

文章编号: 2095—0411 (2014) 02 - 0062 - 04

# 施磷方式对蓖麻生长和铅积累的影响<sup>\*</sup>

施 羽, 潘新星, 张洪波, 王明新

(常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 采用盆栽实验研究了土壤重金属铅污染下 ( $1\ 000\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 磷肥根施和根施配合叶面喷施两种方式对能源作物蓖麻生长和铅积累特征的影响。结果表明, 根施磷肥对蓖麻形态和生物量影响很小, 而根施配合叶面喷施显著地提高了蓖麻总生物量。根施磷肥降低了蓖麻地下部对铅的富集, 根施配合叶面喷施则大幅度提高了蓖麻叶片对铅的积累量, 从而提高了蓖麻地上部的铅积累量, 两者与对照相比分别提高了 90.01% 和 79.40%。磷肥根施配合叶面喷施对蓖麻铅富集系数影响很小, 但大大提高了转运系数, 达 0.549, 是对照的 1.91 倍。因此, 适当的磷肥根施配合叶面喷施可以有效提高蓖麻铅从根系到地上部的转移能力, 从而提高蓖麻对土壤铅的萃取能力和修复效果。

**关键词:** 蓖麻; 铅; 磷肥; 根施; 叶面喷施

中图分类号: X 53

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2014.02.015

## Effects of Phosphate Fertilization Technology on the Growth and Lead Accumulation of Castor

SHI Yu, PAN Xin-xing, ZHANG Hong-bo, WANG Ming-xin

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

**Abstract:** Pot experiments were carried out to investigate the influence of different phosphate fertilizer (P) rates by root fertilization and foliar spraying on the plant growth and accumulation of lead (Pb) in castor when exposed to Pb polluted soil ( $1\ 000\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The results showed that root fertilization had little effects on phytomorph and biomass of castor, while root fertilization combined with foliar spraying increased biomass greatly. Root fertilization decreased concentration of Pb in the root. Root fertilization combined with foliar spraying greatly increased Pb accumulation in leaves, thus promoted Pb accumulation in shoot. They were increased by 90.01% and 79.40% compared to the control, respectively. Root fertilization combined with foliar spraying had little effects on bioaccumulation factor, but greatly increased translocation coefficient up to 0.549, which was 1.91 times of the control. Therefore, appropriate root fertilization combined with foliar spraying of phosphate can improve the translocation ability of Pb from root to shoot by castor, thereby improving the extraction ability and phytoremediation efficiency of lead contaminated soil by castor.

**Key words:** castor; lead; phosphate fertilizer; root fertilization; foliar spraying

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013 - 10 - 30。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (70901035, 31071350)。

作者简介: 施羽 (1989—), 女, 江苏无锡人, 硕士生。通讯联系人: 王明新 (1979—), E-mail: wmxcau@163.com

随着经济发展, 土壤重金属污染问题日趋严重。据调查, 我国经济发展较快地区的 320 个重点污染区中, 重金属含量超标的农产品产量与面积约占污染物超标农产品总量与总面积的 80% 以上<sup>[1]</sup>, 实行高效、低成本的重金属污染土壤修复技术迫在眉睫。目前重金属污染土壤修复技术主要有物理、化学、植物修复技术等, 其中植物修复技术因具有成本低廉、美化环境、容易被公众接受等优点而受到广泛关注<sup>[2-3]</sup>。

蓖麻作为世界十大油料作物之一, 其生物量大, 适应性广, 是理想的油料作物和环保植物<sup>[4]</sup>, 已被国内外学者证明对铅、镉、铜等多种重金属具有较好的耐性和积累能力<sup>[5-8]</sup>。蓖麻虽然生物量大, 但也存在地上部重金属积累量较低的问题, 这限制了其对土壤重金属的修复能力。因此提高地上部重金属含量是提高蓖麻对重金属积累量的关键问题。

许多研究表明, 采用 EDTA、EGTA 等人工螯合剂可以提高植物对重金属的富集作用, 但过量施用往往对植物生长造成严重的负面作用, 从而会影响修复植物的经济价值<sup>[9-11]</sup>。因此, 迫切需要协调植物生长与重金属富集作用之间的矛盾的调控策略。近年来许多研究表明, 植物必需的大量元素和微量元素与重金属产生的交互作用能减缓重金属的毒害效应。例如, 许多研究利用磷酸盐对重金属的吸附、磷酸根阴离子诱导的间接吸附作用、重金属与磷酸根形成磷酸盐沉淀以及重金属与磷形成的金属磷酸盐等原理, 往土壤中施入含磷物质降低重金属的生物可利用性, 同时磷在植物体内可以形成磷酸盐沉淀从而降低其运移能力<sup>[12-14]</sup>。然而, 往土壤施入大量磷肥会导致多余的磷素流失进入周围水体从而影响富营养化问题。有研究发现, 磷肥叶面喷施能增加辣椒(艳椒和朝天椒)地上部供磷水平, 改变地上部镉的化学形态, 降低镉对重金属的毒害作用, 从而提高了对根系镉的转运能力<sup>[15]</sup>。目前, 磷肥叶面喷施对铅污染土壤植物修复的调控效果在国内外鲜见报道。本研究以蓖麻为供试材料, 研究磷肥根施和叶面喷施以及两者配合施用对蓖麻铅耐性和积累特征的调控作用, 旨在为探索植物地上部对铅的积累能力的调控策略提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试蓖麻为淄蓖麻 5 号, 由山东淄博农业科学研究院提供。供试土壤来自常州周边菜地的 0~20cm 耕层土壤, 采回后风干、过 5mm 筛, 混匀后备用。土壤有机质为  $13.30\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效氮、速效磷和速效钾分别为  $35.51$ 、 $54.73\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $121.32\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH 为 6.4, 铅含量为  $24.5\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。往供试土壤中均匀喷洒  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  溶液, 使土壤 Pb 含量达到  $1\,000\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (土壤环境质量标准 GB15618—1995 中 Pb 3 级标准限值的 2 倍)。将经过 Pb 处理的过 40 目筛的风干土装入塑料盆内 (直径 23cm, 高 15cm), 每盆装人工污染土 2kg, 静置平衡 6 个月。

### 1.2 试验设计

蓖麻种子晒种后播种于石英砂中, 并放入温度调节为  $25^\circ\text{C}$  的温室培养箱进行育苗。待大部分种子出芽 2d 后进行移栽, 每盆 3 株, 10d 后进行间苗, 留下长势最好的植株。盆栽试验于 2013 年 4 月~6 月在常州大学温室大棚内进行。培养期间土壤水分保持田间持水量 60%。试验共设 4 个处理, 每个处理 3 次重复: CK (不施加磷肥), P1 (土壤中施加磷肥  $40\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), P2 (土壤中施加磷肥  $80\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), P3 (土壤中施加磷肥  $40\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  且叶片喷施 0.4% 磷溶液)。使用的磷肥为  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。移栽后每 20d 喷施 1 次, 喷施时间为傍晚, 叶片正反面均匀喷施, 每次施用量为 5mL/株, 培养 60d 后收获。

### 1.3 样品处理与分析

收获的植物样品分为根、茎、叶 3 个部分。先用  $20\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 EDTA - Na 浸泡植物根部 20min, 避免重金属铅附着于根部<sup>[16]</sup>。随后用自来水冲洗植物样品以去除粘附于样品上的污物, 再用蒸馏水冲洗, 用滤纸吸干样品水分, 分别测定样品株高、根长。植物样品均先在  $105^\circ\text{C}$  杀青 30min, 后于  $72^\circ\text{C}$  烘干至恒重, 称其干重。分别研磨植物根、茎、叶的烘干样品, 样品称取 0.1g 后加入 8mL  $\text{HNO}_3$  和 1mL  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 采用微波消解仪 (上海新仪公司, MDS - 8G) 进行消解, 消解液定容到 50mL 容量瓶中, 最后采用原子吸收分光光度计 (德国耶拿公司, Nov Aa 300) 测定 Pb 含量。

1.4 数据统计分析

实验数据采用 SPSS19.0 软件中的 one - way ANOVA 模块进行分析。采用富集系数和转运系数来分析蓖麻对 Pb 的积累与分配特征。富集系数为植物地上部重金属含量与土壤中重金属含量之比，转运系数为植物地上部重金属含量与植物地下部重金属含量之比。

2 结果与讨论

2.1 施 P 对铅胁迫下蓖麻生长的影响

实验期间蓖麻各处理长势良好，收获时蓖麻根系和叶片未见明显生理症状，说明蓖麻对供试人工铅污染土壤的适应性较好。磷肥处理改变对铅胁迫条件下蓖麻根长、株高和生物量的影响见表 1。与 CK 相比，施加磷肥的处理降低了根长但增加了株高且生物量总量均有提高。有研究表明，磷肥根施时可以增加植物的生物量。据张晓璟等研究发现，土壤镉污染条件下叶面喷施磷肥，喷施 0.3% 的磷能增加世纪朝天椒各器官干重及总干重，而当磷浓度增加到 0.5% 时，果实与根的干重会降低<sup>[15]</sup>。可见，磷与重金属存在复杂的互作效应，既可能提高植物生物量也可能抵制植物生长，其效应受到磷与重金属比例的影响；磷肥过量供应时，磷与重金属的协同作用加剧了重金属对某些植物品种的毒害作用。此外，磷肥供应量本身也会影响植物体内的各种养分间的供需平衡，从而影响植物的生长状况。

表 1 施磷对蓖麻根长、株高及生物量的影响  
Table 1 Effect of phosphate fertilizer on the length of roots, height of stems and biomass of castor

处理	根长/cm	株高/cm	生物量/ (mg/株)			
			根	茎	叶	合计
CK	27.00	15.83	0.28	0.41	0.93	1.62
P1	20.67	18.43	0.26	0.46	0.93	1.65
P2	17.33	19.67	0.30	0.52	1.17	1.99
P3	26.00	18.50	0.42	0.58	1.20	2.21

2.2 施 P 对蓖麻铅含量和铅积累量的影响

施磷方式对蓖麻根、茎、叶铅含量的影响见表 2。随着土壤中磷肥施加量的增加，根部铅含量降低，P3 根系铅含量与 CK 相比下降率达 20.61%。可见，施加磷肥抑制了蓖麻根系对铅的吸收，这有助于缓解铅对蓖麻根系的毒害作用。这个结果与孙健等报道的高量钙镁磷肥对抑制灯心草根系吸收铅

的效果最为明显的结论相似<sup>[17]</sup>。其原因可能是根施磷肥改变了土壤中重金属的赋存形态，降低了土壤溶液铅含量，从而降低了其有效性与移动性。但林笠等发现磷肥可以提供草莓根系对铅、镉的富集量，认为重金属在植物体内还可能与磷形成难溶性磷酸盐，从而降低重金属在植物体内的迁移能力，把重金属固定于植物的根系中，提高了根系中重金属的含量<sup>[18]</sup>。这些研究结果的差异可能与植物品种差异、土壤质地以及土壤磷铅比的不同有关。从蓖麻地上部铅含量来看，相较于 CK，P3 将叶片中铅的含量提高了 42.64%，可能是由于叶面喷施磷肥改变了叶片中铅的化学形态，降低了其生理毒性及其对植物生长的伤害<sup>[13]</sup>，从而提高了蓖麻叶片对铅的耐性和富集能力。由于 P3 根系铅含量未见明显提高，由此推测叶面喷施磷肥可以提高铅从根系到地上部的迁移。

表 2 施磷对蓖麻根、茎、叶铅含量的影响 mg · kg<sup>-1</sup>  
Table 2 Effect of phosphate fertilizer on Pb concentrations in root, stem and leaf of castor mg · kg<sup>-1</sup>

处理	根	茎	叶
CK	118.20	51.93	26.08
P1	115.80	65.15	31.93
P2	93.84	66.24	15.70
P3	82.68	62.27	37.20

施磷对蓖麻根、茎、叶铅积累量的影响见表 3。施磷对蓖麻铅积累的影响是蓖麻生物量和铅含量两者综合作用的结果。本研究中，施磷处理降低了蓖麻根部的铅积累量，提高了茎部铅积累量，根施配合叶面喷施对叶片铅积累量影响很大。与不施加磷肥的 CK 相比，P3 的叶片铅积累量提高了 90.01%，与不喷施磷肥但根部添加相同浓度的磷肥 P1 相比，P3 的叶片铅积累量增加了 56%。P3 处理下蓖麻对铅的总积累量也因此提高，与 CK 相比提高了 41.87%。可见，磷肥根施配合叶面喷施可以有效提高蓖麻地上部对铅的富集能力，这有助于提高蓖麻对土壤铅的萃取能力，改善蓖麻对铅污染土壤的修复效果。

表 3 施磷对蓖麻根、茎、叶铅积累量的影响 μg/株  
Table 3 Effect of phosphate fertilizer on Pb accumulations in root, stem and leaf of castor μg/株

处理	根	茎	叶	合计
CK	34.24	21.17	23.53	78.94
P1	30.06	30.31	28.66	89.03
P2	31.88	39.39	19.03	90.30
P3	31.80	35.48	44.71	111.99

2.3 施 P 对蓖麻铅富集和分配特征的影响

富集系数反映了植物地上部对土壤中重金属的富集能力,是考察植物修复重金属污染土壤效能的重要评价指标。重金属富集系数越高,表明植物地上部对土壤中重金属的去除率越大。转运系数是用来考察植物地下部向地上部运输重金属的能力。施磷对蓖麻富集系数和转运系数的影响见表 4。磷肥根施或配合叶面喷施均对蓖麻铅富集系数无明显影响,但相较于 CK,叶面喷施将转运系数提高了 90.63%,即提高了铅从蓖麻根系到地上部的转移能力。可见,蓖麻地上部对铅的富集量的增加不是富集能力提高的结果,而是促进了根系铅向地上部的迁移。由此推测,磷肥叶面喷施可以提高蓖麻地上部的磷供应水平,磷铅互作的结果可能改变了铅的化学形态和亚细胞分布特征,降低了生理毒性,有助于提高蓖麻的生物量和铅含量,从而提高了蓖麻地上部对铅的积累量。Yu 等在研究磷镉互相作用条件下紫茉莉对镉的吸收累积影响时也发现,在高浓度磷处理下,转运系数降低,通过透射电镜研究发现,根系中形成了明显的磷酸镉,这可能是根系镉富集量增加但迁移能力降低的主要原因<sup>[19]</sup>。

表 4 施磷对蓖麻富集系数、转运系数的影响  
Table 4 Effect of phosphate fertilizer on bioaccumulation factor and translocation coefficient of castor

处理	CK	P1	P2	P3
富集系数	0.034	0.043	0.044	0.045
转运系数	0.288	0.372	0.184	0.549

3 结 论

磷肥根施对蓖麻根长、株高以及生物量影响很小,但根施配合叶面喷施对蓖麻总生物量提高较大。根施磷肥降低了蓖麻根部铅富集量,而根施配合叶面喷施极大地提高了蓖麻叶片铅含量,从而提高了蓖麻地上部对铅的积累量。施磷对蓖麻富集系数提高较小,但磷肥根施配合叶面喷施大幅度地提高了铅的转运系数,即提高了铅从根系到地上部的转移能力。因此,磷肥根施结合叶面喷施可以有效提高蓖麻地上部对土壤铅的积累能力从而提高蓖麻对铅污染土壤的修复效果。

参考文献:

[1] 孙波. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22 (2): 248 - 251.

[2] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染退化状况及防治对策 [J]. 土壤, 2006, 38 (5): 505 - 508.

[3] 周启星, 宋玉芳. 植物修复的技术内涵及展望 [J]. 安全与环境学报, 2001, 1 (3): 48 - 53.

[4] 高彩婷, 宝力高, 刘涛. 蓖麻研究概况 [J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2010, 25 (2): 178 - 181.

[5] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属 Cd 的耐性及吸收积累研究 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24 (4): 674 - 677.

[6] 康薇, 郑进. 超积累植物蓖麻对重金属铜的吸收 [J]. 黄石理工学院学报, 2011, 5: 10 - 13.

[7] de Souza Costa E T, Guilherme L R G, de Melo é E C, et al. Assessing the tolerance of castor bean to Cd and Pb for phytoremediation purposes [J]. Biological Trace Element Research, 2012, 145 (1): 93 - 100.

[8] Romeiro S, Lag óa A M M A, Furlani P R, et al. Lead uptake and tolerance of Ricinus Communis L [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2006, 18 (4): 483 - 489.

[9] Blaylock M J, Salt D E, Dushenkov S, et al. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil - applied chelating agents [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31 (3): 860 - 865.

[10] Huang J W, Chen J, Berti W R, et al. Phytoremediation of lead - contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31 (3): 800 - 805.

[11] 雒焕章, 南忠仁, 胡亚虎, 等. 不同螯合剂处理下杨树对土壤中 Cd 的吸收和富集效应 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (3): 461 - 465.

[12] 方卢秋, 田足. 三峡库区消落带土壤中施用磷肥对环境激素铅吸附、解吸的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (5): 923 - 929.

[13] 王碧玲, 谢正苗. 磷对铅、锌和镉在土壤固相 - 液相 - 植物系统中迁移转化的影响 [J]. 环境科学, 2008, 29 (11): 3225 - 3229.

[14] 邢维芹, 李立平, 王琳, 等. 磷肥和黑麦草结合修复铅污染贫磷潮土的研究 [J]. 生态毒理学报, 2009, 5: 718 - 725.

[15] 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.

[16] 牛力华. 植物根部对重金属固着作用的研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2012.

[17] 孙健, 铁柏清, 周浩, 等. 不同改良剂对铅锌尾矿污染土壤中灯心草生长及重金属积累特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (3): 637 - 643.

[18] 林笠, 周婷, 汤帆, 等. 铅镉污染灰潮土中添加磷对草莓生长及重金属累积的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (3): 503 - 507.

[19] Yu Z, Zhou Q. Growth responses and cadmium accumulation of Mirabilis jalapa L under interaction between cadmium and phosphorus [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167 (1): 38 - 43.