

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放测量 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C₃N₄/Bi₂S₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征

唐登勇^{1,2,3}, 黄越^{1,2,3}, 胥瑞晨^{2,3}, 胡洁丽^{2,3}, 张聪^{2,3}

(1. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 3. 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室, 南京 210044)

摘要: 为吸附处理低浓度含磷废水和实现芦苇资源化利用, 将湿地植物芦苇制备成生物炭, 通过负载氯化铁进行改性, 探究了改性芦苇生物炭对水体中磷的吸附特征. 结果表明, 改性后芦苇生物炭的含铁量为 $11.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 是改性前的 44.7 倍; 改性芦苇生物炭 pH_{pzc} 为 7.49, 当溶液 pH 为 7.0 时, 吸附效果最好; 在磷溶液浓度为 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度为 298K 时, 改性芦苇生物炭平衡吸附量为 $0.658 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 是未改性生物炭吸附量的 34.6 倍. 研究不同温度下的吸附等温线, Langmuir 方程很好地拟合不同温度的吸附等温线, 该吸附是单层吸附, 温度升高有利于吸附. 吸附热力学研究表明, $\Delta G^{\circ} < 0$ 、 $\Delta H^{\circ} > 0$ 和 $\Delta S^{\circ} > 0$, 说明该吸附是自发、熵增的吸热过程. 假二级方程很好地拟合改性芦苇生物炭吸附磷的动力学数据, 初始吸附速率随初始浓度的增大而增大, 该吸附主要受颗粒内扩散控制. 该研究为改性芦苇生物炭用于污水处理厂和水体深度除磷提供基础数据.

关键词: 芦苇生物炭; 氯化铁; 改性; 吸附; 低浓度磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2195-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.024

Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar

TANG Deng-yong^{1,2,3}, HUANG Yue^{1,2,3}, XU Rui-chen^{2,3}, HU Jie-li^{2,3}, ZHANG Cong^{2,3}

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Environment Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to remove low concentration of phosphorus in wastewater and realize resource utilization of reed, reed biochar (RB) was prepared using reed and then modified by ferric chloride, and the adsorption behavior of low concentration phosphorus was investigated. The results showed that the iron content of modified reed biochar (MRB) was $11.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, which was 44.7 times that of RB; pH_{pzc} of the MRB was 7.49, and the adsorption effect was the best when the solution pH was 7.0; at the initial concentration of $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and temperature of 298K, the adsorption capacity of MRB was $0.658 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, which was 34.6 times that of RB. The adsorption isotherms at different temperatures were well fitted to Langmuir equation, which indicated the adsorption was monolayer adsorption, and increasing temperature was favorable for adsorption. $\Delta G^{\circ} < 0$, $\Delta H^{\circ} > 0$ and $\Delta S^{\circ} > 0$ indicated that the adsorption was a spontaneous, entropy increasing and endothermic process. The kinetic experimental data of the adsorption fitted well to the pseudo-second-order equation, the initial adsorption rate increased with the increasing initial concentration of solution, and the adsorption was mainly controlled by intraparticle diffusion. The research will provide basic data for application of MRB in deep removal of low concentration phosphorus from sewage treatment plant and water body.

Key words: modified reed biochar; ferric chloride; modification; adsorption; low concentration phosphorus

水体富营养化已经是重要的环境问题, 磷被认为是富营养化水体的限制因子^[1]. 我国的城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB 18918-2002) 规定城镇污水处理厂执行一级 A 标准的总磷浓度限值为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 去除低浓度的磷比较困难, 吸附法是去除低浓度磷最有效方法之一^[2].

芦苇对维持湿地生态系统稳定及去除污染物起着重要作用. 但是, 如果大量芦苇无法及时处理, 其残体腐烂分解会导致环境二次污染, 其凋亡降解过程会向水体释放有机质, 造成水体污染^[3]. 生物炭是生物残体在缺氧的情况下, 经由高温热解产生的

一类难熔的、稳定的、富含碳素的固态物质, 是一种新型、廉价的吸附材料^[4]. 有研究人员采用铁盐对蛋壳、生物炭、沸石等吸附剂进行改性^[5~8], 取得较好效果. 但是普通吸附剂除磷后通常面临后期处置问题, 有些需要进行脱附再生, 再生后的吸附效果降低, 耗费物力、财力. 根据生物炭的物理化学特性, 吸附磷后的铁改性生物炭含有较多的铁和磷元

收稿日期: 2015-08-13; 修订日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41303096, 21107050); 2014 年江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (SJLX_0390)

作者简介: 唐登勇 (1972~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制工程和清洁生产, E-mail: tdynju@163.com

素,可以作为土壤改良剂^[9]. 与其他吸附材料相比,利用生物炭作为除磷吸附剂,不仅有良好的除磷效果,还具有一定的环境效益.

本研究将湿地植物芦苇制备成生物炭,实现芦苇资源化利用. 为了增强其除磷效果,采用氯化铁对其进行改性,将制得的改性芦苇生物炭用来吸附低浓度含磷废水,分析其吸附特征,以期对改性芦苇生物炭用于污水处理厂和水体深度除磷提供基础数据.

1 材料与amp;方法

1.1 吸附剂的制备方法

芦苇采自南京市浦口区某湿地,将风干后的芦苇剪成长度约为 0.5 cm 的小段,并填满坩埚,置于马弗炉中 623 K 下热解 6 h,冷却后研磨过 50 目筛,取制备好的生物炭 50.0 g 浸渍到 500 mL 浓度为 1.0 mol·L⁻¹ 的氯化铁溶液中,放入烘箱在 358 K 烘干,取出后冷却至室温,将负载铁后的芦苇生物炭用蒸馏水清洗,直到洗出水的 pH 为中性,在 358 K 下烘干至恒重,装入密封袋中置于干燥器保存备用.

1.2 化学试剂与仪器

主要化学试剂:磷酸二氢钾、抗坏血酸、钼酸铵、酒石酸锑钾、过硫酸钾、三氯化铁,六水、还原铁粉、氯化钠、氢氧化钠、盐酸、硫酸等,以上试剂均为分析纯,溶液采用蒸馏水配制.

主要仪器:3510 原子吸收分光光度计(上海精科实业有限公司)、722 可见分光光度计(上海棱光科技有限公司)、SX2 马弗炉(兴化市华生电热电器厂)、SEM-SU1510 扫描电子显微镜(日本日立公司)、iS5 傅立叶变换红外光谱仪(美国 Thermo Fisher 公司)、LDZX-30FA 立式压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂)、THZ-C 恒温振荡器(金坛市荣华仪器制造有限公司)、PHS-25B 型数字酸度计(上海大普仪器有限公司)、FA2004 精密电子天平(天津市天马仪器厂)、GZX-9070MBE 数显鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司).

1.3 磷溶液的配制与分析方法

首先配制 50.0 mg·L⁻¹ 的磷酸盐贮备液(以 P 计),在酸性条件下可保存数月,根据实验所需的磷浓度,向贮备液中移取一定的量进行现配. 考虑到本研究针对低浓度含磷废水处理,因此,本研究的磷浓度范围在 1.0 ~ 10.0 mg·L⁻¹.

磷的浓度采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)进行测定分析.

1.4 实验方法

1.4.1 芦苇生物炭改性前后的表征

芦苇生物炭在改性前后的表面和内部结构变化用扫描电子显微镜进行比较. 改性和未改性芦苇生物炭的等电点 pH_{pzc} 采用 Babic 序批平衡法^[10]测定. 改性和未改性芦苇生物炭的铁含量采用火焰原子吸收分光光度法(GB 11911-89)测定. 改性和未改性芦苇生物炭中铁的存在形态用傅立叶变换红外光谱仪进行检测.

1.4.2 溶液初始 pH 对除磷效果的影响

分别投加 0.10 g 改性芦苇生物炭到 100 mL 锥形瓶中,加入 50 mL 浓度为 4.0 mg·L⁻¹、pH 为不同值的磷溶液,用 HCl 和 NaOH 调节初始 pH 为 4.0 ~ 10.0,在 298 K、120 r·min⁻¹ 下恒温振荡 24 h 后过滤取样,分别测定水样磷浓度.

1.4.3 吸附剂的投加量对除磷效果的影响

分别投加 0.05 ~ 0.40 g 的改性芦苇生物炭到 100 mL 锥形瓶中,加入 50 mL 浓度为 4.0 mg·L⁻¹、pH 为 7.0 的磷溶液,于 298 K、120 r·min⁻¹ 下恒温振荡 24 h 后过滤取样,磷的去除率和平衡吸附量分别采用式(1)和(2)计算.

$$R = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e) \times V}{m} \quad (2)$$

式中, R 为磷的去除率,%; q_e 为平衡吸附量,mg·g⁻¹; c_0 和 c_e 分别为初始和吸附平衡时磷溶液的浓度,mg·L⁻¹; V 为吸附溶液的体积,L; m 为投加吸附剂的质量,g.

1.4.4 吸附等温线

分别投加 0.10 g 改性和未改性的芦苇生物炭到 100 mL 锥形瓶中,加入 50 mL 不同浓度、pH 为 7.0 的磷溶液,在 120 r·min⁻¹ 的转速下,保持不同温度振荡 24 h 后过滤取样,计算溶液剩余磷浓度和平衡吸附量.

1.4.5 吸附动力学

分别投加 0.10 g 改性芦苇生物炭到 100 mL 锥形瓶中,加入 50 mL 不同浓度、pH 为 7.0 的磷溶液,在恒温振荡器中保持 298 K、120 r·min⁻¹ 分别振荡一定时间后取样快速过滤,测定浓度,用式(3)计算不同时刻的吸附量.

$$q_t = \frac{(c_0 - c_t) \times V}{m} \quad (3)$$

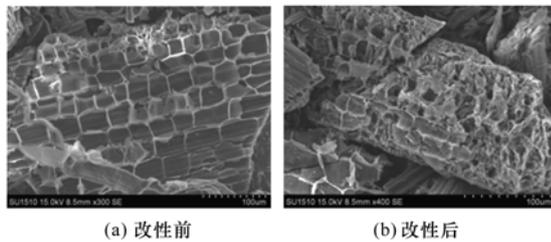
式中, q_t 为 t 时刻的吸附量,mg·g⁻¹; c_t 为 t 时刻

溶液磷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 芦苇生物炭改性前后的表征

使用扫描电子显微镜比较改性前后芦苇生物炭表面结构变化, 见图 1, 芦苇秸秆经炭化后, 产生丰富光滑的孔隙结构, 为负载铁提供了场所. 经铁改性后的芦苇生物炭的孔隙端口和表面因被铁覆盖而变得更加粗糙, 并且可以看出在孔隙内部也有铁的存在, 由于芦苇生物炭特殊的孔隙结构, 增加了铁与芦苇生物炭的接触面积和负载量.



(a) 改性前 (b) 改性后

图 1 芦苇生物炭改性前后的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photographs of reed biochar before and after modification

测定未改性芦苇生物炭和改性芦苇生物炭的 pH_{pzc} , 当初始 pH 分别为 6.40 和 7.49 时, 其溶液的终了和初始的 OH^- 或 H^+ 浓度相同, 故芦苇生物炭在改性前的 pH_{pzc} 为 6.40, 改性后的 pH_{pzc} 为 7.49.

未改性的芦苇生物炭含铁量为 $0.268 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 经过负载铁改性后的芦苇生物炭含铁量为 $11.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

改性和未改性芦苇生物炭的傅立叶变换红外光谱图见图 2. 从中可以看出, 芦苇生物炭改性前后均在 $3140 \sim 3386 \text{ cm}^{-1}$ 处存在一系列吸收峰, 这可能来自羧基、酚羟基和/或水分子中的 $-\text{OH}$ 键的伸缩振动; 1610 cm^{-1} 处的吸收峰可归于芳香环的伸缩振动; 1395 cm^{-1} 处的吸收峰来自酚基的伸缩振动. 而改性后的芦苇生物炭在 1098 cm^{-1} 处有明显的吸收峰归于 $\text{Fe}-\text{OH}$ 的伸缩振动^[11], 797 cm^{-1} 处出现的吸收峰为 $\text{Fe}-\text{OH}$ 的特征吸收峰, 进一步证明了负载在芦苇生物炭上的铁主要以氢氧化铁的形式存在^[12].

2.2 溶液初始 pH 对吸附磷的影响

溶液初始的 pH 对除磷效果的影响见图 3. 从中看出, 随着初始 pH 的增大, 吸附量呈先上升后下降, 在 pH 为 7.0 时吸附量达到最大值. 根据 H_3PO_4 的酸解离平衡式和解离常数可知, pH 为 6.0 ~ 8.0

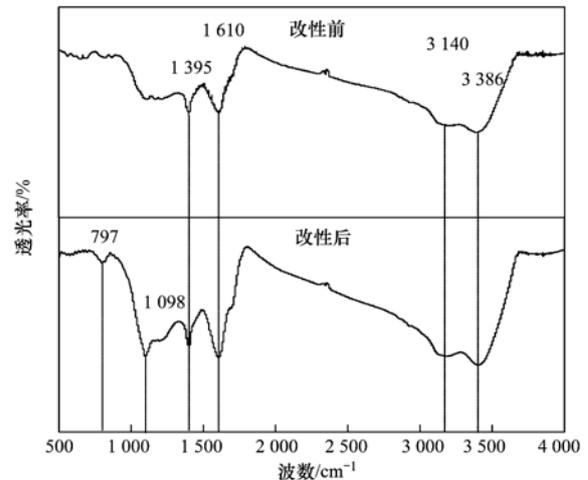


图 2 芦苇生物炭改性前后的 FTIR 谱图

Fig. 2 FTIR spectra of reed biochar before and after modification

时磷酸根主要以 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 阴离子的形态存在^[13], 可以与负载在炭上的 Fe^{3+} 发生吸附, 由于改性芦苇生物炭的零点电荷 pH_{pzc} 为 7.49, 当 $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ 时改性芦苇生物炭表面带正电荷, 更容易吸附阴离子, 随着 pH 增大, OH^- 浓度迅速增大, 与 PO_4^{3-} 产生了竞争, 不利于吸附的进行, 故当溶液 pH 为 7.0 时吸附效果最好.

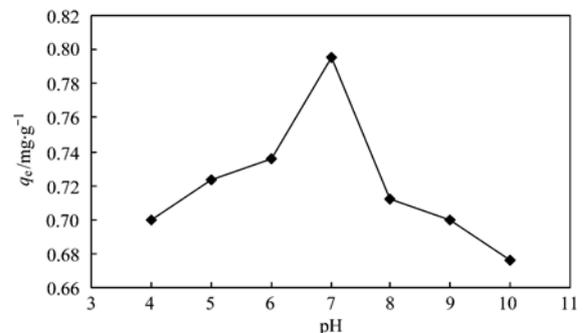


图 3 溶液初始 pH 对除磷效果的影响

Fig. 3 Effect of solution initial pH on phosphorus adsorption

2.3 吸附剂投加量对除磷效果的影响

不同投加量对除磷效果的影响见图 4. 可以看出, 随着吸附剂投加量的增加, 磷去除率增加, 吸附量减少, 投加量为 $7.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之前, 去除率显著增加, 到 $7.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时去除率为 91.05%, 此时溶液的平衡浓度为 $0.358 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 之后去除率增加缓慢并趋于平衡, 所以在 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷溶液中, 最佳投加量为 $7.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.4 吸附等温线

不同温度下的吸附等温线见图 5. 从中可以看出, 在温度为 298 K 时, 未改性的芦苇生物炭对磷的吸附效果很差, 在低浓度 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2.0

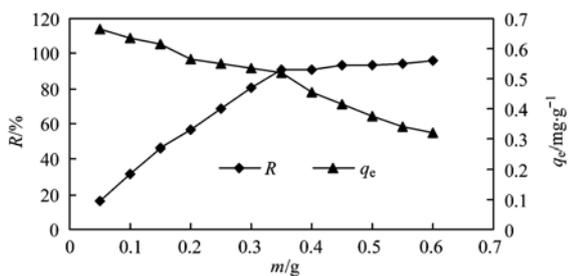


图 4 不同吸附剂投加量对除磷效果的影响

Fig. 4 Effect of different adsorbent dosage on phosphorus removal

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时吸附量出现了负值,由于此时芦苇生物炭有磷溶出的现象;在温度为 298 K、磷溶液浓度为 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,芦苇生物炭平衡吸附量为 $0.019 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,改性芦苇生物炭平衡吸附量为 $0.658 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,改性芦苇生物炭吸附量是芦苇生物炭吸附量的 34.6 倍,改性效果显著,主要原因是经过改性的芦苇生物炭,铁含量达到 $11.98 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,是芦苇生物炭含铁量的 44.7 倍。由图 5 还可以看出,相同初始浓度下,随着温度的升高,平衡吸附量增大,升高温度有利于吸附的进行。

采用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程^[14]拟合改性芦苇生物炭对磷的吸附等温线。

Langmuir 方程:

$$q_e = \frac{bq^0c_e}{1 + bc_e} \quad (4)$$

表 1 不同温度下的吸附等温线拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the adsorption isotherms at different temperatures

T/K	Langmuir 等温吸附方程			Freundlich 等温吸附方程		
	$q^0/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$b/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	R^2	K_F	$1/n$	R^2
283	0.771	0.552	0.981	0.292	0.383	0.944
298	0.987	0.784	0.992	0.434	0.347	0.962
313	1.185	1.248	0.983	0.616	0.302	0.964

2.5 吸附热力学计算

为了计算磷在改性芦苇生物炭上的吸附热力学,吸附过程的 ΔG^θ 采用式(6)计算^[17],再根据 ΔG^θ 与 ΔH^θ 和 ΔS^θ 的关系式(7)得式(8)。根据式(8), $\ln b$ 对 $1/T$ 作图拟合(图 6),得到斜率和截距,从而计算出 ΔH^θ 和 ΔS^θ 的值。

$$\Delta G^\theta = -RT \ln b \quad (6)$$

$$\Delta G^\theta = \Delta H^\theta - T\Delta S^\theta \quad (7)$$

$$\ln b = -\frac{\Delta H^\theta}{RT} + \frac{\Delta S^\theta}{R} \quad (8)$$

式中, ΔG^θ 为自由能变, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; ΔS^θ 为熵变, $\text{J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$; ΔH^θ 为焓变, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$; T 为热力学温度, K; b 为

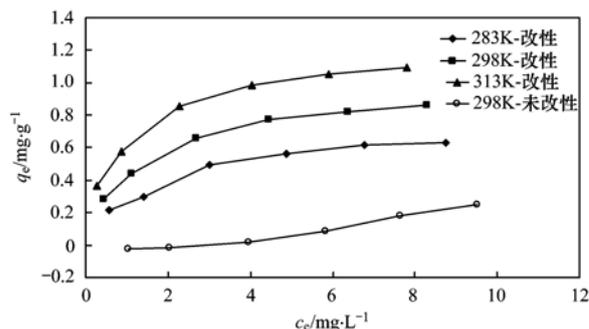


图 5 不同温度下的吸附等温线

Fig. 5 Adsorption isotherms at different temperatures

Freundlich 方程:

$$q_e = K_F c_e^{1/n} \quad (5)$$

式中, q^0 为最大平衡吸附量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; b 为 Langmuir 常数, $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$; K_F 为 Freundlich 常数, $1/n$ 为经验常数。

通过 Origin 软件分别将各等温吸附平衡数据代入式(4)和(5)进行非线性拟合,拟合的各参数见表 1。从中可以看出,Langmuir 方程拟合的相关系数 R^2 更高 (>0.98),Langmuir 方程更好地反映改性芦苇生物炭吸附磷的行为,说明该吸附是单层吸附^[15,16]。由表 1 还可看出,温度从 283 K 上升到 313 K,改性芦苇生物炭对磷酸根(以 P 计)的最大平衡吸附量(q^0)由 $0.771 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增大至 $1.185 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,也说明升高温度有利于改性芦苇生物炭吸附磷。

Langmuir 等温方程常数, $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

吸附热力学各参数见表 2,从中可见, $\Delta G^\theta < 0$,说明改性芦苇生物炭对水体中磷的吸附是自发进行的,并且随着温度的升高 ΔG^θ 的绝对值越大,吸附

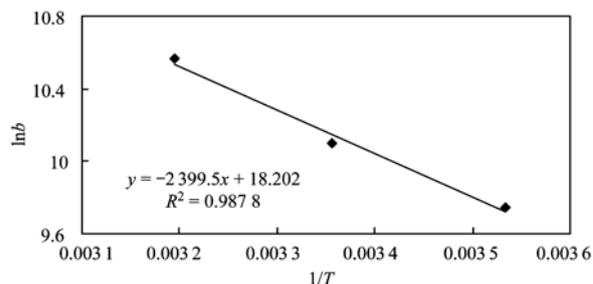
图 6 $\ln b$ 对 $1/T$ 的线性关系

Fig. 6 The $1/T$ linear relationship with $\ln b$

表 2 改性芦苇生物炭对磷吸附的热力学参数

Table 2 Adsorption thermodynamic parameters of phosphorus adsorption on modified reed biochar

T/K	$\Delta G^0/kJ \cdot mol^{-1}$	$\Delta S^0/kJ \cdot (mol \cdot K)^{-1}$	$\Delta H^0/kJ \cdot mol^{-1}$
283	-22.94		
298	-25.02	0.151	19.95
313	-27.49		

剂的自发能力越大. ΔH^0 为 $19.95 kJ \cdot mol^{-1}$, 表明该吸附过程是吸热过程, 温度升高有利于吸附的进行, 这与吸附等温研究中相同初始浓度下, 温度升高平衡吸附量增加的研究结果一致. $\Delta S^0 > 0$, 表明改性芦苇生物炭对磷的吸附过程为熵增的过程^[18].

2.6 吸附动力学研究

吸附量随时间的变化见图 7. 从中可见, 不同初始浓度下吸附量随时间的变化约在 600 min 后趋于平衡. 研究其吸附动力学, 分别用假一级方程、假二级方程^[19,20] 和颗粒内扩散方程^[21] 进行拟合分析.

假一级方程:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (9)$$

假二级方程:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (10)$$

$$\text{令: } h = K_2 q_e^2 \quad (11)$$

颗粒内扩散方程:

$$q_t = K_p t^{0.5} + c \quad (12)$$

式中, t 为吸附时间, min; q_t 为 t 时刻的吸附量, $mg \cdot g^{-1}$; $q_{e, \text{exp}}$ 为实验测得的平衡吸附量, $mg \cdot g^{-1}$; q_e 为理论平衡吸附量, $mg \cdot g^{-1}$; K_1 为假一级动力学速率常数, min^{-1} ; K_2 为假二级动力学速率常数, $g \cdot (mg \cdot min)^{-1}$; K_p 为颗粒内扩散速率常数, $mg \cdot (g \cdot min)^{-1}$; c 是常数, 为颗粒内扩散方程的截

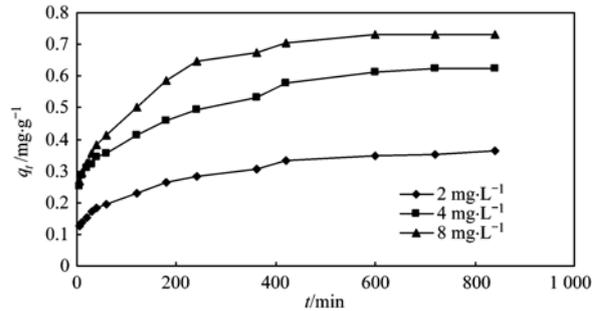


图 7 不同初始浓度下吸附量随时间的变化

Fig. 7 Change of adsorption capacity with time at different initial concentrations

距; h 为初始吸附速率, $mg \cdot (g \cdot min)^{-1}$.

拟合不同动力学方程的各参数见表 3. 从中可见, 拟合假一级方程的 R^2 值小于假二级方程拟合的 R^2 值, 且从假一级方程计算得到的平衡吸附量 q_e 与实验得到的 $q_{e, \text{exp}}$ 相差较大, 这是因为假一级动力学方程具有局限性, 往往更适用于吸附初始阶段的描述, 不能准确地描述吸附的全过程^[22]. 拟合假二级的 R^2 均达到 0.99 以上, 说明假二级方程拟合更好, 且通过假二级动力学方程计算的平衡吸附量 q_e 分别为 0.372 、 0.643 和 $0.764 mg \cdot g^{-1}$, 与实验所得吸附量 $q_{e, \text{exp}}$ 的 0.370 、 0.635 和 $0.762 mg \cdot g^{-1}$ 很接近, 因此, 假二级方程更好地拟合改性芦苇生物炭吸附磷的动力学数据. 假二级方程包含了吸附的所有过程, 如外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内扩散^[23], 更全面真实地反映了磷在改性芦苇生物炭上的吸附机制. 假二级动力学速率常数 K_2 随初始浓度的升高而降低, 初始吸附速率 h 随初始浓度升高而增大. 这是由于在吸附的初始阶段, 磷浓度越高, 磷与吸附剂的固液界面形成的浓度梯度越大, 传质推动力也越大, 磷在吸附剂表面的流体界面膜中扩散速率就越快.

表 3 不同初始浓度下的动力学方程拟合参数

Table 3 Fitting parameters of dynamic equation at different initial concentrations

c_0 $/mg \cdot L^{-1}$	$q_{e, \text{exp}}$ $/mg \cdot g^{-1}$	假一级动力学方程			假二级动力学方程			
		K_1 $/min^{-1}$	q_e $/mg \cdot g^{-1}$	R^2	K_2 $/g \cdot (mg \cdot min)^{-1}$	q_e $/mg \cdot g^{-1}$	h $/mg \cdot (g \cdot min)^{-1}$	R^2
2	0.370	0.004 0	0.231	0.982	0.059 4	0.372	0.008 2	0.993
4	0.635	0.004 4	0.373	0.985	0.038 4	0.643	0.015 9	0.993
8	0.762	0.003 8	0.409	0.942	0.035 7	0.764	0.020 8	0.997

拟合不同初始浓度下的颗粒内扩散方程, 从图 8 可以看出颗粒扩散方程所描述的不同初始浓度下的吸附曲线均分为两个阶段: 第一阶段斜

率最大, 此阶段吸附速率最快, 是由于吸附剂表面和溶液中的磷存在较大的浓度差, 磷通过膜扩散迅速聚集到吸附剂的外表面, 被外表面上的吸

附位吸附; 第二阶段斜率略小, 属于颗粒内扩散阶段, 磷通过粒子间内扩散进入到吸附剂的内表面吸附, 被内表面上的吸附位吸附, 而后溶液中剩余磷浓度降低、吸附剂表面吸附点位减少, 粒子内扩散速率也逐渐降低, 直至最后达到吸附平衡状态^[24]. 从表 4 可见, 3 个初始浓度下分段拟合的线性方程的截距均不为零, 拟合直线的反向延长线并不会通过原点, 说明该吸附过程虽主要受颗粒内扩散控制, 但是颗粒内扩散控制不是唯一的速率控制步骤, 可能是由表面吸附和颗粒内扩散共同控制^[25].

表 4 不同初始浓度下的颗粒内扩散方程拟合参数

Table 4 Fitting the diffusion equation of the particles at different initial concentrations

c_0 /mg·L ⁻¹	颗粒内扩散方程					
	K_{p1} /mg·(g·min) ⁻¹	c_1	R^2	K_{p2} /mg·(g·min) ⁻¹	c_2	R^2
2	0.011 2	0.101	0.995	0.005 8	0.200	0.922
4	0.017 6	0.225	0.990	0.010 0	0.351	0.915
8	0.027 9	0.203	0.997	0.008 2	0.523	0.959

3 结论

(1) 使用扫描电子显微镜观察到铁负载到芦苇生物炭的表面和孔道上, 负载在芦苇生物炭上的铁主要以氢氧化铁的形态存在. 改性芦苇生物炭 pH_{pzc} 为 7.49, 改性芦苇生物炭的吸附量随溶液 pH 的升高先增大后减小, pH 为 7.0 时吸附量最大. 改性芦苇生物炭的负载铁量为 11.98 mg·g⁻¹, 是芦苇生物炭的 44.7 倍.

(2) 改性芦苇生物炭处理初始浓度为 4.0 mg·L⁻¹ 的磷溶液, 去除率随投加量的增大而增大, 而后趋于平缓, 最佳投加量为 7.0 g·L⁻¹, 此时去除率为 91.05%, 溶液的剩余磷浓度为 0.358 mg·L⁻¹.

(3) 改性芦苇生物炭与未改性芦苇生物炭相比, 对磷吸附效果有显著提高, 在温度为 298K、磷溶液浓度为 4.0 mg·L⁻¹ 时, 改性芦苇生物炭平衡吸附量为 0.658 mg·g⁻¹, 是未改性生物炭吸附量的 34.6 倍.

(4) Langmuir 方程很好地拟合不同温度的吸附等温线, 改性芦苇生物炭吸附磷是单层吸附, 在相同初始浓度下, 温度升高平衡吸附量增大.

(5) 根据吸附热力学计算, ΔG^θ 为负值, ΔH^θ 和 ΔS^θ 都为正值, 表明改性芦苇生物炭吸附磷是一个自发、熵增的吸热过程, 温度升高有利于吸附的进行.

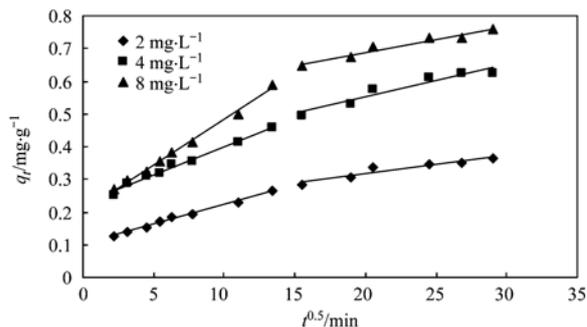


图 8 拟合不同初始浓度下颗粒内扩散方程

Fig. 8 Fitting intraparticle diffusion equation at different initial concentrations

(6) 假二级方程很好地拟合改性芦苇生物炭吸附磷的动力学数据, 初始吸附速率随初始浓度的增大而增大. 吸附过程虽主要受颗粒内扩散控制, 但颗粒内扩散不是唯一的速率控制步骤.

参考文献:

- [1] Wang H J, Wang H Z. Mitigation of lake eutrophication: loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(10): 1445-1451.
- [2] Tian S L, Jiang P X, Ning P, et al. Enhanced adsorption removal of phosphate from water by mixed lanthanum/aluminum pillared montmorillonite [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 151(1-3): 141-148.
- [3] 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3458-3466.
- [4] 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.
- [5] 郭照冰, 陈天, 陈天蕾, 等. 铁盐改性废弃蛋壳对水中磷的吸附特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(4): 611-615.
- [6] Chen B L, Chen Z M, Lv S F. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 716-723.
- [7] 陆燕勤, 朱丽, 何昭菊, 等. 沸石负载氧化铁吸附剂吸附除磷研究[J]. 环境工程, 2015, 33(4): 48-52.
- [8] Ren J, Li N, Li L, et al. Granulation and ferric oxides loading enable biochar derived from cotton stalk to remove phosphate from water[J]. Bioresource Technology, 2015, 178: 119-125.
- [9] 姜志翔, 郑浩, 李锋民, 等. 生物炭碳封存技术研究进展[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3327-3333.
- [10] Babić B M, Milonjić S K, Polovina M J, et al. Point of zero

- charge and intrinsic equilibrium constants of activated carbon cloth[J]. *Carbon*, 1999, **37**(3): 477-481.
- [11] Krishnan K A, Haridas A. Removal of phosphate from aqueous solutions and sewage using natural and surface modified coir pith [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(2): 527-535.
- [12] Rahimi S, Moattari R M, Rajabi L, *et al.* Iron oxide/hydroxide (α , γ -FeOOH) nanoparticles as high potential adsorbents for lead removal from polluted aquatic media [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, **23**: 33-43.
- [13] Chen N, Feng C P, Zhang Z Y, *et al.* Preparation and characterization of lanthanum (III) loaded granular ceramic for phosphorus adsorption from aqueous solution[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2012, **43**(5): 783-789.
- [14] Chung H K, Kim W H, Park J, *et al.* Application of Langmuir and Freundlich isotherms to predict adsorbate removal efficiency or required amount of adsorbent [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, **28**: 241-246.
- [15] Javadian H. Application of kinetic, isotherm and thermodynamic models for the adsorption of Co(II) ions on polyaniline/polypyrrole copolymer nanofibers from aqueous solution [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, **20**(6): 4233-4241.
- [16] Guo J Z, Chen S W, Liu L, *et al.* Adsorption of dye from wastewater using chitosan-CTAB modified bentonites[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, **382**(1): 61-66.
- [17] Kubilay S, Gürkan R, Savran A, *et al.* Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite[J]. *Adsorption*, 2007, **13**(1): 41-51.
- [18] Ding L, Wu C, Deng H P, *et al.* Adsorptive characteristics of phosphate from aqueous solutions by MIEX resin[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2012, **376**(1): 224-232.
- [19] Yang J B, Yu M Q, Qiu T. Adsorption thermodynamics and kinetics of Cr(VI) on KIP210 resin[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, **20**(2): 480-486.
- [20] Boparai H K, Joseph M, O'Carroll D M. Kinetics and thermodynamics of cadmium ion removal by adsorption onto nano zerovalent iron particles [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(1): 458-465.
- [21] Kołodyńska 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.
- [22] 李坤权, 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.
- [23] Alshameri A, Yan C J, Al-Ani Y, *et al.* An investigation into the adsorption removal of ammonium by salt activated Chinese (Hulaodu) natural zeolite: kinetics, isotherms, and thermodynamics[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, **45**(2): 554-564.
- [24] 马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 等. 牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1678-1685.
- [25] 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.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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