

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

于崧, 郭潇潇, 梁海芸, 付鸾鸿, 史京京, 张翼飞*, 阎磊

黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江大庆163319

摘要: 为明确不同基因型绿豆(*Vigna radiata*)萌发期耐盐碱性特性, 筛选耐盐碱性绿豆鉴定指标, 建立可靠的绿豆耐盐碱性数学评价模型, 从而为绿豆抗逆栽培和耐盐碱新品种选育、推广及大规模鉴定评价提供科学依据, 本研究以30个绿豆品种为试验材料, 采用人工气候箱内培养皿培养, 以混合盐碱(NaHCO_3 与 Na_2CO_3 的摩尔比为9:1)模拟松嫩平原盐碱环境, 在萌发期选用 $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合盐碱溶液胁迫处理30个绿豆品种, 以蒸馏水处理为对照, 测定了不同基因型绿豆在对照与胁迫处理下种子发芽率(*GR*)、胚芽长(*GL*)、胚根长(*RL*)、胚芽鲜重(*FWG*)、胚根鲜重(*FWR*)、胚芽干重(*DWG*)、胚根干重(*DWR*)、根冠比(*RSR*)、相对电导率(*RC*)、发芽势(*GP*)、发芽指数(*GI*)和活力指数(*VI*) 12个生长指标, 以各单项指标的耐盐碱系数作为衡量耐盐碱性的依据, 利用多元分析方法对不同绿豆品种耐盐碱能力进行了综合评价。通过主成分分析将12个单项指标转化为5个相互独立的综合指标, 涵盖了全部数据91.74%的信息量; 利用隶属函数法和聚类分析将30个绿豆品种划分为3类; 采用逐步回归建立绿豆幼苗耐盐碱性评价数学模型, $D = -0.161 + 0.604VI + 0.379GR + 0.167RSR + 0.156RL + 0.113GL$ ($R^2 = 0.999$), 并筛选出*VI*、*GR*、*RSR*、*RL*、*GL*五个鉴定指标, 可进行不同基因型绿豆萌发期耐盐碱性强弱的快速评价与预测。

关键词: 绿豆; 萌发期; 耐盐碱指数; 多元分析; 鉴定指标

土壤盐碱化与次生盐碱化是造成全球土地退化和障碍农业高效利用的主要原因之一, 联合国教科文组织(UNESCO)和世界粮农组织(FAO)统计数字显示, 世界范围盐碱化土地面积已达9.5亿 hm^2 , 约占陆地总面积的30%, 主要分布在干旱半干旱气候区, 且每年以100~150万 hm^2 的速度增长(Zhang等2006; Elnaggar和Noller 2010)。作为我国东北地区重要的商品粮基地, 松嫩平原区内现有盐碱化土地面积已达373万 hm^2 , 是世界三大苏打盐碱土壤集中分布区域之一, 由于气候变化、灌溉方式不当、过度使用化肥、滥采滥伐和过度放牧等原因, 次生盐碱化土地面积仍以每年1.4%的速度日趋扩大(张巍和冯玉杰2009; 王彩娟等2011)。此外, 由于苏打盐碱土中 NaHCO_3 含量高, 存在着大量的交换性 Na^+ 和较高浓度的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- , 且pH值(>8)和钠吸附比(SAR)亦较高, 既有盐胁迫又有碱胁迫, 严重影响作物的产量、品质和效益(Wang等2015)。国内外学者普遍认为, 在盐碱土壤上种植耐盐碱作物品种是盐碱耕地高效开发利用及减轻土壤盐碱化危害的有效途径之一(Jacobsen等2012; Rozema等2013; Richter等2015)。绿豆(*Vigna radiata*)是豆科(Leguminosae)蝶形花亚科(Papilionaceae)菜豆族(Phaseoleae)豇豆属(*Vigna*)的一年生栽培种, 其营养丰富, 属高蛋白、低脂肪、中淀粉、药食同源的食用豆类作物, 是理想的营养保健食品和较好的出口创汇作物, 也是松嫩平

原干旱半干旱地区的主要农作物之一(王兰芬等2015; 张翼飞等2016)。因此, 筛选和鉴定不同绿豆品种的耐盐碱能力, 对于有效利用盐碱耕地, 实现高产稳产具有重要的意义。前人在盐碱环境对绿豆种子萌发及植株生长影响方面开展了大量的研究工作, 发现在盐碱胁迫下, 绿豆种子发芽率, 植株各部位的鲜重、干重、蛋白质和碳水化合物含量, 以及叶面积、株高、根长、根冠比、叶绿素含量等均显著降低, 且较高水平盐碱胁迫对不同绿豆品种生长的抑制程度存在明显差异(Ashraf和Rasul 1988; 孙振雷等2001)。Zayed和Zeid (1997)的研究表明, 在绿豆萌发期, 3 d胁迫处理后, 种子 α -淀粉酶和蛋白酶活力以及脯氨酸、糖类与可溶性蛋白含量均有所下降; 而胁迫10 d后, 种子体内有机溶质和水解酶活力反而有所增加。殷丽华等(2015)研究认为, 绿豆种子的发芽率、发芽势、发芽指数及活力指数在盐碱胁迫下均显著下降。另有研究指出, 种子萌发阶段是作物能否在盐碱环境下完成生育周期最为关键的时期(Khan等2003; 陈新等2014), 萌发期耐盐碱能力强弱决定着立苗

收稿 2017-04-16 修订 2017-09-01

资助 国家公益性行业(农业)专项(201303007)、国家科技支撑计划项目(2014BAD07B05)、黑龙江省农垦总局科技攻关项目(HNK125A-01-02)、大庆市科技计划项目(zd-2016-098)和高校学成引进人才科研启动计划项目(XYB2014-02)。

* 通讯作者(E-mail: byndzyf@163.com)。

和后期的生长发育。常用的作物萌发期耐盐碱性评价方法有基于发芽率的相对盐害率分析法(王萌萌等2012)、分级赋值法(罗志娜等2012)、聚类分析(孙璐等2012)、模糊数学隶属函数(陈托兄等2011)等,而目前有关绿豆品种(系)耐盐碱性评价筛选的报道中,通常仅依据发芽率的相对盐害率来划分萌发期的耐盐碱性级别(焦广音等1997)或评价未能考虑不同鉴定指标的权重(王乐政等2015),难以全面客观反映不同基因型绿豆的耐盐碱能力。为此,本研究结合松嫩平原盐碱土自然特点,以 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 模拟盐碱胁迫,采用多种多元分析方法,在萌发期对30个绿豆品种的萌发性状进行综合鉴定分析,以期筛选出不同基因型绿豆萌发期耐盐碱性的主要鉴定指标和耐盐碱性较强的绿豆品种,同时建立耐盐碱数学评价模型,为绿豆耐盐碱种质资源的快速、准确评价及品种选育提供参考依据,充分发挥绿豆在干旱半干旱地区利用和改良盐碱地方面的积极作用。

材料与方法

1 供试材料与试验设计

供试的30个不同基因型绿豆[*Vigna radiata* (L.) Wilczek.]品种(表1)来自黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区、河北省、山西省绿豆主产区。

试验于黑龙江八一农垦大学现代农业栽培技

术与作物种质改良重点实验室进行。利用人工气候培养箱进行绿豆萌发期的耐盐碱性鉴定,采用培养皿纸上发芽法,每个品种挑选籽粒饱满、大小一致的种子,分别用30% H_2O_2 于种子表面消毒10 min,然后自来水冲洗3次,去离子水漂洗3次。将种子表面水分吸干,置于铺有双层滤纸的已灭菌培养皿中,每个培养皿30粒。为了确定绿豆品种萌发期耐盐碱性筛选的适宜盐碱处理浓度,分别采用0(对照)、25、50、75和100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合盐碱(NaHCO_3 与 Na_2CO_3 的摩尔比为9:1)溶液进行预备试验。通过测定发芽率、芽长和根长,分析得到50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合盐碱溶液胁迫下,绿豆品种间各生长指标的差异最为明显,因而被选定为不同基因型绿豆品种萌发期耐盐碱性鉴定的适宜浓度;以蒸馏水作为对照。不同品种各处理6次重复。将每培养皿中加入10 mL蒸馏水或盐碱溶液,放入种子后置于人工气候箱中。培养条件为:光照强度150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光照周期12 h/12 h(昼/夜);温度28°C/25°C(昼/夜);相对湿度50%~60%。

2 测定项目与方法

于绿豆种子培养的第1天开始每天统计发芽数,每隔1 d用称重补水法补充蒸发的水分,一直持续到第10天,并在第10天测定胚芽和胚根的长度、鲜重、干重,每培养皿测定3株,取平均值。发芽以种子胚根达种子长,胚芽达种子长的1/2为标准。最后在各培养皿中随机选取5个绿豆种子

表1 供试绿豆品种及其来源

Table 1 Tested mung bean varieties and their origins

编号	品种	来源	编号	品种	来源
1	‘绿丰2号’	黑龙江省	16	‘洮绿5号’	吉林省
2	‘绿丰3号’	黑龙江省	17	‘辽绿8号’	辽宁省
3	‘绿丰5号’	黑龙江省	18	‘辽绿10号’	辽宁省
4	‘嫩绿1号’	黑龙江省	19	‘大鹦哥绿豆’	河北省
5	‘公绿1号’	吉林省	20	‘中绿1号’	河北省
6	‘公绿2号’	吉林省	21	‘中绿4号’	河北省
7	‘吉绿3号’	吉林省	22	‘中绿6号’	河北省
8	‘吉绿5号’	吉林省	23	‘中绿9号’	河北省
9	‘吉绿6号’	吉林省	24	‘冀绿2号’	河北省
10	‘吉绿7号’	吉林省	25	‘冀绿7号’	河北省
11	‘吉绿9号’	吉林省	26	‘冀绿10号’	河北省
12	‘白绿1号’	吉林省	27	‘明绿豆’	山西省
13	‘白绿9号’	吉林省	28	‘榆林绿豆’	山西省
14	‘白绿522’	吉林省	29	‘赤绿3号’	内蒙古自治区
15	‘洮绿3号’	吉林省	30	‘兴绿1号’	内蒙古自治区

测定相对电导率(李合生2000)。

根冠比(root shoot ratio, RSR)=胚根干重/胚芽干重; 发芽率(germination rate, GR)=第10天发芽种子数量/供试种子数量×100%; 发芽势(germination potential, GP)=第4天发芽种子数量/供试种子数量×100%; 发芽指数(germination index, GI)= $\sum(G_t/D_t)$, 其中 G_t 为第 t 天的发芽种子数量, D_t 为相应的发芽天数; 活力指数(vigor index, VI)=发芽指数×胚根鲜重。

3 数据处理与统计分析

采用Excel 2013统计软件进行数据统计与整理, 基于已测得的种子萌发期相关形态学指标, 计算各指标的平均值与耐盐碱系数(saline-alkaline tolerance coefficient, SATC)。SATC(%)=盐碱胁迫处理测定值/对照测定值×100%。利用SPSS 21.0软件进行主成分分析、相关性分析、聚类分析及逐步回归等多元分析。参照王军等(2007)和李琳等(2016)的方法计算以下指标。

不同绿豆品种各综合指标的隶属函数值:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \times 100\% \quad j=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, X_j 表示第 j 个综合指标; $U(X_j)$ 表示第 j 个综合指标的隶属函数值; X_{\min} 与 X_{\max} 分别表示第 j 个综合指标的最小值与最大值。

不同基因型绿豆综合指标的权重:

$$W_j = \sum_{j=1}^n |P_j| \quad j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度, 即权重; P_j 为各基因型绿豆第 j 个综合指标的贡献率。

不同基因型绿豆的综合耐盐碱能力的大小:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j] \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, D 为各绿豆品种在盐碱胁迫条件下的耐盐碱性综合评价值。

实验结果

1 各单项指标的耐盐碱系数及相关关系分析

由表2可知, 在50 mmol·L⁻¹盐碱胁迫处理下, 不同基因型绿豆种子萌发均受到不同程度的抑制, 除了种子相对电导率和根冠比以外, 各绿豆品种其他指标整体上都小于对照(SATC<1), 而不同基因型绿豆的降低幅度不同。因此, 利用单一性状

耐盐碱系数评价绿豆品种萌发期的耐盐碱性可能会得到不同或者相反的结果。从绿豆耐盐碱系数间的相关系数可以看出, 各指标彼此之间存在着显著或极显著相关性(表3), 从而使得它们所提供的信息发生重叠, 影响耐盐碱性的鉴定和筛选结果。为弥补单项指标耐盐碱性评价的不足, 需在此基础上进一步利用其他多元统计方法进行分析。

2 主成分分析

利用SPSS 21.0软件对12个单项指标的耐盐碱系数进行主成分分析, 前5个综合评价指标的贡献率分别为35.99%、25.38%、13.85%、9.18%和7.35%, 累计贡献率达91.74%, 其余可忽略不计(表4)。这样, 把原来的12个具有相互关联的单项指标转换为5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5(CI_5)主成分, 能代表12个单项指标的绝大部分信息。通过分析不同综合指标的各特征向量可以看出, CI_1 中VI、FWG、DWR的系数较大; CI_2 中GR、GP、DWG的系数较大; CI_3 中RSR、RC、FWR的系数较大; CI_4 中RL、RSR、RC的系数较大; CI_5 中GL、RC、RL的系数较大。综合分析上述结果, VI、GR、RSR、RL、GL可作为绿豆耐盐碱性的综合鉴定指标。

3 不同基因型绿豆的综合评价

3.1 隶属函数分析

根据公式(1)计算不同基因型绿豆各综合指标的隶属函数值 $U(X_j)$ 。从表5可以看出, 对于某一综合指标而言, 如 CI_1 在盐碱胁迫处理下, ‘绿丰5号’的 $U(X_j)$ 最小, 表明此品种在 CI_1 表现为对盐碱胁迫高度敏感, 而‘中绿9号’的 $U(X_j)$ 最大, 表明此品种在该综合指标上表现为较强的耐盐碱性。

3.2 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 , 5个综合指标的权重分别为0.392、0.277、0.151、0.100和0.080(表5)。

3.3 品种综合评价及分类

应用公式(3)计算不同基因型绿豆耐盐碱综合评价值 D 值, 并依据 D 值对其耐盐碱能力进行强弱排序。其中, ‘中绿9号’的 D 值最大, 表明其耐盐碱能力最强; ‘冀绿7号’的 D 值最小, 表明其耐盐碱能力最弱(表5)。

采用组间连接距离聚类法对 D 值进行聚类分

表2 不同基因型绿豆各单项指标的耐盐碱系数

Table 2 Saline-alkaline tolerance coefficient of each single indicator in different mung bean genotypes

品种	GR	GL	RL	FWG	FWR	DWG	DWR	RSR	RC	GP	GI	VI
‘绿丰2号’	0.700	0.222	0.422	0.344	0.668	0.389	0.505	1.297	1.622	0.357	0.601	0.401
‘绿丰3号’	0.222	0.239	0.530	0.330	0.301	0.460	0.246	0.535	2.356	0.083	0.153	0.046
‘绿丰5号’	0.059	0.438	0.566	0.536	0.405	0.606	0.480	0.792	1.868	0.000	0.039	0.016
‘嫩绿1号’	0.316	0.529	0.226	0.595	0.912	0.721	0.900	1.248	2.509	0.167	0.280	0.255
‘公绿1号’	0.059	0.135	0.618	0.545	1.343	0.590	0.851	1.442	2.33	0.000	0.034	0.045
‘公绿2号’	0.250	0.754	0.499	0.551	0.582	0.499	0.504	1.010	2.063	0.154	0.301	0.175
‘吉绿3号’	0.450	0.742	0.345	0.469	0.599	0.436	0.504	1.156	2.301	0.273	0.406	0.243
‘吉绿5号’	0.789	0.446	0.230	1.011	0.857	0.876	0.682	0.779	3.404	0.500	0.665	0.570
‘吉绿6号’	0.737	0.295	0.471	0.975	0.596	0.733	0.747	1.019	2.732	0.667	0.847	0.505
‘吉绿7号’	0.368	0.691	0.524	0.707	0.950	0.626	0.844	1.348	2.982	0.250	0.571	0.543
‘吉绿9号’	0.333	0.118	0.196	0.168	0.337	0.267	0.366	1.367	2.551	0.182	0.299	0.101
‘白绿1号’	0.632	0.415	0.396	0.222	0.271	0.257	0.293	1.140	1.684	0.455	0.474	0.128
‘白绿9号’	0.250	0.577	0.219	0.822	0.898	0.867	0.657	0.758	2.024	0.222	0.366	0.328
‘白绿522’	0.158	0.623	0.836	0.185	0.254	0.242	0.235	0.972	3.237	0.091	0.091	0.023
‘洮绿3号’	0.200	0.361	0.322	0.560	0.702	0.764	0.545	0.714	2.577	0.167	0.121	0.085
‘洮绿5号’	0.350	0.082	0.509	0.296	0.291	0.324	0.384	1.184	1.685	0.231	0.241	0.070
‘辽绿8号’	0.500	0.269	0.544	0.388	0.304	0.384	0.360	0.938	2.322	0.444	0.494	0.150
‘辽绿10号’	0.263	0.466	0.622	1.003	0.877	0.801	0.740	0.924	2.570	0.167	0.173	0.152
‘大鹦哥绿豆’	0.556	0.416	0.314	0.597	0.415	0.549	0.597	1.087	3.526	0.714	0.601	0.249
‘中绿1号’	0.737	0.491	0.236	0.391	0.372	0.366	0.438	1.199	2.098	0.600	0.569	0.212
‘中绿4号’	0.421	0.333	0.331	0.444	0.385	0.423	0.365	0.864	2.359	0.308	0.469	0.181
‘中绿6号’	0.200	0.090	0.343	0.422	0.517	0.461	0.544	1.179	2.110	0.091	0.109	0.057
‘中绿9号’	0.778	0.410	0.772	0.999	0.939	0.801	1.093	1.364	3.687	0.462	0.710	0.666
‘冀绿2号’	0.250	0.786	0.331	0.786	1.111	0.935	0.930	0.995	1.803	0.167	0.119	0.132
‘冀绿7号’	0.105	0.364	0.245	0.407	0.367	0.480	0.369	0.769	2.506	0.100	0.127	0.047
‘冀绿10号’	0.158	0.699	0.715	0.942	0.654	0.828	0.573	0.692	2.535	0.125	0.252	0.165
‘明绿豆’	0.500	0.227	0.702	0.812	0.471	0.600	0.432	0.720	3.526	0.273	0.341	0.161
‘榆林绿豆’	0.158	0.312	0.304	0.743	0.563	0.913	0.544	0.596	3.340	0.100	0.245	0.138
‘赤绿3号’	0.222	0.666	0.582	0.767	0.788	0.579	0.731	1.264	2.296	0.182	0.282	0.222
‘兴绿1号’	0.278	0.332	0.232	0.477	0.951	0.495	0.692	1.399	1.823	0.250	0.339	0.323

GR: 发芽率; GL: 胚芽长; RL: 胚根长; FWG: 胚芽鲜重; FWR: 胚根鲜重; DWG: 胚芽干重; DWR: 胚根干重; RSR: 根冠比; RC: 相对电导率; GP: 发芽势; GI: 发芽指数; VI: 活力指数。下同。

表3 盐碱胁迫条件下绿豆萌发期各单项指标的相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of every single indicator during mung bean germination period under saline-alkaline stress

指标	GR	GL	RL	FWG	FWR	DWG	DWR	RSR	RC	GP	GI	VI
GR	1.00											
GL	-0.09	1.00										
RL	-0.11	0.10	1.00									
FWG	0.16	0.33	0.19	1.00								
FWR	-0.10	0.27	0.00	0.59**	1.00							
DWG	-0.08	0.32	-0.02	0.88**	0.65**	1.00						
DWR	0.11	0.28	0.04	0.71**	0.88**	0.70**	1.00					
RSR _t	0.25	-0.07	-0.04	-0.22	0.33	-0.35	0.39*	1.00				
RC	0.22	0.02	0.27	0.45*	0.03	0.33	0.21	-0.20	1.00			
GP	0.90**	-0.03	-0.19	0.17	-0.16	-0.06	0.08	0.19	0.25	1.00		
GI	0.91**	0.03	-0.12	0.28	-0.02	0.02	0.21	0.24	0.28	0.89**	1.00	
VI	0.69**	0.20	-0.04	0.56**	0.42*	0.37*	0.59**	0.30	0.36	0.59**	0.83**	1.00

*和**分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著水平。

表4 各综合指标的系数及贡献率
Table 4 Coefficients and contribution of comprehensive indicators

主成分	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%	特征向量											
				GR	GL	RL	FWG	FWR	DWG	DWR	RSR	RC	GP	GI	VI
CI_1	4.319	35.988	35.988	0.615	0.287	-0.001	0.780	0.576	0.615	0.769	0.211	0.454	0.586	0.725	0.910
CI_2	3.045	25.378	61.366	-0.733	0.360	0.219	0.474	0.609	0.666	0.464	-0.264	0.034	-0.728	-0.654	-0.218
CI_3	1.661	13.845	75.211	-0.057	-0.034	-0.300	-0.288	0.467	-0.229	0.369	0.832	-0.601	-0.114	-0.065	0.075
CI_4	1.102	9.181	84.392	-0.005	-0.079	0.867	-0.041	0.012	-0.288	0.082	0.378	0.311	-0.106	-0.030	0.031
CI_5	0.881	7.346	91.737	0.017	0.861	0.152	-0.044	-0.114	-0.128	-0.107	-0.018	-0.252	0.061	0.075	0.035

表5 不同基因型绿豆的综合指标值、权重、 $U(X_j)$ 、 D 值及综合评价
Table 5 The comprehensive indicator values, indicator weight, $U(X_j)$, D value and comprehensive evaluation of different mung bean genotypes

品种	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	CI_5	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	D 值	综合评价
‘绿丰2号’	0.219	-1.403	1.261	0.132	-0.149	0.593	0.878	0.840	0.353	0.200	0.654	较强
‘绿丰3号’	-1.424	0.002	-1.265	-0.103	-0.395	0.046	0.224	0.000	0.522	0.223	0.150	较弱
‘绿丰5号’	-1.199	0.962	-0.354	0.016	0.380	0.000	0.000	0.283	0.578	0.506	0.141	较弱
‘嫩绿1号’	0.501	0.721	1.196	-0.651	-0.180	0.368	0.352	0.787	0.047	0.635	0.416	中等
‘公绿1号’	-0.321	1.503	1.914	1.609	-1.906	0.045	0.000	1.000	0.659	0.075	0.241	较弱
‘公绿2号’	-0.349	0.356	0.150	0.054	1.900	0.245	0.262	0.523	0.473	0.955	0.371	中等
‘吉绿3号’	0.003	-0.361	0.479	-0.277	1.742	0.350	0.535	0.685	0.233	0.937	0.487	中等
‘吉绿5号’	1.969	-0.379	-1.094	-1.307	-0.617	0.852	1.000	0.269	0.054	0.517	0.698	较强
‘吉绿6号’	1.803	-1.083	-0.621	-0.137	-0.499	0.753	0.928	0.533	0.430	0.303	0.700	较强
‘吉绿7号’	1.314	0.291	0.739	0.989	0.914	0.810	0.424	0.896	0.512	0.865	0.691	较强
‘吉绿9号’	-1.079	-1.080	0.893	-0.069	-1.246	0.131	0.376	0.918	0.000	0.052	0.298	中等
‘白绿1号’	-0.681	-1.703	0.414	-0.206	1.06	0.173	0.784	0.667	0.312	0.473	0.455	中等
‘白绿9号’	0.546	0.896	0.029	-1.901	0.376	0.481	0.262	0.246	0.036	0.703	0.358	中等
‘白绿522’	-1.457	-0.014	-1.105	2.372	1.439	0.011	0.136	0.482	1.000	0.768	0.276	中等
‘洮绿3号’	-0.436	0.821	-0.527	-1.034	-0.717	0.106	0.193	0.197	0.197	0.396	0.176	较弱
‘洮绿5号’	-1.193	-0.823	0.591	0.534	-0.755	0.083	0.399	0.716	0.489	0.000	0.300	中等
‘辽绿8号’	-0.428	-1.215	-0.564	0.372	0.038	0.207	0.604	0.444	0.544	0.266	0.391	中等
‘辽绿10号’	0.381	1.352	-0.381	0.466	-0.208	0.209	0.280	0.429	0.665	0.546	0.334	中等
‘大鹦哥绿豆’	0.806	-1.254	-0.795	-0.193	-0.245	0.359	0.680	0.609	0.184	0.475	0.477	中等
‘中绿1号’	0.139	-1.770	0.424	-0.832	0.947	0.301	0.928	0.732	0.063	0.581	0.538	中等
‘中绿4号’	-0.436	-0.831	-0.428	-0.624	-0.010	0.253	0.496	0.362	0.212	0.357	0.341	中等
‘中绿6号’	-1.011	0.096	0.793	-0.028	-1.512	0.063	0.193	0.710	0.229	0.012	0.209	较弱
‘中绿9号’	2.553	-0.137	-0.080	2.223	-0.645	1.000	0.984	0.914	0.899	0.467	0.930	较强
‘冀绿2号’	0.493	1.767	0.971	-1.234	1.108	0.179	0.262	0.507	0.211	1.000	0.320	中等
‘冀绿7号’	-1.194	0.218	-0.492	-0.993	-0.304	0.047	0.064	0.257	0.076	0.401	0.115	较弱
‘冀绿10号’	0.120	1.399	-1.269	0.389	1.222	0.229	0.136	0.173	0.810	0.877	0.305	中等
‘明绿豆’	0.087	-0.062	-1.969	1.161	-1.046	0.223	0.604	0.204	0.791	0.206	0.381	中等
‘榆林绿豆’	-0.086	0.995	-1.535	-1.079	-1.369	0.188	0.136	0.067	0.170	0.327	0.164	较弱
‘赤绿3号’	0.248	0.774	0.670	0.839	1.119	0.317	0.224	0.804	0.602	0.830	0.434	中等
‘兴绿1号’	0.116	-0.035	1.955	-0.490	-0.444	0.472	0.300	0.953	0.057	0.356	0.446	中等
权重						0.392	0.277	0.151	0.100	0.080		

析,建立了聚类树状图,将30份不同基因型绿豆划分为3个类群。第I类包括‘中绿9号’、‘吉绿6号’、‘吉绿5号’、‘吉绿7号’和‘绿丰2号’5个品种,其耐

盐碱性较强,占供试绿豆材料的16.67%;第II类包括‘中绿1号’、‘吉绿3号’、‘大鹦哥绿豆’、‘白绿1号’、‘兴绿1号’、‘赤绿3号’、‘嫩绿1号’、‘辽绿8

号’、‘明绿豆’、‘公绿2号’、‘白绿9号’、‘中绿4号’、‘辽绿10号’、‘冀绿2号’、‘冀绿10号’、‘洮绿5号’、‘吉绿9号’和‘白绿522’ 18个品种,其耐盐碱性中等,占供试绿豆材料的60.00%;第III类包括‘公绿1号’、‘中绿6号’、‘洮绿3号’、‘榆林绿豆’、‘绿丰3号’、‘绿丰5号’和‘冀绿7号’ 7个品种,其耐盐碱性较弱,占供试绿豆材料的23.33% (图1)。各类群材料*D*值的平均值分别为0.73、0.39和0.17,不同耐盐碱性绿豆类群代表性品种的发芽比较见图2。

3.4 回归模型建立及鉴定指标筛选

为分析各单项指标与绿豆品种耐盐碱性间的关系,筛选可靠的耐盐碱性鉴定指标,探讨可用于绿豆萌发期耐盐碱性评价的数学模型,把不同

基因型各单项指标的耐盐碱系数(*SATC*)作为自变量,耐盐碱性综合评价值(*D*值)作为因变量进行逐步回归分析,建立最优回归方程: $D = -0.161 + 0.604VI + 0.379GR + 0.167RSR + 0.156RL + 0.113GL$, 方程决定系数 $R^2 = 0.999$, $P = 0.0001$ 。由方程可知, 12个单项指标中有5个指标对绿豆萌发期耐盐碱性有显著影响, 分别是 *VI*、*GR*、*RSR*、*RL*和*GL*。对回归方程的估计精度进行评价, 结果显示, 不同基因型绿豆估计精度均在99.870%以上(表6), 说明本方程中的指标对绿豆萌发期耐盐碱性影响明显, 可用于绿豆耐盐碱性评价, 即在相同条件下测定其他品种绿豆的上述5个指标, 并计算其耐盐碱系数, 进而利用该方程预测相应品种的耐盐碱性。

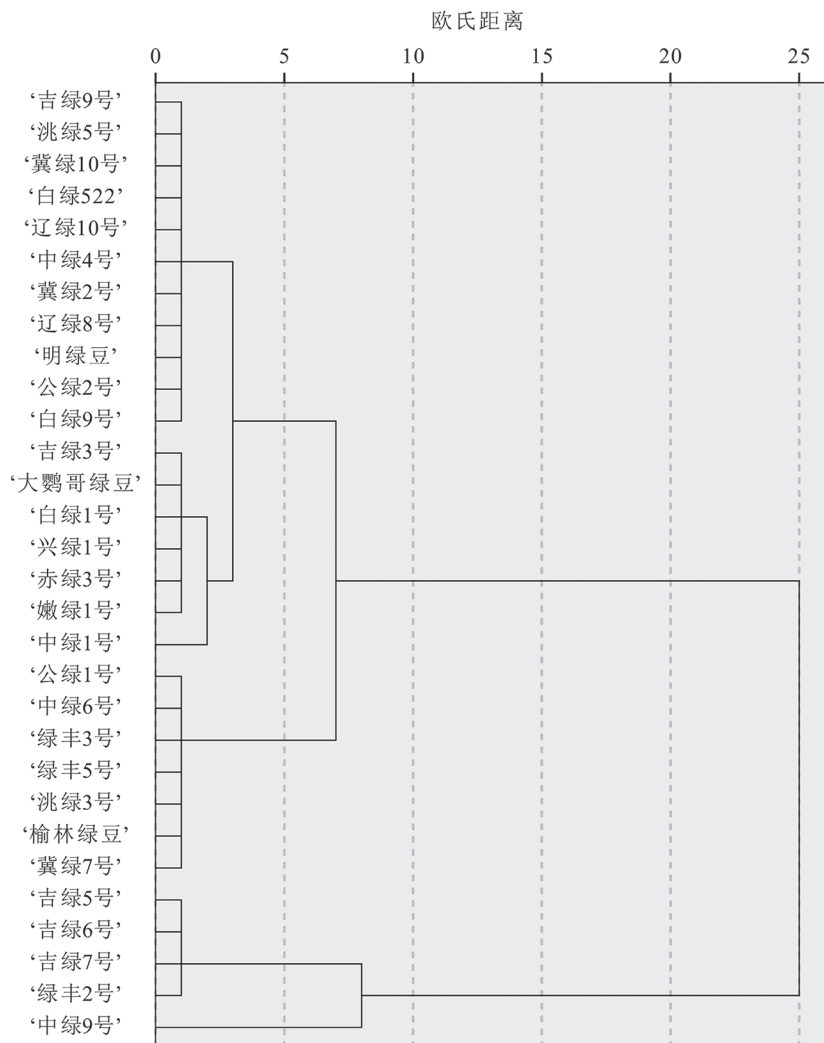


图1 30个绿豆品种的聚类树状图

Fig.1 The dendrogram of clusters for 30 mung bean varieties

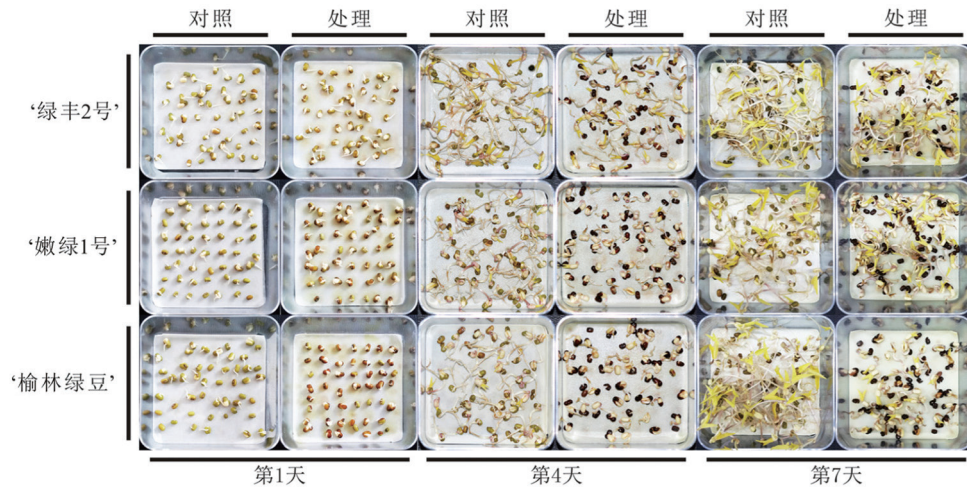


图2 不同耐盐碱性绿豆类群代表性品种的发芽比较

Fig.2 Comparison of germination among representative mung bean varieties in different types of saline-alkaline tolerance
盐碱处理浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表6 回归方程的估计精度分析

Table 6 Analysis of evaluation accuracy of equation

品种	原始值	回归值	差值	估计精度/%
'绿丰2号'	0.654	0.654	0.001	99.903
'绿丰3号'	0.150	0.150	0.000	99.904
'绿丰5号'	0.141	0.141	0.000	99.873
'嫩绿1号'	0.416	0.416	0.000	99.926
'公绿1号'	0.241	0.241	0.000	99.875
'公绿2号'	0.371	0.371	0.000	99.983
'吉绿3号'	0.487	0.487	0.000	99.980
'吉绿5号'	0.699	0.698	0.001	99.923
'吉绿6号'	0.701	0.700	0.001	99.913
'吉绿7号'	0.691	0.691	0.001	99.912
'吉绿9号'	0.299	0.298	0.000	99.871
'白绿1号'	0.455	0.455	0.000	99.979
'白绿9号'	0.358	0.358	0.000	99.948
'白绿522'	0.276	0.276	0.000	99.910
'洮绿3号'	0.176	0.176	0.000	99.970
'洮绿5号'	0.300	0.300	0.000	99.920
'辽绿8号'	0.391	0.391	0.000	99.970
'辽绿10号'	0.334	0.334	0.000	99.995
'大鹦哥绿豆'	0.478	0.477	0.000	99.946
'中绿1号'	0.539	0.538	0.000	99.963
'中绿4号'	0.341	0.341	0.000	99.962
'中绿6号'	0.209	0.209	0.000	99.878
'中绿9号'	0.931	0.930	0.001	99.907
'冀绿2号'	0.320	0.320	0.000	99.962
'冀绿7号'	0.115	0.115	0.000	99.945
'冀绿10号'	0.305	0.305	0.000	99.935
'明绿豆'	0.381	0.381	0.000	99.989
'榆林绿豆'	0.164	0.164	0.000	99.997
'赤绿3号'	0.434	0.434	0.000	99.965
'兴绿1号'	0.447	0.446	0.001	99.870

讨 论

盐碱胁迫对植物的伤害主要有2种方式: 一是土壤含盐量过高引起的渗透胁迫, 使得植物种子受表土层过高盐分胁迫不能萌发或出苗, 后期根系难于从土壤中吸收水分, 形成水分胁迫, 加速叶片衰老死亡(Munns 2002); 二是吸收过多的离子, 对植物形成离子毒害(Munns和Tester 2008)。我国东北地区苏打盐碱土壤主要包括一些易溶解盐类, 如 NaCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 等, 并以 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为主, 由于 HCO_3^- 或 CO_3^{2-} 含量增加会导致土壤pH值升高, Na_2CO_3 和 NaHCO_3 等碱性盐胁迫所造成的生态破坏作用明显大于 NaCl 、 Na_2SO_4 等中性盐胁迫(Li等2010)。现有的绿豆耐盐生理研究大多针对 NaCl 胁迫, 对碳酸盐胁迫的研究较少, 而针对绿豆盐碱耐性综合评价的研究则更少。Song等(2005和2008)报道认为盐碱环境下的种子萌发是植物生长的关键及敏感阶段, 且不同的环境条件对种子萌发的影响也可能不同(Liu等2010)。为此, 本研究结合松嫩平原盐碱土自然特点, 以 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 摩尔比为9:1的混合溶液模拟萌发期盐碱胁迫, 能更真实反映田间实际盐碱胁迫环境情况。尽管绿豆具有耐瘠薄、抗旱等优良的生物学特征, 目前对于绿豆耐盐碱性研究多集中在盐碱胁迫对其生长发育和生理特性影响等方面(殷丽华等2016), 但是系统的对绿豆萌发期耐盐碱能力的综合评价研究还鲜有报道。王乐政等(2015)

研究将相对发芽率、相对发芽指数、相对质量、相对活力指数等作为评价不同绿豆品种对NaCl胁迫耐受能力的评价指标;那桂秋等(2009)研究认为发芽率可以作为大豆种子萌发期耐盐碱性鉴定的指标;祁栋灵等(2006)研究发现盐碱胁迫对水稻发芽势的影响大于发芽率,将两者认定为芽期耐盐碱鉴定的指标;也有学者认为相对胚芽长、相对胚根长、相对根条数、相对芽干重、相对根干重均可作为水稻芽期耐盐碱鉴定指标(赵海新等2011)。同时,根冠比、相对电导率亦能较好地反映盐碱胁迫对作物生物量合理分配以及受胁迫程度的影响(李丰先等2013;李洁等2016)。鉴于此,基于国内外众多学者已筛选出的多种与作物萌发期耐盐碱性相关的生长性状指标,本试验选择其中较为便捷、直观、简易的12个指标进行测定。本试验中,对不同基因型绿豆进行混合盐碱胁迫后,发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数以及胚芽和胚根的长度、鲜重、干重整体上表现出不同程度的下降,这说明盐碱胁迫明显抑制了绿豆萌发的生理过程。然而,作物耐盐碱性是受多因子影响的复杂性状,极易受自身遗传背景差异及外界环境的影响,单独使用某些指标很难准确、客观、可靠地反映作物的耐盐碱本质。同时,众多评价指标间存在一定的相关性,导致它们所提供的盐碱响应信息发生交叉重叠,且其重要程度不尽相同(李琳等2016;张婷婷等2016)。为此,我们运用多元分析方法对绿豆萌发期耐盐碱能力进行了综合评价。

本研究基于对照及盐碱胁迫处理下不同基因型绿豆萌发期的12个单项指标,计算得到各单项指标的耐盐碱系数,利用主成分分析,将12个指标的耐盐碱系数转换为5个独立的综合指标,并得到不同品种绿豆的耐盐碱综合评价价值(D 值),参照对 D 值进行聚类分析的结果,较为客观地将各参试绿豆品种划分为耐盐碱性较强、耐盐碱性中等和耐盐碱性较弱3种类型,其中‘中绿9号’、‘吉绿6号’、‘吉绿5号’、‘吉绿7号’和‘绿丰2号’等耐盐碱性较强。最后,进一步使用逐步回归法建立了可靠的绿豆萌发期耐盐碱性评价模型, $D=-0.161+0.604VI+0.379GR+0.167RSR+0.156RL+0.113GL$,筛选出 VI 、 GR 、 RSR 、 RL 和 GL 五个明显影响绿豆萌发期

耐盐碱能力的单项指标。通过测定这5项指标,在相同胁迫条件下,应用该综合评价模型可以有效预测参试绿豆品种的耐盐碱性强弱,为绿豆抗逆栽培、种质资源鉴定及良种选育提供科学依据。

本研究选用的30份绿豆品种来源于国内绿豆主产区,尽管品种分布有一定的地域局限性,但是这些绿豆品种均为当前生产中应用的主要品种,具有一定的代表性,且从研究方法上也可以为今后更大规模的耐盐碱绿豆种质资源的筛选提供借鉴。本研究针对不同基因型绿豆萌发期耐盐碱能力进行的鉴定评价,选择的筛选指标是易于操作和掌握的生长指标,对于其他生育时期的耐盐碱性及其生理机制还有待深入研究。

参考文献

- Ashraf M, Rasul E (1988). Salt tolerance of mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) at two growth stages. *Plant Soil*, 110: 63–67
- Chen TX, Wang TM, Lu XS (2011). Evaluation on the salt tolerance of fall nondormancy standard varieties of alfalfa at the germination period. *Pratacul Sci*, 28 (1): 121–126 (in Chinese with English abstract) [陈托兄, 王铁梅, 卢欣石(2011). 紫花苜蓿非秋眠型标准品种种子萌发期耐盐性评价. *草业科学*, 28 (1): 121–126]
- Chen X, Zhang ZW, Wu B (2014). Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of naked oat (*Avena nuda* L.) at germination stage. *Sci Agric Sin*, 47 (10): 2038–2046 (in Chinese with English abstract) [陈新, 张宗文, 吴斌(2014). 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选. *中国农业科学*, 47 (10): 2038–2046]
- Elnaggar AA, Noller JS (2010). Application of remote-sensing data and decision-tree analysis to mapping salt-affected soils over large areas. *Remote Sens*, 2: 151–165
- Jacobsen SE, Jensen CR, Liu F (2012). Improving crop production in the arid Mediterranean climate. *Field Crop Res*, 128: 34–47
- Jiao GY, Ren JH, Lu GS, Jiang CX (1997). Salt resistance identification and research of mung bean variety resources. *China Seed Ind*, (2): 38–40 (in Chinese) [焦广音, 任建华, 逯贵生, 降彩霞(1997). 绿豆品种资源耐盐性鉴定与研究. *作物品种资源*, (2): 38–40]
- Khan AA, Rao SA, McNeilly T (2003). Assessment of salinity tolerance based upon seedling root growth response functions in maize (*Zea mays* L.). *Euphytica*, 131: 81–89
- Li FX, Zhou YF, Wang YT, Sun L, Bai W, Yan T, Xu WJ, Huang RD (2013). Screening and identification of sorghum cultivars for alkali tolerance during germination. *Sci Agric Sin*, 46 (9): 1762–1771 (in Chinese with English abstract) [李丰先, 周宇飞, 王艺陶, 孙璐, 白薇, 闫彤, 许文娟, 黄瑞冬(2013). 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定. *中国农业科学*, 46 (9): 1762–1771]
- Li HS (2000). *Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment*. Beijing: Higher Education Press,

- 261–263 (in Chinese) [李合生(2000). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 261–263]
- Li J, Xu JG, Lin C, Guan YJ, Hu J (2016). Effect of priming on germination and physiological characteristics of different types of corn seeds under low-temperature stress. *Plant Physiol J*, 52 (2): 157–166 (in Chinese with English abstract) [李洁, 徐军桂, 林程, 关亚静, 胡晋(2016). 引发对低温胁迫下不同类型玉米种子萌发及幼苗生理特性的影响. *植物生理学报*, 52 (2): 157–166]
- Li L, Yu S, Jiang YC, Zhang TT, Zou CL, Jin SS, Guo JH, Liang HY, Duan JJ, Yu LH (2016). Identification and screening of different kidney bean cultivars for saline-alkaline tolerance during seeding stage. *Plant Physiol J*, 52 (1): 62–72 (in Chinese with English abstract) [李琳, 于崧, 蒋永超, 张婷婷, 邹春雷, 金珊珊, 郭建华, 梁海芸, 段君君, 于立河(2016). 芸豆苗期耐盐碱性鉴定及品种筛选研究. *植物生理学报*, 52 (1): 62–72]
- Li R, Shi F, Fukuda K (2010). Interactive effects of salt and alkali stresses on seed germination, germination recovery, and seedling growth of a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). *S Afr J Bot*, 76: 380–387
- Liu J, Guo WQ, Shi DC (2010). Seed germination, seedling survival, and physiological response of sunflowers under saline and alkaline conditions. *Photosynthetica*, 48: 278–286
- Luo ZN, Zhao GQ, Liu H (2012). Influence of cadmium on seed germination of *Trifolium repens* and *Dichondra repens*. *Grassland Turf*, 32 (1): 34–38 (in Chinese with English abstract) [罗志娜, 赵桂琴, 刘欢(2012). 24个燕麦品种种子萌发耐盐性综合评价. *草地与草坪*, 32 (1): 34–38]
- Munns R (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ*, 25: 239–250
- Munns R, Tester M (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol*, 59: 651–681
- Na GQ, Kou H, Cao MJ (2009). Salt and alkaline tolerance evaluation of different soybean varieties at germination stage. *Soybean Sci*, 28 (2): 352–356 (in Chinese with English abstract) [那桂秋, 寇贺, 曹敏建(2009). 不同大豆品种种子萌发期耐盐碱性鉴定. *大豆科学*, 28 (2): 352–356]
- Qi DL, Zhang SY, Cao GL, Ruan RC, Sun MM, Zhang YR, Zhou QY, Han LZ (2006). Studies on screening methods for alkaline tolerance at germination period and early seedling stage in rice. *J Plant Genet Resour*, 7 (1): 74–80 (in Chinese with English abstract) [祁栋灵, 张三元, 曹桂兰, 阮仁超, 孙明茂, 张艳蕊, 周庆阳, 韩龙植(2006). 水稻发芽期和幼苗前期耐碱性的鉴定方法研究. *植物遗传资源学报*, 7 (1): 74–80]
- Richter JA, Erban A, Kopka J, Zörb C (2015). Metabolic contribution to salt stress in two maize hybrids with contrasting resistance. *Plant Sci*, 233: 107–115
- Rozema J, Muscolo A, Flowers T (2013). Sustainable cultivation and exploitation of halophyte crops in a salinising world. *Environ Exp Bot*, 92: 1–3
- Song J, Fan H, Zhao YY, Jia YH, Du XH, Wang BS (2008). Effect of salinity on germination, seedling emergence, seedling growth and ion accumulation of a euhalophyte *Suaeda salsa* in an intertidal zone and on saline inland. *Aquat Bot*, 88: 331–337
- Song J, Feng G, Tian CY, Zhang FS (2005). Strategies for adaptation of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage. *Ann Bot-London*, 96: 399–405
- Sun L, Zhou YF, Wang C, Xiao MJ, Tao Y, Xu WJ, Huang RD (2012). Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination. *Sci Agric Sin*, 45 (9): 1714–1722 (in Chinese with English abstract) [孙璐, 周宇飞, 汪澈, 肖木辑, 陶冶, 许文娟, 黄瑞冬(2012). 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定. *中国农业科学*, 45 (9): 1714–1722]
- Sun ZL, Liu P, Ye BJ, Liu HX, Zhang WG, Zhu WG (2001). Study on germination of mung bean seeds and salt resistance in seedling stage. *J Inner Mongol Univ Natl (Nat Sci Ed)*, 16 (1): 31–38 (in Chinese with English abstract) [孙振雷, 刘鹏, 叶柏军, 刘海学, 张卫国, 朱卫刚(2001). 绿豆种子萌发及苗期抗盐性的研究. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 16 (1): 31–38]
- Wang CJ, Li ZQ, Wang XL, Jiang CD, Tang YD, Gu WB, Shi L (2011). Effects of salt stress on photosystem II activity in sweet sorghum seedlings grown in pots outdoors. *Acta Agron Sin*, 37 (11): 2085–2093 (in Chinese with English abstract) [王彩娟, 李志强, 王晓琳, 姜闯道, 唐宇丹, 谷卫彬, 石雷(2011). 室外盆栽条件下盐胁迫对甜高粱光系统II活性的影响. *作物学报*, 37 (11): 2085–2093]
- Wang J, Zhou MX, Xu RG, Lv C, Huang ZL (2007). Studies on selecting indices and evaluation methods for barley's (*Hordeum vulgare* L.) waterlogging tolerance. *Sci Agric Sin*, 40 (10): 2145–2152 (in Chinese with English abstract) [王军, 周美学, 许如根, 吕超, 黄祖六(2007). 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究. *中国农业科学*, 40 (10): 2145–2152]
- Wang LF, Wu J, Jing RL, Cheng XZ, Wang SM (2015). Identification of mung bean germplasm resources resistant to drought at adult stage. *Acta Agron Sin*, 41 (8): 1287–1294 (in Chinese with English abstract) [王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民(2015). 绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定. *作物学报*, 41 (8): 1287–1294]
- Wang LX, Fang C, Wang K (2015). Physiological responses of *Leymus chinensis* to long-term salt, alkali and mixed salt-alkali stresses. *J Plant Nutr*, 38: 526–540
- 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 with English abstract) [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]
- Wang MM, Jiang QY, Hu Z, Zhang H, Fan SJ, Feng L, Zhang HL (2012). Evaluation for salt tolerance of wheat cultivars. *J Plant Genet Resour*, 13 (2): 189–194 (in Chinese with English abstract) [王萌萌, 姜奇彦, 胡正, 张辉, 樊守金, 冯沂, 张海玲(2012). 小麦品种资源耐盐性鉴定. *植物遗传资源学报*, 13 (2): 189–194]
- Yin LH, Xu P, Ke XW, Wang ZH, Zhang PP, Song DW, Diao JJ, Zheng DF, Zuo YH (2015). Effects of complex salt-alkali stresses on seed germination and seedling growth of mung bean. *J Heilongjiang Bayi Agric Univ*, 27 (5): 40–43 (in Chinese with English abstract) [殷丽华, 徐鹏, 柯希望, 王志辉, 张盼盼, 宋大巍, 刁静静, 郑殿峰, 左豫虎(2015). 混合盐碱胁迫对绿豆种子

- 萌发与幼苗生长发育的影响. 黑龙江八一农垦大学学报, 27 (5): 40-43]
- Zayed MA, Zeid IM (1997). Effect of water and salt stresses on growth, chlorophyll, mineral ions and organic solutes contents, and enzymes activity in mung bean seedlings. *Biol Plantarum*, 40: 351-356
- Zhang TT, Yu S, Yu LH, Li L, Jin SS, Guo JH, Zhang J (2016). Saline-alkaline tolerance identification and varieties (lines) screening of spring wheat in Songnen Plain. *J Triticeae Crop*, 36 (8): 1008-1019 (in Chinese with English abstract) [张婷婷, 于崧, 于立河, 李琳, 金珊珊, 郭建华, 张静(2016). 松嫩平原春小麦耐盐碱性鉴定及品种(系)筛选. 麦类作物学报, 36 (8): 1008-1019]
- Zhang W, Feng YJ (2009). Physico-chemical properties and ecological recovery of saline-alkaline soil in Songnen Plain. *Acta Pedol Sin*, 46 (1): 169-172 (in Chinese) [张巍, 冯玉杰(2009). 松嫩平原盐碱土理化性质与生态恢复. 土壤学报, 46 (1): 169-172]
- Zhang XX, Takano T, Liu SK (2006). Identification of a mitochondrial ATP synthase small subunit gene (*RmtATP6*) expressed in response to salts and osmotic stresses in rice (*Oryza sativa* L.). *J Exp Bot*, 57: 193-200
- Zhang YF, Yu S, Zhang WC, Wu Q, Pang C, Wang YF, Yang KJ (2016). Effects of seeding date and planting density on growth, dry matter accumulation and yield component of mung bean. *Heilongjiang Agric Sci*, (11): 26-33 (in Chinese with English abstract) [张翼飞, 于崧, 张文超, 吴琼, 庞晨, 王玉凤, 杨克军(2016). 播期和密度对绿豆生长、干物质积累及产量的影响. 黑龙江农业科学, (11): 26-33]
- Zhao HX, Xu ZJ, Huang XQ, Shan LL, Wang C, Li M, Zhang YJ (2011). Analysis and screening evaluation indexes for alkaline tolerance of rice at germination period in cold. *Seed*, 30 (10): 1-7 (in Chinese with English abstract) [赵海新, 徐正进, 黄晓群, 单莉莉, 王翠, 李敏, 张云江(2011). 寒地水稻芽期耐碱鉴定指标的分析与筛选. 种子, 30 (10): 1-7]

Analysis of saline-alkaline tolerance and screening of identification indicators at the germination stage among different mung bean genotypes

YU Song, GUO Xiao-Xiao, LIANG Hai-Yun, FU Luan-Hong, SHI Jing-Jing, ZHANG Yi-Fei*, CHUANG Lei

College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Daqing, Heilongjiang 163319, China

Abstract: The purpose of this paper was to investigate the characteristics of saline-alkaline tolerance during germination stage among different mung bean (*Vigna radiata*) genotypes, screen suitable identification indicators, and establish reliable mathematical model for saline-alkaline tolerance evaluation, which would provide scientific basis for cultivation practices of stress-resistance, breeding and spreading of new mung bean varieties with saline-alkaline tolerance, and identification and evaluation experiments of saline-alkaline tolerance ability for a large number of mung bean germplasm resources. Thirty varieties were selected as experimental materials which were cultured in petri dishes in artificial climate system. 50 mmol·L⁻¹ mixed saline-alkaline solution (NaHCO₃:Na₂CO₃ with the mole ratio of 9:1) was used to simulate the typical saline-alkaline stress of the Songnen Plain, and distilled water treatments were set as control in this study. Twelve growth indicators, including germination rate (*GR*), germ length (*GL*), radicle length (*RL*), fresh weight of germ (*FWG*), fresh weight of radicle (*FWR*), dry weight of germ (*DWG*), dry weight of radicle (*DWR*), root shoot ratio (*RSR*), relative conductivity (*RC*), germination potential (*GP*), germination index (*GI*) and vigor index (*VI*) of different mung bean genotypes under control and saline-alkaline stress treatments were determined. And then based on the saline-alkaline tolerance coefficient (*SATC*) of single indicator in every mung bean variety as basic data, principal components analysis, hierarchical cluster analysis and regression analysis were performed to comprehensively evaluate the saline-alkaline tolerance of different mung bean varieties. The results showed that by principal component analysis, twelve single indicators could be converted into five independent comprehensive components, which represent 91.74% information on the raw data of the traits related to saline-alkaline tolerance. In addition, the membership function method was employed to calculate comprehensive saline-alkaline tolerance value (*D*), and 30 mung bean varieties were divided into three types by carrying out cluster analysis based on *D* value. At last, a mathematical evaluation model for mung bean saline-alkaline tolerance during germination stage was established by stepwise regression analysis, $D = -0.161 + 0.604VI + 0.379GR + 0.167RSR + 0.156RL + 0.113GL$ ($R^2 = 0.999$). According to the model, five indicators closely related to the saline-alkaline tolerance, including *VI*, *GR*, *RSR*, *RL* and *GL*, by which we could rapidly identify and predict saline-alkaline tolerance of other mung bean varieties under the same stress condition during germination stage.

Key words: mung bean; germination stage; saline-alkaline tolerance coefficient; multivariate analysis; identification indicators

Received 2017-04-16 Accepted 2017-09-01

This work was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research of National Public Welfare Industry (Grant No. 201303007), the National Scientific and Technological Support Program (Grant No. 2014BAD07B05), the Scientific and Technological Project of Agricultural Reclamation General Bureau in Heilongjian Province (Grant No. HNK125A-01-02), the Scientific and Technological Project of Daqing City, Heilongjiang Province (Grant No. zd-2016-098), and the Scientific Research Project for People Returned after Further Learn and Talent Introduction of Heilongjiang Bayi Agricultural University (Grant No. XYB2014-02).

*Corresponding author (E-mail: byndzyf@163.com).