

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究

郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明*, 王林, 孙约兵, 秦旭

(农业部环境保护科研监测所污染防治研究室, 农业部产地环境质量重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191)

摘要: 目前以生物炭为代表的生物质对重金属的吸附表现出良好的应用前景. 为确定生物炭对溶液中镉的吸附性能, 选用由棉花秸秆制备的生物炭, 研究吸附等温线、吸附动力学以及温度、pH 和离子强度等对生物炭吸附 Cd^{2+} 的影响. 研究表明, 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附可以用 Freundlich 等温线较好地拟合, 在不同温度下其饱和吸附量分别为 $9.738 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (288.15 K)、 $10.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (298.15 K)、 $10.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (308.15 K) 和 $10.71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (318.15 K), 热力学参数表明生物炭吸附 Cd^{2+} 的过程是自发的吸热过程; 吸附动力学过程符合二级动力学模型, 在 40 min 即可达到平衡; pH 对生物炭吸附 Cd^{2+} 的影响较大, 在 pH 2~8 范围时, 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随 pH 的增加先上升后下降; 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随着溶液离子强度的增大呈降低趋势. 该项研究可为生物炭在土壤重金属污染修复中的应用提供一定的理论基础.

关键词: 生物炭; 镉; 吸附; 反应动力学; pH; 离子强度

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3716-06

Adsorption of Cd^{2+} on Biochar from Aqueous Solution

GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, XU Ying-ming, WANG Lin, SUN Yue-bing, QIN Xu

(Key Laboratory of Original Environmental Quality of Ministry of Agriculture/Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment & Safe-Product, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Biomass-based materials such as biochar have a good performance in heavy metal adsorption. The adsorption of Cd^{2+} on biochar converted from cotton straw was studied. Adsorption isotherm, kinetics and effect factors such as temperature, pH and ionic strength were investigated. The adsorption of Cd^{2+} on biochar can be fitted by the Freundlich isotherm better than the Langmuir isotherm. The maximum adsorption amounts of Cd^{2+} at different temperatures were $9.738 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (288.15 K), $10.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (298.15 K), $10.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (308.15 K) and $10.71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (318.15 K), respectively. The free energies ΔG^{θ} were from $-8.346 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ to $-10.276 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ at different temperatures, indicating that the adsorption of Cd^{2+} onto biochar is spontaneous and is an endothermic process. The adsorption process can reach equilibrium within 40 minutes and can be fitted by the pseudo second order kinetic model. pH showed a significant effect on the adsorption of Cd^{2+} on biochar in the range of 2-8. The adsorption amount of Cd^{2+} on biochar shows a reducing trend with the increasing ionic strength.

Key words: biochar; Cd; adsorption; reaction kinetic; pH; ionic strength

生物炭 (biochar) 是由生物残体在缺氧的情况下, 经高温慢热解 (通常 $< 700^{\circ}\text{C}$) 产生的一类难溶的、稳定的、高度芳香化的、富含碳素的固态物质^[1]. 生物炭的组成元素主要为碳、氢、氧等, 以高度富含碳 (约 70%~80%) 为主要标志. 生物炭的制备原料来源广泛, 主要有农林业废弃物如木材、秸秆、果壳, 工业和城市生活中产生的有机废弃物如垃圾、污泥等. 不同的原材料, 不同的生产环境条件 (温度、时间)^[2, 3], 得到不同性状的生物炭. 生物炭具有疏松多孔的结构, 比表面积巨大, 表面带有大量负电荷和较高的电荷密度, 并且富含一系列含氧、含氮、含硫官能团, 具有很大的阳离子交换量 (CEC), 理论上能够吸附大量可交换态阳离子, 因此生物炭应该是一种良好的吸附材料^[4].

生物炭在土壤改良^[5-8]、温室气体减排^[9]以及

受污染环境修复^[10, 11]方面具有广阔的应用前景, 为解决粮食危机、全球气候变化等环境问题, 提供了新的思路^[12]. 近年来, 关于生物炭对重金属吸附行为的研究受到广泛关注, 在生物炭的环境行为与环境效应研究方面, 目前已经取得了一定的成果, 尤其是在污水中重金属的处理和重金属污染土壤的修复方面^[13, 14]. 大量的实验研究表明, 生物炭在农业、环境方面具有应用前景, 但其对污染物的详细作用机制及其与生物炭微观结构的关系至今还没有满意的解答. 生物炭对重金属离子的吸附机制很多, 目

收稿日期: 2012-08-17; 修订日期: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21177068, 31200397); 农业部农业科研杰出人才项目; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项

作者简介: 郭文娟 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学与污染物控制技术, E-mail: guo_wenjuan_ok@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ymxu1999@126.com

前用来解释的主要有表面静电吸附、阳离子交换、吸附-沉淀机制等^[15]。本研究选用棉花秸秆生物炭,分析了吸附等温线、热力学参数及吸附动力学,并探讨了 pH、离子强度等对生物炭吸附 Cd²⁺ 的影响,考察生物炭对溶液中 Cd²⁺ 的吸附性能,并揭示吸附机制。

1 材料与与方法

1.1 生物炭的制备和表征

生物炭原料为棉花秸秆,来自山东省东营市,在缺氧条件下 550 ~ 600 °C 热解 6 ~ 8 h 制备,使用前过 100 目筛(粒径小于 0.15 mm)。

生物炭的比表面积及孔径分布由美国康塔 Autosorb iQ-MP 测定, BET 方程确定比表面积, BJH 方法确定孔径分布。生物炭的含碳量采用 CHNS-O 元素分析仪测定。

1.2 吸附实验

吸附等温线实验:用 Cd(NO₃)₂·4H₂O 配制成 Cd²⁺ 浓度分别为 5、10、15、20、25 和 30 mg·L⁻¹ 的溶液,所有溶液均用 0.01 mol·L⁻¹ NaNO₃ 作支持电解质。称取 0.02 g 生物炭于 50 mL 聚乙烯离心管中,并记录其准确质量 *m*,加入 20 mL 不同浓度的 Cd²⁺ 溶液,在恒温水浴振荡器上分别于 15、25、35、45 °C 条件下振荡 8 h。以 4 000 r·min⁻¹ 速度高速离心 20 min,取上清液,用原子吸收分光光度计(Thermo Solaar M6)测定 Cd²⁺ 质量浓度 ρ_e ,按下式计算平衡吸附量 Q_e (mg·g⁻¹)。

$$Q_e = V(\rho_0 - \rho_e)/m \quad (1)$$

式中, *V* 为 Cd²⁺ 溶液的体积(L); *m* 为生物炭质量(g); ρ_0 和 ρ_e 为吸附前和吸附平衡后 Cd²⁺ 的质量浓度(mg·L⁻¹)。

吸附动力学:配制 500 mL 浓度为 10 mg·L⁻¹ 的 Cd²⁺ 溶液转移至 1 000 mL 塑料烧杯中,以 0.01 mol·L⁻¹ 的 NaNO₃ 为支持电解质,在磁力搅拌器上于常温下搅拌,称取 0.50 g 生物炭,加入上述溶液中并开始计时,于不同的时间点分别取样过 0.45 μm 水系滤膜,用原子吸收分光光度计测定滤液中 Cd²⁺ 的质量浓度,计算平衡吸附量。

pH 对吸附的影响:量取 20 mL 浓度为 10 mg·L⁻¹ 的 Cd²⁺ 溶液于 50 mL 聚乙烯离心管中,用 HNO₃ 和 NaOH 分别调节 pH 至 2、3、4、5、6、7、8。称取 0.02 g 生物炭加入上述溶液中,在恒温水浴振荡器上于 25 °C 下振荡 8 h。高速离心后取上清液用原子吸收分光光度计测定 Cd²⁺ 的质量浓度,计算

平衡吸附量。

离子强度对吸附的影响:称取 0.02 g 生物炭置于 50 mL 聚乙烯离心管中,加入 20 mL 浓度为 10 mg·L⁻¹ 的 Cd²⁺ 溶液,再加入不同的支持电解质 NaNO₃、KNO₃、NaCl,使其浓度分别为 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 mol·L⁻¹,在恒温水浴振荡器上于 25 °C 下振荡 8 h。高速离心后取上清液用原子吸收分光光度计测定 Cd²⁺ 的质量浓度,计算平衡吸附量。

2 结果与讨论

2.1 生物炭比表面积分析

如图 1 所示,生物炭对氮气吸附的等温线为典型的介孔材料 IV 型等温线,其 BET 比表面积为 64.32 m²·g⁻¹,其孔体积为 0.034 cm³·g⁻¹,平均孔径 3.831 nm。生物炭的含碳量为 45.90%。

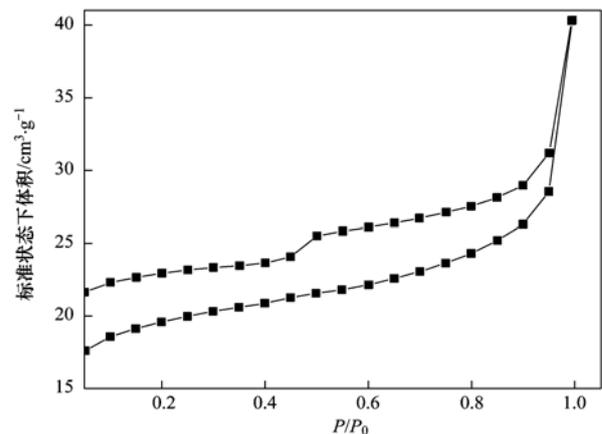


图 1 生物炭对氮气吸附的等温线

Fig. 1 Isotherm of N₂ adsorption on biochar

2.2 吸附等温线

生物炭对不同浓度 Cd²⁺ 的吸附等温线如图 2 所示,初始阶段的吸附量随平衡浓度的升高而增大,在较低平衡浓度时就有较高的吸附量,当平衡浓度达到一定浓度后,吸附量趋于一个平衡值,呈现典型的 L 型曲线,因此选择常用的 Langmuir 和 Freundlich 等温线进行拟合^[16],结果如图 2 所示,相关拟合参数列于表 1。

Langmuir 等温线:

$$Q_e = Q_m K_L \rho_e / (1 + K_L \rho_e) \quad (2)$$

Freundlich 等温线:

$$Q_e = K_F \rho_e^n \quad (3)$$

式中, Q_m 为饱和吸附量(mg·g⁻¹); K_L 为 Langmuir 吸附特征常数(L·g⁻¹); K_F 和 *n* 为 Freundlich 特征常数。Langmuir 和 Freundlich 等温线均能较好地拟

合,其中 Freundlich 等温线的拟合效果更好.

生物炭对 Cd^{2+} 在不同温度下其饱和吸附量分别为 $9.738 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (288.15 K)、 $10.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$

(298.15 K)、 $10.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (308.15 K)、 $10.71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (318.15 K),可见随着温度升高,饱和吸附量增大.

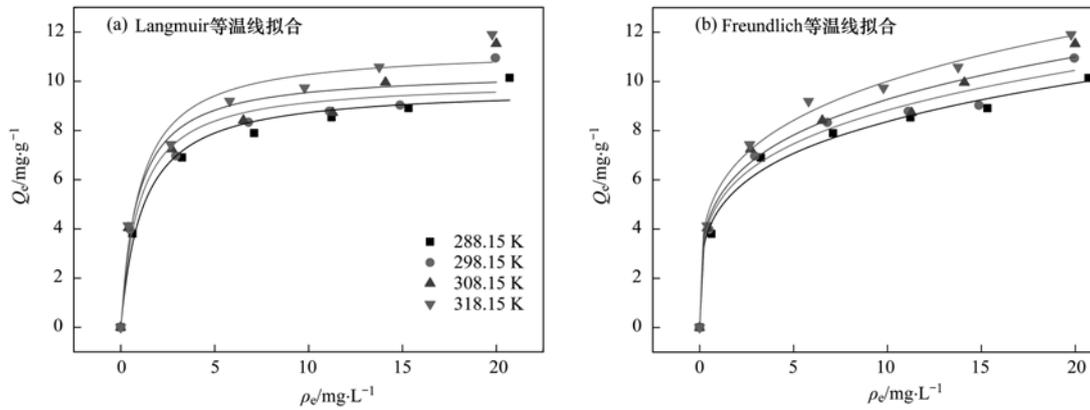


图 2 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附等温线

Fig. 2 Isotherm fitting of Cd^{2+} sorption on biochar

表 1 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附等温线拟合参数

Table 1 Parameters of isotherm fitting for Cd^{2+} sorption on biochar

T/K	Langmuir 等温线拟合			Freundlich 等温线拟合		
	R^2	$K_L/\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$	$Q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	R^2	K_F	n
288.15	0.977 2	0.847 3	9.75 9	0.988 9	4.760	0.245 4
298.15	0.954 4	1.016	10.03	0.983 6	5.051	0.242 6
308.15	0.936 3	1.117	10.40	0.983 3	5.252	0.246 7
318.15	0.962 3	0.979 0	11.33	0.994 3	5.637	0.249 2

通过不同温度下的吸附实验可以计算吸附过程的热力学参数.

$$\ln K_s = \Delta H^\theta / RT + \Delta S^\theta / R \quad (4)$$

$$\Delta G^\theta = -RT \ln K_s \quad (5)$$

式中, ΔG^θ 、 ΔH^θ 和 ΔS^θ 分别代表吸附过程中吉布斯自由能、焓和熵的变化; 参数 K_s 是热力学平衡常数. 以 $\ln Q_e/\rho_e$ 对 Q_e 作图并进行线性拟合 [图 3

(a)], $Q_e = 0$ 时对应的 $\ln Q_e/\rho_e$ 值而得到 $\ln K_s$. 由范特霍夫方程 [公式 (4)] 可知, 以 $\ln K_s$ 对 $1/T$ 作图并进行线性拟合 [图 3 (b)], 通过斜率和截距计算可以得到 ΔH^θ 和 ΔS^θ 的值. 所有热力学参数值见表 2.

吉布斯自由能变 (ΔG^θ) 为负值, 说明反应自发进行. 随着温度升高, ΔG^θ 减小, 说明温度升高有利于反应进行. ΔH^θ 为正值, 表明该吸附过程在 15 ~

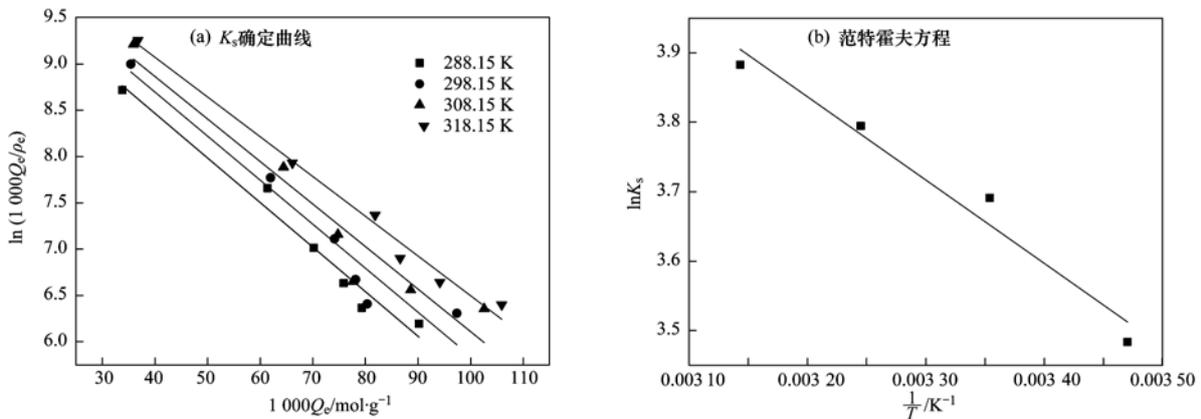


图 3 热力学平衡常数 K_s 确定曲线及范特霍夫方程拟合热力学平衡常数

Fig. 3 Plot for determination of the adsorption equilibrium constant (K_s) and Van't Hoff plot for the adsorption equilibrium constant

45℃下是吸热的,另外 ΔS^θ 为正值,表明 Cd^{2+} 与活性位点结合的过程中,同时有不同种类的离子释放到液相中,有可能使系统的粒子混乱度增加从而导致熵增^[17],根据 $\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta < 0$,温度升高则增大 $T\Delta S^\theta$ 使 ΔG^θ 值进一步减小,因而有利于 Cd^{2+} 的吸附。

表 2 不同温度下生物炭对 Cd^{2+} 的吸附热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of Cd^{2+} sorption onto biochar at various temperatures

T/K	R^2	$\ln K_s$	$\Delta G^\theta/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta H^\theta/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$\Delta S^\theta/\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$
288.15	0.964 8	3.484	-8.346	9.969	63.80
298.15	0.924 5	3.691	-9.149		
308.15	0.918 8	3.794	-9.721		
318.15	0.980 2	3.883	-10.27		

2.3 吸附动力学

选择一级和二级动力学方程来对生物炭对 Cd^{2+} 吸附量随时间的变化进行拟合^[19]。拟合结果如图 4,参数见表 3。

一级动力学方程:

$$Q_t = Q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (6)$$

二级动力学方程:

$$Q_t = Q_e k_2 t / (1 + Q_m k_2 t) \quad (7)$$

式中, Q_t 和 Q_e 分别为 t 时刻的吸附量和平衡时的吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); t 为时间 (min); k_1 为一级吸附速率常数 (min^{-1}); k_2 为二级吸附速率常数 [$\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$].

根据 R^2 可以判断二级动力学方程可否更好地反映生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随时间的变化。如图 4 所示,初始阶段,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随着时间的增加而明显增加,但当 40 min 后,吸附达到平衡,说明生物炭对 Cd^{2+} 的吸附速率比较快。开始时吸附量迅速增大是因为此时重金属离子在生物炭上的吸附主要发生在外表面上,随着吸附的进行,吸附质逐渐由大孔经过过渡孔深入到微孔中,重金属在内孔中传质速度逐渐减慢,吸附容量随

一般来说,物理吸附的自由能变小于化学吸附,前者在 $-20 \sim 0 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内,而后者在 $-80 \sim -400 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围内^[18]。本实验中吸附自由能变在 $-8.346 \sim -10.27 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 范围,说明生物炭对 Cd^{2+} 的吸附过程是以物理吸附为主的。

时间缓慢增加,直至达到吸附平衡^[20]。有报道指出^[21],玉米秸秆、花生壳和小麦秸秆原料的生物炭对 Cd^{2+} 的吸附在 5 min 内就可达到平衡,这其中的差异可能与生物炭的特性有关,生物炭的原材料不同,其微孔结构和表面性质不同,致使重金属离子在生物炭表面的运输和在微孔内部的扩散速率不一样,因此表现出不同的吸附特性,也可能是与 Cd^{2+} 初始浓度的选择以及生物炭的用量有关。

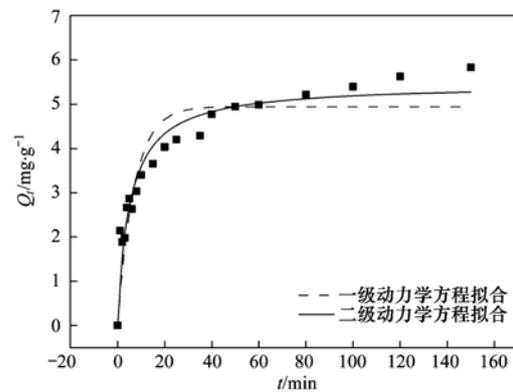


图 4 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附动力学方程拟合

Fig. 4 Fitting of kinetic data of Cd^{2+} sorption on biochar

表 3 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附动力学方程拟合参数

Table 3 Kinetic parameters of Cd^{2+} sorption on biochar

一级动力学方程			二级动力学方程		
$Q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k_1/min^{-1}	R^2	$Q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$k_2/\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$	R^2
4.945	0.142 6	0.843 3	5.457	0.035 2	0.925 3

2.4 pH 对吸附的影响

pH 是影响吸附的重要因素,它影响吸附剂的表面电荷,而且会影响溶液中的离子化程度和重金属离子的存在形式。随着溶液初始 pH 不同,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量的变化如图 5。可见,溶液初始 pH 对

生物炭吸附 Cd^{2+} 的影响比较大。在 pH 为 2~6 范围内,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随着 pH 的升高呈增加趋势,尤其是在 3~4 范围内,增大幅度较大。而当 pH 为 6~8 时,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随着 pH 的升高呈减小趋势。这是因为当 pH 值较低时,溶液

中的 H^+ 与 Cd^{2+} 对结合位点形成竞争吸附,而随着 pH 的增大, H^+ 的竞争优势减弱,更多的结合位点释放出来,因此,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附效率则提高,当 pH 达到 6 左右时,吸附量达到最大. 但是当 pH 值升高到一定程度后生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量开始下降,原因可能是 Cd^{2+} 与溶液中的 OH^- 等形成了沉淀,使溶液中可移动的 Cd^{2+} 浓度下降^[22]. 这与 Kołodźńska 等^[23] 以猪、牛粪作为原料高温裂解而成的生物炭对 Cd^{2+} 的吸附研究中 pH 对吸附过程的影响得出的结论相似.

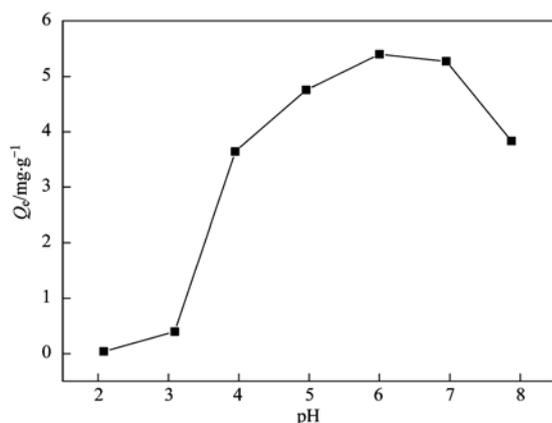


图 5 初始 pH 对生物炭吸附 Cd^{2+} 的影响

Fig. 5 Effect of pH on Cd^{2+} sorption onto biochar

2.5 离子浓度对吸附的影响

电解质 $NaNO_3$ 、 KNO_3 、 $NaCl$ 对生物炭吸附 Cd^{2+} 的影响如图 6. 随着电解质浓度 c 的增大,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量均有减小的趋势. 离子强度的增加既影响吸附质又影响吸附剂,其原因可能是:①电解质的加入压缩了双电层的厚度,使得生物炭与 Cd^{2+} 之间的静电作用减小;② Cd^{2+} 在生物炭表面形成了外层络合物,加入电解质之后,电解质离子与

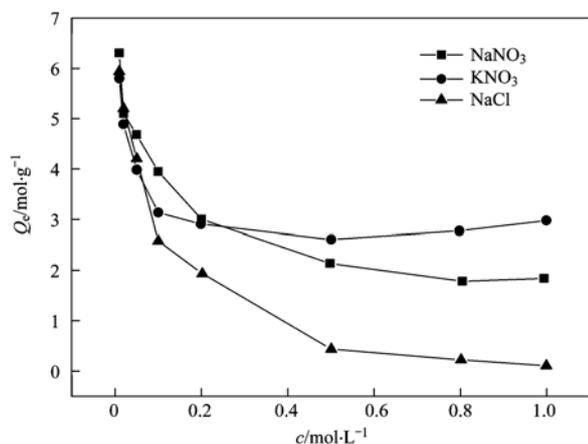


图 6 介质离子强度对生物炭吸附 Cd^{2+} 的影响

Fig. 6 Effect of electrolytes on Cd^{2+} sorption onto biochar

Cd^{2+} 发生离子交换竞争,从而抑制吸附^[24]. 但当 KNO_3 的浓度大于 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量有了较小幅度的增加,原因可能是 Cd^{2+} 与阴离子形成特定络合物,有利于生物炭对其吸附,也可能是离子强度增大到一定程度后,生物炭的表面电荷发生了改变,有研究也发现同样的现象^[25],并提出介质离子强度具有一个拐点. 照此推断, $NaNO_3$ 和 $NaCl$ 的浓度增大到一定程度后,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量应该也会有增大的趋势,有待进一步研究.

3 结论

(1) 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随平衡液质量浓度的增加而增加,其吸附曲线可用 Freundlich 等温线较好地拟合,生物炭对 Cd^{2+} 的饱和吸附量分别为 $9.738 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (288.15 K)、 $10.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (298.15 K)、 $10.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (308.15 K)、 $10.71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (318.15 K),随温度升高呈增大趋势.

(2) 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附符合二级动力学模型,反应在 40 min 可达到平衡.

(3) pH 对生物炭吸附 Cd^{2+} 的影响较大,在 2 ~ 8 范围时,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随 pH 的增加先上升后下降,其中在 5 ~ 7 范围时,生物炭对 Cd^{2+} 的吸附效果较好.

(4) 介质离子的种类及其浓度对吸附过程也会产生影响. 生物炭对 Cd^{2+} 的吸附量随着 3 种支持电解质 ($NaNO_3$ 、 KNO_3 、 $NaCl$) 强度的增大有减小的趋势.

参考文献:

- [1] 李力, 刘娅, 陆宇超, 等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学, 2011, **30**(8): 1411-1421.
- [2] Mukherjee A, Zimmerman A R, Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars [J]. Geoderma, 2011, **163**(3-4): 247-255.
- [3] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 3488-3497.
- [4] Regmi P, Garcia Moscoso J L, Kumar S, et al. Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process [J]. Journal of Environmental Management, 2012, **109**: 61-69.
- [5] Barrow C J. Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture [J]. Applied Geography, 2012, **34**: 21-28.
- [6] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, **39**(2): 278-284.
- [7] 张晗芝, 黄云, 刘钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸

- 收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(11): 2713-2717.
- [8] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(11): 2930-2934.
- [9] Smith J L, Collins H P, Bailey V L. The effect of young biochar on soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(12): 2345-2347.
- [10] Sun K, Keiluweit M, Kleber M, *et al.* Sorption of fluorinated herbicides to plant biomass-derived biochars as a function of molecular structure [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(21): 9897-9903.
- [11] 花莉, 陈英旭, 吴伟祥, 等. 生物质炭输入对污泥施用土壤-植物系统中多环芳烃迁移的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2419-2424.
- [12] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(2): 1-7.
- [13] Hossain M K, Strezov V, Yin Chan K, *et al.* Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(9): 1167-1171.
- [14] Inyang M, Gao B, Yao Y, *et al.* Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **110**: 50-56.
- [15] Jiang T Y, Jiang J, Xu R K, *et al.* Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar [J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(3): 249-256.
- [16] 陈再明, 方远, 徐义亮, 等. 水稻秸秆生物炭对重金属 Pb²⁺ 的吸附作用及影响因素[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 769-776.
- [17] Huang R, Wang B, Yang B, *et al.* Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of adsorption of Cd(II) from aqueous solution onto HACC - bentonite[J]. *Desalination*, 2011, **280**(1-3): 297-304.
- [18] Yu Y, Zhuang Y Y, Wang Z H, *et al.* Adsorption of water-soluble dyes onto modified resin [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(3): 425-430.
- [19] Tu Y J, You C F, Chang C K. Kinetics and thermodynamics of adsorption for Cd on green manufactured nano-particles [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **235-236**: 116-122.
- [20] 安增莉. 生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2011.
- [21] 刘莹莹, 秦海芝, 李恋卿, 等. 不同作物原料热裂解生物质炭对溶液中 Cd²⁺ 和 Pb²⁺ 的吸附特性[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 146-152.
- [22] 吴平霄, 徐玉芬, 朱能武, 等. 高岭土-胡敏酸复合体对重金属离子吸附解吸实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, **27**(4): 356-362.
- [23] Kołodzyńska D, Wnętrzak R, Leahy J J, *et al.* Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **197**: 295-305.
- [24] 吴志坚, 刘海宁, 张慧芳. 离子强度对吸附影响机理的研究进展[J]. 环境化学, 2010, **29**(6): 997-1003.
- [25] Li Z Z, Katsumi T, Imaizumi S, *et al.* Cd(II) adsorption on various adsorbents obtained from charred biomaterials [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 410-420.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jiao, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行