

含磷物质对铅耐性与敏感性植物生长及磷铅吸收的影响

李维立, 方月英, 赵 玲, 曹心德*

(上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要:将耐性植物芥蓝(*Brassica capitata*)与敏感植物小白菜(*Brassica chinensis*)暴露于含 Pb 的营养液中,通过添加磷灰石矿尾料(PR)、重过磷酸钙(TSP)及二者混合物(P+T)处理,研究含磷物质对两种植物吸收 Pb 的影响以及 Pb 在植物根表面形态变化过程。结果显示:添加含磷物质降低了耐性植物芥蓝根部 Pb 的含量,但对地上部 Pb 吸收的影响不显著;对敏感植物小白菜来说,PR 和 P+T 处理的植物根部及地上部 Pb 的含量与对照基本一致,而 TSP 处理促进了 Pb 的吸收,表现出小白菜根部及地上部 Pb 的含量显著高于对照组。含磷物质添加诱导了 Pb 在植物根表面形成 $Pb_5(PO_4)_3Cl$ 、 $Pb_5(PO_4)_3OH$ 的沉淀,但这并没有直接导致两种植物对 Pb 吸收量的减少。

关键词:含磷物质;芥蓝;小白菜;铅;植物根表面

中图分类号:X503.23 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)07-1288-06 doi:10.11654/jaes.2014.07.005

Effects of Phosphorous-containing Substances on Growth and Phosphorous and Lead Uptake of Lead-Tolerant and Sensitive Plants

LI Wei-li, FANG Yue-ying, ZHAO Ling, CAO Xin-de*

(School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Lead-tolerant plant kale (*Brassica capitata*) and Pb-sensitive plant Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) were exposed to nutrient solution containing Pb to examine the transformation of Pb on root surface and Pb uptake by plants after adding phosphate rock tailing (PR), triple superphosphate fertilizer (TSP) and their combination (P+T) to the solution. Applying phosphorous-containing substances enhanced phosphorous uptake in roots and shoot of Chinese cabbage and roots of kale, with effects being TSP>P+T>PR, but had no effect on shoot phosphorous in kale. Lead concentrations in roots of tolerant kale were reduced, but those in shoot were not significantly affected by additions of phosphorous-containing substances. For Chinese cabbage, PR and P+T treatments had little effect on Pb concentrations in both root and shoot, while applying TSP enhanced Pb uptake. Additions of phosphorous-containing substances induced formations of $Pb_5(PO_4)_3Cl$ and $Pb_5(PO_4)_3OH$ on the surface of plant roots. However, this was in no position to directly reduce Pb absorption by plants.

Keywords: phosphorous-containing substance; kale; Chinese cabbage; lead; root surface

一些研究表明,向 Pb 污染土壤中添加含磷物质能有效减少植物对 Pb 的吸收^[1-4]。陈世宝等^[5]向 Pb 污染的土壤中分别添加了羟基磷灰石、磷矿粉及磷酸氢钙,发现种植的中国芥菜(*Brassica oleracea*)中 Pb 的吸收量显著下降,认为含磷物质诱导了土壤中 Pb 向残留态转化从而降低了有效态 Pb 的含量。王碧玲等^[6]在 Pb/Zn 矿区污染的土壤中添加磷矿粉、过磷酸钙和钙镁磷肥,发现种植的小白菜中 Pb 的含量都显著降

低,原因是含磷物质与土壤中 Pb 形成了难溶性的氯(羟基)磷酸铅盐化合物和 Pb-P-Ca/Fe 化合物,从而减少了植物可吸收态 Pb 的量。Cao 等^[7]向废旧蓄电池加工回收场地 Pb 污染土壤中实施了三种磷处理:磷酸、磷酸+过磷酸钙及磷酸+磷矿石,发现生长在处理土壤上的钝叶草(*Stenotaphrum secundatum*)根部 Pb 的含量增加,但显著降低了 Pb 从根部向地上部的转移,即地上部分 Pb 的含量显著下降,其原因是磷酸根与土壤中 Pb 形成了稳定了氯磷酸铅沉淀。上述研究主要观察到含磷物质诱导了土壤中 Pb 形成沉淀。但是,植物吸收 Pb 是由根部开始,添加含磷物质究竟如何影响 Pb 在植物根表面上的变化以及整个植物的吸收,还有待进一步研究。本实验设计了水培暴露实验,

收稿日期:2013-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(21077072, 21377081)

作者简介:李维立(1989—),男,硕士研究生,从事含磷物质修复土壤重金属污染效果与机理的研究。

E-mail: nangongxuanyu@sjtu.edu.cn

* 通信作者: 曹心德 E-mail: xdciao@sjtu.edu.cn

以水介质代替土壤溶液介质来使得反应体系简单化,选取对 Pb 耐受植物芥蓝^[8]和对 Pb 敏感植物小白菜^[9]作为受试植物,先暴露于 Pb 的溶液中 24 h 后,添加含磷物质处理 48 h,以此研究含磷物质添加对两种植物吸收 Pb 的影响以及 Pb 在植物根表面的形态变化。

1 材料与方法

1.1 植物预培养

实验选择 Hoagland 全营养液作为植物的预培养液,其配方见参考文献[10]。从上海市近郊大棚中获得土培长大的芥蓝植株和小白菜植株,苗龄 45 d,单株植物叶片数在 7 左右。芥蓝品种为早熟种,小白菜品种为夏白菜。用水充分洗净附着其上的泥土,并将每三株植物移至一个盛有 Hoagland 全营养液的容器中进行驯化 1 周。光暗比为 14 h/10 h,温度控制为 (25±1)℃,实验全程充分曝气。

1.2 植物 Pb 暴露及添加含磷物质培养

先利用 Visual-MINTEQ 模型^[11]调整 Hoagland 营养液的成分和浓度,目的是营养液和 Pb 的硝酸盐混合后不产生沉淀,从而保证初始时营养液中 Pb 都是以自由离子态存在。经模型计算确定,将标准 Hoagland 营养液中磷酸铵用氯化铵替代,硫酸镁用硝酸镁替代,以排除 H_2PO_4^- 和 SO_4^{2-} 对 Pb 的沉淀可能,并且将氯化铵的摩尔浓度调整成原磷酸铵摩尔浓度的 1/20,硝酸镁的摩尔浓度变成原硫酸镁摩尔浓度的 1/10,其余成分的浓度均调整为原来浓度的 1/5。这样制备的 Hoagland 修正营养液的 pH 为 5.59。

以 Hoagland 修正营养液为基底配制 Pb 为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的培养液,分别让芥蓝暴露高浓度 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb,小白菜暴露低浓度 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb。在 24 h 后,添加不同的含磷物质,设置空白对照(CK,不添加磷基材料)和三种 P 处理,对照及各处理均设 3 个平行样。P 处理包括:重过磷酸钙(TSP)、磷灰石矿尾料(PR)及 PR 与 TSP 按 P 含量 1:1 混合后的 P+T 复合处理。TSP 的主成分为 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其中含 21.2%P,由美国 CEYLON FERTILIZER 公司提供,PR 的主成分为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$,含 14.1%P,由湖北省钟祥市王集磷肥厂提供。三种 P 处理中总 P 物质的量与总重金属物质的量之比为 2:1,远高于目标沉淀物 $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ 和 $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ 中 P 和 Pb 的化学计量比(P:Pb=3:5)^[12-13]。含磷物质添加前需研磨至粒径<0.2 mm。实验过程使光暗比为 14 h/10 h,温度为 (25±

1)℃,全程充分曝气。

1.3 植物收获及培养液的收集处理

添加含磷物质处理 48 h 后结束实验,取出植物,测出培养液的 pH,采用微波清洗仪振荡的方法收集根表面沉淀(滤纸上固相收集)进行 X 射线衍射(XRD)分析,并将植物分为根部与地上部,称其鲜重,烘干后称其干重。定量收集培养液并经过 $0.45 \mu\text{m}$ 的微孔滤膜过滤,将滤液分为两份,一份用浓 HNO_3 调节至 $\text{pH}<2$ 以测 Pb 含量,另一份用于 P、DOC 含量的测定。

1.4 分析方法

使用 pH 计(PHS-3C Shanghai INESA & Scientific Instrument CO.LTD)分别测出培养液初始和反应结束时的 pH。使用 TC/TN 分析仪(TOC-V CPN Shimadzu Co. Ltd., Kyoto, Japan)测出反应结束后培养液中 DOC 的含量。烘干后的植物样品参照 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 石墨炉法消解^[14]。植物样品消解液中 Pb 的测定采用火焰原子吸收分光光度法(Jena AAS CotrAA700 Jena Co. Ltd., Jena, Germany)。P 含量的测定采用抗坏血酸/钼酸盐分光光度法^[15]。计算出所有处理植株根部和地上部 P 和 Pb 的含量。使用 X 射线衍射仪(D/max-2200/PC, Japan Rigaku Corporation)鉴定根表面沉淀和植物培养液中的沉淀,用 $\text{Cu K}\alpha$ 射线以 $2^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$ 的速度,步长为 0.02° ,从 $2\theta=10^\circ$ 扫描到 $2\theta=50^\circ$ 。依照下式计算 Pb 在植物体内的转移因子(Translocation factor, TF):

$$\text{转移因子} = \frac{\text{植物地上部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{植物根部重金属含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}$$

1.5 数据处理

所有实验数据通过 Q 检验来取舍可疑值。具体做法是三个平行样的数据,先按从小到大的顺序排列,以最大值和最小值之差为极差,再求出可疑值与其最相邻数据之间差值的绝对值,此绝对值与极差之比称为 Q 值,当 $Q>0.9$ 时则舍去可疑值,否则保留该值。同时,对相关数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 植物生长状况及生物量

在 Pb 暴露 24 h 内,芥蓝逐渐显露出受毒害症状,表现为一些叶片及叶柄疲软下垂,添加含磷物质后,植物毒害症状逐渐缓解消失。Pb 暴露和添加含磷物质条件下,小白菜均正常生长。表 1 为 Pb 胁迫和添加含磷物质条件下芥蓝和小白菜根部及地上部的

表1 芥蓝与小白菜根部与地上部生物量(g)

Table1 Root and shoot biomass of kale and Chinese cabbage(g)

处理	芥蓝		小白菜	
	地上干重	地下干重	地上干重	地下干重
CK	2.66ab	0.31ab	2.17a	0.31a
PR	3.03a	0.37a	2.66a	0.37a
TSP	2.24b	0.23b	2.03a	0.26a
P+T	2.31b	0.21b	2.06a	0.29a

注:数据为3次重复平均值;同列中相同字母表示差异不显著,不同字母表示差异显著。

生物量干重。表中数据表明,添加 PR 促进了芥蓝生长,而添加的 TSP 和 P+T 则抑制了芥蓝的生长。P 处理对小白菜的生物量影响较小,其生长差异不显著。

2.2 植物对 P 的吸收

添加含磷物质显著促进了两种植物对 P 的吸收,但植物根部和地上部 P 的增加率不同(图 1)。对于芥蓝,添加 PR、TSP 和 P+T 使其根部 P 吸收量分别增加 15.79%、42.64%和 39.38%,效果为 TSP>P+T>PR;PR 和 P+T 没有促进其地上部 P 吸收量,TSP 使之增加了 17.01%,根部 P 的增量显著大于地上部。对于小白菜,添加 PR、TSP 和 P+T 使其根部 P 吸收量分别增加了 13.78%、28.51%、17.73%,效果为 TSP>P+T>PR;其地上部 P 吸收量分别增加了 10.26%、28.96%和

21.03%,效果为 TSP>P+T>PR,根部 P 的增量与地上部差别不大。芥蓝根部 P 的增加率大于小白菜,而地上部 P 的增加率小于小白菜。

2.3 植物对 Pb 的吸收

与对照组相比,PR、TSP 及 P+T 处理分别使芥蓝培养液中 Pb 的浓度显著降低了 22.22%、73.39%和 58.94%,降低效果是 TSP>P+T>PR(图 2a)。然而,小白菜培养液中 Pb 的浓度未显著下降(图 2b)。

含磷物质添加后,芥蓝根部 Pb 含量降低了 12.11%~29.65%,其地上部 Pb 的含量 PR 处理降低了 13.73%,而 TSP 和 P+T 处理却分别增加了 12.73%和 31.02%(图 2c)。含磷物质添加后,小白菜根部及地上部 Pb 含量没有下降,PR 和 P+T 处理效果均与对照相似,然而 TSP 处理使得根部及地上部 Pb 的吸收量分别增加了 25.27%和 255%(图 2d)。

2.4 Pb 的迁移性以及培养液中 DOC 含量

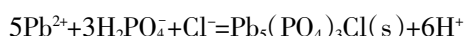
添加含磷物质后,芥蓝体内 Pb 的迁移因子没有降低,TSP 与 P+T 处理的 Pb 迁移因子分别增加了 60.24%和 67.97%,PR 处理结果与对照基本一致;小白菜体内 Pb 的迁移因子也没有降低,TSP 处理的 Pb 迁移因子增加了 184%。PR 和 P+T 处理结果与对照基本一致。总的来说,添加 TSP 使两种植物 Pb 的迁移因子都大为增加,添加 PR 使两种植物的迁移因子与对照保持一致,添加 P+T 使芥蓝 Pb 的迁移因子大为增加却未对小白菜产生影响(图 3a、图 3b)。

含磷物质添加后,芥蓝培养液中 DOC 的含量显著下降,PR、TSP 和 P+T 处理分别下降 8.6%、38.18%和 23.98%,下降效果为 TSP>P+T>PR。PR 和 P+T 处理的小白菜培养液中 DOC 含量分别降低 26.47%和 32.72%,而 TSP 处理却使得 DOC 的含量升高了 298%(图 3c、d)。添加 TSP 显著降低芥蓝培养液中 DOC 的浓度却显著增加小白菜培养液中 DOC 的浓度。

2.5 植物根表面及培养液中沉淀 XRD 图

图 4 为 Pb 胁迫小白菜对照组培养液和根表面沉淀 XRD 图,均显示有氯磷酸铅和羟基磷酸铅沉淀,可能的反应式为:

(1)氯磷酸铅:



(2)羟基磷酸铅沉淀:

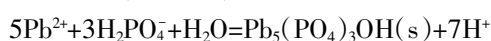


图 5a、图 5b 分别为芥蓝和小白菜在 PR 和 P+T 处理后培养液和根表面沉淀 XRD 图,根部均显示大量氯磷酸铅和羟基磷酸铅沉淀,而且比对照沉淀量大

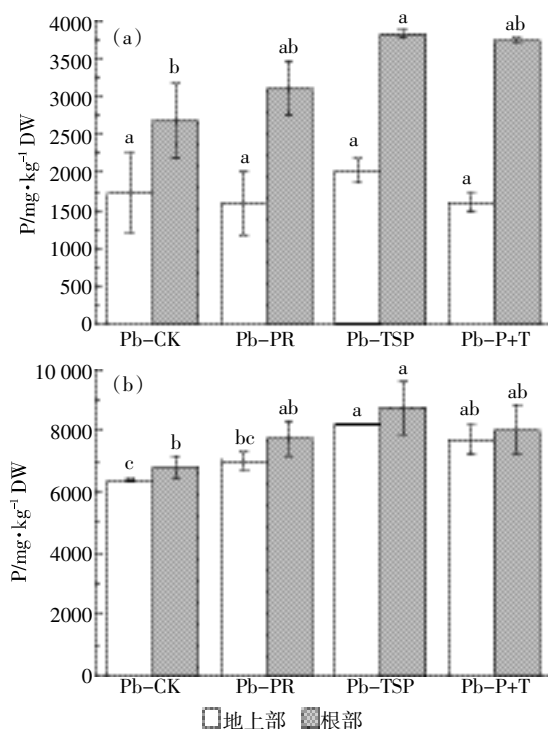


图1 Pb胁迫芥蓝(a)和小白菜(b)地上部与根部P含量

Figure 1 Concentrations of P in shoots and roots of kale(a) and Chinese cabbage(b) under Pb stress

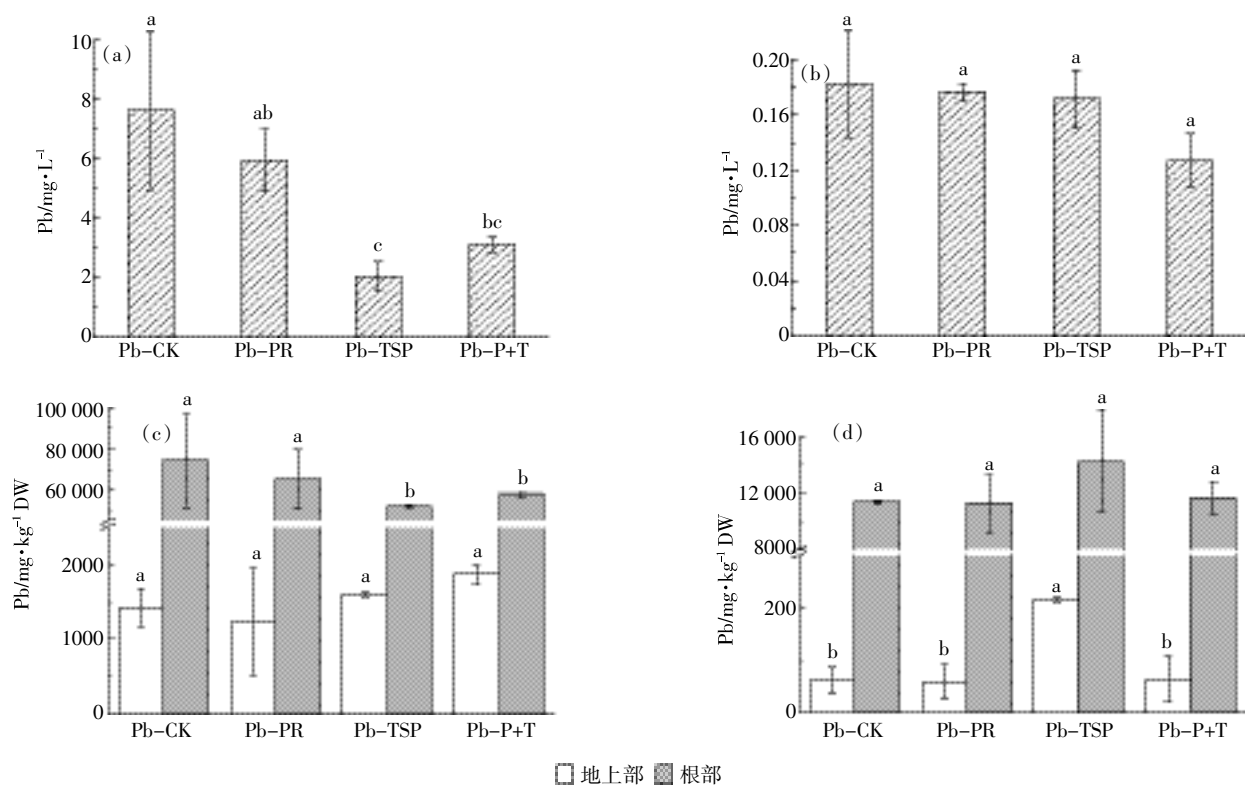


图2 芥蓝培养液中 Pb 的浓度(a)、小白菜培养液中 Pb 的浓度(b)、芥蓝根部及地上部分 Pb 的浓度(c)、小白菜根部及地上部分 Pb 的浓度(d)

Figure 2 Concentrations of Pb in culture medium of kale(a) and Chinese cabbage(b) and in roots and shoots of kale(c) and Chinese cabbage(d)

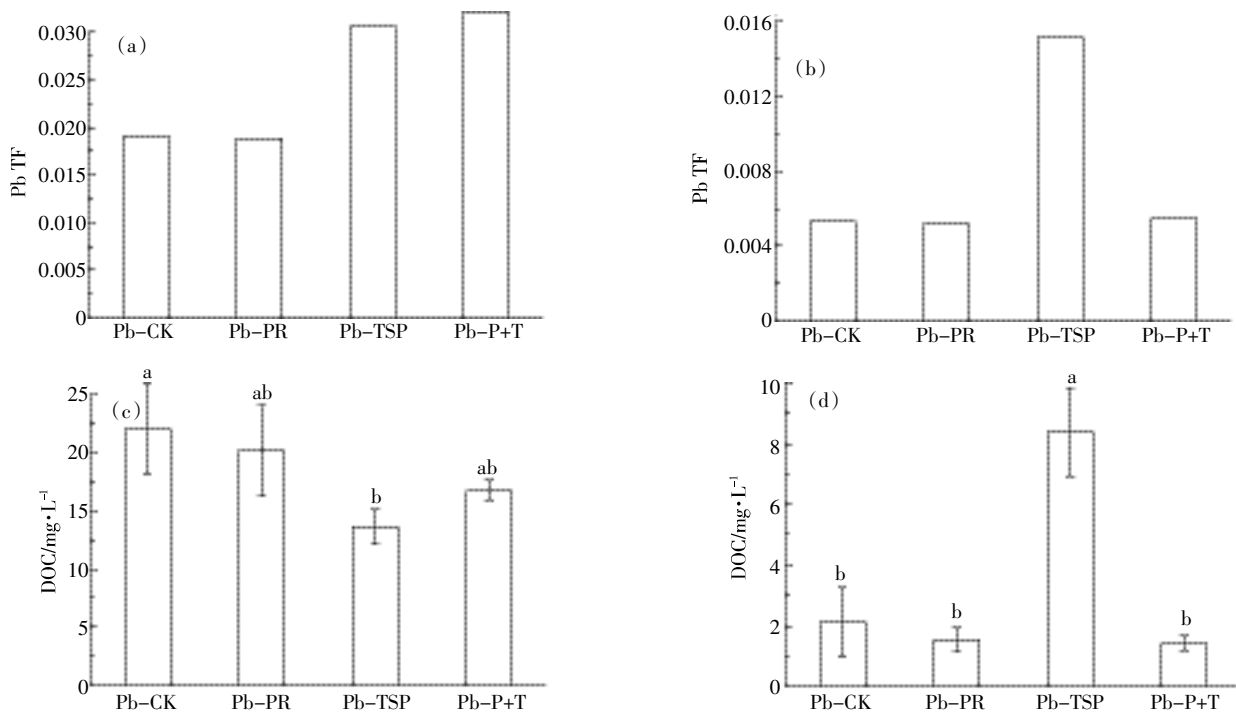


图3 Pb 的迁移因子(a 芥蓝)(b 小白菜)、芥蓝培养液中 DOC 的含量(c)、小白菜培养液中 DOC 含量(d)

Figure 3 Translocation factor of Pb in kale(a) and Chinese cabbage(b) and concentrations of DOC in culture medium of kale(c) and Chinese cabbage(d)

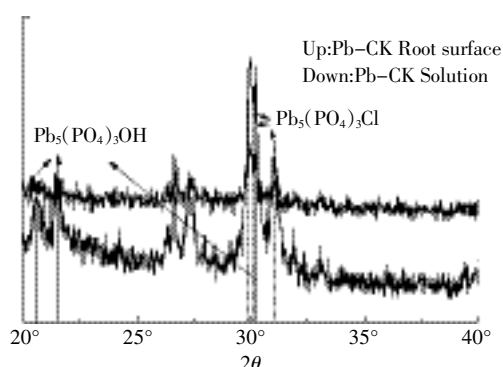


图4 小白菜对照组培养液与根表面沉淀 XRD 谱

Figure 4 X-ray diffraction patterns of precipitates on root surface and in culture medium of Chinese cabbage from control treatment

(图4),培养液中这两种沉淀不明显,表明植物根表面提供了有利于磷酸铅形成的主要场所。

3 讨论

TSP 的主要成分为 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其在 25 °C 的溶解度为 $18 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,本实验添加的 TSP 会完全溶解释放出 H_2PO_4^- ,而 PR 的主要成分是 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$,其溶度积为 2.512×10^{-61} [16],在水中很难溶解,释放 H_2PO_4^- 的量有限,因而含磷物质促进植物吸收 P 的效果都是 $\text{TSP} > \text{P+T} > \text{PR}$ (图1)。

未添加含磷物质的小白菜根部及培养液中有 $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ 、 $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ 的生成,表明小白菜受到 Pb 胁迫时,自身会释放 P 而与根表面吸附的及培养液中的 Pb^{2+} 产生沉淀,其通过自身这样一个解毒机制抵御 Pb 的毒害,即使得到 P 处理如 PR 及 P+T 在溶液中和根部形成磷酸铅沉淀(图5b),但小白菜根部及地上部可能在处理之前已达到 Pb 吸收饱和,因而其含量无显著差异。然而,添加 TSP 则明显增加了小白菜根部及地上部 Pb 的吸收量,可能是因为植物吸收大量的 P(图1)受到刺激,于是向培养液中释放了大

量的小分子有机物,这些小分子有机物可与 Pb 形成络合物而增大 Pb 的迁移性,导致 Pb 吸收量增加[17-19]。图3d显示 TSP 处理产生了大量 DOC,佐证了其释放大分子小分子有机物的存在。添加含磷物质于芥蓝生长液中,由于根表面作用生成氯磷酸铅、羟基磷酸铅,从而降低了根部 Pb 的吸收量(图2c),但地上部 Pb 的含量并没有呈现明显下降,相反,TSP 和 P+T 两种处理使地上部 Pb 略有上升(图2c)。由于这两个处理 Pb 的迁移因子显著增大(图3a),但芥蓝培养液中 DOC 含量并没有增加(图3c),推测如果存在络合过程,则应当发生在芥蓝的根部。

本研究中,暴露实验结束后,植物根部 Pb 的浓度达到了 $8000 \sim 100\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图2c、图2d),即 0.8%~10% 的含量。此浓度远高于一般土壤实验[5-6]植物根部重金属浓度,也高于一些水培实验植物根部重金属的浓度[20-21]。究其原因,除了因为植物在水培环境中更易吸收富集铅以外,更大可能是植物根部吸附了铅或溶液中铅沉淀在植物根表,这些铅及沉淀没有被彻底去除,导致所测根部铅的含量偏高。

还应注意的是,P 处理与 Pb 暴露时间有一定的关系。本实验采用 24 h Pb 暴露后添加 P 处理,时间间隔较长,可导致植物特别是小白菜在添加 P 处理之前自身调节适应,从而表现出 P 处理的影响较小。如果缩短暴露与处理之间的时间,则可能出现不一样的效果,

Syam 等[20]向水培香根草营养液中同时加入铅和磷,发现相比只添加铅的处理,香根草吸收的铅的量有所减少,证明修复效果与磷的添加时间有很大关系。另外,本实验是在水培环境中进行,总体表现出 P 处理并未抑制 Pb 向地上部分迁移,而以往土培实验均观察到 P 处理显著抑制 Pb 向地上部分迁移[6-7,22],其可能的原因是存在于土壤中的介质参与了反应,比如土壤矿物或胶体吸附由 P 刺激产生的小分子有

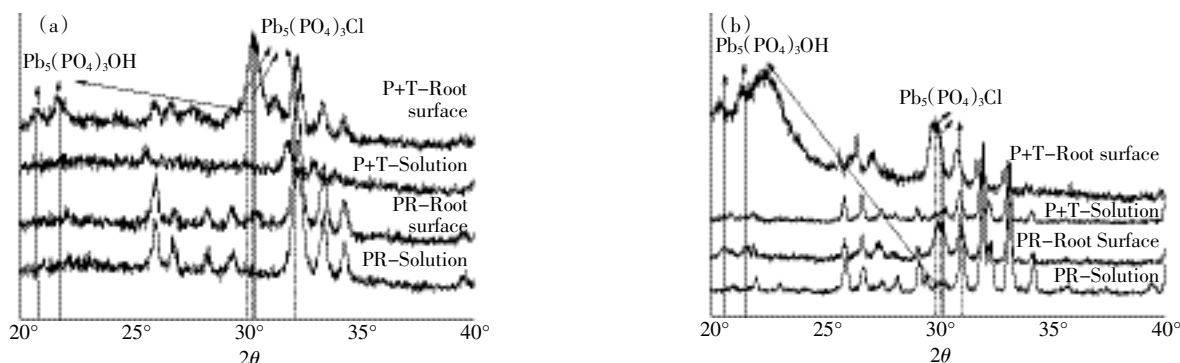


图5 Pb 胁迫芥蓝(a)及小白菜(b)根表面及培养液中沉淀 XRD 谱

Figure 5 X-ray diffraction patterns of precipitates on root surface and in culture medium of kale(a) and Chinese cabbage(b) under Pb stresses

机酸,从而抑制迁移性较大的 Pb 络合物产生,因此 P 处理抑制了 Pb 向地上部分的迁移。这种推测需要进一步实验验证。

4 结论

(1)含磷物质的添加能有效促进两种植物对 P 的吸收,且根部吸收量大于地上部。含磷物质的促进效果都是 $TSP > P+T > PR$ 。

(2)含磷物质减少了水培体系中芥蓝根部对 Pb 的吸收,但未有效减少地上部 Pb 的含量。对照组小白菜自身释放了含磷物质,使得 PR 和 P+T 处理小白菜根部及地上部 Pb 的吸收量与对照相同,而 TSP 处理小白菜根部及地上部 Pb 的含量显著高出对照处理。

(3)含磷物质能够诱导 Pb 在根表面发生形态变化形成 $Pb_5(PO_4)_3Cl$ 与 $Pb_5(PO_4)_3OH$ 沉淀,但这没有直接导致芥蓝和小白菜 Pb 吸收量的减少。

参考文献:

- [1] Cao X D, Ma L Q, Singh S P, et al. Phosphate-induced lead immobilization from different lead minerals in soils under varying pH conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152: 184–192.
- [2] Theodoratos P, Papassiopi N, Xenidis A. Evaluation of monobasic calcium phosphate for the immobilization of heavy metals in contaminated soils from Lavrion[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 94(2): 135–146.
- [3] Hashimoto Y, Takaoka M, Oshita K, et al. Incomplete transformations of Pb to pyromorphite by phosphate-induced immobilization investigated by X-ray absorption fine structure (XAFS) spectroscopy[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(5): 616–622.
- [4] Chen M, Ma L Q, Singh S P, et al. Field demonstration of in situ immobilization of soil Pb using P amendments[J]. *Advance in Environmental Research*, 2003, 8(1): 93–102.
- [5] 陈世宝, 朱永官. 不同含磷化合物对中国芥菜 (*Brassica Oleracea*) 铅吸收特性的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 707–708.
CHEN Shi-bao, ZHU Yong-guan. Effects of different phosphorus-compounds on Pb uptake by *Brassica Oleracea*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4): 707–708.
- [6] 王碧玲. 含磷物质修复铅锌矿污染土壤的机理与技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 98–100.
WANG Bi-ling. Mechanism and technology of Pb/Zn mining tailing contaminated soil remediation using phosphorus[D]. Hangzhou: Zhejiang University 2008: 98–100.
- [7] Cao X D, Ma L Q, Chen M, et al. Impacts of phosphate amendments on lead biogeochemistry at a contaminated site[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(24): 5296–5304.
- [8] 游杰. 芥蓝花提取物对铅毒性拮抗作用研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所, 2008: 63–64.
YOU Jie. Antagonistic effect of Chinese kale flower extracts against the toxicity of lead[D]. Beijing: The Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2008: 63–64.
- [9] 王玲, 刘凤枝, 蔡彦明. 不同种类蔬菜幼苗对铅的敏感性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1650–1651.
WANG Ling, LIU Feng-zhi, CAI Yan-ming. Sensitivity of different vegetable seedlings to lead[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1650–1651.
- [10] Zhou M, Gong X L, Wang Y, et al. Improvement of cerium of photosynthesis functions of maize under magnesium deficiency[J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 142(3): 761–762.
- [11] Houben D, Pircar J, Sonnet P. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in contaminated soil: Effects on metal leaching and phytoavailability[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 123: 88–90.
- [12] Cao X D, Wahbi A, Ma L Q, et al. Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soils using phosphate rock and phosphoric acid[J]. *Journal of Hazard Materials*, 2009, 164(2–3): 555–564.
- [13] Fang Y Y, Cao X D, Zhao L. Effects of phosphorous amendments and plant growth on the mobility of Pb, Cu and Zn in a multi-metal-contaminated soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19: 1660–1661.
- [14] U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). Test methods for evaluating solid waste: Laboratory manual physical/chemical methods[R]: 3rd Edition. Washington, DC: Office of Solid Waste, USEPA, 1986.
- [15] Page A L. Methods of soil analysis Part 2: Chemical and microbiological properties[M]. 2nd Edition. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982, 9: 407–414.
- [16] Zhu Y N, Zhang X H, Chen Y D, et al. A comparative study on the dissolution and solubility of hydroxylapatite and fluorapatite at 25 °C and 45 °C[J]. *Chemical Geology*, 2009, 268: 94–95.
- [17] 孙琴, 王晓蓉, 丁士明. 超积累植物吸收重金属的根际效应研究进展[J]. 生态学报, 2005, 24(1): 31–32.
SUN Qin, WANG Xiao-rong, DING Shi-ming. Rhizosphere effects in metal absorption by hyperaccumulators and its research advances[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(1): 31–32.
- [18] Seuntjens P, Nowack B, Schulen R. Root-zone modeling of heavy metal uptake and leaching in the presence of organic ligands[J]. *Plant and Soil*, 2004, 265: 69–72.
- [19] Seth C S, Misra V, Singh R R, et al. EDTA-enhanced lead phytoremediation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) hydroponic culture[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347: 239–240.
- [20] Syam S A, Rupali D, Dibyendu S. Synthesis of phytochelatin in vetiver grass upon lead exposure in the presence of phosphorus[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326: 175–184.
- [21] Mufarrege M M, Hadad H R, Maine M A. Response of *Pistia stratiotes* to heavy metals (Cr, Ni, and Zn) and phosphorous[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58: 54–58.
- [22] 朱雁鸣, 韦朝阳, 冯人伟. 三种添加剂对矿冶区多种重金属污染土壤的修复效果评估: 大豆苗期盆栽实验[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1277–1278.
ZHU Yan-ming, WEI Chao-yang, FENG Ren-wei. Assessment of three chemical additives for remediation of heavy metal contaminated soils from mining and smelting areas: A seedling pot trial using soybeans[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1277–1278.