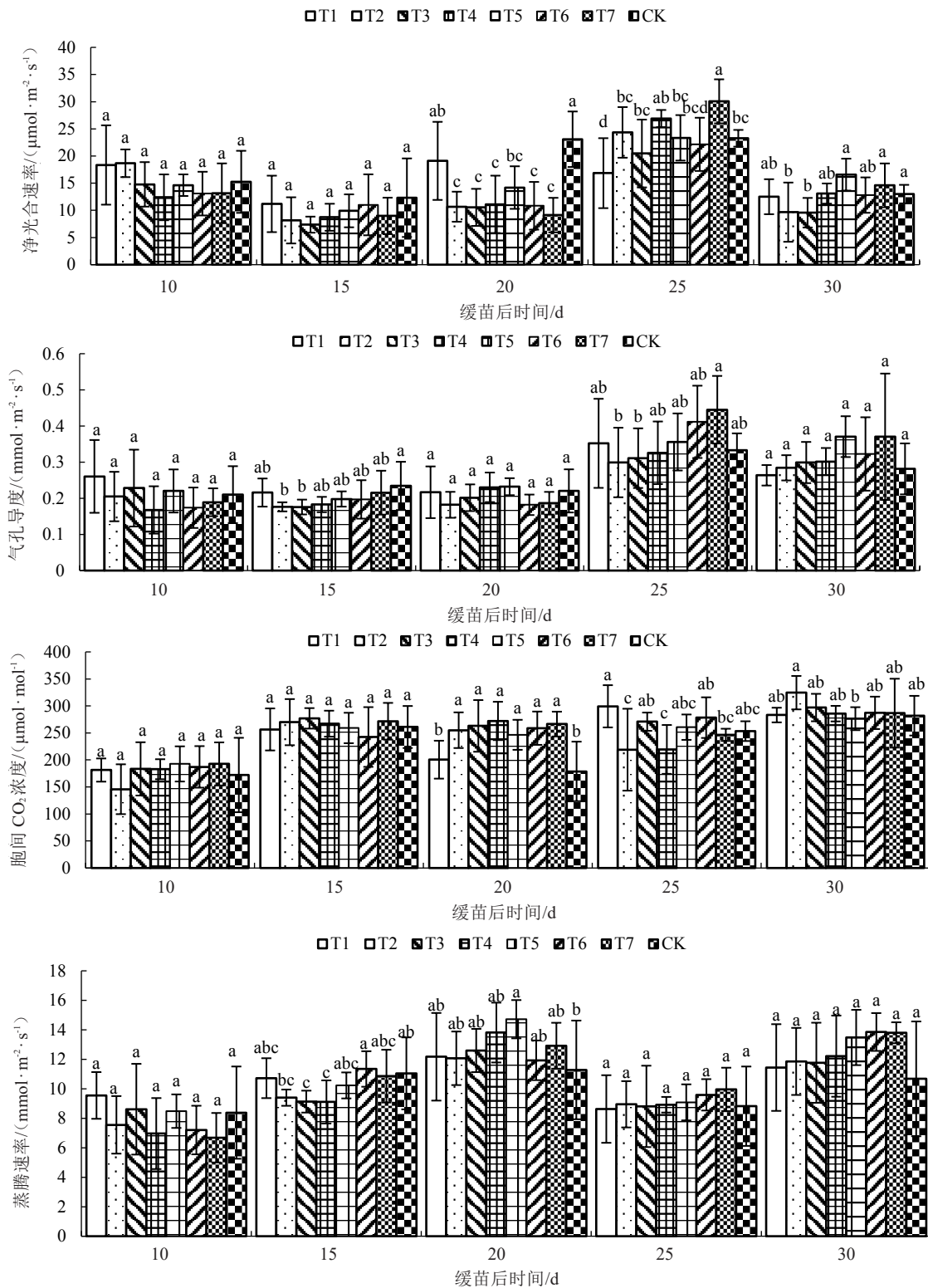


图2 不同LED光质对南瓜田间光合特性的影响

这表明单色蓝光对南瓜幼苗的可溶性糖合成有一定的促进作用。

蓝光比红光更有利于光合能力的形成,蓝光可以促进气孔的发育^[28-29]。本试验表明,在苗期对南瓜进行单色蓝光处理后,南瓜田间的净光合速率和

气孔导度最大。在苗期对南瓜进行红蓝复合光源处理,有利于促进南瓜田间的营养生长和雌花开放。可能是由于苗期对南瓜进行不同光质处理后,对南瓜的田间生长发育产生了影响。由于此类研究很少追踪到田间生长阶段,因此导致这一现象的

具体原因还需进一步探讨。

综上所述,与单色蓝光和单色红光以及白光相比,红蓝组合光源更有利于南瓜培育壮苗,并且在苗期经过红蓝复合光源处理后,对于南瓜的田间生长也起到了一定促进作用。尤其是在红蓝光比为8:2、7:3、6:4时对南瓜生长更加有利,为今后南瓜工厂化育苗和设施栽培提供了一定理论支撑和数据参考。

参考文献

- [1] 钟军,张寒,熊兴耀.鱼腥草幼苗生长发育和叶片显微结构对不同光质的响应[J].中国瓜菜,2018,31(10):27-34.
- [2] 陈光彩,潘彤彤,毛琪,等.LED红、蓝光对香蕉组培苗生长的影响[J].中国南方果树,2019,48(2):59-66.
- [3] 乔新荣,段鸿斌,叶兆伟.植物向光素受体与信号转导机制研究进展[J].生物技术通报,2014(8):1-7.
- [4] 陈祥伟.不同光质LED对乌塌菜生长生理特性及营养品质的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2014.
- [5] 韦峰.不同光质及补光时间对几种蔬菜生长的影响[D].银川:宁夏大学,2015.
- [6] 高振,雷恒树,吴雨霏,等.不同比例红蓝光对草莓生长和叶片光合特性的影响[J].中国农业大学学报,2016,21(12):20-27.
- [7] 何蔚,杨振超,蔡华,等.光质调控蔬菜作物生长和形态研究进展[J].中国农业科技导报,2016,18(2):9-18.
- [8] 任桂萍,王小菁,朱根发.不同光质的LED对蝴蝶兰组织培养增殖及生根的影响[J].植物学报,2016,51(1):81-88.
- [9] 刘彤,刘雯,马建设.可调红蓝光比例LED植物光源配光设计方法[J].农业工程学报,2014,30(1):154-159.
- [10] 岳崇勤,陈欢,姚力.LED植物生长灯在日光温室结球生菜生产的试验与应用[J].农业开发与装备,2017(2):92-93.
- [11] DINI I, TENORE G C, DINI A. Effect of industrial and domestic processing on antioxidant properties of pumpkin pulp [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(1):382-385.
- [12] 侯成全,张有铎.保健南瓜浅谈[J].种业导刊,2017(6):27-28.
- [13] 臧茜茜,陈鹏,张逸,等.辅助降血糖功能食品及其功效成分研究进展[J].中国食物与营养,2017,23(7):55-59.
- [14] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [15] 高俊凤.植物生理学实验技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [16] 周华,刘淑娟,王碧琴,等.不同波长LED光源对生菜生长和品质的影响[J].江苏农业学报,2015,31(2):429-433.
- [17] 李岩,王丽伟,文莲莲,等.红蓝光质对转色期间番茄果实主要品质的影响[J].园艺学报,2017,44(12):2372-2382.
- [18] 梁宗锁,李倩,徐文晖.不同光质对丹参生长及有效成分积累和相关酶活性的影响[J].中国中药杂志,2012,37(14):2055-2060.
- [19] LI H M, XU Z G, TANG C M. Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets *in vitro* [J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2010, 103:155-163.
- [20] LI H M, TANG C M, XU Z G, et al. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.) [J]. Journal of Agriculture Science, 2012, 4(4):262-273.
- [21] 余意,杨其长,赵姣姣,等.LED光质对三种叶色生菜光谱吸收特性、生长及品质的影响[J].照明工程学报,2013,24(S1):139-145.
- [22] 杨其长,徐志刚,陈弘达,等.LED光源在现代农业的应用原理与技术进展[J].中国农业科技导报,2011,13(5):37-43.
- [23] 尚文倩,王政,侯甲男,等.不同红蓝光质比LED光源对铁皮石斛试管苗生长的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(5):155-159.
- [24] 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.
- [25] 史宏志,韩锦峰,远彤,等.红光和蓝光对烟叶生长、碳氮代谢和品质的影响[J].作物学报,1999,25(2):215-220.
- [26] 王嘉佳,唐中华.可溶性糖对植物生长发育调控作用的研究进展[J].植物学研究,2014,3(3):71-76.
- [27] 高松,刘学娜,刘颖,等.人工气候室控制条件下青葱对LED光质的响应特性[J].中国农业科学,2020,53(14):2919-2928.
- [28] 许大全,高伟,阮军.光质对植物生长发育的影响[J].植物生理学报,2015,51(8):1217-1234.
- [29] 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 and Photobiology B-Biology, 2009, 96(1):30-37.