

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山铈矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘满威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究

刘娟, 陈迪云*, 张静, 宋刚, 罗定贵

(广州大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 采用静态实验方法研究了凹凸棒石对水溶液中铀的吸附特性, 考察了溶液 pH 值、初始浓度、吸附时间对吸附的影响, 用扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 表征凹凸棒石的形貌和结构, 用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 表征凹凸棒石吸附铀前后结构的变化, 探讨了凹凸棒石对铀的吸附动力学及吸附机制。结果表明, pH 值对凹凸棒石吸附铀的影响显著, 且在 pH = 5 时吸附量最大。吸附量随着时间增大而增大, 在 2 h 内可以达到平衡, 吸附等温线方程符合 Langmuir 等温吸附模型, 吸附过程为准二级动力学模型。由 FTIR 分析可得, 凹凸棒石吸附铀后, 在高频区 $3\,700 \sim 3\,000\text{ cm}^{-1}$ 内吸光度减弱, 可能是由于铀与凹凸棒石的 R—OH 发生配位作用形成了 R—OUO_2^+ 或 $(\text{R—O})_2\text{UO}_2$ 等络合物; 在中频区 $1\,700 \sim 800\text{ cm}^{-1}$ 内吸光度减弱, 可能是铀离子和镁离子产生离子交换作用。铀在凹凸棒石上的吸附机制主要表现为离子交换和配位作用。

关键词: 凹凸棒石; 铀; 吸附等温线; 吸附动力学; 吸附机制

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2889-06

Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite

LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, SONG Gang, LUO Ding-gui

(School of Environmental Science & Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The adsorption characteristics of uranium on attapulgite were investigated by conducting a series of batch adsorption experiments in this study. The influence of solution pH, initial uranium concentration and contact time was investigated. Scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) were used to characterize the surface structure of the attapulgite, Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) were used to characterize the surface properties of the attapulgite before and after uranium adsorption, and to analyze the adsorption mechanism and adsorption kinetics of uranium on attapulgite. The experimental results showed that sorption of uranium on attapulgite was strongly dependent on pH, and the highest adsorption reached at pH = 5. The adsorption quantity increased with time, adsorption could achieve balance in 2 h. The adsorption isotherm equation conformed to the Langmuir isothermal adsorption model and adsorption process could be described by the two-order kinetics model. According to FTIR spectral, the absorbance of attapulgite decreased, which may result from R—OUO_2^+ or $(\text{R—O})_2\text{UO}_2$ formed by the bond between uranium and R—OH of attapulgite in the high frequency area $3\,700\text{--}3\,000\text{ cm}^{-1}$, and which uranium ion and magnesium ions may produce ion exchanges in the intermediate frequency area $1\,700\text{--}800\text{ cm}^{-1}$. Adsorption mechanism of uranium on attapulgite was mainly ion exchange and complexation.

Key words: attapulgite; uranium; adsorption isotherm; adsorption kinetics; adsorption mechanism

随着核技术的迅猛发展,放射性核素的环境治理研究成为一个研究热点^[1~5]。铀是自然界中天然存在的放射性核素,以3种同位素存在:²³⁸U(99.27%)、²³⁴U(0.0055%)和²³⁵U(0.72%)^[6],在环境中主要是以六价态(UO_2^{2+})的形式存在。由于铀具有很长的半衰期($4.51 \times 10^9\text{ a}$),而且伴有放射毒性和化学毒性,基本上不经历生物或化学降解的过程,可以在环境中长期存留并富集,所以深入研究铀的环境行为与生态效应十分重要^[7~9]。

土壤受到放射性核素铀的污染现象日益严重,目前许多学者关于放射性核素铀污染土壤的治理提出了很多方法^[10~13],但由于各自都存在优缺点,真正能够推广应用的方法还有待研究。凹凸棒石(又称坡缕石)在矿物学分类上隶属于海泡石族,是一种晶质的水合镁铝硅酸盐矿物,其基本结构单元为

2:1层型,即2层硅氧四面体夹1层镁氧八面体组成单元层。由于凹凸棒石所含的 Si^{4+} 被 Al^{3+} 替代置换,所以表面出现剩余负电荷,可以吸附重金属离子,阻止重金属离子的迁移^[14~16]。运用黏土钝化土壤中放射性核素铀,阻止其在环境中的迁移转化,降低植物的吸收,可能是治理核素土壤一种简便、经济的思路。但有关凹凸棒黏土钝化铀污染土壤的实验研究还少见报道。铀在土壤中的钝化行为主要受固体表面吸附解吸作用,特别是其中黏土的吸附作用。前人对铀在黏土矿物中的吸附解吸行为做了较多的实验研究^[17~22],但这些研究主要探讨黏土矿物

收稿日期: 2011-10-22; 修订日期: 2012-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872201)

作者简介: 刘娟(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为放射性化学, E-mail: lj_brave@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: cdy@gzhu.edu.cn

处理含铈废水的可能性以及影响因素,对吸附机制研究还有待深入。

本研究通过采用静态实验方法分析凹凸棒石对水溶液中铈的吸附特性,考察溶液 pH 值、初始浓度、吸附时间对吸附的影响,用 SEM、XRD 表征凹凸棒石的形貌和结构,用 FTIR 表征凹凸棒石吸附铈前后结构的变化,探讨凹凸棒石对铈的吸附动力学及吸附机制,以期凹凸棒石钝化修复铈污染土壤提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 主要试剂和仪器

主要试剂:凹凸棒石(江苏省淮源矿业有限公司);八氧化三铈(中国计量科学研究院);硝酸、氨水、硫酸、磷酸、偏钒酸铵、三氯化钛等试剂为分析纯;溴化钾为光谱纯;所有溶液均用去离子水配制。

主要仪器:包括酸度计(上海雷磁 pH-3C 型 pH 计),振荡器(Julabo SW22),扫描电镜(HITACHI S-3700N),X 射线衍射仪(北京普析通用仪器有限责任公司, XD-3),傅里叶变换红外光谱仪(BRUKER, Tensor27)等。

1.2 实验方法

1.2.1 铈溶液的配制

称取 1.179 2 g 八氧化三铈,放置于 100 mL 的烧杯中,加入 10 mL 盐酸(比重 1.19),3 mL H_2O_2 (30%),2 滴 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝酸,盖上表面皿,放置 3 min,并经常摇动,待剧烈反应停止后于电炉上加热至完全溶解,取下,稍冷,转入 1 000 mL 容量瓶中,用 pH < 2 的硝酸溶液稀释至刻度,摇匀,此溶液浓度为 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的铈溶液。然后,从此溶液中吸取一定量配置成所需浓度的溶液。

1.2.2 等温线的测定

移取 50 mL 铈浓度分别为 10、30、50、70、100、120、150、180、200、250、300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液于 200 mL 磨口锥形瓶内,用稀 HNO_3 和氨水调节溶液 pH 值为 4,然后称取约 0.2 g(准确到 0.000 1 g)凹凸棒石于锥形瓶内,在室温下于振荡器内以 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速振荡 24 h 保证达到吸附平衡。

所有实验均用定性滤纸过滤,三氯化钛还原/钒酸铵氧化滴定法^[23]测定滤液中铈的平衡浓度。实验结果均为 3 次平行实验的平均值。

1.2.3 溶液 pH 值的影响

将 50 mL 铈浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液装入磨口锥形瓶内,用稀 HNO_3 和氨水调节溶液 pH 值,使溶

液的 pH 值为 2、3、4、5、6、7、8。分别称取约 0.2 g(准确到 0.000 1 g)凹凸棒石投入到上述的锥形瓶中,然后放入振荡器,在室温下以 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 24 h,保证达到吸附平衡。

1.2.4 吸附动力学的测定

分别移取 50 mL 铈浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液装入 200 mL 磨口锥形瓶内,用稀 HNO_3 和氨水调节溶液 pH 值为 4。加入约 0.1 g(准确到 0.000 1 g)凹凸棒石,在室温下以 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡,然后在不同时段(4、8、12、16、20、24、30、40、60、120、180、240 min)取样,迅速将其过滤,取滤液测定铈浓度。

1.3 吸附量计算方法

分别用式(1)和式(2)计算瞬时吸附量和平衡吸附量:

$$q_t = V(c_0 - c_t)/m \quad (1)$$

$$q_e = V(c_0 - c_e)/m \quad (2)$$

式中, q_t 为单位凹凸棒石 t 时刻吸附铈的量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; q_e 为吸附平衡时单位凹凸棒石吸附铈的量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; c_0 为初始铈的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_t 为 t 时刻铈的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_e 为吸附平衡时铈的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为溶液体积, mL; m 为凹凸棒石的质量, g。

1.4 SEM、XRD 和 FTIR 分析

凹凸棒石的物理表征是通过 SEM、XRD 和 FTIR 完成的。在 SEM 扫描之前,先将凹凸棒石喷金,使其导电,然后在扫描电子显微镜下观察凹凸棒石吸附铈前后的形貌。XRD 用 $\text{Cu K}\alpha$ 射线检测,设置参数为 36 kV 和 20 mA,测量范围(2θ)为 $5^\circ \sim 70^\circ$ 。FTIR 测定前样品与光谱纯 KBr 研磨混匀,测量范围为 $500 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$,在室温下检测。

2 结果与讨论

2.1 凹凸棒石的表征

2.1.1 SEM 分析

图 1 是凹凸棒石的 SEM 图。从中可以看出,凹凸棒石主要形态表现为棒状晶体。由于凹凸棒石所具有的这种特殊结构,使其具有较高的比表面积,从而对重金属离子有较强的吸附能力。

2.1.2 XRD 分析

图 2 是凹凸棒石的 XRD 图。根据 Jade 5.0 软件物相检索,图中峰位置: (2θ) 8.4° 、 19.8° 、 27.3° 、 34.7° 、 42.4° 为凹凸棒石的特征衍射峰,其中 $2\theta = 8.4^\circ$ 为凹凸棒石的基面,其晶面间距 $d = 1.062 \text{ nm}$ ^[24]。由图 2 可以看出,凹凸棒石含有蒙脱石和石英等杂质。

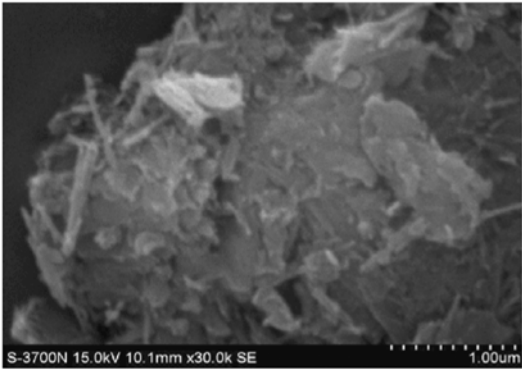


图 1 凹凸棒石的 SEM 图
Fig. 1 SEM image of attapulgite

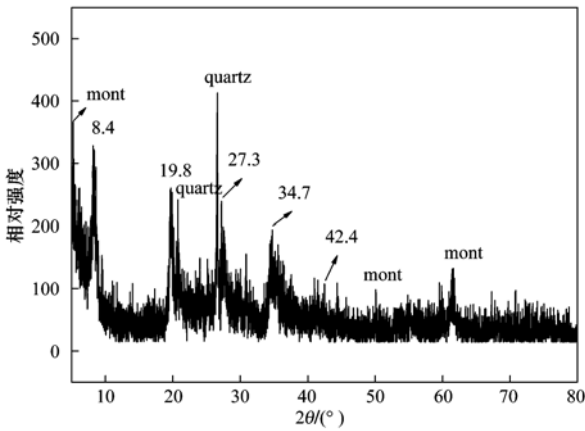
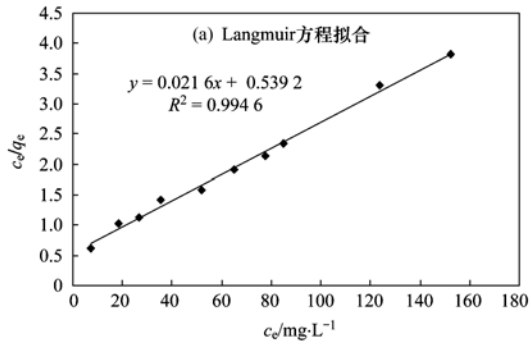


图 2 凹凸棒石的 XRD 图
Fig. 2 X-ray diffraction image of attapulgite



2.2 凹凸棒石对铀吸附行为

2.2.1 吸附等温线

分别采用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温模型对吸附过程进行数据拟合,其线性表达式^[25]如下.

Langmuir 等温式:

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{c_e}{q_m} + \frac{1}{b q_m}$$

Freundlich 等温式:

$$\lg q_e = \frac{\lg c_e}{n} + \lg K_f$$

式中, c_e 为平衡浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; q_e 为平衡吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_m 为形成单分子层的最大吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; b 、 K_f 为平衡吸附系数; n 为经验常数.

分别以 $c_e/q_e - c_e$ 和 $\lg q_e - \lg c_e$ 作图,如图 3. q_m 、 K 和 K_f 、 $1/n$ 可分别由 Langmuir 和 Freundlich 吸附平衡线的斜率和截距求得,计算结果如表 1. 比较拟合相关系数 R^2 , 在相同条件下,凹凸棒石对铀的吸附与 Langmuir 模型的拟合结果 ($R^2 = 0.9946$) 优于 Freundlich 模型 ($R^2 = 0.9746$). 从而说明凹凸棒石吸附铀为单分子层的化学吸附.

2.2.2 溶液 pH 值的影响

图 4 为 pH 值对凹凸棒石吸附铀的影响. 从中可以看出, pH 值对凹凸棒石吸附铀的影响很大. pH 值为 2~5 时,随着 pH 的升高,吸附量逐渐升高,在 pH 为 5 时达到最大;在 $\text{pH} > 5$ 时,随着 pH 值的升

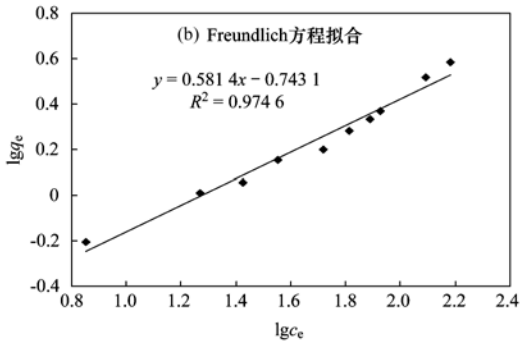


图 3 凹凸棒石对铀的吸附等温线

Fig. 3 Adsorption isotherms for uranium on attapulgite

表 1 凹凸棒石吸附铀的等温线拟合结果

Table 1 Isotherm parameters for uranium on attapulgite

核素	Langmuir 吸附等温模型			Freundlich 吸附等温模型		
	$q_m / \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b / \text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2	K_f	$1/n$	R^2
U	46.30	0.04	0.9946	0.18	0.58	0.9746

高,吸附量降低.

该实验结果与 Niu 等^[26] 获得的研究结果有所不同,其结果是在 pH 为 6 时出现最大吸附量. 主要

原因可能有 2 个,一是矿物样品不同,根据 XRD 可判断,凹凸棒石中的蒙脱石含量相对较高,陈天虎^[27] 指出蒙脱石基面和凹凸棒石端面接合可以形

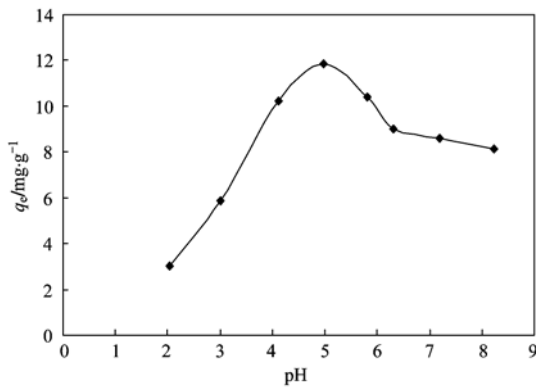


图4 溶液 pH 对凹凸棒石吸附铀的影响

Fig. 4 Effect of solution pH on the adsorption

成较大的结构空隙,对吸附作用会产生很大的影响.二是溶液中铀浓度不同,因为 UO_2^{2+} 水解形成 UO_2OH^+ 、 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 、 $\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$ 、 $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ 等配合物,这些配合物会随着铀浓度的变化而变化.随着溶液中铀浓度的增加, UO_2OH^+ 、 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 、 $\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$ 含量减少, $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ 含量增加^[28,29].

凹凸棒石的表面电荷为结构电荷和可变电荷.结构电荷主要来源于类质同相替代,不受 pH 值影响.而可变电荷受来自于凹凸棒石表面的 $\text{Al}-\text{OH}$ 、 $\text{Si}-\text{OH}$ 等基团与 H^+ 的缔合和解析,受 pH 值的影响.因此,当 pH 值较低,尤其是 $\text{pH} < 5$ 时,溶液中的 H^+ 浓度较高,同时铀的离子形态以 UO_2^{2+} 为主, H^+ 会与 UO_2^{2+} 竞争交换凹凸棒石层间的阳离子,一方面使凹凸棒石表面的吸附位点数及负电荷数减少,从而降低了凹凸棒石与 UO_2^{2+} 的结合能力,另一方面因为凹凸棒石表面吸附 H^+ 而带正电荷,使得凹凸棒石与 UO_2^{2+} 间存在静电斥力,而且 pH 值越小,斥力越大^[30].在 pH 值为 5 左右时,溶液中的铀主要是 UO_2OH^+ 、 $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$ 、 $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_5^+$ 等络合离子,这些带正电荷的阳离子与带负电荷的凹凸棒石产生络合吸附,所以吸附量最大.随着 pH 值的升高, H^+ 浓度减少,凹凸棒石表面负电荷增加,铀离子水解形成 $\text{UO}_2(\text{OH})_3^-$ 、 $\text{UO}_2(\text{OH})_4^{2-}$ 等络合负离子,同时铀离子与溶液中的 CO_3^{2+} 形成不容易吸附的 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$,这些带负电荷的络合离子与凹凸棒石表面产生静电斥力作用^[26,29,31],使得铀在凹凸棒石上的吸附降低.综上所述可以得出,在低 pH 值时,凹凸棒石吸附铀主要是以离子交换为主,在高 pH 值时以配位作用为主.

2.2.3 吸附动力学

吸附动力学可以反映吸附过程的速率快慢.本研究用准一级、准二级 2 种动力学模型对凹凸棒石吸附铀的动力学数据进行拟合,其线性表达式如下.

准一级动力学模型:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

准二级动力学模型:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e}$$

式中, q_t 为单位凹凸棒石 t 时刻吸附铀的量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_e 为吸附平衡时单位凹凸棒石吸附铀的量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; t 为吸附时间, min; k_1 为准一级动力学模型的速率常数; k_2 为准二级动力学模型的速率常数.

图 5 为常温下铀在凹凸棒石上的单位吸附量与时间的关系.从中可以看出,凹凸棒石对铀的吸附在 120 min 内可以达到吸附平衡.其中在 30 min 内的吸附量为 $20.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,达到平衡吸附量 $24.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的 85%.

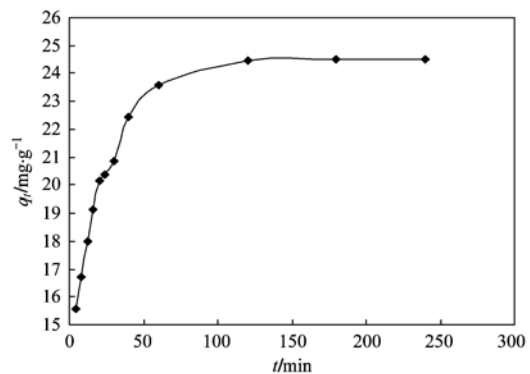


图5 接触时间对凹凸棒石吸附铀影响

Fig. 5 Effect of contact time on the adsorption of uranium

图 6 是分别以 $\ln(q_e - q_t) - t$ 和 $t/q_t - t$ 所作的动力学拟合曲线,动力学参数如表 2.由图 6 可以看出,在相同的初始浓度下,准二级动力学方程模拟的相关系数 $R^2(0.9998)$ 高于准一级动力学方程拟合的相关系数 $R^2(0.9863)$.由表 2 可以看出,从二级动力学方程得到的 $q_{e, \text{cal}}$ 与实验得到的 $q_{e, \text{exp}}$ 更接近.从以上的结果可以表明,准二级动力学方程能更好地描述凹凸棒石对铀的吸附动力学过程.主要是准二级模型包含了吸附的所有过程,如外部膜扩散、表面吸附和颗粒内部扩散等^[32],更能全面地反映铀在凹凸棒石上的吸附机制.

3 吸附反应机制分析

由于凹凸棒石有离子交换位和边面存在 $\text{R}-\text{OH}$ 官能团,所以凹凸棒石对铀的吸附作用主要

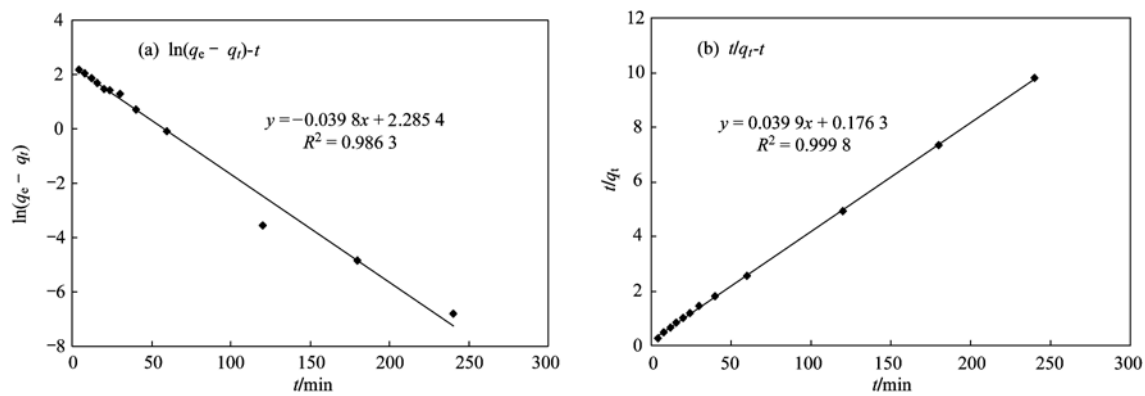


图 6 凹凸棒石吸附铀的动力学模型拟合
Fig. 6 Adsorption kinetics for uranium on attapulgite

表 2 吸附动力学参数¹⁾

Table 2 Kinetic parameters for uranium on attapulgite

核素	$q_{e,exp}$ /mg·g ⁻¹	准一级反应动力学			准二级反应动力学		
		K_1	$q_{e,cal}$ /mg·g ⁻¹	R^2	K_2	$q_{e,cal}$ /mg·g ⁻¹	R^2
U	24.51	0.0398	9.83	0.9863	0.2263	25.06	0.9998

1) $q_{e,exp}$ 为实验值; $q_{e,cal}$ 为动力学方程计算值

表现为低 pH 时离子交换和高 pH 时配位作用. 为了进一步分析其吸附机制, 利用 FTIR 表征凹凸棒石吸附铀前后结构的变化情况.

图 7 为凹凸棒石吸附铀前后的 FTIR 图. 凹凸棒石在高频区 3 700 ~ 3 000 cm⁻¹, 是 R—OH 的伸缩振动^[20] (3 612、3 585、3 555 cm⁻¹), 由图 7 可以看出, 吸附前和吸附后该区域伸缩振动减弱, 可能是铀离子与凹凸棒石中的 R—OH 发生络合作

用形成了 R—OUO₂⁺ 或 (R—O)₂UO₂ 络合物, 降低了吸光度; 中频区 1 700 ~ 800 cm⁻¹ 中 1 637 cm⁻¹、1 459 cm⁻¹ 的振动吸收是矿物吸附水和层间水的反映, 1 200 ~ 800 cm⁻¹ 为 (Mg, Al)—Si—O, Si—O—Si (Al) 的伸缩振动区间, 1 042 cm⁻¹ 为 Si—O 的伸缩振动, 该区域内吸光度也有比较小的变化, 可能是铀离子和凹凸棒石中的镁离子产生离子交换作用.

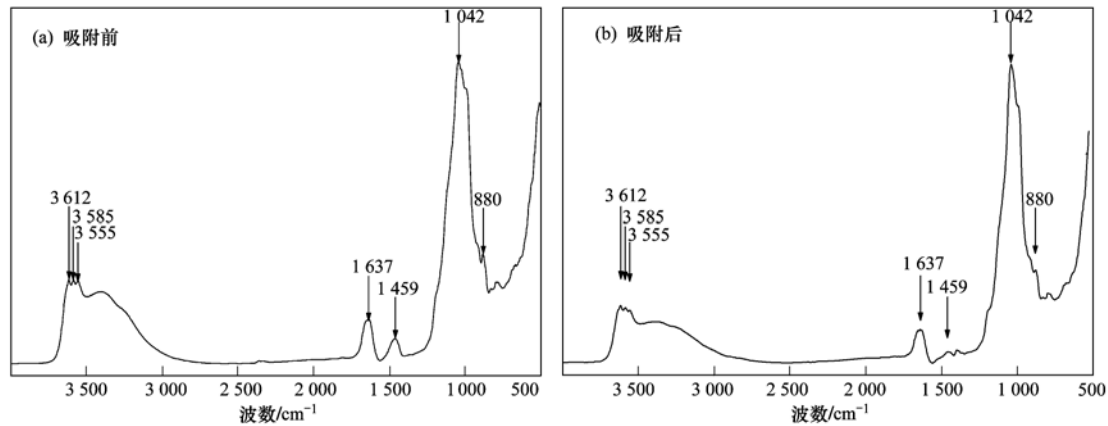


图 7 凹凸棒石吸附铀前后的 FTIR 图
Fig. 7 FTIR spectra of attapulgite

4 结论

(1) 用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温模型对吸附过程进行数据拟合, Langmuir 模型的拟合结果 ($R^2 = 0.9946$) 优于 Freundlich 模型 ($R^2 = 0.9746$).

说明凹凸棒石吸附铀为单分子层的化学吸附.
(2) pH 值对凹凸棒石吸附铀的影响很大. 主要原因有 2 个, 一是铀在不同的 pH 值中水解形成不同的形态, 二是 pH 值影响凹凸棒石表面电荷的正负性. pH 值为 5 时吸附最佳. 因为凹凸棒石有离子

交换位和边面存在 R—OH 官能团,所以凹凸棒石对铀的吸附作用主要表现为低 pH 时离子交换和高 pH 时配位作用。

(3)用准一级、准二级 2 种动力学模型对凹凸棒石吸附铀的动力学数据进行拟合,准二级动力学模型可以很好地描述吸附过程。

(4)由 FTIR 分析可得,凹凸棒石吸附铀后,在高频区 $3\,700 \sim 3\,000\text{ cm}^{-1}$ 吸光度减弱,可能是由于铀与凹凸棒石的 R—OH 发生配位作用形成了 R— OUO_2^+ 或 $(\text{R—O})_2\text{UO}_2$ 等铀络合物;在中频区 $1\,700 \sim 800\text{ cm}^{-1}$ 内吸光度减弱,可能是铀离子和凹凸棒石中镁离子产生离子交换作用。所以凹凸棒石对铀的吸附机制主要表现离子交换和配位作用。

参考文献:

- [1] Gargarello R M, Di Gregorio D, Huck H, *et al.* Reduction of uranium (VI) by *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. *Hydrometallurgy*, 2010, **104** (3-4): 529-532.
- [2] Martins M, Faleiro M L, Da Costa A M R, *et al.* Mechanism of uranium (VI) removal by two anaerobic bacterial communities [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **184** (1-3): 89-96.
- [3] Sprynskyy M, Kowalkowski T, Hlanganani T, *et al.* Adsorption performance of talc for uranium removal from aqueous solution [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **171** (3): 1185-1193.
- [4] 陈保冬,陈梅梅,白刃. 丛枝菌根在治理铀污染环境中的潜在作用[J]. *环境科学*, 2011, **32** (3): 809-816.
- [5] 郑伟娜,夏良树,王晓,等. 谷壳对铀(VI)的吸附性能及机理研究[J]. *原子能科学技术*, 2011, **45** (5): 534-540.
- [6] Allard B, Olofsson U, Torstenfelt B. Environmental actinide chemistry[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 1984, **94** (4): 205-221.
- [7] Yusan S D, Akyil S. Sorption of uranium (VI) from aqueous solutions by akaganeite [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **160** (2-3): 388-395.
- [8] Krestou A, Xenidis A, Pnias D. Mechanism of aqueous uranium (VI) uptake by natural zeolitic tuff [J]. *Minerals Engineering*, 2003, **16** (12): 1363-1370.
- [9] Han R P, Zou W H, Wang Y, *et al.* Removal of uranium (VI) from aqueous solutions by manganese oxide coated zeolite: discussion of adsorption isotherms and pH effect [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007, **93** (30): 127-143.
- [10] Bai J, Yao H J, Fan F L, *et al.* Biosorption of uranium by chemically modified *Rhodotorula glutinis* [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2010, **101** (11): 969-973.
- [11] 万芹方,任亚敏,王亮,等. 铀污染土壤的植物修复研究[J]. *化学学报*, 2011, **69** (15): 1780-1788.
- [12] 沙峰. 放射性污染土壤的清洗去污研究[D]. 北京: 中国原子能研究院, 2005. 6-48.
- [13] Groudev S, Spasova I, Nicolova M, *et al.* *In situ* bioremediation of contaminated soils in uranium deposits[J]. *Hydrometallurgy*, 2010, **104** (3-4): 518-523.
- [14] 宋宁宁,王丽萍,耿建新,等. 凹凸棒石黏土资源化现状研究[J]. *中国环保产业*, 2007, (1): 26-28.
- [15] 孔泳,王志良,倪珺华,等. 凹凸棒土应用于重金属离子吸附剂的研究[J]. *分析测试学报*, 2010, **29** (12): 1224-1227.
- [16] Pehlivan E, Cetin S, Yantk B H. Equilibrium studies for the sorption of zinc and copper from aqueous solutions using sugar beet pulp and fly ash[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **135** (1-3): 193-199.
- [17] Wang G H, Wang X G, Chai X J, *et al.* Adsorption of uranium (VI) from aqueous solution on calcined and acid-activated kaolin [J]. *Applied Clay Science*, 2010, **47** (3-4): 448-451.
- [18] Kilislioglu A, Aras G. Adsorption of uranium from aqueous solution on heat and acid treated sepiolites [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2010, **68** (10): 2016-2019.
- [19] Xie S B, Zhang C, Zhou X H, *et al.* Removal of uranium (VI) from aqueous solution by adsorption of hematite [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2009, **100** (2): 162-166.
- [20] Prikryl J D, Jain A, Turner D R, *et al.* Uranium^{VI} sorption behavior on silicate mineral mixtures[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, **47** (2-4): 241-253.
- [21] 高伟. 硅藻土和膨润土对铀的吸附研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2006. 1-84.
- [22] 郭择德,卫为强,程理,等. 尾矿库中 U、Th 和 ^{226}Ra 在亚粘土层的垂向迁移[J]. *辐射防护*, 2005, **25** (1): 24-30.
- [23] EJ 267. 3-1984, 铀矿石中铀的测定-三氯化钛还原/钼酸铵氧化滴定法[S].
- [24] 牛智伟. U(VI)和 Th(IV)在凹凸棒石上的吸附研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009. 25-26.
- [25] 谢燕华,李适宇,王飞,等. 质子化交联壳聚糖对水中高氯酸根的吸附特性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30** (9): 2580-2585.
- [26] Niu Z W, Fan Q H, Wang W H, *et al.* Effect of pH, ionic strength and humic acid on the sorption of uranium (VI) to attapulgite[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, **67** (9): 1582-1590.
- [27] 陈天虎. 凹凸棒石吸附性能应用的制约因素[J]. *安徽地质*, 1999, **9** (3): 199-203.
- [28] 张景廉. 铀矿物-溶液平衡[M]. 北京: 原子能出版社, 2005. 149.
- [29] Korichi S, Bensmaili A. Sorption of uranium (VI) on homoionic sodium smectite experimental study and surface complexation modeling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169** (1-3): 780-793.
- [30] 李坤全,郑正,蒋剑春,等. 铅在棉秆基活性炭上的吸附动力学与热力学[J]. *环境科学*, 2010, **31** (5): 1402-1408.
- [31] Mellah A, Chegrouche S, Barkat M. The removal of uranium (VI) from aqueous solutions onto activated carbon: Kinetic and thermodynamic investigations [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **296** (2): 434-441.
- [32] Chang M Y, Juang R S. Adsorption of tannic acid, humic acid, and dyes from water using the composite of chitosan and activated clay[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, **278** (1): 18-25.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行