

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

张远兵, 刘爱荣, 张雪平, 黄守程

(安徽科技学院 生命科学学院, 安徽 凤阳 233100)

摘要: 研究了外源一氧化氮对 Pb^{2+} 1000 mg/L 胁迫下高羊茅生长及无机离子含量变化的影响。结果表明, 与对照相比, 单用 Pb^{2+} 胁迫使高羊茅鲜重、干重、含水量、根系活力和无机离子如 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Mn^{2+} 含量均下降, 而其根的丙二醛含量和质膜透性、 Pb^{2+} 含量均上升; 与单用 Pb^{2+} 胁迫相比, 用 SNP(Sodium Nitroprusside, NO 供体) 0.01~1 mmol/L 处理 Pb^{2+} 胁迫下高羊茅, 其鲜重、干重、含水量、根系活力、无机离子如 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Mn^{2+} 含量呈先上升后下降的变化趋势, 而根的丙二醛含量和质膜透性、 Pb^{2+} 含量呈相反的变化趋势。综合结果表明, 外源 NO 对 Pb^{2+} 胁迫下高羊茅生长影响具有剂量效应, 适宜浓度能缓解铅毒害, 提高耐铅性。

关键词: 高羊茅; 一氧化氮; Pb^{2+} 胁迫; 无机离子; 生长

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2009)03-0360-06

Effect of exogenous NO on the growth and inorganic ion content of *Festuca arundinacea* seedlings under Pb^{2+} stress

ZHANG Yuan-Bing, LIU Ai-Rong, ZHANG Xue-Ping, HUANG Shou-Cheng

(College of Life Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract: Effects of exogenous nitric oxide (NO) on the growth and some inorganic ions changes of *Festuca arundinacea* seedlings under Pb^{2+} stress (1 000 mg/L) were investigated. The result showed that: in comparison with the control, Pb^{2+} stress decreased the fresh weight, dry weight, water content, the root activity, inorganic ions contents such as NO_3^- , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Mn^{2+} , but increased the root MDA content, the root membrane permeability and Pb^{2+} content of *F. arundinacea* seedlings. In comparison with Pb^{2+} stress, SNP 0.01—1 mmol/L made the fresh weight, dry weight, water content, the root activity, the inorganic ions contents of the seedlings under Pb^{2+} stress increase first and then decline, and the root MDA content, the root membrane permeability and Pb^{2+} content changed in the opposite direction. The results suggested that there was the dose effect of exogenous NO on the seedlings growth under Pb^{2+} stress, suitable concentration of NO could mitigate lead poison and enhance the lead tolerance of *F. arundinacea* seedlings.

Key words: *Festuca arundinacea*; NO; Pb^{2+} stress; inorganic ions; growth

铅是重金属“五毒”之一, 是造成重金属污染最常见元素, 对人体健康、农业生产带来不可忽视的负

面影响(Salt 等, 1998)。草坪草在受铅污染土壤中生长, 根系活力急剧降低, 影响根系对水肥吸收和运输,

收稿日期: 2008-11-05 修回日期: 2009-02-09

基金项目: 安徽省自然科学基金(2005KJ325Z); 安徽省科技厅年度重点科研项目(0702030493)[Supported by Scientific Research Project of Education Department of Anhui Province(2005KJ325Z); Annual Key Scientific Research Item of Science and Technology Department of Anhui Province(0702030493)]

作者简介: 张远兵(1966-), 男, 安徽六安人, 硕士, 副教授, 主要从事草坪草栽培学研究, (E-mail) zyb2246@163.com.

草坪色泽、分蘖和成坪性能变差。铅还使高羊茅根冠细胞有丝分裂减少、根量减少,严重时根系腐烂,叶片失绿,枯黄死亡(王慧忠等,2003)。高浓度铅降低匍茎翦股颖生物量和叶绿素含量(赵树兰等,2008)。因此,在铅污染土壤上,缓解草坪草受铅毒害,提高耐铅性是草坪养护管理亟待解决的问题之一。

亚硝基铁氰化钠又名硝普钠(Sodium Nitroprusside, SNP)是一种常见 NO 供体,NO 是生物体中一种重要的氧化还原信号分子和毒性分子,也是一种活性氮(reactive nitrogen species, RNS)。在植物体内主要通过一氧化氮合酶(nitric oxide synthase, NOS)和硝酸还原酶(nitrate reductase, NR)催化形成(Wendehenne 等, 2001; Yamasaki 等, 1999)。有相关研究表明:NO 可以增强镉胁迫下水稻(Hsu & Kao, 2004)、白羽扇豆幼苗(Kopyra 等, 2003)、向日葵(Laspina 等, 2005)和黑麦草(张远兵等, 2008)的抗氧化能力,减缓镉毒害;而关于 NO 对铅胁迫下草坪草生长和无机离子含量的影响鲜见报道。高羊茅(*Festuca arundinacea*)为重要草种之一,具有适应性广、抗性强、耐低修剪等优点,目前已被广泛用于饲草、护坡和城市绿化(孙吉雄, 1996; 徐胜等, 2004);同时它在修复重金属污染土壤方面,是具有潜力的草种之一(王友保等, 2006; 姚婧等, 2008)。本试验采用高羊茅为供试材料,测定外源 NO 对铅胁迫下高羊茅植株生物量、根系活力、几种无机离子和铅含量变化情况,探究外源 NO 对铅胁迫下高羊茅生长和维持无机离子稳态机制提供资料,同时也为利用草坪草治理土壤铅污染、增强草坪草耐铅性等方面提供参考。

1 材料与方 法

1.1 高羊茅植株培养

供试品种为高羊茅‘回报’,供试种子由山东农业大学草坪研究所提供。高羊茅种子经 0.1% HgCl 消毒 10 min,浸泡 12 h,均匀地播于垫有 2 层吸水纸白瓷盘中,加适量自来水,于 25 °C/20 °C(昼/夜)黑暗条件下,在恒温箱中进行培养,每日喷水,保持种子萌发所需湿度,直至种子萌发。种子萌发后,将白瓷盘转移至 25 °C/20 °C(昼/夜)日光培养箱中,光照时间为 14 h/10 h(昼/夜),光强为 600~800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),用 1/2 浓度的 Hoagland 营养液培养,7 d 后用完全 Hoagland 营养液继续培养。

待幼苗生长 30 d 后,取生长一致幼苗移栽到高 25 cm、直径 18 cm 的小塑料桶中,每桶 50 株,共 36 桶,并转移至室外,用完全 Hoagland 营养液继续培养,每 3 d 更换一次营养液。培养 30 d 后,进行 Pb^{2+} 和 SNP 处理。

1.2 Pb^{2+} 和 SNP 处理

试验共设 6 个处理,分别为 0(对照)、 Pb^{2+} 1 000 mg/L、 Pb^{2+} 1 000 mg/L+SNP 0.01 mmol/L、 Pb^{2+} 1 000 mg/L+SNP 0.1 mmol/L、 Pb^{2+} 1 000 mg/L+SNP 0.5 mmol/L、 Pb^{2+} 1 000 mg/L+1 mmol/L SNP,每个处理 6 桶,对照为完全 Hoagland 营养液, Pb^{2+} 和不同浓度 SNP 均用 Hoagland 营养液配制,以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 为 Pb^{2+} 供体。每天补充蒸发的水分,至预定体积,每 3 d 更换一次处理液。处理 10 d 以后测定各项指标:生物量测定,20 株/重复,重复 5 次,生理指标测定,重复 3 次,结果取平均值。

1.3 鲜重、干重和含水量的测定

将整株植物从培养盆中完整取出,用自来水快速冲洗干净,再用蒸馏水迅速将植株冲洗 3 次,用吸水纸吸干表面水分,分根和叶,立即分别称鲜重。再将鲜样品置于 105 °C 烘箱中杀青 10 min,转至 65 °C 烘干,称干重。含水量 = [(单株鲜重 - 单株干重) / 单株鲜重] \times 100%。

1.4 根系活力、质膜透性和 MDA 含量的测定

根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法(李合生, 2000);细胞质膜透性按照李振国方法(1999)进行;MDA 含量测定用硫代巴比妥酸法(李合生, 2000)。

1.5 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Pb^{2+} 含量测定

NO_3^- 含量测定用比色法(李合生, 2000)。 Na^+ 、 K^+ 含量测定参照 Hunt(1982)方法,稍作改动。取干样根和叶分别研磨,1 mm 过筛,精确称取 50 mg 放于 50 mL 三角瓶中,加入 25 mL 0.5 mol/L 盐酸,50 °C 振荡水浴 45 min,过滤并用去离子水定容至 50 mL,用 WFX-110 型原子吸收分光光度计分别测定 Na^+ 、 K^+ 的含量。取根和叶干样分别研磨,1 mm 过筛,称取 50 mg,放入已烘干坩埚内,加盖,于马伏炉中 550 °C 灰化 24 h。室温冷却后用 1 mL 浓 HNO_3 消化,去离子水定容至 50 mL,用 WFX-110 型原子吸收分光光度计分别测定溶液 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Pb^{2+} 含量(杨居荣等, 1993)。

1.6 统计分析

采用 Microsoft Office Excel 2003 软件对数据做预处理,用 SPSS 10.0 软件进行单因素方差分析,并对平均数作 Duncan's 新复极差法多重比较。

2 结果与分析

2.1 鲜重、干重、含水量

表 1 显示,单用 Pb^{2+} 胁迫,高羊茅根和叶鲜重、干重均显著低于对照 ($P < 0.05$)。与单用 Pb^{2+} 胁迫相比,在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~1 mmol/L,其根和叶鲜重、干重呈先上升后下降的变化趋势 ($P < 0.05$)。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L,其根和叶鲜重、干重分别比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 32.0%~41.2%、20.7%~32.4%、14.8%~22.0% 和 2.9%~9.1%,低于对照;而加入 SNP 0.5~1 mmol/L 则低于单用 Pb^{2+} 胁迫。表 1 还显示,单用 Pb^{2+} 胁迫,高羊茅含水量显著低于对照 ($P < 0.05$);在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~1 mmol/L,其含水量呈先上升后下降的变化趋势,且低于对照。

表 1 SNP 对 Pb 胁迫下高羊茅鲜重、干重和含水量的影响
Table 1 Effect of SNP on the fresh weight, dry weight and water content of *F. arundinacea* under Pb^{2+} stress

浓度 Concentration Pb(mg/L)+SNP (mmol/L)	鲜重 Fresh weight (g/per plant)		干重 Dry weight (mg/per plant)		含水量 Water content (%)
	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	
0	1.139a	2.695a	91.35a	431.57a	86.4a
Pb	0.592c	0.876cd	70.21c	197.46c	81.8b
Pb+0.01	0.783b	1.057bc	80.60b	203.22b	84.6a
Pb+0.1	0.836b	1.160b	85.68ab	215.54ab	84.9a
Pb+0.5	0.553c	0.783d	65.08c	179.65d	81.5b
Pb+1	0.342d	0.528e	46.07d	130.24e	79.7b

注: 同列中标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: the same column with different small letters indicate significance at $P < 0.05$, the same below.

2.2 根系活力、丙二醛含量和质膜透性

由表 2 可知,单用 Pb^{2+} 胁迫,高羊茅根系活力显著低于对照 ($P < 0.05$)。与单用 Pb^{2+} 胁迫相比,在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~1 mmol/L,其根系活力呈先上升后下降的变化趋势,但均显著低于对照 ($P < 0.05$)。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L,其根系活力比单独用 Pb^{2+} 胁迫增加了 10.7%~26.9% ($P < 0.05$);而加入 SNP 0.5~1 mmol/L,则低于单独用 Pb^{2+} 胁迫。

表 2 SNP 对 Pb 胁迫下高羊茅根系活力、丙二醛含量和质膜透性的影响

Table 2 Effect of SNP on the root activity, MDA content and membrane permeability in *F. arundinacea* root under Pb^{2+} stress

浓度 Concentration of Pb ⁺ (mg/L) SNP(mmol/L)	根系活力 Root activity (μ g/g h FW)	根丙二醛含量 MDA content (nmol/g FW)	根质膜透性 Membrane permeability (%)
0	283.98a	3.39e	17.1e
Pb	192.16d	8.29c	35.5c
Pb+0.01	212.65c	6.45d	21.8d
Pb+0.1	243.93b	6.64d	20.6d
Pb+0.5	188.73d	9.915b	46.2b
Pb+1	160.56e	12.86a	54.8a

从表 2 可知,单用 Pb^{2+} 胁迫,高羊茅根丙二醛含量和质膜透性均显著高于对照 ($P < 0.05$)。与单用 Pb^{2+} 胁迫相比,在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~1 mmol/L,其丙二醛含量、质膜透性呈先下降后上升的变化趋势,且显著高于对照 ($P < 0.05$)。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L,其丙二醛含量和质膜透性均显著低于单用 Pb^{2+} 胁迫 ($P < 0.05$);而加入 SNP 0.5~1 mmol/L 则高于单用 Pb^{2+} 胁迫。

2.3 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Pb^{2+} 含量

由表 3 可知,单用 Pb^{2+} 胁迫,高羊茅根和叶 NO_3^- 、 K^+ 和 Na^+ 含量分别是对照的 59.2%、68.5%、73.9%、65.3%、68.5% 和 70.1% ($P < 0.05$)。与单用 Pb^{2+} 胁迫相比,在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~1 mmol/L,其根和叶 NO_3^- 、 K^+ 和 Na^+ 含量呈先上升后下降变化趋势,且均低于对照。

在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L,高羊茅根和叶 NO_3^- 含量是单用 Pb^{2+} 胁迫 1.2~1.3 倍和 1.5~1.7 倍 ($P < 0.05$);加入 SNP 0.5~1 mmol/L,则比单用 Pb^{2+} 胁迫减少 13.0%~37.6% 和 1.3%~12.0%。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.5 mmol/L,其根 K^+ 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 3.6%~27.0%;加入 SNP 1 mmol/L,则低于单用 Pb^{2+} 胁迫 18.1%。在 Pb^{2+} 胁迫下分别加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L,其叶 K^+ 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 25.7%~34.4%;加入 SNP 0.5~1 mmol/L,比单用 Pb^{2+} 胁迫下降 11.7%~18.1%。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L,其根 Na^+ 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 13.4%~23.0% ($P < 0.05$);加入 0.5~1 mmol/L SNP,低于单用 Pb^{2+} 胁迫 4.2%~15.6%;在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~

0.5 mmol/L, 其叶 Na^+ 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 10.2%~27.8% ($P < 0.05$); 加入 SNP 1 mmol/L, 比单用 Pb^{2+} 胁迫下降 8.5%。

表 4 显示, 单用 Pb^{2+} 胁迫, 高羊茅根和叶

Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Mn^{2+} 含量是对照的 60.3%、78.5%、58.5%、54.1%、73.4%、70.2% ($P < 0.05$)。与单用 Pb^{2+} 胁迫相比, 在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~1 mmol/L, 其根和叶 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Mn^{2+} 含量均呈

表 3 SNP 对铅胁迫下高羊茅根和叶 NO_3^- 、 K^+ 和 Na^+ 含量的影响

Table 3 Effects of SNP on NO_3^- , K^+ and Na^+ content in *F. arundinacea* root and leaf under Pb^{2+} stress

浓度 Concentration Pb (mg/L)+SNP(mmol/L)	NO_3^- (mg/g DW)		K^+ (mg/g DW)		Na^+ (mg/g DW)	
	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf
0	25.28a	11.54b	60.82a	69.51a	10.04a	10.31a
Pb	14.97c	7.90c	44.96d	45.39c	6.88c	7.23de
Pb+0.01	17.91b	11.81b	52.01bc	57.07b	7.80b	8.63bc
Pb+0.1	19.32b	13.76a	57.11ab	60.88b	8.46b	9.24b
Pb+0.5	13.03c	7.80c	46.57cd	40.08cd	6.59cd	7.97cd
Pb+1	9.34d	6.95c	33.36e	37.19d	5.81d	6.62e

表 4 SNP 对铅胁迫下高羊茅根和叶 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Pb^{2+} 含量的影响

Table 4 Effects of SNP on Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} and Pb^{2+} content in *F. arundinacea* root and leaf under Pb^{2+} stress

浓度 Concentration Pb(mg/L)+SNP(mmol/L)	Ca^{2+} (mg/g DW)		Mg^{2+} (mg/g DW)		Mn^{2+} ($\mu\text{g/g DW}$)		Pb^{2+} (mg/g DW)	
	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf
0	28.56a	41.51a	2.77a	5.05a	198.62a	118.78a	0d	0d
Pb	17.23c	32.58b	1.62b	2.73cd	145.85c	83.43bc	116.83b	2.01c
Pb+0.01	21.34b	38.63a	2.93a	3.11bc	169.92b	105.45ab	83.57c	1.96c
Pb+0.1	22.65b	39.78a	2.96a	3.87b	182.79ab	129.79a	73.18c	1.92c
Pb+0.5	16.37cd	32.73b	1.78b	2.66cd	123.02d	77.06bc	129.61b	4.30b
Pb+1	14.29d	26.57c	1.17c	1.97d	95.61e	56.24c	145.40a	5.77a

先升高后下降的变化趋势。

在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L, 其根 Ca^{2+} 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 23.9%~31.5%; 而加入 SNP 0.5~1 mmol/L, 则低于单用 Pb^{2+} 胁迫。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.5 mmol/L, 其叶 Ca^{2+} 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 0.5%~31.5%; 加入 SNP 1 mmol/L, 则是单用 Pb^{2+} 胁迫 81.5%。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.5 mmol/L, 其根 Mg^{2+} 含量是单用 Pb^{2+} 胁迫的 1.1~1.8 倍, 而加入 SNP 1 mmol/L, 则是单用 Pb^{2+} 胁迫的 72.2%; 在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L, 其叶 Mg^{2+} 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫的增加 13.9%~41.6%; 加入 SNP 0.5~1 mmol/L, 比单用 Pb^{2+} 胁迫下降 2.6%~27.8%。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L, 其根和叶 Mn^{2+} 含量比单用 Pb^{2+} 胁迫增加 16.5%~25.3% 和 26.4%~55.6%; 加入 SNP 0.5~1 mmol/L, 比单用 Pb^{2+} 胁迫下降 15.7%~34.5%。

对照根和叶均没有检测到 Pb^{2+} ; 在 Pb^{2+} 胁迫下, 均检测出 Pb^{2+} 。与单用 Pb^{2+} 胁迫相比, 在 Pb^{2+}

胁迫下加入 SNP 0.01~1 mmol/L, 其根和叶 Pb^{2+} 含量呈先下降后上升变化趋势。在 Pb^{2+} 胁迫下加入 SNP 0.01~0.1 mmol/L, 其根和叶 Pb^{2+} 含量为单用 Pb^{2+} 胁迫的 71.5%~62.6% ($P < 0.05$) 和 97.5%~95.5%; 加入 SNP 0.5~1 mmol/L, 是单用 Pb^{2+} 胁迫 1.1~1.2 倍和 2.1~2.9 倍。

3 讨论

植物根系是其吸收水分和矿质营养的最重要器官, 它对水分和无机离子的吸收是建立在细胞对水分和无机离子吸收的基础之上, 也就是水分和无机离子必需跨过细胞质膜进入细胞才能被植物吸收。MDA 是膜脂过氧化反应的产物, 现已被广泛用作衡量膜脂过氧化损伤的指标。正常条件下, 细胞膜对物质具有选择透性的能力; 当植物受到逆境影响时, 膜脂过氧化程度加剧, 积累 MDA, 导致细胞膜结构功能的被破坏, 透性会发生不同程度的增大, 细胞内溶质大量外渗。根系活力是反映其生长状况的重要指标。根系活力的测定常用还原氯化三苯基四氮

啉(TTC)法进行,而还原 TTC 能力是测定与呼吸有关的琥珀酸脱氢酶活性的指标(张雄,1982),因而可用于测定植物材料的呼吸能力。Stohs & Bagchi (1995)报道 Pb^{2+} 进入细胞后与酶活性中心或蛋白质中的巯基结合,取代金属蛋白中的必需元素(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Fe^{2+}),导致蛋白质大分子构象改变、酶活性丧失、干扰细胞的正常代谢过程。本试验中,与对照比较,单用 Pb^{2+} 处理高羊茅根的质膜透性、MDA 和 Pb^{2+} 含量显著增加,根系脱氢酶活性,无机离子含量、鲜重和干重下降(表 1~4)实验结果显示:一方面, Pb^{2+} 进入根系细胞,引起膜质过氧化加剧,积累 MDA,透性增大,导致离子外渗量增加;另一方面, Pb^{2+} 进入细胞可能取代了根系脱氢酶的必需金属元素而抑制其活性,导致其呼吸作用减弱,主动吸收水分和无机离子能力也因此下降,引起水分失调,离子稳态受干扰,最终导致生长受抑制。与单用 Pb^{2+} 相比,在铅胁迫下加入适宜浓度 SNP, Pb^{2+} 含量下降,根的质膜透性、MDA 和 Pb^{2+} 含量显著下降,根系脱氢酶活性、无机离子含量、鲜重和干重增加(表 1~4)的实验结果表明:可能是适宜浓度 SNP 释放的 NO,一方面降低膜质过氧化程度,减轻或防止细胞膜系统的伤害,缓和膜相变化,减少了质膜透性增大和离子外漏,恢复和维持细胞质膜正常选择透性;另一方面减少对 Pb^{2+} 的吸收,减缓了根系脱氢酶受 Pb^{2+} 的攻击作用,增强根系脱氢酶活性,提高根系呼吸作用,其主动吸收水分和无机离子能力也因此增强,维持了水分和无机离子稳态(图 1,表 1~3),缓解高羊茅受 Pb^{2+} 毒害,从而恢复植株生长。

植物根部吸收的无机离子进入细胞后,其主要作用包括维持水分和无机离子的稳态,此外还具有以下 3 个方面:(1)无机离子 NO_3^- 是植物氮素重要来源之一,植物吸收的 NO_3^- 被还原成 NH_4^+ 后同化为氨基酸,进而参与蛋白质的合成。本实验结果表明:单用 Pb^{2+} 处理,高羊茅 NO_3^- 含量下降(表 3),生长所需的氮素营养供应不足,引起生长受阻。而在 Pb^{2+} 胁迫下加入适宜浓度的 SNP,与单用 Pb^{2+} 胁迫比较, NO_3^- 含量增加(表 3)的实验结果显示:可能适宜浓度 SNP 释放 NO,促进根系对 NO_3^- 吸收或减少了 NO_3^- 的泄漏,生长所需的氮素营养得到供应,恢复正常的氮素代谢。(2)无机离子如 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 等还可以作为植物生命活动的调节剂,参与酶的活动,广泛地影响植物体内各种代谢活动。

本实验中,单用 Pb^{2+} 处理, Pb^{2+} 进入高羊茅植株体内,引起 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 缺乏(表 3~4),导致这些离子起调节作用的代谢活动失调;而在 Pb^{2+} 胁迫下加入适宜浓度的 SNP,与单用 Pb^{2+} 处理比较, K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Mn^{2+} 含量增加(表 3~4)的实验结果显示:可能适宜浓度 SNP 释放 NO,促进根系对这几种无机离子的吸收或减少泄漏,修复相应代谢活动的失调。(3)无机离子如 Ca^{2+} 作为第二信使,在细胞信号转导中起重要作用。Wallance 等(1996)认为铅抑制植物的生长可能是因为 Pb^{2+} 与 Ca^{2+} 竞争吸附位点,阻止 Ca^{2+} 跨膜内流,导致钙调素(CAM)和 Ca-ATP 酶不能被激活,从而阻止了有丝分裂进行,最终使生长受阻。本试验中,单用 Pb^{2+} 处理,高羊茅根和叶 Ca^{2+} 含量(表 3)明显下降,因此推测, Pb^{2+} 可能竞争其根部 Ca^{2+} 吸附位点,使 Ca^{2+} 吸收减少, Ca^{2+} 介导的信号转导途径受阻,从而生长受抑制。在 Pb^{2+} 胁迫下加入适宜浓度的 SNP,与单用 Pb^{2+} 处理比较, Ca^{2+} 含量(表 3)增加的实验结果显示:可能适宜浓度 SNP 释放 NO,促进根系对 Ca^{2+} 吸收或减少其泄漏, Ca^{2+} 介导的信号转导途径受阻得到修复,生长受阻得以缓解。

总之,单用 Pb^{2+} 胁迫,高羊茅植株鲜重、干重、含水量、根系活力和几种无机离子含量均下降, Pb^{2+} 含量、丙二醛含量和质膜透性均上升等结果表明: Pb^{2+} 加剧膜质过氧化作用,降低根系活力和吸收能力等,进而干扰无机离子稳态,引起渗透失调,氮素供应不足,无机离子参与的调控作用受抑制, Ca^{2+} 介导的信号转导途径受阻等,导致一系列正常代谢失调,最终引起生物量下降。适宜浓度 SNP,降低 Pb^{2+} 胁迫下高羊茅膜质过氧化程度,恢复质膜正常选择透性,减少离子泄漏和 Pb^{2+} 进入细胞,增强根系活力,提高其吸收能力,进而使水分失调,无机离子稳态受干扰,氮素营养不足,无机离子参与的调控作用受抑制, Ca^{2+} 介导的信号转导途径受阻等得以修复,促进 Pb^{2+} 胁迫下高羊茅鲜重和干重的增加。因此,适宜浓度 SNP 对 Pb 胁迫下高羊茅生长具有缓解效应。

参考文献:

- 王学奎. 2006. 现代植物生理学(第 2 版)[M]. 北京:高等教育出版社,337
 孙吉雄. 1996. 草坪学[M]. 北京:中国农业出版社,1-17
 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,119-121,123-124,260-263

