果 树 学 报 2020，37(6)：838-847
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20200007

不同光质对‘秋红宝’葡萄试管苗生长的影响

杨忠义[1,2,3a]，郭雯岩[1,2,3a]，李戌彦[1,2,3]，董志刚[1,2,3]，乔治军[1,2,3,4*]，纪 薇[1,2,3*]

([1]山西农业大学园艺学院，山西太谷 030801；[2]农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室，太原 030031；[3]果树种质创制和利用山西省重点实验室，山西太谷 030801；[4]山西省农业科学院农作物品种资源研究所，太原 030031)

摘 要：【目的】探索不同光质对‘秋红宝’葡萄试管苗生长及生理特性的影响。【方法】以‘秋红宝’葡萄试管苗为试材，设置7种不同光质处理，观测试管苗的株高、茎粗、叶片叶绿素含量及抗氧化酶活性等生理生化指标，并结合主成分分析和灰色关联分析筛选出最优光质。【结果】单白光与单红光处理的株高显著高于其他处理；单蓝光处理的植株根数和最长根长均达到各处理最大值，且叶片叶绿素含量均显著高于其他处理；红蓝光质4∶1处理的叶片SOD活性显著高于其他处理；POD与CAT活性在红蓝光质5∶1中最高。综合灰色关联分析得出最适光质排序为：红蓝光质5∶1＞单蓝光＞单白光＞单红光＞红蓝白光质3∶1∶1＞红蓝光质4∶1＞红蓝光质3∶1。【结论】红蓝5∶1光质可作为促进‘秋红宝’葡萄试管苗生长的最理想光质；影响不同光质下试管苗生长的主要指标有总叶绿素、最长根长、株高、叶长、SOD。

关键词：‘秋红宝’葡萄；试管苗；红蓝光配比；抗氧化酶

中图分类号：S663.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-9980(2020)06-0838-10

Effect of light quality on the growth of *in vitro* seedling of ‘Qiuhongbao’ grape

YANG Zhongyi[1,2,3a], GUO Wenyan[1,2,3a], LI Xuyan[1,2,3], DONG Zhigang[1,2,3], QIAO Zhijun[1,2,3,4*], JI Wei[1,2,3*]

([1]College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China; [2]Key Laboratory of Crop Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture, Taiyuan 030031, Shanxi, China; [3]Key Laboratory of Fruit Tree Germplasm Creation and Utilization, Taigu 030801, Shanxi, China; [4]Institute of Crop Germplasm Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract:【Objective】Light is one of the environmental factors affecting tissue culture for propagation. Light quality plays an important role in the growth, physiology and metabolite accumulation in *in vitro* seedlings. LED polychromatic light can promote the proliferation of *in vitro* seedlings. At present, the research of light quality on grape growth focuses mostly on vines grown in greenhouse, but there is little research on its application in tissue culture. Therefore, this study explored the effect of light quality on the growth and physiological characteristics of ‘Qiuhongbao’ grape seedlings grown *in vitro*.【Methods】Seven different light quality treatments were set up in this experiment. They were white light (W), red light (R), blue light (B), and combinations of red, blue or white light with different ratios (R∶B=3∶1, R∶B=4∶1, R∶B=5∶1, and R∶B∶W=3∶1∶1). The young stems of ‘Qiuhongbao’ grape were collected from the Horticultural Station of Shanxi Agricultural University. Healthy young stem segments of ‘Qiuhongbao’ were collected in the morning before dew dried. They were washed with water for 2 h to remove dust, cut it into 5 cm stem segments as explant, and surface disinfected in an ultra clean workbench. The specific disinfection method was 75% alcohol immersion for 30 s, washing with sterile wa-

收稿日期：2020-01-14 接受日期：2020-03-18

基金项目：山西省高等学校青年科研人员培育计划(2019)；国家农作物种质资源共享服务平台山西农作物种质资源平台(NICGR-2019-26)；山西省科技厅重点研发项目(国际合作)(201703D421003)

作者简介：杨忠义，副教授，主要从事葡萄种质资源利用及创新研究。Tel：15503500136，E-mail：yang_zhongyi092@163.com。a为共同第一作者。郭雯岩，在读硕士研究生，主要从事葡萄栽培生理的研究。Tel：18404982787，E-mail：18404982787@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail：sxsnkypzs@126.com；E-mail：jiweiputao@163.com

ter for 2-3 times, 0.1% mercuric chloride immersion, and washing with sterile water for 5 times. The sterilized stem segments were cut into 2 cm single bud stem segments with both ends removed, and inoculated on MS+0.2 $mg \cdot L^{-1}$ IBA+1.0 $mg \cdot L^{-1}$ 6-BA+0.2 $mg \cdot L^{-1}$ NAA+30.0 $g \cdot L^{-1}$ sucrose + 7.0 $g \cdot L^{-1}$ agar (pH 5.8-6.0). The culture environment temperature was (25±1) ℃, and the photoperiod was 16/8 h (light/dark). 10 days after inoculation, the survival rate, pollution rate and browning rate under different treatments were recorded. In each treatment, 10 plantlets were randomly selected to measure seedling water content and their morphological indexes including plant height, stem diameter, leaf number, leaf length, leaf width, root number, maximum root length and internode length. Then the chlorophyll content (ethanol extraction method), soluble sugar content (anthrone method), soluble protein content (Coomassie brilliant blue method), malondialdehyde (MDA) content (thiobarbituric acid method), and activities of POD (guaiacol method), SOD (NBT photoreduction method) and CAT (H_2O_2 method) were measured.【Results】The survival rate in R∶B=5∶1 and W treatments was the highest and significantly higher than the other light treatments, while the pollution rate and browning rate were significantly lower than the other treatments. The plant height in R and W was significantly higher than that in the other treatments. Among different red and blue light ratios, seedling height showed a gradual upward trend with the increase in the proportion of red light. Under the treatment of R∶B=5∶1, the length and width of leaves were the largest. The number of roots and maximum root length of plants under B treatment was the highest, which indicated that single blue light had a strong influence on the rooting of *in vitro* seedlings of ‘Qiuhongbao’. The plant height, internode length, leaf number, leaf length, leaf width, root number and maximum root length were lowest under R∶B=4∶1. There was no significant difference in water content among treatments. Total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid contents were the highest in B treatment and significantly higher than in the other treatments. The total chlorophyll content of leaves under R∶B=5∶1 was significantly higher than that in the other treatments except for B. SOD activity in the leaves was the highest in the treatment of R∶B=4∶1 (100.89 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$) and significantly higher than the other treatments, and the second highest was found in the treatment of R∶B=5∶1. The POD activity of leaves was the highest (185.57 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$) under R∶B=5∶1, but not significantly different from that under B treatment. The highest CAT activity was 96.27 $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$, which was significantly higher than the other treatments. MDA content of the leaves under R∶B=3∶1 treatment was the largest (54.27 $U \cdot g^{-1}$), and it showed a significant decreasing trend with the increase in red light proportion. The physiological and biochemical data were standardized and analyzed by grey correlation, the order of suitability of light treatments for the growth of *in vitro* ‘Qiuhongbao’ plantlet was R∶B=5∶1＞B＞W＞R＞R∶B∶W=3∶1∶1＞R∶B=4∶1＞R∶B=3∶1.【Conclusion】R∶B=5∶1 can be used as the optimal light quality ratio to promote the growth of *in vitro* cultured seedling of ‘Qiuhongbao’ grape. Total chlorophyll content, maximum root length, plant height, leaf length, and SOD activity are the main indexes that are closely correlated with the growth of the *in vitro* seedlings of ‘Qiuhongbao’ under different light quality.

Key words: ‘Qiuhongbao’ grape; Test tube seedlings; Red and blue ratio; Antioxidant enzymes

中国是葡萄（*Vitis* spp.）生产大国，2018 年其产量约为 1 500 万 t[1]。我国葡萄生产以鲜食葡萄为主，葡萄苗木的标准化栽培生产是其产业发展的基础[2]。组织培养技术因其周期短、效率高、不受环境影响等优点，已广泛应用于葡萄育种及生产[3-4]。葡萄组培快繁体系的建立，对提高苗木繁育质量，加速葡萄商业化生产具有重要的实践意义。

光是植物生长发育必不可少的生态因子，影响着植物的生长发育和品质[5]。人工光环境是组培育苗的核心技术之一，能有效调控组培苗的物质合成、水分利用、养分运输等多种生理代谢途径[6]，其中，光质是光环境的重要组成部分。目前，人工光

环境以添加灯组为主，以荧光灯和LED灯为光源的灯组最为常见。与普通荧光灯相比，LED灯在组培苗的形态、生物量、壮苗指数、酶活性等方面具有明显优势[7]。不同LED光质能产生不同的光信号，影响着组培苗的生长发育[8]。与其他光质相比，红光和蓝光是自然光中有效光合辐射的重要组成部分，对植物生长的影响更为明显[5-9]，已有研究表明，蓝光可显著抑制水稻幼苗生长，提高其可溶性蛋白质含量，而红光则可显著提高其可溶性糖和淀粉含量[10]；红光可提高菊花的芽增殖率和平均芽长[11]；蓝光可以促进铁皮石斛生长得更加粗壮[12]；红光有利于提高生菜中可溶性糖含量的积累，蓝光具有抑制生菜叶面积增大并矮化植株的作用[13]。然而，单独使用红光或者蓝光并不能满足植物正常的生长发育，LED复色光对试管苗增殖具有促进作用[14]，在香蕉[15]、红叶石楠[16]、草莓[17]等多种植物组培苗中已有相关报道，表明植物对红光和蓝光的需求量因种类不同而存在一定的差异。目前，光质对葡萄生长的研究多集中于设施葡萄[18]，而针对组培育苗中的应用则鲜有研究。

笔者以‘秋红宝’葡萄试管苗为试材，设置7种不同光质，测定生长发育过程中相关形态及生理生化指标的差异，探讨不同光质与‘秋红宝’试管苗生长发育之间的关系，并利用主成分分析法对17个生理生化指标进行分析，结合灰色关联分析，以期筛选‘秋红宝’试管苗生长的理想光质，为其高效繁殖、规模化生产以及培育壮苗等提供理论参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验选取繁殖性状良好的‘秋红宝’葡萄幼嫩茎段，在无菌条件下，将其消毒后接种于MS＋0.2 mg·L^{-1} IBA＋1.0 mg·L^{-1} 6BA＋0.2 mg·L^{-1} NAA＋30.0 g·L^{-1}蔗糖＋7.0 g·L^{-1}琼脂的培养基(pH 5.8~6.0)上，置于山西农业大学园艺学院组织培养实验室培养，作为供试材料。试验所用‘秋红宝’葡萄幼嫩茎段采自山西农业大学园艺站(37°25′21″ N，112°34′45″ E，海拔803 m±4 m)。

1.2 试验设计

试验设置7种不同光质处理，调节光源与植株的距离，使光强保持一致。将供试材料置于不同光照系统中培养，每处理30瓶，每瓶接种3株，培养环境均为温度(25±1)℃，光周期16 h/8 h（光/暗）。

试验所用LED灯由深圳市恩达光电科技有限公司提供，灯体圆柱形，光照强度2 000 lx，具体光质条件参数见表1。

表1 LED光质处理设计

Table 1 LED light quality treatment design

处理 Treatment	光质 Light quality	光量比例 Light amount ratio
A	白 White	红(Red)∶蓝(Blue)∶绿(Green)=10∶7∶3
B	红 Red	100%
C	蓝 Blue	100%
D	红/蓝 Red/Blue	3∶1
E	红/蓝 Red/Blue	4∶1
F	红/蓝 Red/Blue	5∶1
G	红/蓝/白 Red/Blue/White	3∶1∶1

1.3 试验方法

各处理随机选择10株，于接种45 d后测定各处理试管苗的形态指标，包括株高、茎粗、叶片数、叶长、叶宽、根数、最长根长、节间长及整株含水量，用于指标测定的试管苗不进行继代培养。测量各形态指标时每处理需测定10个样品，其中叶长、叶宽例外，各测定5个，3次重复[19-20]。叶片叶绿素含量的测定采用无水乙醇提取法[21]，丙二醛（MDA）含量的测定采用硫代巴比妥酸法，过氧化物酶（POD）活性的测定采用愈创木酚法，超氧化物歧化酶（SOD）活性测定采用氮蓝四唑（NBT）光还原法，过氧化氢酶（CAT）活性测定采用H_2O_2法[22]。

1.4 数据处理与分析

利用Excel 2013（Microsoft，美国）和SPSS 21.0（IBM，美国）软件进行统计分析，数据以平均值±标准差计，进行显著性分析和主成分分析，并用GraphPad Prism 7软件（GraphPad Software，美国）制图。利用灰色关联分析评价最适‘秋红宝’葡萄试管苗生长的光质配比，计算各参试光质的关联系数、等权关联度，公式如下[23]：

$$关联系数：\varepsilon_i=\frac{\min\Delta_i(k)+\rho\max\Delta_i(k)}{\Delta_i(k)+\rho\max\Delta_i(k)}；\quad(1)$$

$$等权关联度：r_i=\frac{1}{n}\cdot\sum_{k=1}^{n}\varepsilon_i(k)。\quad(2)$$

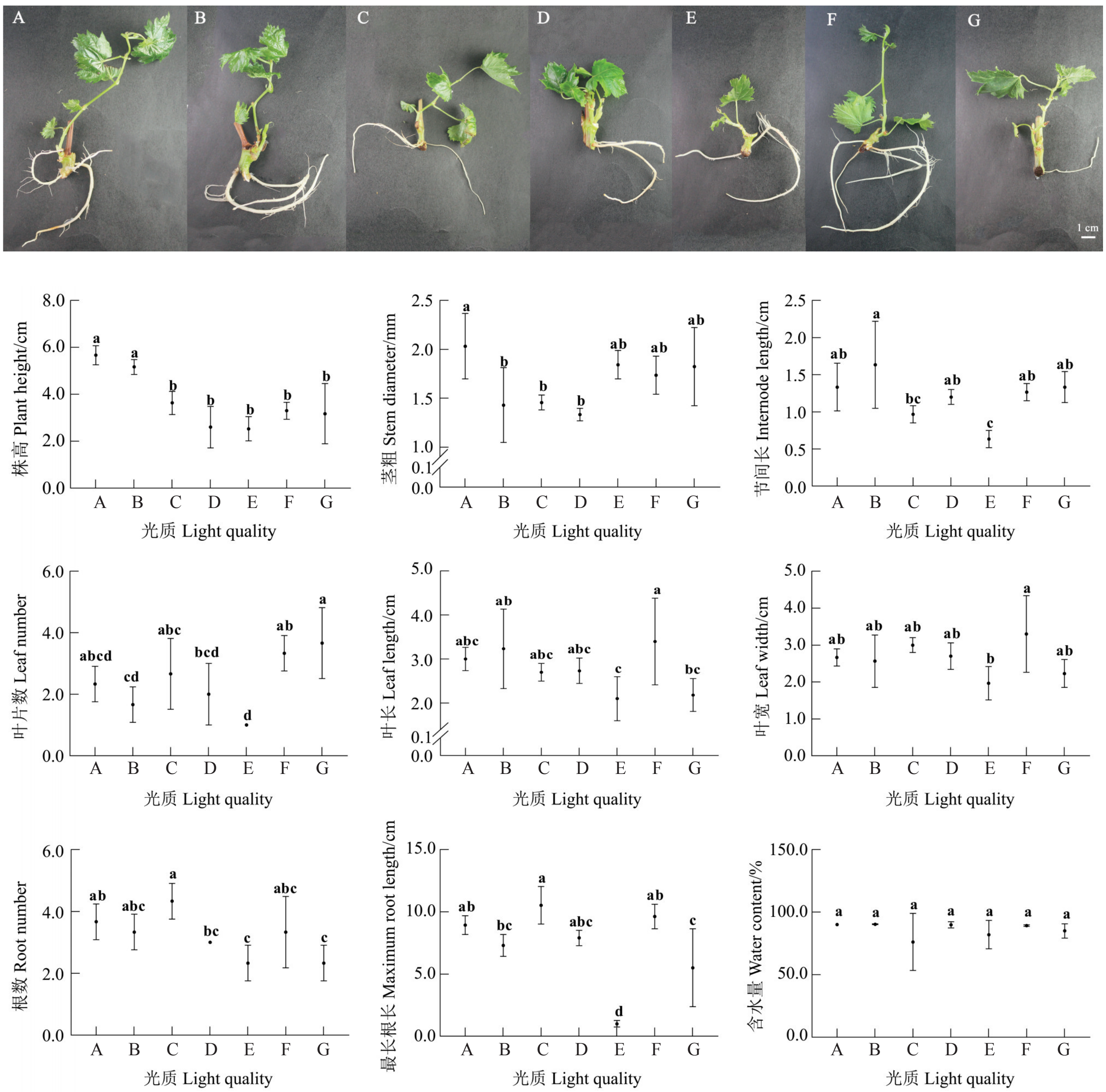
式中，$\Delta_i(k)=|X_0(k)-X_i(k)|$，为$X_0$数列与$X_i$数列在第$k$点的绝对值；$\min\Delta_i(k)$为二级最小差，$\max\Delta_i(k)$

是二级最大差，ρ 为分辨系数，通常取值 0.5，n 为参试光源数，k 为评估的性状数。

2　结果与分析

2.1　不同光质对‘秋红宝’试管苗生长阶段生物量的影响

由图 1 可知，单红光与单白光的‘秋红宝’株高显著高于其余处理，且单白光下株高最高，为 5.67 cm，红蓝配比光质中随着红光比例的加大，株高表现出逐渐上升的趋势。单白光下其茎粗也最大(2.03 mm)。单红光下植株的节间长最大，可达 1.63 cm。红蓝光质 5∶1 下叶片的叶长叶宽最大，分别可达 3.40 cm 与 3.30 cm，表明其叶面积最大。单蓝光下植株的根数和最长根长均达到各处理最大值，表明单蓝光对‘秋红宝’试管苗的生根具有较强的影响。红蓝光质 4∶1 下的‘秋红宝’株高、节间长、叶片数、叶长、叶宽、根数与最长根长均为各处理最低值。不同光质对‘秋红宝’整株的含水量无显著差异。在不同



处理 A、B、C、D、E、F、G 同表 1。不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Treatment A, B, C, D, E, F, G are same as Table 1. Different small letters indicate significant difference at $p < 0.05$. The same below.

图 1　不同光质下‘秋红宝’葡萄试管苗发育情况

Fig. 1　Development of *in vitro* seedling of ‘Qiuhongbao’ grape under different light treatments

红蓝配比光质下，随着红光比例的增大，植株的节间长、叶片数、叶长、叶宽、根数及最长根长均表现先下降后上升的趋势，表明一定比例的红光对提高植株的长势有促进作用。

2.2 不同光质对‘秋红宝’试管苗叶片叶绿素含量的影响

光合色素是植物叶片中进行光合作用的物质基础，对植株的生长发育有重要的影响。由表2可知，‘秋红宝’试管苗叶片的叶绿素含量对不同的光质呈现不同的响应。单蓝光下‘秋红宝’的总叶绿素含量、叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量均表现出最高值，且均显著高于其余处理。而红蓝光质3∶1下的叶片各叶绿素值则均表现最低值。红蓝光质5∶1下的叶片总叶绿素含量除低于单蓝光下的含量外，均显著高于其余处理。在不同红蓝配比光质下，随着红光比例的增大，叶片的总叶绿素、叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量均表现出显著上升的趋势，但单红光下叶片的叶绿素与单白光下的含量并无显著差异。可见不同的光质对‘秋红宝’试管苗光合色素的积累有不同的影响。

表2 不同光质对‘秋红宝’试管苗叶片叶绿素含量的影响

Table 2 Effect of different light quality on chlorophyll contents in ‘Qiuhongbao’ leaves

处理 Treatment	*w*(总叶绿素) Total chlorophyll content/(mg·g^{-1})	*w*(叶绿素a) Chlorophyll a content/(mg·g^{-1})	*w*(叶绿素b) Chlorophyll b content/(mg·g^{-1})	*w*(类胡萝卜素) Carotenoid content/(mg·g^{-1})
A	1.26±0.00 cd	0.92±0.00 cd	0.34±0.00 c	0.18±0.00 bc
B	0.98±0.18 d	0.66±0.31 de	0.31±0.12 c	0.12±0.15 c
C	3.12±0.00 a	2.28±0.00 a	0.83±0.00 a	0.43±0.00 a
D	0.54±0.00 e	0.40±0.00 e	0.14±0.00 d	0.09±0.00 c
E	1.63±0.00 c	1.19±0.00 c	0.44±0.00 c	0.24±0.00 b
F	2.26±0.00 b	1.67±0.00 b	0.59±0.00 b	0.30±0.00 b
G	0.86±0.56 de	0.69±0.43 de	0.17±0.14 d	0.19±0.08 bc

2.3 不同光质对‘秋红宝’试管苗生理生化指标的影响

由图2可知，‘秋红宝’试管苗叶片中SOD活性在红蓝光质4∶1处理下最高(100.89 U·g^{-1}·min^{-1})，显著高于其余各处理；其次为红蓝光质5∶1处理；再次为单红光与红蓝白复合光，但两者之间无显著差异；单蓝光叶片的SOD活性最小，为2.72 U·g^{-1}·min^{-1}，并显著低于其他处理。叶片的POD活性在红蓝光质5∶1处理下最高(185.57 U·g^{-1}·min^{-1})，与单蓝光下叶片活性无显著区别；其次为红蓝光质4∶1与3∶1，且两者之间差异显著；单白光与红蓝白复合光下叶片的POD活性最低，且两者之间无显著差异。红

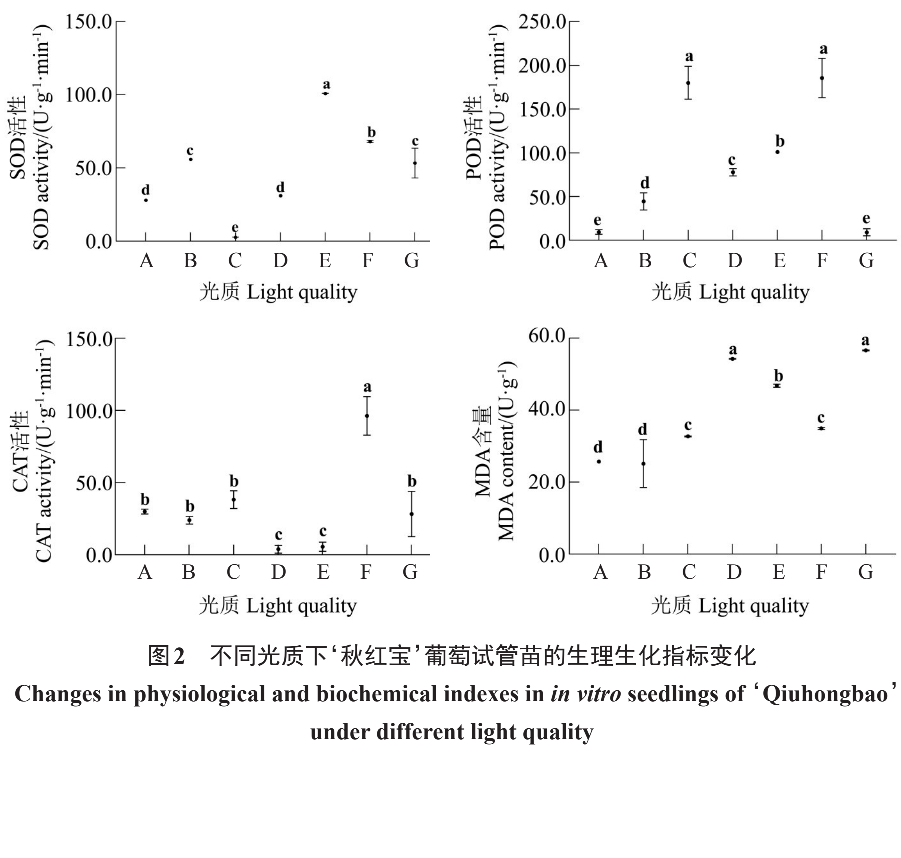


图2 不同光质下‘秋红宝’葡萄试管苗的生理生化指标变化

Fig. 2 Changes in physiological and biochemical indexes in *in vitro* seedlings of ‘Qiuhongbao’ grape under different light quality

蓝光质 5∶1 处理下植株的 CAT 活性最高，为 96.27 U·g^{-1}·min^{-1}，显著高于其余处理；而红蓝光质 4∶1 与 3∶1 两处理下的活性最低，且两者之间差异不显著。可见红蓝配比光质在总体上提高了‘秋红宝’试管苗生长过程中主要抗氧化酶活性，增强了其抗氧化胁迫能力。

‘秋红宝’试管苗叶片的 MDA 含量在不同的光质下表现出不一样的特征。在不同配比的红蓝光质下，红蓝光质 3∶1 处理下叶片的 MDA 含量最大(54.27 U·g^{-1})，且随着红光比例的增大，含量呈现明显下降的趋势，且在单红光下，其含量显著低于红蓝配比光质下的含量，而在红蓝白复合光下，叶片的 MDA 值则与红蓝光质 3∶1 处理下的叶片无显著差异。

2.4　不同生理生化指标主成分分析

通过对不同光质下‘秋红宝’试管苗的生理生化指标信息进行 PCA 分析，选取特征值最高的前 5 个主成分因子，累计贡献率为 84.68%(表 3)。第一主成分有总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、POD 活性、CAT 活性，其特征值为 6.09，累计方差贡献率为 35.82%；第 2 主成分主要有叶片数、叶宽、节间长、最长根长，其特征值为 3.24，累计贡献率为 19.06%；第 3 主成分主要有株高，其特征值为 2.03，贡献率为 11.97%；第 4 主成分主要有叶长，其特征值为 1.62，方差贡献率为 9.52%。第 5 主成分主要有 SOD 活性，其特征值为 1.41，方差贡献率为 8.31%。综合分析，前 5 个主成分，贡献率较大的总叶绿素、最长根长、株高、叶长、SOD 活性，是光质影响‘秋红宝’试管苗生长的主要影响指标。

表3　各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 3　Characteristic vector and contribution rate of principal components of each indicator

指标 Index	编号 Code	特征向量 Characteristic vector				
		主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3	主成分4 Principal component 4	主成分5 Principal component 5
株高 Plant height	k1	-0.10	-0.21	0.69	0.01	0.48
茎粗 Stem diameter	k2	0.53	0.39	-0.58	-0.04	0.16
叶片数 Leaf number	k3	0.07	0.70	0.56	-0.30	0.01
叶长 Leaf length	k4	0.24	0.12	-0.06	0.83	0.33
叶宽 Leaf width	k5	0.33	0.61	-0.56	-0.29	0.21
根数 Root number	k6	0.66	0.33	0.37	0.03	-0.32
最长根长 Maximum root length	k7	0.63	0.61	-0.17	0.33	-0.10
节间长 Internode length	k8	-0.10	0.66	0.41	0.27	0.15
含水量 Water content	k9	-0.37	0.34	-0.03	-0.28	0.31
叶绿素a Chlorophyll a	k10	0.91	-0.35	0.15	-0.04	-0.02
叶绿素b Chlorophyll b	k11	0.92	-0.26	0.01	-0.25	-0.03
总叶绿素 Total chlorophyll	k12	0.93	-0.33	0.12	-0.10	-0.01
类胡萝卜素 Carotenoid	k13	0.80	-0.42	0.28	0.10	-0.01
SOD	k14	-0.43	-0.47	-0.08	-0.35	0.57
POD	k15	0.77	-0.37	-0.28	-0.11	0.07
CAT	k16	0.66	0.11	0.01	0.16	0.66
MDA	k17	-0.52	-0.54	-0.24	0.51	-0.04
特征值 Eigen value		6.09	3.24	2.03	1.62	1.41
方差贡献率 Variance contribution rate/%		35.82	19.06	11.97	9.52	8.31
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%		35.82	54.88	66.85	76.37	84.68

2.5　不同光质灰色关联分析

对不同光质下‘秋红宝’试管苗生长阶段生理生化数据进行标准化处理后进行灰色关联分析。由表 4 排序可知，红蓝光质 5∶1 对‘秋红宝’试管苗生长的影响最大，可作为理想光质，其余依次是：单蓝光＞单白光＞单红光＞红蓝白光质 3∶1∶1＞红蓝光质 4∶1＞红蓝光质 3∶1。

3　讨　论

光对植物的生长发育、形态建成、物质代谢以

表4 各指标灰色关联分析

Table 4 Grey relational analysis of each indicator

编号 Code	光质 Light quality						
	A	B	C	D	E	F	G
k1	1.00	0.85	0.58	0.47	0.47	0.54	0.53
k2	1.00	0.62	0.63	0.59	0.84	0.77	0.82
k3	0.57	0.47	0.64	0.52	0.40	0.84	1.00
k4	0.81	0.91	0.70	0.71	0.56	1.00	0.58
k5	0.72	0.69	0.84	0.73	0.55	1.00	0.60
k6	0.76	0.68	1.00	0.61	0.51	0.68	0.51
k7	0.76	0.61	1.00	0.66	0.35	0.85	0.50
k8	0.73	1.00	0.54	0.65	0.44	0.68	0.73
k9	1.00	1.00	0.63	0.99	0.84	0.97	0.89
k10	0.45	0.41	1.00	0.37	0.50	0.64	0.41
k11	0.45	0.44	1.00	0.37	0.51	0.63	0.38
k12	0.45	0.41	1.00	0.37	0.50	0.64	0.40
k13	0.46	0.40	1.00	0.38	0.53	0.62	0.46
k14	0.40	0.52	0.33	0.41	1.00	0.60	0.51
k15	0.34	0.39	0.94	0.46	0.52	1.00	0.34
k16	0.41	0.39	0.45	0.34	0.34	1.00	0.41
k17	0.47	0.47	0.54	0.92	0.74	0.56	1.00
γ	1.54	1.47	1.83	1.36	1.37	1.86	1.44
排序 Order	3	4	2	7	6	1	5

注：k1~k17 代表指标详见表 3。γ代表关联度。

Note: Representational indicators of k1-k17 are detailed in Table 3. γ stands for correlation degree.

及基因表达均有调节作用[24]。本试验研究表明，单红光与单白光处理的‘秋红宝’试管苗株高显著高于其余处理，且单红光下植株的节间长最长，显著高于其余光质。这与前人对红叶石楠[25]、蓝莓[26]、菊花[27]等植物的研究结果一致，说明红光能够促进‘秋红宝’试管苗茎的伸长生长。但不同植物对于光质中红光所占比例多少要求并不相同。侯甲男等[28]的研究表明，随着红光比例的增加，铁皮石斛组培苗株高呈增加趋势。在本研究中，随着红光比例的加大，‘秋红宝’株高表现为逐渐伸长，与前人研究具有一致性，且红蓝光质 5∶1 处理下，‘秋红宝’试管苗的植株最高，表明红蓝光质 5∶1 对‘秋红宝’试管苗茎的伸长作用最大。单蓝光下植株的根数和最长根长均达到最大值，表明蓝光能促进‘秋红宝’试管苗根的生长。与学者在香蕉[29]组培苗上的研究一致。从本试验结果可知‘秋红宝’试管苗对不同光质有不同的响应，同时试验结果还得出红蓝光质 4∶1 下植株的株高、节间长、叶片数、叶长、叶宽、根数与最长根长均为各处理最低值，表明‘秋红宝’试管苗对不同的红蓝比光质的具体响应不同，红蓝光质 4∶1 下其生长效果较差。

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础，其含量高低与组成将会影响叶片的光合速率大小[30]。光是影响叶绿素合成的重要条件[7]。有研究表明，与红光相比，蓝光能显著促进叶绿体和类囊体的发育，同时能引起与叶绿素合成有关的基因表达上调，从而使色素合成增加[8,31]。前人已在菊花[32-33]、葡萄[34-35]等多种植物上进行研究，证明蓝光及红蓝组合光能促进组培苗叶绿素的合成。本试验中，单蓝光下‘秋红宝’试管苗叶片的总叶绿素含量、叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量均表现出最高值，且显著高于其余处理，与前人研究一致。王政等[36]在不同 LED 红蓝光质对红叶石楠试管苗生长的研究中得出，单色蓝光和红蓝复合光下光合色素含量较高，而在单红光处理下光合色素含量较低。本试验研究结果与其完全一致。同时任桂萍等[37]在蝴蝶兰组织培苗中的研究中得出，红光不利于叶片叶绿素的合成。本试验中同样发现，单红光下‘秋红宝’试管苗叶片的叶绿素含量与单白光下的含量并无显著差异，与其研究结果相同。且本试验设置不同红蓝配比光质，研究发现随着红光比例的增大，叶片的总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量均表现出显著上升的趋势，与陈光彩等[29]在香蕉组培苗上的研究一致，表明在红蓝配比组合中，红光比例的增大对叶绿素含量的积累有促进作用。

光作为一种调节因子，可激活植物体内的抗氧化防御系统，进而合成抗氧化物质，使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵抗逆境胁迫[38]。有研究表明[36,39-40]，红蓝光可显著提高红叶石楠试管苗叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性。余阳等[41]在葡萄上的研究也得出，红蓝复合光可提高叶片 SOD、POD、MDA 等的活性。本试验结果表明，‘秋红宝’试管苗叶片在红蓝组合光下活性最大，验证了前人的研究，可表明红蓝复合光处理对提高‘秋红宝’试管苗叶片的抗氧化能力有一定的促进作用。本试验针对具体红蓝光组合比例进行研究发现，‘秋红宝’试管苗叶片中 SOD 活性在红蓝光质 4∶1 处理下最高，而 POD、CAT 活性则在红蓝光质 5∶1 处理下达到最高值，表明不同的配比对‘秋红宝’试管苗抗氧化能力的影响程度不同。同时还发现，在不同配比的红蓝光质下，随着红光比例的增大，MDA 含量呈现明显

下降的趋势，分析原因可能与红光的比例多少有关，红光的增加可能会降低植株MDA含量的累积。

本试验通过主成分分析和灰色关联度分析对不同光质下‘秋红宝’试管苗的生理生化指标进行了研究，发现总叶绿素、最长根长、株高、叶长、SOD活性是影响‘秋红宝’试管苗在不同光质下生长的主要因子，且红蓝光质5∶1处理对‘秋红宝’试管苗生长发育的影响最大，最适合其生长，这一研究结果为今后葡萄离体培养的光调控措施提供了良好的理论依据和技术支撑。

参考文献 References：

[1] 焦晓博，纪薇 . 葡萄抗寒机制研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒，2019(5): 63-68.
JIAO Xiaobo, JI Wei. Progress in the mechanisms of cold tolerance in grape[J]. Sino-Overseas Grapevine and Wine, 2019(5): 63-68.

[2] 蔡文博，段虹，王军，朱元娣 . 4个鲜食葡萄品种组培快繁体系的建立[J]. 核农学报，2019，33(2): 248-254.
CAI Wenbo, DUAN Hong, WANG Jun, ZHU Yuandi. Establishment of *in vitro* rapid micropropagation of four table grape cultivars[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(2): 248-254.

[3] 冯文华，代红军 . ‘赤霞珠’葡萄组培快繁体系研究[J]. 北方园艺，2016(13): 104-106.
FENG Wenhua, DAI Hongjun. Study on tissue culture and rapid propagation system of ‘Cabernet Sauvignon’ grape[J]. Northern Horticulture, 2016(13): 104-106.

[4] 张培安，左倩倩，董天宇，葛孟清，贾海锋，樊秀彩，房经贵 . 茉莉酸甲酯对葡萄植株不定根发育的影响[J]. 园艺学报，2018，45(12): 2331-2346.
ZHANG Peian, ZUO Qianqian, DONG Tianyu, GE Mengqing, JIA Haifeng, FAN Xiucai, FANG Jinggui. Effects of MeJA on adventitious root development of grape plants[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(12): 2331-2346.

[5] 马宏，孟红志，李世军，李佳，李中勇，张学英，徐继忠 . 不同光质对‘春美’桃光合特性和果实品质的影响[J]. 果树学报，2017，34(7): 835-842.
MA Hong, MENG Hongzhi, LI Shijun, LI Jia, LI Zhongyong, ZHANG Xueying, XU Jizhong. Effects of light quality on photosynthetic characteristics and fruit quality of ‘Chunmei’ peach[J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(7): 835-842.

[6] MACEDO A F, LEAL-COSTA M V, TAVARES E S, LAGE C L S, ESQUIBEL M A. The effect of light quality on leaf production and development of *in vitro*-cultured plants of *Alternanthera brasiliana* Kuntze[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 70(1): 43-50.

[7] 李慧敏 . 不同LEDs复合光质对秋葵组培苗生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报，2016，36(5): 996-1003.
LI Huimin. Growth and physiological characteristics of *Abelmoschus esculentus* plantlets *in vitro* under different quality lights[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(5): 996-1003.

[8] 刘伟超，王政，何松林，孟新亚，宋盈龙，袁晓绘 . 不同红蓝光质比对大花萱草组培苗增殖及生根的影响[J]. 西北林学院学报，2019，34(2): 134-139.
LIU Weichao, WANG Zheng, HE Songlin, MENG Xinya, SONG Yinlong, YUAN Xiaohui. Effects of different red and blue light quality rations on multiplication and rooting of *Hemerocallis middendorfii* plantlets *in vitro*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(2): 134-139.

[9] 王海波，王帅，王孝娣，史祥宾，王宝亮，郑晓翠，王志强，刘凤之 . 光质对设施葡萄叶片衰老与内源激素含量的影响[J]. 应用生态学报，2017，28(11): 3535-3543.
WANG Haibo, WANG Shuai, WANG Xiaodi, SHI Xiangbin, WANG Baoliang, ZHENG Xiaocui, WANG Zhiqiang, LIU Fengzhi. Effect of light quality on leaf senescence and endogenous hormones content in grapevine under protected cultivation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3535-3543.

[10] 郭银生，谷艾素，崔瑾 . 光质对水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 应用生态学报，2011，22(6): 1485-1492.
GUO Yinsheng, GU Aisu, CUI Jin. Effects of light quality on rice seedlings growth and physiological characteristics[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(6): 1485-1492.

[11] DIERCK R, DHOOGHE E, VAN HUYLENBROECK J, VAN DER STRAETEN D, DE KEYSER E. Light quality regulates plant architecture in different genotypes of *Chrysanthemum morifolium* Ramat[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 218: 177-186.

[12] 高亭亭，斯金平，朱玉球，黄华宏 . 光质与种质对铁皮石斛种苗生长和有效成分的影响[J]. 中国中药杂志，2012，37(2): 198-201.
GAO Tingting, SI Jinping, ZHU Yuqiu, HUANG Huahong. Effects of light quality and germplasm on growth and effective ingredients of *Dendrobium officinale* germchit[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2012, 37(2): 198-201.

[13] 陈文昊，徐志刚，刘晓英，杨杨，王志敏，宋非非 . LED光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J]. 西北植物学报，2011，31(7): 1434-1440.
CHEN Wenhao, XU Zhigang, LIU Xiaoying, YANG Yang, WANG Zhimin, SONG Feifei. Effect of LED light source on the growth and quality of different lettuce varieties[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(7): 1434-1440.

[14] 赵根，潘月，杨钰，陈丽萍，韩明丽 . LED光源在设施园艺生产中的应用与前景[J]. 浙江农业科学，2013(9): 1110-1112.
ZHAO Gen, PAN Yue, YANG Yu, CHEN Liping, HAN Mingli.

Application and prospect of LED light source in protected horticultural production[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2013(9): 1110-1112.

[15] NHUT D T, TAKAMURA T, WATANABE H, TANAKA M. Efficiency of a novel culture system by using light-emitting diode (LED) on in vitro and subsequent growth of micropropagated banana plantlets[J]. Acta Horticulturae, 2003, 616: 121-127.

[16] 王政，刘伟超，何松林，贺丹，尚文倩，宋盈龙 . LED 红蓝光质比对红叶石楠试管苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2018，46(10): 49-56.
WANG Zheng, LIU Weichao, HE Songlin, HE Dan, SHANG Wenqian, SONG Yinlong. Effect of different light quality ratios of LED red/blue light on growth and antioxidant enzyme activities of *Photinia fraseri* plantlets *in vitro*[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2018, 46(10): 49-56.

[17] 吴鹏飞，王丽娟，刘昭，切岩祥和 . LED 不同光质对草莓组织培养的影响[J]. 湖北农业科学，2017，56(10): 1895-1897.
WU Pengfei, WANG Lijuan, LIU Zhao, QIE Yanxianghe. Effects of different light quality of LED on tissue culture of *Fragaria ananassa*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56 (10): 1895-1897.

[18] 王海波，王帅，王孝娣，史祥宾，王志强，刘凤之 . 葡萄叶片衰老过程中不同光质对其光合和叶绿体超微结构的影响[J]. 园艺学报，2019，46(2): 205-214.
WANG Haibo, WANG Shuai, WANG Xiaodi, SHI Xiangbin, WANG Zhiqiang, LIU Fengzhi. Effect of different light qualities on the photosynthetic properties and ultrastructure of chloroplast in senescing grape leaves[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2019, 46 (2): 205-214.

[19] 刘振威，孙丽，方婷婷，刘会超，贾文庆 . 不同光质及组合对番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 华北农学报，2015，30(5): 141-145.
LIU Zhenwei, SUN Li, FANG Tingting, LIU Huichao, JIA Wenqing. Effects of different light qualities on growth and physiological characteristics of tomato seedlings[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(5): 141-145.

[20] 杨晓芬，张京伟，张金政，孙纪霞，张英杰，刘述河，宫子惠，初美静，刘学庆 . LED 光源对玉簪组培苗增殖生长及光合特性的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版)，2018，36(6): 50-54.
YANG Xiaofen, ZHANG Jingwei, ZHANG Jinzheng, SUN Jixia, ZHANG Yingjie, LIU Shuhe, GONG Zihui, CHU Meijing, LIU Xueqing. Effect of LED light on *Hosta plantaginea* seedling propagation and photosynthetic characteristics *in vitro*[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), 2018, 36(6): 50-54.

[21] 高虹，宋喜娥，姚满生，余凯凯，郭美俊，高贞攀，冯雷，王斌强，郭平毅，原向阳 . 不同施肥量对马铃薯产量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版)，2015，35(1): 416-420.
GAO Hong, SONG Xi'e, YAO Mansheng, YU Kaikai, GUO Meijun, GAO Zhenpan, FENG Lei, WANG Binqiang, GUO Pingyi, YUAN Xiangyang. Effects of different fertilizer application on potato yield[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 35(1): 416-420.

[22] 张良英，牛歆雨，刘林 . UV-B 增强下 6-BA、GA_3 对油桃光合和抗氧化酶活性的影响[J]. 果树学报，2012，29(5): 820-824.
ZHANG Liangying, NIU Xinyu, LIU Lin. Effects of 6-BA and GA_3 on photosynthesis and antioxidase activity of nectarine under enhanced UV-B radiation[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(5): 820-824.

[23] 纪薇，郭荣荣，王静波，焦晓博，闫钊，昌秦湘，董志刚，王跃进 . 无核葡萄胚败育生理生化因子灰色关联分析[J]. 园艺学报，2019，46(8): 1473-1485.
JI Wei, GUO Rongrong, WANG Jingbo, JIAO Xiaobo, YAN Zhao, CHANG Qinxiang, DONG Zhigang, WANG Yuejin. Grey correlation analysis of physiological and biochemical factors in embryo abortion of seedless grape[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2019, 46(8): 1473-1485.

[24] GUPTA S D, SAHOO T K. Light emitting diode (LED)-induced alteration of oxidative events during *in vitro* shoot organogenesis of *Curculi goorchioides* Gaertn[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(11): 233.

[25] 尚文倩，王政，侯甲男，郑卫杰，何松林 . 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.
SHANG Wenqian, WANG Zheng, HOU Jianan, ZHENG Weijie, HE Songlin. Effects of light emitting diode (LED) with different red/blue quality ratios on the growth of *Dendrobium officinale* plantlets *in vitro*[J]. Journal of Northwest A and F University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 155-159.

[26] HUNG C D, HONG C H, KIM S K, LEE K H, PARK J Y, NAM M W, CHOI D H, LEE H I. LED light for *in vitro* and *ex vitro* efficient growth of economically important highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(6):152.

[27] KIM S J, HAHN E J, HEO J W, PAEK K Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro*[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 101(1/2): 0-151.

[28] 侯甲男，王政，尚文倩，何松林，杨博 . CCFL 光源不同光质比对铁皮石斛原球茎增殖及试管苗生长的影响[J]. 河南农业科学，2013，42(1): 86-89.
HOU Jianan, WANG Zheng, SHANG Wenqian, HE Songlin, YANG Bo. Effects of different light quality ratios of CCFL on multiplication of *Dendrobium officinale* PLB and growth of plantlets *in vitro*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(1): 86-89.

[29] 陈光彩，潘彤彤，毛琪，叶春海，陈瑶，李映志 . LED 红、蓝光源对香蕉组培苗生长的影响[J]. 中国南方果树，2019，48(2): 59-

66.
CHEN Guangcai, PAN Tongtong, MAO Qi, YE Chunmei, CHEN Yao, LI Yingzhi. Effects of blue and red light source of Light Emitting Diode (LED) on growth of plantlets of Musa AAA Cavendish *in vitro*[J]. South China Fruits, 2019, 48(2): 59-66.

[30] 吴雪霞，尚静，张圣美，朱宗文，张爱冬，查丁石 . 不同光周期对丝瓜幼苗生长生理及其内源激素含量和性别分化的影响[J]. 西北植物学报，2019，39(10): 1812-1818.
WU Xuexia, SHANG Jing, ZHANG Shengmei, ZHU Zongwen, ZHANG Aidong, CHA Dingshi. Effect different photoperiod on plant growth, contents of endogenous hormones hormones and floral sex differentiation of luffacylindricain seedlings stage[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(10): 1812-1818.

[31] LI C X, XU Z G, DONG R Q, CHANG S X, WANG L Z, KHALIL-UR-REHMAN M, TAO J M. An RNA-Seq analysis of grape plantlets grown *in vitro* reveals different responses to blue, green, red LED light, and white fluorescent light[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 78.

[32] 王政，张丹丹，刘艳楠，尚文倩，贺丹，何松林 . 不同光源处理对非洲菊组培苗生长的影响[J]. 河南农业科学，2016，45(7): 96-100.
WANG Zheng, ZHANG Dandan, LIU Yannan, SHANG Wenqian, HE Dan, HE Songlin. Effects of different light sources on the growth of *Gerbera jamesonii* plantlets *in vitro*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(7): 96-100.

[33] 邸秀茹，焦学磊，崔瑾，刘晓英，孔燕，徐志刚 . 新型光源 LED 辐射的不同光质配比光对菊花组培苗生长的影响[J]. 植物生理学通讯，2008(4): 661-664.
DI Xiuru, JIAO Xuelei, CUI Jin, LIU Xiaoying, KONG Yan, XU Zhigang. Effects of different light quality ratios of LED on growth of *Chrysanthemum* plantlets *in vitro*[J]. Plant Physiology Communications, 2008(4):661-664.

[34] POUDEL P R, KATAOKA I, MOCHIOKA R. Effect of red-and blue- light- emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2008, 92(2): 147-153.

[35] 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.

[36] 王政，马杰，何松林，贺丹，尚文倩，王慧霞 . LED 光源不同比例光质对红叶石楠组培苗生长的影响[J]. 江苏农业科学，2019，47(7): 152-155.
WANG Zheng, MA Jie, HE Songlin, HE Dan, SHANG Wenqian, WANG Huiwen. Effects of different light proportions of LED light sources on growth of tissue culture seedlings of *Photinia*×*fraseri*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(7): 152-155.

[37] 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.
REN Guiping, WANG Xiaojing, ZHU Genfa. Effect of LED in different light qualities on growth of *Phalaenopsis* plantlets[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2016, 51(1): 81-88.

[38] 樊小雪，杨亚娜，徐刚 . 不同光质处理对樱桃番茄生长发育和叶绿素荧光的影响[J]. 福建农业学报，2019，34(9): 1026-1031.
FAN Xiaoxue, YANG Yana, XU Gang. Effects of different light quality treatments on growth and chlorophyll fluorescence of cherry tomato[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(9): 1026-1031.

[39] 周鹏，张敏，吴双竹，黄婧 . LED 光质对乌饭树组培苗茎段增殖和生根的影响[J]. 植物研究，2018，38(5): 697-703.
ZHOU Peng, ZHANG Min, WU Shuangzhu, HUANG Jing. Effect of different LEDs light qualities on *Vaccinium bracteatum* stem multiplication and rooting [J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(5): 697-703.

[40] 张克坤，刘凤之，王孝娣，史祥宾，王宝亮，郑晓翠，冀晓昊，王海波 . 不同光质补光对促早栽培‘瑞都香玉’葡萄果实品质的影响[J]. 应用生态学报，2017，28(1): 115-126.
ZHANG Kekun, LIU Fengzhi, WANG Xiaodi, SHI Xiangbin, WANG Baoliang, ZHENG Xiaocui, JI Xiaohao, WANG Haibo. Effects of supplementary light with different wavelengths on fruit quality of ‘Ruidu Xiangyu’ grape under promoted cultivation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 115-126.

[41] 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.