

# 外源一氧化氮对氯化钠处理下秋茄幼苗抗氧化系统的调节效应<sup>\*</sup>

张玲玲 肖强 叶文景 杨坚 朱珠 茹巧美 郑海雷<sup>\*\*</sup>

(厦门大学生命科学学院, 福建厦门 361005)

**摘要** 研究了外源一氧化氮(NO)供体硝普钠(SNP)对NaCl处理下红树植物秋茄(*Kandelia candel*)幼苗叶片中抗氧化酶活性、抗氧化物质及脯氨酸含量的影响。结果表明:NaCl处理下,秋茄幼苗叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等4种活性氧清除酶的活性均受到明显抑制( $P < 0.05$ ),SNP可以不同程度地恢复SOD、POD、CAT的活性,但对APX活性影响不大;SNP提高谷胱甘肽(GSH)及类胡萝卜素(Car)的含量,促进脯氨酸含量的上升,显著降低叶片中过氧化氢( $H_2O_2$ )和丙二醛(MDA)的累积。表明外源NO可以缓解NaCl处理诱导的秋茄幼苗叶片氧化损伤,降低膜脂过氧化水平,有利于秋茄适应盐生环境。

**关键词** 秋茄; NaCl; NO; 活性氧; 抗氧化系统

**中图分类号** Q945 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2007)11-1732-06

**Regulation effect of exogenous nitric oxide on anti-oxidation system of *Kandelia candel* seedlings treated with NaCl.** ZHANG Ling-ling, XIAO Qiang, YE Wen-jing, YANG Jian, ZHU Zhu, RU Qiao-mei, ZHENG Hai-lei (School of Life Science, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(11): 1732-1737.

**Abstract:** By using sodium nitroprusside (SNP) as the donor of exogenous nitric oxide, this paper studied its effects on the antioxidant enzyme activities, anti-oxidation substances, and proline content in the leaves of *Kandelia candel* seedlings treated with NaCl. The results showed that after treated with NaCl, the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) in *K. candel* seedling leaves were depressed significantly ( $P < 0.05$ ), while SNP could recover the activities of SOD, POD and CAT to different degrees but showed little effect on APX. SNP increased the contents of glutathione (GSH) and carotenoid (Car), promoted the production of proline, and decreased the accumulation of  $H_2O_2$  and malondialdehyde (MDA) significantly. It was indicated that SNP could relieve the oxidation damages induced by NaCl via decreasing the level of membrane lipid peroxidation in *K. candel* leaves, and facilitate *K. candel* to adapt to saline environment.

**Key words:** *Kandelia candel*; NaCl; NO; reactive oxygen species; anti-oxidation system.

## 1 引言

一氧化氮(NO)作为广泛分布于生物体的一类气体生物活性分子,属于活性氮(reactive nitrogen species, RNS)范畴。在植物中,NO的潜在来源包

括一氧化氮合成酶、硝酸还原酶、黄嘌呤氧化还原酶等酶促途径和类胡萝卜素等非酶促途径(肖强和郑海雷,2004)。植物中的NO是一种关键的信号分子,一定浓度的NO能促进植物生长,延缓叶片、花和果实衰老,促进休眠和需光种子的萌发,并能调节气孔运动,诱导程序性细胞死亡和防御相关基因的表达(程红焱和宋松泉,2005)。近期研究表明,NO与植物的抗逆性密切相关,可调节超氧化物的形成,

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(30670317和39970438)和厦门大学新世纪优秀人才支持计划项目(0000-X07115)资助。

<sup>\*\*</sup>通讯作者 E-mail: zhenghl@xmu.edu.cn

收稿日期:2007-01-15 接受日期:2007-07-03

抑制脂质过氧化,具有潜在的抗氧化作用。如 NO 在干旱处理的小麦 (*Triticum aestivum*) 叶片氧化胁迫中起到保护作用 (Mata & Lamattina, 2001); NO 可缓解渗透胁迫诱导的小麦叶片氧化损伤 (王宪叶等, 2005); 另外, NO 也可以提高植物的抗盐性 (Zhao *et al.*, 2004)。

红树植物秋茄 (*Kandelia candel*) 是生长于热带、亚热带海岸潮间带的盐生木本植物,在长期的适应和进化过程中,红树林已特化出一套独特的抗盐机制 (林鹏, 1997)。红树林生境是还原性生境,十分有利于 NO 气体的生成。那么红树林在盐渍环境下的适应性是否与 NO 有关? NO 如何调节红树林的抗盐性? 这些问题的解答对于揭示红树植物及其它耐盐湿地植物的抗 (耐) 盐机制具有十分重要的意义。本试验以秋茄幼苗为试材,采用人工控制盐度同时向营养液中施用 NO 供体硝普钠 (sodium nitroprusside, SNP) 的方法,研究了 SNP 对 NaCl 处理下秋茄幼苗叶片内活性氧水平和抗氧化系统的影响,探讨外源 NO 对秋茄幼苗盐伤害的保护效应及其可能机制,以为红树逆境机制提供新的证据。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验设计

秋茄胚轴采自福建九龙江口龙海浮宫红树林自然保护区,洗净后栽培于砂基的塑料盆中。自然光照下培养,培养期间空气相对湿度 75% 左右,白天平均温度 32 ℃,夜间平均温度 25 ℃,每天补充耗去的水量,待第一对真叶展开后每 10 天更换 1 次 Hoagland 营养液。待植株长至 2 个月大,挑选生长较一致的幼苗进行 SNP 和 NaCl 处理。100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SNP 是经预实验筛选出对植物生长起促进作用的最佳浓度。具体处理方式如下: 1) 对照, Hoagland 溶液; 2) 含 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SNP 的 Hoagland 溶液; 3) 含 250  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 的 Hoagland 溶液; 4) 含 250  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 及 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SNP 的 Hoagland 溶液; 5) 含 500  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 的 Hoagland 溶液; 6) 含 500  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 及 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SNP 的 Hoagland 溶液。每个处理 8 株, 3 个重复, 1 周后取其叶片进行测试分析。

### 2.2 测定方法

0.4 g 叶片加入 5 ml 预冷的酶提取液 (50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  磷酸缓冲液, pH 7.8, 含 10% 的 PVP 和 5  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDTA), 冰浴研磨匀浆, 4 ℃ 下 20 000  $\times$ g 离

心 20 min, 上清液用于酶活性的测定。超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定按照 Beauchamp 和 Fridovich (1971) 所建立的方法, 以抑制氮蓝四唑 (NBT) 在光照下被还原 50% 为 1 个酶活性单位 (U)。过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚法 (陈建勋和王晓峰, 2002), 以 460 nm 吸光值每 1 min 上升 0.01 为 1 个酶活性单位。过氧化氢酶 (CAT) 活性测定参照陈建勋和王晓峰 (2002) 的方法, 以 240 nm 吸光值每分钟减小 0.01 为 1 个酶活性单位。抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性测定参照 Nakano 和 Asada (1981) 的方法, 以 280 nm 吸光值每分钟减小 0.01 为 1 个酶活性单位。

$\text{H}_2\text{O}_2$  含量的测定参照王爱国等 (1990) 方法。MDA 含量的测定参照赵世杰等 (1994) 的方法。脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮法 (张殿忠等, 1990)。抗坏血酸 (AsA) 和谷胱甘肽 (GSH) 含量的测定分别参照 Arakawa 等 (1981) 和 Ellman (1959) 的方法。类胡萝卜素 (Car) 含量测定按照陈建勋和王晓峰 (2002) 的方法。

### 2.3 数据处理

数据通过 SPSS 软件进行统计分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 NaCl 处理下外源 NO 对秋茄幼苗叶片中脯氨酸含量的影响

脯氨酸含量变化如图 1 所示, NaCl 处理下出现脯氨酸累积, 随着 NaCl 处理浓度增高, 秋茄幼苗叶片内脯氨酸累积逐渐增加。500  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理下秋茄幼苗叶片内脯氨酸含量 (以鲜质量计算) 比对照组提高了 35.25%, 且较 250  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理组增加了 21.32%。外加 SNP 处理进一步提高了各浓度 NaCl 处理条件下叶片脯氨酸含量, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。由此可见外源 NO 可以促进 NaCl 处理下秋茄幼苗叶片脯氨酸含量的增加。

### 3.2 NaCl 处理下外源 NO 对秋茄幼苗叶片 MDA 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 含量的影响

图 2A 反应了不同处理条件下, 秋茄幼苗叶片中  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量的变化, 从中可看出, 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SNP 处理对未经 NaCl 处理的秋茄幼苗叶片中  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量 (以鲜质量计算) 无明显影响。但不同浓度 NaCl 处理条件下, 叶片中  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量随 NaCl 浓度的增加而升高。SNP 可明显降低 NaCl 处理下  $\text{H}_2\text{O}_2$  的积累, 与单独 NaCl 处理相比, SNP 使 NaCl 处理下秋

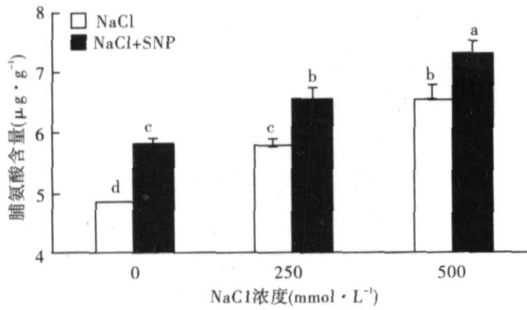


图 1 SNP对 NaCl处理下秋茄幼苗叶片脯氨酸含量的影响  
Fig 1 Effect of SNP on proline content in K. candel seedling leaves under NaCl treatments

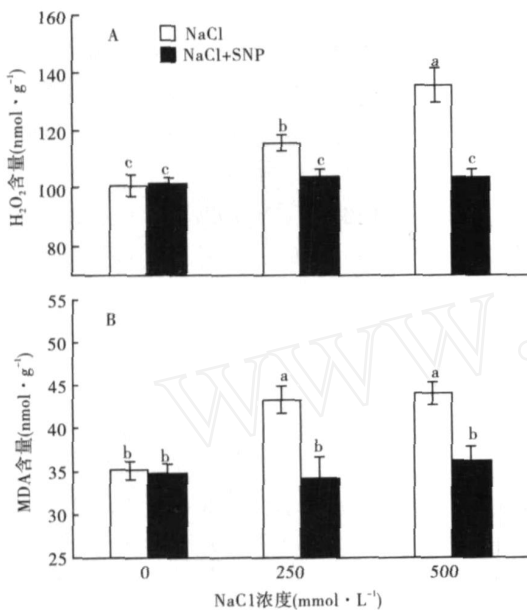


图 2 NO 供体 SNP对 NaCl处理下秋茄幼苗叶片 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (A)和 MDA (B)含量的影响  
Fig 2 Effects of SNP on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (A) and MDA (B) contents in K. candel seedling leaves under NaCl treatments

茄幼苗叶片 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量分别下降了 10.13% 和 23.64%, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。

由图 2B 可见,与对照相比,NaCl处理下,秋茄幼苗叶片中 MDA 含量显著升高,250和 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理使 MDA 含量(以鲜质量计算)分别提高了 23.02% 和 25.32%, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。SNP单独处理对 MDA 含量影响不大,但在 NaCl处理条件下同时加 SNP,则秋茄幼苗叶片 MDA 含量比单独 NaCl处理的分别下降了 21.01% 和 17.94%。SNP有效抑制秋茄幼苗叶片中 MDA 的产生,表明外源 NO可以缓解由于 NaCl处理导致的叶片膜脂过氧化作用。

### 3.3 NaCl处理下外源 NO对秋茄幼苗叶片中抗氧化酶活性的影响

由图 3A 可以看出,在 NaCl处理下,秋茄幼苗叶片内 SOD活性迅速下降,且明显低于对照,250和 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理,其 SOD活性分别比对照降低了 18.93% 和 14.26%。100 μmol·L<sup>-1</sup> SNP单独处理对秋茄幼苗叶片 SOD活性无明显影响,但 SNP处理显著增强 NaCl处理下叶片中 SOD活性。250和 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl处理下,外加 SNP处理

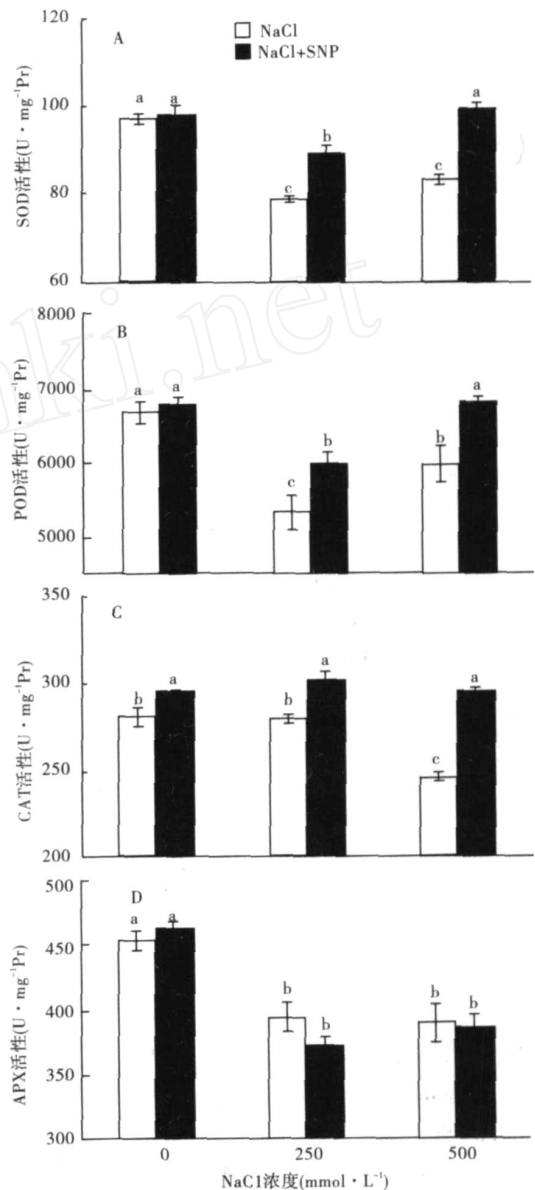


图 3 SNP对 NaCl处理下秋茄幼苗叶片 SOD (A), POD (B), CAT (C)和 APX (D)活性的影响  
Fig 3 Effects of SNP on activities of SOD (A), POD (B), CAT (C), and APX (D) in K. candel seedling leaves under NaCl treatments

的秋茄幼苗叶片中 SOD 比单加 NaCl 处理的分别提高了 13.53% 和 19.01% ( $P < 0.05$ )。

POD 表现出与 SOD 相似的变化趋势,如图 3B 所示,在不同浓度 NaCl 处理下,POD 活力迅速下降,经 SNP 处理后均明显提高了不同盐度条件下 POD 活力。SNP 处理分别使 250 和 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理下秋茄幼苗叶片的 POD 活力提高了 12.42% 和 14.40%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 3C 显示, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 清除酶 CAT 活性随 NaCl 浓度的增加而下降,250 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理时秋茄幼苗叶片 CAT 活性与对照无差异,但 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理下 CAT 活性仅为对照组的 60%。SNP 可以显著提高 CAT 酶活性,NaCl 处理下同时加入 SNP 后,叶片中 CAT 活力比单独 NaCl 处理分别提高了 7.72% 和 20.21%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。

APX 显示了与 SOD、POD 和 CAT 不同的变化规律。如图 3D 所示,不同浓度 NaCl 处理明显降低秋茄叶片 APX 活力,与对照相比,250 和 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理下,APX 活力分别下降了 12.98% 和 14.07%,差异显著 ( $P < 0.05$ ),然而对照及 NaCl 处理同时加入 SNP 对其活性影响不显著。

### 3.4 NaCl 处理下外源 NO 对秋茄幼苗叶片中抗氧化物质含量的影响

GSH 在植物体内起着清除 ROS,调节 AsA 含量及 APX 活性的作用 (阮海华等,2005)。表 1 表明,与对照相比,SNP 单独处理不影响秋茄幼苗叶片 GSH 含量。250 和 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理则不同程度地降低 GSH 含量,使其含量分别下降了 9.47% 和 7.30%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。NaCl 处理同时加入 SNP 后,秋茄幼苗叶片 GSH 含量比单加 NaCl 处理的明显上升,分别提高了 9.52% 和 27.27%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。

AsA 是一种小分子的抗氧化剂,在抵抗植物体内活性氧的损伤过程中发挥重要作用 (何文亮等,2004)。如表 1 所示,在 250 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理下,秋茄幼苗叶片中 AsA 的含量无明显变化,但当 NaCl 处理浓度增加至 500 mmol·L<sup>-1</sup>,AsA 含量明显升高。500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理同时加入 SNP 后,SNP 反而抑制 AsA 含量的上升,其 AsA 含量比单独加 NaCl 处理下降了 15.56%,使之维持在一个较稳定的水平 ( $P < 0.05$ )。与 GSH 的含量变化类似,与对照相比,SNP 单独处理对秋茄幼苗叶片 AsA 含量影响不显著。

表 1 SNP 对 NaCl 处理下秋茄幼苗叶片 GSH、AsA 和 Car 含量的影响

Tab 1 Effects of SNP on contents of GSH, AsA and Car in *K. candel seedling leaves under NaCl treatments*

处理	GSH 含量 (mg·g <sup>-1</sup> FM)	AsA 含量 (mg·g <sup>-1</sup> FM)	Car 含量 (μg·g <sup>-1</sup> FM)
CK	0.679 ±0.002b	5.264 ±0.186b	0.178 ±0.001c
SNP	0.676 ±0.006b	5.312 ±0.244b	0.188 ±0.001b
250 mmol·L <sup>-1</sup> NaCl	0.622 ±0.009c	4.824 ±0.243b	0.188 ±0.001b
250 mmol·L <sup>-1</sup> NaCl+SNP	0.687 ±0.001b	4.748 ±0.138b	0.190 ±0.001b
500 mmol·L <sup>-1</sup> NaCl	0.630 ±0.016c	6.170 ±0.148a	0.187 ±0.001a
500 mmol·L <sup>-1</sup> NaCl+SNP	0.801 ±0.005a	5.211 ±0.077b	0.191 ±0.001a

表 1 显示,不同浓度 NaCl 处理下,秋茄幼苗叶片中 Car 含量明显升高。NaCl 处理同时加入 SNP 后,Car 含量进一步增加。与对照相比,250 和 500 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 处理下,SNP 使其含量分别提高了 6.86% 和 7.31%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。SNP 单独处理也提高了叶片中 Car 含量。

## 4 讨论

盐胁迫下植物体内大量积累的脯氨酸除作为渗透调节物质外,在清除 ROS、提高抗氧化能力及稳定大分子结构等方面起重要作用 (阮海华等,2001)。Mishra 和 Das (2004) 曾报道小花木榄 (*B. nanguiera parviflora*) 短期盐处理下体内会大量积累脯氨酸。本研究表明,NaCl 处理下,秋茄幼苗叶片脯氨酸含量累积作用增强,脯氨酸累积一方面可以增加细胞的渗透调节能力,另一方面又可通过与蛋白质亲水部分结合避免了蛋白质失水变性 (赵可夫和李法曾,1999)。SNP 进一步促进其含量的增加。这暗示着外源 NO 可能诱导秋茄幼苗合成更多脯氨酸物质或抑制其降解,对增强秋茄抗盐性起到促进作用。

逆境条件下,植物细胞产生的 OH<sup>-</sup>、O<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 等自由基增多,自由基启动膜脂过氧化作用,导致膜的损伤和破坏,造成植物体内重要的活性氧清除酶活性降低 (马向平等,2005)。因此,提高逆境下植物体内的 SOD、CAT 和 POD 等酶活性能减缓膜脂过氧化过程。本研究表明,NaCl 处理下秋茄幼苗叶片中 SOD、CAT 和 POD 等抗氧化酶活性降低,叶片细胞中清除 ROS 的系统受到影响,秋茄幼苗发生氧化胁迫。NaCl 处理同时加入 SNP,幼苗叶片中 SOD、CAT 和 POD 这 3 种酶的活性均有不同程度的

增强,并能维持在较高的水平上(图 3)。表明外源 NO 可通过提高逆境胁迫下秋茄幼苗体内抗氧化酶的活性来增强对 ROS 的清除能力,提高幼苗抗逆性,从而缓解叶片受到的氧化损伤,维持细胞膜结构和功能的稳定。但同上述 3 种酶变化不同的是,外源 NO 对 NaCl 处理诱导的 APX 活力降低却没有明显效应,这可能由于该浓度的 SNP 未能有效调节 APX 活性,也可能与 SNP 对 AsA 的抑制作用有关。因为 APX 与  $H_2O_2$  结合会形成中间复合物,中间复合物继续氧化 AsA 形成产物,但当 AsA 未被复合物利用时,APX 则失活(李惠华和赖钟雄,2006)。本实验结果显示,SNP 抑制高盐处理下 AsA 含量的升高,仅有少量 AsA 被 APX 形成的中间复合物所利用,致使 APX 因底物缺乏未能提高活性。

AsA、GSH 和 Car 在植物清除 ROS 过程中也发挥重要作用。它们能直接与 ROS 反应使其还原或作为酶的底物在 ROS 的清除过程中扮演重要角色。叶文景等(2006)报道,100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  SNP 处理显著提高同为红树植物的白骨壤叶片中 GSH 和 Car 的含量。本文进一步证实,SNP 处理能显著诱导 500  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 处理下秋茄幼苗叶片 GSH 和 Car 水平的上升 ( $P < 0.05$ )。这些变化可能是 SNP 诱导秋茄幼苗对 NaCl 处理下产生过量积累 ROS 的应激反应,从而最终增强幼苗的抗氧化能力,缓解其氧化损伤。SNP 处理对叶片 GSH 水平起显著诱导作用的原因,可能与其对 GSH 合成代谢途径限速酶编码基因的上调有关,有待进一步研究。

有研究表明,外源 NO 有 2 种缓解逆境胁迫的可能机制。首先,NO 可能作为一种信号分子,改变基因的表达(Lamattina *et al*, 2003);其次,NO 也可能类似一种抗氧化剂,直接与 ROS 反应产生过氧亚硝酸盐( $\text{ONOO}^-$ ), $\text{ONOO}^-$  被质子化并分解为  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{H}^+$ ,再进一步反应生成  $\text{NO}_2$  和氧,减轻细胞损伤(Wink *et al*, 1993; Beligni & Lamattina, 2002)。本实验结果显示,SNP 处理下秋茄幼苗叶片中  $H_2O_2$  含量累积作用减弱,MDA 含量降低,NO 和 ROS 之间的联合作用表现出减轻了由 NaCl 处理诱导生成 ROS 的损害。由此可见,外源 NO 在木本植物秋茄中也形成这种保护机制。

植物抗氧化能力的提高是多种 ROS 合成途径以及酶和非酶类物质共同参与及协同作用的结果(Laspina *et al*, 2005)。本实验结果显示,外源 NO 在增强植物的抗氧化性方面发挥着重要作用。在秋

茄幼苗中,外源 NO 能显著减轻盐诱导的氧化损伤,表现在:1)增强 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶的活性;2)改变 AsA、GSH 和 Car 等物质在体内的比例;3)促进脯氨酸的积累;4)降低 MDA 和  $H_2O_2$  水平。虽然目前已经确认 NO 是植物的内源代谢物,但 NO 的生物合成还不完全清楚。今后若能结合内源 NO 的合成及 NO 更详细的信号机制,进行进一步研究,将有助于更好理解 NO 在植物抗胁迫中扮演的重要生物学作用。

## 参考文献

- 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.
- 程红焱,宋松泉. 2005 植物一氧化氮生物学的研究进展. 植物学通报, 22(6): 723-737.
- 何文亮,黄承红,杨颖丽,等. 2004 盐胁迫过程中抗坏血酸对植物的保护功能. 西北植物学报, 24(12): 2196-2201.
- 李惠华,赖钟雄. 2006 植物抗坏血酸过氧化物酶研究进展. 亚热带植物科学, 35(2): 66-69.
- 林鹏. 1997 中国红树林生态系. 北京:科学出版社.
- 马向丽,魏小红,龙瑞军,等. 2005 外源一氧化氮提高一年生黑麦草抗冷性机制. 生态学报, 25(6): 1269-1274.
- 阮海华,沈文飏,刘开力,等. 2005 外源一氧化氮供体对盐胁迫下小麦幼苗叶片谷胱甘肽抗氧化酶系统的影响. 作物学报, 131(19): 1144-1149.
- 阮海华,沈文飏,叶茂炳,等. 2001 一氧化氮对盐胁迫下小麦叶片的氧化损伤的保护效应. 科学通报, 46(23): 1993-1997.
- 王爱国,罗广华. 1990 植物的超氧自由基与羟胺反应的定量关系. 植物生理学通讯, 26(6): 55-57.
- 王宪叶,沈文飏,徐朗莱. 2004 外源一氧化氮对渗透胁迫下小麦幼苗叶片膜脂过氧化的缓解作用. 植物生理与分子生物学学报, 30(2): 195-200.
- 肖强,郑海雷. 2004 一氧化氮与植物胁迫响应. 植物生理学通讯, 40(3): 379-384.
- 叶文景,肖强,朱珠,等. 2006 一氧化氮对 NaCl 处理下白骨壤幼苗活性氧代谢的调节. 厦门大学学报(自然科学版), 45: 105-108.
- 张殿忠,汪沛洪,赵会贤. 1990 测定小麦叶片游离脯氨酸含量的方法. 植物生理学通讯, (4): 62-65.
- 赵可夫,李法曾. 1999 中国盐生植物. 北京:科学出版社.
- 赵世杰,许长成,邹琦,等. 1994 植物组织中丙二醛测定方法的改进. 植物生理学通讯, 30(3): 207-210.
- 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 & Biochemical Chemistry*, 45(5): 1289-1290.

- Beauchamp C, Fridovich I 1971. Super oxide dismutase improved assays and an assay applicable to acrylamide gels *Analytical Biochemistry*, **44**: 276-287.
- Beligni MV, Lamattina L 2002. Nitric oxide interferes with plant photo-oxidative stress by detoxifying reactive oxygen species *Plant, Cell and Environment*, **25**: 737-748.
- Ellman GL 1959. Tissue sulfhydryl groups *Archives of Biochemistry and Biophysics*, **82**: 70-77.
- Lamattina L, Carlos-García MC, Graziano M, et al 2003. Nitric oxide: The versatility of an extensive signal molecule *Plant Biology*, **54**: 109-136.
- Lasplina NV, Groppa MD, Tomaro ML, et al 2005. Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd-induced oxidative stress *Plant Science*, **169**: 323-330.
- Mata CG, Lamattina L 2001. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress *Plant Physiology*, **126**: 1196-1204.
- Mishra S, Das AB 2004. Effect of short-term exposure to NaCl on photochemical activity and antioxidant enzymes in *Barringtonia parviflora*, a non-secretor mangrove *Acta Physiologica Plantarum*, **26**(3): 317-326.
- Nakano Y, Asada K 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts *Plant Cell Physiology*, **22**: 867-880.
- Wink DA, Hanbauer I, Krishna MC, et al 1993. Nitric oxide protects against cellular damage and cytotoxicity from reactive oxygen species *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, **90**: 9813-9817.
- Zhao L, Zhang F, Guo J, 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 张玲玲,女,1980年11月生,硕士研究生。主要从事植物生理生化研究。E-mail: zhanglingling@xmu.edu.cn  
责任编辑 李凤芹

---

www.cnki.net