

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, 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芘解吸的影响	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)	

Fe³⁺ 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

(华中科技大学环境科学与工程学院, 环境科学研究所, 武汉 430074)

摘要: 以凹凸棒土(凹土, ATP)为原料, 采用浸渍法制备 Fe³⁺ 负载凹土 (Fe/ATP), 表征了其结构与形貌, 研究了凹土和 Fe/ATP 对土壤中镉 (Cd) 的吸附效果, 以浸出浓度作为稳定化评价指标, 通过吸附前后凹土和 Fe/ATP 形貌等特征的变化探讨了稳定化修复 Cd 机制. 结果表明, 加入质量比 20% 的凹土和 Fe/ATP, Cd 的浸出浓度分别降低了 45% 和 91%, 说明 Fe/ATP 对土壤中 Cd 有显著的稳定化作用. 形貌表征分析表明, 凹土主要通过结构中的水、—OH 基团和晶格缺陷来稳定 Cd, 而 Fe/ATP 对土壤中 Cd 稳定化作用可能主要来自—OH 基团以及 Fe—O 中桥氧的贡献. 凹土与氧化铁均为土壤中天然矿物, 廉价易得且环境友好, 制备方法简单易实现, 该复合材料用于 Cd 污染土壤的稳定化修复具有较好的应用前景.

关键词: 凹土; Fe/ATP; 土壤; 镉; 浸出浓度; 稳定化机制

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3032-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.041

Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism

YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, CHEN Jing*, WANG Lin-ling, LU Xiao-hua

(Research Institute of Environmental Sciences, College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Ferric ion modified attapulgite (Fe/ATP) was prepared by impregnation and its structure and morphology were characterized. The toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) was used to evaluate the effect of Cadmium (Cd) stabilization in soil with the addition of attapulgite (ATP) and Fe/ATP. The stabilization mechanism of Cd was further elucidated by comparing the morphologies and structure of ATP and Fe/ATP before and after Cd adsorption. Fe/ATP exhibited much better adsorption capacity than ATP, suggesting different adsorption mechanisms occurred between ATP and Fe/ATP. The leaching concentrations of Cd in soil decreased by 45% and 91% respectively, with the addition of wt. 20% ATP and Fe/ATP. The former was attributed to the interaction between Cd²⁺ and —OH groups by chemical binding to form inner-sphere complexes in ATP and the attachment between Cd²⁺ and the defect sites in ATP framework. Whereas Cd stabilization with Fe/ATP was resulted from the fact that the active centers (—OH bonds or O²⁻ sites) on ATP could react with Fe³⁺ giving Fe—O—Cd— bridges, which helped stabilize Cd in surface soil. What's more, the ferric oxides and metal hydroxides on the surface of ATP could interact with Cd, probably by the formation of cadmium ferrite. In conclusion, Fe/ATP, which can be easily prepared, holds promise as a potential low-cost and environmental friendly stabilizing agent for remediation of soil contaminated with heavy metals.

Key words: attapulgite; Fe/ATP; soil; Cadmium; TCLP; stabilization mechanism

近年来,随着我国城市建设的扩张以及产业布局的调整,大量的工业场地的搬迁、关停等,例如电镀、采矿、冶炼、燃料和化工等产生的镉 (Cd), 进入土壤甚至是地下水,影响场地的再次开发使用. Cd 是《重金属污染综合防治“十二五”规划》重点监控与污染物排放量控制的 5 种重金属之一^[1]. Cd 污染场地的修复已经成为国内研究的热点领域. 化学稳定化是重金属污染土壤的重要修复技术之一, 通过添加稳定化药剂降低土壤中活性态重金属的含量. Cd 稳定化药剂主要包括碱性材料^[2,3]、含磷材料^[4]、活性炭^[5]、有机物^[6]、铁化合物^[7]和黏土矿物^[8]. 黏土矿物以其低价环保而受到广泛青睐.

凹凸棒土(凹土, ATP)是一种链层状结构的含水富镁硅酸盐黏土矿物,由于其具有多孔结构、高比表面积、特征结构负电荷以及表面富含活性硅醇基等特点,在吸附重金属方面具有独特的优势,被广泛用于水体中重金属的去除以及农田中重金属的钝化^[9~20],其吸附机制主要包括阳离子交换和表面的一OH配位反应. 研究发现,改性后的凹土对重金属的吸附能力显著提高. 例如,丙烯酸-丙烯酰胺改性

收稿日期: 2015-01-23; 修订日期: 2015-03-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2014TS093); 水利部公益性行业科研专项(201501019)

作者简介: 杨蓉(1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤修复, E-mail: nuanyangyilin@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chenjing@hust.edu.cn

后的凹土能显著提高对水中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 等的去除^[13]; 氨基改性后的凹土显著提高了对水中 Cd^{2+} 的吸附^[14]. 铁离子(Fe^{2+} 、 Fe^{3+})改性凹土多应用在水体和气体中有机物等的催化反应中^[15,16], 用于重金属的吸附去除的报道较少^[17,18], 且对吸附机制研究的较少. 目前, 尚未见以浸出毒性来评价凹土对土壤中重金属的吸附稳定化的报道.

本研究将 Fe^{3+} 改性凹土(Fe/ATP), 通过 Cd 与 $\text{Fe}-\text{O}$ 、 $\text{Fe}-\text{OH}$ 、 $\text{ATP}-\text{OH}$ 基团形成配位体来显著降低 Cd 浸出浓度, 从而达到稳定化的目的. 本文研究 Fe/ATP 对土壤中 Cd 的稳定化效果, 通过傅里叶变换显微红外光谱仪(FTIR)、配备 X 射线能谱探测器的扫描电子显微镜(SEM-EDAX)、比表面积分析仪(BET)、X 射线荧光光谱仪(XRD)、X 射线光电子能谱仪(XPS)等手段表征吸附前后凹土和 Fe/ATP 的形貌和结构特征, 探讨稳定化机制. 该制备方法简单、价格低廉、处理工艺简单且环境友好, 土壤重金属稳定化修复有较好的应用前景.

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (A. R)、 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (A. R)、凹土(A. R)、盐酸(G. R)、氢氟酸(G. R)、硫酸(G. R)和硝酸(G. R)均购自国药集团化学试剂有限公司. 高岭土来自安徽省三二七地质队原料化工厂. 实验使用的仪器包括 Barnstead EASY pour II 型纯水仪(上海百基生物科技有限公司)、ACCULAB 型电子分析天平(郑州朋来仪器有限公司)、101 型电鼓风干燥箱(北京中兴伟业仪器有限公司)、 SX_{2-1-10} 型马弗炉(湖北英山县建力电炉制造有限公司)、DB-2A 电热板(江苏晨阳电子仪器厂)、novAA400P 火焰原子吸收光谱仪(美国 Perkin Elmer 公司).

1.2 Fe/ATP 制备与表征

称取 80.8 g $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶解于 1 L 去离子水中, 加入 100 g 凹土, 搅拌浸渍 24 h, 过滤, 去离子水清洗 3 遍, 105°C 烘干 4 h, 400°C 焙烧 3 h, 研磨过 200 目筛, 待用. 称取 0.2 g 制备好的 Fe/ATP 于 50 mL 聚四氟乙烯坩埚中消解, 加去离子水润湿, 加入 10 mL 浓盐酸, 在 120°C 电热板加热至残渣变白, 逐次加入 1 mL HF 继续消解至白色溶解, 冷却定容至 50 mL 容量瓶, $0.45 \mu\text{m}$ 水相滤头过滤后用原子吸收分光光度计(AAS)测定消解液中 Fe 的质量分数为 9%.

FTIR (ERTE7 系列, 德国 Bruker) 分析化合物基团及其在分子中的相对位置. SEM-EDAX (Nova 450 Nano, 荷兰 FEI) 获取形貌特征和晶体结构等信息以及元素的组成和相对含量. BET (JW-BK122W 型, 北京精微高博公司) 分析材料的孔道结构参数, 采用 BJH 模型获取孔体积和孔径分布, 由 BET 方程得到样品的比表面积. XRD (RINT 2500, XRD-RigakuU 公司, 日本) 获取化合物结构特征. XPS (GENESIS 型, 美国 EDAX) 获取化学元素成分和分布信息.

1.3 稳定化实验

称取 600 g 高岭土和 0.12 g $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 加入 750 mL 去离子水, 搅拌混匀, 室温放置 3 d. 105°C 烘 12 h, 研磨, 室温放置一个月, 密封备用. 模拟土样中 Cd 含量为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 浸出浓度为 $9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 称取 10 g Cd 污染土样品, 置于 500 mL 带盖玻璃磨口三角瓶中, 分别加入 2 g ATP 和 Fe/ATP , 加入 20 mL 去离子水使得土壤完全浸润, 机械搅拌 20 min, 室温静置 24 h 后分析 Cd 的浸出浓度. 浸出浓度的提取方法参考硫酸硝酸法[《固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法》(HJ/T 299-2007)], 取 1 g 土壤, 固液比为 1:10, 在 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下水平振荡浸提 18 h, AAS 测定浸提液中 Cd 浓度.

2 凹土和 Fe/ATP 形貌表征

取 1 mg 样品与 100 mg KBr 混合, 研磨 10 min 后, 压片 10 min 制得约 1 mm 厚的混合压片样品, FTIR 光谱扫描范围 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$. 凹土的吸收峰主要分布在两大区域: $4000 \sim 1300 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1200 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ (图 1). 前者主要是由凹土中的水以及 $\text{Si}-\text{OH}$ 、 $\text{Al}-\text{OH}$ 、 $\text{Mg}-\text{O}$ 振动引起, 后者则来自凹

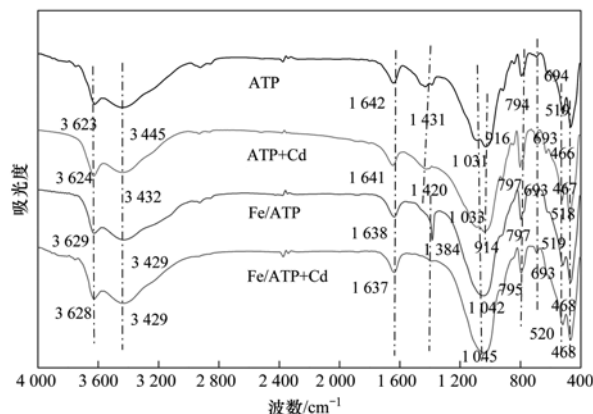


图 1 凹土和 Fe/ATP 吸附 Cd 前后 FTIR 图

Fig. 1 FTIR spectra of ATP and Fe/ATP before and after Cd adsorption

土骨架振动^[19,20]. 凹土中的水包括结构水、结晶水、沸石水和吸附水. 制备 Fe/ATP 过程中经过 400℃ 高温焙烧后脱去吸附水、沸石水和部分结晶水,但仍保留有结构水和部分结晶水. 因此 Fe/ATP 上—OH 振动峰均有不同程度的减弱. 另一方面,与 Al—O 和 Mg—O 键相比,Fe—O 键结合更为紧密^[21,22],也会导致—OH 振动峰的减弱. 凹土骨架振动峰略有偏移,主要是由 Fe—O—Fe 振动引起^[23].

SEM 显示凹土呈现坍塌的片层结构夹杂棒束

[图 2(a)]. 载铁经高温煅烧后,凹土失水部分结构坍塌. 由于 Fe—O 的作用力较强,凹土结构收缩,形成多孔状层片结构,片层中夹杂棒束[图 2(b)]. 可观察到 Fe^{3+} 较均匀地分散在凹土表面. EDAX 分析显示 Fe 与凹土质量比为 9%,这与 AAS 分析结果一致.

BET 分析表明(图 3),凹土和 Fe/ATP 的比表面积分别为 $142 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $154 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,平均孔径分别为 12.61 nm 和 7.56 nm,说明 Fe^{3+} 改性后,凹土的孔径有所收缩,而比表面积增大,这与 SEM 图一致.

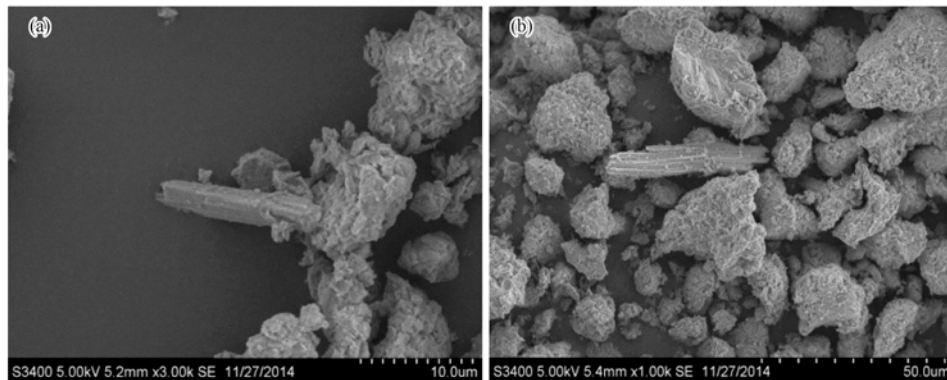


图 2 凹土和 Fe/ATP SEM 图

Fig. 2 SEM images of ATP and Fe/ATP

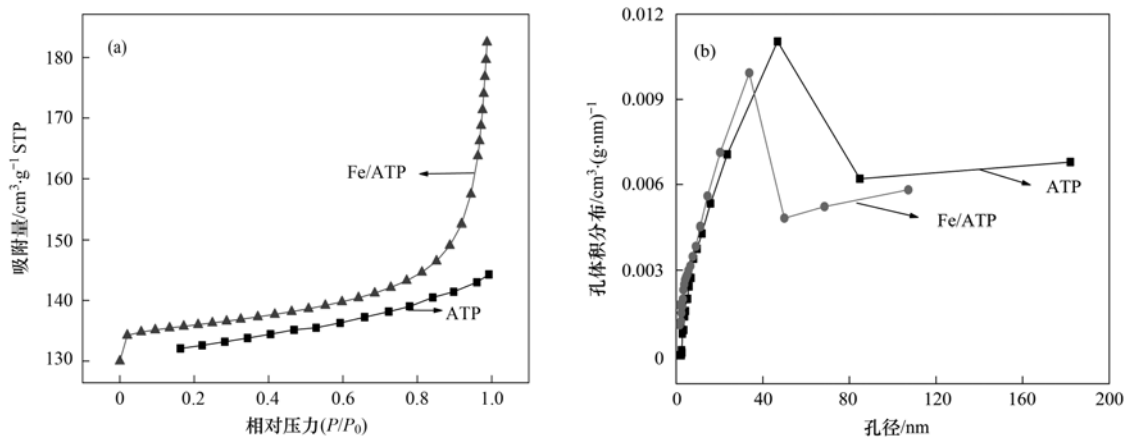


图 3 凹土和 Fe/ATP 的 N_2 吸附等温曲线和孔径分布曲线图

Fig. 3 N_2 adsorption isotherms and corresponding pore-size distribution curves of ATP and Fe/ATP

3 土壤中 Cd 的稳定化研究

加入 2 g 凹土,土壤中 Cd 的浸出浓度从 $9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到了 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 4),降低了 45%;而加入 2 g Fe/ATP, Cd 的浸出浓度下降了 91%,表明 Fe/ATP 对土壤中 Cd 具有显著的稳定化作用. 研究表明^[16~18],凹土结构中存在大量活性硅醇基(—OH),有利于与重金属形成配位体从而提高对

重金属的吸附. 凹土带有负电荷而存在大量晶格缺陷,因此可通过阳离子交换或静电作用吸附重金属. 一般来说,阳离子交换和静电吸附力较弱,经过硫酸硝酸 18 h 的浸提,吸附的 Cd 会从凹土中脱附出来再次进入到浸提液中. 因此,凹土对土壤中 Cd 的稳定化主要来自活性硅醇基和晶格缺陷的贡献. 吸附实验结束后的浸提液中未检测到 Fe^{3+} 离子,说明 Fe/ATP 中 Fe^{3+} 未与土壤中 Cd^{2+} 发生离子交换. 从

图 1 可看出,尽管高温焙烧失去了部分结晶水,Fe/ATP 但依然保留有—OH 基团,这些残留的活性硅醇基可与 Cd 形成配位体. 吸附结束后,用磁铁吸出部分 Fe/ATP 进行 EDAX 分析,结果表明 Cd 进入凹土晶格(图略). 研究表明^[24,25],Cd 可通过桥氧形成 Fe—O—Cd 而稳定在黏土矿物中. 因此,Fe/ATP 对土壤中 Cd 稳定化作用可能主要是硅醇基以及 Fe—O 中桥氧的贡献.

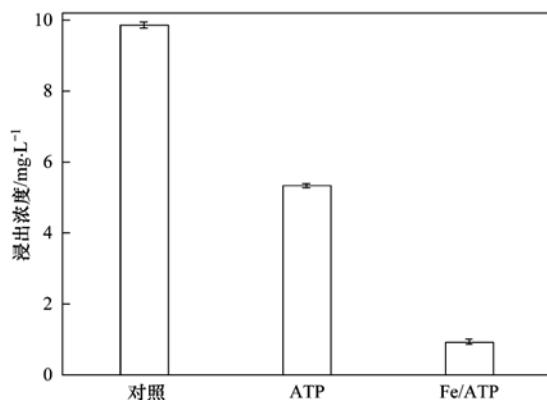
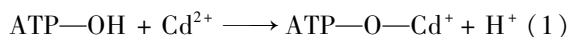


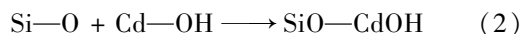
图 4 凹土和 Fe/ATP 对土壤中 Cd 的浸出浓度影响

Fig. 4 Influence of ATP and Fe/ATP on the leaching concentration of Cd in soil

为了进一步探讨凹土和 Fe/ATP 对 Cd 的吸附机制,将 100 mL 浓度为 100 mg·L⁻¹ CdCl₂ 溶液分别加入 1 g 凹土和 Fe/ATP,水浴恒温 (25℃),150 r·min⁻¹ 水平振荡 48 h,离心过滤. FTIR 分析吸附后凹土和 Fe/ATP 中的形貌变化(图 1). 吸附 Cd 后,凹土中来自—OH 和水振动的吸收峰(3 445、1 642 和 916 cm⁻¹)均有不同程度的减弱,而凹土骨架振动引起的吸收峰(794、519 和 466 cm⁻¹)则明显增强(图 1). 3 445 cm⁻¹ 是由凹土中 Si—OH、Al—OH、Mg—OH 和 H—OH 振动引起^[19,20]; 1 642 cm⁻¹ 则是 δ(H₂O) 变形所致; 916 cm⁻¹ 为凹土骨架中与 Al³⁺ 和 Si⁴⁺ 连接的—OH 基团的特征吸收峰^[19,20]. 吸附 Cd 后,Cd 通过共价键或氢键与—OH 或—O 结合^[10,12] [公式(1)],由于结合力增强,削弱了这些特征吸收峰的强度.



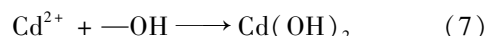
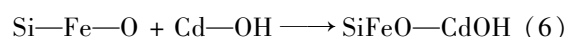
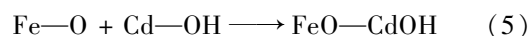
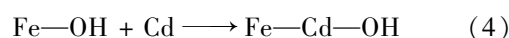
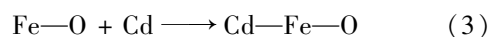
凹土中存在大量晶格缺陷,Cd 可进入凹土骨架 [公式(2)],使得骨架振动特征峰明显增强.



凹土表面带有大量的负电荷,也有利于吸附 Cd²⁺^[14],但这种依赖静电吸附的作用力较弱,一般来说,强酸浸出过程中会通过离子交换再次从凹土

中脱附出来. 因此,凹土主要是通过结构中存在的水、—OH 基团以及晶格缺陷来稳定土壤中的 Cd.

Fe/ATP 中 Fe³⁺ 与凹土晶格中桥氧紧密结合,形成 Si—O—Fe、Fe—O—H 聚合物,还有部分成无定型的铁氧化物分散在凹土表面^[26]. 研究表明桥氧键具有更高的活性^[27],Cd 可能进入凹土晶格中和聚合物中的桥氧键结合而被稳定^[24] [公式(3) ~ (6)],从 FTIR 分析可看出(图 1),Fe/ATP 吸附 Cd 后,来自骨架振动的吸收峰发生了显著变化,可能是 Cd 进入凹土骨架引起. 另外,Cd 可与铁氧化物中游离的羟基结合^[10,24] [公式(7)]:



但在强酸浸提的过程中,Cd(OH)₂ 易溶解,因此沉淀反应不能引起浸出浓度的变化. XRD 分析表明 Fe/ATP 吸附 Cd 后,在 30.4°、37.1°、48.9° 出现明显的 Cd(OH)₂ 特征峰(JCPDF 84-1767) (图 5),说明 Cd 可能是通过配位体的方式稳定在 Fe/ATP 中 30.4°、50.1°、58.4° 和 75.6° 出现 CdCO₃ 特征峰(JCPDF 85-0989),这是由于 Cd 与 Fe/ATP 晶格中的晶格氧结合,易吸收空气中的 CO₂ 而形成 CdCO₃ 沉淀^[12].

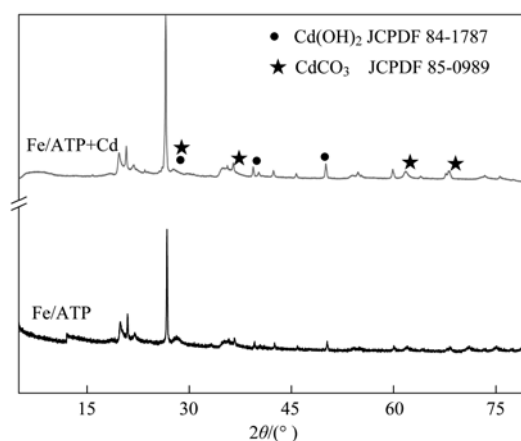


图 5 吸附 Cd 前后 Fe/ATP 的 XRD 图

Fig. 5 XRD patterns of Fe/ATP before and after Cd adsorption

XPS 分析也表明,吸附 Cd 后,Fe/ATP 出现 Cd3d 谱峰(407 eV) [图 6(a)],蒙脱石类黏土吸附 Cd²⁺ 也出现了类似特征峰^[28],该特征峰源于 Cd—O 键合^[29],推测可能由于 Fe/ATP 中部分 Si—O、Fe—O 官能团中桥氧键与 Cd 键合所致. 吸附 Cd 后,Fe/ATP 中一些铁原子的特征吸收峰也发生了变化[图

6(b)]. 例如, 712.3 eV 是 Fe/ATP 晶格中 Fe 原子的吸收峰^[30], 该处峰强明显降低, 说明 Cd 进入晶格可能与 Fe—O、Si—Fe—O 成键; 711.6 eV 源于 Fe₂O₃ 中的 Fe 原子^[31]吸收峰, 位移至 711.2 eV, 说明吸附 Cd 可能进入 Fe₂O₃ 晶格影响其结合能. 从以上 XPS 谱图分析进一步验证了 Cd 与凹土中桥氧结合以及铁氧化物吸附稳定机制.

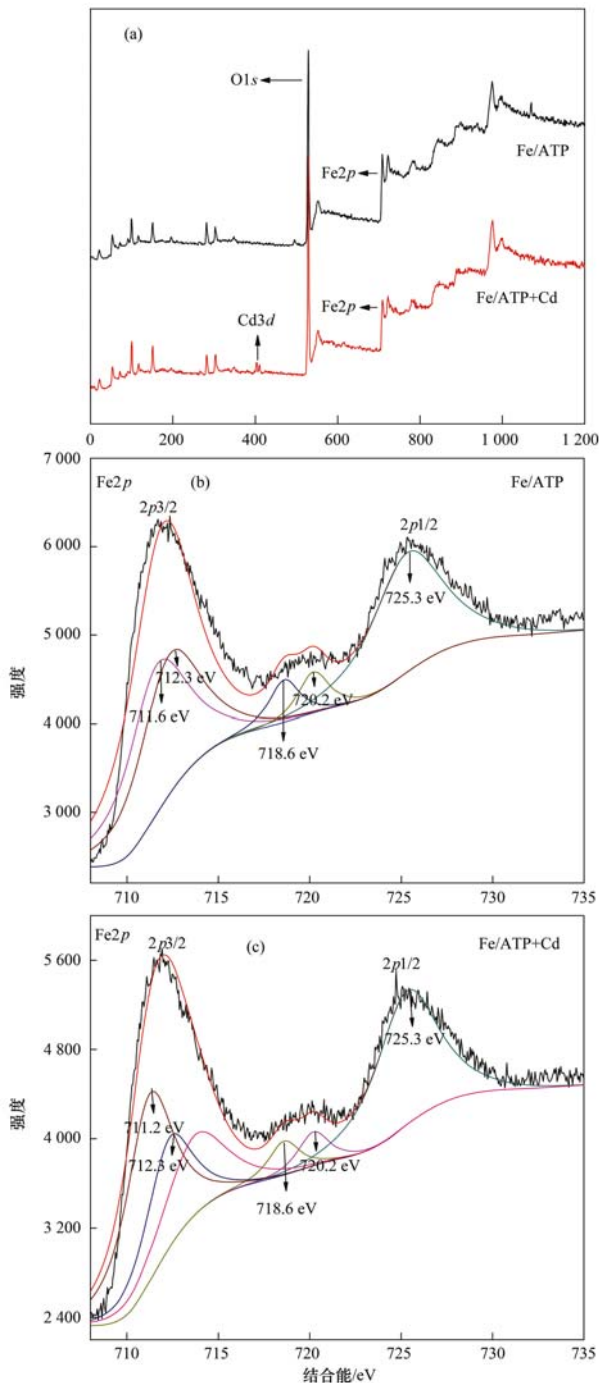


图 6 Fe/ATP 吸附 Cd 前后 XPS 图

Fig. 6 XPS of Fe/ATP before and after Cd adsorption

4 结论

(1) 应用浸渍法成功制备了 Fe/ATP, 载 Fe³⁺ 后凹土依然保持原有的形貌特征. 部分 Fe³⁺ 进入凹土晶格, 部分则以无定型氧化物形式分散在凹土表面. 与凹土相比, Fe/ATP 粒径减小, 比表面积增大, 吸附性能提高.

(2) 加入 20% 凹土, 土壤中 Cd 浸出浓度降低 45%, 主要是由于凹土中水、—OH 基团以及晶格缺陷的贡献; 而加入 Fe/ATP, 土壤中 Cd 的浸出浓度降低了 91% 以上, 显著提高了 Cd 的稳定化. Fe³⁺ 与凹土中 —OH 基团中氧原子以及骨架中氧原子的结合, 增加了这些桥氧的活性, 有利于结合 Cd, 形成了 —Fe—O—Cd—; 另外 Cd 与 Fe₂O₃ 中 —O 形成配位体也促进了 Cd 的稳定化.

(3) Fe/ATP 制备方法简单, 价格低廉, 处理工艺简单, 对土壤中 Cd 有较好的稳定效果, 在场地重金属稳定化修复中具有较好的应用前景.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部和国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [2] Yun S W, Yu C. The leaching characteristics of Cd, Zn, and As from submerged paddy soil and the effect of limestone treatment [J]. Paddy and Water Environment, 2015, **13**(1): 61-69.
- [3] 李翔, 宋云, 刘永兵. 石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1946-1954.
- [4] Osborne L R, Baker L L, Strawn D G. Lead immobilization and phosphorus availability in phosphate-amended, mine-contaminated soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2015, **44**(1): 183-190.
- [5] Jha V K, Matsuda M, Miyake M. Sorption properties of the activated carbon-zeolite composite prepared from coal fly ash for Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **160**(1): 148-153.
- [6] Xu Y, Fang S R. Stabilization of heavy metals in contaminated sediments using organic chelating agents[J]. Water Environment Research, 2015, **87**(1): 52-60.
- [7] Shaheen S M, Tsadilas C D, Rinklebe J. Immobilization of soil copper using organic and inorganic amendments[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, **178**(1): 112-117.
- [8] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, et al. Assessment of natural sepiolite on cadmium stabilization, microbial communities, and enzyme activities in acidic soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(5): 3290-3299.
- [9] Chae H S, Piao S H, Maity A, et al. Additive role of attapulgite nanoclay on carbonyl iron-based magnetorheological suspension [J]. Colloid and Polymer Science, 2015, **293**(1): 89-95.
- [10] Han J, Xu Y M, Liang X F, et al. Sorption stability and

- mechanism exploration of palygorskite as immobilization agent for Cd in polluted soil [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, **225**(10): 2160.
- [11] Zhang G Y, Lin Y Q, Wang M K. Remediation of copper polluted red soils with clay materials [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(3): 461-467.
- [12] Liang X F, Han J, Xu Y M, *et al.* In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite [J]. *Geoderma*, 2014, **235-236**(4): 9-18.
- [13] Liu P, Jiang L P, Zhu L G, *et al.* Synthesis of covalently crosslinked attapulgite/poly (acrylic acid-co-acrylamide) nanocomposite hydrogels and their evaluation as adsorbent for heavy metal ions [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, **23**: 188-193.
- [14] Liang X F, Han J, Xu Y M, *et al.* Sorption of Cd^{2+} on mercapto and amino functionalized palygorskite [J]. *Applied Surface Science*, 2014, **322**: 194-201.
- [15] Zhang Z H, Liang H J, Du X G, *et al.* H_2S removal: correlation between performance and loading species of Zn-Fe/attapulgite [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2014, **33**(2): 378-384.
- [16] Mu B, Wang A Q. One-pot fabrication of multifunctional superparamagnetic attapulgite/ Fe_3O_4 /polyaniline nanocomposites served as an adsorbent and catalyst support [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, **3**(1): 281-289.
- [17] Fan Q H, Li P, Chen Y F, *et al.* Preparation and application of attapulgite/iron oxide magnetic composites for the removal of U (VI) from aqueous solution [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192**(3): 1851-1859.
- [18] Zhang W P, Xu H B, Wang J, *et al.* Removal of As (V) from drinking water by attapulgite loaded with Fe (III) adsorbent [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **750-752**: 1452-1456.
- [19] Chen W C, Ding C C, Sun Y B, *et al.* Fabrication of fungus/attapulgite composites and their removal of U (VI) from aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **269**: 1-8.
- [20] Jiang L P, Liu P, Zhao S B. Magnetic ATP/FA/Poly (AA-co-AM) ternary nanocomposite microgel as selective adsorbent for removal of heavy metals from wastewater [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, **470**: 31-38.
- [21] Panov G I, Starokon E V, Pirutko L V, *et al.* New reaction of anion radicals O^- with water on the surface of FeZSM-5 [J]. *Journal of Catalysis*, 2008, **254**(1): 110-120.
- [22] Wichtelová B, Sobalík Z, Dědeček J. Redox catalysis over metallo-zeolites: contribution to environmental catalysis [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2003, **41**(1-2): 97-114.
- [23] Yu B Y, Kwak S Y. Assembly of magnetite nanocrystals into spherical mesoporous aggregates with a 3-D wormhole-like pore structure [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, **20**(38): 8320-8328.
- [24] Soto K T S, Guzmán-Blas R G, Ortiz-Quiles E O, *et al.* Highly organized nanofiber formation from zero valent iron nanoparticles after cadmium water remediation [J]. *RSC Advances*, 2014, **5**(4): 2777-2784.
- [25] Turapan S, Kongkachuichay P, Worathanakul P. Synthesis and characterization of Fe/SUZ-4 zeolite worathanakul [J]. *Procedia Engineering*, 2012, **32**: 191-197.
- [26] Stockenhuber M, Joyner R W, Dixon J M, *et al.* Transition metal containing mesoporous silicas-redox properties, structure and catalytic activity [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2001, **44-45**: 367-375.
- [27] Hu E, Cheng H F. Catalytic effect of transition metals on microwave-induced degradation of atrazine in mineral micropores [J]. *Water Research*, 2014, **57**: 8-19.
- [28] Kim S H, Heo N H, Kim G H, *et al.* Preparation, crystal structure, and thermal stability of the cadmium sulfide nanoclusters Cd_6S^{4+} and $\text{Cd}_2\text{Na}_2\text{S}^{4+}$ in the sodalite cavities of zeolite A (LTA) [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, **110**(51): 25964-25974.
- [29] Setty M S, Shinha A P B. Characterization of highly conducting PbO-doped Cd_2SnO_4 thick films [J]. *Thin Solid Films*, 1986, **144**(1): 7-19.
- [30] Seyama H, Soma M. Fe2p spectra of silicate minerals [J]. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1987, **42**(1): 97-101.
- [31] Zhao Y M, Li Y H, Ma R Z, *et al.* Growth and characterization of iron oxide nanorods/nanobelts prepared by a simple iron-water reaction [J]. *Small*, 2006, **2**(3): 422-427.

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