

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征分析 ..... 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM<sub>2.5</sub>背景浓度研究 ..... 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 ..... 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM<sub>10</sub>、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 ..... 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 ..... 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 ..... 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 ..... 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 ..... 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 ..... 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO<sub>2</sub>在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 ..... 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 ..... 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 ..... 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 ..... 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 ..... 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 ..... 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 ..... 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义 ..... 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 ..... 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征 ..... 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 ..... 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 ..... 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 ..... 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 ..... 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 ..... 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 ..... 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 ..... 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 ..... 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 ..... 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 ..... 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 ..... 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 ..... 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 ..... 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 ..... 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 ..... 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 ..... 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 ..... 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 ..... 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 ..... 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 ..... 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 ..... 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 ..... 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 ..... 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 ..... 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 ..... 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 ..... 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 ..... 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 ..... (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

# 土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究

谢伟强<sup>1,2,3</sup>, 李小明<sup>1,2\*</sup>, 陈灿<sup>3</sup>, 陈寻峰<sup>1,2</sup>, 钟宇<sup>1,2</sup>, 钟振宇<sup>3</sup>, 万勇<sup>3</sup>, 王琰<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082; 3. 湖南省环境保护科学研究院, 长沙 410004)

**摘要:** 本研究采用磷酸二氢钾、生石灰、氯化钾以一定比例混合, 对铅锌矿区污染土壤进行稳定化处理, 并通过 TCLP 和 Tessier 连续提取法对稳定化效果进行分析和评价。利用 X 射线衍射仪(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)对土壤进行形态和结构研究, 分析稳定化机制。结果表明, P/Pb 摩尔比在 2~4,  $\omega(\text{CaO})/\omega(\text{Soil})$  投加比在 0.1%~0.5%, 氯化钾投加量在 0.02~0.04 mol 时, Pb 的稳定效率在 80% 以上, 且 Pb、Zn 浸出浓度远低于标准限值。土壤中铅、锌的稳定化处理主要是将铅、锌从交换态转化为了残渣态, 有效地限制了重金属离子的迁移。XRD 和 SEM 分析表明, 稳定化处理后形成的 Ca-P-Pb 沉淀、磷酸铅盐 $[\text{PbHPO}_4, \text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2]$ 、类磷氯铅矿 $(\text{Pb-PO}_4\text{-Cl/OH})$ 及混合重金属沉淀物 $(\text{Fe-PO}_4\text{-Ca-Pb-Zn-OH})$ 相互交联将重金属离子裹缚起来, 形成稳定的结构, 使得重金属离子难以浸出。

**关键词:** 土壤; 铅; 锌; 稳定化; 浸出毒性; 形态变化; X 射线衍射

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4609-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.037

## Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies

XIE Wei-qiang<sup>1,2,3</sup>, LI Xiao-ming<sup>1,2\*</sup>, CHEN Can<sup>3</sup>, CHEN Xun-feng<sup>1,2</sup>, ZHONG Yu<sup>1,2</sup>, ZHONG Zhen-yu<sup>3</sup>, WAN Yong<sup>3</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China; 3. Hunan Research Academy of Environment Sciences, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In the present work, the combined application of potassium dihydrogen phosphate, quick lime and potassium chloride was used to immobilize the Pb and Zn in contaminated soils. The efficiency of the process was evaluated through leaching tests and Tessier sequential extraction procedure. The mechanism of stabilization was analyzed by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) to reveal the mechanism of stabilization. The results showed that the stabilizing efficiency of Pb contaminated soils was above 80% and the leaching concentrations of Pb, Zn were far below the threshold when the ratio of exogenous P and soil ( $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) was 2:1-4:1, the dosing ratio of CaO was 0.1%-0.5% (mass fraction) and the dosage of potassium chloride was 0.02-0.04 mol. Meanwhile, Pb and Zn in soil were transformed from the exchangeable fraction into residual fraction, which implied that the migration of Pb, Zn in soil could be confined by the stabilization treatment. XRD and SEM analysis revealed that Ca-P-Pb precipitation, lead orthophosphate  $[\text{PbHPO}_4, \text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2]$ , pyromorphite  $(\text{Pb-PO}_4\text{-Cl/OH})$  and mixed heavy metal deposits  $(\text{Fe-PO}_4\text{-Ca-Pb-Zn-OH})$  could be formed after solidification/stabilization in which Pb and Zn could be wrapped up to form a solidified composition and to prevent leaching.

**Key words:** soils; lead; zinc; stabilization; leaching toxicity; morphological change; X-ray diffraction (XRD)

近年来,随着我国采矿业的迅速发展,矿业开采过程中导致的重金属污染已经受到了国内外越来越多的关注,矿区重金属污染土壤的治理与修复也备受关注<sup>[1,2]</sup>。向污染土中施入改良剂,改良土壤不良性状,降低重金属的移动性和生物有效性,原位固定或钝化重金属,是重金属污染土壤修复的重要发展方向之一。磷酸盐作为一种廉价、有效的化学改良剂被不少学者用于铅污染土壤的修复,效果显著<sup>[3-7]</sup>,生石灰对铅、锌重金属污染土壤的修复效果也非常明显<sup>[8,9]</sup>。在当前研究中,对重金属污染的报道多集中于磷酸盐和石灰的单独施用治理,鲜

见对二者混合施用的研究;且在使用含磷物质修复铅、锌污染土壤时,添加适量的氯可以提高修复效果<sup>[10]</sup>。本研究在添加不同低剂量氯化钾的基础上,探讨磷酸二氢钾和生石灰混合施用对矿区铅、锌重金属污染土壤的影响。目前,我国多数矿区土壤营养元素供给潜力普遍缺乏<sup>[11]</sup>,研究氯化钾、磷酸二

收稿日期: 2015-06-12; 修订日期: 2015-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278175, 51378188); 国家国际科技合作专项项目(2013DFG91190, 2012DFB30030-03)

作者简介: 谢伟强(1989~),男,硕士,主要研究方向为土壤重金属污染治理与修复, E-mail: xieweiqianghappy@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: xmli@hnu.edu.cn

氢钾和生石灰联合修复的稳定化处理效果,探究重金属的转化机制和土壤微观结构的变化,以期在实现污染土壤修复的同时,有效改善区域土壤的肥力状况,因而更具有实践意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤采自湖南省东江湖某铅锌矿区附近,按常规标样法取样,采样深度为0~20 cm。挑除供试土壤中砾石和植物碎根后自然风干,过100目尼龙筛,充分混匀后置于塑料袋中备用。供试土壤为Pb、Zn复合污染土壤,土壤基本理化性质为:pH=5.46,重金属Pb含量为9365.83 mg·kg<sup>-1</sup>、Zn含量为5438.17 mg·kg<sup>-1</sup>、Fe含量为36512.6 mg·kg<sup>-1</sup>、Mn含量为28031.2 mg·kg<sup>-1</sup>、有机质含量为3.54 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 实验设计

由上文可知,土壤中铅远高于锌含量。由于Zn和Pb具有相似的土壤化学行为,且矿区土壤中Pb较Zn更容易在土壤表层富集<sup>[12]</sup>,因此本实验以土壤中总铅为依据,磷的投加量以Pb/P的摩尔比为基础来设计,生石灰则以与土样的百分比进行投加。本实验每组土样取量为100 g,药剂与土样混合搅拌均匀,称重法保持土壤含水率为30%,再次搅拌均匀,置于室内自然条件下养护28 d。实验采用三因素四水平正交设计进行实验,共16个处理,投加比例见表1。

表1 正交试验因素水平  
Table 1 Orthogonal experiment under different ratios of P/Pb and CaO/Soil

水平	试验因素		
	P/Pb/mol·mol <sup>-1</sup>	CaO/Soil/%	Cl/mol
1	0.5:1	0.05	0.005
2	1:1	0.1	0.01
3	2:1	0.5	0.02
4	4:1	2	0.04

### 1.3 测定与计算方法

采用美国危险废弃物毒性浸出程序(TCLP)<sup>[13]</sup>对处理前后土样中重金属的稳定化效果进行分析;重金属形态分析采用 Tessier 等提出的分级提取方法<sup>[14]</sup>提取,共分为5个形态:交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态以及残渣态;浸出液中的重金属离子浓度采用原子吸收分光光度计(ASS,Agilent3510,USA)进行测定分析;采用D500型全自动X射线衍射(XRD)分析处理前后土壤中的成分;采用TM-3000型台式扫描电子显微镜分析处

理前后土壤的微观表面形貌。为了描述药剂对土壤重金属的稳定效果,文中引入稳定效率的定义:

$$\eta\% = \frac{c_0 - c_s}{c_0} \times 100$$

式中, $\eta$ 为稳定效率(%), $c_0$ 为处理前土壤重金属浸出液浓度(mg·L<sup>-1</sup>), $c_s$ 为处理后土壤重金属浸出液浓度(mg·L<sup>-1</sup>)。稳定效率越大,稳定效果越好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤稳定化处理后 Pb、Zn 的稳定效率

由表2可知,Pb的稳定效率为3.9%~99.6%,Zn的稳定效率为16.9%~57.6%。在稳定效率的基础上采用极差分析法<sup>[15]</sup>对其进一步分析。如表3所示, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 表示各实验因素在其特定水平上的实验结果平均值; $R$ 为极差, $R$ 值越大,表示该列因素的数值在实验范围内的变化会导致实验指标在数值上更大的变化,因此 $R$ 值最大的一列,就是因素水平对实验结果影响最大的因素。由表3可知,重金属Pb中因素P/Pb中 $k_4$ 值最大,因此此因素中的最佳摩尔比为4:1;同理可分析出因素CaO/Soil的最佳质量比为0.1%,最佳KCl投加量为0.02 mol,因素P/Pb摩尔比、CaO/Soil质量投加比、KCl投加量的 $R$ 值分别为80.3%、13.3%、2.1%,据此可知影响Pb稳定化效果的顺序为磷酸二氢钾>生石灰>KCl;处理后土壤TCLP浸出液中Pb浓度在0.1~1.4 mg·L<sup>-1</sup>范围内,最佳为0.1 mg·L<sup>-1</sup>;Zn浓度在8.0~8.9 mg·L<sup>-1</sup>范围内,最佳为8.0 mg·L<sup>-1</sup>。重金属Zn的最佳稳定效果的参数比为:P/Pb摩尔比2:1,CaO/Soil质量投加比为2%,KCl投加量0.04 mol。影响Zn稳定化效果的顺序为生石灰>磷酸二氢钾>KCl;处理后土壤TCLP浸出液中Pb浓度在0.15~7.6 mg·L<sup>-1</sup>(7.6 mg·L<sup>-1</sup>是P/Pb摩尔比为0.5:1的浸出浓度),最佳为0.15 mg·L<sup>-1</sup>;Zn浓度在4.5~8.1 mg·L<sup>-1</sup>范围内,最佳为4.5 mg·L<sup>-1</sup>。在此范围内,土壤pH值变化范围为5.94~7.24。

采用含磷物质将土壤TCLP浸出液中Pb的含量降低到国际标准限值(5 mg·L<sup>-1</sup>)内,不同的学者研究各有不同。Theodoratos等<sup>[16]</sup>研究指出,在0.6 P/Pb摩尔比时可以将污染土壤TCLP浸出液中Pb的含量降低到标准限值内;Chen等<sup>[17]</sup>和Melamed等<sup>[18]</sup>研究指出修复污染土壤时,4:1 P/Pb摩尔比效果最佳。本实验结果表明P/Pb摩尔比在2~4区间时,土壤中TCLP浸出液的Pb含量

降低到标准限值内,在 P/Pb 摩尔比 4:1 时效果最佳,且浸出液中 Zn 的含量也远远低于标准限值 ( $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),这些与上述学者的研究结果相符,说明磷酸二氢钾和生石灰可以有效修复铅锌污染土壤. 上述实验结果证明了采用氯化钾、磷酸二

氢钾和生石灰联合修复铅锌污染土壤是有效的. 综合考虑 Pb、Zn 的浸出浓度、稳定效率及极差结果, P/Pb 摩尔比在 2~4, CaO/Soil 质量投加比在 0.1%~0.5%, 氯化钾投加量在 0.02~0.04 mol 范围内比较合理.

表 2 土壤稳定化处理条件及 Pb、Zn 稳定效率表

Table 2 Pb and Zn stabilizing performances of the soil under various conditions

处理编号	因素			Pb 的稳定效率 /%	Zn 的稳定效率 /%
	P: Pb/mol·mol <sup>-1</sup>	CaO/Soil/%	Cl/mol		
1	0.5:1	0.05	0.005	10.1	21.9
2	0.5:1	0.1	0.01	8.1	24.7
3	0.5:1	0.5	0.02	13.9	23.1
4	0.5:1	2	0.04	7.2	27.7
5	1:1	0.05	0.01	51.2	18.8
6	1:1	0.1	0.005	63.3	26.5
7	1:1	0.5	0.04	54.04	43.5
8	1:1	2	0.02	40.6	49.6
9	2:1	0.05	0.02	91.3	18.3
10	2:1	0.1	0.04	92.7	33.5
11	2:1	0.5	0.005	88.8	43.1
12	2:1	2	0.01	80.6	57.6
13	4:1	0.05	0.04	82.4	17.1
14	4:1	0.1	0.02	98.8	24.8
15	4:1	0.5	0.01	98.4	16.9
16	4:1	2	0.005	81.1	24.6

表 3 Pb、Zn 极差分析/%

Table 3 Ranging analysis for Pb and Zn/%

重金属种类	极差分析	因素		
		P/Pb/mol·mol <sup>-1</sup>	CaO/Soil/%	Cl/mol
Pb	$k_1$	9.9	58.8	60.1
	$k_2$	52.3	65.7	59.6
	$k_3$	88.4	63.8	61.2
	$k_4$	90.2	52.4	59.1
	$R$	80.3	13.3	2.1
Zn	$k_1$	24.6	19.8	29
	$k_2$	34.6	27.4	29.5
	$k_3$	38.1	31.7	28.9
	$k_4$	20.9	39.9	30.5
	$R$	17.2	20.1	1.6

## 2.2 土壤中 Pb、Zn 的形态变化

土壤中重金属的赋存形态会因周围环境条件的改变而发生变化<sup>[19]</sup>,且浸出液中重金属离子浓度的变化只是稳定剂与土壤重金属相互作用的结果,其本质应归因于在稳定剂作用下,重金属在土壤中的赋存状态发生了改变<sup>[20]</sup>. 在 5 种形态中,交换态属于生物可利用态,迁移能力较强,对环境存在较大的风险;碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态属于生物潜在可利用态,在特定条件下,可变为生物可利用态,残渣态属于生物不可利用态,该形态下重金属非常稳定,其迁移能力和生物可利用性

很低.

根据上述实验结果,主要考虑 Pb、Zn/Pb 摩尔比在 2~4, CaO/Soil 质量投加比在 0.1%~0.5%, 氯化钾投加量在 0.02~0.04 mol 范围内取样本进行分析,且主要考虑 P 和 CaO 的主导因素,因此本阶段实验选取 10 号、11 号、14 号、15 号土壤样品进行重金属形态分析.

由图 1 可知,处理前土壤样品中, Pb、Zn 的主要赋存形态为铁锰氧化物结合态和残渣态, Pb 交换态占比为 3.2%, 碳酸盐结合态为 9.1%, 有机物结合态含量极少, Zn 交换态占比为 4.8%, 碳酸盐结合

态为 5.4%, 有机物结合态为 4.8%; Pb、Zn 的交换态占比较低, 考虑到土壤中两种重金属含量都很高, 因此土壤中的交换态 Pb、Zn 的含量也会很高, 仍会对环境产生较大的风险。

经稳定化处理后, 土壤样品中 Pb 的交换态占比急剧减少, 含量仅在 0.5% 左右, 随着磷酸盐和氯化钾投加量的增加, Pb 的碳酸盐结合态也随之减少至 1.9%, 铁锰氧化物结合态增加了 2% ~ 3.9%, 残渣态增加了 5.4% ~ 7.2%。交换态的急剧减少, 说明磷酸盐可以有效降低污染土壤中 Pb 的生物可利用性, 其原理是通过投加磷酸二氢钾形成磷酸铅沉淀并由此增加铅的吸附量来降低土壤中铅的迁移和转化; 随着生石灰投加量的增加, 样品中的碳酸盐结合态并没有增加反而减少, 有研究表明 Ca 对 P-Pb 沉淀反应有促进作用<sup>[21]</sup>, 且生石灰投入土壤形成的氢氧化物和碳酸盐在一定程度上提升了土壤中 pH 值<sup>[22,23]</sup>, 在中性及偏酸性条件下有利于促进磷酸盐的溶解和铅的固定<sup>[24]</sup>, 同时 Cl<sup>-</sup> 的添加促进了磷酸二氢钾对重金属 Pb 的吸收, 生成极难分解的氯磷铅矿, 从而降低了铅的有效性<sup>[25,26]</sup>, 且已有研究表明<sup>[27,28]</sup>, K<sup>+</sup> 的添加并不影响含磷物质固化污染重金属的效果。

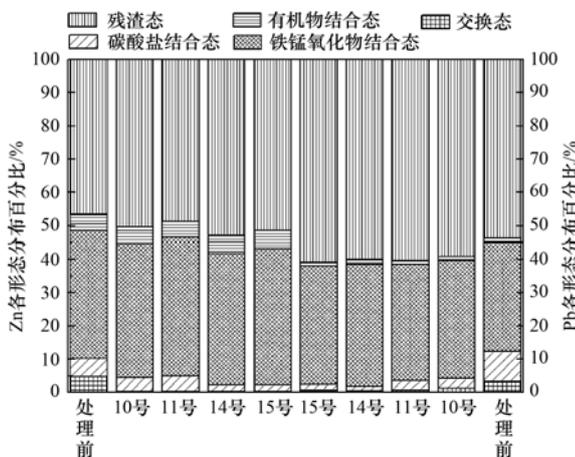


图 1 稳定化前后土壤中 Pb、Zn 形态分布

Fig. 1 Fractionation of Pb, Zn before and after stabilization of soil

土壤样品中重金属 Zn 经稳定化处理后主要表现为交换态和残渣态的变化, 交换态急剧减少, 最终含量在 0.2% 左右, 碳酸盐结合态在 P/Pb 摩尔比 2:1 时, 减少幅度较小, 在 P/Pb 摩尔比 4:1 时, 减少至 2%, 铁锰氧化物结合态和有机物结合态变化幅度较小, 残渣态增加了 2.1% ~ 6.35%; 上述实验结果表明磷酸盐和生石灰的混合施用能显著减少重金属 Zn 的有效性。有报道指出, 生石灰对土壤中锌的

稳定化作用主要是通过改变土壤中 pH 值来实现<sup>[29,30]</sup>, 向土壤中施入生石灰后, 土壤 pH 值上升, 一方面土壤表面的可变负电荷增加从而促进了土壤中胶凝颗粒对重金属锌离子的吸收; 另一方面, 随着氢离子浓度降低, 氢离子竞争作用减弱, 土壤中吸附重金属锌离子的主要载体, 包括铁锰氧化物, 有机质等胶凝颗粒与重金属离子结合更加牢固, 锌向更加稳定的态系转化。磷酸盐对土壤中 Zn 的稳定化机制一般有两种<sup>[31]</sup>, 即表面吸附作用和沉淀/共沉淀作用; 而土壤中添加生石灰促进重金属离子形成氢氧化物沉淀及碳酸盐沉淀/共沉淀, 因此可推断出磷酸盐对土壤中 Zn 的稳定化主要是通过沉淀/共沉淀作用实现的。

## 2.3 微观表征与分析

### 2.3.1 X 射线衍射分析

土壤中含有大量的结晶矿物, 需要通过 XRD 鉴定, 本阶段实验通过对处理前土壤及处理后 14 号土壤进行了物相分析。由图 2 可知, 土样中的晶相物质主要是 SiO<sub>2</sub>、铁锰氧化物及铁锰铅硅氧化物。经稳定化处理后, 土壤中的晶体相由 SiO<sub>2</sub>、铁锰氧化物、铁锰铅硅氧化物、Ca-P-Pb 沉淀、磷酸铅盐 [PbHPO<sub>4</sub>、Pb<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]、类磷氯铅矿 (Pb-PO<sub>4</sub>-Cl/OH) 及混合重金属沉淀物 (Fe-PO<sub>4</sub>-Ca-Pb-Zn-OH) 构成。形成这些产物的原因是投加氯化钾、磷酸二氢钾和生石灰到土壤中后, P 与土壤中水相和胶体表面的 Pb 迅速反应, 生成各种含铅磷酸盐沉淀, 从而降低了土壤中 Pb 的交换态含量; Ca 通过与 P 发生沉淀反应, 将重金属 Pb 离子包裹在沉淀凝胶颗粒中, 形成 Ca-P-Pb 化合物; Cl<sup>-</sup> 与 P 一起投加到土壤中, 生成极难溶解的氯磷铅矿, 添加氯能促进土壤中类磷氯铅矿

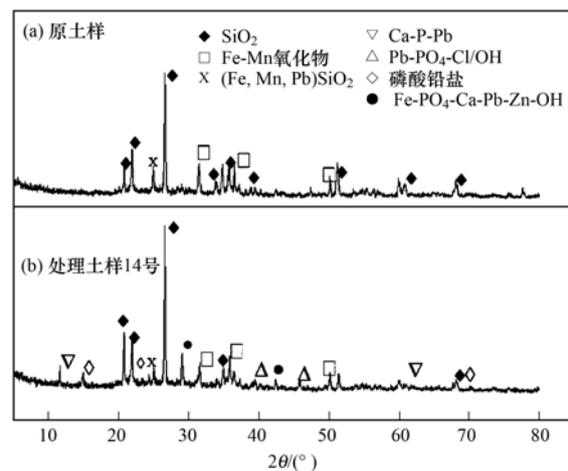


图 2 土壤稳定化处理后 X 射线衍射图谱

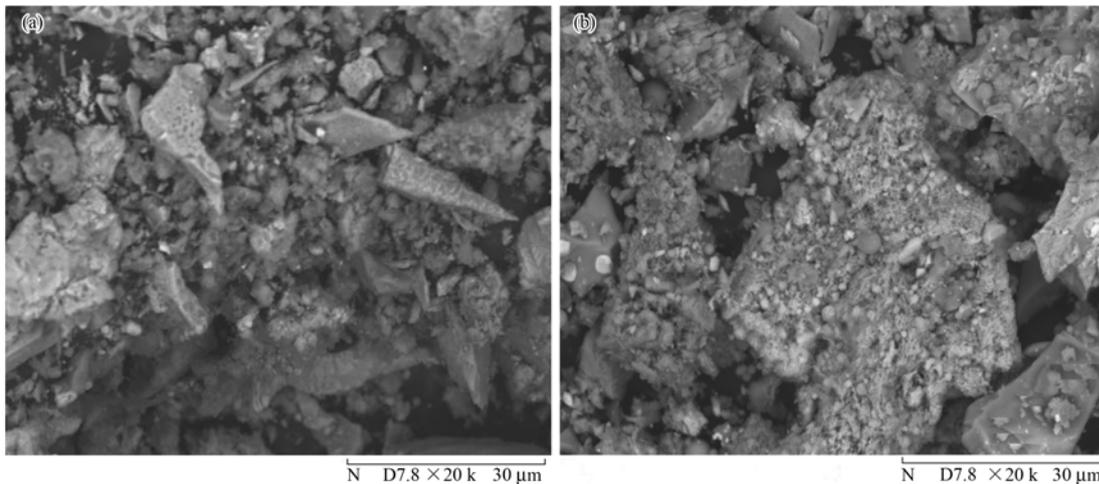
Fig. 2 XRD spectra of soil before and after stabilization

沉淀的进行<sup>[10]</sup>; 上述产物及土壤中的铁锰氧化物通过物理吸附、大型包胶等作用将重金属锌离子包裹这些沉淀凝胶颗粒中从而形成混合重金属沉淀物; 这些产物都是低溶解性和低迁移性的物质。

### 2.3.2 SEM 电镜分析

对稳定化处理前后土样的形态进行微观形貌观察(图 3), 放大倍数均为 2 000 倍。从中可见, 稳定化处理前, 原土样中颗粒稀少且结构稀疏, 没有规则,

因此颗粒流动性大, 对环境存在较大的风险; 稳定化处理后, 土样中呈现网状物质结构, 呈现一定规则的团状和柱状颗粒, 且结构密实, 这些物质结构和颗粒物都是 Ca-P-Pb 沉淀、磷酸铅盐 [  $\text{PbHPO}_4$ 、 $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$  ]、类磷氯铅矿 (  $\text{Pb-PO}_4\text{-Cl/OH}$  ) 及混合重金属沉淀物 (  $\text{Fe-PO}_4\text{-Ca-Pb-Zn-OH}$  ) 的表面形态特征, 它们将重金属离子裹缚起来, 并相互交联, 使得重金属离子难以浸出。



(a) 原土样; (b) 处理土样 14 号

图 3 土壤稳定化处理前后 SEM 图 (  $\times 2\,000$  )

Fig. 3 SEM photograph of soil before and after solidification/stabilization (  $\times 2\,000$  )

## 3 结论

(1) P 的加入对稳定化处理铅锌污染土壤中起着至关重要的作用。P/Pb 摩尔比在 2 ~ 4, CaO/Soil 质量投加比在 0.1% ~ 0.5%, 氯化钾投加量在 0.02 ~ 0.04 mol 范围内, Pb 的稳定效率在 80% 以上, 且 Pb、Zn 浸出浓度远低于标准限值。

(2) 形态分析结果表明, 土壤中 Pb、Zn 都以残渣态和铁锰氧化物结合态为主; 稳定化处理后, 土壤中 Pb、Zn 交换态均显著减少, 残渣态有不同程度地增加。

(3) XRD 和 SEM 分析表明, 稳定化处理后形成的 Ca-P-Pb 沉淀、磷酸铅盐 [  $\text{PbHPO}_4$ 、 $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$  ]、类磷氯铅矿 (  $\text{Pb-PO}_4\text{-Cl/OH}$  ) 及混合重金属沉淀物 (  $\text{Fe-PO}_4\text{-Ca-Pb-Zn-OH}$  ) 相互交联将重金属离子裹缚起来, 形成稳定的结构, 使得重金属离子难以浸出。

### 参考文献:

[ 1 ] 仇荣亮, 仇浩, 雷梅, 等. 矿山及周边地区多金属污染土壤修复研究进展 [ J ]. 农业环境科学学报, 2009, **28** ( 6 ): 1085-1091.  
[ 2 ] 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复 [ J ]. 土壤学报,

2003, **40** ( 2 ): 161-169.

[ 3 ] 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.  
[ 4 ] McGowen S L, Basta N T, Brown G O. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil [ J ]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30** ( 2 ): 493-500.  
[ 5 ] 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** ( 1 ): 184-192.  
[ 6 ] Chrysochoou M, Dermatas D, Grubb D G. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization; the unclear role of phosphate [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **144** ( 1-2 ): 1-14.  
[ 7 ] Raicevic S, Kaludjerovic-Radoicic T, Zouboulis A I. In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: theoretical prediction and experimental verification [ J ]. Journal of Hazardous Materials, 2005, **117** ( 1 ): 41-53.  
[ 8 ] 张茜, 徐明岗, 张文菊, 等. 磷酸盐和石灰对污染红壤与黄泥土中重金属铜锌的钝化作用 [ J ]. 生态环境, 2008, **17** ( 3 ): 1037-1041.  
[ 9 ] 陈晓婷, 王果, 张潮海, 等. 石灰泥炭对镉铅锌污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响 [ J ]. 土壤与环境, 2002, **11**

- (1): 17-21.
- [10] 王碧玲, 谢正苗, 李静, 等. 氯和磷对土壤中水溶-可交换态铅的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1724-1728.
- [11] Lu X S. Mine land reclamation and ecological restoration for the 21 Century: Beijing international symposium on land reclamation [C]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2000. 139-146.
- [12] 姬艳芳, 李永华, 杨林生, 等. 湘西凤凰铅锌矿区典型土壤剖面中重金属分布特征及其环境意义[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(5): 1094-1102.
- [13] United States Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste and Emergency Response. Test methods for evaluating solid waste: physical/chemical methods[R]. US Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, 1982.
- [14] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [15] 胡传荣, 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 130-131.
- [16] 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.
- [17] Chen M, Ma L Q, Singh S P, *et al.* Field demonstration of in situ immobilization of soil Pb using P amendments[J]. Advances in Environmental Research, 2003, **8**(1): 93-102.
- [18] Melamed R, Cao X D, Chen M, *et al.* Field assessment of lead immobilization in a contaminated soil after phosphate application [J]. Science of the Total Environment, 2003, **305**(1-3): 117-127.
- [19] 汪玉娟, 吕文英, 刘国光, 等. 沉积物中重金属的形态及生物有效性研究进展[J]. 安全与环境工程, 2009, **16**(4): 27-29.
- [20] 缪德仁. 重金属复合污染土壤原位化学稳定化试验研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010. 35-36.
- [21] Chen S B, Xu M G, Ma Y B, *et al.* Evaluation of different phosphate amendments on availability of metals in contaminated soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **67**(2): 278-285.
- [22] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar [J]. Chemosphere, 2013, **92**(11): 1450-1457.
- [23] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3488-3497.
- [24] 陈世宝, 朱永官, 马义兵. 不同磷处理对污染土壤中有效态铅及磷迁移的影响[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(7): 1140-1144.
- [25] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, **35**(3): 366-370.
- [26] Ma L Q, Rao G N. Effects of phosphate rock on sequential chemical extraction of lead in contaminated soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, **26**(3): 788-794.
- [27] Miretzky P, Fernandez-Cirelli A. Phosphates for Pb immobilization in soils: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2008, **6**(3): 121-133.
- [28] Arya C, Sa'id-Shawqi Q, Vassie P R W. Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, **26**(6): 851-860.
- [29] 徐明岗, 张青, 曾希柏. 改良剂对黄泥土镉锌复合污染修复效应与机理研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1361-1366.
- [30] Zwonitzer J C, Pierzynski G M, Hettiarachchi G M. Effects of phosphorus additions on lead, cadmium, and zinc bioavailabilities in a metal-contaminated soil [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, **143**(1-4): 193-209.
- [31] Cao X D, Ma L Q, Rhue D R, *et al.* Mechanisms of lead, copper, and zinc retention by phosphate rock [J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(3): 435-444.

## CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> of Beijing During 2014 APEC .....	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM <sub>2.5</sub> Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013 .....	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC .....	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying .....	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta .....	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry .....	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution .....	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing .....	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material .....	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO <sub>2</sub> Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites .....	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area .....	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem .....	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data .....	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs .....	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir .....	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics .....	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research .....	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis .....	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section .....	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River .....	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang .....	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season .....	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake .....	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches .....	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System .....	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties .....	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR .....	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions .....	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS .....	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing .....	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou .....	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures .....	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques .....	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales .....	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects .....	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies .....	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO <sub>4</sub> and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize .....	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L. .....	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage .....	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil .....	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization .....	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River .....	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain .....	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector .....	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发售