

## 利用隶属函数值法对甜高粱苗期耐盐性的综合评价

张士超, 袁芳, 郭建荣, 韩国良, 孙利珍, 王帅, 王宝山\*

山东师范大学生命科学学院逆境植物重点实验室, 济南250014

**摘要:** 选用‘Mer72-3’等11个甜高粱品种幼苗为材料, 用100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl进行处理, 研究盐胁迫对其生长、光合荧光参数、离子含量及其盐害率的影响。利用模糊函数值法对盐处理下甜高粱苗期的10个生理指标进行综合评价, 以筛选出耐盐性较强的甜高粱品种并为苗期耐盐性鉴定提供依据。结果表明, 与对照相比, 100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理下各甜高粱品种的鲜重、干重、株高、根长、 $F_v/F_m'$ 和 $\Phi_{PSII}$ 及 $K^+/Na^+$ 等指标均显著下降。盐处理下甜高粱根部干重盐害率的隶属函数值与总隶属函数值的相关系数( $r=0.895$ )最大, 为极显著水平( $P<0.01$ )。因此, 根部干重的盐害率可以作为甜高粱苗期筛选耐盐品种的一个重要参考指标。综合评价11个甜高粱品种耐盐强弱顺序为: ‘Mer72-2’>‘甜选171’>‘济甜杂11-6’>‘绿能1号’>‘晋甜杂1号’>‘T-98’>‘济甜杂3号’>‘MN-94’>‘济甜杂2号’>‘戴尔’>‘Mer72-3’。

**关键词:** 甜高粱; 盐胁迫; 耐盐性; 苗期; 隶属函数值法

## Comprehensive Evaluation on Salt-Tolerance of *Sorghum bicolor* Seedlings by Subordinate Function Values Analysis

ZHANG Shi-Chao, YUAN Fang, GUO Jian-Rong, HAN Guo-Liang, SUN Li-Zhen, WANG Shuai, WANG Bao-Shan\*

Key Laboratory of Plant Stress Research, College of Life Science, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China

**Abstract:** Eleven *Sorghum bicolor* varieties including ‘Mer72-3’ were used to study effects of salinity stress (100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl) on the parameters such as growth, photosynthetic fluorescence, ion content and their salt damage rates at seedling stage. Ten physiological parameters of *S. bicolor* seedlings treated with 100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl were comprehensively evaluated by subordinate function values analysis for screening salt-tolerant varieties of *S. bicolor* and laid a foundation for further study of salt-tolerance identification of *S. bicolor*. The results showed that fresh and dry weights of both shoot and roots, plant height, root length,  $F_v/F_m'$ ,  $\Phi_{PSII}$  and  $K^+/Na^+$  were significantly decreased under 100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl, compared with control. The correlation coefficient between the subordinate function values of salt damage rate of dry weight of roots and the total subordinate function value was the highest (0.895) at  $P<0.01$  level. Therefore, the salt damage rate of root dry weight can be used as an important indicator on screening for the salt-tolerant *S. bicolor* varieties. Results of the comprehensive evaluation indicated the salt-tolerance order of eleven *S. bicolor* varieties as followings: ‘Mer72-2’>‘Tianxuan171’>‘Jitianza11-6’>‘Lvngeng-I’>‘Jintianza-I’>‘T-98’>‘Jitianza-III’>‘MN-94’>‘Jitianza-II’>‘Dale’>‘Mer72-3’.

**Key words:** *Sorghum bicolor*; salt stress; salt-tolerance; seedling stage; subordinate function values analysis

土壤盐渍化已成为日益严重的全球性问题, 严重影响着农业的发展(Munns 2005), 每年都造成数目巨大的经济损失(Jiang和Deyholos 2006)。据统计, 我国约有总面积达3 600万hm<sup>2</sup>的盐渍土壤(杨劲松2008), 占可利用土地面积的4.88%。筛选耐盐作物已成为有效开发利用盐碱地的热点研究领域。甜高粱隶属禾本科(Poaceae)高粱属(*Sorghum*), 是生产燃料乙醇的重要农作物之一(Vasilakoglou等2011)。作为一种新兴的能源作物, 甜高粱因其对盐碱、干旱、水涝等逆境具有广泛的适

应性而具有“生物能源系统中的最有力竞争者”的美称(杨文华2004)。

甜高粱作为能源作物开发利用盐碱地已成为热点问题, 但是对甜高粱耐盐品种的筛选及评价的研究较少, 这是甜高粱耐盐育种及在盐碱地推

收稿 2015-02-04 修定 2015-05-11

资助 教育部博士点基金(20123704130001)和国家科技支撑计划项目(2009BADA7B05)。

\* 通讯作者(E-mail: bswang@sdsu.edu.cn; Tel: 0531-86180197)。

广种植的重要基础。不同作物或同一种作物不同品种间的耐盐性不同(Munns和Tester 2008), 不同生育时期的耐盐性也不同(Ashraf 2002), 植物的耐盐性随个体的发育阶段而变化(Shannon 1985)。植物耐盐性是一个复杂的过程(刘吉利和吴娜2014), 盐胁迫几乎影响植物从萌发到成熟的整个过程。萌发期和苗期耐盐性是作物在盐碱地上能否生长及种群建立的关键时期, 而能否出苗及成苗又决定单位面积株数及产量, 所以, 苗期耐盐性评价是植物耐盐性鉴定的关键。张云华等(2004)研究了盐胁迫下高粱芽期和苗期的耐盐性, 对比发现两个时期的耐盐性不一致, 高粱芽期的耐盐性强于苗期。张国伟等(2011)在评价棉花耐盐性时发现萌发期和苗期耐盐性也表现不一致。周美利等(2012)在研究甜高粱耐盐过程中, 比较出萌发期耐盐性较强的品种‘绿能1号’在苗期却对盐敏感。因此, 植物在不同的生育时期可能有不同的耐盐性。目前, 有关甜高粱耐盐性评价的研究大都集中在盐胁迫对萌发期的影响, 但萌发期的耐盐性不能完全代表苗期的耐盐性。由于苗期也是甜高粱对盐胁迫最敏感的时期之一(Almansouri等2001), 是植物在盐碱地上能否生长发育及种群建立的关键时期。因此, 甜高粱苗期耐盐性指标筛选及评价是耐盐种质筛选、耐盐育种及盐碱地种植的关键, 对缓解耕地资源紧张和粮食安全压力有巨大的现实意义, 同时可达到环境改良与经济利用的双重功效。

盐胁迫最明显的效应表现在对植株生长的抑制(Parida和Das 2005)。因此, 生长是评价植物耐盐性的重要指标。De León等(1995)将根长和叶长作为快速鉴定小麦耐盐性的指标; 刘芳等(2008)在鉴定玉米耐盐性时, 采用了叶长、干重和鲜重作为筛选的形态指标; 崔江慧等(2012)通过比较根长、苗高、侧根数、叶片萎蔫情况的变化来对高粱材料耐盐性进行评价。但是, 目前有关甜高粱苗期耐盐性具体快速的筛选评价方法还未见报道, 至今尚未找到能准确、可靠地鉴定出甜高粱耐盐性强弱的指标。刘妍妍等(2014)提出仅用单一的指标来评价抗盐性高低具有片面性, 不能客观地反映植物的真实抗盐性。因此, 为了克服这种弊端, 大量学者开始采用隶属函数值法来综合评价

作物抗逆性的强弱(魏永胜等2005; 张保青等2011; 高山等2014; 闫春娟等2015)。本实验测定了盐胁迫下不同甜高粱品种苗期的相关生理指标, 利用模糊函数值法对甜高粱11个品种进行综合分析, 旨在对供试品种的耐盐性进行评价, 确定哪些(个)耐盐指标更可靠, 为甜高粱耐盐性鉴定提供准确、简便的鉴定方法, 并为甜高粱耐盐性研究提供理论依据。

## 材料与方法

### 1 植物材料及处理

在选用的11个不同甜高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]品种中, ‘甜选171’、‘戴尔’由山东省农业科学院提供, 其他9个品种(表1)由山东师范大学盐生植物种质资源库提供。

表1 不同品种甜高粱的名称及来源

Table 1 The names and sources of different varieties of *S. bicolor*

编号	品种名称	来源
1	‘Mer72-3’	美国
2	‘MN-94’	美国
3	‘Mer72-2’	美国
4	‘T-98’	河北谷子研究所
5	‘济甜杂11-6’	山东省农业科学院
6	‘晋甜杂1号’	山西省农业科学院
7	‘绿能1号’	内蒙古
8	‘济甜杂2号’	山东省农业科学院
9	‘济甜杂3号’	山东省农业科学院
10	‘甜选171’	山东省农业科学院
11	‘戴尔’	美国

挑选籽粒饱满、无病虫害的11个甜高粱品种的种子, 用清水浸种10 h, 分别将每个品种种子均匀播种于装有洗净细砂约6 kg、内径约20 cm、高度约20 cm的塑料盆中, 每盆播种7粒。每天浇水1次, 以浇透为准, 出苗后每天浇施1/2Hoagland营养液。待幼苗长至三叶一心时间苗, 每盆保留4棵。然后用1/2Hoagland营养液配制的100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl溶液对这11个品种的甜高粱幼苗进行处理, 以添加等量的1/2Hoagland营养液(0 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl)为对照, 每个处理设定3盆重复。为避免盐冲击效应, 盐溶液浇灌采用每天递增25 mmol·L<sup>-1</sup>直

至预定浓度, 处理3周。

## 2 耐盐指标的测定

### 2.1 幼苗株高和根长

在盐胁迫处理21 d后, 选取各处理下长势均匀的甜高粱幼苗, 从细砂中小心完整地取出植株, 用清水缓缓地将根部细小砂石轻轻漂去, 用去离子水快速漂洗根部。吸水纸轻轻拭干植株表面水分。用直尺测量株高(植株基部到上部最长叶叶尖的绝对距离)和根长(植株基部到根系形态学最下端的绝对距离), 每个品种每个处理进行4个重复。

### 2.2 幼苗地上部和根部的鲜重、干重

将洗净、拭干后的植株在根茎结合处剪断, 用电子天平分别称量地上部和根部的鲜重。然后, 分别将其装入已经编号的牛皮纸信封, 放于鼓风干燥箱中, 70 °C恒温条件下至恒重, 用电子天平分别称量地上部和根部的干重, 每个处理4个重复。

### 2.3 幼苗叶片最大光化学效率( $F_v'/F_m'$ )和实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )

参考梁芳等(2010)的方法, 用英国Hansatech公司生产的FMS-2型便携调制式荧光仪测定甜高粱叶绿素的荧光参数 $F_v'/F_m'$ 和 $\Phi_{PSII}$ 。植物放于日光下适应至少1 h后, 光合作用达到稳态。选取甜高粱植株从基部起第4片完全展开的功能叶进行测定, 开启荧光仪得到稳态荧光 $F_s$ 。这时再给一个饱和脉冲光(约为15 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  PPF, 时间0.7 s)后关闭, 得到光适应下最大荧光产量( $F_m'$ )和最小荧光产量( $F_o'$ ), 于是可以计算 $F_v'/F_m'=(F_m'-F_o')/F_m'$ , 得到光适应下PSII的 $F_v'/F_m'$ 和 $\Phi_{PSII}=(F_m'-F_s)/F_m'$ 。每个处理至少10个重复。

### 2.4 地上部和根部无机离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ )含量

取甜高粱地上部和根部相同部位0.07 g的干材料, 放入洁净的试管中, 加入10 mL的去离子水, 沸水加热至少4 h。冷却过滤, 用去离子水定容于25 mL的容量瓶中, 用火焰光度计(Flame Photometer 410, UK)测定 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 的浓度, 并计算 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ , 每个处理至少4个重复。

## 3 综合评价方法

综合评价是一种基于模糊数学的综合评价方法, 是根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价, 即用模糊数学对受到盐害影响的多个生理指标做出一个总体耐盐性大小的评价。

利用隶属函数值的方法(邓仁菊等2014)进行各指标综合评价, 计算公式为:  $X(u)=(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$  (董志刚和程智慧2009), 式中,  $X$ 为甜高粱品种的某一指标测定值,  $X_{\max}$ 为所试品种中某一指标测定值的最大值,  $X_{\min}$ 为最小值,  $X(u)$ 表示该指标的隶属值。

在抗盐性评价过程中, 首先计算各个指标在100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl处理下的盐害率, 然后计算出每个指标盐害率的隶属值, 最后将各品种不同指标的盐害率的隶属值累加后求平均值, 即为总函数值, 平均值越大表明其耐盐性越弱。其中, 盐害率是指100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl处理下某一指标与对照相比遭受盐分胁迫的程度, 盐害率越大说明植物受盐害影响越严重, 计算公式为: 盐害率=(对照值-处理值)/对照值 $\times$ 100% (刘妍妍等2014)。

## 4 数据分析

利用SPSS 22.0软件进行平均值间的多重方差检验和苗期各指标盐害率之间的相关分析, 对实验数据进行统计分析并进行 $t$ 检验, 其中,  $P<0.05$ 时为差异显著,  $P<0.01$ 时为差异极显著。

## 实验结果

### 1 盐处理对甜高粱生长的影响

从甜高粱幼苗生长状况来看, 100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl处理下所有品种甜高粱幼苗长势均显著低于对照, 表现为植物生长受到抑制, 植株矮小, 叶片发黄、萎蔫, 叶尖、边缘干枯。同时, 不同品种间也存在一定的差异, 与对照相比, ‘MN-94’长势最弱, 受盐胁迫影响较大, ‘Mer72-2’长势最好, 受到盐胁迫影响较小。

### 2 盐处理对甜高粱鲜重和干重的影响

鲜重、干重、株高和根长是植物重要的生长指标。因此, 其生物量的大小可作为判定耐盐性大小的依据。由图1和2可以看出, 在100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl处理下, 各品种甜高粱的地上部和根部的鲜重和干重都低于对照。在100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl处理下, 除‘戴尔’外, 其他10个品种的单株地上部鲜重和地上部干重均显著降低, 其中, ‘济甜杂3号’受到明显抑制, 仅为对照的23.17%和22.06%, ‘Mer72-2’的单株地上部鲜重和干重相对最高, 是对照的59.06%和62.12%; 甜高粱单株根部鲜重和根部干



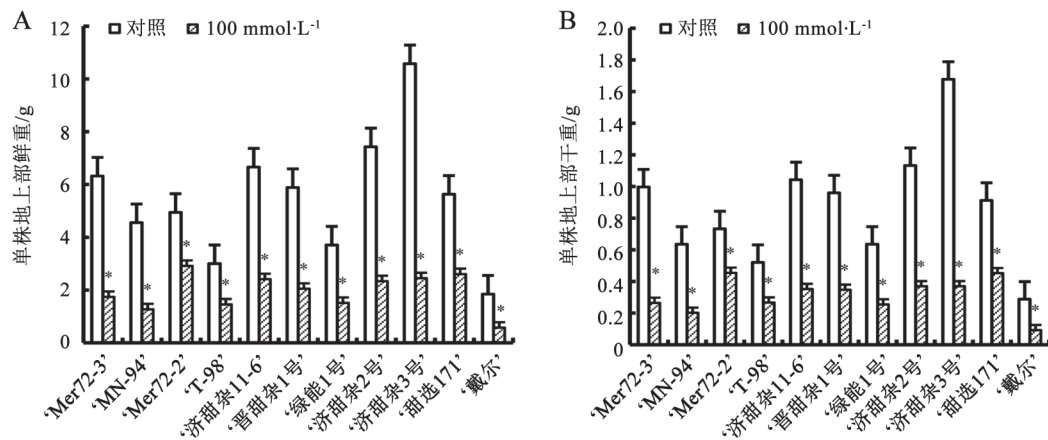


图1 NaCl处理对不同甜高粱品种苗期地上部鲜重(A)和干重(B)的影响

Fig.1 Effect of NaCl treatment on fresh weight (A) and dry weight (B) of shoot of different *S. bicolor* varieties at seedling stage  
\*表示各品种的对照和100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理21 d在P<0.05水平上差异显著; 图2~5同。

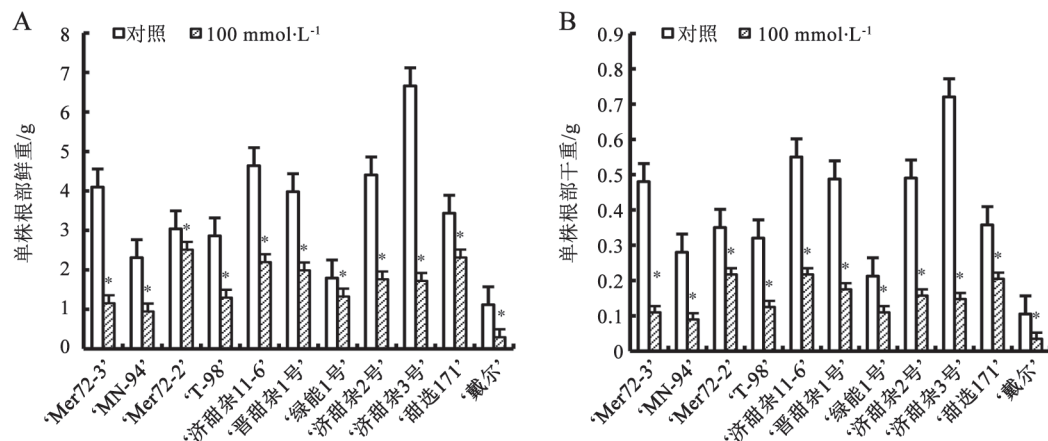


图2 NaCl处理对不同甜高粱品种苗期根部鲜重(A)和干重(B)的影响

Fig.2 Effect of NaCl treatment on fresh weight (A) and dry weight (B) of roots of different *S. bicolor* varieties at seedling stage

重也均显著降低,表现出一定的相似性,‘济甜杂3号’受到抑制最为明显,为对照的25.90%和20.49%,‘Mer72-2’的单株根鲜重和干重相对最高,是对照的82.72%和62.14%。仅从单株鲜重和干重来看,‘Mer72-2’最为耐盐,‘济甜杂3号’则表现出盐敏感。

### 3 盐处理对甜高粱株高和根长的影响

由图3-A可以看出,在100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理下,所有品种甜高粱的株高均显著低于对照;盐处理下‘Mer72-2’的株高为对照的86.52%,植株长势相对最好,‘MN-94’仅为对照的66.29%,长势表现最差。由图3-B可知,在100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl盐处理下,所有品种甜高粱的根长均低于对照组;盐处理下‘甜选171’的根长为对照的95.10%,根长长势相

对最好,‘MN-94’仅为对照的61.47%,根长长势表现最差。从株高和根长来看,‘Mer72-2’和‘甜选171’分别表现为最耐盐,‘MN-94’最为敏感。

### 4 盐处理对甜高粱 $F_v/F_m$ 和 $\Phi_{PSII}$ 的影响

图4显示,100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理下甜高粱叶片的 $F_v/F_m$ 和 $\Phi_{PSII}$ 均下降。盐处理对‘甜选171’叶片 $F_v/F_m$ 的影响最小,为对照组的90.30%,‘济甜杂2号’降低程度最大,为对照的70.71%;‘MN-94’叶片的 $\Phi_{PSII}$ 受影响最小,为对照的95.83%,‘济甜杂2号’降低程度最大,为对照的63.76%。造成此现象的原因可能是,盐处理条件下反应中心受到了破坏,改变了甜高粱叶片光系统的光化学效率和激发能的分配。

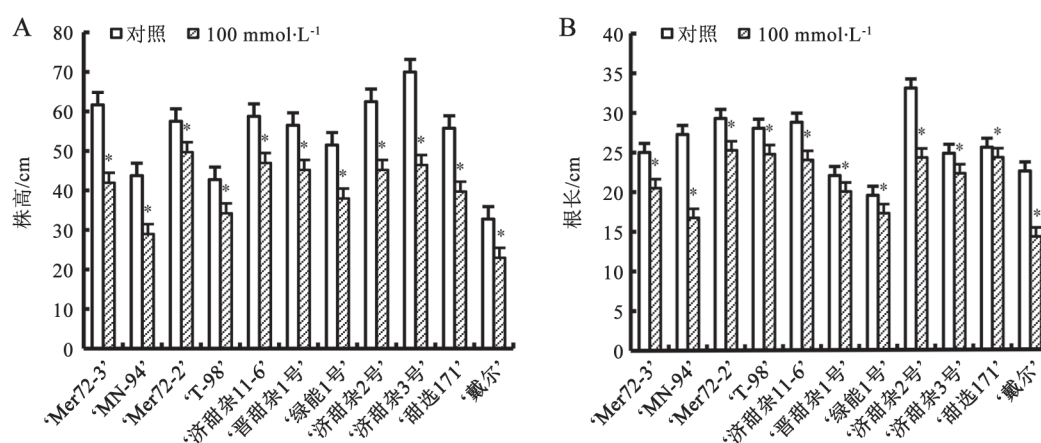
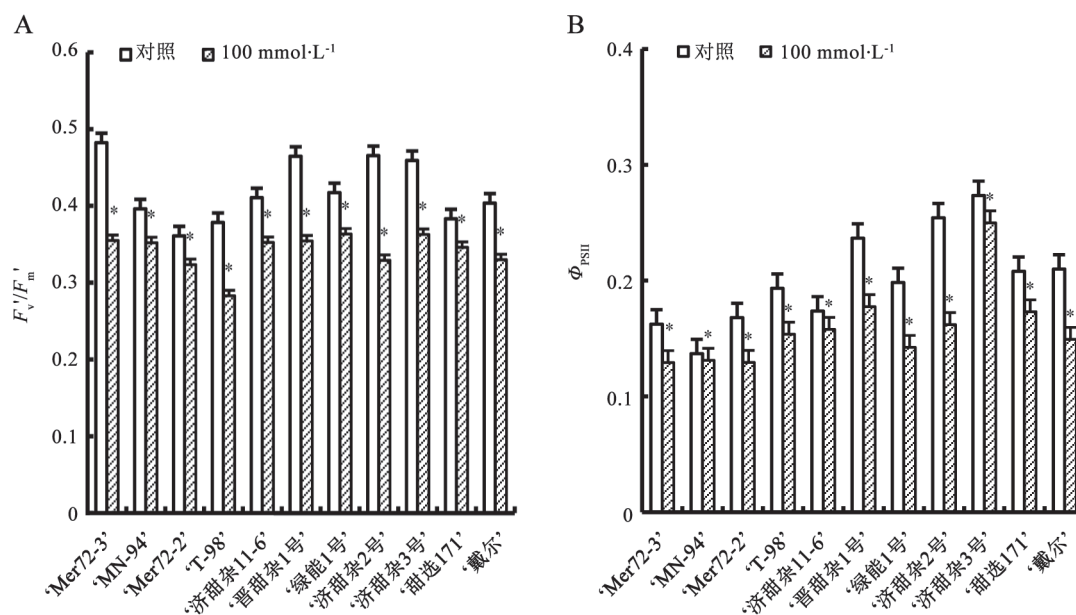


图3 NaCl处理对不同甜高粱品种苗期株高(A)和根长(B)的影响

Fig.3 Effect of NaCl treatment on plant height (A) and root length (B) of different *S. bicolor* varieties at seedling stage图4 NaCl处理对不同甜高粱品种苗期 $F_v'/F_m'$  (A)和 $\Phi_{PSII}$  (B)的影响Fig.4 Effect of NaCl treatment on the  $F_v'/F_m'$  (A) and  $\Phi_{PSII}$  (B) of different *S. bicolor* varieties at seedling stage

## 5 盐处理对甜高粱根部和地上部 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 含量的影响

由表2可以看出, 盐处理下甜高粱根部的 $\text{Na}^+$ 含量明显升高, 外界环境中的 $\text{Na}^+$ 通过根的吸收作用大量进入植物体内, 导致根的 $\text{Na}^+$ 含量显著增加。100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl处理下, 'MN-94'根部 $\text{Na}^+$ 含量增加幅度最大, 与对照相比增加到4.13倍, 'Mer72-2'增加幅度最小, 仅为2.17倍。盐处理下根部的 $\text{K}^+$ 含量随着 $\text{Na}^+$ 的增加而降低, '甜选171'降低幅度最小, 为对照的97.22%, 'Mer72-2'降低幅度最

大, 为对照的40.16%。

甜高粱地上部的 $\text{Na}^+$ 含量也在盐处理下明显升高, 由根吸收的 $\text{Na}^+$ 向上运输进入植物地上部, 导致 $\text{Na}^+$ 含量显著增加, 但均低于根部的含量。100  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl处理下, 'T-98'地上部 $\text{Na}^+$ 含量增加幅度最大, 与对照相比增加到28.95倍, '甜选171'增加幅度最小, 仅为8.17倍。盐处理下甜高粱地上部的 $\text{K}^+$ 含量随着 $\text{Na}^+$ 的增加而降低, 'T-98'根部的 $\text{K}^+$ 含量降低幅度最小, 为对照的95.32%, '绿能1号'降低幅度最大, 为对照的66.17%。

表2 NaCl处理对不同甜高粱品种苗期Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>含量的影响Table 2 Effect of NaCl treatment on Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> contents of different *S. bicolor* varieties at seedling stage

NaCl浓度/ mmol·L <sup>-1</sup>	品种	根部		地上部		
		Na <sup>+</sup> 含量/ mmol·g <sup>-1</sup> (DW)	K <sup>+</sup> 含量/ mmol·g <sup>-1</sup> (DW)	Na <sup>+</sup> 含量/ mmol·g <sup>-1</sup> (DW)	K <sup>+</sup> 含量/ mmol·g <sup>-1</sup> (DW)	
0	‘Mer72-3’	0.219±0.011 <sup>gh</sup>	0.669±0.050 <sup>ab</sup>	0.034±0.008 <sup>h</sup>	0.765±0.045 <sup>ef</sup>	
	‘MN-94’	0.237±0.007 <sup>efgh</sup>	0.654±0.036 <sup>ab</sup>	0.040±0.007 <sup>h</sup>	0.832±0.031 <sup>cd</sup>	
	‘Mer72-2’	0.291±0.011 <sup>e</sup>	0.691±0.059 <sup>a</sup>	0.034±0.007 <sup>h</sup>	0.755±0.076 <sup>efg</sup>	
	‘T-98’	0.198±0.014 <sup>gh</sup>	0.507±0.038 <sup>c</sup>	0.019±0.006 <sup>h</sup>	0.660±0.039 <sup>hij</sup>	
	‘济甜杂11-6’	0.259±0.016 <sup>ef</sup>	0.623±0.036 <sup>b</sup>	0.029±0.002 <sup>h</sup>	0.640±0.054 <sup>ijk</sup>	
	‘晋甜杂1号’	0.195±0.029 <sup>h</sup>	0.495±0.028 <sup>c</sup>	0.034±0.006 <sup>h</sup>	0.700±0.053 <sup>fghi</sup>	
	‘绿能1号’	0.231±0.011 <sup>gh</sup>	0.646±0.039 <sup>ab</sup>	0.026±0.007 <sup>h</sup>	0.701±0.059 <sup>fghi</sup>	
	‘济甜杂2号’	0.241±0.018 <sup>efgh</sup>	0.671±0.047 <sup>ab</sup>	0.038±0.007 <sup>h</sup>	0.688±0.045 <sup>ghi</sup>	
	‘济甜杂3号’	0.258±0.013 <sup>efg</sup>	0.626±0.035 <sup>b</sup>	0.045±0.006 <sup>h</sup>	0.957±0.023 <sup>a</sup>	
	‘甜选171’	0.208±0.010 <sup>gh</sup>	0.482±0.032 <sup>c</sup>	0.035±0.007 <sup>h</sup>	0.875±0.043 <sup>bc</sup>	
	‘戴尔’	0.251±0.015 <sup>efgh</sup>	0.665±0.012 <sup>ab</sup>	0.132±0.010 <sup>g</sup>	0.915±0.036 <sup>ab</sup>	
	100	‘Mer72-3’	0.865±0.068 <sup>b</sup>	0.369±0.049 <sup>de</sup>	0.405±0.039 <sup>cd</sup>	0.729±0.010 <sup>efgh</sup>
		‘MN-94’	0.979±0.091 <sup>a</sup>	0.402±0.040 <sup>d</sup>	0.537±0.048 <sup>b</sup>	0.746±0.032 <sup>efg</sup>
‘Mer72-2’		0.632±0.039 <sup>d</sup>	0.277±0.018 <sup>f</sup>	0.315±0.047 <sup>ef</sup>	0.589±0.041 <sup>k</sup>	
‘T-98’		0.659±0.037 <sup>d</sup>	0.288±0.033 <sup>f</sup>	0.536±0.090 <sup>b</sup>	0.629±0.064 <sup>ijk</sup>	
‘济甜杂11-6’		0.655±0.043 <sup>d</sup>	0.283±0.020 <sup>f</sup>	0.289±0.047 <sup>f</sup>	0.591±0.067 <sup>jk</sup>	
‘晋甜杂1号’		0.723±0.064 <sup>c</sup>	0.363±0.026 <sup>de</sup>	0.349±0.092 <sup>de</sup>	0.637±0.030 <sup>ijk</sup>	
‘绿能1号’		0.730±0.054 <sup>c</sup>	0.360±0.020 <sup>de</sup>	0.372±0.010 <sup>cd</sup>	0.464±0.044 <sup>l</sup>	
‘济甜杂2号’		0.680±0.019 <sup>cd</sup>	0.357±0.032 <sup>de</sup>	0.356±0.034 <sup>de</sup>	0.647±0.012 <sup>ijk</sup>	
‘济甜杂3号’		0.816±0.044 <sup>b</sup>	0.412±0.028 <sup>d</sup>	0.422±0.039 <sup>c</sup>	0.748±0.029 <sup>efg</sup>	
‘甜选171’		0.852±0.025 <sup>b</sup>	0.469±0.009 <sup>c</sup>	0.286±0.014 <sup>f</sup>	0.690±0.028 <sup>ghi</sup>	
‘戴尔’		0.864±0.015 <sup>b</sup>	0.329±0.059 <sup>ef</sup>	0.744±0.041 <sup>a</sup>	0.777±0.023 <sup>de</sup>	

差异显著性分析用Duncan检验法, 同列不同小写字母表示对照和100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理差异显著( $P < 0.05$ )。

由图5-A可以看出, 100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理后, 甜高粱根部的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>显著下降, ‘甜选171’降低幅度最小, 为对照的23.75%, ‘Mer72-3’降低幅度最大, 为对照的13.88%。100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理下, 甜高粱地上部的K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>也显著下降, ‘济甜杂2号’降低幅度最小, 为对照的9.79%, ‘T-98’降低幅度最大, 仅为对照的3.12% (图5-B)。

## 6 不同品种甜高粱耐盐性的综合评价

以上结果表明, 不同品种甜高粱的不同生长和生理指标对盐胁迫相应差别很大, 很难用某一指标评价其耐盐性。通过模糊数学隶属函数对11个品种甜高粱材料苗期10个指标的盐害率的隶属函数值进行综合评价, 从而评价甜高粱苗期的耐盐性。甜高粱品种苗期耐盐性排序如下: ‘Mer72-2’ > ‘甜选171’ > ‘济甜杂11-6’ > ‘绿能1号’ > ‘晋甜杂1号’ > ‘T-98’ > ‘济甜杂3号’ > ‘MN-94’ > ‘济甜杂2号’ > ‘戴尔’ > ‘Mer72-3’ (表3)。

对11个不同品种甜高粱盐害率的隶属函数值进行相关性分析, 结果显示, 甜高粱苗期地上部鲜重、根部鲜重、地上部干重、根部干重的相关性互为极显著水平, 株高与地上部鲜重和地上部干重呈极显著相关( $P < 0.01$ ); 株高与根部鲜重、根部干重,  $F_v'/F_m'$ 与根部鲜重、根部干重, 根长与根部K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>均达到显著相关水平( $P < 0.05$ )。各指标的盐害率隶属函数值与总盐害隶属函数值均表现正相关。与总隶属函数值达极显著相关水平的有地上部鲜重、根部鲜重、地上部干重、根部干重的盐害率隶属函数值, 其相关系数分别为0.839<sup>\*\*</sup>、0.887<sup>\*\*</sup>、0.814<sup>\*\*</sup>、0.895<sup>\*\*</sup>, 与株高、根长、 $F_v'/F_m'$ 、根部K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>的盐害率隶属函数值的相关性达到显著性差异水平, 其相关系数分别为0.672<sup>\*</sup>、0.608<sup>\*</sup>、0.638<sup>\*</sup>、0.630<sup>\*</sup>。相关系数最高的是根部干重, 为0.895, 最低的 $\Phi_{PSII}$ 为0.084 (表4)。总盐害隶属函数值与根部干重盐害率隶属函数值相关性

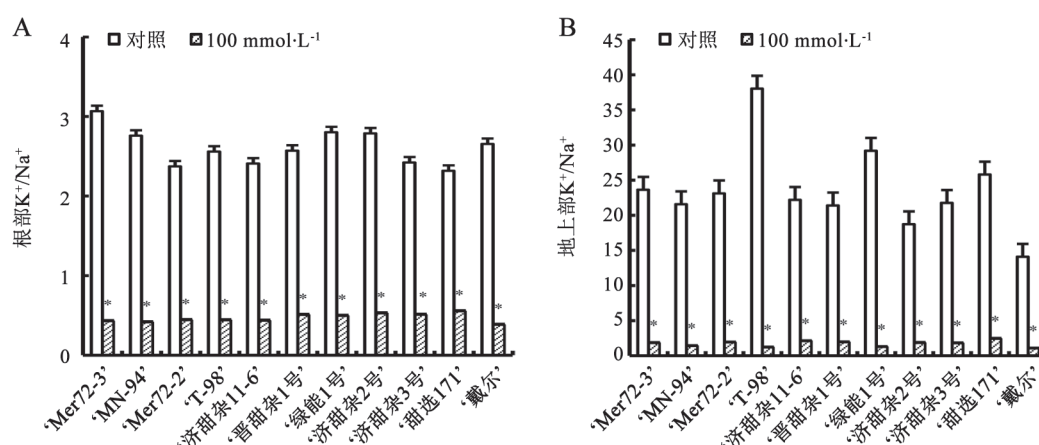
图5 NaCl处理对不同甜高粱品种苗期根部 $K^+/Na^+$  (A)和地上部 $K^+/Na^+$  (B)的影响Fig.5 Effect of NaCl treatment on  $K^+/Na^+$  of roots (A) and shoot (B) of different *S. bicolor* varieties at seedling stage

表3 不同甜高粱品种各指标盐害率的隶属函数值及耐盐顺序

Table 3 Subordinate function values of salt damage rates of all indexes and salt tolerance order of different *S. bicolor* varieties

品种	地上部鲜重	根部鲜重	地上部干重	根部干重	株高	根长	$F_v'/F_m'$	$\Phi_{PSII}$	根部 $K^+/Na^+$	地上部 $K^+/Na^+$	总隶属值	耐盐顺序
'Mer72-2'	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.261	0.034	0.586	0.531	0.242	0.165	1
'甜选171'	0.356	0.268	0.313	0.115	0.752	0.000	0.000	0.394	0.000	0.060	0.226	2
'济甜杂11-6'	0.636	0.621	0.707	0.542	0.322	0.346	0.228	0.154	0.589	0.057	0.420	3
'绿能1号'	0.505	0.152	0.548	0.249	0.629	0.197	0.164	0.749	0.623	0.826	0.464	4
'晋甜杂1号'	0.675	0.575	0.647	0.630	0.318	0.125	0.716	0.648	0.418	0.124	0.487	5
'T-98'	0.294	0.656	0.266	0.554	0.317	0.199	0.792	0.508	0.676	1.000	0.526	6
'济甜杂3号'	1.000	1.000	1.000	1.000	0.993	0.155	0.576	0.139	0.290	0.239	0.639	7
'MN-94'	0.866	0.731	0.755	0.720	1.000	1.000	0.072	0.000	0.896	0.497	0.654	8
'济甜杂2号'	0.770	0.751	0.735	0.720	0.698	0.643	1.000	1.000	0.500	0.000	0.682	9
'戴尔'	0.773	0.986	0.747	0.692	0.805	0.945	0.437	0.771	0.957	0.353	0.747	10
'Mer72-3'	0.878	0.957	0.887	0.942	0.910	0.389	0.853	0.507	1.000	0.317	0.764	11

表4 NaCl处理下不同甜高粱品种苗期各指标盐害率隶属函数值的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of subordinate function values of salt damage rates of all indexes of different *S. bicolor* varieties at seedling stage under NaCl treatment

项目	地上部鲜重	根部鲜重	地上部干重	根部干重	株高	根长	$F_v'/F_m'$	$\Phi_{PSII}$	根部 $K^+/Na^+$	地上部 $K^+/Na^+$	总隶属值
地上部鲜重	1.000										
根部鲜重	0.839**	1.000									
地上部干重	0.987**	0.817**	1.000								
根部干重	0.895**	0.949**	0.882**	1.000							
株高	0.789**	0.623*	0.737**	0.613*	1.000						
根长	0.436	0.465	0.366	0.372	0.404	1.000					
$F_v'/F_m'$	0.413	0.616*	0.417	0.670*	0.116	0.024	1.000				
$\Phi_{PSII}$	-0.216	-0.160	-0.199	-0.187	-0.243	0.013	0.432	1.000			
根部 $K^+/Na^+$	0.293	0.417	0.287	0.400	0.173	0.704*	0.206	0.060	1.000		
地上部 $K^+/Na^+$	-0.216	-0.095	-0.224	-0.065	-0.029	0.011	-0.008	0.005	0.402	1.000	
总隶属值	0.839**	0.887**	0.814**	0.895**	0.672*	0.608*	0.638*	0.084	0.630*	0.126	1.000

\*和\*\*分别表示100 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理21 d两个指标之间在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上呈显著和极显著相关。



最高,因此,可以用根部干重作为甜高粱苗期筛选耐盐品种的一个指标。

## 讨 论

柴媛媛等(2008)用隶属函数法对甜高粱萌发期的耐盐性进行了综合评价,得出10个品种甜高粱的耐盐顺序,认为隶属函数法是一种较为理想的评价方法,为今后甜高粱耐盐性的进一步鉴定提供了借鉴。戴凌燕等(2011)在不同盐碱浓度处理下对7个甜高粱品种进行比较,采用隶属函数法评价并提出在植物耐盐性鉴定中须运用多个指标进行综合评价。王秀玲等(2010)用模糊数学隶属函数方法综合评价了甜高粱萌发期的耐盐性,并提出了8个指标作为耐盐性筛选的候选指标,但它们不能完全作为苗期的筛选指标。崔江慧等(2012)通过综合研究发芽期和幼苗期多项指标建立了一套高粱耐盐性评价方法,但苗期指标仅用叶片萎蔫状况计分具有片面性,且观测时间较长,不具有可操作性。高建明等(2012)用株高和地上部鲜重评价了66份高粱种质材料,并没有提出可靠的评价方法和筛选指标。丛靖宇等(2010)用鲜重、株高、叶绿素含量和脯氨酸含量等耐盐生理生化指标评价了3个品种甜高粱,但其指标方法不适合大量种质筛选且用某一指标单独评价具有片面性。本研究综合了苗期株高、根长、鲜重和干重等10个筛选指标的隶属函数值进行了评价,并将总隶属函数值与各个筛选指标进行相关性分析,其中根干重盐害率的隶属值与总隶属函数值相关性最高( $r=0.895$ ),达到极显著水平( $P<0.01$ ),可将其作为甜高粱苗期筛选耐盐品种的一个可靠指标。

株高、根长、干重、鲜重等指标是植物体生长状况最直接的反映,生物量是耐盐性评价中最直观、最可靠、最有说服力的证据(Huang等2012)。盐胁迫主要是渗透胁迫(Munns 2002)和离子胁迫(Parida和Das 2005)对植物造成影响,使得植物的地上部和根的鲜重和干重等生物量显著降低(Mahmood等2010)。生长环境中过量的盐分会降低植物体干物质的积累(Gaballah和Gomaa 2004),同时高盐也会抑制地下根部的正常生长(Pervais等2002)。通过实验发现,盐处理后根的生长受到明显抑制,‘济甜杂3号’根鲜重和干重的盐

害率分别高达74.10%和79.51%,相关性分析表明根干重的盐害率隶属值与总隶属值极显著相关。总隶属函数值的大小可以反映甜高粱耐盐性强弱。因此,可将根干重作为甜高粱耐盐性筛选的重要参考指标。

Deisenhofer称光合作为地球上最重要的化学反应(沈允钢2006),为植物生长发育提供物质和能量,是植物生长发育的基础。Powles (1984)的研究证明盐胁迫可使光合系统结构受损,导致叶绿体吸能和传递能力下降,反应中心不能得到充分的激发能,PSII的电子传递速率显著下降。因此,测定光合荧光参数的变化可以反映盐处理对甜高粱光合系统的伤害程度,是诊断光合系统运转状况、分析植物对逆境响应机理的重要途径(林世青等1992)。本实验测得盐处理后叶绿体 $F_v'/F_m'$ 和 $\Phi_{PSII}$ 均下降,光合系统PSII光能转化效率降低,说明光反应中心可能受到了破坏,改变了甜高粱叶片光系统的光化学效率和激发能的分配;与葛江丽等(2007)的研究结果一致。盐胁迫下,甜高粱耐盐品种‘Mer72-2’的地上部鲜重与其他品种比较相对最高,是对照的59.06%,为最耐盐;而其 $F_v'/F_m'$ 是对照的89.65%,与其他品种相比受到盐胁迫影响较小,这说明‘Mer72-2’光合反应中心的结构和功能受到影响较小,叶片还能通过光合作用积累物质,因此其地上部鲜重相对最高,耐盐性表现最好。

盐胁迫下细胞内离子平衡破坏的一个典型现象是 $K^+/Na^+$ 降低(Drew和Läuchli 1985),甜高粱在盐处理下根部和地上部的 $K^+/Na^+$ 明显降低,可见,过量的 $Na^+$ 通过根系的吸收进入植株造成 $Na^+$ 大量积累,降低了根和地上部的 $K^+/Na^+$ ,造成胞质中 $Na^+$ 过多,打破细胞内的离子稳态,影响植物细胞的正常代谢;与王殿等(2012)的研究结果一致。盐敏感品种‘Mer72-3’根的 $K^+/Na^+$ 下降幅度最大,高达86.12%,说明 $Na^+$ 大量地进入植物细胞破坏了离子平衡,严重影响了植物的正常生长,造成该品种生物量积累少,表现为最不耐盐。王宝山等(2000)认为,禾本科植物高粱具有拒 $Na^+$ 特性,在一定程度盐胁迫下,根中 $Na^+$ 含量明显高于地上部。本文结果表明,盐处理下甜高粱根部 $Na^+$ 含量升高, $K^+$ 含量降低, $K^+/Na^+$ 下降;地上部 $Na^+$ 含量升高, $K^+$ 含量



降低,  $K^+/Na^+$ 降低。根部的 $Na^+$ 含量显著高于地上部, 在盐胁迫下甜高粱将大量的 $Na^+$ 聚集在地下部分根中, 避免向地上部运输而造成伤害, 是典型的拒盐植物。耐盐品种‘甜选171’地上部 $K^+/Na^+$ 下降幅度较小, 说明其具有较高的拒盐特性, 能阻碍根部大量的 $Na^+$ 和 $K^+$ 向地上部运输, 维持地上部的离子平衡, 因而其 $F_v'/F_m'$ 受盐胁迫影响最小, 保证光合作用得以进行, 能积累出较多的生物量, 从而表现出耐盐。因此, 苗期耐盐性鉴定有助于甜高粱耐盐品种的选育, 至于甜高粱品种苗期耐盐性是否与其拒 $Na^+$ 有关及相关机理, 还有待进一步研究。

隶属函数值法是一种在多个指标测定的基础上对测试材料进行综合评价, 将其应用于甜高粱耐盐品种的筛选, 更具科学性和可靠性。本实验选择了10个测试耐盐指标, 能够从不同的角度反映出甜高粱苗期耐盐性的强弱, 避免了使用单一评价指标进行评价的不准确性。研究还发现根部干重可作为甜高粱苗期筛选耐盐品种的参考指标, 是一个能反映耐盐性大小的理想指标, 该方法为今后甜高粱种质的快速筛选提供了依据。

### 参考文献

柴媛媛, 史团省, 谷卫彬(2008). 种子萌发期甜高粱对盐胁迫的响应及其耐盐性综合评价分析. 种子, 27 (2): 43~47

丛靖宇, 张焯, 杨冠宇, 田瑞华, 段开红, 王瑞刚(2010). 不同品种甜高粱幼苗的耐盐能力. 中国农学通报, 26 (19): 128~135

崔江慧, 谢登磊, 常金华(2012). 高粱材料耐盐性综合评价方法的初步建立与验证. 植物遗传资源学报, 13 (1): 35~41

戴凌燕, 张立军, 张成才(2011). 苏打盐碱胁迫对甜高粱种子萌发的影响及品种耐性综合评价. 种子, 30 (10): 28~32

邓仁菊, 范建新, 王永清, 金吉芬, 刘涛(2014). 火龙果幼苗对低温胁迫的生理响应及其抗寒性综合评价. 植物生理学报, 50 (10): 1529~1534

董志刚, 程智慧(2009). 番茄品种资源芽苗期和幼苗期的耐盐性及耐盐指标评价. 生态学报, 29 (3): 1348~1355

高建明, 夏卜贤, 袁庆华(2012). 高粱种质材料幼苗期耐盐碱性评价. 应用生态学报, 23 (5): 1303~1310

高山, 钟开勤, 许端祥, 林碧英, 陈中钲, 钟凤林(2014). 不同基因型苦瓜幼苗耐低温弱光综合评价及鉴定指标筛选. 热带作物学报, 35 (11): 2191~2198

葛江丽, 石雷, 谷卫彬, 唐宇丹, 张金政, 姜闯道, 任大明(2007). 盐胁迫条件下甜高粱幼苗的光合特性及光系统II功能调节. 作物学报, 33 (8): 1272~1278

梁芳, 郑成淑, 孙宪芝, 王文莉(2010). 低温弱光胁迫及恢复对切花菊光合作用和叶绿素荧光参数的影响. 应用生态学报, 21 (1): 29~35

林世青, 许春辉, 张其德, 徐黎, 毛大璋, 匡廷云(1992). 叶绿素荧光

动力学在植物抗性生理学、生态学和农业现代化中的应用. 植物学通报, 9 (1): 1~16

刘芳, 付艳, 高树仁, 王振华(2008). 玉米幼苗的盐胁迫反应及玉米耐盐性的鉴定. 黑龙江八一农垦大学学报, 19 (6): 22~26

刘吉利, 吴娜(2014). 龟裂碱土对不同基因型甜高粱幼苗生长和生理特性的影响. 草业学报, 23 (5): 208~213

刘妍妍, 吴纪中, 许璋阳, 沈振国, 夏妍, 王桂萍, 陈亚华(2014). 人工海水胁迫下小麦芽期和苗期的耐盐性鉴定方法. 植物生理学报, 50 (2): 214~222

沈允钢(2006). 光合作用. 中国生物学文摘, 20 (2): 1

王宝山, 邹琦, 赵可夫(2000). NaCl胁迫对高粱不同器官离子含量的影响. 作物学报, 26 (6): 845~850

王殿, 袁芳, 王宝山, 陈敏(2012). 能源植物杂交狼尾草对NaCl胁迫的响应及其耐盐阈值. 植物生态学报, 36 (6): 572~577

王秀玲, 程序, 李桂英(2010). 甜高粱耐盐材料的筛选及芽苗期耐盐性相关分析. 中国生态农业学报, 18 (6): 1239~1244

魏永胜, 梁宗锁, 山仑, 张辰露(2005). 利用隶属函数值法评价苜蓿抗旱性. 草业科学, 22 (6): 33~36

闫春娟, 宋书宏, 王文斌, 王昌陵(2015). 大豆耐旱种质的鉴定. 大豆科学, 34 (1): 163~167

杨劲松(2008). 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 45 (5): 837~845

杨文华(2004). 甜高粱在我国绿色能源中的地位. 中国糖料, (3): 57~59

张保青, 杨丽涛, 李杨瑞(2011). 自然条件下甘蔗品种抗寒生理生化特性的比较. 作物学报, 37 (3): 496~505

张国伟, 路海玲, 张雷, 陈兵林, 周治国(2011). 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选. 应用生态学报, 22 (8): 2045~2053

张云华, 孙守均, 王云, 宋桂云, 王翠花, 白金明(2004). 高粱萌发期和苗期耐盐性研究. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 19 (3): 300~302

周美利, 程然然, 范海, 王宝山(2012). 不同品种(系)甜高粱萌发期和苗期耐盐性研究. 现代农业科技, (4): 57~59

Almansouri M, Kinet J-M, Lutts S (2001). Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). Plant Soil, 231 (2): 243~254

Ashraf M (2002). Salt tolerance of cotton: some new advances. Crit Rev Plant Sci, 21 (1): 1~30

De León JLD, Carrillo-Laguna M, Rajaram S, Mujeeb-Kazi A (1995). Rapid *in vitro* screening of some salt tolerant bread wheats. Cereal Res Commun, 23 (4): 383~389

Drew MC, Läuchli A (1985). Oxygen-dependent exclusion of sodium ions from shoots by roots of *Zea mays* (cv Pioneer 3906) in relation to salinity damage. Plant Physiol, 79 (1): 171~176

Gaballah M, Gomaa A (2004). Performance of faba bean varieties grown under salinity stress and biofertilized with yeast. J Appl Sci, 4 (1): 93~99

Huang Z, Long X, Wang L, Kang J, Zhang Z, Zed R, Liu Z (2012). Growth, photosynthesis and  $H^+$ -ATPase activity in two Jerusalem artichoke varieties under NaCl-induced stress. Process Biochem, 47 (4): 591~596

Jiang Y, Deyholos MK (2006). Comprehensive transcriptional profiling of NaCl-stressed *Arabidopsis* roots reveals novel classes of responsive genes. BMC Plant Biol, 6 (1): 25

- Mahmood T, Iqbal N, Raza H, Qasim M, Ashraf MY (2010). Growth modulation and ion partitioning in salt stressed sorghum (*Sorghum bicolor* L.) by exogenous supply of salicylic acid. *Pak J Bot*, 42 (5): 3047~3054
- Munns R (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ*, 25 (2): 239~250
- Munns R (2005). Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytol*, 167 (3): 645~663
- Munns R, Tester M (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol*, 59: 651~681
- Parida AK, Das AB (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotox Environ Safe*, 60 (3): 324~349
- Pervaiz Z, Afzal M, Xi S, Xiaoe Y, Ancheng L (2002). Physiological parameters of salt tolerance in wheat. *Asian J Plant Sci*, 1 (4): 478~481
- Powles SB (1984). Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. *Ann Rev Plant Physiol*, 35 (1): 15~44
- Shannon M (1985). Principles and strategies in breeding for higher salt tolerance. *Plant Soil*, 89 (1): 227~241
- Vasilakoglou I, Dhima K, Karagiannidis N, Gatsis T (2011). Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. *Field Crops Res*, 120 (1): 38~46