

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

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

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

丁二酸改性茶油树木屑吸附铀的研究

张晓峰^{1,2}, 陈迪云^{1,2*}, 彭燕^{1,2}, 刘永胜¹, 熊雪莹^{1,2}

(1. 广州大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 广东省放射性核素污染控制与资源化重点实验室, 广州 510006)

摘要: 为了探究丁二酸改性对茶油树木屑吸附铀的促进作用, 将茶油树木屑经过粉碎、筛分、碱化和酸化等前处理后, 再利用丁二酸对茶油树木屑作改性处理。红外分析表明改性后木屑内部的化学基团中增加了羧基、酯基; 扫描电镜可知, 改性后的茶油树木屑由致密平直的条状结构变为疏松褶皱的叶片状结构, 说明改性作用增加木屑内部的空隙。通过静态吸附实验, 考察了吸附反应时间、木屑用量、pH 值、温度、以及溶液初始浓度等因素对茶油树木屑改性前后吸附铀的影响; 结果表明, 茶油树木屑经丁二酸改性后对铀吸附效果明显提高, 在 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铀溶液中约提高了 20%。改性和未改性的茶油树木屑对铀的吸附都在 180 min 内达到平衡, 并且都符合准二级动力学模型。改性和未改性茶油树木屑对铀的吸附等温线都符合 Langmuir 和 Freundlich 模型。且由 Langmuir 等温方程计算可知, 在 35°C 、 $\text{pH} = 4.0$ 条件下, 改性后的茶油树木屑对铀的最大吸附容量 (Q_m) 由 $21.4133 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 提高到 $31.5457 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

关键词: 生物吸附; 铀; 改性; 茶油树木屑; 丁二酸

中图分类号: X131.2; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1686-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.024

Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid

ZHANG Xiao-feng^{1,2}, CHEN Di-yun^{1,2*}, PENG Yan^{1,2}, LIU Yong-sheng¹, XIONG Xue-ying^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Province Key Laboratory of Radioactive Pollution Control and Resource, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to explore how the modification of succinic acid improves the adsorption of tea oil tree sawdust for uranium, the tea oil tree sawdust was modified by succinic acid, after the pretreatments of crushing, screening, alkalization and acidification. Infrared analysis indicated carboxylic acid groups and ester groups were added to the sawdust after modification, and scanning electron microscope demonstrated after modification the appearance of tea oil tree sawdust was transferred from the structure like compact and straight stripped into the structure like loose and wrinkled leaves, which meant modification increased its inner pores. By the static experiments, effects of reaction time between adsorbent and solvent, dosage of adsorbent, temperature, pH value and initial concentration of uranium were investigated. The results showed that after the modification by succinic acid, the absorption rate of tea oil tree sawdust for uranium increased significantly by about 20% in $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ initial concentration uranium solution. Adsorption equilibrium was achieved within 180 min, and the kinetic data can be well described by the pseudo-second-order kinetic model. The experimental adsorption isotherm followed the Langmuir and Freundlich models. In addition, the maximum adsorption amounts of tea oil tree sawdust after modification calculated from Langmuir equation raised from 21.4133 to $31.5457 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ at 35°C and $\text{pH} 4.0$.

Key words: biosorption; uranium; modification; tea oil tree sawdust; succinic acid

在铀矿的开采、冶炼和提纯的过程中, 往往伴随着大量含铀废水的产生, 这些废水中的铀元素同时具有化学毒性和放射性且 U-238 的半衰期长达 $4.468 \times 10^9 \text{ a}$, 如果不加处理即排入周边环境将会对生态环境和人体健康造成严重危害, 因此对含铀废水的处理一直都是科研工作者的热门课题^[1,2]。

传统的处理含铀废水的方法主要有蒸发浓缩法、离子交换法、混凝沉淀法、氧化还原法等, 但这些传统方法存在工艺流程冗长复杂且成本较高等缺点^[3]。而运用生物吸附材料处理放射性废水的生物吸附法, 因其具有材料来源广泛, 吸附速度快, 选择性好, pH 值和温度范围宽, 且没有二次污染物等优点, 在处理含铀元素的放射性废水领域中日益受到人们的重视, 如 Silva 等^[4] 2009 年利用马尾藻吸附

同时含有钡、铬、铁等元素的铀放射性废水; Khani 等^[5] 于 2008 年用粘藻类水藻吸附铀, 探讨了吸附平衡的条件。近年来, 植物材料尤其是一些廉价的农业废弃物, 如谷壳、板栗壳、椰壳、橘子皮、菠萝皮、番石榴皮、稻草、米糠、麦秆、槟榔果髓、橄榄果渣等材料被直接用来处理废水中的 Cu、Ni、U、Cd、Pb 和 Cr 等重金属元素^[6~17], 且取得了较明显的效果, 在一定程度上达到了“变废为宝”、“以废治废”的目的。但是这些未经处理的原生态生物材

收稿日期: 2014-07-01; 修订日期: 2015-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372364); 羊城学者首席科学家项目(12A007S); 广东省放射性核素污染控制与资源化重点实验室建设项目(2012A061400023)

作者简介: 张晓峰(1987~), 男, 硕士, 主要研究方向为放射性污染控制与防治, E-mail: zhangxiaofeng0926@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cdy@gzhu.edu.cn

料^[18], 往往吸附容量不大吸附率较低, 且难以承受废水中强酸性环境, 这限制了生物材料在放射性废水中的实际应用。

中国南方普遍种植茶油树, 其木质结构坚硬、致密且耐腐蚀能力强, 富含木质素和纤维素成分可供与有机酸类进行酯化改性具有良好的好表面活性^[19,20], 目前尚鲜见到有关利用茶油树作为吸附材料去除铀的相关报道。本研究以枯死的茶油树枝制成适当粒度的茶油树木屑; 再经过碱化等前处理, 去除附着在其表面的脂类物质, 并溶解其结构中的半纤维素、可溶性糖类等黏结物质, 使其主要的有效成分木质素和纤维素得以充分暴露^[21,22]; 之后, 通过丁二酸的一端与茶油树木屑上的醇羟基酯化, 使之连接上羧基以增强其吸附能力; 然后, 通过吸附静态实验以考察其改性前后吸附铀的能力。通过考察茶油树木屑改性前后吸附铀效果的变化, 以期探索出一种将天然植物资源进行改性处理来治理放射性污染的新方法, 并为将生物吸附技术推广到实际应用中打下基础。

1 材料与方法

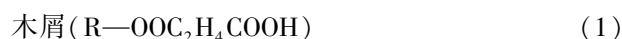
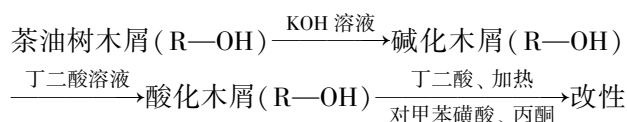
1.1 主要仪器与试剂

721 分光光度计 (721 上海第三仪器厂); TESCAN VEGAS3SBU 型扫描电镜 (捷克 TESCAN 公司); SHA-B 水浴恒温振荡器 (常州澳华仪器有限公司); Nexus-870 傅里叶变换红外光谱仪 (Nicolet 公司)。茶油树木屑 (湖南益阳 自制); U_3O_8 (优级纯); 丁二酸 (天津大茂化学试剂厂 AR)。

1.2 实验与计算方法

1.2.1 茶油树木屑改性方法

将茶油树木屑筛分, 取粒度为 16~40 目茶油树木屑 20 g 加入 300 mL 10% KOH 溶液中, 45℃ 下碱化 1 h, 用去离子水洗涤至 pH = 8 左右, 过滤, 取滤渣, 于 85℃ 负压为 0.07 MPa 真空干燥箱中干燥, 得到碱化木屑; 取碱化后木屑 10 g 加入 200 mL 15% 的丁二酸溶液中, 45℃ 下酸化 1 h, 取滤渣, 于 85℃ 负压为 0.07 MPa 真空干燥箱中干燥, 得到酸化木屑; 取酸化后木屑 19 g、丁二酸 30 g、对甲苯磺酸 4 g 加入 300 mL 丙酮中, 加热回流 2.5 h 后, 用去离子水洗涤至中性, 过滤, 取滤渣, 干燥, 即得改性茶油树木屑。流程如式(1)所示:



1.2.2 模拟含铀废水的配制方法

称取 1.179 2 g U_3O_8 , 置于 100 mL 的烧杯中。加 10 mL 浓盐酸, 3 mL H_2O_2 , 两滴 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸, 盖上表面皿放置 3 min 并经常摇动, 待剧烈反应停止后, 加热至完全溶解, 取下, 稍冷, 转入 1 000 mL 容量瓶中, 加水稀释至刻度, 摇匀, 即得 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $U(VI)$ 标准溶液。

取 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铀标准溶液, 按照实验的需要用去离子水将其稀释成不同浓度的铀溶液, 并用 NaOH 溶液和盐酸调节其 pH 值, 得到实验用的模拟含铀废水。

1.2.3 吸附实验

于一系列 500 mL 具塞锥形瓶中, 加入 300 mL 用去离子水配制的不同 $U(VI)$ 浓度的模拟废水, 用 NaOH 溶液和盐酸调节溶液 pH 值, 然后再加入适量的茶油树木屑或改性茶油树木屑, 根据不同实验目的, 选择实验条件。室温下, 在转速为 $145 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒温水浴振荡器振荡适当时间, 之后取悬浮液过滤, 取滤液, 分析其中的铀含量。

1.2.4 计算方法

铀吸附率:

$$\psi_t(\%) = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100 \quad (2)$$

式中, c_0 为初始铀浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_t 为时间 t 时的铀浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

吸附容量:

$$Q_t(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{(c_0 - c_t)V}{m_p} \quad (3)$$

式中, c_0 为初始铀浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_t 为时间 t 时的铀浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为溶液体积, mL; m_p 为加入的木屑的总质量, g。

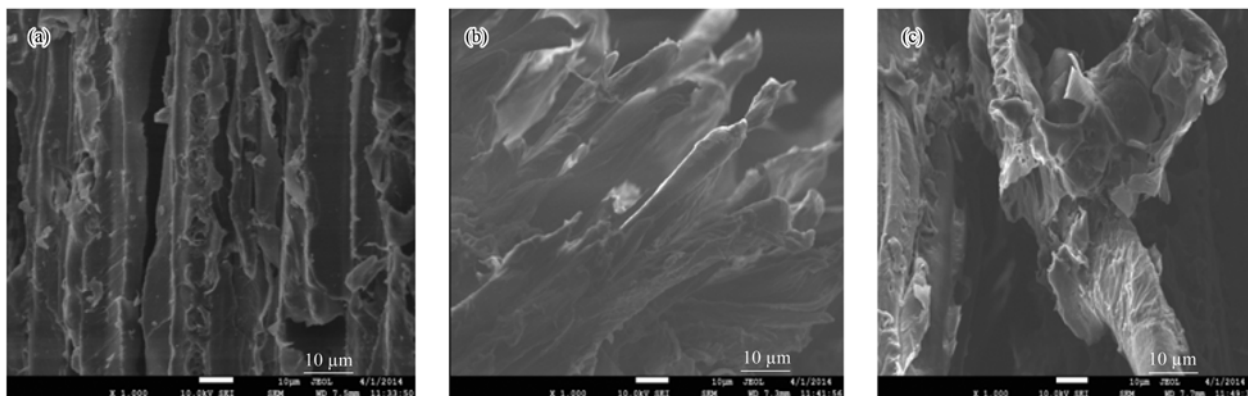
1.3 分析测试方法

SEM、FTIR 和铀含量分析: 在 SEM 扫描之前, 先将改性前后的茶油树木屑喷金, 使其导电, 然后在扫描电镜下观察茶油树木屑改性前后的形貌。FTIR 测定前样品与光谱纯 KBr 研磨混匀, 测量范围为 $400 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ 。溶液中铀含量的测定方法为 Br-PADAP 分光光度法, 具体如文献[23]。

2 结果与讨论

2.1 茶油树木屑改性前后的表征

为表征茶油树木屑改性前后在结构和化学基团的变化特征, 做了其改性前后的扫描电镜分析 (SEM) 和红外光谱分析 (FTIR), 结果如图 1、2 所示。



(a) 茶油树木屑; (b) 其碱化; (c) 酯化改性后

图1 茶油树木屑及其碱化和酯化改性后的扫描电镜

Fig. 1 SEM images of tea oil tree sawdust, alkaline tea tree sawdust and modified tea oil tree sawdust

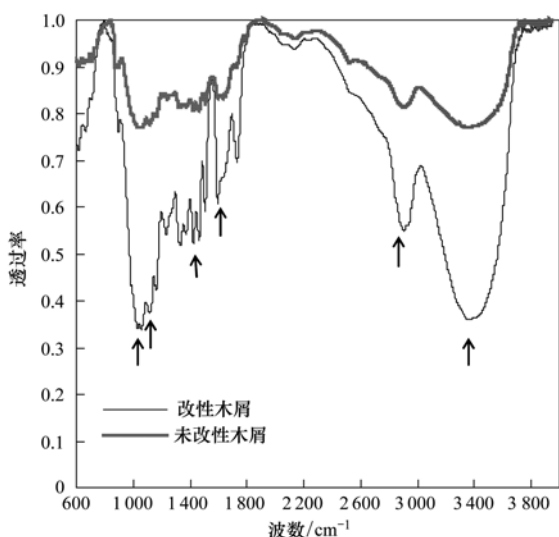


图2 茶油树木屑改性前后的红外光谱

Fig. 2 IR of tea oil tree sawdust before and after modification

从图1(a)可知,原生态的茶油树木屑呈现板结的锯条状;从图1(b)可知,茶油树木屑经过碱化处理后呈现分散而光滑的纤维状,这有利于提高茶油树木屑的空隙,这是因为在碱性溶液的作用下溶解了茶油树木屑中的半纤维素、果胶物质、脂类物质和其他糖类;从图1(c)可知,茶油树木屑经过酯化改性呈现褶皱的叶片状,说明改性过程能使茶油树结构疏松而分散,这有利于进一步增加木屑内部的空隙,增加与铀溶液的接触面积。

从图2可知,茶油树木屑经改性后在 $1266 \sim 1205 \text{ cm}^{-1}$ 处, $1450 \sim 1410 \text{ cm}^{-1}$ 处和 $3400 \sim 2500 \text{ cm}^{-1}$ 处均出现明显吸收峰,这是羧酸OH的吸收峰;在 $1740 \sim 1690 \text{ cm}^{-1}$ 处出现明显吸收峰,这是羧酸C=O的吸收峰;表明经改性后在茶油树木屑上加上了羧基。同时,在 $1300 \sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ 处,出现明显

吸收峰,这是酯中COC的吸收峰;在 $1770 \sim 1720 \text{ cm}^{-1}$ 处和 3450 cm^{-1} 处,出现明显吸收峰,这是酯中C=O的吸收峰;说明通过丁二酸一端的羧基与木屑中的羟基酯化缩合使木屑加上羧基,而羧基与酯基都具有孤对电子,对铀都有较强的络合作用,这有利于增强木屑的吸附效率^[24]。

2.2 反应时间对吸附铀的影响

在室温,振荡频率 $145 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,初始 $\text{pH}=4$,初始铀浓度 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,改性或未改性茶油树木屑用量 0.5 g ,模拟废水体积 300 mL 的实验条件下,考察反应时间对茶油树木屑吸附溶液中铀的影响,结果如图3、4所示。

从图3可知,随着反应时间的增加,改性与未改性的茶油树木屑对铀的吸附率都逐渐升高,且随着反应时间延长吸附率的升高幅度逐渐趋于平缓。茶油树木屑改性前后对铀的吸附率都在 60 min 内增

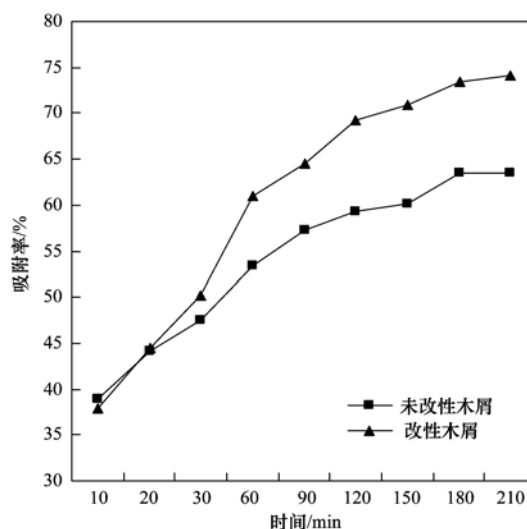


图3 反应时间对吸附铀的影响

Fig. 3 Effects of reaction time on adsorption of uranium

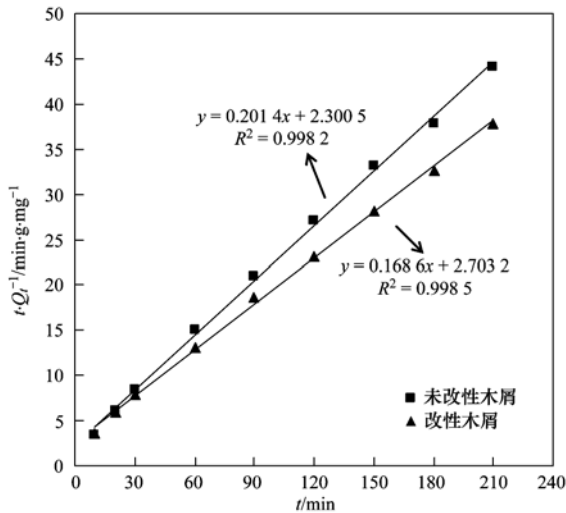


图4 木屑吸附铀的准二级动力学曲线

Fig. 4 Pseudo-second-order kinetic profile for adsorption of uranium onto the sawdust

加最明显,且二者对铀的吸附都在 180 min 左右达到平衡,这符合吸附反应的一般规律.但是,30 min

后,改性茶油树木屑对铀的吸附率明显高于未改性木屑,说明茶油树木屑经丁二酸改性后对铀的吸附效果明显提高.

从图 4 可知,改性与未改性茶油树木屑对铀的吸附反应都符合准二级动力学模型^[24] (R^2 分别高达 0.998 2、0.998 5). 而准二级动力学方程如式(4):

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{t}{Q_e} + \frac{1}{K_f Q_e^2} \tag{4}$$

式中, t 为反应时间,min; Q_t 为 t 时刻吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; K_f 为准二级吸附速率常数, $\text{g} \cdot (\text{min} \cdot \text{mg})^{-1}$; Q_e 为在初始铀浓度为 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的平衡吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 根据 2 个相关方程 $y = 0.2014x + 2.3005$ 和 $y = 0.1686x + 2.7032$ 可求出其准二级动力学参数(见表 1). 从表 1 可知,茶油树木屑改性后的 Q_e 值明显大于未改性的,同时改性后准二级吸附速率常数 K_f 的值也明显变化,说明经过改性处理后茶油树木屑对铀的吸附在动力学上发生了改变.

表 1 茶油树木屑改性前后吸附铀的动力学参数

Table 1 Kinetic parameters for adsorption of uranium onto tea oil tree sawdust before and after modification			
类型	$Q_e/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$K_f/\text{g} \cdot (\text{min} \cdot \text{mg})^{-1}$	R^2
茶油树木屑改性前	4.965 2	0.017 6	0.998 2
茶油树木屑改性后	5.931 2	0.010 5	0.998 5

2.3 木屑用量对其吸附铀的影响

鉴于 2.2 节中反应时间为 60 min 时,铀的去除率增加最明显,综合考虑去除效果和反应时间,此实验中反应时间选为 60 min,其他条件同 2.2 节,考察木屑用量对其吸附溶液中铀的影响,结果如图 5 所示.

从图 5 可知,改性和未改性茶油树木屑对铀的吸附率都随着木屑用量的增加而逐渐升高. 对于改性木屑,投加量从 0.3 g 增加到 0.5 g 时,吸附率从 59.15% 迅速升高到 70.36%,投加量大于 0.5 g 后,吸附率升高幅度较为缓慢,且改性和未改性木屑吸附率在投加量为 0.5 g 时相差最大. 因此,为了综合考虑单位质量的改性茶油树木屑的吸附效率并节约材料,选择用量为 0.5 g 较为恰当.

2.4 溶液 pH 值对吸附铀的影响

木屑投加量为 0.5 g,其他条件同 2.3 节,考察 pH 值对茶油树木屑去除溶液中铀的影响,结果如图 6 所示.

从图 6 可知,随着 pH 的增大,未改性茶油树木屑对铀的吸附率先升高后下降,当 $\text{pH} < 5$ 时,随着

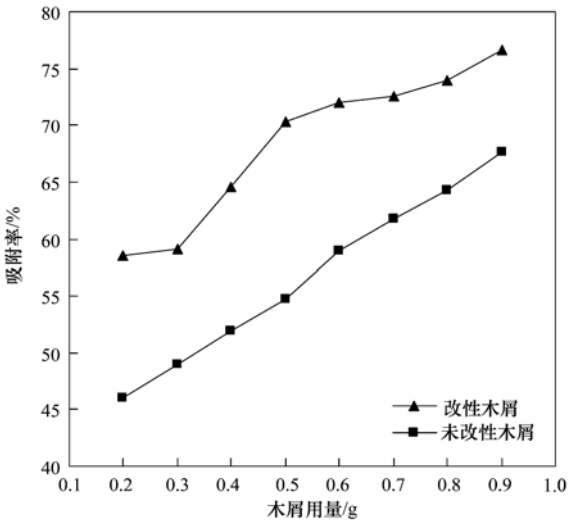


图5 木屑用量对去除铀的影响

Fig. 5 Effects of sawdust dosage on adsorption of uranium

pH 值升高未改性木屑对铀的吸附率逐渐升高;当 $\text{pH} > 5$ 时,随着 pH 值的升高未改性木屑对铀的吸附率却逐渐下降,pH 值为 5 时,吸附率达到最大. 改性茶油树木屑对铀的去除率随着 pH 的增大一直升高,说明茶油树木屑在改性后所能适用 pH 值范

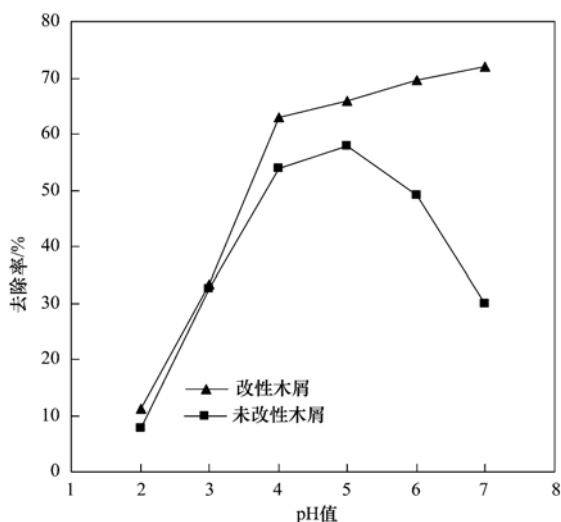


图6 pH值对木屑去除铀的影响

Fig. 6 Effects of pH on adsorption of uranium

围更宽.

2.5 初始铀浓度对茶油树木屑去除铀的影响

实际含铀废水一般 $\text{pH} \leq 4$, 而且为了减小 UO_2^{2+} 的水解, 此实验中初始 pH 为 4, 其他条件同 2.4 节, 考察初始铀浓度对茶油树木屑去除溶液中铀的影响, 结果如图 7 所示.

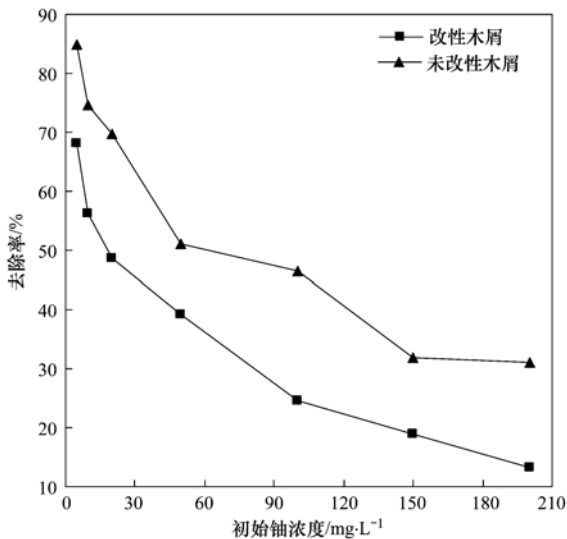


图7 初始铀浓度对木屑去除铀的影响

Fig. 7 Effects of initial concentration of uranium on adsorption of uranium

从图 7 可知, 改性和未改性茶油树木屑对铀的去除率都随着初始铀浓度的增加而逐渐降低. 这是由于木屑对铀的去除存在吸附容量上的极限, 这符合吸附的一般规律^[25,26]. 茶油树木屑改性前后对铀的去除率之差的最大值约为 20%, 说明茶油树木屑经丁二酸改性后有利于增强吸附效果, 且随着铀浓

度的增大这种效果越明显.

2.6 温度对茶油树木屑去除铀的影响

鉴于铀矿山和有冶炼加工厂废水中铀浓度一般为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 同时为了与 2.2 ~ 2.4 节保持一致形成对照作用, 此实验中初始铀浓度还选为 $12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其他条件同 2.5 节, 考察反应温度对茶油树木屑去除铀的影响, 结果如图 8 所示.

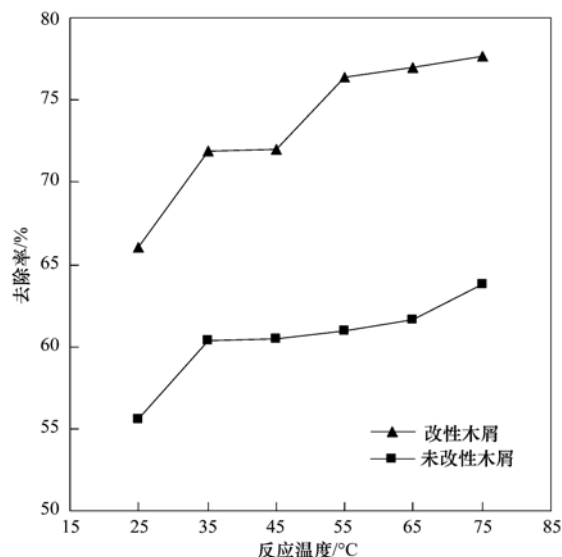


图8 反应温度对木屑去除铀的影响

Fig. 8 Effects of reaction temperature on adsorption of uranium

从图 8 可知, 改性和未改性茶油树木屑对铀的去除率都随着反应温度的升高而增加. 这是因为温度升高, 离子的运动更加剧烈, 离子间的有效碰撞增多, 一定的时间内的反应去除率增大. 同时, 也说明二者对铀去除皆为吸热反应, 提高温度有利于反应向正方向进行, 利于吸附. 而随着温度的升高, 改性木屑对铀的去除率提高幅度更大, 表明经丁二酸改性后其化学活性增强, 对温度变化更敏感.

2.7 改性与未改性茶油树木屑去除铀机制的对比研究

为了深入研究茶油树木屑改性前后去除铀的机制, 拟合了在 $\text{pH} = 4$, 温度 35°C 的条件下, 茶油树木屑改性前后吸附铀的 Langmuir 吸附等温线和 Freundlich 吸附等温线, 结果如图 9、10.

从图 9、10 可知, 改性及未改性茶油树木屑对铀的吸附基本遵循 Langmuir 等温线, 即表示茶油树木屑表面由大量的吸附中心点构成, 在这些活性中心上发生吸附反应, 每个活性中心只能吸附一个分子. 当这些活性中心被吸附的铀酰离子占满时, 吸附量将达到饱和值, 在吸附剂表面上的吸附为单分子层吸附. 而 Langmuir 吸附等温方程, 如式 (5)

所示.

$$\frac{1}{Q'_e} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m c_e} \quad (5)$$

式中, Q'_e 为在各个平衡状态的吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; Q_m 为最大吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; K_L 为 Langmuir 平衡常数, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$; c_e 为在各个浓度下的吸附平衡浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据 2 个相关方程, $y = 1.2888x + 0.0467$

和 $y = 0.4929x + 0.0317$, Q_m 和 K_L 可以被推导出来, 见表 2. 同时从中可知, 茶油树木屑改性前后吸附铀的 K_L 明显变化, 说明茶油树木屑改性后吸附铀的 Langmuir 热力学规律发生了改变; 且茶油树木屑经丁二酸改性后 Q_m 由 $21.4133 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增大至 $31.5457 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明改性过程使茶油树木屑的吸附位点的数量增加, 从而使其吸附性能明显增强.

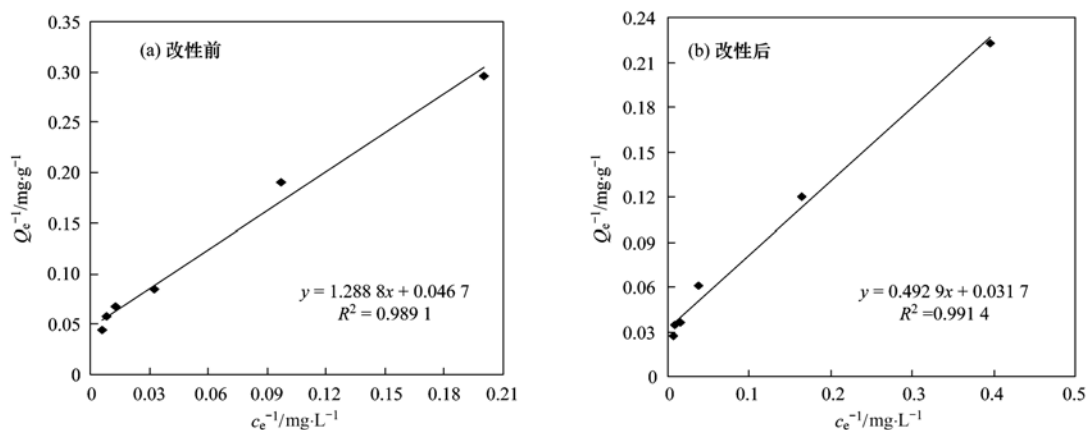


图 9 茶油树木屑改性前后吸附铀的 Langmuir 吸附等温线

Fig. 9 Langmuir adsorption isotherm for adsorption of uranium onto the sawdust before and after modification

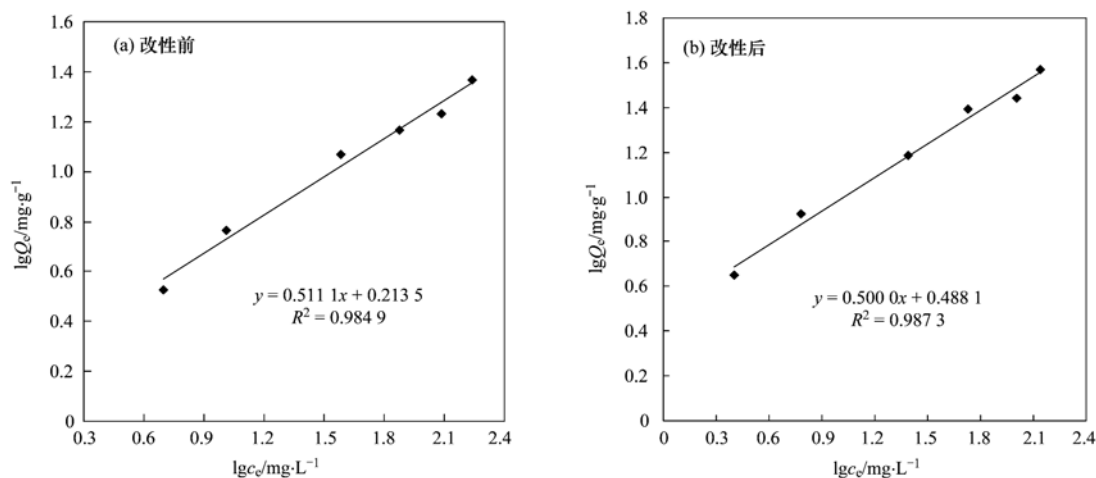


图 10 茶油树木屑改性前后吸附铀的 Freundlich 吸附等温线

Fig. 10 Freundlich adsorption isotherm for adsorption of uranium onto the sawdust before and after modification

从图 10 可知, 改性茶油树木屑及未改性茶油树木屑对铀的吸附基本遵循 Freundlich 等温线, 而 Freundlich 等温方程如式(6)所示:

$$\lg Q'_e = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg c_e \quad (6)$$

式中, c_e 为溶液的平衡浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q'_e 为各个平衡状态的吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; K_F 为吸附平衡常数, $\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$; n^{-1} 为非线性系数. 根据 2 个相关方

程, $y = 0.5111x + 0.2135$ 和 $y = 0.5000x + 0.4881$, n^{-1} 和 K_F 可以被推导出来, 见表 2. 同时从中可知, 茶油树木屑改性前后吸附铀的 K_F 值明显变化, 说明茶油树木屑改性后吸附铀的 Freundlich 热力学规律发生了改变; 且茶油树木屑改性前后的 n^{-1} 都小于 1, 说明茶油树木屑改性前后都对 UO_2^{2+} 具有较强的吸附能力, 且都为化学吸附^[27].

表 2 茶油树木屑改性前后吸附铀的热力学参数

Table 2 Parameters for Langmuir and Freundlich adsorption isotherms for uranium adsorption by the sawdust before and after modification

类型	Langmuir			Freundlich		
	$Q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$K_L/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	R^2	$K_F/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	n^{-1}	R^2
茶油树木屑改性前	21.413 3	0.036 24	0.989 1	1.634 9	0.511 1	0.984 9
茶油树木屑改性后	31.545 7	0.064 31	0.991 4	3.076 8	0.500 0	0.987 3

3 结论

(1) 红外分析表明,丁二酸对茶油树木屑的改性作用使丁二酸一端的羧基与木屑中的羟基发生了酯化缩合作用,使木屑增加了羧基、酯基,而羧基与酯基都具有孤对电子对铀都有较强的络合作用,这有利于增强木屑的吸附效率.同时,扫描电镜表明,改性后的茶油树木屑由致密平直的条状结构变为疏松褶皱的叶片状结构,说明改性作用增加木屑内部的空隙,这增加木屑与铀溶液的接触面积,也有利于增强木屑的吸附效率.

(2) 吸附实验结果表明,茶油树木屑改性前后对铀的吸附率均随着木屑用量的增加而增大,随着温度的升高而增大且经改性后其所能适用的 pH 范围更宽.同时,茶油树木屑经丁二酸改性后对铀的吸附率提高了约 20%,说明丁二酸的改性作用确能提高茶油树木屑对铀吸附效果.

(3) 改性和未改性茶油树木屑对铀的吸附反应既符合 Langmuir 热力学模型又符合 Freundlich 热力学模型.且由 Langmuir 等温方程计算可知,改性后的茶油树木屑对铀的最大吸附容量(Q_m)由 21.413 3 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 提高到 31.545 7 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,说明丁二酸的改性作用增加了木屑吸附位点,从而增强了其对铀的吸附能力.

参考文献:

[1] 刘娟,陈迪云,张静,等.铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究[J].环境科学,2012,33(8):2889-2894.

[2] Wang G, Liu J, Wang X, et al. Adsorption of uranium (VI) from aqueous solution onto cross-linked chitosan [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(2-3): 1053-1058.

[3] 谢水波,王水云,张浩江,等.硫酸盐还原菌还原 U(VI) 的影响因素与机制[J].环境科学,2009,30(7):1962-1967.

[4] Silva J I R, de Melo Ferreira A C, da Costa A C A. Uranium biosorption under dynamic conditions: Preliminary tests with *Sargassum filipendula* in real radioactive wastewater containing Ba, Cr, Fe, Mn, Pb, Ca and Mg [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, 279(3): 909-914.

[5] Khani M H, Keshtkar A R, Ghannadi M, et al. Equilibrium, kinetic and thermodynamic study of the biosorption of uranium onto *Cystoseria indica* algae [J]. Journal of Hazardous Materials,

2008, 150(3): 612-618.

[6] Chakravarty P, Sarma N S, Sarma H P. Biosorption of cadmium (II) from aqueous solution using heartwood powder of *Areca catechu* [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162(3): 949-955.

[7] Dhakal R P, Ghimire K N, Inoue K. Adsorptive separation of heavy metals from an aquatic environment using orange waste [J]. Hydrometallurgy, 2005, 79(3-4): 182-190.

[8] Harshala P, Shreeram J, Niyoti S. Uranium removal from aqueous solution by coir pith: equilibrium and kinetic studies [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(11): 1241-1248.

[9] Yao Z Y, Qi J H, Wang L H. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the biosorption of Cu (II) onto chestnut shell [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174(1-3): 137-143.

[10] Han R P, Zhang J H, Zhu L, et al. Determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of the batch biosorption of copper (II) ions onto chaff [J]. Life Science Journal, 2006, 3(1): 81-88.

[11] Foo L P Y, Tee C Z, Raimy N R, et al. Potential malaysia agricultural waste materials for the biosorption of cadmium (II) from aqueous solution [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2012, 14(2): 273-280.

[12] Haloi N, Sarma H P, Chakravarty P. Biosorption of lead (II) from water using heartwood charcoal of *Areca catechu*; equilibrium and kinetics studies [J]. Applied Water Science, 2013, 3(3): 559-565.

[13] Pagnanelli F, Mainelli S, Vegliò F, et al. Heavy metal removal by olive pomace: biosorbent characterisation and equilibrium modelling [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(20): 4709-4717.

[14] Babarinde A, Babalola J O, Adegoke J, et al. Biosorption of Ni (II), Cr (III), and Co (II) from solutions using acalypha hispida leaf: kinetics, equilibrium, and thermodynamics [J]. Journal of Chemistry, 2013, 2013: 460635.

[15] Wang J L, Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future [J]. Biotechnology Advances, 2009, 27(2): 195-226.

[16] 杨剑梅,高慧,李庭,等.稻草秸秆对水中六价铬去除效果的研究[J].环境科学与技术,2009,32(10):78-82.

[17] Sakamoto N, Kano N, Imaizumi H. Biosorption of uranium and rare earth elements using biomass of algae [J]. Bioinorganic Chemistry and Applications, 2008, 2008: 706240.

[18] 谭光群,袁红雁,刘勇,等.麦秆对重金属 Pb^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附性能的研究[J].化学研究与应用,2011,23(7):840-846.

- [19] 李莉, 王昌命, 陈保森. 工业林木材化学成分的研究进展[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2007, **20**(6): 41-43.
- [20] 谢延军, 符启良, 王文清. 木材化学功能改良技术进展与产业现状[J]. 林业科学, 2012, **48**(9): 154-163.
- [21] 王艳林, 赵元修. 木材细胞壁上的结构特征[J]. 科学与财富, 2012, (12): 157.
- [22] 郭文琴, 郭修生, 于红. 木材成分的化学利用[J]. 林业勘察设计, 1998, (3): 44-45.
- [23] 张燮. 工业分析化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [24] 王宇, 高宝玉, 岳文文, 等. 改性玉米秸秆对水中磷酸根的吸附动力学研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 703-708.
- [25] Li X L, Wu J J, Liao J L, *et al.* Adsorption and desorption of uranium (VI) in aerated zone soil[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, **115**: 143-150.
- [26] 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.
- [27] Stellacci P, Liberti L, Notamicola M, *et al.* Valorization of coal fly ash by mechano-chemical activation: Part I. Enhancing adsorption capacity [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **149**(1-3): 11-18.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 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