

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英, 郎继东, 张丽娜, 方剑火, 曹晨, 郝吉明, 朱昕, 田埂, 蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林, 赵文吉, 郭道宇, 陈凡涛, 束同同, 郑晓霞, 赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨, 崔彤, 何万清, 聂磊, 王军玲, 潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红, 瞿群, 刘随心, 李雄, 钟佩仪, 陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽, 杨俊, 仇珍珍, 雷万雄, 曾婷婷, 兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰, 孔少飞, 汤莉莉, 赵天良, 韩永翔, 于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳, 陈辉, 巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋, 姚鹏, 赵彬, 王金鹏, 潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪, 马迎群, 秦延文, 邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 华玉妹, 朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷, 姚鹏, 王金鹏, 潘慧慧, 高立蒙, 赵彬, 李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍, 康世昌, 陈鹏飞, 柏建坤, 李洋, 胡召富, 李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 刘文, 肖琼, 于爽, 张陶, 莫雪, 孙平安, 潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一, 吕现福, 段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰, 余浩, 刘书卉, 刘梦琳, 孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 廖昱, 谢正兰, 张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬, 张成, 赵锋, 唐振亚, 王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏, 王远娜, 尤琼智, 郭芳, 高雪飞, 何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞, 肖琼, 刘文, 郭芳, 潘谋成, 于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应: 对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋, 何俊, 杨轶中, 韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云, 周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东, 周森, 孟晓荣, 王磊, 黄丹曦, 夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺, 韩佳芮, 魏博凡, 周磊, 张亚, 杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲, 周丹丹, 张嵘嵘, 邵享文, 雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红, 卓琼芳, 许振成, 王劲松, 魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明, 王会芳, 左早荣, 仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 刘捷, 沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰, 李婷, 张树军, 樊晓燕, 潘凯玲, 马谦, 袁亚林 (2939)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究	巫恺澄, 吴鹏, 徐乐中, 李月寒, 沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊, 杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏伟, 杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 全致琦, 马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静, 康荣华, 张婷, 朱婧, 段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑, 王章玮, 张晓山, 秦普丰, 陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君, 王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 刘上千, 王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中苊解吸的影响	全冬丽, 双生晴, 李晓军, 邓万荣, 赵然然, 贾春云, 巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林, 李金春子, 王斌远, 樊磊涛, 沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉, 李鸿博, 周永莉, 陈静, 王琳玲, 陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性	焦海华, 潘建刚, 徐圣君, 白志辉, 王栋, 黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽, 邹威, 周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 林龙勇, 杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆, 胡红青, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷, 姚春霞, 沈源源, 张玉洁, 苏楠楠, 周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬, 李雅洁, 崔益斌, 李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶, 付玉彬, 梁生康, 陈伟, 柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣, 卜龙利, 梁欣欣, 孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 曹知平, 王凯军, 左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季, 吴洪生, 高志球, 尚小厦, 郑培慧, 印进, Kakpa Didier, 任迁琪, Ogou Katchele Faustin, 陈素云, 徐亚, 姚童言, 李炜, 钱景珊, 马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文, 李力, 王杰, 曹燕, 刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734, 2783, 3073, 3079)	

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化

汤帆, 胡红青*, 苏小娟, 付庆灵, 朱俊

(华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 通过室内培养试验研究了磷矿粉和草酸活化磷矿粉与腐熟水稻秸秆配施及不同水分处理对土壤基本性质和铅形态变化的影响。结果表明, 施用3种钝化材料都能提高土壤pH值、有效磷、交换性钙、阳离子交换量, 其中活化磷矿粉效果最佳; 与保持70%田间持水量相比, 淹水处理增加pH、提高交换性钙效果更好, 但有效磷较低。施用3种钝化材料能使可交换态铅减少, 促进其向生物难利用态转变, 活化磷矿粉对铅的钝化效果优于未活化的磷矿粉, 两者最高分别可使交换态与对照相比降低40.3%和24.2%, 且钝化效果与施用量呈正相关; 腐熟水稻秸秆能增加土壤有机结合态铅; 淹水处理可促使交换态铅向铁锰氧化物和残渣态转化。

关键词: 磷矿粉; 腐熟水稻秸秆; 铅; 土壤; 钝化

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3062-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.045

Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil

TANG Fan, HU Hong-qing*, SU Xiao-juan, FU Qing-ling, ZHU Jun

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The soils treated with phosphate rock (PR) and oxalic acid activated phosphate rock (APR) mixed with decomposed rice straw were incubated in different moisture conditions for 60 days to study the effect on the basic property of the soil and on the speciation variation of Pb. The results showed that all these three types of immobilizing materials increased the pH, the Olsen-P, the exchangeable Ca and the soil cation exchange capacity, and APR showed more obvious effect; the pH and the exchangeable Ca of soil in the flooding treatment were higher than those in normal water treatment (70%), but the Olsen-P of soil in normal water treatment was a little bit more. These materials reduced exchangeable Pb fraction, and converted it into unavailable fraction. But the APR was better than raw PR in immobilizing lead, and the exchangeable Pb fraction was reduced by 40.3% and 24.2%, compared with the control, respectively, and the immobilization effect was positively correlated with the dosage. Decomposed rice straw could transform the exchangeable Pb fraction in soil into organic-bound fraction, while the flooding treatment changed it into the Fe-Mn oxide-bound and residue fractions.

Key words: activated phosphate rocks; decomposed rice straw; lead; soil; immobilization

矿产的不合理开采、冶炼、制造和含重金属制品的不规范使用, 以及相关工矿企业在生产过程中对水、气、渣等废弃物的违规排放等, 造成了世界范围内的土壤重金属污染, 严重危害人类健康和生态环境^[1]。重金属污染已受到世界环保工作者的广泛关注, 寻求重金属污染治理的高效修复材料、修复技术迫在眉睫。研究发现, 磷矿粉是一种修复重金属污染土壤的经济高效的钝化材料, 其主要作用机制是与重金属发生化学反应, 将重金属固定或生成沉淀^[2]。土壤中铅与磷矿粉作用主要生成磷酸铅类化合物, 其中磷氯铅矿 ($\text{Pb}_5[\text{PO}_4]_3\text{Cl}$) 是最稳定的铅形态之一^[3]。Wang等^[4]研究磷矿粉钝化重金属及对黑麦草吸收重金属的影响发现, 5%的磷矿粉能增加黑麦草的生物量并减少铅、铜、锌的积累, 可分别降低黑麦草根和茎中铅的33%和56%。

有机物料施用能改变土壤中重金属的形态^[5-8]; 有机物料腐解后产生的某些基团能有效吸附、络合土壤重金属, 从而减少重金属的生物有效性^[9,10]。李影等^[11]研究表明牛粪、鸡粪、秸秆与化肥配施及单施化肥均能显著降低土壤中弱酸溶解态铅含量, 增加残余态铅含量, 大大增加重金属铅的稳定性。

重金属的活性受土壤环境变化的影响, 土壤水分状况与环境变化有着密切的联系^[12], 而土壤水分状况对重金属形态变化的影响尚鲜见报道。利用磷矿粉钝化重金属, 前人的研究多集中在研究其施用

收稿日期: 2015-01-27; 修订日期: 2015-03-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA101402)

作者简介: 汤帆(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染修复, E-mail: nmtf.ok@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn

量、粒径大小、矿石类型对重金属钝化的影响^[2~4]，本文利用磷矿粉与腐熟水稻秸秆混合施于铅污染土壤，研究磷矿粉与秸秆混施和不同水分条件对铅的钝化效果，以期为铅污染土壤治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1)磷矿粉：购自湖北省钟祥市，为沉积型磷酸盐矿床，磨细过筛。称取一定量磷矿粉，用 0.5 mol·L⁻¹草酸按液固比为 10:1混匀，在(28±1)℃下静态培养 6 d，60℃下烘干，磨细过 100 目筛，为活化磷矿粉，用于培养试验。供试磷矿粉的化学性质见表 1。

(2)土壤：采自湖北省咸宁市砂页岩残积坡积物发育的红壤，自然风干后，去除植物残体和砾石等，过 2 mm 筛。土壤基本理化性质按土壤农化常规

分析方法测定，结果为 pH 4.30，有机质 18.1 g·kg⁻¹，全氮 0.7 g·kg⁻¹，全磷 0.37 g·kg⁻¹，全钾 58.6 g·kg⁻¹，有效磷 3.35 mg·kg⁻¹，阳离子交换量(CEC) 6.70 cmol·L⁻¹，质地黏土，铅含量 32.7 mg·kg⁻¹。人为加入硝酸铅溶液污染土壤，铅浓度设定为 250 mg·kg⁻¹，充分搅拌均匀，老化 60 d 后风干，研磨过 2 mm 筛待用。

(3)水稻秸秆：采自华中农业大学水稻试验田，未被铅污染。用微型植物样品粉碎机(孔径为 1 mm)磨碎，测定其养分组成：全氮 3.7 g·kg⁻¹，全磷 0.58 g·kg⁻¹，全钾 16.9 g·kg⁻¹。水稻秸秆的灰分组成：K 289.7 mmol·kg⁻¹、Na 17.8 mmol·kg⁻¹、Ca 70.5 mmol·kg⁻¹、Mg 24.2 mmol·kg⁻¹。秸秆用尿素调节碳氮比 C:N=20，添加质量比为 1% 的白腐菌(鲜重)，充分搅拌均匀，用水浇透，保持湿润，直至腐熟(腐熟标准：秸秆易断，无异味，褐黄或黑黄色)。

表 1 供试磷矿粉的基本化学性质

Table 1 Basic chemical properties of the tested phosphate rock

磷矿粉	总磷(P ₂ O ₅)/%	有效磷(P ₂ O ₅)/%	CaO/%	MgO/%	Pb/mg·kg ⁻¹
原磷矿粉 PR	23.2	2.61	38.1	1.46	18.9
活化磷矿粉 APR	15.1	13.7	24.8	0.96	12.31

1.2 试验设计及管理

试验在 250 mL 塑料烧杯中进行，每杯装污染土 200 g。试验设两个磷材料(磷矿粉 PR，活化磷矿粉 APR)、两个磷水平(P₂O₅ 0.12 g·kg⁻¹，用 PR1 或 APR1 表示；P₂O₅ 0.36 g·kg⁻¹，用 PR2 或 APR2 表

示)和腐熟水稻秸秆(10 g·kg⁻¹，用字母 G 表示)，试验处理如表 2。同时设置保持 70% 田间持水量(含水量为 24%，用字母 D 表示)和淹水深度 10 mm(保持水层深度不变，用字母 W 表示)，各 2 次重复。试验在室内进行，培养 60 d；培养期间保持土壤水分不变。

表 2 试验处理/g·kg⁻¹

Table 2 Treatments in the experiment/g·kg⁻¹

处理代号	CK	G	PR1	PR1G	PR2	PR2G	APR1	APR2	APR1G	APR2G
腐熟水稻秸秆(G)	0	10	0	10	0	10	0	0	10	10
磷矿粉(P ₂ O ₅)	0	0	0.12	0.12	0.36	0.36	0	0	0	0
活化磷矿粉(P ₂ O ₅)	0	0	0	0	0	0	0.12	0.36	0.12	0.36

1.3 数据统计分析

数据用 Microsoft Excel 2007、SAS 8.1 和 Origin 8.0 统计分析软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 试验处理对土壤性质的影响

由图 1 可知，添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆可显著提高土壤 pH。保持田间持水量 70% 的对照处理 pH 值仅为 4.32，淹水的对照处理 pH 值为 4.47，添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆最多可使土壤 pH 提高 0.28，添加了腐熟水稻秸秆的处理土壤

pH 比未添加的最多增加 0.17，高量磷矿粉处理(P₂O₅ 0.36 g·kg⁻¹)提高土壤 pH 的效果比低量磷矿粉处理(P₂O₅ 0.12 g·kg⁻¹)的显著，且活化磷矿粉作用效果强于原磷矿粉。淹水处理的土壤 pH 比保持 70% 田间持水量处理的土壤 pH 值高，最大差值可达 0.17。

由图 2 可见，添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆能提高土壤有效磷含量。保持田间持水量 70% 的对照处理土壤有效磷含量为 3.4 mg·kg⁻¹，淹水对照处理土壤有效磷含量为 3.1 mg·kg⁻¹，添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆可使土壤有效磷含量提高 0.11~9.16

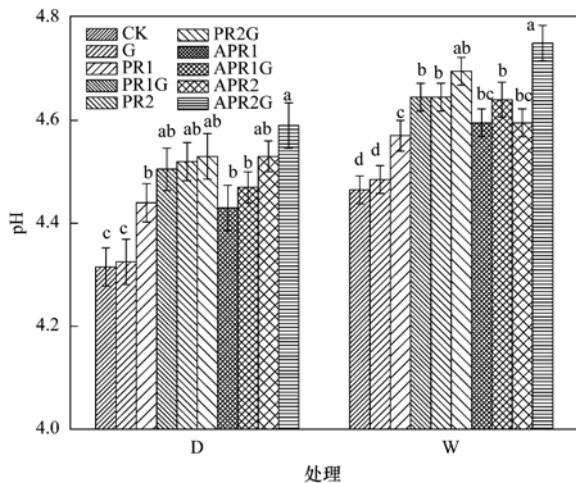


图1 不同处理对土壤 pH 值的变化

Fig. 1 Soil pH changes after treated with various amendments

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 添加了腐熟水稻秸秆的处理土壤有效磷含量比未添加的增加了 $0.1 \sim 0.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高量磷矿粉处理提高土壤有效磷含量的效果比低量磷矿粉处理的显著, 且活化磷矿粉作用效果强于原磷矿粉. 淹水处理土壤有效磷含量比保持田间持水量 70% 处理的含量低 $0.3 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

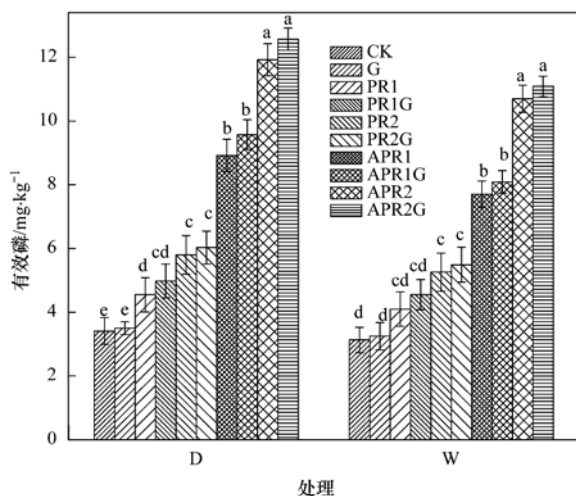


图2 不同处理对土壤有效磷的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on Olsen-P in soil

由图 3 看出, 添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆能提高土壤交换性钙含量. 保持田间持水量 70% 和淹水的对照处理土壤交换性钙含量分别为 $1.01 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.29 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 而添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆可使可交换性钙含量提高 $0.04 \sim 0.72 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 添加了腐熟水稻秸秆的处理土壤交换性钙含量比未添加的略高, 但差异不显著, 高量磷矿粉处理提高土壤交换性钙的效果比低量磷矿粉处理的显著, 且活化磷矿粉作用效果强于原磷矿粉, 如处理

D-PR2 的土壤交换性钙含量比 D-PR1 的多 $0.18 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$, D-APR2 的土壤交换性钙含量比 D-PR2 的增加了 $0.13 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 淹水处理的土壤交换性钙比保持田间持水量 70% 处理的土壤高 $0.22 \sim 0.47 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

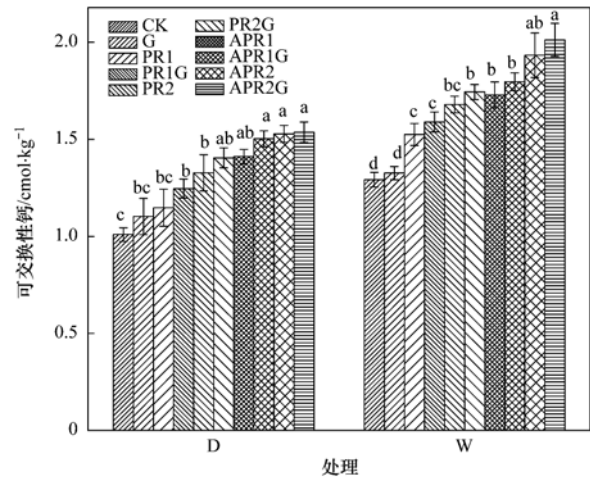


图3 不同处理对土壤可交换性钙的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on interchangeable Ca in soil

图 4 表明, 添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆可使土壤 CEC 增加. 保持田间持水量 70% 的对照处理土壤 CEC 为 $8.76 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 淹水对照处理土壤的为 $9.04 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆可使土壤 CEC 提高 $0.12 \sim 1.44 \text{ cmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 添加了腐熟水稻秸秆的处理土壤 CEC 比未添加的略高, 但差异不显著. 高量磷矿粉处理增加土壤 CEC 的效果比低量磷矿粉处理的显著, 且活化磷矿粉作用效果强于原磷矿粉. 土壤 CEC 在保持田间持水量 70% 的处

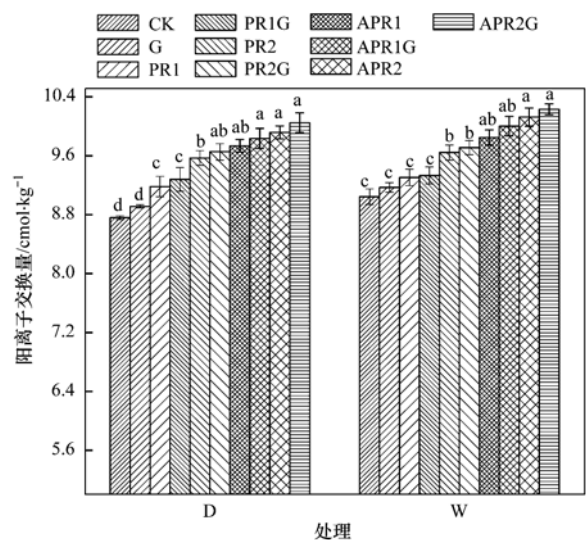


图4 不同处理对土壤阳离子交换量的影响

Fig. 4 Effect of different treatments on CEC in soil

理和淹水处理中有相同的变化趋势,后者的 CEC 比前者略高,但差异不显著.

2.2 试验处理对土壤 Pb 形态的影响

由图 5 可见,添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆可显著减少土壤交换态铅含量. 保持田间持水量 70% 和淹水的对照处理土壤交换态铅分别为 $124\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $108\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆可使土壤交换态铅降低 $4.5\sim 50.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,添加了腐熟水稻秸秆的处理土壤交换态铅浓度比未添加的降低 $4.8\sim 13.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,高量磷矿粉处理降低土壤交换态铅的效果比低量磷矿粉处理的显著,且活化磷矿粉作用效果强于未活化的磷矿粉. 土壤中交换态铅含量在保持田间持水量 70% 的处理和淹水处理中有相同的变化趋势,但淹水处理的土壤交换态铅比保持田间持水量 70% 处理的土壤低 $4.6\sim 17.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

由图 6 和图 7 可以看出,土壤各形态铅含量在不同处理后发生了显著变化. 添加磷矿粉和腐熟水稻秸秆的处理土壤残渣态铅浓度增加,其中 D-APR2G 处理土壤残渣态铅浓度最高为 $72.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比对照增加了 $39.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; W-APR2G 处理土壤残渣态铅浓度最高为 $75.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比对

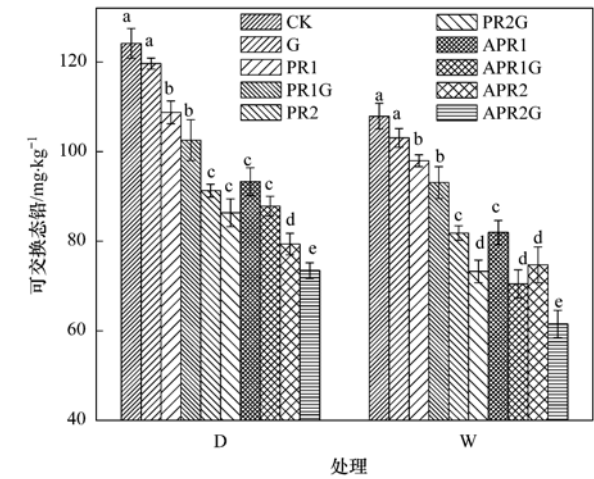
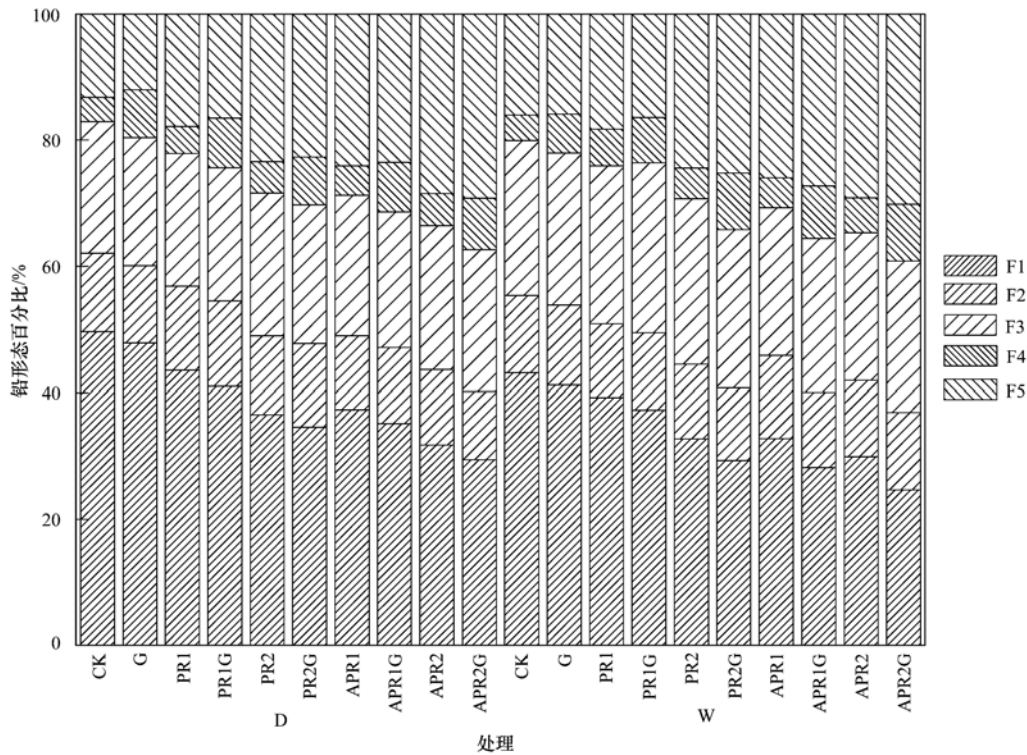


图 5 不同处理中土壤可交换态铅的变化
Fig. 5 Changes of exchangeable Pb in soils after treated with various ammendments

照增加了 $35.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 添加腐熟水稻秸秆的处理土壤有机结合态铅浓度比未添加的处理增加了 $6.6\sim 10.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 各处理中碳酸盐结合态铅差异不显著;淹水处理的土壤铁锰氧化物结合态比保持田间持水量 70% 的处理要高,其最大差值达 $14.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.



F1、F2、F3、F4、F5 分别表示铅的交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态、残渣态
图 6 不同处理对土壤铅形态的影响
Fig. 6 Effects of of different treatments on the speciation of Pb in soils

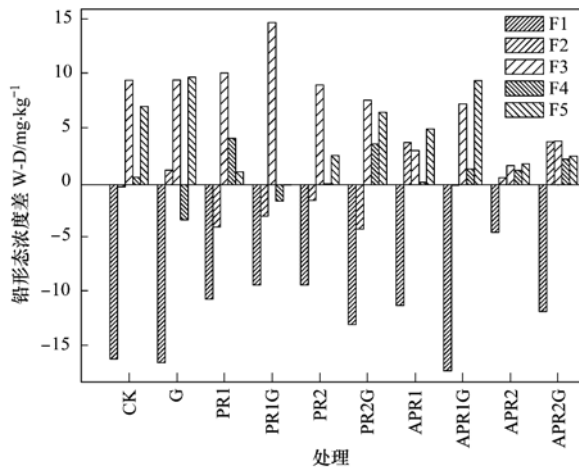


图7 淹水处理与保持70%田间持水量处理的土壤铅形态间浓度差

Fig. 7 Concentration gradient of soil lead speciation between treatments with different content of water

3 讨论

重金属对生物体毒害的大小,不仅取决于土壤中重金属含量的高低,更是由重金属有效态含量决定的。pH的变化影响重金属的生物有效性,一般来说,土壤pH值越低,重金属的生物有效性越强,反之,重金属的生物有效性越低。磷矿粉施入土壤后伴有 H_2PO_4^- 等阴离子的释放,它们可以置换出土壤胶体表面羟基,导致溶液pH值升高^[13]。

试验中添加的磷矿粉、活化磷矿粉可以提高土壤pH值。植物秸秆对土壤pH的影响与秸秆的组成和灰分有关,秸秆腐解时产生有机酸根,其去羧化作用能提高土壤pH^[14],不同植物腐解产生的有机酸根不同,其作用也有区别。植物材料中的灰分含量被作为植物碱度的指标,也被称为超量碱(excess base)或灰分碱(ash alkalinity),主要包括K、Na、Ca、Mg。植物腐解后,超量碱形成有机络离子进入溶液中,使溶液呈碱性,这些有机物分解后将转化为碳酸盐,其碱性更强^[14~16]。因此将超量碱高的有机物料施入酸性土壤效果明显。水稻秸秆腐解产生的腐殖酸含有羧基、酚羟基等官能团^[17],灰分碱含量约 $400 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水稻秸秆可通过去羧化作用和超量碱来提高土壤pH。高海峰等^[18]研究发现,对酸性土壤,土壤pH值与含水量间存在显著的正相关,可通过适度增加土壤含水量来提高土壤pH值,缓解土壤酸化。

试验中经磷矿粉和腐熟秸秆处理后,土壤有效磷和交换性钙含量、CEC都有一定程度的提高。磷

矿粉本身含有效磷,通过土壤微生物和化学作用还可溶解释出土壤和磷矿粉中非有效磷。活化磷矿粉供磷效果更好,可能是活化处理导致可溶性磷增加^[19]。毛小云等^[20]、吴平霄等^[21]运用X射线衍射分析和红外光谱等对活化磷矿粉的结构进行了研究,发现活化后磷矿粉晶体结构发生了较大变化,使其与强酸处理磷肥有效磷含游离 H_2PO_4^- 不同,即后者易与Fe、Al等接触而较快固定,而前者可能通过与 Ca^{2+} 等形成多元络合物,或通过表面吸附及包被作用减少有效磷的固定,从而大大增加了其生物有效性。何群等^[22]研究发现交换性钙的消长程度与添加有机物的种类及数量密切相关。活化后的磷矿粉晶体结构发生改变,使Ca更易溶出,从而促进土壤CEC的增加。

重金属钝化是通过改变重金属形态降低其生物有效性,从而减少对生物体的毒害,在现有的重金属钝化技术中以化学固定较多,主要通过改变土壤pH和吸附、络合、沉淀、氧化还原等方式固定重金属。磷矿粉、活化磷矿粉和水稻秸秆的配合施用以及不同的含水量处理改变了土壤环境。在一定范围内,土壤pH值升高,重金属的生物有效性降低。土壤有效磷和有机质的增加可与重金属发生吸附、络合、沉淀等反应,使重金属由水溶性、交换性等有效态向铁锰结合态、有机结合态、残渣态等生物难利用态转变^[23]。

土壤交换性钙等阳离子对重金属有拮抗作用,抑制植物对重金属的吸收^[24]。秸秆腐解后产生腐殖酸,含有羧基、羰基、醇羟基和酚羟基等多种活性官能团,能与金属离子作用,形成稳定的螯合物^[25]。唐罗忠等^[26]发现,土壤含水量的变化影响土壤溶液中氧化态和还原态物质的相对浓度,改变土壤铁锰氧化物形态,淹水处理中土壤 Fe^{2+} 明显增加,试验中淹水处理的铁锰氧化物结合态也较高。

4 结论

(1)添加磷矿粉和活化磷矿粉能提高土壤pH、有效磷及交换性钙含量和CEC,降低土壤交换态铅含量,且活化磷矿粉效果优于磷矿粉。

(2)不同水分处理对土壤性质影响显著,淹水10 mm的处理土壤pH和可交换性钙含量比保持70%的田间持水量高,但有效磷含量较低;淹水处理土壤交换态铅含量较低,铁锰氧化物结合态和残渣态含量较高。

(3)腐熟水稻秸秆对土壤pH、有效磷含量的提

高也有一定的影响,促进对有效铅的钝化,但对土壤交换性钙和 CEC 影响甚微。

(4) 淹水处理稳定效果优于保持 70% 的田间持水量处理,对土壤可交换态铅的转化影响更大;活化磷矿粉稳定效果优于未活化磷矿粉,两者皆随施用量的增加,稳定效果增强;添加腐熟水稻秸秆能促进铅向有机结合态转化。

参考文献:

- [1] 臧飞,王胜利,南忠仁,等. 工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 497-506.
- [2] Gupta D K, Chatterjee S, Datta S, *et al.* Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals [J]. Chemosphere, 2014, **108**: 134-144.
- [3] Jiang G J, Hu H Q, Liu Y H, *et al.* Immobilizing soil exogenous lead using rock phosphate [J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2010, **8**(1): 275-280.
- [4] Wang Y Z, Zhao Z Q, Jiang G Y. Effects of phosphate rock on absorption and accumulation of heavy metals of ryegrass in heavy metal contaminated soil [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **522-524**: 752-757.
- [5] 吴烈善,曾东梅,莫小荣,等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 309-313.
- [6] 王娟,张丽君,姚槐应. 添加秸秆和黑炭对水稻土碳氮转化及土壤微生物代谢图谱的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, **27**(1): 97-104.
- [7] 谭周进,李倩,陈冬林,等. 稻草还田对晚稻土微生物及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2006, **26**(10): 3385-3392.
- [8] Xu M G, Lou Y L, Sun X L, *et al.* Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, **47**(7): 745-752.
- [9] 陈再明,方远,徐义亮,等. 水稻秸秆生物炭对重金属 Pb^{2+} 的吸附作用及影响因素[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 769-776.
- [10] 卜贵军,于静,邸慧慧,等. 鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4352-4358.
- [11] 李影,吴景贵,陈猛. 不同有机物料与化肥配施对黑土重金属各形态的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(2): 178-182.
- [12] 郑喜坤,鲁安怀,高翔,等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(1): 79-84.
- [13] 朱端卫,董元彦,李学垣. 低品位磷矿粉对酸性土壤化学性质的影响[J]. 土壤通报, 1991, **22**(6): 257-259.
- [14] 李志安,邹碧,丁永祯,等. 植物残茬对土壤酸度的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2005, **25**(9): 2382-2388.
- [15] Marschner B, Noble A D. Chemical and biological processes leading to the neutralization of acidity in soil incubated with litter materials [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(6): 805-813.
- [16] Tang C, Yu Q. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation [J]. Plant and Soil, 1999, **215**(1): 29-38.
- [17] 翟修彩,刘明,李忠佩,等. 不同添加剂处理对水稻秸秆腐解效果的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(12): 2412-2419.
- [18] 高海峰,白军红,王庆改,等. 霍林河下游典型洪泛区湿地土壤 pH 值和土壤含水量分布特征[J]. 水土保持研究, 2011, **18**(1): 268-271.
- [19] 李俊艳,胡红青,李荣纪,等. 改性磷矿粉对油菜幼苗生长和土壤性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(2): 441-446.
- [20] 毛小云,吴平霄,廖宗文. 几种改性磷肥肥效研究初报[J]. 土壤与环境, 1999, **8**(4): 318-320.
- [21] 吴平霄,廖宗文,毛小云. 改性磷肥的结构特征及其增效机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, **6**(3): 287-292.
- [22] 何群,陈家坊. 中性水稻土中的铁解及其影响[J]. 土壤学报, 1986, **23**(2): 184-188.
- [23] Su C, Jiang L Q, Zhang W J. A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques [J]. Environmental Skeptics and Critics, 2014, **3**(2): 24-38.
- [24] 许学慧,姜冠杰,付庆灵,等. 活化磷矿粉对重金属污染土壤上菖蒲的生长与品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(2): 361-369.
- [25] 王立群,罗磊,马义兵,等. 不同钝化剂和培养时间对 Cd 污染土壤中可交换态 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(6): 1098-1105.
- [26] 唐罗忠,生原喜久雄,户田浩人,等. 湿地林土壤的 Fe^{2+} , Eh 及 pH 值的变化[J]. 生态学报, 2005, **25**(1): 103-107.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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

国内外公开发行