

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

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(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能

汪爱河^{1,2}, 周康根^{1*}, 刘行¹, 陈泉州¹, 刘芳¹

(1. 中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083; 2. 湖南城市学院市政与测绘工程学院, 益阳 413000)

摘要: 采用双滴共沉淀-煅烧法制备 Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 金属复合氧化物吸附剂, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射 (XRD) 对制备的吸附剂进行表征。采用批实验考察了吸附时间, 初始氟浓度和共存离子 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 PO_4^{3-}) 对氟吸附性能的影响。结果表明, 3 种吸附剂对氟吸附过程可用准二级动力学模型描述。3 种吸附剂对氟吸附速率主要受液膜扩散速率、颗粒内扩散速率和吸附反应速率共同控制。等温吸附结果显示 Mg-Al-La 对氟吸附能力最大, Mg-Al-Ce 次之, Mg-Al-Zr 最小, 3 种材料对氟吸附规律均符合 Langmuir 等温吸附方程, 其最大饱和吸附量分别为 54.22、51.65、50.89 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。共存离子对 3 种材料吸氟存在不同程度的竞争, 其影响次序是 $\text{Cl}^- < \text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{CO}_3^{2-} \approx \text{HCO}_3^- < \text{PO}_4^{3-}$ 。

关键词: 稀有金属; 含氟废水; 吸附等温线; 吸附动力学; 动边界模型

中图分类号: X131; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4874-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201605160

Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake

WANG Ai-he^{1,2}, ZHOU Kang-gen^{1*}, LIU Xing¹, CHEN Quan-zhou¹, LIU Fang¹

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Municipal and Mapping Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: The Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) composites were prepared by co-precipitation method of Mg, Al, Me (Me = La, Ce, Zr) salt solutions with a molar ratio of 20:1:4. The sample were calcined at 500°C for 5h as the adsorbents for removal of fluoride. The adsorbents were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The patterns of SEM indicated that three calcined sorbents were somewhat agglomerated particles to form a sheet structure after adsorption. The patterns of XRD showed that the three adsorbents formed a metal composite oxide. The effects of adsorption time, initial concentration of fluorine and coexisting ions (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-}) fluoride adsorption properties on three adsorbents were tested by batch adsorption experiments. The results showed that the kinetics of fluorine on three adsorbents were well fitted by pseudo-second-order model. And the adsorption rate of fluoride on three adsorbents decreased in the order of Mg-Al-Zr > Mg-Al-La > Mg-Al-Ce. Regression results of adsorption rate controlling step test by moving boundary model indicated that intra-particle diffusion rate was not the only rate-limiting step in the adsorption of fluoride on the three materials. The equilibrium isotherm showed that the adsorption capacity of fluoride uptake by three adsorbents decreased in the order of Mg-Al-La > Mg-Al-Ce > Mg-Al-Zr. The adsorption isotherm of three adsorbents was very well described by the Langmuir models, and their linear correlations were 0.995 8, 0.979 0, 0.997 5, respectively. The maximum adsorption capacities of fluoride on Mg-Al-La, Mg-Al-Ce, Mg-Al-Zr calculated by Langmuir model were as high as 54.22, 51.65, 50.89 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. The results showed that the co-existing anions such as CO_3^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} had an inhibitory effect on the Mg-Al-La, Mg-Al-Ce, Mg-Al-Zr adsorption of fluoride. The effect of coexisting anions on fluoride adsorption increased in the order of $\text{Cl}^- < \text{NO}_3^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{CO}_3^{2-} \approx \text{HCO}_3^- < \text{PO}_4^{3-}$.

Key words: rare metal; wastewater containing fluoride; adsorption isotherm; adsorption kinetic; moving boundary model

含氟废水主要来源于钢铁制造业、有色金属冶炼、含氟化学肥料的生产、有机氟化学产品和半导体行业等工业生产过程产生废水, 这类工业废水氟浓度一般可达到几十到几千 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [1]。适量的氟对机体牙齿、骨骼的钙化、神经兴奋的传导和酶系统的代谢均有促进作用, 但是长期饮用高氟水会导致氟斑牙和氟骨症, 严重者会导致骨骼变形、关节僵硬、筋腱钙化、行走困难, 甚至瘫痪等 [2]。因此, 世界卫生组织规定饮用水中氟含量不超过 1.5

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 我国《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 中一级排放标准规定废水中氟含量不超过 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [3]。而工业废水氟含量一般都超过数百 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 常采用化学沉淀法 [4] 进行处理, 但处理后

收稿日期: 2016-05-23; 修订日期: 2016-07-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2010ZX07212-008)

作者简介: 汪爱河 (1982 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为含氟废水处理技术, E-mail: hnwaihe409@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhoulkg63@163.com

废水氟含量仍然有 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 需要对出水进行二次处理以达到排放的要求。

含氟废水深度处理方法主要有膜过滤、反渗透、离子交换和吸附等^[5]。吸附法因具有操作简单、成本低、环境友好等特点而备受关注。高效吸附剂的获得是吸附技术关键, 常见的吸附剂主要有沸石^[6]、骨炭^[7]、陶瓷^[8]和类水滑石金属复合氧化物^[9]等, 但这些吸附剂因较低吸附能力或机械强度低而难以推广应用。因此开发吸附效果好和机械强度高的除氟吸附剂迫在眉睫。稀土金属^[10]因具有较高的吸附性能和环境友好被应用到污水处理中, 但有稀土金属价格较贵。水滑石经高温煅烧制得金属复合氧化物是含氟废水处理热门吸附剂之一, 将稀土金属添加到水滑石中有助于提高其吸附能力。王红宇等^[11]用 Mg-Zn-Al 焙烧产物作为吸附剂处理含高氯酸废水, 取得较好的效果。笔者采用共沉淀法制备 Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 金属复合物, 利用 SEM、XRD 等手段对其物理性能进行表征, 并探讨其除氟性能, 以期开发高效价廉的除氟材料提供支持。

1 材料与方法

1.1 试剂

盐酸、氢氧化钠、氯化镁、氯化铝、氯化氧锆、氯化铈、氯化镧、氟化钠、硝酸钠和柠檬酸钠均为分析纯。

1.2 吸附剂的制备

按照 Mg: Al: Me (Me = La, Ce, Zr) = 20: 1: 4 称取一定量的氯化镁、氯化铝、稀土金属氯化物制备成 300 mL 盐溶液, 另称取一定量的氢氧化钠和碳酸钠制备成 300 mL 碱溶液。先在三口烧瓶中加入 400 mL 蒸馏水, 以一定速度用蠕动泵将盐溶液和碱溶液同时滴加到三口烧瓶中, 控制反应 pH 9 ~ 10, 水浴温度 60℃, 并不断搅拌, 滴加结束后, 继续搅拌, 晶化 24 h, 抽滤水洗至中性, 在 80℃ 恒温干燥箱烘烤 24 h, 在 500℃ 马弗炉中煅烧 5 h, 研磨过 100 目筛, 获得吸附材料, 将添加 La、Ce、Zr 的吸附材料分别记为 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce、Mg-Al-Zr。

1.3 吸附动力学实验

分别配置一系列质量浓度为 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 100 mL 模拟含氟废水置于 100 mL 聚氯乙烯瓶中, 分别加入 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce、Mg-Al-Zr, 调节初始 pH 为 6.0, 在 30℃ 水浴振荡器上振荡吸附至设定时间后, 0.22 μm 滤膜过滤取滤液测定氟质

量浓度。每个实验设 3 个平行样, 瞬时吸附量 Q_t ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 取为 3 个平行样的平均值。

1.4 等温吸附实验

设置氟初始质量浓度为 $20 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 投加量 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 初始 pH = 6.0, 水浴温度 30℃, 吸附时间 24 h, 0.22 μm 滤膜过滤取滤液测定氟质量浓度。每个实验设 3 个平行样, 平衡吸附量 Q_e ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 为 3 个平行样的取平均值。

1.5 共存离子对吸附影响

实验设置氟初始为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 初始 pH = 6.0, 吸附剂投加量 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等酸根离子浓度分别为 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸附时间 24 h, 0.22 μm 滤膜过滤取滤液测定氟质量浓度。每个实验设 3 个平行样, 平衡吸附量 Q_e ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 为 3 个平行样的取平均值。

1.6 分析方法

用 X 射线衍射仪 (D/max2550VB+, 日本理学株式会社) 对样品结构进行表征, Cu 靶, Kα 辐射源, $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$, 管电压 36 kV, 管电流 30 mA, 扫描速率 $8(^{\circ}) \cdot \text{min}^{-1}$, $10^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 扫描; 样品形貌特征由场发射扫描电子显微镜 (Nano SEM 230, FEI 公司) 拍摄观察, 工作电压 5 kV, 放大倍数 1 万倍, 溶液中氟离子采用氟离子选择电极进行分析。

2 结果与讨论

2.1 吸附剂性能表征

2.1.1 SEM 分析

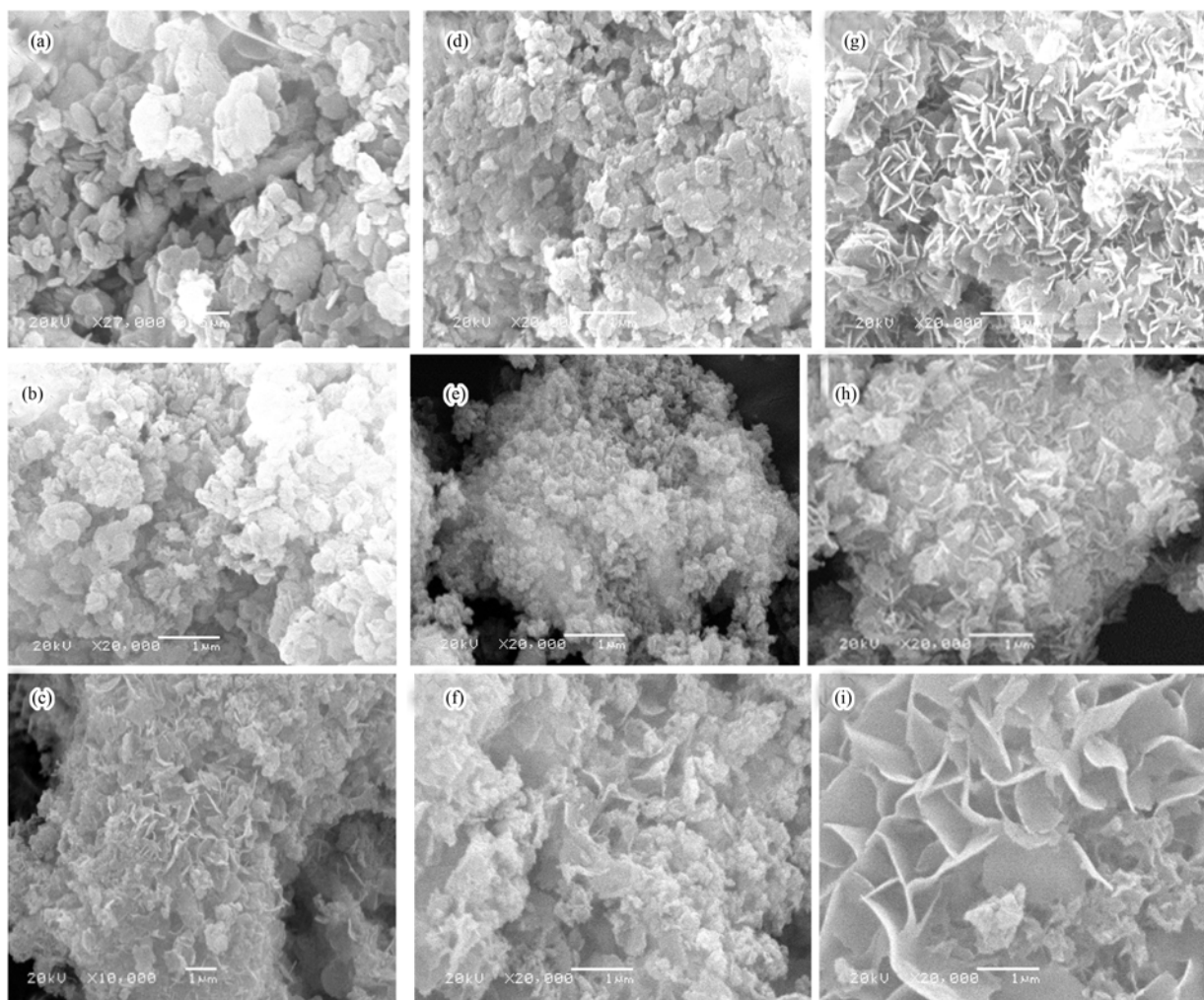
图 1 是 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce、Mg-Al-Zr 煅烧前、煅烧后和吸附后电镜图, 其中, 图 1(a)、1(d)、1(g) 是新鲜制备经 80℃ 烘箱烘烤 24 h 过 100 目筛样品; 图 1(b)、1(e)、1(h) 是经 500℃ 马弗炉煅烧后 5 h 的样品; 图 1(c)、1(f)、1(i) 是在一定氟浓度吸附后的样品。

由图 1 可以看出, La、Ce、Zr 对合成吸附材料的结构有一定的影响, 其中新鲜制备的 Mg-Al-La 和 Mg-Al-Zr 均表现较为层状片状结构。材料煅烧后, 层状结构消失, 3 种材料出现不同程度的亚颗粒团聚体; 吸附后 3 种材料表现出类水滑石良好记忆性能, 都会恢复了层状结构, 但掺 Zr 的层片较大。

2.1.2 XRD 分析

图 2 分别是 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce、Mg-Al-Zr 在 500℃ 马弗炉煅烧 5 h 后的样品。

由图 2 可知, 3 种吸附材料煅烧后 Mg 主要是以为 MgO 形式存在, La 主要以 $\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ 、 La_2CO_3 形



(a) 新鲜制备的 Mg-Al-La, (b) 新鲜制备的 Mg-Al-Ce, (c) 新鲜制备的 Mg-Al-Zr, (d) 煅烧的 Mg-Al-La, (e) 煅烧的 Mg-Al-Ce, (f) 煅烧的 Mg-Al-Zr, (g) 吸附后的 Mg-Al-La, (h) 吸附后的 Mg-Al-Ce, (i) 吸附后的 Mg-Al-Zr

图1 Mg-Al-La, Mg-Al-Ce, Mg-Al-Zr 的电镜图

Fig. 1 SEM images of the Mg-Al-La, Mg-Al-Ce, Mg-Al-Zr samples

式存在, Ce 主要以 CeO_2 形式存在. 没有发现 Al 和 Zr 的特征峰, 推测 Al 和 Zr 主要以无定形的氧化物形式存在.

2.2 吸附动力学

图3 是氟的初始质量浓度为 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 6.0$ 时的吸附动力学曲线. 从中可以看出, 吸附开始阶段的 120 min 内, 3 种材料对氟的吸附都很快; 至吸附 120 min 内, 3 种材料对氟的吸附量分别为 11.68 、 9.65 、 $11.56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 随着吸附时间推移吸附量增加逐渐变小; 240 min 时, Mg-Al-La、Mg-Al-Ce 和 Mg-Al-Zr 对氟基本达到吸附平衡, 其吸附量分别为 11.88 、 11.41 、 $11.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 在吸附初期, 3 种吸附材料上空余吸附位点的数量相对较多; 同时, 由于溶液中氟的质量浓度与吸附材料上的相差较大, 造成吸附系统固-液界面处较大的浓度梯度,

形成较大的传质推动力, 有利于吸附反应的快速进行. 随着时间的延长, 吸附材料上活性吸附位点不断减少、浓度梯度逐渐变小, 吸附反应变得越来越平缓, 最终达到平衡.

为了分析 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce 和 Mg-Al-Zr 对氟吸附速率情况, 分别采用准一级动力学和准二级动力学方程对实验数据进行拟合, 准一级动力学方程和准二级动力学方程^[12]线性表达式如下.

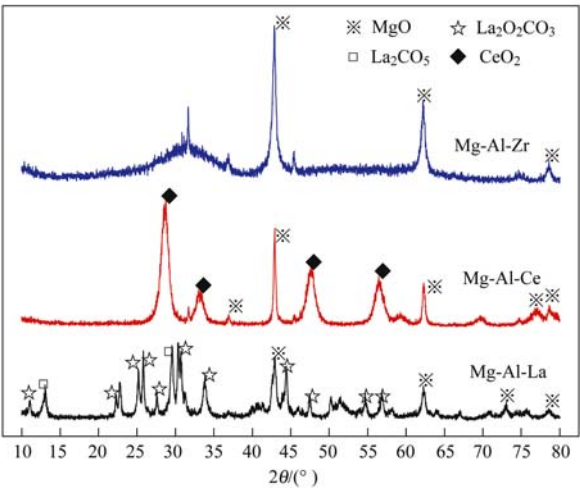
准一级动力学方程:

$$\lg(Q_e - Q_t) = \lg Q_e - k_1 t$$

准二级动力学方程:

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t$$

式中, Q_t 为 t 时刻的吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; t 为吸附时间, min; Q_e 为平衡吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; k_1 为准一级



煅烧条件: 温度 500℃, 时间 5 h
图 2 煅烧后 Mg-Al-La, Mg-Al-Ce, Mg-Al-Zr 的 XRD 图谱
Fig. 2 XRD patterns of Mg-Al-La, Mg-Al-Ce, Mg-Al-Zr

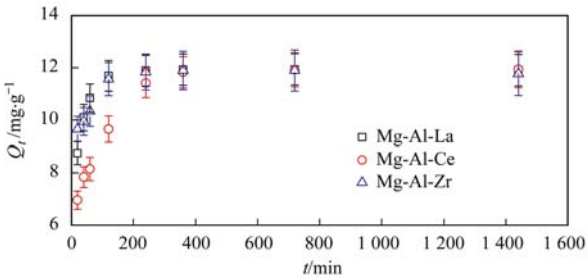


图 3 吸附动力学曲线
Fig. 3 Adsorption kinetic curves

动力学方程吸附常数, min^{-1} ; k_2 为准二级动力学方程吸附常数, $\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$.

拟合结果如图 4 和表 1 所示. 由表 1 可知, 利用准二级动力学方程对实验数据进行拟合的相关系数均大于 0.999, 并且通过此模型计算得到的 Q_e 与实验 Q_t 值十分接近, k_2 值的大小次序是 $\text{Mg-Al-Zr} > \text{Mg-Al-La} > \text{Mg-Al-Ce}$, 说明 Mg-Al-Zr 对氟的吸附速率最大, Mg-Al-La 次之, Mg-Al-Ce 最小. 说明准二级动力学方程非常适合描述氟在 3 种吸附剂上的吸

附, 该吸附过程受化学吸附机制的控制, 化学键的形成是吸附过程的关键, 涉及到吸附剂与吸附质之间的电子共用或电子转移.

为进一步了解 3 种吸附剂对氟的吸附速率限制步骤, 采用动边界模型对实验数据进行拟合分析. 吸附过程分为 3 个阶段^[13, 14]: ① 膜扩散, 氟从液膜边界扩散到吸附剂的表面; ② 颗粒内扩散, 氟从吸附剂表面扩散到吸附剂孔隙中; ③ 吸附反应阶段, 氟在吸附剂内表面进行吸附. 动边界模型^[15]的膜扩散、颗粒扩散和化学反应控制方程可分别表示如下.

膜扩散:

$$\ln(1 - F) = -k_t t$$

吸附反应控制方程:

$$1 - (1 - F)^{1/3} = k_c t$$

颗粒内扩散:

$$1 - 3(1 - F)^{1/3} + 2(1 - F) = k_p t$$

式中, $F = Q_t/Q_e$, Q_t 为 $t(\text{min})$ 时吸附量, Q_e 为平衡吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; k_t 、 k_c 、 k_p 分别为液膜扩散、吸附反应和颗粒扩散的速率常数.

用动边界模型拟合的吸附速率控制步骤的相关参数见表 2, 从中可知, 对于 Mg-Al-La 、 Mg-Al-Ce 、 Mg-Al-Zr , 其吸附反应速率和颗粒内扩散速率均低于膜扩散速率, 这说明 3 种材料对氟的吸附反应速率控制步骤主要是颗粒内扩散和吸附反应过程.

2.3 吸附等温线

吸附等温线是在恒定温度下平衡吸附容量和吸附质平衡浓度的关系曲线, 反映了吸附剂的表面性质、孔结构及吸附质与吸附剂之间的相互作用^[16], 作为优化筛选吸附剂的重要依据. 考察 Mg-Al-La 、 Mg-Al-Ce 、 Mg-Al-Zr 对氟的等温吸附特征. 实验结果如图 5 所示.

表 1 吸附动力学参数

吸附动力学模型		Table 1 Parameters and coefficients of the kinetics equations		
		吸附剂		
		Mg-Al-La	Mg-Al-Ce	Mg-Al-Zr
准一级动力学	$Q_e/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.695 5	2.517	1.274
	$Q_t/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	11.90	11.93	11.77
	k_1/min^{-1}	0.000 9	0.001 4	0.000 7
	R^2	0.416 2	0.735 7	0.318 7
准二级动力学	$Q_e/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	11.96	12.15	11.83
	$Q_t/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	11.90	11.93	11.77
	$k_2/\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$	0.019 23	0.004 059	0.024 94
	R^2	1	0.999 7	0.999 9

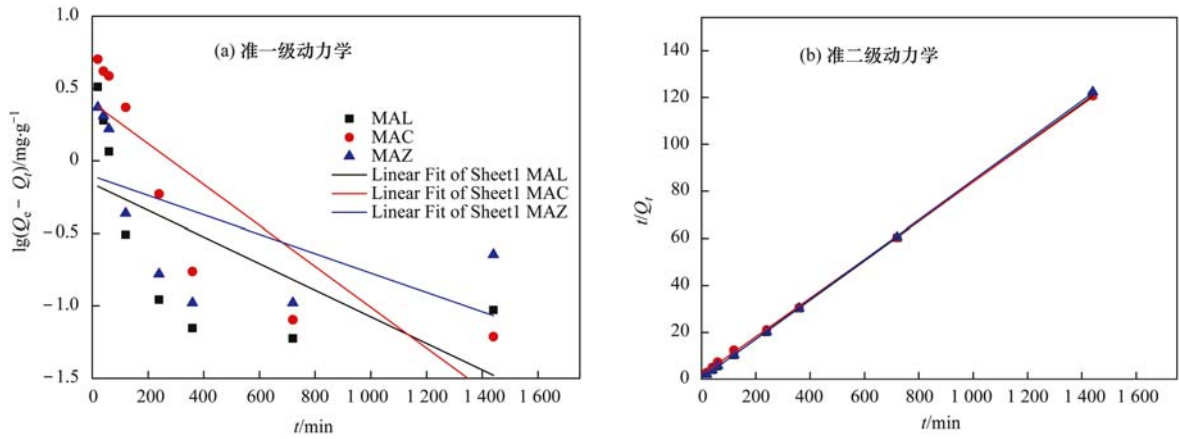


图 4 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce、Mg-Al-Zr 吸附氟的动力学

Fig. 4 Kinetic of fluoride adsorption onto Mg-Al-La, Mg-Al-Ce and Mg-Al-Zr

表 2 吸附速率控制步骤

Table 2 Adsorption rate-controlling steps

吸附剂	膜扩散		颗粒内扩散		吸附反应	
	$k_f \times 10^{-3}$ /min	R^2	$k_p \times 10^{-3}$ /min	R^2	$k_c \times 10^{-3}$ /min	R^2
Mg-Al-La	3.5	0.359 5	0.3	0.372 8	0.3	0.391 5
Mg-Al-Ce	6.7	0.968 1	0.6	0.643 8	0.5	0.736 7
Mg-Al-Zr	3.3	0.129 7	0.3	0.326 1	0.2	0.278 0

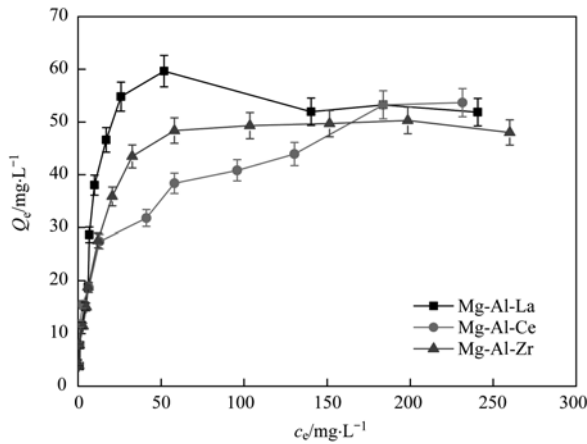


图 5 吸附等温线

Fig. 5 Adsorption isotherm curves

Mg-Al-La、Mg-Al-Ce 和 Mg-Al-Zr 吸附氟的 Langmuir、Freundlich 等温线的各参数以及相关系数列于表 3 和图 6。可以看出,3 种吸附剂对氟的吸附, Langmuir 等温线的相关系数较 Freundlich 等温线高; 表明 3 种吸附剂对氟吸附的实验数据更符合 Langmuir 等温线方程; 说明 3 种吸附剂对氟吸附为单层吸附, 提供的吸附位点具有相同的吸附能, 对氟具有相同的亲和力。计算的 Q_e 与实验值较为接近。3 种吸附对氟吸附的 Freundlich 等温线参数 n 均大于 2, 表明 3 种吸附剂较易吸附氟。表 4 显示, 实验制备的 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce、Mg-Al-Zr 复合吸附剂优于大多数已报道的吸附剂除氟能力, 说明实验制备的复合吸附剂可以应用到工业含氟废水的深度处理中。

表 3 吸附等温线参数

Table 3 Parameters and coefficients of isotherms equations

吸附等温式	参数	吸附剂		
		Mg-Al-La	Mg-Al-Ce	Mg-Al-Zr
Freundlich	$k_F/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	8.725	8.906	8.050
$\lg Q_e = \lg k_F + \frac{1}{n} \lg c_e$	$n/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	2.402	2.941	2.562
	R^2	0.751 3	0.910 2	0.897 0
Langmuir	$Q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	54.22	51.65	50.89
$\frac{c_e}{Q_e} = \frac{1}{bQ_m} + \frac{c_e}{Q_m}$	b	0.166 5	0.084 8	0.135 7
	R^2	0.995 8	0.979 0	0.997 5

1) Q_e 为平衡时氟吸附容量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; Q_m 为氟最大吸附容量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; c_e 为吸附平衡时溶液中氟质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; b 为 Langmuir 吸附方程常数; k_F 为 Freundlich 方程速率常数

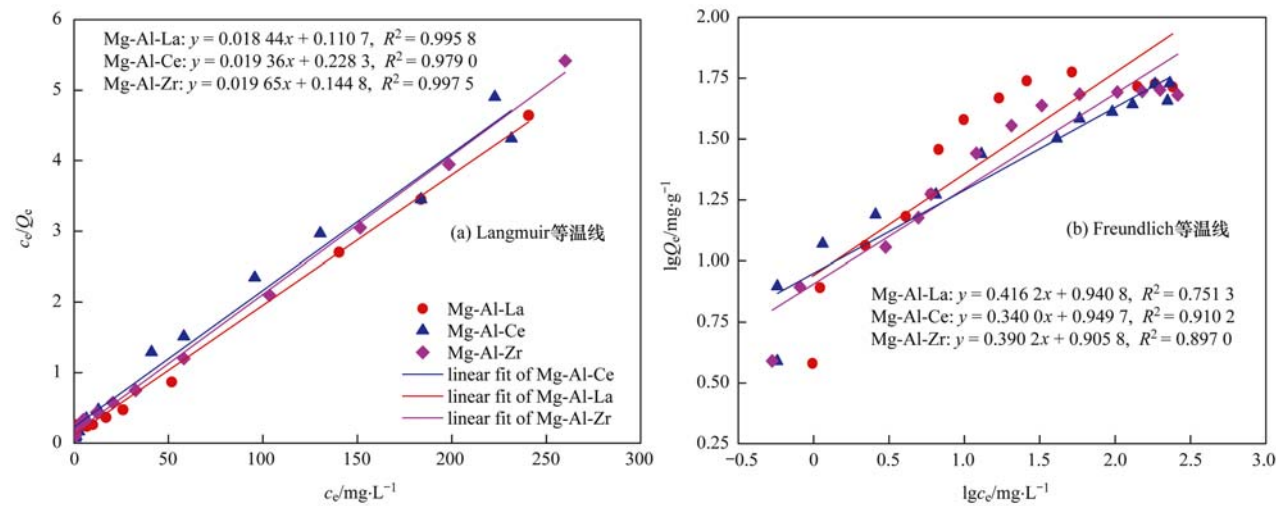


图6 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce、Mg-Al-Zr 对氟的吸附等温线

Fig. 6 Adsorption isotherms of fluoride onto Mg-Al-La, Mg-Al-Ce, Mg-Al-Zr

2.4 共存离子对吸附的影响

含氟废水通常会含有 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等多种阴离子; 已有报道指出^[17, 18], 这些离子存在会和氟产生竞争吸附, 为考察这些离子对氟吸附影响, 实验结果如图7所示。

由图7可知, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 对3

种材料吸附氟有一定的影响, 而 Cl^- 和 NO_3^- 影响甚微。 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 这4种阴离子之所以对材料除氟性能产生影响, 是因为这4种阴离子在溶液体系中同氟离子形成竞争吸附, 减少了吸附氟离子的活性位点。 阴离子对氟离子吸附的影响可能与材料对它们的吸引力有关。 阴离子所带电荷越多, 材料对其吸引力越大。

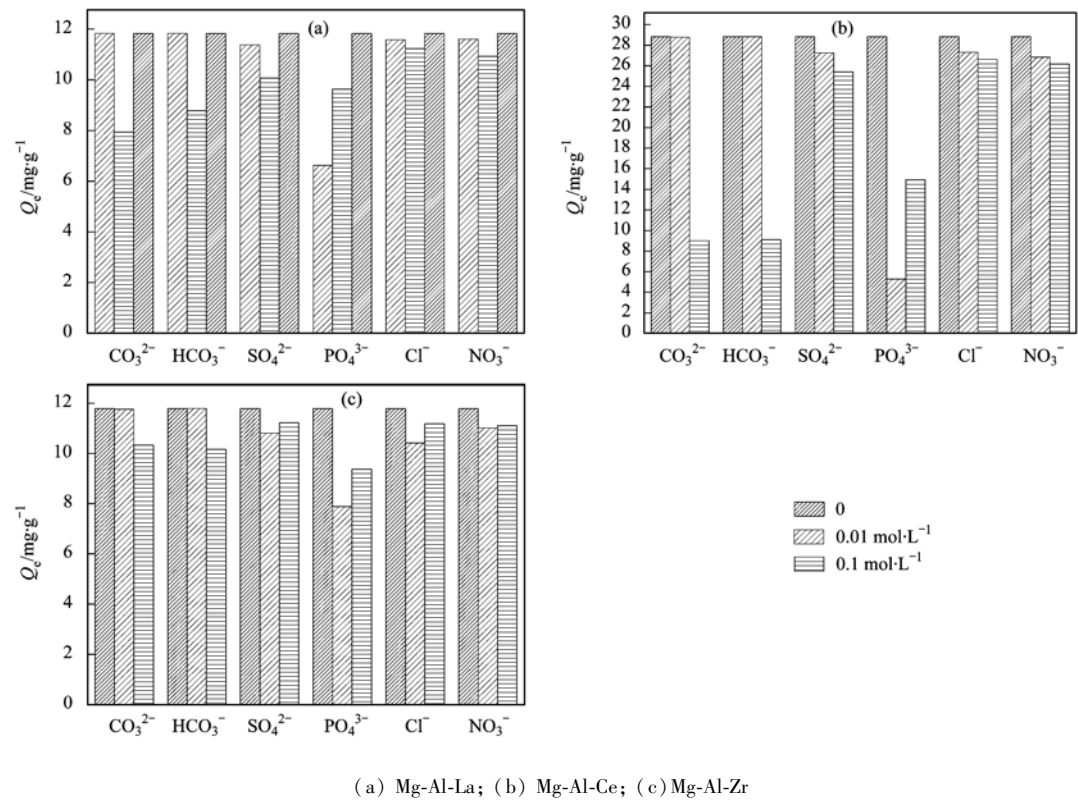


图7 共存离子对吸附的影响

Fig. 7 Effect of co-ions on fluoride adsorption

表 4 不同吸附剂最大氟吸附容量比较
Table 4 Comparison of maximum fluoride adsorption capacity of different adsorbents

吸附剂	最大吸附容量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
Ca-Al-Mg	29.30	[19]
氯化钙改性沸石	1.76	[20]
颗粒酸改性膨润土	4.95	[21]
Zr-DOJR	27.17	[22]
Ce-DOJR	23.18	[22]
Al-DOJR	12.73	[22]
Mg-Cr-Cl	13.15	[23]
HCZMO	19.50	[24]
多孔氧化铁	6.71	[25]
$\text{NO}_3\cdot\text{Mg-Al LDH}$	72.2	[26]
Mg-Al-La	54.22	本研究
Mg-Al-Ce	51.65	本研究
Mg-Al-Zr	50.89	本研究

3 结论

(1) 通过双滴共沉淀-煅烧法制备的 Mg-Al-La、Mg-Al-Ce 和 Mg-Al-Zr 这 3 种金属复合吸附剂层状结构明显,颗粒大小不一。

(2) 3 种吸附剂对氟的等温吸附特征可用 Langmuir 等温线方程描述,计算 3 种材料对氟的饱和吸附容量分别为 54.22、51.65、50.89 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

(3) 3 种材料对氟的吸附动力特征可用准二级动力学方程描述,其对氟的吸附速率主要受到颗粒内扩散和吸附反应共同控制。

(4) 共存离子 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 对制备的复合吸附剂除氟有一定的影响,而 Cl^- 和 NO_3^- 影响甚微。

参考文献:

[1] Liu Q, Zhang L J, Yang B C, *et al.* Removal of fluoride from aqueous solution using Zr(IV) immobilized cross-linked chitosan [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, **77**: 15-23.

[2] Yu Y, Yu L, Chen J P. Adsorption of fluoride by Fe-Mg-La triple-metal composite: adsorbent preparation, illustration of performance and study of mechanisms[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **262**: 839-846.

[3] Wu H X, Wang T J, Chen L, *et al.* Granulation of Fe-Al-Ce hydroxide nano-adsorbent by immobilization in porous polyvinyl alcohol for fluoride removal in drinking water [J]. Powder Technology, 2011, **209**(1-3): 92-97.

[4] Jiang K, Zhou K G, Yang Y C, *et al.* A pilot-scale study of cryolite precipitation from high fluoride-containing wastewater in a reaction-separation integrated reactor [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(7): 1331-1337.

[5] Poursaberi T, Hassanisadi M, Torkestani K, *et al.* Development of zirconium (IV)-metalloporphyrin grafted Fe_3O_4 nanoparticles for efficient fluoride removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **189-190**: 117-125.

[6] Miretzky P, Cirelli A F. Fluoride removal from water by chitosan derivatives and composites: a review [J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2011, **132**(4): 231-240.

[7] Rojas-Mayorga C K, Bonilla-Petriciolet A, Aguayo-Villarreal I A, *et al.* Optimization of pyrolysis conditions and adsorption properties of bone char for fluoride removal from water [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, **104**: 10-18.

[8] Chen N, Zhang Z Y, Feng C P, *et al.* Fluoride removal from water by granular ceramic adsorption[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, **348**(2): 579-584.

[9] Koilraj P, Kannan S. Aqueous fluoride removal using ZnCr layered double hydroxides and their polymeric composites: batch and column studies[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **234**: 406-415.

[10] Rodrigues E, Pereira P, Martins T, *et al.* Novel rare earth (Ce and La) hydrotalcite like material: synthesis and characterization [J]. Materials Letters, 2012, **78**: 195-198.

[11] 王红宇, 刘艳. 类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2585-2589.

Wang H Y, Liu Y. Adsorption of perchlorate by calcined Mg/Zn/Al layered double hydroxides [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2585-2589.

[12] Qiu H, Lv L, Pan B C, *et al.* Critical review in adsorption kinetic models[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2009, **10**(5): 716-724.

[13] Tang D D, Zhang G K. Efficient removal of fluoride by hierarchical Ce-Fe bimetal oxides adsorbent: thermodynamics, kinetics and mechanism [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **283**: 721-729.

[14] 郭俊元, 王彬. HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1852-1857.

Guo J Y, Wang B. Preparation of HDTMA-modified zeolite and its performance in nitro-phenol adsorption from wastewaters[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1852-1857.

[15] 孙德帅, 郑强强, 张晓东, 等. 粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2590-2595.

Sun D S, Zheng Q Q, Zhang X D, *et al.* Adsorption kinetic mechanism of ionic soluble dye mixture on fly ash [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2590-2595.

[16] 张伟, 陈静, 张高生. 铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4198-4204.

Zhang W, Chen J, Zhang G S. Preparation and evaluation of Fe-La composite oxide nanoadsorbent for As (Ⅲ) removal from aqueous solutions[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4198-4204.

[17] He J S, Siah T S, Chen J P. Performance of an optimized Zr-based nanoparticle-embedded PSF blend hollow fiber membrane in treatment of fluoride contaminated water[J]. Water Research, 2014, **56**: 88-97.

[18] Dong S X, Wang Y L. Characterization and adsorption properties of a lanthanum-loaded magnetic cationic hydrogel composite for fluoride removal[J]. Water Research, 2016, **88**: 852-860.

[19] Xiang W, Zhang G L, Zhang Y L, *et al.* Synthesis and

- characterization of cotton-like Ca-Al-La composite as an adsorbent for fluoride removal[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **250**: 423-430.
- [20] Zhang Z J, Tan Y, Zhong M F. Defluorination of wastewater by calcium chloride modified natural zeolite [J]. Desalination, 2011, **276**(1-3): 246-252.
- [21] Ma Y X, Shi F M, Zheng X L, *et al.* Removal of fluoride from aqueous solution using granular acid-treated bentonite (GHB): batch and column studies[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **185**(2-3): 1073-1080.
- [22] Paudyal H, Pangen B, Inoue K, *et al.* Adsorptive removal of trace concentration of fluoride ion from water by using dried orange juice residue[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **223**: 844-853.
- [23] Mandal S, Tripathy S, Padhi T, *et al.* Removal efficiency of fluoride by novel Mg-Cr-Cl layered double hydroxide by batch process from water [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(5): 993-1000.
- [24] Ghosh A, Chakrabarti S, Biswas K, *et al.* Agglomerated nanoparticles of hydrous Ce (IV) + Zr (IV) mixed oxide: preparation, characterization and physicochemical aspects on fluoride adsorption[J]. Applied Surface Science, 2014, **307**: 665-676.
- [25] Nur T, Loganathan P, Nguyen T C, *et al.* Batch and column adsorption and desorption of fluoride using hydrous ferric oxide: solution chemistry and modeling [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **247**: 93-102.
- [26] Kameda T, Oba J, Yoshioka T. Continuous treatment of boron and fluoride in aqueous solutions using a column loaded with granulated Mg-Al layered double hydroxides intercalated with nitrates[J]. Journal of Water Process Engineering, 2015, **8**: 195-201.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2016 年 10 月 12 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2015 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2015 年度总被引频次 8 844,影响因子 1.617,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《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12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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