

网络出版日期:2015-07-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20150718.1104.024.html>

盐胁迫对高寒草地牧草老芒麦幼苗生理指标的影响

杨月娟^{1,2}, 张 灏³, 周华坤¹, 王文颖⁴, 殷恒霞⁴, 姚步青¹, 赵新全¹

(1. 中国科学院 西北高原生物研究所, 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 山西农业大学, 山西太谷 030801; 4. 青海师范大学, 西宁 810008)

摘 要 采用不同浓度(0、50、150、250 mmol·L⁻¹) NaCl 溶液处理萌发的老芒麦(*Elymus sibiricus*)幼苗, 检测老芒麦在盐胁迫逆境下生理生化的变化。结果表明, 随盐浓度增加, 各供试材料的脯氨酸质量分数呈上升趋势($P < 0.05$), 叶绿素质量分数呈下降趋势($P < 0.05$), 而相对含水量、可溶性糖含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性呈先升高后下降趋势($P < 0.05$), 150 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度是其幼苗相对含水量和 CAT 活性的一个转折临界点。老芒麦幼苗期的相对含水量、叶绿素质量分数、可溶性糖质量分数、脯氨酸质量分数、SOD 活性和 CAT 活性对盐胁迫浓度的变化响应灵敏, 且在不同浓度盐胁迫下变化差异显著, 其可作为快速鉴定老芒麦野生种质材料耐盐性的生理生化指标。熵值法综合评价不同浓度 NaCl 处理对老芒麦生理指标的影响表明, 50 mmol·L⁻¹ NaCl 最有利于老芒麦调控各生理指标, 提高对盐胁迫的适应性, 老芒麦适宜在青藏高原盐碱地和湖滨退化湿地的恢复改良中选用。

关键词 老芒麦; 耐盐性; 脯氨酸; 叶绿素; 可溶性糖; 抗氧化酶

中图分类号 Q945

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2015)07-0156-07

Effect of Salt Stress on Physiological Characteristics of Alpine Grassland Pasture *Elymus sibiricus*

YANG Yuejuan^{1,2}, ZHANG Hao³, ZHOU Huakun¹, WANG Wenying⁴,

YIN Hengxia⁴, YAO Buqing¹ and ZHAO Xinquan¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810001, China; 2. University of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanxi Agricultural University,

Taigu Shanxi 030801, China; 4. Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract The growth parameters of *Elymus sibiricus* at early seedling stage were measured by four different concentrations of NaCl solutions (0, 50, 150, 250 mmol·L⁻¹) and salt treatment was performed to explore and utilize the germplasm with high salt tolerance, so as to provide physiological indicators for identifying salt tolerance. The result showed that proline mass fraction increased with increase of salt concentration ($P < 0.05$), chlorophyll mass fraction decreased in response to salt stress ($P < 0.05$), relative water mass fraction, soluble sugar mass fraction, SOD and CAT enzyme activities increased at first and then declined later with increase of NaCl stress concentration ($P < 0.05$). CAT enzyme activity had a critical turning point under the salt stress of 150 mmol·L⁻¹. It was also obvious that the levels of relative contents of water, chlorophyll, soluble sugar, proline, SOD and

收稿日期:2014-07-29 修回日期:2014-11-12

基金项目:国家自然科学基金(31172247, 31472135, 31201836, 31472135, 31260127); 青海省自然科学基金(2013-Z-916); 国家科技支撑课题专题(2011BAC09B06-02, 2014BAC05B03); 青海省重点实验室发展专项资金计划(2014-Z-Y01)。

第一作者:杨月娟,女,在读硕士生,从事草地生态学研究。E-mail: yangyuejuan198907@163.com

通信作者:周华坤,男,博士,从事高寒草地恢复生态学研究。E-mail: qzhkhk1974@yahoo.com.cn

CAT enzyme activities in the leaves at seedling stage were sensitive to the level of salt stress. And all of them could be used as physiological indicators for quick and accurate identification in salt tolerant wildrye germplasm. Soluble sugar mass fraction, proline mass fraction and CAT activity were relatively important physiological indicators of salt resistance of *E. sibiricus*. Entropy method for comprehensive evaluation of treatments of *E. sibiricus* with different salt concentrations the physiological characteristics showed that $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl was the most conducive to regulate physiological indexes of *E. sibiricus*, improve the adaptability to salt stress. Remarkable salt tolerance was detected about *E. sibiricus*, which had provided a basis for utilizing salt tolerant wildrye genetic resources.

Key words *E. sibiricus*; Salt tolerance; Proline; Chlorophyll; Soluble sugar; Antioxidase

土壤盐渍化是世界性的资源和生态问题,全球约 $1.0 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 的土地遭受盐渍化侵害^[1-2],在中国,约有盐渍化土壤 $3.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占现有耕地的 $1/4$ ^[3]。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繁殖养殖业又可以美化环境、防风固沙,起到美化环境的作用。因此,探明植物抗盐的机制、解决盐渍化问题的方法具有重要的理论和实践意义^[4-5]。

目前,有关盐分对禾草种子发芽的影响研究较多^[6-7],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,需建立一套客观评价牧草耐盐性的方法,对植物种质资源的耐盐性进行综合评价^[2,8]。为便于筛选植物耐盐性指标,不断有学者提出与植物生理、生化机制相关的指标作为耐盐性筛选的标准^[9-11]。例如,高浓度的盐分会导致土壤的渗透势增大,对植物产生渗透胁迫,脯氨酸积累是植物抵抗渗透胁迫的有效方式之一^[12]。盐胁迫对植物代谢作用的影响主要是过量产生活性氧类(Reactive Oxygen Species, ROS)^[2],为避免 ROS 的损害,植物会启动一系列的防卫系统^[13]。植物参与防卫机制的酶主要是一些抗氧化的酶类,例如超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)和过氧化氢酶(Catalase, CAT)等,这些酶和其他的酶联合起来通过谷胱甘肽—抗坏血酸途径来清除产生 ROS^[14]。

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^[15]。老芒麦(*Elymus sibiricus*),又名西伯利亚野麦草(Siberian wildrye),具有适应性强、抗寒、高蛋白、适口性好和易栽培等特点,可作为栽培牧草,用于建植

人工草地和放牧草地^[16-17]。老芒麦也是青藏高原三江源区和环青海湖区人工草地建植过程中采用的主要草种之一。本试验以老芒麦幼苗为材料,研究在不同 NaCl 浓度处理条件下,老芒麦相对含水量、叶绿素质量分数、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,初步阐明老芒麦幼苗对盐胁迫的反馈机制,采用样品排序的方法,综合评价不同盐浓度处理对老芒麦生理指标的综合影响效应,旨在为老芒麦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

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试验。农业部牧草与草坪草种子质检中心(兰州)提供供试的老芒麦种子,于 2007 年采收自青海省牧草良种繁殖场,均为成熟饱满的种子。

1.2 试验方法

用蒸馏水分别配制浓度梯度为 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液。种子用 $\varphi = 7\%$ NaClO 消毒后均采用纸上发芽法,取萌发 1 周的幼苗进行处理,每次处理 50 粒种子,3 次重复,即样本数为 150 个,处理培养时间据表型而定^[18]。

1.3 测定内容和方法

叶片相对含水量采用饱和称量法^[19];叶绿素质量分数的测定采用比色法^[19];可溶性糖的测定采用蒽酮比色法^[20];脯氨酸质量分数的测定酸性茚三酮法^[19];SOD 活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[19],以抑制 NBT 光化还原的 50% 为 1 个酶活性单位表示;CAT 活性的测定采用紫外分光光度法^[21],以每分钟内 A_{240} 变化 0.01 为 1 个

酶活性单位。

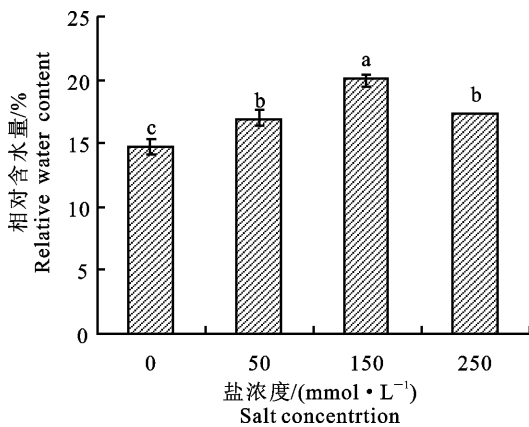
1.4 数据处理与分析

数据采用 Microsoft Excel 2010 录入并绘图,应用 SAS 9.2 进行单因素 6 水平设计一元定量资料的方差分析,使用 SAS 中的 GLM 过程对所有处理组进行两两比较,用 Pearson 相关系数评价不同生理指标间的相关关系,运用熵值法(entropy method)综合评价不同盐浓度处理对老芒麦生理指标的综合影响效应。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对老芒麦相对含水量的影响

相对含水量标志着幼苗的生长状况,相对含水量高表示老芒麦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老芒麦生长受到抑制,叶片早衰,生长较弱。经盐胁迫处理后,随着 NaCl 浓度的增加,幼苗的相对含水量先升高后下降(图 1),与对照相比,差异达显著水平 ($P < 0.05$), 50 mmol · L⁻¹、150 mmol · L⁻¹、250 mmol · L⁻¹ 处理的幼苗,相对含水量分别增加 2.542%、5.406%、2.636%,老芒麦在 50 mmol · L⁻¹ 和 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时的相对含水量没有差异性。不同盐浓度处理的幼苗茎叶的外观均未明显表现出侵害症状。



不同小写字母表示不同处理间差异达显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters represent significant difference under different treatments ($P < 0.05$). The same as below.

图 1 盐胁迫下老芒麦的含水量

Fig. 1 Water content of *E. sibiricus* under NaCl stress

2.2 盐胁迫对老芒麦叶绿素质量分数的影响

叶绿素是反映植物光合作用的重要指标。经盐胁迫处理后,老芒麦幼苗的叶绿素质量分数明

显降低(图 2),盐胁迫对参试材料的叶绿素质量分数影响显著 ($P < 0.05$)。与对照相比,在 50 mmol · L⁻¹、150 mmol · L⁻¹ 和 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时分别下降 0.101 mg · g⁻¹、0.166 mg · g⁻¹、0.327 mg · g⁻¹,下降率分别是 7.367%、12.108%、23.852%。说明就叶绿素质量分数而言,50 mmol · L⁻¹ 盐浓度是其耐受盐胁迫的一个阈值。

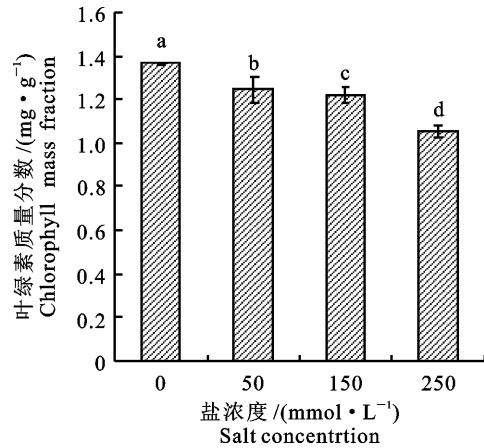


图 2 盐胁迫下老芒麦叶绿素质量分数

Fig. 2 Chlorophyll mass fraction of *E. sibiricus* under NaCl stress

2.3 盐胁迫对老芒麦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。经盐胁迫处理后,随着盐浓度的增加,幼苗的可溶性糖质量分数先上升后下降(图 3),差异达显著水平 ($P < 0.05$),在 50 mmol · L⁻¹ 和 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时,与对照相比,可溶性糖含量均具有显著差异。与对照相比,在 50 mmol · L⁻¹ NaCl 时上升 0.021%,幼苗的渗透调节能力显著提高,降低幼苗的渗透势,而在 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时下降 0.025%,说明幼苗此时可能已经失去对其可溶性糖质量分数的调控能力。50 mmol · L⁻¹ 盐浓度是其幼苗渗透调节能力变化的一个转折点。

2.4 盐胁迫对老芒麦脯氨酸质量分数的影响

植物在正常生长条件下,游离脯氨酸质量分数很低,但遇到逆境时,游离脯氨酸便会大量积累。由图 4 可知,盐胁迫下游离脯氨酸质量分数随 NaCl 浓度的增加而升高,NaCl 浓度对老芒麦脯氨酸质量分数影响显著 ($P < 0.05$)。与对照相

比,在 50 mmol · L⁻¹、150 mmol · L⁻¹、250 mmol · L⁻¹ NaCl 时分别上升 0.008%、0.012%、0.018%,说明在一定 NaCl 浓度范围内,游离脯氨酸的质量分数可以在一定程度上反映老芒麦的耐盐性,老芒麦的渗透调节能力显著提高,幼苗的吸水能力提高。

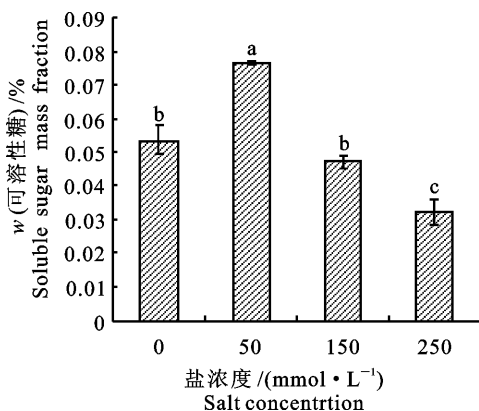


图 3 盐胁迫下老芒麦可溶性糖质量分数

Fig. 3 Soluble sugar mass fraction of *E. sibiricus* under NaCl stress

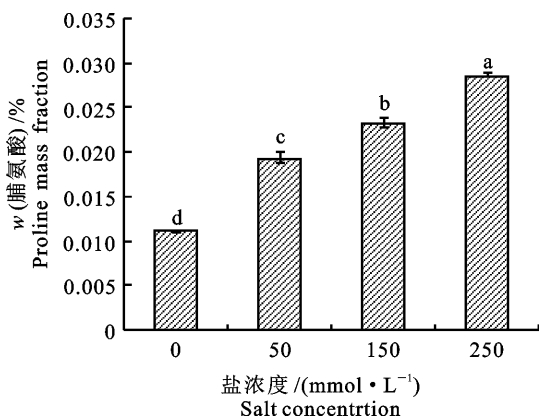


图 4 盐胁迫下老芒麦脯氨酸质量分数

Fig. 4 Proline mass fraction of *E. sibiricus* under NaCl stress

2.5 盐胁迫对老芒麦 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一定程度的升高。从图 5 可以看出,老芒麦幼苗 SOD 的活性随盐浓度的升高而先升高后降低。与对照相比,在 50 mmol · L⁻¹、150 mmol · L⁻¹ NaCl 时分别增加 26.887 U · g⁻¹、91.532 U · g⁻¹,这说明老芒麦的清除活性氧的能力显著提高,而在 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时减少 19.620 U · g⁻¹,说明幼苗的 SOD 已经失去对盐胁迫的调控能力与适应性。

植物组织中高浓度的 H₂O₂ 主要靠 CAT 清除。方差分析表明,盐胁迫对老芒麦 CAT 活性影响显著(P<0.05)。从图 6 可以看出,在 50 mmol · L⁻¹、150 mmol · L⁻¹ NaCl 时,盐胁迫导致幼苗 CAT 活性比无盐处理时显著提高,分别提高 108.333 U · g⁻¹ · min⁻¹、181.667 U · g⁻¹ · min⁻¹,而在 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时提高 13.333 U · g⁻¹ · min⁻¹,与对照无差异。说明随着 NaCl 浓度的升高,CAT 对 H₂O₂ 的清除能力显著增加,当超过一定 NaCl 浓度(150 mmol · L⁻¹) 范围后,CAT 对 H₂O₂ 的清除能力显著降低。

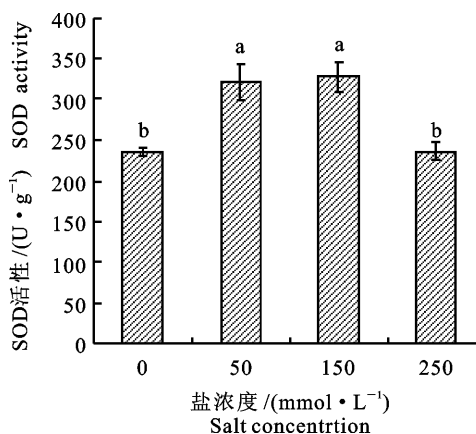


图 5 盐胁迫下老芒麦 SOD 活性

Fig. 5 SOD activity of *E. sibiricus* under NaCl stress

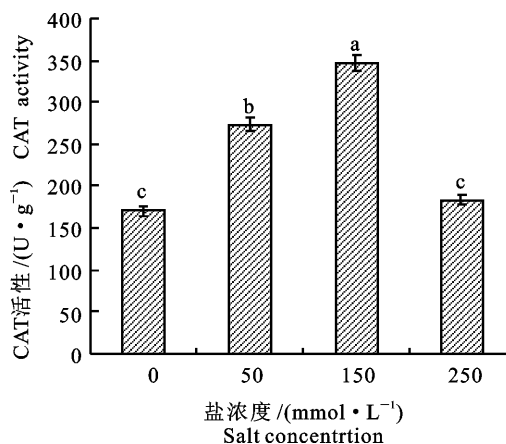


图 6 盐胁迫下老芒麦 CAT 活性

Fig. 6 CAT activity of *E. sibiricus* under NaCl stress

2.6 盐胁迫下老芒麦各生理生化指标的相关系数

植物的盐害表现涉及生理、生化、组织形态和生长发育等许多方面,是一个综合的反应。不同抗旱性鉴定指标间必然存在着一定的相关性,了

解这些相关性有利于对植物抗旱性的进一步认识。对老芒麦相关生理指标的相关性分析发现(表 1):含水量与叶绿素呈极显著负相关,与可溶性糖呈显著负相关,与脯氨酸、SOD、CAT 呈极显著正相关;叶绿素与可溶性糖、SOD 呈极显著正相关,与脯氨酸、CAT 呈极显著负相关;可溶性糖

与 SOD 呈显著正相关,与 CAT 呈极显著正相关,与脯氨酸呈极显著负相关;脯氨酸与 SOD、CAT 呈显著正相关;SOD 与 CAT 呈极显著正相关。由此可看出,上述 6 个指标可以作为老芒麦抗盐性生理指标。

表 1 老芒麦生理指标间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis among physiological indicators of *E. sibiricus*

指标 Index	相对含水量 Relative water mass fraction	叶绿素 Chlorophyll	可溶性糖 Soluble sugar	脯氨酸 Proline	超氧化物歧化酶 SOD	过氧化氢酶 CAT
相对含水量 Relative water mass fraction	1.000					
叶绿素 Chlorophyll	-0.940**	1.000				
可溶性糖 Soluble sugar	-0.611*	0.714**	1.000			
脯氨酸 Proline	0.774**	-0.970**	-0.731**	1.0000		
超氧化物歧化酶 SOD	0.689**	0.851**	0.659*	0.633*	1.000	
过氧化氢酶 CAT	0.853**	-0.873**	0.785**	0.653*	0.947**	1.000

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

Note: * show significant correlation ($P < 0.05$), ** show extremely significant correlation ($P < 0.01$), the same as the below.

2.7 熵值法综合评价盐胁迫对老芒麦幼苗生理指标的影响

在基于样品排序的综合评价方法中,熵值法是一种利用信息量的大小来确定指标权重并进行综合评价的方法^[22]。采用熵值法确定各指标(相对含水量、叶绿素质量分数、可溶性糖质量分数、脯氨酸质量分数、SOD 活性和 CAT 活性)的权重,然后进行综合评价分析。由表 2 可得,可溶性糖质量分数、脯氨酸质量分数和 CAT 活性是整体评价老芒麦抗盐性相对重要的生理指标,其权

重分别为:0.281 25、0.318 31 和 0.260 57。从表 3 可以看出,综合评价的结果为:50 mmol · L⁻¹ > 150 mmol · L⁻¹ > 250 mmol · L⁻¹ > 0 mmol · L⁻¹,盐胁迫处理后,老芒麦生理指标的综合评价价值均大于对照,这说明老芒麦具有一定的抗盐性,而 50 mmol · L⁻¹ NaCl 处理的老芒麦生理指标的综合评价价值最高,这表明浓度为 50 mmol · L⁻¹ NaCl 最有利于老芒麦调控各生理指标,提高对盐胁迫的适应性。

表 2 老芒麦生理指标权重的计算结果

Table 2 Calculation result of physiological indicators weight of *E. sibiricus*

生理指标 Physiological indicators	相对含水量 Relative water mass fraction	叶绿素质量分数 Chlorophyll mass fraction	可溶性糖质量分数 Soluble sugar mass fraction	脯氨酸质量分数 Proline mass fraction	SOD 活性 SOD activity	CAT 活性 CAT activity
权重 Weight	0.034 654	0.029 177	0.281 25	0.318 31	0.076 031	0.260 57

表 3 熵值法综合评价结果

Table 3 Result of comprehensive evaluation by entropy method

盐浓度 / (mmol · L ⁻¹) Salt concentration	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排序结果 Sorting result
0	0.137 96	4
50	0.207 92	1
150	0.185 76	2
150	0.178 62	3

3 讨论与结论

正常情况下,植物体内各项代谢的生理生化过程都是比较稳定而协调的。当植物受到逆境胁迫时,植物体内的各种代谢活动会由于某种因素的影响而失调,使植物对逆境作出反应。从试验结果可以看出,与对照相比,老芒麦在盐胁迫下相对含水量增加,在高浓度盐(250 mmol · L⁻¹ NaCl)胁迫下,幼苗相对含水量依然高于对照试验,说明老芒麦对盐害具有一定的调控能力,能够在一定盐浓度下生长(图 1)。NaCl 对老芒麦叶

绿素的抑制作用非常明显(图 2),叶绿素质量分数呈下降趋势,盐害使叶绿体趋于分解,叶绿素被破坏,叶绿素的合成受到抑制。

由图 3 可知,老芒麦在受害初期(50 mmol · L⁻¹ NaCl)时可溶性糖质量分数增多,以适应盐胁迫条件。老芒麦叶片在受到较低浓度的盐(50 mmol · L⁻¹ NaCl)胁迫时可溶性糖质量分数增加,可能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,且盐胁迫下蔗糖是主要的渗透调节物质,且盐胁迫对植物的间接伤害是干旱胁迫,所以可溶性糖质量分数升高可以调节渗透势,降低细胞内的水势^[23],而达到从周围吸水的目的,缓解盐害。随着盐浓度的增加,可溶性糖质量分数逐渐减少,在 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时,可溶性糖质量分数显著低于对照,这主要是由于盐害破坏了老芒麦的正常生理活动,可溶性糖合成减少,而分解加速的原因。

脯氨酸在植物体中的积累,在一定程度上反映植物的抗逆性,对植物应对盐渍环境条件下的渗透胁迫十分有利,且能在很短的时间内积累到足以降低细胞渗透势的水平。脯氨酸在抗逆中有两个作用,一是作为渗透调节物质,保持原生质与环境的渗透平衡;二是保持膜结构的完整性,脯氨酸随着盐害胁迫的深入质量分数增加。贾亚雄等^[24]研究表明,脯氨酸质量分数的升高有助于提高植物的耐盐性;而陆一鸣等^[25]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。Poustini 等^[26]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。因此,脯氨酸质量分数作为衡量植物种质材料耐盐性指标具有一定的局限性,仅限于特定的植物种质材料。从本试验结果可知,在 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时,脯氨酸质量分数仍高于对照,说明脯氨酸能灵敏的响应盐胁迫,老芒麦具有一定的抗盐性。

生物体通过超氧化物歧化酶等酶保护系统使自由基维持在一个低水平,从而防止自由基伤害,酶保护系统能以超氧阳离子为基质进行歧化反应,从而清除植物组织和细胞内的超氧阳离子自由基,减缓氧自由基对细胞膜的损伤。在 NaCl 胁迫下,植物的许多代谢过程都会产生超氧化物自由基,破坏细胞膜系统,抑制植物正常的生命活动。从老芒麦受到 NaCl 胁迫时幼苗 SOD 和 CAT 活性的变化中可以看出(图 5 和图 6),两种

酶活性的提高减少了超氧化物自由基的伤害。在 50 mmol · L⁻¹ NaCl 处理时,幼苗 SOD 和 CAT 酶活性增加,150 mmol · L⁻¹ 时达到非常高的活性,这可能是植物的一种保护性应激反应,与植物受到盐胁迫而产生的超氧化物自由基的增加存在着潜在联系。在 250 mmol · L⁻¹ NaCl 时,老芒麦可能已无法保持较高水平的酶活性,对盐胁迫的调节能力降低,酶活性降低。SOD 和 CAT 活性的变化保持同步,而且二者在清除超氧化物自由基的过程中发挥了重要的作用,这一结果和前人的研究结果一致^[27-29]。由此可知,SOD 和 CAT 是老芒麦对膜脂过氧化的酶促防御系统中的重要保护酶。老芒麦是通过维持较高水平的 SOD 和 CAT 活性等保护机制来适应盐胁迫,减轻盐伤害。

植物的耐盐性是植物在盐胁迫下,通过自身的遗传性和生理、生化等方面的反应,减弱盐害的影响而维持正常生长发育的一种特性。所以,植物的抗盐性在不同作物和不同品种之间表现是不同的,也是可以遗传的,并能够在盐胁迫过程中由植株相关的生理和生化指标上反映出来。所以,研究老芒麦的耐盐能力时,宜对指标进行综合评价。熵值法综合评价不同浓度 NaCl 处理对老芒麦生理指标的影响表明,50 mmol · L⁻¹ NaCl 最有利于老芒麦调控各生理指标,提高对盐胁迫的适应性。

Reference (参考文献):

- [1] Tester M, Davenport R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants[J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(5): 503-527.
- [2] Foyer C H, Noctor G. Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling[J]. *New Phytologist*, 2000, 146(3): 359-388.
- [3] LUO Qingyun(罗庆云), YU Bingjun(於丙军), LIU Youliang(刘有良). Effect of NaCl on the growth, K⁺, Na⁺ and Cl⁻ distribution in seedlings of 6 soybean cultivars(*Glycine max* (L.) Merrill)[J]. *Soybean Science(大豆科学)*, 2001, (3): 177-182 (in Chinese with English abstract).
- [4] WANG Yuexia(汪月霞), SUN Guorong(孙国荣), WANG Jianbo(王建波), et al. Relationships among MDA content, plasma membrane permeability and the chlorophyll fluorescence parameters of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under NaCl stress[J]. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 2006, 26(1): 122-129 (in Chinese with English abstract).
- [5] LIU Yiming(刘一鸣), CHENG Fengzhi(程凤枝), WANG Qi(王齐), et al. Salinity stress responses and tolerance

- thresholds in four warm-season turfgrasses[J]. *Acta Prataculturae Sinica*(草业学报), 2009, 18(3): 192-199 (in Chinese with English abstract).
- [6] TAN Weijie(谭伟杰), MA Zhiyuan(马志媛), ZHANG Jing(张静). Effect of salt stress on seed germination of *Limonium aureum* [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*(现代农业科技), 2009, (14): 300 (in Chinese).
- [7] ZUO Haitao(左海涛), LI Jiwei(李继伟), GUO Bin(郭斌), *et al.* Effect of soil saline type and concentration as well as soil water content on the growth characteristics of switch grass at the vegetative stage on two soil matrixes [J]. *Acta Agrestia Sinica*(草地学报), 2009, 17(16): 760-766 (in Chinese with English abstract).
- [8] Tursuany(吐尔逊娜依), GAO Huiyuan(高辉远), AN Shazhou(安沙舟), *et al.* The comprehensive evaluation of salt resistance of eight iberbages[J]. *Grassland of China*(中国草地), 1995(1): 30-32 (in Chinese with English abstract).
- [9] Lauchli A. Salt Exclusion; An Adaptation of Legumes for Crops and Pastures under Saline Conditions [M]. New York; Staples Press, 1984; 20-25.
- [10] Cuartero J, Yeo A R, Flowers T J. Selection of donors for salt-tolerance in tomato using physiological traits[J]. *New Phytologist*, 1992, 121(1): 63-69.
- [11] Yeo A R. Variation and inheritance of sodium transport in rice[J]. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 1993, 50(50): 143-150.
- [12] Hare P D, Cress W A, Van Staden J. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21(6): 535-553.
- [13] Alscher R G, Erturk N, Heath L S. Role of superoxide dismutases(SOD) in controlling oxidative stress in plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(372): 1331-1341.
- [14] Cavalcanti F R, Oliveira J T A, Martins-Miranda A S, *et al.* Superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities do not confer protection against oxidative damage in salt-stressed cowpea leaves [J]. *New Phytologist*, 2004, 163(3): 563-571.
- [15] The Herbage Cultivar Registration Committee(牧草品种注册委员会). *Chinese Forage Variety Registration Set*(中国牧草登记品种集)[M]. Beijing: China Agricultural University press, 1992; 18-21(in Chinese).
- [16] CHEN Mojun(陈默君), JIA Shenxiu(贾慎修). *China Forage Plants*(中国饲用植物)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008; 35-41(in Chinese).
- [17] LI Haiyun(李海云), ZHAO Kefu(赵可夫), WANG Xiufeng(王秀峰). The inhibition of salinity on the germination of halophyte seeds[J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*(山东农业大学学报: 自然科学版), 2002, 33(2): 170-173 (in Chinese with English abstract).
- [18] YAN Qichuan(颜启传), BI Xinhua(毕辛华). *International Seed Inspection Procedures*(国际种子检验规程)[M]. Beijing: Agricultural Press, 1985; 23-29(in Chinese).
- [19] ZHANG Zhi'an(张治安), ZHANG Meishan(张美善), WEI Ronghai(蔚荣海). *Plant Physiology Experimental Guidance*(植物生理学实验指导)[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004; 59-68(in Chinese).
- [20] LI Hesheng(李合生). *Plant Physiology and Biochemistry Experimental Principles and Techniques*(植物生理生化实验原理和技术)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000; 65-79(in Chinese).
- [21] XIA Yang(夏阳), SUN Mingguo(孙明高), LI Guolei(李国雷), *et al.* The effects of salt stress on the contents of chlorophyll in seedling leaves of four garden tree species [J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*(山东农业大学学报: 自然科学版), 2005, 36(1): 30-34 (in Chinese with English abstract).
- [22] HU Liangping(胡良平). *Research Design and Statistical Analysis*(科研设计与统计分析)[M]. Beijing: Military Medical Science Press, 2012; 58-79(in Chinese).
- [23] ZHOU Guilian(周桂莲). Mechanisms of salt tolerance in wheat and barley[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*(西北农业学报), 1998, 7(4): 97-101 (in Chinese with English abstract).
- [24] JIA Yaxiong(贾亚雄), LIU Rongtang(刘荣堂), YUAN Qinghua(袁庆华). Study salt tolerance of *Elymus germplasm*[J]. *Grassland and Turf*(草原与草坪), 2007(2): 47-52 (in Chinese with English abstract).
- [25] LU Yiming(陆一鸣), LI Yanfang(李彦舫), CAO Mingfu(曹明富), *et al.* Biological analysis of salt-tolerant new lines of *Hordeum brevisubulatum* (Trin.) link[J]. *Scientia Agricultura Sinica*(中国农业科学), 2002, 35(3): 282-286 (in Chinese with English abstract).
- [26] 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): 925-934.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Liang Y, Chen Q, Liu Q, *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.