

文章编号:2095-0411(2016)03-0048-06

硫对镉胁迫下蓖麻生理生化特性的影响

李 君,葛 跃,孙向武,王明新,赵兴青
(常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:以淄蓖麻 5 号为供试材料,采用营养液培养方法,研究了不同硫(S)浓度下(0、0.5、1、2 mmol · L⁻¹)镉(Cd) (50 μmol · L⁻¹)胁迫对蓖麻叶片生理特性的影响。结果表明:适度施硫降低了镉胁迫下蓖麻叶片中过氧化氢(H₂O₂)和丙二醛(MDA)含量,提高了叶片中关键酶的活性和抗氧化物质的含量;1 mmol · L⁻¹的硫处理使镉胁迫下蓖麻叶片中的 MDA 和 H₂O₂ 含量分别降低了 30.43% 和 39.22%;镉胁迫下低浓度硫处理对蓖麻叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性影响不明显,但高浓度硫(2 mmol · L⁻¹)处理明显抑制了蓖麻叶片 SOD 活性。当硫处理水平为 0.5 mmol · L⁻¹时,叶片过氧化物酶(POD)活性达到最高。之后,POD 活性开始下降,说明高浓度硫处理使 POD 也受到损伤,进而对蓖麻叶片细胞产生毒害作用。由此可见,硫缓解镉毒害存在剂量效应关系;当硫处理浓度为 2 mmol · L⁻¹时,抗坏血酸(AsA)和还原型谷胱甘肽(GSH)含量均达到峰值。这表明硫显著提高了蓖麻叶片中的 AsA 和 GSH 含量,从而促进植物体内 H₂O₂ 等活性氧的清除,减缓镉对蓖麻叶片的毒害,进而提高蓖麻对镉的耐性。可见,硫可通过调节蓖麻叶片中的抗氧化酶活性和抗氧化剂代谢来提高对镉胁迫的耐性。

关键词:蓖麻;镉胁迫;硫;生理生化特征

中图分类号:TQ 316.334

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.03.010

Regulation of Exogenous Sulfur on Physiological and Biochemical Characteristics of Ricinus Communis L. under Cd Stress

LI Jun, GE Yue, SUN Xiangwu, WANG Mingxin, ZHAO Xingqing

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to investigate physiological and biochemical indexes in leaves of Ricinus communis (Zibima 5) with Cd doses of 50 μmol · L⁻¹ and different sulfur treatment (0, 0.5, 1, 2 mmol · L⁻¹) in nutrient solution. The results indicated that reasonable application of sulfur decreased the contents of peroxide (H₂O₂) and malondialdehyde (MDA), but increased key enzymes activities and antioxidants content in leaves of Ricinus communis. Compared with the control, the contents of MDA and H₂O₂ in leaves were decreased by 30.43% and 39.22% with 1 mmol · L⁻¹ of sulfur treatment, respectively. There was no significant effect on the activity of SOD in leaves of Ricinus communis with lower concentration of S(0.5, 1 mmol · L⁻¹). While the activity of SOD was obviously inhibited when exposed to higher level of S(2 mmol · L⁻¹). The activity of POD reached the highest with 0.5 mmol · L⁻¹ of sulfur treatment. After that, the activity of POD began to decline. The high concentrations of S did damage to POD, which was harmful the leaves of Ricinus communis. That is, there exists dose effects on alleviating toxicity of cadmium under sulfur treatment. The contents of AsA and GSH reached the peak in

收稿日期:2015-04-04。

基金项目:江苏省高校自然科学基金项目(14KJB610001);国家自然科学基金资助项目(41302025)。

作者简介:李君(1990—),女,河南洛阳人,硕士生。通讯联系人:王明新(1979—),E-mail:wmxcu@163.com

the $2\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ sulfur level, This indicated that, in presence of exogenous sulfur significantly increased the contents of AsA and GSH, so as to promote the removal of active oxygen such as H_2O_2 , which helps to alleviate the toxicity of Cd, and improved the *Ricinus communis* on Cd tolerance. This may be one of the important reasons to alleviate the toxicity of Cd. The above conclusions provide a new insight into antioxidant enzymes activities and antioxidants metabolism involving in Cd tolerance and detoxification in *Ricinus communis* under the control of sulfur.

Key words: *Ricinus communis* L; cadmium stress; sulfur; physiological-biochemical characteristics

随着工农业生产的发展,三废排放、矿产开发、污水灌溉以及农药和化肥的使用,土壤、水体、大气已经受到严重污染。根据环境保护部和国土资源部2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》,耕地土壤点位超标率为19.4%,主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和多环芳烃,其中镉的污染最为严重,它是一种具有高迁移率的有毒重金属,即使在较低浓度水平下也会对植物、动物、微生物等产生危害,还可以通过生物富集和食物链危害人类的健康^[1]。

如何安全利用受污染土地资源逐渐开始受到关注。有研究表明,部分能源作物对重金属具有较好的耐性,且生物量较大,有望用于修复和利用重金属污染土壤^[2]。利用污染的土壤开发能源作物,不仅能够使土壤中的重金属远离食物链,而且还能够逐渐恢复土壤环境质量和生产力,还能为生物质液体燃料工业提供原料,因此具有较好的环境、能源和经济效益,有着良好的应用前景。

利用镉污染土壤种植能源作物,需调控镉污染胁迫作用,以保证能源作物的正常生长。近年来,许多学者研究了氮、磷、硫、铁、硅和硒等矿质元素对植物镉胁迫的影响^[3-8]。硫是植物和动物必需的营养元素,被认为是继氮、磷和钾之后的第4位对植物正常生长和发育起着重要作用的营养元素。此外,金属硫蛋白在清除植物体内氧自由基方面具有重要意义,它可以显著降低由于重金属胁迫引起的脂质过氧化过程^[9],提高植物中的硫含量有助于增强植物对镉胁迫的抗性 or 耐性^[10-13]。然而,关于外源硫如何调控植株的生理响应以提高植株镉胁迫下的耐受性与适应性还鲜见报道。本研究通过营养液培养试验,研究不同浓度的外源硫对镉胁迫下蓖麻叶片生理生化特征的影响,为解释硫对蓖麻体内镉的解毒机理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

选用淄蓖麻5号品种为试验材料,种子由山东淄博农业科学研究院提供。挑选饱满的淄蓖麻5号种子经日晒后直接播种于潮湿的石英砂中,待其长出真叶后,将其移入装有1/4 Hoagland 营养液的塑料盆中进行培养,试验采用容器长×宽×高为 $28\text{cm} \times 19\text{cm} \times 8\text{cm}$ 的塑料盆,每盆6个植株,正常管理。培养15d后选取长势比较均一的幼苗进行处理。镉、硫分别以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 和 Na_2SO_4 形式加入原来的1/4 Hoagland 营养液基础上进行处理。实验设定以下5个处理,各处理均设3次重复:CK(不加镉和硫),S0(镉: $50\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),S1(镉: $50\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,硫: $0.5\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),S2(镉: $50\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,硫: $1\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),S3(镉: $50\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,硫: $2\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)。全部实验处理置于全封闭光照培养箱中培养,光周期为12h:12h(L:D),昼夜温度为 $25^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$ 。营养液每3d更换1次,连续通气,培养第12天后取样。选取同一部位的功能叶片,进行各指标测定。

1.2 测定指标与方法

超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定、过氧化物酶(POD)活性的测定以及抗坏血酸(AsA)和还原型谷胱甘肽(GSH)含量的测定均参照陈建勋等的方法^[14];丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[15];过氧化氢(H_2O_2)含量的测定参照张蜀秋等的方法^[16];全部操作在 4°C 下进行。重复3次,取其平均值。

1.3 数据处理与分析

实验数据采用SPSS19统计软件进行回归分析和ANOVA方差显著性分析,采用OriginPro 8绘制图形。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度 S 处理对镉胁迫下蓖麻叶片 MDA 和 H_2O_2 含量的影响

植物在逆境胁迫下会因活性氧代谢平衡失调,发生细胞膜脂过氧化,影响膜的结构和功能。表 1 显示,其他各处理与 CK 相比,蓖麻叶片 H_2O_2 含量均显著增加($P<0.05$)。说明镉胁迫对蓖麻叶片产生明显的氧化胁迫作用。S1 处理中,叶片 H_2O_2 含量有所下降,但与 S0 相比未达到显著水平($P<0.05$)。S2 处理中, H_2O_2 含量显著降低($P<0.05$),与 S0 和 S1 相比分别下降了 39.22% 和 34.07%($P<0.05$)。然而高浓度硫($2\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理使 H_2O_2 含量又呈上升趋势。这可能与添加过量硫导致的硫酸盐胁迫有关。

MDA 是反映在逆境胁迫下植物细胞膜脂过氧化程度的重要指标^[17]。本研究中,镉胁迫未能对蓖麻叶片 MDA 含量产生显著影响($P<0.05$)(表 1),表明镉胁迫对蓖麻叶片尚未造成显著的膜脂过氧化伤害。低浓度硫($0.5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理,叶片 MDA 含量较 S0 相比虽呈下降趋势,但尚未达到显著水平($P<0.05$),随着硫处理浓度的提高,S2 处理使叶片 MDA 含量显著降低($P<0.05$),与 S0 相比下降幅度达 30.43%。说明 S2 处理中脂质过氧化受到了抑制。然而,高浓度硫($2\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理使叶片 MDA 含量又呈现回升趋势,但与 S2 相比未达到显著水平($P<0.05$)。

表 1 不同处理对蓖麻叶片 H_2O_2 和 MDA 含量的影响

Table 1 Effects of different treatments on H_2O_2 and MDA contents in *Ricinus communis* $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$

处理	H_2O_2	MDA
CK	4.36 ± 0.42	7.87 ± 0.35
S0	12.80 ± 0.14	8.28 ± 0.11
S1	11.80 ± 0.71	7.00 ± 1.15
S2	7.78 ± 2.98	5.76 ± 0.07
S3	10.96 ± 1.46	6.50 ± 0.76

2.2 不同浓度 S 处理对镉胁迫下蓖麻叶片 SOD 和 POD 活性的影响

植物在受到镉胁迫时,体内会产生大量活性氧,进而导致体内蛋白质、膜脂以及其他细胞组分受到严重的伤害。然而,此时植物体本身对这种氧胁迫会表现出相应的适应和抵抗措施,具体体现在其具

有完善的活性氧清除系统。因此,逆境胁迫下,植物体内抗氧化系统清除活性氧水平的高低与植物对重金属的耐性强弱密切相关^[18]。

SOD 和 POD 是植物应对逆境伤害的重要抗氧化酶类。当受到外来胁迫时,植物体内产生大量活性氧自由基。此时,作为植物抗氧化系统第一道防线的 SOD 能够及时并有效地清除氧自由基^[17],其活性的高低变化能够反映出对氧化损伤的修复能力。本研究中,图 1 显示,镉胁迫使蓖麻叶片的 2 种抗氧化酶活性都有所变化。与 CK 相比,SOD 活性在镉胁迫下表现出下降趋势,但与 CK 相比没有达到显著水平。说明在镉胁迫下 SOD 并未起到很好的抗氧化作用。镉胁迫下,不同浓度的硫处理使蓖麻叶片中 SOD 活性虽然呈现出下降的趋势,但与 CK 相比均未达到显著水平($P<0.05$)。说明,低浓度硫处理对蓖麻叶片 SOD 活性无显著毒害作用。但当硫处理浓度达到 $2\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶片 SOD 活性明显受到抑制,与 CK 相比下降幅度达 9.40%($P<0.05$)。表明镉胁迫下,高浓度硫处理对叶片 SOD 活性产生了明显的毒害作用。

作为植物体内另外一种重要的抗氧化保护酶,POD 也可以有效地清除活性氧对植物细胞产生的伤害。另外,在重金属胁迫下,POD 被激活的程度最大,且持续的时间也最长,因此,有建议用 POD 活性的高低作为反映逆境胁迫的灵敏指标^[19]。图 1 显示,POD 在镉胁迫下呈显著性上升,与 CK 相比,增加了 2.19 倍($P<0.05$)。这说明蓖麻叶片可以通过提高 POD 活性来应对镉胁迫,最大限度地减少伤害。从这方面看,蓖麻耐受抗逆性较强,蓖麻在镉胁迫生境下 POD 活性升高,这与韦江玲^[20]的试验结果相似。植物细胞内产生的 $O_2^-\cdot$ 经 SOD 催化反应生成 H_2O_2 ,若 H_2O_2 不及时清除,则叶绿体的光合能力会很快丧失。 H_2O_2 是由具有较高活性的 POD 来清除的^[18]。POD 对逆境胁迫反应灵敏,且在 H_2O_2 等氧自由基的诱导下其活性会升高。镉胁迫导致植物体内产生大量的氧自由基,首先,由 SOD 与其发生歧化反应生成 H_2O_2 后,再由 POD 将 H_2O_2 分解成为 H_2O ,从而抵御镉胁迫对植物体的氧化损伤^[18]。从总体上看,镉胁迫下,随着硫处理浓度的增加,蓖麻叶片中 POD 活性变化较 SOD 酶活性变化明显。叶片 POD 活性随着硫处理浓度的提高呈先升后降的趋势。由图 1 可见,当硫处理水平为 $0.5\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,POD 活性达到最高,较 S0 提高幅度达到 46.17%($P<0.05$)。POD 活性的升

高,能够有效地降低或清除植物体内氧自由基的累积,进而缓解镉胁迫对蓖麻叶片的毒害效应。然而之后,叶片 POD 活性呈现下降趋势,说明硫水平的提高使 POD 受到伤害,S2 较 S0 活性提高 32.91%

($P < 0.05$)。S3 叶片 POD 活性下降较 S1 达到显著水平,下降幅度为 17.13% ($P < 0.05$),与 S0 相比已无显著差异($P < 0.05$)。

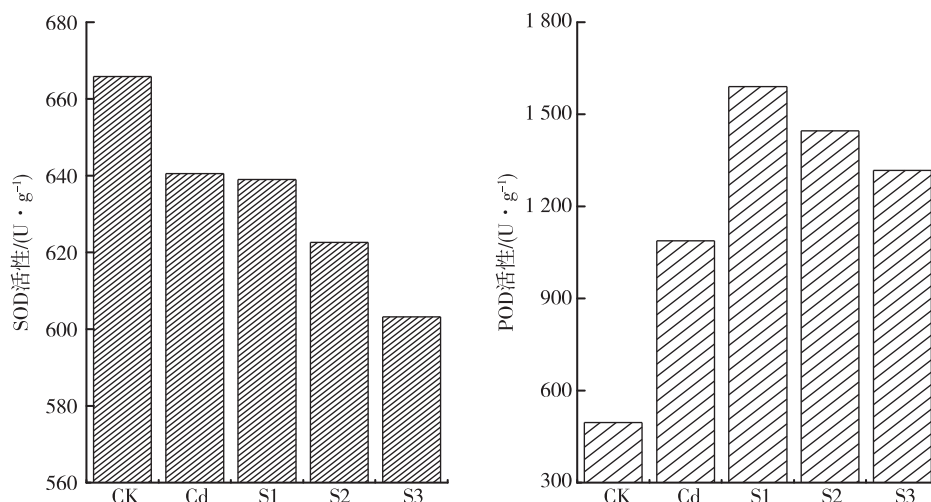


图1 不同处理对蓖麻叶片(鲜重)SOD和POD活性的影响

Fig.1 Effects of different treatments on the activity of SOD and POD in *Ricinus communis* (FW)

2.3 不同浓度S处理对镉胁迫下蓖麻叶片AsA和GSH含量的影响

AsA和GSH作为植物体内2种十分重要的抗氧化物质,在清除植物体内活性氧方面同样发挥着重要的作用。通常情况下AsA和GSH是相偶联起作用的,其中,AsA作为植物细胞中重要的氧化还原缓冲剂^[21],可以直接清除活性氧,在植物抗氧化胁迫中起重要作用。由于镉胁迫会导致活性氧产生并且使植株表现出氧化损伤的症状,因此认为其毒害效应与植物体内的氧化剂水平有关^[22]。所以,有效地清除活性氧以及提高有效清除活性氧酶类的活性和抗氧化物质的含量能够在一定程度上减缓镉毒害效应。许丙军等^[23]的研究发现,AsA能有效地减缓镉胁迫对黑藻的毒害作用。本研究中,图2显示,镉胁迫下蓖麻叶片AsA含量急剧增加,且与CK相比,增加了2.94倍($P < 0.05$)。表明镉胁迫使蓖麻通过提高其AsA含量来应对镉胁迫。镉胁迫下,随着硫的加入,叶片AsA含量继续呈现上升趋势,但低浓度硫处理,AsA含量增加较S0无显著差异($P < 0.05$)。当硫处理浓度为 $2\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,AsA含量达到峰值,与S0和S1相比分别增加了29.22%和23.21%,差异显著($P < 0.05$)。这表明

添加硫能够提高AsA的含量,进而清除镉诱导下产生的 H_2O_2 等活性氧。

GSH作为植物体内的一种还原剂,可以和镉胁迫产生的活性氧直接作用,从而保护植物体内含巯基的蛋白质免受伤害。另外,GSH还是植物螯合肽的合成前体^[24],重金属胁迫下植物体能够大量合成PCs从而结合重金属而起到解毒作用^[25]。因此,GSH含量的提高将有利于减缓镉胁迫产生的毒害作用。由图2可见,镉胁迫下蓖麻叶片GSH含量显著高于CK($P < 0.05$),与CK相比升高了40.08%。GSH还能够防止一些易分解的大分子物质被各种代谢活动过程中产生的氧自由基分解,进而避免造成植株细胞的氧化损伤^[24]。有研究发现杨树中GSH消耗、合成及所处氧化还原状态对忍耐高Zn起着重要作用^[26]。于方明^[27]等的研究也显示,GSH在保护水稻细胞膜的过程中发挥至关重要的作用。由图2可见,镉胁迫下,硫使蓖麻叶片GSH含量持续上升,较S0而言,不同浓度硫处理分别上升了30.43%、47.56%和69.41%($P < 0.05$)。表明供硫水平的提高促进了GSH的生物合成,进而提高了蓖麻植株对镉胁迫的抗性与耐性,这可能是硫缓解镉毒害效应的重要原因之一。

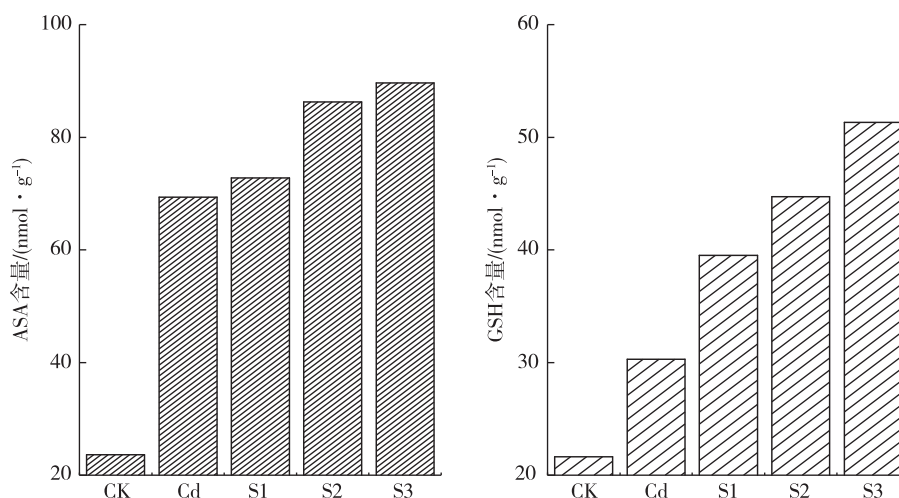


图2 不同处理对蓖麻叶片 AsA 和 GSH 含量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on AsA and GSH contents in *Ricinus communis*

3 结 论

镉胁迫下施加硫可以降低蓖麻叶片 MDA 和 H_2O_2 含量,施硫水平为 $1\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蓖麻叶片中 MDA 和 H_2O_2 含量都显著降低($P < 0.05$);但当硫处理浓度超过一定值时,缓解作用就会下降。表明适当浓度外源硫的存在可缓解镉对蓖麻植株的氧化胁迫。镉胁迫下不同浓度硫处理对蓖麻叶片 SOD 活性影响不明显,但高浓度硫($2\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)处理对蓖麻叶片 SOD 活性产生了明显的毒害作用,与 CK 相比显著下降。当硫处理浓度为 $0.5\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蓖麻叶片 POD 活性达到最高,这说明蓖麻叶片可以通过提高 POD 的活性来应对镉胁迫,最大限度地减少伤害。之后,叶片 POD 活性开始下降,说明高浓度硫处理使 POD 受到伤害。本实验中,硫使蓖麻叶片中 AsA 和 GSH 含量均呈上升趋势,且两者发挥协同作用,为 AsA—GSH 循环的有效运转及活性氧的清除奠定基础,减轻蓖麻叶片细胞的膜脂过氧化程度,进而提高蓖麻对镉的耐性和适应性。

参考文献:

- [1]刘昭兵,纪雄辉,田发祥,等.碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤镉生物有效性的影响及机制[J].环境科学,2011,32(4):1164-1170.
- [2]易自成,贺俊波,程华,等.镉对皇竹草构件生长及生理特性的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(2):276-282.
- [3]CHANG Y S, CHANG Y J, LIN C T, et al. Nitrogen fertilization promotes the phytoremediation of cadmium in *Pentas lanceolata* [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 85:709-714.
- [4]GAO X P, FLATEN D N, TENUTAM, et al. Soil solution dynamics and plant uptake of cadmium and zinc by durum wheat following phosphate fertilization [J]. Plant and Soil, 2011, 338:423-434.
- [5]LIANG J, SHOHAG M J L, YANG X E, et al. Role of sulfur assimilation pathway in cadmium hyperaccumulation by *Sedum alfredii* Hance [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 100: 159 - 165.
- [6]刘俊,周坤,徐卫红,等.外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响[J].环境科学,2013,34(10):4126-4131.
- [7]陈喆,铁柏清,雷鸣,等.施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J].环境科学,2014,35(7):2762-2770.
- [8]郭锋,樊文华,冯两蕊,等.硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响[J].环境科学学报,2014,34(2):524-531.
- [9]孙丽娟,段德超,彭程,等.硫对土壤重金属形态转化及植物有效性的影响研究进展[J].应用生态学报,2014,25(7):2141-2148.
- [10]ANJUM N A, UMAR S, AHMADA, et al. Sulphur protects mustard (*Brassica campestris* L) from cadmium toxicity by improving leaf ascorbate and glutathione [J]. Plant Growth Regulation, 2008, 54:271-279.
- [11]BABULA B, RYANT P, ADAM V, et al. The role of sulphur in cadmium(II) ions detoxification demonstrated in vitro model: *Dionaea muscipula* Ell [J]. Environmental Chemistry Letters, 2009, 7:353-361.

- [12] MISHRA S, TRIPATHI R D, SRIVASTAVAS, et al. Thiol metabolism play significant role during cadmium detoxification by *Ceratophyllum demersum* L. [J]. *Biore-source Technology*, 2009, 100 (7):2155-2161.
- [13] FASSLER E, PLAZA S, PAIRRAUD A, et al. Expression of selected genes involved in cadmium detoxification in tobacco plants grown on a sulphur amended metal-contaminated field [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, 70:158-165.
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [15] 张以顺, 黄霞, 陈云凤. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [16] 张蜀秋. 植物生理学实验技术教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [17] 王娅玲, 李维峰, 苏志龙, 等. 大叶种普洱茶幼苗对镉胁迫的生理响应 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42 (26): 8873-8874, 8877.
- [18] 金璘, 叶亚新, 徐蕊. 复合稀土对 Cd 胁迫下玉米保护酶系统的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37 (17): 7928-7931.
- [19] 刘俊, 廖柏寒, 周航, 等. 镉胁迫对大豆花荚期生理生态的影响 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18 (1):176-182.
- [20] 韦江玲. 镉胁迫对苕荳生理生态特征的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2011, 39 (20):12125-12128.
- [21] 王聪, 朱月林, 杨立飞, 等. NaCl 胁迫对菜用大豆种子抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (5):1209-1216.
- [22] 张佩, 周琴, 孙小芳, 等. 抗坏血酸对镉胁迫下油菜幼苗生长的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27 (6): 2362-2366.
- [23] 许丙军, 施国新, 徐勤松, 等. 外源抗坏血酸对镉胁迫下黑藻抗氧化系统的保护作用 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (9):1768-1770.
- [24] 田丹, 赵文, 王媛, 等. 镉胁迫对两种海洋微藻生长和抗氧化系统的影响 [J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25 (5):417-421.
- [25] SETH C S, CHATURVEDI P K, MISRA V. The role of phytochelutins and antioxidants in tolerance to Cd accumulation in *Brassica juncea* L. [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 71:76-85.
- [26] DI BACCIO D, KOPRIVA S, SEBASTIANI L, et al. Does glutathione metabolism have a role in the defence of poplar against zinc excess [J]. *New Phytologist*, 2005, 167 (1):73-80.
- [27] YU F M, TANG Y T, QIUR L, et al. Antioxidative responses to cadmium stress in the hyperaccumulator *Arabidopsis paniculata* Franch [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30 (2):409-414.

(责任编辑:李艳)

【上接第 47 页】

- [8] SING K S W, EVERETT D H, HAUL R A W, et al. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57: 603-619.
- [9] GREEGG S J, SING K S W. Adsorption, Surface Area and Porosity [M]. London: Academic Press, 1982.
- [10] LIU H H, CAI X Y, WANG Y, et al. Adsorption mechanism-based screening of cyclodextrin polymers for adsorption and separation of pesticides from water [J]. *Water Research*, 2011, 45: 3499-3511.
- [11] CHEN L, BAI B. Equilibrium, kinetic, thermodynamic, and in situ regeneration studies about methylene blue adsorption by the raspberry-like TiO_2 @yeast microspheres [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52: 15568-15577.
- [12] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1918, 40: 1361-1403.
- [13] FREUNDLICH H M F. Über die adsorption in losungen [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1906, 57: 385-470.

(责任编辑:李艳)