

# 外源一氧化氮供体 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗氧化损伤的保护效应

刘建新, 王鑫, 李博萍

(陇东学院生命科学系, 甘肃 庆阳 745000)

**摘要:** 研究了外源一氧化氮(NO)供体硝普钠(SNP)对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗生长和氧化损伤的影响。结果表明: 正常生长条件下喷施 SNP 能促进多裂骆驼蓬幼苗的生长, 而 NO 信号传递途径关键酶鸟苷酸环化酶(GC)抑制剂亚甲基蓝(MB)明显抑制幼苗的生长; 喷施 SNP 预处理显著缓解了 NaCl 胁迫对幼苗生长的抑制, 明显降低了 NaCl 胁迫下叶片丙二醛(MDA)、超氧阴离子( $O_2^{\cdot-}$ )和  $H_2O_2$  的积累及过氧化氢酶(CAT)活性, 提高了超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性; 使抗坏血酸(ASA)和谷胱甘肽(GSH)含量及(Spd+Spm)/Put 比值显著提高, 而 MB 逆转了 SNP 对 NaCl 胁迫幼苗生长的促进作用及 MDA、 $H_2O_2$ 、CAT、POD、ASA、GSH 和(Spd+Spm)/Put 的调节作用, 但对 SNP 调节  $O_2^{\cdot-}$ 、SOD 和 APX 的效应无明显影响。表明外源 NO 可能通过 GC 介导的 cGMP 依赖和非 cGMP 依赖两条途径参与盐胁迫下活性氧代谢的调节, 从而缓解盐胁迫导致的氧化损伤, 促进多裂骆驼蓬幼苗的生长。

**关键词:** 多裂骆驼蓬; 一氧化氮; NaCl 胁迫; 氧化损伤

**中图分类号:** Q946 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)06-0139-05

盐害是影响植物生长的主要因素之一, 提高植物耐盐性是目前耐逆研究的热点。盐胁迫下, 由于细胞代谢受阻使活性氧(ROS)产生与清除的动态平衡遭受破坏, 导致膜系统损伤和细胞伤害, 植物则会通过调节抗氧化保护系统减缓和抵御 ROS 对细胞的伤害<sup>[1]</sup>。一氧化氮(NO)是植物体内一种重要的生物活性分子, 广泛参与植物对盐逆境胁迫应答的调节<sup>[2]</sup>。研究表明, NO 能够诱导盐胁迫下水稻叶片的抗氧化酶活性, 增加耐盐相关基因的转录<sup>[3]</sup>; 缓解盐胁迫对玉米<sup>[4]</sup>和黄瓜<sup>[5]</sup>幼苗生长的抑制及小麦幼苗的氧化损伤<sup>[6]</sup>。近来的研究已证实, 在植物中 NO 作用的重要途径之一是通过激活鸟苷酸环化酶(GC)产生环鸟苷单磷酸(cGMP)而介导的, 例如, 用 NO 处理烟草叶片后可检测到 cGMP 水平迅速提高<sup>[7]</sup>。樊怀福等<sup>[8]</sup>的研究也证明, NO 可能通过 GC 介导提高 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗叶片的 GR 活性和 GSH/GSSG 比值, 缓解盐胁迫造成的伤害。

多裂骆驼蓬是骆驼蓬属(*Peganum* L.)的多年生草本植物, 为我国特有种, 广泛分布于西北地区的盐碱化荒地、荒漠化草原和黄土山坡, 形成该区盐碱、干旱植被的单优势种群<sup>[9]</sup>。因其根系发达、生长茂盛和较强的耐盐碱特性, 成为优良的水土保持植物, 在西北生态环境建设中具有抗风固沙、防止水土流

失和绿化环境等重要作用。然而, 盐害仍然是限制其生长发育的主要因素<sup>[10]</sup>。因此, 探索多裂骆驼蓬对盐渍环境的适应机理以及通过生化手段增强其耐盐性是减轻盐害的有效途径, 对生态脆弱地区植被的恢复和保护具有重要意义。目前用 NO 调控盐胁迫对植物伤害的研究多以大田和蔬菜作物为材料, 而对水土保持植物的研究并不多见。本研究以多裂骆驼蓬为材料, 探讨外源 NO 供体对 NaCl 胁迫下植株生理响应的调节作用, 以期为 NO 缓解盐胁迫伤害提供理论依据和实践对策。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料培养与处理

供试多裂骆驼蓬种子于 2007 年 8 月采自甘肃省环县, 选均匀、饱满的种子水洗后用 0.1%  $HgCl_2$  消毒 10 min, 漂洗干净, 25℃ 浸种、催芽。选露白一致的种子播于装有珍珠岩的塑料盆(上口径 23 cm, 高 21 cm)中, 置玻璃温室培育生长。温度(26±6)℃/(20±4)℃, 自然光照。萌发后浇灌 1/2 Hoagland 营养液, 幼苗长至 5~6 片真片时疏苗, 每盆保留 10~12 株, 待幼苗具 10~12 片真叶时, 选整齐一致的植株进行 NO 供体硝普钠( $[Na_2Fe(CN)_5] \cdot NO$ , SNP)或 NO 信号传递途径关键酶 GC 抑制剂亚

收稿日期: 2009-05-29

基金项目: 甘肃省教育厅科研基金资助项目(JY0510-07)

作者简介: 刘建新(1964—), 男, 教授, 主要从事植物逆境生理生态和信号转导研究, E-mail: liujx1964@163.com

甲基蓝(methylene blue, MB)进行叶片喷施处理,对照和单一 NaCl 处理喷等量蒸馏水,喷施以滴液为度,每天 7:00 和 19:00 各喷 1 次,连续喷 3 d,然后根施 NaCl 进行盐胁迫处理。为防止盐冲击,NaCl 浓度每日递增 50 mmol/L 直至实验预定浓度,溶液浇灌量以盆底渗出为限。每处理 5 次重复,随机排列。以质膜相对透性和叶绿素含量为指标,根据预试验选择的处理浓度,具体试验设计方案为:① 蒸馏水(CK);② 150  $\mu\text{mol/L}$  SNP(SNP);③ 8  $\mu\text{mol/L}$  MB(MB);④ 300 mmol/L NaCl(NaCl);⑤ 300 mmol/L NaCl + 150  $\mu\text{mol/L}$  SNP(NaCl+SNP);⑥ 300 mmol/L NaCl + 150  $\mu\text{mol/L}$  SNP + 8  $\mu\text{mol/L}$  MB(NaCl+SNP+MB)。在达到盐预定浓度后胁迫 7 d 出现明显盐害症状时采幼苗叶片进行各项生理指标的测定。

## 1.2 测定项目与方法

鲜、干重测定:植株从盆中取出并冲洗干净,吸干表面水分后称量鲜重;105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,75 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,称干重。丙二醛(MDA)含量和超氧阴离子( $\text{O}_2^{\cdot-}$ )产生速率按陈建勋和王晓峰<sup>[11]</sup>的方法测定; $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量测定采用 Mukherjee & Choudhari<sup>[12]</sup>的方法。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 Giannopolitis & Ries<sup>[13]</sup>的方法测定,以抑制氮蓝四唑(NBT)在光照下被还原 50%的酶量为一个酶活性单位(U);过氧化氢酶(CAT)测定参照 Patterson 等<sup>[14]</sup>的方法,以 240 nm 吸光度每分钟减少 0.01 为一个酶活性单位;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法<sup>[11]</sup>,以 460 nm 吸光度每分钟上升 0.01 为一个酶活性单位;抗坏血酸过氧化物酶(APX)采用 Nakano & Asada<sup>[15]</sup>的方法测定,以 280 nm 吸光度每分钟减小 0.01 为一个酶活性单位。抗坏血酸(ASA)含量按 Arakawa 等<sup>[16]</sup>的方法测定;谷胱甘肽(GSH)含量测定采用 Ellman<sup>[17]</sup>的方法;多胺的提取和含量测定参照刘俊

等<sup>[18]</sup>的方法。各指标测定至少重复 3 次,结果均以单位鲜重表示。

所有数据用 DPS 软件进行方差分析,SSR 法多重比较( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗生长的影响

与对照相比(表 1),NaCl 胁迫 7 d 后多裂骆驼蓬幼苗鲜、干重显著下降;叶面喷施 SNP 预处理显著缓解了 NaCl 胁迫对幼苗生长的抑制,使幼苗鲜、干重明显高于单独 NaCl 处理;而喷施 SNP 的同时添加 NO 信号传递途径抑制剂 MB 逆转了 SNP 对 NaCl 胁迫下幼苗生长抑制的缓解作用。正常条件下,喷施 SNP 处理的幼苗鲜、干重显著高于对照;而喷施 MB 抑制了幼苗的生长,幼苗鲜、干重较对照明显下降。

### 2.2 外源 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗叶片 MDA、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响

MDA 是膜脂过氧化的产物。NaCl 胁迫下,多裂骆驼蓬幼苗叶片 MDA 含量较对照明显增加;喷施 SNP 预处理使 NaCl 胁迫下 MDA 含量的增幅下降;但增添 MB 处理后消除了 SNP 对 NaCl 胁迫下 MDA 含量提高的抑制作用。正常条件下,SNP 或 MB 处理对幼苗叶片 MDA 含量无显著影响(表 1)。

与对照相比,NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗叶片  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量和  $\text{O}_2^{\cdot-}$  产生速率与对照相比无显著差异;SNP 预处理使 NaCl 胁迫下的  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量和  $\text{O}_2^{\cdot-}$  产生速率明显降低,分别下降了 29.8% 和 54.1%;喷施 SNP 的同时添加 MB 显著消除了 SNP 对 NaCl 胁迫下  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量的降低作用,但对 SNP 在 NaCl 胁迫下  $\text{O}_2^{\cdot-}$  的产生速率无显著影响(表 1)。

表 1 外源 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗生长及叶片 MDA、 $\text{H}_2\text{O}_2$  含量和  $\text{O}_2^{\cdot-}$  产生速率的影响

Table 1 Effects of exogenous SNP on the fresh and dry weight, contents of MDA and  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^{\cdot-}$  producing rate in *P. multisectum* seedling leaves under NaCl stress

处理 Treatment	植株生长量 Plant biomass amount (g/plant)		MDA 含量 MDA content	$\text{H}_2\text{O}_2$ 含量 $\text{H}_2\text{O}_2$ content	$\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率 $\text{O}_2^{\cdot-}$ producing rate
	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	(nmol/g)	(nmol/g)	(nmol/(g·min))
CK	3.452 $\pm$ 0.356 <sub>b</sub>	1.086 $\pm$ 0.078 <sub>b</sub>	8.84 $\pm$ 1.28 <sub>c</sub>	14.54 $\pm$ 2.58 <sub>a</sub>	1.841 $\pm$ 0.05 <sub>a</sub>
SNP	3.861 $\pm$ 0.286 <sub>a</sub>	1.216 $\pm$ 0.065 <sub>a</sub>	8.21 $\pm$ 1.35 <sub>c</sub>	13.72 $\pm$ 3.22 <sub>ab</sub>	1.75 $\pm$ 0.02 <sub>a</sub>
MB	2.975 $\pm$ 0.327 <sub>c</sub>	0.892 $\pm$ 0.073 <sub>c</sub>	8.96 $\pm$ 1.12 <sub>c</sub>	14.88 $\pm$ 2.68 <sub>a</sub>	1.93 $\pm$ 0.04 <sub>a</sub>
NaCl	2.224 $\pm$ 0.198 <sub>d</sub>	0.758 $\pm$ 0.045 <sub>d</sub>	20.76 $\pm$ 1.24 <sub>a</sub>	16.19 $\pm$ 3.41 <sub>a</sub>	1.965 $\pm$ 0.08 <sub>a</sub>
NaCl+SNP	2.768 $\pm$ 0.246 <sub>c</sub>	0.872 $\pm$ 0.062 <sub>c</sub>	12.32 $\pm$ 1.75 <sub>b</sub>	11.36 $\pm$ 2.52 <sub>b</sub>	0.902 $\pm$ 0.06 <sub>b</sub>
NaCl+SNP+MB	2.349 $\pm$ 0.331 <sub>d</sub>	0.763 $\pm$ 0.056 <sub>d</sub>	18.17 $\pm$ 1.83 <sub>a</sub>	15.67 $\pm$ 2.76 <sub>a</sub>	1.034 $\pm$ 0.06 <sub>b</sub>

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准误( $n=5$ );同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

Note: The data are mean value  $\pm$ SE ( $n=5$ ), while different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level between different treatments. They are the same as below.

2.3 外源 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗叶片活性氧清除系统的影响

由表 2 可见,NaCl 胁迫下,多裂骆驼蓬幼苗叶片 SOD 和 POD 活性较对照显著提高,CAT 和 APX 活性无明显差异,而 ASA、GSH 含量显著低于对照;喷施外源 SNP 预处理使 NaCl 胁迫下幼苗叶片的 SOD、POD 和 APX 活性及 ASA、GSH 含量明显高于单独 NaCl 胁迫处理,CAT 活性却较单独 NaCl 处理下降 15.7%,下降幅度达显著水平;喷施 SNP 的同时添加抑制剂 MB 消除了 SNP 对 NaCl 胁迫下 CAT 活性的抑制作用及 POD 活性和 ASA、GSH 含量的提高作用,而 SOD、APX 活性与 NaCl+SNP 处理相比无显著变化。正常生长条件下,SNP 处理显著提高了叶片内 SOD、APX 活性和 ASA、GSH 含量,CAT 和 POD 活性无显著变化;MB 处理使叶片 SOD、POD 和 APX 活性较对照显著提高,ASA、GSH 含量明显低于对照,CAT 活性无显著差异。

表 2 外源 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗叶片活性氧清除系统的影响

Table 2 Effects of exogenous SNP on the activities of SOD, CAT, POD and APX and contents of ASA and GSH in *P. multisetum* seedling leaves under NaCl stress

处理 Treatment	SOD 活性 SOD activity (U/g)	CAT 活性 CAT activity (U/g)	POD 活性 POD activity (U/g)	APX 活性 APX activity (U/g)	ASA 含量 ASA content (mg/g)	GSH 含量 GSH content (mg/g)
CK	212.6±13.4c	51.7±6.4a	72.2±7.6d	8.2±2.5c	3.83±0.13b	0.75±0.11b
SNP	239.8±10.6b	47.2±5.3ab	70.3±5.3d	11.6±2.6b	4.52±0.22a	1.28±0.14a
MB	232.5±9.8b	50.3±6.8a	84.5±8.3c	10.8±1.9b	3.14±0.35c	0.36±0.07c
NaCl	243.7±12.6b	50.8±7.3a	96.2±5.1b	8.7±1.3c	3.06±0.16c	0.45±0.09c
NaCl+SNP	281.4±8.9a	42.8±5.8b	123.8±6.4a	14.7±1.7a	3.75±0.25b	0.77±0.07b
NaCl+SNP+MB	276.3±10.4a	52.2±4.9a	92.5±5.1b	15.0±2.1a	2.96±0.18c	0.48±0.05c

表 3 外源 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗叶片游离态多胺含量的影响(nmol/g)

Table 3 Effects of exogenous SNP on free polyamine content and (Spd+Spm)/Put ratio in *P. multisetum* seedling leaves under NaCl stress

处理 Treatment	腐胺 Putricine (Put)	亚精胺 Spermidine (Spd)	精胺 Spermine (Spm)	多胺总量 Total content	(Spd+Spm)/Put
CK	148.49±9.01a	77.58±8.59c	60.31±8.08c	286.38±12.01a	0.929±0.168d
SNP	145.38±5.62a	78.92±6.37c	58.63±7.19c	282.93±10.22a	0.946±0.153d
MB	152.46±7.49a	62.35±9.32d	49.82±5.67d	264.63±8.64c	0.736±0.122e
NaCl	122.15±8.47b	88.27±10.63b	65.92±7.21b	276.34±10.87ab	1.262±0.241c
NaCl+SNP	95.73±9.22d	100.54±11.18a	71.78±5.96a	268.05±13.25bc	1.800±0.219a
NaCl+SNP+MB	110.06±10.51c	93.69±8.04ab	68.04±7.42ab	271.79±8.96bc	1.469±0.185b

3 讨论

生长量是植物对盐胁迫响应的综合反应。本研究结果表明,NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗生长受到显著抑制,而喷施外源 NO 供体 SNP 能够显著缓解 NaCl 胁迫对幼苗生长的抑制作用,喷施 SNP 的同时添加 NO 信号传递途径抑制剂 MB 逆转了 SNP 对盐

2.4 外源 SNP 对 NaCl 胁迫下多裂骆驼蓬幼苗叶片游离态多胺含量的影响

从表 3 可见,NaCl 胁迫下,多裂骆驼蓬幼苗叶片中游离态 Put 含量显著低于对照,Spd 和 Spm 含量及(Spd+Spm)/Put 比值明显提高,多胺总量变化不大;SNP 喷施预处理使 NaCl 胁迫下叶片的 Put 含量进一步降低,Spd 和 Spm 含量及(Spd+Spm)/Put 比值较单独 NaCl 处理显著提高,多胺总量显著低于对照;喷施 SNP 的同时添加抑制剂 MB 部分逆转了 SNP 对 NaCl 胁迫下 Spd 和 Spm 含量及(Spd+Spm)/Put 比值的提升作用,Put 含量较 NaCl+SNP 处理显著提高,但多胺总量无显著变化。正常生长条件下喷施外源 SNP 对多裂骆驼蓬幼苗叶片 Put、Spd、Spm 含量及(Spd+Spm)/Put 比值与对照相比无显著差异;喷施抑制剂 MB 使正常条件下叶片 Put 含量与对照相比变化不明显,Spd、Spm 含量和多胺总量及(Spd+Spm)/Put 比值显著低于对照。

胁迫下幼苗生长抑制的缓解效应;正常生长条件下喷施 SNP 同样促进了幼苗的生长,添加 MB 时则使幼苗的生物积累量显著降低。说明外施 NO 供体可有效促进盐胁迫或正常条件下多裂骆驼蓬幼苗的生长,这与 NO 可通过质外体直接作用于细胞壁组分,使细胞壁松弛,以及 NO 作用于膜的磷脂双分子层,增强膜的流动性,从而促进细胞扩展有关<sup>[19]</sup>。阻断

NO 的信号传递使幼苗生长受到抑制的原因可能是 NO 对植株生理代谢的调节受抑所致。

盐胁迫下 ROS 积累是细胞氧化伤害的直接原因,而细胞膜系统是盐害最敏感的部位和原初位点。SNP 是一种常用的 NO 供体, Delledonne 等<sup>[20]</sup> 证明 0.5 mmol/L SNP 约能产生 2.0  $\mu\text{mol/L}$  NO。本试验结果表明,正常条件下喷施 SNP 或 NO 信号传递途径抑制剂 MB 对多裂骆驼蓬叶片  $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  和 MDA 积累无显著影响。盐胁迫下 SNP 预处理能显著降低叶片  $\text{O}_2^{\cdot-}$  的产生速率及  $\text{H}_2\text{O}_2$  和 MDA 的含量;而抑制剂 MB 显著逆转了 SNP 对盐胁迫下  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、MDA 的调节作用,但对  $\text{O}_2^{\cdot-}$  产生速率无明显影响。由此表明,NO 可通过调节 ROS 水平减轻盐胁迫对膜脂的过氧化损伤,其原因可能与 NO 以直接或经  $\text{H}_2\text{O}_2$  介导间接抑制顺乌头酸酶活性而降低 ROS 水平相关<sup>[21]</sup>。

植物体内存在着酶促和非酶促两类活性氧清除系统防御 ROS 对膜脂的攻击,维持膜结构和功能的完整性。SOD、CAT、POD 和 APX 等组成植物清除 ROS 的酶系统,而 ASA 和 GSH 等是重要的非酶抗氧化物质。其中 SOD 催化  $\text{O}_2^{\cdot-}$  发生歧化反应生成  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,而 CAT、POD 和 APX 则进一步清除  $\text{H}_2\text{O}_2$ 。本研究表明,正常条件下,SNP 显著提高了多裂骆驼蓬叶片内 SOD、APX 活性和 ASA、GSH 含量;抑制剂 MB 使 SOD、POD 和 APX 活性显著提高,而 ASA 和 GSH 含量明显下降,MB 抑制正常条件下幼苗生长的原因可能与其降低 ASA 和 GSH 含量从而破坏体内氧化还原平衡有关。NaCl 胁迫下 SNP 诱导了叶片 SOD 活性的提高,抑制剂 MB 未能显著阻断这种效应。SNP 预处理显著提高了 NaCl 胁迫下叶片的 POD 和 APX 活性,但降低了 CAT 活性,说明 SNP 减轻 NaCl 胁迫下  $\text{H}_2\text{O}_2$  积累主要与其提高 POD 和 APX 活性有关;MB 消除了 SNP 对 NaCl 胁迫下 CAT 和 POD 活性的调节作用,但对 APX 活性的调节无显著影响,提示 NO 对 CAT 和 POD 活性的调控可能依赖 cGMP 信号转导途径。这与叶文景等<sup>[22]</sup> 在白骨壤 (*Avicennia marina*) 幼苗上的研究结果一致,而与 Clark 等<sup>[23]</sup> 提出的 NO 直接与 CAT 中的血红素铁结合抑制烟草 (*Nicotiana tabacum* L.) 叶片 CAT 活性的调节机制不同,这种差异可能与材料或 CAT 同工酶对 NO 信号形成和响应机制差别有关<sup>[21]</sup>。NaCl 胁迫下 SNP 显著提高了多裂骆驼蓬叶片 ASA 和 GSH 含量,MB 逆转了 SNP 对 NaCl 胁迫下 ASA 含量的提高效应,却对 GSH 含量无显著影响。ASA 和 GSH 是植物通过 ASA-GSH 循环清除  $\text{H}_2\text{O}_2$  过程中的反应

底物,SNP 对 GSH 水平显著的诱导作用可能与其对 GSH 合成代谢途径限速酶编码基因的上调有关<sup>[24]</sup>。GSH 是催化 ASA 合成的关键酶双脱氢抗坏血酸还原酶的底物,而 SNP 处理提高了盐胁迫下的 GSH 含量,可能部分促进了 ASA 含量的上升。

多胺是植物代谢过程中产生的一类低分子量脂肪族含氮碱,主要包括 Put、Spd 和 Spm,在维持蛋白质和核酸等大分子的构象和清除 ROS 方面具有重要作用。盐胁迫下大麦体内游离态 Spm、Spd 和 Put 的平衡与其耐盐性密切相关,游离态 Put 向 Spm 和 Spd 的转化有利于提高耐盐性<sup>[25]</sup>。本研究结果显示,正常条件下 SNP 对多裂骆驼蓬叶片 Put、Spd、Spm 含量及 (Spd+Spm)/Put 比值无显著影响;抑制剂 MB 使 Spd、Spm 含量和 (Spd+Spm)/Put 比值显著降低,这可能也是 MB 抑制幼苗生长的又一重要原因。NaCl 胁迫下,外源 SNP 使 Put 含量显著下降,Spd 和 Spm 含量及 (Spd+Spm)/Put 比值明显升高,抑制剂 MB 阻断了 SNP 对 NaCl 胁迫下 Put 含量和 (Spd+Spm)/Put 比值的调节作用,而对 Spd、Spm 含量无显著影响,这表明 NO 可能通过依赖 cGMP 和非依赖 cGMP 两条途径调控盐逆境下多胺的平衡,提高 (Spd+Spm)/Put 比值,增强植物抗盐胁迫伤害的能力。

综上所述,通过喷施外源 NO 供体 SNP 预处理提高了 NaCl 胁迫下叶片的 SOD、POD 和 APX 等活性氧清除酶活性和非酶抗氧化物质 ASA 和 GSH 含量,使 (Spd+Spm)/Put 比值增大,从而增强了植株抗氧化损伤的能力,促进了盐胁迫下多裂骆驼蓬幼苗的生长。

#### 参 考 文 献:

- [1] Sreenivasulu N, Grimm B, Wobus U, et al. Differential response of antioxidants to salinity stress in salt tolerant and salt sensitive seedlings of foxtail millet (*Setaria italica*) [J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 109(4): 435-442.
- [2] Zhao M G, Tian Q Y, Zhang W H. Nitric oxide synthase-dependent nitric oxide: production is associated with salt tolerance in *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiology*, 2007, 144(1): 206-217.
- [3] Uchida A, Jagendorf A T, Hibino T, et al. Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice [J]. *Plant Science*, 2002, 163(3): 515-523.
- [4] 张艳艳, 刘俊, 刘友良. 一氧化氮缓解盐胁迫对玉米生长的抑制作用 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004, 30(4): 55-59.
- [5] 樊怀福, 郭世荣, 焦彦生, 等. 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 [J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 546-553.
- [6] 陈明, 沈文彪, 阮海华, 等. 一氧化氮对盐胁迫下小麦幼苗根生长和氧化损伤的影响 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004,

- 30(5):569-576.
- [7] Dumer J, Wendehenne D, Klessing D F. Defense gene induction in tobacco by nitric oxide, cyclic GMP, and cyclic ADP-ribose[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1998, 95(17):10328-10333.
- [8] 樊怀福,郭世荣,段九菊,等.外源 NO 对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长和谷胱甘肽抗氧化酶系统的影响[J].生态学报,2008,28(6):2511-2517.
- [9] 马骥,王勋陵.中国荒漠地区骆驼蓬属植物种类与分布[J].中国沙漠,1998,18(2):131-136.
- [10] 刘建新,赵国林,胡浩斌,等.NaCl 胁迫对骆驼蓬属植物渗透调节作用的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):115-119.
- [11] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导(第一版)[M].广州:华南理工大学出版社,2002:120-129.
- [12] Mukherjee S P, Choudhuri M A. Implications of water stress induced changes in the levels of endogenous ascorbic acid and hydrogen peroxide in vigna seedlings[J]. Physiologia Plantarum, 1983, 58:166-170.
- [13] Giannopolitis C N, Ries S K. Purification and quantitative relationship with water-soluble protein in seedling[J]. Plant Physiol, 1977, 59:315-318.
- [14] Patterson B D, Payne L A, Chen Y, et al. An inhibitor of catalase induced by cold chilling-sensitive plants[J]. Plant Physiol, 1984, 76:1014-1018.
- [15] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. Plant Cell Physiol, 1981, 22:867-880.
- [16] Arakawa N, Tsutsumi K, Sanceda N G, et al. A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline [J]. Agric Biol Chem, 1981, 45(5):1289-1290.
- [17] Ellman G L. Tissue sulfhydryl groups[J]. Arch Biochem Biophys, 1959, 82:70-77.
- [18] 刘俊,吉小佳,刘友良.检测植物组织中多胺含量的高效液相色谱法[J].植物生理学通讯,2002,38(6):596-598.
- [19] Leshem Y Y, Hamarat Y E. Plant aging the emission of NO and ethylene and effect of NO-releasing compounds on growth of pea (*Pisum sativum*) foliage[J]. J Plant Physiol, 1996, 148:258-263.
- [20] Delledonne M, Xia Y J, Dixon R A. Nitric oxide function as a signal in plant disease resistance [J]. Nature, 1998, 394(6693):585-588.
- [21] Navarre D A, Wendehenne D, Durner J, et al. Nitric oxide modulates the activity of tobacco aconitase[J]. Plant Physiol, 2000, 122:573-582.
- [22] 叶文景,肖强,朱珠,等.一氧化氮对 NaCl 处理下白骨壤幼苗活性氧代谢的调节[J].厦门大学学报,2006,45(增):105-108.
- [23] Clark D, Durner J, Navarre D A, et al. Nitric oxide inhibition of tobacco catalase and ascorbate peroxidase[J]. Mol Plant-Microbe Interact, 2000, 13(12):1380-1384.
- [24] Gegg M E, Beltran B, Salas-Pino S, et al. Differential effect of nitric oxide on glutathione metabolism and mitochondrial function in astrocytes and neurons: implications for neuroprotection/neurodegeneration? [J]. J Neurochem, 2003, 86(1):228-237.
- [25] Zhao F G, Sun C, Liu Y L, et al. Relationship between polyamine metabolism in roots and salt tolerance of barley seedlings[J]. Acta Bot Sin, 2003, 45(3):295-300.

## Effects of exogenous nitric oxide donor SNP on protecting *Peganum multisectum* seedlings from oxidative damage under NaCl stress

LIU Jian-xin, WANG Xin, LI Bo-ping

(Department of Life Science, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China)

**Abstract:** Effects of exogenous nitric oxide(NO) donor sodium nitroprusside(SNP) on growth of *Peganum multisectum* Bobr seedlings and protecting them from oxidative damage under salt stress were investigated. The results indicated that spraying SNP on leaves increased the growth of *P. multisectum* seedlings in normal growth conditions, but exogenous methylene blue, the inhibitor of the key enzyme guanylyl cyclase during signal transfer of NO, decreased significantly the growth of *P. multisectum* seedlings. Spraying SNP pretreatment alleviated obviously the inhibition of *P. multisectum* seedlings growth under NaCl stress, the contents of malondialdehyde(MDA) and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, the O<sub>2</sub><sup>-</sup> producing rate and catalase(CAT) active were decreased while the activities of superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD) and ascorbate peroxidase(APX), the contents of ascorbate acid(ASA) and reduced glutathione(GSH), and (Spd+Spm)/Put ratio were significantly increased in *P. multisectum* leaves under NaCl stress. But methylene blue reversed some effects of exogenous SNP under NaCl stress, such as the plant biomass amount and POD activity, the contents of ASA and GSH, (Spd+Spm)/Put were decreased, the contents of MDA and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and CAT activity were significantly increased, however, the O<sub>2</sub><sup>-</sup> producing rate and the activities of SOD and APX were not markedly affected under NaCl stress. These results suggested that NO might involve in regulation of reactive oxygen species metabolism through cyclic guanosine monophosphate (cGMP)-dependent and cGMP-independent pathways to alleviate the oxidative damage and the inhibition of *P. multisectum* seedlings growth under salt stress.

**Keywords:** *Peganum multisectum* Bobr; nitric oxide; NaCl stress; oxidative damage