

一氧化氮对水分胁迫下玉米种子萌发及幼苗生理特性的影响

陈银萍, 陶玲, 杨莉, 王惠, 思显佩

(兰州交通大学 环境与市政工程学院 寒区旱区水资源综合利用教育部工程研究中心, 兰州 730070)

摘要: 以 0.4 mol/L 的甘露醇(M)模拟水分胁迫状况,研究了外源一氧化氮(NO)供体硝普钠(SNP)对水分胁迫下玉米种子萌发、幼苗生长和生理特性的影响。结果表明:(1)水分胁迫下,玉米种子萌发和幼苗生长受到抑制,叶片丙二醛(MDA)含量、质膜相对透性、脯氨酸含量均显著增加;(2)SNP 能显著提高水分胁迫下玉米种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数,增加玉米幼苗的根长、茎长、根重和整株干重,抑制水分胁迫下玉米幼苗叶片 MDA 含量的上升,降低叶片质膜相对透性,降低脯氨酸含量。其中以 100 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ SNP 对水分胁迫的缓解效果最佳。

关键词: 一氧化氮(NO); 硝普钠(SNP); 水分胁迫; 玉米; 种子萌发; 幼苗生理特性

中图分类号: Q142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2010)05-0672-06

Effects of nitric oxide on seed germination and physiological reaction of maize seedlings under water stress

CHEN Yin-Ping, TAO Ling, YANG Li, WANG Hui, SI Xian-Pei

(School of Environmental and Municipal Engineering, Engineering Research Center for Cold and Arid Regions Water Resource Comprehensive Utilization, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The effects of sodium nitroprusside(SNP), an exogenous nitric oxide donor at different concentrations, on the seed germination, growth and physiological reaction of maize seedlings under 0.4mol/L mannitol(M) stress were studied. The results showed that: (1) The water stress inhibited significantly the maize seed germination and growth of seedlings, increased significantly the malondialdehyde(MDA) content, cell membrane permeability and content of proline; (2) The treatments with SNP at different concentrations could promote the germination rate, germination energy, index of germination and index of vigor of maize seeds, increased the root length, stem length, root height, dry weight, relative water content and carotenoid contents of maize seedlings, inhibited significantly the MDA content, cell membrane permeability and the content of proline of maize seedlings under water stress. It was shown that exogenous nitric oxide had abating effect on depressed seed germination and growth of maize seedlings, could improve the antioxidant ability of maize seedlings, debasing lipid peroxidation and protect plasma membrane from being destroyed during the water stress to enhance the drought resistance of plants under water stress and the best abating effect occurred with the SNP concentrations set at 100 $\mu\text{mol/L}$ and 200 $\mu\text{mol/L}$.

Key words: nitric oxide(NO); sodium nitroprusside(SNP); water stress; maize; seed germination; seedling physiological reaction

收稿日期: 2009-09-21 修回日期: 2010-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(31060060, 40901049); 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金(QL-08-14A); 兰州市科技计划项目 [Supported by the National Natural Science Foundation of China(31060060, 40901049); “Qing Lan” Talent Engineering Funds by Lanzhou Jiaotong University(QL-08-14A); Science & Research Program of Lanzhou City]

作者简介: 陈银萍(1974-), 女, 甘肃榆中人, 博士, 副教授, 主要从事环境生物学研究, (E-mail) yinpch@yahoo.com.cn.

作为信号分子的 NO 可以调控作物种子的萌发过程(Bethke 等, 2004; 张华等, 2003)。外源 NO 供体硝普钠(sodium nitroprusside, SNP)能显著促进渗透胁迫下小麦种子的萌发(张华等, 2003), 低浓度 SNP 预处理水稻, 能缓解其在水分胁迫和高温胁迫下叶片叶绿素的降解、维持光系统 II 的活性(Laxalt 等, 1997; Beligni & Lamattina, 1999), SNP 与甘露醇同时处理小麦幼苗对水分胁迫下叶片的氧化损伤有保护作用(王罗霞等, 2006), 凌腾芳等(2005)发现外源 SNP 可以提高水稻幼苗的耐盐性, 张艳艳等(2004)发现 0.1~200 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 都可提高盐分胁迫下玉米幼苗的干物重积累速率。玉米是我国重要的农作物, 干旱是农业生产面临的严峻挑战。本文旨在分析 SNP 浸种处理对水分胁迫下玉米种子萌发过程的调节作用以及 NO 对玉米幼苗生长和生理特性的影响, 为农作物种子的萌发生理、生长代谢和生产实践中的化学调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

玉米(*Zea mays*)品种为“沈单 16 号”(甘肃省农科院提供)。NO 供体硝普钠(亚硝基铁氰化钠, sodium nitroprusside, SNP, 购自 Sigma 公司)。通常 0.15 mmol/L 的 SNP 大约可以产生小于 0.2 $\mu\text{mol/L}$ 的 NO(García & Lamattina, 2001)。

1.2 实验设计

培养时取籽粒饱满、大小均匀且无病虫害伤害的种子洗净种外包衣, 再用质量分数为 1% 的 NaClO 消毒 10 min, 然后再用蒸馏水冲洗数次, 把种子放于水中让其吸胀 12 h 后, 吸干种子表面水分播于铺有两层滤纸的培养皿内进行常规发芽实验。以含有 0.4 mol/L 甘露醇(M)的 Hoagland 营养液为基础培养液(0+M), 分别添加 SNP 至最终浓度为 25(25+M)、50(50+M)、100(100+M)、200(200+M)、500(500+M)、1000(1000+M) $\mu\text{mol/L}$ 。每个浓度设 3 个重复, 以浇 10 mL Hoagland 营养液为对照(CK), 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗中培养 24 h 后置于温度为 27 $^{\circ}\text{C}$, 光照 12 h/d 的培养箱内培养。发芽后第二天、第三天、第四天、第五天分别统计发芽数, 第六天测量根长、芽长, 第七天称根的鲜重, 再烘干称干物质量。7 d 后把根芽长势好的种子移植到口径为 15 cm 且装有珍珠岩的花盆中, 用相对应的营养液继续

培养, 每个处理设 3 个重复, 每个重复 20 株幼苗。三片真叶完全展平时测定茎的长度, 取第 1 片完全展开的叶片测定叶片相对含水量、细胞质膜相对透性、叶绿素含量、游离脯氨酸含量和丙二醛含量。

1.3 测试方法

以芽长超过 1 mm 长为发芽标准, 每天记录发芽数。发芽势=(规定日数内发芽的种子粒数/供试种子数) $\times 100$; 发芽率=(发芽终期全部正常发芽的种子数/供试种子数) $\times 100$; 发芽指数= $\sum(Gt/Dt)$, 其中 Gt 为 t 天的发芽数, Dt 为发芽日数。活力指数=发芽指数 $\times$ 苗长度(取芽长)。

按照烘干法测定干重和叶片相对含水量(孙群等, 2006); 电导率法测定细胞质膜相对透性(孙群等, 2006); 乙醇-丙酮混合法测定叶绿素含量(张志良, 2003); 磺基水杨酸-酸性茚三酮比色法测定游离脯氨酸含量(张宪政, 1992); 硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量(MDA)(高俊凤, 2000)。

1.4 数据处理

所有数据均取 3 次重复平均值, 采用 SPSS13.0 统计分析软件进行数据分析及差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米种子萌发的影响

2.1.1 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米种子发芽率和发芽势的影响 水分胁迫下, 玉米种子的发芽势和发芽数均大幅度下降, 从第二天开始, 发芽率较对照分别降低了 59.84%、38.03%、28.77% 和 17.14%, 0.4 mol/L 甘露醇显著推迟了玉米种子的萌发($P<0.05$), 经不同浓度的 SNP 处理后均能不同程度的提高水分胁迫下玉米种子的发芽率、发芽势及发芽整齐度, 并缩短发芽时间, 且在 SNP 浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 时 NO 对水分胁迫的缓解效果最显著($P<0.05$), 尤其是在种子发芽第 2、3 天, 发芽率与 0.4 mol/L 甘露醇处理的比较分别升高了 88.24%、39.79%, 但随着 SNP 浓度的逐渐升高, 缓解效果减弱(图 1, 图 2)。

2.1.2 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米种子发芽指数和活力指数的影响 水分胁迫下, 玉米种子的发芽指数和活力指数均显著下降($P<0.05$), 从发芽第 2 天到第 5 天玉米种子的发芽指数较对照组分别降低了 59.84%、52.02%、47.42% 和 43.52%(图

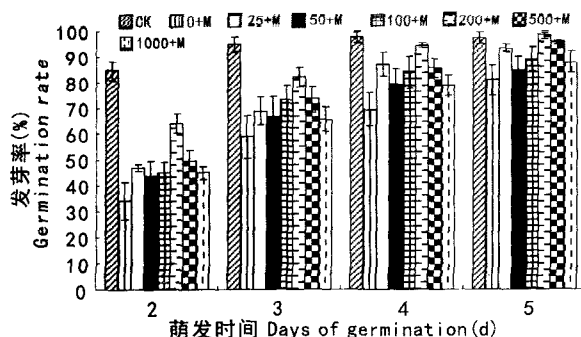


图 1 不同浓度的 SNP 对水分胁迫下玉米种子萌发率的影响

Fig. 1 Effect of different concentrations of SNP on maize seed germination rate under water stress

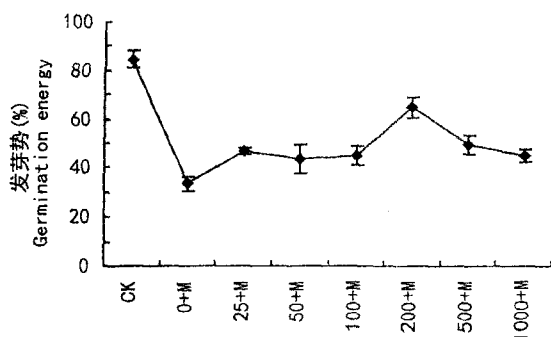


图 2 不同浓度的 SNP 对水分胁迫下玉米种子发芽势的影响

Fig. 2 Effect of different concentrations of SNP on germination energy of maize seed under water stress

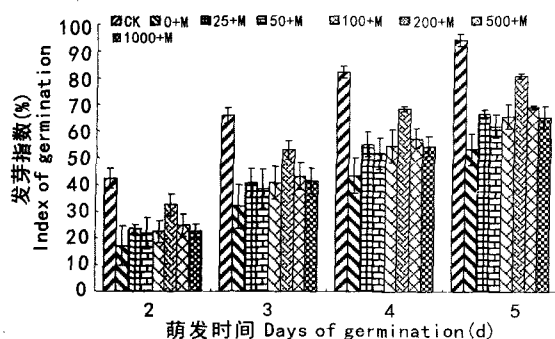


图 3 不同浓度的 SNP 对水分胁迫下玉米种子发芽指数的影响

Fig. 3 Effect of different concentrations of SNP on index of germination of maize seed under water stress

理后的种子发芽指数比 0.4 mol/L 甘露醇处理的分别提高了 90.18%、66.81%、58.45% 和 51.47% (图 3), 活力指数提高了 159.36% (图 4)。

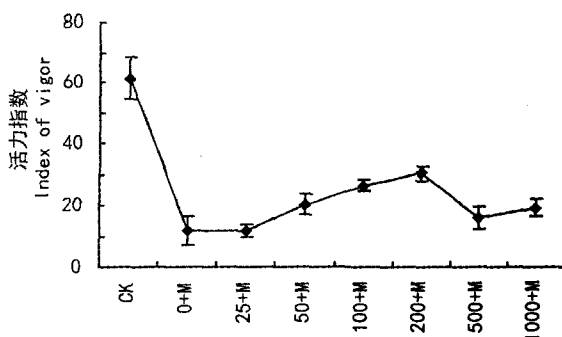


图 4 不同浓度的 SNP 对水分胁迫下玉米种子活力指数的影响

Fig. 4 Effect of different concentrations of SNP on index of vigor of maize seed under water stress

2.2 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗生长的影响

水分胁迫下玉米幼苗的茎、根的生长受到抑制, 达极显著 ($P < 0.01$), 根长 (图 5:A)、茎长 (图 5:B) 分别比对照下降了 58.96% 和 77.70%。SNP 处理对水分胁迫下幼苗茎、根生长都有一定的促进作用, 其中浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理效果极显著 ($P < 0.01$), 根长和茎长分别比水分胁迫处理增加了 87.25%、79.76% 和 75.86%、40.89%。水分胁迫下幼苗的根鲜重 (图 5:C) 和干物质质量 (图 5:D) 分别比对照下降了 42.77% ($P < 0.05$) 和 85.19% ($P < 0.01$), 而 100 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 处理下, 根鲜重仅比对照下降了 9.36% 和 21.44%, 干物质质量比对照下降了 55.30% 和 60.91%, 但随 SNP 浓度的增大, 对水分胁迫的缓解越不明显。

2.3 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗生理特性的影响

2.3.1 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗叶片相对含水量的影响 水分胁迫下, 玉米幼苗叶片组织的相对含水量显著下降 ($P < 0.05$), 比对照组下降了 33.61%, 而 SNP 处理的相对含水量下降幅度随 SNP 浓度的增大而逐渐显著减弱 ($P < 0.05$), 其中浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理效果极显著 ($P < 0.01$), 仅比对照组下降了 10.61% (图 6)。

2.3.2 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗叶片细胞膜透性的影响 水分胁迫下玉米叶片的相对

3), 活力指数较对照组下降了 81.06% (图 4)。不同浓度的 SNP 均能缓解水分胁迫, 其中浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 缓解效果最显著 ($P < 0.01$), 其处

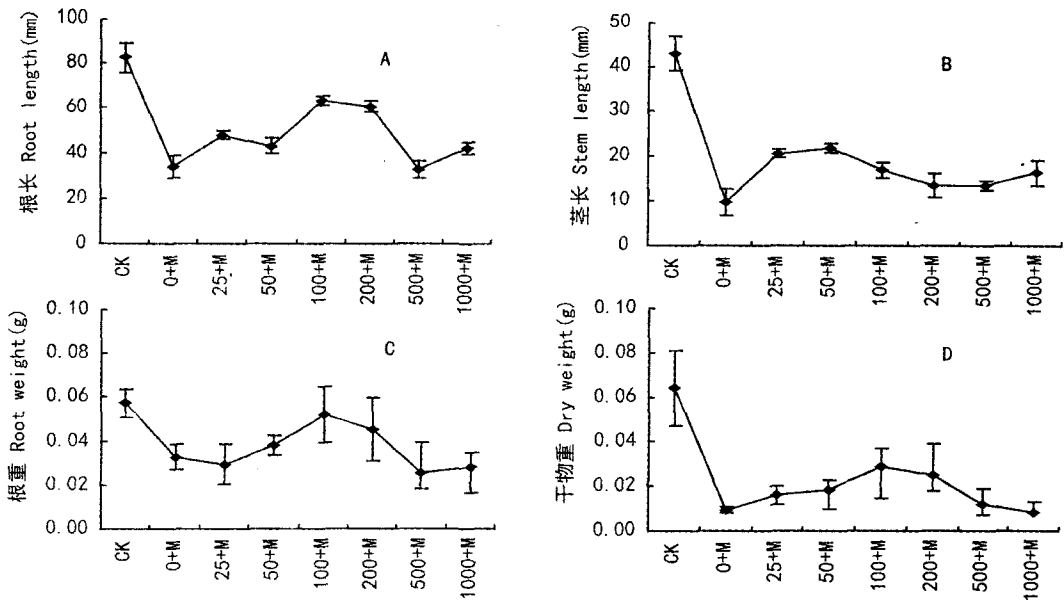


图 5 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗生长的影响

Fig. 5 Effect of different concentrations of SNP on growth of maize seedlings under water stress

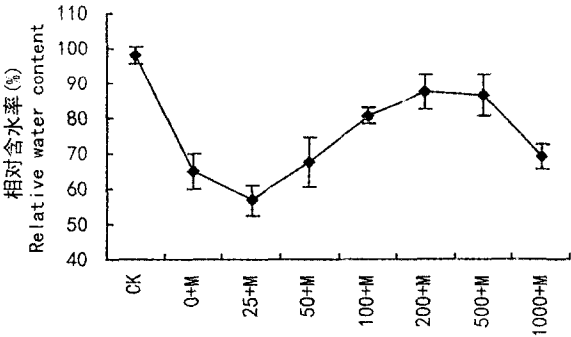


图 6 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗相对含水量的影响

Fig. 6 Effect of different concentrations of SNP on relative water content of maize seedlings under water stress

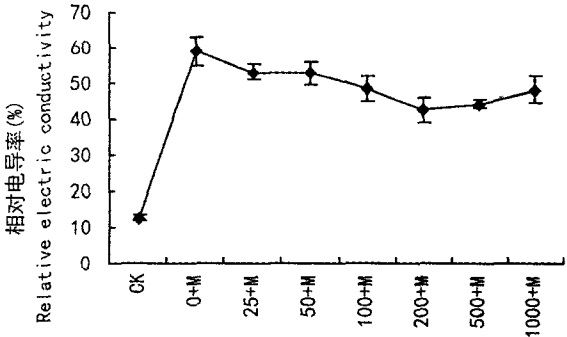


图 7 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗相对电导率的影响

Fig. 7 Effect of different concentrations of SNP on relative electric conductivity of maize seedlings under water stress

电导率较对照极显著增加($P < 0.001$), 比对照组增加了 364.83%。SNP 处理的相对电导率均显著高于对照, 但显著低于 0.4 mol/L 甘露醇水分胁迫处理; 另外, 随 SNP 浓度的提高电导率逐渐降低, 在浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 时降到最低, 之后随 SNP 浓度的提高电导率又逐渐增加, 但仍然低于 0.4 mol/L 甘露醇水分胁迫处理(图 7)。

2.3.3 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗中叶绿素含量的影响 用 0.4 mol/L 甘露醇处理玉米幼苗后, 除叶绿素 b(Cb)外, 玉米幼苗中的叶绿素 a(Ca)、类胡萝卜素含量(Cx. c)及总叶绿素含量(CT)值明显降低, 较对照组分别降低了 38.58%、

78.06%、17.15%, 外源喷施不同浓度的 SNP 除增加类胡萝卜素的合成外对叶绿素 a 和叶绿素 b 的影响不明显(图 8)。

2.3.4 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗游离脯氨酸含量的影响 水分胁迫诱导玉米幼苗体内游离脯氨酸极显著积累($P < 0.01$), 不同浓度 SNP 处理的玉米叶片中脯氨酸含量较仅 0.4 mol/L 甘露醇水分胁迫的均显著下降($P < 0.05$), 虽然仍高于对照, 但与对照无显著差异性(图 9)。

2.3.5 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗 MDA 含量的影响 随着培养液 SNP 浓度的增加, MDA

的含量逐渐降低。在 SNP 浓度为 100 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 时,MDA 的含量降至最低,这时幼苗体内 MDA 的水平相当于 0.4 mol/L 甘露醇水分胁迫的 1/2 倍。随着 SNP 浓度的增加,MDA 的含量也增加,在培养液中 SNP 浓度为 500 和 1 000 $\mu\text{mol/L}$ 时,MDA 的含量虽然有所增加,但依然低于 0.4 mol/L 甘露醇水分胁迫的 MDA 水平(图 10)。

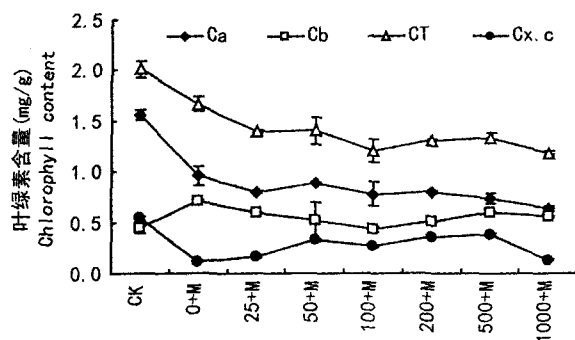


图 8 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗中叶绿素含量的影响

Fig. 8 Effect of different concentrations of SNP on chlorophyll content of maize seedlings under water stress

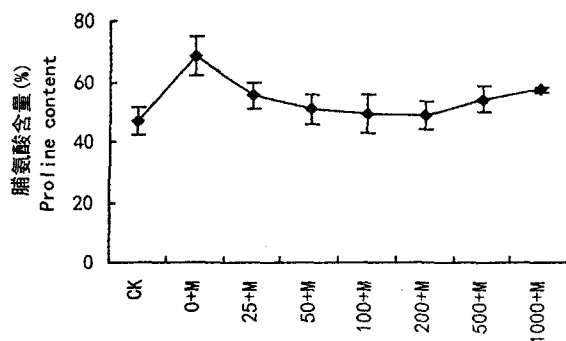


图 9 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗脯氨酸含量的影响

Fig. 9 Effect of different concentrations of SNP on Proline content of maize seedlings under water stress

3 讨论

一氧化氮与植物非生物胁迫的关系是植物界目前研究的热点之一。适宜浓度的 NO 可以减轻盐害、干旱、低温、臭氧和紫外线照射等对植物细胞的伤害(王韶唐,1983;陈明等,2004;王宪叶等,2004)。Caro & Puntarulo(1998)曾观察到大豆种子的 NO 产生率和一氧化氮合酶(NOS)活性随萌发进程上

升,SNP 和另一种 NO 供体 SNAP 可诱导光依赖性的莠苣种子萌发,其效应可被 NO 清除剂 cPTIO 所抑制(Beligni & Lamattina,2000),也能明显促进渗透胁迫下小麦种子萌发、胚根和胚芽伸长(张华等,2003)。本试验中玉米种子对照发芽率最高,水分胁迫下玉米种子的萌发率受到很大的影响,外源一氧化氮供体 SNP 处理对玉米种子萌发有明显的促进作用,增加玉米的发芽指数和活力指数,特别是浓度为 200 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 处理对玉米种子的萌发起到显著的促进作用。

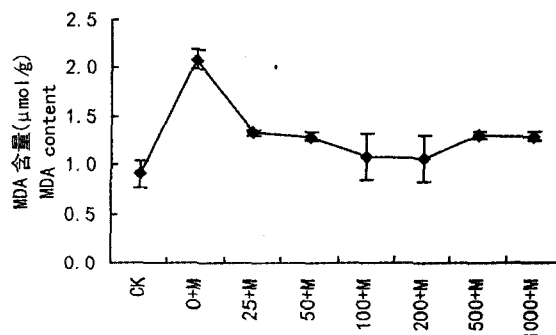


图 10 不同浓度 SNP 对水分胁迫下玉米幼苗 MDA 含量的影响

Fig. 10 Effect of different concentrations of SNP on MDA content of maize seedlings under water stress

据报道,以 0.06mmol/L 的 SNP 浸种预处理可极显著提高 100 mM NaCl 胁迫下小麦幼苗的生物量(段培等,2006)。本研究发现用不同浓度的 SNP 处理 0.4 mol/L 甘露醇胁迫下玉米幼苗,可不同程度的增加幼苗的根长、茎长、根重和干物质重。其中 100 $\mu\text{mol/L}$ 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 处理可显著提高 0.4 mol/L 甘露醇胁迫下玉米幼苗的根长、茎长、根重和干物质重,极显著地缓解水分胁迫对玉米地上部分和根部生长的抑制作用。

本研究中,水分胁迫造成了植株细胞膜的伤害,导致玉米幼苗叶片的相对含水量显著下降。水分胁迫下 SNP 处理的幼苗有较高的相对含水量,表明外源 SNP 能够提高幼苗的持水能力,保证了植株体内水分的运输,对增强抗旱性有显著作用。水分胁迫引起植物体内 MDA 含量明显增加(董芳等,2009;刘奕清等,2008;赵文才等,2009),而在外源 SNP 存在的条件下,MDA 含量显著降低,说明 SNP 能抑制膜脂过氧化作用,从而减轻对细胞的伤害作用,特别是在 SNP 浓度为 100 和 200 $\mu\text{mol/L}$ 时效果最为明显。同时,适量浓度的 SNP 处理对提高水分胁迫

下类胡萝卜素的合成具有积极作用,而类胡萝卜素在光合作用过程中具有过剩激发能的耗散和活性氧的清除功能,能够保护其细胞器免受伤害。此外,一定浓度的 SNP 处理可使水分胁迫下玉米叶片的渗透调节物质维持在一个相对稳定的状态而达到提高抗旱性的目的。

综上所述,外源一氧化氮供体 SNP 对水分胁迫有一定的缓解作用,可以促进在水分胁迫下的玉米种子萌发及幼苗生长,改善幼苗生理活性。SNP 通过促进游离脯氨酸的积累进而提高玉米叶片的渗透调节能力以缓解水分胁迫造成的玉米幼苗叶片的水分损失,提高叶片的相对含水量,改善玉米幼苗的水分状况;SNP 降低了水分胁迫下玉米叶片细胞的质膜透性增加程度和膜脂过氧化程度,使逆境中的植株在一定程度上仍能保持较好的生理生长特性。特别是浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 处理效果较好。

参考文献:

- 王韶唐. 1983. 植物抗旱的生理基础[M]//北京植物生理学会. 植物生理生化进展,北京:科学出版社:120—133
- 孙群,胡景江. 2006. 植物生理学研究技术[M]. 陕西杨陵:西北农林科技大学出版社:56—57
- 张志良. 2003. 植物生理学实验指导[M]. 第3版. 北京:高等教育出版社:67—70
- 张宪政. 1992. 作物生理研究法[M]. 北京:农业出版社:208—212
- 高俊凤. 2000. 植物生理学实验技术[M]. 西安:世界图书出版公司:101—102
- Beligni MV, Lamattina L. 1999. Nitric oxide counteracts cytotoxic processes mediated by reactive oxygen species in plant tissues [J]. *Plants*, **208**:337—344
- Beligni MV, Lamattina L. 2000. Nitric oxide stimulates seed germination and de-etiolation, and inhibits hypocotyl elongation, three light-inducible responses in plants[J]. *Planta*, **210**:215—221
- Bethke PC, Badger MR, Jonew RL. 2004. Apoplastic synthesis of nitric oxide by plant tissues[J]. *Plant Cell*, **16**:332—341
- Caro A, Puntarulo S. 1998. Nitric oxide decreases superoxide anion generation by microsomes from soybean embryonic axes [J]. *Physiol Plant*, **104**:357—364
- Chen M(陈明), Shen WB(沈文飏), Ruan HH(阮海华), et al. 2004. Effects of nitric oxide on root growth and its oxidative damage in wheat seedling under salt stress(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]. *J Plant Physiol Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), **30**(5):569—576
- Dong F(董芳), Liang ZS(梁宗锁), Jia YY(贾媛媛). 2009. Physiological reaction of maize seedlings to exogenous Rutin under water stress(外源芦丁预处理对水分胁迫下玉米幼苗的生理效应)[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin* (西北植物学报), **29**(1):93—98
- Duan P(段培), Wang F(王芳), Wang BS(王宝山). 2006. Seed pre-soaking with NO donor sodium nitroprusside(SNP) significantly alleviates the oxidative damage in wheat seedlings under salt stress (NO 供体 SNP 浸种显著缓解盐胁迫对小麦幼苗的氧化损伤)[J]. *J Heze Univ* (菏泽学院学报), **10**(5):93—98
- Garcia-Mata C, Lamattina L. 2001. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress[J]. *Plant Physiol*, **126**:196—204
- Laxalt AM, Beligni MV, Lamattina L. 1997. Nitric oxide reserves the level of chlorophyll in potato leaves infected by *Phytophthora infestans*[J]. *Eur J Plant Pathol*, **73**:643—651
- Ling TF(凌腾芳), Xuan W(宣伟), Fan YR(樊颖瑞). 2005. The effect of exogenous glucose, fructose and no donor sodium nitroprusside(SNP) on rice seed germination under salt stress(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)[J]. *J Plant Physiol Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), **31**(20):205—212
- Liu YQ(刘奕清), Chen ZX(陈泽雄), Yang WQ(杨婉晴). 2008. Effect of high temperature and drought stress on the physiological characteristics of *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* seedlings(高温和干旱胁迫对尾巨桉幼苗生理特性的影响)[J]. *Acta Hort Sin* (园艺学报), **35**(5):761—764
- Wang LX(王罗霞), Zhao ZG(赵志光), Wang SM(王锁民). 2006. Effect of nitric oxide on metabolism of reactive oxygen species and membrane lipid peroxidation in *Triticum aestivum* leaves under water stress(一氧化氮对水分胁迫下小麦叶片活性氧代谢及膜脂过氧化的影响)[J]. *Acta Prat Sin* (草业学报), **22**(10):104—108
- Wang XY(王宪叶), Shen WB(沈文飏), Xu LL(徐朗莱). 2004. Exogenous nitric oxide alleviates osmotic stress-induced membrane lipid peroxidation in wheat seedling leaves(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)[J]. *J Plant Physiol Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), **30**(2):195—200
- Zhang H(张华), Shen WB(沈文飏), Xu LL(徐朗莱). 2003. Effects of nitric oxide on the germination of wheat seeds and its reactive oxygen species metabolisms under osmotic stress(一氧化氮对渗透胁迫下小麦种子萌发及其活性氧代谢的影响)[J]. *Acta Bot Sin* (植物学报), **45**(8):901—905
- Zhang YY(张艳艳), Liu J(刘俊), Liu YL(刘友良). 2004. Nitric oxide alleviates growth inhibition of maize seedlings under nacl stress(一氧化氮缓解盐胁迫对玉米生长的抑制作用)[J]. *J Plant Physiol Mol Biol* (植物生理与分子生物学学报), **30**(4):455—459
- Zhao WC(赵文才), Li H(李慧), Zhao HJ(赵会杰). 2009. Effects of exogenous polyanfine osmotica regulation in wheat seedling leaves under drought stress(外源腐胺对干旱胁迫下小麦叶片渗透调节的影响)[J]. *Chin Agric Sci Bull* (中国农学报), **25**(09):148—151