

光质对沙氏 茸草组培苗生 生理和玻璃化转变的影响

罗桂生 刘素贞 李峰卿* 邹玉玲 罗家萱 曾满生 黄维

(中国林业科学研究院亚热带林业实验中心 江西分宜 336600)

摘 要:【目的】沙氏鹿茸草在组培过程中存在玻璃化、生长不良等现象,试验旨在探究光质在沙氏鹿茸草组织培养中是否有壮苗和缓解玻璃化作用,以为鹿茸草的规模化生产提供理论基础。【方法】本研究以 2 个沙氏鹿茸草优良无性系为材料,比较纯蓝光、纯红光、红蓝 1:1、红蓝 1:3 以及红蓝 3:1 和对照荧光间组培苗生长、生理生化的差异。【结果】(1) 纯红光显著促进 JXFY1 的苗高和干重,与对照相比,纯红光处理下,分别增加了 16%和 14%,纯红光、红蓝 1:1、红蓝 1:3 显著提高了 POD 活性和 SOD 活性,与对照相比,分别提高了 99.8%、74.5%、47.3%和 89.5%、157.3%和 95.6%;纯红光和纯蓝光显著提高了可溶性糖和可溶性蛋白的含量,与对照相比,分别提高了 102.6%、33.7%和 42.4%、41.4%,并且纯红光还显著提高了其类胡萝卜素的含量。(2) 纯蓝光、纯红光、红蓝 1:1、红蓝 1:3 和红蓝 3:1 处理均显著降低了 ZJLS13 的玻璃化率,与对照相比,玻璃化率分别降低了 64%、87.9%、45.5%、69.7%和 60.6%;纯红光处理下的 POD 活性和 SOD 活性均显著高于对照,与对照相比,分别提高了 20.9%和 46.7%;纯蓝光和纯红光下的可溶性糖含量和可溶性蛋白含量均显著高于对照,与对照相比,分别提高了 31.7%、26.3%和 62.5%、66.3%;对照下的叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素 (a+b) 均显著低于纯红光处理。(3) 利用隶属函数法进行综合评价,纯红光处理在 JXFY1 和 ZJLS13 组培苗中综合评分最高。【结论】光质对 JXFY1 和 ZJLS13 组培苗的生长和生理均有显著影响,应选择纯红光促进 JXFY1 无性系组培苗生长并降低 ZJLS13 组培苗的玻璃化率。

关 词: 沙氏鹿茸草; LED 光质; 生长生理; 玻璃化

The effect of light quality on the growth physiology and vitrification transition of tissue cultured seedlings of *Monochasma salvatieri* Franch. ex Maxim

Gui-Sheng Luo Su-Zhen Liu Feng-Qing Li Yu-Ling Zou Jia-Xuan Luo Man-Sheng Zeng Wei Huang

Abstract:【Objective】There are phenomena such as vitrification and poor growth in the tissue culture process of *Monochasma salvatieri*. The experiment aims to explore whether light quality has a strong seedling and alleviates vitrification effect in *Monochasma salvatieri* tissue culture, in order to provide a theoretical basis for the large-scale production of *Monochasma salvatieri*.【Method】This study used two superior clones of *Monochasma salvatieri* as materials to compare the differences in tissue culture seedling growth, physiological and biochemical characteristics between pure blue light, pure red light, red blue 1:1, red blue 1:3, and red blue 3:1 with control fluorescence.【Result】(1) Pure red light significantly promoted the seedling height and dry weight of JXFY1. Compared with the control, pure red light treatment increased by 16% and 14%, respectively. Pure red light, red blue 1:1, and red blue 1:3 significantly increased POD and SOD activities. Compared with the control, pure red light treatment increased by 99.8%, 74.5%, 47.3%, 89.5%, 157.3%, and 95.6%, respectively; Pure red light and pure blue light significantly

基金项目: 中国林科院基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2022MB005); 新余市科技计划项目 (余科发 (2023) 32 号
作者简介: 罗桂生 (1995-), 男, 工程师。主要从事组培及林下经济研究, Email:469139476@qq.com
*通讯作者: 李峰卿, 女, 高级工程师。主要从事组培及林下经济研究, Email:lfqnjfu@163.com

increased the content of soluble sugars and soluble proteins, with increases of 102.6%, 33.7%, 42.4%, and 41.4% compared to the control, respectively. Pure red light also significantly increased the content of carotenoids. (2) Pure blue light, pure red light, red blue 1:1, red blue 1:3, and red blue 3:1 treatments all significantly reduced the glass transition rate of ZJLS13. Compared with the control, the glass transition rate decreased by 64%, 87.9%, 45.5%, 69.7%, and 60.6%, respectively; The POD activity and SOD activity under pure red light treatment were significantly higher than the control, with an increase of 20.9% and 46.7%, respectively, compared to the control; The soluble sugar content and soluble protein content under pure blue and pure red light were significantly higher than the control, with an increase of 31.7%, 26.3%, and 62.5%, 66.3%, respectively, compared to the control; The chlorophyll a, chlorophyll b, and chlorophyll (a+b) under control were significantly lower than those under pure red light treatment. (3) Using the membership function method for comprehensive evaluation, pure red light treatment had the highest comprehensive score in JXFY1 and ZJLS13 tissue cultured seedlings. 【Conclusion】 Light quality has a significant impact on the growth and physiology of JXFY1 and ZJLS13 tissue cultured seedlings. Pure red light should be chosen to promote the growth of JXFY1 asexual tissue cultured seedlings and reduce the vitrification rate of ZJLS13 tissue cultured seedlings.

Key words: *Monochasma salvatieri* Franch; *ex Maxim*; LED light quality; growth physiology; vitrification.

植物组织培养是将植物组织、细胞等部分在体外培养,从而获得再生植株的过程,目前已成为植物快速繁殖的重要手段,广泛应用于各种重要经济植物的无性繁殖,包括兰花、葡萄、草莓、西伯利亚人参等(郭春东等, 2024)。在植物组培过程中,外植体来源、培养基种类、植物生长调节剂、光/暗处理和光质处理等都会对植物的再生产生影响(Long et al., 2022),不适宜的因素会导致组培苗出现生长不良和玻璃化等问题。研究表明,光质在组织培养过程中对植物生长发育、形态建成和生理代谢过程起着重要的作用(Arena et al., 2016),其中,红光主要控制叶绿体、茎、叶柄生长和生殖系统功能,而蓝光主要调节植物生长、叶片扩展、光形态建成、气孔开放、光合作用和色素积累(Naznin et al., 2019),红蓝光还能在一定程度上缓解和降低组培苗的玻璃化程度(Muneer et al., 2017)。由于光质在植物组织培养中的重要作用,国内已应用于大部分经济植物的组培过程,如大花萱草(刘伟超等, 2019)、非洲菊(孙翊等, 2017)和杉木(唐银等, 2022)等,这些研究表明,红蓝光不仅仅能提高组培苗的增殖能力,还能促进其根系生长,并提高体内生长素的含量。而国外主要从光质对植物中植物化学积累的影响来探究(Chung et al., 2020; Braidot et al., 2014; Kopsell et al., 2014),例如,在不同光质下生长的组培苗发现初级次生代谢产物、淀粉、简单糖、蛋白质、维生素 C 和酚类化合物(包括花青素)的积累增加(Reis et al., 2015; Darko et al., 2014)。因此,通过控制调控不同的光质,在一定程度上能促进组培苗的生长发育、形态建成,甚至缓解玻璃化现象,然而光质配比通常由发光二极管 LED 来实现,在植物组织培养环境中,与普通荧光灯相比,其具有光质可调、波长设置方便、体积小、发热少、易于组合控制等优势,不仅能够调控植物的生长发育和形态建成、提高组培苗的产量和品质,而且还能降低能耗、节约成本,目前,已被广泛应用于许多植物的组织培养(Do Nascimento Vieira et al., 2015)。

沙氏鹿茸草为玄参科鹿茸草属多年生草本植物,其干燥全草具有凉血止血、清热解毒的功效,市场前景巨大,但是,当前沙氏鹿茸草野生资源存在急剧减少的现象(Chen et al., 2020),这极大的限制了鹿茸草的临床运用。为解决这种困境,有效的开发和保护鹿茸草资源,本研究团队在前期已突破其组织培养技术(唐艳等, 2022)并对鹿茸草进行了规模化育苗,然而,在鹿茸草组培育苗过程中发现,保存 2 个沙氏鹿茸草优良无性系 JXFY1 和 ZJLS13 分别存在生长弱和玻璃化严重等问题。因此为了解决上述问题,本实验在前期组培技术的基础上,以保存 2 个沙氏鹿茸草优良无性系为研究对象,研究 LED 光源不同光质在缓解生长弱和玻璃化等问题上是否具有积极作用,旨在探究促进鹿茸草组培苗生长发育的最佳光质,解决当前组培过程中存在的困境,以期生产中降低能耗提高组培苗的品质,进一步为工厂化育

苗专用光源的研发提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试 材料

以本课题选育并保存的 2 个沙氏鹿茸草优良无性系为材料（分别编号为 JXFY1 和 ZJLS13），其中 JXFY1 取自江西分宜，组培过程中存在生长弱等现象，ZJLS13 取自浙江丽水，组培过程中存在玻璃化严重等现象，两者组培苗在无菌的条件下，接种于 MS+5.8g/L 琼脂+30g/L 蔗糖+BA0.5-1.0+GA0.2-0.4 的增殖培养基上，在普通荧光灯（光照强度 $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ）、温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ，光照时间 12h/d 条件下进行培养，培养 20d 后，随机选取生长状况及规格一致（株高约 1.5 cm）的组培苗作为供试材料。

1.2 试 设计

以 LED 红光 R（主波长 640nm）和蓝光 B（主波长 464nm）为光源，设置蓝光比红光为 1/0、1/3、1/1、3/1、0/1，分别简称为 1B0R，1B3R，1B1R，3B1R，0B1R，5 种处理组，并以普通荧光灯 W 作为对照。转接后的组培苗在普通荧光灯下预培养 7 d 后随机分成 6 组，每组 24 瓶，每瓶接种 6 株芽苗，分别置于不同光质（含对照）的培养架中，培养 45d 后测定生长、生理指标，荧光白灯下，调节电流及光源与植株的距离，使光强保持一致，不同层间用 2cm 厚纸壳隔离，其他条件同普通增殖培养（光照强度 $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ，光照时间 12h/d）。

1.3 指标测定及方法

1.3.1 形态指标 从鹿茸草组培苗进行试验处理后，第 45d 取样进行株高、茎间距、鲜重和干重的测定，并进行增殖系数和玻璃化系数的计算，株高测定从植株基部开始到最长叶片的长度，茎间距为相邻两对叶片的距离，两者均用直尺进行测量。每个处理分别取 6 瓶组培苗，用精度为 0.1 mg 的电子天平测定植物的鲜重，并将称得植株置于 105°C 烘箱中杀青 15 min-20 min，于 80°C 烘干至恒重后，用电子天平测量干重。增殖系数的计算：增殖系数为测定每瓶组培苗中 6 个茎段萌芽的数量（6 个重复），增殖系数=新芽总数/接种茎段数。玻璃化率的计算：玻璃化率=玻璃化株数/总的株数。

1.3.2 生理指标测定 参照李合生的方法测定以下指标（李合生，2012），叶绿素和类胡萝卜素、可溶性糖、可溶性蛋白含量分别采用分光光度计法，蒽酮比色法和考马斯亮蓝法；超氧化物歧化酶活性（SOD）测定依据该酶抑制氮蓝四唑的光下还原作用来确定酶活性的大小，用愈创木酚法测定过氧化物酶活性（POD）。

1.4 数据分析

数据采用 SPSS22.0 进行统计分析，先进行正态分布和方差齐性检验（Normal distribution and homogeneity of variance test），然后做单因素方差分析（One way ANOVA）。不同光质处理的均值在 5% 的显著性水平下做 Duncan 多重比较，生长和生理相关性采用 Person 分析，并用 Origin2021 进行作图。

采用隶属函数法综合各项生长生理指标进行评价(李凤等，2010)，隶属函数值计算公式为：

如果某一指标与组培苗生长呈正相关，则公式为：

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) ,$$

$i=1, 2, 3, \dots, n$ ；如果某一指标与组培苗生长呈负相关，则公式为：

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) ,$$

$i=1, 2, 3, \dots, n$ 。式中： $U(X_i)$ 为性状指标的隶属函数值， X_i 为指标测定值， $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 为不同

光质处理下某一性状指标的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 不同光质对 2 个沙氏 茸草优良无性系组培苗生 的影响

不同光质对 2 个无性系组培苗均有显著的影响（表 1、2），JXFY1 组培苗在对照下株高和茎间距分别为 7.99cm 和 0.80cm，显著低于纯红光处理，与对照相比，纯红光处理下，分别增加了 16%和 14%；干重在对照下最低，显著低于其他处理，与对照相比，纯蓝光下和纯红光下分别提高了 143%和 100%。在 ZJLS13 组培苗中，对照下的玻璃化率最高，为 91.7%，显著高于其他处理，与对照相比，纯蓝光、纯红光、红蓝 1： 1、红蓝 1： 3、红蓝 3： 1 处理下的玻璃化率分别降低了 64%、87.9%、45.5%、69.7%和 60.6%；对照下的增殖系数为 20.22，显著低于纯蓝光处理下，与对照相比，纯蓝光处理下增加了 29.8%。

表 1 不同光质对 JXFY1 组培苗生 指标的影响

Tab. 1 The effect of different light qualities on the growth indicators of JXFY1 tissue cultured seedlings						
处理	苗高	茎间距	鲜重	干重	玻璃化率	增殖系数
Treat	Height/cm	Stem spacing/cm	Fresh weight/g	dry weight/g	Vitrification rate/%	multiplication factor
T1	7.99±0.83b	0.80±0.04b	0.68±0.09a	0.07±0.006d	0.000a	19.34±0.92a
T2	6.72±0.52d	0.58±0.06c	0.87±0.18a	0.17±0.007a	0.028a	19.36±1.38a
T3	9.32±0.92a	0.91±0.12a	0.63±0.17a	0.14±0.004b	0.000a	17.07±1.09a
T4	6.89±0.62cd	0.79±0.09b	0.77±0.17a	0.11±0.004c	0.110a	15.86±1.33a
T5	7.51±0.72bcd	0.62±0.07c	0.70±0.11a	0.11±0.011c	0.000a	19.90±0.95a
T6	7.80±0.89bc	0.72±0.05b	0.79±0.16a	0.12±0.030c	0.028a	18.13±0.87a

注：T1、T2、T3、T4、T5、T6 分别代表荧光对照、纯蓝光、纯红光、红蓝 1： 1、红蓝 1： 3、红蓝 3： 1。同列数据后不同小写字母表示处理之间差异显著(P <0.05)。下同。

Note: T1, T2, T3, T4, T5, and T6 represent fluorescence control, pure blue light, pure red light, red blue 1:1, red blue 1:3, and red blue 3:1, respectively. Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference between treatments(P<0.05). the same below.

表 2 不同光质对 ZJLS13 组培苗生长指标的影响

Tab. 2 Effects of Different Light Quality on Growth Indicators of ZJLS13 Tissue Culture Seedlings						
处理	苗高	茎间距	鲜重	干重	玻璃化率	增殖系数
Treat	Height/cm	Stem spacing/cm	Fresh weight/g	dry weight/g	Vitrification rate/%	multiplication factor
T1	8.18±1.17abc	1.11±0.29a	1.067±0.22bc	0.175±0.04a	0.917a	20.22±1.13b
T2	9.22±1.32a	0.85±0.17b	1.45±0.36ab	0.213±0.04a	0.333bc	26.25±1.95a
T3	9.63±0.33a	1.15±0.25a	0.96±0.43c	0.215±0.02a	0.111d	18.08±0.94b
T4	7.45±1.54bc	0.93±0.06ab	1.21±0.14bc	0.176±0.02a	0.500b	16.41±1.78b
T5	8.83±0.91ab	0.85±0.15b	1.14±0.28bc	0.20±0.03a	0.278bc	19.44±1.45b
T6	6.93±1.56c	1.05±0.08ab	1.66±0.29a	0.20±0.03a	0.361bc	15.72±2.02b

2.2 不同光质对 2 个沙氏 茸草优良无性系组培苗光合色素的影响

光质对 2 个优良无性系组培苗光合色素均有显著的影响（图 1），在 JXFY1 组培苗中，对照下的叶绿素 a 含量显著高于红蓝 1： 3、红蓝 3： 1 处理，与纯蓝光、纯红光、红蓝 1： 1 处理间并无显著差异，而叶绿素 b 的含量显著低于红蓝 1： 3、红蓝 3： 1 两种处理，并显著高于纯蓝光处理下；对照下的类胡萝卜素含量显著低于纯红光、红蓝 1： 1、红蓝 1： 3 处理下。在 ZJLS13 组培苗中，对照下的叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素（a+b）均显著低于纯红光处理，并显著高于纯蓝光处理，类胡萝卜素之间均无显著差异。

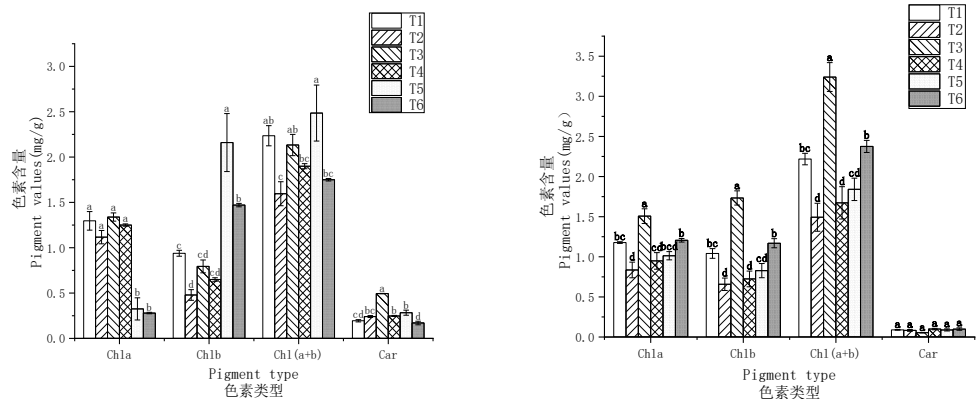


图 1 不同光质下 JXFY1（左）和 ZJLS13（右）组培苗光合色素含

Fig. 1 Photosynthetic pigment content of JXFY1 (left) and ZJLS13 (right) tissue cultured seedlings under different light qualities

Chla、Chlb、Chl(a+b)、Car 分别代表叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 (a+b) 和类胡萝卜素；

Chla, Chlb, Chl (a+b), Car represent chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll (a+b), and carotenoids, respectively

2.3 不同光质对 2 个沙氏 蕁草优良无性系组培苗抗氧化酶活性的影响

不同光质对 2 个优良无性系组培苗 POD 和 SOD 活性的均有显著的影响（图 2），在 JXFY1 组培苗中，对照下的 POD 和 SOD 活性均低于其他光质处理，并且 POD 的活性显著低于纯蓝光、纯红光、红蓝 1：1、红蓝 1：3 和红蓝 3：1 处理，与对照相比，纯蓝光、纯红光、红蓝 1：1、红蓝 1：3 和红蓝 3：1 处理下 POD 的活性分别提高了 71.3%、99.8%、74.5%、47.3%和 45.7%，而 SOD 活性则显著低于纯红光、红蓝 1：1 和红蓝 1：3 处理，与对照相比，纯红光、红蓝 1：1 和红蓝 1：3 处理下 SOD 活性分别提高了 89.5%、157.3%和 95.6%。在 ZJLS13 组培苗中，对照下的 POD 活性显著高于纯蓝光、红蓝 1：1、红蓝 1：3 和红蓝 3：1 处理，却显著低于纯红光处理，与对照相比，纯红光下的 POD 活性提高了 20.9%，其对照下的 SOD 活性显著高于纯蓝光处理，却显著低于纯红光和红蓝 3：1 处理，与对照相比，纯红光和红蓝 3：1 处理下的 SOD 活性分别提高了 46.7%和 52.2%，红蓝 1：1、红蓝 1：3 与对照间的 POD 活性并没有显著差异。

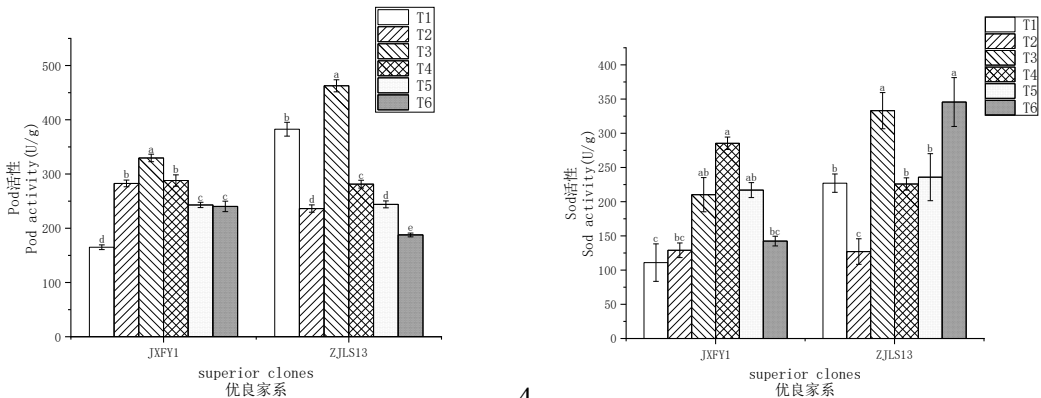


图 2 不同光质下 JXFY1 和 ZJLS13 组培苗 pod（左）和 sod（右）活性

Fig. 2 POD (left) and SOD (right) contents in JXFY1 and ZJLS13 tissue cultured seedlings under different light qualities

2.4 不同光质对 2 个沙氏 蕁草优良无性系组培苗碳氮代谢的影响

不同光质对 2 个优良无性系组培苗可溶性糖和可溶性蛋白的含量均有显著的影响（图 3），在 JXFY1

组育苗中，对照的可溶性糖含量显著低于纯红光和纯蓝光处理，与对照相比，纯红光和纯蓝光处理下可溶性糖含量分别提高了 102.6%和 33.7%，而与红蓝 1：1、红蓝 1：3 和红蓝 3：1 处理间并没有显著差异；对照下的可溶性蛋白含量显著低于纯蓝光、纯红光、红蓝 1：1、红蓝 1：3 和红蓝 3：1 处理，与对照相比，纯蓝光、纯红光、红蓝 1：1、红蓝 1：3 和红蓝 3：1 处理下的可溶性蛋白含量分别提高了 42.4%、41.4%、88.5%、66.8%和 38.5%。在 ZJLS13 组育苗中，对照下的可溶性糖含量显著低于纯蓝光和纯红光处理，与红蓝 1：1 和红蓝 3：1 处理间没有显著差异，却显著高于红蓝 1：3 处理，与对照相比，纯蓝光和纯红光处理下的可溶性糖含量分别提高了 31.7%和 26.3%； 对照下的可溶性蛋白含量均显著低于纯蓝光、纯红光、红蓝 1：1、红蓝 1：3 和红蓝 3：1 处理，与对照相比，纯蓝光和纯红光处理下的可溶性蛋白含量分别提高了 62.5%和 66.3%。

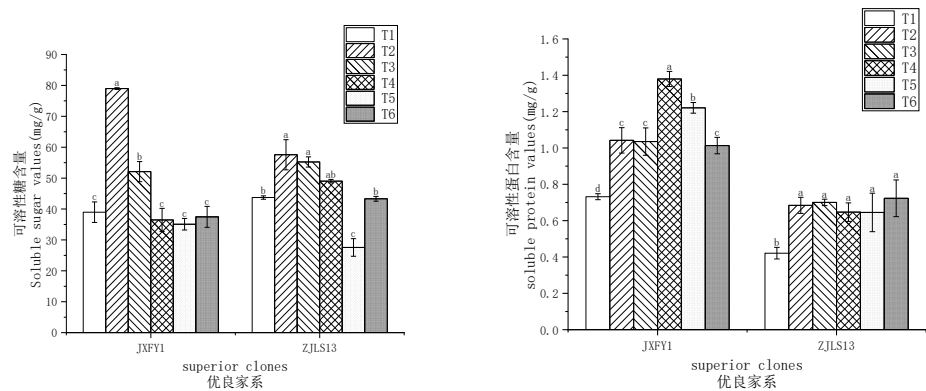


图 3 不同光质下 JXFY1 和 ZJLS13 组育苗可溶性糖（左）和蛋白（右）含
Fig. 3 Soluble sugar (left) and protein (right) content of JXFY1 and ZJLS13 tissue cultured seedlings under different light qualities

2.5 不同光质对 JXFY1 和 ZJLS13 组育苗生 理综合质 的分析

使用隶属函数分析法，采用苗高/非玻璃化率、POD 活性、SOD 活性、可溶性糖和可溶性蛋白 5 个指标对 6 个光质处理的 JXFY1 和 ZJLS13 组育苗生长生理进行综合评价，结果表明（表 3、表 4），JXFY1 组育苗在纯红光处理下综合评分最高，评分顺序为纯红光>红蓝 1：1>纯蓝光>红蓝 1：3>红蓝 3：1>白光；ZJLS13 组育苗也在纯红光处理下综合评分最高，评分顺序为纯红光>红蓝 3：1>纯蓝光>红蓝 1：1>红蓝 1：3>白光。综上所述，相对对照白光来说，5 种光质均能起到一定的促进苗木生长和生理的效果，但纯红光效果最显著， 纯红光不仅仅能促进 JXFY1 组育苗的生长，而且还能降低 ZJLS13 组育苗的玻璃化率，进而从总体达到壮苗的效果。

表 3 不同光质处理对 JXFY1 组育苗的综合质 评价

Tab. 3 Comprehensive quality evaluation of JXFY1 tissue cultured seedlings under different light quality treatments

处理	苗高	POD 活性	SOD 活性	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	平均值	排名
Treat	Height/cm	POD activity	SOD activity	Soluble sugar content	Soluble protein content	average value	ranking
T1	0.488	0	0	0.089	0	0.115	6
T2	0	0.715	0.103	1	0.479	0.459	3
T3	1	1	0.569	0.388	0.468	0.685	1
T4	0.065	0.747	1	0.032	1	0.569	2
T5	0.304	0.474	0.608	0	0.755	0.428	4
T6	0.415	0.457	0.181	0.054	0.434	0.308	5

表 4 不同光质处理对 ZJLS13 组培苗的综合质 评价

Tab. 3 Comprehensive quality evaluation of ZJLS13 tissue cultured seedlings under different light quality treatments

处理	玻璃化率	POD 活性	SOD 活性	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	平均值	排名
Treat	Vitrification	POD activity	SOD activity	Soluble sugar co	Soluble protein	average value	ranki
	rate/%			ntent	content		ng
T1	0	0.709	0.457	0.539	0	0.341	6
T2	0.725	0.177	0	1	0.872	0.555	3
T3	1	1	0.942	0.922	0.925	0.958	1
T4	0.517	0.341	0.452	0.715	0.748	0.554	4
T5	0.793	0.205	0.498	0	0.742	0.448	5
T6	0.690	0	1	0.525	1	0.643	2

3 讨论

植物组织培养是将植物的细胞、组织、器官或者整个植株放在人工控制的培养基中进行无菌培养的技术 (Garcia-Gonzales et al., 2010), 该技术弥补了传统繁殖方法的局限性, 在当代生物技术中占据十分重要的位置, 并广泛用于各种经济作物, 然而, 在组织培养过程中会受外植体来源、培养基种类、植物生长调节剂、光质处理等因素的影响, 不适的因素均会导致组培苗生长弱小和玻璃化等问题。其中光质对于植物的生长和生理有重要的调节作用, 是影响植物生长和形态建成的关键因子 (任毛飞等, 2023), 一般来说, 红光能促进植物的高生长, 而蓝光则起到抑制作用 (Paradiso and Proietti, 2022), 在本研究中也发现, 红光明显促进了 JXFY1 组培苗的高生长, 这与一些物种的研究结果相似, 如烟草(张艳艳,2012), 但也有研究表明, LED 红蓝复合光比单色光最能促进组培苗高的生长 (谢苗苗等, 2018), 这可能与不同物种对光质的反应的特异性有关 (Bantis et al., 2018), 也与其光照强度有关 (Johnson et al., 2020), 分析还发现干重在对照下最低, 显著低于其他处理, 与对照相比, 纯蓝光下和纯红光下分别提高了 143%和 100%, 其他的光照处理也有相应的提高, 这说明加入红蓝光质能够一定程度上提高组培苗的生长状况, 以纯红光效果最佳。

光质不仅能影响植株的光形态建成, 同时也调控光合色素的合成和积累 ((Bercel and Kranzet., 2022)。光合色素能够吸收、传递和转换光能, 是植物进行光合作用的物质基础, 其含量与组成直接影响叶片的光合速率, 本研究结果表明, 在 JXFY1 组培苗中, 对照下的类胡萝卜素含量显著低于纯红光、红蓝 1: 1、红蓝 1: 3 处理下, 其中纯红光下的类胡萝卜素含量最高, 研究表明, 类胡萝卜在植物抵抗外界逆境中起到了重要的作用, 可防止细胞膜的氧化 (陆晨飞等, 2022), 而在沙氏鹿茸草组培之后, 还需进行炼苗并进行容器苗培育, 在此过程中, 鹿茸草采用的是瓶外生根方法, 因此前期的成活率与植物叶绿素和类胡萝卜素的含量有密切的关系, 纯红光能够提高类胡萝卜素的含量, 进而可能提高容器苗的成活率。分析还发现, 光质对色素合成的影响也与物种本身的特异性有关, 如在本研究中, 蓝光显著降低了叶绿素的含量, 这与史宏志等人的研究结果相同 (史宏志等, 1999), 其研究表明蓝光处理使烟草的叶绿素含量下降, 但在对西南杨 (陈智华等, 2024) 的研究却发现, 蓝光对叶片色素的合成有促进作用。即使在同一物种不同品种下, 其对光质的响应也有差异, 如在金线莲中研究发现, 不同品种的金线莲对光质的响应表现出较大的差异 (李杰等, 2017)。

生理生化指标是反映植株状态的重要参数, 往往是解释生长指标发生变化的依据 (林魁等, 2017), 研

研究表明, SOD、POD 活性的高低可以反应植物受伤害的程度(张如义等, 2020), 而光合作用过程中光能利用不足会导致植物体内氧化活性物质积累。本研究发现, 与对照相比, 纯红光、红蓝 1: 1、红蓝 1: 3 处理下 JXFY1 组培苗 POD 活性和 SOD 活性得到了显著的提高, 这说明这 3 种光质处理可以有效提高组培苗的抗氧化能力, 从而在某种程度上提高后续容器苗的成活率。光质还能调控可溶性糖和可溶性蛋白的含量, 可溶性糖能增强植物的抗逆性(Zhao, 2023), 而可溶性蛋白可以提升植物的光合能力(朱光冕等, 2019), 二者含量在一定程度上可以反映植物整体的生长状况和发育水平(Hanson and Zhao, 2022), 光质的调控作用在不同的物种表现出明显的差异, 如红、蓝光能显著提高红花檵木的可溶性糖含量(郭佩瑶等, 2022), 却对樱桃萝卜没有显著的效果(陈冰星等, 2020), 本研究中发现, 纯红光和纯蓝光处理下可溶性糖和可溶性蛋白均得到了显著的提高, 这反映出纯红光和纯蓝光两种光质下组培苗的整体的生长状况和发育水平相对较好。综上所述, 对于生长较弱的 JXFY1 组培苗, 纯红光处理能达到明显的壮苗效果。

玻璃化是指植物生长过程中出现的类似水浸状的半透明化生理病变现象, 常见于植物组织培养(赵青平等, 2022)。玻璃化程度的诱导会影响健康组培苗的整体质量, 导致健康组培苗的减少, 这极大的限制了组培苗的产业化, 然而, 在研究中发现, 组培苗的玻璃化在不同因素的诱导下可以恢复到正常状态, 如改变培养条件(林文云等, 2023), 添加外源物(张换换等, 2021)、添加多胺(Sreelekshmi and Siril, 2020)以及光质处理(Zarate-Salazar et al., 2020)等方法, 这些方法均能达到一定的效果。通过对比各种处理发现, 光质处理是最容易实现的一种方式, LED 可能方便快捷的控制不同的光质配比, 并且相对荧光灯来说, 可以减少能耗, 因此本研究尝试用 LED 光质处理来缓解 ZJLS13 组培苗的玻璃化, 分析发现, ZJLS13 组培苗在荧光灯的照射下玻璃化率达到 91.7%, 纯蓝光、纯红光、红蓝 1: 1、红蓝 1: 3、红蓝 3: 1 处理均能显著降低组培苗的玻璃化率, 其中以红光的效果最好, 共降低了 87.9%, 这与 Muneer 等人(2020)研究结果相似, 其研究结果表明, 红光和蓝光 LED 降低了香石竹茎的玻璃化程度, 另外 Zárate-Salazar 等人(2020)在研究中也发现, 红光和蓝光 1: 1 的处理下, *Lippia grata* 叶片的玻璃化程度降低了 61%, 进一步分析发现, 纯红光处理下, 不仅仅降低了 ZJLS13 组培苗的玻璃化率, 还显著提高了其叶绿素浓度、POD 和 SOD 活性、可溶性糖和可溶性蛋白的含量以及可溶性糖和可溶性蛋白的含量, 这与林文云研究结果相似, 其研究表明, 广藿香组培苗玻璃化的逆转能提高 SOD、CAT 的酶活性(林文云等, 2023)。这意味着纯红光在降低 ZJLS13 组培苗的玻璃化率的同时还提高了组培苗的光合能力以及抗逆性, 从而达到了缓解玻璃化并壮苗的效果。

4 结论

本研究通过探究光质在沙氏鹿茸草组培苗壮苗和缓解玻璃化中的作用, 发现对于生长弱的 JXFY1 组培苗, 5 种红蓝光质处理均有一定的效果, 其中以纯红光效果最佳, 纯红光能够提高组培苗的株高、干重, 类胡萝卜素以、POD 和 SOD 活性, 可溶性糖和可溶性蛋白的含量, 进而达到壮苗的效果; 对于玻璃化严重的 ZJLS13 组培苗, 纯红光也是最佳的光质处理, 其能够最大程度的降低其玻璃化的概率, 并提高叶绿素含量、POD 和 SOD 活性以及可溶性糖和可溶性蛋白的含量, 进而达到缓解其玻璃化的作用。