

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

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

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较

朝木尔乐格, 冯流*, 霍艳霞

(北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029)

摘要: 以氧化石墨为前驱体, 分别将磁铁矿、赤铁矿和零价铁负载到石墨烯上, 通过 FTIR 和 XRD 对其进行表征, 成功地制备出石墨烯负载磁铁矿 (M-RGO)、石墨烯负载赤铁矿 (H-RGO) 和石墨烯负载零价铁 (N-RGO) 这 3 种复合材料。研究比较了 3 种复合材料的除砷性能, 如吸附动力曲线、吸附等温线、pH 值范围和共存离子对除砷效果影响。结果表明, 3 种材料吸附 As(Ⅲ) 的动力曲线遵从准二级动力学模型, 吸附等温线符合 Langmuir 模型, 在相同条件下, 其吸附容量依次为 N-RGO > M-RGO > H-RGO。3 种材料均在弱酸性至中性条件下对 As(Ⅲ) 有较好的吸附效果, M-RGO 和 H-RGO 材料受 pH 值影响较小, 且吸附 As(Ⅲ) 的最佳 pH 值范围较 N-RGO 材料宽。3 种材料中, N-RGO 材料抗共存离子干扰能力较强, 其次是 H-RGO 材料, M-RGO 材料最差。

关键词: 石墨烯; 磁铁矿; 赤铁矿; 零价铁; 除砷

中图分类号: X13 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3927-06

Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material

Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia

(Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: FTIR and XRD showed that three hybrid materials which were M-RGO, H-RGO and N-RGO were successfully made from graphene oxide with magnetite, hematite and zero-valence iron respectively. The arsenic removal performance, such as adsorption kinetics, adsorption isotherm, appropriate pH range and resistance to co-existing ions were studied and compared. Results showed that the adsorption of arsenic on three materials fit pseudo-second-order kinetics, and the adsorption isotherm was consistent with the Langmuir model, while the order of adsorption capacities was: N-RGO > M-RGO > H-RGO. Three materials had better adsorptions of As(Ⅲ) under the condition of weak acid to neutral, the M-RGO and H-RGO materials were less influenced by the pH, and their pH ranges for adsorbing As(Ⅲ) were wider than that of N-RGO material. In these three materials, N-RGO was least affected by co-existing ions, H-RGO was the second, and M-RGO was most affected.

Key words: graphene; magnetite; hematite; zero-valence-iron; arsenic removal

砷是一种毒性很强的原生质毒物, 已被美国疾病控制中心 (CDC) 和国际防癌研究机构 (IARC) 确定为第一类致癌物^[1]。世界卫生组织 (WHO) 将砷列为水体中优先控制的污染物之一^[2]。因此, 对水体中砷的去除越来越受到广泛关注。目前, 去除水中砷的方法主要有吸附、混凝沉淀/微滤、离子交换和膜技术等方法^[3], 其中吸附法因具有处理效率高、吸附干扰小、吸附剂可再生重复使用以及对环境很少产生二次污染等优点而得到广泛关注。在常用吸附剂中, 铁氧化物及其复合氧化物有较强的结合能力和经济适用性^[4], 但在实际应用中, 铁氧化物在空气中易被氧化, 在水溶液中金属易溶出, 因此将其负载在一定载体上, 以提高其活性和稳定性。

石墨烯是近年来研究较多的新型载体, 是世界上最薄的二维纳米材料, 由单层碳原子组成, 具有较高的机械强度和比表面积^[5], 能较好地负载铁氧化物。Zhang 等^[6]用石墨烯负载氢氧化铁复合材料去除饮用水中的砷, 发现该材料在较宽 pH 值 (4~9)

下, 能将砷溶液的浓度从 $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Vimlesh 等^[7]研制了石墨烯负载 Fe_3O_4 材料, 发现其能够去除水中 99.9% 以上的砷, 将浓度降至 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。但目前只限于对单个的石墨烯负载的铁基材料进行研究, 很少有在相同条件下对不同形态铁基材料的除砷性能进行综合比较的研究。

为了研究石墨烯负载铁基材料中铁的形态对除砷性能的影响, 本研究通过前期文献调研, 筛选了被广泛报道的吸附性能较高的 3 种形态的铁: 磁铁矿^[8,9]、赤铁矿^[10,11]和零价铁^[12,13], 并将其负载到石墨烯上, 制备出石墨烯负载磁铁矿 (M-RGO)、石墨烯负载赤铁矿 (H-RGO) 和石墨烯负载零价铁 (N-RGO) 这 3 种复合材料, 考察了吸附动力曲线与吸附

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-03-11

基金项目: 环境工程北京市重点学科项目; 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 朝木尔乐格 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境功能材料制备与研究, E-mail: hualei901@126.com

* 通讯联系人, E-mail: fengliu-buct@vip.sina.com

等温线,并对 pH 值和共存离子对吸附效果的影响等方面进行了综合比较,以期对石墨烯负载铁基除砷材料中铁形态的选择及实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验涉及药品有氯化铁、氯化亚铁、硝酸铁、尿素、硫酸亚铁、聚乙二醇、亚砷酸钠,以上试剂均为分析纯,北京化工厂生产。

本实验通过 Hummers 法制备氧化石墨^[14],通过超声还原法将氧化石墨还原为石墨烯。以氧化石墨为前驱体,分别用共沉淀法^[15]、直接加热法^[16]和液相还原法^[17]制备出石墨烯负载磁铁矿(M-RGO)、石墨烯负载赤铁矿(H-RGO)和石墨烯负载零价铁(N-RGO)。

1.2 实验方法

1.2.1 砷含量测定

根据水体砷污染情况和实验条件,选定用亚砷酸钠配置浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的三价砷溶液为含砷水样。水溶液中砷的含量用北京科创海光仪器有限公司的 AFS-3000 双道原子荧光光度计来测定。

1.2.2 吸附动力曲线测定

分别取 0.1 g M-RGO、H-RGO、N-RGO 材料放入 100 mL , $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 As(III) 溶液中。pH 值调至适当,于转速为 $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒温振荡器中振荡,分别在振荡 1、2、4、6、8、10、12、24 h 后取样(做 3 组平行实验),测定溶液中砷浓度、计算其吸附量。

1.2.3 吸附等温线测定

分别取 0.1 g M-RGO、H-RGO、N-RGO 材料放入初始浓度 0.5、1、2、5、10、20、30、50、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 100 mL As(III) 溶液(3 组平行实验)中, pH 值调至适当, $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 24 h 后离心,测上清液砷浓度,计算其吸附量。

1.2.4 吸附影响因素

用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 和 NaOH 将 pH 值调至 3、4、5、6、7、8、9,测定 pH 值对 3 种材料除砷性能影响。

用 NaNO_2 、 NaNO_3 、 Na_2SO_4 、 Na_3PO_4 和 Na_2CO_3 各配置浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水中常见阴离子(NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 CO_3^{2-})溶液,再与砷溶液配制成浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的共存离子混合溶液,分别取 100 mL 混合溶液,用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 和 NaOH 将 pH 值调制适当值,并通过静态吸附实验测

定共存离子对 3 种材料除砷性能的影响。

吸附量通过公式(1)计算:

$$Q_e = V(c_i - c_e)/m \quad (1)$$

式中, Q_e 是吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; c_i 、 c_e 分别是初始和吸附平衡后的砷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 是溶液初始体积, L ; m 是吸附剂的质量, g 。

1.3 材料结构性能测量

用德国 Bruker 公司的 TENSOR27 型傅立叶变换红外光谱仪对材料表面官能团结构进行分析,测试条件:采用 KBr 压片,波数范围 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,分辨率 4 cm^{-1} ,扫描次数 32 次。

用德国 Bruker 公司的 D8ADVANCE 型 X-射线衍射分析仪对材料进行物相分析,测试条件:Cu 靶,管压 40 kV,管电流 30 mA,扫描范围 $10^\circ \sim 80^\circ$ 。

2 结果与讨论

2.1 实验材料制备结果

图 1 为石墨烯 RGO、M-RGO、H-RGO、N-RGO 的红外对比图。从中可以看出,4 种材料在 3434 cm^{-1} 左右均有较宽较长的吸收峰,其属于 O—H 伸缩振动峰;在 1630 cm^{-1} 处出现了属于 C=C 的吸收峰^[18]。除 RGO 外, M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料均在 560 cm^{-1} 附近出现吸收峰,为 Fe—O 的特征峰,表明铁基和石墨烯形成了复合物。

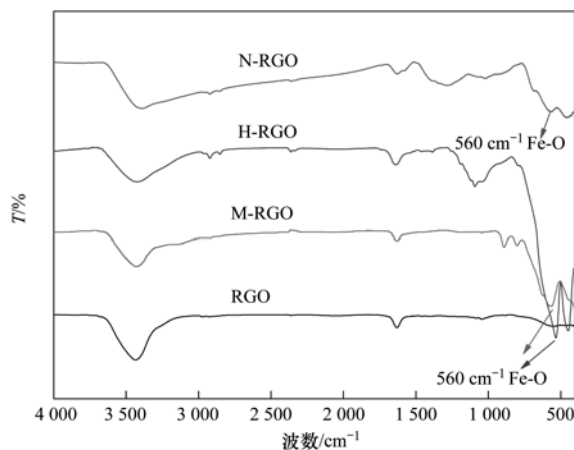


图1 RGO、M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料红外对比

Fig. 1 FTIR of RGO, M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

图 2 为 RGO、M-RGO、H-RGO、N-RGO 材料的 XRD 分析图。从中可以看出, RGO 在 23° 附近有一个较强的衍射峰, 跟石墨(002) 峰很接近^[19]。M-RGO 材料的衍射峰强度较强, 说明其晶型结构比较完整^[20], 并在 30.3° 、 35.6° 、 43.4° 、 57.3° 、 62.9° 显示出特征峰。通过跟磁铁矿标准 PDF 卡对比, 该

材料中含有磁性 Fe_3O_4 . H-RGO 在 33.2° 、 35.6° 、 39.3° 、 49.5° 、 54.1° 显示出特征峰,通过跟赤铁矿 PDF 标准卡对比,该材料中含有 Fe_2O_3 . N-RGO 材料在 44.7° 附近出现一个较强的衍射峰,这个衍射峰位置与 Fe^0 的标准衍射图样中的最强峰出现位置 (44.67°) 一致,因此可以判断制备的 N-RGO 材料中含有大量的零价铁^[21]. M-RGO、H-RGO、N-RGO 材料的谱图在 23° 附近出现石墨烯的特征峰,说明 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 和 Fe^0 这 3 种形态铁已负载到石墨烯载体上.

2.2 材料除砷性能比较

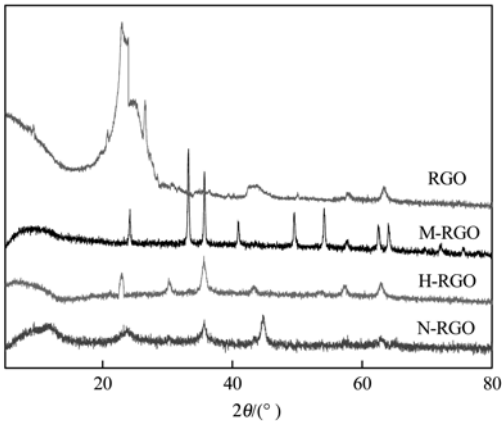


图2 RGO、M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料 XRD 对比

Fig. 2 XRD of RGO, M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

2.2.1 吸附动力学曲线

利用公式(1)计算绘制吸附容量 Q_t 和时间 t 的关系曲线,得到 M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料的吸附动力曲线,如图 3 所示. 分别用准一级模型[公式(2)]和准二级模型[公式(3)]对吸附速率数据进行拟合,结果如图 4 所示,拟合参数见表 1.

$$d(Q - Q_e)/dt = k_1(Q - Q_e) \tag{2}$$

$$d(Q - Q_e)/dt = k_2(Q - Q_e)^2 \tag{3}$$

式中, k_1 为准一级反应速率常数, k_2 为准二级反应速率常数; Q 为 t 时刻的吸附量 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; Q_e 为平衡吸附量 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

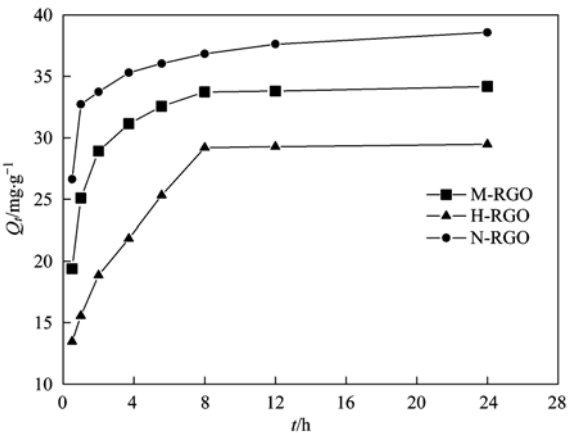


图3 M-RGO、H-RGO、N-RGO 材料吸附速率曲线

Fig. 3 Adsorption kinetics of M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

表 1 吸附速率模型参数

Table 1 Parameters of adsorption kinetics model

材料	准一级反应参数			准二级反应参数		
	k_1/h^{-1}	$Q_e/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	R^2	$k_2/\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	$Q_e/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	R^2
M-RGO	0.051 6	30.9	0.746 8	0.028 7	34.9	0.999 6
H-RGO	0.069 6	29.9	0.738 5	0.032 1	30.4	0.993 5
N-RGO	0.057 9	38.4	0.938 6	0.025 6	39.1	0.999 3

从图 3 看出,3 种材料表现出相似的动力学性质:吸附容量随着时间的增大而增大,前 8 h 吸附速率较快,12 h 基本达到吸附平衡. 表 1 的数据和图 4 表明,准二级动力学速率方程较准一级速率方程能够更好地描述这 3 种材料对 $\text{As}(\text{III})$ 的吸附动力学过程,相关系数 $R^2 > 0.99$,说明 3 种材料对 $\text{As}(\text{III})$ 的去除是准二级反应. 准二级模型真实表征了反应的外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内扩散过程,同时说明吸附过

程为物理吸附和化学吸附相结合的过程^[22].

2.2.2 吸附等温线

利用公式(1)计算绘制平衡吸附容量 Q_e 和平衡浓度 c_e 的关系曲线,得到 M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料的吸附等温线,如图 5 所示. 分别用 Langmuir[公式(4)]模型和 Freundlich[公式(5)]模型对实验数据进行拟合,结果如图 6 所示,拟合参数见表 2.

表 2 吸附等温线模型参数

Table 2 Adsorption isotherm model parameters

材料	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	$Q_m/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b/\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2	k	n	R^2
M-RGO	71.9	0.024	0.995 4	1.68	0.87	0.978 9
H-RGO	46.3	0.017	0.986 0	0.06	1.06	0.965 7
N-RGO	85.5	0.031	0.998 8	2.75	0.80	0.976 3

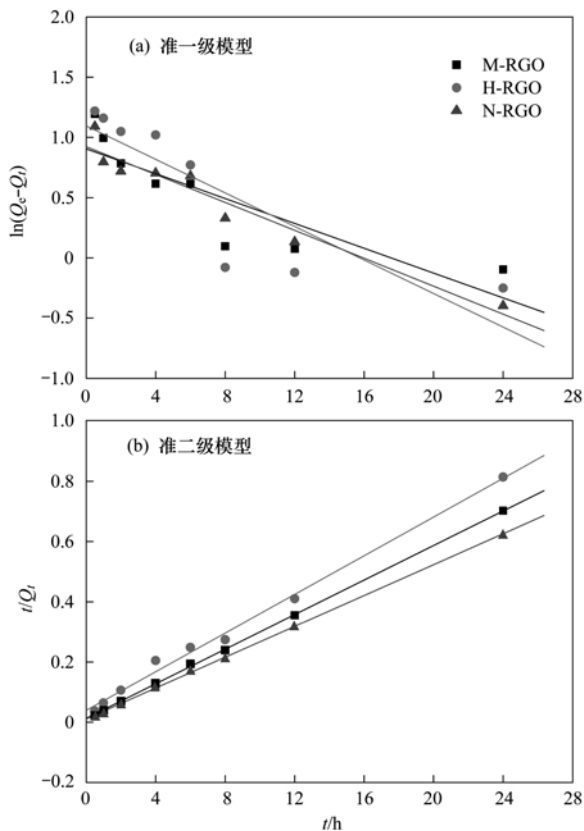


图4 M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料吸附动力学
曲线准一级、准二级模型拟合

Fig. 4 Pseudo-first and pseudo-second-order adsorption kinetics of M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

$$Q_e = Q_{\max} bc_e / (1 + bc_e) \quad (4)$$

$$Q_e = kc_e^n \quad (5)$$

式中, Q_e 为平衡吸附容量 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; c_e 为平衡浓度 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $Q_{\max}$ 为最大单分子层吸附量 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; b 为 Langmuir 吸附常数 $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$; k, n 为无量纲 Freundlich 常数。

为了比较 3 种材料对 As(Ⅲ) 的吸附容量, 对其进行等温吸附测试, 结果如图 5 所示, 3 种材料的吸附量都随着 As(Ⅲ) 平衡浓度的增大而增加, 达到一定浓度后, 砷吸附量渐趋平衡。使用 Freundlich 和 Langmuir 模型对吸附等温线进行拟合, 结果如表 2 和图 6 所示, 3 种材料拟合结果更加符合 Langmuir 模型 (R^2 为 0.98), 说明 As(Ⅲ) 的去除主要在 M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 表面进行, 为单分子层吸附。相同条件下, 3 种材料中 N-RGO 材料对砷的吸附量最大 ($85.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 其次为 M-RGO 材料 ($71.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), H-RGO 材料吸附效果最差 ($46.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 说明在相同的吸附条件下, N-RGO 材料能够更有效地去除水中 As(Ⅲ)。

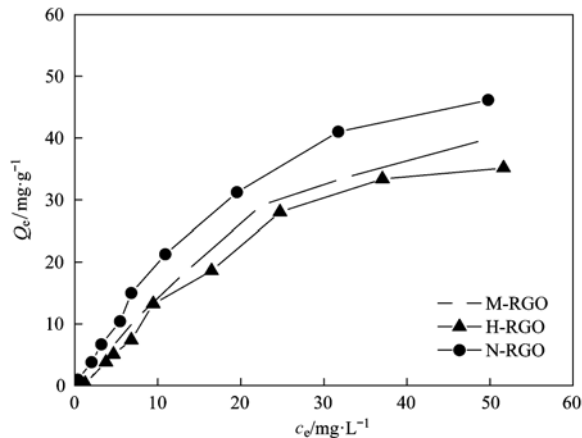


图5 M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料吸附等温线

Fig. 5 Adsorption isotherm of M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

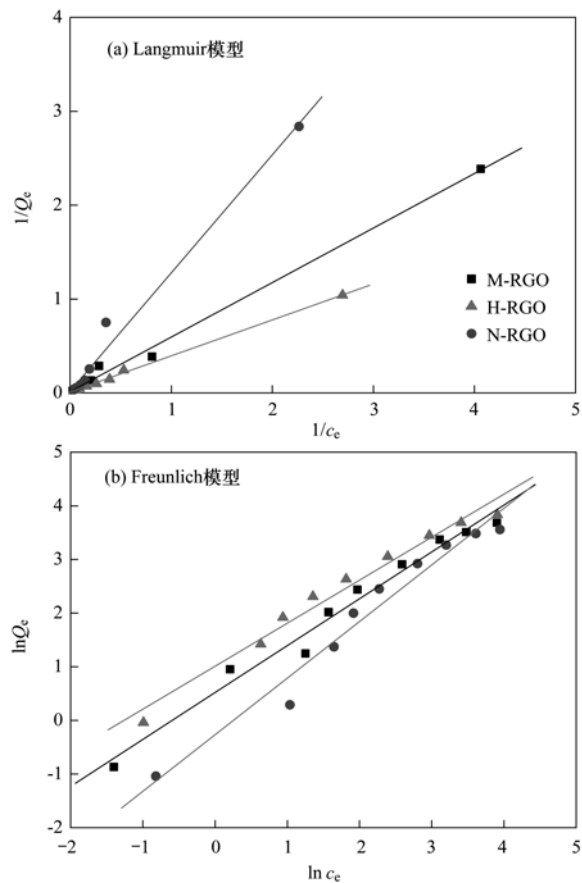


图6 M-RGO、H-RGO 和 N-RGO 材料吸附等温线
Langmuir、Freundlich 模型拟合

Fig. 6 Langmuir, Freundlich model adsorption isotherm of M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

2.2.3 吸附影响因素

pH 值对 As(Ⅲ) 的存在形态有一定的影响, 从而影响材料的除砷性能。当 pH 值为 6~9 之间时以 H_3AsO_3 的形态稳定存在, 当 pH 值为 10~12 时以

H_2AsO_3^- 形态存在,当 pH 为 13 和 14 时分别以 HAsO_3^{2-} 和 AsO_3^{3-} 形态存在^[23]. pH 值对 M-RGO、H-RGO、N-RGO 这 3 种材料除砷性能的影响如图 7 所示. 从中可以看出,溶液 pH 值对 As(Ⅲ) 的吸附有较大的影响:当 pH 值从 3 升高到 9 时,3 种材料的吸附量均出现先增大后减小的趋势,且 N-RGO 材料的吸附量始终高于 M-RGO 和 H-RGO 材料. N-RGO 材料在 pH 为 5 时吸附量达到峰值 $55.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 当 pH 大于 5 时,吸附量迅速下降,这是因为零价铁易在碱性环境下生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和一些氢氧化亚铁络合离子,新生成的物质使零价铁表面钝化,降低其吸附量^[24]. M-RGO 材料在 pH 为 7 时吸附量达到峰值 $42.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,这是因为 Fe_3O_4 的 Zeta 电位为 7.03,当 $\text{pH} < 7.03$ 时, Fe_3O_4 表面带正电,有利于静电吸附的进行,即在弱酸性条件下 Fe_3O_4 对砷的吸附效果最佳. 当 $\text{pH} > 7.03$ 时 Fe_3O_4 表面带负电,使得其吸附能力减弱^[25]. H-RGO 材料在 pH 为 7 时吸附量达到峰值 $41.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 对比 3 种材料,N-RGO 材料吸附性能受 pH 影响最大,最佳 pH 范围较小,M-RGO 和 H-RGO 材料受 pH 影响相对较小,M-RGO 在 pH 5~7 范围内,对 As(Ⅲ) 有较好的吸附能力,H-RGO 材料吸附 As(Ⅲ) 最佳 pH 范围为 6~8.

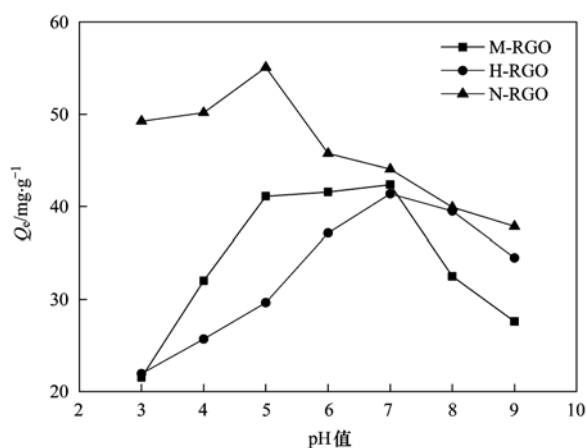


图7 pH 对 M-RGO、H-RGO、N-RGO 材料影响

Fig. 7 Effects of pH on M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

为了了解 3 种材料抗共存离子干扰的能力,考察了水中常见的阴离子对材料吸附性能的影响,结果如图 8 所示. NO_2^- 和 NO_3^- 离子使 M-RGO、H-RGO、N-RGO 这 3 种材料的吸附量依次减少为 40.4%、13.9%、8.5% 和 46.9%、26.9%、7.3%,可见 NO_2^- 和 NO_3^- 对 M-RGO 影响最为严重,H-RGO 材料次之,对 N-RGO 的吸附性能影响较小,原因是

NO_2^- 、 NO_3^- 能与材料表面的活性吸附位点结合,与 As(Ⅲ) 发生竞争,且两个离子更容易与 M-RGO 材料表面的活性吸附位点结合^[26]. SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 离子使 M-RGO、H-RGO、N-RGO 这 3 种材料的吸附量依次减少为 1.1%、0.64%、12.4% 和 28.1%、0.69%、15.3%,可以看出这两种离子对 N-RGO 材料的吸附性能影响较大,对 H-RGO 几乎没有影响,M-RGO 受 CO_3^{2-} 离子的影响大于 SO_4^{2-} 离子. PO_4^{3-} 离子对 N-RGO 材料的吸附有促进作用. 总体来看 N-RGO 材料抗共存离子干扰能力较强,其次是 H-RGO 材料,M-RGO 材料抗共存离子干扰能力相对较差,原因为 N-RGO 表面活性吸附位点较 H-RGO 和 M-RGO 更有容易与 As(Ⅲ) 结合.

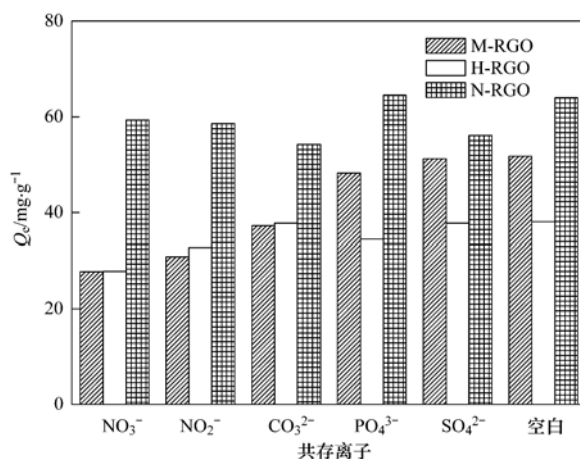


图8 共存离子对 M-RGO、H-RGO、N-RGO 材料的影响

Fig. 8 Effects of co-existed ions on M-RGO, H-RGO and N-RGO materials

3 结论

(1) 3 种材料的动力学曲线符合准二级模型,吸附等温线符合 Langmuir 模型. 3 种材料中 N-RGO 对砷的吸附量最大,其次为 M-RGO, H-RGO 吸附效果最差. 说明在相同的吸附条件下,N-RGO 材料能够更有效地去除水中 As(Ⅲ).

(2) 3 种材料均在弱酸性至中性条件下对 As(Ⅲ) 有较好的吸附效果. 相同 pH 值变化下,N-RGO 材料的吸附量高于 M-RGO 和 H-RGO,但 N-RGO 材料吸附 As(Ⅲ) 受 pH 影响较大,其最佳 pH 范围较小,M-RGO 和 H-RGO 材料在较宽的 pH 下对 As(Ⅲ) 有较好的吸附能力.

(3) 水环境中常见的阴离子中, NO_2^- 、 NO_3^- 、 CO_3^{2-} 对 As(Ⅲ) 的去除有不同程度的抑制作用,其余常见离子对其吸附影响不大,且 N-RGO 材料抗共存离子干扰能力较强,其次是 H-RGO 材料,M-RGO 材料相对较差.

参考文献:

- [1] 段桂兰, 王利红, 陈玉, 等. 植物超富集砷机制研究的最新进展[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(5): 714-720.
- [2] Raven K P, Jain A, Loeppert R H, *et al.* Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: Kinetics, equilibrium and adsorption envelopes[J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(2): 344-349.
- [3] Hülya G F, Jens C T, David M, *et al.* Adsorption of arsenic from water using activated neutralized red mud [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(8): 2428-2434.
- [4] Kohn T, Kenneth J T, Roberts A L, *et al.* Longevity of granular iron in groundwater treatment processes: Corrosion product development[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(8): 2867-2879.
- [5] 张燚, 陈彪, 杨祖培, 等. Fe_3O_4 磁性纳米粒子-氧化石墨烯复合材料的可控制备及结构与性能表征[J]. 物理化学学报, 2011, **27**(5): 1261-1266.
- [6] Zhang K, Dwivedi V, Chi C Y, *et al.* Graphene oxide/ferric hydroxide composites for efficient arsenate removal from drinking water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **182**(1): 162-168.
- [7] Vimlesh C, Jaesung P, Young C, *et al.* Water-dispersible magnetite-reduced graphene oxide composites for arsenic removal [J]. American Chemical Society, 2010, **4**(7): 3979-3986.
- [8] Saidur R C, Ernest K Y. Arsenic and chromium removal by mixed magnetite-maghemite nanoparticles and the effect of phosphate on removal [J]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(11): 2238-2244.
- [9] Kim K R, Lee B T, Kim K W, *et al.* Arsenic stabilization in mine tailings using nano-sized magnetite and zero valent iron with the enhancement of mobility by surface coating[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, **113**(2): 124-129.
- [10] 王强, 卜锦春, 魏世强, 等. 赤铁矿对砷的吸附解吸及氧化特征[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(8): 1612-1617.
- [11] Guo H M, Stuben D, Berner Z, *et al.* Removal of arsenic from aqueous solution by natural siderite and hematite[J]. Applied Geochemistry, 2007, **22**(5): 1039-1051.
- [12] Konstantina T, Nikolaos P N, Nikolaos V, *et al.* Arsenic removal from geothermal waters with zero-valent iron-Effect of temperature, phosphate and nitrate[J]. Water Research, 2006, **40**(12): 2375-2386.
- [13] Dong H, Guan X H, Irene M C, *et al.* Fate of As(V)-treated nano zero-valent iron: Determination of arsenic desorption potential under varying environmental conditions by phosphate extraction Original Research Article[J]. Water Research, 2012, **46**(13): 4071-4080.
- [14] Hummers W S, Offeman R E. Preparation of graphitic oxide[J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, **80**(6): 1339-1339.
- [15] Javier G, Joan de P, Maria M, *et al.* Reactive transport of arsenic(III) and arsenic(V) on natural hematite: Experimental and modelin[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, **348**(1): 293-297.
- [16] 方继敏, 李山虎, 龚文琪, 等. 五氯苯酚在赤铁矿表面吸附的红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(2): 319-321.
- [17] 王翠英, 陈祖耀, 程彬, 等. 金属铁纳米粒子的液相制备、表面修饰及其结构表征[J]. 化学物理学报, 1999, **12**(6): 670-674.
- [18] 马文石, 周俊丈, 程顺喜, 等. 石墨烯的制备与表征[J]. 高校化学工程学报, 2010, **24**(4): 720-722.
- [19] 温祝亮, 杨苏东, 宋启军, 等. 石墨烯负载高活性 Pd 催化剂对乙醇的电催化氧化[J]. 物理化学学报, 2010, **26**(6): 1570-1574.
- [20] Dong L J, Zinin P V, Cowen J P, *et al.* Iron coated pottery granules for arsenic removal from drinking water[J]. Hazardous Material, 2009, **168**(1): 626-623.
- [21] 冯婧微, 梁成华, 王黎, 等. 零价纳米铁处理水中 Cr(VI) 的实验研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(10): 164-167.
- [22] 辛琳琳. 复合吸附材料 TLA 的制备及其砷氟共除性能的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009. 35-43.
- [23] 郭学军. 载铁(B-FeOOH)球形棉纤维素吸附剂去除地下水 As(III) 和 As(V) 的研究[D]. 天津: 南开大学, 2001. 2-3.
- [24] 黄园英, 刘丹丹, 刘菲. 纳米铁用于饮用水中 As(III) 去除效果[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(1): 83-87.
- [25] 吴少雄, 邢志, 陈红兵, 等. 磁性纳米四氧化三铁选择性富集-电感耦合等离子体原子发射光谱测定砷[J]. 分析化学, 2009, **37**(5): 711-714.
- [26] 陈春宁, 石林, 刘金香, 等. 水中竞争性阴离子对 Fe^0 除砷效率的影响研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2006, **20**(4): 51-54.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 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