

王碧玲,谢正苗,孙叶芳,等.磷肥对铅锌矿污染土壤中铅毒的修复作用 [J].环境科学学报,2005,25(9):1189 - 1194

WANG Biling, XIE Zhengmiao, SUN Yefang, et al. Effects of phosphorus fertilizers on remediation of lead toxicity in a soil contaminated by lead and zinc mining [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(9): 1189 - 1194

磷肥对铅锌矿污染土壤中铅毒的修复作用

王碧玲¹,谢正苗^{1,2,*},孙叶芳¹,李 静¹,田兆君¹,陈英旭¹

1. 浙江大学环境与资源学院,杭州 310029

2. 杭州电子科技大学环境科学与工程系,杭州 310018

收稿日期:2005-01-18 修回日期:2005-06-30 录用日期:2005-07-04

摘要:用连续提取法研究了不同磷肥对铅锌矿污染土壤中铅化学形态的影响、磷肥降低铅毒性的机理以及磷肥的有效使用条件。结果表明,3种磷肥都具有显著降低铅的各种非残渣形态含量的作用。磷肥用量在P/Pb摩尔比为7.0时已经足够修复土壤的铅毒,并且在该磷肥用量水平时,从非残渣形态铅总量的降低幅度上看,3种磷肥修复铅污染的效果顺序为:过磷酸钙(85%)、钙镁磷肥(83%)>磷矿粉(16%);把铅的形态与其生物有效性联系起来比较,3种磷肥修复铅污染效果顺序为:钙镁磷肥(94%)、过磷酸钙(92%)>磷矿粉(61%)。磷肥具有原位修复铅污染土壤的潜能,其主要机理是通过磷肥中的磷与各种非残渣形态铅反应形成溶解度极小的磷(氯/羟基/氟)铅矿沉淀,从而降低铅的溶解性的结果,3种磷肥中以磷矿粉最为经济。

关键词:铅污染; 铅形态; 磷肥; 土壤修复

文章编号:0253-2468(2005)09-1189-07 中图分类号:X53 文献标识码:A

Effects of phosphorus fertilizers on remediation of lead toxicity in a soil contaminated by lead and zinc mining

WANG Biling¹, XIE Zhengmiao^{1,2,*}, SUN Yefang¹, LI Jing¹, TIAN Zhaojun¹, CHEN Yingxu¹

1. College of Environmental & Resource Science, Zhejiang, University, Hangzhou 310029

2. Department of Environmental Science and Engineering, Hangzhou 310018

Received 18 January 2005; received in revised form 30 June 2005; accepted 4 July 2005

Abstract: The effects of three phosphorus fertilizers (single superphosphate- SSP, calcium magnesium phosphate- CMP, phosphate rock- PR) on chemical fractions of lead (Pb) in a soil contaminated by Pb/Zn mining tailings using a sequential extraction procedure were evaluated. The primary mechanism for decreased lead toxicity in the soil by phosphorus fertilizers and the economic application of phosphorus fertilizers were also discussed. All three phosphorus fertilizers reduced Pb solubility and bioavailability effectively. It was suggested that application dosage of phosphorus fertilizers at the P/Pb molar ratio of 7.0, was enough to remediate Pb toxicity in the soil. At the level of 7.0 molar ratio of P/Pb, the effect of Pb remediation by phosphorus fertilizers followed the order in terms of the sum of decreased non residual fractions: SSP(85%) CMP(83%)>PR(16%). If the comparison linking up the chemical fractions of Pb in soil with its bioavailability, the effect of Pb remediation by three phosphorus fertilizers followed the order: CMP(94%) SSP(92%)>PR(61%). There was no remarkable difference between SSP and CMP in the reduction of lead toxicity, while both were markedly greater than PR. PR was the most economic amendment in terms of the most bioavailable (exchangeable) fraction of Pb in soil (79%). It was concluded that PR would be a most cost-effective amendment considering both its effectiveness and price. Lead precipitation as a fluoropyromorphite-like mineral in the contaminated soil reacted with phosphorus fertilizer reduced Pb solubility and reduction in the non residual fractions. The effective conversion indicate a potential of phosphorus fertilizers for in-situ Pb immobilization in soils contaminated by lead and zinc mining tailings.

Keywords: lead pollution; chemical fraction; phosphorus fertilizer; soil remediation

铅(Pb)能导致包括人类在内的各种生物的生殖功能下降、机体免疫力降低,从而引起各种生理异常,尤其对儿童的智力发育造成严重障碍(匡少平

等,2002)。环境中铅的污染源主要是含铅矿山企业排放的“三废”,其中主要是尾砂(吴永亮等,2002),这些“三废”的排放和堆积导致了含铅矿山周围土壤

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 40432004);浙江省科技厅项目(2004)资助

作者简介:王碧玲(1982→),女,硕士研究生,土壤环境化学方向,E-mail:w-biling@sohu.com; * 通讯作者(责任作者)

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 40432004); Funds from Department of Science & Technology of Zhejiang Province (2004).

Biography: WANG Biling(1982→), female, master candidate, E-mail:w-biling@sohu.com; * Corresponding author

的铅积累,并通过尘土和食物链危害人体。铅的地球化学形态决定了其在土壤中的溶解性,从而影响其潜在的生物有效性(Xian,1989)。目前,连续分级提取法被普遍应用于评定土壤中Pb的生物有效性,其中以Tessier连续提取方法为主,这种方法较之只用铅的水溶态浓度或者总量来评价其对土壤的影响更详细、更全面(Tessier et al.,1979)。

土壤铅污染治理方法有物理、化学和生物修复,且各有优缺点。近年来,根据磷与铅的相互作用来调控环境中Pb的有效性的原理而采用含磷物质(包括水溶性磷化合物、磷肥、磷灰矿粉等)来修复土壤铅污染的研究是国际上该领域的关注热点(Nriagu et al.,1974;Hettiarachchi et al.,2001;Cao et al.,2004;Ma et al.,1993;Ma et al.,1995;Ma et al.,1997b;Theodoratos et al.,2002)。国内方面,王新、吴燕玉等(1995)将Ca、Mg、P肥应用于重金属污染土壤的修复,并取得了很好的效果。但其研究对象是外加重金属土壤即人工污染土壤而不是自然污染土壤,也未涉及磷与铅相互作用的机理研究。已经有学者发现羟基磷灰石、磷矿粉和磷酸氢钙等3种含磷化合物可以通过降低铅污染土壤中铅的有效性从而降低中国芥菜的铅吸收量(陈世宝等,2004),但至今没人对农业上常用的3种磷肥(过磷酸钙、钙镁磷肥

和磷矿粉)修复铅锌矿污染土壤的效果进行比较,并在此基础上探索各种磷肥的有效使用条件。本实验的目的是采用Tessier连续分级提取方法,研究3种磷肥(过磷酸钙、钙镁磷肥和磷矿粉)对铅锌矿污染土壤中铅化学形态的影响及其机理,以及各种磷肥的有效使用条件。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 实验室模拟培养实验

供试土壤采自浙江省绍兴某铅锌矿区附近。据本研究组的前期调查发现,此铅锌矿开采已有100多年历史,现已废弃;野蛮开采导致了大量的尾矿砂被堆积在山腰处,经过长年累月的风化,其释放的铅污染了约800 hm²土壤。按常规标准法取样,采样深度为0~20 cm。土壤样品风干后,制取过100目尼龙筛的土样供实验室培养,其基本理化性质见表1。

本实验采用的3种磷肥分别为水溶性磷肥过磷酸钙(SSP)、枸溶性磷肥钙镁磷肥(CMP)、难溶性磷肥磷矿粉(PR),这3种肥料均过100目尼龙筛,其基本理化性质见表2。土壤和肥料的重金属元素的全量分析采用HNO₃-微波消化法,用原子吸收仪测定。土壤和肥料的基本性质按照常规方法测定(国家环境保护局,1995)。

表1 供试土壤的理化性质和重金属含量

Table 1 Properties of the tested soils and heavy metal contents

项目 Items	pH	有机质 Organic Matter /(g kg ⁻¹)	全铅 Total Pb /(mg kg ⁻¹)	全锌 Total Zn /(mg kg ⁻¹)	全镉 Total Cd /(mg kg ⁻¹)	全铜 Total Cu /(mg kg ⁻¹)
供试土壤	5.51	21.8	16 362	871	5.81	103
国家二级标准(CB15618—1995)	<6.50		250	200	0.300	50.0
浙江省土壤背景值(EMCC,1990)			24.5	84.8	0.202	19.8

表2 供试肥料的元素含量

Table 2 Concentrations of elements in the tested phosphorus fertilizers

磷肥 Phosphate fertilizer	pH ¹⁾ (H ₂ O)	水溶态 P Water soluble P /(mg kg ⁻¹)	有效态 P Citric acid soluble P /(mg kg ⁻¹)	全 P Total P /(mg kg ⁻¹)	全铅 Total Pb /(mg kg ⁻¹)	全锌 Total Zn /(mg kg ⁻¹)	全镉 Total Cd /(mg kg ⁻¹)	全铜 Total Cu /(mg kg ⁻¹)
PR	7.41	1.00	24.4	330	240	228	3.40	51.3
CMP	9.51	14.2	52.0	129	3.20	168	1.80	62.8
SSP	3.09	43.0	73.6	152	115	234	1.71	61.0

注:1)以1:2.5肥料/水比例测量肥料的pH值(Measure in 1:2.5 fertilizer/water suspensions)

实验按照P/Pb摩尔比(P是指全磷)计算磷肥添加量,设置2个磷用量水平,P/Pb摩尔比7.0和14.0,共7个处理:CK、PR 7.0、PR 14.0、SSP 7.0、SSP 14.0、CMP 7.0、CMP 14.0,每个处理设2个重复。称2.000 g风干土样于50 mL的聚碳酸酯离心管,按上

述处理添加肥料,混和均匀,再加去离子水使土壤保持60%含水量(田间持水量),在(25±1)℃下培养反应30 d(Ma et al.,1995;Ma et al.,1997b)。

1.2 测定方法

培养30 d后的土壤样品中元素(Pb)按照Tessier

连续分级提取方法获得各个形态:水溶态、交换态、碳酸盐态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态(Tessier *et al.*, 1979)。

水溶态:在离心管中按土水比(质量比,下同)1:15加去离子水,在室温下震荡2 h后,离心30 min,取上清液待测。

交换态:取上步残渣,按土水比1:8加1 mol L⁻¹ MgCl₂溶液(pH=7.0),震荡1 h后,离心30 min,取上清液待测。

碳酸盐态:取上步残渣,按土水比1:8加pH为5.0的1 mol L⁻¹ NaAc溶液(用HAc溶液调节pH),震荡5 h后,离心30 min,取上清液待测。

铁锰氧化物结合态:取上步残渣,按土水比1:10加0.04 mol L⁻¹ NH₄OH·HCl溶液[用25%(体积分数)HAc溶液做底液],在(96±3)水浴中间歇搅拌作用6 h,离心30 min,取上清液待测。

有机结合态:取上步残渣,先按土水比1:3和1:5分别加入0.02 mol L⁻¹ HNO₃溶液和pH为2的30% H₂O₂溶液(用HNO₃调节).在85水浴中间歇搅拌2 h,再按土水比1:3加pH为2的30% H₂O₂溶液(用HNO₃调节),在85水浴中间歇搅拌3 h.冷却后,再按土水比1:5加3.2 mol L⁻¹ NH₄Ac溶液[用20%(体积分数)HNO₃溶液做底液],防止再吸附,连续搅拌30 min.离心30 min,取上清液待测。

残渣态:取上步残渣,加浓HNO₃,微波消化.采

用由国家标准技术组织提供的标准参照物矫正上述酸消化的误差,各种微量金属的消化结果的误差都在(100±5)%范围内。

萃取液中的铅浓度用日本岛津AA6800原子吸收仪测定.测定过程中每10个测定样品间用标准样检测结果,以确保测定精度.相关统计分析采用SPSS软件10.0版本.

2 结果(Results)

2.1 污染土壤中Pb的形态分布

实验数据分析结果表明,该矿区土壤已受到严重的铅污染,全Pb分别是浙江省土壤Pb背景值的667倍、国家土壤环境质量二级标准Pb浓度的65倍(见表1).土壤中Pb各种形态组成如表3所示,各种形态比例大小顺序为:残渣态>铁锰氧化物结合态>碳酸盐态>有机结合态>交换态>水溶态,其中主要是以生物有效性最低的残渣态为主(53.8%),而生物毒性最高的水溶态和交换态的比例很小(2.02%),但其含量也高达330 mg kg⁻¹.

2.2 磷肥处理后污染土壤中Pb的形态分布变化

采用磷肥处理污染土壤后,土壤中铅形态组成的变化及方差分析结果如表3所示,3种磷肥都显著降低了该污染土壤中各种非残渣形态Pb的含量,同时也使土壤中残渣态Pb的比例明显上升.各种磷肥处理均大幅度降低了Pb污染土壤中非残渣态Pb

表3 不同磷肥处理对污染土壤中Pb的形态组成(%)影响^b

Table 3 Effects of different phosphorus fertilizers treatment on different chemical fractions of lead in contaminated soil

形态 fraction	CK	PR 7.0	PR 14.0	CMP 7.0	CMP 14.0	SSP 7.0	SSP 14.0
水溶态 Water-soluble	0.12% ^a	0.11% ^b	0.08% ^c	0.02% ^d	0.01% ^d	0.02% ^d	0 ^e
交换态 Exchangeable	1.90% ^a	0.68% ^b	0.40% ^c	0.10% ^d	0.09% ^d	0.13% ^d	0.12% ^d
碳酸盐结合态 Carbonate-Bound	15.0% ^a	13.0% ^b	8.50% ^c	1.35% ^d	0.83% ^e	1.41% ^d	1.30% ^d
铁锰氧化物态 Fe-Mn oxide-Bound	21.42% ^a	18.96% ^b	18.31% ^b	3.39% ^c	2.78% ^{cd}	2.30% ^d	1.07% ^e
有机结合态 Organic-Bound	7.76% ^a	5.90% ^b	4.76% ^c	2.91% ^d	2.15% ^e	3.02% ^d	2.26% ^e
残渣态 Residual	53.80% ^f	61.31% ^e	67.96% ^d	92.23% ^c	94.14% ^b	93.12% ^{bc}	95.25% ^a
水溶-交换态 Water-exchangeable	2.02% ^a	0.79% ^b	0.48% ^c	0.11% ^d	0.10% ^d	0.15% ^d	0.12% ^d
各非残渣态总量 Sum of nonresidual fractions	46.20% ^a	38.69% ^b	32.01% ^c	7.77% ^d	5.86% ^e	6.88% ^{de}	4.75% ^f

注:1)横向数据之间的显著性差异用Duncan检验,p<0.05,同一行的数据上标的字母不同表示处理间有显著差异,字母相同表示处理间无显著差异(The difference among treats tested by One-way AVONA, numbers which on the same row followed by different letters were significantly different at p<0.05).

含量(水溶态、交换态、碳酸盐态、铁锰氧化物结合态、有机结合态 Pb 的总和),降低幅度范围为 16%~89%,并且在所有形态中,铁锰氧化物结合态和碳酸盐结合态 Pb 的降低对土壤中非残渣态 Pb 的降低量贡献最大(这 2 种形态 Pb 降低量占了非残渣形态降低总量的 22%~74%)。方差分析结果表明,含磷量相同的磷肥,品种不同对土壤各种非残渣形态 Pb 的降低效果不同。3 种磷肥在 7.0 P/Pb 摩尔比和 14.0 P/Pb 摩尔比的磷用量水平,降低非残渣形态 Pb 总量幅度大小的顺序分别为:SSP(85%)、CMP(83%)>PR(16%),SSP(90%)>CMP(87%)>PR(30%);降低水溶-交换态 Pb 幅度大小的顺序分别为 CMP(94%)、SSP(92%)>PR(61%),CMP(95%)、SSP(94%)>PR(76%)。

当磷肥添加量从 P/Pb 摩尔比为 7.0 增加到 P/Pb 摩尔比为 14.0 时,各种非残渣形态 Pb 含量的降低量的增幅见图 1。从图 1 可知,磷肥添加量提高后,增加了污染土壤中各种非残渣形态 Pb 含量的降低幅度,但不同品种的磷肥所降低的 Pb 的形态不同:PR 主要增加了对碳酸盐结合态 Pb 含量的降低幅度,SSP 则主要促进了铁锰氧化物结合态和有机物结合态的降低(占了非残渣形态降低总量的 90%),而 CMP 则对碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态等 3 种形态 Pb 含量的降低都有促进作用。从图 1 还可以看出,增加磷肥用量后,PR 对非残渣形态 Pb 含量降低总量的促进作用在 3 种磷肥处理中是最高的,而添加 SSP 与 CMP 时的非残渣形态 Pb 降低总量相近,都不及 PR 的一半。

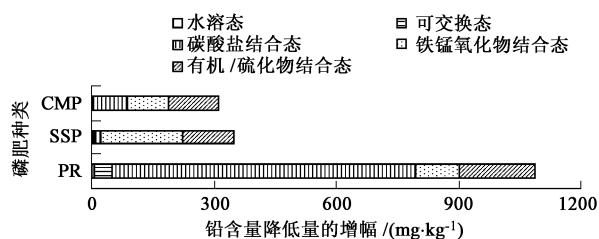


图 1 磷肥添加量的增加对土壤的铅形态分布变化的影响

Fig. 1 Effects of increasing molar ratio of P/Pb on the decreasing of Lead distribution in different chemical fractions

3 讨论(Discussion)

本实验数据表明,浙江省绍兴铅锌矿区附近的 Pb 污染土壤的 Pb 主要是以残渣态为主(53.8%),这可能和该土壤的主要污染源是长期堆放在山腰的

尾矿砂有关。山腰的尾矿砂经过长时间的地球化学风化过程,其释放的 Pb 进入土壤后主要被固定在原生、次生硅酸盐和其它稳定矿物中,因此该土壤中的 Pb 主要以残渣态为主。但土壤中的水溶和交换态 Pb 的含量也很高,并且具有很高的生物毒性。添加磷肥处理土壤后,土壤中 Pb 形态组成的变化结果表明(见表 3),磷矿粉、过磷酸钙和钙镁磷肥等 3 种磷肥都能把土壤中水溶态、交换态、碳酸盐态、铁锰氧化物结合态和有机结合态 Pb 转化为更稳定的形态。Ma Q Y 等人(1995; 1997a; 1997b)研究发现,Tessier 连续提取方法中所有的非残渣态提取剂都不能溶解提取结合在磷氯铅矿中的 Pb,并进一步猜测含磷物质主要是通过磷与各种非残渣形态 Pb 反应形成磷氯铅矿沉淀来降低 Pb 含量的,从而降低非残渣形态 Pb 的总量。类似地,可以认为磷肥降低铅毒的主要机理是通过磷肥中的磷与土壤中各个非残渣态的铅反应生成更稳定的磷酸铅盐矿(主要是磷氯/羟基/氟铅矿沉淀),降低了土壤中 Pb 的移动性,从而降低了 Pb 对生物的毒性。该反应机理符合溶度积原理(土壤中含铅矿物/沉淀的理论溶解度列于表 4)。

表 4 土壤中含铅矿物/沉淀的理论溶解度(pK_{SP} 即 $-\log K_{SP}$)

Table 4 The theoretical solubility of some lead phosphate in soil
($pK_{SP} = -\log K_{SP}$)

矿物/沉淀	Mineral/precipitate	Stoichiometry	pK_{SP}^*
密驼僧	Litharge	PbO	15.3
氢氧化铅	Lead hydroxide	Pb(OH) ₂	19.9
铅矾	Anglesite	PbSO ₄	7.7
白铅矿	Cerussite	PbCO ₃	12.8
方铅矿	Galena	PbS	27.5
正磷酸铅矿	Lead orthophosphate	Pb ₃ (PO ₄) ₂	44.6
氟磷铅矿	Fluoropyromorphite	Pb ₅ (PO ₄) ₃ F	71.6
羟基磷铅矿	Hydroxypyromorphite	Pb ₅ (PO ₄) ₃ OH	76.8
氯磷铅矿	Chloropyromorphite	Pb ₅ (PO ₄) ₃ Cl	84.4

* $pK_{SP} = -\log K_{SP}$; 数据引自 Nriagu(1974)、Ma et al.(1997a)。

实验数据方差分析的结果显示(见表 3),土壤中添加磷含量相等的磷肥时,过磷酸钙和钙镁磷肥对非残渣形态 Pb 含量的降低作用相当(均显著降低),PR 对非残渣形态 Pb 含量的降低作用较强,但也显著降低非残渣形态 Pb 含量,并且很大幅度上降低了最高生物毒性的水溶-交换态的 Pb 的含量。其中原因可能与这 3 种磷肥本身的性质有关,过磷酸钙和钙镁磷肥在酸性土壤(本实验土壤 pH 为 5.51,表 1)中可以迅速溶解出游离的磷,与土壤中各种非残渣形态 Pb 反应生成磷(氯/羟基/氟)铅沉淀,从而大幅度去除土壤中的非残渣形态 Pb,这与 Zhang P C 等(Zhang et al., 1998a; 1998b; 1999a;

1999b)的研究结果“水溶性磷可以与土壤中存在的含铅矿物如铅矾(anglesite, PbSO₄)、白铅矿(cerussite, PbCO₃)或方铅矿(galena, PbS)中的Pb、针铁矿吸附的Pb快速反应生成磷氯铅矿”相吻合。另外,过磷酸钙在土壤中溶解后降低了肥料周围土壤的pH值,从而使土壤中的碳酸盐、氧化物和有机物结合的Pb溶解并释放,并使其与土壤中的磷反应生成磷(氯/羟基/氟)铅沉淀。相反,磷矿粉是中性、难溶的磷肥,无法提供足够的水溶性磷与土壤中的Pb反应生成磷(氯/羟基/氟)铅沉淀,因而对非残渣形态Pb的去除作用较其它2种磷肥小。但磷矿粉有极大的比表面,可以大量地吸附固定土壤溶液和胶体上的水溶性和交换态的Pb,达到降低Pb生物有效性的效果。将磷肥的降低Pb毒的效果与市场上的磷肥价格综合考虑分析,经济效益排序如下:磷矿粉>过磷酸钙>钙镁磷肥。故使用磷矿粉对铅锌矿污染土壤的修复是最经济的,而且磷矿粉是一种长效磷肥,相对其

它2种速效磷肥过磷酸钙、钙镁磷肥而言,随着时间延长可以增加磷矿粉中磷的释放,从而增加对非残渣态Pb的固定。

本实验中,按P/Pb摩尔比例为7添加磷肥使土壤中非残渣形态Pb含量有大幅度降低,而P/Pb摩尔比例从7.0增加到14.0,非残渣形态P含量降低虽然达到显著水平,但其幅度却很小(见图1)。这说明了P/Pb摩尔比例为7的磷肥已经足够降低该土壤中的Pb毒。本实验添加3种磷肥处理污染土壤后土壤的pH变化情况如表5所示,pH范围为3.47~9.15,说明了磷(氯/羟基/氟)铅矿沉淀在宽pH范围内稳定,改变土壤环境的条件(特别是pH)不会影响磷肥降低Pb毒的效果,即在强酸性条件下而磷肥降低Pb毒的效果依然很显著。被固定的Pb不会因为pH的降低而重新释放到土壤环境中,而且不会因为施用磷肥而产生磷的非点源污染。这表明使用磷肥修复污染土壤中Pb毒的方法比其它方法更有优越性。

表5 不同磷肥处理对土壤pH变化的影响

Table 5 Effects of different phosphorus fertilizers on pH in soil

对照(CK)	PR 7.0	PR 14.0	CMP 7.0	CMP 14.0	SSP 7.0	SSP 14.0
pH	5.51 ±0.01	6.19 ±0.04	6.42 ±0.02	8.89 ±0.03	9.15 ±0.04	3.85 ±0.05

4 结论(Conclusions)

1) PR、SSP、CMP等3种磷肥都具有显著降低土壤中Pb的生物毒性的作用。在土壤中使用相同磷含量的磷肥时,SSP和CMP对非残渣形态Pb的去除作用相当;PR对非残渣形态Pb的去除作用较低,但也显著降低非残渣形态Pb含量,并且在很大幅度上降低了最高生物毒性的水溶-交换态Pb。

2) 增加磷肥用量可以增加磷肥对非残渣形态Pb的固定,但增加效果并不显著。因此P/Pb摩尔比例为7的磷肥用量已经足够降低该土壤中的Pb毒。

3) 将磷肥降低Pb毒的效果和市场上的磷肥价格综合考虑,使用磷矿粉是最经济的。

通讯作者简介:谢正苗(1956—),男,浙江余姚人,博士、教授、博士生导师。现主要从事环境污染化学和环境污染修复研究,已发表文章100余篇。E-mail: zhxie@sina.com

参考文献(References):

- Cao X D, Ma Q Y, Rhue D R. 2004. Mechanisms of lead, copper, and zinc retention by phosphate rock [J]. Environmental pollution, 131: 435—444
- Chen S B, Zhu Y G. 2004. Effect of different phosphorus compounds on Pb

uptake by Brassica Oleracea [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 24(4): 707—712 (in Chinese)

Hettiarachchi G M, Pierzynski G M, Ransom M D. 2001. In situ stabilization of soil lead using phosphorus [J]. J Environ Qual, 30:1214—1221

Kuang S P, Xu Z, Zhang S S. 2002. Pollution control of environmental hormone in country soil [J]. Environmental Engineering, 20(Supplement 1): 66—69 (in Chinese)

Lu R K. 1999. Analytical Methods for Soil Agrochemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press: 305—336 (in Chinese)

Ma Q Y, Logan T J, Traina S J. 1995. Lead immobilization from aqueous solutions and contaminated soils using phosphate rocks [J]. Environ Sci Technol, 29: 1118—1126

Ma Q Y, Rao G N. 1997a. Effects of phosphate rock on sequential chemical extraction of lead in contaminated soils [J]. J Environ Qual, 26: 788—794

Ma Q Y, Choate A L, Rao G N. 1997b. Effects of incubation and phosphate rock on lead extractability and speciation in contaminated soils [J]. J Environ Qual, 26:801—807

Ma Q Y, Traina S J, Logan T J. 1993. In situ lead immobilization by apatite [J]. Environ Sci Technol, 27: 1803—1810

Nriagu J O. 1974. Lead orthophosphates: Formation and stability in the environment [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 38: 887—898

SEPA. 1995. Environmental quality standard for soils (GB15618—1995) [OL], <http://www.sepa.gov.cn/eic/650208312909889536/19951206/1023470.html>

Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Anal Chem,

- 51: 844—851
- The Environmental Monitoring Center of China. 1990. The background of element in soils of China [M]. Beijing: Environmental Science Press of China :329—380 (in Chinese)
- Theodoratos L , Papassiopi N , Xenidis A. 2002. Evaluation of monobasic calcium phosphate for the immobilization of heavy metals in contaminated soils from Lavrion [J]. J Hazardous materials , B94: 135—146
- Wang X , Wu Y Y. 1995. Effect of modification treatments on behaviour of heavy metals in combined polluted soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology ,6(4) : 440—444 (in Chinese)
- Wu Q L , Yang Y A , Xie Z M. et al , 2000. The environmental quality of Pb [M]. Microelement & Bio-health , Guiyang: Science and Technology Press of Guizhou :208—281 (in Chinese)
- Xian X. 1989. Effect of chemical forms of cadmium ,Zinc and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants [J]. Plant soil , 113: 257—264
- Zhang P C , Ryan J A , Yang J. 1998a. in vitro soil Pb solubility in the presence of hydroxyapatite [J]. Environ Sci Technol , 32:2763—2768
- Zhang P C , Ryan J A. 1998b. Formation of pyromorphite in anglesite-hydroxyapatite suspension under varying pH conditions [J]. Environ Sci Technol , 32:3318—3324
- Zhang P C , Ryan J A. 1999a. Formation of chloropyromorphite from galena (PbS) in the presence of hydroxyapatite [J]. Environ Sci Technol. 33: 618—624
- Zhang P C , Ryan J A. 1999b. Transformation of Pb () from cerrusite to chloropyromorphite in the presence of hydroxyapatite under varying pH conditions [J]. Environ Sci Technol. 33:625—630
- 中文参考文献:**
- 陈世宝 ,朱永官. 2004. 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 ,24(4) : 707—712
- 匡少平,徐仲,张书圣. 2002. 农村土壤环境激素污染与防治[J]. 环境工程 ,20(增刊 1) :66—69
- 鲁如坤. 1999. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社: 305—336
- 国家环境保护局. 土壤环境质量标准(CB15618 ——1995) [OL] ,http://www. sepa. gov. cn/eic/650208312909889536/19951206/1023470. html
- 吴求亮,杨玉爱,谢正苗,等. 2000. 铅的环境质量[M]. 微量元素与生物健康. 贵阳:贵州科技出版社:208—281
- 王新,吴燕玉. 1995. 改性措施对复合污染土壤重金属行为影响的研究[J]. 应用生态学报 ,6(4) :440—444
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社:329—380

《环境科学学报》投稿须知

本刊为环境科学与工程类学术月刊 ,由中国科学院生态环境研究中心主办、科学出版社出版. 本刊力求及时报导国内环境科学与工程领域新近取得的创新性研究成果 ,跟踪最新学术进展 ,推动我国环境科学研究事业的蓬勃发展. 本刊采取主编约稿和作者自由投稿两种方式组稿. 凡自由投稿的研究论文所报导的必须是原创性研究成果 ,有关理论或技术的综述/评述/进展类的自由投稿 ,本刊不予受理.

本刊稿件录用原则是 :1)要求来稿选题新颖 ,具有开拓性或创新性 ,属于国内或国际环境科学与工程领域基础理论/应用基础/应用研究方面的前沿课题 ;2)所报道的研究成果具有重要的科学意义或工程开发应用价值 ,能够引起本学科同行的广泛关注 ;3)所报告的实验方法/技术路线合理 ,数据可靠 ,推理严谨 ,结论明确 ;4)论文写作规范 ,无政治思想错误 ,无国界、国名等错误 ,不涉及保密问题 ,无抄袭或一稿多投问题.

为执行出版领域相关国家标准 ,贯彻国家新闻出版署、科技部和中国科学院有关期刊编辑出版的标准和规范 ,本刊制定了具体的稿件格式要求. 作者可发电子邮件向本刊索取《稿件格式要求》.

投稿请将稿件电子文档发送至本刊电子邮箱或将 2 份打印件邮寄至本刊编辑部. 本刊声明事项: 由于本刊稿件流通量大 ,对于不拟录用的稿件 ,本刊一律不予退还 ,请作者投稿前保留底稿; 欢迎作者投稿前打电话或通过 E-mail 咨询投稿要求 ,或访问本刊挂在 CNKI 中国期刊网和“万方数据—数字化期刊群”上的网页查阅“稿约”信息(网页地址 :<http://hjxx.chinajournal.net.cn> 或 <http://hjkxxb.periodicals.com.cn>); 欢迎作者投稿后打电话或发 E-mail 询问编辑部是否收到稿件或查询稿件处理进程.