

# 基于层次分析法的柽柳属4种植物耐盐性评价

陈亚辉,周 鹏,张 敏,隋德宗,王 磊\*

(江苏省林业科学研究院,江苏 南京 211153)

**摘要:**利用层次分析法对柽柳属4种植物在200 mmol/L NaCl胁迫15 d的总叶绿素含量、SOD活性、POD活性、CAT活性、脯氨酸含量、可溶性糖含量、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量、MDA含量、根系活力和地上部分相对含水量等10个指标数值构建综合评价模型,对4种植物耐盐能力进行比较。结果显示,柽柳属4种植物的综合得分排名为甘蒙柽柳>中国柽柳>刚毛柽柳>多枝柽柳。该研究结果可为盐碱地树种筛选和耐盐性树种的选育提供参考。

**关键词:**柽柳;NaCl胁迫;耐盐性;层次分析法

**中图分类号:**Q945.78;S727.23;S793.5

**文献标志码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2024.06.005

世界上大约20%的灌溉农业用地受到土壤盐渍化的不利影响<sup>[1-2]</sup>。自然环境恶化、不良灌溉方式和气候变化加剧了土壤盐碱化问题<sup>[3-4]</sup>。柽柳(*Tamarix* sp.)属于盐生植物<sup>[5]</sup>,具有土壤修复,提高土壤肥力的巨大潜力,在降低土壤盐碱度同时也改善了生物多样性<sup>[6]</sup>。柽柳是盐碱地种植的优良树种,在中度和重度盐碱地上生长良好,能改善环境并提供较高的经济效益<sup>[7-9]</sup>。

目前,我国现存柽柳18种<sup>[10]</sup>,常见的有中国柽柳(*T. chinensis* Lour.)、甘蒙柽柳(*T. austromongolica* Nakai.)、刚毛柽柳(*T. hispida* Willd.)和多枝柽柳(*T. ramosissima* Ledeb.)等<sup>[11]</sup>。王红宝等利用隶属函数分析及逐步回归分析方法对不同NaCl浓度下7种柽柳属植物耐盐性进行综合评价,筛选出甘蒙柽柳的耐盐性比较强<sup>[12]</sup>。杨晴等利用隶属函数法计算隶属函数值比较4种柽柳在NaCl胁迫下的耐盐能力,得出密枝柽柳6号耐盐能力较强<sup>[13]</sup>。张孝仁等研究了7种柽柳属植物在不同盐类的不同浓度下耐盐性,结果显示甘肃柽柳耐盐性最强<sup>[14]</sup>。陈刚等基于层次分析法综合评价了引进的15种观赏植物在干旱半干旱区适应性状况<sup>[15]</sup>。刘振虎等利用层次分析法综合评价9个草坪品种的耐盐性,筛选出较为耐盐类的草坪<sup>[16]</sup>。为了探究柽柳属植物的耐盐性,本研究利用层次

分析法对NaCl胁迫下柽柳属4种植物生理数据构建的综合评价体系进行耐盐能力比较,研究结果可为盐碱地区耐盐性树种选育以及盐碱地资源的可持续利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

中国柽柳、甘蒙柽柳、刚毛柽柳和多枝柽柳幼苗由山东省林业科学研究院提供。试验材料为长势相近的5月龄苗。

### 1.2 试验设计

试验于2020年9月—2021年9月在南京林业大学林学院实验室进行。对中国柽柳、甘蒙柽柳、刚毛柽柳和多枝柽柳用200 mmol/L NaCl胁迫,以1/2 Hoagland营养液加入200 mmol/L NaCl培养为处理组(T),以1/2 Hoagland营养液培养为对照组(CK)。水培箱放置在温室大棚中,自然光照培养,温度(26±2)℃,相对湿度40%—55%,每种柽柳每个处理苗8株,3个重复,共计苗木24株。

### 1.3 测定方法

**1.3.1 生理指标测定** 随机采集经NaCl胁迫处理15 d每种植物各8植株的新鲜叶片或根系。采集样本用于测定相对含水量<sup>[17]</sup>、总叶绿素含量<sup>[18]</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>含量<sup>[19]</sup>、MDA含量<sup>[20]</sup>、SOD活性<sup>[21]</sup>、POD活性<sup>[21]</sup>、

收稿日期:2023-11-12;修回日期:2024-04-20

基金项目:江苏耐盐乡土林木树种培育长期科研基地(LYKJ[2021]08)

作者简介:陈亚辉(1990—),男,江苏姜堰人,助理研究员,博士。主要从事植物生理和分子生物学研究。

\*通信作者:王 磊(1980—),男,江苏宜兴人,研究员,博士。主要从事森林生态学研究。

CAT 活性<sup>[18]</sup>、脯氨酸含量<sup>[18]</sup>和可溶性糖含量<sup>[22]</sup>及根系活力<sup>[23]</sup>,每个测定 3 个生物学重复。

1.4 柃柳属 4 种植物耐盐性的综合评价模型构建

选取经 NaCl 胁迫处理 15 d 柃柳属 4 种植物的总叶绿素含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、脯氨酸含量、可溶性糖含量、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量、MDA 含量、根系活力和地上部分相对含水量等 10 个指标作为具体评价指标,在前人研究柃柳属植物耐盐评价基础上<sup>[12-14]</sup>,结合层次分析法评价指标体系的构建原则<sup>[24]</sup>,构建柃柳属 4 种植物耐盐性的综合评价模型。该综合评价模型分为 3 层,目标层 A 为优良的耐盐性柃柳;准则层 B 为根生长和光合系统、抗氧化酶活性、渗透调节物质和其他生理指标;向下再设置 10 个标准层 C(如图 1)。

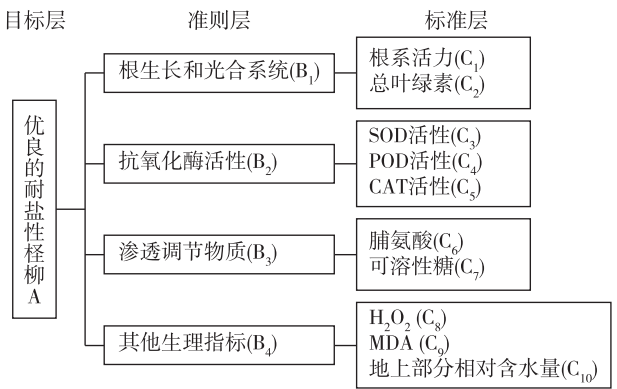


图 1 柃柳属植物耐盐性的综合评价模型

1.4.1 判断矩阵建立与一致性检验 根据比较 2 个因素来衡量各因素的重要性,计算各层次各因素对目标相对重要性次序的权重值。依据各因素对柃柳耐盐性的贡献以及各因素的重要程度,综合相关文献及专家意见,采用 1—9 标度法的取值方法<sup>[25]</sup>(见表 1),建立 A—B,B—C 之间的 5 个判断矩阵(见表 2—6)。使用 AHP-yaahp 软件<sup>[15]</sup>计算各层次指标的具体权重系数 W,如表 3,4,5,6 所示。因为层次分析法应用一致性矩阵的计算方法来进行排序,需要对判断矩阵进行一致性检验。

判断矩阵一致性检验计算表达式为: $CR=CI/RI$

式中, $CR$  为判断矩阵的随机一致性比率; $RI$  称为判断矩阵的平均随机一致性指标,1—9 阶判断矩阵  $RI$  值为 0, 0, 0.58, 0.91, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45。

$CI$  为判断矩阵的一般一致性指标,其计算表达式为: $CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1)$

式中, $n$  为判断矩阵的阶数; $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征根。

当  $CR<0.1$ ,即可判断其为一致性矩阵,否则需要进行合理的调整。

表 1 判断矩阵 1—9 标度及其含义

标度	含义
1	表示 2 因子比较, $Z_i$ 与 $Z_j$ 同等重要
3	表示 2 因子比较, $Z_i$ 比 $Z_j$ 稍微重要
5	表示 2 因子比较, $Z_i$ 比 $Z_j$ 明显重要
7	表示 2 因子比较, $Z_i$ 比 $Z_j$ 强烈重要
9	表示 2 因子比较, $Z_i$ 比 $Z_j$ 极端重要
2,4,6,8	表示相邻标度的中值
倒数	表示因子 $Z_j$ 与 $Z_i$ 比较,即 $Z_{ji}=1/Z_{ij}$

表 2 判断矩阵及一致性检验(A—B<sub>i</sub>)

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	权重 W
B <sub>1</sub>	1	2	4	4	0.457 0
B <sub>2</sub>	1/2	1	5	5	0.361 2
B <sub>3</sub>	1/4	1/5	1	1	0.090 9
B <sub>4</sub>	1/4	1/5	1	1	0.090 9

注: $\lambda_{\max}=4.106 1$ ,一致性比率  $CR=0.039 7<0.1$

表 3 判断矩阵及一致性检验(B<sub>1</sub>—C<sub>i</sub>)

B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	权重 W
C <sub>1</sub>	1	1/2	0.333 3
C <sub>2</sub>	2	1	0.666 7

注: $\lambda_{\max}=2$ ,一致性比率  $CR=0<0.1$

表 4 判断矩阵及一致性检验(B<sub>2</sub>—C<sub>i</sub>)

B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	权重 W
C <sub>3</sub>	1	1	1	0.333 3
C <sub>4</sub>	1	1	1	0.333 3
C <sub>5</sub>	1	1	1	0.333 3

注: $\lambda_{\max}=3$ ,一致性比率  $CR=0<0.1$

表 5 判断矩阵及一致性检验(B<sub>3</sub>—C<sub>i</sub>)

B <sub>3</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	权重 W
C <sub>6</sub>	1	3	0.750 0
C <sub>7</sub>	1/3	1	0.250 0

注: $\lambda_{\max}=2$ ,一致性比率  $CR=0<0.1$

表 6 判断矩阵及一致性检验(B<sub>4</sub>—C<sub>i</sub>)

B <sub>4</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	权重 W
C <sub>8</sub>	1	1	3	0.428 6
C <sub>9</sub>	1	1	3	0.428 6
C <sub>10</sub>	1/3	1/3	1	0.142 8

注: $\lambda_{\max}=3$ ,一致性比率  $CR=0<0.1$

1.4.2 各指标赋值方法 根据前人研究怪柳耐盐性的评价指标和综合评价标准<sup>[10]</sup>,在咨询研究怪柳耐盐方面相关专家、查阅怪柳相关文献<sup>[12-13]</sup>和参考本研究测得的数据基础上,确定各层指标的 5 分制评分标准(见表 7)。

1.4.3 综合权重及综合得分计算 根据表 2—6 的权重,计算出各层指标及总的综合评价权重值(见表 8)。表达式如下:

$W_j = W_1 \times W_2$

再根据以下公式计算各怪柳属植物的综合得分:

$$Y = \sum W_j \times X_j$$

式中, $Y$  为综合得分; $W_j$  为综合权重; $W_1$  为准则层指标权重; $W_2$  为标准层指标权重; $X_j$  为第 15 日测得的数据对照表 7 获得的分值; $j$  为对应标准层的指标。

表 7 各层指标因子的评价标准

因子	分值				
	5	4	3	2	1
根系活力/( $\mu\text{g/g}\cdot\text{h}$ )	(60, + $\infty$ )	(50, 60]	(40, 50]	(35, 40]	(10, 35]
叶绿素/(mg/g)	(1.5, + $\infty$ )	(1.3, 1.5]	(1.05, 1.3]	(0.80, 1.05]	(0.5, 0.80]
SOD/(U/g)	(90, + $\infty$ )	(75, 90]	(65, 75]	(50, 65]	(0, 50]
POD/(U/g $\cdot$ min)	(13.5, + $\infty$ )	(12.5, 13.5]	(11.5, 12.5]	(10, 11.5]	(0, 10]
CAT/(U/g $\cdot$ min)	(150, + $\infty$ )	(135, 150]	(120, 135]	(90, 120]	(50, 90]
脯氨酸/( $\mu\text{g/g}$ )	(70, + $\infty$ )	(60, 70]	(50, 60]	(40, 50]	(10, 40]
可溶性糖/(mg/g)	(5, + $\infty$ )	(4.5, 5]	(3.5, 4.5]	(2.0, 3.5]	(0, 2.0]
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /( $\mu\text{mol/g}$ )	(8, 11]	(11, 12.5]	(12.5, 14]	(14, 18]	(18, + $\infty$ )
MDA/(nmol/g)	(9, 12]	(12, 13]	(13, 15]	(15, 17]	(17, + $\infty$ )
地上部分相对含水量/%	(90, + $\infty$ )	(80, 90]	(75, 80]	(65, 75]	(50, 65]

表 8 各层指标及综合权重值

目标层(A)	准则层(B)	$W_1(A-B_i)$	标准层(C)	$W_2(B-C_i)$	综合权重( $W_j$ )
优良的耐盐性怪柳	根生长和光合系统	0.457 0	根系活力	0.333 3	0.152 3
			叶绿素	0.666 7	0.304 7
	抗氧化酶活性	0.361 2	SOD	0.333 3	0.120 4
			POD	0.333 3	0.120 4
			CAT	0.333 3	0.120 4
			脯氨酸	0.750 0	0.068 2
	渗透调节物质	0.090 9	可溶性糖	0.250 0	0.022 7
			H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.428 6	0.039 0
	其他生理指标	0.090 9	MDA	0.428 6	0.039 0
			地上部分相对含水量	0.142 8	0.013 0

1.5 数据处理

使用 Excel 计算试验数据的均值和标准差,数据结果以平均值 $\pm$ 标准差表示;采用 SPSS 26.0 软件对所有数据进行统计分析;使用 AHP-yaahp 软件构建判断矩阵以及进行一致性检测。

2 结果与分析

2.1 怪柳属 4 种植物在 NaCl 胁迫下的生理指标数值分析

怪柳属 4 种植物在 NaCl 胁迫 15 d 的生理指标数值各不相同(见表 9),除了 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量和 MDA 含

量的数值显示甘蒙怪柳最低,多枝怪柳最高,其他生理指标的数值结果显示甘蒙怪柳最高,多枝怪柳最低。同时,除了 CAT 活性中甘蒙怪柳和多枝怪柳数值不存在显著差异性,其他生理指标的数值中两者均存在显著差异性。

2.2 怪柳属 4 种植物的综合评价结果

按照各指标层评分标准(见表 7)对 4 种怪柳属植物的 10 个指标的测定数值(第 15 日数据)逐一打分,然后用表 8 中各项因子的综合权重值进行计算,即得到每个品种的综合得分,并进行排名,结果见表 10。

表 9 柽柳属 4 种植物在 NaCl 胁迫 15 d 的生理指标数值

植物	根系活力/ ( $\mu\text{g/g}\cdot\text{h}$ )	叶绿素含量/ ( $\text{mg/g}$ )	SOD 活性/ ( $\text{U/g}$ )	POD 活性/ ( $\text{U/g}\cdot\text{min}$ )	CAT 活性/ ( $\text{U/g}\cdot\text{min}$ )	$\text{H}_2\text{O}_2$ 含量/ ( $\mu\text{mol/g}$ )	MDA 含量/ ( $\text{nmol/g}$ )	脯氨酸含量/ ( $\mu\text{g/g}$ )	可溶性糖含量/ ( $\text{mg/g}$ )	地上部分 相对含水量/%
中国柽柳	61.82 $\pm$ 3.15 <sup>b</sup>	1.25 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	55.32 $\pm$ 3.01 <sup>b</sup>	11.88 $\pm$ 1.07 <sup>b</sup>	115.44 $\pm$ 7.23 <sup>a</sup>	12.31 $\pm$ 0.60 <sup>a</sup>	10.58 $\pm$ 0.62 <sup>ab</sup>	36.90 $\pm$ 2.99 <sup>ab</sup>	2.76 $\pm$ 0.12 <sup>ab</sup>	83.33 $\pm$ 0.29 <sup>b</sup>
甘蒙柽柳	66.15 $\pm$ 4.47 <sup>b</sup>	1.36 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	60.15 $\pm$ 3.15 <sup>b</sup>	12.59 $\pm$ 0.61 <sup>b</sup>	125.16 $\pm$ 10.64 <sup>a</sup>	11.57 $\pm$ 0.90 <sup>a</sup>	10.07 $\pm$ 0.80 <sup>a</sup>	40.90 $\pm$ 3.74 <sup>b</sup>	3.16 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>	84.16 $\pm$ 0.48 <sup>c</sup>
刚毛柽柳	56.84 $\pm$ 4.66 <sup>ab</sup>	1.19 $\pm$ 0.04 <sup>ab</sup>	50.91 $\pm$ 3.77 <sup>ab</sup>	11.29 $\pm$ 0.53 <sup>b</sup>	110.26 $\pm$ 9.24 <sup>a</sup>	12.66 $\pm$ 0.70 <sup>ab</sup>	11.00 $\pm$ 0.63 <sup>ab</sup>	33.89 $\pm$ 2.69 <sup>ab</sup>	2.65 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	82.77 $\pm$ 0.51 <sup>b</sup>
多枝柽柳	51.83 $\pm$ 3.01 <sup>a</sup>	1.09 $\pm$ 0.06 <sup>a</sup>	45.26 $\pm$ 3.12 <sup>a</sup>	10.06 $\pm$ 0.55 <sup>a</sup>	102.69 $\pm$ 9.36 <sup>a</sup>	13.57 $\pm$ 0.50 <sup>b</sup>	11.57 $\pm$ 0.44 <sup>b</sup>	30.86 $\pm$ 2.74 <sup>a</sup>	2.59 $\pm$ 0.13 <sup>a</sup>	80.62 $\pm$ 0.61 <sup>a</sup>

注:数据为平均值 $\pm$ 标准误;同列数据右上角的不同小写字母表示在<0.05 水平上的差异显著性

由表 10 可知,柽柳属 4 种植物耐盐性排名为甘蒙柽柳>中国柽柳>刚毛柽柳>多枝柽柳。中国柽柳和甘蒙柽柳在 SOD 活性、可溶性糖含量、 $\text{H}_2\text{O}_2$  含量、MDA 含量、根系活力和地上部分相对含水量中得分

相同且最高,表明中国柽柳和甘蒙柽柳在 NaCl 胁迫下,生长受影响较小。除此以外,甘蒙柽柳在叶绿素含量、POD 活性、CAT 活性和脯氨酸含量中得分最高,并且总分高于中国柽柳。

表 10 柽柳属 4 种植物耐盐性综合评价及排名

植物	根系活力	叶绿素	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	脯氨酸	可溶性糖	$\text{H}_2\text{O}_2$	MDA	地上部分 相对含水量	总分	排名
中国柽柳	0.43	0.52	0.17	0.26	0.17	0.07	0.05	1.56	1.95	0.52	5.71	2
甘蒙柽柳	0.43	0.69	0.17	0.35	0.26	0.14	0.05	1.56	1.95	0.52	6.12	1
刚毛柽柳	0.35	0.52	0.17	0.17	0.17	0.07	0.05	1.17	1.95	0.52	5.14	3
多枝柽柳	0.35	0.52	0.09	0.17	0.17	0.07	0.05	1.17	1.95	0.52	5.06	4

### 3 讨论与结论

SOD、POD 和 CAT 活性的变化可以反映植物在胁迫下清除 ROS 的能力<sup>[26]</sup>。SOD 能将  $\text{O}_2^{\cdot-}$  分解为  $\text{O}_2$  或  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,CAT 能催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$ ,POD 能以  $\text{H}_2\text{O}_2$  为电子受体直接氧化苯酚或胺类化合物,消除有毒的  $\text{H}_2\text{O}_2$  和酚胺<sup>[27-28]</sup>。植物合成脯氨酸,可溶性糖和其他渗透剂,可以促进细胞水平的渗透平衡<sup>[28-29]</sup>。MDA 含量是膜脂质过氧化最重要的产物之一,反映了生物和非生物胁迫下膜系统的损伤程度<sup>[30-32]</sup>。盐胁迫可引起耐盐和盐敏感植物的脂质过氧化和可溶性糖的积累,并增加抗氧化酶的活性<sup>[33]</sup>。本研究中,甘蒙柽柳的 SOD、POD 和 CAT 活性高于其他 3 种柽柳属植物。由此推测,甘蒙柽柳响应 NaCl 胁迫时主要抗氧化酶活性可能被快速启动,提高了植株耐盐性。此外,刚毛柽柳和多枝柽柳在 POD 活性、 $\text{H}_2\text{O}_2$  含量和根系活力的得分低于中国柽柳和甘蒙柽柳。多枝柽柳在 SOD 活性中得分最低,多枝柽柳可能在 NaCl 胁迫时抗氧化机制启动较慢,正常生长代谢受阻,耐盐性降低。

与田间试验相比,生理性状测定简单易行,但植物胁迫后会有众多生理指标产生变化,用 1 个或多个指标往往难以确定树木的抗逆性。层次分析法综合了专家经验和科学测定数据,是一种便捷、

实用的多准则决策方法<sup>[34-35]</sup>。但其结果的准确性受到专家经验和选择测试指标的限制。本研究结果表明甘蒙柽柳在 NaCl 胁迫下株高生长受影响最小,耐盐能力强于其他 3 种柽柳属植物,与前人研究结果相一致<sup>[12,36]</sup>。甘蒙柽柳可作为盐碱地区树种改良、造林和绿化的优势树种,对“南红北柳”湿地生态修复工程具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] QADIR M, QUILLÉROU E, NANGIA V, et al. Economics of salt-induced land degradation and restoration [J]. Natural Resources Forum, 2014, 38(4): 282-295.
- [2] MORTON M J L, AWLIA M, AL-TAMIMI N, et al. Salt stress under the scalpel-dissecting the genetics of salt tolerance[J]. The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology, 2019, 97(1): 148-163.
- [3] PARK H J, KIM W Y, YUN D J. A new insight of salt stress signaling in plant[J]. Molecules and Cells, 2016, 39(6): 447-459.
- [4] ZISKA L H, BUNCE J A, SHIMONO H, et al. Food security and climate change: on the potential to adapt global crop production by active selection to rising atmospheric carbon dioxide[J]. Proceedings of Biological Sciences, 2012, 279(1745): 4097-4105.
- [5] DUAN Q X, ZHU Z H, WANG B S, et al. Recent progress on the salt tolerance mechanisms and application of tamarisk[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(6): 3325.
- [6] TANIGUCHI T, IMADA S, ACHARYA K, et al. Effect of soil sa-



- linity and nutrient levels on the community structure of the root-associated bacteria of the facultative halophyte, *Tamarix ramosissima*, in southwestern United States [J]. The Journal of General and Applied Microbiology, 2015, 61(5): 193-202.
- [7] HAN Z, YIN W, ZHANG J, et al. Active anti-erosion protection strategy in tamarisk (*Tamarix aphylla*) [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 3429.
- [8] MAMAT Z, HALIK U, AISHAN T, et al. Ecological effect of the riparian ecosystem in the lower reaches of the Tarim River in north-west China [J]. PloS One, 2019, 14(1): e208462.
- [9] ZENG Y, ZHAO C Y, KUNDZEWICZ Z W, et al. Distribution pattern of Tugai forests species diversity and their relationship to environmental factors in an arid area of China [J]. PloS One, 2020, 15(5): e232907.
- [10] 孟晓松.中国柽柳品系耐盐性试验研究[D].秦皇岛:河北科技师范学院, 2020.
- [11] 慕 铭.中国柽柳品种‘鲁桂 1 号’对盐胁迫的生理响应[D].泰安:山东农业大学, 2021.
- [12] 王红宝, 郑伶俐, 丁 丁, 等. 7 种柽柳属植物对 NaCl 胁迫的生长生理响应与耐盐性差异[J]. 山东农业科学, 2022, 54(11): 31-38.
- [13] 杨 晴, 代 波, 刘振林, 等. 四个柽柳新品系的耐盐性评价[J]. 河北科技师范学院学报, 2016, 30(4): 23-28.
- [14] 张孝仁, 徐先英. 柽柳属种间耐盐性比较试验[J]. 中国沙漠, 1993(1): 38-43.
- [15] 陈 刚, 吕 东, 赵 明, 等. 基于层次分析法的干旱半干旱区 15 种引进观赏植物适应性[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 186-191.
- [16] 刘振虎, 卢欣石, 葛 军. 利用层次分析法综合评价 9 个草坪品种的耐盐性[J]. 草地学报, 2002(3): 207-211.
- [17] 刘咏梅, 程 聪, 姜 黎, 等. NaCl 胁迫下 3 种柽柳属植物生长、盐离子分布和 SOS1 基因相对表达量的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(1): 1-9.
- [18] 张治安, 张善美, 蔚荣海. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [19] SERGIEV I, ALEXIEVA, KARANOV E. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants [J]. Comptes Rendus de l'Academie Bulgare Sciences, 1997, 51: 121-124.
- [20] KOSUGI H, KIKUGAWA K. Thiobarbituric acid reaction of aldehydes and oxidized lipids in glacial acetic acid [J]. Lipids, 1985, 20(12): 915-921.
- [21] 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, 2003.
- [22] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [23] 朱秀云, 梁 梦, 马 玉. 根系活力的测定 (TTC 法) 实验综述报告[J]. 广东化工, 2020, 47(6): 211-212.
- [24] 邓 雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [25] 郭佳惠, 教忠意, 何旭东, 等. 基于层次分析法对柳树观赏性及适应性的综合评价[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2021, 45(6): 169-176.
- [26] WAND D J, GAO Y, SUN S M, et al. Effects of salt stress on the antioxidant activity and malondialdehyde, solution protein, proline, and chlorophyll contents of three *Malus* species [J]. Life (Base 1), 2022, 12(11): 1929-1946.
- [27] LIANG W, MA X, WAN P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: A review [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 495(1): 286-291.
- [28] AKTER S, HUANG J J, WASZCZAK C, et al. Cysteines under ROS attack in plants: a proteomics view [J]. Journal of experimental botany, 2015, 66(10): 2935-2944.
- [29] SHARP R E, HSIAO T C, SILK W K. Growth of the maize primary root at low water potentials [J]. Plant Physiology, 1990, 93(4): 1337-1346.
- [30] ERASLAN F, INAL A, PILBEAM D J, et al. Interactive effects of salicylic acid and silicon on oxidative damage and antioxidant activity in spinach (*Spinacia oleracea* L. cv Matador) grown under boron toxicity and salinity [J]. Plant Growth Regulation, 2008, 55(3): 207-219.
- [31] ASHRAF M, FOOLAD M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 206-216.
- [32] RAHNAMA H, EBRAHIMZADEH H. The effect of NaCl on proline accumulation in potato seedlings and calli [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2004, 26(3): 263-270.
- [33] IBRAHIMOVA U, SULEYMANOVA Z, BRESTIC M, et al. Assessing the adaptive Mechanisms of two bread wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes to Salinity Stress [J]. Agronomy (Base 1), 2021, 11(10): 1979.
- [34] 黄正金, 卫云丽, 张春红, 等. 基于层次分析法的 5 个黑莓杂交品系综合评价[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2019, 43(1): 135-140.
- [35] 张彩红, 薛 伟, 辛 颖, 等. 基于层次分析法的贵州玉舍国家森林公园休养地适宜度评价[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(2): 215-219.
- [36] 乔来秋, 王玉祥, 荀守华, 等. 柽柳引种试验研究[J]. 山东林业科技, 2004(6): 18-20.