

外源 NO 对铅胁迫下水果黄瓜种子萌发和 幼苗生理特性的影响

肖小君,黄作喜,陈文年,王 辉

(内江师范学院 生命科学学院,四川省高等学校特色农业资源研究与利用重点实验室,四川 内江 641100)

摘要:探讨水果黄瓜幼苗对铅胁迫的响应机制,为揭示水果黄瓜抗铅性提供理论依据。在 200 mg/L 硝酸铅胁迫下,研究了不同浓度的(50,100,300,500 $\mu\text{mol/L}$)外源一氧化氮(Nitric oxide,NO)对水果黄瓜种子萌发以及幼苗可溶性蛋白含量、丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性及叶绿素相对含量的影响。结果表明,200 mg/L 的硝酸铅对水果黄瓜种子的萌发起到显著的抑制作用,并使可溶性蛋白与丙二醛的含量升高,POD、CAT 活性以及叶绿素相对含量显著降低;加入硝普钠(SNP,NO 供体)对水果黄瓜种子的发芽率、发芽势及发芽指数有明显的促进作用,同时降低了丙二醛的含量,增加 POD、CAT、SOD 活性以及叶绿素相对含量和可溶性蛋白质含量。外源 NO 能显著促进 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜种子萌发,增强细胞的渗透调节能力,提高保护酶活性,明显缓解幼苗叶片受到的氧化损伤,其中以 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理的效果最好。

关键词:水果黄瓜;一氧化氮;铅胁迫;种子萌发;生理特性

中图分类号:S642.01 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2015)03-0123-06

doi:10.7668/hbxb.2015.03.022

Influences of Exogenous Nitric Oxide on Seed Germination and Seedling Physiological Characteristics of Fruit Cucumber under Pb^{2+} Stress

XIAO Xiao-jun, HUANG Zuo-xi, CHEN Wen-nian, WANG Hui

(School of Life Science, Neijiang Normal University, Key Laboratory of Colleges and Universities in Sichuan
for Research and Utilization of Distinctive Agricultural Undertakings, Neijiang 641100, China)

Abstract: The mechanisms of *Cucumis sativus* L. seedlings responding to Pb stress were studied in order to provide a theoretical basis for lead-resistant. The effects on the germination of cucumber seeds and the contents of soluble protein and MDA, the activities of POD, CAT and SOD and chlorophyll relative contents of cucumber seedlings of the different concentration of exogenous NO (50, 100, 300, 500 $\mu\text{mol/L}$) were studied under 200 mg/L $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. The results showed that the germination of fruit cucumber seeds was inhibited significantly, the contents of soluble protein and MDA increased, while the activities of POD, CAT and chlorophyll relative contents decreased obviously under 200 mg/L $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. The germination percentage, germination potential and germination indexes of fruit cucumber seeds were stimulated greatly with adding sodium nitroprusside (SNP, nitric oxide donor), which decreased the contents of MDA at the same time, while raised the activities of POD, CAT and the contents of relative chlorophyll and soluble protein. It could obviously promote the germination of fruit cucumber seeds under Pb^{2+} stress with adding exogenous nitric oxide, enhance the osmotic adjustment capacity of cell, increase the activity of protective enzyme and significantly alleviate oxidative damage to seeding leaves, the effect was the best when SNP was at 100 $\mu\text{mol/L}$ especially.

Key words: Fruit cucumber; Nitric oxide; Pb^{2+} stress; Seed germination; Physiological characteristics

近年来,由于机动车辆使用含铅的抗震剂,农药、化肥和除草剂的广泛使用以及工业“三废”等严

收稿日期:2015-02-25

基金项目:四川省教育厅科研项目(10ZA014);四川省教育厅重大成果转化培育项目(11ZZ006)

作者简介:肖小君(1982-),女,四川岳池人,助理研究员,硕士,主要从事植物逆境生理方面的研究。

通讯作者:黄作喜(1966-),男,四川安岳人,教授,硕士,主要从事植物抗性生理及相关领域的研究。

重污染了大气、水质和土壤,导致环境中铅含量显著增加^[1]。铅是一种常见的重金属,全球每年消耗量约为 400 万 t,但仅有 1/4 得到回收利用,其余大部分都以不同形式进入环境引起污染^[2]。研究表明,铅胁迫严重影响植物的种子萌发^[3-4],加剧细胞膜脂质过氧化作用,引起根系活力下降^[5],抑制叶绿素的生物合成^[6]和矿质营养的吸收^[7],进而导致植物无机离子稳态受到严重伤害^[5],阻止植物生长。因此,缓解铅污染对农作物的危害具有十分重大的意义。

硝普钠(SNP)全名亚硝基铁氰化钠,是一种常见的 NO 供体,NO 是参与植物生理活动和生长发育的信号分子^[8],也是一种植物体内经一氧化氮合成酶(NOS)与硝酸还原酶(NR)催化形成的活性氮(RNS)。其广泛存在于植物组织中,并参与植物种子萌发、衰老、光形态建成、呼吸作用以及对胁迫的响应等过程^[9]。研究表明,NO 具有双面作用性,适宜浓度的 NO 在增强植物抗逆性和抗氧化能力等方面发挥重要作用,具有对多种胁迫的缓解作用^[10]。

水果黄瓜(*Cucumis sativus* L.)属葫芦科一年生蔓生植物,外形精巧,口感甜脆,营养丰富,商品性好,深受酒店、餐厅和消费者青睐,由于其生长势旺,坐果能力强,丰产潜力很大,近年来其生产发展迅速,在全国各地广为种植,经济效益显著^[11]。目前,关于外源 NO 与黄瓜的研究多集中在缓解盐胁迫方面^[12-14],外源 NO 对于 Pb²⁺胁迫下水果黄瓜生长影响及其机理未见相关报道。笔者曾采用不同浓度的 Pb²⁺胁迫对水果黄瓜种子萌发和幼苗生长进行研究^[15],结果发现,200 mg/L 的硝酸铅对黄瓜幼苗生长具有明显的抑制作用,但又不过于强烈。因此,本试验选择 200 mg/L 作为硝酸铅胁迫的处理浓度,通过研究不同浓度的硝普钠对硝酸铅胁迫下水果黄瓜种子萌发以及幼苗生理生化特性的影响,筛选出硝普钠缓解硝酸铅胁迫的适宜浓度,初步探讨 NO 对提高水果黄瓜耐铅性的作用。

1 材料和方法

1.1 试验材料

以卡其 01 水果黄瓜种子为试材,购于山东寿光种子贸易中心,试验于 2012 年 3-5 月在内江师范学院玻璃温室内进行。

1.2 试验方法

精选大小一致、颗粒饱满的水果黄瓜种子,用 0.1% (m/V) HgCl₂ (氯化汞)消毒 3 min,蒸馏水冲洗 3~4 次,于恒温水浴锅中(28±2)℃浸种 12 h

后播种到垫有 2 层滤纸的培养皿中,分别加入以下处理液:H0:蒸馏水;H1:200 mg/L 硝酸铅;H2:200 mg/L 硝酸铅 + 50 μmol/L SNP;H3:200 mg/L 硝酸铅 + 100 μmol/L SNP;H4:200 mg/L 硝酸铅 + 300 μmol/L SNP;H5:200 mg/L 硝酸铅 + 500 μmol/L SNP,试验共设 6 个处理,3 次重复,置于(26±1)℃人工气候箱中黑暗萌发。培养期间视情况分别用 6 种处理液淋洗种子,为了保证处理浓度的稳定性,处理期间 3 d 更换一次营养液,浇透培养皿底部滤纸,然后倾斜培养皿沥去多余处理液。以胚根与种子等长为指标,每天对种子的萌发情况进行统计,并采用下述公式进行发芽率、发芽势及发芽指数的计算。种子在培养箱中萌发 7 d 后,移至口径为 12 cm 的营养钵中,用上述对应的处理液继续培养,每个处理设 3 个重复,每个重复 30 株幼苗,待 2 片真叶完全展开时进行生理指标的测定。

1.3 指标测定方法

种子发芽率(GE) = $Ga/Gn \times 100\%$ (Ga :7 d 发芽种子数; Gn :供试种子数);

种子发芽势(GR) = (4 d 内正常发芽的种子粒数/供试种子数) × 100%;

种子发芽指数(GI) = $\Sigma(Gt/Dt)$ (Gt : t d 内发芽种子数; Dt :发芽天数);

可溶性蛋白含量参照 Bradford^[16]的方法;MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸法^[17],POD 和 CAT 活性的测定参考 Cakmak 等^[18]的方法;SOD 活性的测定参考 Giannopolities 等^[19]的方法;以上生理指标的测定均重复 3 次。采用 SPAD-502Plus 叶绿素测定仪对每个处理随机抽取 30 片真叶的中部进行叶绿素相对含量测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2003 软件处理数据和绘图,以 Pb²⁺胁迫后水果黄瓜各生理指标相对于对照的增减幅度为数据源进行相关性分析,用 SPSS 13.0 软件对数据进行方差分析。

2 结果与分析

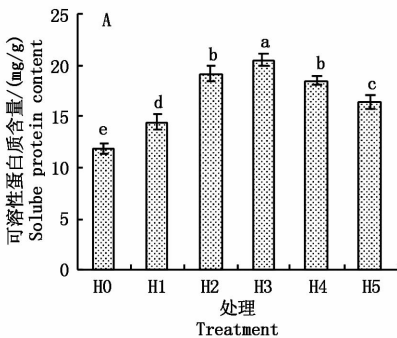
2.1 不同浓度外源 NO 对 Pb²⁺胁迫下水果黄瓜种子萌发的影响

从表 1 可以看出,在 200 mg/L Pb(NO₃)₂ 胁迫下,水果黄瓜种子萌发受到明显抑制,H1 的发芽率(GE)、发芽势(GR)、发芽指数(GI)分别比对照 H0 下降约 56.53%,77.78%和 70.09%,三者存在显著差异($P < 0.05$);添加 50 μmol/L SNP 后(H2)的发芽势和发芽指数较 H1 有所上升,但差异不显著;

100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理(H3)效果最好,其发芽率、发芽势和发芽指数比 H1 分别提高 180.02% ,387.40% 和 287.26% ,二者间发芽率、发芽势和发芽指数均存在显著差异;随着 SNP 处理浓度的增加(H4 和 H5),其缓解作用逐步降低,显著低于 H3 的缓解效果。这表明 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理(H3)显著促进 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜种子萌发,缓解 Pb^{2+} 胁迫对水果黄瓜种子的伤害,SNP 浓度过高(H4 和 H5)或过低(H2)缓解效果降低。

2.2 不同浓度外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜幼苗叶片可溶性蛋白含量的影响

由图 1-A 可知,水果黄瓜幼苗在受到 Pb^{2+} 胁迫后,其叶片内可溶性蛋白质含量(以鲜质量计)明显上升,H1 的可溶性蛋白含量相比 H0 增加约 21.51%;添加 SNP 后可溶性蛋白质的含量均显著高于 H0 和 H1,其中在 H3 达到最大值,相比 H1 上升约 42.09%,且与其他处理差异显著;H2 和 H4 处



理之间可溶性蛋白含量差异不显著,但明显高于 H5。本试验结果表明,适宜浓度的 SNP 处理能提高 Pb^{2+} 胁迫下可溶性蛋白质的含量,增强了植物的渗透调节能力,有利于保持细胞内环境的相对稳定。

表 1 外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜种子萌发的影响
Tab.1 Effects of exogenous nitric oxide on seed germination of fruit cucumber under Pb^{2+} stress

处理 Treatments	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index
H0	76.67 \pm 6.67b	40.00 \pm 6.03a	17.32 \pm 0.95b
H1	33.33 \pm 3.33d	8.89 \pm 1.59c	5.18 \pm 0.65e
H2	33.33 \pm 6.67d	12.22 \pm 2.17c	5.97 \pm 1.15e
H3	93.33 \pm 0.00a	43.33 \pm 6.34a	20.06 \pm 1.02a
H4	60.00 \pm 10.00c	20.00 \pm 3.01b	10.94 \pm 1.78c
H5	53.33 \pm 3.33c	11.11 \pm 1.68c	8.88 \pm 0.53d

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),图 1~3 同。
Note: Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 level, The same as Fig. 1-3.

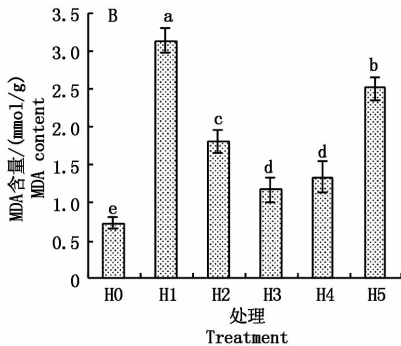


图 1 外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜叶片可溶性蛋白质(A)和 MDA(B)含量的影响

Fig.1 Effect of exogenous nitric oxide on the soluble protein(A) and MDA(B) contents of fruit cucumber seedling leaves under Pb^{2+} stress

2.3 不同浓度外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜幼苗叶片 MDA 含量的影响

由图 1-B 可知,在 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜叶片中 MDA 含量(以鲜质量计)显著提高,H1 的 MDA 含量相比 H0 增加约 3.30 倍;不同浓度的 SNP 作用下叶片中的 MDA 含量呈先降低后升高的趋势,但均显著高于 H0,低于 H1,其中在 H3 处达到最低值,相比 H1 降低约 62.74%。表明 Pb^{2+} 胁迫加速了细胞的膜脂过氧化作用,使其叶片 MDA 含量显著提高,100,300 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理(H3 和 H4)能明显缓解 Pb^{2+} 胁迫造成的氧化损伤,显著减少幼苗叶片 MDA 含量,50 $\mu\text{mol/L}$ 低浓度(H2)和 500 $\mu\text{mol/L}$ 高浓度(H5)的 SNP 处理对其氧化损伤的缓解作用比 H3 和 H4 显著降低。

2.4 不同浓度外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

从图 2,3-A 可以看出,200 mg/L 硝酸铅胁迫明

显降低水果黄瓜叶片中的抗氧化酶活性,H1 的 POD、CAT 活性(以鲜质量计)相比 H0 下降了约 34.19% ,45.19% ,差异显著,而 SOD 的活性(以鲜质量计)相比 H0 下降了约 34.64% ,差异不显著;添加适宜浓度的 SNP 能明显提高铅胁迫下的 POD、CAT 和 SOD 活性,三者均在 H3 处理达最高值,分别比 H1 增加约 70.56% ,69.47% 和 363.25% ($P < 0.05$),SNP 通过提高酶活性以降低内源活性氧(ROS)浓度从而间接缓解膜脂过氧化作用;高浓度的 SNP 作用下(H4 和 H5)其缓解能力逐渐降低,H5 处理的 CAT 和 SOD 活性与 H1 差异不显著,表明外源 NO 对植物的双重性。

2.5 不同浓度外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜幼苗叶片叶绿素相对含量的影响

由图 3-B 可知,水果黄瓜叶片的叶绿素相对含量在 Pb^{2+} 胁迫下明显降低,H1 相比 H0 下降约 20.99% ,二者差异显著;不同浓度的 SNP 处理明显

提高 Pb^{2+} 胁迫下的叶绿素相对含量,在 H3 处理表现最为明显,相比 H1 上升约 28.13%,与 H1 差异显

著;随 SNP 浓度的增加,叶绿素相对含量有所下降,对 Pb^{2+} 胁迫的缓解作用减弱。

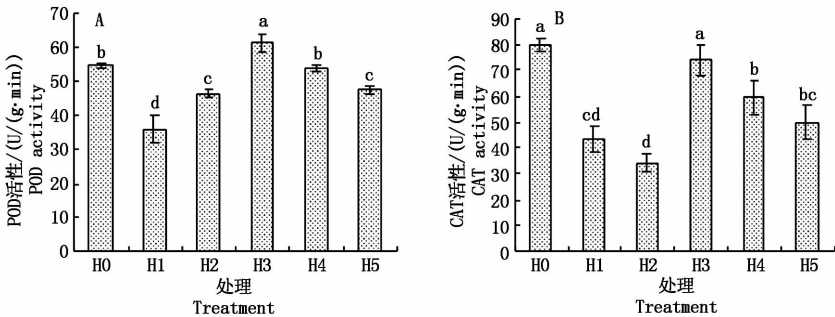


图 2 外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜叶片 POD(A) 和 CAT(B) 活性的影响
Fig.2 Effect of exogenous nitric oxide on the POD(A) and CAT(B) activities of fruit cucumber seedling leaves under Pb^{2+} stress

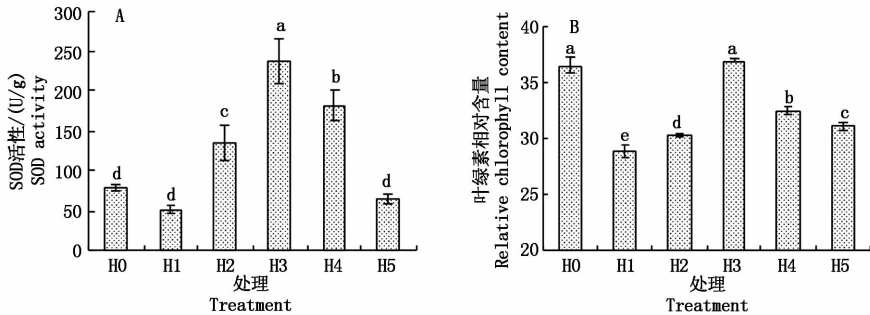


图 3 外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜叶片 SOD(A) 活性和叶绿素相对含量(B) 的影响
Fig.3 Effect of exogenous nitric oxide on the SOD(A) activity and relative chlorophyll contents(B) of fruit cucumber seedling leaves under Pb^{2+} stress

2.6 外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜幼苗叶片各生理指标的相关性

从表 2 可以看出,MDA 含量与 POD 活性呈显著负相关,与 SOD 活性和可溶性蛋白含量呈极显著负相关,POD 活性与 CAT、SOD 活性和可溶性蛋白含量呈显著正相关,SOD 活性与可溶性蛋白含量呈显著正相关,CAT 活性与 SOD 活性和可溶性蛋白含量呈一定正相关,与 MDA 含量呈负相关,但均不显著。丙二醛是衡量逆境胁迫比较直接的鉴定指

标^[20],以上分析说明,MDA 含量与其他指标呈负相关,起负面效应,它含量越高,植物对 Pb^{2+} 胁迫的耐受能力越低;POD、SOD 活性和可溶性蛋白含量对水果黄瓜抗 Pb^{2+} 胁迫能力起正面作用,含量越高,抗 Pb^{2+} 胁迫能力越强;而 CAT 活性与 MDA 含量之间无明显相关性。表明 Pb^{2+} 胁迫水果黄瓜各生理指标的变化相互联系,共同影响植物的耐受能力,MDA 含量、POD、SOD 活性和可溶性蛋白含量可作为水果黄瓜抗 Pb^{2+} 胁迫能力的重要鉴定指标。

表 2 外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下水果黄瓜幼苗叶片各生理指标的相关性

Tab.2 Correlation analyses among physiological indices of exogenous nitric oxide in fruit cucumber seedling leaves under Pb^{2+} stress

指标 Index	MDA 含量 MDA content	POD 活性 POD activity	CAT 活性 CAT activity	SOD 活性 SOD activity	可溶性蛋白质含量 Solube protein content
MDA 含量 MDA content	1				
POD 活性 POD activity	-0.916 *	1			
CAT 活性 CAT activity	-0.607	0.816 *	1		
SOD 活性 SOD activity	-0.954 **	0.906 *	0.722	1	
可溶性蛋白质含量 Solube protein content	-0.950 **	0.876 *	0.497	0.920 *	1

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关显著。

Note: * and ** denote significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

重金属铅是一种对植物有积累性危害的有毒物

质^[21],土壤中高浓度的 Pb^{2+} 能够抑制种子的萌发,通过改变种子和幼苗的生理过程影响植株的发育^[22]。NO 是一种广泛存在于植物体内的信号传导

分子,参与植物生长发育调控和对生物与非生物环境胁迫的应答反应^[23],进而影响植物的新陈代谢。本试验结果表明,200 mg/L 的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 明显降低了水果黄瓜种子的发芽率、发芽势和发芽指数,叶绿素相对含量和抗氧化酶活性亦显著降低,可溶性蛋白与 MDA 含量显著升高。在适宜浓度的外源 NO 供体 SNP 与 Pb^{2+} 共同作用下,可明显提高水果黄瓜种子的发芽率、发芽势及发芽指数,同时降低丙二醛的含量,缓解 Pb^{2+} 胁迫造成的氧化损伤,增加 POD、CAT、SOD 活性以及可溶性蛋白质和叶绿素相对含量,其中以 100 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 缓解效果最好,500 $\mu\text{mol/L}$ SNP 的缓解作用显著降低,这与汤绍虎等^[24]的研究结果一致。

植物体内的可溶性蛋白大多数是参与各种代谢的酶类,测其含量是了解植物总体代谢的一个重要指标^[25]。逆境条件下,植物也通过渗透调节来提高对逆境的抵抗能力,可溶性蛋白作为一种渗透调节物质可以使细胞保持适当的渗透势而防止脱水,同时对生物分子的结构和功能起到稳定和保护作用^[26],前人研究表明,可溶性蛋白含量升高有助于提高植物对逆境的抵抗力^[27-28]。本试验研究结果表明, Pb^{2+} 胁迫下适宜浓度的 SNP 处理使水果黄瓜幼苗叶片可溶性蛋白质含量显著提高,究其原因可能是 SNP 诱导合成新的抗胁迫蛋白,提高了溶质浓度,降低水势,以利于从外界获得水分,从而适应不良环境^[29],缓解重金属离子的毒害作用。

逆境胁迫会导致植物叶片活性氧的积累和膜脂过氧化程度加重,细胞内 MDA 含量的高低反映细胞氧化损伤的程度,SOD 是清除生物体内 O_2^- 的唯一酶类。根据超氧化学说原理,SOD 活性下降和 MDA 的存在表明细胞膜透性受到影响,进而影响植物的正常生理代谢活动^[30]。本试验中, Pb^{2+} 胁迫导致水果黄瓜幼苗叶片 MDA 含量显著提高,POD、CAT 和 SOD 活性降低,说明 Pb^{2+} 胁迫可能造成植物体内细胞膜系统的损伤和大量的 ROS 积累,加速了 POD、CAT 和 SOD 的消耗;添加 SNP 后,MDA 含量显著降低,同时提高了 POD、CAT 和 SOD 活性,表明外源 NO 对植物细胞膜具有良好的保护或修复作用,提高了清除自由基防御系统的防御能力,从而缓解 Pb^{2+} 胁迫造成的氧化毒害。植物通常通过自身的抗氧化酶系统(包括 SOD、POD 和 CAT 等)清除体内积累的 ROS。SOD 可将超氧阴离子自由基转化为过氧化氢,过氧化氢在植物体内又由较高活性的 POD 分解,而 CAT 则能清除过氧化氢^[31],因此,提高逆境下植物体内的 SOD、POD 和 CAT 活性能增

强植物体抵抗胁迫的能力,减缓膜脂过氧化进程。前人研究认为,外源 NO 浸种处理能有效提高 NaCl 胁迫下种子体内抗氧化酶的活性^[32-33],从而增强种子萌发抗 NaCl 胁迫的能力,高安妮等^[34]认为,外源 NO 能显著提高 SOD、POD 和 CAT 等酶活性,降低 MDA 含量,从而减轻平邑甜茶幼苗连作障碍现象,这与本人的研究结果一致。就其原因可能是不同的 NO 和 ROS 自由基能够发生多种直接的化学反应而相互转换^[35],Mata 等^[36]研究也表明,NO 通过与 ROS 或脂质过氧化自由基反应来减轻细胞膜损伤,并中断氧化胁迫,恢复和维持细胞质膜正常选择透性。

有报道指出,适宜浓度的 SNP 处理可明显缓解逆境下叶绿素的降解^[37]。卢晓萍等^[38]研究认为,SPAD 值与叶绿素含量具有极显著相关性,SPAD 值能准确反映叶片中的叶绿素含量。本试验结果表明, Pb^{2+} 胁迫下 SPAD 值明显降低,在加入 SNP 后 SPAD 值显著上升,其中以 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 最为明显,表明 NO 缓解了叶绿素降解,这与肖强等^[39]的研究结果一致,究其原因可能是施加外源 NO 可显著增加叶绿体中活性氧清除关键酶 SOD 与 APX 活性,保护了叶绿体膜系统的稳定,从而提高叶片叶绿素含量^[37]。

参考文献:

- [1] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of world-wide contamination of air, water and soils by trace-metals [J]. *Nature*, 1988, 333 (6169): 134 - 139.
- [2] 李建政. 环境毒理学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 135.
- [3] 回振龙, 李自龙, 李朝周, 等. 外源 NO 供体 SNP 对 PEG 模拟干旱胁迫下高羊茅种子萌发及幼苗抗性生理的影响 [J]. *华北农学报*, 2013, 28 (4): 86 - 92.
- [4] 吕静霞, 张雅莉. 铅胁迫对小麦种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *种子*, 2012, 31 (1): 100 - 103.
- [5] 刘爱荣, 张远兵, 张雪平, 等. 铅污染对高羊茅生长、无机离子分布和铅积累量的影响 [J]. *核农学报*, 2009, 23 (1): 128 - 133, 144.
- [6] 龚双姣, 马陶武, 姜业芳, 等. 铅胁迫对 3 种藓类植物细胞伤害及光合色素含量的影响 [J]. *西北植物学报*, 2009, 29 (8): 1630 - 1636.
- [7] 张志坚, 高 健, 蔡春菊, 等. 铅胁迫下菲白竹的矿质营养吸收和分配 [J]. *林业科学*, 2011, 47 (1): 153 - 157.
- [8] 张远兵, 刘爱荣, 张雪平, 等. 外源一氧化氮对铅胁迫下高羊茅生长和无机离子含量的影响 [J]. *广西植物*, 2009, 29 (3): 360 - 365.
- [9] Graziano M, Lamattina L. Nitric oxide accumulation is re-

- quired for molecular and physiological responses to Iron deficiency in tomato roots [J]. *Plant Journal*, 2007, 52 (5): 949 – 960.
- [10] 曹 慧, 王孝威, 邹岩梅, 等. 外源 NO 对干旱胁迫下平邑甜茶幼苗叶绿素荧光参数和光合速率的影响 [J]. *园艺学报*, 2011, 38(4): 613 – 620.
- [11] 肖小君, 齐泽民, 王 辉, 等. 卡其水果黄瓜子叶节高频再生体系的研究 [J]. *北方园艺*, 2011 (19): 113 – 115.
- [12] 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.
- [13] 焦 娟, 王秀峰, 杨凤娟, 等. 外源一氧化氮对硝酸盐胁迫下黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 3009 – 3014.
- [14] 杜长霞, 邵俏赛, 樊怀福, 等. 外源 NO 对 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 胁迫下黄瓜幼苗生长和抗氧化系统的影响 [J]. *核农学报*, 2013, 27(6): 854 – 860.
- [15] 彭文露, 陈玺希, 罗 婧, 等. 重金属 Pb 胁迫对水果黄瓜种子萌发和幼苗生理特性的影响 [J]. *种子*, 2013, 32(5): 82 – 84.
- [16] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248 – 254.
- [17] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 3 版. 台北县: 艺轩图书出版社, 2009: 274 – 276.
- [18] Cakmak I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves [J]. *Plant Physiology*, 1992, 98(4): 1222 – 1227.
- [19] Giannopolities C N, Ries S K. Superoxide dismutase I. Occurrence in higher plants [J]. *Plant Physiology*, 1977, 59: 309 – 314.
- [20] 张保青, 杨丽涛, 李杨瑞. 自然条件下甘蔗品种抗寒生理生化特性的比较 [J]. *作物学报*, 2011, 37(3): 496 – 505.
- [21] Kopyra M, Edward A, Gwozdz. Nitric oxide stimulates seed germination and counteracts the inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus* [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2003, 41: 1011 – 1017.
- [22] 魏学玲, 史如霞, 贾凌云, 等. 外源一氧化氮对铅胁迫下小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响 [J]. *植物研究*, 2011, 31(1): 34 – 39.
- [23] He Y K, Zhang F X, Liu Y Z, *et al.* Nitric oxide: a new growth regulator in plants [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(5): 325 – 332.
- [24] 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.
- [25] 王 芳, 常盼盼, 陈永平, 等. 外源 NO 对镉胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *草业学报*, 2013, 22(2): 178 – 186.
- [26] 田晓艳, 刘延吉, 郭迎春. 盐胁迫对 NHC 牧草 Na^+ 、 K^+ 、Pro、可溶性糖及可溶性蛋白的影响 [J]. *草业科学*, 2008, 25(10): 34 – 38.
- [27] 张明生, 谢 波, 谈 锋, 等. 甘薯可溶性蛋白、叶绿素及 ATP 含量变化与品种抗旱性关系的研究 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(1): 13 – 16.
- [28] 曾长立, 陈禅友. 外源水杨酸降低辣椒幼苗盐害的生理效应 [J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(11): 32 – 37.
- [29] 毛亚斌, 魏小红. 外源 NO 对干旱胁迫下板蓝根叶片氧化损伤的保护作用 [J]. *草业科学*, 2010, 27(6): 97 – 101.
- [30] Foyer C H, Noctor G. Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signalling [J]. *New Phytologist*, 2000, 146(3): 359 – 388.
- [31] Shi Q H, Zhu Z J. Effects of exogenous salicylic acid on Manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63(1 – 3): 317 – 326.
- [32] 路 莹, 王 萍, 宋兆伟. 外源 NO 浸种对 NaCl 胁迫下沙葱种子萌发和生理特性的影响 [J]. *华北农学报*, 2011, 26(2): 207 – 212.
- [33] 张 红. 硝普钠、 Ca^{2+} 浸种对盐胁迫下小麦的发芽及幼苗生长的影响 [J]. *核农学报*, 2013, 27(10): 1597 – 1603.
- [34] 高安妮, 田长平, 胡艳丽, 等. 外源 NO 对连作条件下平邑甜茶幼苗生理特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(10): 2184 – 2192.
- [35] Neill S J, Desikan R, Hancock J T. Nitric oxide signaling in plants [J]. *New Phytologist*, 2003, 159: 11 – 35.
- [36] García-Mata C, García Mata 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.
- [37] 赵 滢, 艾 军, 王振兴, 等. 外源 NO 对 NaCl 胁迫下山葡萄叶片叶绿素荧光和抗氧化酶活性的影响 [J]. *核农学报*, 2013, 27(6): 867 – 872.
- [38] 卢晓萍, 杨丙贤, 徐婵娟, 等. 3 种小檗科植物叶片 SPAD 值与叶绿素的相关性及通径分析 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2013, 39(3): 261 – 266.
- [39] 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.