

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

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

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明	(1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水正	(8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思	(15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳	(21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氮挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远	(27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋	(34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨	(39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜(DMSO)的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋	(45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇	(51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙	(61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁	(69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍	(77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军	(84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元	(91)
湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山	(98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男	(108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟	(116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强	(121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军	(129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新	(137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦	(145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民	(150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳	(156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐	(163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直	(169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺	(177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴	(182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓	(188)
污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇	(194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根	(198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文	(204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢	(209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立栲,何宝燕,李跃鹏	(217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳	(226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南	(231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛	(237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福	(244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	千志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏	(251)
多效应残差法(MERA)表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾	(257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远	(263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文	(271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林	(277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国	(283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博	(288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇	(293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟	(302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少锋,贾永锋	(308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲	(315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎	(321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志	(328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易	(336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强	(347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文		
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛	(357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正	(364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强	(373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维	(379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新	(385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌	(395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌	(401)
《环境科学》征订启事(26)	《环境科学》征稿简则(68)	信息(76,144,301,400)
		专辑征稿通知(394)

活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究

孟文娜, 谢杰, 吴德意*, 张振家, 孔海南

(上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 使用活性氧化铝作为吸附剂研究其对磷的吸附特性, 并对不同提取剂对磷的回收效果进行了讨论. 结果表明, 活性氧化铝对使用蒸馏水、自来水及洱海入湖河流罗时江水配制的磷溶液有不同的磷吸附效果, 其对 3 种不同磷溶液的吸附等温线模型均符合 Langmuir 模型, 经计算得到理论最大吸附量分别为 20.88、32.15 和 29.85 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 通过吸附试验表明, 电解质的存在对吸附效果有促进作用. pH 值越低, 活性氧化铝表面的 Zeta 电位越高, 越有利于磷吸附. 对比使用 4 种不同提取剂的试验结果表明, 使用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 基本可以完全提取活性氧化铝吸附的磷.

关键词: 活性氧化铝; 磷; 吸附; 回收; 电解质

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0231-06

Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina

MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, ZHANG Zhen-jia, KONG Hai-nan

(School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Activated alumina was studied for removing phosphate from water, and the recovery of adsorbed phosphate on activated aluminum oxide was also tested. Phosphate solution was prepared using distilled water, tap water and Luoshijiang River water, respectively. All the phosphate adsorption tests using activated alumina were proved to be well fitted with Langmuir isotherm and the respective maximum adsorption amount were 20.88, 32.15 and 29.85 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The presence of electrolyte in water could be a positive factor for phosphate removal. As the pH value of phosphate solution became lower the Zeta potential of activated alumina increased, which could enhance the phosphate removal efficiency of activated alumina. The recovery tests indicated that NaOH ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) solution could almost completely extract the phosphate adsorbed by activated alumina.

Key words: activated alumina; phosphate; adsorption; recovery; electrolyte

近年来我国水体富营养化问题和灾害日益严重, 而磷是影响湖泊和水库等相对静止的淡水水体中藻类生长的主要因素, 是水体富营养化的主要原因^[1]. 在浅水湖泊中, 磷浓度增加到一定临界值以上会导致湖泊由良性的草型清水稳态向恶性的藻型浊水稳态转变. 这种转变一旦发生, 要恢复到之前的草型清水稳态, 则需要将磷浓度降低到比前述临界值低得多的浓度^[2,3].

另一方面, 磷肥是农作物稳产增产不可缺少的肥料, 但磷在地球生态系统中是一种有限的资源, 主要来源为磷矿. 由于土壤中钙、铁和铵离子的存在, 用作肥料的磷酸盐大多变成不溶性的盐固结在土壤深层沉积物中. 而且磷在地球生态系统中具有沉积型循环的特征, 随降水流入海洋的磷几乎不能回到陆地.

基于以上背景, 一方面要加强水处理中脱磷技术的开发, 另一方面也要研究水处理中磷资源的回收再利用. 吸附法除磷具有稳定性好、成本较低、占地面积小和可以进行磷回收等特点, 因此近年来出现了不少对于磷吸附材料的研究, 包括炉渣、钢渣、氧化铁、

氧化铝、粉煤灰及其合成沸石、方解石、类水滑石等^[4-12]. 关于活性氧化铝除磷也有一些研究^[5,7,13-15], 但详细的研究仍较缺乏, 尤其对于电解质共存条件下的影响(实际污水或自然水体中均存在不同含量的电解质)以及吸附达到饱和后的处置问题尚很少有人关注. 本研究的目的是探讨活性氧化铝对磷的吸附特性及吸附磷的提取回收方法.

1 材料与方法

1.1 试验材料

氧化铝呈现多种结构形态, 其物化特性大不相同. 本研究的活性氧化铝购自江苏某公司, 主要用作自来水除氟材料. 该材料为表面光滑的白色球状物, 粒径 3~5 mm. 除吸附磷的提取回收试验直接使用球状颗粒外, 其它试验中均对活性氧化铝球状

收稿日期: 2012-03-22; 修订日期: 2012-05-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07105003-03, 2012ZX07105002-03)

作者简介: 孟文娜(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境吸附材料, E-mail: xiejie@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: dywu@sjtu.edu.cn

颗粒进行研磨且过 16 目筛. 活性氧化铝的电子显微镜照片表明, 活性氧化铝材料的表面粗糙多孔 (图 1). 经测试, 该材料的比表面积为 $298.3 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. X 射线粉晶衍射鉴定结果 (图 2) 表明, 该材料为 $\text{X-Al}_2\text{O}_3$ 和勃姆石 ($\alpha\text{-AlOOH}$) 的混合物.

吸附试验使用 KH_2PO_4 (分析纯, 上海埃彼化学试剂有限公司) 配制磷溶液, 磷回收试验所用试剂 NaOH , NaHCO_3 , NH_4F 均为分析纯 (国药集团上海化学试剂有限公司).

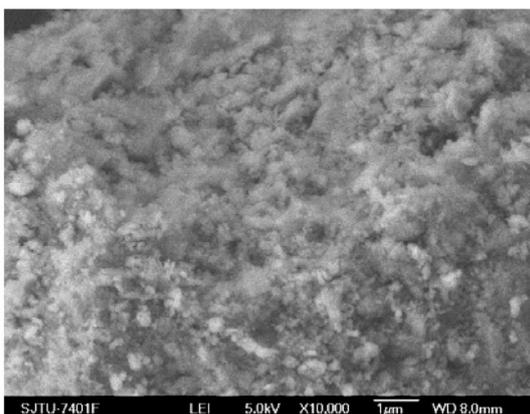


图 1 活性氧化铝的电子显微镜照片

Fig. 1 SEM photographs of activated aluminum oxide

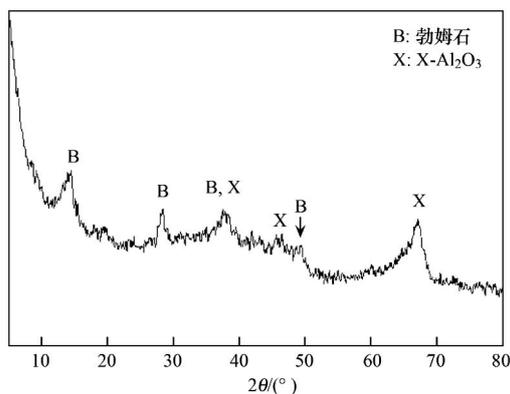


图 2 活性氧化铝的 X 射线衍射图

Fig. 2 XRD patterns of activated aluminum oxide

1.2 试验方法

材料表征: 使用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪 (40 kV , 40 mA , $\text{Cu-K}\alpha$, $2\theta: 3^\circ \sim 80^\circ$) 鉴定矿物结晶成分; 使用 JEOL JSM-7401F 型场发射扫描电子显微镜观察形貌; 比表面积使用 BET 氮气吸附法 (美国康塔仪器 NOVA2200e 高速自动比表面与孔隙度分析仪) 测定; Zeta 电位采用 Zetasizer 2000-Malvern 测定仪测定; pH 值使用 Hach sensION + 便携式测定仪测定; 电导率采用 HANNA DiST 4 便携式测定仪检测.

吸附试验: 称取 0.1 g 粉末活性氧化铝放入 50 mL 离心管中, 加入 40 mL 分别由蒸馏水、自来水和云南洱海的人湖河流之一的罗时江水配制的不同浓度的含磷溶液 ($0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 在 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 下进行振荡吸附, 24 h 后离心分离, 采用钼锑抗分光光度法测定上清液中磷的含量, 并按式 (1) 计算吸附材料对磷吸附量.

$$q_e = (c_0 - c_1) \cdot V/m \quad (1)$$

式中, q_e 为磷吸附量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); c_0 , c_1 分别为吸附前、吸附后磷溶液浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为磷溶液体积 (L); m 为吸附材料的质量 (g).

探讨 pH 值、吸附剂投加量和盐度对磷吸附影响时采用的磷初始浓度均为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸附试验条件与上述相同. 探讨 pH 值和投加量影响时的磷溶液采用蒸馏水配制, 而探讨盐度影响时采用不同浓度 (0 , 0.05 , 0.1 , 0.2 和 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的 NaCl 溶液配制. pH 调节使用 NaOH 和 HCl 溶液.

吸附磷的提取试验: 向 150 mL 的锥形瓶中, 分别加入磷浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟含磷废水 100 mL (蒸馏水配制), 加入 0.2 g 活性铝, 于 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 下振荡 24 h 后, 经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维素滤膜过滤后, 采用钼锑抗分光光度法测定滤液中磷的含量并计算吸附量. 吸附饱和后的活性氧化铝通过蒸馏水清洗后, 分别加入 100 mL 4 种脱附剂: $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH , 盐酸-氟化铵 (NH_4F $0.03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 HCl $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 以及 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 ($\text{pH} = 8.5$), 于 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 下振荡 24 h 后, 用 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维素滤膜过滤, 测定滤液中磷的含量, 按式 (2) 计算脱附率.

$$R = m_b/m_a \cdot 100\% \quad (2)$$

式中, R 为磷的脱附率 ($\%$); m_a 为磷饱和氧化铝中磷的含量 (g); m_b 为滤液中磷的含量 (g).

2 结果与讨论

2.1 活性氧化铝对磷酸盐的等温吸附

活性氧化铝对蒸馏水、自来水和罗时江河水中的磷的吸附等温线示于图 3. 吸附等温线的初始阶段接近于垂直, 这是由于活性氧化铝对于磷酸盐具有良好的亲和性, 因此在低浓度时几乎 100% 的磷都被吸附, 水中残留的磷含量很少. 这一特性在实际水处理时非常有利, 因为实际污水或低污染水中的磷浓度相对于吸附等温线研究所采用的磷浓度而言均很低. 随着磷浓度的进一步增加, 吸附等温线变得缓和并具有达到饱和的趋势, 这是由于活性氧化

铝表面的吸附位逐渐被占据,磷酸盐越来越难以找到空的吸附位. 按照 Giles^[16]对固-液吸附等温线的分类,很显然图 3 的等温线属于 L 型,可采用 Langmuir 吸附模型进行拟合:

$$c_e/q_e = c_e/b + 1/kb \quad (3)$$

式中, c_e 为平衡浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), q_e 为平衡吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), b 为理论最大吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), k 为常数. 拟合结果表明,活性氧化铝对蒸馏水、自来水和罗时江河水中的磷吸附等温线均符合 Langmuir 模型,相关系数 (R^2) 分别为 0.986 1、0.990 5 和 0.994 6. 由模型计算得到的理论最大吸附量示于表 1. 为便于对比活性氧化铝和其它磷吸附材料的除磷能力,表 1 还列出了近年文献中报道的一些磷吸附材料的 Langmuir 理论最大吸附量.

由表 1 可见,活性氧化铝对磷具有很大的吸附能力,且其除磷作用与电解质的存在有关. 活性氧化铝对磷的吸附能力依次为:上海闵行自来水 > 云南罗时江河水 > 蒸馏水. 蒸馏水的电导率极低

表 1 磷吸附能力对比

Table 1 Comparison of phosphate adsorption maxima of the tested materials

材料	温度/ $^{\circ}\text{C}$	电解质	$b/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
活性氧化铝	25	无	20.88	本研究
活性氧化铝	25	自来水	32.15	本研究
活性氧化铝	25	罗时江河水	29.85	本研究
氧化铁	21 ~ 22	无	8.21	[4]
合成氧化铝	22	$0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl	35.03	[5]
水铁矿	22	$0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl	42.78	[5]
针铁矿	22	$0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl	6.42	[5]
高炉矿渣	25	$0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl	44.25	[6]
天然沸石	25	$0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl	2.15	[6]
铝土矿	21	$0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2	0.61	[11]
页岩	21	$0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2	0.65	[11]
石灰石	21	$0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2	0.68	[11]
层状双氢氧化物	30	无	19.1	[12]

2.2 电解质对活性氧化铝除磷的影响

为进一步探讨电解质对活性氧化铝除磷的影响,研究了活性氧化铝在不同浓度(0、0.05、0.1、0.2 和 $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) NaCl 溶液条件下对磷的吸附作用,试验结果见图 4. 很显然,NaCl 的存在明显提高了活性氧化铝的固磷能力,尤其是在 NaCl 浓度较低的情况下,固磷能力随 NaCl 浓度升高明显增加.

铁和铝的(氢)氧化物对磷酸盐的吸附可归因于磷酸盐与吸附剂表面羟基之间的反应. 这一反应分为化学吸附(又称配位吸附,形成吸附剂和磷酸盐之间无水分子层存在的内层表面复合物)和物理吸附(又称静电吸附,形成吸附剂和磷酸盐之间至

($0.04 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$),试验测得上海自来水和罗时江河水的电导率分别为 $0.66 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $0.26 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. 由此推断,电解质的存在对活性氧化铝的固磷作用具有促进效果.

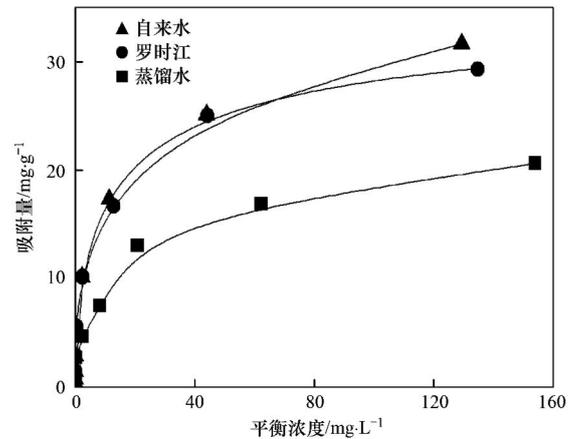
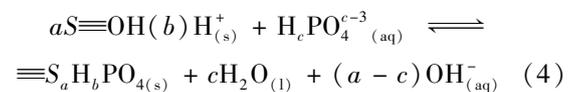


图 3 活性氧化铝对磷的吸附等温线

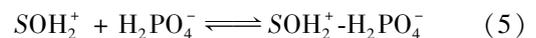
Fig. 3 Adsorption isotherms for phosphate on activated aluminum oxide

少有一层水分子层存在的外层表面复合物). 配位吸附机制可以表达为:



式中, S 为金属原子(Fe 或 Al), OH 为羟基, a 、 b 、 c 为系数,其中 c 为磷酸根离子所含的质子数,取值 ≤ 3 .

静电吸附机制为带负电的磷酸根与带正电的氧化物表面之间的静电引力,可以表达为:



以上 2 种机制的最大差异为吸附产物的稳定性. 配位吸附产物稳定,只有当阴离子(例如 OH^{-} ,

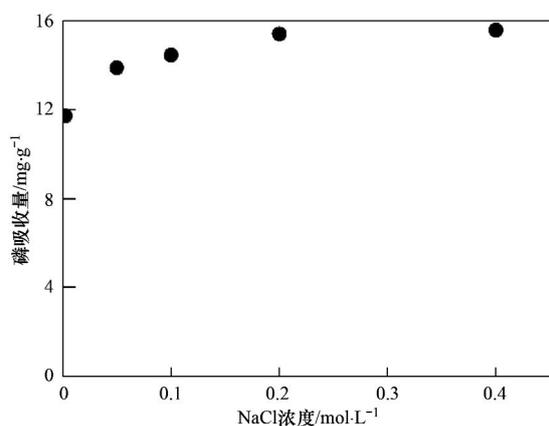


图 4 NaCl 对活性氧化铝吸附磷的影响

Fig. 4 Effect of NaCl on the adsorption of phosphate

F⁻等)能与氧化物形成配位复合物时,吸附的磷酸根才能被交换出来.而静电吸附产物的吸附力较弱,很容易被其它阴离子所交换出来.

前人对氧化铁矿物(针铁矿)的固磷作用的研究结果表明^[17~20],在酸性条件下(pH = 3.0)随着电解质(Cl⁻或NO₃⁻等阴离子)浓度的增加,磷的吸附能力越低,反映了此时存在静电吸附.但在pH值为4.5时磷的吸附与电解质浓度无关,而在中性和碱性条件下(pH > 6.0)则随着电解质浓度的增加,磷吸附量也增加.本研究中活性氧化铝在不人工加酸或碱调节的情况下初始pH值为6.3,与50 mg·L⁻¹磷酸盐反应后的pH值为8.0,磷的吸附也是随着电解质浓度的提高而增加.很显然活性氧化铝对磷的吸附作用主要不是静电吸附,而是配位吸附.笔者推断,电解质浓度增加对活性氧化铝固磷的促进作用和针铁矿固磷作用一样,是由于电解质浓度的增加提高了水和吸附剂之间的界面电位(Zeta 电位),从而增加了吸附剂对磷酸根阴离子的吸引力,并由此增加了磷的吸附作用.

2.3 pH 对活性氧化铝除磷的影响

由图 5 可见,活性氧化铝对磷的吸附在酸性条件下最大,当 pH 值低于 5.5 时磷的去除率接近 100%.大约在中性 pH 条件(pH 值约为 6.5)以上随着 pH 的增加磷的吸附急剧下降,pH 为 9.9 时磷的去除率仅为 12%.前人对其它铁铝氧化物的脱磷研究也发现了同样的趋势^[7,17~24].

由磷的吸附机制可知,配位吸附为产生 OH⁻的反应,因此在 pH 低的酸性条件下无疑有利于配位吸附反应的进行.另一方面,在 pH 足够低的酸性条件下,活性氧化铝将带足够多的正电荷,因此也有利于静电吸附反应的进行.由图 6 可见,活性氧化铝

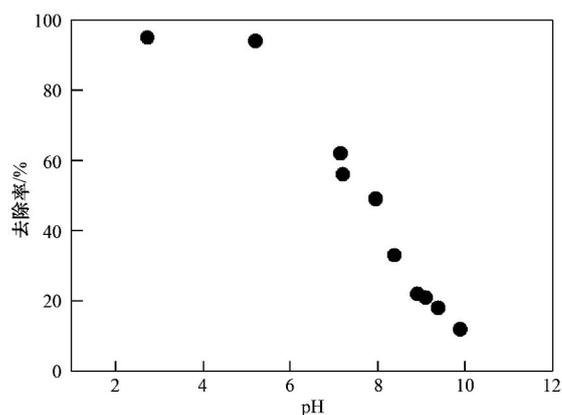


图 5 pH 值对活性氧化铝吸附磷的影响

Fig. 5 Effect of pH on the adsorption of phosphate

的表面 Zeta 电位随着 pH 的增加而降低,大约在 pH 6.5 时所带正电荷已极少,零电荷点大约为 8.5.在 pH 约 8.5 以上,活性氧化铝带负电.这一趋势很好地对应于活性氧化铝的脱磷反应随 pH 的变化.无论何种吸附机制的情况下,活性氧化铝表面 Zeta 电位的升高,都将有利于减少活性氧化铝表面与带负电的磷酸根之间的排斥作用,从而促进磷的吸附固定作用.

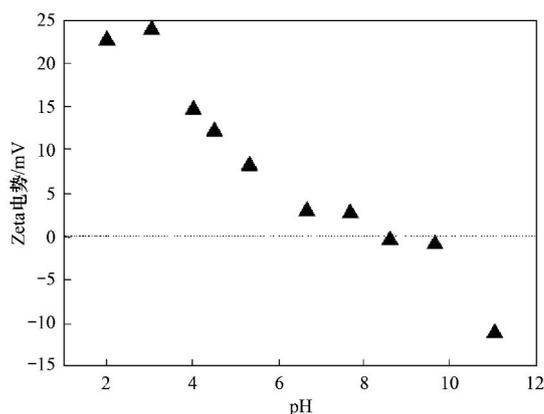


图 6 不同 pH 值下活性氧化铝的表面 Zeta 电势

Fig. 6 Zeta potential of activated aluminum oxide at different pH levels

2.4 投加量对活性氧化铝除磷的影响

图 7 显示的是活性氧化铝在投加量为 0.5 g·L⁻¹~20 g·L⁻¹之间时,对 40 mL 磷酸盐溶液(50 mg·L⁻¹)的吸附效果.投加量的增加意味着对于同样多的磷酸盐而言吸附表面积和吸附位更多,因此随着投加量的增加,磷的吸附去除率也随之增加.但另一方面,单位质量吸附剂的固磷量随着投加量的增加而减少.从节约吸附剂方面考虑,投加量应该选用合适的剂量.从试验结果来看,无论是磷的

去除效率还是单位质量吸附剂的固磷量,在活性氧化铝投加量为 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上时趋于缓和. 因此对于活性氧化铝固磷作用而言,似乎存在一个比较经济合理的投加量(约 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$).

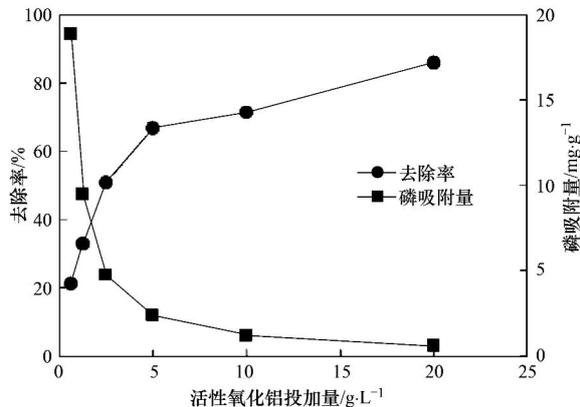


图7 投加量与磷吸附去除效果的关系

Fig. 7 Relationship between the dose of activated aluminum oxide and the removal efficiency

3 活性氧化铝的再生方法

考虑到实际应用的情况,研究材料选用市售的球状活性氧化铝与经研磨处理的粉末氧化铝. 试验结果表明,在同等吸附剂投加量和磷浓度条件下,球状活性氧化铝的固磷量($5.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)明显低于粉末状活性氧化铝($16.19 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). 这说明,市售用于自来水除氟的活性氧化铝的造粒方法并不适合于除磷. 因为磷酸根的离子直径比氟离子大得多,所以为充分发挥活性氧化铝的除磷能力,今后仍有必要研究适合于除磷的造粒方法.

吸附法除磷尽管具有诸多优点,但吸附剂最终将达到饱和,需要进行再生处理. 试验所选用磷回收药剂的依据是: NaHCO_3 和酸性 NH_4F 是用于分析提取土壤中对植物有效的磷酸盐的常用试剂,前者可用于各种 pH 的土壤,而后者适合于酸性土壤^[25]; $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 是磷分级提取中用于提取测定土壤或底泥中铁铝结合态磷的试剂^[8]; $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 则是为了考察较低浓度的 NaOH 对活性氧化铝的再生效果.

提取试验的结果表明,不同试剂对活性氧化铝所吸附磷的提取效果不尽相同. $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 几乎可以完全提取吸附态磷,提取率达到 97.4%; 而 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 和 $\text{NH}_4\text{F}\cdot\text{HCl}$ 的提取效果也较好,且两者之间的差异不大,提取率分别为 89.1% 和 87.3%. 相比较而言, NaHCO_3 的提取效果最差,仅为 54.9%.

4 结论

(1) 活性氧化铝对水中的磷具有较好的吸附固定效果,对蒸馏水、上海闵行自来水和云南罗时江河水配制磷溶液中磷的 Langmuir 理论最大吸附量分别达到 20.88、32.15 和 29.85 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$.

(2) 活性氧化铝的除磷机制主要为配位吸附,溶液中电解质的存在促进活性氧化铝的除磷作用.

(3) 溶液 pH 值对吸附作用有明显的影响,pH 值越低,活性氧化铝表面的 Zeta 电位越高,越有利于磷吸附作用.

(4) 使用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 基本可以完全提取活性氧化铝吸附的磷,适于提取与回收吸附剂吸附的磷.

参考文献:

- [1] Manuel C M Jr. Ecology: concepts and applications [M]. Boston: McGraw-Hill Inc., 1999.
- [2] Schefer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems[J]. Nature, 2001, **413**(6856): 591-596.
- [3] 日本総合地球環境学研究所. 地球環境学事典[M]. 東京: 弘文堂, 2010.
- [4] Zeng L, Li X M, Liu J D. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using iron oxide tailings[J]. Water Research, 2004, **38**(5): 1318-1326.
- [5] Borggaard O K, Raben-Lange B, Gimsing A L, et al. Influence of humic substances on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides[J]. Geoderma, 2005, **127**(3-4): 270-279.
- [6] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, **32**(2): 393-399.
- [7] Tanada S, Kabayama M, Kawasaki N, et al. Removal of phosphate by aluminum oxide hydroxide[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, **257**(1): 135-140.
- [8] Chen J G, Kong H N, Wu D Y, et al. Removal of phosphate from aqueous solution by zeolite synthesized from fly ash[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, **300**(2): 491-497.
- [9] Guan Q Y, Hu X Z, Wu D Y, et al. Phosphate removal in marine electrolytes by zeolite synthesized from coal fly ash[J]. Fuel, 2009, **88**(9): 1643-1649.
- [10] Song Y H, Hahn H H, Hoffmann E. Effects of solution conditions on the precipitation of phosphate for recovery a thermodynamic evaluation[J]. Chemosphere, 2002, **48**(10): 1029-1034.
- [11] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1999, **33**(17): 3595-3602.
- [12] Das J, Patra B S, Baliarsingh N, et al. Adsorption of phosphate

- by layered double hydroxides in aqueous solutions[J]. *Applied Clay Science*, 2006, **32**(3-4): 252-260.
- [13] 丁春生, 邹英龙, 张越茜, 等. 改性活性氧化铝除磷性能的试验[J]. *城市环境与城市生态*, 2011, **24**(2): 31-34.
- [14] 王挺, 王三反, 陈霞. 活性氧化铝除磷吸附作用的研究[J]. *水处理技术*, 2009, **35**(3): 35-38.
- [15] 王俊岭, 吴俊奇, 龙莹洁, 等. 活性氧化铝和其他滤料除微量磷效果比较[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(10): 18-21.
- [16] Giles C H, MacEwan T H, Nakhwa S N, *et al.* Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids [J]. *Journal of the Chemical Society*, 1960, **846**: 3973-3993.
- [17] Barrow N J, Bowden J W, Posner A M, *et al.* Describing the effects of electrolyte on adsorption of phosphate by a variable charge surface[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1980, **18**(4): 395-404.
- [18] Geelhoed J S, Hiemstra T, Van Riemsdijk W H. Phosphate and sulfate adsorption on goethite: Single anion and competitive adsorption[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(12): 2389-2396.
- [19] Hiemstra T, Van Riemsdijk W H. Surface structural ion adsorption modeling of competitive binding of oxyanions by metal (hydr) oxides [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1999, **210**(1): 182-193.
- [20] Antelo J, Avena M, Fiol S, *et al.* Effects of pH and ionic strength on the adsorption of phosphate and arsenate at the goethite-water interface [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, **285**(2): 476-486.
- [21] Chitrakar R, Tezuka S, Sonoda A, *et al.* Phosphate adsorption on synthetic goethite and akaganeite[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **298**(2): 602-608.
- [22] Huang X, Foster G D, Honeychuck R V, *et al.* The maximum of phosphate adsorption at pH 4.0: why it appears on aluminum oxides but not on iron oxides [J]. *Langmuir*, 2009, **25**(8): 4450-4461.
- [23] Han Y U, Park S J, Lee C G, *et al.* Phosphate removal from aqueous solution by aluminum (Hydr) oxide-coated sand [J]. *Environmental Engineering Research*, 2009, **14**(3): 164-169.
- [24] Xu Y H, Ohki A, Maeda S. Adsorption and removal of antimony from aqueous solution by an activated Alumina[J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2001, **80**(3): 133-144.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop-p-ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 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

国内外公开发售