

光质对二倍体与四倍体红掌幼苗生长与生理特性的影响

王紫莹^{1,2}, 张永平^{2*}, 乔永旭², 张卫华¹, 何金秀^{1,2}, 张佳怡^{1,2}, 高丽红³

1. 天津农学院园艺园林学院, 天津 300384; 2. 宿迁学院生物与材料工程学院, 江苏宿迁 223800; 3. 中国农业大学园艺学院, 北京 100193

摘要: 为筛选适宜红掌幼苗生长的光质, 以红掌粉冠军二倍体 ($2n=2\times=30$) 与四倍体 ($2n=4\times=60$) 幼苗为试材, 利用具有不同比例的红光 (R) 与蓝光 (B) 的 LED 灯为光源, 以荧光日光灯为对照 (CK), 设置 7 种光质: CK、R、B、R5 : B5、R6 : B4、R7 : B3、R8 : B2, 研究不同光质对红掌幼苗生长, 叶片可溶性糖 (SS)、可溶性蛋白 (SP)、过氧化氢 (H_2O_2) 和丙二醛 (MDA) 含量, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 及过氧化物酶 (POD) 活性的影响。结果表明: 与对照相比, R 降低了 2 种幼苗叶宽、叶面积、生物量、 H_2O_2 含量, 增加了 2 种幼苗叶片 POD 活性及二倍体幼苗 CAT 活性与 MDA 含量; B 显著降低四倍体幼苗生物量、SS 与 H_2O_2 含量, 增加了二倍体与四倍体幼苗叶片 CAT、POD 活性及二倍体的 SOD 活性; 红光与蓝光复合光质具有缓解 R 或 B 引起的生长降低或 MDA 增加的特性, 红蓝复合光质增加了 2 种幼苗叶片数量、叶面积、叶宽、根长、生物量、SP 含量、SOD 与 CAT 活性, 随着红光比例增加, 生物量与保护酶活性均呈现先上升后下降的趋势, 并在 R7 : B3 处理下达到最大值, 而 H_2O_2 与 MDA 含量则呈现相反趋势。总之, 适宜比例的红蓝复合光质可促进红掌幼苗的形态建成和生物量积累, 增强其抗氧化能力; 经隶属函数综合评价, R7 : B3 在 7 种光质中表现最优, 可作为红掌幼苗生长的适宜光质。

关键词: 红掌; 光质; 二倍体; 四倍体; 红光; 蓝光

中图分类号: S682.14

文献标志码: A

Impact of Light Quality on the Growth and Physiological Characteristics of Diploid and Tetraploid *Anthurium andraeanum* Seedlings

WANG Ziyi^{1,2}, ZHANG Yongping^{2*}, QIAO Yongxu², ZHANG Weihua¹, HE Jinxiu^{1,2}, ZHANG Jiayi^{1,2}, GAO Lihong³

1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. College of Biological and Materials Engineering, Suqian University, Suqian, Jiangsu 223800, China; 3. College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Diploid ($2n$) and tetraploid ($4n$) seedlings were used in this study to access the optimal light quality for the growth of *Anthurium andraeanum* Pink Champion seedlings. Different LED light configurations with varying ratios of red light (R) and blue light (B) served as the light source, while fluorescent daylight lamps were used as the control (CK). Seven types of light qualities were set up: CK, R, B, R5 : B5, R6 : B4, R7 : B3, and R8 : B2. The study evaluated how different light qualities affected the growth of *A. andraeanum* seedlings, as well as the contents of soluble sugar (SS), soluble protein (SP), hydrogen peroxide (H_2O_2), and malondialdehyde (MDA) in the leaves. Additionally, the activity of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD) was measured. The results indicated that, compared with the control, red light (R) reduced leaf width, leaf area, and biomass of the two types of seedlings, and increased the POD activity in both seedlings, also the CAT activity and MDA content in the $2n$ seedlings. Blue light

收稿日期 2025-02-04; 接受日期 2025-03-17

基金项目 宿迁英才“雄鹰计划”引进人才项目 (宿人才[2022]8 号); 宿迁学院人才引进科研启动基金项目 (校 2022XQT004, 校 2022XRC095)。

作者简介 王紫莹 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 红掌生理生化。*通信作者 (Corresponding author): 张永平 (ZHANG Yongping), E-mail: zh-yongping@163.com。

(B) significantly decreased the biomass, SS, and H_2O_2 content of the 4n seedlings, and increased the CAT and POD activity in both 2n and 4n seedlings, and the SOD activity in the leaves of the 2n seedlings. The combination of red and blue light qualities had the ability to mitigate the growth reduction or MDA increase caused by the individual light types. The combined red and blue light treatment increased the number of leaves, leaf area, leaf width, root length, biomass, SP content, and SOD and CAT activity in both types of seedlings. As the proportion of red light increased, biomass and protective enzyme activity initially rose and then declined, peaking under the R7 : B3 treatment. Conversely, H_2O_2 and MDA content exhibited an inverse trend. In conclusion, the appropriate ratio of combined red and blue light significantly promotes the morphogenesis and biomass accumulation of *A. andraeanum* seedlings, and enhances the antioxidant capacity. After a comprehensive evaluation using membership functions, R7 : B3 was determined to be the most effective among the seven light qualities, making it the optimal choice for the growth of *A. andraeanum* seedlings.

Keywords: *Anthurium andraeanum*; light quality; diploid; tetraploid; red light; blue light

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.08.013

红掌 (*Anthurium andraeanum*) 是天南星科花烛属多年生草本热带花卉, 观叶观花俱佳, 是世界著名的切花和盆栽花卉之一, 具有广阔的市场前景^[1]。然而, 中国大部分地区冬季气温较低, 尤其是北方地区, 红掌种植必须在加温温室等设施内进行, 这在很大程度上增加了红掌的生产成本。有报道表明一些多倍体红掌不仅具有较高的观赏价值, 在抗逆性方面也有较好的表现。如四倍体红掌的花梗长度缩短增粗, 支撑能力变强^[2]; 本课题组也发现四倍体红掌叶片厚度与佛焰苞直径显著增加, 单个花序的观赏期延长, 且苞片颜色更加鲜艳^[3]; 在低温胁迫下冷害指数、可溶性糖、可溶性蛋白及抗氧化酶活性等生理指标变化幅度较二倍体更小, 表现出更强的抗逆性^[4]。同时, 四倍体红掌的基因组加倍为遗传变异和基因编辑提供了更广阔的空间, 在杂交育种中表现出更强的生长势和更高的产量, 能够产生无种子的三倍体后代, 因而有助于培育具有优良性状的新品种^[3]。

光质对植物的形态建成、生长发育、光合生理和代谢生理等多个方面均有影响^[5]。发光二极管 (LED) 作为一种新型人工光源, 在园艺设施领域前景越来越广阔, 在农业中将起重要的作用。红掌生产中主要靠组织培养无性繁殖来规模化生产种苗, 通过优化光照培养条件, 对于提高种苗生长速度和质量, 具有潜在的应用价值。有研究表明, 采用适宜光照强度的 LED 光质配比处理能够显著提高红掌种苗的生长速度和质量^[1, 6-7]。学者们对红掌二倍体组织培养过程中的生长条件与表现进行了较为深入的研究^[5, 8], 但不同光质对不同倍性红掌幼苗生长的相关研究较少。因此, 本

研究以红掌粉冠军四倍体 ($2n=4\times=60$) 和二倍体 ($2n=2\times=30$) 幼苗为材料, 研究 LED 不同光质对比对红掌幼苗生长的影响, 以期建立一套适合红掌幼苗的 LED 光调控技术体系。

1 材料与方法

1.1 材料

红掌粉冠军二倍体 ($2n=2\times=30$) 和四倍体 ($2n=4\times=60$) 组培苗由宿迁学院植物细胞工程实验室培养及鉴定^[9]。选取生长条件一致, 株龄 60 d 的幼苗作为供试材料。设置荧光日光灯 (CK)、100% 红光 (R)、100% 蓝光 (B)、50%R+50%B (R5 : B5)、60%R+40%B (R6 : B4)、70%R+30%B (R7 : B3)、80%R+20%B (R8 : B2) 7 种不同光质处理, 光质由本课题组设计, 中国深圳鑫与光照明有限公司用 LED 灯带定制, 7 种光质处理的相对光谱分布如图 1 所示。培养条件: 洗净植株根部, 移栽于盛有草炭 : 蛭石 : 珍珠岩体积比 = 3 : 1 : 1 的混合基质的花盆中 (底径/口径/高: 7 cm/9 cm/8 cm)。置于自制的植物培养架 (层数/层高/层长/层宽: 5/40 cm/1200 cm/600 cm) 上培养, LED 灯安装在植物培养架层间顶部, 植物冠层光强为 $80 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光周期为 12 h/d, 温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。培养期间为 60 d, 每 3 d 浇 1 次水, 每 7 d 用 1 : 2000 的花多多 2 号营养液灌溉 1 次, 每个处理重复 3 次, 每个重复 20 株。

1.2 方法

1.2.1 形态指标测定与统计分析 所测形态指标包括株高、叶数、叶面积、叶宽、根数、最大根长、生物量。根长测量从根的附着基部到从植株收获的最长根的根尖。叶面积、叶宽和根数使用

根系扫描进行测量。测量生物量时，将材料在烘箱中 105 ℃下杀青 30 m，然后在 60 ℃下干燥至恒重。

1.2.2 生理指标测定与统计分析 随机选取各处理的幼苗中上部叶片（3~5 片）进行相关生理指标测定。可溶性糖（SS）与可溶性蛋白（SP）含量分别采用蒽酮法^[10]与考马斯亮蓝染色法测定^[11]；丙二醛（MDA）含量、超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）与过氧化物酶（POD）活性均使用南京建成试剂公司试剂盒检测；过氧化氢

（H₂O₂）含量使用索莱宝科技有限公司试剂盒检测。各指标每处理均重复 3 次。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 软件处理数据和绘制图表；采用 SPSS 27.0 软件进行数据分析；采用隶属函数分析得出最优处理。隶属函数值计算公式：正相关指标 $R_i=(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ ，负相关指标 $R_i=1-(X_i-X_{min})/(X_{max}-X_{min})$ ； X_i 为某一处理指标测定值， X_{max} 为该指标测定值中的最大值； X_{min} 为该指标测定值中的最小值。

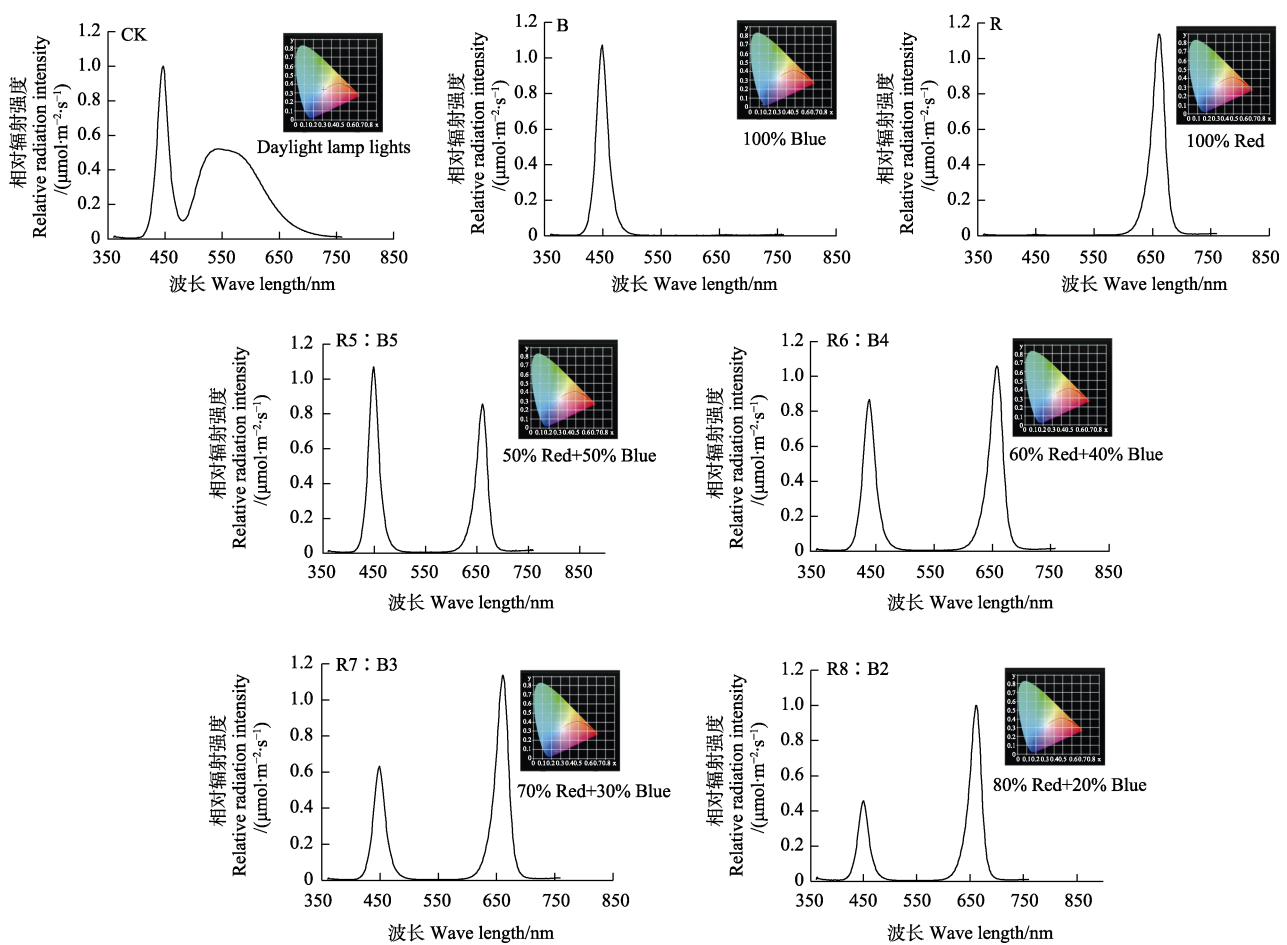


图 1 各处理的相对光谱分布
Fig. 1 Relative spectral distribution of each treatment

2 结果与分析

2.1 不同光质处理对红掌幼苗生长的影响

（1）不同光质处理对粉冠军二倍体和四倍体幼苗形态指标的影响。由表 1 可知，在对照处理下，四倍体的叶片面积、叶片宽度、生根数、根宽均高于二倍体，株高低于二倍体，叶片数量和根长与二倍体差异不大。与对照处理相比，R、B

处理均降低了粉冠军二倍体与四倍体幼苗的叶片宽度与叶片面积，而对叶片数量与根数未产生明显影响。但红光与蓝光复合光质处理却可在一定程度上缓解 R、B 处理引起的降低趋势。并且，随着红光与蓝光复合光质处理中红光比例的增加，粉冠军二倍体与四倍体幼苗的叶片数量、叶面积、叶片宽度和根长均呈现先上升后下降的

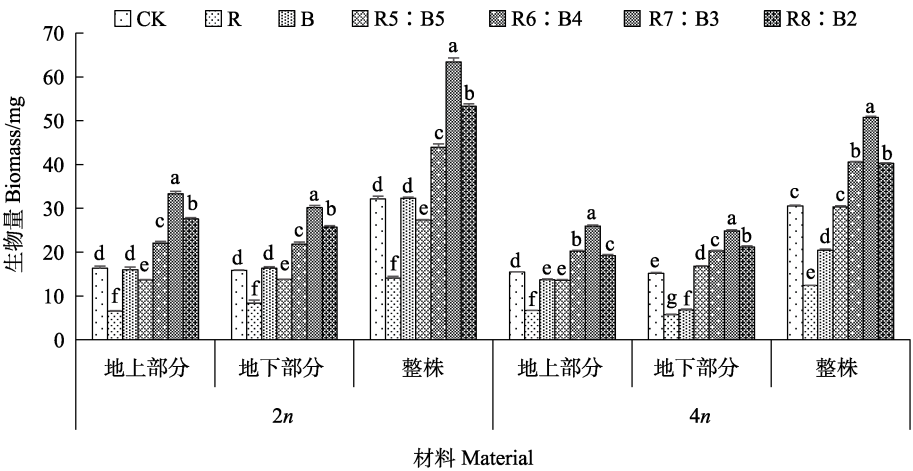
表 1 不同光质处理对红掌二倍体和四倍体幼苗形态指标的影响
Tab. 1 Influence of different light qualities on the morphology of 2*n* and 4*n* seedlings of *A. andraeanum*

材料 Material	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	叶片数量 Leaf number	叶片面积 Leaf area/mm ²	叶片宽度 Leaf width/cm	根数 Root number	根长 Root length/cm	根宽 Root width/cm
2 <i>n</i>	CK	8.52±0.14 ^d	4.67±0.67 ^{abc}	23.76±0.40 ^b	1.11±0.066 ^a	6.00±1.00 ^{ab}	3.68±0.14 ^b	0.09±0.01 ^b
	R	11.52±0.35 ^b	3.67±0.33 ^c	16.06±0.77 ^d	0.73±0.05 ^d	4.00±1.00 ^b	3.01±0.14 ^c	0.05±0.00 ^c
	B	5.96±0.38 ^e	4.00±0.58 ^{bc}	15.94±0.50 ^d	0.77±0.04 ^{bcd}	6.67±1.02 ^{ab}	2.38±0.15 ^c	0.08±0.00 ^b
	R5 : B5	6.53±0.28 ^e	4.00±0.58 ^{bc}	19.77±0.70 ^c	0.81±0.07 ^{cd}	6.67±0.88 ^{ab}	2.61±0.11 ^c	0.09±0.00 ^b
	R6 : B4	9.93±0.39 ^c	6.00±0.58 ^{ab}	18.97±0.69 ^{cd}	0.81±0.07 ^{cd}	7.00±1.00 ^{ab}	5.11±0.20 ^a	0.09±0.00 ^b
	R7 : B3	13.44±0.24 ^a	6.33±0.88 ^a	32.50±1.53 ^a	1.04±0.05 ^{abc}	6.67±0.88 ^{ab}	4.02±0.20 ^b	0.12±0.00 ^a
	R8 : B2	9.45±0.05 ^c	6.00±0.58 ^{ab}	29.82±0.27 ^a	0.95±0.05 ^{ab}	7.67±1.02 ^{ab}	2.79±0.12 ^b	0.11±0.01 ^a
4 <i>n</i>	CK	7.22±0.30 ^c	4.33±0.33 ^a	25.16±0.27 ^a	1.16±0.01 ^a	10.67±0.67 ^{ab}	3.55±0.09 ^b	0.11±0.00 ^b
	R	9.37±0.17 ^b	3.37±0.88 ^a	12.57±0.51 ^c	0.60±0.01 ^d	5.00±0.58 ^b	1.47±0.21 ^d	0.09±0.00 ^c
	B	5.41±0.30 ^d	4.00±0.58 ^a	20.53±1.24 ^b	0.77±0.04 ^c	5.67±2.67 ^b	3.50±0.37 ^b	0.09±0.01 ^c
	R5 : B5	6.39±0.07 ^c	4.67±0.33 ^a	21.45±1.21 ^b	0.83±0.05 ^c	8.67±3.48 ^{ab}	3.26±0.39 ^b	0.10±0.00 ^{bc}
	R6 : B4	7.05±0.35 ^c	5.00±0.58 ^a	22.97±0.59 ^b	1.04±0.04 ^b	10.00±3.46 ^{ab}	2.41±0.34 ^c	0.10±0.00 ^{bc}
	R7 : B3	10.46±0.30 ^a	5.67±0.88 ^a	28.15±0.43 ^a	1.19±0.04 ^a	14.00±1.53 ^a	4.92±0.12 ^a	0.13±0.01 ^a
	R8 : B2	6.97±0.27 ^c	5.33±0.33 ^a	22.13±1.95 ^b	0.98±0.06 ^{ab}	10.67±1.76 ^{ab}	2.78±0.11 ^{bc}	0.11±0.00 ^b

注：不同小写字母表示不同处理间差异显著（*P*<0.05）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments (*P*<0.05).

趋势，并在 R7 : B3 处理达到最大值。
(2) 不同光质处理对粉冠军二倍体和四倍体幼苗生物量的影响。由图 2 可知，对照处理下，粉冠军二倍体的生物量均高于四倍体，R 处理显著降低了二倍体和四倍体幼苗的生物量。B 处理对二倍体幼苗生物量均未造成显著差异，但显著降低了四倍体生物量；二者相比，R 处理的降低程度更高。红光与蓝光复合光质处理却可在一定程度上缓解甚至逆转 R、B 处理引起的粉冠军幼

苗生物量的降低趋势。随着红光比例的增加，粉冠军二倍体和四倍体生物量呈现先上升后降低趋势，均在 R7 : B3 处理达到最大值，其次是 8R : 2B 与 6R : 4B 处理，这 3 种红光与蓝光复合光质处理均显著高于对照处理，如 6R : 4B、R7 : B3 与 8R : 2B 三种处理中二倍体整株生物量比对照处理分别增加 32.13%、97.32%、65.76%；四倍体的整株生物量比对照处理分别增加 32.62%、65.8%、31.87%。



不同小写字母表示不同处理间差异显著（*P*<0.05）。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments (*P*<0.05).

图 2 不同光质对红掌二倍体和四倍体幼苗生物量的影响
Fig. 2 Effect of different light qualities on dry weight in *A. andraeanum* 2*n* and 4*n* leaves

2.2 不同光质处理对红掌叶片生理指标的影响

2.2.1 不同光质处理对红掌叶片可溶性糖(SS)与可溶性蛋白(SP)含量的影响。由图3A可知,对照处理下,粉冠军四倍体的SS含量较二倍体高21.88%。与对照处理相比,R处理增加了二倍体幼苗的SS含量,而对四倍体的幼苗未表现出显著影响。B处理对二倍体幼苗的SS含量无显著影响,但降低了四倍体的SS含量。红光与蓝光复合光质处理中,随着红光比例的增加,二倍体和四倍体的SS含量均呈现先上升后下降的趋势,二倍体在R7:B3处理下出现最大值,其次是R6:B4处理,二者较对照处理分别增加89.69%、78.11%。四倍体的SS含量在R7:B3处理出现最大值,其次是R8:B2处理,较对照处理分别增加28.16%、20.77%。

由图3B可知,对照处理下粉冠军二倍体与四倍体幼苗的SP含量接近。R、B光质处理均未显著影响2种幼苗的SP含量。红光与蓝光复合光质处理可增加2种幼苗的SP含量,随着红光比例的增加,二倍体和四倍体的SP含量均呈现先上升后下降的趋势,二者均在R7:B3处理中达到最高值,较对照处理分别增加了89.89%、72.90%。

2.2.2 不同光质处理对红掌叶片抗氧化酶(SOD)活性的影响。由图3C可知,对照处理下,粉冠军四倍体的SOD活性较二倍体高58.45%。与对照处理相比,R处理未显著影响2种幼苗的SOD活性。B处理显著增加了粉冠军二倍体幼苗的SOD活性,但对四倍体幼苗SOD活性无显著影响。红光与蓝光复合光质处理均显著提高二倍体和四倍体的SOD活性。二倍体的SOD活性在R8:B2处理出现最大值,其次是R7:B3处理,二者较对照处理分别增加111.74%、85.16%。四倍体的SOD活性在R7:B3处理中出现最大值,其次是R8:B2处理,分别较对照处理增加43.86%、30.05%。

由图3D可知,不同光质处理后粉冠军四倍体幼苗的CAT活性低于二倍体;对照处理下,四倍体的SOD活性较二倍体低577.08%。与对照处理相比,R处理增加了二倍体幼苗的CAT活性,而对四倍体的未表现出显著影响。B处理显著增加了二倍体与四倍体幼苗的CAT活性。红光与蓝光复合光质处理中的CAT活性基本上大于对照和单色光的处理,随着红光比例的增加,红光与蓝光复合光质处理的二倍体和四倍体幼苗的CAT活

性均呈现先上升后下降的趋势。二倍体与四倍体幼苗的CAT活性均在R7:B3处理达到最大值,其次是R8:B2处理,均显著高于对照处理,其中二倍体在R7:B3、R8:B2两种光质处理下的CAT活性较对照处理分别增加159.01%、144.75%,而四倍体则分别增加383.51%、183.72%。

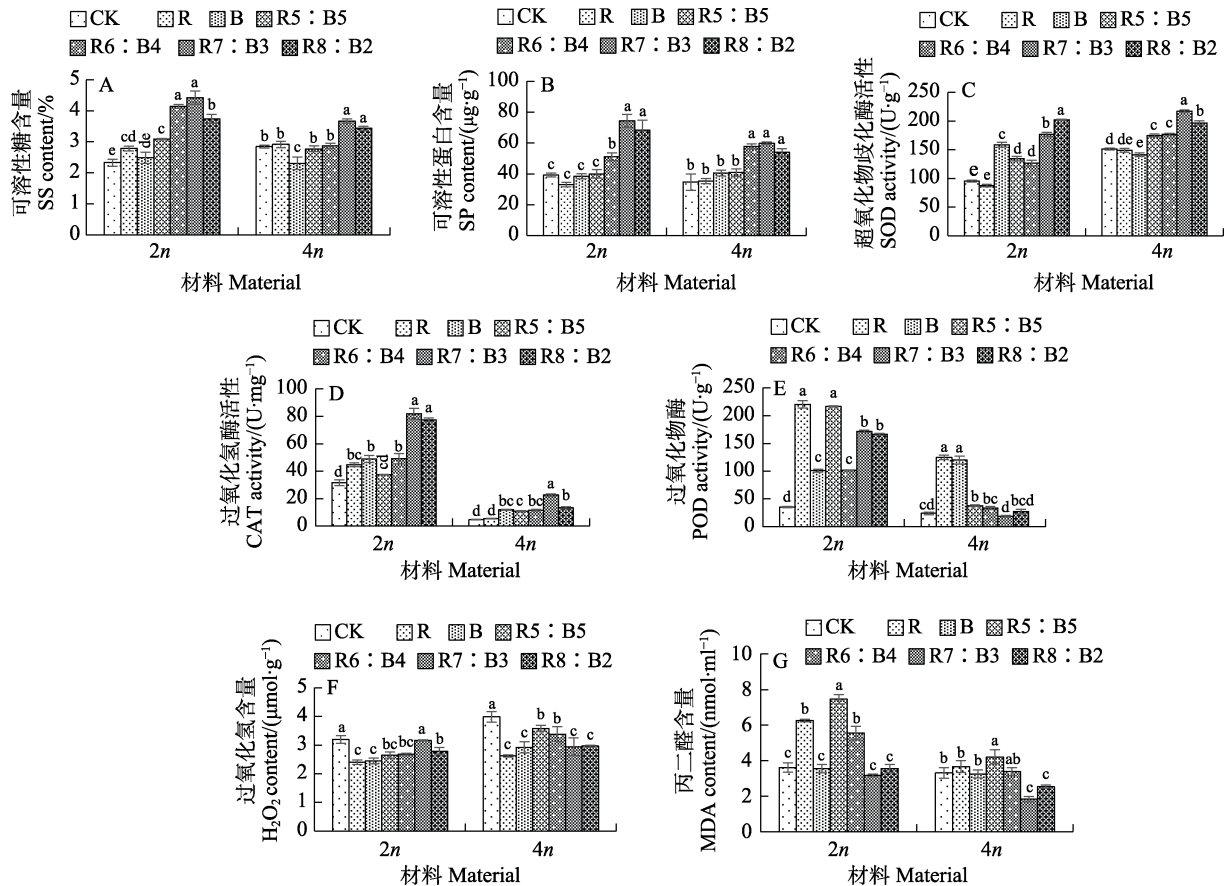
由图3E可知,对照处理下,粉冠军四倍体幼苗叶片的POD活性较二倍体低47.73%。与对照处理相比,无论是R、B处理,还是红光与蓝光复合光质处理,基本能在一定程度上增加2种粉冠军幼苗叶片的POD活性。2种幼苗叶片的POD活性均在R处理出现最大值,分别较对照处理增加519.7%、418.52%。

2.2.3 不同光质处理对红掌叶片过氧化氢(H_2O_2)含量的影响由图3F可知,对照处理下粉冠军四倍体的 H_2O_2 含量较二倍体增加24.68%。与对照处理相比,R、B及红光与蓝光复合光质处理均能降低二倍体和四倍体的 H_2O_2 含量,其中R处理对幼苗叶片 H_2O_2 含量影响最大,分别降低25%、34.08%。

2.2.4 不同光质处理对红掌叶片丙二醛(MDA)含量的影响由图3G可知,对照处理下粉冠军四倍体的MDA含量与二倍体无明显差异。与对照处理相比,R处理显著增加了二倍体幼苗的MDA含量,而对四倍体的MDA含量无显著影响。B处理对二倍体和四倍体幼苗的MDA含量无显著影响。红光与蓝光复合光质处理中,随着红光比例的增加,粉冠军二倍体与四倍体的MDA含量总体呈下降趋势,二者的MDA含量均在R5:B5处理中出现最大值,分别较对照处理增加106.64%、27.19%。四倍体幼苗在R7:B3与R8:B2两种处理下的MDA含量较对照处理有所降低,但在二倍体幼苗上未表现出明显的差异。

2.2.5 不同光质处理下红掌叶片生理指标相关性分析由图4可知,SP含量与SS含量、SOD活性呈显著和极显著正相关关系;MDA含量与POD活性呈显著正相关关系;MDA含量与SOD活性呈极显著负相关关系;POD活性与 H_2O_2 含量呈显著负相关关系,而其余指标间的相关程度不高。

2.2.6 不同生理指标间隶属函数分析根据隶属函数值分析能够判断出各光质处理的差异状况,并可以对各处理效果进行排序便于筛选。本研究通过对不同光质处理下粉冠军二倍体和四倍体叶片的7个生理指标平均隶属函数分析发现,二倍



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同光质对红掌生理指标的影响

Fig. 3 Effect of different light qualities on physiological characteristic in *A. andraeanum*

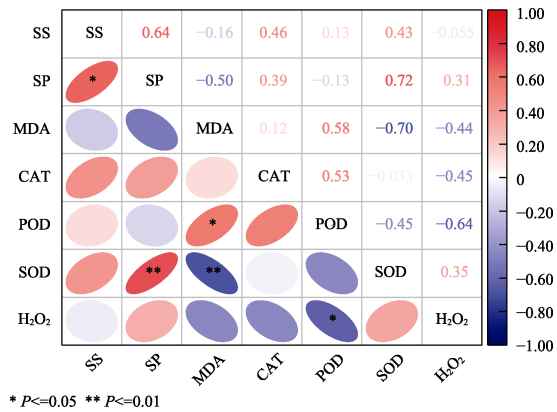


图 4 不同光质处理下红掌叶片生理指标相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of physiological indicators in *A. andraeanum* leaves under different light quality treatments

体幼苗的各处理效果排序为: $\text{R7:B3} > \text{R8:B2} > \text{R6:B4} > \text{B} > \text{R5:B5} > \text{CK} > \text{R}$, 四倍体幼苗各处理排序为: $\text{R7:B3} > \text{R8:B2} > \text{R6:B4} > \text{R5:B5} > \text{B} > \text{CK} > \text{R}$ (表 2)。

3 讨论

3.1 光质对粉冠军二倍体和四倍体幼苗生长指标的影响

光质及其组成的不同对植物的生长发育有重要影响^[12], 有研究表明红蓝组合光 (3:1) 在番茄幼苗的光合性能方面有显著提高, 利于壮苗的培育^[13]。前人研究发现红光和蓝光对植物的生长、光合作用和抗氧化能力有显著影响^[14]。植物的外部形态特征是其对光环境适应性最直观的表达。本研究结果发现粉冠军二倍体幼苗在蓝光处理下的根宽以及总干重高于红光处理; 在 B 处理下, 粉冠军四倍体幼苗的叶片面积、叶片宽度、最大根长和总干重均高于 R 处理。表明粉冠军二倍体和四倍体幼苗对红光与蓝光的生长响应存在差异。在 R7:B3 和 R8:B2 处理下, 粉冠军二倍体和四倍体的叶片数量、叶片宽度、最大根长、根宽及地上部和地下部的干重均显著大于 B 处理和 R 处理, 表明红光与蓝光复合光比单色光更有

表 2 不同光质处理下红掌二倍体和四倍体生理指标隶属函数综合评价
Tab. 2 Comprehensive evaluation of physiological indices of *A. andraeanum* 2n and 4n under different light qualities using membership functions

材料 Material	处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value								
		SS	SP	MDA	SOD	CAT	POD	H ₂ O ₂	Mean	Rank
2n	CK	0	0.15	0.90	0.07	0	0	1	0.30	6
	R	0.22	0	0.28	0	0.26	1	0	0.25	7
	B	0.08	0.13	0.91	0.62	0.34	0.35	0.06	0.36	4
	R5 : B5	0.36	0.17	0	0.41	0.12	0.98	0.31	0.34	5
	R6 : B4	0.87	0.44	0.45	0.34	0.35	0.36	0.35	0.45	3
	R7 : B3	1	1	1	0.78	1	0.74	0.95	0.92	1
	R8 : B2	0.67	0.96	0.91	1	0.91	0.71	0.48	0.81	2
4n	CK	0.39	0	0.38	0.13	0	0.05	1	0.28	6
	R	0.44	0.03	0.23	0.10	0.04	1	0	0.26	7
	B	0	0.23	0.40	0	0.40	0.95	0.22	0.32	5
	R5 : B5	0.34	0.25	0	0.44	0.35	0.18	0.70	0.32	4
	R6 : B4	0.41	0.92	0.34	0.47	0.39	0.14	0.55	0.46	3
	R7 : B3	1	1	1	1	1	0	0.23	0.75	1
	R8 : B2	0.82	0.76	0.70	0.73	0.48	0.08	0.25	0.55	2

利于粉冠军的形态发生和干物质的积累。有研究表明红光可抑制叶片中叶绿素合成，阻碍叶片结构发育和叶绿体发育，降低桑树幼苗叶片光合活性、碳氮代谢能力，不利于桑树幼苗生长；蓝光能抑制桑树叶片展开和茎伸长；而红蓝组合光能弥补单一红光或蓝光的不良影响，所以一定比例的红蓝组合光更适用于温室繁育桑树实生幼苗的生长^[15]。这与本研究结论相似。

3.2 光质对粉冠军二倍体和四倍体幼苗可溶性固形物含量的影响

可溶性糖和可溶性蛋白是植物光合作用的直接产物，可以直接或间接地影响植物的生长发育过程^[16]。本研究发现，粉冠军二倍体和四倍体在 R 处理下的 SS 含量高于 B 处理，而 SP 含量则相反，R 处理下 SP 含量低于 B 处理，这与在青蒿^[17]上的研究结论相似。这可能是因为红光抑制光合产物向外运输，导致 SS 在叶片中积累^[18]。粉冠军二倍体和四倍体的 SS 和 SP 含量在红光与蓝光复合光处理中均高于对照处理、R、B 处理，且在 R7 : B3 处理下达到最大值。说明红光与蓝光复合光处理下光合产物的积累总体上优于单色光处理，这与在芹菜^[19]上的研究结果相似。

3.3 光质对粉冠军二倍体和四倍体幼苗抗氧化系统的影响

本研究中，红光与蓝光复合光能够显著提高

粉冠军二倍体和四倍体幼苗叶片的 SOD 活性，这与邹祥^[20]的研究结果相似。在 7R : 3B 光质处理下，粉冠军四倍体幼苗叶片的 SOD 活性最高，二倍体的 SOD 活性在 8R : 2B 光质处理下达到最大值，说明合适比例的红光与蓝光复合光处理能增强粉冠军二倍体和四倍体幼苗的防御能力。

SOD 可将超氧阴离子自由基歧化为 H₂O₂ 和 O₂，H₂O₂ 与超氧阴离子自由基是植物细胞中的活性氧的重要组分，光质可以通过影响植物的光合作用和呼吸作用间接调节 H₂O₂ 的生成。前人研究发现蓝光和红光作为植物光合作用的主要光质，能够通过调节光合电子传递链的效率，影响细胞内的氧化还原状态，进一步影响 H₂O₂ 的积累^[21]。而 H₂O₂ 的清除主要靠 CAT 与 POD 等酶来完成，其中 CAT 通过将 H₂O₂ 还原成水和分子氧，维持细胞内氧化还原平衡，保护植物细胞免受氧化损伤^[22]。与对照处理相比，本研究中所有光质处理都可提高粉冠军二倍体和四倍体幼苗叶片的 CAT 活性，而在 7R : 3B 光质处理下达到最大值，这与胡举伟等^[23]的研究结果一致。

与本研究结果类似，红光处理能够显著提高木薯 POD 活性^[24]；蓝光提高了玉米的 POD 活性^[25]，但降低了黄芪的 POD 活性^[26]。说明光质对 POD 活性的影响因植物种类和具体光质类型而异。

由于 R、B 处理以及红光与蓝光复合光处理

能在一定程度上增加粉冠军幼苗叶片的 CAT 与 POD 活性,所以在这些光质处理下 2 种粉冠军幼苗叶片的 H_2O_2 含量均呈现下降趋势,生理指标相关性分析也验证了这一点。这也说明 R、B 处理及红光与蓝光复合光可在一定程度上通过增加植物保护酶活性来增强粉冠军幼苗的自我保护能力。

粉冠军幼苗的 MDA 含量在红光与蓝光复合光 7R : 3B 处理下最低,这与该处理下粉冠军二倍体与四倍体幼苗的叶片中具有较高的 SOD、CAT 及 POD 活性和其 H_2O_2 含量较低有关,说明此处理下较高的抗氧化酶活性有能力将体内的活性氧清除而保持较低的水平,从而避免高水平脂质过氧化物的发生,减轻植物膜系统受到的伤害。类似的结果在 LI 等^[27]的研究中也有报道。

通过对不同光质处理下粉冠军二倍体与四倍体幼苗的生理指标进行隶属函数综合评价后发现,对 2 种倍性的粉冠军幼苗而言,表现最好的前 3 种光质处理分别是红光与蓝光复合光处理 R7 : B3、R8 : B2、R6 : B4。综合幼苗生长状况、生物量与生理指标的隶属函数分析,本研究所设处理中均以红光与蓝光复合光处理 R7 : B3 表现最佳,可作为日后粉冠军幼苗生产的光质选择。

参考文献

- [1] 纪思羽,王政,聂世煥,陈颖,何松林,杨博.不同光质冷阴极荧光灯光照处理对红掌试管苗生长的影响[J].西北林学院学报,2013,28(3):119-122,268.
JI S Y, WANG Z, NIE S H, CHEN Y, HE S L, YANG B. Effects of different light treatments of cold cathode fluorescent lamps on the growth of *Anthurium andraeanum* plantlets in vitro[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 119-122, 268. (in Chinese)
- [2] 冷青云,牛俊海,尹俊梅,杨光穗,黄少华,徐洪伟.红掌品种‘樱桃红’变异株的倍性鉴定[J].热带作物学报,2014,35(11):2139-2143.
LENG Q Y, NIU J H, YIN J M, YANG G S, HUANG S H, XU H W. Identification of the tetraploid variant in *Anthurium andraeanum* ‘Cherry Red’[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(11): 2139-2143. (in Chinese)
- [3] 乔永旭,张永平,张卫华,张惠敏,龚荣娅,王紫莹,高丽红.红掌特伦萨四倍体的离体诱导及其鉴定[J].核农学报,2025,39(1):10-18.
QIAO Y X, ZHANG Y P, ZHANG W H, ZHANG H M, GONG R Y, WANG Z Y, GAO L H. Induction and characterization of *Anthurium andraeanum* turenza tetraploids in vitro[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025, 39(1): 10-18. (in Chinese)
- [4] 刘星溢,乔永旭,张永平,王力,张卫华,高丽红.红掌二倍体和四倍体幼苗耐寒性差异评价[J].北方园艺,2025(10):56-66.
LIU X Y, QIAO Y X, ZHANG Y P, WANG L, ZHANG W H, GAO L H. Evaluation of differences in cold resistance between diploid and tetraploid *Anthurium andraeanum* seedlings[J]. Northern Horticulture, 2025(10): 56-66. (in Chinese)
- [5] YANG J L, JUNG B R. lighting enhances morphophysiology by inducing more branching and flowering in chrysanthemum grown in controlled environment[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(21): 12019.
- [6] 顾梦云,曾伟达,宿庆连,黄明翅,冯肖梅,刘艳艳,张雪莲,周晓云.不同 LED 光质配比和光照强度对红掌新品种福星组织培养的影响[J].广东农业科学,2023,50(5):46-55.
GU M Y, ZENG W D, SU Q L, HUANG M C, FENG X M, LIU Y Y, ZHANG X L, ZHOU X Y. Effects of different LED light quality ratio and light intensity on tissue culture of a new *Anthurium andraeanum* cultivar fuxing[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2023, 50(5): 46-55. (in Chinese)
- [7] 陈孝丑,杨芮,户帅雅,巫伟峰,张曦文,徐永,陈发兴.红蓝复合光对‘阳光红心’红掌生长和叶绿素荧光反应的影响[J].热带作物学报,2018,39(2):224-230.
CHEN X C, YANG R, HU S Y, WU W F, ZHANG X W, XU Y, CHEN F X. Effects of blue and red light-emitting diode on the growth and chlorophyll fluorescence reaction of *Anthurium andraeanum* ‘Yongonred’[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(2): 224-230. (in Chinese)
- [8] 张志胜,黎扬辉,姜蕾,李运,王朱莹,夏晴,易懋升.红掌四倍体的离体诱导及其鉴定[J].园艺学报,2007(3):729-734.
ZHANG Z S, LI Y H, JIANG L, LI Y, WANG Z Y, XIA Q, YI M S. In vitro tetraploid induction and its identification in *Anthurium andraeanum*[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007(3): 729-734. (in Chinese)
- [9] ZHANG Y P, QIAO Y X, ZHANG W H, LIU X Y, GONG R Y, WANG Z Y, ZHANG Y. In vitro induction and characterization of *Anthurium andraeanum* ‘Pink Champion’ tetraploids[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant, 2025, 61: 249-251.
- [10] DING Y, WANG X T, WANG F, SHAO Y L, ZHANG A M, CHANG W. The effects of chilling stress on antioxidant enzymes activities and proline, malondialdehyde, soluble sugar contents in three *Paphiopedilum* species[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2023, 70(4): 61.
- [11] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2015:24-25.
CHEN J X, WANG X F. Experimental guidance of plant physiology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2015: 24-25. (in Chinese)

- [12] 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.
XU D Q, GAO W, RUAN J. Effects of light quality on plant growth and development[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8): 1217-1234. (in Chinese)
- [13] 李岩, 王丽伟, 文莲莲, 魏珉, 史庆华, 杨凤娟, 王秀峰. 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.
LI Y, WANG L W, WEN L L, WEI M, SHI Q H, YANG F J, WANG X F. Effects of red and blue light quality on main fruit quality of tomato during color-turning period[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(12): 2372-2382. (in Chinese)
- [14] CHUTIMANKUI P, WANICHANANAN P, JANTA S, TOOJINDA T, DARWELL C T, MOSALEEYANON K. The influence of different light spectra on physiological responses, antioxidant capacity and chemical compositions in two holy basil cultivars[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 588.
- [15] 胡举伟. 不同红蓝光配比对桑树幼苗生长和生理特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
HU J W. Effects of different proportions of red and blue light on the growth and physiological characteristics of mulberry seedlings[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [16] LIU W, JIANG H, ZENG F. The sugar transporter proteins in plants: an elaborate and widespread regulation network-a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 294: 139252.
- [17] RAI N, ANSARI N, APOORVA, KUMARI S, SAHA P, BISEN M S, SINGH S, PANDEY-RAI S. Red and blue light-mediated physiological and metabolic insights in *Artemisia annua* L.[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119879.
- [18] 王竞, 唐雪东, 程存刚, 周江涛, 陈艳辉, 李鑫, 张艳珍, 刘炳含. 不同光质补光对富士苹果果实品质的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(3): 459-469.
WANG J, TANG X D, CHENG C G, ZHOU J T, CHEN Y H, LI X, ZHANG Y Z, LIU B H. Effects of light quality on Fuji apple fruit quality[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(3): 459-469. (in Chinese)
- [19] 王哲, 王宇航, 王晓庆, 樊怀福. 植物工厂 LED 光质调控对芹菜生长及产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(2): 340-344.
WANG Z, WANG Y H, WANG X Q, FAN H F. Effect of LED light quality control on celery growth and yield in plant factory[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2024, 65(2): 340-344. (in Chinese)
- [20] 邹祥. 辣木组培及不同光质对其组培苗生长的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
ZOU X. Effects of *Moringa* tissue culture and different light quality on the growth of tissue culture seedlings[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2024. (in Chinese)
- [21] WU B S, MANSOORI M, SCHWALB M, ISLAM S, NAZNIM M T, ADDO P W, MACPHERSON S, ORSAT V, LEFSRUD M. Light emitting diode effect of red, blue, and amber light on photosynthesis and plant growth parameters[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2024, 256: 112939.
- [22] CHISHTI M S, SHAHBAZ M, KALEEM M, SHAFI S, MEHMOOD A, ZHANG Q Z, MANSHA N, SHEHZADI N, RANA S, SHAHID H, HASHEM A, ALFAGHAM A, ABD-ALLAH E F. Fertigation with alpha-tocopherol enhances morphological, physiological, and antioxidant responses in radish (*Raphanus sativus* L.) under drought stress[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25: 30.
- [23] 胡举伟, 郑磊, 孟鑫, 黄乐秋, 王庆庆, 李曰鹏, 吴淑娟, 徐劲松, 宋涛, 彭善俊, 邢连强. 不同红蓝光配比对樱桃幼苗形态发育、抗坏血酸和活性氧代谢的影响[J]. 中国果树, 2024(4): 55-60, 70.
HU J W, ZHENG L, MENG X, HUANG L Q, WANG Q Q, LI Y P, WU S J, XU J S, SONG T, PENG S J, XING L Q. Effects of different proportions of red and blue light on morphological development and metabolism of ascorbic acid and reactive oxygen species in cherry seedlings[J]. China Fruits, 2024(4): 55-60, 70. (in Chinese)
- [24] ZHOU Q, LI R, FERNIE A R, CHE Y, DING Z, YAO Y, LIU J, WANG Y, HU X, GUO J. Integrated analysis of morphological, physiological, anatomical and molecular responses of cassava seedlings to different light qualities[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(18): 14224.
- [25] 张同祯, 李永生, 李玥, 姚海梅, 赵娟, 王婵, 赵阳, 王汉宁, 方永丰, 胡晋. 多胺氧化酶(PAO)调控光诱导玉米中胚轴伸长的生理机制[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 734-742.
ZHANG T Z, LI Y S, LI Y, YAO H M, ZHAO J, WANG C, ZHAO Y, WANG H N, FANG Y F, HU J. Physiological mechanism regulating light-induced mesocotyl elongation by polyamine oxidase (PAO) in maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(5): 734-742. (in Chinese)
- [26] 胡瑜辉, 杨振宇, 宋诗娟, 王宝慧, 石志勇, 牛景萍, 梁建萍, 柴智. 不同光质对黄芪抗氧化酶活性及产量和品质的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(10): 1173-1178.
HU Y H, YANG Z Y, SONG S J, WANG B H, SHI Z Y, NIU J P, LIANG J P, CHAI Z. Effects of different light quality on antioxidant enzyme activity, yield and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(10): 1173-1178. (in Chinese)
- [27] LI J, LIU Y B, WANG J W, LIU M Y, LI Y L, ZHENG J Y. Effects of different led spectra on the antioxidant capacity and nitrogen metabolism of chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *Pekinensis*)[J]. Plants, 2024, 13(21): 2958.