

# 外源 NO 对 NaCl 胁迫下燕麦幼苗抗氧化酶活性和生长的影响

芦翔<sup>1,2</sup>, 石卫东<sup>1</sup>, 王宜伦<sup>1</sup>, 汪强<sup>1</sup>, 谭金芳<sup>1</sup>, 韩燕来<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省科学院地理研究所, 河南 郑州 450002)

**摘要:**为了探讨外源 NO 是否能减轻盐胁迫对燕麦(*Avena sativa*)幼苗的伤害,以水培生长到四叶一心的燕麦幼苗为研究材料,在 150 mmol/L NaCl 胁迫下,探讨了 0.06 mmol/L 外源 NO 供体硝普钠(SNP)处理对白燕 6 号和内散 2 号 2 个燕麦品种幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性以及丙二醛(MDA)含量、质膜透性、叶绿素含量和植株干质量的影响。结果表明,NaCl 胁迫下,施入外源 NO 可提高燕麦叶片 SOD、CAT、POD 和 APX 活性,降低 MDA 含量和质膜透性,并能缓解叶绿素含量的下降,提高植株干质量,从而减轻 NaCl 胁迫对燕麦幼苗的伤害;但外源 NO 对不同抗氧化酶活性影响不同,其中对提高 SOD、CAT、APX 活性的作用相对较大,而对提高 POD 活性的作用相对较小。

**关键词:**燕麦; NO; NaCl 胁迫; 抗氧化酶活性

**中图分类号:** S512.603.4; Q945.78

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-0629(2011)12-2150-07

\*<sup>1</sup> 土壤盐渍化是世界性的问题,据统计,全球大约有 3.8 亿  $\text{hm}^2$  土地存在不同程度的盐渍化,约占可耕地面积的 10%。中国目前有 0.2 亿  $\text{hm}^2$  以上盐碱地和 0.07 亿  $\text{hm}^2$  以上盐渍化土壤,约占可耕地面积的 20%,严重影响了粮食产量,成为限制农业生产的主要因素<sup>[1-3]</sup>。

一氧化氮(NO)是生物体内的信号分子,有关 NO 对作物抗盐性的调节作用已在多种作物进行过研究。前人的相关研究表明,外源的 NO 可缓解小麦(*Triticum aestivum*)叶片和根尖细胞的氧化损伤<sup>[4]</sup>;缓解水稻(*Oryza sativa*)在盐胁迫和高温胁迫下叶绿素的降解,维持光系统 II 稳定性<sup>[5-6]</sup>;缓解盐胁迫对玉米(*Zea mays*)生长的抑制作用<sup>[7]</sup>;减轻盐胁迫对黄瓜(*Cucumis sativus*)幼苗的伤害<sup>[8]</sup>;提高番茄(*Solanum lycopersicum*)幼苗对光能利用效率,促进番茄的生长<sup>[9]</sup>。燕麦(*Avena sativa*)是一年生具有较高的营养价值的粮饲兼用型作物。与小麦相比,燕麦对盐碱土有更好的适应性,目前被广泛认为是盐碱地改良的替代作物之一<sup>[10]</sup>。虽然前人对 NO 已做较多的研究,但外源 NO 对盐胁迫下燕麦生长的调节效应及机理研究还鲜有报道。本研究利用耐盐能力不同的 2 个燕麦品种为材料,探讨外源 NO 对盐胁迫下燕麦幼苗抗氧化酶活性及生长的影响,以了解 NO 缓解燕麦盐胁迫的生理机制。

## 1 材料与方法

**1.1 供试材料** 供试燕麦品种白燕 6 号(*A. sativa* ‘BaiYan No. 6’)和内散 2 号(*A. sativa* ‘NeiSan No. 2’)是吉林白城农业科学院、内蒙古农牧大学的原种,引进当地后在相同条件下经一年的繁殖后备用。

**1.2 植株培养** 取籽粒饱满、大小一致的燕麦种子,用 1%次氯酸钠消毒 10 min 后,再用无菌水冲洗净消毒液、然后将种子放入蒸馏水中通气吸涨 4 h,均匀放入铺有一层吸水纸的培养皿中,25 °C 黑暗条件下催芽。催芽 3 d 后,挑选露白一致的种子,用 Hoagland 营养液进行水培,于(25±1) °C 恒温室培养,每天光照 12 h,光强 72.7  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,至燕麦幼苗长至四叶一心时进行试验。

**1.3 试验方案** 采用室内水培试验,设 1 个对照,3 个处理:1) Hoagland (CK); 2) Hoagland + 0.06 mmol/L 硝普钠(SNP); 3) Hoagland + 150 mmol/L NaCl (NaCl); 4) Hoagland + 0.06 mmol/L SNP + 150 mmol/L NaCl (NaCl + SNP)。重复 4 次。处理

\* 收稿日期:2010-02-22 接受日期:2011-07-07  
基金项目:河南省农业综合开发重点项目(30200141);河南省人事厅引智项目  
作者简介:芦翔(1983-),男,河南三门峡人,研究实习员,硕士,从事作物营养与施肥技术研究。  
E-mail:skyboylx@163.com  
通信作者:韩燕来 E-mail:hyanlai@126.com

8 d后进行植株干质量、叶绿素含量和叶片质膜透性的测定;于处理后 0、2、4、6、8 d,进行叶片抗氧化酶活性和丙二醛(MDA)含量测定。培养期间为保证各营养液浓度的相对稳定,每天更换一次营养液。

#### 1.4 测定项目与方法

**1.4.1 植株干质量测定** 取出完整植株,用蒸馏水快速冲洗去地上部分表面的灰尘,用吸水纸吸干表面水分后将材料放入 90 °C 的烘箱中杀青 30 min 后,65 °C 烘干至质量不变,称其干质量。

**1.4.2 叶片叶绿素含量和质膜透性的测定** 叶绿素含量的测定参照 Arnon<sup>[11]</sup> 的方法。质膜透性的测定参考刘宁等<sup>[12]</sup> 的方法。

**1.4.3 叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶活性和丙二醛含量测定** 叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性按照 Beauchamp 和 Fridovich<sup>[13]</sup> 的方法测定。过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法<sup>[14]</sup>。过氧化氢酶(CAT)活性测定参照 Patterson 等<sup>[15]</sup> 的方法。抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定参照 Nakano 和 Asada<sup>[16]</sup> 的方法,叶片中 MDA 含量参照许长成等<sup>[17]</sup> 的方法。

**1.4.4 数据处理及统计分析** 利用 Excel 2003 和 DPS 2000 对相关数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

**2.1 外源 NO 对 NaCl 胁迫下燕麦幼苗干质量的影响** 处理后 8 d,与 CK 相比,NaCl 处理白燕 6 号和内散 2 号干质量均显著下降( $P < 0.05$ ),分别下降了 26.8%和 45.1%(图 1),表明白燕 6 号的耐盐性相对较好,而内散 2 号的耐盐性相对较弱。

与 CK 相比,SNP 处理对燕麦幼苗生长无显著影响( $P > 0.05$ )。与 NaCl 处理相比,NaCl+SNP 处理均显著提高了白燕 6 号和内散 2 号干质量( $P < 0.05$ ),2 个燕麦品种分别提高了 18.3%和 48.7%,说明外源 NO 对盐胁迫下内散 2 号的幼苗干质量下降的缓解作用大于白燕 6 号。

**2.2 外源 NO 对盐胁迫下燕麦叶片丙二醛含量的影响** CK 和 SNP 处理时,两燕麦品种叶片中 MDA 含量在 8 d 内保持相对稳定,而 NaCl 胁迫后,两燕麦品种 MDA 含量均迅速上升,胁迫期间内散 2 号叶片 MDA 含量比白燕 6 号 MDA 含量平均值高 18.5%(图 2),说明 NaCl 胁迫下内散 2 号质膜氧化损伤更重。

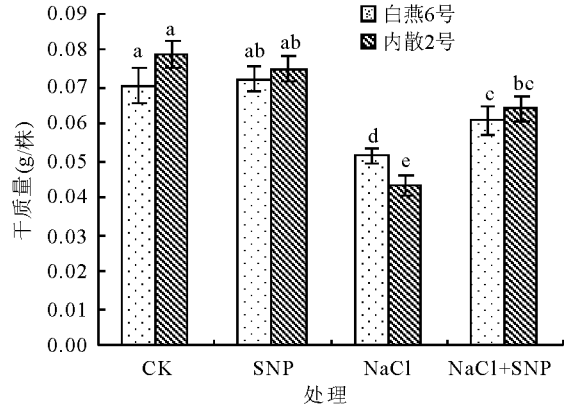


图 1 外源 NO 对 NaCl 胁迫燕麦幼苗干质量的影响

注:CK 为 Hoagland,SNP 为 Hoagland+0.06 mmol/L SNP,NaCl 为 Hoagland+150 mmol/L NaCl,NaCl+SNP 为 Hoagland+0.06 mmol/L SNP+150 mmol/L NaCl;不同字母表示同一品种不同处理间差异显著。下同。

与 NaCl 处理相比,NaCl+SNP 处理显著降低了两燕麦品种叶片的 MDA 含量( $P < 0.05$ ),特别是在处理后 4 和 6 d,白燕 6 号和内散 2 号 MDA 含量均急剧下降。其中白燕 6 号叶片 MDA 含量在处理后 2、4、6 和 8 d 分别降低了 14.4%、11.4%、19.1%和 28.9%,平均为 18.5%,内散 2 号叶片的 MDA 含量分别降低了 24.9%、19.5%、23.6%和 37.5%,平均为 26.4%。

**2.3 外源 NO 对盐胁迫下燕麦幼苗叶片质膜透性的影响** 叶片质膜透性用叶片相对电导率表示。处理后 8 d,CK 和 SNP 处理中 2 个燕麦品种叶片相对电导率均较低;与 CK 相比,NaCl 处理植株叶片相对电导率显著增加( $P < 0.05$ ),白燕 6 号和内散 2 号幼苗叶片相对电导率分别增加了 286.2%和 316.2%(图 3),说明盐胁迫对内散 2 号的伤害更大。

与 NaCl 处理相比,NaCl+SNP 处理燕麦幼苗叶片的相对电导率显著降低( $P < 0.05$ ),其中白燕 6 号和内散 2 号的叶片的相对电导率分别降低了 33.1%和 34.6%。说明在盐胁迫下,外源 NO 能够保护叶片细胞膜结构的完整性,从而使叶片质膜透性保持在相对较低的水平。

**2.4 外源 NO 对盐胁迫下燕麦幼苗叶绿素含量的影响** 处理后 8 d,CK 和 SNP 处理之间燕麦幼苗叶片叶绿素含量差异不显著( $P > 0.05$ );与 CK 相比,NaCl 处理白燕 6 号和内散 2 号幼苗叶片叶绿

素含量均显著下降( $P < 0.05$ ),分别下降了 62.7%和 72.3%(图 4),说明内散 2 号受 NaCl 胁迫影响较为严重。

与 NaCl 处理相比,NaCl+SNP 处理能显著提

高燕麦幼苗叶片叶绿素含量( $P < 0.05$ ),白燕 6 号和内散 2 号叶绿素含量分别提高了 71.9%和 97.7%,表明外源 NO 对盐胁迫下燕麦叶片叶绿素含量的下降有显著的缓解作用。

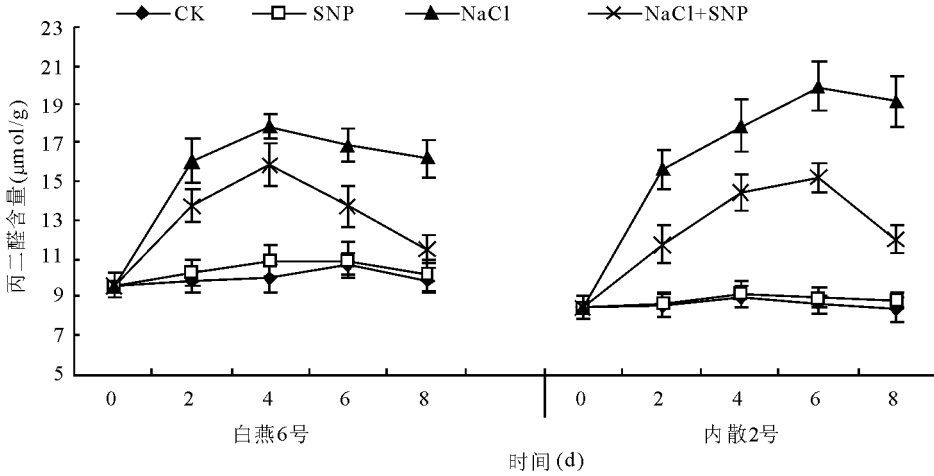


图 2 外源 NO 对 NaCl 胁迫燕麦幼苗叶片丙二醛含量的影响

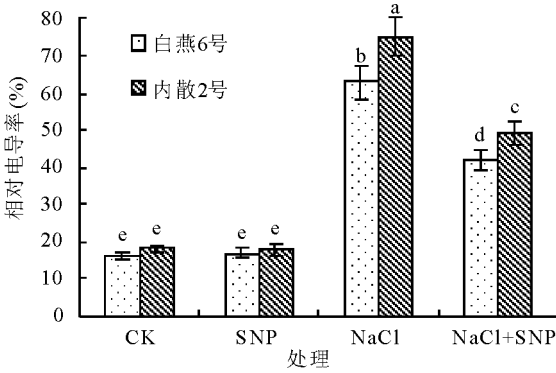


图 3 外源 NO 对 NaCl 胁迫燕麦幼苗叶片相对电导率的影响

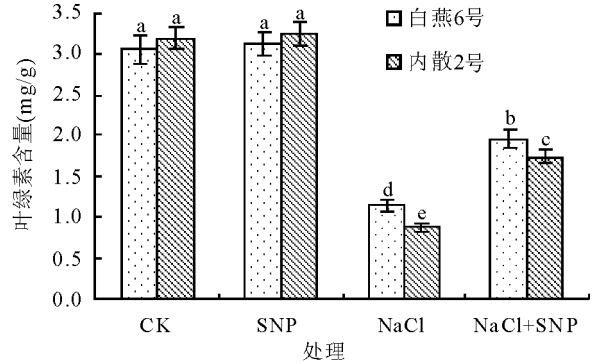


图 4 外源 NO 对 NaCl 胁迫燕麦幼苗叶片叶绿素含量的影响

2.5 外源 NO 对盐胁迫下燕麦幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

2.5.1 外源 NO 对盐胁迫下燕麦幼苗叶片 SOD 活性的影响 CK 和 SNP 处理,两燕麦品种叶片 SOD 活性在 8 d 内变化均相对较小,且同一燕麦品种两处理之间差异不显著( $P > 0.05$ )。NaCl 处理使两燕麦品种叶片的 SOD 活性在短时间内均显著升高,并在处理后 2 d 达到最高水平,之后迅速下降,但胁迫 8 d 时,白燕 6 号叶片 SOD 活性仍大于对照处理,而内散 2 号叶片 SOD 活性已低于对照(图 5)。

与 NaCl 处理相比,NaCl+SNP 处理明显提高了两燕麦品种叶片的 SOD 活性,其中白燕 6 号叶片

SOD 活性在处理后 2、4、6 和 8 d 分别提高了 12.6%、11.5%、16.3%和 20.4%,平均为 15.2%,内散 2 号叶片的 SOD 活性分别提高了 8.5%、21.8%、9.6%、48.3%,平均为 22.0%。

2.5.2 外源 NO 对盐胁迫下燕麦幼苗叶片 CAT 活性的影响 CK 和 SNP 处理,两燕麦品种叶片 CAT 活性在 8 d 内变化不大,且同一品种两处理之间差异不显著( $P > 0.05$ )。与 CK 相比,NaCl 处理迅速降低了两燕麦品种叶片 CAT 活性,且随着盐胁迫时间的推移,两燕麦品种叶片 CAT 活性均持续下降,在胁迫 8 d 时,白燕 6 号和内散 2 号燕麦叶片 CAT 活性分别下降了 48.4%和 58.7%(图 6)。

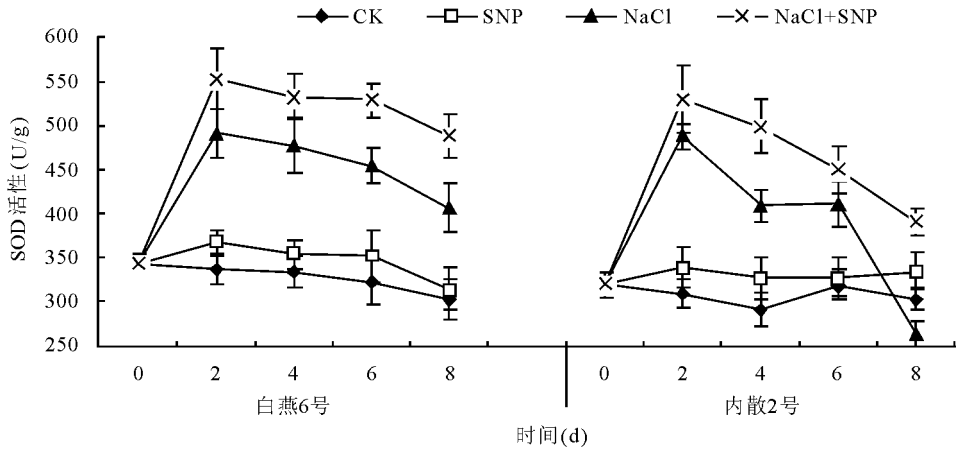


图5 外源NO对NaCl胁迫下燕麦幼苗叶片SOD酶活性的影响

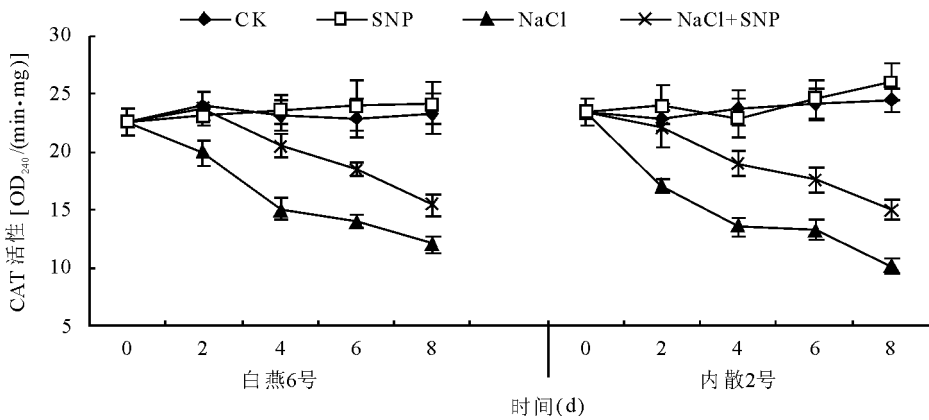


图6 外源NO对NaCl胁迫下燕麦幼苗叶片CAT酶活性的影响

与NaCl处理相比,NaCl+SNP处理显著提高了两燕麦品种叶片CAT活性( $P < 0.05$ ),其中白燕6号叶片CAT活性在处理2、4、6和8d分别提高了19.0%、36.6%、32.2%和28.8%,平均为29.1%,内散2号叶片的CAT活性分别提高了29.2%、40.4%、32.1%和48.5%,平均为37.6%,但均低于CK和SNP处理。

**2.5.3 外源NO对盐胁迫下燕麦幼苗叶片POD活性的影响** 处理后8d内,CK和SNP处理两燕麦品种叶片POD活性随时间推移均呈缓慢增加趋势,处理之间差异不显著( $P > 0.05$ )。与CK相比,NaCl处理后2d时两燕麦品种叶片的POD活性即显著升高( $P < 0.05$ ),此后随时间的推移缓慢增加(图7)。

与NaCl处理相比,NaCl+SNP的处理两燕麦品种叶片的POD活性均进一步增加,其中白燕6号叶片POD活性在处理2、4、6和8d分别提高了

8.6%、9.5%、8.1%和5.0%,平均为7.8%;内散2号叶片的POD活性分别提高了2.4%、9.9%、7.8%和13.4%,平均为8.4%。与SNP对SOD活性、CAT活性的提高作用相比,SNP对POD活性的影响相对较小。

**2.5.4 外源NO对盐胁迫下燕麦幼苗叶片APX活性的影响** 盐胁迫2d时,白燕6号的叶片APX活性即比CK显著增高( $P < 0.05$ ),但此后增加趋势渐缓,而内散2号在0~6d呈缓慢增加趋势,此后变化不大(图8)。

与NaCl处理相比,NaCl+SNP的处理显著提高了白燕6号和内散2号的叶片APX活性( $P < 0.05$ ),并随时间的延长提高作用趋于增强。其中白燕6号叶片APX活性在处理2、4、6和8d分别提高了8.6%、16.5%、8.6%和16.3%,平均为12.5%,内散2号叶片的APX活性分别提高了52.0%、38.2%、34.3%和73.3%,平均为49.5%。

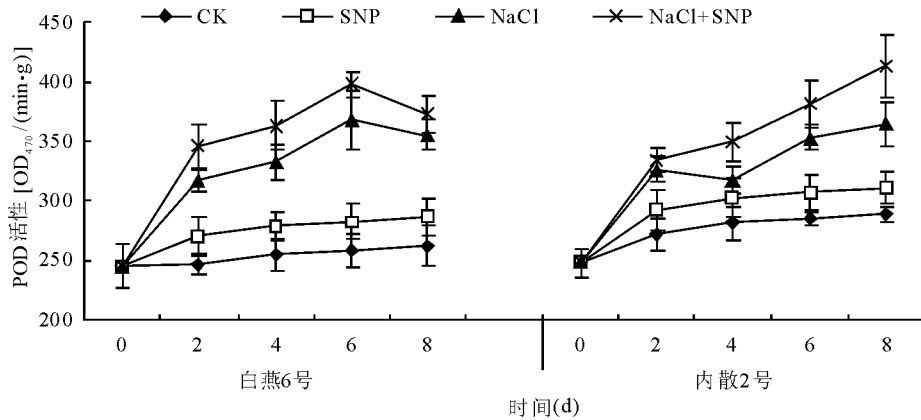


图7 外源NO对盐胁迫燕麦幼苗叶片POD活性的影响

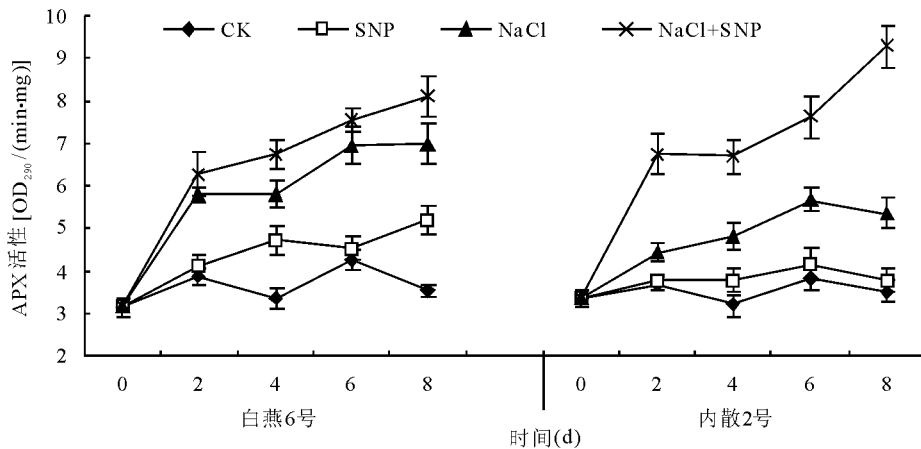


图8 外源NO对盐胁迫燕麦幼苗叶片APX活性的影响

### 3 讨论与结论

**3.1 盐胁迫对燕麦生长的影响** 盐胁迫对非盐生植物生长抑制是盐胁迫产生的普遍结果,然而由于盐分胁迫反应的复杂性,其机理并不清楚。本研究中观察到盐分胁迫引起了叶绿素含量和干物质积累的下降,对此一般认为是,植物体内叶绿素酶可引起叶绿素的降解,而盐分胁迫能增强叶绿素酶的活性,加速叶绿素分解<sup>[18]</sup>;同时叶绿素是植物进行光合作用的重要物质基础,盐分胁迫可促进叶绿素的分解,进而影响到植株的光合作用及自身生长。近年来,人们又从自由基伤害学说观点来解释逆境对植物生长的影响,指出在盐分胁迫条件下,需氧植物体内活性氧代谢系统失去平衡,自由基增加,细胞内不饱和脂肪酸在生物自由基的作用下易诱发膜脂过氧化,从而使膜的透性增加,离子外渗,引起植物代谢紊乱,生长受阻<sup>[19]</sup>。质膜相对透性的大小是膜伤

害的重要标志,丙二醛则是脂质过氧化的主要产物之一<sup>[20]</sup>。本研究表明,燕麦幼苗叶片丙二醛含量随着NaCl胁迫时间的推移显著增加,同时在胁迫后8d叶片细胞质膜相对透性与对照相比显著增加。因此,结合盐胁迫下氧自由基伤害学说可以认为,NaCl胁迫可能由于促进了活性氧的积累,造成了燕麦叶片的细胞膜损伤,同时也影响到叶绿素稳定性并最终影响到植物光合作物和植株生长。此外,与多数试验观察到的丙二醛含量随盐胁迫时间延长而持续增加不同,本研究发现,随着盐胁迫时间的延长,白燕6号在盐胁迫4d后,内散2号在盐胁迫6d后,丙二醛含量上升趋势变缓,说明盐胁迫引起的燕麦膜伤害反应可在一定时段保持相对稳定性,使膜系统结构和功能维持某种程度的平衡,从而使叶片细胞仍能维持一定的生理功能,这一结果也可能与燕麦本身有一定的抗盐能力有关。

### 3.2 抗氧化酶在燕麦适应盐胁迫反应的作用

植物体内超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶等抗氧化酶类是植物体内重要的活性氧清除剂,在一定范围内能有效地清除活性氧,维持活性氧的代谢平衡、保护膜结构,从而使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵御逆境胁迫伤害<sup>[21]</sup>。盐胁迫下植物的抗氧化酶活性通常会表现显著的变化,但由于不同研究者使用的研究手段、供试作物品种、胁迫强度、胁迫时间的不同而得到不尽相同的结论。陈明等<sup>[4]</sup>研究表明,盐胁迫下小麦幼苗根尖细胞中超氧化物歧化酶、过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶3种活性氧清除酶活性在盐胁迫初期均呈上升趋势,并随着胁迫时间的延长又转为下降;苏桐等<sup>[22]</sup>研究表明,盐胁迫下燕麦体内超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性随时间的延长先上升后下降,而过氧化氢酶活性则呈下降趋势。本研究表明,NaCl处理后,超氧化物歧化酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶和过氧化氢酶活性随时间推移变化不同。其中超氧化物歧化酶活性随NaCl胁迫时间推移表现为快速上升后快速下降的特点,过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶基本上呈持续上升的趋势,而过氧化氢酶则表现持续下降,这一结果也与苏桐等<sup>[22]</sup>的结果相似,说明燕麦在受盐胁迫时,超氧化物歧化酶可能主要在胁迫的最初阶段的氧自由基的清除中起作用,过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶可在较长阶段持续起作用,而过氧化氢酶活性可能由于对盐胁迫较为敏感,受到胁迫后立即下降,清除氧自由基的作用相对较小。

### 3.3 NO对盐胁迫下燕麦耐盐生理反应的调节

NO是植物体中广泛存在的一种正常代谢物或副产物,也是一种重要的信号分子,NO重要的生理作用即是参与氧自由基代谢的调控<sup>[23]</sup>。本研究表明,盐胁迫时加入硝普钠的处理,耐盐性不同的两燕麦品种叶片超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶活性均有明显增加,说明不论对耐盐性高的品种或是耐盐性差的品种,硝普钠均可提高盐胁迫下植株氧自由基清除系统的活性。同时还观察到,盐胁迫时加入硝普钠的处理在提高抗氧化酶活性的同时可显著降低燕麦叶片丙二醛含量和叶片质膜相对透性,由于丙二醛是膜脂过氧化产物,叶片质膜相对透性是质膜受伤害的重要

标志,因此可以推测,硝普钠很可能也是由于提高了NaCl胁迫下燕麦抗氧化酶活性,减少了活性氧的产生,从而有助于缓解NaCl胁迫对燕麦幼苗的氧化伤害作用。此外,硝普钠的加入在降低盐胁迫下叶片丙二醛含量的同时,亦增加了叶绿素含量和干物质积累,尽管有人认为,NO提高叶绿素的含量的具体原因有可能是因为激活了叶绿素生物合成过程中的某些酶类,但本研究中NO在提高了抗氧化酶活性和降低叶片丙二醛含量的同时,亦增加了叶绿素含量和干物质积累,所以也不能排除NO可直接通过降低活性氧的积累而减少叶绿素的分解从而增加干物质积累的可能。本研究还表明,盐胁迫时加入硝普钠对不同抗氧化酶活性影响不同,其中对超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶活性影响较大,而对过氧化物酶活性影响相对较小,说明NO对不同抗氧化酶的调节作用是不同的,具体原因有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 解松峰, Kansaye A, 杜向红, 等. 30份引进大麦品种(系)苗期耐盐性综合分析[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 127-133.
- [2] 芦翔, 汪强, 韩燕来, 等. 盐胁迫对不同燕麦品种种子萌发和出苗影响的研究[J]. 草业科学, 2009, 26(7): 77-81.
- [3] Zhu J K. Plant salt tolerance[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6: 66-71.
- [4] 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报, 2004, 30(5): 569-576.
- [5] Uchida A, Andre T J, Takashi H. Effects of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice [J]. Plant Science, 2002, 163(3): 515-523.
- [6] 肖强, 陈娟, 吴飞华, 等. 外源NO供体硝普钠(SNP)对盐胁迫下水稻幼苗中叶绿素和游离脯氨酸含量以及抗氧化酶的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(10): 1849-1853.
- [7] 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): 455-459.
- [8] 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.
- [9] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 等. 外源一氧化氮对NaCl胁迫

- 迫下番茄幼苗光合作用和离子含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 658-663.
- [10] 王波, 宋凤斌. 燕麦对盐碱胁迫的反应和适应性[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 625.
- [11] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris* [J]. Plant Physiology, 1949, 24: 1-15.
- [12] 刘宁, 高玉葆, 贾彩霞. 渗透胁迫下多花黑麦草叶内过氧化物酶活性和脯氨酸含量以及质膜相对透性的变化[J]. 植物生理学通讯, 2000, (36): 11-14.
- [13] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase, improved assays and an assay applicable to acrylamide gels[J]. Analytical Chemistry, 1971(44): 276-287.
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 120-122.
- [15] Patterson B D, Payne L A, Chen Y, *et al.* An inhibitor of catalase induced by cold chilling-sensitive plants [J]. Plant Physiology, 1984(76): 1014-1018.
- [16] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. Plant and Cell Physiology, 1981 (22): 867-880.
- [17] 许长成, 赵世杰, 邹琦. 植物膜脂过氧化水平硫代巴比妥酸测定方法中的干扰因素[J]. 植物生理学通讯, 1993(29): 361-363.
- [18] 吴雪霞, 朱为民, 朱月林, 等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗光合特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1105-1109.
- [19] Zhu J K. Salt and drought stress signal transduction in plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2002, 53: 247-273.
- [20] 孙存华, 李扬, 贺鸿雁, 等. 藜对于旱胁迫的生理生化反应[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2556-2560.
- [21] Hang Y C, 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*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160: 1157-1164.
- [22] 苏桐, 龙瑞军, 魏小红, 等. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下燕麦幼苗氧化损伤的保护作用[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 48-53.
- [23] 阮海华, 沈文彪, 叶茂炳, 等. 一氧化氮对盐胁迫下小麦叶片氧化损伤的保护效应[J]. 科学通报, 2001, 46(23): 1993-1997.

## Effects of exogenous nitric oxide on activity of antioxidative enzyme and growth of oat seedlings under salt stress

LU Xiang<sup>1,2</sup>, SHI Wei-dong<sup>1</sup>, WANG Yi-lun<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>1</sup>,  
TAN Jin-fang<sup>1</sup>, HAN Yan-lai<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Henan Zhengzhou 450002, China;

2. Institute of Geography Sciences, Henan Academy of Sciences, Henan Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Under 150 mmol/L NaCl stress, a hydroponic experiment was conducted to investigate the effect of 0.06 mmol/L sodium nitroprusside (SNP) on antioxidative enzyme and growth of two kind of oat seedlings (Baiyan 6 and Neisan 2) at fourth leaves stage by measuring the MDA, SOD, CAT, POD, APX contents, electronic conductivity, chlorophyll contents in leaves and dry weight. The results of this study indicated that 0.06 mmol/L SNP increased the activities of SOD, CAT, POD, APX and the dry weight, and decreased MDA, chlorophyll content and membrane permeability. The antioxidant enzyme activities showed a different response to exogenous NO, in which exogenous NO had more effectiveness on SOD, CAT and APX than that on POD.

**Key words:** oat; nitric oxide; salt stress; activity of antioxidative enzyme