

水杨酸对废电池胁迫下绿豆幼苗抗氧化酶活性及生理特性的影响

王红星, 纪秀娥, 陈晓君, 尚 燕, 史留功

(河南省周口师范学院生命科学系, 河南 周口 466000)

摘 要:采用室内有培养土的纸杯培养方法,研究了不同浓度水杨酸(SA)处理对废电池胁迫下,绿豆幼苗抗氧化酶及生理特性的影响。结果表明,废电池胁迫下,超氧化物歧化酶(SOD)活性升高,过氧化物酶(POD)活性降低,光合色素、可溶性蛋白含量下降,脯氨酸和丙二醛(MDA)含量升高,电导率增大,膜稳定性降低,显示出一定的毒害效应;低浓度($\leq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的外源 SA 处理能够明显增强废电池胁迫下绿豆叶片 SOD、POD 活性,改善多项指标,但随着 SA 浓度升高,SOD 和 POD 酶活性逐渐降低。说明低浓度 SA 能通过刺激抗氧化酶活性,减轻氧化胁迫,缓解废电池对绿豆幼苗的毒害作用,但高浓度 SA($\geq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)缓解作用降低。

关键词:绿豆;废电池;水杨酸;抗氧化酶

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)03-0429-06

Effect of Salicylic Acid on Antioxidant System of Mungbean (*Vigna radiata*) Seedling Under Used Batteries Stress

WANG Hong-xing, JI Xiu-e, CHEN Xiao-jun, SHANG Yan, SHI Liu-gong

(College of Life Science, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466000, China)

Abstract: This paper investigated the effect of different treatments of salicylic acid (SA) on antioxidant enzyme activities and physiological characteristics of mungbean seedling under used batteries stress. The results showed that used batteries regulated up the superoxide dismutase (SOD) activities of mungbean seedling and its conductivity, down the Peroxidase (POD) activities, with decreased contents of photosynthetic pigments and soluble proteins, and increased contents of MDA and proline. The data of physiological characteristics indicated that the mungbean seedling was injured with the membrane system damaged. The treatment with low concentration of SA ($\leq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) promoted the activities of SOD and POD, and improved many index of seedling under the used batteries stress significantly. When the SA concentration over $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ the activities of SOD and POD began to turn down with the increase of SA concentration. It was suggested that used batteries stress on mungbean seedling could be relieved by activating antioxidant enzyme activities and subsequently reducing oxidative stress under the treatment of SA, but the relieving of high concentration of SA was lowered.

Keywords: *Vigna radiata*; used batteries; salicylic acid; antioxidant enzyme

废电池中含有汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、镍(Ni)、锰(Mn)等重金属及酸、碱等电解质溶液,这些物质会严重污染环境,危害生物。据报道,废电池浸提液明显抑制小麦种子发芽和幼苗的生长^[1]。有关 Hg、Cd、Pb、Ni、Mn 等单一重金属对植物的毒害作用也有大量报道,废电池中的 Hg、Cd、Pb 不是植物生长所必需的元素,在这些重金属胁迫下,植物保护酶系统紊乱,膜脂

过氧化作用加剧^[2-4],幼苗根系的生长受到抑制、染色体发生畸变^[5-6];光合作用和蒸腾作用及其他代谢过程受到干扰,最终降低植物的产量和品质^[7]。Hg、Cd 胁迫下的鱼草甚至出现细胞叶绿体、线粒体嵴突膨胀,膜破损,核膜破裂等现象^[2]。尽管 Ni 和 Mn 是植物生长和发育必需的微量元素,作为代谢过程中酶的组成元素及活化剂参与植物的分解代谢过程^[8],但过量的 Ni 和 Mn 扰乱植物体内抗氧化系统和活性氧(Reactive Oxygens Species, ROS)的代谢平衡,从而导致氧化损伤,降低光合和呼吸速率,引起产量下降^[9-11]。因此,如

收稿日期:2010-08-30

作者简介:王红星(1967—),女,河南周口人,硕士,副教授,主要从事植物生理生化研究。E-mail:wanghx0606@126.com

何缓解重金属对植物的毒害、解决废电池的污染问题越来越受到人们的关注。

水杨酸(SA)是广泛存在于植物体内的酚类内源性植物激素和重要的信号分子,在植物对抗生物^[12]和非生物胁迫的防御反应中起关键作用^[13]。植物受到不良环境胁迫时,SA通过 H_2O_2 介导的信号途径,激活NPR1、TGA和WRKY^[14-15]等转录因子的活化与互作,诱导PR基因的表达及抗性相关酶的生成,并调节植物抗氧化系统活性,减轻不良因素对植物的伤害^[11,16-17]。如,SA处理增强Cd胁迫下玉米抗氧化酶活性,提高抗性^[18];缓解Cd、Pb、Hg和Mn等重金属对植物的毒害效应^[9,19-21]。但SA能否缓解废电池中多种金属对植物的胁迫,还未见报道。本文以绿豆为材料,采用土培法,研究不同浓度SA对废电池液处理下绿豆幼苗抗氧化酶及生理特性的影响,旨在为缓解废电池污染造成的毒害和农业生态环境保护提供一定的理论依据,也为干旱地区污水乃至废水的合理利用提供有益的帮助。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为绿豆新中绿1号(*Vigna radiata* L. Wilczek xinzhonglv1),购于周口市农科院。

1.2 材料处理

取某品牌5号废电池两节,去掉金属外壳,用1 000 mL蒸馏水浸泡24 h,过滤后作母液,然后将其与蒸馏水按1:4的比例配制成稀释液,再用此稀释液配制成不同浓度的SA溶液,并编号0~6,0为蒸馏水对照,1为废电池液,2~6 SA浓度分别为25、50、100、150、200 $mg \cdot L^{-1}$ 。选择均一、饱满的绿豆种子,用10% NaClO消毒10 min后,蒸馏水冲洗干净。将种子分成7份,每份100粒,并编号0~6,用相应编号含不同浓度水杨酸的废电池液浸种12 h后,种在相应编号有培养土的纸杯中,于室温下培养,待幼苗长出4片真叶时,选取同位叶测定酶活性及相应生理指标,每样重复3次。实验过程中每48 h浇1次等量相应编号的溶液。

1.3 生理指标的测定方法

超氧化物歧化酶(SOD)活力的测定采用联苯三酚自氧化法;过氧化物酶(POD)活力的测定采用愈创木酚比色法^[22];采用丙酮和95%乙醇(V:V为1:1)浸提分光光度法测定叶绿素含量,游离脯氨酸含量的测定采用磺基水杨酸浸提法,可溶性蛋白质含量的测定

采用考马斯亮蓝G-250显色法,电导率的测定采用李合生的方法,丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法,根系活力的测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法,稍作改进^[23]。

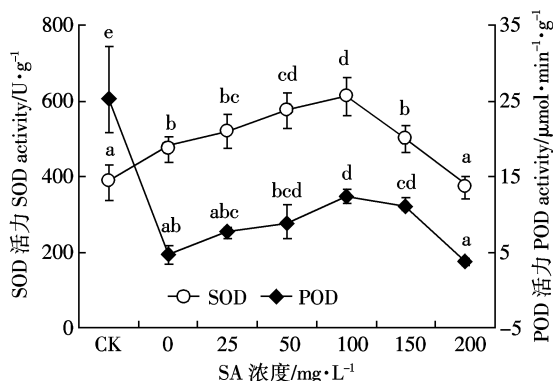
测定结果采用SPSS统计软件,在95%水平上进行One-Way ANOVA分析样品间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 SA对废电池液胁迫下绿豆幼苗抗氧化酶活性的影响

SOD和POD是植物抗氧化系统中重要的保护性酶,能清除体内过多的ROS,使机体免遭氧化损伤。图1显示,废电池胁迫下,SOD活性显著提高,比蒸馏水对照提高了24.04%;用25~150 $mg \cdot L^{-1}$ 的外源SA处理,绿豆幼苗叶片中酶活性进一步增强,并具有浓度效应,在100 $mg \cdot L^{-1}$ 时达到最大,为废电池胁迫的1.57倍,SA浓度增至150 $mg \cdot L^{-1}$ 时,SOD活性开始减弱,到200 $mg \cdot L^{-1}$ 时酶活性降至对照以下。

与SOD的活性变化稍有不同,废电池胁迫导致绿豆幼苗叶片中POD的活性明显减弱,比对照降低了81.52%;施用外源SA,酶活性开始增强,与废电池处理相比,SA为25 $mg \cdot L^{-1}$ 时,酶活性增强不显著,50~100 $mg \cdot L^{-1}$,POD的活性明显增强,100 $mg \cdot L^{-1}$ 时达到废电池处理的2.64倍,SA浓度增至200 $mg \cdot L^{-1}$,酶活性又大幅下降。在25~100 $mg \cdot L^{-1}$ 范围内,POD活性的增幅显然大于SOD。SOD、POD活性变化说明,低浓度的SA能诱导酶的活性,100 $mg \cdot L^{-1}$ 的SA效果最明显,高浓度对酶活性具有抑制作用。



不同小写字母表示各处理间的差异显著性($P < 0.05$),下同; Different small letters meant significant difference at 0.05 level. The same below.

图1 绿豆幼苗抗氧化酶活性的变化

Figure 1 Antioxidant enzyme activities change of mungbean seedling

2.2 SA 对废电池液胁迫下绿豆幼苗光合色素含量的影响

叶绿素与光合作用紧密相联,其含量高低直接影响植物对光能的吸收和传递。类胡萝卜素(car)除把吸收的光能传递给叶绿素 a(chla)用于光合作用外,还具有保护叶绿素防止强光对叶绿素破坏的作用。表 1 显示,废电池处理导致绿豆幼苗叶片中 chla 和 car 含量明显降低,分别比对照减少 20.99%和 48.09%;叶绿素 b(chlb)却有 12.38%的增加,但与对照相比差异不显著。废电池胁迫下,经 SA 处理,chla 的含量表现出缓慢增加的趋势,SA 浓度增至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最高值,比废电池处理增加了 33.72%;由表 1 还可看出,SA 浓度在 $25 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间能明显促进 car 的积累, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 car 的积累量达到最高,比废电池处理增加了 47.41%,随后积累量开始减少,chlb 的变化表现为随 SA 浓度的增加持续升高。说明废电池处理使 chla 和保护性色素 car 遭到破坏,应激性提高 chlb 的含量,以吸收更多的光能,SA 处理能刺激 3 种色素的积累。

2.3 SA 对废电池液胁迫下绿豆幼苗可溶性蛋白和游离脯氨酸含量的影响

蛋白质是生命现象的基本物质基础,是机体修复、更新必不可少的营养物质,也是体内各种酶和某些激素的构成原料,其含量的多少可以衡量植株对逆境的适应能力。图 2 显示,废电池液胁迫下可溶性蛋白含量显著减少,比对照减少了 73.75%。废电池胁迫下,经 SA 处理,随 SA 浓度的升高,可溶性蛋白含量表现出先增加后减少的趋势,与废电池胁迫相比,SA 各浓度下可溶性蛋白的变化均达到显著性差异水平,当 SA 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可溶性蛋白含量增幅最大,达到废电池处理的 3.96 倍。SA 浓度达到 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蛋白含量有所减低,但仍高出废电池处理下幼苗的 3.57 倍,说明 SA 能促进可溶性蛋白的积累,提高绿豆对废电池胁迫的适应性。

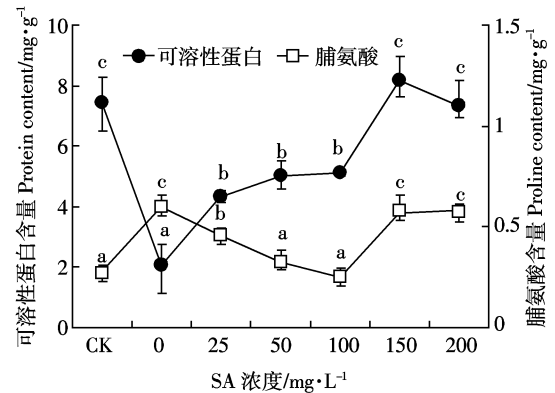


图 2 绿豆幼苗可溶性蛋白和游离脯氨酸的变化

Figure 2 Soluble proteins and proline content change of mungbean seedling

植物在逆境胁迫下,细胞会主动积累渗透调节物质,以适应逆境胁迫,而脯氨酸是任何逆境下均能积累的一种最有效的渗透调节物质之一。图 2 显示,与可溶性蛋白相比,脯氨酸表现出相反的变化趋势,即废电池胁迫绿豆幼苗叶片脯氨酸含量显著增加,比对照增加了 2.14 倍,在废电池胁迫下,施用 SA 能降低绿豆叶片中脯氨酸含量,随 SA 浓度的增加,脯氨酸含量先降后增,SA 浓度在 $25 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,脯氨酸含量的变化显著, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,含量降至最低,比废电池处理减少了 58.35%,浓度超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,脯氨酸含量开始升高,但仍低于废电池胁迫下的含量。叶片中脯氨酸积累的减少,说明废电池对绿豆幼苗的胁迫作用减弱。

2.4 SA 对废电池液胁迫下绿豆幼苗 MDA、根系活力和电导率的影响

MDA 是膜脂过氧化的产物,MDA 含量的多少与膜脂过氧化程度有关,其含量的变化可以说明植物受伤害的程度。废电池胁迫下,绿豆幼苗叶片中 MDA 含量比对照增加了 16.52%,表明绿豆幼苗受到一定程度的伤害(图 3)。施用 SA 能降低绿豆叶片中 MDA 含量,其变化趋势和脯氨酸的变化趋势一致。低浓度

表 1 绿豆幼苗光合色素含量的变化($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 1 Photosynthetic pigments content change of mungbean seedling($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

色素种类 Pigment Species	SA 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$						
	CK	0	25	50	100	150	200
叶绿素 a chla	0.337±0.021b	0.279±0.024a	0.285±0.003a	0.322±0.041ab	0.330±0.011ab	0.373±0.052b	0.292±0.036a
叶绿素 b chlb	0.453±0.041a	0.541±0.037a	0.541±0.008a	0.541±0.074a	0.516±0.004a	0.564±0.024a	0.714±0.024b
类胡萝卜素 car	0.107±0.008c	0.056±0.002a	0.061±0.000a	0.075±0.014b	0.082±0.002b	0.073±0.009b	0.054±0.006a

注:同行不同小写字母表示各处理间的差异显著性($P < 0.05$)。Different small letters in the same line meant significant difference at 0.05 level.

SA 处理,MDA 逐渐下降,高浓度升高,在 $25\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,MDA 含量的变化显著, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,降至最低,比废电池处理减少了 27.34%。说明低浓度的 SA 可以减轻废电池液胁迫下绿豆幼苗叶片细胞的膜脂过氧化作用,增加了细胞膜的稳定性,浓度过高缓解作用减弱。

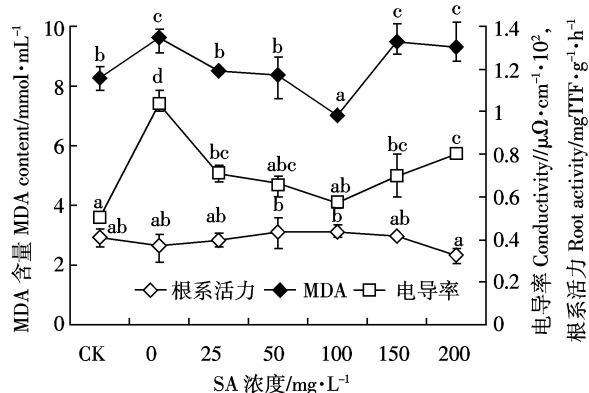


图3 绿豆幼苗 MDA、根系活力和电导率的变化

Figure 3 MDA, root activity and conductivity change of mungbean seedling

植物细胞膜对维持细胞的微环境和正常代谢起着重要作用,正常的细胞膜对物质具有选择透过性,能阻止细胞中的有用物质外渗。当受到逆境胁迫时,细胞膜透性增大,电解质外渗导致电导率加大。因此,电导率的高低代表细胞膜透性的大小。图3显示,对照组绿豆幼苗叶片电导率最低,废电池处理下,叶片电导率的变化与各处理间差异显著,达到对照的 2.067 倍,电导率的升高,说明细胞完整性受损。外源 SA 处理使叶片中电导率明显下降,表现出随浓度升高先降后增的变化。SA 浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,电导率降至最低,仅是废电池处理的 54.84%。随后电导率开始升高,说明低浓度 SA 对绿豆幼苗叶片细胞电解质的外渗作用有所缓解,高浓度的 SA 缓解作用减弱, $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SA 效果最佳。

根系活力的大小代表植物新陈代谢活动的强弱,是反映植物吸收功能的一项综合指标。根系作为植物重要的吸收器官和代谢器官,它的生长发育直接影响到地上茎叶的生长和作物产量的高低^[18]。图3显示,废电池胁迫根系活力降低,降低幅度较少,仅比对照下降了 9.4%,与对照组无统计学上差异($P>0.05$)。外施 SA 处理能提高绿豆幼苗的根系活力,表现为在一定浓度范围内 ($25\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随着 SA 浓度的增加,废电池胁迫下绿豆幼苗根系活力逐渐升高。而当 SA 浓度超过 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之后,根活力又降低,达到

$200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,降至低于废电池处理的水平。与废电池相比,不同浓度的 SA 处理根系活力的变化差异不显著,说明低浓度 SA 能提高废电池胁迫下的幼苗根系活力,促进植物的吸收功能。而高浓度的 SA 具有抑制作用,但作用不明显。

3 讨论

植物在生命活动过程中,通过各种途径产生超氧化物阴离子自由基($\text{O}_2\cdot^-$)、羟自由基($-\text{OH}\cdot$)、过氧化氢(H_2O_2)、单线态氧($^1\text{O}_2$)等 ROS,正常生理条件下,植物体内的抗氧化系统能协同作用,使细胞中 ROS 维持在较低水平。例如,机体中重要的抗氧化酶 SOD,可以将 $\text{O}_2\cdot^-$ 歧化成 H_2O_2 和 O_2 ,POD 则能将 H_2O_2 分解成 H_2O ,从而调节机体内的氧代谢,维持细胞 ROS 代谢平衡。研究表明,重金属污染能刺激植物抗氧化酶的活性,使 SOD、POD 活性增强,以清除机体产生的自由基。但当植物受到高强度重金属胁迫时,机体内的抗氧化系统受到干扰,氧代谢失调,加快 ROS 的产生,致使 ROS 自由基在体内大量积累。过剩的 H_2O_2 等可能抑制 SOD 活性,或产生的 ROS 自由基超出了它的清除能力,致使 SOD 活性降低^[3,11]。

本实验中,废电池胁迫下,绿豆幼苗叶片中 SOD 增强,而较高活性的 SOD,产生过多的 H_2O_2 。过剩的 H_2O_2 超出了 POD 的清除能力,致使 POD 活性降低。SA 处理两种酶活性进一步增强,这与彭喜旭的研究结果一致^[21],证明了 SA 能诱导抗氧化酶的生成,调节抗氧化系统代谢平衡,减轻对植物的伤害。

重金属诱导的氧化胁迫,引起膜质过氧化^[2-4],其终产物 MDA 攻击质膜内蛋白质、核酸、不饱和脂肪酸等生物大分子,阻止新脂类的合成,导致膜的损伤和破坏^[25],进而导致生物膜透性增大。因此,MDA 是衡量脂质过氧化损伤的重要指标^[26]。MDA 含量越多,说明 ROS 积累越高,膜损伤越严重。本研究结果显示,绿豆幼苗在废电池胁迫下,MDA 含量升高,电导率增大,说明膜系统受到一定程度的损伤,质膜透性增大。 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 SA 处理,能明显降低叶片中 MDA 的含量和电导率,减轻废电池液胁迫下绿豆幼苗叶片细胞质膜过氧化程度,缓解废电池对膜的伤害,维持膜的选择透过性,提高绿豆幼苗对废电池液的适应性。这与 SA 在玉米上的研究是一致的^[18]。

植物中的光合色素是影响光合效率的重要因素,是衡量植物对逆境胁迫敏感性的重要指标,其中的 chl_b 具有收集光能的作用,chl_a 除了收集光能还能将

光能转换成电能。许多研究证明,重金属胁迫导致光合色素含量下降^[11,27],chl a 的减少不利于色素分子收集的光能转换成电能,过剩的光能又可诱导新自由基的产生和色素分子的光氧化,本实验中,废电池处理下 chl a 和类胡萝卜素含量下降,类胡萝卜素含量的减少对叶绿素的保护作用减弱,同时,由于 MDA 含量的增加,膜脂过氧化加剧,致使叶绿素含量降低。SA 处理导致光合色素含量的增加,这可能是由于在 SA 诱导下,类胡萝卜素含量增加,加强了对色素的保护,同时 POD、SOD 活性提高,消除了体内过多的 ROS,膜脂过氧化减弱,MDA 含量减少,一定程度上缓解了对生物大分子的攻击。叶绿素含量的增加利于提高光合效率,积累较多的光合产物,进一步提高植物的抗逆性。

可溶性蛋白含量的提高可以增加细胞的渗透势和功能蛋白的数量,有助于维持细胞正常的代谢,提高植物的抗逆性^[28]。脯氨酸作为细胞调节物质和细胞渗透物质,可保持植物受环境胁迫时的渗透压,还参与植物体内氧自由基的清除^[29]。在逆境胁迫下脯氨酸会大量积累,因此脯氨酸的含量在一定程度上反映了植物所受胁迫影响的程度。本实验显示,在废电池液胁迫下,适宜浓度的 SA 处理绿豆幼苗叶片可溶性蛋白增加,说明 SA 能增强绿豆幼苗的抗废电池胁迫的能力,而脯氨酸含量的减少,则表明重金属的伤害得到一定程度的缓解。

4 结论

综上所述,废电池溶液对绿豆幼苗有一定的毒害作用。外源 SA 处理,能诱导绿豆抗氧化酶的产生,并调节其活性,降低 ROS 的积累,使 MDA 含量下降,减轻对生物大分子的攻击,消除或缓解氧化损伤,减轻废电池对绿豆幼苗的毒害作用。综合各指标的变化幅度,100 mg·L⁻¹ 的 SA 缓解效果最佳,高浓度的 SA 缓解作用减弱。

参考文献:

- [1] 姚锦秋,王云,齐广,等. 废电池浸提液对小麦种子发芽影响的初步研究[J]. 内蒙古民族大学学报:自然科学版, 2007, 22(6): 637-641.
- [2] YAO Jin-qiu, WANG Yun, QI Guang, et al. Preliminary study on the effect of waste battery extraneous liquids on seeds germination of wheat [J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences)*, 2007, 22(6): 637-641.
- [3] 刘周莉,何兴元,陈玮. 镉胁迫对金银花生理生态特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 40-44.
- [4] LIU Zhou-li, HE Xing-yuan, CHEN Wei. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Lonicera japonica* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 40-44.
- [5] Reddy A M, Kumar S G, Jyothsnakumari G, et al. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotermis aegyptiaca* (Lam.) Verdc) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. *Chemosphere*, 2005, 60: 97-104.
- [6] 何俊瑜,任艳芳,严玉萍,等. 镉胁迫对水稻幼苗生长和根尖细胞分裂的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 138-144.
- [7] HE Jun-yu, REN Yan-fang, YAN Yu-ping, et al. Impacts of cadmium stress on the growth of rice seedlings and division of their root tip cells [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 138-144.
- [8] Kozhevnikova A D, Seregin I V, Bystrova E I, et al. Effects of heavy metals and strontium on division of root cap cells and meristem structural organization [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2007, 54(2): 257-266.
- [9] 孙光闻,朱祝军,方学智. 不同镉水平对白菜生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(3): 378-380.
- [10] SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi. Effects of different cadmium levels on the growth and antioxidant enzymes in *Brassica campestris* L. Ssp. *Chinensis* (L.) Makino [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(3): 378-380.
- [11] Mukaopadhyay M J, Sharma A. Manganese in cell metabolism of higher plants [J]. *The Botanical Review*, 1991, 57(2): 117-149.
- [12] Lei Y, Chen K, Tian X, et al. Effect of Mn toxicity on morphological and physiological changes in two *Populus cathayana* populations originating from different habitats [J]. *Trees-Structure and Function*, 2007(21): 569-580.
- [13] Shi Q H, Zhu J Z. Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 5: 317-326.
- [14] 王海华,冯涛,彭喜旭,等. 锰对锰超积累植物美洲商陆抗氧化系统的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2481-2486.
- [15] WANG Hai-hua, FENG Tao, PENG Xi-xu, et al. Effects of manganese on antioxidant system of manganese-hyperaccumulator *Phytolacca americana* L. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2481-2486.
- [16] Durner J, Shah, J, Klessig D F. Salicylic acid and disease resistance in plants [J]. *Trends in Plant Science*, 1997(2): 266-274.
- [17] 江行玉,赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 92-99.
- [18] JIANG Xing Y, ZHAO Ke-fu. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants [J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2001, 7(1): 92-99.
- [19] Zhang Y L, Fan W H, Kinkema M, et al. Interact of NPR1 with basic

- leucine zipper proteint transcription factors that bind sequences required for salicylic acid induction of the PR-1 gene[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1999, 96:6523-6528.
- [15] Yu D Q, Chen C H, Chen Z X. Evidence for an important role of WRKY DNA binding proteins in the regulation of NPR1 gene expression[J]. *Plant Cell*, 2001, 13:1527-1540.
- [16] Chen J, Zhu C, Li L P, et al. The effects of exogenous salicylic acid on growth and H_2O_2 -metabolizing enzymes in rice seedlings under lead stress[J]. *Journal of Environmental Science*, 2007, 19(1):44-49.
- [17] Horváth E, Szalai G, Janda T. Induction of abiotic stress tolerance by salicylic acid signaling[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2007, 26:290-300.
- [18] 李彩霞, 李 鹏, 苏永发, 等. 水杨酸对镉胁迫下玉米幼苗质膜透性和保护酶活性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(5):882-884.
- LI Cai-xia, LI Peng, SU Yong-fa, et al. Effect of salicylic acid on permeability of plasma membrane and activities of protect enzymes of Maize(*Zea mays* L.) seedlings under cadmium stress[J]. *Plant Physiology Communications*, 2006, 42(5):882-884.
- [19] Metwally A, Finkemeier I, Georgi M, et al. Salic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings [J]. *Plant Physiology*, 2003, 132:272-281.
- [20] Krantev A, Yordanova R, Janda T, et al. Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(9):920-931.
- [21] 彭喜旭, 冯 涛, 严明理, 等. 外源水杨酸对锰污染红壤中玉米的生长与抗氧化酶活性的调节作用[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5):972-977.
- PENG Xi-xu, FENG Tao, YAN Ming-li, et al. Modulation of growth and antioxidative enzyme activities of *Zea mays* L. in manganese-contaminated red soil by exogenous salicylic acid[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5):972-977.
- [22] 刘 萍, 李明军. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- LIU Ping, LI Ming-jun. Plant physiology experimental technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI He-sheng. Plant physiology and biochemistry experimental principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [24] Andres S, Andrea P. Plant responses to abiotic stresses; Heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhizati on[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53:1351-1365.
- [25] 唐 咏, 王萍萍, 张 宁. 植物重金属毒害作用机理研究现状[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4):551-555.
- TANG Yong, WANG Ping-ping, ZHANG Ning. Researches in heavy metal oxicity mechanism in plant [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(4):551-555.
- [26] 苏金为, 王湘平. 镉诱导的茶树苗膜脂过氧化和细胞程序性死亡 [J]. 植物生理学与分子生物学学报, 2002, 28(4):292-298.
- SU Jin-wei, WANG Xiang-ping. Cadmium-iduced membrane lipid peroxidation and programmed cell death in tea seedling [J]. *Journal of Plant Physiology an Molecular Biology*, 2002, 28(4):292-298.
- [27] 张金彪, 黄维南. 镉胁迫对草莓光合的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7):1673-1676.
- ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan. Effects of cadmium stress on photosynthetic functions of strawberry[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7):1673-1676.
- [28] 吴桂容, 严重玲. 镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响 [J]. 生态环境, 2006, 15(5):1003-1008.
- WU Gui-rong, YAN Chong-ling. Effects of Cd on the growth and osmotic adjustment regulation contents of *Aegiceras conrriculatum* seedlings[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5): 1003-1008.
- [29] 郭晓音, 严重玲, 叶彬彬. 镉锌复合胁迫对秋茄幼苗渗透调节物质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(3):308-312.
- GUO X Y, YAN C L, YE B B. Effect of Cd-Zn combined stress on contents of osmotic substances in *Kandelia candel*(L.) Druce Seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2009, 15(3):308-312.
- [30] Pawlik S B. Correlations between toxic Pb effects and production of Pb-induced thiolpeptides in the microalga *Stichococcus bacillaris* [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119:119-127.