

土壤酸碱度对马缨杜鹃生长和生理指标的影响及适应性评价

张文亭^{1,2}, 曹洋^{1,2}, 代丽华¹, 曾松³, 田奥^{1*}, 张孙健^{1,2}

(1. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001; 2. 平塘喀斯特峰丛洼地生态系统贵州省野外科学观测研究站, 贵州 平塘 558300; 3. 贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要:为科学引种、栽培、管理和保护马缨杜鹃,以2年生实生苗为材料,设置土壤pH3、4、5、6、7、8的栽培试验,通过测定22个生长和生理指标,采用主成分分析和隶属函数法进行综合评价。结果表明,除芽长、相对地径增量和落叶数外,其他生长指标均随着土壤pH增加先升高后下降,且pH8处理最小。叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量均随着pH增加呈先减少后增加的趋势,SOD、CAT、POD活性和MDA、脯氨酸含量均在pH6处理最低,可溶性糖、可溶性蛋白含量在pH4处理最少。叶绿素a、叶黄素、总叶绿素含量均随土壤pH增大先增加后减少,叶绿素a、总叶绿素含量在pH5处理最多,叶黄素含量在pH7处理最多。净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T)均随pH增大先上升后下降,且在pH4~7处理均显著大于pH8处理;胞间CO₂浓度(C_i)在pH8处理最高。主成分分析结果表明,株高增量、气孔导度、蒸腾速率、叶绿素a含量、总叶绿素含量、净光合速率、MDA含量、CAT活性、POD活性和SOD活性等可作为反映马缨杜鹃生长的重要特征指标。基于隶属函数综合评价得出适于马缨杜鹃生长的土壤酸碱度排序为:pH4>pH5>pH3>pH6>pH7>pH8。

关键词:土壤pH;马缨杜鹃;幼苗生长;生理响应;主成分分析;隶属函数综合评价

中图分类号:S685.21

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2026)02-0054-09

Effects of Soil pH on Growth and Physiological Indexes of *Rhododendron delavayi* and Its Adaptability Evaluation

ZHANG Wenting^{1,2}, CAO Yang^{1,2}, DAI Lihua¹, ZENG Song³, TIAN Ao^{1*}, ZHANG Sunjian^{1,2}

(1. Institute of Mountain Resources of Guizhou Province, Guiyang 550001; 2. Pintang Karst Peak-cluster Depression Ecosystem Observation and Research Station of Guizhou Province, Pingtang 558300; 3. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to scientifically introduce, cultivate, manage, and protect *Rhododendron delavayi*, 2-year-old *R. delavayi* seedlings were used as materials in a cultivation experiment with different soil pH levels (3, 4, 5, 6, 7, 8). By measuring 22 growth and physiological indicators, comprehensive evaluation was carried out using principal component analysis and membership function analysis. The results showed that except for bud length, relative ground diameter increment, and defoliation number, all other growth indicators first increased and then decreased with increasing soil pH, reaching the minimum at pH 8 treatment. The activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD), as well as the contents of malondialdehyde (MDA), soluble protein, soluble sugar, and proline in leaves all showed a trend of decreasing first and then increasing with increasing pH. The activities of SOD, CAT, POD, and the contents of MDA and proline were the lowest at pH 6 treatment, while the contents of soluble sugar and soluble protein were the lowest at pH 4 treatment. The contents of chlorophyll a, lutein, and total chlorophyll first increased and then decreased with increasing soil pH. The contents of chlorophyll a and total chlorophyll were the highest at pH 5 treatment, while the lutein content was the highest at pH 7 treat-

收稿日期:2025-01-24

基金项目:国家自然科学基金项目(42101283);贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般275);贵州科学院青年博士基金项目(黔科院R字[2021]5号)

作者简介:张文亭(1996-),女,研究实习员,硕士,主要从事生态学、植物生理学研究。

通信作者:田奥, E-mail: tianao640249@126.com

ment. Net photosynthetic rate(P_n), stomatal conductance(G_s), and transpiration rate(T) all first increased and then decreased with increasing pH, and were significantly higher at pH 4 to 7 treatments than at pH 8 treatment; the intercellular CO_2 concentration(C_i) was the highest at pH 8 treatment. Principal component analysis indicated that plant height increment, stomatal conductance, transpiration rate, chlorophyll a content, total chlorophyll content, net photosynthetic rate, MDA content, CAT activity, POD activity, and SOD activity could serve as important characteristic indicators reflecting the growth and physiology of *R. delavayi*. Based on the membership function method analysis, the comprehensive evaluation ranking of soil pH suitable for the growth of *R. delavayi* was pH 4 > pH 5 > pH 3 > pH 6 > pH 7 > pH 8.

Key words: Soil pH; *Rhododendron delavayi*; Seedling growth; Physiological regulation; Principal component analysis; Subordinate function analysis

土壤酸碱度是土壤重要的化学性质,对植物生长发育具有重要影响^[1-4]。土壤过酸会加速有机质淋失,提高氧化铁活性,破坏土壤团聚体结构,加剧土壤养分流失^[4];土壤过碱则会使土壤黏重板结、通气透水性变差,易引发水土流失^[5]。植物适宜生长的pH多在6~8^[6-8]。杜鹃花是世界广泛分布的观赏花卉,也是典型的酸性土壤指示植物^[9],土壤酸碱度是影响杜鹃花生长发育的主要环境因子。贵州百里杜鹃景区是世界著名的杜鹃花自然生态景观区,野生杜鹃花种质资源丰富,具有较高的开发利用价值。马缨杜鹃(*Rhododendron delavayi*)作为景区优势树种,观赏价值高,深受游客喜爱^[10-11]。但近年来其种群出现明显衰退趋势,已被列为景区重点保护植物^[12-13],亟需开展相关研究,为马缨杜鹃的引种栽培和管理保护提供科学指导。

目前,关于杜鹃花逆境生理的研究已有大量报道,研究多集中在抗旱特性及生理机制方面^[14-16]。有研究发现,在pH5条件下,西鹃(*R. hybridum*)和毛鹃(*R. pulchrum*)扦插苗成活率最高、根系数量最多^[17]。鲜小林等^[18]采用不同酸碱度水溶液浇灌杜鹃花,发现在pH5.5条件下,叶绿素含量增加、细胞质膜透性降低,SOD和CAT活性升高,植株生长最为旺盛。陶巧静等^[19]在模拟酸雨胁迫对西洋杜鹃生长和生理的研究中发现,在pH4.3条件下,CAT、SOD活性最大,表明不同品种杜鹃花对不同酸碱度的敏感性和适应性存在差异。有研究指出,部分杜鹃花在pH9.5的土壤中仍可存活^[9]。段旭等^[20]研究指出,碱性土壤会导致马缨杜鹃叶片发黄、长势衰弱甚至死亡,并强调育苗时期需严格调控土壤酸碱度,但该研究未进一步开展对其生长及生理机制的探究。一方面,杜鹃花属植物对土壤酸碱变化具有一定生理适应能力,但马缨杜鹃具体的生长及生理适应机制仍不清楚;另一方面,现有研究中土壤pH梯度多设置在

2.0~6.5,偏碱性处理较少,无法全面掌握马缨杜鹃在不同酸碱度条件下的生长发育规律。植物的生长适应能力是一个受多种指标共同调控的复杂过程,对环境变化敏感,通过单一指标难以进行综合评价。通过隶属函数综合评价,结合主成分分析对多指标进行降维,提取关键综合变量,已广泛应用于多因素条件下植物抗逆性的综合评价^[21-22]。本研究以2年生马缨杜鹃实生苗为材料,设置土壤pH3、4、5、6、7、8的栽培试验,探究马缨杜鹃在不同酸碱度条件下的生长和生理变化,通过主成分分析和隶属函数法进行综合评价,筛选出马缨杜鹃生长的最适土壤酸碱度,进一步完善杜鹃花属植物对土壤酸碱度响应的理论体系,为马缨杜鹃合理种植、资源保护及引种推广提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

马缨杜鹃苗购自贵州省毕节市百里杜鹃万绿源种苗公司,选择大小及长势一致、无病虫害2年生实生苗(平均株高20.38 cm,平均地径5.11 mm)。

1.2 试验方法及指标测定

试验在温室大棚进行,以黄壤土:腐殖土=1:4的质量比配成基质(2 kg),测酸碱度为pH4.23,用柠檬酸和生石灰调节pH为3、4、5、6、7、8,共计6个处理,每个处理4次重复、每个重复5盆。

马缨杜鹃移栽21 d后,用卷尺测定芽长(芽痕至芽先端长度)。移栽后缓苗45 d,每7 d调节1次酸碱度,移栽5个月后测定相关指标。用卷尺测量株高(栽培基质表面至主茎顶端的距离);游标卡尺测量地径,相对株高、地径增量的计算参考周顺福等^[23]的方法。叶面积采用网格法进行测量^[24],在每个处理中随机选取5株测定新叶面积。目数法测定老叶数、新叶数、落叶数及总叶数。

超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定^[25],过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢还原法测定^[25],过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚显色法测定^[26],丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[27],光合色素含量采用酒精浸提法测定^[25],可溶性蛋白(Sp)含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定^[28],可溶性糖(Ss)含量采用蒽酮比色法测定^[27],脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮法测定^[27]。用 Li-6400 LI-COR 便携式光合仪测定光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理, SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析、主成分分析, Origin 2018 软件进行绘图, 利用隶属函数法进行综合评价^[29-30]。

隶属函数值:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), i = 1, 2, \dots, n。$$

式中, X_i 为所提取 i 主成分在不同处理上的综合得分, X_{\max} 和 X_{\min} 分别为 i 主成分得分的最大值

和最小值。

指标权重值:

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i, i = 1, 2, \dots, n。$$

式中, W_i 为第 i 个隶属函数的权重, P_i 为第 i 个主成分的贡献率,

综合评价值:

$$D = \sum_{i=1}^n [U(X_i) \times W_i], i = 1, 2, \dots, n。$$

式中, D 值为综合指标评价所得的综合评价价值。

2 结果与分析

2.1 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃生长的影响

由表 1 可知, 马缨杜鹃芽长、相对地径增量在各处理间均无显著差异变化。新叶数、总叶数分别在 pH4 和 pH5 处理显著高于 pH8 处理, 落叶数则相反。单叶面积与相对株高增量均随 pH 的升高呈先增加后减少的趋势, 综合分析表明, pH4 处理最适宜植株生长, pH8 处理各生长指标表现较差。

表 1 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃生长指标的影响

Table 1 Effects of different soil pH on the seedling growth of *R. delavayi*

处理 Treatment	芽长/cm Bud length	新叶数/片 Number of new leaves	总叶数/片 Total number of leaves	落叶数/片 Number of fallen leaves	单叶面积/cm ² Single leaf area	相对株高增量/% Relative plant height increment	相对地径增量/% Relative ground diameter increment
pH3	1.68±0.51a	9.85±0.70ab	21.85±1.02ab	2.25±0.83bc	37.50±2.17c	23.54±3.27c	12.59±2.04a
pH4	1.56±0.32a	11.15±1.47a	22.95±1.28a	1.94±0.30c	58.75±4.38a	30.21±2.29a	12.97±1.58a
pH5	1.60±0.16a	10.45±1.90ab	22.70±1.73a	1.80±0.37c	50.67±1.85b	29.76±3.32a	13.37±1.84a
pH6	1.63±0.47a	9.05±0.71ab	19.90±1.14bc	2.80±0.42bc	35.83±2.34c	29.96±3.68a	14.65±2.22a
pH7	1.28±0.36a	9.15±0.80ab	19.40±1.41bc	3.35±0.43ab	28.17±0.58d	27.17±3.96b	13.03±3.47a
pH8	1.20±0.35a	8.35±1.20b	18.95±1.81c	4.40±1.01a	18.92±0.68e	20.19±3.46c	12.12±2.32a

注: 小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

2.2 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃生理生化指标的影响

2.2.1 抗氧化能力

如图 1 所示, 马缨杜鹃叶片 SOD、CAT、POD 活性及 MDA 含量随土壤 pH 升高呈先降低后升高的趋势。SOD、CAT 活性在 pH3 处理均显著高于 pH6、7 处理; POD 活性在 pH3、4 处理均显著高于其他处理, pH6 处理显著低于其他处理; MDA 含量在 pH3 处理较高, pH6 处理最低。说明 pH 处理较低时, 膜脂过氧化加重、抗氧化酶被诱导增强, pH6 处理酶活性较低, 细胞生理状态趋于正常。

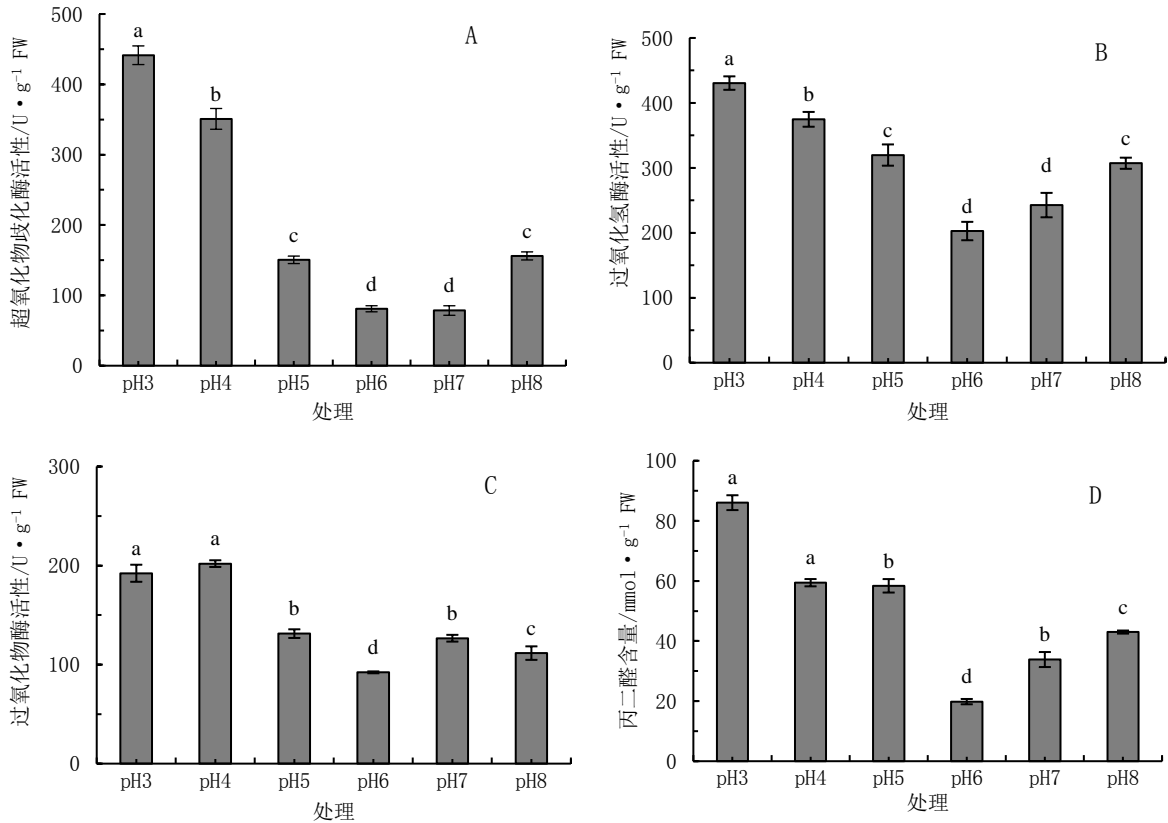
2.2.2 渗透调节系统

如图 2 所示, 随着土壤 pH 升高, 马缨杜鹃叶片的可溶性蛋白、可溶性糖含量均呈先减少后增加趋势, 在 pH3、8 处理均显著高于 pH4 处理。脯氨酸含量在 pH3 处理显著高于其他处理, pH6 处理则显著低于其他处理。土壤 pH 偏低和偏高, 可溶性蛋白、可溶性糖含量迅速积累, 且 pH 偏低时脯氨酸含量增加, 均是马缨杜鹃为维持细胞渗透平衡, 抵抗不良环境渗透胁迫的反应。

2.3 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃光合作用的影响

2.3.1 光合色素含量

如图 3 所示, 马缨杜鹃叶片叶绿素 a 和总叶绿



注:小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters indicate significant differences($P<0.05$), the same below.

图1 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃SOD、CAT、POD酶活性和MDA含量的影响

Fig. 1 Effects of different soil pH on antioxidative enzyme activities and MDA content in *R. delavayi* seedling

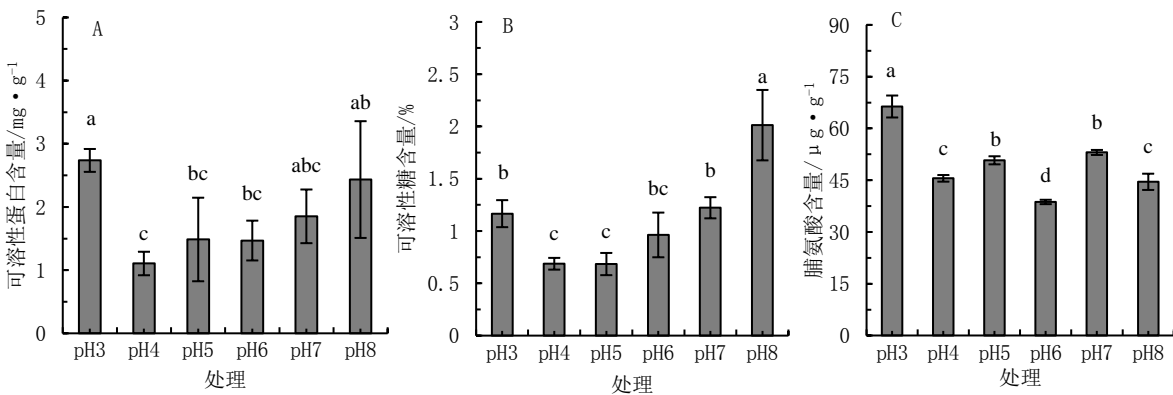


图2 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃渗透调节物质的影响

Fig. 2 Effects of different soil pH on osmotic regulating substances in *R. delavayi* seedling

素含量均随着 pH 升高呈先增加后减少的趋势,且 pH5 处理均显著高于 pH3、8 处理;叶绿素 b 含量在不同处理间无显著差异;叶黄素含量在 pH3、4、8 处理显著低于 pH7 处理。土壤酸碱度偏高和偏低均使叶绿素含量降低,进而影响正常的光合作用。

2.3.2 光合作用

如图 4 所示,随着 pH 升高,马缨杜鹃叶片净光合速率(P_n)呈先升高后降低的趋势,且 P_n 在 pH4、5、6 处理均显著高于 pH3、8 处理。气孔导度

(G_s)和蒸腾速率(T_r)均在 pH4 处理显著大于 pH3、8 处理。胞间 CO_2 浓度(C_i)在 pH8 处理显著高于其他处理。pH8 处理叶片对光照的吸收能力减弱,气孔与外界进行气体交换通道不畅通,影响叶片气体交换和光合速率。

2.4 马缨杜鹃对土壤碱性适应能力的综合评价

2.4.1 主成分分析

如表 2 所示,对 22 个指标进行主成分分析,提取特征根大于 1 的 3 个主成分,累计贡献率达

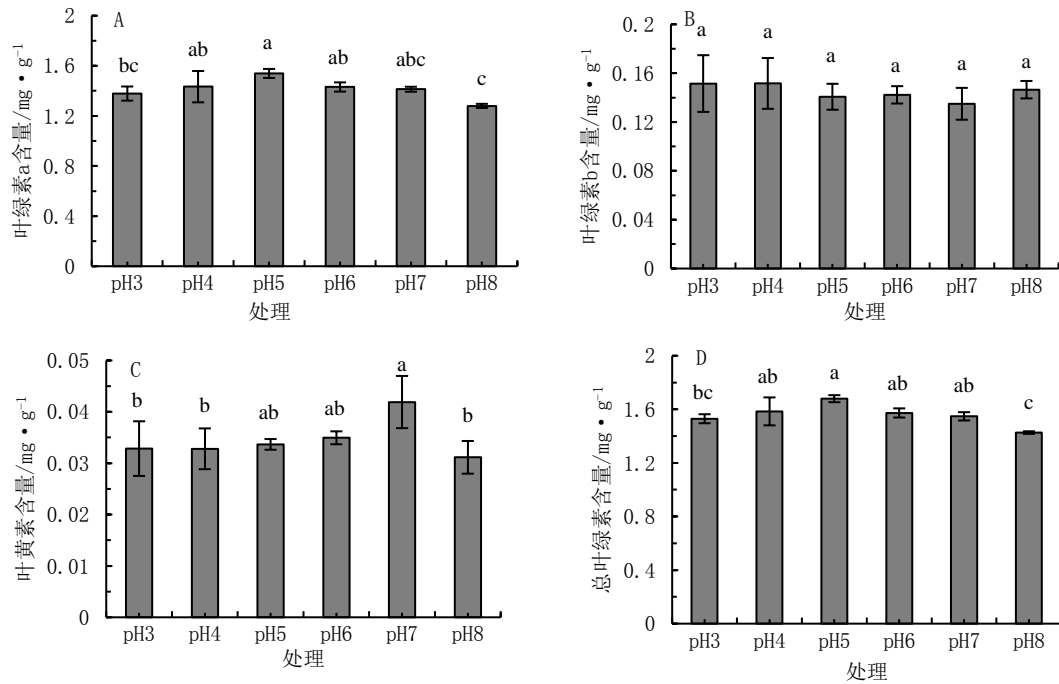


图3 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃叶绿素含量的影响

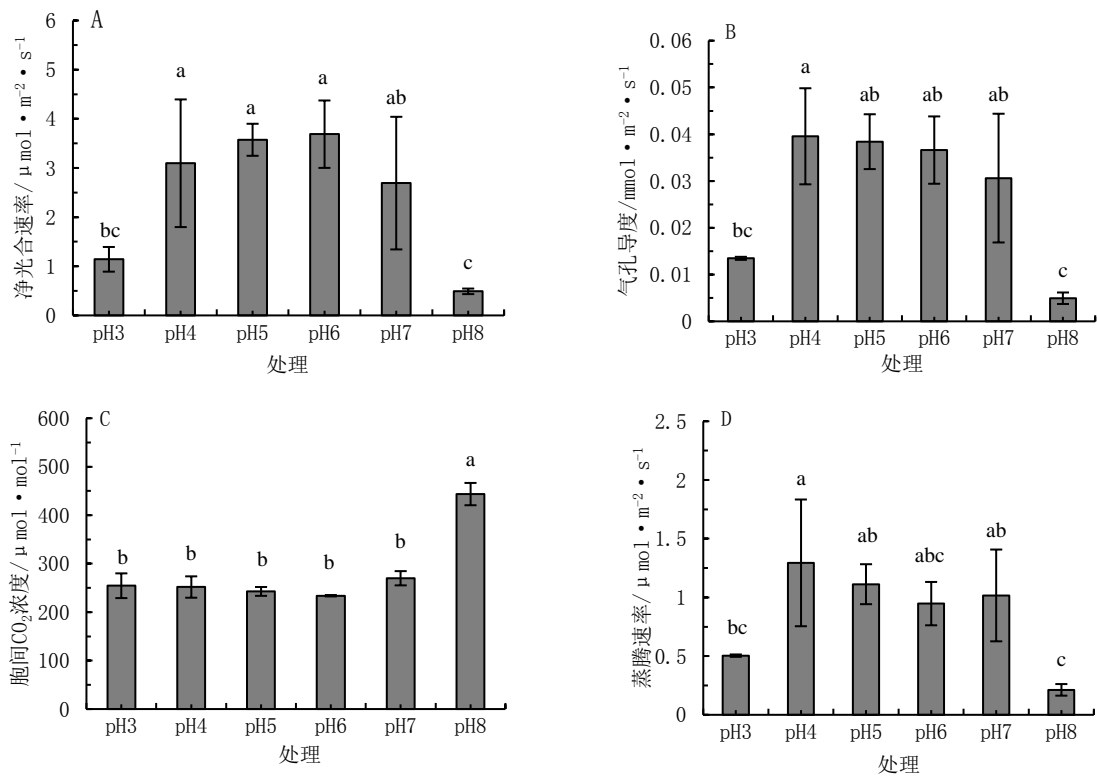
Fig. 3 Effects of different soil pH on chlorophyll content of *R. delavayi* seedling

图4 不同土壤酸碱度对马缨杜鹃光合参数的影响

Fig. 4 Effects of different soil pH on photosynthetic parameters of *R. delavayi* seedling

91.662%, 权重分别为 0.560、0.355、0.085, 主成分分析中载荷较高(>0.500)且为正值的测定指标中, 第1主成分(PC1)包括相对株高增量, 气孔导度和蒸腾速率; 第2主成分(PC2)包括MDA含量, CAT、

POD、SOD活性; 第3主成分(PC3)较高的是叶绿素b含量。

2.4.2 综合分析

由表3可知, $X_1 \sim X_3$ 分别为不同处理条件下所

表2 不同土壤酸碱度条件下马缨杜鹃生长和生理指标的主成分分析

Table 2 Principal component analysis of growth and physiological indicators of *R. delavayi* under different soil pH

指标 Index	主成分 Component			指标 Index	主成分 Component		
	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3
芽长	0.665	0.435	0.151	叶黄素含量	0.175	-0.311	-0.844
新叶数	0.769	0.532	0.232	总叶绿素含量	0.931	0.077	-0.168
总叶数	0.690	0.641	0.274	P_n	0.924	-0.366	-0.104
落叶数	-0.853	-0.499	-0.052	G_s	0.955	-0.251	-0.057
单叶面积	0.864	0.367	0.311	C_i	-0.868	-0.198	0.297
相对株高增量	0.971	-0.213	-0.028	T_r	0.932	-0.113	-0.084
相对地径增量	0.656	-0.530	-0.075	可溶性蛋白含量	-0.826	0.411	-0.236
SOD活性	0.003	0.913	0.325	可溶性糖含量	-0.980	-0.188	0.027
CAT活性	-0.073	0.951	0.280	脯氨酸含量	-0.161	0.855	-0.485
POD活性	0.210	0.869	0.206	特征根	11.298	7.158	1.709
MDA含量	-0.015	0.983	0.094	贡献率/%	51.356	32.538	7.767
叶绿素a含量	0.919	0.026	-0.220	累计贡献率%	51.356	83.895	91.662
叶绿素b含量	-0.117	0.628	0.725				

提取主成分的得分,所得隶属函数值 $U(X)$ 为 0~1, 当 $U(X)$ 值越接近于 1 时,马缨杜鹃的综合指标对土壤酸碱度适应性越强,反之越差。根据综合指

标评价所得的综合评价价值 (D 值) 进行排序,依次为: $pH4 > pH5 > pH3 > pH6 > pH7 > pH8$ 。

表3 不同土壤酸碱度条件下马缨杜鹃生长和生理指标的综合评价价值

Table 3 Comprehensive membership degree of growth and physiological indicators of *R. delavayi* seedlings under different soil pH

处理 Treatment	X_1	X_2	X_3	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	D 值 D value	排序 Ranking
pH3	-0.472	1.662	-0.340	0.463	1.000	0.463	0.651	3
pH4	0.864	0.437	1.185	0.969	0.579	1.000	0.828	1
pH5	0.946	0.120	-0.222	1.000	0.470	0.505	0.767	2
pH6	0.500	-1.250	0.243	0.831	0.000	0.668	0.519	4
pH7	-0.146	-0.468	-1.657	0.586	0.269	0.000	0.423	5
pH8	-1.692	-0.502	0.791	0.000	0.257	0.861	0.160	6

3 讨论与结论

土壤酸碱度对植物生长发育至关重要,适宜的土壤酸碱度能使植株拥有良好的生长态势,提高植物的观赏价值^[31-32]。植株的生长特征是植物对环境变化最直观的表现^[33]。本研究中,相对株高增量在 pH4、5、6 处理显著高于其他处理,且相对株高增量在综合评价中具有较大的得分系数。总叶片数在 pH4、5 处理最多,落叶则最少,反之, pH8 处理总叶数最少,落叶数最多;新叶数和单叶面积在 pH4 处理均显著高于 pH8 处理,这与陶巧

静和鲜小林等的研究结果相似,即在 pH5 左右的土壤中杜鹃生长较好。从表观指标看, pH4、5 较适宜马缨杜鹃生长;而中性及偏碱土壤,植株生长迟缓、叶片更新缓慢,叶片变小甚至脱落。

叶片是植物进化过程中可塑性最大的器官,是植物进行光合作用的重要场所,叶片的生理指标和光合特性反映植物自身生长状况及对环境适应能力^[34]。土壤酸碱度发生变化,植物叶片通过改变保护酶活性及保护物质的含量来适应环境。当植物生长环境发生变化,活性氧或氧自由基活性增强,膜质过氧化发生致植物受害产生

MDA^[35-36]。本研究中,马缨杜鹃叶片的MDA含量在pH3处理最高,pH6处理降至最低,后又明显回升。表明马缨杜鹃在强酸环境时,活性氧增加,膜脂过氧化产物MDA含量增加,叶片受害程度加重。同时,叶片抗氧化酶活性在pH3处理高于pH6处理,与MDA含量呈相似的变化趋势,抗氧化酶系统SOD、POD、CAT活性的作用是组织防御系统中活性氧清除,防止植物细胞被氧化损伤,三者协同作用可减缓细胞发生膜脂过氧化损伤。在综合评价第2主成分中SOD、CAT和POD活性指标有较大的得分系数,即土壤酸碱度偏低,马缨杜鹃叶片的抗氧化酶活性升高,抗性增强。植物生长环境变化,渗透物质也通过调节渗透压维持代谢平衡,确保植物正常生长;可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,渗透调节物质含量增加,有利于提高细胞的保水能力,加大对生物膜的保护作用^[37]。此外,脯氨酸对植物进行生长代谢活动所需的各类酶活性具有一定调节作用^[38]。本研究中,土壤酸碱度偏低和偏高时,叶片可溶性蛋白和可溶性糖在其体内迅速积累,提高马缨杜鹃在强酸和偏碱环境中细胞的保水能力,增强生物膜保护机制;脯氨酸含量与叶片抗氧化酶活性及MDA含量的变化趋势相似,体现了脯氨酸对抗氧化酶活性的保护和生理协同调节作用。

植物的光合作用是其生长发育的基础,很多研究将光合参数作为描述植物生长状态的重要参数^[39]。叶绿素含量的高低反映了叶绿体对光能吸收的能力,叶绿素含量下降,影响光合代谢,使净光合速率下降^[40]。本研究中,在土壤酸碱度偏低和偏高时,马缨杜鹃的叶绿素a、总叶绿素含量及光合参数 P_n 、 T_r 、 G_s 均较低,表明叶绿体对光能吸收能力较低,影响叶片进行光合作用。除了光能吸收能力外,光合作用也受气孔和水分等影响^[41-42]。依据Farquhar等^[43]的气孔限制型理论可知,当光合作用受气孔限制时, G_s 下降导致气孔关闭, C_i 降低, P_n 随之下降。本研究中,在pH8处理, C_i 最高, G_s 及 P_n 最低,此时光合作用较弱,消耗的 CO_2 减少,导致细胞间的 CO_2 大量积累, C_i 大幅增加。表明在偏碱环境下,马缨杜鹃叶片光合作用并非受气孔影响。此时 G_s 的降低与 T_r 关系密切,土壤偏碱性或限制了根系对水分的吸收能力,引起水分胁迫,为了降低水分胁迫, G_s 及 T_r 随之降低。因此在综合评价第1主成分中 G_s 、 P_n 和 T_r 有较大的得分系数和贡献率。

综上所述,要更好地了解马缨杜鹃的生长适应性,只采用单一的指标来判定是有片面性的。本研究使用隶属函数综合评价法,评价其生长适应能力,消除个别指标带来的片面影响。通过对马缨杜鹃22个相关指标主成分分析和隶属函数综合评价得出适于马缨杜鹃生长的土壤酸碱度排序为:pH4>pH5>pH3>pH6>pH7>pH8。由此可见,土壤pH4~5处理较适宜马缨杜鹃生长,该研究结果可为马缨杜鹃苗木繁殖、栽培及园林应用提供参考。

参考文献:

- [1] 肖蒙,秋新选,何忠俊,等.云南省森林土壤酸碱度现状及影响因素分析[J].甘肃农业大学学报,2021,56(1):142-148. XIAO M, QIU X X, HE Z J, et al. Study on the current situation and influencing factors of forest soil pH in Yunnan Province[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(1):142-148. (in Chinese)
- [2] ZHU H H, CHEN C, XU C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 99-106.
- [3] GU X D, ZHANG F J, XIE X W, et al. Effects of N and P addition on nutrient and stoichiometry of rhizosphere and non-rhizosphere soils of alfalfa in alkaline soil[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 12119-12119.
- [4] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263. ZHAO X Q, PAN X Z, MA H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(5): 1248-1263. (in Chinese)
- [5] 聂朝阳,杨帆,王志春,等.耕作协同物料添加对苏打盐碱化耕地土壤理化性质的影响[J].干旱地区农业研究,2023,41(1):235-243. NIE C Y, YANG F, WANG Z C, et al. Effects of tillage synergistic material addition on physical and chemical properties of cultivated sodic-saline soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 235-243. (in Chinese)
- [6] 唐琨,朱伟文,周文新,等.土壤pH对植物生长发育影响的研究进展[J].作物研究,2013,27(2):207-212. TANG K, ZHU W W, ZHOU W X, et al. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development[J]. Crop Research, 2013, 27(2): 207-212. (in Chinese)
- [7] 艾星梅,杨鹏,李煜,等.酸、碱、盐胁迫下千层金幼苗的生理指标变化研究[J].西部林业科学,2014,43(1):29-33. AI X M, YANG P, LI Y, et al. Variation of physiological indexes of *Melaleuca bracteata* seedlings under acid, alkali and salt stress[J]. Journal of West China Forestry Science, 2014, 43(1): 29-33. (in Chinese)
- [8] 田彦锋,白小明,张晓俊,等.4种野生早熟禾对土壤酸碱性的生理响应[J].草业科学,2017,34(12):2445-2453.

- TIAN Y F, BAI X M, ZHANG X J, et al. Physiological response of four wild *Poa* to soil pH[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(12): 2445–2453. (in Chinese)
- [9] 陆娟娟. 不同杜鹃品种耐碱能力比较研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [10] LIU D C, ZHANG Y, WANG S S, et al. Development and Characterization of 23 Microsatellite Loci for *Rhododendron ovatum* (Ericaceae)[J]. Applications in Plant Sciences, 2017(1): 1600106.
- [11] 吴倩楠, 董建文, 郑宇, 等. 百里杜鹃国家森林公园优势种生态位研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 175–180.
- WU Q N, DONG J W, ZHENG Y, et al. Niches of the main plant species in Baili Rhododendron National Forest Park[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2017, 41(2): 175–180. (in Chinese)
- [12] 张长芹, 黄承玲, 黄家勇, 等. 贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃花属种质资源的调查[J]. 植物分类与资源学报, 2015, 37(3): 357–364.
- ZHANG C Q, HUANG C L, HUANG J Y, et al. Investigation of germplasm resources of the Genus *Rhododendron* in Baili Nature Reserve in Guizhou[J]. Plant Diversity, 2015, 37(3): 357–364. (in Chinese)
- [13] 黄睿雪, 欧静, 王洪飞, 等. 百里杜鹃国家森林公园植物群落物种多样性及优势种生态位宽度对人为干扰的响应[J]. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1217–1226.
- HUANG R X, OU J, WANG H F, et al. Responses of plant species diversity and niche breadth of dominant species to human disturbance in Baili Rhododendron National Forest Park[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(5): 1217–1226. (in Chinese)
- [14] 李畅, 苏家乐, 刘晓青, 等. 杜鹃花不同品种的观赏性和耐旱性比较[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 138–142.
- LI C, SU J L, LIU X Q, et al. Comparison of ornamental and drought tolerance of different varieties of *Rhododendron*[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(22): 138–142. (in Chinese)
- [15] 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, WANG J, ZHANG M, et al. Physiological response to drought stress and drought resistance evaluation of five azalea varieties[J]. Jiangxi Agricultural Journal, 2022, 34(10): 52–58. (in Chinese)
- [16] 黄承玲, 陈训, 高贵龙. 3种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. 林业科学, 2011, 47(6): 48–55.
- HUANG C L, CHEN X, GAO G L. Physiological response of seedlings of three azalea species of drought stress and evaluation of drought resistance[J]. Forestry Science, 2011, 47(6): 48–55. (in Chinese)
- [17] 李明银, 张媚, 陈娟. 不同pH值对杜鹃插条成活的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(5): 245–246.
- LI M Y, ZHANG M, CHEN J. Effects of different pH on growth of *Rhododendron simsii* cutting[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2010(5): 245–246. (in Chinese)
- [18] 鲜小林, 陈睿, 秦帆, 等. 4个杜鹃品种对不同pH值灌溉水的生理响应[J]. 西北植物学报, 2013, 33(1): 139–145.
- XIAN X L, CHEN R, QIN F, et al. Physiological response of four azalea species to water with different pH values[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(1): 139–145. (in Chinese)
- [19] 陶巧静, 付涛, 项锡娜, 等. 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2020–2027.
- TAO Q J, FU T, XIANG X N, et al. Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2020–2027. (in Chinese)
- [20] 段旭, 陈训, 赵洋毅. 马缨杜鹃播种苗的生长规律研究[J]. 种子, 2007(10): 82–84.
- DUAN X, CHEN X, ZHAO Y Y. Study on growth regularity and technology of *Handeliodendron* sowing seeds[J]. Seed, 2007(10): 82–84. (in Chinese)
- [21] 葛春梅, 徐德冰, 吴林, 等. 基于主成分分析的软枣猕猴桃资源性状评价研究[J]. 东北农业科学, 2023, 48(4): 95–101, 121.
- GE C M, XU D B, WU L, et al. Research on the evaluation of the resource characters of *actinidia arguta* characters based on principal component analysis[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(4): 95–101, 121. (in Chinese)
- [22] 庞敏眩, 王瀚, 李志涛, 等. 不同水分处理下施用立收谷对马铃薯品质的影响[J]. 作物杂志, 2024(6): 132–139.
- PANG M X, WANG H, LI Z T, et al. Effects of applying diquat-dibromide on potato quality under different watering treatments [J]. Crops, 2024(6): 132–139. (in Chinese)
- [23] 周顺福. 模拟酸雨对4种树种苗木生长及生理的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [24] 何天友, 殷彪, 赖金莉, 等. 干旱胁迫对鼓节竹生理生化的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(11): 23–29.
- HE T Y, YIN B, LAI J L, et al. Effect of drought stress on physiological and biochemical responses of *Bambusa tuldoidea* ‘Swolleninternode’ [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(11): 23–29. (in Chinese)
- [25] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants[J]. Plant Physiology, 1977, 59(2): 309–314.
- [26] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 77–78.
- [27] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 195–197, 258–261.
- [28] 曲春香, 沈颂东, 王雪峰, 等. 用考马斯亮蓝测定植物粗提液中可溶性蛋白质含量方法的研究[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2006(2): 82–85.
- QU C X, SHEN S D, WANG X F, et al. Method research of measuring soluble protein contents of plant rough extraction using Coomassie Brilliant Blue[J]. Journal of Soochow University (Natural Science Edition), 2006(2): 82–85. (in Chinese)
- [29] 张晓艳, 曹焜, 李学海, 等. 大麻种质资源表型性状及主要大麻素含量的遗传多样性分析及评价[J]. 东北农业科学, 2024, 49(5): 25–31.
- ZHANG X Y, CAO K, LI X H, et al. Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits and major

- cannabinoids content in hemp germplasm resources[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(5): 25-31. (in Chinese)
- [30] 罗静,孙绘健,杜珊珊,等. 25个不同基因型陆地棉品种种子萌发期耐盐性评价[J]. 中国棉花, 2024, 51(7): 23-30.
LUO J, SUN H J, DU S S, et al. Evaluation on salt tolerance of 25 upland cotton varieties during germination[J]. China Cotton, 2024, 51(7): 23-30. (in Chinese)
- [31] QIU L C. Research progress on the effects of soil acidity and alkalinity on plant growth[J]. Open Journal of Applied Sciences, 2022, 12(6): 1045-1053.
- [32] CHOJAK-KOŹNIEWSKA J, LINKIEWICZ A, SOWA S, et al. Interactive effects of salt stress and pseudomonas syringae pv. lachrymans infection in cucumber: Involvement of antioxidant enzymes, abscisic acid and salicylic acid[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 136: 9-20.
- [33] 沈波,王豪,焦猛,等. 不同日本杜鹃品种盐胁迫下生理响应及评价研究[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(5): 1264-1269.
SHEN B, WANG H, JIAO M, et al. Physiological response and evaluation of different Japanese *Rhododendron* varieties under salt stress[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(5): 1264-1269. (in Chinese)
- [34] 胡余楠,张涛,胡苑,等. 5种杜鹃花叶片生理特性对海拔高度适应性初探[J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(5): 57-62.
HU Y N, ZHANG T, HU W, et al. Preliminary study on the adaptability of leaf physiological characteristics of five *Rhododendron* species to altitude[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2024, 43(5): 57-62. (in Chinese)
- [35] ZHAO Z, LIU J H, JIA R Z, et al. Physiological and TMT-based proteomic analysis of oat early seedlings in response to alkali stress[J]. Journal of Proteomics, 2019, 193(20): 10-16.
- [36] 王曼力,项洪涛,李琬,等. 淹水胁迫下烯效唑缓解小豆幼苗茎部生理损伤的效应研究[J]. 东北农业科学, 2024, 49(2): 17-24.
WANG M L, XIANG H T, LI W, et al. Mitigating effects of uniconazole on physiological damage and yield of adzuki bean seedlings under waterlogging stress[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(2): 17-24. (in Chinese)
- [37] 梁琼月,潘明君,尹永强,等. 外源ABA对低温胁迫下烤烟幼苗生理指标的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(5): 51-55.
LIANG Q Y, PAN M J, YIN Y Q, et al. Effects of exogenous ABA on physiology index of tobacco seedling under cold stress[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(5): 51-55. (in Chinese)
- [38] 张乐华,周广,孙宝腾,等. 高温胁迫对两种常绿杜鹃亚属植物幼苗生理生化特性的影响[J]. 植物科学学报, 2011, 29(3): 362-369.
ZHANG L H, ZHOU G, SUN B T, et al. Physiological and biochemical effects of high temperature stress on the seedlings of two *Rhododendron* species of subgenus *Hymenanthes*[J]. Chinese Journal of Plant Science, 2011, 29(3): 362-369. (in Chinese)
- [39] 李彦平,宋红霞. CO₂ 加富对温室小型黄瓜光合特性和幼苗质量的影响[J]. 东北农业科学, 2023, 48(6): 117-120, 140.
LI Y P, SONG H X. Effects of CO₂ enrichment on photosynthetic characteristics and seedling quality of mini-cucumber in greenhouse[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(6): 117-120, 140. (in Chinese)
- [40] ZHOU X, WANG Y, SHEN S. Transcriptomic comparison reveals modifications in gene expression, photosynthesis, and cell wall in woody plant as responses to external pH changes[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 203: 111007.
- [41] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Reviews of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- (责任编辑:范杰英)
- =====
- (上接第46页)
- [20] 李森,赵平,姜蓉,等. 鲜切菊花品种‘Cedis’多头小菊和‘Country’多头菊养分需求特性研究[J]. 园艺学报, 2018, 45(3): 591-598.
LI M, ZHAO P, JIANG R, et al. Studies on nutrient requirement characteristics of fresh-cut chrysanthemum cultivars ‘Cedis’ multi-head small chrysanthemum and ‘Country’ multi-head chrysanthemum[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(3): 591-598. (in Chinese)
- [21] 吕华军,刘秀梅,王辉,等. 施肥模式对连作菊花生长状况及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(5): 747-753.
LYU H J, LIU X M, WANG H, et al. Effects of fertilization patterns on growth and yield of chrysanthemum under continuous cropping[J]. Soils, 2012, 44(5): 747-753. (in Chinese)
- [22] 刘大会,杨特武,朱端卫,等. 不同钾肥用量对福田河白菊产量和质量的影响[J]. 中草药, 2007, 38(1): 120-124.
LIU D H, YANG T W, ZHU D W, et al. Effects of different potassium fertilizer rates on yield and quality of Futianhe white chrysanthemum[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2007, 38(1): 120-124.
- [23] 闫可,申海林,邹利人,等. 叶面喷施γ-聚谷氨酸生物菌肥对葡萄生长发育的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2017(4): 40-43.
YAN K, SHEN H L, ZOU L R, et al. Effects of foliar application of γ-polyglutamic acid bio-fertilizer on growth and development of grape[J]. Sino-overseas Grapevine & Wine, 2017(4): 40-43. (in Chinese)
- [24] 王晓军,李和明,马廷吉,等. 秦艽不同种植年限对根际土壤微生物群落结构影响的研究[J]. 东北农业科学, 2024, 49(6): 45-49.
WANG X J, LI H M, MA T J, et al. Effects of different planting years of *Gentiana macrophylla* on rhizosphere soil microbial community structure[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2024, 49(6): 45-49. (in Chinese)
- (责任编辑:范杰英)