

赵 慧, 徐迎春, 张 翔, 等. 外源 NO 对铜、镉胁迫下狭叶香蒲生理反应的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(2): 260-266.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.02.006

外源 NO 对铜、镉胁迫下狭叶香蒲生理反应的影响

赵 慧, 徐迎春, 张 翔, 董春兰

(南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 为研究外源一氧化氮(NO)对狭叶香蒲耐 Cu、Cd 胁迫的影响,进而揭示其缓解 Cu、Cd 胁迫的生理机制,以狭叶香蒲幼苗为试材,在 Cu 或 Cd 的胁迫下,分别添加 0 $\mu\text{mol/L}$ 、50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP (硝普钠,为 NO 供体),检测叶片和根系中抗氧化酶活性以及丙二醛(MDA)、抗坏血酸、蛋白质和叶绿素含量。结果表明:在 25 mg/L Cu^{2+} 或 1.5 mg/L Cd^{2+} 处理下施加不同浓度的 SNP 引起反应的生理指标有所不同,总体表现为叶片和根中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和蛋白质、抗坏血酸含量升高,MDA 含量下降,叶绿素含量不受影响。说明外源 NO 能在一定程度上缓解 Cu 及 Cd 胁迫对狭叶香蒲幼苗造成的伤害。

关键词: 狭叶香蒲; 硝普钠; 抗氧化酶; 丙二醛

中图分类号: S68 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2015)02-0260-07

Physiological response of *Typha angustifolia* to exogenous nitric oxide under copper and cadmium stress

ZHAO Hui, XU Ying-chun, ZHANG Xiang, DONG Chun-lan

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Studies on the effects of exogenous nitric oxide(NO) on the physiological reaction of *Typha angustifolia* in response to copper and cadmium stress will uncover the underlying mechanism of stress relief. In this study, the physiological responses of the leaves and roots of *T. angustifolia* seedlings applied with 0 $\mu\text{mol/L}$, 50 $\mu\text{mol/L}$, 75 $\mu\text{mol/L}$ and 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP (sodium nitroprusside, NO donor) under Cu or Cd stress were detected. Different concentrations of SNP led to various physiological responses of leaves and roots subjected to the stress of 25 mg/L Cu^{2+} or 1.5 mg/L Cd^{2+} . The overall performance was that the activities of superoxide dismutase(SOD), peroxidase (POD) and the contents of proteins and ascorbic acid were increased in the leaves and roots of *T. angustifolia*, while MDA content was decreased. The chlorophyll content had no significant change. These results indicated that the damage caused by Cu and Cd stress was alleviated by SNP to a certain degree.

Key words: *Typha angustifolia*; sodium nitroprusside; antioxidase; malondialdehyde

狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)又称水烛、香蒲、蒲草,为香蒲科香蒲属多年生挺水植物,是湿地、水面造景常用的观赏植物,具有广阔的园林应用前景。

近年来研究发现香蒲属植物具有较强的吸附重金属的能力。陈桂珠等^[1]研究发现,以宽叶香蒲(*Typha latifolia*)为优势种的净化塘对矿山废水中的铜、镉、铅、锌等重金属污染物具有综合净化效果。我们研究发现狭叶香蒲具有较强的耐铜、镉胁迫的能力^[2-4]。连建军等^[5]报道香蒲还具有显著的吸附重金属钼的能力。

一氧化氮(Nitric oxide, NO)作为易扩散的生物活性分子,被认为是一种新的植物生长调节物质,在

收稿日期:2014-07-09

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2011640)

作者简介:赵 慧(1988-),女,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为观赏植物生理生态。(E-mail) zhaohui5951@126.com

通讯作者:徐迎春, (E-mail) xyc@njau.edu.cn

植物生长、发育和信号传递过程中发挥重要作用^[6-7]。研究表明,NO 具有缓解重金属胁迫的作用,主要表现在促进种子萌发^[8]、幼苗生长^[9-11]和抵御活性氧^[12]等方面。另外,前人研究发现,一氧化氮对重金属胁迫的缓解作用对一氧化氮的浓度有一定的依赖性,表现为不同浓度的 NO 对不同植物铜、镉胁迫有不同的缓解效果^[13]。

近年来,由于工矿企业废水、农业退水的不合理排放,造成了水体重金属污染日益严重。水体中的重金属通过食物链进入人体,危害人类健康,而利用具吸附重金属作用的植物修复水体重金属污染是一个具有巨大发展潜力的生态修复领域。鉴于狭叶香蒲具有较强的吸附重金属铜、镉的作用,本试验通过研究不同浓度的硝普钠(SNP)对 Cu、Cd 胁迫下狭叶香蒲生理特性的影响,筛选出 SNP 缓解狭叶香蒲耐 Cu、Cd 胁迫的适宜浓度,揭示其缓解 Cu、Cd 胁迫的生理机制,以提高狭叶香蒲对重金属离子的耐性,以期将狭叶香蒲用于水质净化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料培养与处理

狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)幼苗购自江苏省淮安市楚州区施河镇,采集当年萌发的幼苗(来源于老株根茎萌发形成)。首先将狭叶香蒲用自来水预培养 3 d,再先后用 1/4 和 1/2 Hoagland 营养液各培养 6 d,每 3 d 换 1 次营养液,然后再用全营养液培养 6 d,每天 24 h 用电动气泵连续通气。选取长势一致的狭叶香蒲幼苗设置 5 个营养液处理:①空白对照(Hoagland 营养液);②25 mg/L Cu²⁺或 1.5 mg/L Cd²⁺;③25 mg/L Cu²⁺(或 1.5 mg/L Cd²⁺)+50 μmol/L SNP(硝普钠, [Na₂Fe(CN)₅]·NO);④25 mg/L Cu²⁺(或 1.5 mg/L Cd²⁺)+75 μmol/L SNP;⑤25 mg/L Cu²⁺(或 1.5 mg/L Cd²⁺)+100 μmol/L SNP。其中 Cu²⁺为 CuSO₄·5H₂O, Cd²⁺为 CdCl₂·2.5H₂O,营养液组分中 Cu²⁺浓度为 0.02 mg/L,在此忽略不计。每个处理设 3 次重复,处理 14 d 后分别取根、叶鲜样,用于各项指标的测定。取样时,用去离子水将狭叶香蒲的根冲洗 2~3 次。

1.2 测定内容与方法

丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法^[14]。叶绿素含量的测定采用 95% 乙醇提取法^[15]。抗坏血酸含量测定参照陈建勋的方

法^[16]。蛋白质含量测定采用 G-250 染色法^[15]。

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)酶液的制备:取 0.2 g 新鲜狭叶香蒲叶片或者根于冰浴中研磨,加入少量石英砂和 1.6 ml 预冷的酶提取液(50 mmol/L、pH7.8 的磷酸缓冲液),研磨后的匀浆在 4 ℃、12 000 g 下离心 20 min,取上清液备用。SOD 活性的测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[17],以抑制 NBT 光化还原的 50% 为 1 个酶活单位(U)。POD 活性的测定采用愈创木酚法,以 1 min OD 值变化(升高)0.01 为 1 个酶活性单位(U),反应液配制时由于愈创木酚难溶,应加热一段时间,加入 H₂O₂ 前注意溶液冷却,防止 H₂O₂ 的挥发。由于该反应迅速,加入酶液时要立即进行吸光值的测定^[18]。

1.3 数据分析

采用 SPSS 软件进行方差分析,以 Excel 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 SNP 处理对铜、镉胁迫下狭叶香蒲幼苗叶片和根中抗氧化酶活性的影响

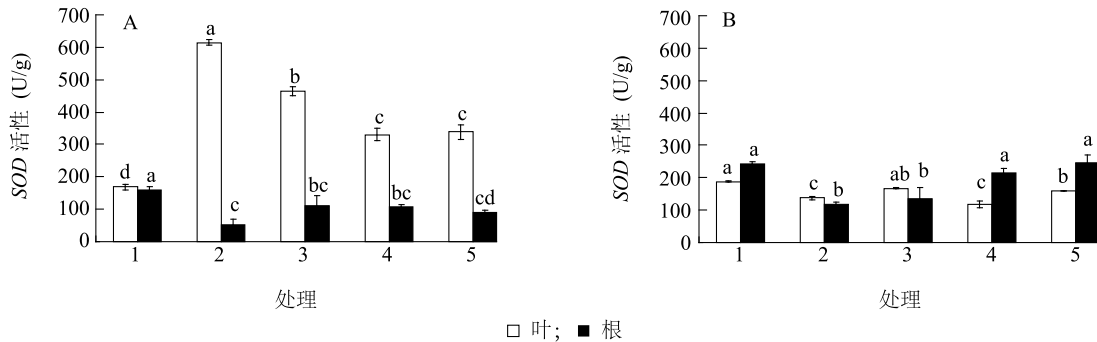
由图 1 可以看出,在 25 mg/L Cu²⁺胁迫下狭叶香蒲叶片中 SOD 活性显著高于空白对照,而在铜胁迫下施加 50 μmol/L、75 μmol/L 和 100 μmol/L SNP,叶片中 SOD 活性均显著低于铜胁迫处理,但是均显著高于空白对照。在 25 mg/L Cu²⁺胁迫下狭叶香蒲根中 SOD 活性与空白对照相比显著降低;在铜胁迫下施加不同浓度的 SNP,根中 SOD 活性均高于铜胁迫处理,但是差异不显著,与空白对照相比均显著降低。在 1.5 mg/L Cd²⁺胁迫下狭叶香蒲叶片中 SOD 活性显著低于空白对照,而在镉胁迫下施加 50 μmol/L、75 μmol/L 和 100 μmol/L SNP,能够显著增加叶片中 SOD 的活性,但是均低于空白对照。在 1.5 mg/L Cd²⁺胁迫下狭叶香蒲根中 SOD 活性与空白对照相比显著降低,在镉胁迫下施加不同浓度的 SNP,根中 SOD 活性与镉胁迫处理相比均有所升高,且在 75 μmol/L 和 100 μmol/L SNP 处理下差异显著,但与空白对照相比差异不显著。

由图 2 可以看出,在 25 mg/L Cu²⁺胁迫下,狭叶香蒲叶片中 POD 活性高于空白对照但是差异不显著;在铜胁迫下施加不同浓度的 SNP,叶片中 POD 活性与空白对照和铜胁迫处理相比差异均不显著。在铜胁迫下狭叶香蒲根中 POD 活性显著低于空白

对照,而在铜胁迫下施加不同浓度的 SNP 能够显著增加根中 *POD* 活性,但与空白对照相比差异不显著。在 1.5 mg/L Cd^{2+} 胁迫下狭叶香蒲叶片中 *POD* 活性与空白对照相比有所降低但是差异不显著,而在镉胁迫下施加 50 $\mu\text{mol/L}$ SNP 能够显著增加叶片中 *POD* 活性。狭叶香蒲根中 *POD* 活性在镉胁迫下有所降低但是差异不显著;在镉胁迫下施加不同浓

度的 SNP 后,随着 SNP 浓度的升高,根中 *POD* 活性呈现逐渐上升的趋势,但是差异不显著。

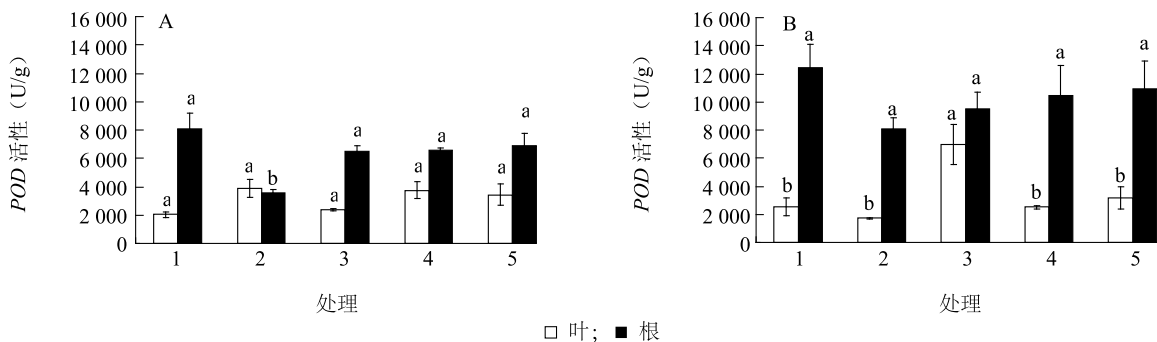
从根系和叶片中抗氧化酶 *SOD* 和 *POD* 活性的反应来看,在铜、镉胁迫下施加 50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 后叶片和根中 *SOD*、*POD* 活性均有所升高,说明在铜、镉胁迫下施加一定浓度的 SNP 对缓解铜镉胁迫有一定的作用。



处理 1:空白对照 (Hongland 营养液);处理 2:25 mg/L Cu^{2+} (或 1.5 mg/L Cd^{2+});处理 3:25 mg/L Cu^{2+} (或 1.5 mg/L Cd^{2+}) + 50 $\mu\text{mol/L}$ SNP;处理 4:25 mg/L Cu^{2+} (或 1.5 mg/L Cd^{2+}) + 75 $\mu\text{mol/L}$ SNP;处理 5:25 mg/L Cu^{2+} (或 1.5 mg/L Cd^{2+}) + 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP。不同小写字母表示在同一 Cu^{2+} (或 Cd^{2+}) 浓度下不同浓度 SNP 处理之间差异达到 0.05 显著水平。

图 1 不同浓度 SNP 对 Cu (A)、Cd (B) 胁迫下狭叶香蒲叶和根中 *SOD* 活性的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of SNP on the activities of *SOD* in the leaves and roots of *Typha angustifolia* under Cu (A) or Cd (B) stress



图注见图 1 注。

图 2 不同浓度 SNP 对 Cu (A)、Cd (B) 胁迫下狭叶香蒲叶和根中 *POD* 活性的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of SNP on the activities of *POD* in the leaves and roots of *T. angustifolia* under Cu (A) or Cd (B) stress

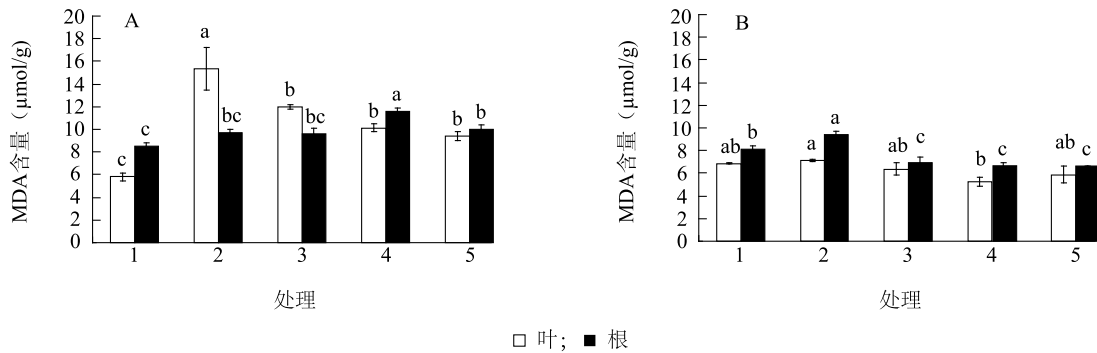
2.2 SNP 处理对铜、镉胁迫下狭叶香蒲幼苗叶片和根中 MDA 含量的影响

MDA 是植物在逆境胁迫下产生的一种膜脂过氧化产物,MDA 含量高表示植物受到伤害的程度大。由图 3 可以看出,在 25 mg/L Cu^{2+} 胁迫下狭叶香蒲叶片中 MDA 含量显著高于空白对照,在铜胁迫下施加 50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$

SNP,随着 SNP 浓度的增加,MDA 含量呈现逐渐下降的趋势,且显著低于铜胁迫处理,但均高于空白对照。根中 MDA 含量在铜胁迫下有所上升但是差异不显著,但是在铜胁迫下施加不同浓度的 SNP 后根中 MDA 含量有所升高,75 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理显著高于铜胁迫处理和空白对照,但是其他浓度处理差异不显著。在 1.5 mg/L Cd^{2+} 胁迫下狭叶香蒲叶片和

根中 MDA 含量均高于空白对照,但是根中差异显著,在镉胁迫下施加不同浓度的 SNP 后叶片和根中 MDA 含量均低于镉处理,根中差异显著。从 MDA 含量变化可以看出,在铜、镉胁迫下施加不同浓度的

SNP 均能降低狭叶香蒲叶片和根中 MDA 含量,75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理效果较好,说明在铜、镉胁迫下施加 SNP 能够缓解铜、镉对狭叶香蒲造成的伤害。



图注见图 1 注。

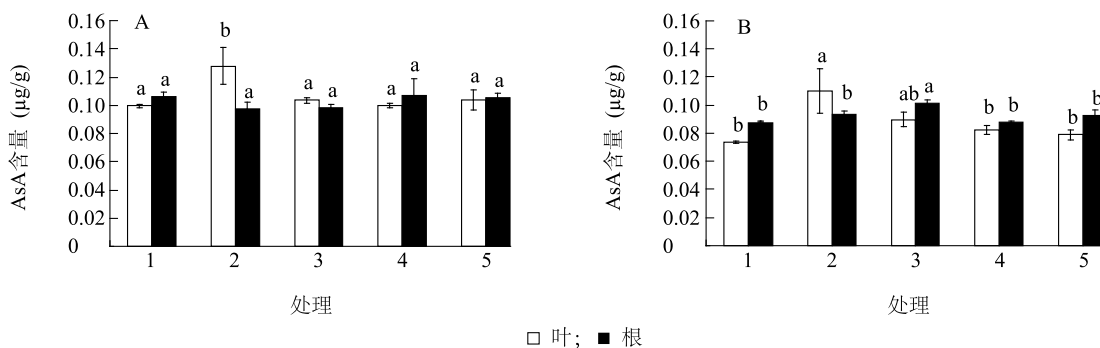
图 3 不同浓度 SNP 对 Cu (A)、Cd (B) 胁迫下狭叶香蒲叶和根中 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of SNP on the content of MDA in the leaves and roots of *T. angustifolia* under Cu (A) or Cd (B) stress

2.3 SNP 处理对铜、镉胁迫下狭叶香蒲幼苗叶片和根中 AsA 含量的影响

抗坏血酸 (AsA) 是一种抗氧化剂,可以清除自由基,维持体内活性氧代谢的平衡,抑制膜脂过氧化,从而起到缓解胁迫的作用^[19]。由图 4 可以看出,在 25 mg/L Cu^{2+} 胁迫下狭叶香蒲叶片中 AsA 含量与空白对照相比显著升高,而根中 AsA 含量有所下降但是差异不显著。在铜胁迫下施加不同浓度的 SNP,叶片中 AsA 含量与铜胁迫处理相比显著降低,

但与空白对照相比差异不显著,根中 AsA 含量随着 SNP 浓度的升高呈现逐渐升高的趋势,但是差异不显著。在镉胁迫下狭叶香蒲叶片中 AsA 含量显著升高,而在镉胁迫下施加不同浓度的 SNP 后,与镉处理相比 AsA 含量均降低,且 75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理差异显著,但是均高于空白对照。根中 AsA 含量在镉胁迫下增加,施加 SNP 后呈现上升的趋势,50 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理差异显著。



图注见图 1 注。

图 4 不同浓度 SNP 对 Cu (A)、Cd (B) 胁迫下狭叶香蒲叶和根中 ASA 含量的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of SNP on the content of AsA in the leaves and roots of *T. angustifolia* under Cu (A) or Cd (B) stress

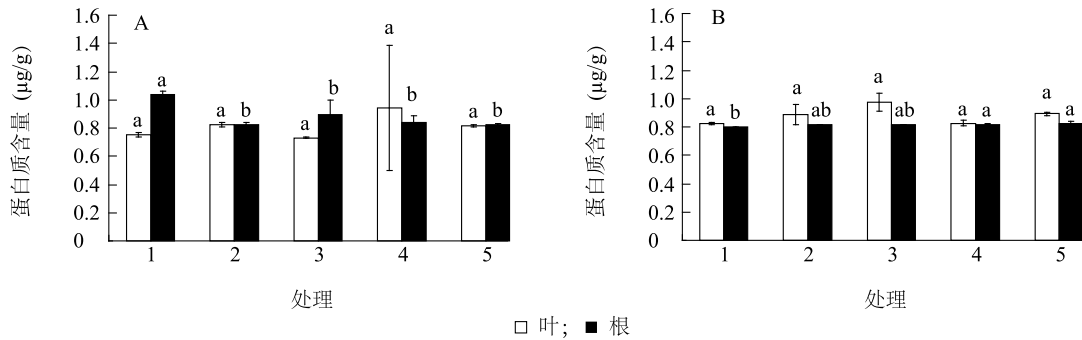
2.4 SNP 处理对铜、镉胁迫下狭叶香蒲幼苗叶片和根中蛋白质含量的影响

由图 5 可以看出,在铜胁迫下狭叶香蒲叶片中蛋白质含量高于空白对照,而在铜胁迫下施加 75

$\mu\text{mol/L}$ SNP 处理显著升高。根中蛋白质含量在铜胁迫下显著降低,在铜胁迫下施加不同浓度的 SNP 后,与铜胁迫处理相比呈现上升的趋势,但是差异不显著。在镉胁迫下狭叶香蒲叶片和根中蛋白质含量

呈现上升的趋势,但是差异均不显著。在镉胁迫下施加不同浓度的 SNP 后,根中蛋白质含量在 75

$\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理时显著高于空白对照。



图注见图 1 注。

图 5 不同浓度 SNP 对 Cu (A)、Cd (B) 胁迫下狭叶香蒲叶和根中蛋白质含量的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of SNP on the content of protein in leaves and roots of *T. angustifolia* under Cu(A) or Cd(B) stress

2.5 SNP 处理对铜、镉胁迫下狭叶香蒲幼苗叶片中叶绿素含量的影响

叶绿素含量降低是植物受到胁迫损伤的一种表现。由表 1 可看出,在 25 mg/L Cu^{2+} 胁迫下狭叶香蒲叶片中叶绿素 a、b 含量、叶绿素总量和类胡萝卜素含量与空白对照相比有所下降但是差异不显著,而叶绿素 a/b 比值显著下降。在铜胁迫下施加 50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理叶片中叶绿素 a、b 含量、叶绿素总量和类胡萝卜素含量均高于铜胁迫处理,叶绿素 a/b 比值均显著高于铜胁迫处理,100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理叶绿素 a/b 比值最高。由表 2 可以看出,在

1.5 mg/L Cd^{2+} 胁迫下狭叶香蒲叶片中叶绿素 a、b 含量、叶绿素总量和类胡萝卜素含量与空白对照相比有所增加,其中类胡萝卜素差异显著,而叶绿素 a/b 比值高于空白对照。在镉胁迫下施加 50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 后,随着 SNP 浓度的增加,叶绿素 a、b 含量、叶绿素总量和类胡萝卜素含量及叶绿素 a/b 比值呈现逐渐上升的趋势,100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理效果最好。从狭叶香蒲叶片中叶绿素含量变化可以看出,铜、镉胁迫下施加不同浓度的 SNP 能够通过增加叶绿素 a/b 比值、叶绿素总量和类胡萝卜素含量来缓解铜镉胁迫对狭叶香蒲造成的伤害。

表 1 不同浓度 SNP 对铜胁迫下狭叶香蒲叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of different concentrations of SNP on the content of chlorophyll in the leaves of *T. angustifolia* under Cu stress

| Cu^{2+} 浓度 (mg/L) | SNP 浓度 ($\mu\text{mol/L}$) | 叶绿素 a 含量 (mg/g) | 叶绿素 b 含量 (mg/g) | 叶绿素 a/b | 叶绿素总量 (mg/g) | 类胡萝卜素含量 (mg/g) |
|--|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------|----------------------------|------------------------------|
| 0 | 0 | 428.05±59.33a | 285.48±39.58a | 1.50±0.02c | 713.53±98.78a | 39.13±6.11b |
| 25 | 0 | 368.15±7.81a | 267.32±5.07a | 1.38±0d | 635.47±12.87a | 28.60±5.39b |
| 25 | 50 | 633.81±156.63a | 240.14±60.25a | 2.64±0.01a | 873.94±216.88a | 112.71±12.97a |
| 25 | 75 | 607.66±74.10a | 242.87±31.99a | 2.51±0.03b | 850.54±106.04a | 110.88±16.77a |
| 25 | 100 | 560.92±111.16a | 205.61±38.52a | 2.71±0.06a | 766.54±149.61a | 114.59±13.36a |

同列中不同小写字母表示在同一 Cu^{2+} 浓度不同 SNP 浓度处理之间差异达到 0.05 显著水平。

3 讨论

NO 是一种重要的信号分子,其具有双重生理效应,高浓度的 NO 对植株有毒害作用,低浓度的 NO 则具有保护作用,适当浓度的 NO 可以缓解逆境条件下植株受到的伤害^[20-22]。本研究采用 50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ SNP 处理,研究在

无重金属和有重金属胁迫下,施加 SNP 对狭叶香蒲叶片和根中生理指标的影响,发现 3 种浓度的 SNP 处理均能缓解 Cu、Cd 对狭叶香蒲幼苗的胁迫作用。Mata 等^[23]研究发现在各种胁迫中低浓度 NO 能够迅速清除超氧阴离子和脂质自由基,阻断活性氧参与的各种伤害效应,发挥抗氧化功能。可见本研究选择的 SNP 浓度均属于低浓度。

表 2 不同浓度 SNP 对镉胁迫下狭叶香蒲叶中叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of different concentrations of SNP on the content of chlorophyll in the leaves of *T. angustifolia* under Cd stress

| Cd ²⁺ 浓度 (mg/L) | SNP 浓度 (μmol/L) | 叶绿素 a 含量 (mg/g) | 叶绿素 b 含量 (mg/g) | 叶绿素 a/b | 叶绿素总量 (mg/g) | 类胡萝卜素含量 (mg/g) |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|-----------------|-------------------|
| 0 | 0 | 164.80±18.23bc | 112.08±11.78bc | 1.47±0.01b | 276.88±30.01bc | 8.76±0.65c |
| 1.5 | 0 | 263.93±56.78bc | 131.94±25.28bc | 1.98±0.07a | 395.87±82.03bc | 31.89±4.54b |
| 1.5 | 50 | 92.76±20.10c | 53.10±12.51c | 1.79±0.14ab | 145.85±32.36c | 15.71±3.69bc |
| 1.5 | 75 | 317.08±63.35b | 161.34±16.93b | 1.95±0.19a | 478.42±80.28b | 31.54±8.27b |
| 1.5 | 100 | 531.49±83.06a | 268.73±47.15a | 1.98±0.04a | 800.22±130.21a | 54.33±8.03a |

同列中不同小写字母表示在同一 Cd²⁺ 浓度不同 SNP 浓度处理之间差异达到 0.05 显著水平。

在抗氧化酶系统中 *SOD* 和 *POD* 是抗氧化系统中关键的抗氧化酶, *SOD* 将超氧阴离子歧化为 H₂O₂ 和 O₂, 而超氧阴离子可以和 H₂O₂ 产生毒性更强的 ·OH^[24], 从而保护膜的结构, 防止膜脂过氧化对植物产生伤害。外源 NO 对 *SOD*、*POD* 活性的变化具有不同的诱导作用, 可能与 NO 在信号传导中的位置有关, 也可能与 *SOD*、*POD* 在膜脂过氧化中产生的位置和调节机制的不同有关^[13]。段凯旋等^[12] 研究发现 NO 可以提高铜镉胁迫下平邑甜茶根和叶中 *POD*、*SOD* 的活性。徐严等研究发现外源 NO 能够提高亚麻幼苗在 Cd 胁迫下 *SOD*、*POD* 和 *CAT* 的活性^[25]。本研究发现, 在 25 mg/L Cu²⁺ 胁迫下, 75 μmol/L 和 100 μmol/L SNP 处理下狭叶香蒲根中 *SOD* 和 *POD* 活性升高, 叶片中 *SOD* 活性下降, 叶片中 *SOD* 活性下降原因可能与狭叶香蒲材料自身特性有关, 具体原因有待进一步研究。在 1.5 mg/L Cd²⁺ 胁迫下, 施加外源 SNP 能够提高狭叶香蒲叶片和根中 *SOD* 和 *POD* 活性, 叶片中 50 μmol/L SNP 处理效果较好, 而 100 μmol/L SNP 处理能显著提高根中 *SOD* 和 *POD* 活性, 说明同一植物在同一浓度 SNP 处理下, 可能对缓解不同部位重金属胁迫的程度有所不同。

植物在逆境条件下, 往往产生膜脂过氧化作用, 丙二醛 (MDA) 是其产物之一, 通常利用它作为膜脂过氧化指标, 表示膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱。已有研究发现 SNP 处理可以不同程度缓解 Cd 胁迫下对水稻幼苗的抑制, 降低幼苗根系和叶片中 MDA 含量^[26]。在 1.5 mg/L Cd²⁺ 处理下, 施加外源 SNP 处理后, 狭叶香蒲叶片和根系中 MDA 含量降低, 从而起到缓解重金属胁迫的效果。在 25 mg/L Cu²⁺ 处理下, 施加外源 SNP 降低了

狭叶香蒲叶片中 MDA 含量, 而根中 MDA 含量有所上升, 可能是 Cu²⁺ 浓度过高, 施加 SNP 已经起不到缓解作用, 具体原因有待研究。

叶绿素是一种光合色素, 直接参与光合作用中光能的吸收、传递、分配和转化等过程。叶绿素 a/b 比值也能反映一定的光合速率, 叶绿素 a/b 比值高, 光合活性也高, 光合速率也高^[27]。在 25 mg/L Cu²⁺ 胁迫下施加外源 NO 能够有效地提高狭叶香蒲幼苗中叶绿素含量。同时在 50 μmol/L 和 75 μmol/L SNP 处理下, 能够显著增加叶绿素 a/b 比值, 达到提高光合速率的作用, 从而起到缓解重金属胁迫的作用。有研究发现外源 NO 能够缓解盐胁迫造成的黄瓜叶肉细胞光合活性的下降, 增加叶片中叶绿素含量^[28]。在 1.5 mg/L Cd²⁺ 胁迫下, 施加 100 μmol/L SNP 对狭叶香蒲叶绿素含量的增加效果最佳。在 25 mg/L Cu²⁺ 胁迫下, 施加 50 μmol/L、75 μmol/L 和 100 μmol/L SNP 对狭叶香蒲叶绿素含量的增加均效果显著。在不同重金属胁迫下, 施加不同浓度的 SNP 对狭叶香蒲幼苗叶片中叶绿素含量影响不同。类胡萝卜素是一种重要的天然色素的总称, 是光合作用不可缺少的色素之一, 类胡萝卜素是植物对外界刺激响应的信号分子前体物质, 在植物中类胡萝卜素具有促进光形态发生、参与非光化学抑制反应、脂质过氧化反应等作用^[29-30]。目前已有研究者认为类胡萝卜素是植物体内重要的抗氧化剂, 能够清除植株体内的活性氧, 防止 H₂O₂ 过量积累, 缓解胁迫所带来的氧化损伤^[13]。本研究发现, 在 Cu 或 Cd 胁迫下, 施加外源 NO 能够增加植物叶片中类胡萝卜素的含量, 说明在铜和镉胁迫下类胡萝卜素通过清除植株体内活性氧自由基, 起到缓解重金属胁迫的作用。

综上所述,本研究发现 Cu 或 Cd 胁迫下施加不同低浓度 SNP 引起反应的生理指标有所不同,与李德文等^[13]的结果相一致。在 Cu 或 Cd 胁迫下,相对较低浓度(50~100 $\mu\text{mol/L}$)的 NO 可通过提高狭叶香蒲的抗氧化酶 SOD 和 POD 活性,降低 MDA 含量,提高 AsA、叶绿素及类胡萝卜素含量等,以缓解 Cu、Cd 胁迫的毒害。

参考文献:

- [1] 陈桂珠,李柳川. 香蒲植物净化塘复合系统的结构和功能[J]. 有色金属环保, 1990(4): 91-97.
- [2] 吴晓丽,罗玉明,徐迎春,等. 镉胁迫对狭叶香蒲某些生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 74-76.
- [3] 赵 艳,徐迎春,柴翠翠,等. 铜胁迫对狭叶香蒲生长及生理特性的影响[J]. 广西植物, 2010, 30(3): 367-372.
- [4] 赵 艳,徐迎春,吴晓丽,等. Cu 胁迫对狭叶香蒲体内元素吸收分配的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 665-670.
- [5] 连建军,许士国,韩成伟. 芦苇和香蒲对重金属铅的吸收特性研究[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3335-3340.
- [6] DURNER J, KLESSIG D F. Nitric oxide as a signal in plants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 1999, 2: 369-374.
- [7] WENDEHENNE D, DURNER J, KLESSIG D F. Nitric oxide: A new player in plant signaling and defence responses[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2004, 7: 449-455.
- [8] HU K D, HU L Y, LI Y H, et al. Protective roles of nitric oxide on germination and antioxidant metabolism in wheat seeds under copper stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2007, 53: 173-183.
- [9] 李海燕,郭永成,李刘洋,等. 外源一氧化氮对镉胁迫下玉米幼苗根生长及氧化伤害的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(8): 1599-1605.
- [10] LASPINA N V, GROPPA M D, TOMARO M L, et al. Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd-induced oxidative stress[J]. Plant Science, 2005, 169: 323-330.
- [11] ZHANG Z Y, WANG H H, WANG X M, et al. Nitric oxide enhances aluminum tolerance by affecting cell wall polysaccharides in rice roots[J]. Plant Cell Reports, 2011, 30: 1701-1711.
- [12] 段凯旋,杨洪刚,冉 坤,等. 一氧化氮对铜、镉胁迫下平邑甜茶幼苗活性氧代谢的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 104-109.
- [13] 李德文,李美兰,于景华,等. 外源 NO 对 UV-B 胁迫下红豆杉抗氧化系统的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2203-2208.
- [14] KUMAR G N M, KNOWLES N R. Change in lipid peroxidation and lipolytic and free-radical scavenging enzyme activities during aging and sprouting of potato (*Solanum tuberosum*) seed-tubers[J]. Plant Physiology, 1993, 102: 115-124.
- [15] 李和生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:134-137.
- [16] 陈建勋. 植物生理实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2002:69-70.
- [17] ZHOU W, ZHAO D, LIN X. Effects of water logging on nitrogen accumulation and alleviation of waterlogging damage by application of nitrogen fertilizer and mixtalol in winter rape (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1997, 16: 47-53.
- [18] QUINTANILLA-GUERREO F, DUARTE-VAZQUEZ M A, GARCIA-ALMENDAREZ B E, et al. Polyethylene glycol improves phenol removal by immobilized turnip peroxidase[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(18): 8605-8611.
- [19] 黄文敏,邢 伟,李敦海,等. 外源抗坏血酸对烟草细胞生长及衰老的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1157-1161.
- [20] 张力思,王 洁,艾呈祥,等. 外源 NO 对干旱胁迫下君迁子幼苗光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 623-628.
- [21] 方淑梅,梁喜龙,纪伟波,等. 外源 NO 对盐碱胁迫下水稻幼苗生长抑制的缓解作用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(8): 67-69.
- [22] 尹丹丹,薛泽云,徐迎春,等. 外源一氧化氮对黄长筒石蒜子球发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(9): 153-156.
- [23] MATA C G, LAMATTINA L. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress[J]. Plant Physiology, 2001, 126: 1196-1204.
- [24] 吴业飞,吴鲁阳,张振文. 紫外线-B 辐射增强对葡萄叶片抗氧化系统的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(12): 161-166.
- [25] 徐 严,魏小红,李兵兵. 外源 NO 对重金属 Cd 胁迫下亚麻幼苗叶片抗氧化能力的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(5): 45-49.
- [26] 赵宝泉,万 宇,杨世湖,等. 外源 NO 供体硝普钠(SNP)对重金属 Cd 胁迫下水稻幼苗膜脂过氧化及抗氧化酶的影响[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(3): 468-475.
- [27] 曹仪植,宋占午. 植物生理学[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1998:102-105.
- [28] 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]. 生态学杂志, 2007, 27(2): 546-553.
- [29] AUGUST C F, SHIZUE M, BIRGIT O. Photoinhibition carotenoid composition and the co-regulation of photochemical and nonphotochemical quenching in neotropical savanna trees[J]. Tree Physiology, 2007, 27(5): 717-725.
- [30] MCNULTY H P, BYUN J, LOCKWOOD S F, et al. Differential effects of carotenoids on lipid peroxidation due to membrane interactions: X-ray diffraction analysis[J]. Biochimica et Biophysica Acta-biomembranes, 2007, 1768(1): 167-174.

(责任编辑:张震林)