

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 ..... 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 ..... 周雪明,仵雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 ..... 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 ..... 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM<sub>2.5</sub> 的污染水平及来源解析 ..... 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 ..... 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 ..... 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 ..... 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 ..... 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO<sub>2</sub> 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 ..... 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 ..... 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 ..... 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$  和  $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$  示踪北京城区河流硝酸盐来源 ..... 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 ..... 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 ..... 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 ..... 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 ..... 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 ..... 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 ..... 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 ..... 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 ..... 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 ..... 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 ..... 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 ..... 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 ..... 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 ..... 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 ..... 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 ..... 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 ..... 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 ..... 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 ..... 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 ..... 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的优势藻种筛选 ..... 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 ..... 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 ..... 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响 ..... 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH<sub>4</sub> 与 N<sub>2</sub>O 浓度特征 ..... 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 ..... 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 ..... 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 ..... 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 ..... 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 ..... 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对土壤重金属释放及形态变化的影响 ..... 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 ..... 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 ..... 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 ..... 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 ..... 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 ..... 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 ..... 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

# HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学

郭俊元, 王彬

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

**摘要:** 采用十六烷基三甲基溴化铵 (HDTMA) 对天然沸石进行改性, 研究了沸石的改性条件、改性沸石投加量、废水 pH 值、反应时间等对 HDTMA 改性沸石去除废水中对硝基苯酚性能的影响, 并分析了吸附动力学和吸附等温线。结果表明, 改性沸石对废水中对硝基苯酚的吸附效果明显高于天然沸石, 当制备改性沸石的 HDTMA 溶液的质量分数为 1.2%, 且其 pH 值为 10 时, 改性沸石对废水中对硝基苯酚的吸附量达到  $2.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 远高于天然沸石的  $0.54 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。吸附实验中, 改性沸石投加量  $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 反应时间 90 min, pH = 6 的条件下, HDTMA 改性沸石对废水中对硝基苯酚的去除率高达 93.9%。吸附动力学和等温线研究表明, 一级动力学方程能够更好地拟合沸石吸附对硝基苯酚的过程 ( $R^2 > 0.90$ ), 不同温度条件下 Langmuir 等温线拟合方程的相关系数均在 0.90 以上, 数据和方程拟合性较好。

**关键词:** 对硝基苯酚; 十六烷基三甲基溴化铵; 改性沸石; 吸附动力学; 吸附等温线

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1852-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.032

## Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters

GUO Jun-yuan, WANG Bin

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In this study, natural zeolite was modified by HDTMA. Effects of the modified conditions, HDTMA-modified zeolite doses, solution pH values, and reaction time on nitro-phenol removal were investigated, and the adsorption kinetics and isotherms were discussed. Compared with natural zeolite, HDTMA-modified zeolite showed better performance in nitro-phenol removal. An adsorption capacity of  $2.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  was achieved when the concentration of HDTMA solution (pH = 10) was 1.2% in preparation of modified zeolite. This adsorption capacity was higher than that obtained by natural zeolite ( $0.54 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ). In adsorption tests, when HDTMA-modified zeolite dose was adjusted to  $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , the removal efficiency of nitro-phenol reached 93.9% after 90 min reaction, with wastewater pH of 6. Furthermore, the nitro-phenol adsorption process could be well fitted to the pseudo-first-order kinetics model ( $R^2 > 0.90$ ), whereas the adsorption isotherm results indicated that Langmuir model provided the best fitting for the equilibrium data at different temperatures, with  $R^2$  of higher than 0.90.

**Key words:** nitro-phenol; HDTMA; modified zeolite; adsorption kinetics; adsorption isotherm

随着现代化工行业的发展, 含有对硝基苯酚的有机废水大量排放; 由于对硝基苯酚具有良好的生化稳定性, 不易降解, 从而造成了严重的水体环境污染。目前, 从废水中去除对硝基苯酚的方法主要有微生物降解法、萃取法、吸附法以及光催化氧化法<sup>[1-5]</sup>。其中, 吸附法由于不引入新的污染物, 能耗较低, 且能够从废水中分离污染物加以重新利用, 备受广泛关注。天然沸石独特的四面体结构、巨大的比表面积、稳定的化学性质, 使得其具有较好的吸附性能, 此外, 沸石中的阳离子使其具有静电吸引力, 对极性和易极化分子的吸附作用较强<sup>[6]</sup>。针对废水中的对硝基苯酚, 由于—C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>基团是可极化基团, 使得沸石能够被应用于废水中对硝基苯酚的去除<sup>[7-10]</sup>。然而, 天然沸石表面硅氧结构所具有的亲

水性, 使得其吸附有机物的极限性能不理想, 因此, 为了提高沸石去除废水中有机污染物的能力, 常在使用前对其进行改性处理<sup>[11,12]</sup>, 例如: 天然沸石经质量浓度为  $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  十六烷基三甲基溴化铵溶液浸泡后, 能够提高对酚类废水的去除效果<sup>[13,14]</sup>。

本研究采用 HDTMA 对天然沸石进行改性, 探讨改性条件对沸石吸附能力的影响, 考察改性沸石吸附废水中对硝基苯酚的性能, 在此基础上, 研究吸附过程中的动力学和吸附等温线特征。

收稿日期: 2015-09-08; 修订日期: 2015-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508043); 成都信息工程大学中青年学术带头人科研人才基金项目(J201515)

作者简介: 郭俊元(1985~), 男, 讲师, 主要研究方向为环境微生物技术与废水资源化处理技术, E-mail: gjy@cuit.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用天然沸石购自上海国药集团化学试剂有限公司, 20~40 目, 经实验测得其阳离子交换量为  $0.36 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 天然沸石样品经蒸馏水漂洗后, 在  $105^\circ\text{C}$  下烘干备用; 十六烷基三甲基溴化铵购自成都市科龙化工试剂厂(相对分子质量: 364.45  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 分析纯。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 HDTMA 改性沸石的制备

基于现有研究<sup>[13,14]</sup>, 配制质量浓度为 0.8%、1.0%、1.2%、1.4%、1.6% 的不同 pH 值的 HDTMA 溶液, 将天然沸石分别与配制好的 HDTMA 溶液以 1:10 (质量体积比, 质量单位 g, 体积单位 mL) 混合, 于  $25^\circ\text{C}$ ,  $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  振荡 6 h 后,  $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  离心 20 min 收集沉淀物, 采用蒸馏水冲洗, 相同条件下离心和冲洗 4~5 次, 直到冲洗后的上清液中检测不到 HDTMA, 最后收集沉淀物于  $100^\circ\text{C}$  下干燥 12 h, 获得改性沸石。

#### 1.2.2 吸附实验

准确称取一定量的改性沸石添加至 1.0 L 浓度为  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的对硝基苯酚溶液中, 常温条件下  $120 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  搅拌 2 h 后, 静沉 30 min, 取上清液经  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜过滤后, 测定其中的对硝基苯酚浓度。废水 pH 采用  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 HCl 或 NaOH 溶液调节。按下列公式计算对硝基苯酚吸附量  $q_e$  和去除率  $\eta$ :

$$q_e = \frac{V(c_0 - c_e)}{m} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $c_0$  和  $c_e$  分别为废水中对硝基苯酚的初始浓度和吸附平衡时的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $m$  为改性沸石投加量, g;  $V$  为废水样容积, L。

#### 1.2.3 检测方法

实验过程中, 对硝基苯酚溶液的浓度采用紫外分光光度法测定, 最大吸收波长为 317 nm; 废水 pH 值采用 pH 计 (pHS-3C) 检测; 废水中 HDTMA 浓度采用分光光度法测定, 最大吸收波长为 470 nm; 改性沸石的阳离子交换量采用乙酸铵法测定。

### 1.3 吸附动力学

基于吸附实验得到的对硝基苯酚的最佳吸附条件, 保持改性沸石投加量、废水 pH 值等不变, 通过

检测吸附过程中改性沸石对废水中对硝基苯酚吸附量的变化, 考察对硝基苯酚的吸附动力学特征。一级速率方程和二级速率方程的响应目标均是描述吸附动力学过程, 分别如方程(3)和(4)所示:

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 t / 2.303 \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} \quad (4)$$

式中,  $q_t$  为  $t$  时刻沸石对废水中对硝基苯酚的吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;  $k_1$  为一级速率方程速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $k_2$  为二级速率方程速率常数,  $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$ ;  $t$  为反应时间 (min)。

### 1.4 吸附等温线

一般情况下, 溶质从溶液中转移到吸附剂上这一动态过程取决于固-液相之间的吸附平衡, 吸附等温线正是用来描述溶质的这一吸附过程的, 最为典型的是 Freundlich、Langmuir 等温线方程<sup>[15,16]</sup>。基于吸附实验得到的对硝基苯酚的最佳吸附条件, 保持改性沸石投加量、废水 pH 值等不变, 在不同实验温度条件下, 通过检测吸附平衡状态时改性沸石的平衡吸附量与废水中对硝基苯酚的剩余量之间的关系, 考察改性沸石对废水中对硝基苯酚的吸附等温线特征。Freundlich、Langmuir 等温线分别如方程(5)和(6)所示:

$$\lg q_e = \lg k_f + \frac{1}{n} \lg c_e \quad (5)$$

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_m} + \frac{c_e}{q_m} \quad (6)$$

式中,  $k_f$  和  $n$  为 Freundlich 常数;  $k_L$  为 Langmuir 常数;  $q_m$  为最大吸附量,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同改性条件对沸石去除废水中对硝基苯酚性能的影响

由图 1 可知, 当不调节 HDTMA 溶液的 pH 值, 不同质量浓度的 HDTMA 溶液改性制备的沸石对废水中对硝基苯酚的平衡吸附量均高于天然沸石的  $0.54 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 按照单程楠<sup>[14]</sup>的研究, 天然沸石经过 HDTMA 改性后, 由于 HDTMA 结构中疏水长碳链间的相互作用, 在沸石表面形成了类似胶束的一层覆盖物, 使对硝基苯酚通过分配作用进入到沸石表面的 HDTMA 有机相中而得以去除。实验结果显示, 当 HDTMA 溶液质量分数为 1.2% 时, 与天然沸石以 10:1 比例混合制备的改性沸石对废水中的对硝基苯酚的吸附量达

到最大,约为  $2.52 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,高于或低于 1.2% 时,对硝基苯酚的吸附量均明显降低,这与单程楠等的研究结论相似<sup>[13,14]</sup>. HDTMA 浓度低时,负载到沸石表面的量小,不能有效地在沸石表面形成疏水性的覆盖层,如此制备得到的改性沸石不能有效地结合对硝基苯酚;HDTMA 浓度过高时,其“两亲性”结构会使得 HDTMA 以离子交换方式分布在沸石-液相界面,沸石表面过多的 HDTMA 也会发生解析现象,从而降低改性沸石的表面稳定性,进而使得对废水中对硝基苯酚的结合能力较弱<sup>[17-19]</sup>.

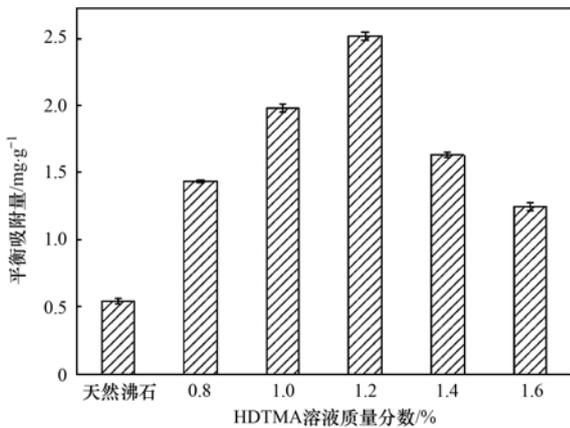


图 1 HDTMA 溶液质量分数对改性沸石吸附废水中对硝基苯酚效果的影响

Fig. 1 Effects of HDTMA equivalent on the adsorption of nitro-phenol from wastewater by modified zeolite

由图 2 可知,在改性沸石制备过程中,保持 HDTMA 溶液质量浓度不变的情况下,随着 HDTMA 溶液 pH 值增加至 10,所制备得到的改性沸石对废水中对硝基苯酚的吸附量逐渐增加,并达到  $2.53 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . 酸碱条件影响改性效果的原因在于:酸性条件下,沸石表面的部分 Si—OH 和 Al—OH 基团因质子化而带正电,不利于 HDTMA 的负载,如此制备得到的改性沸石不能有效结合对硝基苯酚;相反,碱性环境更有利于 HDTMA 在沸石表面的负载,这是由于碱性环境使得沸石架构中的氧带负电荷<sup>[20]</sup>. 有研究表明,强碱性环境引入的 NaOH 也会改善沸石吸附污染物的性能<sup>[21]</sup>. 综上考虑,在下述吸附实验中,改性沸石的制备条件设置为 HDTMA 溶液质量浓度 1.2%,pH 值 10.

### 2.2 吸附条件对沸石去除废水中对硝基苯酚性能的影响

对硝基苯酚的去除率与沸石投加量在一定范围

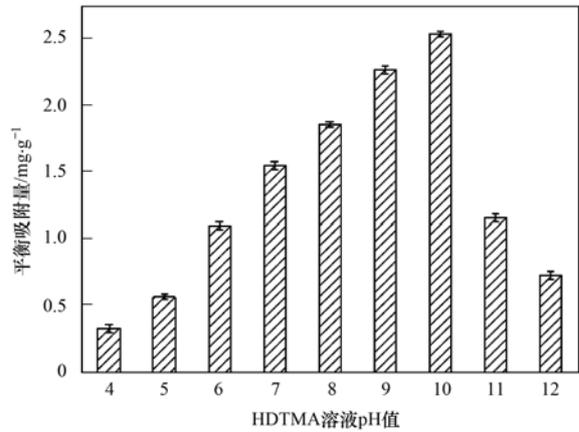


图 2 HDTMA 溶液 pH 值对改性沸石吸附废水中对硝基苯酚效果的影响

Fig. 2 Effects of HDTMA solution pH values on the adsorption of nitro-phenol from wastewater by modified zeolite

内呈正相关关系. 单程楠等<sup>[13]</sup>研究表明,随着改性沸石投加量的增加,去除率逐渐增大,但投加量超过  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时去除率增幅逐渐变缓. 由图 3 可知, HDTMA 改性沸石投加量在  $4 \sim 8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内变化时,废水中对硝基苯酚去除率随着改性沸石投加量的增加而增大,而且增长速率较快,投加量为  $8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,去除率高达 89.7%. 继续投加改性沸石,对硝基苯酚去除率持续增加,但增加趋势变得缓慢,这是因为投加量较小时,达到吸附平衡状态时所吸附的对硝基苯酚的总量很小,体现为去除率较低;随着沸石投加量的增加,其吸附的对硝基苯酚量也在不断增加,体现为去除率随投加量的增加而增大. 随着沸石投加量增加到吸附动态平衡,沸石吸附的对硝基苯酚总量与废水中对硝基苯酚浓度之间的浓度压差越来越小,最终导致对硝基苯酚去除率逐渐

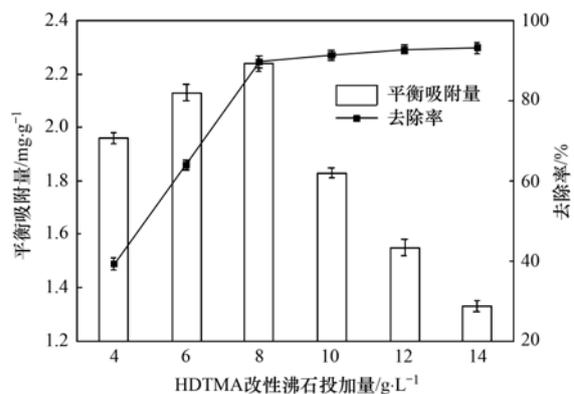


图 3 改性沸石投加量对废水中对硝基苯酚吸附效果的影响

Fig. 3 Effects of modified zeolite dose on the adsorption of nitro-phenol from wastewater

达到平衡.

由图 4 可知,在不同 pH 条件下,改性沸石对废水中对硝基苯酚的去除率均高于天然沸石的最大去除率(21.6%).随着废水 pH 的增加,改性沸石对废水中对硝基苯酚的去除率逐渐增加,在 pH 为 6 时,对硝基苯酚的去除率最高,约为 93.9%.当废水为碱性时(如 pH = 8),对硝基苯酚的去除率明显降低,随着 pH 值的继续增加(pH > 8),对硝基苯酚的去除率反而有所增加(增加至 83.5%).有研究者认为<sup>[14]</sup>,出现上述现象是由于废水 pH 的变化导致对硝基苯酚电负性的改变,对硝基苯酚在酸性条件下以分子形态存在,碱性条件下以离子形态存在;对硝基苯酚解离常数为 7.16, pH = 6 时废水中的对硝基苯酚主要是分子态,在沸石表面的 HDTMA 有机相中的分配系数远大于水相(相似相溶原理),更容易被吸附,因而去除率较大.废水 pH 高于 7.16 时,对硝基苯酚部分以离子形式存在,使得分子吸附降低,在有机相中的分配率降低,因此, pH = 8 时,对硝基苯酚去除率较低.随碱性环境的继续增强(pH > 8),废水中的对硝基苯酚大部分解离成阴离子,通过阴、阳离子之间的静电引力被吸附到带正电的活性剂外层,因而此时的吸附量增加,张红梅等<sup>[22]</sup>的研究佐证了这一观点.上述结果表明,HDTMA 改性沸石对废水中对硝基苯酚的吸附主要基于分配作用,天然沸石经由有机疏水性表面活性剂(HDTMA)改性后,其表面形成有机分配相,可以使对硝基苯酚很好地“溶解”在这层有机膜中,最终在水相和 HDTMA 两相间达到分配平衡.

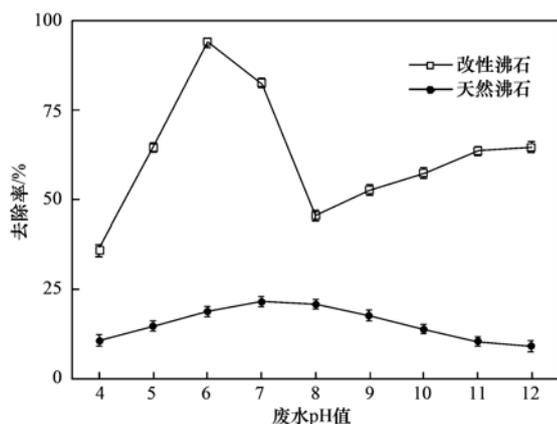
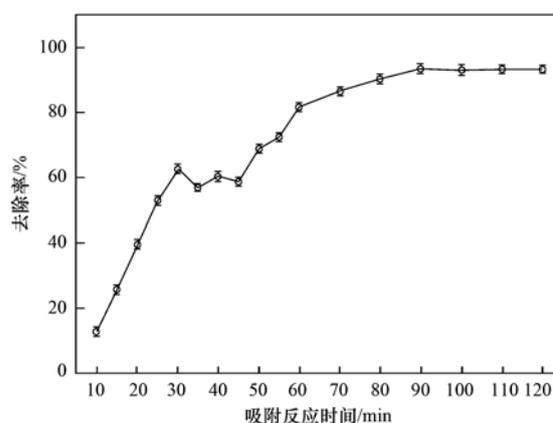


图 4 对硝基苯酚废水 pH 值对废水中对硝基苯酚吸附效果的影响

Fig. 4 Effects of nitro-phenol solution pH values on the adsorption of nitro-phenol from wastewater

图 5 反映了对硝基苯酚的去除主要发生在吸附过程前 60 min, 改性沸石对废水中对硝基苯酚的去除率随着反应时间的延长迅速增加到 81.7%. 在 30 ~ 60 min 去除率会出现波动, 原因是吸附反应开始时, 对硝基苯酚被迅速吸附在改性沸石的表面, 但由于吸附得不够牢固, 对硝基苯酚可能部分发生脱附, 从而导致吸附效果出现波动. 随着时间的推移, 对硝基苯酚分子从改性沸石表面的有机相向内部扩散到沸石孔道中, 并在 90 min 时, 吸附趋于稳定, 去除率达到 93.9%.



沸石投加量:  $8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ; pH = 6

图 5 吸附时间对废水中对硝基苯酚吸附效果的影响

Fig. 5 Effects of reaction time on the adsorption of nitro-phenol from wastewater

### 2.3 吸附动力学和吸附等温线

由表 1 可知,一级动力学模型的速率常数  $k_1$  和二级动力学模型的速率常数  $k_2$  均随着废水中初始对硝基苯酚浓度的增加而增大,初始对硝基苯酚浓度为克服液相和固相之间的传质阻力提供了重要的推动力,因此,初始对硝基苯酚浓度的升高在一定范围内有利于提高沸石的吸附能力.此外,两个模型的速率常数  $k_1$  和  $k_2$  随着废水温度的增加而降低,随着 pH 值的升高而增大.不同实验条件下,一级动力学模型的相关系数 ( $R^2$ ) 均高于 0.90,二级动力学模型的相关系数 ( $R^2$ ) 则均低于 0.90,而且一级动力学模型计算出的平衡吸附量更加接近实验值(相对误差更小),说明一级动力学模型能更好地拟合改性沸石吸附废水中对硝基苯酚的过程.如表 2 所示,不同温度条件下(25、35、45℃),由于 Langmuir 吸附等温线的  $R^2$  较高,说明其能够更好地拟合实验数据.

表 1 对硝基苯酚吸附动力学参数

Table 1 Kinetics constants for nitro-phenol adsorption

一级动力学	指标	$k_1/\text{min}^{-1}$	计算值 $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$R^2$	实验值 $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	相对误差/%
初始浓度	10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.044	2.18	0.918 8	2.07	5.1
	20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.061	2.44	0.966 5	2.46	0.8
	30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.085	2.57	0.968 5	2.53	1.6
	40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.112	2.62	0.901 2	2.56	2.3
温度	25 $^{\circ}\text{C}$	0.053	2.58	0.954 7	2.55	1.2
	35 $^{\circ}\text{C}$	0.046	2.46	0.955 4	2.51	2.0
	45 $^{\circ}\text{C}$	0.038	2.39	0.952 3	2.35	1.7
pH	6	0.035	2.09	0.913 3	2.13	1.9
	8	0.068	2.36	0.932 7	2.42	2.5
	11	0.077	2.43	0.904 6	2.37	2.5
二级动力学	指标	$k_2/\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$	计算值 $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$R^2$	实验值 $q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	相对误差/%
初始浓度	10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.002 6	2.06	0.866 4	2.18	5.8
	20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.003 4	2.25	0.893 6	2.32	3.1
	30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.005 5	2.33	0.877 8	2.46	5.6
	40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.012 7	2.47	0.898 9	2.52	2.0
温度	25 $^{\circ}\text{C}$	0.004 3	2.41	0.864 6	2.34	2.9
	35 $^{\circ}\text{C}$	0.003 6	2.28	0.855 8	2.21	3.1
	45 $^{\circ}\text{C}$	0.002 1	2.17	0.862 3	2.08	4.1
pH	6	0.006 3	2.05	0.883 9	2.12	3.4
	8	0.009 4	2.24	0.836 7	2.33	4.0
	11	0.009 8	2.16	0.871 8	2.25	4.1

表 2 对硝基苯酚吸附等温线参数

Table 2 Isotherms constants for nitro-phenol adsorption

温度/ $^{\circ}\text{C}$	Langmuir 等温线			Freundlich 等温线		
	$k_L$	$q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$R^2$	$k_f$	$1/n$	$R^2$
25	0.778	2.68	0.962 4	0.341	1.63	0.864 8
35	0.792	2.32	0.945 7	0.364	1.75	0.823 5
45	0.823	1.97	0.901 1	0.395	1.78	0.810 8

### 3 结论

(1) HDTMA 质量浓度与 pH 值对所制备的改性沸石吸附对硝基苯酚的能力影响较大。HDTMA 质量分数为 1.2%，且在碱性条件下 (pH = 10)，所制备的有机改性沸石对废水中对硝基苯酚的吸附量最大 (2.53  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )。

(2) HDTMA 改性沸石去除废水中对硝基苯酚的实验中，当对硝基苯酚废水 pH = 6 时，投加 8  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  的改性沸石，反应 90 min 后，对硝基苯酚的去除效果最好，去除率达到 93.9%。

(3) 吸附动力学表明，一级动力学模型能更好地拟合改性沸石吸附废水中对硝基苯酚的过程；等温线研究表明，Langmuir 等温线能够较好地拟合实验数据。

#### 参考文献：

[1] Xu A H, Yang M, Qiao R P, *et al.* Activity and leaching

features of zinc-aluminum ferrites in catalytic wet oxidation of phenol[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **147**(1-2): 449-456.

[2] Chen Y M, Lin T F, Huang C, *et al.* Degradation of phenol and TCE using suspended and chitosan-bead immobilized *Pseudomonas putida*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **148**(3): 660-670.

[3] 苗肖君, 王楠楠, 赵姗姗, 等. 微波辅助 Cu(II)-Fenton 体系催化氧化处理对硝基苯酚废水[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(6): 2299-2305.

[4] 任磊, 史延华, 贾阳, 等. 菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1757-1762.

[5] 万年升, 顾继东, 郝伏勤, 等. *Rhodococcus* sp. Ns 对硝基苯酚的好氧生物降解[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 431-435.

[6] 佟小薇, 朱义年. 沸石改性及其去除水中氨氮的实验研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(4): 635-638.

[7] 李效红, 朱琨, 郝学奎. 环糊精改性沸石制备方法及对对硝基苯酚吸附性能的影响[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(7):

- 922-926.
- [ 8 ] 郑凤英, 钱沙华, 李顺兴, 等. 3,5-二硝基水杨酸表面修饰纳米 TiO<sub>2</sub> 吸附对硝基苯酚[J]. 环境科学, 2006, **27**(6): 1140-1143.
- [ 9 ] 洪昌红, 黄本胜, 邱静, 等. 对硝基酚在超高交联吸附树脂 NDA-701 上的脱附行为研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1388-1393.
- [ 10 ] Ahmedzeki N S, Rashid H A, Alnaama A A, *et al.* Removal of 4-nitro-phenol from wastewater using synthetic zeolite and kaolin clay[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2013, **30**(12): 2213-2218.
- [ 11 ] 张晖. 沸石改性和去除水中氮磷的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [ 12 ] Guo J Y. Adsorption characteristics and mechanisms of high-levels of ammonium from swine wastewater using natural and MgO modified zeolites[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(12): 5452-5463.
- [ 13 ] 单程楠, 唐见, 王小治, 等. CTMAB 改性沸石及其对对硝基苯酚吸附效果的研究[J]. 安全与环境学报, 2011, **11**(1): 46-50.
- [ 14 ] 单程楠. 改性沸石的制备及其对对硝基苯酚吸附效果的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
- [ 15 ] Alkan M, Doğan M, Turhan Y, *et al.* Adsorption kinetics and mechanism of maxilon blue 5G dye on sepiolite from aqueous solutions[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **139**(2): 213-223.
- [ 16 ] Vadivelan V, Kumar K V. Equilibrium, kinetics, mechanism, and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, **286**(1): 90-100.
- [ 17 ] 高叶松. 有机改性粘土矿物的制备及其对甲基异柳磷的吸附[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [ 18 ] 赵振国. 胶束催化与微乳催化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [ 19 ] Cordoves A I P, Valdés M G, Fernández J C T, *et al.* Characterization of the binding site affinity distribution of a surfactant-modified clinoptilolite [ J ]. Microporous and Mesoporous Materials, 2008, **109**(1-3): 38-48.
- [ 20 ] 王曙光, 栾兆坤, 高宝玉, 等. 有机沸石对富里酸的静态吸附性能[J]. 环境化学, 2004, **23**(6): 659-663.
- [ 21 ] Jovanović V, Dondur V, Damjanović L J, *et al.* Improved materials for environmental application: surfactant-modified zeolites[J]. Materials Science Forum, 2006, **518**: 223-228.
- [ 22 ] 张红梅, 彭先佳, 栾兆坤, 等. PDMDAAC-膨润土对对硝基苯酚吸附特性的研究[J]. 环境化学, 2005, **24**(2): 205-208.

## CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC .....	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry .....	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou City .....	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM <sub>2.5</sub> in Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region .....	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources .....	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing .....	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing .....	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO <sub>2</sub> Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis .....	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication .....	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region .....	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers .....	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin .....	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region .....	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China .....	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network .....	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake .....	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors .....	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province .....	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China .....	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou .....	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River .....	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing .....	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province .....	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example .....	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co <sup>2+</sup> Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process .....	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile .....	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process .....	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System .....	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters .....	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment .....	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge .....	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor .....	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain .....	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring .....	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N <sub>2</sub> O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China .....	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism .....	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China .....	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates .....	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang .....	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil .....	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic .....	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil .....	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i> .....	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source .....	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting .....	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

# 《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)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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@reces. 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@reces. 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