

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2022.04283

绿豆种质资源苗期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选

胡亮亮** 王素华** 王丽侠 程须珍* 陈红霖*

中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081

摘要: 土壤盐渍化已成为影响中国农业生产的重要问题, 筛选耐盐绿豆种质资源对于盐渍化土地利用具有重要意义。本研究对 346 份国内外绿豆种质苗期用 150 mmol L⁻¹ NaCl 进行胁迫处理, 测定了株高、地上部鲜重、根鲜重、地上部干重、根干重、根长、根体积等 12 个指标, 采用主成分分析和隶属函数分析、耐盐性综合评价分析及聚类分析对各样本的耐盐性进行了综合评价和归类, 并采用逐步回归分析建立了耐盐性预测回归方程。结果表明, 处理组与对照组各性状评价指标存在极显著差异, 且 12 个指标的耐盐系数间均存在着不同程度的相关性。结合盐害症状等级划分与耐盐性综合评价结果, 筛选到苗期高耐盐(1 级)绿豆 26 份, 耐盐(3 级)绿豆 65 份, 对盐分敏感(7 级)绿豆 74 份, 对盐分极敏感(9 级)绿豆 18 份。其中来自江西的 C04125、菲律宾的 C06310 等 10 份耐盐能力最强, 可作为绿豆耐盐育种的优异种质资源。地上部鲜重、根鲜重、根干重、根长、根体积和根分枝数可以作为绿豆苗期耐盐性评价指标。

关键词: 绿豆; 种质资源; 苗期; 耐盐性; 综合评价

Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant germplasm of mungbean (*Vigna radiate* L.) at seedling stage

HU Liang-Liang**, WANG Su-Hua**, WANG Li-Xia, CHENG Xu-Zhen*, and CHEN Hong-Lin*

Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Soil salinization has become one of the important factors affecting agricultural production in China. It is of great significance to screen germplasm resources of mungbean [*Vigna radiate* (L.) Wilczek] for the utilization of salinized land. In the present study, the seedlings of 346 domestic and foreign collections of mungbean were exposed to 150 mmol L⁻¹ NaCl. To evaluate the salt-tolerance of different mungbean genotypes at seedling stage, 12 indicators were calculated, including plant height, fresh weight of above-ground part, fresh weight of root, dry weight of above-ground part, dry root weight, root length, and root volume. Salt tolerance of each sample was comprehensively evaluated and classified by principal component analysis, membership function analysis, salt tolerance comprehensive evaluation, and cluster analysis; and the regression equation of salt tolerance prediction was established by stepwise regression analysis. The results revealed that there were significant differences between treatment group and control group in each trait evaluation index, and the salt tolerance coefficients of the 12 indicators were correlated to some content. Combining the classification of salt damage symptoms and the comprehensive evaluation results of salt tolerance, 26 mungbean germplasms with high salt tolerance, 65 germplasms with high salt tolerance, 74 germplasms with salt sensitive, and 18 germplasms with extremely salt sensitive were selected at seedling stage. Among them, 10 varieties such as C04125 from Jiangxi and C06310 from the Philippines had the strongest salt tolerance, which could be used as excellent resources for mungbean salt tolerance breeding. Above-ground fresh weight, root fresh weight, root dry weight, root length, root volume, and root branch number could be used to predict salt tolerance of mungbean at seedling stage.

本研究由国家重点研发计划项目(2019YFD1000702, 2019YFD1000700), 中国农业科学院科技创新工程项目, 农作物种质资源保护与利用专项(2019NWB036-07), 国家农作物种质资源共享服务平台(NICGR2019)和国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-08)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFD1000702, 2019YFD1000700), the Agricultural Science and Technology Innovation Program (ASTIP) in CAAS, the Crop Germplasm Resources Protection (2019NWB036-07), the National Infrastructure for Crop Germplasm Resources Project from the Ministry of Science and Technology of China (NICGR2019), and the China Agriculture Research System (CARS-08).

* 通信作者(Corresponding authors): 陈红霖, E-mail: chenhonglin@caas.cn; 程须珍, E-mail: chengxuzhen@caas.cn

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 胡亮亮, E-mail: 931629850@qq.com; 王素华, E-mail: wangshuhua@caas.cn

Received (收稿日期): 2020-12-28; Accepted (接受日期): 2021-04-26; Published online (网络出版日期): 2021-05-18.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20210517.1539.004.html>

Keywords: mungbean [*Vigna radiate* (L.) Wilczek]; germplasm resources; seeding stage; salt tolerance; comprehensive evaluation

土壤盐渍化严重影响农作物的生长,是导致农作物减产的主要非生物因子之一。土壤盐渍化已成为一个世界性问题,地球约 6% 的陆地以及 20% 的耕地在一定程度上被盐渍化^[1]。中国约有盐渍化土地 3600 万公顷,约占全国可利用土地面积的 4.88%,盐渍化耕地约占全国可耕地面积的 7%^[2]。近年来,由于耕作方式落后、灌溉措施不当,引起土地次生盐渍化日趋严重,可耕地面积日益缩小,对粮食安全构成潜在威胁^[3-4]。

农作物的耐盐机理比较复杂,受环境条件影响较大。筛选高度耐盐的优良农作物品种是解决土地盐渍化的有效途径^[5]。近年来,国内外在作物耐盐性方面开展了大量工作,普遍认为不同生育期,盐胁迫对作物的危害程度不同,且苗期对盐胁迫尤为敏感^[2,6-7]。盐胁迫会导致作物渗透胁迫^[8],体内严重缺水,进而引起离子毒害,氧化胁迫,破坏膜的结构,营养元素亏缺,最后次级产物积累,导致烂芽、烂根、叶片干枯、抑制作物形态建成,产量降低^[9]。目前,大豆、玉米、水稻、小麦等作物的苗期耐盐性鉴定已取得了较大进展,并筛选出一些高耐盐的种质资源,如刘谢香等^[2]通过苗期 NaCl 胁迫,从 27 份大豆中筛选到 4 份高耐盐种质;郝德荣等^[5]采用盆栽法评价了 157 份玉米自交系的苗期耐盐性,筛选到 10 份高耐盐玉米种质;吴其褒等^[6]采用苗期海水灌溉的方式,从 104 份由俄罗斯引进的水稻种质中筛选到 1 份高耐盐种质和 14 份耐盐种质;马雅琴等^[7]通过室内鉴定,从 28 份引进春小麦中筛选到 13 份在芽期和苗期耐盐性均较强的种质。

中国是绿豆原产地,种质资源十分丰富^[10-11]。然而,中国已育成的绿豆品种耐盐种质极少^[12-13]。优良品种选育进程缓慢,因此鉴定和评价不同基因型绿豆种质的耐盐性,筛选耐盐绿豆种质,培育耐盐绿豆品种,对于有效利用盐渍化地,提高绿豆产量,增加收入具有重要意义。近年来,绿豆耐盐性研究取得了一定进展,筛选出一些绿豆耐盐种质,如焦广音等^[12]从 1199 份绿豆品种资源中筛选到芽期耐盐种质 180 份和苗期耐盐种质 16 份;徐宁等^[13]利用混合盐碱胁迫,从 34 份绿豆中筛选到芽期高耐盐种质 9 份;绿豆的耐盐基因 *VrNHX1*^[14]和 *VrDREB2A*^[15] 已经被克隆,本实验室克隆的 *VrDREB2A*,不仅控制植物的耐盐性,还控制耐旱

性。目前,针对绿豆耐盐性鉴定的研究大多集中在芽期,对苗期耐盐性研究较少,选用的材料数目也较少,且大多为育成品种,存在生态区域代表性不全面等问题。有研究发现不同生育期及同时期不同基因型的耐盐能力差异很大,且芽期的耐盐性远高于苗期的耐盐性,因此研究苗期耐盐性更有利用价值^[8,16]。不同研究者对苗期耐盐性鉴定方法、鉴定指标和评价方法的选择存在差异。鉴定的指标主要包括形态指标如株高、生物量等^[2],生理生化指标如叶绿素含量、丙二醛含量等^[17];评价方法主要包括胁迫差数、胁迫系数、胁迫指数、抗逆性指数、分级评分法、主成分分析法、聚类分析法、灰色关联度分析法、隶属函数值法、多属性决策法等^[2,18-21]。使用多个指标以及不同的分析方法对苗期进行了耐盐分析都证实隶属函数法和主成分分析的结果基本一致,隶属函数值法和主成分分析是一种较全面、有效的抗逆性综合评价方法,已广泛运用于大豆^[22]、玉米^[5,23]、水稻^[6]、小麦^[7]、高粱^[24-25]等作物的研究。

目前,大多数对绿豆耐盐性鉴定研究主要在芽期,材料数较少、不能完全代表绿豆生态种植区域,且耐盐性鉴定筛选指标较为单一。本研究以涵盖全世界主要绿豆生态区的 346 份绿豆种质资源为材料,对不同基因型绿豆幼苗进行盐胁迫处理,通过多指标综合分析、主成分分析、模糊隶属函数分析等多元统计方法,拟建立更加系统、全面、快速的绿豆耐盐评价体系,为耐盐绿豆优异资源发掘、抗盐新品种培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

346 份参试绿豆材料均来自国家绿豆种质库,涵盖了北美洲、大洋洲、非洲和亚洲等 21 个国家,其中国内种质 212 份,印度 26 份、菲律宾 24 份、俄罗斯 20 份、韩国 13 份、阿富汗 10 份、伊朗 6 份、巴基斯坦 5 份、其他 13 个国家共 30 份。

1.2 试验设计

将蛭石:营养土(1:1)装入育苗盘(54 cm × 27 cm × 6 cm)中,下部托盘内加入蒸馏水,使其完全浸湿,绿豆种子用 1.0% NaClO 溶液消毒 10 min,然后用 ddH₂O 反复冲洗 3 次,播种于育苗盘内,播种深度约 1 cm,放入光照培养箱中,在 25℃ 恒温、昼

夜光照周期为 11 h/13 h、60%湿度、光照强度 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 条件下培养。种子发芽后, 用 1/2 Hoagland 营养液浇灌, 待幼苗真叶完全展开时, 挑选长势一致的幼苗每孔定苗 5 株。设置含有 0 (CK)、50、100、150 和 200 mmol L^{-1} NaCl 的 1/2 Hoagland 混合液, 于底部托盘中加入混合液 1 L, 每个处理 3 个重复, 此后每 48 h 往底部托盘中加入 1 L 1/2

Hoagland 营养液, 处理 14 d 后, 观察植株是否出现盐害症状, 根据植株受害程度对绿豆耐盐性进行分级, 分级标准^[26]如表 1。前期通过对随机挑选的 8 份绿豆材料的预试验发现, 在 150 mmol L^{-1} NaCl 浓度处理下, 品种间的生长差异最明显, 故确定绿豆苗期耐盐筛选的 NaCl 浓度为 150 mmol L^{-1} , 并按照上述方法对全部 346 份供试材料进行苗期耐盐性鉴定。

表 1 盐胁迫后绿豆苗期的盐害症状
Table 1 Symptoms of mungbean at seedling stage under salt stress

等级 Grade	耐盐性 Salt tolerance	表型特征 Symptom
1	高耐盐 Highly salt-tolerant	生长正常, 未出现盐害症状。 Normal growth, no symptoms were observed.
3	耐盐 Salt-tolerant	生长基本正常, 少数叶片边缘出现青枯或卷缩。 The growth is basically normal, and a few leaves appear withered or curled on the edge.
5	中耐盐 Mediumly salt-tolerant	叶片面积一半左右出现青枯或卷缩。 About half of the leaf area appear withered or curled.
7	敏感 Salt-sensitive	叶片大部分面积干枯坏死, 生长严重受阻。 Most of the leaves are dry and necrotic, and the growth is severely blocked.
9	高敏感 Highly salt-sensitive	严重受害, 植株完全枯萎。 Severely damaged, the plant is completely withered.

1.3 性状考察

盐胁迫处理 14 d 后, 取出幼苗, 用清水将根部冲洗干净, 用滤纸去除残余水分, 分别测量株高、地上部鲜重、根鲜重。然后使用 WinRHIZO 根系分析系统测量根长、根表面积、根平均直径、单位体积根长、根体积、根尖数、根分枝数等根部性状, 最后将地上部和根分别置于纸袋内, 于烘箱中, 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘 48 h, 至恒重时测定干物质量。

1.4 统计分析

利用 Microsoft Excel 2007、SPSS 24.0 和 R 3.3.3 软件计算耐盐系数, 并进行主成分分析、隶属函数值分析、聚类分析及逐步回归等多元分析。文中用到的公式如下:

耐盐系数(salt tolerance coefficient, STC) = 处理值/正常值 (1)

$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{i,\min}) / (X_{i,\max} - X_{i,\min}), i = 1, 2, \dots, n$ (2)
式中, U 表示隶属函数值, X_{ij} 表示第 j 个品种第 i 个主成分值, $X_{i,\min}$ 表示第 i 个主成分的最小值, $X_{i,\max}$ 表示第 i 个主成分的最大值。

$w_i = p / \sum(i = 1, n) p_i, i = 1, 2, \dots, n$ (3)
式中, w_i 表示第 i 个主成分的重要程度即权重, P_i 代

表第 i 个主成分的贡献率。

$$D = \sum(i = 1, n) [U(X_{ij}) \times w_i] \quad (4)$$

式中, D 值为第 i 个绿豆品种在盐胁迫条件下的耐盐性综合评价值。

2 结果与分析

2.1 绿豆种质苗期盐害症状分级及各性状耐盐系数分析

根据盐害症状划分标准将绿豆耐盐性划分为 1、3、5、7 和 9 共 5 个等级, 其中 1 级为高耐盐材料, 9 级为对高盐敏感材料, 各等级盐害症状表现见图 1。结果(附表 1)表明, 高耐盐(1 级)材料有 26 份, 耐盐(3 级)材料有 65 份, 中度耐盐(5 级)材料有 163 份, 耐盐敏感(7 级)材料有 74 份, 对盐分高敏感(9 级)材料有 18 份。12 个性状表型值处理与对照之间均存在极显著差异, 在盐胁迫处理条件下, 各性状表型值较对照都显著降低(图 2)。

利用公式(1)计算 12 个性状耐盐系数(附表 2)。从表 2 可看出, 株高、地上部鲜重、根鲜重、地上部干重、根干重、根长、根表面积、根直径、单位体积根长、根体积、根尖数和根分枝数的耐盐系数

分别是 0.355~0.998、0.159~1.104、0.113~1.044、0.206~1.077、0.220~0.998、0.156~1.026、0.148~1.134、0.574~1.144、0.156~1.053、0.140~1.085、0.049~0.998 和 0.112~0.999。各指标耐盐系数平均值均小于 1, 说明在盐胁迫条件下, 这些性状表型值较对照组均明显降低。且各指标耐盐系数变异丰富, 其中根平均直径变异系数最小(9.61%), 根尖数变异系数最大(42.11%)。

2.2 绿豆苗期各性状耐盐系数相关性分析

利用 SPSS 24.0 软件对 12 个性状耐盐系数进行相关性分析(表 3)表明, 株高与地上部鲜重、地上部干重、根干重、根长等呈显著正相关, 而与根平均直径呈显著负相关; 地上部鲜重与地上部干重呈极显著正相关, 与根鲜重、根干重、根长等呈显著正相关; 根鲜重与根干重呈极显著正相关, 与根长、根表面积、根体积等呈显著正相关; 地上部干重与根干重、根长等呈显著正相关; 根干重与根长、根表面积、根体积等呈显著正相关; 根长与根表面积、根体积、根尖数等呈极显著正相关, 而与根平均直径呈显著负相关; 根表面积与根体积、根尖数、分枝数等呈显著或极显著正相关; 根直径与单位体积根长、根尖数和根分枝数呈显著负相关; 单位体积

根长与根体积、根尖数和根分枝数呈极显著正相关; 根尖数与分枝数呈显著正相关。

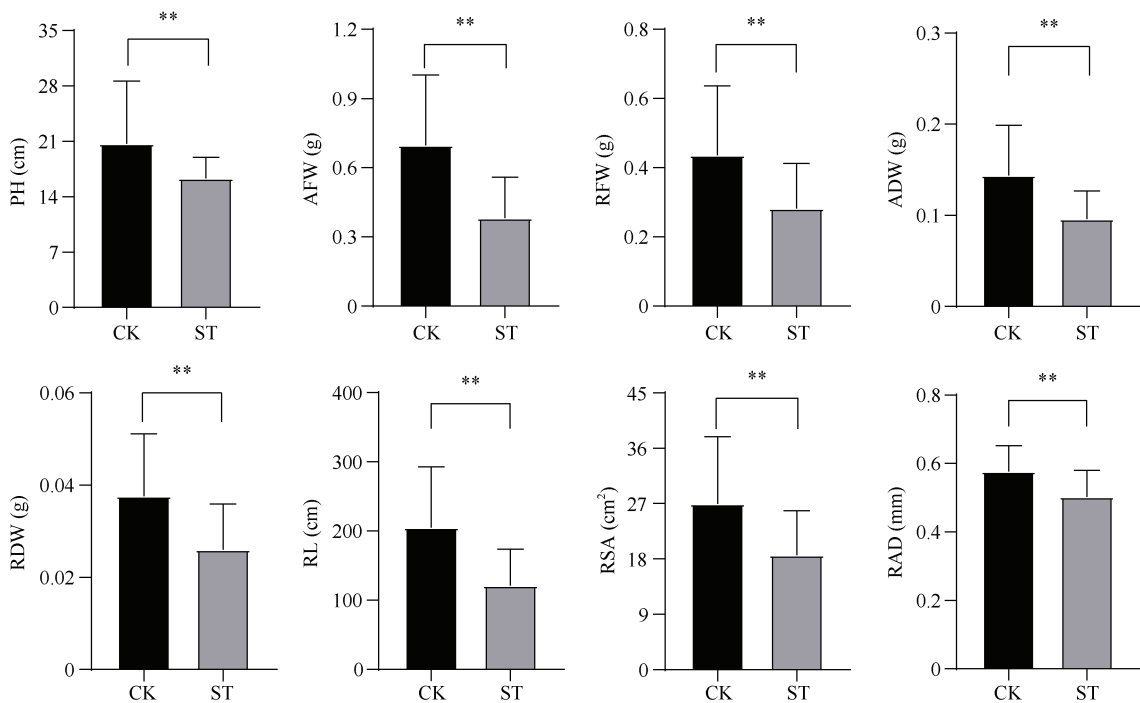


图 1 苗期耐盐性单株分类记载法的标准

Fig. 1 Standard of individual classification for salt tolerance at seedling stage

1: 高耐盐, 生长正常, 未出现盐害症状; 3: 耐盐, 生长基本正常, 少数叶片边缘出现青枯或卷缩; 5: 中耐盐, 叶片面积一半左右出现青枯或卷缩; 7: 敏感, 叶片大部分面积干枯坏死, 生长严重受阻; 9: 高敏感, 严重受害, 植株完全枯萎。

1: highly salt-tolerant, normal growth, no symptoms were observed; 3: salt-tolerant, the growth was basically normal, and a few leaves appeared withered or curled on the edge; 5: mediumly salt-tolerant, about half of the leaf area appeared withered or curled; 7: salt-sensitive, most of the leaves were dry and necrotic, and growth was severely blocked; 9: highly salt-sensitive, severely damaged, the plant was completely withered.



(图 2)

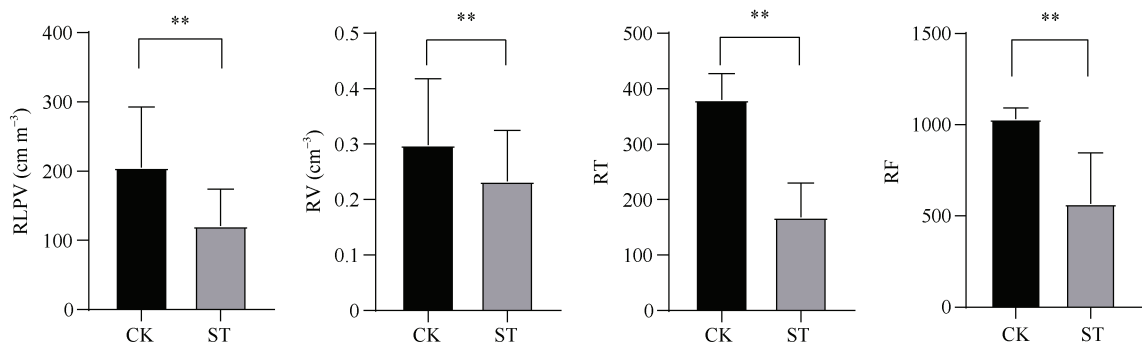


图 2 正常条件和盐胁迫条件下的 12 个性状表型差异

Fig. 2 Phenotypic differences of 12 traits under normal and salt stress conditions
CK: 对照; ST: 盐处理; PH: 株高; AFW: 地上部鲜重; RFW: 根鲜重; ADW: 地上部干重; RDW: 根干重; RL: 根长; RSA: 根表面积; RAD: 根平均直径; RLPV: 单位体积根长; RV: 根体积; RT: 根尖数; RF: 根分枝数。 ** 表示 $P < 0.01$ 的显著水平。
CK: control; ST: salt treatment; PH: plant height; AFW: above-ground fresh weight; RFW: root fresh weight; ADW: above-ground dry weight; RDW: root dry weight; RL: root length; RSA: root surface area; RAD: root average diameter; RLPV: root length per volume; RV: root volume; RT: root tips; RF: root forks. **: $P < 0.01$.

表 2 绿豆盐胁迫下各性状耐盐系数描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of saline tolerance index of mungbean traits under salt stress

性状 Trait	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV (%)
PH	0.355	0.998	0.730	0.14	19.08
AFW	0.159	1.104	0.596	0.23	39.42
RFW	0.113	1.044	0.684	0.22	32.30
ADW	0.206	1.077	0.711	0.19	26.54
RDW	0.220	0.998	0.713	0.19	26.08
RL	0.156	1.026	0.633	0.24	37.86
RSA	0.148	1.134	0.719	0.21	28.62
RAD	0.574	1.144	0.873	0.08	9.61
RLPV	0.156	1.053	0.630	0.24	37.61
RV	0.140	1.085	0.796	0.18	22.73
RT	0.049	0.998	0.647	0.27	42.11
RF	0.112	0.999	0.607	0.24	40.12

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

表 3 绿豆盐胁迫下各性状耐盐系数相关性分析
Table 3 Correlation analysis of saline tolerance index of mungbean traits under salt stress

性状 Trait	PH	AFW	RFW	ADW	RDW	RL	RSA	RAD	RLPV	RV	RT
AFW	0.53*										
RFW	0.17	0.40*									
ADW	0.64*	0.74**	0.21								
RDW	0.45*	0.63*	0.75**	0.61*							
RL	0.46*	0.40*	0.40*	0.44*	0.52*						
RSA	0.31	0.39	0.46*	0.35	0.52*	0.93**					
RAD	-0.58*	-0.21	-0.06	-0.40*	-0.24	-0.57*	-0.26				
RLPV	0.46*	0.40*	0.40*	0.44*	0.52*	0.99**	0.93**	-0.57*			
RV	0.08	0.30	0.46*	0.19	0.44*	0.71**	0.91**	0.13	0.71**		
RT	0.38	0.34	0.18	0.37	0.35	0.72**	0.60*	-0.57*	0.72**	0.38	
RF	0.37	0.34	0.35	0.38	0.44*	0.90**	0.87**	-0.45*	0.90**	0.69*	0.66*

缩写同图 2。* 表示 $P < 0.05$ 的显著水平; ** 表示 $P < 0.01$ 的显著水平。
Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.3 绿豆苗期各性状耐盐系数主成分分析

为降低数据的冗余性,以较少的主成分替代原始指标,对各性状耐盐系数进行主成分分析。各主成分因子的特征值,对原始指标的载荷矩阵和对表型的贡献率如表 4 所示。根据累计贡献率大于 90% 的原则,选取了前 5 个主成分因子,各因子的贡献率分别为 52.39%、16.78%、13.24%、6.80%和 3.71%,累计贡献率达到 92.93%,可代表 12 个单一指标的绝大部分信息。从表 4 可以看出,主成分因子 F1 主要与根长、根体积、根分枝数等根部性状密切相关,主成分因子 F2 主要与株高、地上部干重、根体积等密切相关,主成分因子 F3 主要对根鲜重、根直径、根干重等性状发挥作用,主成分因子 F4 主要与根鲜重、根直径、地上部鲜重等性状密切相关,主成分因子 F5 主要与根尖数、株高等性状密切相关。综上,通过主成分分析将绿豆 12 个耐盐相关指标,转换为 5 个独立的综合指标,以用于下一步的耐盐综合评价分析。

2.4 不同基因型绿豆耐盐性综合评价

2.4.1 不同基因型绿豆各综合指标的隶属函数分析和权重分析 根据不同基因型绿豆的主成分值,利用公式(2)计算 5 个综合指标的隶属函数值,结果如附表 3 所示。根据 5 个主成分因子的贡献率大小,

利用公式(3)计算 5 个综合指标的权重,分别为 0.564、0.181、0.142、0.073 和 0.040。得到综合指标的隶属函数值和权重后,进一步计算不同基因型绿豆耐盐性综合评价值 D 值。

2.4.2 不同基因型绿豆耐盐性综合评价 根据 5 个综合指标的隶属函数值和权重大小,利用公式(4)计算不同基因型绿豆耐盐性综合评价值 D 值,并依据 D 值对其耐盐能力进行评价。依据 D 值大小,对 346 份绿豆种质耐盐性能力大小进行排序(表 5)。耐盐性较强的前 10 名供试材料分别为 C04125 (中国江西)、C06310 (菲律宾)、C06393 (中国吉林)、C06299 (俄罗斯)、C06303 (越南)、C06342 (韩国)、C03279 (中国贵州)、C03609 (中国四川)、C01752 (中国陕西)和 C06270 (韩国);耐盐性较弱的后 10 名供试材料为 C06206 (菲律宾)、C02077 (中国安徽)、C05935 (中国山西)、C06242 (印度)、C05930 (中国吉林)、C05929 (中国吉林)、C06231 (伊朗)、C06300 (俄罗斯)、C06221 (斯里兰卡)和 C06289 (俄罗斯)。对比盐害症状等级划分结果,高耐盐(26 份)和耐盐(65 份)的绿豆材料 D 值均较大,而对盐分高敏感(18 份)和敏感(74 份)的材料 D 值均较小,从 1 级到 9 级, D 值也随之变小,表明综合评价结果与供试材料的实际耐盐情况较为一致。

表 4 前 5 个主成分的特征值及特征向量描述
Table 4 Eigen values and eigenvectors of the first five principal components

性状 Trait	主成分因子 Comprehensive factors				
	F1	F2	F3	F4	F5
PH	-0.22	0.46	0.10	-0.04	-0.57
AFW	-0.23	0.38	-0.24	-0.37	0.39
RFW	-0.19	-0.02	-0.53	0.55	0.07
ADW	-0.23	0.48	-0.10	-0.34	0.04
RDW	-0.26	0.19	-0.41	0.36	0.01
RL	-0.38	-0.15	0.15	0.02	-0.10
RSA	-0.36	-0.28	-0.03	-0.13	-0.12
RAD	0.20	-0.26	-0.51	-0.43	0.03
RLPV	-0.38	-0.15	0.15	0.02	-0.10
RV	-0.37	-0.39	-0.25	-0.31	-0.13
RT	-0.30	-0.04	0.31	0.08	0.67
RF	-0.37	-0.19	0.13	-0.04	-0.07
特征值 Eigen values	6.29	2.01	1.59	0.82	0.45
贡献率 Contribution rate (%)	52.39	16.78	13.24	6.80	3.71
累计贡献率 Accumulative contribution rate (%)	52.39	69.18	82.41	89.21	92.93

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

表 5 不同基因型绿豆耐盐性综合评价 D 值Table 5 D -value of salt tolerance of different genotypes of mungbean

品种 Variety	D 值 D -value	排名 Rank	品种 Variety	D 值 D -value	排名 Rank	品种 Variety	D 值 D -value	排名 Rank	品种 Variety	D 值 D -value	排名 Rank
C05290	0.663	164	C03069	0.592	253	C06292	0.741	44	C06227	0.568	270
C05495	0.747	36	C03070	0.549	283	C06293	0.758	21	C06228	0.541	291
C05506	0.683	126	C03071	0.708	96	C06294	0.699	105	C06230	0.663	165
C05668	0.678	135	C03072	0.602	241	C06295	0.703	99	C06231	0.406	340
C05786	0.513	308	C03078	0.609	232	C06296	0.769	12	C06232	0.547	285
C05787	0.762	19	C03079	0.702	101	C06297	0.757	23	C06233	0.502	313
C05798	0.526	300	C03086	0.621	223	C06298	0.538	293	C06234	0.453	331
C06117	0.748	35	C03090	0.669	151	C06299	0.792	4	C06235	0.562	275
C06118	0.626	219	C03094	0.740	47	C06300	0.413	339	C06236	0.724	65
C05788	0.722	67	C03140	0.720	75	C06302	0.740	46	C06237	0.663	162
C06397	0.631	210	C03606	0.538	294	C06303	0.789	5	C06238	0.643	188
C06396	0.664	159	C03656	0.717	88	C06304	0.458	328	C06241	0.642	190
C06386	0.632	208	C03608	0.545	289	C06305	0.636	201	C06242	0.341	343
C05636	0.674	140	C03609	0.772	8	C06306	0.727	60	C06243	0.631	211
C06398	0.711	94	C03610	0.754	28	C06307	0.615	229	C06244	0.582	261
C06390	0.746	38	C03601	0.768	13	C06308	0.756	25	C06246	0.561	277
C06391	0.744	39	C03651	0.682	128	C06309	0.547	286	C06247	0.664	161
C05503	0.583	260	C03273	0.755	26	C06310	0.804	2	C06248	0.607	236
C06392	0.717	83	C03279	0.777	7	C06311	0.721	71	C06249	0.522	301
C06393	0.796	3	C03280	0.719	78	C06312	0.743	40	C06251	0.657	173
C06394	0.751	31	C03284	0.733	56	C06313	0.740	48	C06253	0.575	266
C06383	0.567	271	C03289	0.638	197	C06314	0.738	50	C06254	0.477	321
C06384	0.672	146	C03304	0.670	149	C06315	0.673	145	C06255	0.719	77
C05249	0.507	311	C03305	0.432	336	C06316	0.721	69	C06256	0.533	295
C05248	0.726	62	C03312	0.695	108	C06317	0.695	106	C06257	0.643	189
C06385	0.664	160	C03316	0.741	45	C06318	0.454	329	C06258	0.717	86
C04717	0.720	76	C03319	0.695	107	C06319	0.638	196	C06259	0.512	309
C06387	0.736	54	C03320	0.680	131	C06320	0.501	314	C06260	0.662	167
C06389	0.657	175	C03334	0.715	91	C06321	0.462	327	C06261	0.437	334
C06388	0.740	49	C03380	0.748	34	C06322	0.596	248	C06262	0.520	302
C05635	0.751	30	C03381	0.674	138	C06323	0.750	32	C06263	0.454	330
C05637	0.715	92	C03383	0.685	120	C06324	0.653	179	C06264	0.516	306
C06402	0.716	90	C03384	0.639	195	C06325	0.607	234	C06265	0.648	185
C03413	0.684	121	C03385	0.721	70	C06326	0.699	104	C06266	0.588	257
C03416	0.721	72	C03397	0.472	323	C06327	0.607	235	C06267	0.432	335
C06395	0.685	119	C03399	0.684	123	C06328	0.584	259	C06268	0.741	43
C06405	0.547	284	C03400	0.769	11	C06329	0.500	316	C06269	0.466	325
C05179	0.701	103	C03401	0.590	256	C06330	0.615	228	C06270	0.770	10
C06179	0.562	276	C03402	0.768	15	C06331	0.718	81	C06271	0.645	187
C06403	0.665	158	C03405	0.723	66	C06332	0.768	14	C06272	0.618	226
C06404	0.725	63	C03434	0.674	141	C06333	0.720	74	C06273	0.576	264
C03414	0.635	202	C03435	0.684	122	C06334	0.683	124	C06274	0.667	155
C04702	0.687	116	C03436	0.725	64	C06335	0.682	127	C06275	0.566	274

(续表 5)

品种 Variety	D 值 D-value	排名 Rank	品种 Variety	D 值 D-value	排名 Rank	品种 Variety	D 值 D-value	排名 Rank	品种 Variety	D 值 D-value	排名 Rank
C03923	0.759	20	C03440	0.757	22	C06336	0.547	287	C06276	0.717	89
C00376	0.573	267	C03441	0.547	288	C06337	0.633	204	C06277	0.711	93
C00377	0.681	130	C03442	0.593	251	C06338	0.722	68	C06278	0.658	172
C00381	0.637	199	C03471	0.754	29	C06339	0.718	82	C06279	0.476	322
C00385	0.516	304	C03472	0.702	102	C06340	0.632	206	C06280	0.552	281
C00389	0.554	279	C03484	0.632	207	C06341	0.479	320	C05900	0.566	273
C00391	0.707	97	C03485	0.667	156	C06342	0.778	6	C05901	0.617	227
C00396	0.593	250	C03486	0.683	125	C06343	0.597	246	C05902	0.678	134
C00399	0.494	317	C03526	0.673	144	C06344	0.464	326	C05903	0.444	333
C00834	0.592	254	C03527	0.676	137	C06345	0.612	230	C05904	0.721	73
C00840	0.630	212	C03528	0.541	290	C06346	0.569	269	C05905	0.651	182
C00848	0.742	41	C03529	0.444	332	C06347	0.717	85	C05906	0.640	194
C00858	0.693	111	C03530	0.694	110	C06348	0.692	113	C05907	0.632	205
C01606	0.592	255	C03593	0.619	225	C06349	0.567	272	C05908	0.659	171
C01607	0.604	239	C03594	0.681	129	C06350	0.690	115	C05909	0.665	157
C01609	0.671	147	C03595	0.667	154	C06351	0.630	213	C05910	0.577	263
C01610	0.692	114	C03596	0.677	136	C06352	0.596	247	C05911	0.608	233
C01611	0.594	249	C03597	0.603	240	C06353	0.619	224	C05912	0.628	218
C01623	0.651	183	C03598	0.625	220	C06200	0.650	184	C05913	0.491	318
C01627	0.655	177	C03599	0.766	16	C06201	0.571	268	C05914	0.647	186
C01630	0.528	299	C04081	0.514	307	C06202	0.728	59	C05915	0.610	231
C01633	0.601	242	C04082	0.641	193	C06203	0.755	27	C05916	0.662	166
C01635	0.764	17	C04083	0.490	319	C06204	0.660	170	C05917	0.736	52
C01651	0.718	80	C04084	0.735	55	C06205	0.653	178	C05918	0.679	133
C01657	0.668	153	C04085	0.652	180	C06206	0.173	346	C05919	0.635	203
C01660	0.605	238	C04086	0.703	100	C06208	0.529	298	C05920	0.657	174
C01740	0.517	303	C04125	0.829	1	C06209	0.670	150	C05921	0.652	181
C01741	0.628	215	C04126	0.540	292	C06210	0.587	258	C05922	0.763	18
C01742	0.692	112	C04127	0.637	198	C06211	0.468	324	C05923	0.661	168
C01751	0.624	221	C04558	0.750	33	C06212	0.674	143	C05924	0.516	305
C01752	0.770	9	C04559	0.710	95	C06213	0.717	87	C05925	0.674	139
C01753	0.628	216	C04560	0.680	132	C06214	0.599	244	C05926	0.600	243
C01754	0.599	245	C04561	0.741	42	C06215	0.503	312	C05927	0.674	142
C01755	0.706	98	C06281	0.624	222	C06216	0.687	117	C05928	0.660	169
C01815	0.606	237	C06282	0.593	252	C06217	0.552	282	C05929	0.377	341
C02056	0.694	109	C06283	0.641	192	C06218	0.670	148	C05930	0.341	342
C02058	0.575	265	C06284	0.727	61	C06219	0.501	315	C05931	0.731	57
C02071	0.746	37	C06285	0.669	152	C06220	0.561	278	C05932	0.552	280
C02072	0.686	118	C06286	0.736	53	C06221	0.426	338	C05933	0.532	296
C02073	0.663	163	C06287	0.656	176	C06222	0.637	200	C05934	0.718	79
C02077	0.212	345	C06288	0.736	51	C06223	0.731	58	C05935	0.292	344
C02078	0.628	217	C06289	0.431	337	C06224	0.641	191	C05937	0.630	214
C02081	0.632	209	C06290	0.756	24	C06225	0.507	310			
C02103	0.717	84	C06291	0.579	262	C06226	0.531	297			

2.5 不同基因型绿豆聚类分析

利用不同基因型绿豆耐盐性评价 D 值, 根据最短距离法对 346 份绿豆种质进行聚类(图 3)。结果显示, 346 份绿豆供试材料被划分为 6 类, 第 I 类包含 126 份材料, D 值介于 0.650~0.728 之间, 其中 33 份材料盐害等级属于 3 级, 93 份材料属于 5 级, 为中度耐盐或耐盐材料; 第 II 类包含 58 份材料, D 值介于 0.731~0.829 之间, 其中 26 份材料盐害等级属于 1 级, 32 份材料属于 3 级, 为高耐盐或耐盐材料; 第 III 类包括 135 份材料, D 值介于 0.490~0.648 之间, 其中 70 份材料盐害等级属于 5 级, 65 份材料属于 7 级, 为中度耐盐或盐分敏感材料; 第 IV 类包括 5 份材料

(C06206、C02077、C05930、C05935 和 C06242), D 值介于 0.173~0.341 之间, 属于盐分高敏感材料; 第 V 类包含 22 份材料, D 值介于 0.377~0.479 之间, 其中 9 份材料盐害等级属于 7 级, 13 份材料属于 9 级, 为盐分敏感或高敏感材料。

2.6 回归模型建立和及鉴定指标筛选

为筛选可用于评价不同基因型绿豆耐盐性的鉴定指标, 建立绿豆耐盐性评价的数学模型, 将 12 个性状的耐盐系数作为自变量, 耐盐性综合评价 D 值作为因变量, 进行逐步回归分析。最终建立了最优回归方程: $D = 0.881 - 0.029\text{STC}_{\text{AFW}} - 0.020\text{STC}_{\text{RFW}} - 0.041\text{STC}_{\text{RDW}} - 0.081\text{STC}_{\text{RL}} - 0.091\text{STC}_{\text{RV}} - 0.031\text{STC}_{\text{RF}}$,

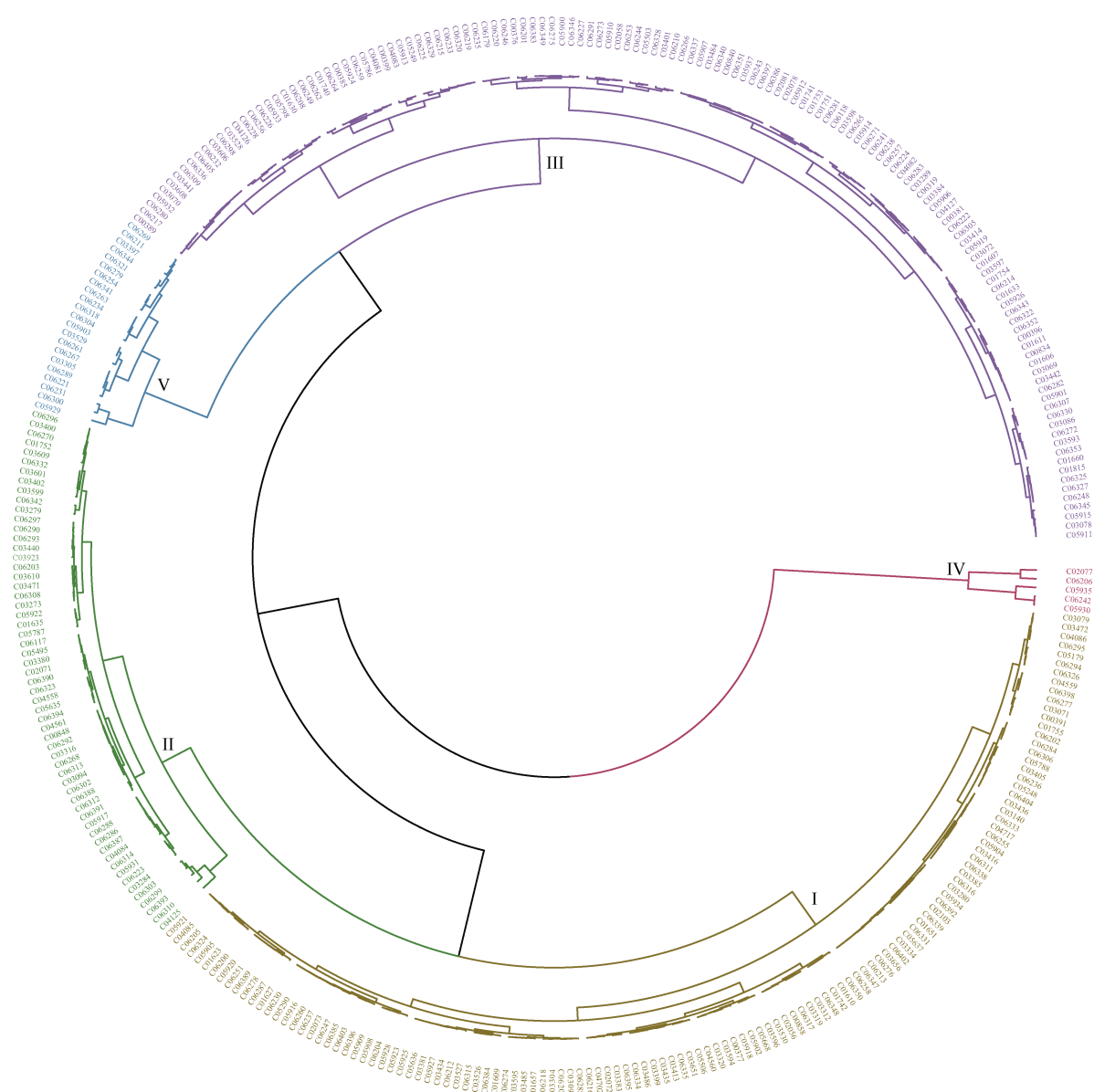


图 3 346 份绿豆种质基于 D 值的聚类图

Fig. 3 Cluster image based on D -value of 346 mungbean germplasms

方程决定系数 $R^2 = 0.996$, $P = 0.0001$ 。由方程的决定系数和 P 值可看出, 该方程可以很好地估计不同基因型绿豆的耐盐性评价 D 值, 对该回归方程的估计精度进行评价发现, 不同供试材料的估计精度均在 95.257% 以上(附表 4), 表明本方程中的指标对绿豆苗期耐盐性强弱具有显著的影响, 所以, 在相同处理条件下, 只需测定不同基因型绿豆的地上部鲜重、根鲜重、根干重、根长、根体积和根分枝数这 6 个指标, 计算其耐盐系数, 最后利用该方程估算其 D 值, 就可以较好地对其耐盐性强弱进行评价。

3 讨论

植物的耐盐性涉及渗透调节、信号转导等众多生理生化反应, 且不同植物及同一植物不同品种对盐胁迫的耐受能力存在差异^[27]。盐胁迫对植物的伤害首先是渗透胁迫, 导致根系吸水能力降低, 植株表现出缺水, 叶片干枯发黄等症状; 其次是离子毒害, 引起营养元素亏缺, 导致氧化胁迫, 进而破坏膜的结构^[28]; 最后是高盐分抑制酶的活性, 引起生理生化代谢紊乱以及有害物质积累, 最终影响植株的形态建成和生长发育。生产上绿豆受盐胁迫危害主要发生在芽期和苗期^[12-13], 且苗期对盐害最为敏感。盐分对绿豆苗期生长发育的影响主要表现在土壤中的低水势引起叶片气孔导度下降, 降低光合作用速率, 降低同化物与能量的供给, 从而制约植株的生长发育, 另外盐害还会影响某些特定的酶活性或代谢过程^[29]。

植物在受到盐胁迫时, 为了降低对自身的损害, 在长时间的进化过程中, 形成了一系列的耐盐机制。这些耐盐机制主要包括渗透调节^[30]、盐分外排^[30]、细胞区隔化^[31]、清除活性氧^[32]、信号转导^[33]、激素调节^[34-37]等。目前, 绿豆的耐盐机制还需要进一步深入研究, 开展绿豆种质资源耐盐性评价, 筛选高耐盐种质资源, 对于开展绿豆耐盐机制研究、品种选育以及盐渍化土地利用具有重要意义。

目前, 绿豆的耐盐性评价主要集中在育成品种, 且主要针对绿豆芽期进行耐盐性鉴定, 如徐宁等^[13]对 26 份食用豆产业技术体系育成的品种和 8 份优异种质在芽期用混合碱胁迫处理, 以隶属函数值法进行了耐盐碱性鉴定; 王乐政等^[38]对 14 份中绿系列和冀绿 9 号绿豆品种在芽期用 NaCl 进行胁迫, 以隶属函数值法进行了耐盐性鉴定。前人研究中选用的绿豆材料数量相对较少且多为育成品种, 存在生态区

覆盖片面、遗传基础狭窄等弊端。本研究中 346 份供试材料来自 21 个国家和地区, 不仅有育成品种, 还包括地方品种等, 生态覆盖面广, 遗传多样性丰富, 能够更好的为绿豆耐盐研究提供参考。

耐盐性鉴定需要选择合适的鉴定指标, 鉴定指标的选择与耐盐鉴定时期和供试材料数量有关。不同植物的耐盐性可采用不同的生长和生理指标进行评价, 对不同作物以及同一作物鉴定指标的选择也有差异, 如田小霞等^[39]对 132 份苜蓿以幼苗存活率、幼苗生长速率、株高、绿叶数量、电导率、叶绿素含量和干物质量为鉴定指标, 对其苗期进行耐盐性鉴定; 宝力格等^[40]对 110 份高粱以发芽势、发芽率为指标对芽期进行了耐盐性鉴定, 并以苗长、根长、苗鲜重、根鲜重、苗干重、根干重、叶绿素含量为指标对苗期进行了耐盐性鉴定; 孙现军等^[41]对 550 份水稻以有效分蘖数、主穗长度、主穗结实率、单株产量等产量性状为指标, 进行了全生育期的大田耐盐鉴定; 于崧等^[17]对绿豆苗期叶片的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、叶绿素含量、可溶性糖含量、丙二醛含量、游离脯氨酸含量、电导率等生理生化特征进行了研究。本研究对 346 份绿豆种质资源苗期耐盐性进行了研究, 考察了株高、生物量、根长、根体积等 12 个指标, 涵盖绿豆苗期地上部和根部的形态指标, 能较为全面表现绿豆幼苗在盐胁迫条件下的形态变化, 从而反映不同基因型绿豆苗期耐盐能力的大小。选取的指标一般相互间存在着显著或极显著的相关性, 易使鉴定结果与实际耐盐能力出现偏差, 主成分分析能够较好地解决这一问题。本研究通过主成分分析将 12 个单一指标变换成了 5 个主成分因子, 可解释 92.93% 的表型变异, 主成分因子 F1 的贡献率达到 52.39%, 其对根长、根体积、根分枝数相关系数较大, 表明根长、根体积、根分枝数可作为绿豆耐盐鉴定的指标。主成分分析不仅降低了指标间信息的重叠和冗余, 同时也表明了综合指标重要性的差异, 有助于客观全面地评价绿豆种质资源的耐盐性。隶属函数值法以主成分分析的综合指标为基础, 能够很好的评价作物间以及品种间耐盐性的强弱, 弥补了单一指标的片面性。本研究通过主成分分析, 结合隶属函数值法得到的综合指标权重, 对绿豆种质进行综合评价发现, 综合评价结果与盐害等级划分结果基本一致。

为进一步筛选出可靠的耐盐性评价指标, 本研

究采用了逐步回归分析,建立了用于绿豆苗期耐盐性评价的数学模型。于崧等^[42]的耐盐性评价模型指出活力指数、发芽率、根冠比、胚根长、胚芽长可作为绿豆芽期耐盐性鉴定的评价指标,后续研究又发现净光合速率、相对电导率、最大光化学效率、可溶性糖含量、初始荧光、地上干重、地下鲜重可作为绿豆苗期耐盐性评价的评价指标^[17]。可见,不同时期用于绿豆耐盐性评价的指标不同,且同一时期可用于绿豆耐盐性评价的指标也较为复杂,因此需要在初期选择指标时应尽量选择代表性强、且尽可能多的指标,经分析得到综合指标再进行耐盐性评价。本研究通过逐步回归分析发现,地上部鲜重、根鲜重、根干重、根长、根体积和根分枝数可作为绿豆苗期耐盐性鉴定的评价指标,这与主成分分析结果基本一致。这6个耐盐性鉴定的评价指标中,其中5个指标都与根系形态相关,可能是由于根系是植物最先感知盐胁迫的器官,最先受到盐胁迫等逆境的影响,进而抑制地上部的生长发育。

4 结论

从346份绿豆种质资源中筛选出C04125、C06310等10份在苗期表现为高耐盐的种质资源,可供耐盐基因发掘和耐盐品种选育等利用。在相同的试验条件下,地上部鲜重、根鲜重、根干重、根长、根体积和根分枝数可作为绿豆苗期耐盐性鉴定的评价指标。

附表 请见网络版: 1) 本刊网站 <http://zxwb.china-crops.org/>; 2) 中国知网 <http://www.cnki.net/>; 3) 万方数据 <http://c.wanfangdata.com.cn/Periodicalzuo-wxb.aspx>。

References

- [1] Li W H, Zhang H Z, Zeng Y L, Xiang L J, Lei Z H, Huang Q X, Li T Y, Shen F, Cheng Q. A salt tolerance evaluation method for sunflower (*Helianthus annuus* L.) at the seed germination stage. *Sci Rep*, 2020, 10: 10626.
- [2] 刘谢香, 常汝镇, 关荣霞, 邱丽娟. 大豆出苗期耐盐性鉴定方法建立及耐盐种质筛选. *作物学报*, 2020, 46: 1-8.
Liu X X, Chang R Z, Guan R X, Qiu L J. Establishment of screening method for salt tolerant soybean at emergence stage and screening of tolerant germplasm. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 陈志刚. 盐碱地可持续利用研究综述. *地理学报*, 2011, 66: 673-684.
Wang J L, Huang X J, Zhong T Y, Chen Z G. Review on sustainable utilization of salt-affected land. *Acta Geogr Sin*, 2011, 66: 673-684 (in Chinese with English abstract).
- [4] Qadir M, Quill  rou E, Nangia V, Murtaza G, Singh M, Thomas R J, Drechsel P, Nobl A D. Economics of salt-induced land degradation and restoration. *Nat Resour Forum*, 2014, 38: 282-295.
- [5] 郝德荣, 程玉静, 徐辰武, 冒宇翔, 彭长俊, 薛林. 玉米耐盐种质筛选及群体遗传结构分析. *植物遗传资源学报*, 2013, 14: 1153-1160.
Hao D R, Cheng Y J, Xu C W, Mao Y X, Peng C J, Xue L. Screening of maize germplasms for salt-tolerance and evaluation of population genetic structure. *J Plant Genet Resour*, 2013, 14: 1153-1160 (in Chinese with English abstract).
- [6] 吴其襄, 胡国成, 柯登寿, 栾维江, 杨巍, 孙宗修, 陈慧哲. 俄罗斯水稻种质资源的苗期耐盐鉴定. *植物遗传资源学报*, 2008, 9: 32-35.
Wu Q B, Hu G C, Ke D S, Luan W J, Yang W, Sun Z X, Chen H Z. Evaluation of russian rice germplasm in salt tolerance at seedling stage. *J Plant Genet Resour*, 2008, 9: 32-35 (in Chinese with English abstract).
- [7] 马雅琴, 翁跃进. 引进春小麦种质耐盐性的鉴定评价. *作物学报*, 2005, 31: 58-64.
Ma Y Q, Weng Y J. Evaluation for salt tolerance in spring wheat cultivars introduced from abroad. *Acta Agron Sin*, 2005, 31: 58-64 (in Chinese with English abstract).
- [8] Chinnusamy V, Zhu J, Zhu J K. Salt stress signaling and mechanisms of plant salt tolerance. *Genet Eng*, 2006, 27: 141-177.
- [9] 杨淑华, 巩志忠, 郭岩, 龚继明, 郑绍建, 林荣呈, 杨洪全, 毛龙, 秦峰, 罗利军, 张天真, 储成才, 赖锦盛, 晁代印, 关雪莹, 彭佳师, 黄朝峰, 蒋才富, 王瑜, 杨永青, 施怡婷. 中国植物应答环境变化研究的过去与未来. *中国科学: 生命科学*, 2019, 49: 1457-1478.
Yang S H, Gong Z Z, Guo Y, Gong J M, Zheng S J, Lin R C, Yang H Q, Mao L, Qin F, Luo L J, Zhang T Z, Chu C C, Lai J S, Chao D Y, Guan X Y, Peng J S, Huang C F, Jiang C F, Wang Y, Yang Y Q, Shi Y T. Studies on plant responses to environmental change in China: the past and the future. *Sci Sin (Vita)*, 2019, 49: 1457-1478 (in Chinese with English abstract).
- [10] 程须珍, 王素华. 中国绿豆品种资源研究. *作物品种资源*, 1998, (4): 9-11.
Cheng X Z, Wang S H. Research on Chinese mungbean germplasm resources. *Crop Germplasm Resour*, 1998, (4): 9-11 (in Chinese).
- [11] 陈红霖, 胡亮亮, 杨勇, 郝曦煜, 李姝彤, 王素华, 王丽侠, 程须珍. 481份国内外绿豆种质农艺性状及豆象抗性鉴定评价及遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2020, 21: 549-559.
Chen H L, Hu L L, Yang Y, Hao X Y, Li S T, Wang S H, Wang L X, Cheng X Z. Evaluation and genetic diversity analysis of agronomic traits and bruchid resistance using 481 worldwide mungbean germplasms. *J Plant Genet Resour*, 2020, 21: 549-559 (in Chinese with English abstract).
- [12] 焦广音, 任建华, 逯贵生, 降彩霞. 绿豆品种资源耐盐性鉴定与研究. *作物品种资源*, 1997, (2): 38-40.
Jiao G Y, Ren J H, Lu G S, Jiang C X. Identification and research on salt tolerance of mungbean variety resources. *Crop Germplasm Resour*, 1997, (2): 38-40 (in Chinese).
- [13] 徐宁, 陈冰婧, 王明海, 包淑英, 王桂芳, 郭中校. 绿豆品种资源萌发期耐碱性鉴定. *作物学报*, 2017, 43: 112-121.
Xu N, Chen B X, Wang M H, Bao S Y, Wang G F, Guo Z X.

- Identification of alkali tolerance of mungbean germplasm resources during germination. *Acta Agron Sin*, 2017, 43: 112–121 (in Chinese with English abstract).
- [14] Mishra S, Alavilli H, Lee BH, Panda S K, Sahoo L. Cloning and functional characterization of a vacuolar Na⁺/H⁺ antiporter gene from mungbean (*VrNHX1*) and its ectopic expression enhanced salt tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *PLoS One*, 2014, 9: e106678.
- [15] Chen H L, Liu L P, Wang L X, Wang S H, Cheng X Z. *VrDREB2A*, a DREB-binding transcription factor from *Vigna radiata*, increased drought and high-salt tolerance in transgenic *Arabidopsis thaliana*. *J Plant Res*, 2016, 129: 263–273.
- [16] Hosseini M, Powell A, Bingham I. Comparison of the seed germination and early seedling growth of soybean in saline conditions. *Seed Sci Res*, 2002, 12: 165–172.
- [17] 于崧, 梁海芸, 郭潇潇, 张翼飞, 史京京, 付鸾鸿. 不同基因型绿豆苗期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 223–232.
- Yu S, Liang H Y, Guo X X, Zhang Y F, Shi J J, Fu L H. Analysis of saline-alkaline tolerance and determination of saline-alkaline tolerance evaluation indicators in seeding stage of different mungbean genotypes. *Agric Res Arid Areas*, 2018, 36(4): 223–232 (in Chinese with English abstract).
- [18] Ali M, Afzal S, Parveen A, Kamran M, Javed M R, Abbasi G H, Malik Z, Riaz M, Ahmad S, Chattha M S, Ali M, Ali Q, Uddin M Z, Rizwan M, Ali S. Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na⁺ uptake in maize (*Zea mays* L.) cultivars exposed to salinity stress. *Plant Physiol Biochem*, 2021, 158: 208–218.
- [19] Wang S Q, Hu Y G, She K J, Zhou L L, Meng F L. Gray relational grade analysis of agronomical and physico-biochemical traits related to drought tolerance in wheat. *Sci Agric Sin*, 2007, 40: 2452–2459.
- [20] 马帅国, 田蓉蓉, 胡慧, 吕建东, 田蕾, 罗成科, 张银霞, 李培富. 粳稻种质资源苗期耐盐性综合评价与筛选. 植物遗传与资源学报, 2020, 21: 1089–1101.
- Ma S G, Tian R R, Hu H, Lyu J D, Tian L, Luo C K, Zhang Y X, Li P F. Comprehensive evaluation and selection of rice (*Oryza sativa japonica*) germplasm for saline tolerance at seeding stage. *J Plant Genet Res*, 2020, 21: 1089–1101 (in Chinese with English abstract).
- [21] 杨奇勇, 冯发林, 巢礼义. 多目标决策的农业抗旱能力综合评价. 灾害学, 2007, 22(2): 5–8.
- Yang Q Y, Feng F L, Chao L Y. Comprehensive evaluation on ability of coping with agriculture drought by using multi-objective decision. *J Catastrophol*, 2007, 22(2): 5–8 (in Chinese with English abstract).
- [22] 牛远, 杨修艳, 戴存凤, 王博文, 任高磊, 吴静磊, 王飞兵, 陈新红. 大豆芽期和苗期耐盐性评价指标筛选. 大豆科学, 2018, 37: 215–223.
- Niu Y, Yang X Y, Dai C F, Wang B W, Ren G L, Wu J L, Wang F B, Chen X H. Related indices selection of soybean salt tolerance at germination and seedling stages. *Soybean Sci*, 2018, 37: 215–223 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王秀华, 张寒, 潘香逾, 刘国锋, 赵岩. 玉米成株期耐盐性评价与耐盐资源筛选. 分子植物育种, 2020, 18: 685–692.
- Wang X H, Zhang H, Pan X Y, Liu G F, Zhao Y. Evaluation of salt tolerance and selection of salt tolerant germplasm in maize at adult stage. *Mol Plant Breed*, 2020, 18: 685–692 (in Chinese with English abstract).
- [24] 孙璐, 周宇飞, 汪澈, 肖木辑, 陶冶, 许文娟, 黄瑞冬. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定. 中国农业科学, 2012, 45: 1714–1722.
- Sun L, Zhou Y F, Wang C, Xiao M J, Tao Y, Xu W J, Huang R D. Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination. *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 1714–1722 (in Chinese with English abstract).
- [25] 任富莉, 潘映红, 张笑笑, 蒲伟军, 牟永莹, 李玉斌, 张桦, 朱莉. 基于多重表型的高粱耐盐性综合评价方法. 中国农业科技导报, 2019, 21(6): 152–162.
- Ren F L, Pan Y H, Zhang X X, Pu W J, Mu Y Y, Li Y B, Zhang H, Zhu L. Comprehensive evaluation method for sorghum salt tolerance based on multilevel phenotypic analysis. *J Agric Sci Technol*, 2019, 21(6): 152–162 (in Chinese with English abstract).
- [26] 程须珍, 王素华, 王丽侠. 绿豆种质资源描述规范和数据. 北京: 中国农业出版社, 2006. pp 48–58.
- Cheng X Z, Wang S H, Wang L X. Descriptors and Data Standard for Mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. pp 48–58 (in Chinese with English abstract).
- [27] Kim Y, Mun B G, Khan A L, Waqas M, Kim H, Shahzad R, Imran, M, Yun B W, Lee I J. Regulation of reactive oxygen and nitrogen species by salicylic acid in rice plants under salinity stress conditions. *PLoS One*, 2018, 13: e0192650.
- [28] Zhang J L, Shi H Z. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance. *Photosynth Res*, 2013, 115: 1–22.
- [29] 郭玉静, 马宗琪, 宋佳慧, 何晓彤, 于梦斐, 王颖. 绿豆盐胁迫响应机制研究进展. 山东农业科学, 2021, 53(1): 137–142.
- Guo Y J, Ma Z Q, Song J H, He X T, Yu M W, Wang Y. Research progress on the mechanism of mungbean in response to salt stress. *Shandong Agric Sci*, 2021, 53(1): 137–142 (in Chinese with English abstract).
- [30] Shen Q F, Yu J H, Fu L B, Wu L Y, Dai F, Jiang L X, Wu D Z, Zhang G P. Ionomic, metabolomic and proteomic analyses reveal molecular mechanisms of root adaption to salt stress in tibetan wild barley. *Plant Physiol Biochem*, 2018, 123: 319–330.
- [31] Deinlein U, Stephan AB, Horie T, Luo W, Xu G, Schroeder J I. Plant salt-tolerance mechanisms. *Trends Plant Sci*. 2014, 19: 371–379.
- [32] Liang W J, Ma X L, Wan P, Liu L Y. Plant salt-tolerance mechanism: a review. *Biochem Biophys Res Commun*, 2018, 495: 286–291.
- [33] Jiang Z H, Zhou X P, Tao M, Yuan F, Liu L L, Wu F H, Wu X M, Xiang Y, Niu Y, Liu F, Li C J. Plant cell-surface GIPC sphingolipids sense salt to trigger Ca²⁺ influx. *Nature*, 2019, 572: 341–346.
- [34] Suzuki N, Bassil E, Hamilton J S, Inupakutika A M, Zandalinas I S, Tripathy D, Luo Y, Dion E, Fukui G, Kumazaki A, Nakano R, Rivero M R, Verbeck F G, Azad K R, Blumwald E, Mittler R. ABA is required for plant acclimation to a combination of salt

- and heat stress. *PLoS One*, 2016, 11: e0147625.
- [35] Li W Q, Yamaguchi S, Khan M A, An P, Liu X J, Tran L P. Roles of gibberellins and abscisic acid in regulating germination of *suaeda salsa* dimorphic seeds under salt stress. *Front Plant Sci*, 2016, 6: 1235.
- [36] Iqbal N, Umar S, Per T S, Khan N A. Ethephon increases photosynthetic-nitrogen use efficiency, proline and antioxidant metabolism to alleviate decrease in photosynthesis under salinity stress in mustard. *Plant Signal Behav*, 2017, 12: e1297000.
- [37] Erdal S, Aydn M, Genisel M, Taspnar S M, Gorcek Z. Effects of salicylic acid on wheat salt sensitivity. *Afr J Biotechnol*, 2011, 10: 5713–5718.
- [38] 王乐政, 高凤菊, 华方静, 曹鹏鹏. 不同绿豆品种萌发期耐盐性研究. *山东农业科学*, 2015, 47(9): 31–35.
Wang L Z, Gao F J, Hua F J, Cao P P. Study on salt tolerance of different mungbean varieties at germination stage. *Shandong Agric Sci*, 2015, 47(9): 31–35 (in Chinese with English abstract).
- [39] 田小霞, 毛培春, 张琳, 郭强, 孟林. 苜蓿属植物苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价. *植物资源与环境学报*, 2018, 27(2): 46–56.
Tian X X, Mao P C, Zhang L, Guo Q, Meng L. Screening on salt tolerance index and comprehensive evaluation of salt tolerance of *Medicago* Linn. plants at seedling stage. *J Plant Res Environ*, 2018, 27: 46–56 (in Chinese with English abstract).
- [40] 宝力格, 陆平, 史梦莎, 许月, 刘敏轩. 中国高粱地方种质芽期苗期耐盐性筛选及鉴定. *作物学报*, 2020, 46: 734–744.
Bao L G, Lu P, Shi S S, Xu Y, Liu M X. Screening and identification of Chinese sorghum landraces for salt tolerance at germination and seedling stages. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 734–744 (in Chinese with English abstract).
- [41] 孙现军, 姜奇彦, 胡正, 张惠媛, 徐长兵, 邱一桓, 韩龙植, 张辉. 水稻资源全生育期耐盐性鉴定筛选. *作物学报*, 2019, 45: 1656–1663.
Sun X J, Jiang Q Y, Hu Z, Zhang H Y, Xu C B, Di Y H, Han L Z, Zhang H. Screening and identification of salt-tolerant rice germplasm in whole growth period. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1656–1663 (in Chinese with English abstract).
- [42] 于崧, 郭潇潇, 梁海芸, 付鸾鸿, 史京京, 张翼飞, 阎磊. 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*, 2017, 53: 1629–1639.
Yu S, Guo X X, Liang H Y, Fu L H, Shi J J, Zhang Y F, Chuang L. Analysis of saline-alkaline tolerance and determination of saline-alkaline tolerance evaluation indicators in germination stage of different mungbean genotypes. *Plant Physiol Commun*, 2017, 53: 1629–1639 (in Chinese with English abstract).