

不同基因型绿豆苗期耐盐碱性分析 及其鉴定指标的筛选

于 崧,梁海芸,郭潇潇,张翼飞,史京京,付鸾鸿

(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幼苗耐盐碱性特性,筛选耐盐碱性鉴定指标,建立可靠的绿豆耐盐碱性数学评价模型,以30个绿豆品种为试验材料,按 NaHCO_3 与草炭、蛭石复合基质重量比设置0(CK)、0.6%胁迫两个处理水平,对不同基因型绿豆幼苗的20个形态与生理生化指标进行测定,以各单项指标的耐盐碱性系数(SATC)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性进行了综合评价。通过主成分分析将20个单项指标转化为8个相互独立的综合指标,通过隶属函数法计算获得的各品种综合耐盐碱性 D 值,利用聚类分析将30个绿豆品种划分为4类,其中中绿9号、绿丰2号、吉绿9号和洮绿3号为高度耐盐碱性品种;采用逐步回归建立绿豆幼苗耐盐碱性评价数学模型,并筛选出净光合速率、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7个鉴定指标,可进行不同基因型绿豆耐盐碱性强弱的快速评价与预测。

关键词:绿豆;耐盐碱性指数;主成分分析;聚类分析;鉴定指标

中图分类号:S522 **文献标志码:**A

Analysis of saline-alkaline tolerance and determination of saline-alkaline tolerance evaluation indicators in seedling stage of different mung bean genotypes

YU Song, LIANG Hai-yun, GUO Xiao-xiao, ZHANG Yi-fei, SHI Jing-jing, FU Luan-hong

(College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University/ Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: In order to clarify the saline - alkaline tolerance characteristics screen suitable evaluation indicators, and establish reliable mathematical evaluation model for saline - alkaline tolerance of mung bean, 30 varieties were used as experimental materials in this study. the weight ratio of NaHCO_3 to growth medium which was composed of 50% grass charcoal and 50% vermiculite was set to 0(CK) and 0.6% saline - alkaline stress at two treatment levels. the 20 morphological and physiological and biochemical indicators of different genotypes of mung bean seedlings under control and saline - alkaline stress treatments were determined. based on the saline - alkaline tolerance coefficient (SATC) of each individual indicator, different genotypes mung bean were evaluated by principal components analysis, hierarchical cluster analysis and regression analysis. Though the principal component analysis, 20 individual indicators were converted into 8 independent comprehensive components. Based on the comprehensive saline - alkaline tolerance value (D) of each variety obtained by the subordinate function method, 30 mung bean varieties were classified into 4 types by cluster analysis. Among them, Zhonglv 9, Lv Feng 2, Jilv 9 and Taolv 3 were strongly saline - alkaline tolerant varieties. a mathematical evaluation model of saline - alkaline tolerance for mung bean was established by stepwise regression analysis. According to the model, 7 indicators closely related to the saline - alkaline tolerance, including net photosynthetic (P_n), relative electrical conductivity (REC), maximum photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m), soluble sugar content (SS), initial fluorescence

收稿日期:2017-04-15

修回日期:2017-10-22

基金项目:国家公益性行业(农业)专项(201303007);国家科技支撑计划项目(2014BAD07B00);黑龙江省指导性项目(2014BAD07B05-H03);“三横三纵”科研支撑体系青年创新人才项目;高校学成引进人才科研启动计划项目(XYB2014-02)。

作者简介:于崧(1984—),女,黑龙江大庆人,博士,讲师,主要从事作物栽培生理与农业生态学方面的研究。E-mail: byndys@163.com

通信作者:张翼飞(1985—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,主要从事作物栽培与生理生态方面的研究。E-mail: byndzyf@163.com

(*Fo*), aboveground dry matter weight (*DWG*), underground fresh weight (*FWUG*), can be used to quickly evaluate and predict the saline - alkaline tolerance of different genotypes of mung bean.

Keywords: mung bean; saline - alkaline tolerance coefficient; principal components analysis; cluster analysis; identification indicators

绿豆 (*Vigna radiate* (L) Wilczek.) 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, 在我国已有 2000 多年的栽培历史。绿豆营养丰富, 属低脂肪、中淀粉、高蛋白、药食同源的主要食用豆类作物, 同时又是较好的出口创汇作物^[1-2]。我国是世界上最大的绿豆出口国, 常年种植面积约为 600 万 hm^2 , 总产量约 100 万 t, 由于绿豆耐瘠薄、耐干旱、适应性较强, 其产区主要分布在黑龙江、内蒙古、吉林、河北、河南、山西等自然降雨量少、无灌溉条件地区^[3], 其中我国松嫩平原西部干旱半干旱区是绿豆的优势产区之一。然而, 松嫩平原也是世界三大苏打盐碱土壤集中分布区域之一, 区内现有盐碱化土地面积已达 373 万 hm^2 ^[4], 而且由于全球气候变化背景下的高温干旱, 以及人为灌溉方式不当、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^[5-6]。土壤盐碱化与次生盐碱化已成为制约干旱半干旱区绿豆产量稳步提升和农业资源高效利用的主要因子^[7-10], 积极改良与开发利用盐碱地资源, 对缓解土地压力、增加后备耕地储备和保障粮食安全具有重要意义。为了进行盐碱地开发利用, 越来越多的国家和地区选用生物治盐的方法^[11-13]。因此, 挖掘与培育耐盐碱绿豆资源, 明确其盐碱适应机制, 开展盐碱地生物治理, 既可以提高绿豆总产量, 又可以有效控制和利用盐碱土地, 改善生态环境条件, 增加生态效益, 从而促进盐碱地区农业和经济的可持续发展。而合理选择耐盐碱鉴定指标则是进行耐盐碱育种和耐盐碱机理研究的基础。

盐碱胁迫不仅会导致植物体内矿质营养含量及其分布失衡^[14], 还会影响植物的形态学、解剖学、超微结构和新陈代谢^[15], 最终造成植物生长受到抑制, 产量整体下降。国内外学者普遍认为不同基因型绿豆耐盐碱性差异显著, 在盐碱浓度胁迫条件下, 对绿豆品种和个体进行耐盐碱性鉴定筛选, 有可能获得高度耐性材料^[16-18]。作为耐盐碱资源筛选的关键时期, 苗期玉米^[19]、水稻^[20]、小麦^[21]、大豆^[22]、棉花^[23]等作物的耐盐性研究较多, 而系统全面评价绿豆幼苗期耐盐碱性的研究相对较少。任建华等^[24]以幼苗株高、干重和组织含水量作为指标

性状, 对 20 个绿豆品种幼苗期耐盐性进行了比较研究。而作物的耐盐碱能力是一个复杂的综合性状, 与形态、生理和生化等多个性状有关, 而且每个性状对耐盐碱性所起的作用并不相同。前人对绿豆耐盐碱性的鉴定研究多以单项指标或人为加权后的多指标衡量, 难以全面客观地反映其耐盐碱能力。同时, 现有绿豆品种苗期耐盐碱性鉴定大多采用绿豆先培育后胁迫的处理方式, 虽可较快进行大批量耐盐碱材料筛选, 但难以反映绿豆在大田条件下的实际胁迫环境及真实抗逆机制。

为此, 本研究结合松嫩平原盐碱土自然特点, 以 NaHCO_3 模拟盐碱胁迫, 苗期盐碱土栽培持续胁迫的方式, 采用多种多元分析方法, 以绿豆形态、生理生化等各指标的耐盐碱系数计算耐盐碱性综合评价, 并对不同基因型绿豆进行耐盐碱性综合评价, 确定耐盐碱鉴定指标, 同时建立耐盐碱数学评价模型, 为绿豆耐盐碱种质资源的挖掘, 耐盐碱品种的选育和快速、准确地评价耐盐碱性提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

供试材料为黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区、河北省、山西省绿豆主产区主栽的 30 份不同基因型绿豆品种 (见表 1)。试验在黑龙江八一农垦大学寒地作物种质改良与栽培重点实验室进行。分别挑选各品种中大小一致籽粒饱满的自然风干种子, 用 30% H_2O_2 给种子表面消毒 10 min, 再用蒸馏水漂洗 3 次。经 25℃ 的温水浸种 12 h, 然后将种子置于含有蛭石的育苗盘中, 在人工气候箱内催芽至露白。

将 1 : 1 (v/v) 蛭石、草炭复合基质于 120℃ 高温灭菌 24 h, 按照 NaHCO_3 (分析纯) 与复合基质质量比设置 0 (CK)、0.6% 两个水平, 加蒸馏水至基质含水量为 35%, 充分拌匀, 装入塑料培养钵 (110 mm × 100 mm) 中, 钵内培养基质高度 9 cm, 选择露白一致的种子植于钵内, 每盆 6 粒, 用复合基质覆盖 2 ~ 3 cm, 铺平适当压紧。每个品种各种植 20 盆。将种植绿豆的营养钵置于人工气候室进行培养, 培养条件为: 光照强度 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光照周期 (14/10) h (昼/夜), 温度 (23/20) °C (昼/夜), 相对湿度

50%~60%。播种后第7天开始,每3天称量培养钵,并向培养钵内复合基质中缓慢渗入蒸馏水,以

保证复合基质含水量在30%~35%。

表1 供试绿豆品种编号、代码及来源

Table 1 Numbers, codes and origins of mung bean varieties in test

编号 Number	品种 Varieties	代码 Code	来源 Origin	编号 Number	品种 Varieties	代码 Code	来源 Origin
1	绿丰2号 Lufeng 2	LF2	黑龙江省 Heilongjiang Province	16	洮绿5号 Taolu 5	TL5	吉林省 Jilin Province
2	绿丰3号 Lufeng 3	LF3	黑龙江省 Heilongjiang Province	17	辽绿8号 Liaolu 8	LL8	辽宁省 Liaoning Province
3	绿丰5号 Lufeng 5	LF5	黑龙江省 Heilongjiang Province	18	辽绿10号 Liaolu 10	LL10	辽宁省 Liaoning Province
4	嫩绿1号 Nenlu 1	NL1	黑龙江省 Heilongjiang Province	19	大鹦哥绿豆 Dayinggelu	DYGL	河北省 Hebei Province
5	公绿1号 Gonglu 1	GL1	吉林省 Jilin Province	20	中绿1号 Zhonglu 1	ZL1	河北省 Hebei Province
6	公绿2号 Gonglu 2	GL2	吉林省 Jilin Province	21	中绿4号 Zhonglu 4	ZL4	河北省 Hebei Province
7	吉绿3号 Jilu 3	JL3	吉林省 Jilin Province	22	中绿6号 Zhonglu 6	ZL6	河北省 Hebei Province
8	吉绿5号 Jilu 5	JL5	吉林省 Jilin Province	23	中绿9号 Zhonglu 9	ZL9	河北省 Hebei Province
9	吉绿6号 Jilu 6	JL6	吉林省 Jilin Province	24	冀绿2号 Jilu 2	JIL2	河北省 Hebei Province
10	吉绿7号 Jilu 7	JL7	吉林省 Jilin Province	25	冀绿7号 Jilu 7	JIL7	河北省 Hebei Province
11	吉绿9号 Jilu 9	JL9	吉林省 Jilin Province	26	冀绿10号 Jilu 10	JIL10	河北省 Hebei Province
12	白绿1号 Bailu 1	BL1	吉林省 Jilin Province	27	明绿豆 Minglu	MLD	山西省 Shanxi Province
13	白绿9号 Bailu 9	BL9	吉林省 Jilin Province	28	榆林绿豆 Yulinlu	YLLD	山西省 Shanxi Province
14	白绿522 Bailu 522	BL522	吉林省 Jilin Province	29	赤绿3号 Chilu 3	CL3	内蒙古自治区 Neimonggol Autonomous Region
15	洮绿3号 Taolu 3	TL3	吉林省 Jilin Province	30	兴绿1号 Xinglu 1	XL1	内蒙古自治区 Neimonggol Autonomous Region

1.2 测定项目与方法

播种后第10天,记录各品种不同处理下的出苗数,计算出苗率(ER)=出苗数/播种总数 $\times 100\%$ 。

播种后第28天,选择各品种不同处理下具代表性植株的第一片复叶,使用LI 6400XTR型便携式光合仪(美国LI-COR公司)测定净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s),测定时控制叶室 CO_2 浓度为 $400 \mu L \cdot L^{-1}$,光强约为 $800 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,温度为 $25 \pm 2^\circ C$ 。同步使用OS-30P叶绿素脉冲调制式荧光分析仪(美国Opti-Sciences公司)进行测定。叶片暗适应30 min后读取初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m);光适应30 min后测定光下稳态荧光(F_s)、光适应下的最大荧光(F'_m)、光适应下的最小荧光(F'_0),并计算最大光化学效率 $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$,实际光化学效率 $\Phi_{PSII} = (F'_m - F_s)/F'_m$ 。每次测定采用随机选取方式,每片叶测定3次,取平均值,所有参数数据均为

6次重复。

播种后30 d,选取长势均匀的幼苗30株,从培养钵中小心完整地取出植株,用清水将根部附着的基质洗去,用去离子水快速漂洗根部,吸水纸轻轻拭干植株表面水分。取10株用直尺测量株高(PLH)和根长(RL),并分别称量地上鲜重(FWG)、地下鲜重($FWUG$),然后将其装入已经编号的牛皮纸袋中,放于干燥箱中烘干至恒重,用电子天平分别称量地上干重(DWG)、地下干重($DWUG$),计算植株含水量(PWC)= $(FWG+FWUG-DWG-DWUG)/(FWG+FWUG)$;剩余20株取第一片复叶用于生理生化指标的测定,其中叶绿素含量(Chl)采用1:1(v/v)的乙醇、丙酮混合液浸提法^[25],可溶性糖含量(SS)采用蒽酮乙酸酯法^[26],丙二醛含量(MDA)采用硫代巴比妥酸比色法^[26],游离脯氨酸(Pro)采用茚三酮比色法^[25],叶片相对电导率(REC)使用FE30K型电导率仪(瑞士METTLER TOLEDO公司)测定^[26]。

1.3 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,计算各指标的平均值与耐盐碱系数,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。相关指标计算参照李琳等^[27]的方法。

耐盐碱系数 (saline - alkaline tolerance coefficient, SATC):

SATC (%) = 盐碱胁迫处理测定值/对照处理测定值 × 100% (1)

不同绿豆品种各综合指标的隶属函数值:

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

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:

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 individual indicator of different genotypes of mung bean

品种 Varieties	ER	Pn	Ci	Tr	Gs	F ₀	F _v /F _m	Φ _{PSII}	PLH	RL	FWG	FWUG	DWG	DWUG	PWC	Chl	MDA	Pro	SS	REC
LF2	0.87	0.563	1.279	0.384	0.768	1.048	0.663	0.687	0.817	0.752	0.57	0.57	0.953	0.769	0.91	0.918	1.627	1.275	1.21	1.292
LF3	0.766	0.343	1.054	0.346	0.636	1.469	0.605	0.65	0.756	0.729	0.604	0.62	0.976	0.747	0.966	0.925	1.593	1.31	1.057	1.34
LF5	0.911	0.345	1.302	0.363	0.636	1.327	0.782	0.853	0.869	0.709	0.599	0.589	0.981	0.884	0.949	0.915	1.702	1.056	1.107	1.51
NL1	0.675	0.449	1.378	0.512	0.981	1.22	0.988	0.783	0.657	0.622	0.455	0.463	0.826	0.97	0.953	0.914	1.358	1.774	1.081	1.222
GL1	0.923	0.572	1.198	0.299	0.881	1.322	0.675	0.751	0.857	0.736	0.52	0.564	0.93	0.852	0.978	0.807	1.357	1.167	1.077	1.037
GL2	0.726	0.558	1.165	0.593	0.664	1.387	0.88	0.773	0.736	0.618	0.562	0.598	0.935	0.701	0.879	0.988	1.325	1.312	1.024	1.163
JL3	0.762	0.469	1.39	0.244	0.726	1.026	0.425	0.65	0.754	0.753	0.588	0.611	0.822	0.816	0.825	0.634	1.255	1.188	1.148	1.238
JL5	0.912	0.338	1.434	0.207	0.501	1.239	0.663	0.913	0.867	0.784	0.73	0.802	0.901	0.965	0.96	0.927	1.067	1.02	1.123	1.519
JL6	0.995	0.428	1.153	0.541	0.773	1.145	0.618	0.664	0.953	0.829	0.665	0.714	0.806	0.735	0.902	0.87	1.563	1.197	1.078	1.099
JL7	0.841	0.458	1.106	0.291	0.854	1.373	0.999	0.781	0.825	0.668	0.582	0.605	0.945	0.866	0.864	0.932	1.317	1.147	1.074	1.203
JL9	0.838	0.577	1.378	0.384	0.936	1.115	0.964	0.737	0.861	0.667	0.54	0.554	0.88	0.762	0.891	0.967	1.204	1.186	1.131	1.341
BL1	0.802	0.589	1.108	0.225	0.406	1.164	0.516	0.741	0.77	0.699	0.561	0.632	0.952	0.886	0.87	0.743	1.212	1.138	1.102	1.051
BL9	0.978	0.564	1.336	0.406	0.64	1.365	0.514	0.752	0.958	0.892	0.677	0.677	0.947	0.828	0.93	0.777	1.07	1.631	1.117	1.101
BL522	0.729	0.59	1.352	0.53	0.62	1.144	0.904	0.532	0.736	0.605	0.446	0.473	0.957	0.63	0.996	0.905	1.403	1.405	1.083	1.234
TL3	0.807	0.538	1.424	0.803	0.754	1.295	0.456	0.655	0.783	0.661	0.582	0.636	0.985	0.72	0.886	0.755	1.486	1.572	1.102	1.497
TL5	0.851	0.359	1.096	0.339	0.78	1.382	0.427	0.641	0.834	0.65	0.416	0.415	0.949	0.697	0.938	0.996	1.168	1.053	1.1	1.29
LL8	0.854	0.444	1.438	0.295	0.778	1.058	0.98	0.687	0.856	0.587	0.637	0.661	0.938	0.769	0.885	0.7	1.26	1.387	1.076	1.241
LL10	0.896	0.571	1.313	0.503	0.967	1.391	0.683	0.688	0.852	0.764	0.544	0.563	0.822	0.88	0.839	0.903	1.323	1.461	1.095	1.069
DYGL	0.884	0.44	1.256	0.419	0.797	1.318	0.459	0.608	0.837	0.733	0.559	0.561	0.869	0.649	0.804	0.956	1.002	1.27	1.104	1.112
ZL1	0.555	0.311	1.111	0.243	0.725	1.334	0.531	0.625	0.57	0.516	0.3	0.332	0.995	1.013	0.892	0.773	1.032	1.173	1.186	1.09
ZL4	0.85	0.442	1.349	0.29	0.913	1.434	0.5	0.551	0.827	0.57	0.582	0.605	0.851	0.687	0.933	0.771	1.127	1.357	1.204	1.068
ZL6	0.716	0.327	1.196	0.507	0.655	1.491	0.823	0.812	0.73	0.638	0.588	0.622	0.976	0.759	0.913	0.914	1.117	1.2	1.095	1.381
ZL9	0.959	0.455	1.431	0.23	0.936	1.164	0.757	0.795	0.883	0.826	0.789	0.854	0.897	0.917	0.852	0.685	1.194	1.149	1.135	1.339
JIL2	0.673	0.452	1.029	0.16	0.711	1.196	0.506	0.703	0.709	0.657	0.823	0.901	0.823	0.771	0.939	0.518	1.097	1.03	1.094	1.4
JIL7	0.925	0.452	1.34	0.285	0.801	1.091	0.758	0.864	0.911	0.82	0.447	0.622	0.848	0.952	0.883	0.71	1.299	1.261	1.09	1.156
JIL10	0.874	0.537	1.254	0.285	0.802	1.422	0.636	0.753	0.878	0.801	0.562	0.552	0.923	0.621	0.924	0.933	1.283	1.105	1.031	1.084
MLD	0.585	0.342	1.474	0.517	0.618	1.164	0.616	0.529	0.581	0.563	0.348	0.366	0.993	0.633	0.822	0.986	1.402	1.498	1.09	1.277
YLLD	0.777	0.341	1.21	0.305	0.671	1.476	0.693	0.718	0.83	0.749	0.614	0.681	0.905	0.825	0.941	0.686	1.488	1.123	1.079	1.427
CL3	0.869	0.327	1.326	0.246	0.76	1.176	0.578	0.924	0.829	0.811	0.615	0.643	0.983	0.808	0.89	0.717	1.268	1.451	1.143	1.043
XL1	0.784	0.342	1.408	0.246	0.844	1.118	0.766	0.669	0.75	0.512	0.55	0.578	0.911	0.894	0.982	0.89	1.127	1.297	1.062	1.327

注: ER, 出苗率; Pn, 净光合速率; Ci, 胞间 CO₂ 浓度; Tr, 蒸腾速率; Gs, 气孔导度; F₀, 初始荧光; F_v/F_m, PSII 最大光化学效率; Φ_{PSII}, PSII 实际光化学效率; PLH, 株高; RL, 根长; FWG, 地上鲜重; FWUG, 地下鲜重; DWG, 地上干重; DWUG, 地下干重; PWC, 植株含水量; Chl, 叶绿素; MDA, 丙二醛; Pro, 游离脯氨酸; SS, 可溶性糖; REC, 相对电导率。下同。

Note: ER, emergence rate; Pn, net photosynthetic rate; Ci, intercellular CO₂ concentration; Tr, transpiration rate; Gs, stomatal conductance; F₀, initial fluorescence; F_v/F_m, maximum photochemical efficiency of PSII; Φ_{PSII}, actual photochemical efficiency of PSII; PLH, plant height; RL, root length; FWG, aboveground fresh weight; FWUG, underground fresh weight; DWG, aboveground dry matter weight; DWUG, underground dry matter weight; PWC, plant water content; Chl, chlorophyll content; MDA, malondialdehyde content; Pro, free proline content; SS, soluble sugar content; REC, relative electrical conductivity. The same below.

$$W_j = \sum_{j=1}^n |P_j| \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

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:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j] \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

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价值。

2 结果与分析

2.1 不同基因型绿豆各单项指标的耐盐碱系数及相关关系分析

由表 2 可知, 不同基因型绿豆在盐碱胁迫处理下, 植株生长均受到不同程度的抑制, 其中各绿豆品

种出苗率(ER)、幼苗叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、 $PSII$ 最大光化学效率(F_v/F_m)、 $PSII$ 实际光化学效率(Φ_{PSII})、株高(PLH)、根长(RL)、地上鲜重(FWG)、地下鲜重($FWUG$)、地上干重(DWG)、地下干重($DWUG$)、植株含水量(PWC)、叶绿素含量(Chl)与对照处理相比,均有所下降($SATC < 1$),叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)、初始荧光(F_0)、丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(Pro)、可溶性糖(SS)含量及相对电导率(REC)与对照处理相比均

有所增加($SATC > 1$),但不同基因型绿豆各单项指标的变化幅度不尽相同,因此利用单一性状耐盐碱系数评价绿豆品种萌发期和苗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(表3),各指标之间存在着显著或极显著相关性,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。

表3 盐碱胁迫条件下绿豆幼苗各单项指标的相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of every individual indicator in mung bean seedlings under saline - alkaline condition

指标 Indicator	ER	P_n	C_i	Tr	G_s	F_0	F_v/F_m	Φ_{PSII}	PLH	RL	FWG	$FWUG$	DWG	$DWUG$	PWC	Chl	MDA	Pro	SS	REC	
ER	1.00																				
P_n	0.27	1.00																			
C_i	0.16	0.06	1.00																		
Tr	-0.11	0.28	0.18	1.00																	
G_s	0.21	0.16	0.21	0.05	1.00																
F_0	-0.05	-0.19	-0.45*	0.16	-0.03	1.00															
F_v/F_m	-0.04	0.12	0.20	0.13	0.26	-0.13	1.00														
Φ_{PSII}	0.39**	-0.12	0.02	-0.27	-0.05	0.01	0.3	1.00													
PLH	0.97**	0.27	0.10	-0.11	0.18	0.00	0.00	0.39*	1.00												
RL	0.74**	0.22	0.00	-0.12	-0.03	-0.01	-0.22	0.50**	0.74**	1.00											
FWG	0.48**	0.06	-0.01	-0.26	-0.06	-0.03	-0.05	0.38*	0.51**	0.49**	1.00										
$FWUG$	0.46*	0.05	-0.02	-0.29	-0.10	-0.10	-0.04	0.44*	0.50**	0.5**	0.96**	1.00									
DWG	-0.25	-0.20	-0.07	0.13	-0.46**	0.23	0.01	0.02	-0.27	-0.24	-0.29	-0.35	1.00								
$DWUG$	0.06	-0.20	0.04	-0.41*	0.08	-0.15	0.18	0.54**	0.00	0.11	0.04	0.15	-0.13	1.00							
PWC	0.01	-0.10	-0.14	-0.12	-0.11	0.19	0.18	0.09	0.05	-0.13	0.07	0.05	0.14	0.08	1.00						
Chl	-0.01	-0.01	0.00	0.43*	0.03	0.28	0.30	-0.10	-0.06	-0.18	-0.43*	-0.54**	0.26	-0.29	0.07	1.00					
MDA	0.1	0.08	-0.03	0.39*	-0.05	-0.04	0.20	-0.02	0.09	0.16	-0.05	-0.08	0.17	-0.14	0.17	0.18	1.00				
Pro	-0.14	0.21	0.46*	0.57**	0.23	-0.07	0.12	-0.20	-0.19	-0.10	-0.25	-0.29	0.03	-0.08	-0.08	0.08	0.10	1.00			
SS	0.02	-0.07	0.19	-0.24	0.10	-0.24	-0.35	-0.11	-0.05	0.00	-0.03	-0.04	0.00	0.21	-0.16	-0.25	-0.18	-0.01	1.00		
REC	-0.14	-0.35	0.19	0.10	-0.23	-0.02	0.15	0.14	-0.10	-0.13	0.30	0.30	0.17	0.06	0.26	0.02	0.24	-0.23	-0.04	1.00	

注: * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的显著水平。

Note: * and ** significant level at $P < 0.05$ and $P < 0.01$.

2.2 不同基因型绿豆耐盐碱性评价指标的主成分分析

利用 SPSS 21.0 软件对 20 个单项指标的耐盐碱系数进行主成分分析(表4),前8个综合评价指标的贡献率分别为 21.96%、13.13%、11.51%、9.52%、7.74%、6.42%、5.04% 和 4.82%(表4),累计贡献率达 80.14%,其余可忽略不计。这样把原来的 20 个具有相互关联的单项指标转换为 8 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 8(CI_8)主成分,能代表 20 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 $FWUG$ 、 FWG 的系数较大; CI_2 中 P_n 、 Tr 的系数较大; CI_3 中 SS 、 MDA 的

系数较大; CI_4 中 F_v/F_m 、 C_i 的系数较大; CI_5 中 REC 、 $DWUG$ 的系数较大; CI_6 中 DWG 、 SS 的系数较大; CI_7 中的 G_s 、 P_n 系数较大; CI_8 中 F_0 、 Pro 的系数较大。综合分析上述结果, $FWUG$ 、 P_n 、 SS 、 F_v/F_m 、 REC 、 DWG 、 G_s 、 F_0 可作为绿豆耐盐碱性的综合鉴定指标。

2.3 不同基因型绿豆耐盐碱性的综合评价

2.3.1 隶属函数分析

根据公式(2)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 ,在盐碱胁迫处理条件下,ZL1 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 JIL2 的 $U(X_j)$ 最大,表明此品种在该综合指标上表现为高度耐盐碱。

2.3.2 权重确定 根据各综合指标贡献率大小,利用公式(3)计算不同综合指标的权重值 W_j 。经计算,8个综合指标的权重分别为 0.274、0.164、0.144、0.119、0.097、0.080、0.063 和 0.060(见表 5)。

2.3.3 品种综合评价及分类 应用公式(4)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排序(表 5)。其中 ZL9 的 D 值最大,表明其耐盐碱能力最强;MLD 的 D 值最小,表明其耐盐碱能力最弱。

采用组间连接距离聚类法对 D 值进行聚类分析,建立了聚类树状图(图 1),将 30 份不同基因型绿豆划分为 4 类:ZL9、LF2、JL9 和 TL3 为第 I 类,属于高度耐盐碱类型;JIL2、JL7、BL9、JL5 和 LL8 等 13 份品种为第 II 类,属于中度耐盐碱类型;BL1、JIL10、NL1、JIL7 和 LF3 等 10 份品种为第 III 类,属于盐碱敏感型;TL5、ZL1 和 MLD 为第 IV 类,属于盐碱高度敏感型。

2.3.4 回归模型建立及鉴定指标筛选 为分析各

农艺性状及生理生化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,探讨可用于绿豆苗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: $D = -1.860 + 0.592P_n + 0.190REC + 0.240F_v/F_m + 0.865SS + 0.150F_0 + 0.283DWG + 0.455FWUG$,方程决定系数 $R^2 = 0.9856$, $P = 0.0001$ 。由方程可知,20 个单项指标中有 7 个指标对绿豆苗期耐盐碱性有显著影响,分别是 P_n 、 REC 、 F_v/F_m 、 SS 、 F_0 、 DWG 和 $FWUG$ 。对回归方程的估计精度进行评价(表 6),结果发现不同基因型绿豆估计精度均在 94.385% 以上,说明本方程中的指标对绿豆苗期耐盐碱性影响明显,可以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 7 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。

表 4 各综合指标 CI_x 的系数及贡献率

Table 4 Coefficients and proportion of comprehensive indicators (CI_x)

项目 Items	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	CI_5	CI_6	CI_7	CI_8
特征根 Eigen value	4.392	2.625	2.301	1.904	1.549	1.284	1.009	0.964
贡献率 Contribution rate/%	21.962	13.125	11.505	9.519	7.745	6.422	5.043	4.818
累计贡献率/% Acumulative contriution rate	21.962	35.088	46.593	56.112	63.857	70.279	75.322	80.140
特征向量 Eigenvector								
ER	0.769	0.429	0.150	-0.138	-0.117	0.254	0.204	-0.098
P_n	0.131	0.634	-0.088	-0.183	0.053	-0.188	-0.380	-0.271
C_i	0.028	0.414	-0.273	0.591	0.298	0.249	0.217	0.123
Tr	-0.439	0.605	0.323	0.009	0.321	-0.009	-0.029	0.277
G_s	0.062	0.485	-0.325	0.188	-0.411	-0.287	0.420	0.054
F_0	-0.148	-0.148	0.476	-0.450	-0.288	-0.064	0.226	0.486
F_v/F_m	-0.076	0.248	0.324	0.666	-0.343	-0.259	-0.136	-0.116
Φ_{PSII}	0.597	-0.143	0.278	0.360	-0.340	0.261	-0.252	0.235
PLH	0.785	0.399	0.206	-0.167	-0.106	0.159	0.193	-0.100
RL	0.765	0.264	0.123	-0.238	0.011	0.320	-0.135	0.086
FWG	0.811	-0.112	0.141	0.023	0.334	-0.278	0.042	0.158
$FWUG$	0.849	-0.165	0.086	0.070	0.313	-0.284	-0.056	0.148
DWG	-0.422	-0.263	0.405	-0.015	0.113	0.529	-0.151	0.018
$DWUG$	0.304	-0.322	-0.218	0.504	-0.433	0.215	-0.198	0.094
PWC	0.012	-0.228	0.465	0.184	-0.134	-0.153	0.194	-0.287
Chl	-0.461	0.319	0.483	-0.035	-0.287	0.177	0.262	-0.036
MDA	-0.075	0.293	0.516	0.140	0.252	0.155	-0.086	-0.369
Pro	-0.353	0.577	-0.172	0.242	0.151	0.073	-0.160	0.412
SS	0.066	-0.158	-0.600	0.015	0.144	0.451	0.320	-0.140
REC	0.055	-0.351	0.419	0.482	0.476	-0.053	0.319	0.022

表5 不同基因型绿豆的耐盐碱性综合指标值、权重、 $U(X_j)$ 、 D 值及综合评价
Table 5 The comprehensive indicator values, index weight, $U(X_j)$, D values and comprehensive evaluation of saline-alkaline tolerance for each variety

品种 Varieties	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	CI_5	CI_6	CI_7	CI_8	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	$U(X_6)$	$U(X_7)$	$U(X_8)$	D 值 D value	综合评价 Comprehensive evaluation
LF2	0.057	0.660	-0.219	0.213	0.954	1.503	0.302	-2.263	0.417	0.902	1.000	0.415	0.529	0.776	0.630	0.047	0.611	高度耐盐碱 High saline - alkaline tolerance
LF3	-0.463	-0.834	1.851	-0.814	0.338	-0.183	0.083	0.078	0.506	0.113	0.178	0.313	0.629	0.900	0.400	0.953	0.435	敏感 Sensitive 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
LF5	0.406	-0.659	1.946	1.035	0.138	1.500	0.718	-0.863	0.451	0.120	0.445	0.622	0.982	0.925	0.400	0.648	0.514	Moderate saline - alkaline tolerance
NL1	-1.098	1.033	-0.391	2.354	-1.321	-0.990	-0.447	1.114	0.229	0.495	0.308	0.981	0.384	0.102	1.000	0.419	0.438	敏感 Sensitive 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
GL1	0.380	0.451	0.316	-0.576	-1.512	-0.117	-0.409	-1.122	0.407	0.935	0.285	0.436	0.000	0.657	0.825	0.637	0.500	Moderate saline - alkaline tolerance 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
GL2	-0.829	0.599	1.319	-0.340	-0.257	-1.166	-1.659	0.810	0.467	0.882	0.000	0.794	0.262	0.683	0.449	0.777	0.522	Moderate saline - alkaline tolerance
JL3	0.434	-0.267	-2.126	-0.115	1.263	-0.003	-0.350	-0.589	0.490	0.565	0.669	0.000	0.418	0.082	0.556	0.000	0.405	敏感 Sensitive 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
JL5	1.554	-1.517	0.744	1.234	0.240	1.044	0.803	0.515	0.826	0.096	0.533	0.415	1.000	0.502	0.165	0.459	0.543	Moderate saline - alkaline tolerance
JL6	1.068	1.234	0.507	-0.998	0.357	-0.558	0.257	-0.900	0.672	0.419	0.287	0.336	0.129	0.000	0.637	0.256	0.402	敏感 Sensitive 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
JL7	0.090	-0.065	0.729	0.146	-1.639	-0.483	-0.411	0.011	0.480	0.525	0.270	1.000	0.345	0.736	0.779	0.746	0.561	Moderate saline - alkaline tolerance 高度耐盐碱 High saline - alkaline tolerance
JL9	0.040	1.026	-0.286	1.011	-0.506	-0.415	0.865	-1.149	0.389	0.954	0.577	0.940	0.631	0.391	0.922	0.192	0.619	High saline - alkaline tolerance
BL1	0.240	-0.934	-0.505	-1.166	0.119	0.595	-2.924	-0.941	0.527	0.995	0.420	0.158	0.031	0.770	0.000	0.299	0.469	敏感 Sensitive 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
BL9	1.112	0.943	-0.051	-0.908	0.269	1.218	-0.722	1.604	0.606	0.904	0.498	0.155	0.133	0.743	0.408	0.730	0.546	Moderate saline - alkaline tolerance 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
BL522	-1.470	0.854	0.637	0.305	0.940	-0.651	-0.573	-1.884	0.247	1.000	0.318	0.835	0.410	0.796	0.373	0.255	0.519	Moderate saline - alkaline tolerance 高度耐盐碱 High saline - alkaline tolerance
TL3	-0.607	1.067	0.526	0.248	2.668	0.401	0.081	1.397	0.535	0.811	0.421	0.054	0.953	0.948	0.605	0.580	0.587	High saline - alkaline tolerance 高度敏感 High saline - alkaline tolerance
TL5	-0.782	-0.611	0.516	-1.562	-0.837	0.512	1.837	-0.649	0.146	0.169	0.410	0.003	0.526	0.753	0.651	0.766	0.325	High saline - alkaline tolerance 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
LL8	0.211	0.383	-0.414	1.360	0.525	-0.700	-0.416	-0.421	0.577	0.475	0.278	0.967	0.424	0.697	0.646	0.071	0.533	Moderate saline - alkaline tolerance 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
LL10	0.175	1.787	-0.610	-0.406	-0.991	-0.353	0.046	1.083	0.406	0.930	0.383	0.450	0.068	0.081	0.975	0.787	0.494	Moderate saline - alkaline tolerance
DYGL	-0.129	0.716	-0.859	-1.779	0.044	-0.062	0.948	1.066	0.403	0.459	0.427	0.059	0.157	0.333	0.680	0.630	0.376	敏感 Sensitive 高度敏感 High saline - alkaline tolerance
ZL1	-2.012	-2.237	-1.800	-0.271	-1.497	1.076	-0.311	0.085	0.000	0.000	0.871	0.185	0.111	1.000	0.554	0.664	0.313	High saline - alkaline tolerance 中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
ZL4	-0.186	0.186	-1.566	-1.017	0.037	-0.587	2.477	0.154	0.480	0.466	0.965	0.131	0.065	0.234	0.882	0.879	0.496	Moderate saline - alkaline tolerance

续表

品种 Varieties	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	CI_5	CI_6	CI_7	CI_8	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$	$U(X_5)$	$U(X_6)$	$U(X_7)$	$U(X_8)$	D 值 D value	综合评价 Comprehensive evaluation
ZL6	-0.572	-1.040	1.195	0.175	-0.130	-0.157	0.284	1.815	0.509	0.056	0.381	0.693	0.714	0.897	0.433	1.000	0.514	中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
ZL9	1.929	0.039	-0.804	0.996	0.346	-0.029	0.555	0.543	0.918	0.514	0.594	0.579	0.626	0.479	0.920	0.298	0.665	高度耐盐碱 High saline - alkaline tolerance
JIL2	1.087	-2.130	-0.713	-0.452	1.292	-3.080	-0.577	-0.125	1.000	0.504	0.375	0.141	0.752	0.086	0.529	0.366	0.562	中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
JIL7	1.032	0.490	-0.680	0.781	-1.104	0.719	-0.952	-0.390	0.509	0.503	0.352	0.580	0.247	0.219	0.687	0.140	0.435	敏感 Sensitive
JIL10	0.259	0.649	0.955	-1.463	-0.918	-0.371	0.000	-0.291	0.386	0.807	0.039	0.368	0.098	0.616	0.688	0.852	0.441	敏感 Sensitive
MLD	-2.616	0.159	-0.431	0.282	1.576	0.874	-0.175	0.372	0.058	0.109	0.352	0.334	0.499	0.989	0.369	0.298	0.293	高度敏感 High saline - alkaline tolerance
YLLD	0.440	-1.089	1.041	-0.032	0.384	-0.484	0.361	0.305	0.614	0.106	0.298	0.467	0.809	0.522	0.460	0.968	0.491	中度耐盐碱 Moderate saline - alkaline tolerance
CL3	0.750	-0.262	-0.586	0.177	-0.240	1.867	-0.736	1.046	0.546	0.055	0.642	0.266	0.013	0.937	0.615	0.323	0.417	敏感 Sensitive
XL1	-0.502	-0.633	-0.236	1.583	-0.537	-0.919	1.047	-0.410	0.432	0.109	0.206	0.594	0.602	0.552	0.761	0.199	0.398	敏感 sensitive
权重 Weight									0.274	0.164	0.144	0.119	0.097	0.080	0.063	0.060		

表 6 回归方程的估计精度分析

Table 6 Analysis of evaluation accuracy of equation

品种 Varieties	原始值 Primitive value	回归值 Regression value	差值 Difference	估计精度/% Estimated accuracy
LF2	0.611	0.611	-0.000	99.975
LF3	0.435	0.436	0.000	99.886
LF5	0.514	0.521	0.007	98.682
NL1	0.438	0.438	-0.000	99.906
GL1	0.500	0.487	-0.013	97.350
GL2	0.522	0.533	0.011	97.909
JL3	0.405	0.412	0.007	98.125
JL5	0.543	0.565	0.022	96.086
JL6	0.402	0.408	0.006	98.541
JL7	0.561	0.557	-0.004	99.274
JL9	0.619	0.614	-0.005	99.247
BL1	0.469	0.497	0.028	94.385
BL9	0.546	0.553	0.007	98.645
BL522	0.519	0.535	0.016	96.912
TL3	0.587	0.568	-0.019	96.586
TL5	0.325	0.316	-0.009	97.142
LL8	0.533	0.529	-0.004	99.414
LL10	0.494	0.490	-0.004	99.181
DYGL	0.376	0.376	-0.000	99.808
ZL1	0.313	0.317	0.004	98.575
ZL4	0.496	0.497	0.001	99.649
ZL6	0.514	0.524	0.010	98.208
ZL9	0.665	0.644	-0.021	96.856
JIL2	0.562	0.564	0.002	99.738
JIL7	0.435	0.439	0.004	99.059
JIL10	0.441	0.434	-0.007	98.393
MLD	0.293	0.298	0.005	98.253
YLLD	0.491	0.500	0.009	98.204
CL3	0.417	0.406	-0.011	97.400
XL1	0.398	0.386	-0.012	96.675

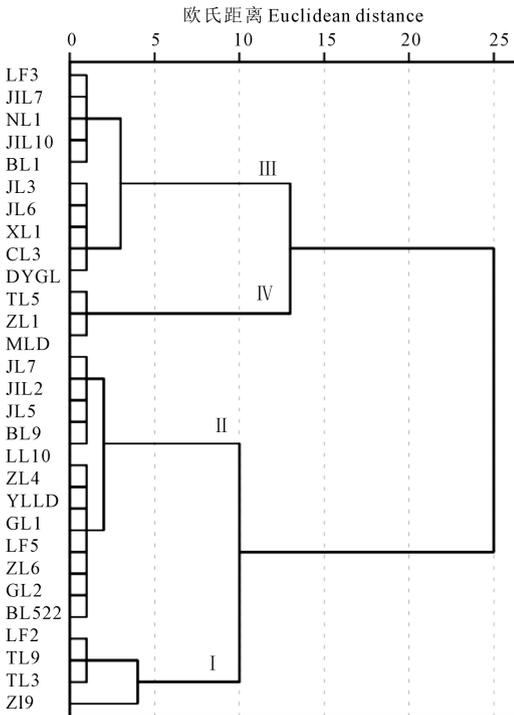


图 1 30 个绿豆品种的聚类树状图

Table 1 The dendrogram of clusters for 30 mung bean varieties

3 讨论与结论

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,使得植物根难于从土壤中吸收水分,造成水分胁迫,加速叶片衰老死亡^[28];二是吸收过多的离子,对植物形成离子毒害^[29]。我国东北地区苏打盐碱土壤 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,对当地农作物的生产影响严重^[30]。为此,本研究结合松嫩平原盐碱土自然特点及前人的相关报道^[31],以 NaHCO_3 模拟苗期盐碱土壤胁迫,选用 0.6% 作为耐盐碱性鉴定的临界浓度。

已有大量研究表明,作物在盐碱逆境条件下,也会通过改变生长、形态以及渗透调节、离子平衡、光合过程等综合反应及众多生理生化途径来适应逆境条件,进而调整生物量分配来构建和维持逆境下植株的存活和生长^[32-33]。因此,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及外界环境的影响,孤立使用某些单项指标很难准确、客观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的信息发生交叉重叠,且其重要程度不尽相同^[21,27,34]。为此,本研究基于国内外众多学者已筛选出多种与作物耐盐碱性相关的形态、生理生化和代谢等方面的指标,选用其中较为便捷、直观、简易的 20 个指标进行测定,并在此基础上运用多元分析方法对绿豆苗期耐盐碱能力进行综合评价。

本研究基于对照处理及盐碱胁迫处理下不同基因型绿豆幼苗的 20 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 20 个指标的耐盐碱系数转换为 8 个独立的综合指标,并得到不同品种绿豆幼苗的耐盐碱综合评价值(D 值),参照 D 值聚类分析结果,较为客观地将各参试绿豆品种划分为高度耐盐碱、中度耐盐碱、敏感和高度敏感等 4 种类型。进一步使用逐步回归法建立了可靠的绿豆幼苗耐盐碱性评价模型 $D = -1.860 + 0.592P_n + 0.190REC + 0.240F_v/F_m + 0.865SS + 0.150F_0 + 0.283DWG + 0.455FWUG$,筛选出 P_n 、 REC 、 F_v/F_m 、 SS 、 F_0 、 DWG 和 $FWUG$ 等 7 个明显影响绿豆幼苗耐盐碱能力的单项指标。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。

一般认为,植物受到盐碱胁迫影响的首要生理

过程是光合作用^[35],气孔、非气孔因素以及光合作用的净光合速率^[36]。其中,非气孔因素主要由 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶(Rubisco)活性和光合电子传递至 1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)的再生能力所决定^[37-38]。此外,Forni 等^[39]报道认为盐碱胁迫对植物的伤害也体现在短期的水分代谢平衡失调,组织器官相对含水量减少,而且存在长效的离子毒害。为了尽可能保持水分以进行正常代谢,植物体内往往会积累大量的渗透调节物质(如脯氨酸、可溶性糖等)。本研究将聚类与逐步回归分析结果相互验证,得到各耐盐碱绿豆品种幼苗的生理生化表现特征,通过比较发现,强耐盐碱绿豆品种幼苗在盐碱逆境条件下 P_n 、 F_v/F_m 、 DWG 和 $FWUG$ 保持较高水平,而 REC 、 F_0 、 SS 较低,说明在相同盐碱环境下,此类绿豆品种幼苗拥有较强的逆境保护机制,受到伤害较轻,进而有利于光合产物的高效积累,最终提升了绿豆植株的耐盐碱能力。

综上所述,本试验将参试的 30 个不同基因型绿豆品种分成强耐盐碱型(4 个)、中度耐盐碱型(13 个)、盐碱敏感型(10 个)和盐碱高度敏感型(3 个),其中中绿 9 号、绿丰 2 号、吉绿 9 号和洮绿 3 号为高度耐盐碱型绿豆品种。净光合速率(P_n)、相对电导率(REC)、最大光化学效率(F_v/F_m)、可溶性糖含量(SS)、初始荧光(F_0)、地上干重(DWG)、地下鲜重($FWUG$)可以作为绿豆耐盐碱性鉴定指标。耐盐碱能力较强的绿豆品种幼苗在盐碱逆境条件下净光合速率、最大光化学效率、地上干重和地下鲜重较高,而相对电导率、初始荧光、可溶性糖含量均保持在较低水平。

参考文献:

- [1] 刘岩,程须珍,王丽侠,等. 基于 SSR 标记的中国绿豆种质资源遗传多样性研究[J]. 中国农业科学,2013,46(20):4197-4209.
- [2] 张翼飞,于崧,张文超,等. 播期和密度对绿豆生长、干物质积累及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学,2016,(11):26-33.
- [3] 王兰芬,武晶,景蕊莲,等. 绿豆种质资源成株期抗旱性鉴定[J]. 作物学报,2015,41(8):1287-1294.
- [4] 司振江,张忠学,李芳花,等. 松嫩平原盐碱土集成治理技术的研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(3):80-84.
- [5] 张巍,冯玉杰. 松嫩平原盐碱土理化性质与生态恢复[J]. 土壤学报,2009,46(1):169-172.
- [6] 王彩娟,李志强,王晓琳,等. 室外盆栽条件下盐胁迫对甜高粱光系统 II 活性的影响[J]. 作物学报,2011,37(11):2085-2093.
- [7] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review[J]. Ecotoxicology Environmental Safety, 2005, 60(3): 324-349.

- [8] Zhang X X, Takano T, Liu S K. Identification of a mitochondrial ATP synthase small subunit gene (RMtATP6) expressed in response to salts and osmotic stresses in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(1): 193-200.
- [9] Elnaggar A, Noller J. Application of remote-sensing data and decision-tree analysis to mapping salt-affected soils over large areas [J]. *Remote Sensing*, 2006, 2(1): 151-165.
- [10] Zhang J T, Mu C S. Effects of saline and alkaline stresses on the germination, growth, photosynthesis, ionic balance and anti-oxidant system in an alkali-tolerant leguminous forage *Lathyrus quinquenervius* [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(5): 685-697.
- [11] Jacobsen S E, Jensen C R, Liu F. Improving crop production in the arid Mediterranean climate [J]. *Field Crop Research*, 2012, 128: 34-47.
- [12] Rozema J, Muscolo A, Flowers T. Sustainable cultivation and exploitation of halophyte crops in a salinising world [J]. *Environmental Experimental Botany*, 2013, 92(S1): 1-3.
- [13] Richter J A, Erban A, Kopka J, et al. Metabolic contribution to salt stress in two maize hybrids with contrasting resistance [J]. *Plant Science*, 2015, 233: 107-115.
- [14] Glenn E P, Brown J J, Blumwald E. Salt tolerance and crop potential of halophytes [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999, 18(2): 227-255.
- [15] Silveira J A, Viegas R de A, da Rocha I M, et al. Proline accumulation and glutamine synthase activity are increased by salt induced proteolysis in cashew leaves [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(2): 115-123.
- [16] Fernandes de Melo D, Jolivet Y, Façanha A R, et al. Effect of salt stress on mitochondrial energy metabolism of *Vigna unguiculata* cultivars differing in NaCl tolerance [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 1994, 32(3): 405-412.
- [17] 焦广音, 任建华, 逯贵生, 等. 绿豆品种资源耐盐性鉴定与研究 [J]. *作物品种资源*, 1997, (2): 38-40.
- [18] Raza S H, Ahmad M B, Ashraf M A, et al. Time-course changes in growth and biochemical indices of mung bean [*Vigna radiate* (L.) Wilczek] genotypes under salinity [J]. *Brazilian Journal Botany*, 2014, 37(4): 429-439.
- [19] 郝德荣, 程玉静, 徐辰武, 等. 玉米耐盐种质筛选及群体遗传结构分析 [J]. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(6): 1153-1160.
- [20] 吴其襄, 胡国成, 柯登寿, 等. 俄罗斯水稻种质资源的苗期耐盐鉴定 [J]. *植物遗传资源学报*, 2008, 9(1): 32-35.
- [21] 张婷婷, 于崧, 于立河, 等. 松嫩平原春小麦耐盐碱性鉴定及品种(系)筛选 [J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1008-1019.
- [22] 张海波, 崔继哲, 曹甜甜, 等. 大豆出苗期和苗期对盐胁迫的响应及耐盐指标评价 [J]. *生态学报*, 2011, 31(10): 2805-2812.
- [23] 张国伟, 路海玲, 张雷, 等. 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2045-2053.
- [24] 任建华, 高平平, 乔燕祥, 等. 绿豆幼苗期耐盐性研究 [J]. *山西农业科学*, 1994, 22(2): 20-24.
- [25] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. *植物生理学实验指导*第 4 版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [26] 李合生. *植物生理生化实验原理和技术* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [27] 李琳, 于崧, 蒋永超, 等. 芸豆苗期耐盐碱性鉴定及品种筛选研究 [J]. *植物生理学报*, 2016, 52(1): 62-72.
- [28] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. *Plant, cell and environment*, 2002, 25(2): 239-250.
- [29] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 651-681.
- [30] Wang L, Fang C, Wang K. Physiological responses of *Leymus chinensis* to long-term salt, alkali and mixed salt-alkali stresses [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(4): 526-540.
- [31] 吾木提汗·卡克木, 海利力·库尔班, 陈其军, 等. 盐胁迫条件下骆驼刺与绿豆光合日变化特征及午休现象的成因 [J]. *干旱区研究*, 2012, 29(6): 1039-1045.
- [32] Koyama M L, Levesley A, Koebner R M. Quantitative trait loci for component physiological traits determining salt tolerance in rice [J]. *Plant Physiology*, 2001, 125(1): 406-422.
- [33] Falster D S, Westoby M. Plant height and evolutionary games [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(7): 337-343.
- [34] 戴海芳, 武辉, 阿曼古丽·买买提阿力, 等. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7): 1290-1300.
- [35] Koyro H W. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(2): 136-146.
- [36] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress; Regulation mechanisms from whole plant to cell [J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(4): 551-560.
- [37] Yang Y, Yu L, Wang L, et al. Bottle gourd rootstock-grafting promotes photosynthesis by regulating the stomata and non-stomata performances in leaves of watermelon seedlings under NaCl stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 186-187: 50-58.
- [38] 刘建新, 王金成, 王瑞娟, 等. 混合盐碱胁迫对燕麦幼苗矿物质离子吸收和光合特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 178-184.
- [39] Forni C, Duca D, Glick B R. Mechanisms of plant response to salt and drought stress and their alteration by rhizobacteria [J]. *Plant and Soil*, 2017, 410(1-2): 335-356.