

Spd 浸种对 Cd 胁迫下油菜幼苗的抗氧化系统的影响

陈茂铨, 刘术新

(丽水职业技术学院环境工程分院, 浙江 丽水 323000)

摘要:采用水培试验,研究了 $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ 浓度下, $0.10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚精胺(Spd)浸种处理对油菜幼苗叶片抗氧化系统的影响。结果表明,Cd 胁迫使油菜幼苗叶片褪绿,叶绿素总量及叶绿素 a/b 含量与对照相比极显著降低,Spd 浸种处理可显著逆转这一变化,缓解叶片的褪绿现象。与 Cd 处理相比,Spd 浸种显著或极显著提高了油菜幼苗中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性和可溶性蛋白、谷胱甘肽(GSH)含量,从而降低了丙二醛(MDA)含量,极显著降低了超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot -}$)含量,缓解了 Cd 的氧化胁迫作用。总之,Spd 浸种处理通过提高 Cd 胁迫下植株体内抗氧化酶及抗氧化剂活性,降低活性氧(ROS)水平来缓解重金属胁迫对油菜幼苗的伤害,提高幼苗的耐重金属能力。

关键词: Cd 胁迫;亚精胺浸种;油菜;抗氧化系统

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)10-1953-05

Effects of Spermidine(Spd) Soaking on Seedling Antioxidant System of *Brassica napus* Linn. Under Cd Stress

CHEN Mao-quan, LIU Shu-xin

(School of Environmental Engineering, Lishui Vocational & Technical College, Lishui 323000, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to study the effect of exogenous Spermidine(Spd) ($0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) presoaking on seedling (*Brassica napus* Linn.) antioxidative system under $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$ stress. The results showed Cd stress caused the declining of total chlorophyll, chlorophyll a/b content and seedling chlorosis. However, Spd presoaking seed could significantly relieve these symptoms including seedling chlorosis. Spd soaking seed significantly improved the activities of superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD) and catalase(CAT) and increased the content of soluble protein and glutathione in seedling. Consequently, the content of malondialdehyde(MDA) and superoxide anion($\text{O}_2^{\cdot -}$) decreased and Cd stress was relieved. In short, Spd soaking treatment alleviated Cd harm and improved Cd resistance through increasing the activities of antioxidant enzymes as well as antioxidants and reducing the activity of reactive oxygen species(ROS) in seedling.

Keywords: Cd stress; Spermidine(Spd) soaking; *Brassica napus* Linn.; antioxidant system

蔬菜产业发展对我国农业发展具有重要意义。据农业部农情统计,2009 年全国蔬菜播种面积 1 820 万 hm^2 ,人均占有量约 440 kg。联合国粮农组织(FAO)调查表明,我国蔬菜播种面积和产量分别占世界的 43%、49%,均居世界第一,因此我国也是世界蔬菜出口大国。由于工业“三废”的排放、污水灌溉及农药和化肥的使用,重金属污染已成为一个严重的环境问题。镉(Cd)以移动性大、毒性高成为最受关注的对象

之一。国内外学者对蔬菜 Cd 污染的研究较多,如 Cd 对蔬菜根系生长发育^[1]、生理特性^[1-2]、吸收累积^[3-5]等方面的影响及蔬菜对镉敏感性的研究^[6-7]均有大量报道。重金属镉通过抑制蔬菜细胞分裂、伸长刺激和抑制一些酶活性,影响其组织蛋白质合成,降低光合作用,伤害细胞膜系统,从而影响蔬菜生长发育和食用安全性。

多胺(PAs)是一类植物体内存在广泛并有较强生理活性的次生物质,可调节植物的生长发育,还能延缓衰老和提高抗逆性,最常见的为精胺(Spm)、亚精胺(Spd)和腐胺(Put)。

大量研究表明,外施 Spd 可明显提高苋菜、向日葵和海菜等对重金属胁迫的耐受性^[8-10],但关于 Spd 处

收稿日期:2011-03-17

基金项目:浙江省丽水市科技局项目(2008jyzb02)

作者简介:陈茂铨(1963—),男,浙江余姚人,硕士,副教授,主要从事植物生态学、城市绿地生态的教学与研究。

E-mail:ls2871158@lszjy.com

理种子是否可以提高蔬菜苗期耐镉性的研究报道尚少。因此,本文以油菜为实验材料,探讨 Spd 浸种对镉胁迫下油菜幼苗生长及叶片内抗氧化酶系统和植株耐镉性的影响,为寻求提高植株耐镉性措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用叶菜类蔬菜为实验材料,“大叶黑大头”是浙江省蔬菜种植面积较多的一种油菜(*Brassica napus* Linn.)。

1.2 试验设计

选取饱满、整齐一致的“大叶黑大头”油菜种子经次氯酸钠消毒后,分别用蒸馏水和 $0.10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Spd 浸种 10 h,然后在 27°C 的恒温培养箱内催芽。挑选露白一致的种子播于装有珍珠岩的 50 孔穴盘中,置于昼夜温度 $(27 \pm 5)^\circ\text{C}/(18 \pm 5)^\circ\text{C}$ 条件下培养,自然光照。当子叶展平后,每 3 d 浇 1 次 $1/2$ 剂量的 Hoagland 营养液。待油菜三叶一心时移到水培种植槽内,当具备 7~8 片真叶时,开始镉处理,即营养液中 Cd^{2+} 浓度为 $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水培培养期间每天早上 8:00 通气 1 次,每隔 3 d 更换 1 次培养液,镉处理 15 d 时取样测定各项生理指标。每个处理 3 次重复,具体 3 个实验设计如下:

- (1)蒸馏水浸种+幼苗 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$
- (2)蒸馏水浸种+幼苗 $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$
- (3) $0.10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Spd 浸种+幼苗 $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}^{2+}$

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶绿素的测定^[1]

选子叶上方第 5 片完全展开叶,取 0.20 g 叶肉样品,放入研钵中,加入少量丙酮和石英砂研磨至匀浆

后,用 80%丙酮提取,定容至 10 mL ,用 T6 分光光度计在 645、663、652 nm 波长测定光密度,计算出叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素含量。

1.3.2 抗氧化酶活性的测定

可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝法,用 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 表示;SOD、POD 和 CAT 活性及 GSH 含量采用南京建成生物工程研究所的生化试剂盒进行测定,分别用 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$ 、 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$ 、 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ prot}$ 和 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ prot}$ 表示;MDA 和超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)含量参照高俊凤^[1]的方法测定,以 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ 和 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ 表示。

1.4 数据处理

采用 SPSS17 软件,Duncan's 多重比较法进行数据统计分析,采用 SigmaPlot 10.0 软件制图。

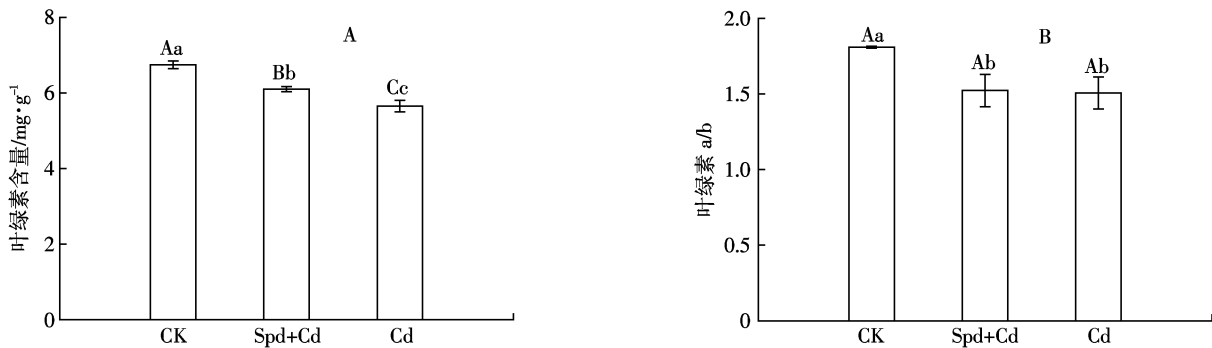
2 结果与分析

2.1 Spd 浸种对 Cd 胁迫下油菜幼苗叶绿素含量及叶绿素 a/b 的影响

Cd 胁迫下,油菜叶褪绿现象非常明显。由图 1A 可见, $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}$ 处理使油菜总叶绿素含量极显著降低,与对照相比降低了 16.19%。而 Spd 浸种处理,使得叶片的失绿症状明显缓解,叶绿素含量大幅上升,与 $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}$ 处理间呈极显著差异($P < 0.01$)。与对照相比, $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}$ 处理油菜叶绿素 a/b 值下降达到显著水平(图 1B),降低了 21.08%。Spd 浸种处理,缓解了 Cd 处理对油菜叶绿素 a/b 的降低。

2.2 Spd 浸种对 Cd 胁迫下油菜幼苗叶片中 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 MDA 含量的影响

由图 2A 可以看出,Cd 胁迫下,油菜叶片 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量极显著提高,是对照的 2.26 倍。Spd 浸种处理显著降低了油菜幼苗叶片内 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量,降低至对照的 1.64 倍;与 $0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}$ 处理相比也显著下降。如图



图中不同大写字母表示 $P < 0.01$ 极显著水平;不同小写字母表示 $P < 0.05$ 显著水平。下同。

图 1 Spd 浸种对 Cd 胁迫下油菜幼苗叶绿素含量(A)及叶绿素 a/b(B)的影响

Figure 1 Effects of pre-sosked seeds with Spd on Chlorophyll content(A) and Chlorophyll a/b(B) of

Brassica napus Linn. seedlings under Cd stress

2B所示,Cd胁迫处理使得MDA含量显著增加,比对照提升了42.19%。Spd浸种处理的油菜叶片MDA含量明显降低,比纯Cd处理降低了18.88%。

2.3 Spd浸种对Cd胁迫下油菜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由表1可知,培养15d后,不同处理的油菜叶片中的抗氧化酶活性均存在显著差异。其中Cd处理与对照间的酶活性存在极显著差异,SOD、POD和CAT活性分别降低了67.12%、29.83%和53.57%,可见,Cd的存在明显抑制了油菜叶片中3种氧化酶的活性。虽然Cd+Spd处理的3种酶活性也有所下降,但下降幅度较小,尤其是POD和CAT酶的活性。从表1还可以看出,Cd+Spd和Cd处理间3种抗氧化酶的活性差异均达到极显著水平。上述情况表明,Spd浸种缓解了Cd胁迫产生的活性氧自由基压力,有效抑制了抗氧化酶活性下降。

2.4 Spd浸种对Cd胁迫下油菜幼苗叶片可溶性蛋白和GSH含量的影响

可溶性蛋白含量的降低是植物对重金属胁迫反应最明显的特征之一。如图3A所示,Cd胁迫使可溶性蛋白含量极显著降低至对照的53.08%,而Spd浸

表1 Spd浸种对Cd胁迫下油菜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Table 1 Effects of pre-sosked seeds with Spd on antioxidant enzymes activities in *Brassica napus* Linn. leaves under Cd stress

处理 Treatment	SOD 活性/ U·mg ⁻¹ prot	POD 活性/ U·mg ⁻¹ prot	CAT 活性/ U·mg ⁻¹ prot
对照 CK	774.684±13.741Aa	1.285±0.030Aa	177.473±4.516Aa
Cd+Spd	337.894±10.464Bb	1.038±0.016Bb	164.980±0.765Ab
Cd	254.682±12.141Cc	0.902±0.009Cc	82.403±3.413Bc

注:大写英文字母表示 $P<0.01$ 极显著水平;小写英文字母表示 $P<0.05$ 显著水平。

种可有效逆转这一变化,与Cd胁迫相比极显著提高了42.82%。GSH是植物细胞中的小分子抗氧化剂。由图3B可见,与对照相比,Cd胁迫处理GSH含量极显著降低了52.69%。与纯Cd处理相比,Spd浸种使GSH含量提高了1.96倍,并达到极显著水平($P<0.01$)。可见,Spd浸种可以通过增加GSH含量在一定程度上增加Cd胁迫下ROS的清除。

3 讨论

多胺(PAs)可直接或间接地清除由化学或酶促反应所产生的自由基而提高植物抗逆性,作为第二信使

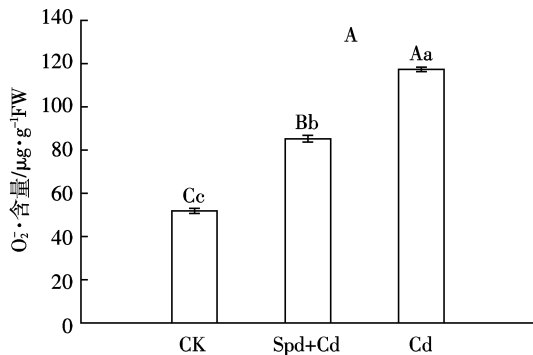


图2 Spd浸种对Cd胁迫下油菜幼苗O₂·⁻(A)和MDA含量(B)的影响

Figure 2 Effects of pre-sosked seeds with Spd on O₂·⁻ (A) and MDA content (B) in *Brassica napus* Linn. leaves under Cd stress

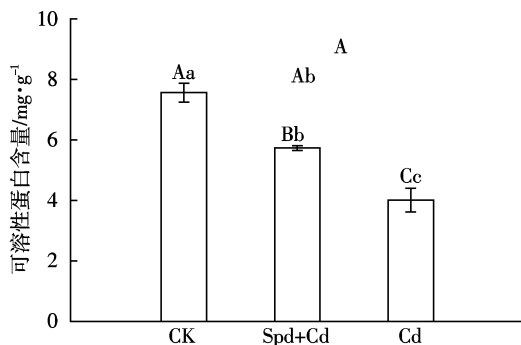
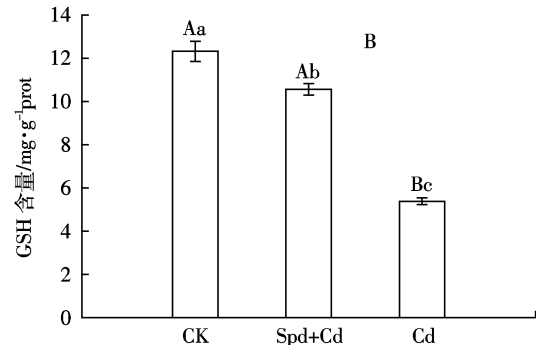
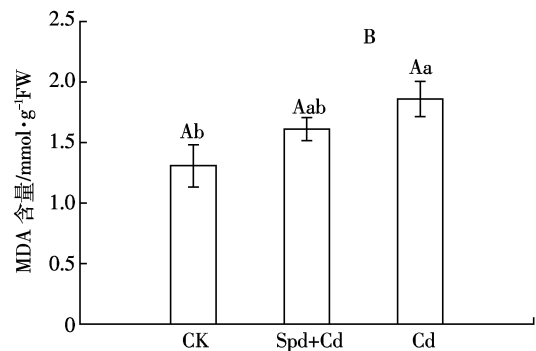


图3 Spd浸种对Cd胁迫下油菜幼苗叶片可溶性蛋白(A)和GSH含量(B)的影响

Figure 3 Effects of pre-sosked seeds with Spd on the content of Soluble protein and GSH in *Brassica napus* Linn. leaves under Cd stress



参与植物逆境胁迫防御反应,从而可缓解逆境胁迫对植物体造成的伤害^[12]。有研究表明,Cd 胁迫下,植物叶绿体结构受损,叶绿素生物合成受阻,导致叶绿素总量降低,植物光合作用受到抑制,从而引起植物长势减弱,生长量减少^[13-14]。本试验中,Cd 胁迫下,油菜叶片叶绿素总量急剧减少,导致植物的光合能力降低,生长延缓。可能与 Cd^{2+} 能破坏主要的捕光复合物以及植物光系统 I 和 II 或 Cd 取代叶片中 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 等元素而抑制叶绿素前体的合成,破坏了叶绿体微结构有关^[1,15]。Spd 浸种处理对叶片褪绿程度和叶绿素总量下降都有明显的缓解作用。

重金属能直接或间接地通过形成 ROS 使植物体内产生氧化胁迫,导致细胞膜脂质的过氧化。外源 Spd 处理可不同程度提高植物体活性氧清除能力,降低活性氧对植物体的氧化伤害。王红霞等研究表明,外施 Spd 显著抑制了 Cu 胁迫下 ROS($\text{O}_2\cdot$ 和 H_2O_2) 的积累,缓解 MDA 含量的增加和膜脂过氧化程度^[16]。汤春芳等的研究也表明喷施 Spd 能抑制活性氧的产生和 MDA 含量的增加^[17]。本研究表明,Spd 浸种处理可以显著提高 Cd 胁迫下油菜幼苗活性氧清除能力,减轻 Cd 胁迫引起的叶绿体 $\text{O}_2\cdot$ 和 MDA 含量的积累,缓解 Cd 胁迫对幼苗的伤害。可见,Spd 浸种与外施 Spd 有着相同的作用。

植物对逆境的生理响应与体内的抗氧化防御系统密切相关。有研究指出 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 会导致太阳花叶圆片 SOD 活性的降低,而外源 Spd 能够逆转 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 的不利影响,表明多胺能缓解重金属诱导的氧化胁迫^[8]。王学等通过外源 Spd 处理苕菜 Hg^{2+} 、 Cr^{6+} 胁迫下的试验也表明,Spd 可提高逆境胁迫下植株体内 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶活性,降低活性氧的产生速率,减少 MDA 的过量积累,提高植物对重金属胁迫的抵抗力^[18-19]。Spd 能显著提高 Cd 胁迫下湖北海棠的 SOD 的活性^[20],Cu 胁迫水鳖叶片,Spd 可提高其体内抗氧化酶活性^[16]。本试验结果表明,Spd 浸种处理,油菜叶片内 SOD、CAT、POD 抗氧化酶活性均高于纯 Cd 处理,并达到极显著水平。由此表明,种子萌发期 Spd 处理能够促进苗期油菜提高自身的抗氧化酶活性,降低 ROS 水平,进而提高苗期植株的抗重金属胁迫能力。

Daniels 等^[21]研究发现多胺可以活化蛋白激酶,而蛋白激酶可以调节非组蛋白的酸性蛋白的磷酸化作用。本研究表明,Spd 浸种处理可提高 Cd 胁迫油菜叶片可溶性蛋白含量,与胡晓辉等^[22]的研究结果相

似。可见,种子萌发期 Spd 处理能够促进苗期植株自身合成多胺的能力,从而诱导相关蛋白的表达,进而提高苗期植株的抗逆性。GSH 作为抗氧化剂,可直接清除 ROS,本试验结果表明,Cd 胁迫下油菜叶片中 GSH 含量显著下降,Spd 浸种可有效提高 GSH 含量,与 Groppa 外施 Spd 的研究结果一致。

4 结论

Cd 胁迫下,油菜幼苗叶片失绿,叶绿素含量降低,体内 ROS 增加,抗氧化酶活性降低。Spd 浸种处理可提高油菜幼苗抗氧化酶和抗氧化剂活性,增加可溶性蛋白含量,降低了 $\text{O}_2\cdot$ 和 MDA 含量,使膜脂过氧化程度下降,减轻 Cd 胁迫对油菜幼苗生长的抑制作用。因此,可以通过播前对种子进行 Spd 浸种处理,以增加幼苗的抗重金属 Cd 能力,为在受重金属 Cd 污染的土壤上作物栽培提供参考。

参考文献:

- [1] 刘可慧,于方明,李明顺,等. 镉胁迫对小白菜(*Brassica campestris* L.) 抗氧化机理的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(4):1466-1470.
LIU Ke-hui, YU Fang-ming, LI Ming-shun, et al. Responses and resistance mechanism of *Brassica campestris* L. to cadmium stress[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(4):1466-1470.
- [2] Yasemin Ekmekci, Deniz Tanyolac, Beycan Ayhan. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165:600-611.
- [3] 孙兆海,郑春荣,周东美,等. 土壤 Cd 污染对油菜和蕹菜生长及 Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3):417-420.
SUN Zhao-hai, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, et al. Phytotoxicity and uptake of cadmium by *brassica chinensis* and *ipomoea aquatica* in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3):417-420.
- [4] Jerome Perriguet, Thibault Sterckeman, Jean-Louis Morel. Effect of rhizosphere and plant-related factors on the cadmium uptake by maize (*Zea mays* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63:333-341.
- [5] 贾彦博,毛红骞,倪伟红. 镉污染对蔬菜镉吸收和积累的影响[J]. 广东微量元素科学, 2009, 16(1):25-30.
JIA Yan-bo, MAO Hong-qian, NI Wei-hong. The effect on cadmium uptake and accumulation of vegetable under cadmium pollution[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2009, 16(1):25-30.
- [6] 徐照丽,吴启堂,依艳丽. 不同品种菜心对镉抗性的研究[J]. 生态学报, 2002, 4:571-576.
XU Zhao-li, WU Qi-tang, YI Yan-li. Studies on the resistance to cadmium in different cultivars of *brassica parachinensis*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 4:571-576.
- [7] 刘传娟,刘凤枝,蔡彦明. 不同种类蔬菜苗期对镉的敏感性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9):1789-1794.

- LIU Chuan-juan, LIU Feng-zhi, CAI Yan-ming. Sensitivity of different vegetable seedlings to cadmium [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1789-1794.
- [8] Groppa M D, Tomaro M L, Benavides M P. Polyamines as protectors against cadmium or copperoxidative damage in sunflower leaf discs[J]. *Plant Science*, 2001, 161: 481-488.
- [9] Tang C F, Liu Y G, Zeng G M, et al. Effects of exogenous spermidine on antioxidant system responses of *Typha latifolia* L. under Cd^{2+} stress[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(4): 428-43.
- [10] Wang X, Shi G X, Xu Q S, et al. Exogenous polyamines enhance copper tolerance of *Nymphaea peltatum* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164: 1062-1070.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74, 210.
- GAO Jun-feng. Plant physiology experiment guidance[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 74, 210.
- [12] 张春梅. 多胺与逆境胁迫关系综述[J]. 河西学院学报, 2010, 26(2): 47-50.
- ZHANG Chun-mei. The summary of relationship between polyamines and stresses[J]. *Journal of Hexi College*, 2010, 26(2): 47-50.
- [13] 石贵玉, 李佳枚, 韦颖, 等. 钙对镉胁迫下生菜幼苗生长和生理的影响[J]. 浙江农业科学, 2010, 4: 717-720.
- SHI Gui-yu, LI Jia-mei, WEI Ying, et al. The effect of calcium on under cadmium stress lettuce seedling growth and physiological[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 2010, 4: 717-720.
- [14] 王林, 史衍玺. 镉、铅及其复合污染对萝卜生理生化特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 411-414.
- WANG Lin, SHI Yan-xi. Effects of cadmium, lead and their compound pollution on physiological and biochemical characteristics of radish[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 411-414.
- [15] 贺迪, 刘元国, 黄玉娥, 等. 钙对不同浓度镉胁迫下芦苇幼苗叶绿素及抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 197-201.
- HE Di, LIU Yun-guo, HUANG Yu-e, et al. Effects of calcium on chlorophyll and antioxidant enzymes in *Phragmites australis* under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 197-201.
- [16] 王红霞, 胡金朝, 施国新, 等. 外源多胺对铜胁迫下水鳖叶片多胺代谢、抗氧化系统和矿质营养元素的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2784-2792.
- WANG Hong-xia, HU Jin-zhao, SHI Guo-xin, et al. Effects of exogenous polyamines on polyamines metabolism, antioxidative systems and mineral nutrition responses of *Hydrocha risdubia* (Bl.) Backer under Cu stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2784-2792.
- [17] 汤春芳, 李科林, 高自成, 等. 喷施亚精胺缓解宽叶香蒲镉毒害的研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 105-110.
- TANG Chun-fang, LI Ke-lin, GAO Zi-cheng, et al. Toxic influences of Cd^{2+} on *Typha latifolia* L. mitigated by spermidine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 0105-0110.
- [18] 王学, 施国新, 马广岳, 等. 外源亚精胺对苣荬菜抗 Hg^{2+} 胁迫能力的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(1): 69-74.
- WANG Xue, SHI Guo-xin, MA Guang-yue, et al. Effects of exogenous spermidine on resistance of *Nymphoides peltatum* to Hg^{2+} stress[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(1): 69-74.
- [19] 王学, 施国新, 徐勤松, 等. 外源亚精胺缓解苣荬菜(*Nymphoides peltatum*) Cr^{6+} 毒害的生理研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(5): 689-693.
- WANG Xue, SHI Guo-xin, XU Qin-song, et al. Toxic effects of Cr^{6+} on *Nymphoides peltatum* mitigated by exogenous spermidine[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(5): 689-693.
- [20] Zhao H Z, Yang H Q. Exogenous polyamines alleviate the lipid peroxidation induced by cadmium chloride stress in *Malus hupehensis* Rehd[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116: 442-447.
- [21] Daniels G R, Atmar V J, Kuehn G D. Polyam inactivated prote in kinase reaction from nuclei and nucleoli of *Physarum polycephalum* which phosphorylates a unique Mr 70000 nonhistone protein[J]. *Biochemistry*, 1981, 20: 2525-2532.
- [22] 胡晓辉, 王素平, 曲斌. NaCl 胁迫下亚精胺对番茄种子萌发及幼苗抗氧化系统的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 446-450.
- HU Xiao-hui, WANG Su-ping, QU Bin. Effects of spermidine on seed germination and seedling antioxidant system of tomato under NaCl stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 446-450.