

网络出版时间:2018-09-27 09:46

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.04.006

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180927.0945.012.html

补光灯类型对设施草莓光合特性与产量的影响

钱舒婷,李建明

(西北农林科技大学 园艺学院,农业部西北设施园艺工程重点实验室,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】研究不同类型补光灯对草莓植株光合特性、生长、产量及品质的影响,为草莓设施栽培补光灯的选择提供参考。【方法】以‘红颜草莓’为供试材料,在温室大棚进行草莓补光试验,共设 5 个类型的补光灯处理,分别为激光生长灯(T1)、红蓝光配比为 4.9 : 1 的 LED 灯(T2)、红光荧光灯(T3)、红蓝光配比为 3 : 1 的 LED 灯(T4)和高压钠灯(T5),以不补光为对照,测定不同补光灯处理下草莓植株的光合参数、形态指标及草莓果实的产量和品质。【结果】红蓝光配比为 4.9 : 1 的 LED 灯和红光荧光灯更有利于提高草莓植株的光合参数,红光荧光灯下草莓植株的营养生长最旺盛,但最终产量并不高;红蓝光配比为 4.9 : 1 和 3 : 1 的 LED 灯以及高压钠灯对促进草莓提前成熟的效果最好,果实单果质量和最终产量也以红蓝光配比为 4.9 : 1 和 3 : 1 的 LED 灯下最高;高压钠灯处理下草莓果实可溶性固形物和可溶性糖含量均最大,果实 V_c 含量在红蓝光配比为 3 : 1 的 LED 灯下最大。【结论】红蓝光配比为 4.9 : 1 的 LED 灯最有利于促进草莓植株的光合和生长,提高果实的产量和品质。综合考虑认为,红蓝光配比为 4.9 : 1 的 LED 灯可作为冬春季节寡日照地区大棚草莓较好的补光源。

【关键词】 补光灯;设施草莓;光合特性

【中图分类号】 S624.4⁺3;S668.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)04-0041-08

Effects of supplement light type on photosynthetic characteristics and yield of strawberry in greenhouse

QIAN Shuting, LI Jianming

(The Agriculture Ministry Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest,
College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The study investigated the effects of different supplemental lighting types on photosynthesis, growth, yield and quality of strawberry to provide reference for selecting supplemental lighting for strawberry. 【Method】 Taking Benihoppe strawberry variety as experimental material, different supplemental lighting types were tested to examine the effects on morphology, photosynthetic parameter, yield and quality of strawberry in greenhouse. Five treatments were set including plant laser light (T1), LED plant light (R/B=4.9) (T2), red fluorescent lamp (T3), LED plant light (R/B=3) (T4), high pressure sodium lamp (T5) and without lamp (CK). 【Result】 Red fluorescent lamp and LED plant light with the red/blue photons ratio of 4.9 : 1 were the best to improve the photosynthetic parameter of strawberry. Red fluorescent lamp had the best nutritional growth of plant, but the yield was not high. High pressure sodium lamp and LED plant lights with the red/blue photons ratios of 4.9 : 1 and 3 : 1 caused the most advanced fruit ripening. Fruit weight and the final output were the highest under LED plant light with the

【收稿日期】 2018-01-19

【基金项目】 农业部国家大宗蔬菜产业技术体系项目(CARS-23-C05);陕西省重点研发项目(2017ZDXM-NY-003);陕西省农业协同创新与推广联盟项目(LMZD201802);杨凌农业科技示范推广项目(2016CN-02)

【作者简介】 钱舒婷(1993—),女,安徽六安人,硕士,主要从事设施环境工程研究。E-mail:986421256@qq.com

【通信作者】 李建明(1966—),男,陕西洛川人,教授,博士生导师,主要从事设施园艺研究。E-mail:lijianming66@163.com

red/blue photons ratios 4.9 : 1 and 3 : 1. The contents of soluble solid and soluble sugar were the highest under high pressure sodium lamp, while the highest vitamin C content was obtained under LED plant light source with the red/blue photons ratio of 3 : 1.【Conclusion】LED plant light with the red/blue photons ratio of 4.9 : 1 was the best to the improve the photosynthetic growth of the plant,quality and yield of strawberry.

Key words: supplemental light;strawberry in greenhouse;photosynthetic characteristics

草莓由于含有丰富的营养物质以及具有较高的药用价值,因此深受人们的喜爱。近年来,随着草莓经济效益的增加,其栽培面积也日益扩大,目前已经成为设施栽培中的主要作物之一。大棚草莓主要是在秋冬季生长,而秋冬季节的日照时间较短,棚内光照不足,从而导致草莓生长缓慢,降低了果实的产量和品质。为了弥补大棚草莓生产光照不足的问题,需要进行人工补光处理。

目前,关于草莓补光的研究主要集中在光强、光质和光周期等方面,光照强度影响植株的生长发育,同时对植物体内营养物质的含量也有显著影响^[1-2]。钟霖霖等^[3]研究发现,光照强度对章姬草莓和红颜草莓的品质有一定影响。魏娜等^[4]研究发现,当光照强度在 1 200~1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,达赛莱克特草莓的光合速率会达到一个峰值。光质对植物的影响更加复杂,其不仅可以调控植株的光合作用^[5],还作为触发信号影响植株的生长^[6],包括对植物生长发育、光合特性以及抗逆性等的影响^[7-11]。光周期不仅影响植物的花性分化和成花诱导^[12-16],还影响植物的营养生长;Hartmann^[17]研究发现,传教士草莓在 10 h 的光周期处理下只形成花芽,而在 15 h 的光周期处理下则会形成大量匍匐茎,影响草莓花芽的形成。

关于不同类型补光灯对植物生长影响的研究也有少量报道,研究发现高压钠灯补光更适合用于植株的开花、结果阶段^[18-20],红橙光较强、蓝绿光较少的高压钠灯更有利于提高果实的品质,促使草莓提前上市^[21]。红光荧光灯的光能利用率也较高,因为其光谱成分主要是红橙光和蓝紫光,该波段光源对

植物生长的影响效果显著。LED 灯是最近几年发展起来的新型光源,其可以调节光源的强度和波长,以满足不同植物对光的需求,与红光荧光灯相比,LED 光源对于提高叶用莴苣植株的光合能力更有优势^[22]。

总体而言,关于不同类型补光灯补光效果综合对比的研究还较少,因此本试验以草莓为供试材料,探究红光荧光灯、高压钠灯、LED 灯以及市面上新出现的激光生长灯等,对草莓光合、生长及果实产量、品质的影响,综合分析各种补光灯的补光效果,以期为冬春季节寡日照地区大棚草莓的补光光源选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用‘红颜草莓(*Fragaria ananassa* Duch)’作为供试材料,并于 2016 年 9 月在陕西杨凌设施草莓产业园中的一座大跨度钢架棚内定植,株行距为 80 cm×40 cm。补光于 2016-12-01—2017-02-13 进行,试验期共计 74 d。

1.2 试验设计

供试大棚总面积约 1 600 m^2 ,在棚内靠北部弱光区共设 6 个小区,各小区面积 50 m^2 ,分别安装以下 5 种类型的补光灯:激光生长灯(T1)、红蓝光配比为 4.9 : 1 的 LED 灯(T2)、红光荧光灯(T3)、红蓝光配比为 3 : 1 的 LED 灯(T4)和高压钠灯(T5),以同区域不补光植株为对照(CK)。各补光灯的属性如表 1 所示,除激光生长灯的补光时间为 16 h/d 外,其他各处理均补光 4 h/d。

表 1 不同处理光源的属性和补光时间

Table 1 Properties and opening time of supplemental lighting

处理 Treatment	光源 Light source	紫外线强度/ ($\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$) Ultraviolet intensity	冠层光照强度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Light intensity of strawberry canopy	红蓝光配比 Red and blue ratio	补光时间/ ($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$) Opening time
CK	不补光 Without lamp				
T1	激光生长灯 Plant laser light	0.4	1	5 : 1	16
T2	LED 生长灯 LED plant light	2.1	15	4.9 : 1	4
T3	红光荧光灯 Fluorescent lamp	0.7	8	1.93 : 1	4
T4	LED 生长灯 LED plant light	4.7	22	3 : 1	4
T5	高压钠灯 High pressure sodium lamp	40.4	215	8.5 : 1	4

1.3 测定项目及方法

1.3.1 光合指标和叶片光合色素含量 采用 Li-6800 便携式光合仪测定叶片的光合参数,包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(Ci),于 2017-02-13 上午 09:00—11:00,分别对各试验区内选取的 8 株草莓生长点下的第 3 片完全展开功能叶片进行测定。测定时将光照强度设定为 $1\ 000\ \mu mol/(m^2 \cdot s)$, CO_2 浓度为 $400\ \mu mol/mol$,叶室温度为 $25\ ^\circ C$,湿度为 50%,气流速度为 $500\ \mu mol/s$ 。叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的测定参考赵世杰等^[23]的方法,每个处理重复 3 次。

1.3.2 形态指标 从 6 个处理中各选取 8 株生长状态大致相同的草莓植株挂牌标记,补光 15 d 时,从标记过的 8 株草莓植株中选择 8 个生长状态大致相同的幼果进行标记,记录果实从幼果到果实发白再到成熟所需要的时间。补光 51 d 时,用直尺测定草莓植株的叶片长、宽、节间长以及株高,并统计每株草莓的叶片数。每个处理重复 3 次。

1.3.3 产量和品质指标 补光 64 d 时,统计各处理下标记过的 8 株草莓的结果数,每株随机采摘 10 颗成熟果实,用天平称其质量,统计出最大单果质

量、平均单果质量以及单株产量。果实可溶性固形物含量用手持式固形物含量测试仪测定,果实可溶性糖含量用蒽酮比色法^[24]测定,果实可滴定酸含量用 NaOH 滴定法^[24]测定,果实 V_c 含量用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定^[25],测定均重复 3 次,取平均值。

1.4 数据统计与分析

采用 SPSS 20.0 和 Excel 2010 软件对数据进行统计分析,采用 Duncan's 新复极差法进行显著性检验($P=0.05$),利用 Excel 2010 软件制图。

2 结果与分析

2.1 补光灯类型对草莓叶片光合色素含量的影响

由表 2 可以看出,各光源处理叶片的光合色素含量均较 CK 高,其中 T3(红光荧光灯)处理下叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)以及类胡萝卜素的含量均为最大,然后依次为 T5(高压钠灯)、T2(红蓝光配比为 4.9:1 的 LED 灯)、T4(红蓝光配比为 3:1 的 LED 灯)和 T1(激光生长灯)处理。可见,红光荧光灯对促进草莓叶片光合色素合成的效果最显著,激光生长灯的效果最差。

表 2 补光灯类型对草莓叶片光合色素含量的影响

Table 2 Effects of supplemental lighting on pigment content of strawberry leaves				mg/g
处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	叶绿素(a+b) Chlorophyll (a+b)	类胡萝卜素 Carotenoid
CK	0.85 c	0.28 c	1.13 c	0.08 b
T1	1.18 b	0.42 b	1.60 b	0.10 ab
T2	1.44 ab	0.49 ab	1.93 ab	0.14 a
T3	1.69 a	0.63 a	2.31 a	0.15 a
T4	1.34 b	0.45 b	1.79 b	0.11 ab
T5	1.47 ab	0.52 ab	1.99 ab	0.14 a

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note: Different lowercase letters mean significant difference at $P<0.05$ level. The same below.

2.2 补光灯类型对草莓叶片光合特性的影响

由表 3 可以看出,不同光源处理下草莓叶片的 P_n 大小不同,草莓在 T1(激光生长灯)和 T2(红蓝光配比为 4.9:1 的 LED 灯)处理下的叶片 P_n 最高,T3(红光荧光灯)处理下次之,T5(高压钠灯)处理下最低。草莓叶片 Tr 在 T3 处理下最高,其余各

处理差异不显著,但均高于 CK。T5 处理下的叶片 Ci 最高,T4(红蓝光配比为 3:1 的 LED 灯)处理次之,其余各处理差异不显著。各处理 G_s 差异不显著。总体来看,激光生长灯、红蓝光配比为 4.9:1 的 LED 灯以及红光荧光灯较有利于促进草莓植株的光合作用。

表 3 补光灯类型对草莓叶片光合特性的影响

Table 3 Effects of supplemental lighting on photosynthetic characteristics of strawberry leaves				
处理 Treatment	$P_n/(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	$Tr/(mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	$G_s/(mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	$Ci/(\mu mol \cdot mol^{-1})$
CK	16.04 ab	4.63 b	307.99 a	286.50 b
T1	17.03 a	4.89 ab	331.94 a	283.01 b
T2	17.03 a	4.92 ab	330.91 a	285.89 b
T3	16.32 a	5.03 a	343.09 a	281.95 b
T4	15.39 ab	4.92 ab	340.53 a	289.56 ab
T5	14.06 b	4.89 ab	333.74 a	299.00 a

2.3 补光灯类型对草莓叶片生长和株高的影响

由表 4 可知,T2(红蓝光配比为 4.9∶1 的 LED 灯)、T3(红光荧光灯)和 T4(红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯)处理下,草莓植株的株高和叶片节间长均高于 T1(激光生长灯)、T5(高压钠灯)以及 CK 处

理,其中 T3 处理下草莓植株营养生长最为旺盛。各处理之间的叶片数和叶片纵横径均相差不大。总体来看,红光荧光灯(T3 处理)更有利于促进大棚草莓营养物质的积累,为后期果实的生长奠定了基础。

表 4 补光灯类型对草莓叶片生长和株高的影响

Table 4 Effects of supplemental lighting on leaf growth and plant height

处理 Treatment	叶纵径/cm Leaf longitudinal diameter	叶横径/cm Leaf transverse diameter	节间长/cm Internode length	叶片数/(个·株 ⁻¹) Leaf number	株高/cm Plant height
CK	6.08 a	4.89 a	10.83 a	26.75 a	14.27 d
T1	6.04 a	5.15 a	10.69 a	25.13 a	15.03 d
T2	5.93 a	5.23 a	11.26 a	26.25 a	20.17 b
T3	6.24 a	5.36 a	11.98 a	27.50 a	24.61 a
T4	6.15 a	5.11 a	11.15 a	25.88 a	18.77 c
T5	5.91 a	5.08 a	10.81 a	26.50 a	14.43 d

2.4 补光灯类型对草莓果实生长的影响

由表 5 可以看出,与 T1(激光生长灯)、T3(红光荧光灯)及 CK 相比,T2(红蓝光配比为 4.9∶1 的 LED 灯)、T4(红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯)和 T5(高压钠灯)处理下草莓果实从幼果到长大成熟所需

要的时间更短;与 CK 相比,红蓝光配比为 4.9∶1 的 LED 灯和高压钠灯可促使草莓提前 5 d 成熟,红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯可以使草莓提前 4 d 成熟。

表 5 补光灯类型对草莓果实转色与成熟期(月-日)的影响

Table 5 Effects of supplemental lighting on the break stage and red stage(month-day) of strawberry

处理 Treatment	幼果期 Young fruit period	浆果变色期 Berry color changing period	成熟期 Mature period
CK	12-16	01-29	02-05
T1	12-16	01-29	02-05
T2	12-16	01-25	01-31
T3	12-16	01-28	02-04
T4	12-16	01-25	02-01
T5	12-16	01-24	01-31

2.5 补光灯类型对草莓果实产量的影响

由表 6 可知,各光源处理下草莓的单果质量、最大单果质量、单株结果数以及单株产量均高于 CK,其中草莓单果质量和最大单果质量依次为 T2>T4>T3>T1>T5>CK,单株结果数依次为 T5>

T2>T3>T4>T1>CK,单株产量依次为 T2>T4>T3>T5>T1>CK。总体来看,红蓝光配比为 3∶1 和红蓝光配比为 4.9∶1 的 LED 灯更有利于提高草莓果实的产量。

表 6 补光灯类型对草莓果实产量的影响

Table 6 Effects of supplemental lighting on the production of strawberry

处理 Treatment	单果质量/g Fruit weight	最大单果质量/g Maximum fruit weight	结果数/(个·株 ⁻¹) Number of fruit	产量/(g·株 ⁻¹) Yield
CK	12.11 a	14.56 f	9.90 b	119.93 c
T1	14.48 a	22.16 d	11.40 ab	165.05 b
T2	18.33 a	32.76 a	13.60 a	249.23 a
T3	14.51 a	25.77 c	13.20 a	191.53 b
T4	18.07 a	28.73 b	12.70 a	229.54 a
T5	12.30 a	18.00 e	13.90 a	171.03 b

2.6 补光灯类型对草莓果实品质的影响

由表 7 可以看出,T5(高压钠灯)处理下的草莓果实可溶性固形物含量(质量分数)最大,其余依次为 T1(激光生长灯)、T2(红蓝光配比为 4.9∶1 的 LED 灯)、T3(红光荧光灯)处理,T4(红蓝光配比为

3∶1 的 LED 灯)处理下草莓果实可溶性固形物含量最低。草莓果实可溶性糖含量(质量分数)也以 T5 处理下最高,其余依次为 T2、T4、T1 处理,T3 处理下的草莓可溶性糖含量最低。草莓果实 V_c 含量依次为 T4>T3>T5>T2>CK>T1;各处理之间

可滴定酸含量(质量分数)相差不大。综合分析认为,高压钠灯更有利于提高草莓果实的可溶性固形

物和可溶性糖含量,红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯更有利于提高草莓果实的 V_C 含量。

表 7 补光灯类型对草莓果实品质的影响

Table 7 Effects of supplemental lighting on the fruit quality of strawberry

处理 Treatment	可溶性固形物/% Soluble solids content	可溶性糖/% Soluble sugar	可滴定酸/% Titratable acid	Vc(mg·hg ⁻¹) Vitamin C
CK	9.73 cd	2.17 c	1.64 a	78.99 bc
T1	10.67 ab	2.28 bc	1.71 a	71.11 c
T2	10.23 abc	2.45 b	1.52 a	85.15 b
T3	10.17 bc	2.17 c	1.44 a	90.66 b
T4	9.40 d	2.37 bc	1.59 a	150.83 a
T5	10.73 a	2.78 a	1.54 a	89.89 b

3 讨 论

3.1 补光灯类型对草莓光合参数的影响

就光源对光合色素含量的影响而言,蓝光会降低叶片的叶绿素含量,而红光则有利于提高叶片的叶绿素含量^[26-27]。蒲高斌等^[28]研究发现,蓝光荧光灯下宝粉番茄幼苗叶片的叶绿素含量最低,红光荧光灯下最高。本研究结果也显示,草莓植株叶片的叶绿素含量在红光荧光灯下最高。阳圣莹等^[29]研究发现,相同光照强度下,草莓叶片光合色素含量在红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯下要比在荧光灯下高,这与本研究结果不同,可能与荧光灯的光谱颜色有关,红光荧光灯可能更有利于提高草莓叶片的叶绿素含量。

李雯琳等^[22]研究了不同光源对多个叶用莴苣品种生长的影响,结果发现‘奶油生菜’在蓝光 LED 灯下的净光合速率最高,而‘美国大速生’则在荧光灯下最高。Kim 等^[30]研究发现,红蓝组合 LED 灯处理下菊花组培苗的净光合速率最大,其次是荧光灯处理,在蓝光及蓝光与远红光组合光照下净光合速率最低。高振等^[31]研究发现,红蓝 LED 组合光源较荧光灯更有利于提高草莓植株叶片的净光合速率。以上结果说明不同光源处理对不同植物种类、品种的影响效果均不同。本研究中,红光荧光灯下草莓叶片的净光合速率较高,这与蒲高斌等^[28]的研究结果一致,但与李雯琳等^[22]的研究结果不同。红蓝光配比为 4.9∶1 的 LED 灯较红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯更有利于促进草莓叶片的光合作用,这可能是因为红蓝组合光中红光比例的增强,会相对提高草莓叶片的净光合速率。激光生长灯下草莓叶片的净光合速率也较高,但该处理下草莓产量并不高,造成其叶片净光合速率高的原因可能与当时的环境因素有关。阳圣莹等^[29]研究发现,相同的光照强度下,荧光灯较红蓝 LED 组合光源更有利于提高

草莓植株的蒸腾速率,这与本研究结果一致。

3.2 补光灯类型对草莓株高和叶片生长的影响

不同光源对植物生长的影响效果不同,对于大多数植物而言,红光更有利于促进植株的纵向生长^[32],因为红光可以促进子叶的伸长,而蓝光则会通过降低生长素含量来抑制植物的生长^[33]。曹刚等^[34]研究发现,蓝光 LED 光源更有利于促进黄瓜幼苗茎的增粗。刘庆等^[35]研究发现,红光处理最有利于促进草莓植株的生长发育,其次是红蓝黄以及红蓝组合光处理,蓝光处理下草莓植株的生长最弱。本研究中,草莓植株的营养生长也是在红光荧光灯处理下最旺盛,但是该处理下草莓的产量并不高,说明红光荧光灯处理不利于同化产物的输出,草莓植株合成的光合产物多用于营养生长。红蓝光配比为 4.9∶1 的 LED 灯较红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯更有利于促进草莓植株的营养生长,说明随着红蓝组合 LED 光源中红光比例的增加,草莓植株的营养生长会更旺盛,这与苏志能等^[32]的研究结果一致。

3.3 补光灯类型对草莓生育期及产量的影响

浦正明等^[36]研究发现,光照虽然对草莓第一花序的花芽分化没有直接影响,但是增加光照强度、延长光照时间却能明显促进第二花序的花芽分化。本研究中,高压钠灯处理下草莓果实成熟最早,激光生长灯处理下最晚,可能是因为高压钠灯的光照强度较大,而激光生长灯的光强较弱。红光荧光灯处理下的果实成熟也较晚,可能是因为红光荧光灯下的草莓植株将积累的光合产物过多地用于营养生长。

影响产量的主要因素与花芽分化的数量以及质量有关。研究发现,光质和光周期对草莓花芽分化的影响效果较大^[37]。本研究中,除激光生长灯外,各处理的补光时间均一致,所以影响草莓产量的主要因素是光质质量。红蓝光配比为 4.9∶1 和红蓝光配比为 3∶1 的 LED 灯下草莓果实的单果质量和产量均较高,说明 LED 灯较荧光灯、高压钠灯以及

激光生长灯更有利于促进草莓植株的生殖生长,这与 Gajcwolska 等^[38]的研究结果不一致,原因可能是不同补光灯对不同植物的补光效果不同。激光生长灯下草莓产量低可能是因为激光生长灯不仅光强最弱,而且补光时间也不在草莓花芽分化的最佳光周期范围,余红等^[37]研究发现,草莓在 4~12 h 的光周期范围内花芽分化更显著,而激光生长灯的补光时间为 16 h。

3.4 补光灯类型对草莓果实品质的影响

光强和光质对于调控果实的品质均有一定影响,光质可以调控果实的糖、酸代谢。王英利等^[39]研究发现,红光可以提高番茄果实的糖、酸含量,蓝光则可以提高果实可溶性蛋白以及 V_C 的含量^[40]。光照强度对于提高果实品质也有一定影响,钟需霖等^[3]研究发现,光照强度对草莓 V_C 和总糖含量均有显著影响,对草莓总酸和可溶性固形物含量影响不大。本研究中,高压钠灯处理下果实可溶性固形物和可溶性糖含量均最大,这可能是因为高压钠灯的红光比例高,而红光有利于促进碳水化合物的合成以及提高碳代谢的强度^[35,41]。激光生长灯处理下果实可溶性固形物含量也较高,可能是受该处理的光质影响,因为光强对草莓果实可溶性固形物含量的影响不大^[3]。红蓝光配比为 3:1 的 LED 灯以及红光荧光灯下的草莓果实 V_C 含量较高,这与阳圣莹等^[29]的研究结果一致,红蓝光配比为 3:1 的 LED 灯较红蓝光配比为 4.9:1 的 LED 灯更有利于提高果实的 V_C 含量,这可能是因为蓝光比例较多的 LED 复合光更有利于促进果实 V_C 的合成,这与常涛涛^[42]的研究结果一致。

4 结 论

(1)红蓝光配比为 4.9:1 的 LED 灯和红光荧光灯有利于促进草莓植株的光合作用以及提高叶片的光合色素含量,激光生长灯下草莓植株的净光合速率也较高,但是该处理下植株叶片的光合色素含量最低,最终的果实产量也不高,说明造成净光合速率高的原因可能与当时的环境因素有关。

(2)红光荧光灯处理下草莓植株的营养生长最旺盛,其次是红蓝光配比为 4.9:1 和 3:1 的 LED 灯,但是红光荧光灯处理下草莓的最终产量并不高,说明该处理下草莓植株积累的营养物质主要用于营养生长。

(3)红蓝光配比为 4.9:1 和 3:1 的 LED 灯以及高压钠灯对于促进草莓提前成熟的效果较好,果

实单果质量、最终产量也是在红蓝光配比为 4.9:1 和 3:1 的 LED 灯下最高,各处理下草莓的单株结果数相差不大。

(4)高压钠灯处理下草莓果实可溶性固形物和可溶性糖的含量均最大,红蓝光配比为 3:1 的 LED 灯下草莓果实的 V_C 含量最大,各处理之间可滴定酸含量相差不大。

综合上述结果分析认为,红蓝光配比为 4.9:1 的 LED 灯和红光荧光灯更有利于提高草莓植株的光合参数,但是红光荧光灯处理下草莓植株的营养生长过于旺盛,因而导致其最终产量不高。高压钠灯虽然有利于提高草莓果实品质、促进果实提前成熟,但是高压钠灯由于耗电量大且增产效果不显著等,因而经济效益不及 LED 灯。所以推荐红蓝光配比为 4.9:1 的 LED 灯为冬春季节寡日照地区大棚草莓的补光光源。

[参考文献]

- [1] Vergeer L H T, Aarts T L, Degroot J D. The wasting disease and the effect of abiotic factors (light-intensity, temperature, salinity) and infection with labyrinthula-zosteriae on the phenolics content of zostera-marina shoots [J]. Aquatic Botany, 1995, 52(1): 35-44.
- [2] Keller M, Arnink K J, Hrazdina G. Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensity during veraison: I. Effects on grapevine growth, fruit development, and ripening [J]. American Journal of Enology & Viticulture, 1998, 49(3): 333-340.
- [3] 钟需霖, 杨仕品, 乔 荣, 等. 光照强度对草莓主要品质的影响 [J]. 西南农业学报, 2011, 24(3): 1219-1221.
Zhong P L, Yang S P, Qiao R, et al. Effect of light intensity on main quality of strawberry [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(3): 1219-1221.
- [4] 魏 娜, 孙翰昌, 武俊琴. 不同光强对结果期草莓光合特性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(6): 2213-2214, 2216.
Wei N, Sun H C, Wu J Q. Influences of different light intensities on the photosynthetic characteristics of strawberry in fruiting stage [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(6): 2213-2214, 2216.
- [5] 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, 19(7): 1619-1624.
Zheng J, Hu M J, Guo Y P. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1619-1624.
- [6] 胡 阳, 江 莎, 李 洁, 等. 光强和光质对植物生长发育的影响 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(4): 296-303.
Hu Y, Jiang S, Li J, et al. Effects of the light intensity and quality on plant growth and development [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2009, 30(4): 296-303.

- [7] 马光恕,廉 华,闫明伟.不同覆盖材料对大棚内番茄生长发育的影响 [J]. 吉林农业科学,2002,27(4):41-43.
Ma G S, Lian H, Yan M W. The effects of different covering material on growth and development of greenhouse tomato [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2002, 27(4): 41-43.
- [8] 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.
- [9] Patil G G, Oi R, Gissinger A, et al. Plant morphology is affected by light quality selective plastic films and alternating day and night temperature [J]. Gartenbauwissenschaft, 2001, 66(2): 53-60.
- [10] 徐 凯,郭延平,张上隆.不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响 [J]. 中国农业科学,2005,38(2):369-375.
Xu K, Guo Y P, Zhang S L. Effect of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(2): 369-375.
- [11] 江明艳,潘远智.不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响 [J]. 园艺学报,2006,33(2):338-343.
Jiang M Y, Pan Y Z. Effects of light quality on the photosynthetic characteristics and growth of *Poinsettia* [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(2): 338-343.
- [12] 李 程,裴忠孝,甘林叶,等.光周期对春石斛开花及多胺含量的影响 [J]. 植物生理学报,2014,50(8):1167-1170.
Li C, Pei Z X, Gan L Y, et al. Effects of photoperiod on flowering and polyamine contents of nobile-type *Dendrobium* [J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(8): 1167-1170.
- [13] 杨 娜,郭维明,陈发棣,等.光周期对秋菊品种“神马”花芽分化和开花的影响 [J]. 园艺学报,2007,34(4):965-972.
Yang N, Guo W M, Chen F D, et al. Effects of photoperiod on floral bud differentiation and flowering of *Chrysanthemum morifolium* ramat ‘Jinba’ [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(4): 965-972.
- [14] 田素波,郭春晓,郑成淑.光周期诱导植物成花的分子调控机制 [J]. 园艺学报,2010,37(2):325-330.
Tian S B, Guo C X, Zheng C S. Molecular mechanism of controlling flower formation by photoperiod inducement in plants [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(2): 325-330.
- [15] Hayama R, Coupland G. The molecular basis of diversity in the photoperiodic flowering responses of arabidopsis and rice [J]. Plant Physiology, 2004, 135(2): 677-684.
- [16] Yamasaki S, Fujii N, Takahashi H. Photoperiodic regulation of *CS-ACS2*, *CS-ACS4* and *CS-ERS* gene expression contributes to the femaleness of cucumber flowers through diurnal ethylene production under short-day conditions [J]. Plant Cell & Environment, 2003, 26(4): 537-546.
- [17] Hartmann H T. Some effects of temperature and photoperiod on flower formation and runner production in the strawberry [J]. Plant Physiology, 1947, 22(4): 407-420.
- [18] 杜 宁,韩 哲.高压钠灯用于园艺光照明的改进设想 [J]. 牡丹江教育学院学报,2008(1):143-144.
Du N, Han Z. Improvement suggestion of high pressure sodium lamp for horticultural lighting [J]. Journal of Mudanjiang College of Education, 2008(1): 143-144.
- [19] Runkle E S, Padhye S R, Oh W, et al. Replacing incandescent lamps with compact fluorescent lamps may delay flowering [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 143(1): 56-61.
- [20] Blom T J, Zheng Y B. The response of plant growth and leaf gas exchange to the speed of lamp movement in a greenhouse [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 119(2): 188-192.
- [21] 陈善飞,王信平,陈 晖,等.大棚草莓补光光源的研制及补光种植实验 [J]. 中国照明电器,2015(3):14-17.
Chen S F, Wang X P, Chen H, et al. Light source development and fill lighting planting experiments for strawberry in plastic greenhouse [J]. China Light & Lighting, 2015(3): 14-17.
- [22] 李雯琳,郁继华,张国斌,等. LED 光源不同光质对叶用莴苣幼苗叶片气体参数和叶绿素荧光参数的影响 [J]. 甘肃农业大学学报,2010,45(1):47-51,115.
Li W L, Yu J H, Zhang G B, et al. Effects of light quality on parameters of gas exchange and chlorophyll fluorescence in lettuce leaves by using LED [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(1): 47-51, 115.
- [23] 赵世杰,史国安,董新纯.植物生理学实验指导 [M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002.
Zhao S J, Shi G A, Dong X C. Techniques of plant physiological experiment [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
- [24] 高俊凤.植物生理学实验指导 [M]. 北京:高等教育出版社,2005.
Gao J F. Experimental guidance for plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [25] 曹建康,姜微波.果蔬采后生理生化实验指导 [M]. 北京:中国轻工业出版社,2007.
Cao J K, Jiang W B. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [26] 童 哲,赵玉锦,王 台,等.植物的光受体和光控发育研究 [J]. 植物学报,2000,42(2):111-115.
Tong Z, Zhao Y J, Wang T, et al. Photoreceptors and light regulated development in plants [J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(2): 111-115.
- [27] 许 莉,刘世琦,齐连东,等.不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响 [J]. 中国农学通报,2007,23(1):96-100.
Xu L, Liu S Q, Qi L D, et al. Effect of light quality on leaf lettuce photosynthesis and chlorophyll fluorescence [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(1): 96-100.
- [28] 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.
Pu G B, Liu S Q, Liu L, et al. Effects of different light qualities on growth and physiological characteristics of tomato seedlings [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005, 32(3): 420-425.
- [29] 阳圣莹,白 胜,蒋浩宏,等.不同补光处理对设施草莓光合特性及果实品质的影响 [J]. 山西农业科学,2016,44(9):1298-

- 1303.
- Yang S Y, Bai S, Jiang H H, et al. Effects of different supplemental lighting treatments on photosynthetic characteristics and fruit quality of strawberry in greenhouse [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(9): 1298-1303.
- [30] Kim S J, Hahn E J, Heo J W, et al. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro* [J]. Scientia Horticulturae, 2004, 101(1): 143-151.
- [31] 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.
- Gao Z, Lei H S, Wu Y F, et al. Effects of different proportions red and blue light on the growth and photosynthetic characteristics of strawberry [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(12): 20-27.
- [32] 苏志能, 杨 婷, 陈光彩. LED 灯不同光质对番茄生长形态特征的影响 [J]. 照明工程学报, 2017, 28(6): 92-99.
- Su Z N, Yang T, Chen G C. Effect of LED lamp with different light quality on morphological characteristics of tomato growth [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(6): 92-99.
- [33] Richter G, Wessel K. Red light inhibits blue light-induced chloroplast development in cultured plant cells at the mRNA level [J]. Plant Molecular Biology, 1985, 5(3): 175-182.
- [34] 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.
- Cao G, Zhang G B, Yu J H, et al. Effects of different LED light qualities on cucumber seedling growth and chlorophyll fluorescence parameters [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6): 1297-1304.
- [35] 刘 庆. 不同光周期及光质对草莓生理特性及品质的影响 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2015.
- Liu Q. Effects of different photoperiod and different light quality on the physiological characteristics and quality in strawberry [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2015.
- [36] 浦正明, 王华君, 谢伟峰, 等. 光照对草莓花芽分化影响的初探 [J]. 上海农业科技, 2004(4): 73.
- Pu Z M, Wang H J, Xie W F, et al. Preliminary study on the effect of light on flower bud differentiation of strawberry [J]. Shanghai Agriculture Science, 2004(4): 73.
- [37] 余 红, 马华升, 方献平, 等. 草莓花芽分化机理及调控技术研究进展 [J]. 江西农业学报, 2011, 23(1): 58-61.
- Yu H, Ma H S, Fang X P, et al. Review on mechanism of strawberry flower bud differentiation and application of regulation techniques [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(1): 58-61.
- [38] Gajewska 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.
- [39] 王英利, 王勋陵, 岳 明. UV-B 及红光对大棚番茄品质的影响 [J]. 西北植物学报, 2000, 20(4): 590-595.
- Wang Y L, Wang X L, Yue M. Effects of supplementary radiation of UV-B and red light on fruit quality of tomato in winter plastic greenhouse [J]. Acta Botanica Boreale-Occidentalia Sinica, 2000, 20(4): 590-595.
- [40] 陈 强, 刘世琦, 张自坤, 等. 不同 LED 光源对番茄果实转色期品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 156-161.
- Chen Q, Liu S Q, Zhang Z K, et al. Effect of different light emitting diode sources on tomato fruit quality during color-changed period [J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 156-161.
- [41] 郑冬梅, 林志斌, 陈艺群, 等. 不同光质对樱桃番茄产量及品质的影响 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, 36(8): 567-571.
- Zheng D M, Lin Z B, Chen Y Q, et al. Effects of different light qualities on yield and quality of cherry tomato [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, 36(8): 567-571.
- [42] 常涛涛. 不同光谱能量分布对番茄生长发育及其果实品质的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- Chang T T. Effects of different light spectral distribution on growth and qualities of tomato [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.