

钟雪梅,代其林,马明莉,等. 外源 NO 浸种对 NaCl 胁迫下油菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):102-106.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.03.027

外源 NO 浸种对 NaCl 胁迫下油菜种子萌发和幼苗生长的影响

钟雪梅¹, 代其林¹, 马明莉¹, 滕守镇¹, 闫宁¹, 吕旭才¹, 冯帅¹, 王劲²

(1. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川绵阳 621010; 2. 中国农业科学院生物技术研究所, 北京 100081)

摘要:以兴油 177 品种油菜为材料, 研究不同浓度外源 NO 供体硝普钠(0、100、200、300、400、500、600 $\mu\text{mol/L}$ SNP)浸种处理对 100 mmol/L NaCl 胁迫下油菜种子萌发及幼苗生长的影响。结果显示, 外源 NO 可显著缓解盐胁迫造成的损伤, 促进种子萌发及幼苗生物量的积累; 显著提高幼苗叶片脯氨酸、可溶性蛋白的含量, 以及抗氧化酶(SOD、POD、CAT)的活性; 显著降低 MDA 含量, 其中以 200 $\mu\text{mol/L}$ SNP 浸种处理的效果最为显著。外源 NO 处理能够显著缓解盐胁迫伤害, 200 $\mu\text{mol/L}$ SNP 浸种处理效果最佳。

关键词:油菜; 外源 NO; NaCl 胁迫; 种子萌发; 生理特性

中图分类号: S634.301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)03-0102-05

一氧化氮(NO)是植物体内分布较广的一种氧化还原信号分子, 在植物体内主要通过硝酸还原酶途径、一氧化氮合酶途径、非酶促途径产生^[1-4]。NO 对植物具有保护和毒害的双重效应, 低浓度 NO 可作为抗氧化剂清除超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)等活性氧, 并通过诱导抗氧化酶基因的表达对植物起到保护作用^[5]; 高浓度 NO 则与 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 相互作用生成过氧亚硝酸阴离子, 后者经质子化形成具有强氧化性的过氧亚硝酸, 破坏生物

大分子的结构与功能。但 NO 的最终生理作用与植物细胞的生理条件及 NO 的浓度有关^[6]。已有研究表明, NO 广泛存在于植物组织中, 参与种子萌发及植株的生长发育、衰老、对各种逆境胁迫的应答过程^[7-9]。NO 能显著促进渗透胁迫下黄瓜、苜蓿、油松、小桐子、板蓝根、小麦等种子的萌发和幼苗生长, 缓解叶片氧化损伤, 显著提高 SOD 等保护酶的活性, 增加脯氨酸等渗透调节物质以增强幼苗的抗逆性^[10-16]。NO 还可增强番茄对光能的捕获和转换^[17], 显著促进棉花幼苗叶、根生长, 增加根长、根表面积、根体积以缓解缺氮胁迫造成的伤害^[18]。而目前关于 NO 用于油菜种子萌发的研究鲜有报道。以油菜为材料, 通过 NaCl 模拟盐胁迫, 研究外源 NO 对盐胁迫下油菜种子萌发的作用机制, 以及对幼苗生长生理特性的影响, 探讨 NO 缓解盐胁迫的生理机理, 为生产实践提供依据。

收稿日期: 2015-10-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(编号: 2013CB733903); 国家“863”计划(编号: 2012AA063503); 国家转基因专项(编号: 2014ZX0801201B); 公益性行业(农业)科研专项(编号: 201103007); 西南科技大学博士研究基金(编号: 11zx7104); 四川省省物质资源利用与改性工程技术研究中心开展开放基金(编号: 13zxsk04)。

作者简介: 钟雪梅(1990—), 女, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事植物遗传转化与抗逆分析研究。E-mail: 1021749833@qq.com。

通信作者: 王劲, 教授, 主要从事植物逆境生理研究。E-mail: wjdsz@vip.sina.com。

异种质材料, 所以选育高含油量的品种已不是高不可攀。我国目前采用优质+杂优的技术路线选育高油、高产、优质、抗(耐)病的杂交油菜新品种, 不仅能缓解我国食用植物油供需的突出矛盾, 而且可为清洁的再生能源提供部分工业原料^[3]。陕西省杂交油菜研究中心培育的秦优 88 就是利用自有的化杀专利技术, 育成的高油双低优质油菜杂交种。研究制定高效栽培技术具有必要性。随着我国工业化、城镇化和农业现代化进程日益加速, 农村人口快速下降, 劳动力结构也在发生着深刻变化, 传统的油菜栽培技术需要投入大量劳动力的情况, 已不适应农村社会发展和农民增收的需要。农户迫切需要作业工序简单、用工少、劳动强度小的高效、科学的栽培技术^[4]。笔者从事高油高产油菜高效栽培技术研究、试验示范多年, 取得了丰富的实践经验, 形成了 1 套适宜秦油 88 的高效栽培技术, 基本实现了良种良法相配套。若能在油

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试油菜品种为兴油 177, 购自四川省荣春种业有限责

菜大田生产上确保这套制种及高效栽培技术的实施, 可为该品种在适宜区种植实现高产高效提供技术保障。由于受到区域性和气候等不确定因素的影响, 在实际生产中应该因地制宜地改进。

参考文献:

- [1] 张芳, 程勇, 谷铁城, 等. 我国油菜种业发展现状与对策建议[J]. 中国农业科技导报, 2011, 13(4): 15-22.
- [2] 刘文祥. 广南县油菜生产现状与发展对策[EB/OL]. (2010-6-3). <http://www.ynagri.gov.cn/ws/gn/news6165/20100603/420620.shtml>.
- [3] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(2): 300-302.
- [4] 田建华. 陕西省职业农民培育丛书——油菜[M]. 西安: 三秦出版社, 2014: 128.

任公司。NO 供体亚硝基铁氰化钠(SNP)购自上海市阿拉丁生化科技股份有限公司。NaCl 为国产分析纯。

1.2 试验方法

选取饱满均匀的油菜种子,采用 75% 乙醇消毒 2 min,用蒸馏水冲洗 3 次。再用 0.1% HgCl_2 溶液消毒 10 min,用蒸馏水冲洗 5~6 次,并用无菌吸水纸吸干备用。

1.2.1 最适盐胁迫浓度筛选试验 用蒸馏水分别配制浓度为 0(对照)、50、100、150、200 mmol/L 的 NaCl 溶液。每个培养皿放置 100 粒已消毒种子,加入 25 mL 处理液,每个处理 3 次重复,置于 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、16 h 光照/8 h 黑暗、相对湿度 80% 的组织培养温室内进行试验。处理液每 24 h 更换 1 次。

处理后连续 7 d 观察种子萌发情况,以胚根凸出种皮长度大于等于种子长度的一半为发芽,计算发芽势、发芽率。发芽 8 d 时于每个培养皿随机选取 5 株幼苗,测定其芽长、根长,每个处理 3 次重复。

发芽势 = 4 d 内正常发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$; 发芽率 = 7 d 内正常发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$ 。

1.2.2 外源 NO(SNP)浸种处理盐胁迫试验 用蒸馏水分别配制浓度为 0、100、200、300、400、500、600 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 溶液。将已消毒种子置于不同浓度 SNP 溶液中,于 25°C 恒温培养箱中黑暗浸种 12 h。浸种处理后将种子取出晾干,置于垫有 2 层无菌滤纸的培养皿中,每皿 100 粒种子。加入 100 mmol/L 的 NaCl 溶液 25 mL(NaCl 最适浓度由第 1 阶段试验得出),每个处理 3 次重复,置于组培室内进行试验,盐胁迫溶液每 24 h 更换 1 次。试验共设 7 个处理,分别命名为 CK、T1、T2、T3、T4、T5、T6。处理后连续 7 d 观察种子的萌发情况,计算发芽势、发芽率。发芽 8 d 时,每皿随机选取 10 株幼苗测定其芽长、根长,称量苗鲜质量、根鲜质量后置于恒温干燥箱,于 105°C 杀青 10 min,并于 80°C 烘干 48 h,分别称其干质量。

处理 10 d 后,取样并测定相关生理指标。采用氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用双氧水法测定过氧化氢酶(CAT)活性。采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量^[19],采用酸性茚三酮法测定脯氨酸含量^[20],采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量^[21]。

1.3 数据处理

采用 OriginPro 9.1 软件绘图,采用 DPS 7.5 软件进行方差分析和多重比较(Duncan's 法)。

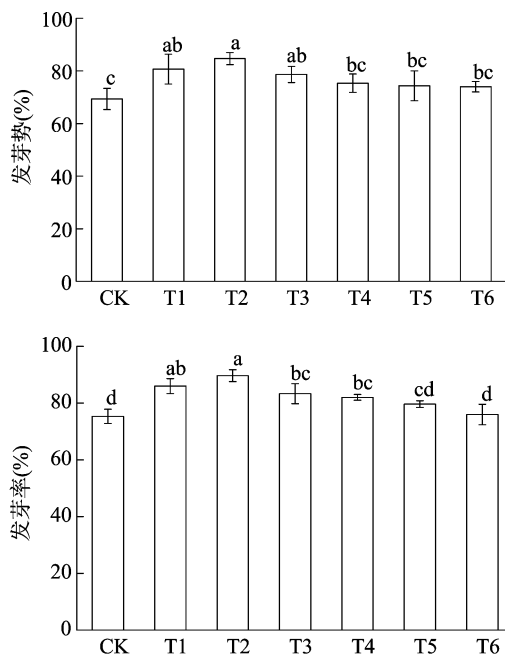
2 结果与分析

2.1 外源 NO 对油菜种子发芽势及发芽率的影响

由图 1 可知,不同浓度的外源 NO 浸种均可提高油菜种子的发芽势、发芽率,且整体随外源 NO 浓度的升高呈先上升、后下降的趋势。其中,100~300 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 NO 浸种效果较好,而 200 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 NO 浸种使发芽势、发芽率达到最高值,分别比对照提高了 15.33%、14.33%,差异达显著性水平($P < 0.05$)。

2.2 外源 NO 对油菜幼苗芽长和根长的影响

由图 2 可知,外源 NO 浸种增加了盐胁迫下油菜幼苗的芽长和根长,且随着处理浓度的升高呈峰形变化,两者变化趋



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$); 下图同
图1 外源 NO 对油菜种子发芽势及发芽率的影响

势一致。芽长、根长在 200 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 NO 浸种浓度下达到峰值,分别比对照高 27.80%、30.33%,差异达显著水平($P < 0.05$)。与对照相比,100~300 $\mu\text{mol/L}$ 浓度的作用效果较好,400~600 $\mu\text{mol/L}$ 浓度的效果次之,但均高于对照。

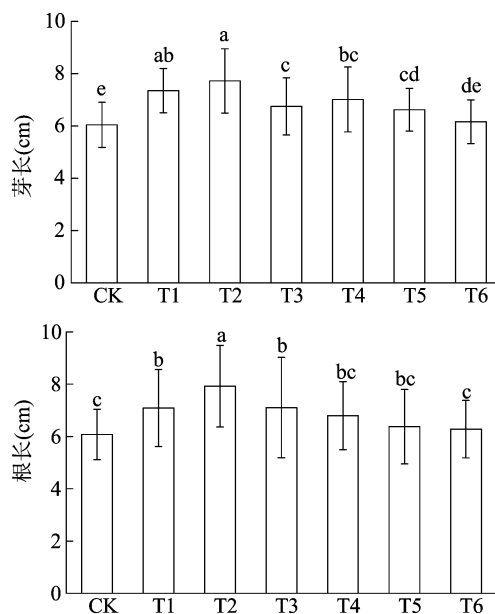


图2 外源 NO 对油菜幼苗芽长及根长的影响

2.3 外源 NO 对油菜幼苗生物量的影响

由表 1 可知,外源 NO 浸种显著提高了盐胁迫下幼苗的生物量,整体呈先上升、后下降的趋势。在 200 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 NO 浸种处理下,各项指标达到最高值,苗鲜质量、苗干质量分别高于对照 55.46%、39.02%;根鲜质量、根干质量分别高于对照 100%、75%。当 NO 浸种浓度大于 200 $\mu\text{mol/L}$ 时,生物量的积累呈下降趋势,但仍高于对照。

表 1 外源 NO 浸种对盐胁迫下油菜幼苗生物量的影响

处理	10 株苗鲜质量 (g)	10 株苗干质量 (g)	10 株根鲜质量 (g)	10 株根干质量 (g)
CK	0.723 ± 0.031e	0.041 ± 0.002d	0.005 ± 0.000 1e	0.004 ± 0.000 1e
T1	1.007 ± 0.088b	0.052 ± 0.003b	0.008 ± 0.000 5bc	0.007 ± 0.000 3b
T2	1.124 ± 0.077a	0.057 ± 0.002a	0.010 ± 0.000 5a	0.007 ± 0.000 1a
T3	0.981 ± 0.051bc	0.050 ± 0.004bc	0.009 ± 0.000 2b	0.006 ± 0.000 2b
T4	0.915 ± 0.032bcd	0.049 ± 0.001bc	0.008 ± 0.000 4bcd	0.006 ± 0.000 2c
T5	0.895 ± 0.025cd	0.048 ± 0.001c	0.008 ± 0.000 4cd	0.006 ± 0.000 2c
T6	0.839 ± 0.027d	0.046 ± 0.002c	0.007 ± 0.000 4d	0.005 ± 0.000 1d

注:同列数字后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。下表同。

2.4 外源 NO 对油菜幼苗丙二醛和脯氨酸的影响

由图 3 可知,在盐胁迫下植物积累了大量膜脂氧化的终产物 MDA,而外源 NO 浸种处理显著降低了 MDA 含量,T1 至 T6 处理与 CK 相比均差异显著 ($P < 0.05$)。200 $\mu\text{mol/L}$ 的外源 NO 作用效果最佳,MDA 含量比对照降低 56.08%。

脯氨酸是植物细胞内的一类重要渗透调节物质,可调节胞内渗透势保护蛋白分子,具有稳定生物大分子结构、清除活性氧的功能。由图 3 可知,外源 NO 显著促进了脯氨酸的积累,且 200 $\mu\text{mol/L}$ 处理下作用最明显,脯氨酸含量比对照高 211.89%。

2.5 外源 NO 对油菜幼苗抗氧化酶及可溶性蛋白的影响

由图 4 可知,外源 NO 浸种显著提高了盐胁迫下幼苗的抗氧化酶活性及可溶性蛋白含量,整体呈先上升、后下降的趋势,4 个指标的变化趋势一致。200 $\mu\text{mol/L}$ 的 NO 处理作用效果最好,SOD、POD、CAT 的活性及可溶性蛋白含量分别比对照增加了 69.73%、480.84%、150.61%、324.10%。

3 讨论

盐分对种子的萌发主要产生离子效应和渗透效应 2 种作用^[22]。发芽势和发芽率是衡量种子活力的重要指标。由表 2

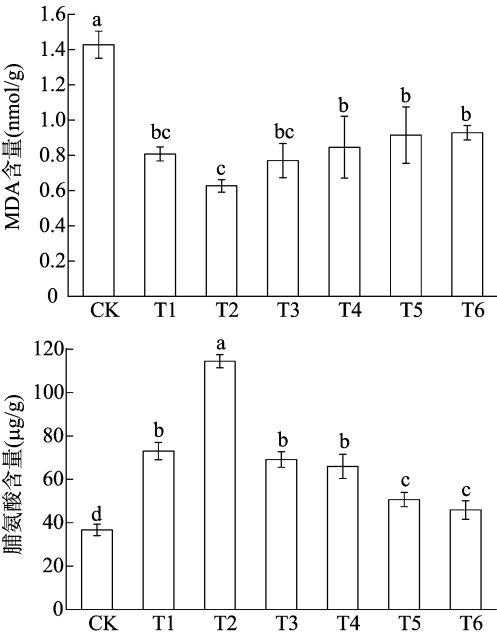


图 3 外源 NO 对油菜幼苗丙二醛及脯氨酸的影响

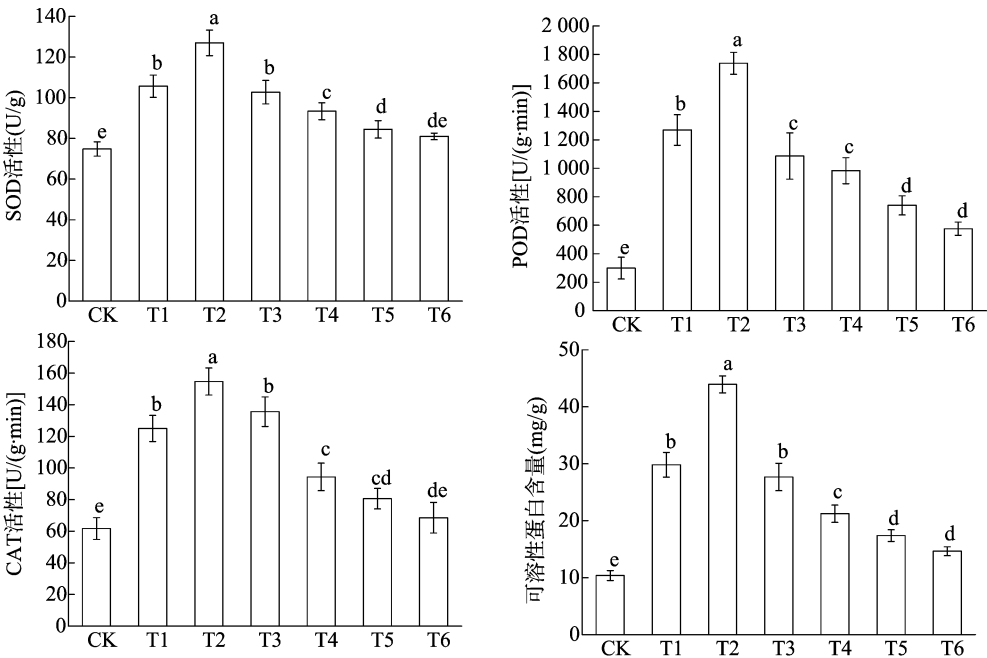


图 4 外源 NO 对油菜幼苗抗氧化酶及可溶性蛋白的影响

表 2 不同浓度 NaCl 胁迫对油菜种子萌发的影响

NaCl 浓度 (mmol/L)	发芽势 (%)	发芽率 (%)	芽长 (cm)	根长 (cm)
0	74.67 ± 2.08b	86.33 ± 1.53a	5.62 ± 0.63b	5.35 ± 0.89a
50	82.67 ± 2.08a	89.00 ± 1.00a	6.15 ± 0.87a	5.51 ± 0.64a
100	71.33 ± 2.08c	75.67 ± 2.52b	4.36 ± 0.35c	4.31 ± 0.99b
150	67.67 ± 0.58d	71.33 ± 2.08c	2.88 ± 0.33d	3.25 ± 0.49c
200	63.00 ± 1.00e	67.00 ± 1.00d	1.62 ± 0.17e	1.72 ± 0.21d

可知,种子萌发及幼苗生长的受抑程度随盐胁迫浓度的升高逐渐增强。当 NaCl 浓度达 50 mmol/L 时,发芽势、发芽率、芽长、根长均高于对照,表明适宜的离子浓度有利于种子萌发。可能是由于离子渗入种子而降低了胞内渗透势,从而促进种子吸胀吸水^[23];也可能由于微量的 Na 离子对呼吸酶有激活作用,促使萌发所需物质的合成更为充分^[24-25]。当 NaCl 处理浓度达 200 mmol/L 时,油菜种子的萌发明显受到抑制,各项指标与对照相比显著降低,幼苗子叶发黄、卷曲、脱落,部分幼苗全株死亡。可见,高盐浓度的离子起到毒害作用,使膜蛋白及膜透性的正常生理结构与功能发生改变^[26]。幼苗芽与根的生长在盐胁迫下均受到抑制,且芽长的受抑程度大于根长(表 2),即随着盐胁迫浓度的升高,芽长的下降幅度大于根长,这与已有研究的结论^[27-28]相一致。有研究表明这是植物耐盐的一种机制,在盐生植物中较为普遍。植物会主动利用摄入的盐离子调节渗透压,在不同组织及器官中协调分配离子以维护幼根生长,这使植物根中的 NaCl 含量低于地上部分^[29-31]。综上所述,低浓度 NaCl 对种子萌发及幼苗生长具有促进作用,高浓度则具有抑制作用,这与已有研究的结论^[32-39]相一致。

盐胁迫通过渗透胁迫和离子毒害抑制种子萌发及幼苗生长,而 NO 作为一种植物体内的重要信号分子,能显著缓解盐胁迫造成的损伤。本研究结果表明,外源 NO 促进了 100 mmol/L NaCl 胁迫下油菜的种子萌发及幼苗生长,其中低浓度(100 ~ 300 μmol/L) NO 作用效果较好,400 ~ 600 μmol/L 的 NO 次之,而 200 μmol/L 的 NO 处理效果最显著,这与 Kazemi 等^[40]、刘颖等^[14]、苏桐等^[41]的研究结论一致。汤绍虎等研究发现,0.1 mmol/L SNP 处理能显著缓解渗透胁迫对黄瓜种子萌发及幼苗生长造成的伤害,而 0.5 mmol/L SNP 处理的作用显著降低^[10]。王文等研究表明,50 ~ 100 μmol/L 的 NO 处理显著减轻了苯丙烯酸对黄瓜幼苗的毒害,而 200 ~ 400 μmol/L NO 的缓解作用明显降低,甚至抑制幼苗生长,其中 100 μmol/L NO 的作用效果最显著^[11]。徐艳等研究发现,300 μmol/L 的 SNP 处理能显著缓解渗透胁迫对梭梭种子萌发及幼苗生长的伤害,提高种子的萌发率,促进幼苗生物量的积累^[42]。刘开力等研究表明,0.4 mmol/L SNP 浸种处理种子可明显缓解盐胁迫下水稻幼苗的生长^[43]。这可能是由不同种类植物对 NO 的敏感程度不同,且各试验的具体处理方法不同造成的。

本试验中,随着外源 NO 处理浓度的升高,其缓解效应逐渐减小,表明 NO 调节植物生长具有双重效应,这与已有研究的结论^[10-18]相一致。可能是由于 NO 通过质外体作用于细胞壁组分,使细胞壁松弛,从而促进细胞扩展^[44]。随着 NO 浓度升高,NO 作用于细胞膜的磷脂双分子层,使膜的流动性

增强。当 NO 浓度升高至一定程度,NO 与超氧阴离子、过氧亚硝酸盐作用,产生毒害效应^[45]。

植物体内 MDA 含量的高低反映了细胞膜氧化损伤的程度。本研究添加 NO 处理显著降低了 MDA 含量,表明 NO 对细胞膜具有一定修复作用。可能是 NO 与活性氧(ROS)或脂质过氧化自由基发生反应中断了氧化胁迫,从而减轻了质膜受氧化损伤的程度^[46]。脯氨酸是植物体内的一类渗透调节物质,其含量高低一定程度上反映了植物的抗逆性。本研究结果表明,外源 NO 处理显著提高了植物体内脯氨酸的含量。脯氨酸不仅可作为渗透调节物质,还在清除活性氧、提高抗氧化能力、稳定大分子结构、降低细胞酸性等方面起重要作用^[47]。

逆境条件下,植物体内 ROS 水平升高,膜脂过氧化程度加剧,导致细胞膜损伤与破坏^[48]。SOD、POD、CAT 是清除 ROS 的重要酶类。本研究结果表明,NO 处理可显著提高抗氧化酶的活性。NO 可通过调节含血红素铁的 CAT 活性来抑制含非血红素铁的顺乌头酸酶等靶酶的活性,从而参与植物体内的代谢调节过程^[49]。大多数可溶性蛋白是参与各种代谢的酶类,具有较强的亲水性,可提高细胞保水力并防止细胞脱水。本研究中,NO 处理显著提高了可溶性蛋白的含量,从而增强了植物的抗逆性。

4 结论

200 μmol/L 的 NO 处理能显著缓解 100 mmol/L NaCl 胁迫造成的损伤,显著促进盐胁迫下油菜种子的萌发,显著提高幼苗叶片脯氨酸、可溶性蛋白的含量及 SOD、POD、CAT 的活性,显著降低 MDA 的含量,多方面修复幼苗受到的损伤,从而增强幼苗的抗氧化胁迫能力。本研究对逆境中栽培作物具有一定参考价值,外源 NO 浸种处理在生产中简便易行,是一种盐胁迫下促进种子萌发及增强幼苗抗性的良好方法,具有一定潜在应用价值。

参考文献:

- [1] Wendehenne D, Pugin A, Klessig D F, et al. Nitric oxide: comparative synthesis and signaling in animal and plant cells[J]. Trends in Plant Science, 2001, 6(4): 177 - 183.
- [2] Yamasaki H, Shanihi S Y, Takahashi S. An alternative pathway for nitric oxide production in plants: new feature of an old enzyme[J]. Trends in Plant Science, 1999, 4(4): 128 - 129.
- [3] Chandok M R, Ytterberg A J, Van W K J, Klessig D F. The pathogen - inducible nitric oxide synthase(iNOS) in plants is a variant of the P protein of the glycine decarboxylase complex[J]. Cell, 2003, 113(4): 1380 - 1384.
- [4] Wojtaszek O. Nitric oxide in plants to NO or not to NO[J]. Phytochemistry, 2000, 54(1): 1 - 4.
- [5] Beligni M V, Lamattina L. Nitric oxide counteracts cytotoxic processes mediated by reactive oxygen species in plant tissues[J]. Planta, 1999, 208: 337 - 344.
- [6] Zhang Y Y, Liu Y L. Source and function of nitric oxide in plants[J]. Acta Botanica Boreali - Occidentalia Sinica, 2004, 24(5): 921 - 929.
- [7] Pagnussat G C, Simontacchi M, Puntarulo S, et al. Nitric oxide is re-

- quired for root organogenesis[J]. Plant Physiology, 2002, 129(3): 954–956.
- [8] Lamattina L, García – Mata C, Graziano M, et al. Nitric oxide: the versatility of an extensive signal molecule[J]. Annual Review of Plant Biology, 2003, 54: 109–136.
- [9] Stohr C, Stremmler S. Formation and possible roles of nitric oxide in plant roots[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(3): 463–470.
- [10] 汤绍虎, 周启贵, 孙 敏, 等. 外源 NO 对渗透胁迫下黄瓜种子萌发、幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 419–425.
- [11] 王 文, 陈振德, 罗庆熙, 等. 外源一氧化氮对苯丙烯酸胁迫下黄瓜幼苗生长及活性氧代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(17): 3677–3683.
- [12] 蔡卓山, 师尚礼, 谢森林, 等. 外源 NO 对水分胁迫下苜蓿种子萌发的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(11): 1777–1782.
- [13] 裴乐乐, 韩锋溪, 胡景江. 外源 NO 对渗透胁迫下油松种子萌发及幼苗生理特性的作用[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 58–62.
- [14] 刘 颖, 邓明华, 龚 明, 等. 外源 NO 对 Cu^{2+} 胁迫下小桐子幼苗抗氧化能力的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(7): 1409–1414.
- [15] 贾海风, 张海艳. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下板蓝根种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 中草药, 2014, 45(1): 118–124.
- [16] 王俊红, 魏小红, 龙瑞军, 等. 外源一氧化氮对渗透胁迫下小麦幼苗叶片膜脂过氧化物的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(1): 77–81.
- [17] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生长和光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(6): 1206–1211.
- [18] 陈 静, 刘连涛, 孙红春, 等. 外源 NO 对缺氮胁迫下棉花幼苗形态及生长的调控效应[J]. 中国农业科学, 2014, 47(23): 4565–4575.
- [19] 李合生, 孙 群, 赵世杰. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 张蜀秋, 李 云. 植物生理学实验技术教程[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 187–188.
- [21] 邹 琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 72–75.
- [22] Levitt J. Response of plants to environmental stress[M]. 2nd Ed. New York: Academic Press, 1980: 365–435.
- [23] Mohammed B J. Ionic effects of NaCl on germination. Early seedling growth, and ion content of *Atriplex halimus* (Chenopodiaceae) [J]. Canadian Journal of Botany, 2002, 80(3): 297–304.
- [24] 刘祖祺, 张石城. 植物抗性生理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 251–254.
- [25] 赵可夫. NaCl 抑制棉花幼苗生长的机理——盐离子效应[J]. 植物生理学报, 1989, 15(2): 173–178.
- [26] 王宝山, 邹 琦. NaCl 胁迫对高粱根、叶鞘和叶片液泡膜 ATP 酶和焦磷酸酶活性的影响[J]. 植物生理学报, 2000, 26(3): 181.
- [27] 朱 义, 谭贵娥, 何池全, 等. 盐胁迫对高羊茅 (*Festuca arundinacea*) 幼苗生长和离子分布的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5447–5454.
- [28] 苗海霞, 孙明高, 夏 阳, 等. 盐胁迫对苦楝根系活力的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2005, 36(1): 9–12, 18.
- [29] Flowers T J, Yeo A R. Solute transport in plants[M]. Glasgow, Scotland: Blackie, 1992: 176.
- [30] Adams P, Thomas J C, Vernon D M, et al. Distinct cellular and organismic responses to salt stress[J]. Plant & Cell Physiology, 1992, 33: 1215–1223.
- [31] McCue K F, Hanson A D. Drought and salt tolerance: towards understanding and application[J]. Biotechnology, 1990, 8: 358–362.
- [32] 秦 岭, 张华文, 杨延兵, 等. 不同高粱品种种子萌发耐盐能力评价[J]. 种子, 2009, 28(11): 7–10.
- [33] 苗翠琴, 李利民, 宋 彬, 等. NaCl 胁迫对两种锦鸡儿种子萌发的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(3): 498–503.
- [34] 顾国峰, 郑佳秋, 郭 军, 等. 盐胁迫对 8 个辣椒品种种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(6): 259–261.
- [35] 王广印, 周秀梅, 张建伟, 等. NaCl 胁迫对不同品种黄瓜种子发芽的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 121–124, 133.
- [36] 王喜涛, 周秀艳, 辛 明, 等. 盐胁迫对甜瓜种子发芽的影响[J]. 北方园艺, 2014(9): 7–11.
- [37] 那桂秋, 寇 贺, 曹敏建. 不同大豆品种种子萌发期耐盐碱性鉴定[J]. 大豆科学, 2009, 28(2): 352–356.
- [38] 肖鑫辉, 李向华, 王克晶. 渤海湾津唐沿海野生大豆 (*Glycine soja*) 种群高盐碱胁迫反应[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(3): 290–297, 304.
- [39] 杜景红, 李北齐, 薛庆喜. NaCl 浸种对水稻种子发芽的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 33–35.
- [40] Kazemi N, Khavari – Nejad R A, Fahimi H A, et al. Effects of exogenous salicylic acid and nitric oxide on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in leaves of *Brassica napus* L. under nickel stress[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 126(3): 402–407.
- [41] 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.
- [42] 徐 艳, 余学军, 高 岩, 等. NO 对渗透胁迫下梭梭种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(6): 65–69.
- [43] 刘开力, 凌腾芳, 刘志兵, 等. 外源 NO 供体 SNP 浸种对盐胁迫下水稻幼苗生长的影响[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(4): 419–422.
- [44] Leshem Y Y, Haramaty E. The characterization and contrasting effects of the nitric oxide free radical in vegetative stress and senescence of *Pisum sativum* Linn. foliage[J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 148: 258–263.
- [45] 张少颖, 任小林, 程顺昌, 等. 外源一氧化氮供体浸种对玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(3): 309–310.
- [46] García M C, García M C, Lamattina L. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress[J]. Plant Physiology, 2001, 126(3): 1196–1204.
- [47] 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.
- [48] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生理影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 575–581.
- [49] Clark D, Durner J, Navarre D A, et al. Nitric oxide inhibition of tobacco catalase and ascorbate peroxidase[J]. Molecular Plant – Microbe Interactions, 2000, 13(12): 1380–1384.