

不同红/蓝LED组合光源对石榴幼树 光合特性和生理指标的影响

史江莉, 胡青霞, 季亚萍, 赵 乾, 陈延惠*

(河南农业大学园艺学院·河南省果树瓜类生物学重点实验室, 郑州 450002)

摘 要:【目的】以自然光为对照,探索不同光质组合对石榴幼树生长的影响,筛选最适宜‘突尼斯’软籽石榴生长的红/蓝光质组合。【方法】从‘突尼斯’软籽石榴为植物材料,在塑料大棚内,用RB(3:7)、RB(2:8)、RB(7:3)、RB(8:2)这4种LED组合光源对石榴幼树人为补光,以自然光为对照,测定幼树叶片的光合特性和生理生化指标,及根系中抗氧化酶活性。【结果】4种LED组合光源补光后,石榴幼树叶片中,RB(2:8)明显提高光合速率,降低蒸腾速率和细胞间CO₂浓度,但在上午和晚上2个补光时段内,RB(3:7)的作用更为显著;叶片中SOD活性依次为RB(3:7)>RB(2:8)>RB(7:3)>RB(8:2)>对照,并且RB(2:8)和RB(3:7)补光条件下,SOD活性显著高于其他2个处理和对照;此外,RB(2:8)处理下叶片中花青素、可溶性糖和可溶性蛋白的含量也最高。在石榴幼树根系中,RB(2:8)与RB(3:7)补光条件下,SOD活性和CAT活性最高,MDA含量最低。【结论】与自然光为对照,4种组合光源对幼树生长产生不同程度的有利作用。其中,蓝光多于红光的红蓝光质组合RB(2:8)和RB(3:7)作用较突出,能够促进光合作用和蛋白质合成,有利于提高石榴幼树叶片中花青素和可溶性糖含量,并降低叶片的蒸腾速率,同时促进冬季石榴根系的SOD和CAT活性,降低MDA含量,因此有利于增强石榴幼树的抗逆性,尤其是RB(2:8)的补光对幼树生长、增强抗逆性的效果更为显著。

关键词:石榴;LED组合光源;光合特性;SOD;生理特性;抗逆性

中图分类号:S665.4

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2017)Suppl.-103-08

Effects of combined LED lights with red and blue on photosynthetic characteristics and physiological indexes of ‘Tunisia’ soft-seed pomegranate

SHI Jiangli, HU Qingxia, JI Yaping, ZHAO Qian, CHEN Yanhui*

(College of Horticulture, Henan Agricultural University · Henan Key Laboratory of Fruit and Cucurbit Biology, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract:【Objective】Pomegranate tree is deciduous, bush or dungarunga, originated in Iran, Afghanistan and other Central Asian regions. Pomegranate is one of the excellent fruit trees with ecological, economic, social benefits, ornamental and health care functions. At present, cultivation techniques of pomegranates have gained some scientific achievements, compared with other fruit trees. However, there was a gap in theory study and cultivation techniques, especially in protected cultivation of pomegranate. With the development of light emitting diode (LED) light in agriculture, especially, the artificial regulation of different LED lights was used widely for vegetable production in protected cultivation, and brought greater economic benefit, high yield and quality. In order to utilize LED lights for pomegranate industry, four different combined LED lights with red and blue ones, as supplementary lights, were used for young ‘Tunisia’ pomegranate trees, so as to obtain the most appropriate the combined LED lights for the growth of pomegranate. 【Methods】LED was used as supplementary lights for pomegranate cultivar ‘Tunisia’, and combined LED lights were divided into four treatments, including: RB (3:7), RB (2:8), RB (7:3), and RB

收稿日期:2017-08-20

接受日期:2017-09-10

基金项目: 河南省重大科技专项(151100110900);郑州市都市生态农业水果(石榴、桃)产业技术体系(2017);河南省高等学校重点科研项目计划(15A210034)

作者简介: 史江莉,女,副教授,从事果树遗传育种与果实品质研究。Tel:13903862993,E-mail:sjli30@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 15237130136,E-mail: chenyanhui188@163.com

(8:2), the natural light as control. Photosynthetic and some physiological characteristics in the leaves, SOD and CAT activity, and MDA content in roots from young pomegranate trees were analyzed with supplemented four LED light qualities to explore the relationship between different light qualities and pomegranate growth.【Results】For leaves, different combined LED light qualities had significant influence on photosynthetic characteristics during pomegranate growth. RB (2:8) combined LED light improved obviously photosynthetic rate, decreased transpiration rate and intercellular CO₂ concentration in young pomegranate trees, but RB (3:7) affected most greatly during the morning and evening of supplementary light; SOD activity with different light treatments followed the decreasing order: RB (3:7) > RB (2:8) > RB (7:3) > RB (8:2) > control, importantly, its activity with RB (3:7) and RB (2:8) were both higher significantly than the other two treatments and control; anthocyanin, the soluble sugar and protein contents were all the highest under RB (2:8) combined LED light. In roots in winter, different LED light qualities had significant influence on MDA content, SOD activity and CAT activity. Under RB (2:8) and RB (3:7) treatments, SOD and CAT activity in roots were the highest while MDA contents were the lowest.【Conclusion】The results in the study proved that four combined LED affected beneficially the growth of young pomegranate trees in different degrees, and the combined LED lights with blue light more than red light, such as RB (3:7) and RB (2:8), improved photosynthetic rate, and stomatal conductance, anthocyanin, the soluble sugar and protein contents in leaves, SOD activity and CAT activity in roots in winter while decreased MDA content in roots, transpiration rate and intercellular CO₂ concentration in young pomegranate trees, suggesting that RB (3:7) and RB (2:8) were the most appropriate combined LED lights for the growth of pomegranate and may improve the resistance to environmental stresses for fruit trees.

Key words: Pomegranate; Combined LED light; Photosynthetic characteristics; SOD; Physiological characteristics; Resistance

石榴(*Punica granatum* L.)鲜美多汁,营养丰富,具有较高的药用价值,受到各国消费者和医学界的青睐。我国具有悠久的石榴种植历史,但长期以来发展缓慢,分布比较零散,管理较粗放,没有形成相应的规模^[1]。20世纪80年代以来,石榴得到广泛重视和开发利用。尤其是近年无公害、绿色食品标准化技术的推广,石榴产业也迅速发展。随着人们生活水平的提高,石榴的营养价值逐步被消费者认可,高品质高效益的软籽石榴品种备受人们青睐^[2]。

光是植物生长最重要的环境因子之一。21世纪被誉为“光的世纪”,各类波长发光二极管(light emitting diode, LED)被业界认为是农业领域最有前途的人工光源,对于解决环境污染,提高空间利用率,减少温室效应都具有十分重要的意义^[3]。LED不仅具有体积小、寿命长、无污染、降低资源损耗、减少成本开支的优点,而且还能根据农业生物的需要进行光谱的精确配置,促进农业生物的生长发育和光形态建成,尤其在设施蔬菜方面的研究与应用已成为热点,LED灯不但促进蔬菜幼苗的生长,同时可以提高蔬菜的产量和品质^[4-12]。因此,LED技术在植物

栽培领域有着良好的发展前景。

然而,LED技术应用于果树方面的研究相当少。葡萄方面的研究主要局限在组织培养方面,研究不同光质对砧木、组培苗、愈伤组织等生长的影响^[13-15]。此外,余阳等^[16]研究发现,红光R630处理有利于提高‘夏黑’葡萄的叶绿素含量;蓝光处理提高了‘夏黑’葡萄的SOD酶的活性,而红光处理提高了POD酶的活性;红蓝光RRB440处理下的MDA含量最高。LED技术还应用于红梨采收后的果实品质研究^[17]。迄今为止,还没有发现LED组合光源在石榴生产上应用的报道。因此笔者以品质优良的‘突尼斯’软籽石榴为试验材料,依据前人对LED光质组合的研究,结合LED光质的特点设计了4种LED光质组合,在石榴的生长季进行人为补光,探索不同光质组合对光合特性、营养物质和抗逆性的影响,筛选最适宜‘突尼斯’软籽石榴生长的光质组合,促进石榴幼树生长。

1 材料和方法

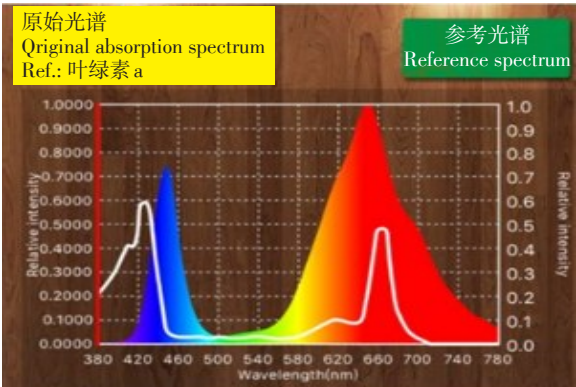
1.1 植物材料

本试验在河南农业大学试验园进行,塑料大棚

占地 666.7 m²,高 4.6 m,覆盖 0.10 mm 厚 PO 膜。选用厚 3 cm 内径长宽 10 cm、功率 50 W 的点光源 LED 灯为补光灯,由深圳普益照明科技有限公司提供。2016 年 3 月 28 日将‘突尼斯’软籽石榴定植于内径 45 cm、高 30 cm 的无纺布育苗袋内,采用常规管理,在定植及整个试验期间未施用任何肥料。

1.2 光质设计

根据 2 种人造光源红光(R)、630~680 nm、吸收峰为 660 nm 和蓝光(B)、450~500 nm、吸收峰为 470 nm(图 1),设计 4 种红蓝组合制成的 LED 灯,分别为 RB(2:8)、RB(8:2)、RB(3:7)、RB(7:3),距离光源 50 cm 处光通量密度(PPDF)分别为 72.55、82.35、75.28、85.58 mol·m⁻²·s⁻¹,随着距离照射中心宽度加大,光通量密度逐渐减小(表 1)。



深圳普益照明科技有限公司提供。
Provided by Shenzhen Puyi Light Technology Co. Ltd.

图 1 红光和蓝光的原始光谱

Fig. 1 Original absorption spectrums of red and blue light

表 1 光通量密度(PPDF)渐变示例

Table 1 PPDF gradient sample

距离中心的宽度 The distance from the center /cm	光通量密度 PPDF/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
100	9.59
90	11.89
80	14.75
70	18.23
60	21.29
50	27.23
40	33.93
30	43.71

1.3 试验处理

选择生长较为一致的 1 a(年)生‘突尼斯’软籽石榴幼树为植物材料,用 4 种 LED 组合光进行人为补光,即 RB(2:8)、RB(8:2)、RB(3:7)、RB(7:3),以自然光为对照。每个处理 8 株幼树,补光时间为早上 5:30—7:30 和傍晚 18:30—20:30。LED 灯悬挂于幼树正上方 50 cm 处垂直向下照射,各处理之

间用灰色遮光布间隔,防止混光。2016 年 7 月 26 日开始补光。每隔 20 d 取样 1 次,连续取样 3 次。采集距离补光灯 50 cm 处的嫩叶,每株幼树采集 3 枚嫩叶,每个处理采集的叶片分为 3 份,立刻放入冰盒,用于相关指标的测定。待落叶后养分回流树体,2016 年 12 月 12 日开始采集石榴根系样品,每隔 15 d 采样 1 次,共取样 3 次。每个处理的 8 株幼树中随机挑选 4 株,分东南西北 4 个不同方向采集整株幼树根系的 1/4,分装整理后放入冰箱备用。

1.4 测定指标及方法

叶片光合特性采用美国 Li-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合仪测定,在天气晴朗无云时测定石榴叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i),光强为 400 mol·m⁻²·s⁻¹,叶温为(25±1)℃。可溶性糖含量采用苯酚法测定;考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白质含量;叶片花青素含量的测定采用分光光度法;叶片中超氧化物歧化酶(SOD)酶液的提取及测定采用氮蓝四唑(NBT)法。根系中过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量和 SOD 活性的测定采用苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒。

1.5 数据处理

用 excel 2003 和 SPSS 19 软件进行相关数据的分析。

2 结果与分析

2.1 LED 光质对石榴幼树叶片光合速率的影响

如图 2 所示,从 6:00 到 20:00,4 种 LED 组合光源的光合速率表现为升—降—升的趋势,而对照表现为先升后降。光合速率峰值出现在 10:00—12:00。

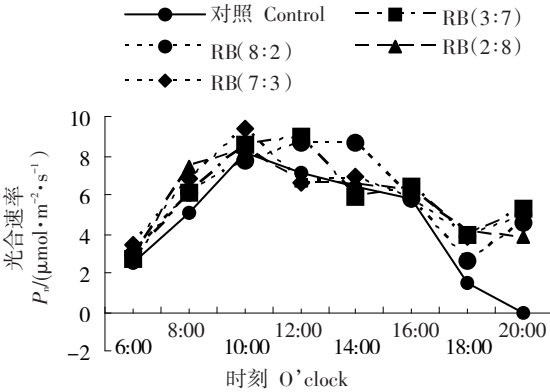


图 2 LED 光质对石榴幼树叶片光合速率的影响
Fig. 2 Effects of LED light quality on photosynthetic rate of leaves from young pomegranate trees

在早晨6:00—8:00补光区段,4种LED光质组合光合速率均高于对照,并且RB(2:8)的光合速率显著高于其他3种处理。傍晚18:00—20:00补光区段,对照已处于黑暗条件下,其光合速率为负值,对比4种LED光质处理,蓝光多于红光可能有利于光合速率的提高,尤其是RB(3:7)对光合速率的促进效果最为显著。

2.2 LED光质对石榴幼树叶片细胞间CO₂浓度的影响

如图3所示,6:00—18:00时间段内,对照与4种LED光质处理的变化趋势基本相同,但是在18:00对照出现明显上升,而其他LED光质处理则出现不同程度的下降。同时,4种LED光质处理的幼树叶片中细胞间CO₂浓度均值均低于对照,其中最低的是RB(2:8)。胞间CO₂浓度呈下降趋势时,光合速率则呈上升趋势,因此RB(2:8)组合光可显著降低胞间CO₂浓度,提高光合速率。

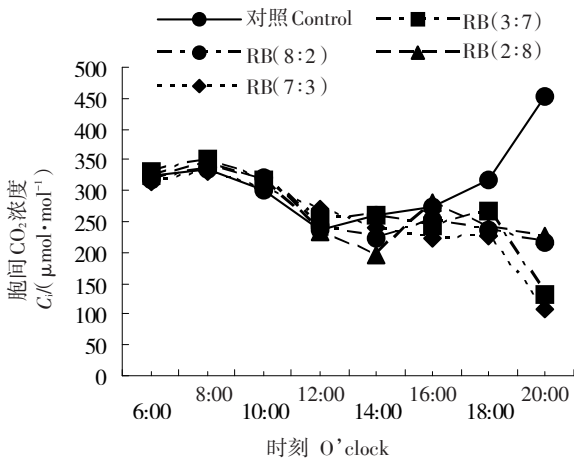


图3 LED光质对石榴幼树叶片胞间CO₂浓度的影响

Fig. 3 Effects of LED light quality on intercellular CO₂ of leaves from young pomegranate trees

2.3 LED光质对石榴幼树叶片气孔导度的影响

由图4可知,4种LED光质组合光源处理下,石榴幼树叶片的气孔导度显著高于对照,都是先升后降的趋势,均在上午10:00达到最高峰,之后开始下降。并且,RB(3:7)处理的气孔导度最高,RB(7:3)最低。

2.4 LED光质对石榴幼树叶片蒸腾速率的影响

由图5可知石榴幼树叶片蒸腾速率的日变化,分别在上午10:00和下午16:00呈现2个峰值。上午10:00,4种LED光质组合光源处理的蒸腾速率均高于对照,从高到底依次为RB(7:3)>RB(8:2)>RB

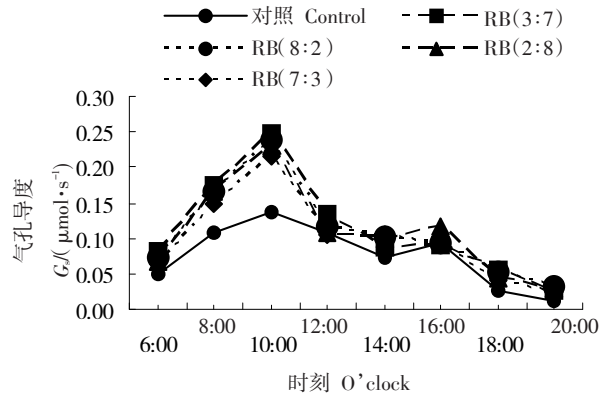


图4 LED光质对石榴幼树叶片气孔导度的影响

Fig. 4 Effects of LED light quality on stomatal conductance of leaves from young pomegranate trees

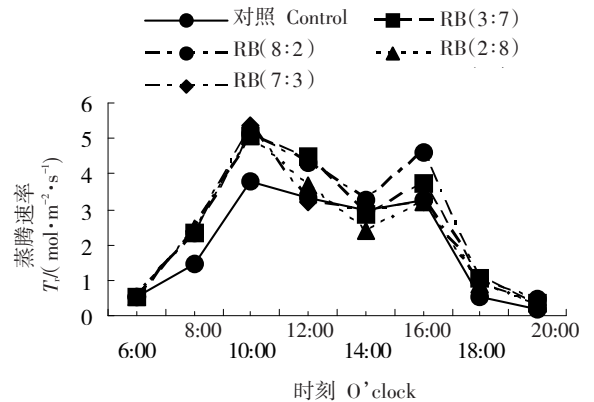


图5 LED光质对石榴幼树叶片蒸腾速率的影响

Fig. 5 Effects of LED light quality on transpiration rate of leaves from young pomegranate trees

(2:8)>RB(3:7)。下午16:00,4种处理的叶片中蒸腾速率从高到底则依次为RB(8:2)>RB(3:7)>RB(2:8)>RB(7:3),其中RB(8:2)处理下,其蒸腾速率显著高于对照。对比各处理6:00—20:00的蒸腾速率,其平均值从高到低依次为RB(8:2)>RB(3:7)>RB(7:3)>RB(2:8)>对照。由此推断,红光多于蓝光的光质组合可以提高蒸腾速率。

2.5 LED光质对石榴幼树叶片可溶性糖含量的影响

不同LED光质组合处理的石榴幼树,其叶片中可溶性糖含量略有差异,但不明显。由图6可知,对比8月17日各处理叶片中可溶性糖含量,RB(2:8)>RB(7:3)>RB(3:7)>RB(8:2)>对照。而9月7日各处理叶片中可溶性糖含量,RB(7:3)>RB(2:8),仍然高于其他2个处理和对照,但差异不显著($P < 0.05$)。9月27日,RB(2:8)光质组合处理的可溶性糖含量最高,比对照高52.19%,且差异显著($P <$

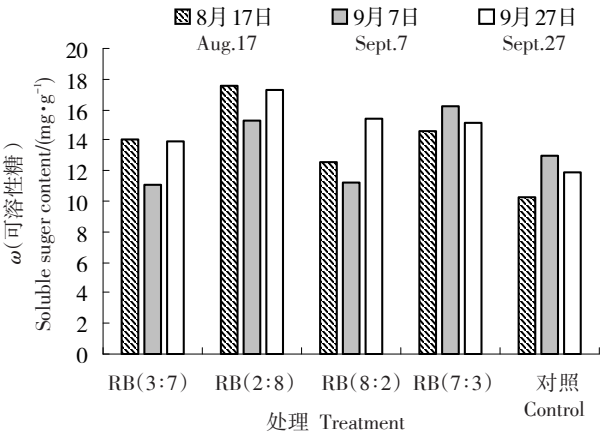


图6 LED光质对石榴幼树叶片中可溶性糖含量的影响
Fig. 6 Effects of LED light quality on soluble sugar content in pomegranate leaves

0.05)。总之,在4种光质组合中,RB(2:8)光质组合增加幼树叶片可溶性糖含量的效果最为突出。

2.6 LED光质对石榴幼树叶片可溶性蛋白含量的影响

如图7所示,在4种LED光质组合处理下,8月17日和9月27日,对照的可溶性蛋白含量均低于4种LED光质组合。同时,8月17日, RB(7:3)和RB(8:2)光照条件下,其可溶性蛋白含量分别比对照高50.43%和50.10%,且差异显著($P < 0.05$)。9月27日, RB(2:8)光照条件下石榴幼树叶片可溶性蛋白含量最高,其次是RB(8:2),但4个处理间与对照之间差异并不显著。9月7日石榴叶片中可溶性蛋白含量对比, RB(2:8)的可溶性蛋白含量最高,比对照可溶性蛋白的含量高28.75%,但是与对照的差异并不显著($P < 0.05$)。总之,在3个不同时期,4个LED光质处理的平均值都高于对照。其中,可溶性蛋白含量最高的处理是RB(2:8)。

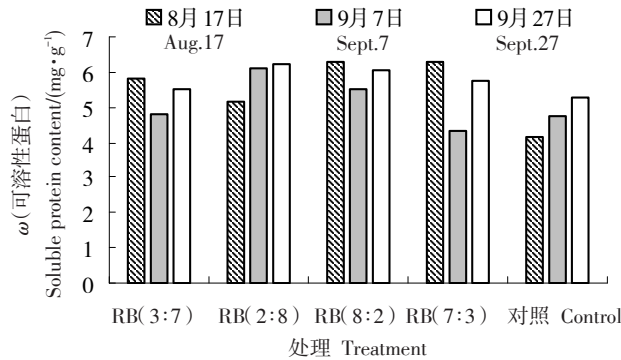


图7 LED光质对石榴幼树叶片中可溶性蛋白含量的影响
Fig. 7 Effects of LED light quality on soluble protein content in pomegranate leaves

2.7 LED光质对石榴幼树叶片花青素含量的影响

由图8可知, RB(2:8)光照处理的石榴幼树,其叶片花青素含量明显高于其他处理。3个时间点花青素含量均值分别比对照高25.47%、29.30%、95.32%,且差异显著($P < 0.05$)。

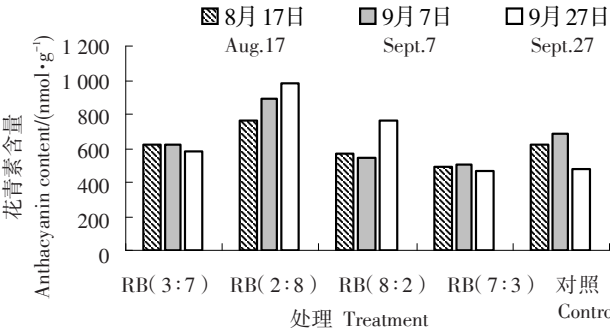


图8 LED光质对石榴幼树叶片中花青素含量的影响
Fig. 8 Effects of LED light quality on anthocyanin content in pomegranate leaves

2.8 LED光质对石榴幼树叶片中SOD活性的影响

SOD是动物和植物体内最具有代表性的抗氧化酶,提高其活性可以有效延缓衰老、增加抗性。由图9可知,4种LED光质处理随着补光时间的延长,除RB(3:7)外, SOD活性出现均逐渐增强的趋势。RB(2:8)和RB(3:7)处理,虽然SOD活性高于对照,但差异不显著。对比4种LED光质处理的SOD活性均值, $RB(3:7) > RB(2:8) > RB(7:3) > RB(8:2)$,这个结果说明,蓝光多于红光的光质组合进行补光有利于提高石榴叶片的SOD活性。

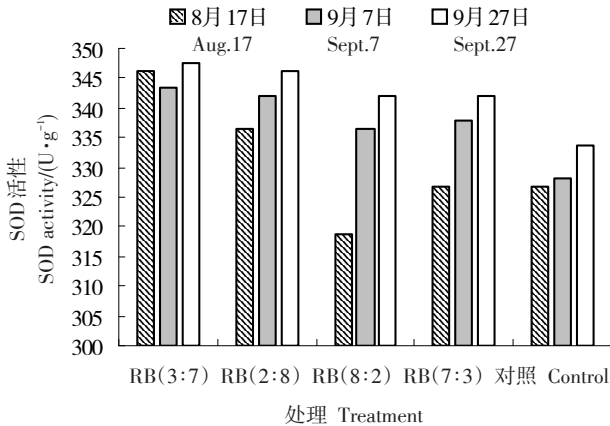


图9 LED光质对石榴幼树叶片SOD活性的影响
Fig. 9 Effects of LED light quality on SOD activity in pomegranate leaves

2.9 LED光质对石榴幼树根系抗性的影响

抗氧化酶系统可以保护植物免受伤害,是植物

的主要的防御系统。SOD 和 CAT 是植物体内重要的保护酶,参与植物体重要生命活动,如抗击机械损伤、组织病原侵入和植物细胞分裂器官分化等。由图 10 可知,经过 4 种 LED 光质补光处理,3 个时间点的 SOD 活性没有明显的变化规律,但是,RB(3:7)和 RB(2:8)2 种光质处理,石榴根系中 SOD 活性显著高于 RB(7:3)、RB(8:2)和对照 ($P < 0.05$)。如图 11 所示,CAT 的活性在 4 种 LED 光质处理的 3 个时期也没有明显的变化规律。对比 4 种 LED 光质处理在 3 个时期的 CAT 活性的平均值,RB(2:8)最高,不仅显著高于其他 3 个光质组合,而且极显著高于对照。其次是 RB(3:7),其根系中 CAT 活性显著高于 RB(7:3)、RB(8:2)和对照。

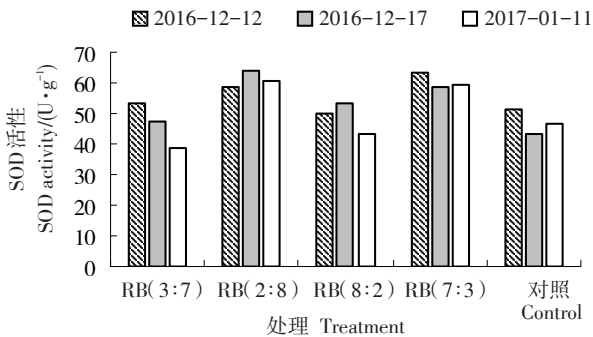


图 10 LED 光质对石榴幼树根系 SOD 活性的影响

Fig. 10 Effects of LED light quality on SOD activity in pomegranate roots

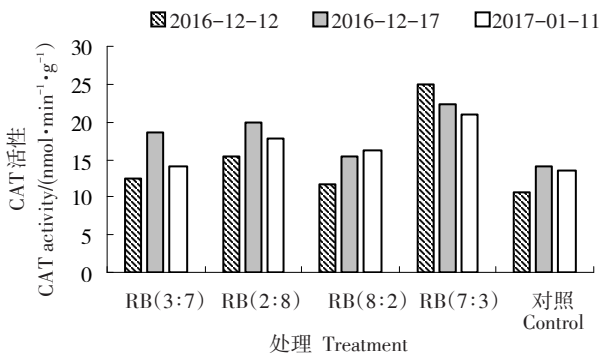


图 11 LED 光质对石榴幼树根系 CAT 活性的影响

Fig. 11 Effects of LED light quality on CAT activity in pomegranate roots

因此,2 个蓝光多于红光的 LED 组合光源明显增强了 SOD 和 CAT 的活性。

MDA 是膜脂过氧化最重要的产物之一,它的产生能加剧膜的损伤,降低植物体的抗逆性,因此在植物衰老生理和抗性生理研究中 MDA 含量是一个常用指标,间接测定膜系统受损程度以及植物的抗逆

性。如图 12 所示,RB(3:7)和 RB(2:8)随着照射时间的延长,MDA 含量逐渐增加,而 RB(8:2)有较明显的降低趋势。对比各个处理 MDA 含量的平均值,RB(3:7)最低,且显著高于 RB(8:2)和 RB(7:3) ($P < 0.05$)。因此,RB(8:2)和 RB(7:3)不利于石榴幼树的生长,RB(3:7)和 RB(2:8)2 个蓝光光质占较大比例的 LED 组合光源对石榴幼树的越冬更为有利。

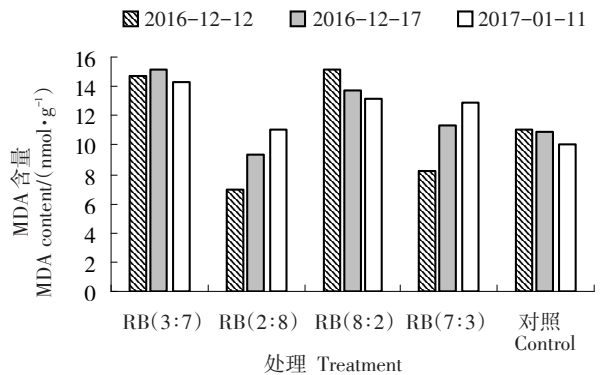


图 12 LED 光质对石榴幼树根系 MDA 含量的影响

Fig. 12 Effects of LED light quality on MDA content in pomegranate roots

3 讨 论

光是植物生长发育的基本要素之一,光质是农业生态研究的一个新领域。相同光强下,不同单色光对蔬菜幼苗生长的影响不同,并且组合光比单色光更有利于蔬菜幼苗的生长^[18]。王绍辉等^[19]在黄瓜果实上的研究发现,蓝光能促进蛋白质的形成;陈强等^[20]用番茄果实作为植物材料,发现红蓝组合光(3:1)处理显著提高可溶性蛋白含量;Kowalik^[21]认为,与其他光产物相比,蛋白质是大分子物质,其合成需要更多能量,而蓝光区光量子能量较高,因而能促进蛋白的合成。并且,吴根良等^[22]和高艺等^[23]分别用越冬辣椒和丝瓜作为植物材料进行研究时发现,红/蓝(8/3)光和红/蓝(8/1)分别促进了可溶性总糖和可溶性蛋白的形成;杨晓健等^[7]认为,红光能显著提高青蒜苗中可溶性糖含量,蓝光能提高青蒜苗中可溶性蛋白质含量。此外,马桂芹等^[24]研究发现,红光有利于青蒜苗碳水化合物和色素的形成。本研究通过对石榴幼树进行红/蓝 LED 组合光源的补光,结果表明,4 种光质处理后,石榴叶片中可溶性糖、可溶性蛋白和花青素含量均高于对照,并且 RB(2:8)高于其他 3 个处理,说明 LED 组合光源影响了石榴幼树

叶片中营养物质的积累。在本研究中,红蓝组合光(蓝光>红光)对提高可溶性蛋白含量的效果优于红蓝组合光(红光>蓝光),但是LED单色光和组合光源对不同物种中可溶性糖含量的影响存在差别,其具体原因和机制有待于进一步探究。此外,笔者还发现组合光源RB(2:8)和RB(3:7)补光条件下,光合速率最强和气孔导度最大,细胞间CO₂浓度和蒸腾速率最低,因此蓝光多于红光的组合光促进了石榴幼树的光合作用,并且降低蒸腾速率,提高植物体内水分的利用效率,尤其是RB(2:8)补光处理的效果更为显著。

植物细胞中SOD和CAT酶能够消除O₂⁻、OH⁻、H₂O₂等活性氧,阻止膜脂过氧化,保护细胞膜不受损坏。王虹等^[25]对黄瓜的研究表明,与对照的白光相比,紫光和蓝光处理后叶片的SOD活性呈上升趋势,加强了叶片对自由基的抵抗清除力,进而减少自由基的累积,延缓叶片的衰老。在本研究中,RB(2:8)和RB(3:7)补光处理后测得的石榴幼树叶片和根系中的SOD活性,以及根系中CAT的活性都高于RB(7:3)、RB(8:2)和对照。并且MDA含量最低,由此推断,蓝光多于红光的光质组合补光可以提高石榴幼树抗氧化酶的活性,可能有助于提高石榴幼树的越冬能力,为‘突尼斯’软籽石榴的抗逆性研究提供了理论依据,并对实际生产提供了指导意义。

当前大多数研究关注于单色光和组合光的对比,而本研究依据前人的研究基础,选择效果更为显著的组合光,利用LED组合光探讨对石榴幼树生长的影响,并针对‘突尼斯’软籽石榴抗寒性较差的特点,有目的地分析了冬季‘突尼斯’软籽石榴幼树根系中的SOD和CAT活性以及MDA含量,从4种LED组合光源中筛选出最适合‘突尼斯’软籽石榴生长和越冬的光质组合[RB(2:8)和RB(3:7)],从而为LED灯在提高植物抗逆性方面的研究提供了有利证据,这也是迄今为止,LED灯在石榴生产上应用的首次报道。

4 结 论

利用4种LED组合光源在塑料大棚内对‘突尼斯’软籽石榴人为补光,研究结果表明,以自然光为对照,4种组合光源对幼树生长产生不同程度的促进作用。在4种组合光源中,蓝光多于红光的光质组合RB(2:8)和RB(3:7)作用较突出,能够促进叶

片的光合作用和蛋白质合成,有利于提高石榴幼树叶片中花青素和可溶性糖含量,降低叶片的蒸腾速率,并促进冬季石榴根系中SOD和CAT活性,降低MDA含量,从而增强石榴幼树的抗逆性,尤其是RB(2:8)的效果更为显著。

参考文献 References:

- [1] 王爱伟,孟繁锡,刘春鸽,郝文谦.我国石榴产业发展现状及对策[J].北方果树,2006(6):35-38.
WANG Aiwei, MENG Fanxi, LIU Chunge, HAO Wenqian. Development situation and measures of pomegranate industry in China [J]. Northern Fruits, 2006(6):35-38.
- [2] 姚方,吴国新,马贵羊.石榴产业发展的广阔空间和引进新品种的必要性[J].经济研究导刊,2012(4):215-216.
YAO Fang, WU Guoxin, MA Guanyang. Broad prospect of pomegranate industry and necessity of new cultivars introduce [J]. Economic Research Guide, 2012(4):215-216.
- [3] 魏灵玲,杨其长,刘水丽.LED在植物工厂中的研究现状与应用前景[J].中国农学通报,2007,23(11):408-411.
WEI Lingling, YANG Qichang, LIU Shuili. Review on research and developing trends of light emitting diode in plant factory [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23 (11):408-411.
- [4] 段奇珍,曲梅,高丽红.不同LED光源对黄瓜幼苗质量的影响[J].北方园艺,2010(15):125-128.
DUAN Qizhen, QU Mei, GAO Lihong. Effect of different light emitting diode sources on the quality of cucumber seedlings[J]. Northern Horticulture, 2010(15):125-128.
- [5] 李效民.LED光源在农业照明领域的市场需求分析[J].湖北农业科学,2012,51(19):4385-4387.
LI Xiaomin. The market demand of LED light source in field of agricultural lighting [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51 (19):4385-4387.
- [6] 王芳,高芳云,吕顺,夏玲,刘建平,郑汉文,庄华才,李洪波,陈丽娜,郭金香.不同比例红/蓝LED灯对蔬菜育苗的补光效应[J].热带作物学报,2015,36(8):1398-1402.
WANG Fang, GAO Fangyun, LÜ Shun, XIA Ling, LIU Jianping, ZHENG Hanwen, ZHUANG Huacai, LI Hongbo, CHEN Lina, GUO Jinxiang. Supplementing light effects of light emitting diodes (LEDs) on vegetable seedling [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(8):1398-1402.
- [7] 杨晓健,刘世琦,张自坤,马琳,张宇,尉辉.不同发光二极管对青蒜苗营养品质的影响[J].营养学报,2010,32(5):518-520.
YANG Xiaojian, LIU Shiqi, ZHANG Zikun, MA Lin, ZHANG Yu, WEI Hui. Effects of different light emitting diode sources on nutritional quality of garlic seedling [J]. Nutrimenta Sinica, 2010, 32 (5):518-520.
- [8] BULA R J, MORROW R C, TIBBITTS T W, BARTA D J. Light-emitting diodes as a radiation source for plants [J]. HortScience, 1991, 26(2):203-205.
- [9] CHEN X, GUO W, XUE X, WANG L, QIAO X. Growth and quality responses of ‘Green Oak Leaf’ lettuce as affected by mono-

- chromic or mixed radiation provided by fluorescent lamp (FL) and light-emitting diode (LED) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 172: 168–175.
- [10] DANIEL J T, ERIC L S, THOMAS D S. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research [J]. *Technical Communication Photosynthesis Research*, 1994, 39(1): 85–92.
- [11] MA G, ZHANG L, KAT O, YAMAWAKI K, KIRIWA Y, YAHATA M, IKOMA Y, MATSUMOTO H. Effect of the combination of ethylene and red LED light irradiation on carotenoid accumulation and carotenogenic gene expression in the flavedo of citrus fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 99: 99–104.
- [12] RENATA W, OLGA D G, ANNA K, MAREK Z. Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 187: 80–86.
- [13] 罗丽媛, 李胜, 马绍英, 刘浩, 薛冲, 方艳, 张真, 刘媛. LED 不同光质对葡萄愈伤组织及白藜芦醇合成的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(5): 46–50.
- LUO Liyuan, LI Sheng, MA Shaoying, LIU Hao, XUE Chong, FANG Yan, ZHANG Zhen, LIU Yuan. Dynamic effects of different LED light qualities on the growth and resveratrol synthetic in callus of *Vitis vinifera* [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010, 45(5): 46–50.
- [14] 马绍英, 李胜, 牛俊义, 张真, 刘媛, 薛冲. LED 不同光质对葡萄砧木试管苗生理生化特性的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(5): 56–62.
- MA Shaoying, LI Sheng, NIU Junyi, ZHANG Zhen, LIU Yuan, XUE Chong. Effects of different LED light on physiological and biochemical characters of grape rootstock plantlets [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010, 45(5): 56–62.
- [15] HEO J, LEE C, CHAKRABART D. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromatic or mixture radiation provided by a light emitting diode [J]. *Plant Growth Regulation*, 2002, 38(3): 225–230.
- [16] 余阳, 刘帅, 李春霞, 辛守鹏, 王小青, 陶建敏. LED 光质对‘夏黑’葡萄光合特性和生理指标的影响 [J]. *果树学报*, 2015, 32(5): 879–884.
- YU Yang, LIU Shuai, LI Chunxia, XIN Shoupeng, WANG Xiaoqing, TAO Jianmin. Effects of LED light quality on the photosynthetic properties and physiological indexes of ‘Summer Black’ grape [J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(5): 879–884.
- [17] 苏俊, 孟庆雄, 李林, 陈霞, 梁明泰, 舒群. 不同光源对‘美人酥’红梨果实品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2013(7): 5–8.
- SU Jun, MENG Qingxiong, LI Lin, CHEN Xia, LIANG Mingtai, SHU Qun. Effect of different light sources on fruit quality of ‘Menrensu’ red Chinese sand pear [J]. *Northern Horticulture*, 2013(7): 5–8.
- [18] 王玲平, 周胜军, 朱育强, 戴丹丽, 张鹏. 不同光质对水果黄瓜育苗的影响 [J]. *浙江农业科学*, 2013(8): 976–978.
- WANG Lingping, ZHOU Shengjun, ZHU Yuqiang, DAI Danli, ZHANG Peng. Effect of different light quality on seedling of fruit cucumber [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2013(8): 976–978.
- [19] 王绍辉, 孔云, 陈青君, 程继鸿, 徐利林. 不同光质补光对日光温室黄瓜产量与品质的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 119–121.
- WANG Shaohui, KONG Yun, CHEN Qingjun, CHENG Jihong, XU Lili. The effects of different light qualities on cucumber fruit quality and yield in greenhouse [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 119–121.
- [20] 陈强, 刘世琦, 张自坤, 崔慧茹, 郝树芹, 刘忠良. 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 Qiang, LIU Shiqi, ZHANG Zikun, CUI Huiru, HAO Shuqin, LIU Zhongliang. Effect of different light emitting diode sources on tomato fruit quality during color-changed period [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 156–161.
- [21] KOWALLIK W. Blue light effects on respiration [J]. *Anna Rev Plant Biology*, 1982, 33(33): 51–72.
- [22] 吴根良, 郑积荣, 李许可. 不同 LED 光源对设施越冬辣椒果实品质和产量的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2014, 31(2): 246–253.
- WU Genliang, ZHENG Jirong, LI Xuke. Effect of different LED sources on the quality and yield of overwintering pepper in the green house [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2014, 31(2): 246–253.
- [23] 高艺, 董皓, 刘厚诚. 不同光质 LED 灯对丝瓜幼苗生长的影响 [J]. *中国园艺文摘*, 2015(7): 10–12.
- GAO Yi, DONG Hao, LIU Houcheng. Effects of different LED lights on growth of luffa seedlings [J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2015(7): 10–12.
- [24] 马桂芹, 刘世琦, 刘颖颖, 钱胜艳, 陈亚霏, 刘星辰. 不同 LED 光源对青蒜苗生长及品质的影响 [J]. *山东农业科学*, 2015, 47(5): 31–33.
- MA Guiqin, LIU Shiqi, LIU Yingying, QIAN Shengyan, CHEN Yafei, LIU Xingchen. Effect of different LED light sources on growth and nutritional quality of garlic seedlings [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015, 47(5): 31–33.
- [25] 王虹, 姜玉萍, 师恺, 周艳虹, 喻景权. 光质对黄瓜叶片衰老与抗氧化酶系统的影响 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(3): 529–534.
- WANG Hong, JIANG Yuping, SHI Kai, ZHOU Yanhong, YU Jingquan. Effects of light quality on leaf senescence and activities of antioxidant enzymes in cucumber plants [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(3): 529–534.