

文章编号: 0455-2059(2014)01-0101-06

盐胁迫对垂穗披碱草幼苗生理指标的影响

杨月娟^{1,2}, 周华坤¹, 王文颖³, 殷恒霞³, 姚步青¹, 余欣超^{1,2},
赵新全¹, 王发刚⁴

1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 8100011
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 青海师范大学生命与地理科学学院, 西宁 810008
4. 青海省畜牧兽医职业技术学院, 青海 湟源 812000

摘要: 采用不同浓度NaCl溶液(0, 50, 150, 250 mmol/L)处理萌发的垂穗披碱草幼苗, 通过检测垂穗披碱草在盐胁迫逆境下生理生化的变化, 并与老芒麦进行比较, 研究其幼苗对盐胁迫的反馈机制, 为垂穗披碱草在盐碱地的建植和恢复改良提供参考. 结果表明: 垂穗披碱草叶片可溶性糖质量分数和过氧化氢酶活性变化一致, 随着盐浓度的增加呈现先上升后下降的趋势, 50 mmol/L NaCl 是其幼苗可溶性糖质量分数和过氧化氢酶活性的一个转折临界点; 相对含水量、脯氨酸质量分数和超氧化物歧化酶活性变化一致, 随着盐浓度的增加呈现上升趋势, 分别在150, 250 mmol/L 盐浓度胁迫下, 垂穗披碱草幼苗相对含水量、脯氨酸质量分数和超氧化物歧化酶活性显著高于其他材料的. 方差分析结果表明盐胁迫对垂穗披碱草、老芒麦的生理指标影响显著. 经相关分析筛选出对抗盐性影响显著的指标为相对含水量、可溶性糖质量分数、脯氨酸质量分数、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性. 经隶属函数法计算得出, 垂穗披碱草具有一定的抗盐性, 而且较老芒麦的强.

关键词: 垂穗披碱草; 耐盐性; 脯氨酸; 可溶性糖; 抗氧化酶

中图分类号: Q945

文献标识码: A

Effect of salt stress on the physiological characteristics of *Elymus nutans*

YANG Yue-juan^{1,2}, ZHOU Hua-kun¹, WANG Wen-ying³, YIN Heng-xia³,
YAO Bu-qing¹, YU Xin-chao^{1,2}, ZHAO Xin-quan¹, WANG Fa-gang⁴

1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. College of Life and Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China
4. Qinghai Animal Husbandry & Veterinary College, Huangyuan 812100, Qinghai, China

Abstract: Compared with those of *Elymus sibiricus*, the growth parameters of *Elymus nutans* at the early seedling stage were measured under four NaCl solutions with different concentrations (0, 50, 150, 250 mmol/L) and salt treatment was performed to explore and utilize the germplasm with high salt-tolerance and to provide physiological indicators for identifying salt-tolerance. It was found that the soluble sugar content and the activities of CAT were increasing at first and then declining with prolonged salt stress; a critical turning point occurred under the salt stress at 150 mmol/L, the relative water content, the proline content and the activities of SOD increased continually with NaCl stress concentration being increased, and accessions were higher than

收稿日期: 2013-05-23; 修回日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31172247, 41030105, 31260127); 国家自然科学基金青年基金项目(31201836); 中国科学院战略性先导科技专项子课题项目(XDA05070202); 国家科技支撑课题专项项目(2011BAC09B06-02); 青海省重点实验室发展专项资金计划项目(2013-Z-Y07); 青海省科技厅国际合作项目(2010-H-809)

作者简介: 周华坤(1974-), 男, 青海乐都人, 研究员, 博士, e-mail: 729492987@qq.com, 研究方向为高寒草地恢复生态学, 通信联系人.

the others when the salt concentration was at 150 mmol/L and 250 mmol/L. Statistics analysis showed that the effects were different for *E. nutans* and *E. sibiricus* under salt stress. Correlation analysis indicated that the indices which had significant impact on salt resistance were the relative water content, soluble sugar content, proline content, and the activities of SOD and CAT. Calculated by the membership function, the salt-resistant ability of *E. nutans* was better than that of *E. sibiricus*.

Key words: *Elymus nutans*; salt tolerance; proline; soluble sugar; antioxidase

青藏高原盐碱地比较多,如柴达木盆地和环青海湖地区,大片的盐碱地没能充分利用。在盐碱地上种植耐盐碱的优良牧草,既可以充分利用土地发展畜牧业又可以美化环境、防风固沙,因而,探明乡土牧草的抗盐机制、寻求解决盐渍化问题对策已经成为研究热点^[1-2]。

披碱草属(*Elymus* spp.)饲用价值很高,具有很好的抗逆性,在中国分布广泛^[3]。垂穗披碱草(*Elymus nutans*)为禾本科牧草,属多年生优良牧草,具有麦类作物所缺乏的抗病、抗虫、抗旱、耐盐等优良抗逆基因^[4-5],但是关于其耐盐性的研究较少^[6]。目前,有关盐分对禾草种子发芽的影响研究较多^[7-8],针对野生植物种质资源耐盐性评价多采用表型指标(分蘖、株高、生物量等),且多采用单一指标,不能真实地反映植物的耐盐性。因此需要建立一套客观评价牧草耐盐性的方法,对高寒地区牧草种质资源的耐盐性进行综合评价^[9-10]。本文以披碱草属模式种老芒麦(*Elymus sibiricus*)幼苗为比较对象,采取人工模拟不同浓度盐胁迫处理,研究在不同盐浓度处理条件下,垂穗披碱草相对含水量、可溶性糖质量分数、脯氨酸质量分数及抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化氢酶)活性的变化,对于初步阐明垂穗披碱草幼苗对盐胁迫的反馈机制,具有一定的意义,旨在为垂穗披碱草耐盐性评价及苗期耐盐性快速准确鉴定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于2007-2008年在中国科学院高原生物适应与进化重点实验室进行。供试垂穗披碱草种子由农业部牧草与草坪草种子质检中心(兰州)提供,于2007年采收自位于青海省海南州同德县的青海省牧草良种繁殖场,为成熟饱满的种子。

1.2 试验方法

用蒸馏水分别配制浓度为0, 50, 150, 250 mmol/L的NaCl溶液。种子用7%NaClO消毒后均采用纸上发芽法,取萌发一周的幼苗进行处理,每次处理50粒种子,3次重复,处理培养时间看表型而定^[11]。

1.3 测定方法

叶片相对含水量采用饱和称重法^[12],可溶性糖的测定采用蒽酮比色法^[13],脯氨酸质量分数的测定采用酸性茚三酮法^[12],超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[12],以抑制NBT光化还原的50%为一个酶活性单位表示,过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用紫外分光光度法^[13],以A240变化0.01/min为一个酶活性单位。

耐盐性评价应用模糊数学中的隶属函数值法^[6],以相对含水量、可溶性糖质量分数、脯氨酸质量分数、SOD活性、CAT活性等指标进行综合评价。

隶属函数值计算公式为

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}).$$

如果为负相关,则用反隶属函数进行转换,计算公式为

$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}).$$

其中, Z_{ij} 表示*i*物种*j*指标的抗盐隶属函数值, X_{ij} 表示*i*物种*j*指标的测定值, X_{imax} , X_{imin} 分别表示各物种中测定的指标的最大值和最小值。

1.4 数据处理与分析

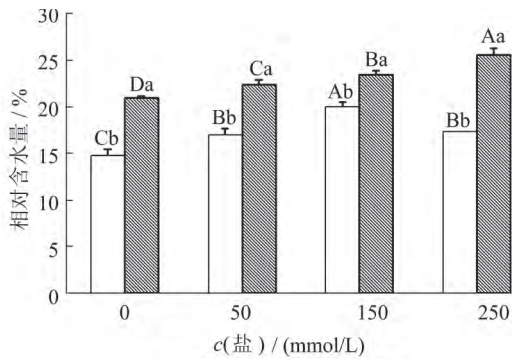
所有数据均用Microsoft Excel 2010录入并绘图,应用SAS 9.2两因素分析,因设计定量资料的五元方差分析予以处理试验数据,用Pearson相关系数评价不同生理指标间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对垂穗披碱草相对含水量的影响

相对含水量标志着幼苗的生长状况。相对含水量高表示垂穗披碱草可以从环境中吸收充足的水分,物质代谢及养分运输可以正常进行;相对含水量过低表示垂穗披碱草生长受到了抑制,叶片早衰,生长较弱。由图1可知,随着盐浓度的增加,垂穗披碱草相对含水量增加,但是较老芒麦的增加少。盐浓度为250 mmol/L时垂穗披碱草相对含水量达到最大值,比对照增加了4.594%,老芒麦在此时相对含水量达到最大值,比对照增加

了 5.406%。方差分析表明: 不同盐浓度处理对垂穗披碱草叶片相对含水量影响显著($P < 0.05$), 同一



不同大写字母表示同一品种不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一处理下不同品种差异达显著水平($P < 0.05$), 下同

图 1 盐胁迫对垂穗披碱草和老芒麦相对含水量的影响
Figure 1 Effect of NaCl stress on relative water content of *Elymus nutans* and *Elymus sibiricus*

处理下, 垂穗披碱草叶片相对含水量显著高于老芒麦的($P < 0.05$).

2.2 盐胁迫对垂穗披碱草可溶性糖质量分数的影响

植物体内的可溶性糖是作物逆境生长条件下体内积累的一种渗透调节物质, 其浓度的增大可降低幼苗叶片的渗透势, 提高幼苗的吸水能力. 盐胁迫处理后, 垂穗披碱草、老芒麦可溶性糖质量分数随盐浓度增加均呈先增加后减少的趋势(图 2). 在盐浓度为 50 mmol/L 时垂穗披碱草、老芒麦可溶性糖质量分数都达到最大值(垂穗披碱草的为 0.085%、老芒麦的为 0.076%), 而且垂穗披碱草可溶性糖质量分数较老芒麦的高, 这说明垂穗披碱草对盐胁迫的自我调节能力强于老芒麦的. 方差分析表明: 在盐胁迫下, 垂穗披碱草和老芒麦可溶性糖质量分数有显著性差异($P < 0.05$).

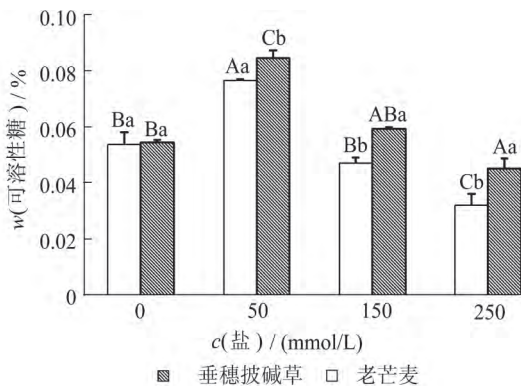


图 2 盐胁迫对垂穗披碱草和老芒麦可溶性糖质量分数的影响
Figure 2 Effect of NaCl stress on soluble sugar content of *Elymus nutans* and *Elymus sibiricus*

2.3 盐胁迫对垂穗披碱草脯氨酸质量分数的影响

植物遇到逆境时, 游离脯氨酸便会大量积累^[14]. 由图 3 可知, 盐胁迫处理下, 垂穗披碱草和老芒麦脯氨酸质量分数随盐浓度增加而增加, 比对照分别增加了 0.029%, 0.018. 可见, 垂穗披碱草通过积累脯氨酸来适应盐胁迫引起的反应. 方差分析表明: 不同盐浓度对垂穗披碱草和老芒麦脯

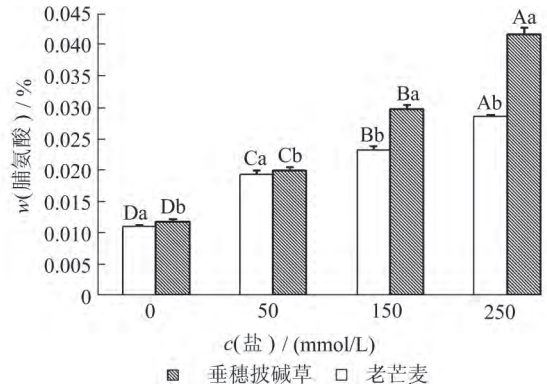


图 3 盐胁迫对垂穗披碱草和老芒麦脯氨酸质量分数的影响
Figure 3 Effect of NaCl stress on proline content of *Elymus nutans* and *Elymus sibiricus*

氨酸质量分数影响显著($P < 0.05$), 同一盐胁迫下, 垂穗披碱草叶片脯氨酸质量分数显著高于老芒麦的($P < 0.05$).

2.4 盐胁迫对垂穗披碱草 SOD, CAT 活性的影响

在盐胁迫生长环境中, 植物会最大限度地提高其自身的活性氧清除功能, SOD 活性在盐胁迫下表现出一定的升高. 研究表明: 垂穗披碱草 SOD 活性随着盐浓度的增加而增加, 在盐浓度为 250 mmol/L 时达最大值 367.731 U/g; 而老芒麦的呈现出先增加后减小的趋势, 在盐浓度为 150 mmol/L 时达最大值 327.542 U/g. 垂穗披碱草的 SOD 活性始终高于老芒麦的(图 4). 方差分析表明: 在盐浓度为 150, 250 mmol/L 时, 垂穗披碱草和老芒麦的 SOD 活性具有显著性差异($P < 0.05$).

植物组织中高浓度的 H_2O_2 主要靠 CAT 清除^[15]. 从图 5 可看出, 垂穗披碱草、老芒麦 CAT 活性随盐浓度增加均呈先增加后减少的趋势(图 2). 在盐浓度为 50 mmol/L 时垂穗披碱草 CAT 活性达到最大值, 在盐浓度为 150 mmol/L 时老芒麦 CAT 活性达最大值, 比对照分别增加了 35.50%, 103.92%. 方差分析表明: 盐胁迫对垂穗披碱草、老芒麦 CAT 活性影响显著($P < 0.05$), 同一盐浓度

下,垂穗披碱草和老芒麦CAT 活性有显著性差异($P < 0.05$).

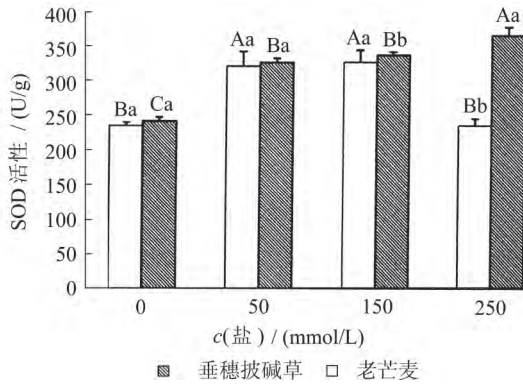


图 4 盐胁迫对垂穗披碱草和老芒麦SOD 活性的影响

Figure 4 Effect of NaCl stress on SOD activity of *Elymus nutans* and *Elymus sibiricus*

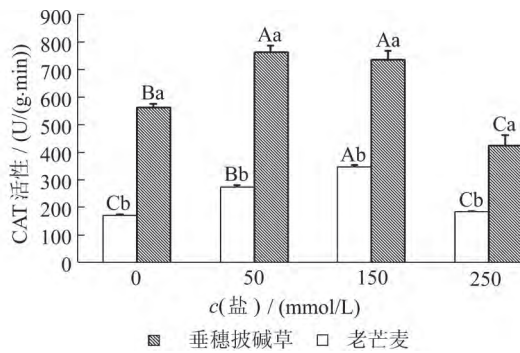


图 5 盐胁迫对垂穗披碱草和老芒麦CAT 活性的影响

Figure 5 Effect of NaCl stress on CAT activity of *Elymus nutans* and *Elymus sibiricus*

2.5 盐胁迫下垂穗披碱草、老芒麦各生理生化指标的相关系数

植物抗盐性是由植物形态、解剖、植物生理生态等多方面综合反映的,不同抗盐性鉴定指标间必然存在一定的相关性.对垂穗披碱草相关生理指标的相关性分析表明(表1):相对含水量与可溶性糖质量分数呈极显著负相关($P < 0.01$),与脯氨酸质量分数、SOD 活性呈极显著正相关($P < 0.01$),与CAT 活性呈显著负相关($P < 0.05$);可溶性糖质量分数与脯氨酸质量分数呈极显著负相关,与SOD 活性呈显著负相关($P < 0.05$),与CAT 活性呈显著正相关($P < 0.05$);脯氨酸质量分数与SOD 活性呈极显著正相关($P < 0.01$),与CAT 活性呈极显著负相关($P < 0.01$);SOD 活性与CAT 活性呈极显著负相关($P < 0.01$).对老芒麦相关生理指标的相关性分析发现(表2):相对含水量与可溶性糖质量分数呈显著负相关($P < 0.05$),与脯氨酸质量分数、SOD 活性、CAT 活性呈极显著正相关($P < 0.01$);可溶性糖质量分数与SOD 活性呈显著正相关

表 1 垂穗披碱草生理指标间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis among physiological indexes on *Elymus nutans*

	相对含水量	可溶性糖质量分数	脯氨酸质量分数	SOD 活性	CAT 活性
相对含水量	1.000				
可溶性糖质量分数	-0.741**	1.000			
脯氨酸质量分数	0.996**	-0.770**	1.000		
SOD 活性	0.904**	-0.634*	0.897**	1.000	
CAT 活性	-0.655*	0.630*	-0.734**	-0.654*	1.000

*表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$),下同.

表 2 老芒麦生理指标间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis among physiological indexes on *Elymus sibiricus*

	相对含水量	可溶性糖质量分数	脯氨酸质量分数	SOD 活性	CAT 活性
相对含水量	1.000				
可溶性糖质量分数	-0.611*	1.000			
脯氨酸质量分数	0.774**	-0.731**	1.000		
SOD 活性	0.689**	0.659*	0.633*	1.000	
CAT 活性	0.853**	0.785**	0.653*	0.947**	1.000

($P < 0.05$),与CAT 活性呈极显著正相关($P < 0.01$),与脯氨酸质量分数呈极显著负相关($P < 0.01$);脯氨酸质量分数与SOD 活性、CAT 活性呈显著正相关;SOD 活性与CAT呈极显著正相关.由此可看出,上述5个指标可以作为垂穗披碱草和老芒麦抗盐性生理指标.

2.6 垂穗披碱草、老芒麦抗盐性综合评价

将参试的垂穗披碱草、老芒麦与抗盐性有关指标进行综合分析,计算不同材料各指标隶属度值,并以各材料的平均抗盐隶属度作为抗盐鉴定综合评价指标.根据垂穗披碱草、老芒麦的抗盐性指标隶属函数值及抗盐能力大小(表3),垂穗披碱草的抗盐性强于老芒麦的,该结果与以上各生理

表 3 垂穗披碱草、老芒麦对盐胁迫适应指标的隶属函数值及评价

Table 3 Function value of subordination and the result of comprehensive evaluation adaptability to salt stress of *Elymus nutans* and *Elymus sibiricus*

植物种类	相对含水量	可溶性糖质量分数	脯氨酸质量分数	SOD 活性	CAT 活性	综合评价
老芒麦	0.101	0.246	0.381	0.922	0.475	0.425
垂穗披碱草	0.327	0.291	0.364	0.262	0.900	0.429

指标的变化基本一致,由此可认为较老芒麦而言,垂穗披碱草具有较强的耐盐性。

3 结论与讨论

植物的水分特征是当环境变化时植物在生理和结构上的一种响应,是植物忍耐干旱胁迫强弱的指示^[16-18],耐盐性强的植物在高浓度盐胁迫下,能够维持较高的含水量。从试验结果可以看出,在盐浓度为250 mmol/L时垂穗披碱草幼苗相对含水量依然高于对照试验的(图1),说明垂穗披碱草对盐害具有一定的调控能力,能够在一定盐浓度下生长。

垂穗披碱草在受害初期(在盐浓度为50 mmol/L时)时可溶性糖质量分数增多,以适应盐胁迫条件,但随着盐浓度的增加,可溶性糖质量分数逐渐减少,其中糖分的减少是由于呼吸作用消耗所致。垂穗披碱草叶片在受到较低浓度(50 mmol/L)的盐胁迫时可溶性糖质量分数增加,原因主要在于有机物的运输减慢,大量可溶性糖在叶绿体中积累,另一个可能原因是植物生长受抑制。盐胁迫下,植物对一些必需离子的吸收减弱,蛋白质、核酸、淀粉等物质的分解加速,因而植物的生长可能会受到抑制。本文中可溶性糖升高的另一原因是通过升高可溶性糖质量分数调节渗透势,用于减少外界对植物造成的伤害,大量增加的可溶性糖、脯氨酸等物质,可降低细胞内的水势,而达到从周围细胞吸水的目的。当盐浓度达到250 mmol/L时可明显看出叶细胞的可溶性糖质量分数急剧下降,叶细胞中的糖质量分数低于对照的,这是盐对植物正常生命活动破坏后造成糖的合成减少而加速分解的缘故。

植物通过增加脯氨酸质量分数进行渗透调节被认为是一种抵抗水分胁迫的有效途径^[19],也有学者认为脯氨酸在植物体中的积累只适合作为胁迫敏感性指标,不能作为植物耐盐性的评价指标^[20]。Poustini等^[21]的研究也表明脯氨酸可能和小麦品种的耐盐性无关,仅在渗透调节方面发挥很小的作用。在本研究中,随着胁迫程度的加深,垂穗披碱草和老芒麦在高浓度(250 mmol/L)盐胁迫下,脯氨酸质量分数的增加十分显著,说明垂穗披碱草和老芒麦通过积累脯氨酸以应对盐渍环境,但是垂穗披碱草脯氨酸质量分数始终高于老芒麦的,这说明就脯氨酸质量分数而言,垂穗披碱草具有较强的抗盐能力。

逆境胁迫下,植物体内发生氧化胁迫,破坏了

酶系统对氧代谢的平衡,植物体可自身提高抗氧化系统活力来平衡活性氧代谢^[22]。从垂穗披碱草在受到盐胁迫时幼苗SOD活性、CAT活性的变化中可以看出,植株可通过提高两种酶活性以减少盐胁迫产生的超氧化物自由基的伤害。但是随着盐浓度的增加,胁迫产生的伤害越来越严重,植株已无法保持高水平的酶活性,CAT活性下降,这一结果和前人的研究结果一致^[23-25]。由此可知,SOD活性、CAT是垂穗披碱草对膜脂过氧化的酶促防御系统中的重要保护酶,垂穗披碱草通过维持较高水平的SOD活性、CAT活性等保护机制来适应盐胁迫,减轻盐伤害。

本试验分别采用50, 150, 250 mmol/L NaCl溶液,在轻盐碱地、中度盐碱地和重盐碱地中具有较强的代表性。试验表明盐胁迫对垂穗披碱草幼苗相对含水量、可溶性糖质量分数、脯氨酸质量分数、SOD活性、CAT活性都有明显的影响,它们之间的差异达到显著水平($P < 0.05$)。研究也表明各指标与盐浓度之间的关系并不完全一致,单一的指标并不能代表垂穗披碱草的耐盐性强弱。隶属函数法和相关性分析表明,垂穗披碱草具有一定的耐盐能力,抗盐性高于老芒麦的。

参考文献

- [1] 汪月霞,孙国荣,王建波,等. NaCl胁迫下星星草幼苗MDA含量与膜透性及叶绿素荧光参数之间的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 122-129.
- [2] 刘一明,程凤枝,王齐,等. 四种暖季型草坪植物的盐胁迫反应及其耐盐阈值[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 192-199.
- [3] 全国牧草品种审定委员会. 中国牧草登记品种集[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1992: 40-62.
- [4] VON BOTHMER R, SEBERG O, JACOBSEN N. Genetic resources in the *Triticeae*[J]. Hereditas, 1992, 116: 141-150.
- [5] SHARMA H C, GILL B S, UYEMOTO J K. High level of resistance in *Agropyron* species to barely yellow dwarf and wheat streak mosaic viruses[J]. Journal of Phytopathology, 1984, 110(2): 143-147.
- [6] 王佩羽,李长慧,李淑娟,等. 4种牧草苗期耐盐性比较[J]. 草业科学, 2013, 30(4): 590-595.
- [7] 谭伟杰,马志媛,张静. 盐胁迫对金色补血草种子萌发的影响[J]. 现代农业科技, 2009(14): 300.
- [8] 左海涛,李继伟,郭斌,等. 盐分和土壤含水量对营养生长期柳枝稷的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(16): 760-766.

- [9] FOYER C H, NOCTOR G. Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling[J]. *New Phytologist*, 2000, 146(3): 359–388.
- [10] 吐尔逊娜依, 高辉远, 安沙舟, 等. 8种牧草耐盐性综合评价[J]. *中国草地*, 1995(1): 30–32.
- [11] 颜启传, 毕辛华. 国际种子检验规程[M]. 北京: 农业出版社, 1985: 203–204.
- [12] 张治安, 张美善, 蔚荣海. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 54–138.
- [13] 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: 184–261.
- [14] 卢金, 杨颖丽, 贾鹏翔, 等. 外源 H_2O_2 处理对小麦渗透性调节物的影响[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(1): 79–85.
- [15] 张腾国, 张艳, 夏小慧, 等. MAPKK抑制剂对低温胁迫下油菜幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(1): 92–99.
- [16] 李丽霞, 梁宗锁, 韩蕊莲. 干旱对沙棘休眠、萌芽期内源激素及萌芽特性的影响[J]. *林业科学*, 2001, 37(5): 35–40.
- [17] 孙洪仁, 刘国荣, 张英俊, 等. 紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究[J]. *草业科学*, 2005, 22(12): 24–30.
- [18] DIAS P C, ARAUJO W L, MORAES G A, et al. Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil availability[J]. *J Plant Physiol*, 2007, 164(12): 1639–1647.
- [19] MCMICHAEL B L, ELMORE C D. Proline accumulation in water stressed cotton leaves[J]. *Crop Science*, 1997, 17(6): 905–908.
- [20] 陆一鸣, 李彦航, 曹明富, 等. 短芒大麦耐盐碱新品系的生理生化和分子生物学分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(3): 282–286.
- [21] POUSTINI K, SIOSEMARDEH A, RANJBAR M. Proline accumulation as a response to salt stress in 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars differing in salt tolerance[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2007, 54(5): 925–934.
- [22] CHERUTH A J, RAGUPATHI G, PARAMASIVAM M, et al. Responses of antioxidant defense system of *Catharanthus roseus*(L.) G. Don. to paclobutrazol treatment under salinity[J]. *Acta Physiologica Plantarum*, 2007, 29(3): 205–209.
- [23] MELONI D A, OLIVA M A, CAMBRAIA J. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49(1): 69–76.
- [24] BADAWI G H, YAMAUCHI Y, SHIMADA E, et al. Enhanced tolerance to salt stress and water deficit by overexpressing superoxide dismutase in tobacco (*Nicotiana tabacum*) chloroplasts[J]. *Plant Science*, 2004, 166(40): 919–928.
- [25] LIANG Yong-chao, CHEN Qin, ZHANG Wen-hua, et al. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(10): 1157–1164.

(责任编辑: 王春燕)