

# 燕麦幼苗活性氧代谢和渗透调节物质积累 对 NaCl 胁迫的响应<sup>\*</sup>

刘建新<sup>\*\*</sup> 王金成 王瑞娟 贾海燕

(陇东学院生命科学与技术学院, 甘肃省高校陇东生物资源保护与利用省级重点实验室, 甘肃庆阳 745000)

**摘 要** 采用营养液砂培方法, 研究了不同浓度 NaCl 胁迫 (0、50、100、150、200 和 250 mmol · L<sup>-1</sup>) 对“定莜 6 号”燕麦幼苗生长、活性氧代谢和渗透调节物质含量的影响。结果表明: NaCl 胁迫显著抑制燕麦幼苗的生长, 抑制程度随 NaCl 浓度提高而增强, 燕麦可耐受的最高 NaCl 浓度约为 150 mmol · L<sup>-1</sup>; 随着 NaCl 浓度的增加, 叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和丙二醛含量明显增加, 超氧化物歧化酶、过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶活性先升后降, 过氧化氢酶活性迅速下降后逐渐升高, NaCl 胁迫明显降低了谷胱甘肽含量, 而抗坏血酸含量变化不大; NaCl 胁迫显著提高了叶片脯氨酸含量, Na<sup>+</sup> 含量随着 NaCl 浓度增加不断提高, K<sup>+</sup> 含量和 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 逐渐下降, 质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性、总可溶性蛋白、热稳定蛋白和热不稳定蛋白含量先升后降, 游离氨基酸含量先降后升, 可溶性糖含量呈降-升-降趋势变化; 盐胁迫下活性氧代谢失调和 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 平衡破坏及积累有机溶质进行渗透调节时更多能量的消耗可能是燕麦生长受抑的重要因素。

**关键词** 燕麦; NaCl 胁迫; 活性氧代谢; 渗透调节物质

**中图分类号** Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)9-2255-06

**Responses of active oxygen metabolism and osmotica accumulation of *Avena nude* L. seedlings to NaCl stress.** LIU Jian-xin<sup>\*\*</sup>, WANG Jin-cheng, WANG Rui-Juan, JIA Hai-yan (College of Life Science and Technology, Longdong University, Provincial Key Laboratory for Protection and Utilization of Longdong Bio-resources in Gansu Province, Qingyang 745000, Gansu, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(9): 2255–2260.

**Abstract:** A sand culture experiment was conducted to study the effects of NaCl stress on the seedling's growth, active oxygen metabolism, and osmotica contents of *Avena nude* L. (cultivar Dingyou No. 6). Six levels (0, 50, 100, 150, 200, and 250 mmol · L<sup>-1</sup>) of NaCl were installed. NaCl stress inhibited the seedling growth significantly, and the inhibition was aggravated with increasing concentration of NaCl. The maximum concentration of NaCl that the seedlings could be in resistance to was about 150 mmol · L<sup>-1</sup>. With the increasing concentration of NaCl, the leaf O<sub>2</sub><sup>-</sup> production rate and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and malondialdehyde contents increased dramatically, the activities of superoxide dismutase, guaiacol peroxidase, and ascorbate peroxidase decreased after an initial increase, and the catalase activity increased gradually after a rapid decrease. The NaCl stress decreased the leaf glutathione content markedly, but the ascorbic acid content was less affected. Under NaCl stress, the leaf proline content had a significant increase. With the increasing concentration of NaCl, the leaf Na<sup>+</sup> content increased markedly, the K<sup>+</sup> content and K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratio were in adverse, the plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase activity and the contents of total soluble protein, heat-stable protein, and heat-unstable protein decreased after an initial increase, the free amino acid content decreased first and increased then, and the soluble sugar content presented a trend of decrease-increase-decrease. All the results indicated that the imbalance of leaf

<sup>\*</sup> 甘肃省庆阳市科技支撑计划项目(NK2011-25)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: liujx1964@163.com

收稿日期: 2012-02-24 接受日期: 2012-06-04

active oxygen metabolism, the disturbance of leaf  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  homeostasis, and the more consumed energy for osmotic adjustment by accumulated organic solutes under NaCl stress could be the main causes for the growth inhibition of the seedlings.

**Key words:** *Avena nuda* L.; NaCl stress; active oxygen metabolism; osmotica.

盐害是制约农业生产发展主要的逆境因素之一。盐胁迫下,植物细胞代谢受阻,引起离子失衡和活性氧积累,植株生长受抑,严重时造成细胞死亡(Munns & Tester, 2008)。植物则通过限制盐分离子的过量吸收和区隔化,增强渗透调节和提高抗氧化防护等对盐胁迫产生抗性(Mittler, 2002)。燕麦(*Avena nuda* L.)是禾本科燕麦属的1年生草本植物,其籽粒营养丰富,并有很高医用价值,长期食用对控制血脂(Drzikova *et al.*, 2005)、血糖(Tapola *et al.*, 2005)和血压(Keenan *et al.*, 2002)升高疗效明显,还可促进肠道益生菌增殖,增强人体免疫力(Jenkins *et al.*, 2002)。燕麦喜冷凉、抗寒耐旱,适应性较强,为粮饲兼用作物,在西北农牧交替带种植面积比重大。以往对燕麦的研究主要集中在种质资源的收集(张向前等, 2010)、品种选育(杨才等, 1998)、适应性栽培(樊明寿等, 2005)以及生物活性成分分析(Bratt, 2003; Givens *et al.*, 2004)等方面,对于燕麦耐盐机理的研究鲜见报道(王波等, 2007)。“定菰6号”燕麦是甘肃省定西市旱作农业科研推广中心以1633-112-1作母本、蒙燕146作父本杂交选育而成的适合在西北地区种植的新品种。本试验研究不同浓度NaCl胁迫对其幼苗生长、活性氧代谢和渗透调节物质积累的影响,以期了解‘定菰6号’的耐盐性及其响应盐胁迫的生理机制,为燕麦的种植推广和耐盐品种选育提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料培养与处理

燕麦品种“定菰6号”的种子(由甘肃省定西市旱作农业科研推广中心馈赠)经消毒、催芽后,选露白一致的播种在装有珍珠岩的塑料盆(直径20 cm, 高度14 cm)中,浇足水后置温室培养,昼/夜温度( $28 \pm 4$ )  $^{\circ}\text{C}$  / ( $21 \pm 5$ )  $^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度65%~75%, 光照强度530~720  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。出苗后每2 d浇一次1/2 Hoagland 营养液,2叶1心期疏苗,每盆保留一致壮苗约120株,3叶1心期分别用含NaCl为0 (CK)、50、100、150、200和250  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的Hoagland 溶液进行盐胁迫处理,浇灌于每天17:00进行,

浇灌量为珍珠岩持水量的2倍(约1000 mL)以保持处理浓度的恒定。每个处理重复5次,随机排列。处理7 d后取倒数第2和第3片功能叶液氮速冻后 $-70^{\circ}\text{C}$ 保存,测定相关生理指标。

### 1.2 测定指标和方法

**1.2.1 株高增加值、鲜重和干重的测定** 处理7 d前后分别用直尺测量幼苗地上部高度,后者减去前者即为株高增加值。每个重复取30株幼苗,洗净、吸干后称全株鲜重,105  $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min,70  $^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重,称干重。

**1.2.2 超氧阴离子( $\text{O}_2^{\cdot-}$ )产生速率、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和丙二醛(MDA)含量的测定** 按Tan等(2008)的方法,称取0.50 g鲜叶片,5 mL 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  PBS(pH 7.0)冰浴研磨,10000  $\times g$ 冷冻离心30 min,上清液为待测提取液。取0.5 mL上清液,按Sui等(2007)的方法测定 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率。1.0 mL上清液加入0.1 mL 20%  $\text{TiCl}_4$ 摇匀,然后加0.2 mL浓氨水,采用Moloi和Westhuizen(2006)的方法测定 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量。取1.0 mL上清液,加2.5 mL 0.5% TBA,沸水浴20 min,冰浴终止反应后35000  $\times g$ 离心10 min,取上清液按Predieri等(1995)的方法测定MDA含量。

**1.2.3 SOD、POD、CAT和APX活性及GSH、AsA含量的测定** 取1.2.2中提取的待测液,按Tan等(2008)的氯化硝基四氮唑蓝(NBT)法,560 nm比色测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,以抑制NBT光化还原的50%为一个酶活性单位;愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,将每分钟 $\text{OD}_{470}$ 值增加0.01定义为1个活力单位。在3.0 mL反应体系中,包括0.3%  $\text{H}_2\text{O}_2$  1.0 mL,  $\text{H}_2\text{O}$  1.9 mL,最后加入100  $\mu\text{L}$ 待测液,测定过氧化氢酶(CAT)活性,以每分钟 $\text{OD}_{240}$ 值减少0.01定义为1个活力单位。在3.0 mL反应体系中,包括0.3  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 抗坏血酸(AsA) 100  $\mu\text{L}$ , 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  PBS(pH 7.0) 1.8 mL, 0.1  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{O}_2$  100  $\mu\text{L}$ ,然后加入1.0 mL提取液测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,以每分钟 $\text{OD}_{290}$ 值降低0.01定义为1个酶活性单位。称取0.20 g叶片,分别用2.0 mL 5%三氯乙酸和15%偏磷酸溶液研磨,将匀浆液15000  $\times g$ 离心20 min,上清液定容

至 2.0 mL,作为测定谷胱甘肽(GSH)和 AsA 的提取液。分别采用 Ellman(1959)和 Arakawa 等(1981)的方法测定 GSH 和 AsA 含量。

1.2.4 可溶性糖、游离氨基酸、脯氨酸和可溶性蛋白含量的测定 分别采用李合生(2000)的蒽酮比色法、茚三酮染色法和磺基水杨酸法测定叶片可溶性糖、游离氨基酸和脯氨酸含量。用考马斯亮蓝 G-250法测定总可溶性蛋白含量(李合生,2000),以 BSA 作标准蛋白。按李美如等(1996)的方法测定热稳定蛋白含量,并计算热不稳定蛋白含量。

1.2.5 质膜 H<sup>+</sup>-ATPase 活性和 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量测定 叶片质膜微囊提取和 H<sup>+</sup>-ATPase 活性测定采用陈海燕等(2007)的方法。Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 按王宝山和赵可夫(1995)的方法浸提,FP640 型火焰光度计测定含量。

1.3 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件方差分析,Duncan 法检验差异显著性(α=0.05)。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对燕麦幼苗生长的影响

从表 1 可见,随着 NaCl 浓度的增加,燕麦幼苗株高增加值、鲜重和干重呈下降趋势。与 CK 相比,50 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 处理的株高增加值、鲜重和干重无显著差异;100 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 时鲜重虽明显降低,但株高增加值和干重仍无明显差异;150 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下,株高增加值、鲜重和干重分别下降了 27.4%、26.8% 和 10.2%,差异显著;此后随着处理浓度的增加,株高增加值、鲜重和干重下降的幅度进一步增大。另外,从形态观察,50 和 100 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下燕麦幼苗生长正常;150 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 时叶片发暗,植株呈现一定的萎蔫;200 mmol · L<sup>-1</sup> 及其以上浓度 NaCl 处理的幼苗不仅萎蔫严重,而且叶片边缘呈灼烧状。可知,“定菰6号”燕麦

表 1 NaCl 胁迫对燕麦幼苗株高增加值、鲜重和干重的影响  
Table 1 Effects of NaCl stress on enhanced plant height, weights of fresh and dry in *Avena nude* seedlings

| NaCl 浓度<br>(mmol · L <sup>-1</sup> ) | 株高增加值<br>(cm) | 鲜重<br>(mg · plant <sup>-1</sup> ) | 干重<br>(mg · plant <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0(CK)                                | 4.81±0.28 a   | 43.20±2.59 a                      | 5.29±0.13 a                       |
| 50                                   | 4.84±0.19 a   | 43.56±3.18 a                      | 5.34±0.08 a                       |
| 100                                  | 4.52±0.01 a   | 35.15±2.11 b                      | 5.17±0.08 a                       |
| 150                                  | 3.49±0.18 b   | 31.64±1.85 bc                     | 4.75±0.14 b                       |
| 200                                  | 2.17±0.44 c   | 27.16±3.04 cd                     | 4.61±0.17 b                       |
| 250                                  | 1.55±0.37 c   | 22.08±1.57 d                      | 3.97±0.24 c                       |

同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

可耐受 NaCl 胁迫的最大浓度约为 150 mmol · L<sup>-1</sup>。  
2.2 NaCl 胁迫对燕麦幼苗叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量的影响

从表 2 可见,随着 NaCl 浓度的提高,燕麦幼苗叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量呈递增趋势。在 NaCl 浓度为 50 和 100 mmol · L<sup>-1</sup> 时,O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率与 CK 差异不显著,150 mmol · L<sup>-1</sup> 及其以上浓度处理的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率显著高于 CK,且相互间差异显著;50 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 处理的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量与 CK 相比变化不大,100 ~ 250 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 处理时 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量显著提高,但各浓度处理间差异不显著;50 和 100 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 处理下 MDA 含量即迅速升高,大于 100 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 的各浓度处理更显著提高了 MDA 含量,但相互间无显著差异。

2.3 NaCl 胁迫对燕麦幼苗叶片抗氧化系统的影响

如表 3 显示,随着 NaCl 浓度的增加,SOD、POD 和 APX 活性呈先升后降变化,100 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 时均出现活性最高值,尔后逐渐降低至 CK 水平或以下;CAT 活性则呈迅速下降后逐渐升高的趋势变化。与 CK 相比,在 50 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 处理下 GSH 含量即明显降低,此后随 NaCl 浓度增加,GSH 含量升高至 CK 水平,在 250 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 时又降至 CK 以下。AsA 含量随 NaCl 浓度提高变化不大。

2.4 NaCl 胁迫对燕麦幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

由表 4 可知,随着 NaCl 浓度的增加,燕麦幼苗叶片中总可溶性蛋白含量呈先升后降变化,在 100 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 时出现最大值。可溶性蛋白中热稳定和热不稳定蛋白含量也随 NaCl 浓度提高先升后降,但热稳定蛋白含量高于热不稳定蛋白,导致热稳

表 2 NaCl 胁迫对燕麦叶片 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量的影响  
Table 2 Effects of NaCl stress on O<sub>2</sub><sup>-</sup> production rate, contents of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and MDA in *Avena nude* leaves

| NaCl 浓度<br>(mmol · L <sup>-1</sup> ) | O <sub>2</sub> <sup>-</sup> 产生速率<br>(nmol · g <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup> ) | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 含量<br>(μmol · g <sup>-1</sup> ) | MDA 含量<br>(nmol · g <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------|---|---|-------------------------------------|
| 0(CK)                                | 2.56±0.08 d   | 9.14±0.74 b   | 13.74±1.49 c                        |
| 50                                   | 2.69±0.13 d   | 9.64±0.82 b   | 18.95±1.86 b                        |
| 100                                  | 2.77±0.08 d   | 17.32±0.55 a  | 20.18±1.79 b                        |
| 150                                  | 4.00±0.13 c   | 18.35±1.24 a  | 25.11±0.95 a                        |
| 200                                  | 4.62±0.15 b   | 18.82±1.31 a  | 28.76±1.97 a                        |
| 250                                  | 5.53±0.07 a   | 19.57±1.75 a  | 28.86±1.35 a                        |

数据以鲜重计。

表 3 NaCl 胁迫对燕麦叶片 SOD、POD、CAT、APX 活性和 GSH、AsA 含量的影响  
Table 3 Effects of NaCl stress on activities of SOD, POD, CAT and APX and contents of GSH and AsA in *Avena nude* leaves

| NaCl 浓度<br>(mmol · L <sup>-1</sup> ) | SOD 活性<br>(U · g <sup>-1</sup> ) | POD 活性<br>(U · g <sup>-1</sup> ) | CAT 活性<br>(U · g <sup>-1</sup> ) | APX 活性<br>(U · g <sup>-1</sup> ) | GSH 含量<br>(μg · g <sup>-1</sup> ) | AsA 含量<br>(mg · g <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0 (CK)                               | 142.41±10.04 bc                  | 1.49±0.05 c                      | 81.27±5.67 c                     | 9.25±0.47 c                      | 9.36±0.13 a                       | 0.20±0.02 a                       |
| 50                                   | 144.13±9.84 bc                   | 1.84±0.04 c                      | 64.60±4.00 d                     | 16.31±0.56 ab                    | 6.91±0.15 c                       | 0.24±0.02 a                       |
| 100                                  | 190.14±11.90 a                   | 4.86±0.14 a                      | 93.71±6.19 c                     | 19.47±0.58 a                     | 7.22±0.12 bc                      | 0.23±0.02 a                       |
| 150                                  | 158.58±5.86 ab                   | 2.59±0.08 b                      | 115.86±6.67 b                    | 12.98±1.23 b                     | 8.29±0.11 ab                      | 0.24±0.01 a                       |
| 200                                  | 130.37±14.49 bc                  | 2.36±0.09 b                      | 122.13±4.33 ab                   | 8.72±0.94 c                      | 8.21±0.22 ab                      | 0.22±0.01 a                       |
| 250                                  | 117.72±8.66 c                    | 1.49±0.12 c                      | 133.90±5.12 a                    | 5.09±0.64 d                      | 6.98±0.14 c                       | 0.23±0.02 a                       |

数据以鲜重计。

表 4 NaCl 胁迫对燕麦幼苗可溶性蛋白、可溶性糖、游离氨基酸和脯氨酸含量的影响 (mg · g<sup>-1</sup>)  
Table 4 Effects of NaCl stress on contents of soluble protein, soluble sugar, free amino acid and proline in *Avena nude* leaves

| NaCl 浓度<br>(mmol · L <sup>-1</sup> ) | 总可溶性<br>蛋白含量 | 热稳定<br>蛋白含量 | 热不稳定<br>蛋白含量 | 可溶性糖<br>含量  | 游离氨基酸<br>含量  | 脯氨酸含量       |
|--------------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| 0 (CK)                               | 3.60±0.01 c  | 1.95±0.01 b | 1.66±0.03 bc | 1.85±0.04 b | 1.80±0.02 a  | 0.11±0.03 c |
| 50                                   | 3.90±0.08 c  | 2.17±0.03 b | 1.74±0.11 b  | 0.80±0.03 c | 1.19±0.05 c  | 0.43±0.02 b |
| 100                                  | 5.51±0.17 a  | 3.25±0.15 a | 2.26±0.11 a  | 0.78±0.11 c | 1.26±0.08 bc | 0.38±0.01 b |
| 150                                  | 4.82±0.09 b  | 3.03±0.15 a | 1.79±0.06 b  | 0.93±0.12 c | 1.85±0.17 a  | 0.40±0.01 b |
| 200                                  | 4.56±0.08 b  | 3.16±0.08 a | 1.41±0.08 c  | 4.54±0.07 a | 1.55±0.02 ab | 0.62±0.01 a |
| 250                                  | 2.48±0.10 d  | 1.64±0.02 c | 0.84±0.04 d  | 1.84±0.09 b | 1.84±0.01 a  | 0.46±0.05 b |

数据以鲜重计。

定蛋白含量明显下降的 NaCl 浓度大于热不稳定蛋白。可溶性糖含量随 NaCl 浓度增大呈降-升-降变化,游离氨基酸含量总体呈先降后升趋势。NaCl 胁迫不同程度提高了脯氨酸含量,并随胁迫强度增大呈先升高后下降变化。

2.5 NaCl 胁迫对燕麦幼苗叶片质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性和 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>含量的影响

NaCl 胁迫下,燕麦幼苗叶片中 Na<sup>+</sup>含量明显增加,K<sup>+</sup>含量和 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>显著降低,增加或降低的程度随 NaCl 浓度增大而增强;质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性随 NaCl 浓度增加呈先升高后下降变化,在 150 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 时活性最高,250 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 时降至 CK 以下(表 5)。

表 5 NaCl 胁迫对燕麦叶片质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性和 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>含量的影响

Table 5 Effects of NaCl stress on plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase activity and the contents of Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> in *Avena nude* leaves

| NaCl 浓度<br>(mmol · L <sup>-1</sup> ) | 质膜 H <sup>+</sup> -ATP<br>酶活性<br>(μmol Pi · mg <sup>-1</sup><br>protein · h <sup>-1</sup> ) | K <sup>+</sup> 含量<br>(mmol · g <sup>-1</sup> ) | Na <sup>+</sup> 含量<br>(mmol · g <sup>-1</sup> ) | K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup> |
|--------------------------------------|---|--|---|---------------------------------|
| 0 (CK)                               | 1.23±0.03 c   | 1.21±0.01 a                                    | 1.22±0.02 d                                     | 0.99±0.04 a                     |
| 50                                   | 1.42±0.07 bc  | 1.19±0.01 a                                    | 1.32±0.05 d                                     | 0.90±0.06 a                     |
| 100                                  | 2.16±0.14 a   | 0.91±0.04 b                                    | 1.56±0.07 c                                     | 0.58±0.05 b                     |
| 150                                  | 2.33±0.05 a   | 0.77±0.02 c                                    | 1.88±0.09 b                                     | 0.41±0.02 c                     |
| 200                                  | 1.63±0.07 b   | 0.76±0.03 c                                    | 2.38±0.11 a                                     | 0.32±0.02 cd                    |
| 250                                  | 0.77±0.12 d   | 0.71±0.06 c                                    | 2.41±0.12 a                                     | 0.29±0.09 d                     |

数据以干重计。

3 讨论

3.1 盐胁迫对燕麦幼苗生长和活性氧代谢的影响  
生物量是植物对盐胁迫响应的综合反映,也是植物耐盐性的直接指标 (Levitt, 1980)。本试验表明,随着盐胁迫强度的增加,燕麦幼苗株高增加值、鲜重和干重呈下降趋势(表 1)。当 NaCl 浓度为 150 mmol · L<sup>-1</sup> 及其以上浓度时,燕麦幼苗的生长受到显著抑制。这种变化与其他淡土植物生长受盐胁迫抑制的结果一致(朱义等,2007),但与一定盐浓度促进盐生植物生长的响应不同(杨明锋等,2007)。说明燕麦与盐生植物存在不同的盐适应机制。在本试验条件下,“定蓓 6 号”燕麦可耐受的最高 NaCl 浓度约为 150 mmol · L<sup>-1</sup>。

维持活性氧代谢平衡是保证植物正常生长发育的重要机制。在植物遭受盐胁迫时,活性氧会大量积累并造成膜脂过氧化(Parida & Das, 2005)。燕麦也不例外,随着 NaCl 浓度的增加,叶片中 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 产生速率及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 MDA 含量明显提高(表 2),表明盐胁迫引起了膜脂过氧化伤害。但植物抗氧化系统常因植物种类和处理方式等不同存在很大差异,甚至出现相反的趋势(魏国强等, 2004; 陈海燕等, 2007)。本试验显示,不同浓度盐胁迫降低了 GSH 含量,AsA 含量却维持相对稳定(表 3);随着 NaCl 浓度的增加,SOD、POD 和 APX 活性呈先升后降趋



势, CAT 活性在  $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 时迅速下降, 然后持续升高。在  $50 \sim 150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下, SOD、CAT( $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 除外)、POD 和 APX 活性不同程度提高, 在活性氧清除中发挥了重要作用。在  $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下, SOD 和 APX 活性已降至对照水平, 活性氧仅靠活性较高的 POD 和 CAT 清除。在  $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 时 SOD 和 APX 活性显著低于对照, 这时活性氧清除主要靠维持在对照活性的 POD 和高活性的 CAT 来完成(表 3), 活性氧清除能力明显降低, 结果导致活性氧积累并造成膜脂过氧化(表 2)。盐胁迫强度提高引起的活性氧代谢失调可能是导致植株生长受抑的重要因素, 这与苏桐等(2008)的研究结果一致。

### 3.2 盐胁迫对燕麦渗透溶质积累和离子均衡的影响

积累渗透溶质进行渗透调节和维持离子的相对均衡是植物适应盐胁迫的重要策略。盐胁迫引起胞质  $\text{Na}^+$  升高,  $\text{Na}^+$  通过跨质膜转运或通过跨液泡膜区隔化至液泡中使胞质免受伤害(Parida & Das, 2005), 胞质中则积累可溶性糖、脯氨酸、多元醇等一些低分子量细胞相容性物质来维持细胞的渗透平衡(Munns & Tester, 2008)。而  $\text{Na}^+$  的跨膜转运需要  $\text{H}^+$ -ATPase 提供驱动力(Serrano, 1989)。另外, 植物在盐胁迫下大量积累  $\text{Na}^+$  的同时会抑制  $\text{K}^+$  的吸收。因此, 维持  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  平衡是衡量植物耐盐性的重要指标。本试验中, 随着 NaCl 浓度的增加, 燕麦幼苗叶片中  $\text{Na}^+$  含量明显增加, 而  $\text{K}^+$  的吸收受到显著抑制, 从而引起  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  显著降低(表 5), 说明盐胁迫破坏了  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  平衡。 $50 \sim 200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理提高了叶片质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性, 这对防止亚细胞单位脱水, 维持膜系统正常功能具有重要作用; $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下, 质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 活性显著下降, 可能是盐胁迫诱导的活性氧积累导致了质膜的损伤(Kerkebet *et al.*, 2001)。可溶性蛋白、可溶性糖、游离氨基酸和脯氨酸等有机溶质是植物细胞重要的渗透调节物质, 其积累量与渗透胁迫强度密切相关(Turner, 1975)。本试验表明, 不同浓度盐胁迫下, 游离氨基酸含量下降或维持在对照水平(表 4), 在燕麦渗透调节中的作用不大。在  $50 \sim 150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下, 可溶性糖含量显著降低, 总可溶性蛋白和脯氨酸含量明显升高, 说明可溶性蛋白和脯氨酸在此强度盐胁迫中发挥着重要的渗透调节功能。在  $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下, 可溶性糖含量显著提高, 脯氨酸含量进一步上升, 总可溶性蛋白仍维持

较高水平, 此时可溶性的蛋白质和糖及脯氨酸是主要的渗透调节物质; 在  $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫下, 总可溶性蛋白明显降低, 可溶性糖也下降至对照水平, 脯氨酸含量虽较  $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 有所下降, 但仍显著高于对照, 脯氨酸仍发挥着重要的渗透调节作用。热稳定蛋白含量与植物耐热、耐冷性关系的研究较多(陈贵林等, 2002), 而植物耐盐方面的研究较少。本试验表明,  $50 \sim 200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 胁迫提高了燕麦叶片热稳定蛋白的含量(表 4)。热稳定蛋白除具有热稳定特性外, 还具有高度的亲水性和调节渗透压的功能(李美如等, 1996), 表明热稳定蛋白在燕麦的盐适应中发挥着重要作用, 这与孙立平等(2007)在盐胁迫下水杨酸可诱导热稳定蛋白合成, 提高玉米耐盐能力的研究结果类似。

## 4 结 论

随着盐胁迫浓度提高, 燕麦幼苗生长受抑明显增强。在本实验条件下, “定麦 6 号”燕麦可耐受的最高 NaCl 浓度约为  $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。盐胁迫下, 活性氧代谢失调引发的膜脂过氧化、 $\text{K}^+$  与  $\text{Na}^+$  平衡破坏及积累有机溶质进行渗透调节能耗增加等可能是盐胁迫抑制燕麦生长的重要原因。

## 参考文献

- 陈贵林, 高洪波, 乜兰春, 等. 2002. 钙对茄子嫁接苗生长和抗冷性的影响. 植物营养与肥料学报, **8**(4): 478-482.
- 陈海燕, 崔香菊, 陈 熙, 等. 2007. 盐胁迫及  $\text{La}^{3+}$  对不同耐盐性水稻根中抗氧化酶及质膜  $\text{H}^+$ -ATPase 的影响. 作物学报, **33**(7): 1086-1093.
- 樊明寿, 孙亚卿, 邵金旺, 等. 2005. 不同形态氮素对燕麦营养生长和磷素利用的影响. 作物学报, **31**(1): 114-118.
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- 李美如, 刘鸿先, 王以柔, 等. 1996. 水稻幼苗冷锻炼过程中钙的效应. 植物学报, **38**(9): 735-74.
- 苏 桐, 龙瑞军, 魏小红, 等. 2008. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下燕麦幼苗氧化损伤的保护作用. 草业学报, **17**(5): 48-53.
- 孙立平, 吴学友, 刘丽霞, 等. 2007. 渗透胁迫下水杨酸对玉米幼苗根系 63.5 kD 热稳定蛋白的调控作用. 西北植物学报, **27**(7): 1389-1393.
- 王 波, 张金才, 宋凤斌, 等. 2007. 燕麦对盐碱胁迫的生理响应. 水土保持学报, **21**(3): 86-89.
- 王宝山, 赵可夫. 1995. 小麦叶片中 Na、K 提取方法的比较. 植物生理学通讯, **31**(1): 50-52.
- 魏国强, 朱祝军, 方学智, 等. 2004. NaCl 胁迫对不同品种

- 黄瓜幼苗生长叶绿素荧光特性和活性氧代谢的影响. 中国农业科学, **37**(11): 1754–1759.
- 杨才, 赵云云, 孙敬三, 等. 1998. 用未成熟胚离体培养法获得四倍体大燕麦与六倍体裸燕麦杂种植株的研究初报. 麦类作物学报, **18**(5): 36–37.
- 杨明锋, 杨超, 候文莲, 等. 2002. NaCl 和 KCl 胁迫对碱蓬根和地上部生长的效应. 山东师范大学学报, **17**(1): 68–72.
- 张向前, 刘景辉, 齐冰洁, 等. 2010. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, **11**(2): 168–174.
- 朱义, 谭贵娥, 何池全, 等. 2007. 盐胁迫对高羊茅(*Festuca arundinacea*)幼苗生长和离子分布的影响. 生态学报, **27**(12): 5447–5454.
- Arakawa N, Tsutsumi K, Sanceda NG, *et al.* 1981. A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline. *Agricultural Biology and Chemistry*, **45**: 1289–1290.
- Bratt K. 2003. Avenanthramides in oats (*Avena sativa* L.) and structure-antioxidant activity relationships. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **51**: 594–600.
- Drzikova B, Dongowski G, Gebhardt E. 2005. Dietary fibre-rich oat-based products affect serum lipids, microbiota, formation of short-chain fatty acids and steroids in rats. *British Journal of Nutrition*, **94**: 1012–1025.
- Ellman GL. 1959. Tissue sulfhydryl groups. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **82**: 70–77.
- Givens DI, Davies TW, Laverick RM. 2004. Effect of variety, nitrogen fertilizer and various agronomic factors on the nutritive value of husked and naked oats grain. *Animal Feed Science and Technology*, **113**: 169–181.
- Jenkins AL, Jenkins DJ, Zdravkovic U, *et al.* 2002. Depression of the glycemic index by high levels of beta-glucan fiber in two functional foods tested in type 2 diabetes. *European Journal of Clinical Nutrition*, **56**: 622–628.
- Keenan JM, Pins JJ, Frazel C, *et al.* 2002. Oat ingestion reduces systolic and diastolic blood pressure in patients with mild or borderline hypertension. *Journal of Family Practice*, **51**: 369–375.
- Kerkeb L, Donaire JP, Rodriguez-Rosales MP. 2001. Plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase activity is involved in adaptation of tomato call to NaCl. *Physiologia Plantarum*, **111**: 483–490.
- Levitt J. 1980. Response of plants to Environmental Stress (2nd Ed). New York: Academic Press.
- Mittler R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, **7**: 405–410.
- Moloi MJ, Westhuizen AJ. 2006. The reactive oxygen species are involved in resistance responses of wheat to the Russian wheat aphid. *Journal of Plant Physiology*, **163**: 1118–1125.
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, **59**: 651–681.
- Parida AK, Das AB. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **60**: 324–349.
- Predieri S, Norman HA, Krizek DT, *et al.* 1995. Influence of UV-B radiation on membrane lipid composition and ethylene of evolution in ‘Doyenne d’Hiver’ pear shoots grown in vitro under different photosynthetic photo fluxes. *Environmental and Experimental Botany*, **35**: 152–160.
- Serrano R. 1989. Structure and function of plasma membrane ATPase. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **40**: 61–94.
- Sui N, Liu X, Wang N, *et al.* 2007. Response of xanthophylls cycle and chloroplastic antioxidant enzymes to chilling stress in tomato over-expressing glycerol-3-phosphate acyl-transferase gene. *Photosynthetica*, **45**: 447–454.
- Tan W, Liu J, Dai T, *et al.* 2008. Alterations in photosynthesis and antioxidant enzymes activity in winter wheat subjected to postanthesis water-logging. *Photosynthetica*, **46**: 21–27.
- Tapola N, Karvonen H, Niskanen L, *et al.* 2005. Glycemic responses of oat bran products in type 2 diabetic patients. *Nutrition Metabolism and Cardiovascular Diseases*, **15**: 255–261.
- Turner NC. 1975. Concurrent comparisons of stomatal behavior, water status, and evaporation of maize in soil at high or low water potential. *Journal of Plant Physiology*, **55**: 932–936.

---

作者简介 刘建新,男,1964年生,教授,主要从事植物生理生态与细胞信号转导研究。E-mail: liujx1964@163.com  
责任编辑 魏中青

---