

绿豆种质资源萌发期耐盐性鉴定与评价

时会影 范保杰 刘长友 王彦 王珅 张志肖 苏秋竹 田静

(河北省农林科学院粮油作物研究所/河北省遗传育种重点实验室, 050035, 河北石家庄)

摘要 萌发期耐盐性是制约绿豆种质在盐碱地上应用的关键因素。以 NaCl 溶液模拟胁迫环境, 对 68 个绿豆种质资源进行了耐盐性综合评价及筛选。结果表明, 发芽势、发芽率、胚芽长等 10 项指标处理组与对照组间存在极显著差异 ($P < 0.001$), 且 10 项指标的耐盐系数间均存在着不同程度的相关性 (R^2 介于 -0.120~0.947)。利用主成分分析将 10 项单项指标转化为 3 个综合指标, 通过耐盐性综合评价和聚类分析把参试材料按耐盐性强弱分为 3 个类群, 其中 25 份材料为高耐盐类型, 20 份材料为耐盐中间类型, 23 份材料为盐敏感类型。采用逐步回归建立绿豆萌发期耐盐性评价模型, 筛选出子叶下部鲜重、活力指数、发芽势、发芽率、发芽指数、胚根长和胚芽鲜重 7 个指标, 可用于不同绿豆种质资源耐盐性快速评价与预测。

关键词 绿豆; 萌发期; 耐盐性; 综合评价

盐胁迫是限制作物生长的主要非生物胁迫之一, 我国盐渍地资源丰富、分布范围广、面积大、类型复杂, 总面积约 9913 万 hm^2 , 占世界盐渍地总面积的 1/10^[1]。研究^[2]发现, 培育耐盐作物品种是应对土地盐碱化问题最经济有效的途径之一。绿豆 (*Vigna radiata* L.) 是我国重要的杂粮作物, 具有抗旱、耐贫瘠、适应环境能力强等优良特性^[3], 是盐碱地改良和边际土地利用的优良作物之一。鉴定和筛选绿豆品种的耐盐碱能力, 发掘耐盐性强的品种, 对有效利用盐碱地具有重要意义。

前人^[4-7]对绿豆的耐盐碱性开展了大量的研究工作, 发现种子萌发期是对盐胁迫较敏感的时期, 决定种子出苗率。不同研究者对萌发期耐盐性鉴定指标和评价方法的选择存在差异, 鉴定指标主要包括萌动前指标 (如发芽势、发芽率、活力指数、发芽指数、相对盐害率等^[4-5])、萌动后指标 (如胚根长、胚芽长、胚根鲜重、胚芽鲜重等^[4-5,8]), 评价方法主要有胁迫差数、胁迫系数、聚类分析法、主成分分析法、隶属函数值法等^[4,9-11]。作为耐盐资源筛选的关键时期, 目前有关绿豆萌发期耐盐性评价通常是依据发芽率的相对盐害率来划分萌发期的耐盐性级别^[12], 而系统全面评价绿豆萌发期耐盐性的研究相对较少。于崧等^[4]、徐宁

等^[8]以混合盐碱 (NaHCO_3 与 Na_2CO_3 摩尔比为 9:1) 模拟盐碱胁迫环境, 分别在萌发期对 30 余个绿豆品种的萌发性状进行了综合鉴定分析。但不同区域盐碱地类型有所差异, 且绿豆对不同种类盐分胁迫响应不同^[13-14]。河北省沧州地区盐渍化类型主要为氯盐渍化, NaCl 是盐分存在的最主要形态^[15]。

本研究以 0.8% NaCl 模拟沧州地区盐胁迫环境, 采用多种多元分析方法, 在萌发期调查了 68 个绿豆种质资源的 10 个性状, 综合评价了不同绿豆种质资源的耐盐性, 以期筛选出绿豆萌发期耐盐性的主要鉴定指标和耐盐性较强的绿豆种质, 为绿豆耐盐种质资源的快速、准确评价及品种选择提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

68 个供试材料中 37 个 (1~37 号) 为国家食用豆产业技术体系 18 个相关单位近期育成的新品种, 31 个 (38~68 号) 是来自 12 个省、市的地方种, 具体信息详见表 1。

1.2 试验设计

利用人工气候培养箱进行绿豆萌发期的耐盐性鉴定, 采用培养皿纸上发芽法, 每份种质挑选

作者简介: 时会影, 主要从事食用豆遗传育种研究, E-mail: 1561669595@qq.com

田静为通信作者, 主要从事食用豆遗传育种研究, E-mail: nkytianjing@163.com

基金项目: 国家食用豆产业技术体系 (CARS-08-G03); 国家重点研发专项 (2021YFD1600601); 河北省杂粮杂豆种业创新团队 (21326305D)

收稿日期: 2023-09-24; 修回日期: 2024-03-26; 网络出版日期: 2024-04-01

表 1 供试绿豆种质资源及来源
Table 1 Mung bean germplasm resources and their origins

编号 Code	材料 Material	来源 Origin	编号 Code	材料 Material	来源 Origin
1	中绿 30	中国农业科学院作物科学研究所	35	同绿 10 号	山西农业大学
2	中绿 27	中国农业科学院作物科学研究所	36	桂绿 2 号	广西农业科学院水稻研究所
3	品绿 2019-26-8-17	中国农业科学院作物科学研究所	37	冀绿 13 号	河北省农林科学院粮油作物研究所
4	品绿 2020-25-10-0	中国农业科学院作物科学研究所	38	绿丰 2 号	黑龙江齐齐哈尔
5	冀绿 0802 反	河北省农林科学院粮油作物研究所	39	绿资 17	黑龙江齐齐哈尔
6	冀绿抗 50-8	河北省农林科学院粮油作物研究所	40	LZL173	辽宁
7	L3019	吉林省农业科学院	41	C001	内蒙古
8	HN267	吉林省农业科学院	42	C028	内蒙古
9	保绿 201610-3	保定市农业科学院	43	C037	内蒙古
10	保绿 201622-2	保定市农业科学院	44	C0072	河北邯郸
11	赤黄绿 101	赤峰市农牧科学研究所	45	C0817	辽宁凌源
12	赤黑绿 100	赤峰市农牧科学研究所	46	C1257	山东高密
13	皖科绿 4 号	安徽省农业科学院作物研究所	47	资源 6	山西
14	皖科绿 5 号	安徽省农业科学院作物研究所	48	资源 9	山西
15	WL1901	湖北省农业科学院	49	资源 10	山西
16	WL1902	湖北省农业科学院	50	资源 11	山西
17	宛绿 10 号	南阳市农业科学院	51	资源 66	山西
18	宛绿 11 号	南阳市农业科学院	52	绿资 5（白荚）	陕西榆林
19	172-017	黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院	53	C1467	河南驻马店
20	172-032	黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院	54	C1498	河南南阳
21	潍绿 60032	青岛市农业科学研究院	55	C1509	河南周口
22	潍绿 70535	青岛市农业科学研究院	56	C1518	河南周口
23	11L638	辽宁省农业科学院作物研究所	57	C0882	山东青岛
24	辽绿 13 号	辽宁省农业科学院作物研究所	58	C1009	山东泰安
25	鹦哥 2 号	张家口市农业科学院	59	C1052	山东泰安
26	晋绿豆 11 号	山西农业大学	60	C1084	山东济宁
27	晋绿豆 12 号	山西农业大学	61	AHYL2014-19	安徽
28	渝绿 10 号	重庆市农业科学院	62	LD127	湖北
29	渝绿 11 号	重庆市农业科学院	63	LD128	湖北
30	蒙科绿 3 号	内蒙古自治区农牧科学院	64	LD163	湖北
31	蒙科绿 4 号	内蒙古自治区农牧科学院	65	LD175	湖北
32	苏绿 17-302	江苏省农业科学院蔬菜研究所	66	绿资 5	重庆
33	苏绿 17-208	江苏省农业科学院蔬菜研究所	67	绿资 10	重庆
34	同绿 9 号	山西农业大学	68	绿豆 1 号	海南

籽粒饱满、大小一致的种子，分别用 10% NaClO 溶液于种子表面消毒 10 min，自来水冲洗 5 次，去离子水漂洗 5 次。将种子表面水分吸干，置于铺有双层滤纸的培养皿中，每个培养皿 30 粒。为了确定绿豆种质资源萌发期耐盐性筛选的适宜盐处理浓度，分别采用 0（CK）、0.8%、1.0%和 1.2% NaCl 溶液进行预试验。通过测定发芽率、芽长和根长，分析得到 0.8% NaCl 溶液胁迫下，绿豆各种质资源间各生长指标的差异最明显，因而

被选定为不同绿豆种质资源萌发期耐盐碱性鉴定的适宜浓度；以蒸馏水作为对照，不同种质资源各处理 3 次重复。将每个培养皿中加入 20 mL 蒸馏水或盐溶液，放入种子后置于人工气候箱中。培养条件为光照强度 150 μmol/(m²·s)，光照周期 16 h/8 h（昼/夜）；温度为 25 °C/18 °C（昼/夜）；相对湿度为 50%~60%。

1.3 测定指标与方法

发芽势（%）=第 3 天发芽种子数/供试种子

数×100；发芽率（%）=第 7 天发芽种子数/供试种子数×100；发芽指数（ G_i ）= $\sum Gt/Dt$ （ Gt 为在 t 天的发芽数， Dt 为相应的天数）；活力指数（ V_i ）=发芽指数×胚根鲜重。

第 7 天测量胚根鲜重及长度、胚芽鲜重及长度。子叶下部鲜重=胚芽鲜重+胚根鲜重。根冠比=胚根鲜重/胚芽鲜重。胚根鲜重、胚芽鲜重和子叶下部鲜重均以 10 株计。

1.4 数据处理

利用 Excel、SPSS 24.0 软件计算耐盐系数，并进行相关性、主成分、隶属函数值、聚类及逐步回归等分析。具体公式如下^[9,16-17]：

耐盐系数（salt tolerance coefficient，STC）=盐胁迫处理平均值/对照处理平均值 (1)

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

式中， U 表示隶属函数值， X_{ij} 表示第 j 个种质第 i 个主成分值， $X_{i,\min}$ 和 $X_{i,\max}$ 分别表示第 i 个主成分的最小值和最大值。

$$w_i=p/\sum(i=1, n)p_i, i=1, 2, \dots, n$$
 (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。

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

式中， D 值为第 i 个绿豆种质的耐盐性综合评价。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫条件下各项评价指标的变化

在 0.8% NaCl 盐胁迫下，不同绿豆品种种子萌发的各项指标均不同程度地受到抑制（表 2）。其中，受抑制最严重的指标为胚芽长和活力指数，均值分别为 0.96 cm 和 11.27，较对照分别下降 89.49%和 77.52%。胚根长、胚根鲜重、子叶下部鲜重、胚芽鲜重、发芽指数、根冠比、发芽势和发芽率的均值分别为 2.38 cm、0.26 g、1.53 g、1.26 g、42.32、0.21、72.56%和 87.77%，较对照分别下降 68.16%、66.28%、57.02%、55.02%、34.50%、25.05%、24.23%和 12.23%。

表 2 68 份绿豆种质在对照和盐胁迫下各指标描述统计
Table 2 Descriptive statistics of each trait in 68 mung bean germplasm under control and salt stress conditions

指标 Index	对照处理 Control treatment					盐胁迫处理 Salt stress treatment				
	最大值 Max.	最小值 Min.	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 CV (%)	最大值 Max.	最小值 Min.	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 CV (%)
GP (%)	100.00	61.11	95.77	7.48	7.81	100.00	13.33	72.56**	20.20	27.84
GR (%)	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00	33.33	87.77**	14.37	16.37
GI	74.99	43.94	64.62	6.65	10.29	72.45	15.73	42.32**	14.31	33.81
VI	85.26	14.59	50.13	15.35	30.62	24.63	3.58	11.27**	5.47	48.53
GFW (g)	4.90	1.77	2.80	0.52	18.63	1.82	0.91	1.26**	0.19	15.00
RFW (g)	1.32	0.26	0.78	0.24	30.67	0.54	0.13	0.26**	0.08	30.34
FWC (g)	4.99	2.09	3.55	0.61	17.19	2.31	1.09	1.53**	0.23	15.22
GL (cm)	12.29	4.63	9.15	1.69	18.44	1.75	0.40	0.96**	0.32	33.54
RL (cm)	13.39	2.84	7.48	3.12	41.68	3.76	1.48	2.38**	0.52	21.95
RSR	0.50	0.12	0.28	0.08	27.41	0.34	0.10	0.21**	0.06	27.23

GP：发芽势；GR：发芽率；GI：发芽指数；VI：活力指数；GFW：胚芽鲜重；RFW：胚根鲜重；FWC：子叶下部鲜重；GL：胚芽长；RL：胚根长；RSR：根冠比。“**”表示在 $P<0.01$ 水平上盐胁迫处理与对照处理差异显著。
GP: germination potential; GR: germination rate; GI: germination index; VI: vigour index; GFW: germ fresh weight; RFW: radicle fresh weight; FWC: fresh weight under cotyledon; GL: germ length; RL: radicle length; RSR: root-shoot ratio. “**” indicates extremely significant difference between salt stress and control treatments at the $P<0.01$ level.

由表 2 的变异系数可知，68 份绿豆材料的 10 项指标在对照和盐胁迫条件下均表现出不同程度的变异，对照处理下变异系数的变化范围是 0.00%~41.68%，盐胁迫处理下变异系数的变化范围是 15.00%~48.53%。盐胁迫处理下活力指数的变异系数最大，比对照增加了 17.90%。变异系数

较对照增加最大的是发芽指数，较对照增加了 23.52%。

2.2 各项指标间的相关性分析

盐胁迫下绿豆参试品种 10 项指标相对值的相关性分析（表 3）表明，相对胚芽鲜重除与相对发芽指数、相对子叶下部鲜重和相对胚根长相关性

显著或极显著外，相关系数分别达到 0.260、0.735、0.267，与其他 6 项指标相关性不显著。其余 9 项指标间均呈极显著正相关，相关系数介于 0.260~0.947，其中相对胚根鲜重和相对根冠比的相关系数最高，达到了 0.947。相对发芽势与相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数呈极显著正相关，相关系数分别为 0.718、0.826 和 0.712。相对活力指数与相对胚根鲜重呈极显著正相关，相关系数

表 3 盐胁迫下绿豆萌发期各单项指标的相关系数矩阵
Table 3 Correlation analysis of saline tolerance indexes of mung bean traits under salt stress

性状 Trait	RGP	RGR	RGI	RVI	RRFW	RGFW	RFWC	RRL	RGL
RGR	0.718**								
RGI	0.826**	0.608**							
RVI	0.712**	0.525**	0.781**						
RRFW	0.608**	0.450**	0.592**	0.953**					
RGFW	0.099	0.141	0.260*	0.202	0.172				
RFWC	0.459**	0.385**	0.528**	0.699**	0.726**	0.735**			
RRL	0.540**	0.356**	0.735**	0.778**	0.702**	0.267*	0.578**		
RGL	0.560**	0.364**	0.529**	0.799**	0.799**	-0.019	0.455**	0.724**	
RRSR	0.581**	0.406**	0.526**	0.894**	0.947**	-0.120	0.519**	0.633**	0.812**

RGP: 相对发芽势; RGR: 相对发芽率; RGI: 相对发芽指数; RVI: 相对活力指数; RRFW: 相对胚根鲜重; RGFW: 相对胚芽鲜重; RFWC: 相对子叶下部鲜重; RGL: 相对胚芽长; RRL: 相对胚根长; RRSR: 相对根冠比。“*”表示在 $P < 0.05$ 水平相关性显著, “**”表示在 $P < 0.01$ 水平相关性极显著。下同。
RGP: relative germination potential; RGR: relative germination rate; RGI: relative germination index; RVI: relative vigour index; RRFW: relative radicle fresh weight; RGFW: relative germ fresh weight; RFWC: relative fresh weight under cotyledon; RGL: relative germ length; RRL: relative radicle length; RRSR: relative root-shoot ratio. “*” indicates significant correlation at $P < 0.05$ level, “**” indicates extremely significant correlation at $P < 0.01$ level. The same below.

达到了 0.953。

2.3 各项指标的主成分分析

相关性分析(表 3)表明,各性状之间存在着显著正相关,信息重叠性较高,因此利用 SPSS 24.0 软件对 10 项测定指标的耐盐系数进行了主成分分析,其中因子个数的选取参考 2 条重要原则^[18],一是使累计方差占总方差的 80%以上;二是令特征值 ≥ 1 。可见,因子取为 3 能够满足上述 2 个原则,前 3 个因子的贡献率分别为 62.042%、14.966%、10.758%,累计贡献率达 87.766%(表 4)。把原来 10 个具有相互关联的单项指标转换为 3 个新的相互独立的综合指标(comprehensive index, CI),分别定义为第 1(CI_1)至第 3(CI_3)主成分。进一步获得的因子载荷矩阵见表 5,反映的是 3 个主因子与 10 个测定指标间的相关性。 CI_1 与活力指数和胚根鲜重相关性最大,相关系数分别为 0.971 和 0.923; CI_2 与胚芽鲜重和子叶下部鲜重相关性最大,相关系数分别为 0.945 和 0.565;

CI_3 与发芽率和发芽势相关性最大,相关系数分别为 0.637 和 0.492。综上所述,活力指数、胚芽鲜重和发芽率可作为绿豆萌发期耐盐性鉴定的筛选指标。

表 4 绿豆萌发期各综合指标的主成分方差贡献率
Table 4 Principal component variance contribution rate of germination indexes of mung bean

主成分 Principal component	特征根 Eigen value	贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)
1	6.204	62.042	62.042
2	1.497	14.966	77.008
3	1.076	10.758	87.766
4	0.547	5.469	93.235
5	0.292	2.917	96.152
6	0.210	2.105	98.256
7	0.103	1.035	99.291
8	0.052	0.515	99.806
9	0.014	0.143	99.949
10	0.005	0.051	100.000

表 5 绿豆各指标的主成分载荷矩阵
Table 5 Principal component load matrix of mung bean index

主成分 Principal component	RGP	RGR	RGI	RVI	RRFW	RGFW	RFWC	RRL	RGL	RRSR
1	0.797	0.626	0.825	0.971	0.923	0.266	0.746	0.825	0.816	0.852
2	-0.070	0.035	0.099	-0.072	-0.106	0.945	0.565	0.043	-0.319	-0.385
3	0.492	0.637	0.365	-0.108	-0.276	-0.106	-0.227	-0.149	-0.245	-0.250

2.4 不同绿豆种质资源的综合评价

2.4.1 隶属函数分析 根据公式（1）计算绿豆种质各综合指标的隶属函数值 $U(X_j)$ 。从表 6 可以看出，对于某一项综合指标而言，如 CI_1 在盐胁迫处理下，8 号（HN267）的 $U(X_j)$ 最小，表明此种质在 CI_1 表现为对盐胁迫高度敏感，而 58 号（C1009）的 $U(X_j)$ 最大，表明此种质在该综合指标上表现为最强的耐盐性。

表 6 不同绿豆种质资源的综合指标值、权重、 $U(X_j)$ 、 D 值及综合评价
Table 6 The comprehensive indicator values, indicator weight, $U(X_j)$, D -value and comprehensive evaluation of different mung bean germplasm resources

材料 Material	CI_1	CI_2	CI_3	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	D 值 D -value	综合评价 Comprehensive evaluation	排名 Ranking
1	1.294	0.369	0.832	0.241	0.741	0.900	0.407	中耐	37
2	1.238	0.345	0.727	0.212	0.713	0.772	0.366	中耐	45
3	1.490	0.194	0.680	0.343	0.541	0.715	0.422	中耐	35
4	1.546	0.183	0.660	0.372	0.528	0.691	0.438	中耐	32
5	1.146	0.392	0.625	0.164	0.766	0.649	0.326	敏感	50
6	0.907	0.403	0.549	0.040	0.780	0.556	0.230	敏感	64
7	1.070	0.313	0.817	0.125	0.677	0.882	0.312	敏感	53
8	0.830	0.337	0.091	0.000	0.704	0.000	0.120	敏感	68
9	1.047	0.320	0.329	0.113	0.685	0.289	0.232	敏感	63
10	1.297	0.280	0.512	0.242	0.638	0.512	0.343	敏感	48
11	1.320	0.330	0.678	0.254	0.696	0.713	0.386	中耐	42
12	1.451	0.220	0.610	0.322	0.570	0.631	0.402	中耐	39
13	1.222	0.295	0.692	0.203	0.656	0.730	0.345	敏感	47
14	1.200	0.330	0.553	0.192	0.696	0.562	0.323	敏感	51
15	1.090	0.307	0.487	0.135	0.669	0.481	0.269	敏感	59
16	1.170	0.188	0.463	0.177	0.534	0.452	0.271	敏感	58
17	1.247	0.322	0.803	0.217	0.687	0.866	0.376	中耐	43
18	1.358	0.338	0.583	0.274	0.706	0.598	0.388	中耐	41
19	1.569	-0.110	0.526	0.384	0.192	0.529	0.369	中耐	44
20	0.968	0.356	0.462	0.072	0.726	0.451	0.230	敏感	65
21	1.652	0.308	0.788	0.427	0.671	0.846	0.520	高耐	25
22	1.088	0.284	0.311	0.134	0.643	0.268	0.237	敏感	62
23	1.410	0.310	0.732	0.301	0.673	0.779	0.423	中耐	34
24	1.111	0.393	0.577	0.146	0.768	0.591	0.306	敏感	54
25	1.966	0.138	0.439	0.589	0.476	0.422	0.550	高耐	22
26	1.068	0.411	0.463	0.124	0.789	0.452	0.277	敏感	56
27	1.462	0.275	0.444	0.328	0.633	0.428	0.393	中耐	40
28	1.608	0.313	0.435	0.404	0.676	0.418	0.452	中耐	29
29	1.468	0.310	0.728	0.331	0.673	0.773	0.444	中耐	31
30	1.644	0.230	0.713	0.423	0.581	0.756	0.491	中耐	26
31	0.840	0.348	0.200	0.006	0.717	0.132	0.142	敏感	67
32	1.205	0.214	0.636	0.195	0.563	0.662	0.315	敏感	52
33	1.055	0.405	0.280	0.117	0.782	0.230	0.244	敏感	61
34	1.546	0.295	0.668	0.372	0.656	0.701	0.461	中耐	28
35	1.160	0.390	0.613	0.172	0.765	0.634	0.329	敏感	49
36	0.897	0.411	0.477	0.035	0.788	0.469	0.217	敏感	66
37	1.054	0.326	0.706	0.117	0.691	0.747	0.292	敏感	55
38	1.836	0.093	0.763	0.522	0.425	0.816	0.542	高耐	23
39	1.390	0.542	0.484	0.291	0.939	0.477	0.424	中耐	33

续表 6 Table 6 (continued)

材料 Material	CI_1	CI_2	CI_3	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	D 值 D -value	综合评价 Comprehensive evaluation	排名 Ranking
40	1.896	0.355	0.746	0.553	0.724	0.795	0.612	高耐	15
41	1.814	0.296	0.679	0.511	0.657	0.714	0.561	高耐	19
42	1.911	0.373	0.663	0.561	0.746	0.695	0.609	高耐	16
43	2.324	0.137	0.433	0.775	0.475	0.416	0.680	高耐	7
44	1.739	0.399	0.801	0.472	0.775	0.863	0.572	高耐	18
45	1.938	0.418	0.790	0.575	0.797	0.849	0.646	高耐	11
46	1.679	0.303	0.831	0.441	0.665	0.899	0.535	高耐	24
47	1.843	0.293	0.807	0.526	0.653	0.870	0.590	高耐	17
48	1.719	0.523	0.608	0.461	0.917	0.628	0.559	高耐	20
49	1.994	0.417	0.723	0.604	0.795	0.768	0.657	高耐	9
50	1.691	0.413	0.821	0.447	0.790	0.887	0.559	高耐	21
51	2.085	0.138	0.599	0.652	0.476	0.617	0.617	高耐	14
52	1.340	0.596	0.914	0.265	1.000	1.000	0.480	中耐	27
53	2.445	0.100	0.388	0.838	0.433	0.361	0.710	高耐	2
54	1.374	0.225	0.839	0.282	0.576	0.908	0.409	中耐	36
55	1.549	0.173	0.456	0.373	0.517	0.444	0.406	中耐	38
56	1.393	0.245	0.378	0.292	0.599	0.349	0.352	敏感	46
57	2.275	0.138	0.561	0.750	0.476	0.571	0.681	高耐	6
58	2.757	-0.163	0.215	1.000	0.132	0.151	0.748	高耐	1
59	2.635	-0.221	0.252	0.936	0.066	0.196	0.697	高耐	3
60	2.659	-0.278	0.163	0.949	0.000	0.088	0.682	高耐	5
61	2.307	0.091	0.395	0.766	0.423	0.369	0.659	高耐	8
62	2.214	0.011	0.506	0.718	0.331	0.504	0.626	高耐	12
63	2.273	0.003	0.573	0.749	0.322	0.586	0.656	高耐	10
64	2.392	-0.041	0.533	0.810	0.271	0.537	0.685	高耐	4
65	2.101	0.095	0.629	0.660	0.426	0.654	0.619	高耐	13
66	1.386	0.417	0.793	0.289	0.795	0.853	0.444	中耐	30
67	1.080	0.343	0.368	0.130	0.711	0.337	0.254	敏感	60
68	1.153	0.389	0.252	0.168	0.764	0.196	0.273	敏感	57
权重 Weight				0.707	0.171	0.123			

2.4.2 权重确定 根据各综合指标贡献率大小，按公式（2）计算不同综合指标的权重值（ W_j ），3 个综合指标的权重分别为 0.707、0.171 和 0.123（表 6）。

2.4.3 综合评价 应用公式（3）计算不同绿豆种质资源耐盐综合评价值（ D 值），并依据 D 值对其耐盐能力进行强弱排序。其中，58 号（C1009）的 D 值最大，表明其耐盐能力最强；8 号材料（HN267）的 D 值最小，表明其耐盐能力最弱（表 6）。依据 D 值大小，对 68 份绿豆种质耐盐能力大小进行排序。其中耐盐性较强的前 5 名供试材料分别为 C1009、C1467、C1052、LD163 和 C1084，均为地方种；耐盐性较弱的后 5 名材料分别为 HN267、蒙科绿 4 号、桂绿 2 号、172-032

和冀绿抗 50-8，均为育成品种。

2.5 不同绿豆种质资源的聚类分析

采用 Ward 系统聚类法对 D 值进行聚类分析，结果（图 1）显示，68 份绿豆种质资源被划分为 3 个类群。第Ⅰ类包括 25 份材料， D 值介于 0.520~0.748，其耐盐性较强，占供试绿豆材料的 36.76%。其中包括 2 份育成品种（潍绿 60032 和鹦哥 2 号）、23 份地方种。第Ⅱ类包括 20 份材料， D 值介于 0.366~0.491，其耐盐性中等，占供试绿豆材料的 29.41%。其中包括育成品种 15 份、地方种 5 份。第Ⅲ类包括 23 份材料， D 值介于 0.120~0.352，其耐盐性较弱，占供试绿豆材料的 33.82%。其中包括地方种 3 份（C1518、绿资 10、绿豆 1 号）、育成品种 20 份。



图 1 68 份绿豆种质资源的聚类分析
Fig.1 The dendrogram of clusters for
68 mung bean germplasm resources

2.6 不同绿豆种质资源回归模型的建立及鉴定指标的筛选

为分析各项指标与绿豆种质资源耐盐性的关系，筛选可靠的耐盐鉴定指标，探讨可用于绿豆萌发期耐盐性评价的数学模型，把不同绿豆品种各单项指标的耐盐系数（STC）作为自变量，耐盐性综合评价价值（*D* 值）作为因变量，进行逐步回归分析，建立最优回归方程： $D=-0.220+0.300FWBC+0.253VI+0.191GP+0.189GR+0.134GI+0.120RL+0.044FWG$ ，方程决定系数 $R^2=0.999$ ， $P<0.01$ 。由方程可知，10 个单项指标中有 7 个指标对绿豆萌发期耐盐性有显著影响，分别是 FWBC、VI、GP、GR、GI、RL 和 FWG。

对回归方程的估计精度进行评价，结果（表 7）显示，不同绿豆种质资源估计精度均在 99.111% 以上，说明本方程中的指标对绿豆萌发期耐盐碱性影响明显，可用于绿豆耐盐性评价。在进行绿豆种质资源耐盐性鉴定评价时，试验条件相同的情况下，只需要测定绿豆发芽期的子叶下部鲜重、活力指数、发芽势、发芽率、发芽指数、胚根长和胚芽鲜重 7 个指标，利用该回归方程计算 *D* 值，从而能便捷、高效地评估不同绿豆种质资源的耐盐性强弱。

表 7 不同绿豆种质资源回归方程的估计精度分析
Table 7 Estimation accuracy analysis of regression equations
of different mung bean germplasm resources

材料 Material	原始值 Original value	回归值 Regression value	差值 <i>D</i> -value	估计精度 Estimation accuracy (%)
1	0.407	0.412	0.005	99.517
2	0.366	0.367	0.001	99.869
3	0.422	0.419	-0.003	99.706
4	0.438	0.448	0.010	98.955
5	0.326	0.330	0.004	99.608
6	0.230	0.238	0.009	99.111
7	0.312	0.315	0.003	99.719
8	0.120	0.122	0.002	99.778
9	0.232	0.230	-0.002	99.820
10	0.343	0.340	-0.003	99.663
11	0.386	0.384	-0.002	99.819
12	0.402	0.398	-0.004	99.579
13	0.345	0.344	-0.002	99.847
14	0.323	0.323	0.000	99.983
15	0.269	0.270	0.002	99.846
16	0.271	0.269	-0.002	99.778

续表 7 Table 7 (continued)

材料 Material	原始值 Original value	回归值 Regression value	差值 D-value	估计精度 Estimation accuracy (%)
17	0.376	0.378	0.001	99.875
18	0.388	0.386	-0.001	99.868
19	0.369	0.371	0.002	99.754
20	0.230	0.235	0.005	99.485
21	0.520	0.520	0.000	99.965
22	0.237	0.235	-0.002	99.776
23	0.423	0.423	0.000	99.986
24	0.306	0.310	0.004	99.630
25	0.550	0.543	-0.007	99.317
26	0.277	0.278	0.000	99.963
27	0.393	0.387	-0.005	99.483
28	0.452	0.447	-0.005	99.539
29	0.444	0.445	0.002	99.848
30	0.491	0.489	-0.001	99.882
31	0.142	0.144	0.001	99.856
32	0.315	0.316	0.001	99.916
33	0.244	0.243	-0.001	99.857
34	0.461	0.459	-0.001	99.869
35	0.329	0.332	0.003	99.741
36	0.217	0.220	0.003	99.681
37	0.292	0.299	0.007	99.304
38	0.542	0.537	-0.004	99.572
39	0.424	0.422	-0.002	99.764
40	0.612	0.617	0.005	99.472
41	0.561	0.562	0.002	99.840
42	0.609	0.615	0.006	99.362
43	0.680	0.685	0.005	99.481
44	0.572	0.570	-0.001	99.880
45	0.646	0.647	0.001	99.893
46	0.535	0.535	-0.001	99.944
47	0.590	0.591	0.001	99.870
48	0.559	0.562	0.002	99.778
49	0.657	0.664	0.007	99.284
50	0.559	0.557	-0.002	99.793
51	0.617	0.619	0.002	99.818
52	0.480	0.472	-0.008	99.194
53	0.710	0.717	0.006	99.351
54	0.409	0.408	-0.001	99.932
55	0.406	0.406	0.000	99.992
56	0.352	0.347	-0.005	99.539
57	0.681	0.687	0.005	99.456
58	0.748	0.750	0.002	99.806
59	0.697	0.691	-0.006	99.356
60	0.682	0.676	-0.006	99.425
61	0.659	0.659	0.000	99.976

续表 7 Table 7 (continued)

材料 Material	原始值 Original value	回归值 Regression value	差值 D-value	估计精度 Estimation accuracy (%)
62	0.626	0.624	-0.002	99.776
63	0.656	0.656	0.000	99.977
64	0.685	0.687	0.002	99.782
65	0.619	0.619	-0.001	99.933
66	0.444	0.440	-0.004	99.596
67	0.254	0.254	0.000	99.978
68	0.273	0.272	-0.001	99.903

3 讨论

种子萌发期是对盐比较敏感的时期，发芽阶段的耐盐性直接决定盐胁迫条件下的出苗情况^[19-20]，对作物耐盐性评价具有重要参考价值，同时萌发期鉴定具有耗时短、容量大、操控性强和重复性好等特点^[4-7,21]，因此，本研究选择在萌发期对绿豆进行耐盐性鉴定评价。

植物耐盐性是受多个基因控制的数量性状，耐盐能力是多种代谢的综合表现，单一的指标并不能够准确地评价作物的耐盐性^[22-23]。用不同的鉴定指标评价同一个作物品种可能会得到不同的结果，运用综合评价的方法，既可以减少指标间的交叉重叠，又可以避免了单一指标的局限性，较为科学、系统地反映种质资源的耐盐性差异^[24]。胡亮亮等^[9]对 346 份国内外绿豆种质苗期进行胁迫处理，采用主成分、隶属函数、耐盐性综合评价及聚类分析对各样本的耐盐性进行了综合评价和归类，筛选出苗期高耐盐绿豆种质资源 26 份。张静等^[25]利用主成分分析、隶属函数分析及聚类分析等方法对 485 份燕麦种质进行了耐盐碱综合评价及筛选，划分出 5 个耐盐等级，筛选出芽长、根鲜重、芽鲜重等 5 个指标作为发芽期燕麦耐盐碱的评价指标；宝力格等^[26]对 110 份中国高粱地方品种分别进行了芽期和苗期 NaCl 胁迫试验，采用隶属函数值和主成分分析 2 种方法结合聚类分析对参试高粱芽期和苗期的耐盐能力进行综合评定。

目前，绿豆的耐盐性评价主要集中在育成品种芽期的耐盐性鉴定^[4,6,8]，且选用的绿豆材料数量相对较少，存在生态区覆盖片面、遗传基础狭窄等弊端。本研究中 68 份供试材料来自国内 16 个省市，不仅有育成品种，还包含部分地方种，

生态覆盖面广, 遗传多样性丰富, 能够更好地为绿豆耐盐研究提供参考。

本研究选取了对照及盐胁迫处理下不同绿豆品种资源萌发期的 10 个单项指标, 计算得到各单项指标的耐盐系数, 几乎涵盖了萌发期耐盐筛选的所有指标, 采用主成分、隶属函数法、聚类分析和逐步回归等分析对绿豆萌发期耐盐性进行了综合评价, 避免了单一指标鉴定的局限性和片面性。主成分分析结果表明, 活力指数、胚芽鲜重和发芽率可以作为评价绿豆萌发期耐盐性的指标。通过计算得到各品种绿豆的隶属函数值、耐盐综合评价值 (D 值), 最后依据 D 值进行聚类分析, 将 68 份绿豆种质资源划分为高耐盐、耐盐中间型、盐敏感 3 种类型, 25 份种质资源的耐盐性较强, 20 份绿豆种质资源耐盐性中等, 23 份绿豆种质资源的耐盐性较弱。

为了进一步筛选可靠的萌发期耐盐性评价指标, 本研究使用逐步回归分析建立了可靠的绿豆萌发期耐盐性评价数学模型, 筛选出子叶下部鲜重活力指数、发芽势、发芽率、发芽指数、胚根长、胚芽鲜重 7 个明显影响绿豆萌发期耐盐性的指标, 通过测定这 7 项指标, 在相同胁迫条件下, 应用该综合评价模型可以便捷、高效预测参试绿豆品种的耐盐碱性强弱。本研究结果与前人^[4,6,8]筛选出的耐盐碱指标具有相似性。于崧等^[4]认为, 与绿豆萌发期耐盐性关系密切的指标是活力指数和发芽率。袁典等^[6]鉴定出活力指数、胚根鲜重、根冠比、胚根干重可作为绿豆萌发期耐盐性综合鉴定指标。徐宁等^[8]发现, 发芽指数、下胚轴干重、胚根长可作为绿豆萌发期耐碱性鉴定的适宜指标。

4 结论

通过隶属函数值法综合评价和聚类分析, 68 份绿豆种质资源可被划分为 3 类, C1009 等 25 份材料为高耐盐类型, 蒙科绿 3 号等 20 份材料为耐盐中间类型, C1518 等 23 份材料为盐敏感类型; 建立了绿豆萌发期耐盐性评价模型, 筛选出 7 个关键评价指标, 可以快速鉴定绿豆的耐盐性, 提高了鉴定效率。

参考文献

- [1] 时会影, 范保杰, 刘长友, 等. 绿豆耐盐性研究进展. 植物遗传资源学报, 2022, 23(6): 1594-1603.
- [2] Richter J A, Erban A, Kopka J, et al. Metabolic contribution to salt stress in two maize hybrids with contrasting resistance. Plant Science, 2015, 233: 107-115.
- [3] 高凤菊. 食用豆优良品种及高产栽培技术. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016.
- [4] 于崧, 郭潇潇, 梁海芸, 等. 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(9): 1629-1639.
- [5] 袁典, 方兴宇, 贾逸清, 等. Na_2CO_3 胁迫对绿豆种子萌发的影响. 安徽农业科学, 2021, 49(20): 32-35.
- [6] 袁典, 刘宏权, 韩会玲, 等. 不同品种绿豆萌发期耐盐性分析. 分子植物育种, 2023, 21(22): 7500-7508.
- [7] 殷丽丽, 陈晓亮, 陈璐璐, 等. NaCl 、 Na_2SO_4 和 Na_2CO_3 对绿豆种子萌发的影响. 作物杂志, 2019(3): 192-196.
- [8] 徐宁, 陈冰娜, 王明海, 等. 绿豆品种资源萌发期耐碱性鉴定. 作物学报, 2017, 43(1): 112-121.
- [9] 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. 作物学报, 2022, 48(2): 367-379.
- [10] Ali M, Afzal S, Parveen A, et al. Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na^+ uptake in maize (*Zea mays* L.) cultivars exposed to salinity stress. Plant Physiology Biochemistry, 2021, 158: 208-218.
- [11] 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. 植物遗传资源学报, 2020, 21(5): 1089-1101.
- [12] 焦广音, 任建华, 逯贵生, 等. 绿豆品种资源耐盐性鉴定与研究. 作物品种资源, 1997(2): 38-40.
- [13] 张秀玲. 盐胁迫对绿豆种子萌发的影响. 北方园艺, 2008(4): 52-53.
- [14] 王丽艳, 杨帆, 李睿瑞, 等. 不同种类盐胁迫对绿豆种子萌发及幼苗生长的影响. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(5): 20-26.
- [15] 陈彭, 王威, 王国明, 等. 沧州东部滨海平原土壤盐渍化特征分析. 华北地质, 2022, 45(3): 36-43.
- [16] 梁潇, 侯向阳, 王艳荣, 等. 羊草种质资源耐盐碱性综合评价. 中国草地学报, 2019, 41(3): 1-9.
- [17] 陈二影, 王润丰, 秦岭, 等. 谷子芽期耐盐碱综合鉴定及评价. 作物学报, 2020, 46(10): 1591-1604.
- [18] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析 & 数据挖掘 (第 2 版). 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] Khan A A, Rao S A, McNeilly T. Assessment of salinity tolerance based upon seedling root growth response functions in maize (*Zea mays* L.). Euphytica, 2003, 131: 81-89.
- [20] Verma O P S, Yadava R B R. Salt tolerance of some oats (*Avena sativa* L.) varieties at germination and seedling stage. Journal of agronomy and crop science, 1986, 156: 123-127.
- [21] Huang R. Research progress on plant tolerance to soil salinity and alkalinity in sorghum. Journal of integrative agriculture, 2018, 17: 739-746.
- [22] 马晓军, 金峰学, 杨姗, 等. 作物耐盐碱数量性状基因座 (QTL) 定位. 分子植物育种, 2015, 13(1): 221-227.
- [23] Trachsel S, Messmer R, Stamp P, et al. QTLs for early vigor of tropical maize. Molecular Breeding, 2010, 25: 91-103.
- [24] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述. 统计与决策, 2004 (11): 119-121.
- [25] 张静, 高文博, 晏林, 等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选. 作物学报, 2023, 49(6): 1551-1561.
- [26] 宝力格, 陆平, 史梦莎, 等. 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(5): 734-744.

Identification and Evaluation of Salt Tolerance of Mung Bean Germplasm Resources during Germination

Shi Huiying, Fan Baojie, Liu Changyou, Wang Yan,
Wang Shen, Zhang Zhixiao, Su Qiuzhu, Tian Jing

(Institute of Cereal and Oil Crops, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences/
Hebei Key Laboratory of Crop Genetics and Breeding, Shijiazhuang, 050035, Hebei, China)

Abstract Salt tolerance during germination is an important factor restricting the application of mung bean germplasm in saline-alkali soil. The 68 salt tolerance mung bean germplasm resources was evaluated and screened with NaCl solution. The results showed that there were extremely significant differences in ten indexes between the treatment groups and the control group ($P < 0.001$), such as germination potential, germination rate and germ length. The salt tolerance coefficients of the ten indexes were correlated to different degrees (R^2 ranged from -0.120 to 0.947). Principal component analysis converted ten individual indexes into three comprehensive indexes, and the tested materials were divided into three categories according to the strength of salt tolerance through comprehensive evaluation of salt tolerance and cluster analysis, of which 25 materials were high salt tolerance types, 20 materials were moderately salt tolerance types, and 23 materials were salt sensitive types. The salt tolerance evaluation model of mung bean at germination stage was established by step-to-step regression, and seven indexes including fresh weight, vigor index, germination potential, germination rate, radicle length and fresh weight of germ were selected, which can be used for rapid evaluation and prediction of salt tolerance of different mung bean germplasm resources.

Key words Mung bean; Germination stage; Salt tolerance; Comprehensive evaluation