

文章编号:2095—0411(2015)04-0085-06

叶面施磷对蓖麻生长、镉积累及亚细胞分布的影响

葛 跃,孙向武,陈亚慧,赵兴青,王明新

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:采用营养液培养试验,研究了在不同浓度镉($50, 100$ 和 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫下,叶面喷施 0.4% 磷肥对蓖麻生理特性、镉积累及亚细胞分布的影响。结果表明,与未施磷处理相比,叶面施磷使蓖麻根、茎、叶生物量分别增加了 $23.2\% \sim 61.5\%$ 、 $31.2\% \sim 68.3\%$ 和 $14.7\% \sim 23.6\%$,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量分别增长了 $6.8\% \sim 78.0\%$ 、 $10.1\% \sim 84.1\%$ 和 $30.0\% \sim 52.1\%$ 。与未施磷处理相比,叶面施磷使根系中镉含量增大了 $25.0\% \sim 59.6\%$,显著提高了地下部对镉的积累量,茎、叶中镉含量无显著变化;根、茎、叶中细胞壁中镉含量的分配比例显著增大,而细胞器分配比例则相对减少。可见,叶面施磷提高了植株细胞壁对镉的固持作用,降低了镉的迁移能力和生理毒性。

关键词:叶面施磷;镉胁迫;亚细胞分布;镉积累;蓖麻

中图分类号:X 53

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095—0411.2015.04.016

Effects of P Foliar Spraying on Plant Growth, Cd Accumulation and Subcellular Distribution in Ricinus Communis

GE Yue, SUN Xiangwu, CHEN Yahui, ZHAO Xingqing, WANG Mingxin

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

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to investigate the influence of foliar spraying of 0.4% phosphate fertilizer (P) on the physiological parameters, Cd accumulation and subcellular distribution characteristics in energy crop *Ricinus communis* with different Cd doses ($50, 100, 150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). The results showed that P spraying increases plant dry mass by $23.2\% - 61.5\%$, $31.2\% - 68.3\%$ and $14.7\% - 23.6\%$ in the roots, stems and leaves, respectively, and the chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid contents were increased by $6.8\% - 78.0\%$, $10.1\% - 84.1\%$ and $30.0\% - 52.1\%$, respectively. Foliar spraying of P significantly increased Cd concentration in the roots by $25.0\% - 59.6\%$, but Cd contents in shoots and leaves showed no significant difference. The proportions of Cd in the cell wall increased, while that in cell organelle decreased. It is supposed that P addition can strengthen cell wall binding, so as to limit Cd translocation and reduce its physiological toxicity in plants.

Key words: phosphate; Cd accumulation; subcellular distribution; physiological characterization; *Ricinus communis*

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,即使在低浓度水平下也会对植物、动物、微生物产生危害,还可以通过生物富

收稿日期:2015-01-22。

基金项目:江苏省高校自然科学研究项目(14KJB610001);国家自然科学基金(41302025)。

作者简介:葛跃(1991—),男,江苏徐州人,硕士生。通讯联系人:王明新(1979—),E-mail:wmx@cczu.edu.cn

集和食物链危害人类健康。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^[1-4]。然而,镉是毒性最强的重金属之一,较高的镉污染胁迫会导致植物受害减产^[5]。因此,如何提高能源植物对镉胁迫的耐性是实现镉污染土壤安全利用的关键问题之一。

大量研究表明,一些矿质元素能增强植物对重金属胁迫的耐受性,例如硅、铈可以减轻植物受镉和铅胁迫的程度^[6],硫能提高水稻对铜的耐受性^[7]。这些矿质元素都是植物生长的必需元素,合理施用可增强植物对逆境的适应能力^[8]。其中磷对改善植物生理状况和提高抗逆性有着重要的调控作用^[9]。张晓璟^[10]等研究表明,外源添加磷肥能够缓解镉对世纪朝天椒生长的抑制,增加植株茎、叶及总干重,增加了果实和植株对镉的吸收富集;向言词^[11]等研究也表明,施磷显著降低了甘蓝型油菜和芥菜型油菜的膜脂化损伤程度以及抗氧化酶活性。关于施磷对于植物镉积累的影响,刘芳^[12]等人的研究表明,外源添加低浓度的磷肥,烟草中的镉含量呈现下降趋势。可见,磷对植物富集重金属的调控效果可能与植物品种本身有很大关系。磷肥一般以肥料形式施入土壤,过量施磷易与土壤中的重金属金属形成磷酸盐沉淀,有助于降低磷镉的生物有效性^[13],但过量施磷容易导致土壤磷素累积,极易通过地表径流和土壤侵蚀进入周边水体,引起富营养化问题^[14]。如果采用叶面喷施的方式适量施磷,对于镉胁迫条件下的植物,有可能起到补充磷营养和钝化镉的双重作用,同时还可以避免土壤过量施磷导致的磷素积累问题,但其效果与机制尚待探索。

本研究以能源植物蓖麻(*Ricinus communis* L.)为供试材料,通过营养液栽培试验研究叶面喷施磷肥对不同镉胁迫下蓖麻生长、生理特性、镉积累及其亚细胞分布的影响,旨在揭示叶面施磷对蓖麻镉耐性与积累的调控作用与机制,为利用重金属污染土壤种植能源植物及其栽培管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 植物培养

供试种子淄蓖麻 5 号来自山东淄博农业科学研

究院。选择饱满种子,直接播种于湿润的石英砂中,待其长出真叶后,移入 1/4 的 Hoagland 营养液中进行培养。营养液栽培容器为塑料盆,尺寸为 28cm×19cm×8cm,每盆放置 6 个植株,采用石英砂固定,培养 15d 后选取大小较为一致的植株供实验用。

实验分为 2 组:第一组是镉浓度为 50、100、150 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的镉胁迫处理,每隔 3d 叶面喷施等量去离子水,并分别标记为 Cd₅₀、Cd₁₀₀、Cd₁₅₀。第二组是镉和叶面施磷复合处理,镉以 CdCl₂·2.5H₂O 的形式加入,设置 3 个镉浓度,分别为 50、100、150 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,并每隔 3d 在植物叶片正反面喷施 0.4% Ca(H₂PO₄)₂溶液,每次喷施量为 5ml·株⁻¹,将这一组不同处理分别标记为 Cd₅₀+P、Cd₁₀₀+P 和 Cd₁₅₀+P;以无镉无叶面施磷为对照,标记为 CK。

实验置于光照培养箱中进行,昼夜温度为 25℃/18℃,光周期为 12h:12h(L:D),每个处理 3 次重复,每隔 3d 更换一次营养液,9d 后收获植株用于检测。首先采用自来水冲洗植株,再用 20mmol·L⁻¹Na₂-EDTA 浸泡 15min^[15],最后用去离子水润洗,吸干植株表面水分,于-20℃冰箱内保存备用。

1.2 测定指标及测定方法

测定植株镉含量时,把植株分成根、茎和叶 3 个部分,105℃下杀青 0.5h,75℃烘干至恒重,用电子天平称取各部分干质量。取 300mg 粉碎烘干样品加入 65% HNO₃ 8ml 和 30% H₂O₂ 1ml,采用微波消解仪(上海新仪, MDS-8G 型)进行消解,消解液中的镉含量采用原子吸收分光光度计(美国赛默飞, Multifuge X1R 型)测定,再换算成植物根、茎和叶单位干重的镉含量。叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量参照张志良的方法测定^[16]。亚细胞组分提取参照 Weigel 和 Jager 方法采用差速离心法测定,把叶片鲜样分离为细胞壁组分(F₁)、细胞器组分(F₂)和可溶组分(F₃)^[17-18]。

1.3 数据处理

实验数据分析采用 SPSS 19 进行,包括回归分析、ANOVA 方差显著性分析和 LSD 检验,采用 Microsoft Excel 2010 制图。Cd 的转移系数为地上部 Cd 含量与根系 Cd 含量的比值,用以表征 Cd 从根系到地上部的转移能力。

2 结果分析

2.1 叶面施磷对镉胁迫下植物生物量的影响

相较于 CK,各镉处理显著降低了蓖麻根、茎、

叶及总干重,见表 1,然而同一镉浓度胁迫下,相较于未施磷处理,叶面施磷使蓖麻各组织生物量均有所提高($p<0.05$),根、茎、叶生物量的增长率分别为:23.2%~61.5%、31.2%~68.3%和 14.7%~23.6%,说明叶面施磷显著缓解了镉对蓖麻生长的抑制。

表 1 叶面施磷对镉胁迫下蓖麻生物量的影响
Table 1 Effects of P on biomass of Ricinus communis L under Cd stress

处理	根干重	茎干重	叶干重	总干重
CK	0.17±0.03ab	0.23±0.07a	0.47±0.01a	0.87±0.10a
Cd ₅₀	0.10±0.01c	0.10±0.01c	0.31±0.04de	0.52±0.04c
Cd ₅₀ +P	0.17±0.04ab	0.14±0.02bc	0.38±0.03bc	0.69±0.09b
Cd ₁₀₀	0.12±0.03abc	0.11±0.02bc	0.29±0.04e	0.51±0.09c
Cd ₁₀₀ +P	0.17±0.03a	0.14±0.04bc	0.35±0.05bc	0.67±0.11b
Cd ₁₅₀	0.12±0.03bc	0.10±0.03c	0.27±0.03e	0.49±0.08c
Cd ₁₅₀ +P	0.14±0.01abc	0.17±0.01ab	0.31±0.01de	0.63±0.04bc

说明:不同字母表示不同处理间存在显著差异($p<0.05$),下同。

2.2 叶面施磷对镉胁迫下植物叶绿素的影响

叶片失绿和叶绿素含量下降是叶片逆境胁迫的重要特征^[19-20],由表 2 可知,相较于 CK,镉胁迫使各光合色素含量显著下降,150μmol·L⁻¹镉处理使叶绿素总量降低到 CK 的 51.5%,而叶面施磷处理中,叶片失绿症状明显缓解,叶绿素 a、b 和类胡萝卜

素含量大幅上升,其中叶绿素 b 和类胡萝卜素的變化较为显著,其含量增加了 10.1%~84.1%和 30.0%~52.1%,且与 CK 相比已无显著差异,施磷使叶绿素总量也恢复至 CK 的 87.2%~88.0%,说明叶面施磷可以缓解镉胁迫对蓖麻叶片光合作用的抑制作用,在一定程度上缓解了叶片的逆境胁迫导致的失绿。

表 2 镉胁迫下叶面施磷对蓖麻叶片光合色素含量的影响
Table 2 Effects of exogenous P on photosynthetic pigments under Cd stress

处理	光合色素含量/(mg·g ⁻¹)				叶绿素 a/b	叶绿素/类胡萝卜素
	叶绿素 a	叶绿素 b	类胡萝卜素	叶绿素 a+b		
CK	1.43±0.13a	0.49±0.04a	0.32±0.03a	1.91±0.17a	2.93±0.11a	6.01±0.21a
Cd ₅₀	1.14±0.14b	0.42±0.04ab	0.29±0.02ab	1.56±0.18b	2.72±0.06ab	5.47±0.19b
Cd ₅₀ +P	1.22±0.14b	0.46±0.08a	0.29±0.02ab	1.69±0.22b	2.66±0.16b	5.71±0.42ab
Cd ₁₀₀	0.94±0.13c	0.36±0.04b	0.25±0.03b	1.29±0.17c	2.63±0.06b	5.09±0.03c
Cd ₁₀₀ +P	1.20±0.01b	0.45±0.01a	0.31±0.01a	1.67±0.02b	2.69±0.07b	5.31±0.12bc
Cd ₁₅₀	0.72±0.08d	0.26±0.03c	0.21±0.01c	0.99±0.09d	2.75±0.15ab	4.77±0.13c
Cd ₁₅₀ +P	1.20±0.15b	0.47±0.05a	0.33±0.04a	1.67±0.18b	2.60±0.23b	5.41±0.41ab

2.3 镉胁迫下叶面施磷对蓖麻富集能力的影响

除 CK 处理未检测出外,不同处理下蓖麻各组织镉含量和积累量见表 3,叶面施磷显著增大蓖麻根系对镉的富集能力。与不施磷相比,其根系镉含

量增大了 25.0%~59.6%,但茎、叶中镉含量与不施磷处理未见显著差异,因此镉转移系数均有所降低。此外,叶面施磷处理显著提高了蓖麻的生物量,使得蓖麻根系镉积累总量增大了 69.6%~115.8%,与相应的不施磷处理形成显著差异。

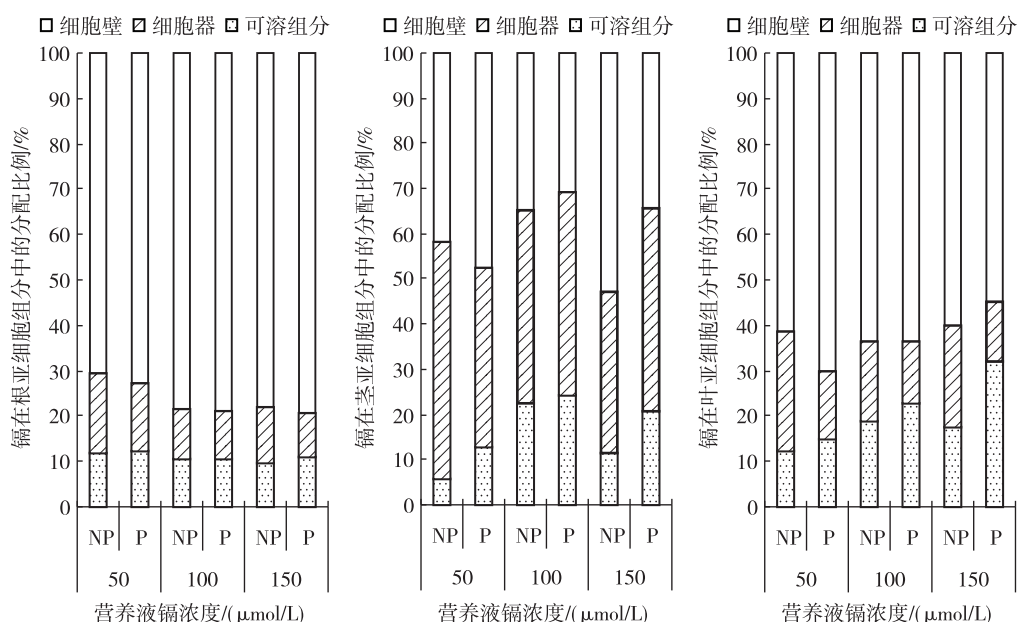
表 3 镉胁迫下叶面施磷对蓖麻镉积累的影响
Table 3 Effects of P foliar spraying on Cd accumulation in Ricinus communis L

处理	Cd 含量/(mg · kg ⁻¹)			Cd 积累量/(μg · plant ⁻¹)			转移系数
	根	茎	叶	根	茎	叶	
Cd ₅₀	785.25±70.41d	36.24±5.23a	13.21±1.06a	81.94±19.10c	3.73±0.65b	4.09±0.80a	0.024a
Cd ₅₀ +P	1052.20±34.02cd	41.96±4.48a	15.12±0.33a	176.82±17.84bc	5.90±0.68ab	5.78±0.42a	0.021ab
Cd ₁₀₀	1232.87±105.80bc	36.21±5.58a	14.34±0.82a	158.62±26.28c	4.17±0.37ab	4.30±0.44a	0.017bc
Cd ₁₀₀ +P	1541.03±23.50b	45.51±16.84a	16.49±1.45a	269.02±25.88ab	6.84±0.29ab	6.06±0.64a	0.016bc
Cd ₁₅₀	1500.99±58.12b	43.80±7.54a	15.86±1.89a	171.17±23.25c	4.31±0.46ab	4.40±0.56a	0.016bc
Cd ₁₅₀ +P	2395.53±89.01a	45.62±13.69a	20.15±1.81a	344.79±18.71a	7.79±0.59a	6.34±0.87a	0.013c

2.4 叶面施磷对蓖麻镉亚细胞分布的影响

镉胁迫下叶面施磷对蓖麻根、茎、叶亚细胞镉含量分布比例有着显著影响,但变化趋势各不相同(图 1)。对于蓖麻根、叶来说,与不施磷相比,叶面施磷显著增大了根、叶细胞壁镉含量的分配比例,其增长比例分别为 4.7%~14.5%和 18.9%~83.7%;同时细胞器的分配比例显著下降,而可溶组分变化较不明显,说明叶面施磷主要是通过增强细胞壁对镉

的固持作用,以减少细胞器中镉的相对含量,从而减轻镉污染对蓖麻的胁迫作用。叶面施磷同样增大了茎细胞壁中的镉含量,细胞器比例在低浓度镉胁迫下显著下降,可溶组分比例有所上升,而在 100 和 150μmol · L⁻¹的镉处理下,细胞器镉分配比例无显著变化,可溶组分分配比例有所减少,说明叶面施磷同样增加了蓖麻茎细胞壁对镉的固持作用,可溶组分镉比例的降低则可能是由于该部分镉更容易移动,有一部分镉向上运移至叶片中导致。



说明:NP 代表镉处理,不施磷;P 代表镉处理,叶面施磷。

图 1 蓖麻根、茎、叶中各亚细胞组分中镉含量分配比例

Fig.1 Distribution percentage of Cd in subcellular fractions of Ricinus communis roots, stems and leaves

3 讨论

重金属镉对植物的毒害是多种反应的综合表现,如生长停滞^[21]、结构损伤^[22]、氧化胁迫^[23-24]和营养失衡^[25]等。本研究中,随着镉处理浓度的增加,蓖麻总生物量不断下降,而叶面喷施 0.4%的磷肥显著增加了不同镉处理中蓖麻根、茎、叶生物量及

总干重,且随着镉浓度的升高,植物总生物量增长率呈现减小趋势,说明叶面喷施磷能够促进植物生长,但随着磷镉比的降低其促进作用有所减弱。这可能是由于磷与镉的拮抗效应可以缓解镉对蓖麻植株生长的胁迫作用,磷也是植物体内许多重要化合物的组分,参与了碳水化合物和蛋白质的合成,因此适量施加外源磷能够促进植株的生长^[10]。

叶绿素是植物光合作用的物质基础^[26],镉能通过降低叶绿素的含量、改变叶绿体的超微结构、抑制与光合作用相关酶的活性等途径影响光合作用^[27]。本研究中,随着镉处理浓度的增加,叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均呈下降趋势,表明镉加速了蓖麻叶片的衰老进程,而叶面施磷使各光合色素含量大幅上升,其中叶绿素总量也恢复至对照的 87.2%~88.0%。类胡萝卜素不仅是光系统中的集光色素,而且能够保护叶绿素免受强光破坏,同时还具有清除活性氧的作用^[28]。本研究中,叶面施磷使镉胁迫下类胡萝卜素含量恢复至与 CK 无显著差异,这在一定程度上减轻了镉胁迫对蓖麻叶片的伤害,保护叶绿素,从而维持植株叶片的光合能力,增强植株对镉的耐性。

镉在植物组织的亚细胞分布特征分析有助于识别植物细胞对镉的解毒与耐性机制^[29]。叶面施磷显著增大了细胞壁中镉的分配比例,其中叶片细胞壁分配比例相较于未施磷处理增加了 18.9%~83.7%,同时叶面施磷后,减少了蓖麻各组织中细胞器中镉的分配比例,此结果与 Qiu 等人^[30]对白菜的研究结果一致,这可能是由于外源磷的添加增加了阴离子数量,如 HPO_4^{2-} 、 H_2PO_4^- ,它可以通过吸附、络合、沉淀、结晶等多种机制将镉固定在细胞壁上,从而降低了镉在植物体内的移动性,避免损伤功能相对重要的组织、细胞和细胞器,降低了镉的生物毒性^[31]。

叶面施磷使蓖麻根系中镉含量和生物量均显著增加,两者综合作用的结果使得蓖麻根系的镉积累量显著增加^[32]。然而,蓖麻茎、叶中镉含量与不施磷相比差异不显著,这可能是由于磷与镉形成了金属磷酸盐,沉积在植物体细胞壁与液泡中,限制了镉在植物体内的木质部长距离输送^[10],阻滞了镉从根系向地上部的转移。因此叶面施磷在一定程度上降低了镉的转移系数,改变了镉在蓖麻地上部和根系中的分配比例。可见,叶面施磷可增另蓖麻根系的镉积累量,但不会显著提高蓖麻地上部镉含量,因而不会加剧镉对植株地上部的胁迫和积累,因此也避免了大量镉进入工业原料部分,这为利用 Cd 污染土壤种植能源植物蓖麻提供了有利保障,有助于同步提高蓖麻对镉胁迫的耐性和提高蓖麻对镉污染土壤的修复能力。

4 结 论

叶面施磷能缓解镉对蓖麻生长的抑制,显著提

高了蓖麻镉胁迫条件下的生物量,其植株生物量显著增加。此外,镉处理显著降低了蓖麻叶片叶绿素和类胡萝卜素含量,而叶面施磷则使光合色素含量得以显著恢复,减轻了叶片失绿症状。可见,叶面施磷显著提高了蓖麻对镉胁迫的耐性。叶面施磷增大了蓖麻根系镉含量,茎、叶则未见显著差异。由于根、茎、叶生物量均显著增加,因此蓖麻根、茎和叶对镉的积累量得到显著提高。可见,叶面施磷不仅可提高蓖麻对镉的耐性,也显著提高了蓖麻对镉的积累能力。叶面施磷显著增大了蓖麻根、茎、叶细胞壁中镉含量的分配比例,细胞器分配比例相对减少,表明叶面施磷通过改变镉在植物不同组织和亚细胞组分中的分布特征而缓解了镉对蓖麻植株的胁迫作用。

参考文献:

- [1]孙约兵,徐应明,史新. 污灌区镉污染土壤钝化修复及其生态效应研究 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1467-1473.
- [2]陈亚慧,李君,王明新,等. EGTA 和酒石酸对蓖麻 Cd 胁迫与积累的调控作用 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(5): 1025-1031.
- [3]武文飞,南忠仁,王胜利,等. 单一与复合胁迫下油菜对镉,铅的吸收效应 [J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3253-3260.
- [4]WITTERS N, VAN SLYCKEN S, RUTTENS A, et al. Short-rotation coppice of willow for phytoremediation of a metal-contaminated agricultural area: a sustainability assessment [J]. Bioenergy Research, 2009, 2(3): 144-152.
- [5]王耀晶,付田霞,苏瑛,等. 镉胁迫下硅对草莓生长及生理特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12): 2335-2339.
- [6]崔晓峰,丁效东,李淑仪,等. 叶面施硅和钾对缓解生菜镉,铅毒害作用的研究 [J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 7-12.
- [7]王海鸥,钟广蓉,徐海洋,等. S 元素对水稻耐重金属 Cu 毒性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2319-2324.
- [8]姚慧,蔡庆生. 缓解植物重金属胁迫伤害的途径及其机理 [J]. 浙江农业科学, 2011(1): 144-147.
- [9]THAWORNCHASIT U, POLPRASERT C. Evaluation of phosphate fertilizers for the stabilization of cadmium in highly contaminated soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165: 1109-1113.
- [10]张晓璟,刘吉振,徐卫红,等. 磷对不同辣椒品种镉积累,化学形态及生理特性的影响 [J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1171-1176.
- [11]向言词,官春云,黄璜,等. 在铀尾渣污染土壤中添加磷对植物生长及重金属积累的影响 [J]. 作物学报, 2010, 36(1): 154-162.
- [12]刘芳,介晓磊,孙巍峰,等. 磷、镉交互作用对烟草生长及吸收积累磷、镉的影响 [J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 116-120.
- [13]崔海燕,王明娣,介晓磊,等. 石灰性褐土中磷锌镉相互作用对其有效性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 97-103.
- [14]盛海君,夏小燕,杨丽琴,等. 施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响 [J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2837-2840.
- [15]DU R J, HE E K, TANG Y T, et al. How phytohormone IAA

- and chelator EDTA affect lead uptake by Zn/Cd hyperaccumulator *Picris Divaricata* [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13: 1024-1036.
- [16] 张志良, 翟伟菁, 李小芳. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 54-61.
- [17] WEIGHEL H J, JAGER H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plant [J]. *Plant Physiology*, 1980, 65: 480-482.
- [18] 陈亚慧, 刘晓宇, 王明新, 等. 蓖麻对镉的耐性、积累及与镉亚细胞分布的关系[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(9): 2440-2446.
- [19] 廖柏寒, 刘俊, 周航, 等. Cd 胁迫对大豆各发育阶段生长及生理指标的影响 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(11): 1516-1521.
- [20] SINGH S, EAPEN S, D'SOUZA S F. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(2): 233-246.
- [21] 周青, 张辉, 黄晓华, 等. 镉对镉胁迫下菜豆 (*Phaseolus vulgaris*) 幼苗生长的影响[J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 48-53.
- [22] VECCHIA F D, ROCCA N L, MORO I, et al. Morphogenetic, ultrastructural and physiological damages suffered by submerged leaves of *Elodea canadensis* exposed to cadmium[J]. *Plant Science*, 2005, 168: 329-338.
- [23] AIBIBU N, LIU Y, ZENG G, et al. Cadmium accumulation in *vetiveria zizanioides* and its effects on growth, physiological and biochemical characters[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(16): 6297-6303.
- [24] FERNÁNDEZ R, BERTRAND A, REIS R, et al. Growth and physiological responses to cadmium stress of two populations of *Dittrichia viscosa* (L.) Greuter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 244: 555-562.
- [25] 徐勤松, 施国新, 王红霞, 等. 外源亚精胺对槐叶苹耐镉胁迫的增强效应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2521-2526.
- [26] CUTRARO J, GOLDSTEIN N. Cleaning up contaminants with plants[J]. *Biocycle*, 2005, 46: 30-32.
- [27] 朱志勇, 郝玉芬, 李友军, 等. 镉对小麦旗叶叶绿素含量及籽粒产量的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(5): 1010-1016.
- [28] MOHAMEDA A A, CASTAGNA A, RANIERI A, et al. Cadmium tolerance in *Brassica juncea* roots and shoots is affected by antioxidant status and phytochelatins biosynthesis[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 57(8): 15-22.
- [29] WANG X, LIU Y, ZENG G, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckmannia nivea* (L.) Gaud [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3): 389-395.
- [30] QIU Q, WANG Y, YANG Z, et al. Effects of phosphorus supplied in soil on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L) cultivars differing in cadmium accumulation [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2011, 49(9): 2260-2267.
- [31] JIANG H M, YANG J C, ZHANG J F. Effects of external phosphorus on the cell ultrastructure and the chlorophyll content of maize under cadmium and zinc stress[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(3): 750-756.
- [32] 施羽, 潘新星, 张洪波, 等. 施磷方式对蓖麻生长和铅积累的影响[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2014, 26(2): 62-65.

(责任编辑:李艳)