

· 研究论文 ·

基于根系表型性状的蚕豆耐盐碱性鉴定与综合评价

范惠玲^{1,3}, 路妍³, 金文海¹, 王慧¹, 彭小星¹, 武学霞^{1*}, 刘玉皎^{1,2*}

¹青海大学, 西宁 810016; ²青藏高原种质资源研究与利用实验室, 西宁 810016; ³河西学院, 张掖 734000

摘要 蚕豆(*Vicia faba*)耐盐碱性种质鉴定为挖掘耐盐碱基因和选育耐盐碱品种奠定基础, 对盐碱地利用具有重要意义。利用8 g·L⁻¹混合盐碱溶液(NaCl、Na₂CO₃和Na₂SO₄, 质量比为9:1:1, pH9.25)对399份国内外蚕豆种质在萌发期进行胁迫处理, 并测定了3个发芽指标和13个根系指标, 采用相关性、主成分、隶属函数和系统聚类分析, 对各种质的耐盐碱性进行综合评价。结果表明: (1) 在盐碱胁迫下, 根系交叠数受到的影响最大, 关节点次之, 而根平均直径较稳定; (2) 交叠数与总连接点数之间, 分叉数与交叠数、总连接点数之间等大部分指标间均呈极显著正相关($P<0.01$); 而根平均直径与根总数量、根尖数量、根总长、端点数、关节点数、连接数、分叉数、交叠数和总连接点数之间呈极显著负相关($P<0.01$); (3) 根总表面积、根总投影面积、根总长和根总体积可作为蚕豆萌发期耐盐碱性鉴定的适宜指标; (4) 筛选出2份耐碱盐种质H0000809和H0000653, 2份盐碱敏感种质H0001714和H0002622; (5) 399份蚕豆种质可分为4类, 第I类为耐盐碱种质, 占0.75%; 第II类为中耐盐碱种质, 占8%; 第III类为弱耐盐碱种质, 占52.88%; 第IV类为不耐盐碱种质, 占38.35%。综上, 该研究明确了各指标的变异程度和相关性, 确定了耐盐碱性鉴定的关键指标, 筛选出的极端材料可用于蚕豆耐盐碱机理研究和耐盐碱基因挖掘。

关键词 蚕豆, 萌发期, 盐碱胁迫, 耐盐碱种质鉴定, 综合评价

范惠玲, 路妍, 金文海, 王慧, 彭小星, 武学霞, 刘玉皎 (2025). 基于根系表型性状的蚕豆耐盐碱性鉴定与综合评价. 植物学报 60, 204–217.

土壤盐分是主要的非生物胁迫因素之一。全球约有 4.5×10^5 hm²的灌溉土地受到盐胁迫相关问题的影响(Abdel Latef et al., 2021)。在未来30年内, 超过50%的耕地可能受到盐的影响(Shrivastava and Kumar, 2015)。由于全球变暖导致海平面上升、富盐水灌溉和土壤大规模侵蚀, 全球土壤盐碱化将日益加剧(Nachshon, 2018)。盐碱化现象导致植物生长受到抑制或死亡, 全球粮食减产。因此, 努力提高作物的耐盐碱性对于盐碱化耕地和边缘土地的可持续利用至关重要, 以确保未来的粮食供应。然而, 过量的盐分在土壤中积累以及含盐地下水的使用威胁全世界豆类生产。蚕豆(*Vicia faba*)作为重要的食用豆类和生物固氮作物, 由于其多元化功能和生态价值(刘伟等, 2024), 现有的种植面积已无法满足蚕豆生产发展的需求。耐盐碱蚕豆品种选育是因地制宜、拓

展农业生产空间的重要途径, 具有重要的生态和经济意义。种子植物生活史中对外界环境最敏感的阶段为萌发期(高占武, 2011)。目前有关其它食用豆类作物萌发期耐盐碱性的研究取得了较大进展。例如, 以NaCl为胁迫条件, 前人开展了大豆(*Glycine max*) (周秀文等, 2022; 刘欣玥等, 2024)、红小豆(*Vigna angularis*) (姜雪琪, 2015; 蔡可心等, 2020)、绿豆(*Vigna radiata*) (任建华等, 1993; 王乐政等, 2015; 时会影等, 2024)和豌豆(*Pisum sativum*) (朱志华等, 1989)等的相关研究。有关蚕豆近缘植物萌发期耐盐性的研究除了以单盐为胁迫条件, 也有采用混合盐碱的研究。郎炳尧等(2024)采用4种成分(NaCl、Na₂CO₃、Na₂SO₄和NaHCO₃)的混合溶液鉴定了绿豆的耐盐碱性; 张新草等(2020)用4种成分的混合盐碱溶液鉴定了大豆的耐盐碱性; 于崧等(2017)采用混合碱溶液鉴定了绿豆

收稿日期: 2024-06-16; 接受日期: 2024-10-14

基金项目: 国家食用豆产业技术体系建设专项(No.CARS-08)、国家自然科学基金(No.42267008)、青海大学两级财政科研实力提升项目-青年创新人才支持计划(No.2025KTSQ12)和青海省重点研发与转化计划(No.2022-NK-109)

* 通讯作者。 E-mail: xuexun111@163.com; 13997058356@163.com

的耐碱性; 亚秀秀等(2022)研究了豌豆种质在盐碱溶液(NaCl 、 Na_2SO_4 和 NaHCO_3)胁迫下的耐盐性。可见, 在大豆、绿豆和豌豆等食用豆类作物中均存在对盐碱具有一定程度耐性的种质。而有关蚕豆种质资源耐盐碱性鉴定方面的研究报道较少, 且多数采用单盐胁迫(朱志华等, 1990; 杨访问, 2020; 樊有存, 2021)。总之, 已有研究中鉴定出的耐盐蚕豆种质仅表现出对单盐胁迫的耐受性。迄今为止, 未见有关蚕豆萌发期耐混合盐碱胁迫的报道。

植物通过根系吸收水分和养分, 而盐碱地对根的生长发育产生不利影响, 根系结构生长发育不良意味着植物的整体健康状况欠佳。前人对蚕豆种质资源耐盐性的评价主要依据发芽相关性状, 未见根系发育特性与耐盐性关系的报道。本研究以399份蚕豆种质资源为试验材料, 采用 $8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合盐碱(NaCl 、 Na_2CO_3 和 Na_2SO_4 , pH9.25)在萌发期进行胁迫处理, 测定了发芽势、发芽率和发芽指数3个发芽指标以及根总长、根总数量和根平均直径等13个根系指标, 运用模糊数学隶属函数值、频数、系统聚类及主成分分析等方法进行综合评价, 筛选出耐盐碱性较强的种质, 为蚕豆耐盐碱机理研究、基因挖掘和品种选育提供了候选材料。

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

供试材料为399份蚕豆(*Vicia faba* L.)种质, 其中包括299份地方种质、99份国外种质和1份育成品种, 其全国统一编号和来源见附表1。实验于2022年7月–2023年9月在甘肃河西学院农业与生态工程学院完成。

1.2 实验设计

参照《蚕豆种质资源描述规范和数据标准》中所述的方法(宗绪晓等, 2006), 在前期浓度筛选试验的基础上, 选取 $8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合盐碱(pH9.25), 包括 $6.56 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 、 $0.733 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 和 $0.733 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2SO_4 , Na^+ 的摩尔浓度为 $136.29 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 进行萌发期胁迫试验。种子消毒处理: 挑选大小较一致的蚕豆种子5粒, 先用5%次氯酸钠消毒15分钟, 再用清水冲洗3次, 用吸水纸吸干水分, 备用。种子吸胀处理: 将消毒后的种子浸泡在盐碱溶液中, 48小时后挑选完全吸胀的种子进

行萌发试验。种子萌发处理: 在培养皿($\Phi 120 \text{ mm}$)中放入一张定性滤纸, 再加入5 mL盐碱溶液, 然后均匀摆放种子, 重复3次; 在 25°C 恒温培养箱中处理7天。为消除不同层次之间的温度差异, 每天调换1次培养皿的位置。发芽期间每天记录种子发芽数(以胚根长度与籽粒长度等长为发芽标准)。发芽势、发芽率和发芽指数按以下公式计算。

发芽势(%)=(第4天发芽种子数/供试种子数) $\times 100$;

发芽率(%)=(第7天发芽种子数/供试种子数) $\times 100$;

发芽指数= $\Sigma(\text{DG}/\text{DT})$, DG: 逐日发芽数; DT: 相应DG的发芽天数。

1.3 指标测定

盐碱胁迫后第8天, 取出每个培养皿中发芽的幼苗, 用清水洗净根系, 滤纸吸干残余水分后准备测量。使用植物根系表型分析系统(GXY-A, 浙江托普云农科技股份有限公司)测量幼苗根总数量、根尖数量、端点数、总连接点数、根总长、根总投影面积、根平均直径、根总体积、分叉数、关节点数、交叠数、连接数和根总表面积共计13个指标。

1.4 耐盐碱和盐碱敏感蚕豆种质花期表型鉴定

选取 $9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐碱(pH10.5)溶液, 包括 $7.3800 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 、 $0.8246 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 和 Na_2SO_4 , 进行花期胁迫处理。将盐碱溶液一次性拌入基质(主要成分为草炭:蛭石:珍珠岩=1:1:1, v/v/v), 使基质持水量达75%–80%。在长宽高为 $19 \text{ cm} \times 13 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ 的培养盒内装入约三分之二体积的基质。挑选健康饱满、大小均匀一致的蚕豆种子5粒, 用自来水冲洗3次, 3%次氯酸钠溶液消毒10分钟, 蒸馏水冲洗3次, 然后均匀摆放在在基质表面, 覆盖1 cm厚的基质。每份材料重复3次。将培养盒置于白天 20°C /夜晚 15°C , 相对湿度为50%–60%, 光照为自然光的玻璃温室中培养。出苗至收获期间, 每隔15天加300 mL Hoagland营养液。为避免在培养过程中盐碱浓度和pH值发生变化, 蚕豆生长到第30天和第60天时各浇1次等量的 $9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐碱溶液。定期观察生长情况, 在花期拍照并记录表型。

1.5 数据处理与分析

先用Microsoft Excel2016软件整理数据, 得到指标的

平均值,在处理13个根系指标时,不计入未发芽种子数。运用SPSS 23.0软件对399份蚕豆种质的16个指标先进行双变量相关性分析,得到皮尔逊相关系数及其显著性水平,再进行因子分析,得到主成分(胡亮亮等,2022)。计算隶属函数值和耐盐碱性综合评价D值,通过D值排名综合评价参试材料的耐盐碱性强弱;然后计算16个指标的总载荷数并排序,确定较优指标,制作四象限图。运用R语言4.3软件,以综合评价D值为变量,按照离差平方和的标准进行系统聚类分析(陈二影等,2020)。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫下各性状的变异

为阐明盐碱胁迫下不同性状的变化特征,对399份蚕豆种质16个指标进行分析(表1)。结果表明,交叠数和关节点数的变异系数大于100%,分别为209.537%和102.528%,表现出强变异;根总体积、根总数量、

连接数、分叉数、发芽势、总连接点数和发芽指数7个指标的变异系数较高,介于53.777%–93.612%之间,发芽率、根尖数量、端点数、根总长、根总投影面积以及根总表面积6个指标的变异系数介于42.779%–48.167%之间,这表明蚕豆种子发芽和大部分根系性状均表现中等程度变异;根平均直径的变异系数最低,为17.480%。综上表明,在盐碱胁迫下,不同蚕豆种质的根系和发芽性状都发生了一定程度的变异,其中交叠数受到的影响最大,关节点次之,而根平均直径较稳定。

考察的16个指标中,发芽率呈左偏态分布,而根总长、根总投影面积、根总表面积、根总体积、根尖数量、端点数、发芽势、发芽指数、总连接点数、关节点数、连接数、分叉数、交叠数、根平均直径和根总数量15个指标呈右偏态分布(图1)。除根平均直径外,个别材料12个根系指标出现极大值。发芽势的平均值为51.200%、众数为20.000%、四分位差为51.050%(表1)。

表1 盐碱胁迫下各性状的参数值

Table 1 Parameter value of different traits under saline-alkali stress

Traits	Mean (%)	Mode (%)	Skewness	Standard deviation	Variation range	Interquartile range (%)	Variable coefficient (%)
NR	2.630	2.000	3.829	1.530	1.000–17.300	1.259	58.175
NRT	3.123	3.000	4.876	1.336	1.000–17.700	0.990	42.779
LR	1.651	1.496	3.502	0.733	0.510–8.721	0.693	44.397
ADR	2.008	1.757	0.187	0.351	1.903–3.418	0.450	17.480
TPAR	34.662	9.324	2.478	15.534	9.324–136.722	15.591	44.816
TSAR	108.895	29.291	2.478	48.802	29.291–429.524	48.981	44.816
BUR	60.948	11.289	2.344	32.776	11.289–262.196	34.705	53.777
TNCP	5.457	0.400	3.613	3.219	0.200–35.700	2.875	58.987
EP	3.123	3.000	4.876	1.336	1.000–17.700	0.990	42.779
CL	2.334	1.000	2.640	2.393	0.000–19.000	2.141	102.528
LN	5.027	3.000	2.843	3.876	1.000–35.300	3.310	77.104
BN	1.628	1.000	3.742	1.524	0.000–16.000	1.259	93.612
ON	0.713	0.000	5.648	1.494	0.000–19.000	0.961	209.537
GP	51.200	20.000	0.058	30.300	0.000–100.000	51.050	59.179
GI	3.679	1.593	0.865	2.433	0.000–11.964	3.613	66.132
GR	60.000	80.000	-0.209	28.900	0.000–100.000	49.000	48.167

NR: 根总数量; NRT: 根尖数量; LR: 根总长; ADR: 根平均直径; TPAR: 根总投影面积; TSAR: 根总表面积; BUR: 根总体积; TNCP: 总连接点数; EP: 端点数; CL: 关节点数; LN: 连接数; BN: 分叉数; ON: 交叠数; GP: 发芽势; GI: 发芽指数; GR: 发芽率

NR: Total number of root; NRT: Number of root tip; LR: Total length of root; ADR: Average diameter of root; TPAR: Total projected area of root; TSAR: Total surface area of root; BUR: Total volume of root; TNCP: Total number of connection points; EP: Endpoint number; CL: Coila number; LN: Linking number; BN: Bifurcation number; ON: Overlap number; GP: Germination potential; GI: Germination index; GR: Germination rate

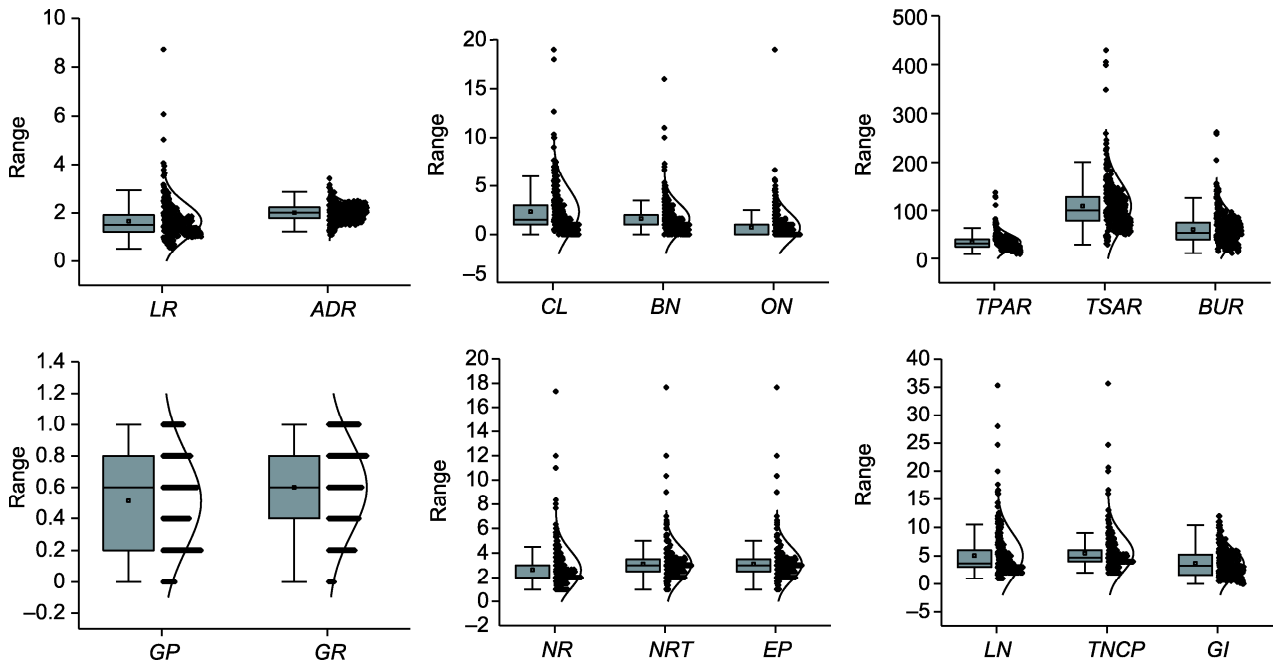


图1 蚕豆根系表型指标的均值分布图

LR、ADR、CL、BN、ON、TPAR、TSAR、BUR、GP、GR、NR、NRT、EP、LN、TNCP和GI同表1。

Figure 1 Plots of the distribution of means for phenotypic index in faba bean root

LR, ADR, CL, BN, ON, TPAR, TSAR, BUR, GP, GR, NR, NRT, EP, LN, TNCP, and GI are the same as shown in Table 1.

不同蚕豆种质根平均直径主要集中在1.234–2.100 mm和2.101–2.597 mm, 分布频率分别为53.90%以及34.30%。就发芽率而言, 54.80%的材料介于20.0%–60.0%, 18.50%的材料分布在80.0%–100.0%。根总长主要分布在0.671–1.666 cm以及1.667–2.926 cm两个长度范围内。根总表面积集中分布在34.515–83.200 mm²和83.827–165.749 mm²。根总体积主要分布在11.289–49.986 mm³和50.226–108.701 mm³, 有4份材料的根总体积大于204.52 mm³。可见, 在盐碱胁迫下不同性状呈现出广泛的变异, 表明参试蚕豆种质耐盐碱性状具有多样性。

2.2 盐碱胁迫下各性状间的相关性分析

为探明各指标间的相关性程度和相关方向, 我们计算出不同指标间的相关系数(表2)。结果表明, 相互间呈极显著正相关($P<0.01$)的指标有: 交叠数与总连接点数, 分叉数与交叠数、总连接点数, 连接数与分叉数、交叠数、总连接点数, 关节点数与连接数、分叉数、交叠数、总连接点数, 端点与关节点数、连接数、分叉数、总连接点数, 根总体积与端点数、关节点数、连接数、分叉数、交叠数、总连接点数, 根总表面积

与根总体积、端点数、关节点数、连接数、分叉数、交叠数、总连接点数, 根总投影面积与根总表面积、根总体积、端点数、关节点数、连接数、分叉数、交叠数、总连接点数, 根平均直径与根总体积, 根总长与根总投影面积、根总表面积、根总体积、端点数、关节点数、连接数、分叉数、交叠数、总连接点数, 根尖数量与根总长、根总投影面积、根总表面积、根总体积、端点数、关节点数、连接数、分叉数、总连接点数, 根总数量与根尖数量、根总长、根总投影面积、根总表面积、根总体积、连接数、分叉数、端点数、关节点数、交叠数、总连接点数。相互间呈极显著($P<0.01$)负相关的指标有: 根平均直径与根总数量、根尖数量、根总长、端点数、关节点数、连接数、分叉数、交叠数、总连接点数。交叠数与根尖数量间呈显著($P<0.05$)负相关。根平均直径与根总投影面积、根总表面积, 端点数与交叠数间相关性均不显著。

由于各性状间存在一定程度的相关性, 使得它们所提供的信息发生重叠, 并且各性状在鉴定蚕豆耐盐碱胁迫中所起的作用也不尽相同。因此, 不能直接利用某一个或其中几个指标进行评价, 而需要通过综合分析来评价不同种质的耐盐碱性。

表2 盐碱胁迫下各指标间的相关系数矩阵**Table 2** Correlation coefficient matrix of indexes under salt-alkali stress

Index	NR	NRT	LR	ADR	TPAR	TSAR	BUR	EP	CL	LN	BN	ON
NRT	0.837**											
LR	0.759**	0.521**										
ADR	-0.362**	-0.181**	-0.215**									
TPAR	0.606**	0.400**	0.930**	0.061								
TSAR	0.606**	0.400**	0.930**	0.061	1.000**							
BUR	0.485**	0.302**	0.819**	0.228**	0.968**	0.968**						
EP	0.837**	1.000**	0.521**	-0.181**	0.400**	0.400**	0.302**					
CL	0.798**	0.445**	0.858**	-0.323**	0.766**	0.766**	0.665**	0.445**				
LN	0.872**	0.574**	0.871**	-0.328**	0.766**	0.766**	0.658**	0.574**	0.988**			
BN	1.000**	0.836**	0.757**	-0.361**	0.606**	0.606**	0.486**	0.836**	0.798**	0.872**		
ON	0.281**	-0.124*	0.615**	-0.162**	0.621**	0.621**	0.581**	-0.124	0.800**	0.707**	0.282**	
TNCP	0.941**	0.746**	0.855**	-0.315**	0.735**	0.735**	0.620**	0.746**	0.928**	0.973**	0.941**	0.543**

NR、NRT、LR、ADR、TPAR、TSAR、BUR、EP、CL、LN、BN、ON和TNCP同表1。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

NR, NRT, LR, ADR, TPAR, TSAR, BUR, EP, CL, LN, BN, ON, and TNCP are the same as shown in Table 1. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

2.3 主成分分析

为筛选评价参试材料萌发期耐盐碱性的主要指标,对399份蚕豆种质16个指标进行主成分分析(表3)。结果表明,第1主成分的特征值为8.052,方差贡献率为47.366%;第2主成分的特征值为2.566,方差贡献率为15.092%;第3主成分的特征值为2.242,方差贡献率为13.189%;第4主成分的特征值为1.382,方差贡献率为8.132%。这4个主成分的累计贡献率达83.779%,可代替16个指标的绝大部分信息,综合反映蚕豆萌发期的耐盐碱特性,可作为耐盐碱种质评价的综合指标。

研究表明,对第1主成分产生正向影响的指标有:根总表面积、根总投影面积和根总体积等11个指标,而根总数量、发芽势、发芽指数和发芽率对其产生负向影响,其中根总表面积、根总投影面积、根总体积、根总长、交叠数、关节数、连接数、总连接点数和根总数量9个指标的载荷数较高,均在0.434以上;对第2主成分产生负向影响的指标有:交叠数、发芽势、发芽指数和根平均直径,而根尖数量、端点数、根总数量和分叉数等产生正向影响,其中根尖数量、端点数和分叉数的载荷数较高,均在0.79以上;发芽势、发芽指数和发芽率在第3主成分上的载荷数较高,均在0.80以上,故将第3主成分称为发芽综合指标;根平均直径在第4主成分上的载荷数最高(附表2)。

根据16个指标所对应的载荷数及其在4个主成分中所对应的方差贡献率计算总载荷数。结果表明,根总表面积、根总投影面积、根总长和根总体积4个指标的总载荷数均较高,可作为蚕豆耐盐碱鉴定的适宜指标(表3)。另外,这4个指标也可用于制作参试材料的四象限图,以确定极端耐盐碱材料。

2.4 蚕豆种质耐盐碱性综合评价和极端材料筛选

在主成分分析的基础上,计算所有参试材料的D值,依据D值对399份种质的耐盐碱性进行综合排序(附表3)。结果显示,耐盐碱性较强的前10名供试材料分别为:编号251 (H0000809)、199 (H0000653)、250 (H0000807)、241 (H0000782)、372 (H0001112)、225 (H0000713)、283 (H0000903)、279 (H0000888)、242 (H0000783)和246 (H0000800)。耐盐碱性较弱的后10名供试材料分别为:编号320 (H0000989)、302 (H0000953)、492 (H0001714)、809 (H0003173)、834 (H0003304)、599 (H0001958)、714 (H0002622)、186 (H0000613)、375 (H0001120)和835 (H0003305)。

选取综合排名前10位和后10位共计20份材料的根总长和根总表面积的值做四象限图,筛选在第二象限和第四象限最边缘或接近边缘的点所对应的种质为极端材料。第二象限边缘点表示根总长和根总表面

积的值都较大的材料, 第四象限边缘点表示根总长和根总表面积的值都较小的材料, 选中的材料在图中用红色标出(附图1)。结果共筛选出耐盐碱材料2份, H0000809 (编号251)和H0000653 (编号199); 不耐

盐碱材料2份, H0002622 (编号714)和H0001714 (编号492) (图2)。这些极端材料芽期16个指标的差异见表4。进一步的实验验证结果表明, 2份耐盐碱种质和2份不耐盐碱种质在花期的盐害症状差异明显(图3)。

表3 4个主成分的特征值和各指标的总载荷数

Table 3 The eigen values of 4 principal components and total load number of each index

Index	Principal components				Total load	Rank
	1	2	3	4		
TNCP	0.959	0.049	-0.206	-0.096	42.666	6
LN	0.957	0.040	-0.015	-0.213	44.003	4
LR	0.950	0.013	0.130	0.025	47.112	2
CL	0.929	0.033	0.113	-0.282	43.698	5
TSAR	0.891	-0.037	0.335	0.246	48.063	1
TPAR	0.891	-0.037	0.335	0.246	48.063	1
BN	0.873	0.059	-0.426	-0.048	36.232	7
BUR	0.799	-0.069	0.430	0.362	45.419	3
ON	0.616	-0.071	0.605	-0.405	33.728	8
NR	-0.367	0.250	-0.206	0.128	-15.286	10
GP	-0.053	0.937	0.124	0.021	13.437	13
GI	-0.031	0.920	0.110	0.037	14.168	11
GR	-0.012	0.855	0.070	0.042	13.600	12
NRT	0.644	0.058	-0.700	0.275	24.383	9
EP	0.644	0.058	-0.700	0.275	24.383	9
ADR	-0.212	-0.089	0.360	0.799	-0.139	14
Eigen values	8.052	2.566	2.242	1.382		
Contribution rate (%)	47.366	15.092	13.189	8.132		
Accumulative contribution rate (%)	47.366	62.458	75.648	83.779		
Weight	0.565	0.180	0.157	0.097		

TNCP、LN、LR、CL、TSAR、TPAR、BN、BUR、ON、NR、GP、GI、GR、NRT、EP和ADR同表1。

TNCP, LN, LR, CL, TSAR, TPAR, BN, BUR, ON, NR, GP, GI, GR, NRT, EP, and ADR are the same as shown in Table 1.

表4 4份极端种质的耐盐碱性相关指标

Table 4 Salt-alkali tolerance indexes of 4 materials with extremely tolerant level

Salt-alkali tolerance	Salt-alkali tolerant faba bean		Salt-alkali sensitive faba bean		Salt-alkali tolerance	Salt-alkali tolerant faba bean		Salt-alkali sensitive faba bean	
	Code	H0000809	H0000653	H0002622		H0001714	Code	H0000809	H0000653
NR	17.333	12.000	1.500	2.000	CL	18.000	12.667	0.500	1.000
NRT	17.667	12.000	2.500	3.000	LN	35.333	24.667	2.000	3.000
LR	8.721	6.078	0.510	0.653	BN	16.000	11.000	0.500	1.000
ADR	1.288	1.704	1.889	1.930	ON	2.000	1.667	0.000	0.000
TPAR	136.722	127.020	9.324	11.882	TNCP	35.667	24.667	3.000	4.000
TSAR	429.524	399.046	29.291	37.329	GP	0.800	1.000	0.000	0.000
BUR	204.520	262.196	13.409	17.031	GI	5.538	7.964	0.000	0.143
EP	17.667	12.000	2.500	3.000	GR	0.800	1.000	0.600	0.200

NR、NRT、LR、ADR、TPAR、TSAR、BUR、EP、CL、LN、BN、ON、TNCP、GP、GI和GR同表1。

NR, NRT, LR, ADR, TPAR, TSAR, BUR, EP, CL, LN, BN, ON, TNCP, GP, GI, and GR are the same as shown in Table 1.



图2 极端耐盐碱和盐碱敏感蚕豆种质(A)及不同耐盐碱层级蚕豆种质(B)芽期根系表型

Group I、Group II、Group III和Group IV分别为耐盐碱、中度耐盐碱、弱耐盐碱及不耐盐碱蚕豆种质的代表性根系表型。红色和绿色标注线分别指示主根和侧根。Bars=1 cm

Figure 2 Root phenotype of extremely salt-alkali tolerant and sensitive germplasms (A) and germplasms with different levels of salt-alkali tolerance (B) in faba bean

Group I, Group II, Group III, and Group IV showed the representative root phenotypes of salt-alkaline tolerant, moderately salt-alkaline tolerant, weakly salt-alkaline tolerant, and salt-alkaline sensitive faba bean germplasms, respectively. The red and green marking lines indicated the main root and the lateral roots, respectively. Bars=1 cm



图3 极端耐盐碱和盐碱敏感蚕豆种质植株花期表型

Bars=5 cm

Figure 3 Plant growth phenotype of extremely salt-alkali tolerant and sensitive faba bean germplasms at flowering stage
Bars=5 cm

2.5 不同蚕豆种质聚类分析

聚类结果表明, 399份蚕豆种质被划分为4类(图4)。第I类包括3份材料, 占比0.75%, 含编号199和251等, D 值为0.532–0.619, 属耐盐碱种质; 第II类包括32份材料, 占比8%, 含编号250和370等, D 值为0.334–0.458, 属中耐盐碱种质; 第III类包括211份材料, 占比为52.88%, 含编号382和651等, D 值为0.219–0.329, 属弱耐盐碱种质; 第IV类包括153份材料, 占比为38.35%, 含编号315和959等, D 值为0.124–0.217, 属不耐盐碱种质。第I、II类蚕豆种质的共同特征: 发芽势、发芽指数和发芽率3个发芽指标以及除根平均直径外的12个根系指标的平均值均高于参试材料的总平均值, 而第IV类中, 12个根系指标(除根平均直径外)的平均值均低于参试材料的总平均值。

3 讨论与结论

3.1 蚕豆萌发期耐盐碱性鉴定溶液成分及其浓度确定

柴达木盆地处于青海省西北部, 分布着大面积的盐碱地, 耐盐碱植物的种植是利用盐碱土地的有效措施。为模拟当地土壤中的主要盐碱成分(张得芳等, 2016), 本研究选用NaCl、 Na_2SO_4 和 Na_2CO_3 三种组分的混合溶液进行盐碱胁迫处理。耐盐碱鉴定溶液浓度会影响筛选材料的耐盐碱性(孙小芳和刘友良, 2001; 吴家富等; 2017), 适宜的筛选压能够使相关指标在不同材料间的变异幅度和变异系数变大(安平平等, 2006), 从而获得良好的筛选效果。在已往文献中, 研究人员鉴定蚕豆萌发期的耐盐性时所采用的NaCl浓度有 $150 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (樊有存, 2021)、1% (朱志华等, 1990)和0.8% (宗绪晓等, 2006)。本课题组在预

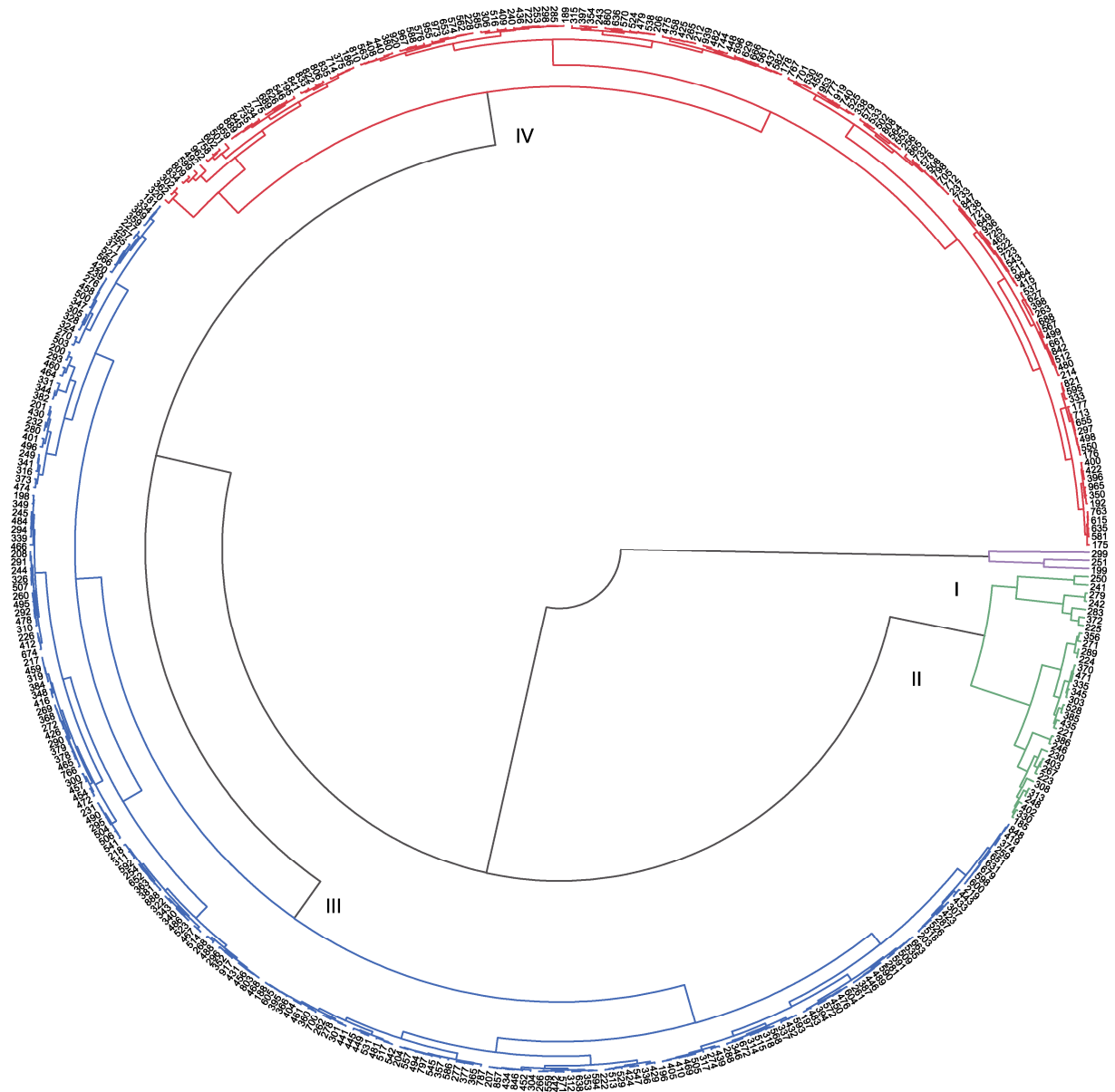


图4 399份蚕豆种质基于D值的系统聚类图

Figure 4 Systematic cluster maps based on D values for 399 faba bean germplasms

实验中分别设计了4、6、8和 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 系列浓度梯度的盐碱溶液,对蚕豆种子进行处理,结果发现在 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH9.34)盐碱胁迫下,大部分种子不能萌发,即使部分种子能萌发,其胚根和胚芽不能继续生长,后期会软化腐烂;而用 $8\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (pH9.25)盐碱溶液处理时,不同种质间萌发和根系性状差异明显,故确定选用该浓度的盐碱溶液进行鉴定实验。本研究所用鉴定溶液成分较复杂,虽总浓度低于其它研究中的单盐浓度,但筛选结果更接近生产实际。

3.2 蚕豆萌发期耐盐碱性鉴定指标的确定

在开展食用豆类作物萌发期耐盐碱性鉴定时,不同研究者采用的指标各异。郎炳尧等(2024)研究表明,发芽指数、活力指数、胚根鲜重、子叶鲜重和总鲜重5个指标可作为绿豆萌发期耐盐碱性筛选的重要指标。张新草等(2020)研究发现,发芽率、幼苗长度和根鲜重3个指标是大豆发芽期耐盐性鉴定的关键指标。刘双幸等(2023)确定相对发芽势和相对发芽率可用于鉴定大豆种质的耐盐性。作物根系生长情况和活力水

平直接影响植物地上部的生长发育和产量。在豆类作物芽期或苗期的胁迫研究中, 研究人员测定并分析了根长和根系活力等指标的变化特征(姜雪琪, 2015; 胡亮亮等, 2022; 李祥祥, 2022)。本研究在鉴定399份蚕豆种质的耐盐碱性时, 不仅测定了种子的发芽率、发芽势和发芽指数, 还测定了根总数量、根长和根直径等13个根系指标; 结合总载荷数确定了根总面积、根总投影面积、根总长和根总体积4个指标可较准确地鉴定出蚕豆种质的耐盐碱性。

3.3 蚕豆芽期耐盐碱性鉴定评价方法及耐盐碱性分类

豆类作物耐盐性评价指标主要包括两类: 单项指标评价和综合指标评价。植物的耐盐性是复杂的综合性状, 多指标综合评价比单项指标评价更能准确全面地反映植物耐盐性的强弱。在大多数文献报道中, 研究人员都测定了各项耐盐指标, 且进行了多个指标的综合分析。所采用的综合评价方法主要包括灰色关联分析法、主成分分析结合隶属函数分析法以及隶属函数法。隶属函数法是一种将多个指标进行综合分析的方法, 利用该方法既可直观地评价植物抗逆性的强弱, 又可克服单一指标评价的局限性。樊有存(2021)通过隶属函数法将31份种质资源划分为5个耐盐等级, 分别为高耐、耐、中耐、弱耐和不耐。于崧等(2017)利用隶属函数法和聚类分析将30个绿豆品种划分为3类(耐盐碱性较强、中等和较弱)。金杭霞等(2021)利用模糊隶属函数法和聚类分析将96个大豆品种划分为5类, 并筛选到30份萌发期耐盐大豆材料。在本研究中, 将16个指标通过主成分分析后, 降维成4个综合指标, 通过隶属函数法得到耐盐碱综合评价 D 值, 根据 D 值对植物耐盐碱性强弱进行排名和系统聚类分析, 结果将399份参试蚕豆材料分成4类: 耐盐碱、中耐盐碱、弱耐盐碱和不耐盐碱。

3.4 蚕豆资源中存在耐一定浓度盐碱的种质

蚕豆对盐分的响应具有基因型特异性(Bimurzayev et al., 2021)。目前, 有关耐盐碱蚕豆种质筛选的研究较少。朱志华等(1990)的鉴定结果表明, 萌发期耐盐性为1级(强耐盐)的材料有: 白小粒种、蚕豆H1538、蚕豆H1541、蚕豆H1549和绿皮豆, 仅占总数的0.8%; 2级(耐盐)材料占2.7%。苗期耐盐鉴定中未发现1级耐

盐材料; 2级占5.3%。杨访问(2020)从67个蚕豆地方品种中筛选出1份耐盐(Y134)和1份盐敏感(Y078)品种。樊有存(2021)从300份蚕豆种质中筛选出1份(占0.33%)发芽期高耐盐种质(H0000995)和6份(占2%)耐盐种质(Z4、H0000693、H0005040、2014-04、H0006682和H0006687)。本研究对399份蚕豆种质进行萌发期耐盐碱性鉴定, 筛选出耐盐碱材料2份(H0000809和H0000653), 盐碱敏感材料2份(H0001714和H0002622)。可见, 在芽期和苗期, 都可筛选出较低比例的耐盐或盐碱(总离子浓度为136–150 mmol·L⁻¹)蚕豆种质, 但能筛选出的强耐盐材料很少。

3.5 蚕豆不同品种(或种质)耐盐性差异的原因

蚕豆对盐的反应具有基因型特异性(Bimurzayev et al., 2021)。本研究发现, 耐盐碱蚕豆种质的发芽指标和根系指标均高于盐碱敏感种质。这是由于芽期耐盐性主要体现在生物组织抵抗渗透胁迫以及种子吸水膨胀的能力(Ben Dkhil and Denden, 2010)。已有研究表明, 大量基因参与调节芽期蚕豆对盐分的响应, 其具体机制较为复杂, 主要有以下几类基因或转录因子发挥关键的调控作用。(1) 一些参与细胞壁松动(例如木葡聚糖内切葡糖苷酶/水解酶、几丁质酶和弹性蛋白)和染色质重塑(如染色质结构蛋白)的基因在盐处理后的耐盐品种中显著上调表达, 在盐胁迫下种子萌发调控中发挥关键作用。(2) 激素调节被认为是种子发芽和休眠的高度保守机制。耐盐蚕豆品种中, 与激素代谢相关的基因下调表达。脱落酸(ABA)或乙烯信号途径的部分基因在盐胁迫24小时内的耐盐品种中均下调表达(杨访问, 2020)。(3) F-box基因广泛参与植物生长发育并在响应非生物胁迫中发挥重要作用。郝树林(2020)研究表明, 在2个耐盐性完全不同的蚕豆品种(Y134和Y078)间, 有5个F-box家族基因(Vf056266.1、Vf062764.1、Vf024236.1、Vf060904.1和Vf045761.1)在芽期耐盐性中发挥重要作用。(4) 在植物响应盐胁迫的分子机制中, NHX为Na⁺/H⁺逆向转运蛋白, 其中NHX1基因对提高植物耐盐性起重要作用(杨郡, 2012; Wang et al., 2020)。HKT家族蛋白是一种与植物耐盐性密切相关的Na⁺或K⁺/Na⁺转运蛋白, 其中HKT1基因是提高植物耐盐能力的主要基因之一(殷桂香等, 2015; Ali et al., 2021)。樊有存(2021)从耐盐蚕豆种质中分离出2个耐盐基因VfNHX1以及

VfHKT1;1。

本研究中,我们将参试蚕豆种质资源划分为耐、中耐、弱耐和不耐盐碱4种类型,筛选出2份耐碱盐种质(H0000809和H0000653)以及2份不耐盐碱种质(H0001714和H0002622)。在此基础上,下一步工作思路:首先,需进行全基因组关联分析,确定与盐碱耐受性相关的1-2个主要位点;其次,对耐盐碱程度不同的蚕豆材料的相关cDNA区域进行测序,找到与表型强关联的序列变异位点,并对其连锁不平衡分析,以确定增强蚕豆耐盐碱的主效基因;最后,采用不同方法验证新主效基因在盐碱耐受性中的作用。

致谢 感谢中国农业科学院国家种质库提供实验所用蚕豆种质资源。

作者贡献声明

刘玉皎:构思并设计实验,修改论文;武学霞:设计实验,修改论文;范惠玲:完成部分实验,分析部分数据并撰写论文;路妍、金文海、王慧和彭小星:完成部分实验,分析部分数据和作图等。

参考文献

- Abdel Latef AA, Hasanuzzaman M, Tahjib-UI-Arif M** (2021). Mitigation of salinity stress by exogenous application of cytokinin in faba bean (*Vicia faba* L.). *Not Bot Horti Agrobot Cluj-Napoca* **49**, 12192.
- Ali A, Raddatz N, Pardo JM, Yun DJ** (2021). HKT sodium and potassium transporters in *Arabidopsis thaliana* and related halophyte species. *Physiol Plant* **174**, 546–558.
- An YP, Qiang AL, Zhang YY, Zhang WY, Cao GL, Han LZ** (2006). Study on characteristics of germination and drought-resistance index by osmotic stress in rice. *J Plant Genet Resour* **7**, 421–426. (in Chinese)
- 安永平, 强爱玲, 张媛媛, 张文银, 曹桂兰, 韩龙植 (2006). 渗透胁迫下水稻种子萌发特性及抗旱性鉴定指标研究. *植物遗传资源学报* **7**, 421–426.
- Ben Dkhil B, Denden M** (2010). Salt stress induced changes in germination, sugars, starch and enzyme of carbohydrate metabolism in *Abelmoschus esculentus* L. (Moench.) seed. *Afr J Agric Res* **5**, 1412–1418.
- Bimurzayev N, Sari H, Kurunc A, Doganay KH, Asmamaw M** (2021). Effects of different salt sources and salinity levels on emergence and seedling growth of faba bean

genotypes. *Sci Rep* **11**, 18198.

- Cai KX, Zhang WD, Cheng HT, Li XP, Zhai DP, Guo Y, Jiang XQ, Wu T** (2020). Effects of salt stress on physiological changes of five Adzuki bean sprouts stage in northeast China. *J Ningxia Univ (Nat Sci Ed)* **41**, 80–86. (in Chinese)
- 蔡可心, 张卫东, 程海涛, 李修平, 翟登攀, 郭勇, 姜雪琪, 邬桐 (2020). 盐胁迫对东北5种红小豆芽期生理变化的影响. *宁夏大学学报(自然科学版)* **41**, 80–86.
- Chen EY, Wang RF, Qin L, Yang YB, Li FF, Zhang HW, Wang HL, Liu B, Kong QH, Guan YA** (2020). Comprehensive identification and evaluation of foxtail millet for saline-alkaline tolerance during germination. *Acta Agron Sin* **46**, 1591–1604. (in Chinese)
- 陈二影, 王润丰, 秦岭, 杨延兵, 黎飞飞, 张华文, 王海莲, 刘宾, 孔清华, 管延安 (2020). 谷子芽期耐盐碱综合鉴定及评价. *作物学报* **46**, 1591–1604.
- Fan YC** (2021). Screening of Salt Tolerant Germplasm Resources and Cloning and Expression Analysis of Salt Tolerant Genes in *Vicia faba* L. Master's thesis. Xining: Qinghai University. pp. 1. (in Chinese)
- 樊有存 (2021). 蚕豆耐盐种质资源筛选与抗盐基因的克隆及表达分析. 硕士论文. 西宁: 青海大学. pp. 1.
- Gao ZW** (2011). Research on the Salt-alkali Resistance Mechanism of Alfalfa and Oat. PhD dissertation. Changchun: Northeast Normal University. pp. 4–5. (in Chinese)
- 高占武 (2011). 紫花苜蓿和燕麦抗盐碱机制研究. 博士论文. 长春: 东北师范大学. pp. 4–5.
- Hao SL** (2020). Identification and Salt Tolerance Analysis of F-box Genes in *Vicia faba* L. Master's thesis. Jingzhou: Yangtze University. pp. 1. (in Chinese)
- 郝树林 (2020). 蚕豆F-box基因的鉴定及耐盐性分析. 硕士论文. 荆州: 长江大学. pp. 1.
- Hu LL, Wang SH, Wang LX, Cheng XZ, Chen HL** (2022). Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant germplasm of mungbean (*Vigna radiate* L.) at seedling stage. *Acta Agron Sin* **48**, 367–379. (in Chinese)
- 胡亮亮, 王素华, 王丽侠, 程须珍, 陈红霖 (2022). 绿豆种质资源苗期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选. *作物学报* **48**, 367–379.
- Jiang XQ** (2015). Study on Salt Tolerance of Red Adzuki Bean at Germination Stage. Master's thesis. Jiamusi: Jiamusi University. pp. 18. (in Chinese)
- 姜雪琪 (2015). 红小豆发芽期的耐盐性鉴定研究. 硕士论文. 佳木斯: 佳木斯大学. pp. 18.

- Jin HX, Guo DD, Yang QH, Yu XM, Fu XJ, Yuan FJ** (2021). Comprehensive evaluation of salt tolerance in soybean germination period by fuzzy subordinate function method. *Mol Plant Breed* **19**, 8265–8271. (in Chinese)
金杭霞, 郭丹丹, 杨清华, 郁晓敏, 傅旭军, 袁凤杰 (2021). 利用模糊隶属函数法综合评价大豆萌发期耐盐性. *分子植物育种* **19**, 8265–8271.
- Lang BY, Wang WY, Feng RQ, Zhou ZH, Chen Y, Zhao YL, Jin F, Du YL** (2024). Comprehensive evaluation on saline-alkali tolerance of 35 mung bean germplasm resources during germination period and analysis of saline-alkali tolerant mechanism. *Shandong Agric Sci* **56**, 69–79. (in Chinese)
郎炳尧, 王伟宇, 冯瑞琦, 周志衡, 陈悦, 赵岩林, 金峰, 杜艳丽 (2024). 35份绿豆种质资源萌发期耐盐碱性综合评价及耐盐碱机制分析. *山东农业科学* **56**, 69–79.
- Li XX** (2022). Comprehensive Evaluation and Physiological Mechanism of Saline-alkali Tolerance of Wild Soybean. Master's thesis. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science and Technology. pp. 8–25. (in Chinese)
李祥祥 (2022). 野生大豆盐碱耐性综合评价及生理机制研究. 硕士论文. 秦皇岛: 河北科技师范学院. pp. 8–25.
- Liu SX, Lai JY, Li HM, Chen P, Ji YF, Zhang WH, Ma QB, Jia JT, Liu J** (2023). Identification of salt tolerance of soybean landraces at germination stage in Guangdong. *J Southern Agric* **54**, 3228–3238. (in Chinese)
刘双幸, 赖剑云, 李红梅, 陈沛, 吉浴芳, 张文虎, 马启彬, 贾俊婷, 刘军 (2023). 广东省大豆农家种芽期耐盐性鉴定. *南方农业学报* **54**, 3228–3238.
- Liu W, Long ZX, Zhang XM, Gu WY, Chi XN, Wang YP** (2024). The physiological mechanism by which exogenous salicylic acid enhances salt tolerance in *Vicia faba* seedlings. *J Gansu Agric Univ* **59**(2), 36–44, 53. (in Chinese)
刘伟, 龙子轩, 张兴民, 顾文媛, 池小娜, 王玉萍 (2024). 外源水杨酸影响蚕豆幼苗耐盐性的生理机制. *甘肃农业大学学报* **59**(2), 36–44, 53.
- Liu XY, Guo XY, Wang XR, Xin DW, Guan RX, Qiu LJ** (2024). Establishment of screening method for salt tolerance at germination stage and identification of salt-tolerant germplasms in soybean. *Acta Agron Sin* **50**, 2122–2130. (in Chinese)
刘欣玥, 郭潇阳, 王欣茹, 辛大伟, 关荣霞, 邱丽娟 (2024). 大豆萌发期耐盐性鉴定方法建立及耐盐大豆资源筛选. *作物学报* **50**, 2122–2130.
- Nachshon U** (2018). Cropland soil salinization and associated hydrology: trends, processes and examples. *Water* **10**, 1030.
- Ren JH, Gao PP, Qiao YX, Jing SE** (1993). Identification of salt tolerance of mung bean variety resources. *Crop Variety Resour* (3), 14–15. (in Chinese)
任建华, 高平平, 乔燕祥, 荆淑娥 (1993). 绿豆品种资源耐盐性鉴定. *作物品种资源* (3), 14–15.
- Shi HY, Fan BJ, Liu CY, Wang Y, Wang S, Zhang ZX, Su QZ, Tian J** (2024). Identification and evaluation of salt tolerance germplasm of mung bean during germination. *Crops*. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20240401.0958.002>. (in Chinese)
时会影, 范保杰, 刘长友, 王彦, 王琚, 张志肖, 苏秋竹, 田静 (2024). 绿豆种质资源萌发期耐盐性鉴定与评价. *作物杂志*. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20240401.0958.002>.
- Shrivastava P, Kumar R** (2015). Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi J Biol Sci* **22**, 123–131.
- Sun XF, Liu YL** (2001). Test on criteria of evaluating salt tolerance of cotton cultivars. *Acta Agron Sin* **27**, 794–801. (in Chinese)
孙小芳, 刘友良 (2001). 棉花品种耐盐性鉴定指标可靠性的检验. *作物学报* **27**, 794–801.
- Wang G, Yang D, Zhang Y, Li Q, Ji J, Jin C, Wu GX, Guan CF** (2020). Na⁺/H⁺ antiporter (NHX1) positively enhances cadmium (Cd) resistance and decreases Cd accumulation in tobacco plants cultivated in Cd-containing soil. *Plant Soil* **453**, 389–408.
- Wang LZ, Gao FJ, Hua FJ, Cao PP** (2015). Study on salt tolerance of different mung bean varieties at germination stage. *Shandong Agric Sci* **47**(9), 31–35. (in Chinese)
王乐政, 高凤菊, 华方静, 曹鹏鹏 (2015). 不同绿豆品种萌发期耐盐性研究. *山东农业科学* **47**(9), 31–35.
- Wu JF, Yang BW, Xiang XC, Xu L, Yan LM** (2017). Identification of salt tolerance in different rice germplasm at different growth stages. *Chin Bull Bot* **52**, 77–88. (in Chinese)
吴家富, 杨博文, 向珣朝, 许亮, 颜李梅 (2017). 不同水稻种质在不同生育期耐盐鉴定的差异. *植物学报* **52**, 77–88.
- Ya XX, Yang DX, Zhou GM, Chen J, Liu ZX** (2022). Identification and evaluation of salt tolerance of pea resources. *J Sichuan Agric Univ* **40**, 505–511. (in Chinese)
亚秀秀, 杨东旭, 周桂梅, 陈健, 刘振兴 (2022). 豌豆种质资源耐盐性的鉴定与评价. *四川农业大学学报* **40**, 505–511.

- Yang FW** (2020). Transcriptome Profile of Faba Bean During Seed Germination Under Salt Stress and Analysis of LEA Gene Family. Master's thesis. Jingzhou: Yangtze University. pp. 14. (in Chinese)
- 杨访问 (2020). 盐胁迫下蚕豆萌发期转录组及LEA基因家族分析. 硕士学位论文. 荆州: 长江大学. pp. 14.
- Yang J** (2012). Molecular Cloning, Functional Analysis and Genetic Transformation of a Na^+/H^+ Antiporter Gene *GmNHX1* from Soybean. Master's thesis. Baoding: Agricultural University of Hebei. pp. 1. (in Chinese)
- 杨郡 (2012). 大豆*GmNHX1*基因的克隆、功能初探及遗传转化. 硕士学位论文. 保定: 河北农业大学. pp. 1.
- Yin GX, Zhang L, She MY** (2015). Structural characterization and abiotic stress response of soybean TRK-HKT family genes. *Acta Agron Sin* **41**, 259–275. (in Chinese)
- 殷桂香, 张磊, 余茂云 (2015). 大豆TRK-HKT家族基因结构及逆境胁迫响应机制. 作物学报 **41**, 259–275.
- Yu S, Guo XX, Liang HY, Fu LH, Shi JJ, Zhang YF, Chuang L** (2017). Analysis of saline-alkaline tolerance and screening of identification indicators at the germination stage among different mung bean genotypes. *Plant Physiol J* **53**, 1629–1639. (in Chinese)
- 于崧, 郭潇潇, 梁海芸, 付鸾鸿, 史京京, 张翼飞, 闯磊 (2017). 不同基因型绿豆萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选. 植物生理学报 **53**, 1629–1639.
- Zhang DF, Fan GH, Ma YL** (2016). Study on the type of saline-alkaline land and salinity correlation of Qaidam Basin. *Sci Technol Qinghai Agric For* (3), 1–6. (in Chinese)
- 张得芳, 樊光辉, 马玉林 (2016). 柴达木盆地盐碱土壤类型及其盐离子相关性研究. 青海农林科技 (3), 1–6.
- Zhang XC, Xue XX, Jiang S, Wang YF, Cao YC** (2020). Identification of mixed saline-alkali tolerance and screening of indicators in soybean at germination stage. *Acta Agric Boreali-Occident Sin* **29**, 374–381. (in Chinese)
- 张新草, 薛项潇, 姜深, 王延峰, 曹永策 (2020). 大豆种质发芽期耐盐碱性鉴定及指标筛选. 西北农业学报 **29**, 374–381.
- Zhou XW, Zhang XR, Sun HX, Zhao X, Zhang N, Yao XD, Xie FT** (2022). Evaluation of salt tolerance of soybean germplasm at germination and seedling stages. *J Shenyang Agric Univ* **53**, 257–264. (in Chinese)
- 周秀文, 张晓蕊, 孙贺祥, 赵翔, 张娜, 姚兴东, 谢甫缙 (2022). 大豆种质萌发期和苗期耐盐性评价. 沈阳农业大学学报 **53**, 257–264.
- Zhu ZH, Wang MZ, Song JZ** (1989). Identification of salt tolerance of pea variety resources. *Crop Variety Resour* (4), 29–30. (in Chinese)
- 朱志华, 王明珍, 宋景芝 (1989). 豌豆品种资源耐盐性鉴定. 作物品种资源 (4), 29–30.
- Zhu ZH, Wang MZ, Song JZ, Zhang XF** (1990). Preliminary report on salt tolerance identification of broad bean and cowpea varieties. *Crop Variety Resour* (4), 29–30. (in Chinese)
- 朱志华, 王明珍, 宋景芝, 张晓芳 (1990). 蚕豆和豇豆品种耐盐性鉴定初报. 作物品种资源 (4), 29–30.
- Zong XX, Bao SY, Guan JP** (2006). Descriptors and Data Standard for Faba Bean (*Vicia faba* L.). Beijing: China Agriculture Press. pp. 56. (in Chinese)
- 宗绪晓, 包世英, 关建平 (2006). 蚕豆种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社. pp. 56.

附表 1 399 份参试材料的来源和类型

Appendix table 1 Origin and type of 399 test materials

附表 2 旋转后的成分矩阵

Appendix table 2 The component matrix after rotation

附表 3 不同蚕豆种质耐盐碱性综合评价 *D* 值及排名

Appendix table 3 *D* value and rank of salt-alkali tolerance of different faba bean germplasm

附图 1 20 份参试材料根总长和根总表面积的四象限图

Appendix figure 1 Four quadrants of total root length and total surface area of root in 20 test materials

<https://www.chinbullbotany.com/fileup/1674-3466/PDF/24-093-1.pdf>

Identification and Comprehensive Evaluation of Faba Bean Salt-alkali Tolerance Based on Root Phenotypic Traits

Huiling Fan^{1,3}, Yan Lu³, Wenhai Jin¹, Hui Wang¹, Xiaoxing Peng¹, Xuexia Wu^{1*}, Yujiao Liu^{1,2*}

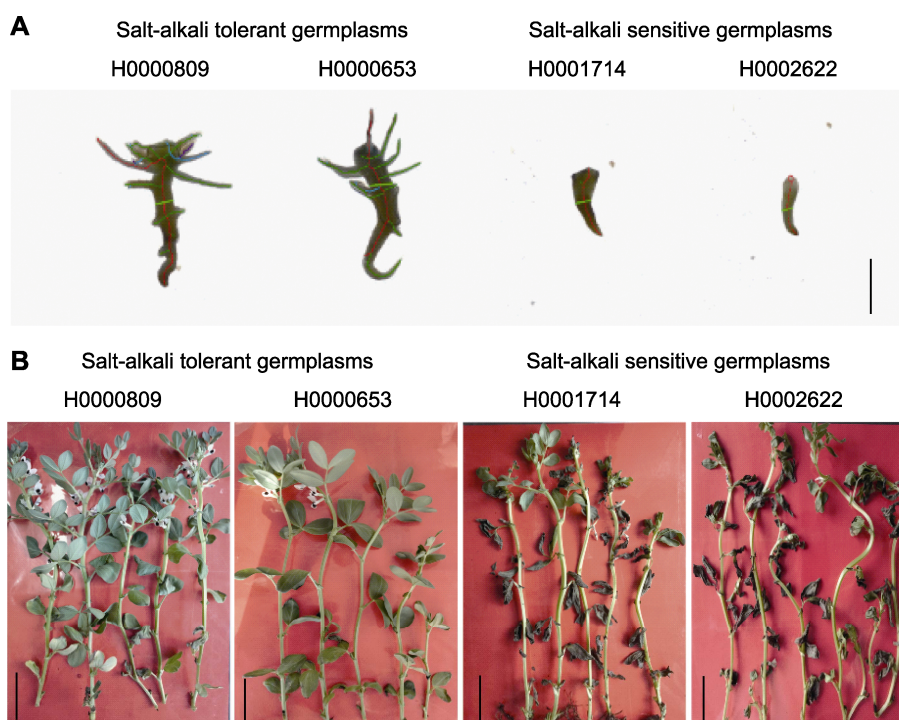
¹Qinghai University, Xining 810016, China; ²Qinghai-Tibet Plateau Germplasm Resources Research and Utilization Laboratory, Xining 810016, China; ³Hexi University, Zhangye 734000, China

INTRODUCTION: Identification of salt-alkali tolerant germplasm in faba bean lays the foundation for the exploration of salt-alkali tolerant genes and for the selection and breeding of salt-alkali tolerant varieties, which is of great significance for the utilization of saline-alkali land.

RATIONALE: Most of the studies on the salt-alkali tolerance of faba beans were focused on the morphological and physiological traits of the aboveground parts, while there are few studies on the phenotypic traits of the roots. The root plays a crucial role in resisting salt-alkali stress. Deep research on the relationship between the phenotypic traits of the root and the salt-alkali tolerance of faba beans will help to comprehensively understand the physiological mechanism of the salt-alkali tolerance.

RESULTS: The results showed that: (1) Under salt-alkali stress, the root overlap number was mostly affected, it was followed by the coila number, while the average diameter of root was affected slightly; (2) Between the overlap number and total number of connection points, among the bifurcation number and the overlap number and total number of connection points, most of indicators were significant positively correlation ($P<0.01$), while there were significant negatively correlation ($P<0.01$) among the average diameter of root and total number of root, the number of root tip, total length of root, endpoint number, coila number, linking number, bifurcation number, overlap number and total number of connection points; (3) Total root surface area of root, total projected area of root, total length of root and total volume of root could be used as the key indicators to identify the salt-alkali tolerance of faba bean during the germination period; (4) Two salt-alkali tolerant accessions H0000809 and H0000653, and two salt-alkali sensitive accessions H0001714 and H0002622 were screened out; and (5) The 399 faba bean accessions were divided into 4 groups: group I, salt-alkali tolerance germplasm, accounting for 0.75%; group II, moderately salt-alkali tolerant germplasm, accounting for 8%; group III, weakly saline-tolerant germplasm, accounting for 52.88%; and group IV, salt-alkali sensitive germplasm, constituting 38.35%.

CONCLUSION: Variation and correlation of each index, and the key indicators used to identify salt-alkali tolerance were determined, extreme materials can be selected and used for future study of salt-alkali tolerance mechanisms in faba bean and the excavation of salt-alkali tolerance genes.



Phenotypic differences of faba bean germplasms with different levels of salt-alkali tolerance at different growth stages (A) Root phenotype differences of faba bean germplasms with different levels of salt-alkali tolerance at germination stage (bar=5 cm); **(B)** Plant phenotype differences of faba bean germplasms with different levels of salt-alkali tolerance at flowering stage (bars=1 cm).

Key words faba bean (*Vicia faba*), germination stage, salt-alkali stress, salt-alkali tolerant germplasm identification, comprehensive evaluation

Fan HL, Lu Y, Jin WH, Wang H, Peng XX, Wu XX, Liu YJ (2025). Identification and comprehensive evaluation of faba bean salt-alkali tolerance based on root phenotypic traits. *Chin Bull Bot* **60**, 204–217.

* Authors for correspondence. E-mail: xuexun111@163.com; 13997058356@163.com

(责任编辑: 朱亚娜)

通讯作者/团队简介

刘玉皎, 青海大学二级研究员, 博士生导师。长期从事蚕豆遗传育种研究。以通讯作者和合作者身份在 *Nature Genetics*、*Theoretical and Applied Genetics*、*Agronomy* 和《作物学报》等期刊上发表研究论文 50 余篇; 主编著作 2 部, 参编著作 6 部。选育蚕豆品种 12 个, 获植物新品种权证 10 个。目前, 其研究团队以基于生态增效型农业发展新模式为主线, 以首次发现并命名的亚有限蚕豆种质为核心, 利用遗传学、基因组学、群体遗传学和生物信息学等手段对其遗传多样性、演化历史及适应性机制进行系统性研究, 以期选育高产、多抗、宜机和多元化等突破性蚕豆品种。

附表 1 399 份参试材料来源和类型

Supplementary table 1 Origin and type of 399 materials

Code	National unified code	Origin	Types	Code	National unified code	Origin	Types
175	H0000572	England	Foreign germplasm	441	H0001499	Hubei	Local variety
176	H0000573	England	Foreign germplasm	442	H0001501	Hubei	Local variety
177	H0000574	England	Foreign germplasm	443	H0001502	Hubei	Local variety
178	H0000577	Uruguay	Foreign germplasm	445	H0001517	Hubei	Local variety
181	H0000605	Germany	Foreign germplasm	446	H0001527	Hubei	Local variety
185	H0000612	Syria	Foreign germplasm	448	H0001536	Hunan	Local variety
186	H0000613	Syria	Foreign germplasm	449	H0001541	Hunan	Local variety
188	H0000618	Syria	Foreign germplasm	450	H0001546	Hunan	Local variety
189	H0000621	Syria	Foreign germplasm	452	H0001559	Hunan	Local variety
192	H0000629	Syria	Foreign germplasm	454	H0001563	Hunan	Local variety
195	H0000646	Iran	Foreign germplasm	455	H0001566	Hunan	Local variety
196	H0000647	Turkey	Foreign germplasm	456	H0001571	Hunan	Local variety
197	H0000650	Turkey	Foreign germplasm	457	H0001572	Hunan	Local variety
198	H0000652	Turkey	Foreign germplasm	458	H0001573	Hunan	Local variety
199	H0000653	Turkey	Foreign germplasm	459	H0001576	Hunan	Local variety
200	H0000655	Turkey	Foreign germplasm	460	H0001577	Hunan	Local variety
201	H0000656	Turkey	Foreign germplasm	461	H0001579	Hunan	Local variety
203	H0000668	Turkey	Foreign germplasm	462	H0001580	Hunan	Local variety
204	H0000672	Turkey	Foreign germplasm	464	H0001584	Hunan	Local variety
206	H0000680	Turkey	Foreign germplasm	465	H0001588	Hunan	Local variety
207	H0000681	Turkey	Foreign germplasm	466	H0001590	Hunan	Local variety
208	H0000684	Turkey	Foreign germplasm	467	H0001594	Hunan	Local variety
212	H0000692	Turkey	Foreign germplasm	468	H0001595	Hunan	Local variety
214	H0000695	Afghanistan	Foreign germplasm	469	H0001600	Hunan	Local variety
217	H0000699	Afghanistan	Foreign germplasm	471	H0001624	Guangxi	Local variety
218	H0000700	Afghanistan	Foreign germplasm	472	H0001629	Sichuan	Local variety
219	H0000701	Iraq	Foreign germplasm	474	H0001635	Sichuan	Local variety
221	H0000704	Iraq	Foreign germplasm	475	H0001637	Chongqing	Local variety
222	H0000705	Iraq	Foreign germplasm	476	H0001644	Chongqing	Local variety
223	H0000708	Iraq	Foreign germplasm	478	H0001652	Sichuan	Local variety
224	H0000709	Iraq	Foreign germplasm	479	H0001657	Sichuan	Local variety
225	H0000713	Iraq	Foreign germplasm	480	H0001667	Sichuan	Local variety
226	H0000714	Iraq	Foreign germplasm	481	H0001668	Sichuan	Local variety
227	H0000720	Iraq	Foreign germplasm	482	H0001669	Sichuan	Local variety
228	H0000727	Iraq	Foreign germplasm	483	H0001671	Sichuan	Local variety
230	H0000747	Egypt	Foreign germplasm	484	H0001675	Sichuan	Local variety
231	H0000748	Egypt	Foreign germplasm	486	H0001688	Chongqing	Local variety
232	H0000757	Egypt	Foreign germplasm	488	H0001701	Sichuan	Local variety
234	H0000768	Ethiopia	Foreign germplasm	489	H0001705	Sichuan	Local variety
237	H0000773	Ethiopia	Foreign germplasm	490	H0001706	Sichuan	Local variety
239	H0000780	Ethiopia	Foreign germplasm	492	H0001714	Sichuan	Local variety
240	H0000781	Sultan	Foreign germplasm	494	H0001717	Chongqing	Local variety
241	H0000782	Sultan	Foreign germplasm	495	H0001718	Sichuan	Local variety
242	H0000783	Sultan	Foreign germplasm	496	H0001722	Guizhou	Local variety
243	H0000786	Sultan	Foreign germplasm	498	H0001731	Guizhou	Local variety
244	H0000794	Sultan	Foreign germplasm	499	H0001737	Guizhou	Local variety
245	H0000796	Sultan	Foreign germplasm	500	H0001758	Guizhou	Local variety

246	H0000800	Ethiopia	Foreign germplasm	501	H0001760	Guizhou	Local variety
248	H0000802	Algeria	Foreign germplasm	502	H0001761	Guizhou	Local variety
249	H0000805	Algeria	Foreign germplasm	503	H0001762	Guizhou	Local variety
250	H0000807	Algeria	Foreign germplasm	504	H0001764	Guizhou	Local variety
251	H0000809	Tunisia	Foreign germplasm	505	H0001773	Yunnan	Local variety
253	H0000813	Tunisia	Foreign germplasm	506	H0001775	Yunnan	Local variety
254	H0000815	Tunisia	Foreign germplasm	507	H0001776	Yunnan	Local variety
256	H0000825	Spain	Foreign germplasm	508	H0001777	Yunnan	Local variety
257	H0000826	Spain	Foreign germplasm	509	H0001780	Yunnan	Local variety
259	H0000842	Spain	Foreign germplasm	511	H0001784	Yunnan	Local variety
260	H0000843	Spain	Foreign germplasm	512	H0001791	Yunnan	Local variety
261	H0000844	Spain	Foreign germplasm	513	H0001792	Yunnan	Local variety
262	H0000848	Spain	Foreign germplasm	514	H0001796	Yunnan	Local variety
263	H0000851	Spain	Foreign germplasm	515	H0001797	Yunnan	Local variety
265	H0000853	England	Foreign germplasm	516	H0001802	Yunnan	Local variety
266	H0000854	England	Foreign germplasm	517	H0001805	Shaanxi	Local variety
267	H0000855	England	Foreign germplasm	518	H0001806	Shaanxi	Local variety
268	H0000861	England	Foreign germplasm	522	H0001819	Shaanxi	Local variety
269	H0000868	Nederlanden	Foreign germplasm	523	H0001823	Shaanxi	Local variety
270	H0000871	Nederlanden	Foreign germplasm	524	H0001824	Shaanxi	Local variety
271	H0000873	Nederlanden	Foreign germplasm	525	H0001834	Shaanxi	Local variety
272	H0000874	Nederlanden	Foreign germplasm	526	H0001835	Shaanxi	Local variety
274	H0000876	Poland	Foreign germplasm	527	H0001837	Shaanxi	Local variety
276	H0000883	Shanxi	Local variety	528	H0001838	Shaanxi	Local variety
277	H0000884	Shanxi	Local variety	529	H0001844	Shaanxi	Local variety
278	H0000886	Shanxi	Local variety	530	H0001845	Shaanxi	Local variety
279	H0000888	Shanxi	Local variety	531	H0001847	Shaanxi	Local variety
280	H0000891	Shanxi	Local variety	533	H0001850	Shaanxi	Local variety
281	H0000896	Shanxi	Local variety	535	H0001854	Shaanxi	Local variety
283	H0000903	Shanxi	Local variety	537	H0001856	Gansu	Local variety
285	H0000912	Shanxi	Local variety	538	H0001857	Gansu	Local variety
287	H0000918	Shanxi	Local variety	541	H0001862	Gansu	Local variety
288	H0000921	Shanxi	Local variety	542	H0001863	Gansu	Local variety
289	H0000924	Shanxi	Local variety	543	H0001864	Gansu	Local variety
290	H0000925	Shanxi	Local variety	545	H0001866	Gansu	Local variety
291	H0000926	Shanxi	Local variety	546	H0001867	Gansu	Local variety
292	H0000927	Shanxi	Local variety	547	H0001869	Gansu	Local variety
293	H0000928	Shanxi	Local variety	550	H0001874	Gansu	Local variety
294	H0000930	Shanxi	Local variety	553	H0001884	Gansu	Local variety
295	H0000931	Shanxi	Local variety	557	H0001890	Gansu	Local variety
296	H0000933	Shanxi	Local variety	559	H0001897	Gansu	Local variety
297	H0000936	Shanxi	Local variety	561	H0001900	Qinghai	Local variety
298	H0000937	Shanxi	Local variety	562	H0001901	Qinghai	Local variety
299	H0000947	Inner Mongolia	Local variety	563	H0001902	Qinghai	Local variety
300	H0000949	Inner Mongolia	Local variety	564	H0001904	Qinghai	Local variety
301	H0000952	Inner Mongolia	Local variety	566	H0001909	Qinghai	Local variety
302	H0000953	Inner Mongolia	Local variety	567	H0001911	Qinghai	Local variety
303	H0000954	Inner Mongolia	Local variety	568	H0001913	Qinghai	Local variety
304	H0000957	Inner Mongolia	Local variety	570	H0001916	Qinghai	Local variety
305	H0000961	Inner Mongolia	Local variety	571	H0001917	Qinghai	Local variety
306	H0000962	Inner Mongolia	Local variety	572	H0001918	Qinghai	Local variety

307	H0000963	Inner Mongolia	Local variety	574	H0001920	Qinghai	Local variety
308	H0000965	Inner Mongolia	Local variety	576	H0001923	Qinghai	Local variety
310	H0000971	Inner Mongolia	Local variety	578	H0001928	Qinghai	Local variety
311	H0000974	Inner Mongolia	Local variety	579	H0001930	Qinghai	Local variety
312	H0000976	Inner Mongolia	Local variety	581	H0001933	Qinghai	Local variety
313	H0000978	Inner Mongolia	Local variety	582	H0001935	Qinghai	Local variety
314	H0000979	Inner Mongolia	Local variety	585	H0001939	Qinghai	Local variety
315	H0000981	Inner Mongolia	Local variety	586	H0001940	Qinghai	Local variety
316	H0000981	Inner Mongolia	Local variety	588	H0001942	Qinghai	Local variety
317	H0000983	Inner Mongolia	Local variety	590	H0001946	Qinghai	Local variety
318	H0000984	Inner Mongolia	Local variety	591	H0001947	Qinghai	Local variety
319	H0000988	Inner Mongolia	Local variety	592	H0001948	Qinghai	Local variety
320	H0000989	Inner Mongolia	Local variety	593	H0001949	Qinghai	Local variety
322	H0000991	Inner Mongolia	Local variety	594	H0001950	Qinghai	Local variety
324	H0000994	Inner Mongolia	Local variety	595	H0001953	Ningxia	Local variety
326	H0000996	Inner Mongolia	Local variety	596	H0001955	Ningxia	Local variety
328	H0000998	Inner Mongolia	Local variety	598	H0001957	Ningxia	Local variety
330	H0001000	Inner Mongolia	Local variety	599	H0001958	Ningxia	Local variety
331	H0001001	Inner Mongolia	Local variety	600	H0001959	Ningxia	Local variety
333	H0001003	Inner Mongolia	Local variety	602	H0002256	Syria	Foreign germplasm
334	H0001005	Inner Mongolia	Local variety	604	H0002278	Afghanistan	Foreign germplasm
335	H0001006	Inner Mongolia	Local variety	605	H0002279	Afghanistan	Foreign germplasm
336	H0001009	Inner Mongolia	Local variety	615	H0002303	Lebanon	Foreign germplasm
337	H0001009	Inner Mongolia	Local variety	626	H0002338	Canada	Foreign germplasm
338	H0001010	Inner Mongolia	Local variety	627	H0002339	Canada	Foreign germplasm
339	H0001011	Inner Mongolia	Local variety	629	H0002345	Canada	Foreign germplasm
340	H0001012	Jiangsu	Local variety	631	H0002350	Canada	Foreign germplasm
341	H0001019	Jiangsu	Local variety	635	H0002360	Canada	Foreign germplasm
343	H0001030	Jiangsu	Local variety	636	H0002362	Canada	Foreign germplasm
344	H0001032	Jiangsu	Local variety	638	H0002367	Canada	Foreign germplasm
345	H0001033	Jiangsu	Local variety	649	H0002399	England	Foreign germplasm
346	H0001034	Jiangsu	Local variety	651	H0002402	England	Foreign germplasm
347	H0001035	Jiangsu	Local variety	652	H0002404	England	Foreign germplasm
348	H0001037	Jiangsu	Local variety	653	H0002405	France	Foreign germplasm
349	H0001039	Jiangsu	Local variety	655	H0002409	France	Foreign germplasm
350	H0001051	Zhejiang	Local variety	661	H0002421	Germany	Foreign germplasm
352	H0001053	Zhejiang	Local variety	663	H0002426	Germany	Foreign germplasm
353	H0001056	Zhejiang	Local variety	666	H0002431	Germany	Foreign germplasm
354	H0001057	Zhejiang	Local variety	672	H0002440	Germany	Foreign germplasm
355	H0001059	Zhejiang	Local variety	674	H0002443	Germany	Foreign germplasm
356	H0001062	Zhejiang	Local variety	679	H0002454	Germany	Foreign germplasm
357	H0001066	Zhejiang	Local variety	688	H0002471	Netherlands	Foreign germplasm
358	H0001068	Zhejiang	Local variety	689	H0002473	Netherlands	Foreign germplasm
359	H0001074	Zhejiang	Local variety	700	H0002507	Canada	Foreign germplasm
360	H0001075	Zhejiang	Local variety	701	H0002512	Germany	Foreign germplasm
				705	H0002517	Afghanistan	Foreign germplasm
363	H0001080	Zhejiang	Local variety	712	H0002620	Ningxia	Local variety
365	H0001085	Zhejiang	Local variety	713	H0002621	Ningxia	Local variety
366	H0001086	Zhejiang	Local variety	714	H0002622	Ningxia	Local variety
368	H0001091	Zhejiang	Local variety	721	H0002640	Ningxia	Local variety
370	H0001108	Zhejiang	Local variety	722	H0002642	Ningxia	Local variety

371	H0001109	Zhejiang	Local variety	723	H0002647	Ningxia	Local variety
372	H0001112	Zhejiang	Local variety	725	H0002656	Ningxia	Local variety
373	H0001114	Zhejiang	Local variety	732	H0002667	Ningxia	Local variety
374	H0001119	Zhejiang	Local variety	733	H0002668	Ningxia	Local variety
375	H0001120	Zhejiang	Local variety	735	H0002670	Ningxia	Local variety
377	H0001128	Zhejiang	Local variety	738	H0002681	Ningxia	Local variety
378	H0001133	Zhejiang	Local variety	740	H0002692	Xinjiang	Local variety
379	H0001135	Zhejiang	Local variety	744	H0003026	Gansu	Bred variety
380	H0001147	Zhejiang	Local variety	758	H0003070	Hebei	Local variety
381	H0001152	Zhejiang	Local variety	763	H0003075	Hebei	Local variety
382	H0001156	Zhejiang	Local variety	766	H0003079	Hebei	Local variety
384	H0001168	Zhejiang	Local variety	767	H0003080	Hebei	Local variety
385	H0001177	Zhejiang	Local variety	775	H0003094	Hebei	Local variety
386	H0001186	Zhejiang	Local variety	777	H0003096	Hebei	Local variety
387	H0001192	Zhejiang	Local variety	787	H0003108	Hebei	Local variety
389	H0001201	Zhejiang	Local variety	797	H0003126	Inner Mongolia	Local variety
394	H0001238	Zhejiang	Local variety	798	H0003128	Inner Mongolia	Local variety
395	H0001239	Zhejiang	Local variety	803	H0003152	Inner Mongolia	Local variety
396	H0001241	Zhejiang	Local variety	806	H0003158	Jiangsu	Local variety
397	H0001242	Zhejiang	Local variety	808	H0003165	Jiangsu	Local variety
398	H0001246	Zhejiang	Local variety	809	H0003173	Jiangsu	Local variety
400	H0001259	Zhejiang	Local variety	810	H0003174	Jiangsu	Local variety
401	H0001267	Zhejiang	Local variety	821	H0003243	Hunan	Local variety
402	H0001269	Zhejiang	Local variety	822	H0003244	Hunan	Local variety
403	H0001282	Zhejiang	Local variety	833	H0003303	Hunan	Local variety
404	H0001286	Zhejiang	Local variety	834	H0003304	Hunan	Local variety
405	H0001287	Zhejiang	Local variety	835	H0003305	Hunan	Local variety
408	H0001335	Anhui	Local variety	841	H0003333	Guizhou	Local variety
409	H0001338	Anhui	Local variety	842	H0003337	Guizhou	Local variety
410	H0001339	Anhui	Local variety	845	H0003345	Yunnan	Local variety
412	H0001344	Anhui	Local variety	846	H0003346	Yunnan	Local variety
415	H0001349	Anhui	Local variety	847	H0003351	Yunnan	Local variety
416	H0001365	Anhui	Local variety	848	H0003352	Yunnan	Local variety
419	H0001381	Anhui	Local variety	857	H0003392	Yunnan	Local variety
420	H0001382	Anhui	Local variety	860	H0003415	Yunnan	Local variety
422	H0001402	Jiangxi	Local variety	865	H0003433	Yunnan	Local variety
423	H0001407	Jiangxi	Local variety	888	H0003708	Anhui	Local variety
424	H0001425	Hubei	Local variety	889	H0003709	Anhui	Local variety
425	H0001429	Hubei	Local variety	917	H0004044	Shaanxi	Local variety
426	H0001431	Hubei	Local variety	919	H0004099	Japan	Foreign germplasm
429	H0001434	Hubei	Local variety	920	H0004113	Germany	Foreign germplasm
430	H0001438	Hubei	Local variety	936	H0004249	Inner Mongolia	Local variety
431	H0001451	Hubei	Local variety	939	H0004254	Inner Mongolia	Local variety
432	H0001454	Hubei	Local variety	953	H0004291	Jiangsu	Local variety
433	H0001464	Hubei	Local variety	955	H0004299	Jiangsu	Local variety
434	H0001469	Hubei	Local variety	959	H0004354	Anhui	Local variety
435	H0001470	Hubei	Local variety	962	H0004360	Guangxi	Local variety
436	H0001471	Hubei	Local variety	964	H0004366	Chongqing	Local variety
437	H0001472	Hubei	Local variety	965	H0004378	Sichuan	Local variety
439	H0001489	Hubei	Local variety	967	H0004411	Sichuan	Local variety
440	H0001496	Hubei	Local variety	973	H0004426	Sichuan	Local variety

附表2 旋转后的成分矩阵

Supplement table 2 The component matrix after rotation

性状 Trait	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
根总表面积 <i>TSAR</i>	0.926	0.290	0.006	-0.163
根总投影面积 <i>PAR</i>	0.926	0.290	0.006	-0.163
根总体积 <i>BVR</i>	0.906	0.199	-0.005	-0.315
根总长 <i>LR</i>	0.856	0.416	0.015	0.112
交叠数 <i>ON</i>	0.848	-0.269	0.034	0.341
关节点 <i>CL</i>	0.829	0.324	0.015	0.406
连接数 <i>LN</i>	0.779	0.461	0.009	0.378
总连接点数 <i>TNCP</i>	0.674	0.649	0.000	0.315
根总数量 <i>NR</i>	-0.434	0.027	0.235	-0.111
根尖数量 <i>NRT</i>	0.136	0.981	-0.026	0.031
端点 <i>EP</i>	0.136	0.981	-0.026	0.031
分叉数 <i>BN</i>	0.479	0.790	-0.014	0.310
发芽势 <i>GP</i>	-0.029	-0.034	0.946	0.027
发芽指数 <i>GI</i>	-0.018	-0.007	0.927	0.018
发芽率 <i>GR</i>	-0.021	0.030	0.858	0.021
根平均直径 <i>ADR</i>	0.032	-0.153	0.010	-0.893

附表3 不同蚕豆种质耐盐性综合评价D值及排名

Supplement table 3 D value and rank of salt-alkali tolerance of different germplasms

Code	D	Rank	Code	D	Rank	Code	D	Rank	Code	D	Rank
299	0.619	1	368	0.279	101	432	0.236	201	655	0.195	301
251	0.564	2	269	0.279	102	593	0.236	202	713	0.195	302
199	0.532	3	290	0.279	103	337	0.236	203	297	0.194	303
250	0.458	4	379	0.279	104	317	0.234	204	176	0.194	304
241	0.448	5	465	0.278	105	196	0.234	205	550	0.194	305
372	0.415	6	378	0.278	106	405	0.234	206	498	0.194	306
225	0.411	7	766	0.278	107	410	0.233	207	333	0.193	307
283	0.404	8	319	0.277	108	505	0.233	208	821	0.192	308
279	0.394	9	217	0.277	109	469	0.233	209	595	0.192	309
242	0.393	10	459	0.277	110	274	0.232	210	175	0.190	310
246	0.375	11	384	0.277	111	439	0.232	211	635	0.189	311
386	0.374	12	348	0.275	112	590	0.230	212	581	0.189	312
230	0.367	13	416	0.275	113	261	0.230	213	615	0.188	313
223	0.364	14	490	0.274	114	387	0.230	214	763	0.188	314
403	0.363	15	231	0.274	115	489	0.230	215	400	0.187	315
267	0.362	16	504	0.274	116	446	0.230	216	396	0.187	316
402	0.361	17	295	0.274	117	281	0.229	217	422	0.186	317

330	0.359	18	541	0.273	118	591	0.229	218	965	0.186	318
185	0.358	19	506	0.273	119	535	0.228	219	350	0.186	319
313	0.356	20	514	0.271	120	663	0.228	220	192	0.185	320
248	0.356	21	467	0.270	121	509	0.228	221	263	0.184	321
308	0.353	22	523	0.269	122	572	0.228	222	398	0.184	322
356	0.348	23	340	0.269	123	394	0.228	223	627	0.184	323
271	0.346	24	486	0.269	124	476	0.227	224	537	0.183	324
224	0.344	25	322	0.268	125	450	0.227	225	214	0.183	325
289	0.344	26	343	0.268	126	604	0.227	226	661	0.182	326
435	0.342	27	888	0.267	127	483	0.226	227	480	0.182	327
221	0.340	28	381	0.267	128	197	0.226	228	842	0.182	328
528	0.338	29	363	0.267	129	443	0.225	229	512	0.182	329
385	0.337	30	652	0.267	130	433	0.224	230	499	0.181	330
345	0.336	31	254	0.267	131	203	0.223	231	567	0.180	331
303	0.335	32	311	0.266	132	518	0.223	232	688	0.180	332
471	0.334	33	592	0.266	133	526	0.222	233	936	0.179	333
335	0.334	34	218	0.265	134	287	0.222	234	462	0.178	334
370	0.334	35	431	0.264	135	423	0.222	235	725	0.178	335
382	0.329	36	468	0.264	136	307	0.221	236	522	0.178	336
344	0.329	37	456	0.264	137	259	0.221	237	511	0.178	337
331	0.328	38	803	0.264	138	374	0.221	238	723	0.178	338
460	0.324	39	917	0.263	139	848	0.220	239	543	0.178	339
464	0.322	40	352	0.263	140	419	0.220	240	415	0.177	340
293	0.320	41	296	0.263	141	219	0.219	241	964	0.177	341
200	0.319	42	488	0.262	142	600	0.219	242	847	0.176	342
373	0.317	43	268	0.261	143	598	0.219	243	738	0.176	343
474	0.316	44	445	0.259	144	679	0.219	244	721	0.176	344
341	0.315	45	531	0.259	145	631	0.219	245	649	0.176	345
249	0.315	46	449	0.259	146	651	0.219	246	733	0.176	346
316	0.314	47	481	0.258	147	315	0.217	247	865	0.174	347
496	0.313	48	542	0.257	148	397	0.215	248	578	0.173	348
401	0.312	49	517	0.257	149	354	0.215	249	732	0.172	349
232	0.310	50	404	0.256	150	243	0.215	250	705	0.172	350
280	0.310	51	461	0.256	151	570	0.214	251	798	0.172	351
430	0.309	52	188	0.256	152	636	0.214	252	237	0.172	352
201	0.309	53	605	0.255	153	860	0.214	253	712	0.171	353
359	0.306	54	395	0.255	154	524	0.213	254	508	0.171	354
334	0.306	55	366	0.255	155	206	0.213	255	502	0.170	355
389	0.305	56	700	0.255	156	538	0.213	256	533	0.170	356
181	0.305	57	360	0.255	157	479	0.212	257	579	0.169	357
420	0.304	58	278	0.254	158	448	0.212	258	553	0.168	358
566	0.303	59	262	0.254	159	744	0.211	259	256	0.168	359
527	0.303	60	441	0.253	160	939	0.211	260	808	0.168	360
371	0.302	61	301	0.253	161	482	0.211	261	564	0.167	361

355	0.302	62	586	0.252	162	629	0.210	262	525	0.167	362
227	0.301	63	357	0.251	163	666	0.210	263	338	0.166	363
257	0.300	64	557	0.251	164	561	0.210	264	953	0.166	364
500	0.298	65	204	0.251	165	596	0.209	265	777	0.166	365
239	0.298	66	545	0.250	166	178	0.209	266	919	0.165	366
276	0.298	67	797	0.250	167	582	0.209	267	740	0.165	367
458	0.298	68	494	0.250	168	437	0.209	268	701	0.164	368
347	0.297	69	277	0.250	169	358	0.208	269	455	0.163	369
305	0.296	70	377	0.250	170	425	0.208	270	530	0.163	370
328	0.296	71	365	0.249	171	265	0.207	271	767	0.163	371
324	0.295	72	787	0.249	172	212	0.207	272	501	0.161	372
270	0.293	73	529	0.247	173	475	0.207	273	602	0.158	373
503	0.292	74	222	0.246	174	306	0.206	274	758	0.157	374
412	0.291	75	513	0.246	175	585	0.205	275	962	0.156	375
226	0.291	76	547	0.246	176	240	0.205	276	195	0.154	376
674	0.290	77	424	0.245	177	189	0.204	277	546	0.153	377
310	0.289	78	429	0.245	178	298	0.204	278	626	0.153	378
478	0.289	79	336	0.244	179	285	0.204	279	689	0.153	379
292	0.289	80	442	0.243	180	436	0.204	280	775	0.152	380
495	0.289	81	571	0.243	181	722	0.204	281	234	0.152	381
260	0.289	82	559	0.243	182	253	0.204	282	735	0.151	382
208	0.288	83	266	0.243	183	409	0.203	283	845	0.151	383
291	0.288	84	594	0.242	184	516	0.203	284	959	0.151	384
507	0.288	85	353	0.242	185	408	0.202	285	889	0.151	385
326	0.288	86	638	0.242	186	810	0.201	286	822	0.149	386
244	0.288	87	312	0.242	187	563	0.201	287	806	0.149	387
339	0.287	88	304	0.241	188	440	0.201	288	841	0.148	388
294	0.287	89	857	0.240	189	380	0.201	289	833	0.147	389
245	0.286	90	207	0.240	190	562	0.200	290	835	0.146	390
484	0.286	91	434	0.240	191	574	0.200	291	375	0.146	391
349	0.286	92	846	0.240	192	228	0.200	292	186	0.146	392
198	0.285	93	452	0.240	193	653	0.199	293	714	0.145	393
466	0.284	94	346	0.239	194	973	0.199	294	599	0.143	394
457	0.282	95	672	0.238	195	955	0.199	295	834	0.140	395
300	0.282	96	288	0.238	196	920	0.198	296	809	0.139	396
472	0.281	97	314	0.238	197	967	0.198	297	492	0.135	397
454	0.280	98	515	0.237	198	588	0.198	298	302	0.128	398
426	0.279	99	318	0.237	199	576	0.197	299	320	0.124	399
272	0.279	100	568	0.237	200	177	0.195	300			

附图 1 20 份参试材料根总长和根总表面积的四象限图

Supplement figure1 Four quadrants of length of total root and total surface area of root 20 materials

