

网络出版时间:2024-01-05 18:25 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2024.07.014
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240104.1259.015

不同地区小茴香苗期耐盐性综合评价及耐盐指标筛选

赵昕玥¹, 王晓敏^{1,2,3}, 赵云雅¹, 郭彦英¹, 宗蕾¹, 程国新^{1,2,3},
郭猛^{1,2,3}, 高艳明^{1,2,3}, 李建设^{1,2,3}

(1 宁夏大学 葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021; 2 宁夏现代设施园艺工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;
3 宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室, 宁夏 银川 750021)

【摘要】【目的】筛选小茴香苗期关键耐盐指标及高度耐盐小茴香品种, 为促进茴香产业的发展提供参考。**【方法】**以来自 5 个不同地区(宁夏海原县、内蒙古托克托县、山西大同市、陕西渭南市和甘肃民勤县)的小茴香为材料, 用不同质量浓度(0(CK), 3, 6, 9, 12 和 15 g/L) NaCl 胁迫其幼苗 20 d 后, 测定幼苗的形态指标(株高、茎粗、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、根长、根数)和生理指标(相对电导率、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量), 对以上指标的相关性进行分析, 并计算其耐盐系数; 在此基础上, 对 5 个不同地区小茴香材料的 11 个指标进行主成分分析, 计算综合评价值(D), 对不同地区小茴香幼苗的耐盐性进行综合评价; 基于综合评价值, 采用组间联接法和平方欧氏距离对不同地区小茴香进行聚类分析; 利用逐步回归分析筛选关键耐盐指标, 建立小茴香幼苗耐盐性评价的最优回归方程。**【结果】**①随着 NaCl 质量浓度的增加, 5 个地区小茴香幼苗的株高、茎粗、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、根长、根数均呈下降趋势; 相对电导率及丙二醛和脯氨酸含量均呈上升趋势; 甘肃、内蒙古和山西小茴香幼苗的可溶性糖含量先增加后下降, 宁夏和陕西小茴香幼苗的可溶性糖含量均呈上升趋势。②相关性分析表明, NaCl 胁迫下小茴香幼苗的各指标之间存在不同程度的相关性, 其中株高、茎粗、最大叶宽、最大叶面积和根数之间均呈显著或极显著正相关, 相对电导率与丙二醛、脯氨酸和可溶性糖含量呈极显著正相关, 相对电导率、脯氨酸和可溶性糖含量与株高、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积和根数之间均呈显著或呈极显著负相关。③甘肃地区小茴香材料的 D 值最大(0.612), 其幼苗耐盐性最强; 其次为内蒙古(0.545)、山西(0.487)和宁夏(0.429); 陕西地区小茴香材料的 D 值最小(0.306), 其幼苗耐盐性最弱。④聚类分析结果显示, 在欧氏距离 8.0 处, 5 个地区的小茴香材料可分为 3 类, 其中第 I 类为甘肃地区小茴香材料, 第 II 类为内蒙古、山西和宁夏地区小茴香材料, 第 III 类为陕西地区小茴香材料。⑤筛选出最大叶长、最大叶面积、相对电导率、脯氨酸含量 4 个指标用于小茴香的耐盐性评价, 并据此建立了小茴香幼苗耐盐性评价的最优回归方程。**【结论】**NaCl 胁迫对小茴香幼苗生长有抑制作用, 不同地区小茴香幼苗对 NaCl 胁迫的响应程度存在差异。甘肃地区小茴香为耐盐材料, 内蒙古、山西和宁夏地区的小茴香为中度耐盐材料, 陕西地区小茴香为轻度耐盐材料。

【关键词】 小茴香; 耐盐性; 综合评价; 主成分分析; 聚类分析

【中图分类号】 S573.903.7

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)07-0125-11

Comprehensive evaluation of salt tolerance of fennel at seedling stage in different regions and screening of salt-tolerant indexes

ZHAO Xinyue¹, WANG Xiaomin^{1,2,3}, ZHAO Yunya¹, GUO Yanying¹, ZONG Lei¹,
CHENG Guoxin^{1,2,3}, GUO Meng^{1,2,3}, GAO Yanming^{1,2,3}, LI Jianshe^{1,2,3}

(1 College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2 Ningxia Modern Facility Horticulture

【收稿日期】 2023-05-04

【基金项目】 宁夏回族自治区农业特色优势产业育种专项(NXNYYZ20200104); 2016 年度教育部春晖计划项目

【作者简介】 赵昕玥(1999—), 女, 青海海东人, 在读硕士, 主要从事蔬菜生物技术与遗传育种研究。

E-mail: Zhaoxinyue1024@163.com

【通信作者】 王晓敏(1981—), 女, 陕西宝鸡人, 副教授, 博士, 主要从事蔬菜生物技术与遗传育种研究。

E-mail: wangxiaomin_1981@163.com

Engineering Technology Research Center, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3 Key Laboratory of Modern Molecular Breeding for Dominant and Special Crops in Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: 【Objective】 This study screened key salt-tolerant indexes and highly salt-tolerant varieties of fennel at seedling stage to provide references for promoting fennel industry. 【Method】 Fennel varieties from 5 different regions (Haiyuan County, Ningxia; Tokto County, Inner Mongolia; Datong City, Shanxi; Weinan City, Shaanxi; Minqin County, Gansu) were selected in this study. After 20 days of NaCl stress at concentrations of 0 (CK), 3, 6, 9, 12 and 15 g/L, morphological indexes (plant height, plant stem diameter, maximum leaf length, maximum blade width, maximum leaf area, root length and root number) and physiological indexes (relative electrical conductivity, malondialdehyde content, proline content and soluble sugar content) of seedlings were determined. The correlations between above indexes were analyzed and the salt tolerance coefficients were calculated. Then, principal component analysis was carried out on 11 indexes of fennel materials from 5 different regions and comprehensive evaluation value (D) was calculated to evaluate salt tolerance of fennel seedlings. Cluster analysis was also conducted using inter group connection method and square Euclidean distance. The key indexes of salt tolerance were screened by stepwise regression analysis, and the optimal regression equation of salt tolerance evaluation was established. 【Result】 ① With the increase of NaCl concentration, plant height, plant stem diameter, maximum leaf length, maximum blade width, maximum leaf area, root length and root number of fennel seedlings in 5 regions showed a decreasing trend, while relative electrical conductivity, malondialdehyde content and proline content showed an increasing trend. The soluble sugar contents of fennel seedlings in Gansu, Inner Mongolia and Shanxi increased and then decreased, while those in Ningxia and Shaanxi increased. ② There were different degrees of correlations among the indexes of fennel seedlings under NaCl stress, among which plant height, plant stem diameter, maximum blade width, maximum leaf area and root number had significant or extremely significant positive correlations, and relative electrical conductivity had positive correlations with malondialdehyde, proline and soluble sugar contents. The relative electrical conductivity, proline and soluble sugar contents had significantly negative correlations with plant height, maximum leaf length, maximum blade width, maximum leaf area and root number. ③ The D value of fennel from Gansu was the largest (0.612) and its salt tolerance was strongest at seedling stage, followed by varieties from Inner Mongolia (0.545), Shanxi (0.487) and Ningxia (0.429). The D value of fennel from Shaanxi was the lowest (0.306), and its salt tolerance was the weakest at seedling stage. ④ The cluster analysis showed that fennel materials from 5 regions were divided into three categories at the Euclidean distance of 8.0, among which class I included fennel material from Gansu, class II included fennel materials from Inner Mongolia, Shanxi and Ningxia, and class III included fennel material from Shaanxi. ⑤ Four indexes including maximum leaf length, maximum leaf area, relative electrical conductivity and proline content were selected for salt tolerance evaluation. And based this, the optimal regression equation for evaluating salt tolerance of fennel seedlings was established. 【Conclusion】 NaCl stress inhibited the growth of fennel seedlings, and fennel seedlings from different regions showed different responses to NaCl stress. The variety from Gansu was salt-tolerant, the varieties from Inner Mongolia, Shanxi and Ningxia were moderately salt-tolerant, and the variety from Shaanxi was mildly salt-tolerant.

Key words: fennel; salt tolerance; comprehensive evaluation; principal component analysis; cluster analysis

小茴香(*Foeniculum vulgare* Mill.)属伞形科、茴香属多年生草本植物^[1],作为一种耐盐碱植物,在

低洼地、盐碱地均可种植^[2]。小茴香的嫩叶可作蔬菜食用,其种子因具有散寒、活血、止痛等功效而被

用作药材^[3];此外,茴香挥发油也广泛应用于药品、食品和保健品行业中^[4-5],还可用作抗菌剂^[6]和杀虫剂^[7]。近年来,有关茴香的研究大部分集中于高产栽培技术^[8]、挥发油的提取及应用^[9]、临床医学^[10]等方面。

土壤盐渍化指土壤中的盐、碱含量过高,从而影响土壤溶液的渗透压,导致作物无法正常生长发育的现象^[11-12]。目前,全球盐渍化土地面积达到 1.1×10^9 hm²,其中我国东北平原盐渍土面积约 3.2×10^6 hm²,是世界盐渍土分布较多的地区之一^[13]。土壤中高浓度的Na⁺、K⁺会使植物体内的渗透压失衡,导致大量有毒物质的积累,进而对植物的正常生长产生严重影响^[14]。宁夏也是我国土壤盐渍化较为严重的地区之一,宁夏盐渍化土壤面积达16.58万hm²,银北灌区是宁夏盐碱地的重灾区。宁夏回族自治区中卫市海原县独特的地理位置和优越的自然环境非常适宜小茴香的生长,从而使其成为全国“一村一品”的小茴香种植示范村镇之一^[15]。小茴香作为宁夏的一种重要区域经济优势作物,建立小茴香耐盐性评价体系,开展耐盐小茴香品种的筛选,不仅能有效利用盐渍化土地,而且有利于宁夏小茴香产业的大力发展。

前人对一些作物耐盐性的研究表明,苗期是评价植物耐盐性的关键期,苗期耐盐性强的植物在生长后期也同样表现出一定的耐盐性^[16-17]。王琪等^[18]测定了不同水平NaCl胁迫下20个番茄品种苗期的生长指标,筛选出5个耐盐性较强的品种,而以9个指标做聚类分析则筛选出3个耐盐性较强的品种,说明依据的生长指标数量不同得出的耐盐性评价结果也有所不同。作物耐盐性是多指标共同作用的结果,在所测定指标的数量足够多时进行分析,

筛选结果的准确性也较高^[19-21]。近年来,耐盐作物品种综合评价和关键指标筛选多基于相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析相结合的多元分析法。马帅国等^[22]对165份粳稻种质资源进行了不同水平NaCl胁迫处理,通过测定苗高、相对电导率等12个指标,采用多元分析法进行了耐盐性综合评价,筛选出5份耐盐性强的粳稻种质资源和5个苗期关键耐盐指标。余如刚等^[23]测定了0和150 mmol/L NaCl胁迫处理35 d后20个紫花苜蓿品种苗期的株高、丙二醛含量等17个指标,运用多元分析法进行耐盐性综合评价,筛选出8个耐盐品种和2个关键耐盐指标。综上所述,通过单一的指标或统计方法很难全面准确反映植物耐盐能力的强弱,而采用多指标结合多元分析法进行植物苗期耐盐性综合评价和耐盐指标筛选,结果将更为可靠合理。

本研究以5个来自不同地区的小茴香作为分析对象,用0(CK),3,6,9,12和15 g/L NaCl胁迫处理20 d后,测定小茴香幼苗的株高、茎粗、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、根长、根数、相对电导率、丙二醛含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量,通过相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析对小茴香苗期耐盐性进行综合评价,并筛选关键耐盐指标,以期遴选耐盐小茴香品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的小茴香种子分别采自宁夏海原县、内蒙古托克托县、山西大同市、陕西渭南市和甘肃民勤县,各地方品种均为常规种,详细信息见表1。

表1 供试小茴香种子的来源及其特性

Table 1 Sources and characteristics of fennel seeds

来源地区 Source region	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	颜色 Color	千粒质量/g 1 000-seed weight
宁夏海原县 Haiyuan County, Ningxia	N105°09'	E36°06'	1 366	浅绿色 Light green	1.64±0.07 b
内蒙古托克托县 Tokto County, Inner Mongolia	N111°02'	E40°05'	1 040	黄绿色 Yellowish and green	1.85±0.01 a
山西大同市 Datong City, Shanxi Province	N112°06'	E39°54'	1 149	浅黄色 Light yellow	1.67±0.09 b
陕西渭南市 Weinan City, Shaanxi Province	N109°00'	E34°52'	882	黄绿色 Yellowish and green	1.35±0.06 c
甘肃民勤县 Minqin County, Gansu Province	N101°49'	E38°03'	1 400	绿色 Green	1.76±0.11 ab

注:数据为“平均值±标准误差”。同列数据后标不同小写字母表示不同材料在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: The data are “average±standard error”. Different lowercase letters indicate significant difference at the $P < 0.05$ probability level.

1.2 试验设计

试验于 2022 年 6 月在宁夏大学科技楼 A705 进行。挑取粒大饱满且无病虫害的来自不同地区的小茴香种子各 30 粒,用体积分数 75%酒精浸泡 10 min,蒸馏水冲洗干净后,参照王晓敏等^[24]的方法进行浸种和催芽处理。采用基质盆栽法播种,营养钵直径为 15 cm、高度为 13 cm。培养基质由草炭和蛭石按体积比 2:1 混合而成,基质用量为营养钵容积的 2/3。将营养钵置于昼/夜温度 25 °C/20 °C、相对湿度 70%、光照强度 30 000 lx、光周期 16 h/8 h 的智能光照培养箱(PGX-450B)中培养。

生长初期每 2 d 浇灌 1 次 Hoagland 营养液 300 mL。待幼苗长至 4 叶 1 心时,选取长势一致的幼苗,每盆留 1 株,转移至宁夏大学农科实训基地玻璃温室于每天上午 08:00—09:00 进行 NaCl 质量浓度分别为 0(CK),3,6,9,12 和 15 g/L 的胁迫处理,每株 NaCl 溶液浇灌量为 300 mL,对照浇等量 pH 7.0 的蒸馏水,各处理均设 3 次重复。玻璃温室的温度为(23±2) °C,自然光照,光周期为 16 h/8 h。

1.3 测定指标及方法

胁迫处理 20 d 后,用电子游标卡尺测量小茴香幼苗的茎粗。用卷尺测量其株高、最大叶长、最大叶宽、根长,并记录根数。采集相同部位的功能叶,用电导仪法^[25]测定相对电导率,硫代巴比妥法^[25]测定丙二醛含量,酸性茚三酮法^[26]测定脯氨酸含量,蒽酮比色法^[26]测定可溶性糖含量。

1.4 数据处理与统计分析

在主成分分析之前,对测定指标进行标准化处理,即计算不同质量浓度 NaCl 处理后小茴香幼苗各指标的耐盐系数(salt tolerance coefficient, STC):

$$\text{STC} = (\text{不同质量浓度 NaCl 胁迫处理后各指标的平均值} / \text{对照各指标平均值}) \times 100\% \quad (1)$$

将各指标的 STC 归纳成 3 个主成分,各主成分隶属函数值的计算公式为:

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}), i = 1, 2, 3, \dots, a; j = 1, 2, 3, \dots, b. \quad (2)$$

式中: U 表示隶属函数值; X_{ij} 表示第 j 个小茴香材料第 i 个指标的主成分; $X_{i\max}$ 和 $X_{i\min}$ 分别表示第 i 个主成分的最大值和最小值; a 为测定指标数, $a = 11$; b 为小茴香材料数, $b = 5$ 。

各主成分权重(W_i)的计算公式为:

$$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i, i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

式中: P_i 表示第 i 个主成分的贡献率, n 为选取的主成分数。

综合评价价值(D)的计算公式^[27]为:

$$D = \sum_{i=1}^n [U(X_{ij}) \times W_i], i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (4)$$

试验数据用 Microsoft Excel 2016 进行统计和整理,利用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析、主成分分析和逐步回归分析。基于 D 值,采用组间联接法和平方欧氏距离法对供试小茴香材料进行聚类分析^[28]。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对小茴香幼苗生长的影响

由表 2 可知,随着 NaCl 质量浓度的增加,来自 5 个不同地区的各小茴香材料的株高、茎粗、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、根长和根数与对照相比均有所下降,说明在 NaCl 胁迫下各地区小茴香幼苗的生长均受到不同程度的抑制。NaCl 处理后各小茴香材料的相对电导率、丙二醛含量、脯氨酸含量均明显升高,且以上指标均以 15 g/L NaCl 处理最高。当 NaCl 质量浓度为 0~15 g/L 时,随着 NaCl 质量浓度升高,宁夏和陕西小茴香幼苗的可溶性糖含量呈增加趋势,而甘肃、内蒙古和山西小茴香幼苗的可溶性糖含量呈先升高后减少趋势,其中以 9 g/L NaCl 处理的可溶性糖含量最高。NaCl 胁迫下各指标的变化幅度不同,故用单一指标评价各小茴香材料的耐盐性具有一定片面性,需要进行多指标综合评价。

表 2 NaCl 胁迫对不同地区小茴香幼苗生长的影响

Table 2 Effects of NaCl stress on growth of fennel seedlings in different regions

指标 Index	NaCl/ (g · L ⁻¹)	材料来源 Material source				
		宁夏 Ningxia	甘肃 Gansu	内蒙古 Inner Mongolia	山西 Shanxi	陕西 Shaanxi
PH/cm	0(CK)	40.51±0.01 a	34.12±0.03 ab	37.27±0.06 a	37.71±0.05 a	32.18±0.04 a
	3	35.97±0.03 ab	25.88±0.05 b	29.26±0.03 ab	35.06±0.02 ab	28.21±0.03 ab
	6	33.17±0.05 bc	24.73±0.02 b	29.10±0.04 ab	29.74±0.03 b	25.39±0.01 d
	9	23.82±0.03 d	23.50±0.07 c	25.36±0.07 c	27.71±0.07 b	23.61±0.05 c
	12	22.43±0.05 d	21.81±0.03 d	22.90±0.02 d	24.40±0.02 c	22.18±0.08 cd
	15	22.89±0.01 d	20.29±0.04 d	22.00±0.05 d	22.07±0.04 d	20.36±0.03 d

表 2(续) Table 2 (continued)

指标 Index	NaCl/ (g · L ⁻¹)	材料来源 Material source				
		宁夏 Ningxia	甘肃 Gansu	内蒙古 Inner Mongolia	山西 Shanxi	陕西 Shaanxi
PSD/cm	0(CK)	0.40±0.07 a	0.21±0.05 ab	0.22±0.04 ab	0.32±0.04 a	0.20±0.01 ab
	3	0.24±0.02 ab	0.21±0.07 ab	0.22±0.09 ab	0.19±0.07 bc	0.19±0.06 ab
	6	0.23±0.07 ab	0.21±0.02 ab	0.21±0.02 ab	0.17±0.03 c	0.15±0.00 b
	9	0.22±0.09 ab	0.15±0.03 c	0.16±0.00 c	0.26±0.04 ab	0.14±0.02 b
	12	0.22±0.01 ab	0.14±0.05 c	0.12±0.01 d	0.24±0.07 bc	0.14±0.08 b
	15	0.22±0.02 ab	0.13±0.07 c	0.17±0.04 bc	0.18±0.03 bc	0.13±0.03 b
MLL/cm	0(CK)	6.29±0.06 a	6.44±0.08 a	5.97±0.03 a	11.69±0.08 a	6.20±0.05 ab
	3	6.30±0.05 a	6.19±0.05 a	5.82±0.02 a	10.08±0.02 b	6.03±0.07 ab
	6	5.81±0.08 ab	5.94±0.03 ab	5.75±0.00 a	5.20±0.04 c	5.15±0.03 b
	9	5.67±0.03 ab	5.89±0.01 ab	5.87±0.07 a	4.93±0.04 cd	4.98±0.06 b
	12	4.74±0.04 b	4.48±0.04 b	4.20±0.03 bc	4.49±0.07 cd	4.55±0.07 bc
	15	4.03±0.07 c	4.43±0.02 b	4.31±0.06 bc	3.53±0.02 d	4.05±0.04 bc
MBW/cm	0(CK)	11.27±0.02 a	8.20±0.06 a	9.73±0.02 a	11.41±0.04 a	7.75±0.03 ab
	3	8.48±0.07 b	7.00±0.03 a	8.42±0.01 a	7.60±0.08 ab	7.32±0.08 ab
	6	8.12±0.04 b	6.72±0.01 ab	8.45±0.00 a	7.48±0.03 ab	6.85±0.03 b
	9	6.42±0.09 bc	6.38±0.03 ab	5.18±0.05 b	6.55±0.08 bc	6.54±0.04 bc
	12	6.88±0.05 bc	3.91±0.02 d	3.89±0.02 c	6.03±0.04 bc	6.08±0.00 bc
	15	4.92±0.03 c	3.21±0.04 d	3.82±0.03 c	4.69±0.02 c	5.48±0.01 c
MLA/cm ²	0(CK)	72.17±0.05 a	53.26±0.08 a	52.09±0.04 a	134.98±0.04 a	41.92±0.03 ab
	3	52.74±0.03 a	43.57±0.03 ab	54.85±0.06 a	77.06±0.09 b	44.09±0.09 a
	6	47.69±0.06 bc	39.98±0.06 bc	48.61±0.02 a	37.11±0.02 bc	35.20±0.02 b
	9	37.59±0.08 bc	37.78±0.04 bc	30.53±0.08 bc	32.30±0.05 cc	37.45±0.05 b
	12	32.60±0.02 c	12.90±0.07 c	26.27±0.03 c	27.09±0.01 d	34.61±0.08 bc
	15	24.76±0.01 d	12.85±0.08 c	21.05±0.02 d	17.07±0.08 d	31.01±0.02 c
RL/cm	0(CK)	5.94±0.63 a	6.27±0.44 a	7.11±0.51 a	6.00±0.00 a	7.78±0.53 a
	3	5.98±1.51 a	5.28±0.35 ab	5.44±0.44 ab	6.12±0.04 a	7.76±0.84 a
	6	4.52±0.38 ab	5.54±0.18 ab	5.74±0.87 ab	4.62±0.07 bc	7.10±0.53 a
	9	4.31±0.69 bc	4.05±0.13 bc	4.51±0.51 bc	4.00±0.75 bc	6.13±0.24 ab
	12	4.09±0.83 bc	4.34±0.52 bc	4.06±0.49 bc	3.56±0.54 bc	5.64±0.56 ab
	15	3.52±0.36 c	3.15±0.19 c	4.03±0.51 bc	3.13±0.01 c	5.27±0.31 bc
RN	0(CK)	10.33±1.55 a	7.67±2.61 ab	7.67±1.38 ab	7.67±0.64 ab	7.00±0.95 ab
	3	9.00±0.96 a	4.67±1.13 b	8.67±0.61 a	6.67±0.23 ab	5.67±0.43 a
	6	6.67±0.37 b	5.00±1.65 b	6.33±0.45 b	5.33±0.74 b	5.67±0.64 a
	9	5.67±0.78 b	3.67±0.56 bc	6.67±0.22 b	3.33±0.23 c	3.00±0.35 b
	12	3.33±0.98 c	2.33±0.72 c	4.33±0.34 c	3.00±0.54 c	5.33±0.84 a
	15	2.33±0.21 c	2.67±0.35 c	2.33±0.53 d	2.33±0.76 c	3.00±0.65 b
REC/%	0(CK)	21.15±1.73 c	29.17±1.93 c	17.45±0.91 e	26.47±1.88 d	25.68±1.77 c
	3	39.20±1.55 c	32.55±1.87 c	25.00±1.45 d	32.42±1.42 d	35.21±2.24 c
	6	41.93±1.81 b	37.41±1.56 bc	37.71±1.53 d	47.82±2.82 c	47.99±2.75 b
	9	63.43±2.23 ab	56.27±2.66 b	79.20±4.65 bc	54.07±2.65 bc	57.68±2.67 b
	12	63.43±2.76 ab	79.84±2.42 a	80.12±7.87 ab	62.80±2.25 ab	53.01±2.44 b
	15	71.78±3.34 a	90.82±3.61 a	140.97±13.34 ab	73.76±2.23 a	84.10±5.53 a
MDA/ (nmol · g ⁻¹)	0(CK)	6.41±1.78 cd	0.55±0.04 cd	2.44±0.44 bc	1.99±0.46 d	3.37±1.83 c
	3	10.59±1.34 c	2.74±1.83 c	4.86±0.53 c	3.32±0.72 cd	5.86±1.35 c
	6	10.60±1.67 c	3.15±1.57 b	10.09±1.76 b	4.96±0.26 c	6.11±1.78 b
	9	12.87±1.82 b	4.00±1.87 b	10.38±1.23 b	6.71±0.65 b	7.21±2.24 b
	12	26.07±3.16 a	4.72±1.33 b	10.72±1.56 b	8.80±0.32 b	7.39±2.86 b
	15	29.41±3.58 a	10.43±5.21 a	17.61±3.24 a	11.52±0.23 a	13.08±4.73 a
Pro/ (μg · g ⁻¹)	0(CK)	59.39±1.72 d	19.73±1.77 c	81.51±1.76 e	55.62±0.87 e	66.18±5.34 e
	3	63.98±3.08 d	62.69±6.45 c	83.68±1.37 d	82.76±0.34 d	80.07±6.65 d
	6	136.40±10.03 c	176.23±22.17 c	175.17±3.54 c	83.01±0.43 d	100.10±10.45 c
	9	140.81±13.52 c	169.29±17.22 c	195.23±8.01 b	201.45±0.84 c	126.32±11.82 b
	12	196.34±46.09 b	433.18±66.46 ab	252.25±11.43 a	423.43±0.64 b	185.91±14.35 a
	15	284.04±50.06 a	449.12±72.61 a	257.98±10.84 a	535.72±0.34 a	212.74±56.48 a

表 2(续) Table 2 (continued)

指标 Index	NaCl/ (g · L ⁻¹)	材料来源 Material source				
		宁夏 Ningxia	甘肃 Gansu	内蒙古 Inner Mongolia	山西 Shanxi	陕西 Shaanxi
	0(CK)	0.36±0.01 c	0.18±0.04 c	0.97±0.08 c	0.10±0.01 d	0.47±0.04 c
SS/ (nmol · g ⁻¹)	3	0.42±0.08 bc	0.20±0.07 c	0.77±0.03 cd	0.18±0.02 cd	0.31±0.01 cd
	6	0.77±0.04 b	0.36±0.00 b	0.81±0.07 c	0.19±0.07 c	0.62±0.01 bc
	9	1.37±0.05 ab	0.59±0.03 a	1.53±0.02 a	0.51±0.06 a	0.72±0.00 ab
	12	1.47±0.07 a	0.43±0.01 ab	1.36±0.04 ab	0.44±0.02 b	0.86±0.02 ab
	15	1.50±0.02 a	0.31±0.01 b	1.19±0.06 ab	0.32±0.01 b	1.00±0.08 a

注:表中数据为“平均值±标准误差”。同列数据后标不同小写字母表示同一材料相同指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。PH. 株高; PSD. 茎粗; MLL. 最大叶长; MBW. 最大叶宽; MLA. 最大叶面积; RL. 根长; RN. 根数; REC. 相对电导率; MDA. 丙二醛含量; Pro. 脯氨酸含量; SS. 可溶性糖含量。下同。

Note: The data are “average±standard error”. Different lowercase letters indicate significant differences at the $P<0.05$ probability level among treatments. PH. Plant height; PSD. Plant stem diameter; MLL. Maximum leaf length; MBW. Maximum blade width; MLA. Maximum leaf area; RL. Root length; RN. Root number; REC. Relative electrical conductivity; MDA. Malondialdehyde content; Pro. Proline content; SS. Soluble sugar content. The same below.

2.2 NaCl 胁迫下小茴香幼苗各生长指标间的相关性分析

由表 3 可知,株高、茎粗、最大叶宽、最大叶面积和根数中,任意两个指标之间均呈显著或极显著正相关,其中最大叶面积与最大叶长的相关系数最大,为 0.920。相对电导率与丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量呈极显著正相关,与株高、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积和根数均呈极显著负相关

($P<0.01$);丙二醛含量与株高呈极显著负相关;脯氨酸含量与可溶性糖含量呈极显著正相关,与株高、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、根长、根数均呈极显著负相关。可溶性糖含量与株高、最大叶宽、最大叶面积、根长、根数均呈极显著负相关。以上结果表明,NaCl 胁迫下小茴香幼苗各指标之间存在不同程度的相关性,且有些指标相关性变化趋势基本一致。

表 3 NaCl 胁迫下小茴香幼苗各生长指标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients among growth indexes of fennel seedling under NaCl stress

指标 Index	PH	PSD	MLL	MBW	MLA	RL	RN	REC	MDA	Pro	SS
PH	1.000										
PSD	0.528**	1.000									
MLL	0.616**	0.363*	1.000								
MBW	0.762**	0.720**	0.631**	1.000							
MLA	0.710**	0.600**	0.920**	0.730**	1.000						
RL	0.273	0.261	0.330	0.442*	0.361*	1.000					
RN	0.762**	0.500**	0.460**	0.761**	0.620**	0.280*	1.000				
REC	-0.420**	-0.173	-0.492**	-0.470**	-0.523**	-0.320	-0.470**	1.000			
MDA	-0.520**	-0.264	-0.221	-0.170	-0.212	-0.233	0.021	0.630**	1.000		
Pro	-0.643**	-0.381*	-0.573**	-0.731**	-0.610**	-0.580**	-0.752**	0.532**	0.168	1.000	
SS	-0.621**	-0.360*	-0.420*	-0.583**	-0.544**	-0.591**	-0.580**	0.500**	-0.146	0.689**	1.000

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $P<0.01$ 水平显著相关。

Note: * indicates significant correlation at the $P<0.05$ level, ** indicates significant correlation at the $P<0.01$ level.

2.3 小茴香幼苗各生长指标的主成分分析

通过 SPSS 26.0 软件对 5 个不同地区小茴香材料的 11 个指标进行主成分分析,结果见表 4。表 4 显示,主成分 1 的特征值为 6.446,方差贡献率达 58.601%;主成分 2 的特征值为 1.485,方差贡献率为 13.498%;主成分 3 的特征值为 1.187,方差贡献率为 10.795%,这 3 个主成分的特征值均大于 1.0,累积方差贡献率达 82.894%,说明提取到的 3 个主成分可代表 11 个原始指标的绝大部分信息,能充分反映数据的变化趋势。在主成分 1 中,最大叶宽和最大叶面积的特征向量较大,均在 0.880 以上,表明

这 2 个单项指标是主成分 1 的主要作用因子。在主成分 2 中,丙二醛和脯氨酸含量的特征向量较高,分别为 0.704 和 0.693,表明这 2 个单项指标是主成分 2 的主要作用因子。主成分 3 中以相对电导率的特征向量最大,表明其是主成分 3 的主要作用因子。综合 3 个主成分的信息,可将最大叶宽、最大叶面积、丙二醛含量、脯氨酸含量和相对电导率作为筛选耐盐性小茴香的重要指标。

2.4 小茴香幼苗耐盐性的综合评价

利用公式(2)计算各个指标的隶属函数值 $U(X_{ij})$,然后使用公式(3)计算 3 个主成分的权重

W_i 分别为 0.707,0.163 和 0.130,以隶属函数值与权重相乘计算综合评价值(D),并依据 D 值大小进行排序,结果见表 5。表 5 显示,5 份小茴香材料耐盐性依次表现为甘肃(0.612)>内蒙古(0.545)>山

西(0.487)>宁夏(0.429)>陕西(0.306)。该结果表明,甘肃地区小茴香材料的耐盐性最强,内蒙古、山西和宁夏小茴香材料耐盐性一般,陕西地区小茴香材料的耐盐性最弱。

表 4 小茴香幼苗各生长指标的主成分特征值、累积贡献率及特征向量

Table 4 Eigenvalue,cumulative contribution rates and eigenvector of principal components of growth indexes of fennel seedlings

项目 Project	指标 Index	主成分 Principal components		
		1	2	3
特征向量 Eigenvector	PH	0.836	-0.033	-0.342
	PSD	0.525	0.579	0.016
	MLL	0.721	0.271	0.466
	MBW	0.905	0.151	-0.122
	MLA	0.880	0.138	0.311
	RL	0.876	-0.019	-0.249
	RN	0.846	-0.047	0.033
	REC	-0.686	-0.231	0.647
	MDA	-0.623	0.704	0.107
	Pro	-0.615	0.693	-0.172
特征值 Eigenvalue	SS	-0.799	-0.040	-0.469
		6.446	1.485	1.187
方差贡献率/% Variance contribution rate		58.601	13.498	10.795
累积贡献率/% Cumulative contribute rate		58.601	72.099	82.894
权重 weight		0.707	0.163	0.130

表 5 NaCl 胁迫处理下小茴香幼苗耐盐性的主成分值、隶属函数值和综合评价值(D)

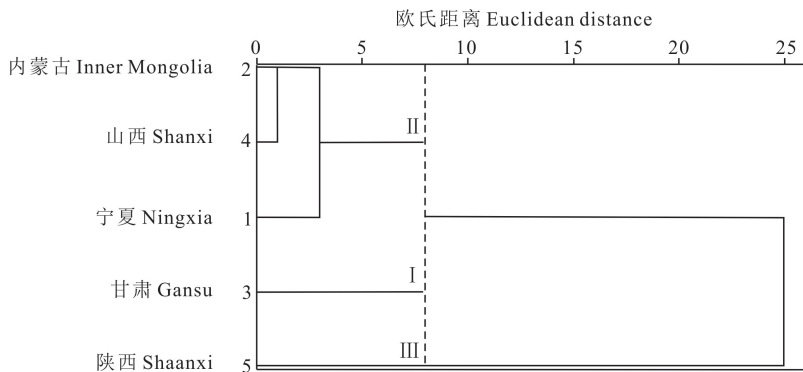
Table 5 Principal component value, membership function value and comprehensive evaluation value(D) of salt tolerance of fennel seedlings under NaCl stress

材料来源 Material source	NaCl/ ($g \cdot L^{-1}$)	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	主成分隶属函数值 Membership function value			综合评价值(D) Comprehensive evaluation value	平均 D 值 Average D value	排序 Rank
					U_1	U_2	U_3			
甘肃 Gansu	3	4.167	0.604	-0.247	1.000	0.401	0.384	0.822	0.612	1
	6	2.597	-0.282	-0.223	0.822	0.209	0.390	0.666		
	9	1.303	-0.373	0.273	0.675	0.190	0.507	0.574		
	12	1.167	-0.354	0.163	0.660	0.194	0.481	0.561		
	15	-0.537	-0.540	0.817	0.467	0.153	0.636	0.438		
内蒙古 Inner Mon- golia	3	3.546	0.486	0.489	0.930	0.376	0.558	0.791	0.545	2
	6	2.640	0.752	0.684	0.827	0.433	0.604	0.734		
	9	0.265	-0.343	1.692	0.558	0.196	0.843	0.536		
	12	-1.910	-1.248	1.998	0.311	0.000	0.915	0.339		
山西 Shanxi	15	-2.635	-0.299	2.357	0.229	0.206	1.000	0.326	0.487	3
	3	2.339	1.247	-0.124	0.793	0.541	0.413	0.702		
	6	2.027	2.537	-0.444	0.757	0.820	0.337	0.713		
	9	-0.128	1.213	0.073	0.513	0.533	0.460	0.509		
	12	-2.923	1.796	-0.591	0.196	0.660	0.303	0.286		
宁夏 Ningxia	15	-4.655	3.367	0.164	0.000	1.000	0.481	0.225	0.429	4
	3	2.913	-0.783	-0.296	0.858	0.101	0.372	0.671		
	6	1.270	-0.812	-0.147	0.672	0.094	0.408	0.543		
	9	-0.779	-1.129	0.676	0.439	0.026	0.602	0.393		
陕西 Shaanxi	12	-1.719	-0.816	0.365	0.333	0.094	0.529	0.319	0.306	5
	15	-2.952	-0.922	0.346	0.193	0.071	0.524	0.216		
	3	2.525	-0.973	-1.376	0.814	0.060	0.117	0.600		
	6	0.013	-0.747	-1.444	0.529	0.109	0.101	0.405		
	9	-1.439	-0.593	-1.820	0.365	0.142	0.012	0.282		
12	-2.587	-0.319	-1.513	0.234	0.201	0.084	0.209			
15	-4.507	-0.682	-1.870	0.017	0.123	0.000	0.032			

2.5 小茴香幼苗耐盐性的聚类分析

基于 D 值,利用组间联接法和平方欧氏距离法对不同地区小茴香幼苗的耐盐性进行聚类分析,结果(图 1)显示,在欧氏距离 8.0 处,来自 5 个不同地区的小茴香材料可分为 3 类。第 I 类为甘肃地区小

茴香材料(D 为 0.612),属耐盐型;第 II 类为内蒙古、山西和宁夏地区小茴香材料(D 为 0.429~0.545),属中度耐盐型;第 III 类为陕西地区小茴香材料(D 为 0.306),属轻度耐盐型。



I. 耐盐型; II. 中度耐盐型; III. 轻度耐盐型。虚线代表欧氏距离为 8.0。

I. Salinity tolerance type; II. Moderate salinity tolerance type; III. Mild salinity tolerance type.

The dotted line represents the Euclidean distance of 8.0.

图 1 不同地区小茴香材料耐盐性的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis on salt tolerance of fennel seedlings from different regions

2.6 小茴香幼苗耐盐性评价最优回归方程的拟合及关键评价指标的筛选

为分析小茴香各形态与生理指标与耐盐性之间的关系,并筛选关键耐盐指标,建立可用于小茴香耐盐性评价的数学模型。以 D 值作为因变量,以株高、茎粗、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、根长、根数、相对电导率、丙二醛含量、脯氨酸含量和可溶性糖含量的耐盐系数作为自变量进行逐步回归分析,筛选出最大叶长、最大叶面积、相对电导率和脯氨酸含量 4 个指标对小茴香幼苗的耐盐性有显著影响,由此建立小茴香苗期耐盐性评价的最优回归方程

为: $D=0.048-0.132X_1+0.545X_2+0.068X_3+0.008X_4$, $R^2=0.902$, $P<0.001$,其中 $X_1\sim X_4$ 分别为最大叶长、最大叶面积、相对电导率和脯氨酸含量的耐盐系数。决定系数 R^2 为 0.902,表明该方程具有较强的解释能力,可以解释 90.2% 的数据变化。通过该回归方程对 5 个不同地区小茴香材料的耐盐性进行预测,其预测精度均达到 98% 以上(表 6),表明该方程可用于小茴香品种耐盐能力的预测,所筛选出的上述 4 个指标可用作小茴香耐盐性评价的关键指标。

表 6 小茴香材料耐盐性评价的最优回归方程的预测精度

Table 6 Forecast accuracy of regression equation for salt tolerance evaluation of fennel seedling

材料来源 Material source	预测值 Primary value	原始值 Regression value	预测误差 Forecast error	预测精度/% Forecast accuracy
宁夏 Ningxia	0.429	0.424	-0.005	98.83
内蒙古 Inner Mongolia	0.545	0.552	0.007	98.73
甘肃 Gansu	0.612	0.620	0.008	98.71
山西 Shanxi	0.487	0.482	-0.005	98.97
陕西 Shaanxi	0.306	0.312	0.006	98.08

3 讨论

小茴香作为耐盐碱作物之一,对其耐盐性进行评价并筛选耐盐性较强的品种,对于小茴香产业的发展以及盐渍化土地的充分利用均具有十分重要的意义。小茴香幼苗对 NaCl 胁迫有明显响应效应,最直观的表现就是其形态和生理生化指标有明显变

化^[29]。本研究分析了 NaCl 胁迫下不同地区小茴香幼苗株高、茎粗、最大叶长、最大叶宽、最大叶面积、根长和根数等 7 个形态指标的变化,结果发现这些指标均受到了一定程度的抑制,并且抑制程度随着 NaCl 质量浓度的增加而增大,这与韩凤叶等^[30]和高方胜等^[31]的研究结果一致。质膜是植物感受逆境胁迫的主要部位,当植物受到 NaCl 胁迫时,首先

伤害质膜结构,膜透性增大,从而使相对电导率增大,同时伴随着膜脂过氧化反应,导致丙二醛含量升高。本研究中,NaCl胁迫下5份来自不同地区的小茴香幼苗的相对电导率和丙二醛含量均随着NaCl质量浓度的增大而上升,表明其细胞膜脂过氧化程度加深,这与孟蕊等^[32]关于菊花嫁接苗耐盐性的研究结果基本一致。王旭明等^[33]的研究发现,耐盐性强的水稻通常丙二醛含量较低,这与本研究中甘肃地区小茴香幼苗丙二醛含量最低,其耐盐性最强的结果一致。前人研究表明,NaCl胁迫会使植物细胞渗透压失衡,植物会通过积累脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质来防止细胞过度失水^[34]。本研究中,随着NaCl质量浓度的增加,甘肃、内蒙古和山西小茴香幼苗的脯氨酸和可溶性糖含量均有所增加,但当NaCl质量浓度高于9 g/L时脯氨酸可持续积累,而可溶性糖含量则呈下降趋势,表明在轻度NaCl胁迫下,小茴香可通过增加溶性糖含量来调节渗透压,NaCl质量浓度较高时小茴香则通过增加脯氨酸来抵抗逆境的胁迫。

植物耐盐性是遗传背景和环境等一系列因素综合影响的复杂结果^[35-36],因此应该采用多指标结合多元分析法才能全面反映植物的耐盐性,通过这种综合评价的方式,不仅可以建立科学可靠的评价体系,而且还能筛选到关键指标,以节省时间和减少耗材^[37],该分析方法现已用于玉米^[38]、大豆^[39]和越橘^[40]等作物的耐盐性研究,但有关小茴香幼苗耐盐性综合评价和关键耐盐指标筛选的报道则较少。本研究通过主成分分析,将11个单项指标简化为3个主成分,其累积方差贡献率为82.894%。结合隶属函数和主成分分析进行综合评价,来自5个地区的小茴香材料中,耐盐性较好的为甘肃小茴香材料,其次为内蒙古、山西和宁夏的小茴香材料,陕西小茴香材料对NaCl胁迫的耐受性较差。边荣荣等^[41]和李爽等^[42]的相关研究也表明,甘肃、内蒙古和山西的盐碱地面积较大,这些地区小茴香等作物长期处于盐碱胁迫生长环境中,因此对NaCl胁迫的耐受性强,这与本研究中小茴香幼苗耐盐性的综合评价结果基本一致。

合理筛选耐盐指标是鉴定作物耐盐性的关键。目前针对作物在盐胁迫下的耐受性,不同研究者所筛选的耐盐指标不尽相同。Mu等^[43]认为,可溶性糖含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性与黑麦品种的耐盐性呈极显著相关($P < 0.05$)。田小霞等^[44]发现,5份无芒雀麦种质材料苗期脯氨酸及丙二醛含

量与其耐盐性显著相关($P < 0.05$)。苗涵等^[45]通过逐步回归分析对2个冰草主栽品种的12个指标进行耐盐指标筛选,发现根长及脯氨酸和可溶性糖含量等7个指标对冰草材料的耐盐性具有显著影响($P < 0.05$)。本研究的逐步回归分析结果表明,最大叶面积、相对电导率、脯氨酸含量和最大叶长对小茴香幼苗的耐盐性有显著影响,这些指标可用作小茴香幼苗耐盐性的筛选指标,以此为基础建立的最优回归方程可用于小茴香幼苗耐盐能力的预测,且其预测精度达98%以上,说明通过逐步回归分析来评价小茴香幼苗的耐盐能力和筛选耐盐指标较为科学且准确。

[参考文献]

- [1] 王晓敏,李军,高艳明,等. 茴香的研究进展 [J]. 河北农业科学, 2013, 17(5): 37-40, 46.
Wang X M, Li J, Gao Y M, et al. Studying progress on fennel [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2013, 17(5): 37-40, 46.
- [2] 李晓微,郭文场,周淑荣. 北方地区小茴香标准化栽培技术 [J]. 特种经济动植物, 2019, 22(12): 25-26, 34.
Li X W, Guo W C, Zhou S R. Standardized cultivation of fennel in northern China [J]. Special Economic Animals and Plants, 2019, 22(12): 25-26, 34.
- [3] 李飞飞,魏悦,宋梦娇,等. 一测多评法测定八角茴香中3种成分及药材指纹图谱 [J]. 中国新药杂志, 2020, 29(12): 1419-1424.
Li F F, Wei Y, Song M J, et al. Determination of three components and fingerprint research in *Anisi stellati* Fructus by QAMS method [J]. Chinese Journal of New Drugs, 2020, 29(12): 1419-1424.
- [4] 莫庸,黄景珠,黄森平,等. 茴香提取液治疗小鼠原发性痛经的作用机制研究 [J]. 中国妇幼保健, 2022, 37(16): 3057-3060.
Mo Y, Huang J Z, Huang S P, et al. Study on the mechanism of fennel extract in treatment of primary dysmenorrhea in mice [J]. Maternal and Child Health Care of China, 2022, 37(16): 3057-3060.
- [5] 江雨欣,王锐莹,张旭,等. 八角茴香及其混伪品的DNA分子标记鉴别 [J]. 食品科技, 2022, 47(8): 307-311.
Jiang Y X, Wang R Y, Zhang X, et al. Authentication of *Anisi stellati* Fructus and its adulterants using DNA molecular markers [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(8): 307-311.
- [6] Javad S. Augmentation of anti-bacterial efficacy of augmentin: an antibiotic by *Foeniculum vulgare* extract [J]. Pure and Applied Biology, 2019, 8(2): 1818-1823.
- [7] Abdel-Baki A A S, Aboelhadid S M, Sokmen A, et al. Larvicidal and pupicidal activities of *Foeniculum vulgare* essential oil, trans-anethole and fenchone against house fly *Musca domestica* and their inhibitory effect on acetylcholinesterase [J]. Entomo-

- logical Research, 2021, 51(11): 568-577.
- [8] 陈晓文, 张蓉, 路平, 等. 9 份小茴香种质资源的种子质量和田间比较试验 [J]. 中国种业, 2022(1): 66-70.
Chen X W, Zhang R, Lu P, et al. Seed quality and field comparative test of 9 fennel germplasm resources [J]. China Seed Industry, 2022(1): 66-70.
- [9] Mutlu-Ingok A, Catalkaya G, Capanoglu E, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of fennel, ginger, oregano and thyme essential oils [J]. Food Frontiers, 2021, 2(4): 508-518.
- [10] Ke W, Wang H, Zhao X, et al. *Foeniculum vulgare* seed extract exerts anti-cancer effects on hepatocellular carcinoma [J]. Food & Function, 2021, 12(4): 1482-1497.
- [11] Hassani A, Azapagic A, Shokri N. Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century [J]. Nature Communications, 2021, 12: 6663.
- [12] 张毅, 侯维海, 冯西博, 等. 有色大麦种质芽期耐盐性鉴定 [J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 564-573.
Zhang Y, Hou W H, Feng X B, et al. Evaluation of salt tolerance of colored barley germplasm during germination [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(3): 564-573.
- [13] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望 [J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10-27.
Yang J S, Yao R J, Wang X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27.
- [14] 胡卉芳, 崔乐乐, 王娟, 等. 老芒麦不同品系种子萌发期耐盐性 [J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(11): 119-126.
Hu H F, Cui L L, Wang J, et al. Salt tolerance of seeds of different *Elymus sibiricus* lines at germination stage [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(11): 119-126.
- [15] 刘缙, 吴科, 徐璐娜. 海原县小茴香适宜生长气象条件分析 [J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(10): 60-62.
Liu M, Wu K, Xu L N. Suitable meteorological conditions for fennel in Haiyuan County [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018, 59(10): 60-62.
- [16] Nounjan N, Theerakulpisut P. Physiological evaluation for salt tolerance in green and purple leaf color rice cultivars at seedling stage [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2021, 27(12): 2819-2832.
- [17] 宋立金, 丁日升, 曹荷莉, 等. 集成萌芽期生长和苗期生理指标高通量筛选番茄耐盐品种 [J]. 植物生理学报, 2022, 58(4): 733-745.
Song L J, Ding R S, Cao H L, et al. High-throughput selection of tomato salt-tolerant varieties by integrating growth and physiological indexes during the germination and seedling stages [J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(4): 733-745.
- [18] 王琪, 岳江, 岑青芙, 等. 不同番茄品种幼苗期耐盐性鉴定 [J]. 山地农业生物学报, 2021, 40(6): 20-29.
Wang Q, Yue J, Cen Q F, et al. Study on salt tolerance of the different tomato varieties at seedling stage [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2021, 40(6): 20-29.
- [19] 常巍, 李雪, 周燕飞, 等. 基于苗期叶片形态及光合特性的苜蓿种质资源抗旱性综合评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 57-68.
Chang W, Li X, Zhou Y F, et al. Screening of drought resistance indices and comprehensive evaluation of alfalfa germplasm resources based on leaf morphology and photosynthetic characteristics at seedling stage [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2020, 48(5): 57-68.
- [20] 郭书亚, 艾金祥, 陈虹宇, 等. 基于主成分-聚类-逐步回归分析构建番茄苗期耐盐性综合评价体系 [J]. 植物学报, 2022, 57(4): 479-489.
Guo S Y, Ai J X, Chen H Y, et al. Establishment of a comprehensive evaluation system for aluminum tolerance in tomato seedlings based on principal component analysis-clustering analysis-stepwise regression analysis [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(4): 479-489.
- [21] Yu R, Wang G, Yu X, et al. Assessing alfalfa (*Medicago sativa* L.) tolerance to salinity at seedling stage and screening of the salinity tolerance traits [J]. Plant Biology, 2021, 23(4): 664-674.
- [22] 马帅国, 田蓉蓉, 胡慧, 等. 粳稻种质资源苗期耐盐性综合评价与筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(5): 1089-1101.
Ma S G, Tian R R, Hu H, et al. Comprehensive evaluation and selection rice (*Oryza sativa japonica*) germplasm for saline tolerance at seedling stage [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(5): 1089-1101.
- [23] 余如刚, 王雪茹, 王国良, 等. 紫花苜蓿品种苗期耐盐性分析及评价指标筛选 [J]. 草地学报, 2022, 30(7): 1781-1789.
Yu R G, Wang X J, Wang G L, et al. Analysis of salinity-tolerance and screening evaluation indicators to salinity-tolerance in *Medicago sativa* seedlings [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(7): 1781-1789.
- [24] 王晓敏, 俞婷, 李军, 等. 不同地区茴香生长习性的比较研究 [J]. 安徽农学通报, 2015, 21(22): 32-34, 77.
Wang X M, Yu T, Li J, et al. Study on growth behavior of fennel from different areas [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(22): 32-34, 77.
- [25] 邹琦. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 159-162.
Zou Q. Experimental instruction of plant physiology [M]. Beijing, China Agriculture Press, 2000: 159-162.
- [26] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 167-281.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological experiment [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 167-281.
- [27] 李洪磊, 王晓敏, 郑福顺, 等. 基于主成分和隶属函数分析的不同果色番茄品种引种初步评价 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 402-411.
Li H L, Wang X M, Zheng F S, et al. Preliminary evaluation of different fruit color tomato varieties introduction based on

- principal component and membership function analysis methods [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2021, 43(2): 402-411.
- [28] 刘畅,郭劲鹏,高原,等. 寒地苹果资源遗传多样性及群体结构的 SSR 标记分析 [J]. 中国果树, 2023, 235(5): 15-22.
Liu C, Guo J P, Gao Y, et al. Genetic diversity and population structure analysis of apple resources in cold region based on SSR markers [J]. China Fruits, 2023, 235(5): 15-22.
- [29] 曹齐卫,杜连达,杨宗辉,等. 黄瓜耐盐种质资源的筛选与评价 [J]. 核农学报, 2022, 36(5): 865-875.
Cao Q W, Du L D, Yang Z H, et al. Screening and evaluation of cucumber salt-tolerant germplasm [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(5): 865-875.
- [30] 韩凤叶,肖艳辉,潘春香,等. NaCl 胁迫对茴香植株生长及生理指标的影响 [J]. 韶关学院学报, 2010, 31(9): 65-68.
Han F Y, Xiao Y H, Pan C X, et al. Effect of NaCl stress on growth and physiological indexes in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) seedling [J]. Journal of Shaoguan University, 2010, 31(9): 65-68.
- [31] 高方胜,王明友. 盐胁迫对茴香生理特性的影响 [J]. 河南农业科学, 2011, 40(12): 126-128, 132.
Gao F S, Wang M Y. Effects of salt stress on physiological characteristics of fennel [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(12): 126-128, 132.
- [32] 孟蕊,刘晔,赵爽,等. 砧穗互作对菊花嫁接苗耐盐性的影响 [J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 629-642.
Meng R, Liu Y, Zhao S, et al. Effects of rootstock and scion interaction on salt tolerance of grafted *Chrysanthemum* seedlings [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 629-642.
- [33] 王旭明,麦绮君,周鸿凯,等. 盐胁迫对 4 个水稻种质抗逆性生理的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(2): 149-156.
Wang X M, Mai Q J, Zhou H K, et al. Effects of salt stress on resistance physiology of four rice germplasms [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(2): 149-156.
- [34] 周静,徐强,张婷. NaCl 胁迫对不同品种辣椒幼苗生理生化特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 120-125.
Zhou J, Xu Q, Zhang T. Effect of NaCl stress on physiological characteristics of seedlings of different pepper varieties [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(2): 120-125.
- [35] 张则宇,李雪,王焱,等. 59 份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选 [J]. 草地学报, 2020, 28(1): 112-121.
Zhang Z Y, Li X, Wang Y, et al. Salt tolerance evaluation and salt tolerance index screening of 59 alfalfa germplasm materials seedling stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1): 112-121.
- [36] Sun Y, Li J, Xing J, et al. Evaluation of salt tolerance in common vetch (*Vicia sativa* L.) germplasms and the physiological responses to salt stress [J]. Journal of Plant Physiology, 2022, 278: 153811.
- [37] 胡亮亮,王素华,王丽侠,等. 绿豆种质资源苗期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选 [J]. 作物学报, 2022, 48(2): 367-379.
Hu L L, Wang S H, Wang L X, et al. Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant germplasm of mungbean (*Vigna radiata* L.) at seedling stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(2): 367-379.
- [38] 刘丽丽,乔梓启,杜明,等. 一种基于综合指标的耐盐方程式准确预测玉米耐盐性 [J]. 植物生理学报, 2022, 58(2): 458-468.
Liu L L, Qiao Z Q, Du M, et al. A salt tolerance equation based on comprehensive indexes accurately predicts salt tolerance of maize inbred lines [J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(2): 458-468.
- [39] 张翠平,王鹏年,张春兰,等. 18 份大豆品种耐盐性筛选与综合鉴定 [J]. 种子, 2020, 39(8): 17-23.
Zhang C P, Wang P N, Zhang C L, et al. Screening and comprehensive identification of 18 salt-tolerant soybean varieties [J]. Seed, 2020, 39(8): 17-23.
- [40] 韦建辰,徐振彪,贾文飞,等. 盐胁迫对 3 个越橘品种组培苗生长的影响与耐盐性评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 113-122.
Wei J C, Xu Z B, Jia W F, et al. Effects of salt stress on growth of tissue culture seedlings of three blueberry cultivars and evaluation of salt tolerance [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 113-122.
- [41] 边荣荣,孙兆军,李向辉,等. 西北盐碱地改良利用技术研究现状及展望 [J]. 宁夏工程技术, 2016, 15(4): 404-408.
Bian R R, Sun Z J, Li X H, et al. Present situation and prospect of improvement and utilization of saline-alkali land in Northwest [J]. Ningxia Engineering Technology, 2016, 15(4): 404-408.
- [42] 李爽,汤巧香,高杰. 河西走廊盐碱地治理研究 [J]. 现代园艺, 2019, 42(17): 76-77.
Li S, Tang Q X, Gao J. Study on saline-alkali land management in Hexi Corridor [J]. Contemporary Horticulture, 2019, 42(17): 76-77.
- [43] Mu D, Ding C. Developing a salinity tolerance indicator for tree varieties at challenging sites and urban forests based on inferences of physiological responses: an example of *Ulmus pumila* [J]. Trees, 2022, 36: 593-607.
- [44] 田小霞,毛培春,孟林,等. 无芒雀麦苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(10): 156-161.
Tian X X, Mao P C, Meng L, et al. Determination of indicators for salt-tolerant evaluation and comprehensive evaluation of salt-tolerant at the seedlings of *Bromus inermis* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(10): 156-161.
- [45] 苗涵,魏莱,杨燕萍,等. 海水胁迫下冰草幼苗期耐盐性指标筛选 [J]. 草业学报, 2023, 32(3): 200-211.
Miao H, Wei L, Yang Y P, et al. Comprehensive screening of *Agropyron cultivars* for tolerance to salt stress at the seedling stage [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(3): 200-211.