

3 个玉米自交系对盐胁迫的生理 响应及耐盐性评价

王婧泽, 高树仁, 孙丽芳, 王霞, 王晶, 胡凯凤, 邓杰

(黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 以自交系 M-2 导入系、Hr30 导入系和 Mo17 导入系为试验材料, 研究不同浓度 NaCl(0、100 mmol·L⁻¹、150 mmol·L⁻¹、200 mmol·L⁻¹、250 mmol·L⁻¹) 对 3 个玉米幼苗的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、可溶性蛋白等生理指标的变化规律的影响, 并采用主成份分析与隶属函数相结合的方法对其耐盐性进行综合评价, 旨在为玉米耐盐性筛选及抗盐新品种的选育奠定基础。结果表明, 3 个自交系的株高、生物量、叶绿素含量、净光合速率(*Pn*)以及可溶性蛋白质的含量大体上随着盐浓度的增加而呈下降的趋势; 根长、相对电导率、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和根冠比大体上呈先上升后下降的趋势。利用主成份分析归纳出株高、净光合速率(*Pn*)、丙二醛(MDA)等 9 个与耐盐密切相关的生理指标, 运用模糊数学隶属函数分析得出, 3 个玉米自交系的耐盐性强弱依次为 M-2 导入系 > Hr30 导入系 > Mo17 导入系。

关键词: 玉米; 盐; 隶属函数

中图分类号: S332.1 文献标志码: A

Physiological responses and tolerance of three maize inbred lines to salt stress

WANG Jing-ze, GAO Shu-ren, SUN Li-fang, WANG Xia, WANG Jing, HU Kai-feng, DENG Jie

(College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: Using three maize inbred lines (including M-2 introgression line, Hr30 introgression line, and Mo17 introgression line) as test materials, an experiment was conducted to investigate the effects of different concentrations of NaCl(0 mmol·L⁻¹, 100 mmol·L⁻¹, 150 mmol·L⁻¹, 200 mmol·L⁻¹, and 250 mmol·L⁻¹) on physiological parameters such as superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity and malondialdehyde (MDA) content in maize seedlings. Furthermore, the salt tolerance of these three inbred lines was comprehensively evaluated by the methods of principal components analysis and fuzzy subordinate function, so as to lay foundation of identifying salt tolerance and selecting salt-tolerant cultivars of maize. The results showed that, with the increase of salt concentration, the plant height, biomass, chlorophyll content, net photosynthetic rate (*Pn*) and soluble protein content in all three inbred lines tended to decrease, while the root length, relative conductivity, MDA content, SOD activity, POD activity and root/shoot ratio were increased at first and decreased subsequently. According to the results of principal components analysis, 9 parameters (including plant height, *Pn*, MDA content, SOD activity and so on) were closely related to salt tolerance. Through the analysis of fuzzy subordinate function, the salt-resistant capability of tested inbred lines was ranked as: M-2 introgression line > Hr30 introgression line > Mo17 introgression line.

Keywords: maize; salt; subordinate function

目前,世界上有超过 6% 的土地受到盐渍化的威胁^[1],世界各地的土壤盐渍化程度在逐年不断地恶化,全球的气候变化成为加剧土壤盐渍化的一个

重要原因。大多数植物对于盐敏感,重度盐碱地上的植被的生长发育受到了严重的影响,甚至导致减产。玉米作为重要的粮食作物,在全世界的种植面

收稿日期: 2015-12-01

基金项目: 黑龙江八一农垦大学研究生创新项目(YJSCX2015-Y05); 农业部公益性项目(201303007)

作者简介: 王婧泽, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为玉米耐盐机制。E-mail: hi_chingchak@163.com.

通信作者: 高树仁, 教授, 主要从事玉米遗传育种的研究工作。E-mail: gaoshri107@126.com.

积超过 1.41 亿公顷, 占全球粮食生产总值的 $1/3$ ^[2-3]。由于玉米是盐中度敏感植物, 耐盐性较差^[4], 因此选育抗逆性较强的玉米优良品种受到人们的广泛关注。盐胁迫导致植物体内的离子失衡和渗透压升高, 激活植物体内的响应机制, 通过修复自身受损的蛋白和膜结构来恢复体内的平衡^[5]。盐胁迫还会诱导大量的活性氧产生, 细胞膜透性增加, 丙二醛(MD)和电导率增加, 导致植物的膜质过氧化损伤^[6]。植物通过建立抗氧化防御机制来保护自己免受氧化损伤, 包括产生超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)等^[7-8]。张骏等^[9]研究不同浓度 NaCl 胁迫对玉米幼苗叶片影响的研究表明, 随着盐浓度的增加, 叶片中的 SOD 活性、MDA 含量逐渐升高, 可溶性蛋白含量呈先升高再降低的趋势, 并认为 SOD 活性、可溶性蛋白含量及 MDA 含量可以作为鉴定玉米耐盐性的生理指标。付长方等^[10]对两个玉米自交系 7 个梯度的盐胁迫进行研究, 结果表明高浓度的盐胁迫对玉米的生长有显著抑制作用, 在盐浓度为 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时叶绿素含量比对照略有升高, 但随着盐浓度的增加, 叶绿素含量逐渐下降。彭云玲等^[11]比较盐胁迫对耐盐系与盐敏感系幼苗生长的影响, 研究表明, 耐盐系和盐敏感系株高、根长都随着盐浓度的增加而降低, 耐盐系变化幅度比敏感系小。本研究综合多项生理指标的变化规律, 采用主成分分析和模糊数学隶属函数法相结合的方法对 3 个玉米自交系耐盐性进行综合评价, 以期对玉米耐盐性的苗期鉴定及其鉴定指标与评价体系提供理论依据, 为耐盐玉米的选育提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 供试材料与 设计

本课题组前期对野生碱蓬总 DNA 通过花粉管导入玉米自交系并稳定遗传的 20 个后代进行耐盐性筛选试验, 选择其中 3 个耐盐性较强的玉米自交系 M-2 导入系、Hr30 导入系和 Mo17 导入系作为试验材料。

1.2 试验设计

试验于植物生长室内进行, 培养条件为: 昼夜温度为 $25^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$, 白天光照 12 h, 光强为 $1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对湿度为 60% ~ 80%。挑选大小一致, 无破损无病斑的玉米种子, 用 10% 的次氯酸钠表面消毒后, 于 24°C 的培养箱内催芽, 挑选长势发芽一致的种子播于装有等量蛭石的塑料盆内(直径 20 cm、高 22 cm), 每盆浇灌等量的 $1/2$ Hoagland 营养液。于三叶一心时分别以 5 个不同浓度梯度(0、100

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、150 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、250 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)的 NaCl 溶液进行盐胁迫处理, 处理 7 天后, 选取相同功能的幼嫩叶片进行样品采集。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 生长指标的测定 盐胁迫处理一周后, 每个处理随机选取 5 株幼苗, 测定其株高、根长。将幼苗的地上部与地下部分离, 置于 105°C 下杀青 30 min, 80°C 烘干至恒重, 称干重即生物量, 并计算根冠比(根冠比 = 地上部干重/地下部干重)。

1.3.2 生理指标的测定 用便携式 Li-6400XTR 光合仪(美国 Li-COR 公司)测定幼苗三叶一心时期生长点下第 2 片完全展开功能叶的净光合速率(P_n), 每叶片重复记录 3 组数据, 结果取其平均值。测定时叶室 CO_2 浓度为 $400 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, 光强约为 $800 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。叶绿素含量的测定方法参照 Wellburn^[12]的方法测定。相对电导率的测定参照 Lutts 等^[13]的方法测定。MDA 含量的测定采用李合生等^[14]的方法。SOD 和 POD 活性的测定分别参照 Giannopolitis C N 等^[15]和 Rao M V 等^[16]的方法测定。可溶性蛋白含量的测定参照郝再彬等^[17]的方法测定。

1.4 数据分析

用 Excel 2003 进行数据整理, SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析和主成分分析, 采用 Duncan 检验法进行多重比较及差异显著性分析, 图表中的数据均为 3 次重复的平均值。选取盐胁迫一周后的主成分分析中得分系数较高的 9 个生理指标的测定值, 采用模糊数学中的隶属函数法进行耐盐性综合评价, 计算方法如下。

隶属函数值计算公式:

$$R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

反隶属函数值计算公式:

$$R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X_i 为各自交系的指标测定值; X_{\min} 、 X_{\max} 为各自交系测定指标的最小值和最大值。当某一指标与植物的耐盐性成正相关时, 用公式(1); 当某一指标与植物耐盐性成负相关时, 则用公式(2)。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对玉米幼苗生长的影响

盐胁迫对玉米幼苗的生长变化有直接的影响。如图 1(A)、1(B)所示, 盐胁迫对 3 个玉米自交系玉米幼苗的株高和生物量有明显的抑制作用, 当盐浓度达到 $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 与对照相比, M-2 导入系的株高和生物量分别下降 14.6% 和 13.7%, Hr30 导

入系下降 20.2% 和 33.2%，Mo17 导入系下降 21.78% 和 36.9%，M-2 导入系下降幅度最小。如图 1(C)、1(D)所示，盐胁迫对 3 个玉米自交系玉米幼苗的根长和根冠比有一定的促进作用，随着盐浓度的增加，3 个玉米自交系的根长和根冠比呈先上升后下降的趋势，Mo17 导入系的根长和根冠比在盐浓度为 150 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值，分别比对照高

67.8% 和 120.9%，随着盐浓度的继续增加逐渐下降；M-2 导入系和 Hr30 导入系在盐浓度达到 250 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大值，与对照相比，M-2 导入系的根长和根冠比增加了 75.1% 和 248.5%，Hr30 导入系的根长和根冠比增加了 75.0% 和 183.2%，之后逐渐降低。

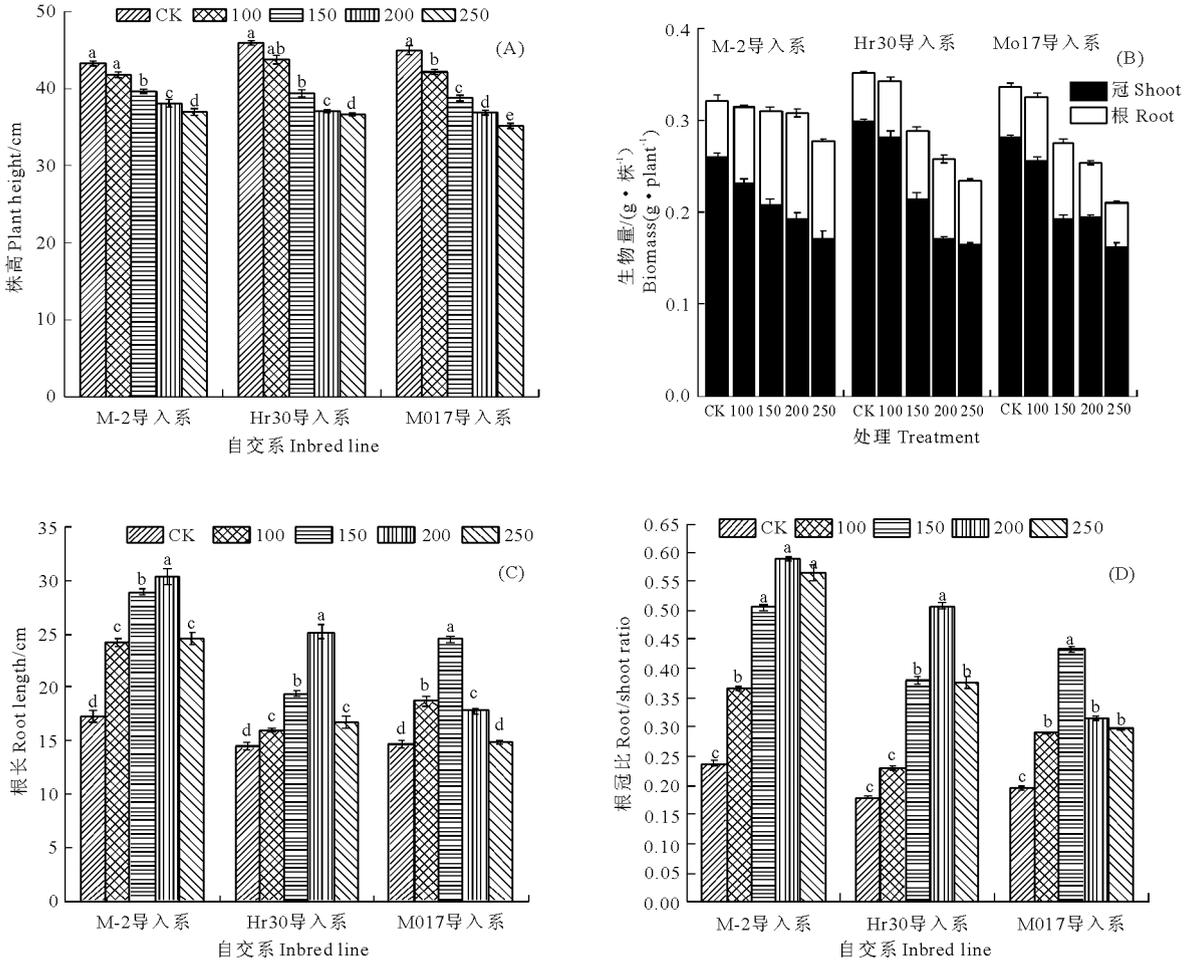


图 1 盐胁迫下各导入系株高、生物量、根长和根冠比的变化

Fig.1 Plant height, total biomass, root length and root/shoot ratio of different inbred lines under salt stress

2.2 盐胁迫对玉米幼苗叶片叶绿素含量和净光合速率的影响

盐胁迫下，3 个玉米幼苗叶片的叶绿素含量和净光合速率显著下降。如图 2(A)、2(B)所示，当盐浓度增加到 250 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，与对照相比，M-2 导入系的叶绿素含量和净光合速率分别比对照下降了 46.7% 和 42.7%，Hr30 导入系分别比对照下降了 49.5% 和 64.8%，Mo17 导入系分别比对照下降了 51.2% 和 68.6%，M-2 导入系的下降幅度较小。

2.3 盐胁迫对玉米幼苗叶片电导率、MDA、可溶性蛋白及抗氧化酶活性的影响

结果如表 1 所示，3 个玉米叶片的 MDA 含量和

相对电导率的变化均随着盐浓度的增加呈先上升后降低的趋势，当盐浓度达到 200 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 3 个自交系均达到最大值，与对照差异显著，M-2 导入系的 MDA 含量和相对电导率分别比对照增加 115.3% 和 81.7%，Hr30 导入系分别比对照增加了 144.9% 和 90.4%，Mo17 导入系分别比对照增加了 156% 和 120.5%，M-2 导入系的增幅较小。

3 个玉米叶片的可溶性蛋白含量的变化大体上随盐浓度的增加而呈逐渐下降的趋势。当盐浓度达到 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，Hr30 导入系叶片可溶性蛋白的含量与对照相比略有升高，比同浓度下 M-2 导入系和 Mo17 导入系分别高 7.04% 和 52.3%，随着盐

浓度的增加,可溶性蛋白的含量显著下降。当盐浓度升高到 $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, M-2 导入系的可溶性蛋

白含量与对照相比下降了 40%, 但分别比 Hr30 导入系和 Mo17 导入系高 35.8% 和 81.6%。

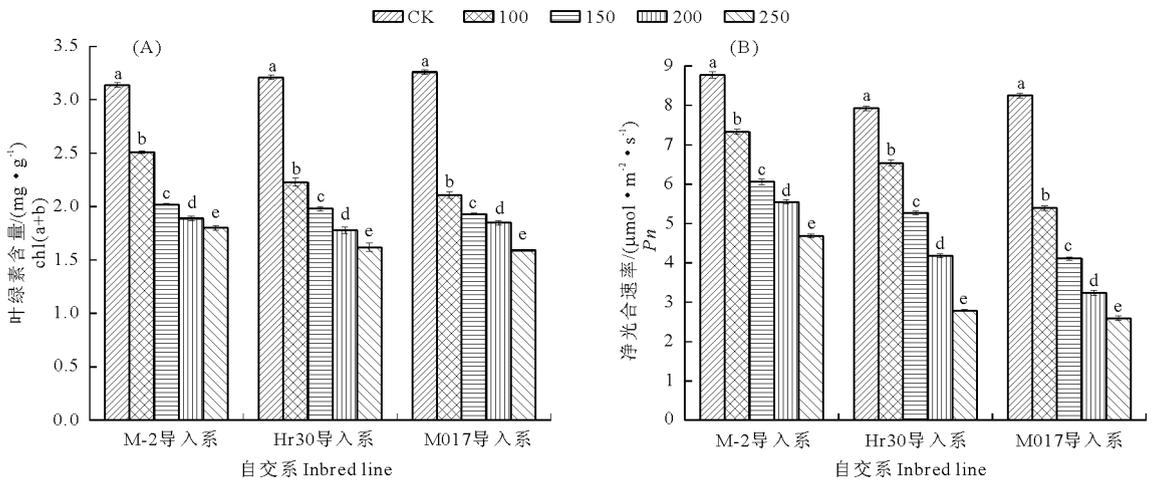


图 2 盐胁迫下各导入系叶绿素含量和净光合速率的变化

Fig.2 Chlorophyll content (a + b) and net photosynthetic rate in different inbred lines under salt stress

表 1 盐胁迫对玉米幼苗叶片电导率、MDA、可溶性蛋白及抗氧化酶活性的影响

Table 1 Relative conductivity, MDA content, soluble protein and antioxidant enzyme activity in maize seedlings under salt stress

自交系 Inbred line	处理浓度 Salt concentration $/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	相对电导率 Relative conductivity $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	丙二醛含量 MDA content $/(\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$	可溶性蛋白含量 Soluble protein content $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	POD 活性 POD activity $/(\text{U} \cdot \text{mg}^{-1})$	SOD 活性 SOD activity $/(\text{U} \cdot \text{mg}^{-1})$
M-2 导入系	0	$0.153 \pm 0.006\text{e}$	$3.78 \pm 0.10\text{e}$	$12.02 \pm 0.15\text{a}$	$116.21 \pm 5.28\text{d}$	$3.28 \pm 0.06\text{e}$
	100	$0.195 \pm 0.007\text{d}$	$4.50 \pm 0.10\text{d}$	$11.37 \pm 0.24\text{b}$	$176.13 \pm 6.05\text{c}$	$4.19 \pm 0.10\text{d}$
	150	$0.216 \pm 0.007\text{c}$	$6.49 \pm 0.22\text{c}$	$9.81 \pm 0.19\text{c}$	$241.50 \pm 8.24\text{b}$	$5.46 \pm 0.03\text{c}$
	200	$0.278 \pm 0.007\text{a}$	$8.14 \pm 0.18\text{a}$	$8.61 \pm 0.12\text{d}$	$317.29 \pm 4.76\text{a}$	$6.66 \pm 0.10\text{a}$
	250	$0.230 \pm 0.005\text{b}$	$7.23 \pm 0.22\text{b}$	$7.21 \pm 0.14\text{e}$	$246.66 \pm 5.14\text{b}$	$5.85 \pm 0.08\text{b}$
Hr30 导入系	0	$0.167 \pm 0.007\text{d}$	$3.45 \pm 0.24\text{e}$	$10.61 \pm 0.11\text{b}$	$91.82 \pm 8.01\text{e}$	$2.01 \pm 0.08\text{e}$
	100	$0.213 \pm 0.007\text{c}$	$4.62 \pm 0.23\text{d}$	$12.17 \pm 0.17\text{a}$	$144.13 \pm 4.53\text{d}$	$2.31 \pm 0.05\text{d}$
	150	$0.268 \pm 0.008\text{b}$	$6.52 \pm 0.24\text{c}$	$9.07 \pm 0.24\text{c}$	$198.40 \pm 8.07\text{b}$	$4.09 \pm 0.04\text{c}$
	200	$0.318 \pm 0.009\text{a}$	$8.45 \pm 0.24\text{a}$	$6.66 \pm 0.16\text{d}$	$301.94 \pm 5.88\text{a}$	$6.01 \pm 0.09\text{a}$
	250	$0.209 \pm 0.009\text{c}$	$7.69 \pm 0.21\text{b}$	$5.31 \pm 0.19\text{e}$	$175.39 \pm 5.01\text{c}$	$4.88 \pm 0.09\text{b}$
Mo17 导入系	0	$0.151 \pm 0.009\text{e}$	$3.68 \pm 0.20\text{d}$	$9.89 \pm 0.20\text{a}$	$112.57 \pm 5.46\text{d}$	$1.90 \pm 0.06\text{d}$
	100	$0.259 \pm 0.006\text{c}$	$4.59 \pm 0.12\text{c}$	$7.99 \pm 0.18\text{b}$	$183.19 \pm 5.12\text{c}$	$3.87 \pm 0.09\text{c}$
	150	$0.284 \pm 0.007\text{b}$	$7.29 \pm 0.22\text{b}$	$6.52 \pm 0.24\text{c}$	$346.55 \pm 9.58\text{a}$	$5.38 \pm 0.09\text{a}$
	200	$0.333 \pm 0.005\text{a}$	$9.42 \pm 0.17\text{a}$	$5.88 \pm 0.11\text{d}$	$205.33 \pm 4.42\text{b}$	$4.31 \pm 0.02\text{b}$
	250	$0.197 \pm 0.007\text{d}$	$7.46 \pm 0.12\text{b}$	$3.97 \pm 0.08\text{e}$	$194.13 \pm 7.93\text{bc}$	$3.86 \pm 0.06\text{c}$

注: 同列不同字母表示达到显著性差异 ($P < 0.05$)。

Note: Different small letters in same columns indicate significant difference ($P < 0.05$).

POD、SOD 活性均随着盐浓度的增加呈先上升后下降的趋势, 当盐浓度升高到 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Mo17 导入系的 POD 和 SOD 活性达到最大值, 分别比对照增加了 207.9% 和 183.2%, 随着盐浓度的继续增加, 活性下降显著。当盐浓度升高到 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, M-2 导入系和 Hr30 导入系的 POD 和 SOD 活性达到最大值, POD 的活性分别比对照增加了

173% 和 228.8%, 分别比同浓度下的 Mo17 高 54.5% 和 47.1%; SOD 的活性分别比对照增加了 103% 和 199%, 分别比同浓度下的 Mo17 高 54.5% 和 39.4%。

2.4 耐盐指标的相关性分析和方差分析

对盐胁迫下 3 个玉米自交系的 11 个生理指标进行了相关性分析(表 2), 大部分指标间存在着相关性, 部分指标间的相关性达到了显著或极显著水

平。为避免指标间的信息重叠,采用主成分分析,转换成较少的综合指标,能够较好地反映玉米的耐盐性。

表 2 玉米不同耐盐性指标的相关关系

Table 2 Correlations among different indexes of salt resistance in maize

指标 Index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
X1	1	0.908**	-0.644**	0.890**	-0.920**	-0.594**	0.826**	-0.663**	-0.758**	0.895**	-0.371*
X2		1	-0.342*	0.887**	-0.790**	-0.411**	0.889**	-0.419**	-0.489**	0.757**	-0.034
X3			1	-0.412**	0.648**	0.525**	-0.322*	0.827**	0.935**	-0.636**	0.873**
X4				1	-0.856**	-0.627**	0.920**	-0.550**	-0.548**	0.913**	-0.110
X5					1	0.774**	-0.769**	0.731**	0.760**	-0.848**	0.425**
X6						1	-0.492	0.730**	0.625**	-0.674**	0.448**
X7							1	-0.480**	-0.473**	0.737**	-0.017
X8								1	0.885**	-0.686**	0.794**
X9									1	-0.722**	0.846**
X10										1	-0.394**
X11											1

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 的显著水平。X1:株高;X2:生物量;X3:根冠比;X4:净光合速率;X5:丙二醛;X6:相对电导率 X7:可溶性蛋白;X8:过氧化物酶;X9:超氧化物歧化酶;X10:叶绿素;X11:根长。

Note: * and ** indicate significance at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. X1: plant height; X2: biomass; X3: shoot/root ratio; X4: Pn; X5: MDA; X6: relative conductivity; X7: soluble protein content; X8: POD; X9: SOD; X10: chl (a + b); X11: Plant root.

方差分析结果表明(表 3),11 项指标在 3 个玉米自交系试验材料和不同盐浓度间呈显著或极显著差异。3 个试验材料间存在显著差异才可进行主成分分析,因此本试验的 11 项耐盐指标可以作主成分分析。

表 3 3 种玉米自交系耐盐性状的 11 个指标方差分析及 F 值检验

Table 3 Variance analysis and F test of 11 indexes of 3 maize inbred lines

指标 Index	自交系间差异 Difference among inbred lines	浓度间差异 Difference among concentrations
X1	102.438**	105.159**
X2	7.977**	42.132**
X3	22.962**	28.711**
X4	94.041**	261.755**
X5	7.504**	336.131**
X6	8.587**	67.583**
X7	78.524**	108.217**
X8	3.478*	27.420**
X9	21.639**	45.183**
X10	9.69**	477.125**
X11	45.369**	25.885**

注: F 检验, * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: F test; * and ** indicate significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively.

2.5 耐盐指标间主成分分析

对 3 个玉米自交系不同浓度 NaCl 胁迫的 11 个指标进行主成分分析(表 4)。前三个主成分的累积贡献率达到 93.959%,表明前 3 个主成分已经对 3 个玉米自交系的耐盐指标作出了充分的概括。由表 4、5 可知,第一主成分的特征值为 7.570,贡献率为 68.815%,其中株高、MDA、Chl(a + b)、Pn、SOD 和 POD 有绝对值较大的得分系数,除株高、Pn、和 Chl(a + b)负向标外,其余均为正向标,第一主成分主要反映地上部生长和生理状况;第二主成分的特征值为 2.185,贡献率为 19.864%,其中根冠比、根长和生物量有绝对值较大的得分系数,均为正向坐标,根长拥有绝对值最大的得分系数,第二主成分与地下部生物量因子密切相关;第三主成分的特征值为 0.581,贡献率为 5.280%,其中电导率有绝对值较大的得分系数,第三主成分主要反映与膜透性相关的因子。

表 4 耐盐指标筛选主成分分析

Table 4 Principal component analysis for screening of salt resistance indexes

主成分 Principle component	特征值 Eigen value	相邻特征 值差异 Difference	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	7.570	5.385	68.815	68.815
2	2.185	1.604	19.864	88.679
3	0.581	0.581	5.280	93.959

表 5 主成分因子得分系数

Table 5 Score coefficients of principle components

指标 Indexes	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
第一主成分 Component 1	-0.343	-0.284	0.281	-0.315	0.344	0.276	-0.284	0.306	0.318	-0.334	0.203
第二主成分 Component 2	0.146	0.363	0.372	0.311	-0.079	0.075	0.360	0.281	0.289	0.100	0.545
第三主成分 Component 3	0.229	0.292	-0.278	-0.072	0.140	0.823	0.070	0.148	-0.197	-0.018	-0.133

2.6 隶属函数分析

主成分分析中各特征向量表示各指标相对于综合指标贡献的大小,特征向量的大小是植物耐盐性评价指标选择的重要依据。第一主成分和第二主成分累积贡献率为 84.349%,表明前 2 个主成分反映了 3 个玉米自交系耐盐能力的 84.349%的信息。第一、二主成分中特征向量较大的有株高、MDA、POD、

SOD、Chl(a + b)、Pn、根冠比、根长和生物量 9 个指标,然后对筛选出的 9 个指标进行隶属函数分析,求平均值并评价 3 个玉米自交系的耐盐性。根据隶属函数平均值的大小对 3 个玉米自交系的耐盐能力进行排序(表 6),3 个玉米自交系玉米耐盐能力由强到弱的顺序为:M-2 导入系、Hr30 导入系、Mo17 导入系。

表 6 盐胁迫条件下玉米隶属函数值

Table 6 Values subordinate function of maize under salt treatment

自交系 Inbred lines	X1	X2	X3	X4	X5	X8	X9	X10	X11	隶属值 Subordinate value	排名 Rank
M-2 导入系	4.000	3.000	4.000	4.000	4.000	3.109	4.000	4.000	4.000	3.790	1
Hr30 导入系	1.667	1.810	0.383	1.691	1.721	0.865	1.236	0.999	0.778	1.239	2
Mo17 导入系	0.200	0.429	0.239	0.000	0.750	2.263	1.772	0.636	0.866	0.795	3

3 结论与讨论

植物形态的变化是反映盐害最直观的指标^[18],合适的筛选压是植物抗逆筛选的基础。本试验中除根冠比的变化率(相对变化率 = 胁迫后的测定值/对照)在 4 个盐胁迫下 3 个自交系间差异均不显著外,在 250 mmol·L⁻¹盐胁迫下,株高、生物量和根长的变化率在 3 个玉米自交系间的差异显著性最高,所以本试验设计的盐胁迫梯度中,250 mmol·L⁻¹可以作为玉米苗期耐盐性筛选的最适浓度。由于土壤中过度盐分的存在,导致土壤的渗透势过高,会损伤叶片中具有蒸腾作用的细胞,降低植物对水分吸收的能力,抑制了植物的正常生长发育^[19]。本研究中,三个玉米自交系的株高和根冠比大体上随着盐浓度的增加而降低,相比较根系受盐胁迫影响较小,在低盐浓度下反而会促进根系的生长发育,说明玉米的地上部对盐胁迫敏感,比地下部更容易受到盐胁迫的伤害。有研究表明,盐胁迫通常会破坏植物细胞膜透性和完整性,引起脂膜过氧化和膜透性增大^[20-21]。本研究中 3 个玉米自交系的 MDA 和相对电导率均随着盐胁迫浓度的增加呈先升高后降低的趋势,M-2 的变化幅度较小,说明 M-2 的膜质过氧化程度和细胞膜受损伤程度均小于其他两个自交

系。此外,盐胁迫会使植物的叶绿体色素系统受损,导致叶绿素酶活性增强,迫使叶绿素不断降解,进而抑制植物的光合作用^[22]。本试验的 3 个玉米自交系的叶绿素含量和净光合速率均随着盐浓度的增加而下降,这与郑世英^[23]等研究结果一致。盐胁迫导致植物体内产生过量的活性氧,活性氧大量增加还会损坏蛋白质的分子结构,使蛋白质合成受阻^[24],本研究中三个玉米自交系的可溶性蛋白质大体上随着盐浓度的增加而逐渐降低。同时,植物会产生大量抗氧化酶来清除多余的活性氧,以此来形成植物体内活性氧的生成和清除之间的动态平衡,减少盐胁迫对植物造成的氧化损伤^[25-26]。付艳^[27]等研究表明,随着盐浓度的增加,玉米幼苗的 POD 和 SOD 活性均呈先升后降的趋势,本研究得到相似结果,这可能与活性氧的大量产生超出了抗氧化酶系统的清除能力有关。本试验中的 3 个自交系的两种酶活性达到最大值的盐处理浓度不同,因此不同品种对活性氧的清除能力也存在一定差异。

通常植物耐盐的机理相对复杂,采用多种生理指标主成分分析和隶属函数法相结合的方法可以充分挖掘各指标间更深层的关系,避免了单一生理指标评价的片面性。戴海芳^[28]等通过主成分分析将盐胁迫下棉花幼苗叶片的 11 项生理指标转换成 6

个彼此独立的指标,通过隶属函数分析得到不同幼苗的耐盐性的综合评价。刘春荣等^[29]同样结合主成分分析和隶属函数法对玉米苗期的生长指标进行耐盐性评价。本试验运用主成分分析归纳出株高、Pn、MDA等9个关键筛选指标,因此盐胁迫下株高、生物量、根冠比和根长可以作为苗期玉米耐盐性鉴定及筛选的形态指标,4个盐胁迫下除根冠比的变化率(相对变化率=胁迫后的测定值/对照)在3个自交系间的差异显著性均不明显外,250 mmol·L⁻¹的盐胁迫下株高、生物量和根长的变化率在3个玉米自交系间的差异显著性均高于其余三个浓度,所以本试验设计的盐浓度梯度中,250 mmol·L⁻¹可以作为耐盐性评价的最适浓度。根据筛选的指标应用隶属函数法对3个玉米自交系进行综合评价,求出每个自交系9项生理指标的隶属平均值,平均值越大,耐盐性就越强。模糊数学隶属函数分析得出,3个玉米自交系玉米耐盐能力由强到弱的顺序为:M-2导入系、Hr30导入系、Mo17导入系。

参考文献:

- [1] Schwabe K A, Kan I, Knapp K C. Drainwater management for salinity mitigation in irrigated agriculture[J]. American Journal of Agricultural Economics, 2006,88(1):133-149.
- [2] International Grains Council. Grain Market: report of IGC Grains conference[R]. London: IGC, 2012.
- [3] Heng L K, Hsiao T, Evett S, et al. Validating the FAO aqua crop model for irrigated and water deficient field maize[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):488-498.
- [4] Bao Y, Zhao R, Li F, et al. Simultaneous expression of spinacia oleracea chloroplast choline monoxygenase (CMO) and betaine aldehyde dehydrogenase (BADH) genes contribute to dwarfism in transgenic lolium perenne[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2011,29(2):379-388.
- [5] Ahmad P, Jaleel C A, Salem M A, et al. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2010,30(3):161-175.
- [6] Rubio M C, Pilar B S, Clemente M R, et al. Effects of salt stress on the expression of antioxidant genes and proteins in the model legume Lotus japonicus[J]. New Phytologist, 2009,181(4):851-859.
- [7] Ashraf M, Akram N A. Improving salinity tolerance of plants through conventional breeding and genetic engineering: An analytical comparison. Biotechnol Adv[J]. Biotechnology Advances, 2009,27(6):744-752.
- [8] Kachout S S, Hamza K J, Bouraoui N K, et al. Salt - Induced changes in antioxidative enzyme activities in shoot tissues of two atriplex varieties [J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj - Napoca, 2013,41(1):115-121.
- [9] 张 骏. NaCl胁迫对玉米幼苗几项生理指标的影响[J]. 吉林农业科学, 2012,37(1):12-14.
- [10] 付长方,张海燕. 盐胁迫对玉米种子萌发、幼苗叶绿素含量和渗透势的影响[J]. 山东农业科学, 2015,5(5):27-30.
- [11] 彭云玲,李伟丽,王坤泽,等. NaCl胁迫对玉米耐盐系与盐敏感系萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2012,(4):62-71.
- [12] Wellburn A R. The spectra determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution [J]. Journal of Plant Physiology, 1994,144(3):307-313.
- [13] Lutts S, Kinet J M, Bouharmont J. NaCl - induced senescence in leaves of rice(Oryza sativaL.) cultivars differing in salinity resistance [J]. Annals of Botany, 1996,78(3):389-398.
- [14] 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,2000:258-260.
- [15] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: II. purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedlings [J]. Plant Physiology, 1977,59(2):481-484.
- [16] Rao M V, Paliyath G, Ormrod D P, et al. Influence of salicylic acid on H₂O₂ production, oxidative stress, and H₂O₂ - metabolizing enzymes. Salicylic acid-mediated oxidative damage requires H₂O₂ [J]. Plant Physiology, 1997,115(1):137-149.
- [17] 郝再彬,苍 晶,徐 仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.
- [18] 王景艳,刘兆普,刘 玲,等. NaCl胁迫对长春花幼苗离子分布和光合作用的影响[J]. 生态学杂志, 2008,(10):1680-1684.
- [19] Munns R. Genes and salt tolerance: Bringing them together[J]. New Phytologist, 2005,(167):645-663.
- [20] Singh P K, Singh R, Singh S. Cinnamic acid induced changes in reactive oxygen species scavenging enzymes and protein profile in maize (Zea mays L.) plants grown under salt stress [J]. Physiology & Molecular Biology of Plants, 2013,19(1):53-59.
- [21] 赵小强,彭云玲,李健英,等. 16份玉米自交系的耐盐性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2014,32(5):40-45.
- [22] 杜 菲,陈 新,杨春华,等. NaCl胁迫对不同柳枝稷材料种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 草地学报, 2011,(6):1018-1024.
- [23] 郑世英,商学芳,王丽燕,等. 盐胁迫对不同基因型玉米生理特性和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010,28(2):109-112.
- [24] 张福锁. 环境胁迫与植物育种[M]. 北京:农业出版社,1993.
- [25] Shahid M A, Balal R M, Pervez M A, et al. Differential response of pea (Pisum sativum L.) genotypes to salt stress in relation to the growth, physiological attributes antioxidant activity and organic solutes [J]. Australian Journal of Crop Science, 2012,6(6):828-838.
- [26] 鲁向晖,穆兴民, VinayNangia,等. DSSAT模型对豫西冬小麦保护性耕作效应模拟效果验证[J]. 干旱地区农业研究, 2010,28(3):64-70.
- [27] 付 艳,高树仁,杨克军,等. 盐胁迫对玉米耐盐系与盐敏感系苗期几个生理生化指标的影响[J]. 植物生理学报, 2011,(5):459-462.
- [28] 戴海芳,武 辉,阿曼古丽,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,(7):1290-1300.
- [29] 刘春荣,张国新,王秀萍. 主成分分析及隶属函数法综合评价玉米苗期耐盐性[J]. 安徽农业科学, 2015,(28):13-14.