

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚 A 的研究

欧阳磊^{1,2}, 丁耀彬¹, 朱丽华¹, 唐和清^{2*}, 廖海星^{3*}

(1. 华中科技大学化学与化工学院, 武汉 430074; 2. 中南民族大学化学与材料学院, 武汉 430074; 3. 长江大学化学与环境工程学院, 荆州 434020)

摘要: 采用溶胶凝胶法制备了钴掺杂的铁酸铋($x\text{Co-BFO}$), 以此作为多相催化剂, 活化过硫酸盐(PMS), 产生硫酸根自由基, 在水相降解溴代阻燃剂四溴双酚 A(TBBPA). 研究了钴掺杂量、催化剂用量、PMS 初始浓度对降解反应过程的影响. 结果表明, 在 $x\text{Co-BFO}$ 中 Co 掺杂量(Co/Fe 摩尔比)为 0.1, 用量为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, PMS 浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 60 min 内对 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TBBPA 的去除率可达 95% 以上. 所得催化剂在反应中稳定, 反应 60 min 后 Co 溶出量仅占总 Co 的 0.27%, 经 4 次重复使用仍具有较高催化活性; 具有磁性, 回收方便, 在污水处理领域具有良好的应用前景.

关键词: 钴掺杂铁酸铋; 过硫酸盐; 四溴双酚 A; 磁性回收; 污水处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3507-06

Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO_3

OUYANG Lei^{1,2}, DING Yao-bin¹, ZHU Li-hua¹, TANG He-qing², LIAO Hai-xing³

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Chemistry and Materials Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China; 3. College of Chemistry and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434020, China)

Abstract: Co-doped BiFeO_3 was synthesized by the sol-gel method and used as a catalyst of persulfate (PMS) for the degradation of tetrabromobisphenol A (TBBPA). The effects of the amount of oxidizing agent, catalyst dosage, and the content of doped Co on the degradation of TBBPA were investigated. Under the optimized conditions (doping level of Co to Fe 0.1, dosage $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, PMS concentration $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), the degradation removal of TBBPA within 60 min achieved more than 95%. Catalyst activity showed only a little loss after 4 recycles, and atomic absorption spectrometry (AAS) result showed that few Co ions were leached (0.27% of total Co). The catalyst can be recycled with magnet which shows a good application prospect in the wastewater treatment.

Key words: Co-doped BiFeO_3 ; persulfate; tetrabromobisphenol A (TBBPA); recycle with magnet; wastewater treatment

四溴双酚 A (tetrabromobisphenol A, TBBPA) 是一种溴代阻燃剂, 由于其优良的阻燃性能^[1], 全球范围内用量巨大^[2]. 近年来的研究认为 TBBPA 是具有潜在持久性、生物累积性和慢性毒性的化合物^[3,4]. TBBPA 虽然有一定的可降解性, 但是由于常规的降解方法矿化率较低, 不完全降解的一系列中间产物可能产生新的环境毒性^[5,6]. 另外由于 TBBPA 的低水溶性, 对 TBBPA 降解的研究工作一般在有机溶剂中进行, 与实际的废水处理有明显不同. 因此, 急需开发一种在水相能高效降解 TBBPA 的方法^[7~9].

由于 TBBPA 在中性和酸性水溶液中溶解度很低, 传统的 H_2O_2 适用的 Fenton 体系难以发挥很好的效果^[10,11]. 基于硫酸根自由基 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的“高级氧化技术”具有宽的 pH 适用性, 目前已应用于不同的有机物降解, 并有望在碱性条件下对 TBBPA 进行氧化降解^[12~18]. 采用过渡金属 Co^{2+} 活化过硫酸盐

(PMS) 产生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 是目前最有效的活化手段之一^[19]. 均相 Co-PMS 系统具有催化效率高, 氧化能力强等优点, 但同时也存在着局限性, 比如催化剂难回收再利用以及 Co^{2+} 对环境不友好、可能造成二次污染和生物毒性等. 如果能够将 Co^{2+} 固定化, 那么就可以克服以上的缺点^[20].

BiFeO_3 本身是一种良好的多相催化剂, 可以有有效的活化双氧水等氧化剂, 可用于有机污染物降解^[21]. Co 活化过硫酸盐效果好于 Fe, 它和 Fe 的原子半径相近, 且处于同一副族, 化学性质相近, 因而可以形成 Co 掺杂的 BiFeO_3 , 使 Co 和 Fe 发挥协同作用活化 PMS. 由于形成 $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x\text{Co-BFO}$) 结

收稿日期: 2012-12-19; 修订日期: 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(21077037, 211770447)

作者简介: 欧阳磊(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染控制, E-mail: ouyanglei22@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hqtang62@yahoo.com.cn; lhx19630913@163.com

构,避免了 Co 的溶出,减少了污染;同时催化剂具有磁性,回收方便,使催化剂可以重复利用,经济环保。

本研究以 $x\text{Co-BFO}$ 为催化剂,PMS 为氧化剂,通过优化催化剂种类、用量以及氧化剂用量等条件实现了对 TBBPA 的有效去除和一定的矿化,建立了一种在水相催化降解 TBBPA 的新方法。

1 材料与方法

1.1 催化剂的制备

称取 7.2 mmol $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、8.0 mmol $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 与 8.0 mmol $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 于 100 mL 烧杯中,加入 20 mL 乙二醇甲醚及 20 μL 0.1 mol·L⁻¹ HNO_3 溶液,室温下搅拌使其溶解.向上述体系中加入 8.0 mmol 柠檬酸与 10 mL 乙二醇,在 60℃ 的水浴中加热 1 h,将所得黑褐色溶液于 100℃ 的油浴中加热蒸干得到黄褐色凝胶,将其转入坩埚并在电炉上炭化 30 min.最后将其转入马弗炉中,于 500℃ 下保持 2 h 得到褐色颗粒状固体,经研磨得粉末状的产物.经洗涤干燥得到 Co 掺杂量为 0.1 的催化剂,记为 0.1Co-BFO.

按上述方法分别按不同 Co/Fe 投加量合成一系列不同掺杂量的催化剂:BFO、0.05 Co-BFO、0.1 Co-BFO、0.2 Co-BFO.

1.2 催化剂的表征

采用德国 Bruker 公司 DB advanced 型 X 射线衍射(XRD)仪分析了所制备的不同催化剂的物相,射线源为 Cu $K\alpha$ 靶射线,石墨单色器滤波,扫描范围 2θ 为 10°~90°.

1.3 降解实验

称取 25 mg 催化剂超声分散于 50 mL 40 mg·L⁻¹ TBBPA 溶液中,在磁力搅拌下使催化剂和污染物预吸附 30 min,吸附后的污染物浓度作为零点浓度.加入氧化剂 PMS,启动 TBBPA 降解反应.每隔一定时间取样 500 μL ,再加入 500 μL 乙醇淬灭,摇匀,置于台式离心机 14 000 r·min⁻¹ 离心 3 min,0.22 μm 孔径滤膜过滤,然后采用 Agilent 1100 型高效液相色谱仪检测 TBBPA 的残余浓度.

1.4 降解产物

采用高效液相色谱法对 TBBPA 降解实验的浓度及中间产物累积情况进行了监测,检测条件如下:色谱柱 SB- C_{18} -RP 柱(5 μm ,120 $\text{\AA}$; 4.6 mm×150 mm);流动相为甲醇-水溶液(80:20,体积比);流速 1 mL·min⁻¹;柱温 30℃;进样量 20 μL ;检测器

采用紫外光检测器,检测波长为 230 nm.

1.5 催化剂稳定性实验

为了研究催化剂的稳定性,采用美国 P. E. 公司的 Analyst 300 原子吸收仪对催化剂的 Co/Fe 溶出量进行了检测,并进行了催化剂的回收重复利用实验.

催化剂重复利用实验采用以下实验方案进行:进行完整的一次实验以后,取反应溶液,超声使吸附在容器壁及磁子上的吸附剂均匀分散至溶液中,0.22 μm 孔径滤膜抽滤,并用二次蒸馏水多次冲洗,取膜及膜滤出的催化剂加入装有 50 mL 二次蒸馏水的反应器中超声 5 min,使催化剂重新均匀分散至溶液中,再加入污染物,重复第一次实验操作步骤,取样测量.

2 结果与讨论

2.1 催化剂的表征

图 1 为不同 Co 掺杂量的催化剂和 BiFeO_3 的 XRD 谱,BFO 标准谱选用 PDF 74-2016.由图 1 可知,Co 掺杂并未导致 BFO(012)、(104)和(110)晶面峰的偏移,原因是 Fe^{3+} (0.64 $\text{\AA}$)半径和 Co^{3+} (0.63 $\text{\AA}$)半径相近而且 Co 的掺杂量很少.由于 Co 的掺杂,谱图中出现了 $\text{Bi}_{23.52}\text{Co}_{1.8}\text{O}_{40}$ 的相和少量 $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{40}$ 的杂相,并随着 Co 掺杂量的增大而增大,未发现明显的 Co_2O_3 等钴氧化物相,表明 Co 已经掺杂入 BFO 中.

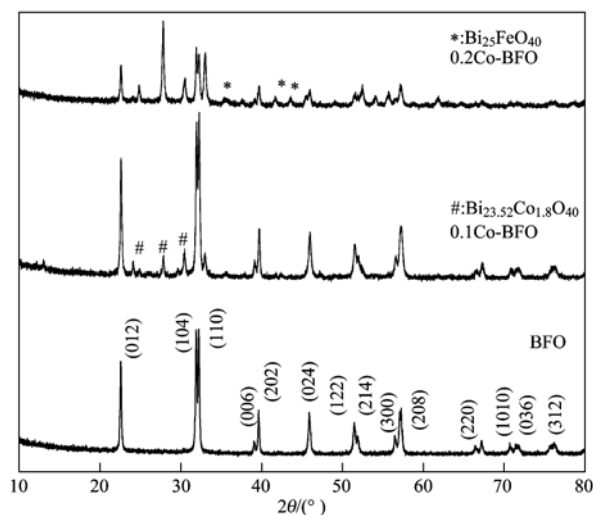


图 1 不同 Co 掺杂量催化剂的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of Co-BFO samples

2.2 氧化剂用量对 TBBPA 降解的影响

0.1Co-BFO 投加量为 0.5 g·L⁻¹ 条件下,分别考察了 1.0、2.0、2.5 和 3.0 mmol·L⁻¹ PMS 浓度时,

0.1Co-BFO 对 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ TBBPA 的降解情况. 如图 2 所示, 氧化剂 PMS 的量直接影响降解效果. PMS 用量从 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 120 min 内 TBBPA 的降解率由 23% 增加到 99%, 降解速率也明显加快. 从 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度再增加虽然降解速率加快, 但是变化已相对较小, 而且在 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 60 min 的降解率已接近 100%, 再增加 PMS 浓度意义不大, 故实验选择 PMS 初始投加浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$.

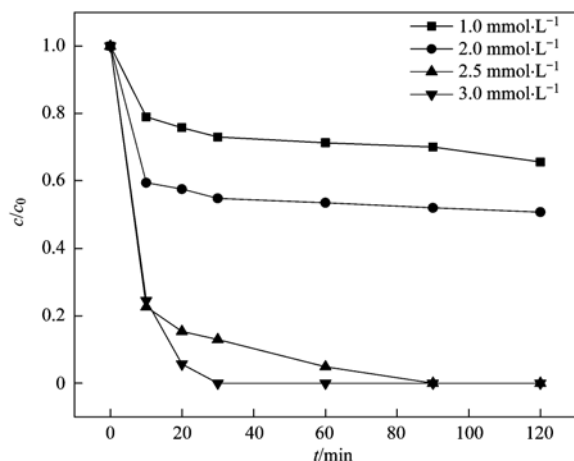


图 2 氧化剂用量对 0.1Co-BFO 降解 TBBPA 的影响

Fig. 2 Effect of PMS concentration on the degradation of TBBPA

2.3 催化剂用量对 TBBPA 降解的影响

实验选取的 PMS 浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, TBBPA 为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 催化剂为 0.1Co-BFO, 选择了 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 这 5 个催化剂投加浓度分别进行了对 TBBPA 的降解实验. 随着催化剂用量的增加, 降解速率加快, 降解率增加. 图 3 显示当催化剂用量增加到 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以后再增加降解效果不再有明显变化, 故在后续实验中催化剂投加量选择 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.4 催化剂掺 Co 量对 TBBPA 降解的影响

采用掺 Co 量分别为 0.02、0.05、0.1、0.15 和 0.2 的催化剂, 投加浓度为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, PMS 浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件对 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TBBPA 进行了降解. 如图 4 和图 5 所示, 随着掺杂量由 0 增加到 0.1, TBBPA 降解率依次增加, 由 0.1 继续增加到 0.2 时, 初期降解速率继续增加, 但 30min 以后的降解率变化不大, 都已经达到 90% 以上, 从降解率的角度出发, Co 掺杂量达到 0.1 时就可以达到对 TBBPA 较为理想的降解率. 另外, 根据催化剂的 XRD 图谱可知, Co 掺杂量达到 0.1 后, 继续增加掺杂量会影响 $\text{BiFe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ 的结构, 形成的 Bi_2O_3 、 Fe_2O_3 杂晶量

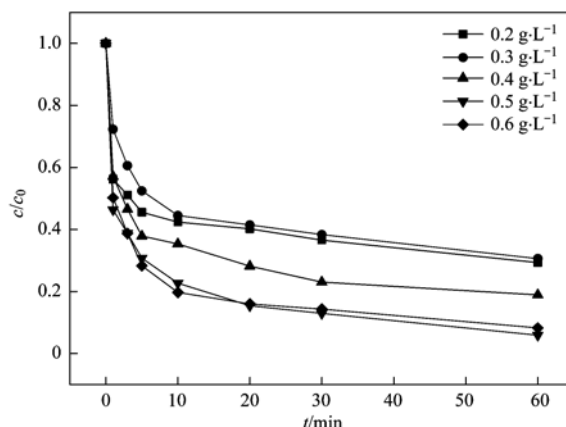


图 3 催化剂用量对 0.1Co-BFO 降解 TBBPA 的影响

Fig. 3 Effect of 0.1Co-BFO concentration on the degradation of TBBPA

增大, 催化剂的结构发生变化, 稳定性发生变化. 因此综合考虑选择 0.1Co-BFO 的作为催化剂较为合适.

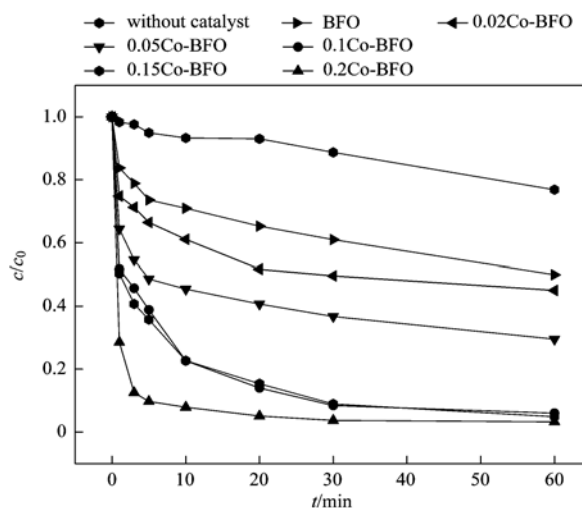


图 4 催化剂掺 Co 量对 TBBPA 降解的影响

Fig. 4 Degradation of TBBPA with different catalysts

2.5 避光条件及溶出 Co 对 TBBPA 降解的影响

由于 BiFeO_3 具有一定的可见光催化活性^[22~25], 在其他条件相同情况下研究了避光与否对 TBBPA 降解的影响, 结果显示避光与不避光条件下 TBBPA 去除的情况区别不大, 表明 $x\text{Co-BFO}$ 的可见光活性较弱, 这可能是由于 Co 的掺杂导致催化剂对光的利用率降低造成的, 从催化剂颜色的加深便可以验证. 由于可见光活性较弱, 而且即使具有可见光活性, 对 TBBPA 的降解也是有利的, 故实验在自然光条件下进行, 未作避光处理.

为了考察溶出 Co 对 TBBPA 降解实验的贡献, 将 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 0.1Co-BFO 在 50 mL 水中搅拌 1 h, 分

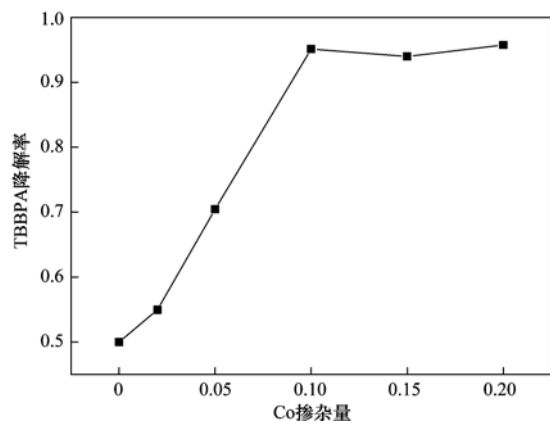


图5 Co掺杂量对TBBPA降解率的影响

Fig. 5 Effect of Co doping amount on the degradation of TBBPA

别取滤液及滤渣进行 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TBBPA 降解实验, PMS 浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 结果如图 6 所示, 溶出 Co 对 TBBPA 降解实验的贡献较小, 表明主体起催化作用的是多相的 0.1Co-BFO 催化剂。

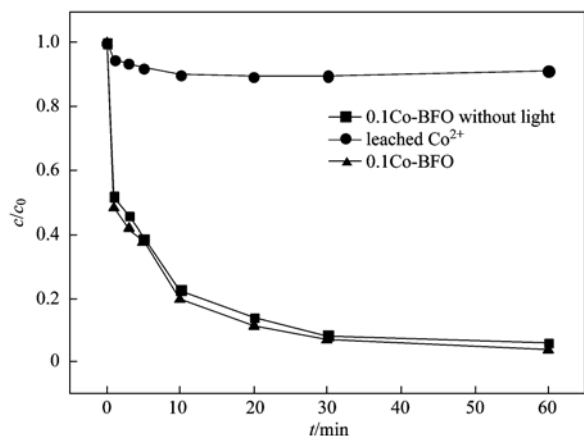


图6 避光条件及溶出Co对TBBPA降解的影响

Fig. 6 Effect of light and Co leach on the degradation of TBBPA

2.6 TBBPA 降解过程中的矿化

在 TBBPA 浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PMS 浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.1Co-BFO 浓度为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 对降解过程中 TBBPA 的紫外可见吸收图谱进行了监测. 从图 7 中特征峰的变化可见, 3 个特征峰均有明显的降低, 说明在降解过程中 TBBPA 结构被破坏. Br^- 的脱除会使 310 nm 处 TBBPA 特征峰下降, 也会使 210 nm 处苯环 E_2 特征峰的降低, 同时叔丁碳断裂会破坏苯环的共轭结构, 在 TBBPA 分子的对称性被破坏以后, 有可能发生苯环的断裂, 会使苯环的 B 带 250 nm 吸收峰发生降低. 因此降解的过程中可能不仅有脱溴作用, 也有一定的矿化作用。

类似地, 在 TBBPA 浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PMS 浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.1Co-BFO 浓度为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

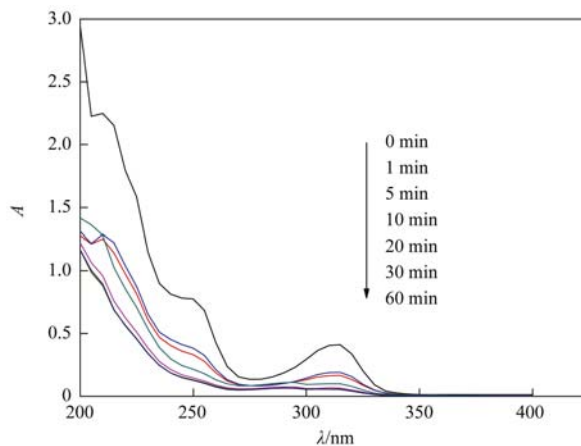


图7 不同反应时间下TBBPA降解的紫外吸收光谱

Fig. 7 Temporal UV-Vis spectra changes during TBBPA degradation

条件下利用高效液相色谱监测降解过程中 TBBPA 及相关中间产物的变化情况, 结果如图 8 所示. 在 10 min 内对 TBBPA 的去除率达到 70%, 60 min 去除率达到约 90%, 120 min 时已经检测不到 TBBPA 峰的存在. 在降解过程中, 出现了一些中间产物峰, 从这些峰的变化情况可以看到, 降解过程中 TBBPA 反应产生的中间产物的残余也逐渐减少。

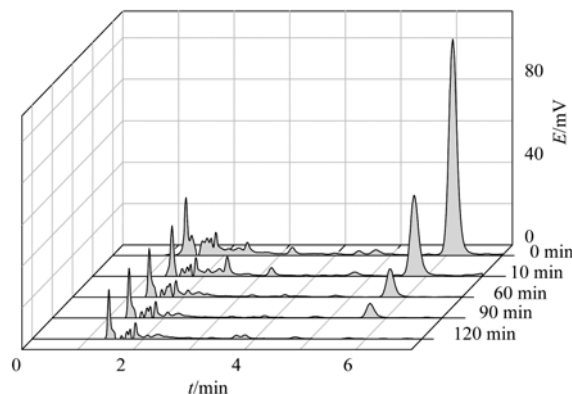


图8 不同反应时间下TBBPA降解的高效液相色谱图谱

Fig. 8 Temporal HPLC spectra changes during TBBPA degradation

通过紫外可见和 HPLC 检测的结果已经表明 TBBPA 在降解过程中会被明显的矿化. 因此, 在 TBBPA 浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PMS 浓度为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 0.1Co-BFO 浓度为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 进行了 TBBPA 的降解, 并监测了 TOC 的变化. 如图 9 所示, 在 60 min 时 TOC 去除率达到了 36%, 90 min 达到 45% 左右, 可见随着反应时间的延长, TOC 去除率逐渐增大, 由于反应体系中由于氧化剂消耗会导致产生的自由基浓度下降, 如果补加氧化剂和延长反应时间, 可以进一步提高 TOC 去除率. 以上结果说明, 降解反应不仅对 TBBPA 有良好的去除作用, 而且有明显的矿化作用。

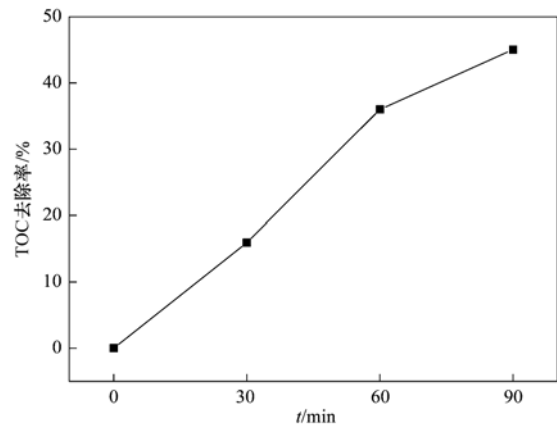


图 9 不同反应时间下 TBBPA 降解的 TOC 变化情况
Fig. 9 TOC removal in TBBPA degradation

2.7 催化剂的稳定性

为了考察催化剂在实验条件下的稳定性,利用原子吸收分光光度计对溶液中的钴铁溶出量进行了监测,结果如表 1 所示.

表 1 不同催化剂反应过程中钴溶出量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Co ions leached during the TBBPA degradation/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$					
催化剂种类	0 min	10 min	30 min	60 min	120 min
0.1Co-BFO	0.023	0.024	0.023	0.024	0.032
Co_3O_4	0.525	0.575	0.644	1.875	2.375

在实验条件下 Fe 的溶出量低于 $0.004\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而催化剂所含有的总 Fe 为 $80.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因此 Fe 的溶出量可以忽略.在所添加的催化剂中 Co 含量为 $9.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而在反应后发现 Co 的溶出量仅占所含总 Co 的 0.27%,可见 Co 的溶出量极低.为了对比该催化剂与普通氧化物的稳定性,利用 $0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Co_3O_4 进行了对比实验.结果表明,在相同条件下 Co_3O_4 的溶出量随反应进行溶出量逐渐增加,但 0.1Co-BFO 催化剂 Co 溶出量变化较小,表明 0.1Co-BFO 催化剂在实验条件下更为稳定.

2.8 催化剂重复利用结果

对 0.1Co-BFO 进行了 4 次循环实验,图 10 表明经过 4 次循环使用,催化剂仍然保持较高的催化活性.

2.9 催化剂磁性回收性能

图 11 为利用磁铁对降解反应后催化剂进行回收的对照图,利用磁铁进行吸附不到 3 min,溶液变得澄清,说明溶液内的催化剂基本上已经回收完全,因此,该催化剂的磁性回收非常方便.

3 结论

(1)采用溶胶凝胶法制备了 Co 掺杂的 BiFeO_3

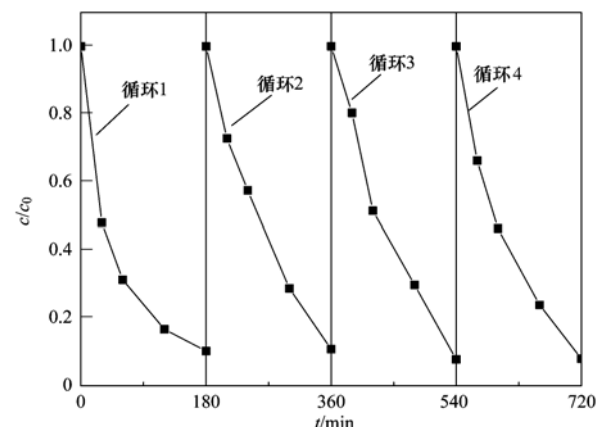
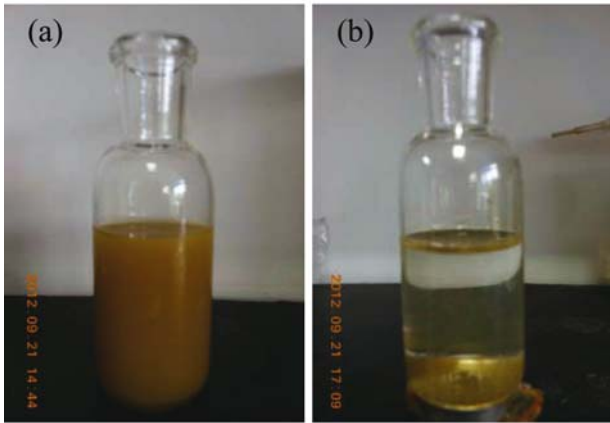


图 10 0.1Co-BFO 循环使用降解 TBBPA 曲线
Fig. 10 Cycling runs in the degradation of TBBPA by 0.1Co-BFO



图(b)为图(a)磁铁吸附 3 min 后
图 11 催化剂磁性回收
Fig. 11 Recycle of catalyst with magnet

催化剂用于去除水中的环境污染物 TBBPA,结果显示该催化剂可以有效的活化氧化剂 PMS 实现对水中的 TBBPA 的良好去除和一定程度的矿化.

(2)相关实验结果也显示催化剂不仅具有良好的催化活性,同时具有良好的稳定性,有害离子溶出量极低,而且该催化剂磁性回收方便,在污水处理领域具有潜在的应用价值.

参考文献:

[1] 彭浩,金军,王英,等. 四溴双酚-A 及其环境问题[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(6): 571-573.
[2] 田凤麟,杨金水. 我国溴系阻燃剂的现状及发展方向[J]. 盐业与化工, 2007, 36(4): 46-48.
[3] 杜青平,彭润,刘伍香,等. 四溴双酚 A 对斑马鱼胚胎体内发育的毒性效应[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 739-744.
[4] 张帆,余应新,张东平,等. 溴系阻燃剂在环境及人体中的存在和代谢转化[J]. 化学进展, 2009, 21(6): 1364-1372.
[5] 李杰,徐殿斗,徐刚,等. 四溴双酚 A 的辐照降解研究[J].

- 环境科学, 2012, **33**(5): 1587-1590.
- [6] Lin K, Liu W P, Gan J. Reaction of tetrabromobisphenol A (TBBPA) with manganese dioxide: kinetics, products, and pathways[J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(12): 4480-4486.
- [7] Guo Y N, Chen L, Ma F Y, *et al.* Efficient degradation of tetrabromobisphenol A by heterostructured Ag/Bi₅Nb₃O₁₅ material under the simulated sunlight irradiation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(1-2): 614-618.
- [8] Luo S, Yang S G, Wang X D, *et al.* Reductive degradation of tetrabromobisphenol A over iron-silver bimetallic nanoparticles under ultrasound radiation[J]. Chemosphere, 2010, **79**(6): 672-678.
- [9] Horikoshi S, Miura T, Kajitani M, *et al.* Photodegradation of tetrahalobisphenol-A (X = Cl, Br) flame retardants and delineation of factors affecting the process[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2008, **84**(3-4): 797-802.
- [10] Evgenidou E, Konstantinou I, Fytianos K, *et al.* Oxidation of two organophosphorus insecticides by the photo-assisted Fenton reaction[J]. Water Research, 2007, **41**(9): 2015-2027.
- [11] Maurino V, Calza P, Minero C, *et al.* Light-assisted 1, 4-dioxane degradation[J]. Chemosphere, 1997, **35**(11): 2675-2688.
- [12] 李文书, 李咏梅, 顾国维. 高级氧化技术在持久性有机污染物处理中的应用[J]. 工业水处理, 2004, **24**(11): 9-12.
- [13] 张旋, 王启山. 高级氧化技术在废水处理中的应用[J]. 水处理技术, 2009, **35**(9): 18-22.
- [14] Liang C J, Bruell C J, Marley M C, *et al.* Persulfate oxidation for in situ remediation of TCE. I. Activated by ferrous ion with and without a persulfate-thiosulfate redox couple [J]. Chemosphere, 2004, **55**(9): 1213-1223.
- [15] 刘景, 冰燕磊, 白文荣, 等. 高级氧化技术在水处理的研究进展[J]. 水处理技术, 2011, **37**(3): 11-17.
- [16] 杨世迎, 陈友媛, 胥慧真, 等. 过硫酸盐活化高级氧化新技术[J]. 化学进展, 2008, **20**(9): 1433-1438.
- [17] 杜肖哲, 张永清. 常温下过硫酸盐氧化降解水中对氯苯胺[J]. 环境化学, 2012, **31**(6): 880-884.
- [18] Kronholm J, Riekkola M L. Potassium persulfate as oxidant in pressurized hot water [J]. Environmental Science and Technology, 1999, **33**(12): 2095-2099.
- [19] 陈晓阳, 陈景文, 杨萍, 等. 均相 Co/PMS 系统降解吡虫啉的影响因素及降解途径研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2816-2820.
- [20] 袁春华, 谢英娜. 钴掺杂二氧化钛光催化剂制备及光催化活性[J]. 无机盐工业, 2011, **43**(11): 31-33.
- [21] Luo W, Zhu L H, Wang N, *et al.* Efficient removal of organic pollutants with magnetic nanoscaled BiFeO₃ as a reusable heterogeneous Fenton-like catalyst [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(5): 1786-1791.
- [22] 谢会东, 贾彩霞, 靳莉, 等. BiFeO₃ 的水热合成、表征及光催化性能研究[J]. 材料导报, 2011, **25**(18): 35-37, 40.
- [23] 县涛, 杨华, 戴剑锋, 等. 粒径可控的纳米铁酸铋的制备及其光催化性能[J]. 催化学报, 2011, **32**(4): 618-623.
- [24] 曹枫, 唐培松, 陈海峰, 等. 溶胶-凝胶法制备铁酸铋及其可见光催化性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, **39**(2): 422-425.
- [25] 王岩玲, 王俊恩. 铁酸铋的水热合成及其光催化性能[J]. 合成化学, 2009, **17**(6): 741-743.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人