

7种杜鹃花的性状评价与杂交亲和性

李杰¹ 张敬丽¹ 孙体梅¹ 白天¹ 吕英民² 李奋勇³ 吴雅文^{1*}

(1. 云南农业大学园林园艺学院,昆明 650500; 2. 北京林业大学园林学院,北京 100091; 3. 大理苍山植物园生物科技有限公司,大理 671003)

摘要 为建立杜鹃花(*Rhododendron*)优质品种筛选体系,该研究以云南农业大学杜鹃种质资源库的7种杜鹃花为试验材料,运用层次分析法进行观赏性评价,结合干旱胁迫及生理指标测定,开展抗旱性评价,最后以优质种进行杂交育种和可育性试验,探究杂交亲和性。结果表明:锦绣杜鹃(*R. × pulchrum*)以株形紧凑、花叶丰满度高和园林应用潜力评分最高排在首位;映山红(*R. simsii*)的花观赏性评分最高,但花序数量少,叶片小且冬季落叶,排名第2;马缨杜鹃(*R. delavayi*)的整体观赏性评分最高,但园林应用潜力评分较低,排名第3。抗旱性排名为锦绣杜鹃>映山红>兴安杜鹃(*R. dauricum*)>红马银花(*R. vialii*)>马缨杜鹃>羊躑躅(*R. molle*)>大白杜鹃(*R. decorum*)。7个杂交组中的最优组为马缨杜鹃×映山红,坐果率为27.3%,种子萌发率为100.0%,而锦绣杜鹃无论是作为父本,还是作为母本,其杂交组合都没有获得杂交后代。总之,锦绣杜鹃观赏价值、抗旱性最佳,而映山红、马缨杜鹃观赏价值、抗旱性次之,且杂交亲和。

关键词 杜鹃;观赏性评价;层次分析法;干旱胁迫;生理指标;杂交亲和性

中图分类号:S685.21 文献标志码:A doi:10.7525/j.issn.1673-5102.2025.06.010

Trait Evaluation and Hybrid Compatibility of Seven *Rhododendron* Species

LI Jie¹ ZHANG Jingli¹ SUN Timei¹ BAI Tian¹ LÜ Yingmin² LI Fenyong³ WU Yawen^{1*}

(1. College of Landscape Architecture and Horticulture, Yunnan Agricultural University, Kunming 650500; 2. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100091; 3. Dali Cangshan Botanical Garden Biotechnology Co., Ltd., Dali 671003)

Abstract To establish a high quality variety screening system for *Rhododendron*, seven *Rhododendron* species from the azalea germplasm bank of Yunnan Agricultural University were taken as materials, and their ornamental values were evaluated by Analytic Hierarchy Process, and the drought resistance was evaluated through the determination of physiological indexes under drought stress, and cross-compatibility of high-quality species was evaluated by the cross-breeding and fertility tests. The results showed that *R. × pulchrum* ranked first for its compact plant shape, high flower and leaf fullness, and garden application potential. *R. simsii* had the highest ornamental score for its flowers, but a small number of flowers in each inflorescence, small leaves, and defoliation in winter, ranking the second. *R. delavayi* had the highest overall ornamental score, but relatively low potential for garden application, ranking the third. The drought resistance was ranked as *R. × pulchrum* > *R. simsii* > *R. dauricum* > *R. vialii* > *R. delavayi* > *R. molle* > *R. decorum*. The optimal group among seven hybrid groups was *R. delavayi* × *R. simsii*, because the fruit setting rate was 27.3%, and seed germination rate was 100.0%. However, no hybrid offspring was obtained from the hybrid combination of *R. × pulchrum* either as the male or female parent. In conclusion, the ornamental value and drought resistance of *R. × pulchrum* was the best, and the ornamental value and drought resistance of *R. simsii* and *R. delavayi* were the second, and the hybrids were compatible.

基金项目:云南省科技厅科技计划项目基础研究专项(202201AU070185);国家自然科学基金面上项目(32460417);云南省农业联合专项(202301BD070001-139);云南省科技厅云南省吕英民专家工作站(202305AF150155);云南省科技厅云南省张启翔专家工作站(202405AF140078);乡村振兴科技专项-科技特派团(队)(202404BI090014)。

第一作者简介:李杰(1999—),男,硕士研究生,主要从事观赏植物资源利用与创新研究。

* 通信作者:E-mail:yawenwu@ynau.edu.cn。

收稿日期:2024年12月31日。

Key words *Rhododendron*; ornamental evaluation; analytic hierarchy process; drought stress; physiological index; cross compatibility

杜鹃花是杜鹃花科(Ericaceae)杜鹃属(*Rhododendron*)植物的统称,在全球范围内享有盛誉,作为一种观赏植物而广受欢迎^[1]。杜鹃花属植物应用极为广泛,具有观赏^[2]、生态^[3]、药用价值^[4]。杜鹃花种质资源丰富,是园林绿化的重要材料之一,但其主栽品种极少,且多年不变,主要原因是具有优良性状的新品种培育体系不完善、育种周期长^[5]。在观赏植物种质资源评价方面,层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的应用尤为广泛,这是因为观赏植物种质资源的评价涉及多个复杂因素^[6],如观赏性、适应性、生长性能等,这些因素之间相互关联、影响,难以用单一指标进行量化评价。而层次分析法通过构建层次结构模型,将这些因素进行有序分类和整合,使得评价过程更加系统化、科学化。研究^[7]表明,植物叶片的叶绿素、丙二醛、脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白含量和超氧化物歧化酶活性等生理指标与杜鹃花抗旱性密切相关。近年来,国内外学者进行了杜鹃花抗旱性相关研究,例如,齐鸣等^[8]研究了干旱胁迫对刺毛杜鹃(*R. championiae*)等5个杜鹃花品种的叶片形态和生理指标的影响, Anisko 和 Lindstrom^[9]研究了杜鹃花品种在干旱胁迫下的水势变化,并评估了其抗旱性。杂交育种是目前国内外杜鹃花育种中应用最广泛、成效最显著的育种方法。一些研究已经对杜鹃花的杂交育种规律进行了探

索,郑硕理等^[10]对云锦杜鹃(*R. fortunei*)等6种杜鹃花进行的杂交亲和性研究发现,常绿杜鹃亚属(subg. *Hymenanthes*)内杂交坐果率相对较高,而不同亚属间杂交坐果率则较低;庄平^[11]研究发现,杜鹃亚属(subg. *Rhododendron*)间杂交存在明显的生殖障碍。中国拥有最丰富的野生杜鹃花种质资源,但能够应用于园林绿化的杜鹃花栽培种较少^[12]。针对市场和环境需求,基于杜鹃花耐旱的生理机制,筛选和培育具有优良抗旱性能的杜鹃花种质,对杜鹃花种质资源保护和丰富园林景观具有重要意义。

本研究以云南农业大学杜鹃种质资源库的7种杜鹃花为研究对象,采用层次分析法评价观赏性状,结合干旱胁迫及生理指标测定分析耐旱性,再综合以上观赏性评价和耐旱性评价试验结果,筛选出优质种开展杂交亲和性试验,以坐果率、种子发芽率等指标对可育性进行综合评价,探明种间杂交亲和性,以期对杜鹃花优良园林应用性状的筛选、育种和推广提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取云南农业大学杜鹃花种质资源库中生长状况基本一致的7种多年生杜鹃花为观测对象。7种杜鹃花材料引种自云南、江苏和辽宁,株高为40~60 cm(表1,图1)。

表1 7种杜鹃花基本情况

Table 1 Basic information of seven *Rhododendron* species

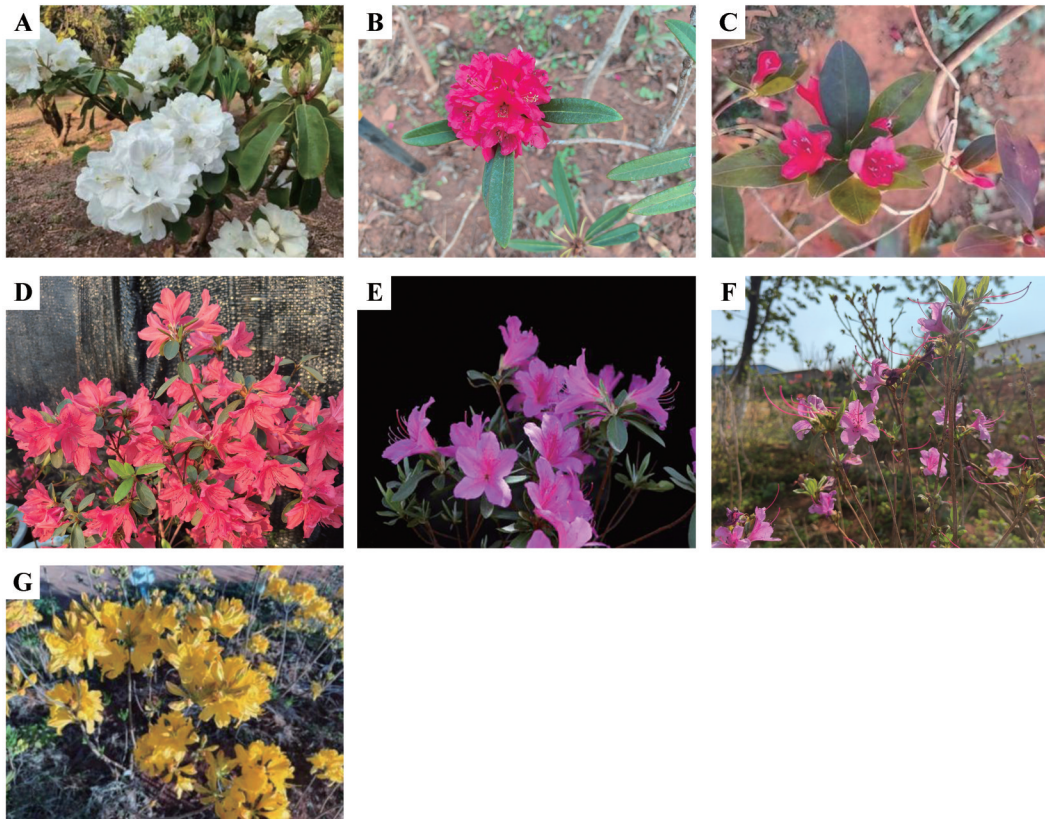
种名 Species	亚属 Subgenus	引种来源 Introduction source
大白杜鹃 <i>R. decorum</i>	常绿杜鹃亚属 subg. <i>Hymenanthes</i>	云南普洱 Pu'er, Yunnan
马缨杜鹃 <i>R. delavayi</i>	常绿杜鹃亚属 subg. <i>Hymenanthes</i>	云南大理 Dali, Yunnan
红马银花 <i>R. vialii</i>	马银花亚属 subg. <i>Azaleastrum</i>	云南普洱 Pu'er, Yunnan
映山红 <i>R. simsii</i>	映山红亚属 subg. <i>Tsutsusi</i>	云南普洱 Pu'er, Yunnan
锦绣杜鹃 <i>R. × pulchrum</i>	映山红亚属 subg. <i>Tsutsusi</i>	江苏宿迁 Suqian, Jiangsu
兴安杜鹃 <i>R. dauricum</i>	杜鹃亚属 subg. <i>Rhododendron</i>	辽宁凤城 Fengcheng, Liaoning
羊躑躅 <i>R. molle</i>	羊躑躅亚属 subg. <i>Pentanthera</i>	云南普洱 Pu'er, Yunnan

1.2 试验方法

1.2.1 观赏性评价方法

选取健康、生长状况基本一致的7种杜鹃花各

5盆,基质为V(泥炭土):V(腐叶土):V(珍珠岩)=2:2:1,移栽至温室大棚内,给予一致的水肥管理,并进行缓苗养护处理,2个月后进行测量和观察。



A. 大白杜鹃; B. 马缨杜鹃; C. 红马银花; D. 映山红; E. 锦绣杜鹃; F. 兴安杜鹃; G. 羊蹄躅。

A. *R. decorum*; B. *R. delavayi*; C. *R. vialii*; D. *R. simsii*; E. *R. × pulchrum*; F. *R. dauricum*; G. *R. molle*.

图1 7种杜鹃花形态

Fig.1 Morphology of seven *Rhododendron* species

参考杜鹃花观赏性评价体系^[13],结合16个表型评价因子(表2)构建层次结构,建立初步的综合评价模型^[14]。在结构模型各层中构造两两比较矩阵,计算判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量,在此基础上再计算各层中每个因子的相对重要性权重,并按要求对判断矩阵进行一致性检验^[15]。在调查杜鹃花属植物的观赏特性和生态学特性的基础上,确定各项指标和对应5分制的评分标准(表3)。

1.2.2 抗旱性评价方法

选取健康、生长状况基本一致的7种杜鹃花各5盆,充分浇水,待自然落干15 min,测定土壤含水量为25%,此后试验期间不再浇水。分别在0、10、20、30、40、50、60 d测量土壤含水量,分别为25%、20%、17%、13%、10%、7%、5%。随机选取中部成熟叶片用于相关生理指标测定,重复3次。

参照张平等^[16]的测定方法,采用分光光度法测定叶绿素含量,采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含

量,采用酸性茚三酮法测定脯氨酸(Pro)含量,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量,采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性。采用Excel 2010和SPSS 26.0对试验数据进行统计和方差分析,采用Origin 2021绘图。

1.2.3 杂交亲和性研究方法

参照熊文艳等^[17]的杂交方法,基于观赏评价和抗旱性评价,从7种杜鹃花中筛选出观赏价值较高、抗旱性较强的锦绣杜鹃、映山红和马缨杜鹃作为父本,以大理苍山植物园的大白杜鹃、马缨杜鹃、锦绣杜鹃作为母本,于开花前对母本去雄,待柱头有黏液渗出时进行授粉,授粉后套袋,定期观察授粉花朵子房变化,3个月后统计坐果率。

参照郑硕理等^[10]的方法,以杂交试验获得的F1代种子及父本、母本种子为材料,用500 mg·L⁻¹ GA₃+200 mg·L⁻¹ NAA浸泡24 h后,用无菌水冲洗干净待用,随后用1.5%NaClO溶液消毒10 min,再用75%乙醇浸泡洗涤30 s,无菌水冲洗5次,均匀

表2 综合评价指标体系结构模型
Table 2 Structural model of comprehensive evaluation index system

目标层(A) Target layer	约束层(C) Restraint layer	标准层(P) Typical floor	最低层(D) The lowest level
7种杜鹃花观赏价值评价 Evaluation of the ornamental value of seven <i>Rhododendron</i> species	C1 花观赏性 Floral ornamental value	P1 花冠直径 Corolla diameter	
		P2 花冠形状 Corolla shape	
		P3 花形 Flower shape	
		P4 花序数量 The number of inflorescences	
		P5 花丰满度 Flowers fullness	
		P6 花期 Flowering period	
		P7 开花时间 Flowering duration	D1 大白杜鹃 <i>R. decorum</i> D2 马缨杜鹃 <i>R. delavayi</i> D3 红马银花 <i>R. vialii</i> D4 映山红 <i>R. simsii</i> D5 锦绣杜鹃 <i>R. × pulchrum</i> D6 兴安杜鹃 <i>R. dauricum</i> D7 羊躑躅 <i>R. molle</i>
		P8 花香 Floral fragrance	
	C2 整体观赏性 Overall plant aesthetic merit	P9 株形 Plant shape	
		P10 叶形 Leaf morphology	
		P11 叶色 Leaf coloration	
		P12 叶丰满度 Leaf fullness	
	C3 园林应用潜力 Landscape application potential	P13 绿期 Foliage retention period	
		P14 资源丰富度* Resource abundance	
		P15 应用现状* Current application status	
		P16 特有性* Rarity of variety	

注:*.查阅资料获得的数据。

Note:*. The reference data.

接种于WPM固体培养基,于25℃下培养。播种后每天观察记录种子发芽情况,记录发芽数量,持续观察4周。

2 结果与分析

2.1 7种杜鹃花的观赏性评价结果

根据表4可知,综合价值较高的品种为锦绣杜鹃、映山红和马缨杜鹃,综合得分均大于3.5。锦绣杜鹃的园林应用潜力评分最高,应用范围最广,资源丰富度较高,株形紧凑,花叶丰满度高,综合

得分最高;映山红观赏性评分最高,花为鲜艳的正红色,花叶丰满度高,资源丰富,综合得分排名第2;马缨杜鹃花序数量最多、花色鲜红,整体观赏性评分最高,综合得分排名第3。

2.2 干旱胁迫下7种杜鹃花的生理响应

2.2.1 叶片叶绿素含量变化

随着干旱胁迫程度的加剧,大白杜鹃、红马银花和映山红叶绿素含量呈先增加后减少的趋势,其中,大白杜鹃在第40天时达到峰值,红马银花和映山红在第30天达到峰值,分别比对照增加

表3 评价指标的评分标准
Table 3 Scoring standards for specific evaluation indicators

标准层(P) Typical floor	1分 Score 1	2分 Score 2	3分 Score 3	4分 Score 4	5分 Score 5
P1	<1 cm	1~3 cm	3~5 cm	5~7 cm	>7 cm
P2	花小而无特色 Small and unremarkable flowers	斜漏斗形 Oblique funnel-shaped	阔漏斗形 Broad funnel-shaped	管状,钟形 Tubular and campanulate	花形奇特,如筒状 Unique forms (cylindrical)
P3	色彩暗淡等不明显的颜色 Dull or inconspicuous colors	粉、浅粉等较为常见色 Common colors (pink, light pink)	白色 White	红、紫红等较为鲜艳色 Vivid colors (red, purple-red)	绿色、黄色等少见色 Uncommon colors (green, yellow)
P4	1~2朵 1-2 flowers	2~5朵 2-5 flowers	6~10朵 6-10 flowers	11~15朵 11-15 flowers	15朵以上 15 flowers or more
P5	<30%	30%~40%	50%~60%	70%~80%	>80%
P6			春季 Spring	夏季 Summer	一年多季或秋季 Multiple seasons per year or autumn
P7	10~20 d	20~30 d	30~40 d	40~50 d	60~70 d
P8	异味 Unpleasant odor	无味 Odorless	清香 Light fragrance	香 Fragrance	浓香 Strong fragrance
P9	松散 Loose	较松散 Moderately loose	一般 Average	较紧凑 Moderately compact	紧凑 Compact
P10	小叶形,叶片长度<3 cm Small leaf shape, blade length <3 cm	卵形,叶片长度3~5 cm Oval, blade length 3-5 cm	披针形,叶片长度6~10 cm Lanceolate, blade length 6-10 cm	椭圆形,叶片长度10 cm Elliptical, blade length >10 cm	叶形奇特,如基部心形等 Unique leaf shape (cordate base)
P11	叶色发黄且冬季落叶 Deciduous with yellow leaves in winter	叶色发黄 Yellowish leaves	叶色较淡,但常绿 Pale green but evergreen	叶色浓绿、有光泽 Dark green and glossy	叶色浓绿有光泽,冬季有变色 Dark green glossy with color change in winter
P12	<40%	40%~50%	50%~60%	70%~80%	>80%
P13	落叶 Deciduous	半常绿 Semi-evergreen	常绿 Evergreen		
P14	稀有 Rare	少 Scarce	较少 Moderately abundant	较丰富 Abundant	丰富 Very abundant
P15	无 None	少 Limited	较少 Moderate	广 Wide	极广 Extensive
P16	非特有种 Non-endemic		中国特有 Endemic to China		云南特有 Endemic to Yunnan

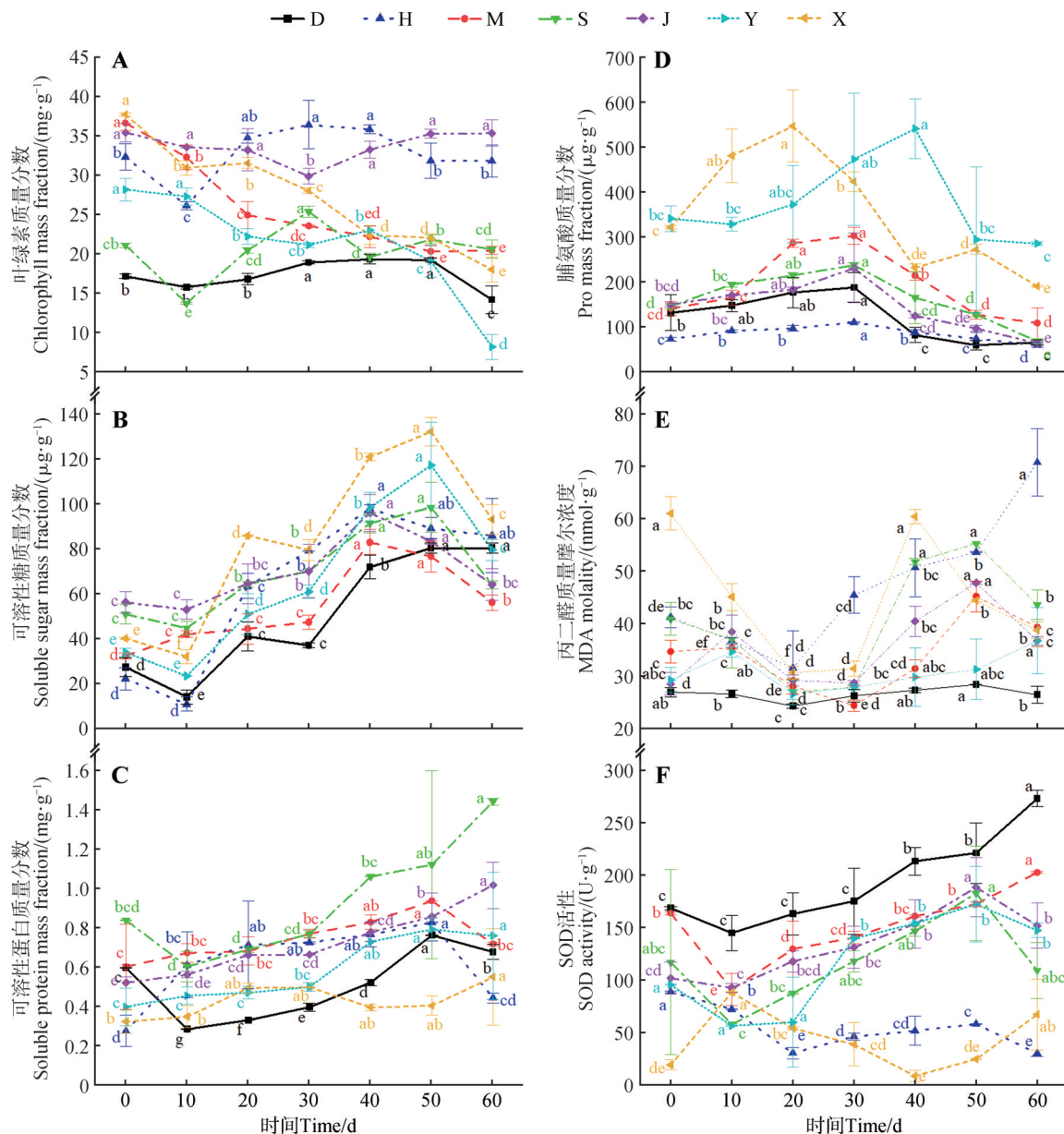
表4 7种杜鹃花的综合评价及排序
Table 4 Comprehensive evaluation and ranking of seven *Rhododendron* species

种名 Species	C1花观赏性 Flower ornamental value	C2整体观赏性 Overall ornamental value	C3园林应用潜力 Landscape application potential	综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
大白杜鹃 <i>R. decorum</i>	1.803 1	0.327 9	1.003 6	3.134 6	5
马缨杜鹃 <i>R. delavayi</i>	2.303 4	0.395 8	0.846 1	3.545 2	3
红马银花 <i>R. vialii</i>	1.775 8	0.313 8	0.317 6	2.407 2	6
映山红 <i>R. simsii</i>	2.586 2	0.252 3	0.991 1	3.829 6	2
锦绣杜鹃 <i>R. × pulchrum</i>	2.377 1	0.350 8	1.174 7	3.902 7	1
兴安杜鹃 <i>R. dauricum</i>	1.571 5	0.180 6	0.620 2	2.372 3	7
羊躑躅 <i>R. molle</i>	2.508 9	0.280 6	0.462 7	3.252 2	4

12.67%、12.65%、20.43%。其余4种杜鹃花的叶绿素含量均呈下降趋势,且不同品种间叶绿素含量及其变化均差异显著。降幅较大的有羊蹄躅、兴安杜鹃和马缨杜鹃,其中,羊蹄躅和兴安杜鹃都在第60天降到最低值,马缨杜鹃在胁迫第50天时降到最低值,分别比对照低71.04%、52.33%、44.28%。锦绣杜鹃在干旱胁迫第30天时到达最低值,比对照降低15.69%(图1A)。

2.2.2 叶片渗透调节物质含量变化

随着干旱胁迫程度的加剧,7种杜鹃花可溶性糖含量整体呈先增加后减少的趋势,且40~50 d达到峰值,且与对照差异显著。其中,增幅最大的为红马银花,比对照增加302.03%;其次是羊蹄躅、兴安杜鹃、大白杜鹃、马缨杜鹃和映山红;增幅最低的是锦绣杜鹃,仅比对照增加了71.03%(图2B)。7种杜鹃花可溶性蛋白含量整体呈上升趋势。其



D. 大白杜鹃; H. 红马银花; M. 马缨杜鹃; S. 映山红; J. 锦绣杜鹃; Y. 羊蹄躅; X. 兴安杜鹃。不同小写字母表示相同品种叶片参数在不同处理时间之间差异显著 ($P < 0.05$)。

D. *R. decorum*; H. *R. vialii*; M. *R. delavayi*; S. *R. simsii*; J. *R. × pulchrum*; Y. *R. molle*; X. *R. dauricum*. Different lowercase letters indicated significant differences in leaf parameter of the same species between different treatment days ($P < 0.05$).

图2 干旱胁迫对7种杜鹃花叶片生理指标的影响

Fig.2 Effects of drought stress on physiological parameters in leaves of seven *Rhododendron* species

中,增幅最大的是红马银花,在胁迫第50天时达到峰值,此时比对照增加206.13%;其次是羊蹄躅、锦绣杜鹃、映山红、马缨杜鹃和兴安杜鹃;增幅最小的是大白杜鹃,在胁迫第50天时仅比对照增加27.72%(图2C)。随干旱胁迫时间的延长,7种杜鹃花Pro含量整体呈先增加后降低的趋势。其中,增幅最大的是马缨杜鹃,在胁迫第30天时达到峰值,此时比对照增加115.35%;其次是兴安杜鹃、映山红、羊蹄躅、锦绣杜鹃和红马银花;增幅最小的为大白杜鹃,在胁迫第30天时达到峰值,此时仅比对照增加43.22%(图2D)。

2.2.3 叶片MDA含量变化

随着干旱胁迫时间的延长,7种杜鹃花MDA含量整体呈先减少后增加的趋势。其中,红马银花在胁迫60d时达到最大值,为对照的171.79%;其次是锦绣杜鹃、映山红、马缨杜鹃,都在胁迫50d时达到最大值,分别为对照的167.67%、135.16%、130.11%(图2E)。在干旱胁迫后期,除红马银花

和羊蹄躅外的5种杜鹃花叶片MDA含量又有所下降。

2.2.4 叶片SOD活性变化

在干旱胁迫初期,除兴安杜鹃外的6种杜鹃花SOD活性均有所下降,随着干旱胁迫时间的延长,SOD活性转为上升,与对照整体差异显著。其中,增幅较大的是映山红、锦绣杜鹃、羊蹄躅,均在胁迫第50天时达到最大值,分别为对照的185.51%、184.52%、177.65%;增幅较小的是大白杜鹃和马缨杜鹃,均在胁迫第60天时达到最大值,分别为对照的145.02%、123.77%。红马银花SOD活性始终低于对照(图2F)。

2.3 7种杜鹃花的抗旱性综合评价

隶属函数分析结果(表5)表明,干旱胁迫下,锦绣杜鹃抗旱隶属函数值最高,为0.619;大白杜鹃抗旱隶属函数值最低,为0.260。由此得出,7种杜鹃花的抗旱性排名为锦绣杜鹃>映山红>兴安杜鹃>红马银花>马缨杜鹃>羊蹄躅>大白杜鹃。

表5 7种杜鹃花各项生理指标的抗旱隶属函数值及排名

Table 5 The drought resistance membership function values and their rankings of physiological indicators of seven *Rhododendron* species

种名 Species	隶属函数值 Membership function values							排名 Ranking
	叶绿素含量 Chlorophyll content	可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	脯氨酸含量 Proline content	MDA含量 MDA content	SOD活性 SOD activity	平均值 Average value	
大白杜鹃 <i>R. decorum</i>	0.032	0.016	0.345	0.047	0.123	1.000	0.260	7
马缨杜鹃 <i>R. delavayi</i>	0.576	0.221	0.643	0.261	0.423	0.701	0.471	5
红马银花 <i>R. Vialii</i>	0.803	0.333	0.396	0.339	1.000	0.138	0.501	4
映山红 <i>R. simsii</i>	0.161	0.571	0.971	0.610	0.588	0.408	0.552	2
锦绣杜鹃 <i>R. × pulchrum</i>	0.873	0.566	0.596	0.569	0.520	0.588	0.619	1
兴安杜鹃 <i>R. dauricum</i>	0.667	0.796	0.094	0.729	0.713	0.130	0.521	3
羊蹄躅 <i>R. molle</i>	0.351	0.391	0.425	0.394	0.335	0.446	0.390	6

2.4 杜鹃花杂交亲和性分析

本研究共进行了7个杂交组合的授粉(表6),其中有4个杂交组合坐果,分别是马缨杜鹃×映山红、大白杜鹃×马缨杜鹃、大白杜鹃×映山红、马缨杜鹃×锦绣杜鹃,坐果率分别为27.27%、18.18%、

10.00%、5.00%。

由表7可知,3个杂交子代的种子发芽率和发芽势整体差异显著。大白杜鹃×马缨杜鹃杂交后代的发芽率为81.73%,与其亲本无显著差异;发芽势为59.19%,显著高于母本;萌发高峰期晚于大白

杜鹃和马缨杜鹃,萌发时滞比亲本晚 1 d。马缨杜鹃×映山红杂交子代的发芽率为 100.00%,显著高于父本;发芽势为 34.95%,显著低于父本;萌发高峰期比马缨杜鹃迟 1 d,比映山红早 5 d;萌发时滞与马缨杜鹃相同,比映山红早 2 d。大白杜鹃×映

山红的杂交后代发芽率为 39.47%,显著低于亲本;发芽势为 26.32%,显著低于父本;萌发高峰期比母本晚 9 d,比父本晚 3 d;萌发时滞比母本晚 3 d,比父本晚 1 d。3 个杂交子代的发芽持续时间均高于亲本。

表 6 7 个杜鹃花杂交组合坐果率

Table 6 Fruit setting rate of seven *Rhododendron* hybrid combinations

亲本(♀×♂) Parents	授粉花朵数量 Number of pollinated flowers	坐果数量 Number of fruit setting	坐果率 Fruit setting rate/%
马缨杜鹃×映山红 <i>R. Delavayi</i> × <i>R. simsii</i>	110	30	27.27
马缨杜鹃×锦绣杜鹃 <i>R. Delavayi</i> × <i>R. × pulchrum</i>	200	10	5.00
锦绣杜鹃×马缨杜鹃 <i>R. × pulchrum</i> × <i>R. Delavayi</i>	205	0	0
锦绣杜鹃×映山红 <i>R. × pulchrum</i> × <i>R. simsii</i>	85	0	0
大白杜鹃×马缨杜鹃 <i>R. Decorum</i> × <i>R. Delavayi</i>	99	18	18.18
大白杜鹃×映山红 <i>R. Decorum</i> × <i>R. simsii</i>	100	10	10.00
大白杜鹃×锦绣杜鹃 <i>R. Decorum</i> × <i>R. × pulchrum</i>	130	0	0

表 7 杜鹃花杂交后代与亲本种子萌发情况

Table 7 Germination of hybrid offspring and parent seeds of *Rhododendron* species

种(♀×♂) Species	发芽率 Percentage of germination/%	萌发高峰期 Germination peak/d	发芽势 Germinability/%	萌发时滞 Germination time lag/d	发芽持续时间 germination duration/d
大白杜鹃 <i>R. decorum</i>	89.84±8.82 ^{ab}	13.00±0 ^d	34.20±9.69 ^{bc}	13.00±0 ^c	9.00±2.00 ^{cd}
马缨杜鹃 <i>R. delavayi</i>	89.50±12.00 ^{ab}	13.00±0 ^d	50.30±15.05 ^{ab}	13.00±0 ^c	7.00±1.15 ^d
映山红 <i>R. simsii</i>	68.04±15.14 ^b	19.00±1.15 ^b	66.65±14.18 ^a	15.00±0.58 ^b	10.00±1.73 ^{bc}
马缨杜鹃×映山红 <i>R. delavayi</i> × <i>R. simsii</i>	100.00±0 ^a	14.00±0.58 ^{cd}	34.95±4.97 ^{bc}	13.00±0 ^c	12.00±0 ^{ab}
大白杜鹃×马缨杜鹃 <i>R. decorum</i> × <i>R. delavayi</i>	81.73±13.91 ^{ab}	16.00±1.15 ^c	59.19±13.03 ^a	14.00±0.58 ^b	12.00±1.15 ^{ab}
大白杜鹃×映山红 <i>R. decorum</i> × <i>R. simsii</i>	39.47±0 ^c	22.00±2.08 ^a	26.32±0 ^c	16.00±0 ^a	13.00±1.00 ^a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: The data in the table were mean±standard deviation; different lowercase letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 7种杜鹃花的观赏性评价

本研究的评价体系参考了相关文献^[18],并充

分考虑了云南农业大学杜鹃花种质资源库现有 7 种杜鹃花的性状特点。本研究中,杜鹃花整体观赏性权重低于 10%,花观赏性权重约占 70%,得分差值主要体现在花观赏性层面,而花观赏性中花

丰满度和花色总权重最高,二者之和接近 50%,其次是花冠形状、开花时间,最后是花序数量、花径、花期、花香。根据综合得分对 7 种杜鹃花观赏价值排序,排名前 2 位的是锦绣杜鹃和映山红(>3.8 分),2 种杜鹃花花朵覆盖整个植株的 70% 以上,花色鲜艳,花丰满度和花色指标得分均为 4~5 分。马缨杜鹃整体观赏性最高,综合排名第 3。排名最后的是红马银花和兴安杜鹃(<2.5 分),兴安杜鹃浅紫色花朵,花径小,花丰满度低于 40%,花序数量低于 4 朵;红马银花花丰满度也低于 40%,花径小,花序数量也少。综合评价结果为适应性强、花丰满度高、花色纯正鲜艳的杜鹃花综合评分高。

3.2 7 种杜鹃花的抗旱性评价

叶绿素是植物光合作用不可或缺的关键色素之一^[19]。干旱胁迫会使叶绿素的合成速度减缓,而分解速度却相对加快,这会导致叶绿体结构发生损坏,叶绿素降解^[20]。本研究中,锦绣杜鹃、红马银花、兴安杜鹃叶绿素含量比其他品种高,且在干旱胁迫下下降幅度比其他品种小,这与高晓宁等^[21]的研究结果相符。映山红叶绿素含量整体处于较低水平,兴安杜鹃叶绿素含量降幅较大,可能是试验期间正值映山红和兴安杜鹃叶片变色期,对叶绿素含量影响较大。

干旱胁迫下,可溶性糖、可溶性蛋白和 Pro 等代谢物质可以调节植物细胞渗透压平衡,增强植物组织的抗脱水能力,提高植物的保水能力,因此,常作为反映植物抗旱能力的指标^[22]。本研究中,7 种杜鹃花叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和 Pro 含量随着干旱胁迫时间的增加而增加,与李畅等^[23]的研究结果基本一致。

在干旱胁迫下,植株体内膜脂过氧化作用加剧,这会引起 MDA 含量的增加,同时激活清除活性氧的保护酶系统,以清除体内产生的活性氧^[24]。本研究中,干旱胁迫下大白杜鹃 MDA 含量增幅最小,红马银花 MDA 含量增幅最大。在干旱胁迫过程中,7 种杜鹃花的 MDA 含量均出现了不同程度下降,由此可见,MDA 含量的变化可能反映了植物对干旱胁迫的自身调节与应激反应的平衡,这与鱼泳^[25]、马进艳^[26]的研究结果一致。

SOD 是重要的抗氧化酶,其活性高低影响逆境下叶绿素和蛋白质的降解速度,以及细胞膜受伤害程度^[27]。本研究中,大白杜鹃、马缨杜鹃、映

山红、锦绣杜鹃、羊蹄躅的 SOD 活性总体上随干旱胁迫时间的延长而升高,这与杜少波等^[28]的研究结果基本一致。干旱胁迫下,锦绣杜鹃和映山红 SOD 活性增幅最大,大白杜鹃和马缨杜鹃 SOD 活性增幅较小,这说明 SOD 能在一定程度上反映植物的耐旱性。

植物的抗旱机制复杂多样,在遭受干旱胁迫后会发生一系列生理生化反应,不能只用单一指标来衡量^[29]。本研究根据叶绿素、可溶性糖等 6 个指标的测定结果综合评价 7 种杜鹃花的抗旱性,结果显示,锦绣杜鹃抗旱性最强,映山红、兴安杜鹃次之,这与邹卉^[30]对映山红的研究结果一致。

3.3 杂交亲和性

马缨杜鹃×映山红杂交组合坐果率为 27.27%,大白杜鹃×映山红杂交组合坐果率为 10.00%,表明常绿杜鹃亚属和落叶的映山红亚属之间存在一定的杂交亲和性,这与郑硕理等^[10]的研究结果一致。锦绣杜鹃无论作为父本还是作为母本均无杂交亲和性,锦绣杜鹃与映山红同属映山红亚属,但与映山红相比,其杂交亲和性较差,映山红与常绿杜鹃亚属的大白杜鹃和马缨杜鹃都有一定的杂交亲和性,证明了映山红亚属与常绿杜鹃亚属的杂交是可行的;而锦绣杜鹃杂交不亲和的原因有待进一步研究。同为常绿杜鹃亚属的大白杜鹃×马缨杜鹃杂交组合坐果率为 18.18%,而庄平^[11]对 23 种常绿杜鹃亚属植物种间杂交可育性的研究表明,常绿杜鹃亚属内异种杂交具有很高的可育性,本研究的结果与之差异较大。3 个杂交组合的发芽率存在较大差异,马缨杜鹃和映山红为不同亚属,马缨杜鹃×映山红发芽率为 100.00%,远高于亲本种子的发芽率,大白杜鹃×映山红发芽率为 39.47%,显著低于父本、母本,可见亲缘关系最近的杜鹃花种类更容易产生可育的杂交后代。

4 结论

本研究通过层次分析法、干旱胁迫下的表型观测与生理指标测定、杂交试验和种子萌发试验系统评估了 7 种杜鹃花的观赏性、抗旱性及杂交亲和性。层次分析结果表明,花观赏性、整体观赏性、园林应用潜力综合排名前 3 位的分别是锦绣杜鹃、映山红、马缨杜鹃;抗旱性评价显示,抗旱性由强到弱的杜鹃花依次为锦绣杜鹃、映山红、兴安杜鹃、红马银花、马缨杜鹃、羊蹄躅、大白杜鹃。杂交

试验和种子萌发试验结果表明,锦绣杜鹃与马缨杜鹃、大白杜鹃之间均无杂交亲和性,映山红与马缨杜鹃之间有较高的坐果率,且其后代种子发芽率为100.00%,可见常绿杜鹃亚属与映山红亚属之间存在较好的杂交亲和性。锦绣杜鹃观赏价值高、抗性佳,在城市园林景观绿化建设中有着重要地位。映山红和马缨杜鹃的观赏价值较高、抗性较强且杂交亲和,在推动优质杜鹃花园林应用和良种选育有一定优势。因此,园林景观中可适当推广锦绣杜鹃、映山红和马缨杜鹃的应用,丰富杜鹃花景观多样性,充分开发利用杜鹃花资源。

参 考 文 献

- [1] 刘德团,常宇航,马永鹏.本底资源不清严重制约我国杜鹃花属植物的生物多样性保护[J].植物科学学报,2020,38(4):517-524.
- LIU D T, CHANG Y H, MA Y P. Unclear resource background seriously restricts biodiversity conservation of *Rhododendron* in China[J]. Plant Science Journal, 2020, 38(4): 517-524.
- [2] 李婧,汤升虎,童琪,等.杜鹃属植物及在园林景观中的应用[J].现代园艺,2020,43(15):66-68.
- LI J, TANG S H, TONG Q, et al. *Rhododendron* species and its application in garden landscape[J]. Contemporary Horticulture, 2020, 43(15): 66-68.
- [3] 李婧,童琪,汤升虎,等.贵州省植物园杜鹃属植物引种初报[J].农业与技术,2021,41(11):5-7.
- LI J, TONG Q, TANG S H, et al. Preliminary introduction of *Rhododendron* in the Botanical Garden of Guizhou Province[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(11): 5-7.
- [4] POPESCU R, KOPP B. The genus *Rhododendron*: an ethnopharmacological and toxicological review[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2013, 147(1): 42-62.
- [5] KREBS S L. *Rhododendron* [J]. Ornamental Crops, 2018: 673-718.
- [6] ZHAO Y, HUO B J, LIN S S, et al. Germplasm innovation and establishment of comprehensive evaluation system for hedgerow garden chrysanthemum [J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1736.
- [7] 李丹丹,李晓花,张乐华.杜鹃花属植物干旱胁迫研究进展[J].广西植物,2022,42(4):700-713.
- LI D D, LI X H, ZHANG L H. Research progress of drought stress on *Rhododendron* [J]. Guihaia, 2022, 42(4): 700-713.
- [8] 齐鸣,王俊,张明,等.5种杜鹃对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J].江西农业学报,2022,34(10):52-58.
- QI M, W J, ZHANG M, et al. Physiological response to drought stress and drought resistance evaluation of five azalea varieties [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(10): 52-58.
- [9] ANISKO T, LINDSTROM O M. Cold hardiness and water relations parameters in *Rhododendron* cv. *catawbiense* Boursault subjected to drought episodes [J]. Physiologia Plantarum, 1996, 98(1): 147-155.
- [10] 郑砾理,易陈燃,刘巧,等.云南几种杜鹃杂交育种初探[J].云南农业大学学报(自然科学),2016,31(6):1052-1057.
- ZHENG S L, YI C R, LIU Q, et al. Primary study on hybridization breeding among several *Rhododendron* species in Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2016, 31(6): 1052-1057.
- [11] 庄平.32种杜鹃花属植物亚属间杂交的可育性研究[J].广西植物,2018,38(12):1566-1580.
- ZHUANG P. Cross fertility of inter-subgen. *Rhododendron* of 32 *Rhododendron* species [J]. Guihaia, 2018, 38(12): 1566-1580.
- [12] GENG X M, YANG Q Y, YUE Y, et al. Effects of high temperature on photosynthesis, membrane lipid peroxidation and osmotic adjustment in four *Rhododendron* species [J]. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 2019, 64(1): 33-38.
- [13] 周丹丹.神农架杜鹃花属种质资源收集与评价[D].武汉:华中农业大学,2022.
- ZHOU D D. Collection and evaluation of *Rhododendron* germplasm resources in Shennongjia [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [14] 耿玉英.中国杜鹃花解读[M].北京:中国林业出版社,2008.
- GENG Y Y. Interpretation of Chinese *Rhododendron* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008.
- [15] 夏红霞,刘李岚,周徐平,等.基于层次分析法的九寨沟震后裸岩边坡覆绿适用苔藓筛选[J].植物研究,2023,43(4):540-549.
- XIA H X, LIU L L, ZHOU X P, et al. Selection of suitable mosses for bare rock and steep slope greening after Jiuzhaigou earthquake based on the analytic hierarchy process [J]. Bulletin of Botanical Research, 2023, 43(4): 540-549.
- [16] 张平,张慧,刘俊娜,等.干旱及复水处理对抗旱性不同小麦品种/系苗期生理生化指标的影响[J].西北农业学报,2020,30(12):1795-1802.
- ZHANG P, ZHANG H, LIU J N, et al. Effects of drought and re-watering treatment on physiological and biochem-

- ical indexes of different drought-resistant wheat varieties/lines at seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 30(12):1795-1802.
- [17] 熊文艳, 吴雅文, 白天, 等. 露珠杜鹃繁育系统及杂交亲和性[J]. *植物研究*, 2024, 44(3):370-379.
XIONG W Y, WU Y W, BAI T, *et al.* Breeding system and hybridization affinity of *Rhododendron irroratum*[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2024, 44(3):370-379.
- [18] 袁一波. 藏东南杜鹃花属植物种质资源评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
YUAN Y B. Evaluation of *Rhododendron* germplasm resources in southeast Tibet[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [19] ZULINI L, RUBINIGG M, ZORER R, *et al.* Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence and photosynthetic pigments in grapevine leaves (*Vitis vinifera* cv. 'White Riesling') [J]. *Acta Horticulturae*, 2007, 754: 289-294.
- [20] HAZRATI S, TAHMASEBI-SARVESTANI Z, MODARRRES-SANAVY S A M, *et al.* Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 106:141-148.
- [21] 高晓宁, 赵冰, 刘旭梅, 等. 4个杜鹃花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(4):597-607.
GAO X N, ZHAO B, LIU X M, *et al.* Physiological response to drought stress and drought resistance evaluation of four *Rhododendron* cultivars[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2017, 34(4):597-607.
- [22] 孟盼盼, 何海燕, 曹钰昕, 等. 5个栽培类型药菊分枝期抗旱性综合评价[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(2):90-99.
MENG P P, HE H Y, CAO Y X, *et al.* Comprehensive evaluation of 5 cultivation types of medicinal *Chrysanthemum morifolium* Ramat. at branching stage[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(2):90-99.
- [23] 李畅, 苏家乐, 刘晓青, 等. 旱涝交替胁迫对杜鹃花生理特性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(2):412-419.
LI C, SU J L, LIU X Q, *et al.* Effects of alternate flooding and drought stress on physiological characteristics in azalea [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(2):412-419.
- [24] DHINDSA R S, PLUMB-DHINDSA P, THORPE T A. Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1981, 32(1):93-101.
- [25] 鱼泳. 干旱胁迫对七种柳树生长及生理的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
YU Y. Effects of drought stress on growth and physiology of seven willow species[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [26] 马进艳. 西南特有植物大王杜鹃对干旱胁迫的响应机制研究[D]. 昆明: 云南大学, 2021.
MA J Y. Research on the response mechanism of *Rhododendron rex*, an endemic plant in southwest China, to drought stress[D]. Kunming: Yunnan University, 2021.
- [27] 郑颖. 6个新引进杜鹃品种的抗旱性评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
ZHENG Y. Drought resistance evaluation of six newly introduced *Rhododendron* varieties[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [28] 杜少波, 毛晓宁, 鄂崇毅, 等. 两种柳属植物在干旱胁迫下的生理响应研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 46(2):29-37.
DU S B, MAO X N, E C Y, *et al.* Physiological responses of two salix species to drought stress[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2025, 46(2):29-37.
- [29] 赵金花, 高佳荷, 伊如, 等. 3种葱属植物野生成年植株耐旱生理响应及综合性评价[J]. *草地学报*, 2025, 33(2):507-515.
ZHAO J H, GAO J H, YI R, *et al.* Comprehensive evaluation and physiological response to drought stress in three wild adult *Allium* L. species [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2):507-515.
- [30] 邹卉. 高温干旱协同胁迫对杜鹃幼苗生长及生理特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
ZOU H. Effects of high temperature and drought stress on physiological characteristics of *Rhododendron* seedling growth[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.