

# 外源一氧化氮供体硝普钠对黑麦草幼苗耐碱性的影响<sup>\*</sup>

刘建新<sup>\*\*</sup> 王 鑫 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, 研究外源一氧化氮(NO)供体硝普钠(SNP)对NaHCO<sub>3</sub>胁迫下黑麦草幼苗生长、活性氧代谢和渗透溶质积累的影响。结果表明: 60 μmol · L<sup>-1</sup> SNP能够缓解100 mmol · L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>胁迫对黑麦草幼苗生长的抑制作用, 减缓NaHCO<sub>3</sub>胁迫导致的叶片O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和丙二醛(MDA)含量的增加, 提高NaHCO<sub>3</sub>胁迫下幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、质膜H<sup>+</sup>-ATP酶的活性和谷胱甘肽(GSH)、可溶性糖、可溶性蛋白质和脯氨酸的含量及K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>比, 降低过氧化氢酶(CAT)活性和抗坏血酸(AsA)含量, 对游离氨基酸含量影响不大。上述结果表明, NO可能通过激活抗氧化系统活性、促进渗透溶质积累和改善Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>平衡等缓解碱胁迫对幼苗的伤害, 从而提高黑麦草的耐碱性。

**关键词** 硝普钠; 黑麦草; NaHCO<sub>3</sub>胁迫; 活性氧代谢; 渗透溶质

**中图分类号** Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)10-2173-06

**Effects of exogenous nitric oxide donor sodium nitroprusside on alkali resistance of *Lolium perenne* seedlings.** LIU Jian-xin<sup>\*\*</sup>, WANG Xin, WANG Rui-juan, JIA Hai-yan (College of Life Science and Technology, Longdong University/University Provincial Key Laboratory for Protection and Utilization of Longdong Bio-resources in Gansu Province, Qingyang 745000, Gansu, China). Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2173–2178.

**Abstract:** A sand culture experiment was conducted to study the effects of nitric oxide (NO) donor sodium nitroprusside (SNP) on the growth, leaf active oxygen metabolism, and leaf osmotica accumulation of ryegrass (*Lolium perenne* L.) seedlings under NaHCO<sub>3</sub> stress. Under the stress of 100 mmol NaHCO<sub>3</sub> · L<sup>-1</sup>, applying 60 μmol · L<sup>-1</sup> of SNP could alleviate the seedling's growth inhibition, increase the leaf O<sub>2</sub><sup>-</sup> generation rate and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and malondialdehyde contents, promote the leaf superoxide dismutase, guaiacol peroxidase, ascorbate peroxidase, and plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase activities, increase the leaf glutathione, soluble sugar, soluble protein, and proline contents and K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratio, and decrease the leaf catalase activity and ascorbic acid content. Little effects were observed on the leaf free amino content. These results suggested that SNP could alleviate the damage of alkali stress on *Lolium perenne* seedling leaves via activating the antioxidant system activity, promoting the osmotica accumulation, and improving the Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> balance, and accordingly, promote the alkali resistance of the ryegrass plant.

**Key words:** sodium nitroprusside (SNP); *Lolium perenne* L.; NaHCO<sub>3</sub> stress; active oxygen metabolism; osmotica.

土壤盐碱化已成为世界性的环境问题和制约农牧业发展的重要逆境因素。目前, 世界上有100多个国家存在着约1.5 × 10<sup>9</sup> hm<sup>2</sup>的盐碱地, 其中23%

为盐土, 37%是苏打土(Kenneth, 1990)。由于土壤碱化往往与盐化相伴发生, 所以常将土壤中可溶性盐分的增加笼统地称为“土壤盐碱化”。盐碱化土壤中的致害盐类除了以NaCl和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>为主的中性盐以外, 还有以Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和NaHCO<sub>3</sub>为主的碱性盐。

<sup>\*</sup> 甘肃省庆阳市科技支撑计划项目(GK098-1-34)资助。

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

收稿日期: 2011-04-06 接受日期: 2011-07-12

为研究方便,通常将中性盐胁迫称为盐胁迫,而将碱性盐胁迫称为碱胁迫(张丽平等,2008)。碱胁迫下,植物除遭受同盐胁迫共有的胁迫外,还要受高 pH 胁迫。所以,碱胁迫比盐胁迫具有更强的生态破坏力(白文波等,2008)。实际上,碱胁迫和盐胁迫是两种既相关但又有本质区别的不同性质的胁迫(杨春武等,2007)。研究证明,盐、碱胁迫下渗透胁迫和离子毒害这两种原初反应引发的活性氧(ROS)积累是造成植物次生氧化损伤的重要原因(曲元刚和赵可夫,2004; Munns & Tester, 2008)。因此,研究植物抗氧化系统和渗透平衡对碱胁迫的响应揭示植物碱胁迫适应机制,提高植物耐碱性具有重要意义。

一氧化氮(NO)是生物体内的信号分子,在植物生长发育及应答干旱、盐害、冷害、强光和病原菌感染等逆境胁迫反应中起重要作用(Besson-Bard *et al.*, 1999; Crawford & Guo, 2005; 许岳飞等, 2009)。研究证明,外源 NO 参与植物对盐胁迫应答反应的调控。盐胁迫下,NO 可缓解小麦、番茄和黄瓜的氧化损伤(Ruan *et al.*, 2001; 吴雪霞等, 2006; 樊怀福等, 2007), 延缓水稻叶片光化学活性的下降(Uchida *et al.*, 2002), 提高芦苇愈伤组织(Zhao *et al.*, 2004) 和玉米幼苗(张艳艳等, 2004) 中  $K^+$  与  $Na^+$  的比率,并通过调控脱落酸诱导的脯氨酸(Pro)积累,减轻盐对小麦幼苗的伤害(Ruan *et al.*, 2004)。黑麦草是目前中国栽培面积最大的禾本科优质牧草,喜温湿,耐盐碱,但盐碱胁迫仍是制约黑麦草生产的主要逆境因子(刘建新等, 2010)。然而,目前关于 NO 对碱胁迫下黑麦草生理响应调节的研究尚未见报道。中国西部许多黑麦草种植区的土壤中  $NaHCO_3$  的含量远高于  $Na_2CO_3$ 。为此,本试验研究了外源 NO 供体硝普钠对  $NaHCO_3$  胁迫下多年生黑麦草幼苗生长、叶片活性氧代谢和渗透溶质积累的影响,以期外源 NO 提高植物耐碱性提供理论依据和实践对策。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料培养和处理

将多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)品种 Oupec 的种子(购自百绿集团北京代理处)消毒、催芽后,选露白一致的播种在装有珍珠岩的塑料钵( $D=20\text{ cm}$ ,  $H=14\text{ cm}$ )中,每钵播 250 粒左右,浇足水后置温室培养。温室昼/夜温度为  $(28\pm5)^\circ\text{C}/(21\pm3)^\circ\text{C}$ ,湿度为 60%~75%,每天照光约 12 h,平均光

强  $620\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。出苗后每隔 2 d 浇 1 次 1/2 Hoagland 营养液,常规管理。待幼苗二叶一心时,每钵选留约 150 株生长一致的健壮幼苗。幼苗三叶一心时,根据预实验筛选的  $NaHCO_3$  胁迫浓度和 NO 供体硝普钠( $[Na_2Fe(CN)_5]\cdot NO$ , SNP)按如下试验设计进行浇苗处理,实验处理为:1) Hoagland 溶液, CK(pH 6.12, EC 1300); 2) 含  $60\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  SNP 的 Hoagland 溶液, SNP(pH 6.27, EC 1300); 3) 含  $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $NaHCO_3$  的 Hoagland 溶液,  $NaHCO_3$ (pH 8.71, EC 4900); 4) 含  $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $NaHCO_3$  和  $60\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  SNP 的 Hoagland 溶液,  $NaHCO_3$ +SNP(pH 8.68, EC 4700)。每天浇苗 1 次,浇灌量为珍珠岩持水量(约 1000 ml)的 2 倍以保持各处理浓度的恒定。每处理重复 5 次,随机排列。处理 6 d 后碱害症状较明显时取幼苗叶片用液氮速冻后保存在  $-80^\circ\text{C}$  冰箱中,进行各指标的测定。

### 1.2 测定指标与方法

鲜重和干重测定 处理 6 d 后取 50 株完整植株用蒸馏水冲洗干净,吸干水分后称鲜重,然后  $105^\circ\text{C}$  杀青 15 min,  $70^\circ\text{C}$  烘至恒重,称干重。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性及丙二醛(MDA)、抗坏血酸(AsA)、谷胱甘肽(GSH)含量和  $O_2^{\cdot-}$  产生速率测定采用陈建勋和王晓峰(2002)的方法;  $H_2O_2$  含量测定采用 Mukherjee 和 Choudhuri (1983) 的方法;可溶性糖、可溶性蛋白质、Pro 和游离氨基酸含量测定按李合生(2000)的方法;  $Na^+$ 、 $K^+$  含量按张艳艳等(2004)的方法浸提,火焰光度计测定;质膜微囊提取和  $H^+$ -ATP 酶活性测定参照陈海燕等(2007)的方法。各指标测定重复 3 次,结果除  $Na^+$ 、 $K^+$  以单位干重、 $H^+$ -ATP 酶活性以单位 mg 蛋白表示外,其余指标均以单位鲜重表示。

### 1.3 数据处理

所有数据采用 SPSS 16.0 软件方差分析,SSR 法检验差异显著性( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源 NO 供体 SNP 对碱胁迫下黑麦草幼苗生长的影响

图 1 显示,  $NaHCO_3$  胁迫下黑麦草幼苗全株鲜重和干重较对照明显下降。SNP 处理对正常条件下植株的生长无明显影响,但有效缓解了  $NaHCO_3$  胁迫对幼苗生长的抑制作用。与单独  $NaHCO_3$  处理相

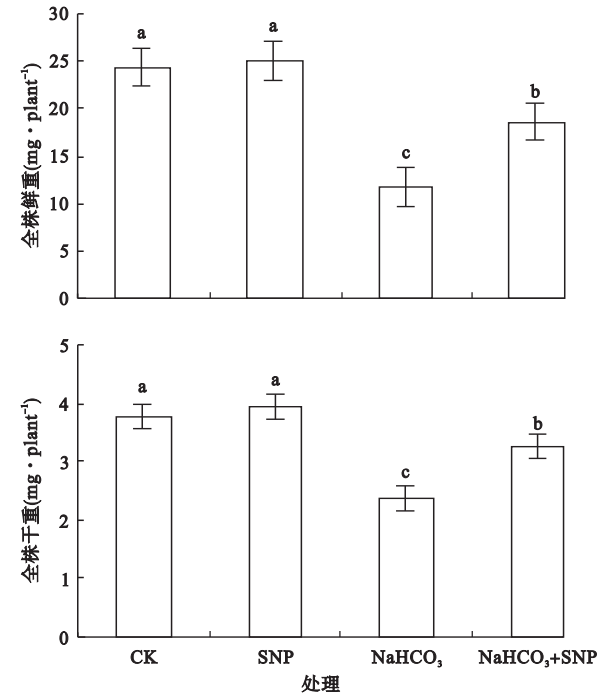


图1 NaHCO<sub>3</sub>胁迫下硝普钠对黑麦草幼苗生长的影响  
Fig.1 Effects of SNP on growth of ryegrass seedlings under NaHCO<sub>3</sub> stress  
不同字母表示处理间差异显著 (P<0.05), 下同。

比,SNP处理使NaHCO<sub>3</sub>胁迫下幼苗鲜重和干重分别提高59.1%和37.6%,差异达显著水平。

2.2 外源NO供体SNP对碱胁迫下黑麦草幼苗叶片活性氧产生和细胞膜伤害的影响

O<sub>2</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>是引发膜脂过氧化重要的活性氧,MDA是膜脂过氧化的产物之一,其含量高低在一定程度上可反映膜脂过氧化的程度。如图2所示,与对照相比,NaHCO<sub>3</sub>胁迫显著提高了黑麦草幼苗叶片中O<sub>2</sub><sup>-</sup>的产生速率及H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和MDA的含量;SNP处理对正常条件下O<sub>2</sub><sup>-</sup>的产生速率及H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和MDA的

含量影响不大,但显著抑制了NaHCO<sub>3</sub>胁迫下O<sub>2</sub><sup>-</sup>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的产生及MDA的积累。与单独NaHCO<sub>3</sub>处理相比,NaHCO<sub>3</sub>+SNP处理使O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和MDA含量分别下降了26.4%、27.7%和27.0%。

2.3 外源NO供体SNP对碱胁迫下黑麦草幼苗叶片抗氧化系统的影响

植物体内由SOD、CAT、POD和APX等抗氧化酶及AsA和GSH等非酶还原性物质构成的抗氧化系统在保持膜结构和功能的完整性方面发挥着重要作用。图3显示,与对照相比,NaHCO<sub>3</sub>胁迫明显提高了黑麦草幼苗叶片中SOD和APX的活性,显著降低了CAT、POD活性和GSH含量,对AsA含量影响不大;SNP处理对正常条件下叶片中的SOD、CAT、POD和APX活性及GSH含量无明显影响,却使AsA含量显著降低;与单独NaHCO<sub>3</sub>处理相比,NaHCO<sub>3</sub>+SNP处理使SOD、POD和APX活性及GSH含量显著提高,CAT活性和AsA含量则明显降低。

2.4 外源NO供体SNP对碱胁迫下黑麦草幼苗叶片几种渗透溶质含量的影响

可溶性的蛋白质和糖、游离氨基酸及脯氨酸是细胞重要的渗透溶质。从表1可见,与对照相比,NaHCO<sub>3</sub>胁迫显著提高了黑麦草幼苗叶片中可溶性糖和Pro的含量,明显降低了可溶性蛋白质和游离氨基酸的含量;正常生长条件下,SNP处理显著提高了Pro含量,对可溶性糖、可溶性蛋白质和游离氨基酸含量无明显影响;在NaHCO<sub>3</sub>胁迫下,增添SNP显著提高了可溶性糖、可溶性蛋白质和Pro的含量,对游离氨基酸含量无显著影响。

2.5 外源NO供体SNP对碱胁迫下黑麦草幼苗叶片Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>含量及质膜H<sup>+</sup>-ATP酶活性的影响

从表2可见,与对照相比,NaHCO<sub>3</sub>胁迫提高了

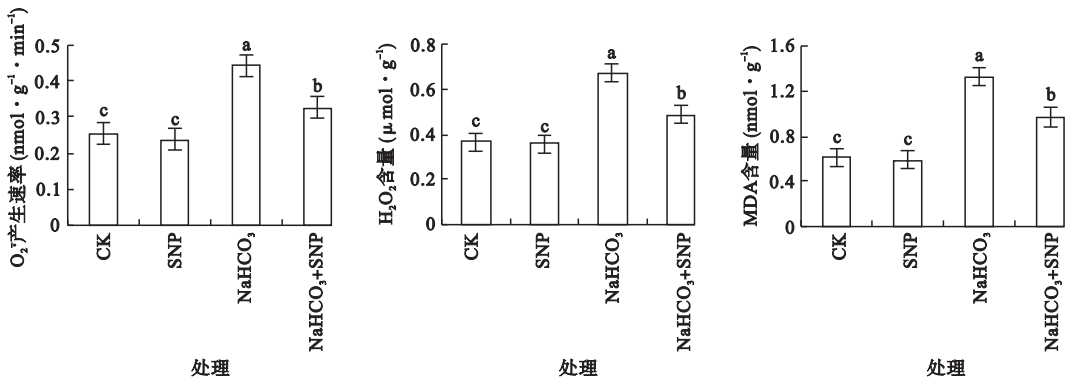


图2 NaHCO<sub>3</sub>胁迫下硝普钠对黑麦草幼苗叶片O<sub>2</sub><sup>-</sup>产生速率、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和MDA含量的影响  
Fig.2 Effects of SNP on O<sub>2</sub><sup>-</sup> generation rate and contents of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and MDA in ryegrass seedling leaves under NaHCO<sub>3</sub> stress

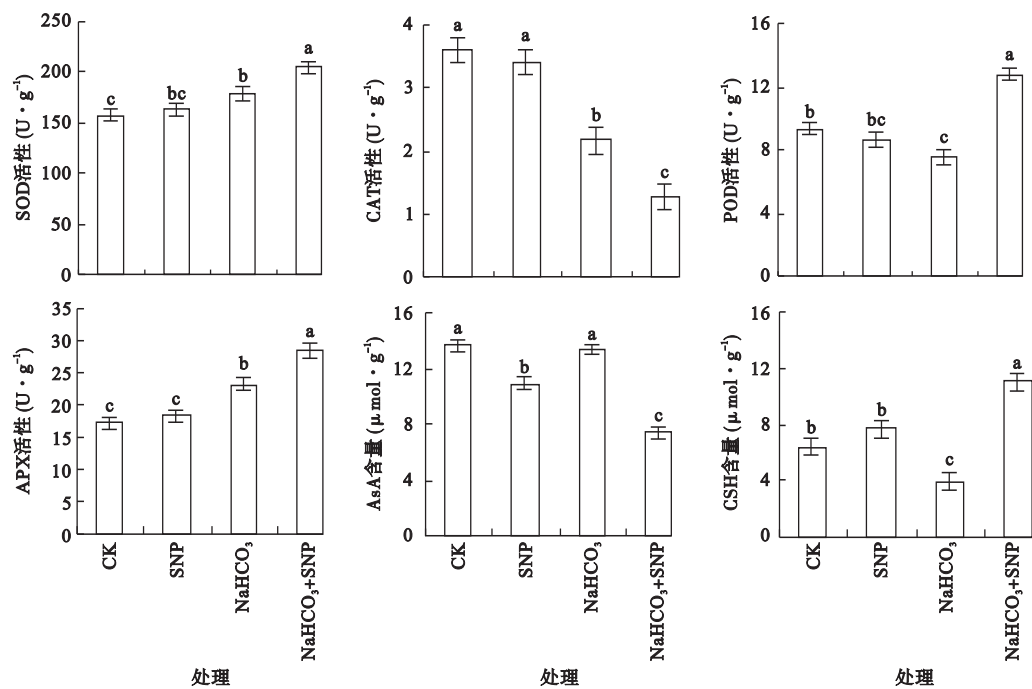


图 3 NaHCO<sub>3</sub>胁迫下硝普钠对黑麦草幼苗叶片 SOD、CAT、POD、APX 活性和 AsA、GSH 含量的影响  
Fig.3 Effects of SNP on activities of SOD, CAT, POD, APX and contents of AsA, GSH in ryegrass seedling leaves under NaHCO<sub>3</sub> stress

表 1 NaHCO<sub>3</sub>胁迫下硝普钠对黑麦草叶片可溶性的糖和蛋白质、游离氨基酸和脯氨酸含量的影响  
Table 1 Effects of SNP on contents of soluble sugar and protein, free amino acid and proline in ryegrass seedling leaves under NaHCO<sub>3</sub> stress

处理	可溶性糖 (mg · g <sup>-1</sup> )	可溶性蛋白质 (mg · g <sup>-1</sup> )	游离氨基酸 (mg · g <sup>-1</sup> )	脯氨酸 (mg · g <sup>-1</sup> )
CK	3. 183±0. 105 c	0. 850±0. 037 a	12. 74±1. 25 a	0. 146±0. 024 d
SNP	3. 407±0. 147 c	0. 802±0. 028 ab	11. 48±1. 44 a	0. 404±0. 018 c
NaHCO <sub>3</sub>	4. 065±0. 122 b	0. 638±0. 032 c	7. 54±1. 82 b	1. 012±0. 022 b
NaHCO <sub>3</sub> +SNP	5. 848±0. 136 a	0. 777±0. 030 b	6. 88±1. 56 b	1. 544±0. 013 a

同列不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

表 2 NaHCO<sub>3</sub>胁迫下硝普钠对黑麦草幼苗叶片 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量及质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性的影响  
Table 2 Effects of SNP on contents of Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> and activity of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase in ryegrass seedling leaves under NaHCO<sub>3</sub> stress

处理	Na <sup>+</sup> (mmol · g <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> (mmol · g <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> / Na <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> -ATP 酶 (μmolPi · mg <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )
CK	0. 737±0. 028 c	1. 248±0. 025 a	1. 693±0. 013 a	8. 362±0. 241 a
SNP	0. 729±0. 014 c	1. 222±0. 017 a	1. 676±0. 014 a	8. 654±0. 189 a
NaHCO <sub>3</sub>	2. 613±0. 022 a	0. 691±0. 026 c	0. 265±0. 022 c	4. 273±0. 176 c
NaHCO <sub>3</sub> +SNP	2. 130±0. 019 b	1. 057±0. 023 b	0. 454±0. 018 b	6. 144±0. 202 b

黑麦草幼苗叶片中 Na<sup>+</sup> 的含量,降低了 K<sup>+</sup> 含量和 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 比,质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性也明显下降;SNP 处理对正常条件下叶片中 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量、K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 比和质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性无明显影响,却显著降低了 NaHCO<sub>3</sub>胁迫下 Na<sup>+</sup> 的含量,提高了 K<sup>+</sup> 含量和 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 比及质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性。说明外源 NO 可能通过提高质膜 H<sup>+</sup>-ATP 酶活性,降低细胞对 Na<sup>+</sup> 的积

累和增加对 K<sup>+</sup> 的吸收。

3 讨 论

生物量变化是植物对逆境胁迫响应的综合反应。盐碱胁迫常导致植物生长受抑(杨春武等, 2007;李悦等,2011),碱胁迫下的黑麦草也不例外。外施 SNP 能够缓解碱胁迫对黑麦草幼苗生长的抑

制作用(图1),这与孙立荣等(2008)在盐胁迫下得到的结果一致,其原因可能与NO能够通过质外体直接作用于细胞壁组分使细胞壁松弛,以及NO增加膜磷脂双分子层的流动性使细胞扩展,从而促进植株生长有关(Leshem & Hamarat, 1996)。

细胞质膜是植物受伤害最敏感的部位和原初位点。本试验中,黑麦草经 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫后叶片中 $\text{O}_2^-$ 产生速率、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和MDA含量大幅提高(图2),与张丽平等(2008)在黄瓜上的研究结果一致。Beligni和Lamattina(1999)认为,NO作为抗氧化剂可抵消许多由活性氧(ROS)介导的细胞毒害。 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫下 $\text{O}_2^-$ 的积累诱导了黑麦草幼苗叶片SOD和APX活性的提高,但CAT、POD活性和GSH含量的降低最终导致了ROS的积累,造成了膜脂的过氧化(图2、3);外源NO对 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫下SOD、POD、APX活性和GSH含量明显的促进作用,提高了抗氧化系统清除ROS的能力,缓解了 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫下 $\text{O}_2^-$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 积累对黑麦草幼苗的氧化伤害作用。NO对碱胁迫下抗氧化系统的这种调节效应与在盐、镉和强光等逆境胁迫下的作用类似(Ruan *et al.*, 2001; 樊怀福等, 2007; 孙立荣等, 2008; 许岳飞等, 2009; 张义凯等, 2010)。表明外源NO可通过调控ROS的水平减轻碱胁迫对质膜的氧化损伤,从而提高植物的耐碱性。NO对ROS水平的这种下调作用可能是两种机制作用的结果:一是NO作为抗氧化剂,直接清除细胞内的ROS(Beligni *et al.*, 2002);二是NO作为信号分子通过诱导多种抗氧化酶的活性或相关编码基因的表达间接清除ROS(Hong *et al.*, 2008)。至于NO降低黑麦草叶片CAT活力的原因可能与NO能和CAT中的血红素铁直接结合而抑制其活性(Clark *et al.*, 2000)有关,而AsA含量的下降可能是NO提高了APX活性所致。

积累渗透溶质和维持较高的 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 比是植物抵御盐碱胁迫的重要机制(曲元刚和赵可夫, 2004; 白文波等, 2008; 张丽平等, 2008)。 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫下,外施SNP显著提高了黑麦草幼苗叶片中可溶性糖、Pro、可溶性蛋白质和 $\text{K}^+$ 的含量及质膜 $\text{H}^+$ -ATP酶活性,明显降低了 $\text{Na}^+$ 积累,从而提高了 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 比(表1、2)。表明外源NO可能通过提高可溶性糖、可溶性蛋白质和Pro的含量以及维持 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 的平衡,提高黑麦草的耐碱性。这与孙立荣等(2008)对黑麦草在NaCl胁迫下的研究结果类似。凌腾芳等(2005)报道,SNP处理可提高盐胁迫下水稻种子萌

发早期果糖和葡萄糖的含量,但NO促进盐碱胁迫下可溶性糖积累的原因仍不明了。NO提高可溶性蛋白质含量可能与其能诱导包括抗氧化酶等蛋白基因的表达有关(Frank *et al.*, 2000),而对Pro积累的促进作用可能是通过信号转导激活Pro合成中吡咯啉-5-羧酸合成酶和降低Pro降解关键酶脯氨酸脱氢酶活性的结果(刘建新等, 2010)。NO能提高液泡膜质子泵和 $\text{Na}^+/\text{H}^+$ 逆向转运蛋白活性降低玉米在盐胁迫下对 $\text{Na}^+$ 的吸收(Zhang *et al.*, 2006);又可激活细胞质膜内向 $\text{K}^+$ 通道活性促进小麦根系对 $\text{K}^+$ 的吸收(闻玉等, 2008)。本试验表明,外源NO可能通过提高质膜 $\text{H}^+$ -ATP酶活性(表2)参与受碱胁迫黑麦草对 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 选择性吸收的调控,这与NO对盐胁迫下芦苇(Zhao *et al.*, 2004)和玉米(张艳艳等, 2004)的研究结果一致,但NO提高盐碱胁迫下细胞 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 比的具体机制尚待进一步揭示。

综上所述,  $60 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SNP不仅能够提高  $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NaHCO}_3$ 胁迫下黑麦草幼苗叶片的SOD、POD和APX活性及GSH含量,抑制 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫诱导的 $\text{O}_2^-$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 积累对膜脂的过氧化;还可促进可溶性糖、可溶性蛋白质和Pro等渗透溶质的积累,改善 $\text{Na}^+$ 与 $\text{K}^+$ 的平衡,从而缓解 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫对植株生长的抑制作用,提高黑麦草的耐碱性。但以幼苗期黑麦草为材料得到的结果是否与其他生育期一致,以及不同强度碱胁迫下不同浓度SNP的作用效应随时间的动态变化等问题还有待进一步研究。

## 参考文献

- 白文波, 李品芳, 李保国. 2008. NaCl和 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫下马蔺生长与光合特性的反应. 土壤学报, **45**(2): 328-335.
- 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.
- 陈建勋, 王晓峰. 2002. 植物生理学实验指导. 广州: 华南理工大学出版社.
- 樊怀福, 郭世荣, 焦彦生, 等. 2007. 外源一氧化氮对NaCl胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响. 生态学报, **27**(2): 546-553.
- 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.
- 李悦, 陈忠林, 王杰, 等. 2011. 盐胁迫对翅碱蓬生长和渗透调节物质浓度的影响. 生态学杂志, **30**(1): 72-76.
- 凌腾芳, 宣伟, 樊颖瑞, 等. 2005. 外源葡萄糖、果糖和NO供体(SNP)对盐胁迫下水稻种子萌发的影响. 植物

- 生理与分子生物学学报, **31**(2): 205–212.
- 刘建新, 胡浩斌, 王鑫, 等. 2010. 一氧化氮参与盐胁迫下黑麦草幼苗脯氨酸积累的调控. 草地学报, **18**(6): 786–791.
- 刘建新, 王鑫, 王瑞娟, 等. 2010.  $\text{NaHCO}_3$  胁迫下硝酸铵对黑麦草幼苗光合机构的保护作用. 应用生态学报, **21**(11): 2836–2842.
- 曲元刚, 赵可夫. 2004.  $\text{NaCl}$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  对玉米生长和生理胁迫效应的比较研究. 作物学报, **30**(4): 334–341.
- 孙立荣, 郝福顺, 吕建洲, 等. 2008. 外源一氧化氮对盐胁迫下黑麦草幼苗生长及生理特性的影响. 生态学报, **28**(11): 5714–5722.
- 闻玉, 赵翔, 张骁. 2008. 水分胁迫下一氧化氮对小麦幼苗根系生长和吸收的影响. 作物学报, **34**(2): 344–348.
- 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 等. 2006. 外源一氧化氮对  $\text{NaCl}$  胁迫下番茄幼苗生理影响. 中国农业科学, **39**(3): 575–581.
- 许岳飞, 金晶炜, 孙小玲, 等. 2009. 一氧化氮对强光胁迫下高羊茅叶片抗氧化系统的调节效应. 生态学杂志, **28**(12): 2471–2476.
- 杨春武, 李长有, 尹红娟, 等. 2007. 小冰麦 (*Triticum aestivum*-*Agropyron intermedium*) 对盐胁迫和碱胁迫的生理响应. 作物学报, **33**(8): 1255–1261.
- 张丽平, 王秀峰, 史庆华, 等. 2008. 黄瓜幼苗对氯化钠和碳酸氢钠胁迫的生理响应差异. 应用生态学报, **19**(8): 1854–1859.
- 张艳艳, 刘俊, 刘友良. 2004. 一氧化氮缓解盐胁迫对玉米生长的抑制作用. 植物生理与分子生物学学报, **30**(4): 455–459.
- 张义凯, 崔秀敏, 杨守祥, 等. 2010. 外源  $\text{NO}$  对镉胁迫下番茄活性氧代谢及光合特性的影响. 应用生态学报, **21**(6): 1432–1438.
- Beligni MV, Fath A, Bethke PC, *et al.* 2002. Nitric oxide acts as an antioxidant and delays programmed cell death in barley aleurone layers. *Plant Physiology*, **129**: 1642–1650.
- Beligni MV, Lamattina L. 1999. Nitric oxide counteracts cytotoxic processes mediated by reactive oxygen species in plant tissues. *Planta*, **208**: 337–344.
- Besson-Bard A, Pugin A, Wendehenne D. 2008. New insights into nitric oxide signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology*, **59**: 21–39.
- Clark D, Dumer J, Navarre DA, *et al.* 2000. Nitric oxide inhibition of tobacco catalase and ascorbate peroxidase. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, **13**: 1380–1384.
- Crawford NM, Guo FQ. 2005. New insights into nitric oxide metabolism and regulatory functions. *Trends in Plant Science*, **10**: 195–200.
- Frank S, Karapfer H, Podda M. 2000. Identification of copper/zinc superoxide dismutase as a nitric oxide-regulated gene in human (HaCaT) keratinocytes: Implications for keratinocyte proliferation. *Biochemical Journal*, **346**: 719–728.
- Hong JK, Yun BW, Kang JG, *et al.* 2008. Nitric oxide function and signaling in plant disease resistance. *Journal of Experimental Biology*, **59**: 147–154.
- Kenneth KT. 1990. Agricultural Salinity Assessment and Management. New York: American Society of Civil Engineers, 1–17.
- Leshem YY, Hamarat YE. 1996. Plant aging the emission of  $\text{NO}$  and ethylene and effect of  $\text{NO}$ -releasing compounds on growth of pea (*Pisum sativum*) foliage. *Journal of Plant Physiology*, **148**: 258–263.
- Mukherjee SP, Choudhuri MA. 1983. Implications of water stress induced changes in the levels of endogenous ascorbic acid and hydrogen peroxide in *Vigna* seedlings. *Physiologia Plantarum*, **58**: 166–170.
- Munns R, Tester M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, **59**: 651–681.
- Ruan HH, Shen WB, Xu LL. 2004. Nitric oxide modulates the activities of plasma membrane  $\text{H}^+$ -ATPase and PPase in wheat seedling roots and promotes the salt tolerance against salt stress. *Acta Botanica Sinica*, **46**: 415–422.
- Ruan HH, Shen WB, Ye MB, *et al.* 2001. Protective effects of nitric oxide on salt stress-induced oxidative damage to wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves. *Chinese Science Bulletin*, **46**: 1993–1997.
- Uchida A, Jagendorf AT, Hibino T, *et al.* 2002. Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice. *Plant Science*, **163**: 515–523.
- Zhang YY, Wang LL, Liu YL, *et al.* 2006. Nitric oxide enhances salt tolerance in maize seedlings through increasing activities of proton-pump and  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  antiport in the tonoplast. *Planta*, **224**: 545–555.
- Zhao LQ, Zhang F, Guo JK, *et al.* 2004. Nitric oxide functions as a signal in salt resistance in the calluses from two ecotypes of reed. *Plant Physiology*, **134**: 849–857.

---

作者简介 刘建新, 男, 1964 年生, 教授。主要从事植物生理生态研究。E-mail: liujx1964@163.com

责任编辑 李凤芹

---