

硒预处理对镉胁迫下荷花幼苗生长和生理的影响

王海希, 周浩民, 李柳燕, 邱琳香, 王彦杰, 徐迎春^①

(南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 研究了不同浓度硒(Se)预处理(0、3、6、12、24 和 48 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se)对镉(Cd)胁迫(25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)下荷花(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)品种‘微山湖红莲’(‘Weishanhuhonglian’)幼苗生长和生理特性的影响。结果表明: $\text{Se}_0\text{-Cd}_{25}$ (0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗受 Cd 毒害最严重,叶片黄化;随着 Se 浓度的提高,幼苗受 Cd 毒害有所缓解,但 Se 浓度过高时幼苗生长较弱,部分叶片出现枯萎。与 CK(0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)组相比, $\text{Se}_0\text{-Cd}_{25}$ 处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中光合色素含量和叶绿素 *a/b* 值,叶片、叶柄和根中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性以及谷胱甘肽(GSH)含量总体上显著($P < 0.05$)降低,丙二醛(MDA)含量显著升高。随着 Se 浓度的提高,荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中光合色素含量和叶绿素 *a/b* 值,叶片、叶柄和根中 SOD 和 POD 活性以及 GSH 含量总体呈先升高后降低的趋势;叶片和叶柄中 MDA 含量呈先降低后略有升高的趋势,根中 MDA 含量呈逐渐降低的趋势;叶片、叶柄和根中 Se 含量呈逐渐升高的趋势,Cd 含量呈先降低后升高的趋势。6 个处理组中, $\text{Se}_{24}\text{-Cd}_{25}$ (24 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中光合色素含量和叶绿素 *a/b* 值最高,叶片、叶柄和根中 MDA 含量较低,叶片中 Cd 含量最低; $\text{Se}_{12}\text{-Cd}_{25}$ (12 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)和 $\text{Se}_{24}\text{-Cd}_{25}$ 处理组叶片、叶柄和根中 SOD 和 POD 活性以及 GSH 含量较高,叶柄和根中 Cd 含量最低。总体上看,各处理组 SOD 和 POD 活性以及 GSH 和 Cd 含量在叶片中最高,在叶柄中次之,在根中最低;MDA 含量在根中最高,在叶柄中次之,在叶片中最低;Se 含量则在叶片中最高,在根中次之,在叶柄中最低。研究结果表明:适宜浓度(12~24 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)的 Se 预处理可以有效缓解 Cd 胁迫对荷花品种‘微山湖红莲’幼苗的毒害,有助于提高其对 Cd 的耐性。

关键词: 硒预处理; 镉胁迫; 荷花品种‘微山湖红莲’; 生长; 生理

中图分类号: Q945.78; S682.32; X52 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)02-0064-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.02.09

Effect of selenium pretreatment on growth and physiology of *Nelumbo nucifera* seedlings under

cadmium stress WANG Haixi, ZHOU Haomin, LI Liuyan, QIU Linxiang, WANG Yanjie, XU Yingchun^① (College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(2): 64-70

Abstract: Effects of selenium (Se) pretreatment at different concentrations (0, 3, 6, 12, 24, and 48 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se) on growth and physiological characteristics of seedlings of cultivar ‘Weishanhuhonglian’ of *Nelumbo nucifera* Gaertn. under cadmium (Cd) stress (25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd) were investigated. The results show that Cd toxicity to seedlings of cultivar ‘Weishanhuhonglian’ of *N. nucifera* in $\text{Se}_0\text{-Cd}_{25}$ (0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd) treatment group is the most serious, and the blades are yellowing. With enhancing of Se concentration, Cd toxicity to seedlings is alleviated, but when Se concentration is too high, the seedling growth is relatively weak, and some of blades appear withered. Compared with CK (0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd) group, photosynthetic pigment content and chlorophyll *a/b* value in blade, and activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) and glutathione (GSH)

收稿日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31400600); 南京农业大学 SRT 计划项目(1714A03); 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(16)1024]

作者简介: 王海希(1998—),女,湖北武汉人,本科,主要从事荷花重金属方面的研究。

^①通信作者 E-mail: xyc@njau.edu.cn

content in blade, petiole, and root of seedlings of cultivar 'Weishanhuhonglian' of *N. nucifera* in $\text{Se}_0\text{-Cd}_{25}$ treatment group decrease significantly ($P < 0.05$) in general, and MDA content increases significantly. With enhancing of Se concentration, photosynthetic pigment content and chlorophyll *a/b* value in blade, SOD and POD activities and GSH content in blade, petiole, and root of seedlings of cultivar 'Weishanhuhonglian' of *N. nucifera* generally show a tendency of first increase and then decrease; MDA content in blade and petiole shows a tendency of first decrease and then increase slightly, while that in root shows a tendency of decrease gradually; Se content in blade, petiole, and root shows a tendency of increase gradually, while Cd content shows a tendency of first decrease and then increase. Among 6 treatment groups, photosynthetic pigment content and chlorophyll *a/b* value in blade of seedlings of cultivar 'Weishanhuhonglian' of *N. nucifera* in $\text{Se}_{24}\text{-Cd}_{25}$ ($24 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se- $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd) treatment group are the highest, while MDA content in blade, petiole, and root is relatively low, and Cd content in blade is the lowest; SOD and POD activities and GSH content in blade, petiole, and root in $\text{Se}_{12}\text{-Cd}_{25}$ ($12 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se- $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd) and $\text{Se}_{24}\text{-Cd}_{25}$ treatment groups are relatively high in general, while Cd content in petiole and root is the lowest. Overall, SOD and POD activities and GSH and Cd contents are the highest in blade, come second in petiole, and are the lowest in root in each treatment group; MDA content is the highest in root, comes second in petiole, and is the lowest in blade; Se content is the highest in blade, comes second in root, and is the lowest in petiole. It is suggested that proper concentration ($12\text{-}24 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) of Se pretreatment can effectively alleviate the toxicity of Cd stress on seedlings of cultivar 'Weishanhuhonglian' of *N. nucifera*, and can help to enhance its tolerance to Cd.

Key words: selenium pretreatment; cadmium stress; cultivar 'Weishanhuhonglian' of *Nelumbo nucifera* Gaertn.; growth; physiology

水体重金属污染是十分严重的环境污染问题之一,因其具有持久性、难降解性及对生态系统的环境毒性,在国内外广受关注^[1]。重金属可通过鱼类和贝类等食物链传递作用在人体内累积,最终危害人类身体健康^[2-3],骨痛病[镉(Cd)毒害]和水俣病[汞(Hg)毒害]就是水体重金属污染所致。Cd是毒性较大的重金属之一,微量的Cd在水体中就能产生毒性效应^[4]。

植物修复作为一种近年来新兴的治理重金属污染的方法,不仅具有能耗少、污染小和材料易获得等优点,还能提升景观效果,实现生态修复的最大效益^[5]。Cd通过根系进入植物组织,然后通过运输积累在根、叶柄、叶和籽实中^[6]。大型水生植物不仅能富集多种类型重金属和吸收降解某些有机污染物,还能抑制藻类生长,促进其他水生生物代谢,对污染物降解有积极作用^[7]。荷花(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)隶属于莲科(Nelumbonaceae)莲属(*Nelumbo* Adans.),为多年生宿根挺水花卉,在中国分布广泛,形态优美,用途多样,在城市水景营造中更是不可或缺。宋力等^[8]认为,荷花对底泥中Cd的去除效果优于睡莲(*Nymphaea tetragona* Georgi)。荷花既能够富集水体中的Cd,又具有一定的耐受Cd能力^[9-10]。Cd胁迫下荷花会调动体内的抗氧化酶系统,提高组织内超氧

化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性,说明荷花具有抵抗Cd污染的潜在能力^[11]。

硒(Se)是动植物生命活动所必需的微量元素之一^[12],不仅能够影响植物的生长发育,调节光合作用和呼吸作用,抵御植物体内的自由基伤害并提高植物的抗逆能力,还对Cd等重金属具有拮抗作用,在一定程度上能够缓解重金属对植物的毒害^[13]。已有研究表明:Se能够与Cd产生拮抗效应,降低植物体内Cd的毒性^[14-18]。例如,Se能通过调节叶绿素荧光、渗透物积累和抗氧化系统减轻番茄(*Solanum lycopersicum* Linn.)体内Cd诱导的氧化应激反应^[16],还能通过促进抗氧化反应减轻向日葵(*Helianthus annuus* Linn.)幼苗Cd中毒的现象^[17]。周健等^[18]认为,Se具有促进小油菜(*Brassica rapa* var. *oleifera* DC.)生长,抑制Cd在小油菜体内的积累,以及增强小油菜生理特性等功能。然而,对于Se缓解Cd毒害的研究主要集中在陆生植物,有关水生植物的研究鲜见报道。

本文研究了Se预处理对Cd胁迫下荷花品种'微山湖红莲'('Weishanhuhonglian')幼苗生长和生理的影响,以期揭示Se缓解荷花幼苗Cd毒害的生理机制,并为城市水体景观营造及重金属污水处理提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试荷花品种‘微山湖红莲’种子来自山东省济宁市微山县荷都水生花卉基地,于2017年7月对种子进行催芽处理,待长出细根和2~3枚小荷叶后,选取生长良好且长势基本一致的幼苗,移栽到内径40 cm、高35 cm的无孔聚乙烯塑料盆中,每盆4株,每盆装15 kg 田园土,盆内注入去离子水,水位高出土面8 cm。上盆后放置在南京农业大学生科楼楼顶的塑料大棚内,自然光照。每隔48 h用去离子水补齐蒸发散失的水分,始终保持盆内水位高度一致。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 缓苗1周后,于2017年8月开始进行Se预处理,每隔7 d添加1次,每次添加浓度分别为0、3、6、12、24、48 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。供试Se源为亚硒酸钠(Na_2SeO_3) (美国Sigma公司)。Se预处理3周后进行Cd胁迫处理。供试Cd源为硝酸镉 [$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$] (美国Sigma公司),参考作者所在实验室前人的研究结果^[11]及预实验结果,设置Cd浓度为25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。采用随机区组设计,每盆为1个重复,每个处理3个重复。

1.2.2 取样方法 在Cd胁迫处理期间,每天观察荷花植株受害情况,包括植株生长情况和叶片失绿情况等。Cd胁迫48 h后叶片出现受害症状,然后进行取样。先用去离子水洗净植株表面的附着物,再用剪刀将叶片、叶柄和根分别剪碎,避开叶脉和叶鼻等部位;用万分之一天平分别称取不同处理每个植株的叶片、叶柄和根样品各6份,每份0.2 g,装入锡箔纸中并做好标记,其中3份样品以鲜样的形式经液氮冷冻后放置在-80 °C超低温冰箱中保存,用于生理指标测定;另外3份样品于105 °C杀青30 min,在80 °C烘干至恒质量后称量干质量,粉碎后用于Se和Cd含量测定。

1.2.3 指标测定方法 采用比色法^{[19]54-55}测定叶片中叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的含量,并计算总叶绿素含量(叶绿素a含量和叶绿素b含量之和)和叶绿素a/b值(叶绿素a含量与叶绿素b含量的比值)。测定叶片、叶柄和根鲜样中丙二醛(MDA)含量、SOD和POD的活性以及谷胱甘肽(GSH)含量。其中,MDA含量采用硫代巴比妥酸比色法^[20]测定;SOD活性采用氮蓝四唑法^{[19]182-183}测定;POD活性采

用愈创木酚法^{[19]184-185}测定;GSH含量采用DTNB直接显色法^{[19]191-192}测定。采用ICP发射光谱法^{[19]44-47}测定叶片、叶柄和根干样中Cd和Se的含量。以上指标均重复测定3次,结果取平均值。

1.3 数据处理和统计分析

采用EXCEL 2010和SPSS 21.0软件对实验数据进行分析处理,采用Duncan's新复极差法进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 Se预处理对Cd胁迫下荷花幼苗生长的影响

CK(0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗生长状态较好,叶片翠绿。Se₀-Cd₂₅(0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)处理组的幼苗受Cd毒害最严重,叶片黄化,叶片表面出现灰黑色的圆形斑块。随着Se浓度的提高,叶片黄化现象有所缓解,但添加高浓度Se的处理组(Se₄₈-Cd₂₅,48 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)幼苗生长较弱,部分叶片出现枯萎。

2.2 Se预处理对Cd胁迫下荷花幼苗叶片中光合色素的影响

Se预处理对Cd胁迫下荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中光合色素的影响见表1。由表1可以看出:添加25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd后,荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中光合色素的合成总体上受到显著($P < 0.05$)抑制。与CK(0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)组相比,Se₀-Cd₂₅(0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)处理组叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量以及叶绿素a/b值均显著降低,与肉眼观察的叶片受害情况一致。6个处理组中,随着Se浓度的提高,叶片中叶绿素a含量和叶绿素a/b值呈先升高后降低的趋势,叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量呈先波动升高后降低的趋势。Se₂₄-Cd₂₅(24 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se-25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd)处理组叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量以及叶绿素a/b值在所有处理组中最高,分别较Se₀-Cd₂₅处理组升高255.09%、51.53%、153.89%、47.00%和138.61%。说明适宜浓度的Se预处理能有效提高Cd胁迫下叶片中光合色素含量和叶绿素a/b值,但Se浓度进一步提高,叶片中光合色素含量和叶绿素a/b值均有所降低。

表 1 Se 预处理对 Cd 胁迫下荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中光合色素的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
 Table 1 Effect of Se pretreatment on photosynthetic pigment in blade of seedlings of cultivar ‘Weishanuhonglian’ of *Nelumbo nucifera* Gaertn. under Cd stress ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

浓度/($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Concentration		光合色素含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Photosynthetic pigment content				叶绿素 a/b 值 Chlorophyll a/b value
Se	Cd	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoid	
0	0	10.53±0.33a	5.74±0.53a	16.27±0.49a	1.11±0.08a	1.85±0.19a
0	25	2.65±0.53c	2.62±0.50d	5.27±1.00e	0.66±0.21cd	1.01±0.09b
3	25	5.49±1.08b	2.87±0.38cd	8.36±1.45d	0.75±0.09cd	1.90±0.14a
6	25	5.85±0.94b	2.92±0.31cd	8.77±1.25cd	0.85±0.09bc	2.00±0.11a
12	25	5.85±1.03b	2.75±0.20cd	8.59±0.99cd	0.78±0.01cd	2.14±0.44a
24	25	9.41±0.77a	3.97±0.79b	13.38±2.04b	0.97±0.08ab	2.41±0.52a
48	25	7.17±0.34b	3.63±0.35bc	10.79±0.35c	0.62±0.04d	2.00±0.26a

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference.

2.3 Se 预处理对 Cd 胁迫下荷花幼苗不同部位中 MDA 含量、抗氧化酶活性和 GSH 含量的影响

Se 预处理对 Cd 胁迫下荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中 MDA 含量、SOD 和 POD 活性以及 GSH 含量的影响见表 2。

2.3.1 对 MDA 含量的影响 由表 2 可以看出: $\text{Se}_0\text{-Cd}_{25}$ ($0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Se}-25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}$) 处理组

荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片、叶柄和根中 MDA 含量均显著 ($P < 0.05$) 高于 CK ($0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Se}-0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}$) 组, 分别较 CK 组升高 29.26%、56.06% 和 65.10%。6 个处理组中, 随着 Se 浓度的提高, 叶片和叶柄中 MDA 含量呈先降低再略有升高的趋势, 根中 MDA 含量则呈持续降低的趋势。从不同部位看, 除 $\text{Se}_{48}\text{-Cd}_{25}$ ($48 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Se}-25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

表 2 Se 预处理对 Cd 胁迫下荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中丙二醛 (MDA) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性以及谷胱甘肽 (GSH) 含量的影响 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾
 Table 2 Effect of Se pretreatment on malondialdehyde (MDA) content, activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), and glutathione (GSH) content in different parts of seedlings of cultivar ‘Weishanuhonglian’ of *Nelumbo nucifera* Gaertn. under Cd stress ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

浓度/($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Concentration		不同部位中 MDA 含量/($\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$) MDA content in different parts			不同部位中 SOD 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$) SOD activity in different parts		
Se	Cd	叶片 Blade	叶柄 Petiole	根 Root	叶片 Blade	叶柄 Petiole	根 Root
0	0	2.70±0.14bC	7.51±0.61cdB	15.33±0.60cA	310.97±3.86bA	291.43±7.37abB	149.31±2.57abC
0	25	3.49±0.65aC	11.72±1.19aB	25.31±4.81aA	297.66±0.78cA	268.31±3.21cA	132.81±28.70bcB
3	25	3.38±0.60abC	9.49±0.26bB	22.00±2.29abA	299.49±4.59cA	271.87±0.89cB	146.40±6.55abC
6	25	3.33±0.04abC	8.27±0.21cB	20.15±2.91bA	297.77±5.28cA	287.32±9.66abA	148.24±17.94abB
12	25	1.94±0.19cC	7.73±0.19cB	14.33±1.13cA	321.20±5.68aA	289.20±5.68abB	167.73±19.45aC
24	25	0.99±0.10dC	6.49±0.14dB	9.85±0.37dA	311.98±6.31abA	297.20±9.26aA	120.49±10.91bcB
48	25	1.33±0.47cdB	8.51±0.93bcA	8.21±0.80dA	304.96±7.70bcA	279.17±8.12bcB	109.33±17.04cC

浓度/($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Concentration		不同部位中 POD 活性/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) POD activity in different parts			不同部位中 GSH 含量/($\text{pmol} \cdot \text{g}^{-1}$) GSH content in different parts		
Se	Cd	叶片 Blade	叶柄 Petiole	根 Root	叶片 Blade	叶柄 Petiole	根 Root
0	0	7 221.88±441.36bA	2 450.00±198.95aB	634.38±69.10aC	75.19±22.82aA	11.14±0.59aB	4.41±1.16aB
0	25	4 561.88±169.62dA	1 627.75±14.21dB	323.96±12.63cC	50.85±1.53bcA	6.07±1.99bB	1.93±0.78cC
3	25	5 031.25±178.55dA	1 737.50±46.25cdB	378.13±14.32cC	54.48±4.74bcA	7.66±1.56bB	2.00±0.02cB
6	25	5 881.25±533.33cA	1 672.92±19.09cdB	475.00±32.92bC	59.50±15.12abA	10.59±1.26aB	3.40±0.39abcB
12	25	7 856.25±235.50aA	1 816.67±10.97cB	644.79±17.77aC	78.22±4.15aA	12.55±0.93aB	3.90±1.35abC
24	25	7 675.00±75.20abA	1 996.88±40.86bB	440.83±29.91bC	65.73±1.91abA	12.62±1.67aB	2.56±0.87bcC
48	25	7 392.71±252.77abA	2 012.50±70.99bB	255.33±25.01dC	37.56±1.69cA	11.84±2.74aB	2.67±0.58bcC

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示不同处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different treatment groups; 同行中不同的大写字母表示不同部位间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different parts.

Cd)处理组外,其他5个处理组和CK组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗根中MDA含量最高,叶柄中MDA含量次之,叶片中MDA含量最低,且3个部位间MDA含量存在显著差异;Se₄₈-Cd₂₅处理组叶柄和根中MDA含量显著高于叶片中MDA含量,但叶柄和根间MDA含量差异不显著。

2.3.2 对SOD活性的影响 由表2还可以看出:总体上看,除Se₁₂-Cd₂₅(12 μmol·L⁻¹ Se-25 μmol·L⁻¹ Cd)和Se₂₄-Cd₂₅(24 μmol·L⁻¹ Se-25 μmol·L⁻¹ Cd)处理组外,其他4个处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片、叶柄和根中SOD活性均低于CK组;6个处理组中,随着Se浓度的提高,叶片、叶柄和根中SOD活性基本呈先升高后降低的趋势,且Se₁₂-Cd₂₅处理组不同部位中SOD活性较高。从不同部位看,6个处理组和CK组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中SOD活性最高,叶柄中SOD活性次之,根中SOD活性最低,且叶片和叶柄中SOD活性显著高于根中SOD活性。

2.3.3 对POD活性的影响 由表2还可以看出:Se₀-Cd₂₅处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片、叶柄和根中POD活性均显著低于CK组。6个处理组中,随着Se浓度的提高,叶片和根中POD活性呈先升高后降低的趋势,且在Se₁₂-Cd₂₅处理组中最高;叶柄中POD活性基本呈逐渐升高的趋势。从不同部位看,6个处理组和CK组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中POD活性最高,叶柄中POD活性次之,根中POD活性最低,且3个部位间POD活性存在显著差异。

2.3.4 对GSH含量的影响 由表2还可以看出:

Se₀-Cd₂₅处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片、叶柄和根中GSH含量均显著低于CK组。6个处理组中,随着Se浓度的提高,叶片、叶柄和根中GSH含量基本呈先升高后降低的趋势,且Se₁₂-Cd₂₅处理组不同部位中GSH含量较高。从不同部位看,6个处理组和CK组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中GSH含量最高,叶柄中GSH含量次之,根中GSH含量最低,且叶片中GSH含量显著高于叶柄和根中GSH含量。

2.4 Se预处理对Cd胁迫下荷花幼苗不同部位中Se和Cd含量的影响

Se预处理对Cd胁迫下荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中Se和Cd含量的影响见表3。

2.4.1 对Se含量的影响 由表3可以看出:随着Se浓度的提高,荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中Se含量均呈逐渐升高的趋势。从不同部位看,各处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中Se含量最高,根中Se含量次之,叶柄中Se含量最低。

2.4.2 对Cd含量的影响 由表3还可以看出:6个处理组中,随着Se浓度的提高,荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片、叶柄和根中Cd含量均呈先降低后升高的趋势,其中,Se₂₄-Cd₂₅(24 μmol·L⁻¹ Se-25 μmol·L⁻¹ Cd)处理组叶片中Se含量最低,Se₁₂-Cd₂₅(12 μmol·L⁻¹ Se-25 μmol·L⁻¹ Cd)和Se₂₄-Cd₂₅处理组叶柄和根中Cd含量较低,且均较Se₀-Cd₂₅(0 μmol·L⁻¹ Se-25 μmol·L⁻¹ Cd)处理组显著($P < 0.05$)降低。从不同部位看,6个处理组中Se₂₄-Cd₂₅处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶柄和根中Cd含量较高,叶片中Cd含量较低;其他处理组均为叶片

表3 Se预处理对Cd胁迫下荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中Se和Cd含量的影响($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 3 Effect of Se pretreatment on contents of Se and Cd in different parts of seedlings of cultivar ‘Weishanuhonglian’ of *Nelumbo nucifera* Gaertn. under Cd stress ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

浓度/(μmol·L ⁻¹) Concentration		不同部位中Se含量 Se content in different parts			不同部位中Cd含量 Cd content in different parts		
Se	Cd	叶片 Blade	叶柄 Petiole	根 Root	叶片 Blade	叶柄 Petiole	根 Root
0	0	—	—	—	0.33±0.01fA	0.35±0.02fA	—
0	25	—	—	—	1061.34±17.10aA	550.22±2.64aB	450.50±100.79aC
3	25	6.26±0.07eA	3.33±1.00dB	4.04±0.10eB	447.47±24.29bA	445.14±7.25bA	359.01±5.65bB
6	25	10.94±0.54dA	7.74±0.47dB	10.18±0.47dA	373.92±18.46cA	337.20±13.91cAB	327.23±4.30cB
12	25	20.85±0.58cA	13.63±0.74cB	19.91±0.74cA	232.55±20.83dA	81.38±2.40eB	78.80±12.77eB
24	25	32.08±0.02bA	24.06±1.16bB	25.80±1.16bB	57.39±10.48eB	89.97±8.80eB	87.76±3.76eA
48	25	68.71±0.91aA	55.94±2.69aB	56.21±2.69aB	242.48±15.42dA	215.28±19.59dB	126.66±50.67dC

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示不同处理组间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different treatment groups; 同行中不同的大写字母表示不同部位间差异显著($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different parts. —: 表示含量极低,可忽略 Indicating content is so low, and can be ignored.

中 Cd 含量最高,叶柄中 Cd 含量次之,根中 Cd 含量最低。

3 讨 论

本研究中,未进行 Se 预处理的荷花品种‘微山湖红莲’幼苗在 Cd 胁迫后叶片失绿并出现焦枯黄化以及灰黑色圆形斑块,这与袁满等^[11]的研究结果相似,而经过 Se 预处理的幼苗生长状态较好,叶片焦枯黄化状态有所缓解。在一定范围内,随着 Se 浓度的提高,缓解效果越明显,但添加高浓度 Se 的处理组 ($Se_{48}-Cd_{25}$, $48 \mu mol \cdot L^{-1} Se-25 \mu mol \cdot L^{-1} Cd$) 又对荷花品种‘微山湖红莲’幼苗有所伤害。植株叶片颜色是叶绿素含量的表观指标,在小白菜 (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* Linn.)^[21] 和胡萝卜 (*Daucus carota* var. *sativa* Hoffm.)^[22] 等植物中发现 Se 能够提高其光合色素含量。本研究结果显示: $Se_{24}-Cd_{25}$ ($24 \mu mol \cdot L^{-1} Se-25 \mu mol \cdot L^{-1} Cd$) 处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片中光合色素含量最高,可以维持正常的光合作用和能量代谢,说明 Se 能增强植株对 Cd 的耐性,减缓光合色素的降解^[15]。而 $Se_{48}-Cd_{25}$ 处理组叶片中光合色素含量降低,推测在重金属 Cd 毒害及高浓度 Se 作用下,对幼苗造成毒害作用,二者共同抑制光合色素合成,导致其含量下降。李登超等^[23]对菠菜 (*Spinacia oleracea* Linn.) 和小白菜的研究结果也表明:低浓度 Se 促进菠菜和小白菜的生长,而高浓度 Se 抑制二者的生长,与荷花均存在“低促高抑”的现象。

植物受到重金属胁迫后,体内会诱导产生大量的活性氧,破坏细胞内大分子物质,植株体内活性氧代谢平衡遭到破坏,面对这一情况,植物体内抗氧化活性系统积极调节代谢,提高 SOD 和 POD 活性^[24],并进一步提高 GSH 含量,使 GSH 通过螯合或络合方式与金属离子相结合,形成稳定的化合物,降低游离态金属离子在细胞内的浓度并清除重金属胁迫诱导的自由基,保护细胞免遭伤害^[25]。本研究中, Se_0-Cd_{25} ($0 \mu mol \cdot L^{-1} Se-25 \mu mol \cdot L^{-1} Cd$) 处理组荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中 MDA 含量较 CK ($0 \mu mol \cdot L^{-1} Se-0 \mu mol \cdot L^{-1} Cd$) 组显著 ($P<0.05$) 升高,SOD 和 POD 活性以及 GSH 含量总体上较 CK 组显著降低,说明 Cd 胁迫下幼苗受到了严重胁迫,植株体内活性氧的代谢平衡被打破,细胞受到伤害。

总体上看,随着 Se 浓度的提高,荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中 MDA 含量呈先降低后升高的趋势,SOD 和 POD 活性以及 GSH 含量呈先升高后降低的趋势。荷花品种‘微山湖红莲’幼苗叶片和叶柄中 MDA 含量在 $Se_{24}-Cd_{25}$ 处理组最低,在 $Se_{48}-Cd_{25}$ 处理组略有回升,说明添加适宜浓度的 Se 能有效缓解 Cd 胁迫对幼苗造成的毒害作用,而 Se 浓度过高则不利于幼苗生长;叶片和根中 SOD 和 POD 活性以及 GSH 含量在 $Se_{12}-Cd_{25}$ ($12 \mu mol \cdot L^{-1} Se-25 \mu mol \cdot L^{-1} Cd$) 处理组最高,叶柄中 SOD 和 POD 活性以及 GSH 含量在 $Se_{24}-Cd_{25}$ 处理组较高,说明 SOD 和 POD 能协调配合清除荷花幼苗体内的活性氧,使自由基维持动态平衡,且 GSH 与 Cd 螯合,将植物体内的游离态的 Cd 转化为无毒的化合物,最终有效减轻 Cd 胁迫,而 Se 浓度过高时,Se 和 Cd 协同发生毒害作用,对幼苗造成危害。

随着 Se 浓度的提高,荷花品种‘微山湖红莲’幼苗不同部位中 Cd 含量呈先降低后升高的趋势, $Se_{12}-Cd_{25}$ 和 $Se_{24}-Cd_{25}$ 处理组对不同部位中 Cd 含量的抑制效果最为明显,推测 Se 能与 Cd 形成化合物,使植物体内游离态 Cd 的浓度下降,减少各部位对 Cd 的吸收和累积;而 $Se_{48}-Cd_{25}$ 处理组中 Se 浓度过高,各部位中 Cd 含量回升,说明低浓度 Se 能有效缓解荷花幼苗的 Cd 毒害,而高浓度 Se 则加重幼苗的 Cd 毒害。张海英等^[26]对草莓 (*Fragaria × ananassa* Duch.) 研究发现,外源施加 Se 可有效控制 Cd 的积累。陈彪等^[27]认为,外源 Se 能够缓解烤烟 (*Nicotiana tabacum* Linn.) 受干旱胁迫的伤害,提高叶片中光合色素含量、抗氧化酶活性和 GSH 含量,降低 MDA 的积累。但杨英豪^[28]认为,水生植物睡莲根中的 Cd 含量最高。本研究中,荷花品种‘微山湖红莲’叶片中 Cd 含量基本高于叶柄和根,且随着 Se 浓度的提高,叶片中 Cd 含量的下降速率最快,推测这可能与植物种类以及同一植物不同部位对 Cd 的吸收、累积和转运存在差异有关^[6]。

综上所述,添加适宜浓度 Se ($12 \sim 24 \mu mol \cdot L^{-1}$) 可对 Cd 产生拮抗,并通过提高荷花品种‘微山湖红莲’幼苗中抗氧化酶活性和 GSH 含量来降低植株体内 Cd 含量,进而减弱膜脂过氧化作用及光合色素含量的降解,从而缓解 Cd 胁迫对其幼苗生长的毒害作用,提高荷花品种‘微山湖红莲’幼苗的 Cd 耐性。

参考文献:

- [1] YUAN G L, LIU C, CHEN L, et al. Inputting history of heavy metals into the inland lake recorded in sediment profiles: Poyang Lake in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185(1): 336-345.
- [2] FERNANDES A R, MORTIMER D N, ROSE M, et al. Occurrence of dioxins (PCDDs, PCDFs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in wild, farmed and processed fish, and shellfish [J]. *Food Additives and Contaminants: Part B*, 2009, 2(1): 15-20.
- [3] ROSE M, FERNANDES A, MORTIMER D, et al. Contamination of fish in UK fresh water systems: risk assessment for human consumption [J]. *Chemosphere*, 2015, 122: 183-189.
- [4] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势 [J]. *环境科学学报*, 2003, 23(5): 561-569.
- [5] 刘伸伸, 张震, 何金铃, 等. 水生植物对氮磷及重金属污染水体的净化作用 [J]. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(5): 910-919.
- [6] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1317-1321.
- [7] 种云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(2): 36-40.
- [8] 宋力, 黄勤超, 黄民生. 利用荷花与睡莲对沉积物中重金属的修复研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(9): 2884-2888.
- [9] 施雪黎. 水湿植物中Cd和Pb的积累研究 [D]. 杭州: 浙江大学农学院, 2016: 27-30.
- [10] 孔德政, 裴康康, 李永华, 等. 铅、镉和锌胁迫对荷花生理生化影响 [J]. *河南农业大学学报*, 2010, 44(4): 402-407.
- [11] 袁满, 徐迎春, 牛叶青, 等. 乙烯与NO交互对镉胁迫下荷花的抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3433-3440.
- [12] 朱善良. 硒的生物学作用及其研究进展 [J]. *生物学通报*, 2004, 39(6): 6-8.
- [13] 王丽霞. 硒元素的植物生理作用及生理机制研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(1): 31-32, 47.
- [14] 廖琳, 胡晓荣, 李晖, 等. 生态环境中镉对生物体毒性作用机理及硒对该毒性拮抗作用的研究进展 [J]. *四川环境*, 2002, 21(2): 21-24.
- [15] 袁思莉, 余垚, 万亚男, 等. 硒缓解植物重金属胁迫和累积的机制 [J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(6): 545-550.
- [16] ALYEMENI M N, AHANGER M A, WIJAYA L, et al. Selenium mitigates cadmium-induced oxidative stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants by modulating chlorophyll fluorescence, osmolyte accumulation, and antioxidant system [J]. *Protoplasma*, 2018, 255(2): 459-469.
- [17] SAIDI I, CHTOUROU Y, DJEBALI W. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sun flower (*Helianthus annuus*) seedlings [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(5): 85-91.
- [18] 周健, 郝苗, 刘永红, 等. 不同价态硒缓解小油菜镉胁迫的生理机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2): 444-450.
- [19] 蔡庆生. 植物生理学实验 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [20] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进 [J]. *植物生理学通讯*, 1994, 30(3): 207-210.
- [21] 薛瑞玲, 梁东丽, 吴雄平, 等. 亚硒酸钠和硒酸钠对小白菜生长生理特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2010, 30(5): 974-980.
- [22] 王晋民, 赵之重, 李国荣. 硒对胡萝卜含硒量、产量及品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 240-244.
- [23] 李登超, 朱祝军, 韩秋敏, 等. 硒对菠菜、小白菜生长及抗氧化活性的研究 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2003, 21(1): 5-8.
- [24] 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.
- [25] 邢艳帅, 朱桂芬. 重金属对水生生物的生态毒理效应及生物耐受机制研究进展 [J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(3): 13-26.
- [26] 张海英, 韩涛, 田磊, 等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响 [J]. *园艺学报*, 2011, 38(3): 409-416.
- [27] 陈彪, 李继伟, 王小东, 等. 外源硒对干旱胁迫下烤烟生长和生理特性的影响 [J]. *植物生理学报*, 2018, 54(1): 165-172.
- [28] 杨英豪. 重金属镉胁迫对睡莲生理生态效应的研究 [D]. 南京: 南京农业大学园艺学院, 2013: 30.

(责任编辑: 张明霞)