

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                           |                                                                          |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O <sub>3</sub> 来源识别 .....         | 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华( 1 ) |
| 厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 .....                             | 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊( 11 )                                                   |
| 近10年海南岛大气NO <sub>2</sub> 的时空变化及污染物来源解析 .....              | 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔( 18 )                                                  |
| 稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 .....                               | 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹( 25 )                              |
| 气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H <sub>2</sub> )浓度 ..... | 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根( 34 )                                              |
| 小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO <sub>2</sub> 特征及扩散通量 .....        | 张永领, 杨小林, 张东( 40 )                                                       |
| 夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 .....                            | 李江萍, 张洪海, 杨桂朋( 49 )                                                      |
| 基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 .....                          | 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠( 56 )                                         |
| 温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 .....                              | 马小雪, 王腊春, 廖玲玲( 64 )                                                      |
| 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 .....                         | 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞( 72 )                                              |
| 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 .....                             | 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇( 80 )                                               |
| 鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 .....                         | 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞( 87 )                                                 |
| 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 .....                            | 李艳利, 李艳粉, 徐宗学( 94 )                                                      |
| 水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 .....                              | 刁晓君, 李一葳, 王曙光( 107 )                                                     |
| 蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 .....                                   | 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹( 114 )                                            |
| 汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 .....                                  | 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅( 121 )                                                  |
| 三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 .....                               | 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟( 130 )                                             |
| 三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征 .....                               | 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇( 136 )                                                  |
| 环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 .....                | 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法( 143 )                                             |
| 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 .....                      | 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮( 151 )                               |
| 舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 .....                       | 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇( 163 )                                            |
| 太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 .....                     | 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮( 172 )                                   |
| 厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 .....                            | 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋( 179 )                                        |
| 两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 .....                     | 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真( 186 )                                                 |
| 大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 .....                               | 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光( 194 )                              |
| 铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 .....                             | 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军( 202 )                           |
| 铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 .....                              | 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华( 209 )                                        |
| 一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 .....                                | 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊( 215 )                                                |
| 磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 .....                                 | 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷( 221 )                                                  |
| 腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 .....                             | 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧( 227 )                                                     |
| 降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 .....                     | 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋( 237 )                              |
| FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 .....                      | 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江( 244 )                                                 |
| 微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 .....                         | 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜( 252 )                                   |
| 微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 .....                               | 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全( 259 )                                             |
| 舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 .....                           | 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉( 266 )                             |
| 四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 .....                             | 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林允静( 274 )                                   |
| 铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 .....                                | 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维( 280 )                                                 |
| 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 .....                               | 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体( 286 )                         |
| 厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 .....                                   | 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲( 295 )                                      |
| 洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 .....                          | 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚( 301 )                               |
| 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 .....                               | 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超( 309 )                                      |
| 畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 .....                  | 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯( 314 )                                                  |
| 华南某市生活垃圾组成特征分析 .....                                      | 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德( 325 )                                           |
| 生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 .....                               | 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印( 333 )                                       |
| 基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 .....                           | 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌( 338 )                                                |
| 一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 .....                         | 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国( 343 )                                                 |
| 典型黄土区油松树干液流变化特征分析 .....                                   | 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩( 349 )                                         |
| 利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究 .....                                 | 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲( 357 )                                 |
| 人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 .....                             | 李曼璐, 姜玥璐( 365 )                                                          |

# 铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚 A 的研究

陈满堂<sup>1</sup>, 宋洲<sup>1</sup>, 王楠<sup>1</sup>, 丁耀彬<sup>1</sup>, 廖海星<sup>2\*</sup>, 朱丽华<sup>1\*</sup>

(1. 华中科技大学化学与化工学院, 武汉 430074; 2. 长江大学化学与环境工程学院, 荆州 434020)

**摘要:** 以  $\text{AgNO}_3$  和  $\text{NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  为原料, 采用离子交换-共沉淀法制备了铋银氧化物混合物 (silver bismuth oxide, BSO), 并利用它氧化降解溴代阻燃剂四溴双酚 A (TBBPA)。研究了制备过程中银铋摩尔比及降解过程中 BSO 用量对 TBBPA 降解效果的影响。结果表明, 当银铋摩尔比为 1:1, BSO 用量为  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  TBBPA 在 7 min 内可完全降解, 其总有机碳的去除率高达 80%。采用离子色谱、气相色谱-质谱联用仪及 X 射线光电子能谱监测降解过程中 TBBPA 的变化, 发现 TBBPA 降解过程涉及脱溴、叔丁基碳的断裂和苯环的开环氧化等反应。利用  $\text{NaN}_3$  作为分子探针, 发现单线态氧是 BSO 氧化降解 TBBPA 的主要反应活性物种。

**关键词:** 铋银氧化物混合物; 四溴双酚 A; 单线态氧; 氧化降解; 矿化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0209-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.027

## Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide

CHEN Man-tang<sup>1</sup>, SONG Zhou<sup>1</sup>, WANG Nan<sup>1</sup>, DING Yao-bin<sup>1</sup>, LIAO Hai-xing<sup>2\*</sup>, ZHU Li-hua<sup>1\*</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Chemical and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434020, China)

**Abstract:** Silver bismuth oxide (BSO) was prepared by a simple ion exchange-coprecipitation method with  $\text{AgNO}_3$  and  $\text{NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  as raw materials, and then used to oxidatively degrade tetrabromobisphenol A (TBBPA). Effects of the molar ratio of Ag/Bi during BSO preparation and the BSO dosage on the degradation of TBBPA were investigated. The results showed that under the optimized conditions (i. e., the Ag/Bi molar ratio of 1:1, BSO dosage of  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ),  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  of TBBPA was completely degraded and the removal of total organic carbon achieved more than 80% within 7 min. The degradation intermediates of TBBPA were identified by ion chromatography, gas chromatograph-mass spectrometer and X-ray photoelectron spectroscopy. The degradation pathway of TBBPA included the debromination, the cleavage of tert-butyl group and the open epoxidation of benzene ring. Based on a quenching study of  $\text{NaN}_3$ , singlet oxygen was proved to play a dominant role in the TBBPA degradation.

**Key words:** silver bismuth oxide; tetrabromobisphenol A; singlet oxygen; oxidative decomposition; mineralization

溴代阻燃剂作为合成高分子材料的重要助剂之一<sup>[1]</sup>, 主要被用于塑料、纺织品、电子电器、运输包装、建材以及其他防火材料中。由于四溴双酚 A (tetrabromobisphenol A, TBBPA) 具有阻燃效率高、价格低廉等优点, 已成为全球使用量最为广泛的溴代阻燃剂<sup>[2,3]</sup>, 约占整个溴代阻燃剂市场的 60% 左右<sup>[4]</sup>。尽管 TBBPA 具有共价结合的特点, 但仍有可能在生产、使用和产品废弃过程中被释放而进入环境。近年来, 在土壤、水体和大气等非生物类样品和水生生物、野生动物等生物样品中均检测到了它的存在, 人体血浆、母乳等样品中也有报道检出<sup>[5-11]</sup>。TBBPA 是一种持久性有机污染物, 也是一种潜在的环境内分泌干扰物, 可在环境和生物体内积累, 对环境和生物产生严重的影响, 如干扰生物的激素系统, 影响人的大脑和骨骼发育, 还可能存在着致癌作用<sup>[12-14]</sup>。因此, 亟需寻找有效的治理 TBBPA 污染的方法。

目前降解 TBBPA 的方法主要有生物降解、热解、光降解及高级氧化技术等。Fackler<sup>[15]</sup> 最早对 TBBPA 的生物降解进行了研究, 但其存在一定的条件限制。Luo 等<sup>[16]</sup> 以零价铁置换出金属银的沉积方法制备了核壳型 Fe-Ag 双金属颗粒, 并以此作为催化剂降解 TBBPA, 在 20 min 之内可将初始浓度为  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 TBBPA 完全降解, 但其脱溴不彻底, 且主要产物双酚 A 也无法进一步矿化。随后, 他们提出了还原-氧化接力处理 TBBPA: 在还原 TBBPA 后, 再利用类芬顿体系进行氧化处理法<sup>[17]</sup>。Zhong 等<sup>[18]</sup> 采用  $0.125 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的钛磁铁矿 ( $\text{Fe}_{2.02}\text{Ti}_{0.98}\text{O}_4$ ) 和  $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的过氧化氢 ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ) 构筑非均相

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-07-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21177044, 21107027)

作者简介: 陈满堂 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制化学, E-mail: U201010360@hust.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: lhx19630913@163.com; lhzhzhu63@hust.edu.cn

UV/Fenton 体系,在 pH 6.5 降解  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  TBBPA,UV 照射 240 min,TBBPA 几乎全部被降解. Horikoshi 等<sup>[19]</sup>在碱性  $\text{TiO}_2$  分散液中用光催化降解 TBBPA,光照 2 h,TBBPA 可被完全降解和脱卤,但在 5 h 内其矿化率只能达到约 50%. Xu 等<sup>[20]</sup>利用具有可见光活性的溴氧化铋微球光催化降解 TBBPA,在紫外-可见光照射下,反应 15 min,TBBPA 可完全降解. Han 等<sup>[21]</sup>首次用光敏化方法产生单线态氧,再利用 TBBPA 阴离子能有效猝灭单线态氧之性质,达到氧化降解 TBBPA 之目的. 闫梦玥等<sup>[22]</sup>研究了改性蒙脱石负载纳米铁材料(NZVI-CMT)在甲醇-水体系中对 TBBPA 的去除作用,在优化条件下,TBBPA 的去除率可达 97.5%. 本课题组<sup>[23]</sup>曾以钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解 TBBPA,60 min 内 TBBPA 的去除率达 95% 以上. 如上所述的处理方法一般需要催化剂、氧化剂和/或外界能量共同作用产生活性氧化物种降解 TBBPA,且矿化率一般不太高.

铋酸钠是一种新型的可见光催化剂,已被用于氧化降解处理有毒有机污染物,但其直接氧化能力较弱. 本研究以铋酸钠和银盐为原料,利用离子交换-共沉淀法制备铋银氧化物混合物(BSO)<sup>[24]</sup>,发现在无需任何外加能量与氧化剂的条件下,利用 BSO 自身产生的具有强氧化性的单线态氧,即可快速氧化降解四溴双酚 A,且矿化程度高.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验试剂

四溴双酚 A 购自于 Sigma-Aldrich 公司,硝酸银购自于上海强顺化学试剂有限公司,二水铋酸钠购自于上海国药集团. 以上试剂均为分析纯,实验用水为二次蒸馏水.

### 1.2 BSO 的制备

称取  $1.7000 \text{ g AgNO}_3$  ( $0.01 \text{ mol}$ ) 于  $200 \text{ mL}$  烧杯中,加入  $100 \text{ mL}$  二次水,搅拌使其溶解. 向上述体系中缓慢加入  $0.6320 \text{ g NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $0.002 \text{ mol}$ ), $25^\circ\text{C}$  下搅拌反应 4 h. 将所得悬浮液抽滤,洗涤,烘干即可得到银铋摩尔比为 5:1 的氧化剂,记为 5-BSO.

按上述方法分别采用不同的 Ag/Bi 投加量制备一系列不同银铋摩尔比的 BSO,分别为 1-BSO、0.2-BSO、0.1-BSO、0.05-BSO、0.025-BSO 及 0.01-BSO.

### 1.3 BSO 的表征

采用德国布鲁克公司 D8 advanced 型 X 射线衍

射仪(XRD)测定新制备的 1-BSO. 测试条件:射线源为 Cu  $\text{K}\alpha$  靶射线,石墨单色器滤波,扫描范围  $2\theta$  为  $10^\circ \sim 70^\circ$ .

采用美国热电公司 VG Multilab 2000 型 X 射线光电子能谱(XPS)测定使用前后的 1-BSO 表面的化学组成. 测试条件:带单色器的铝靶( $\text{Al-K}\alpha$ ) X 射线源( $300 \text{ W}$ ).

### 1.4 降解实验

称取  $50 \text{ mg}$   $\lambda$ -BSO 于  $49.5 \text{ mL}$  蒸馏水中,超声分散 2 min,加入  $0.5 \text{ mL}$   $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  的 TBBPA 储备液,随即开始计时反应,每隔一定时间用注射器取样  $2 \text{ mL}$ ,用  $0.22 \mu\text{m}$  滤膜过滤后,采用 Agilent Carry 60 UV-vis 分光光度计测定滤液中 TBBPA 的残余浓度.

### 1.5 降解产物分析

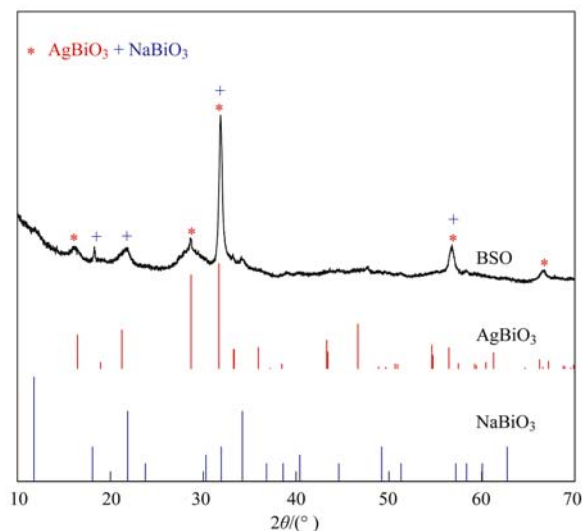
采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对 TBBPA 的降解产物进行分析. 取经膜滤后的 TBBPA 降解液  $10 \text{ mL}$ ,用  $15 \text{ mL}$  二氯甲烷分 3 次萃取,合并萃取液用氮吹干,再用  $0.2 \text{ mL}$  双(三甲基硅烷)三氟乙酰胺(BSTFA)在  $50^\circ\text{C}$  下硅烷基衍生 30 min. GC-MS 测试条件如下:GC 柱温箱的初始温度为  $60^\circ\text{C}$ ,在  $60^\circ\text{C}$  下保持 1 min,然后以  $30^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度升温至  $150^\circ\text{C}$ ,之后以  $5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  的速度升温至  $300^\circ\text{C}$ ,在  $300^\circ\text{C}$  下保持 5 min<sup>[25]</sup>;质谱条件为:EI 源,电离能量  $70 \text{ eV}$ ,离子源温度  $250^\circ\text{C}$ ,全谱扫描范围为  $50 \sim 700 \text{ m/z}$ .

采用 TOSOH 公司 IC-2010 型离子色谱仪对 TBBPA 脱溴量进行检测. 色谱柱为 TSKgel SuperIC-AZ,淋洗液为  $1.7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  碳酸钠 +  $6.3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  碳酸氢钠,流速为  $0.8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,进样量为  $30 \mu\text{L}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 BSO 的表征

图 1 为 1-BSO 的 XRD 图谱. 在  $2\theta$  为  $16.02^\circ$ 、 $28.67^\circ$ 、 $31.84^\circ$ 、 $56.75^\circ$  和  $66.79^\circ$  处,1-BSO 的 XRD 出现了与  $\text{AgBiO}_3$  相似的特征峰;在  $2\theta$  为  $18.31^\circ$ 、 $21.59^\circ$ 、 $31.84^\circ$  和  $56.75^\circ$  出现的衍射峰与  $\text{NaBiO}_3$  相似,表明制得的氧化剂不是纯粹的  $\text{AgBiO}_3$ ,而是  $\text{AgBiO}_3$  和  $\text{NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  组成的混合物(铋银氧化物混合物,简写成 BSO). 这是由于在反应  $\text{NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{AgNO}_3 = \text{AgBiO}_3 + \text{NaNO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$  中, $\text{NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  不溶于水,在银铋摩尔比为 1:1 时, $\text{Ag}^+$  未能完全取代  $\text{NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  中的  $\text{Na}^+$ ,从而得到的产物不是纯的铋酸银,会残留有未反应的  $\text{NaBiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .



图中给出了  $\text{AgBiO}_3$  和  $\text{NaBiO}_3$  的标准 XRD 衍射谱图

图 1 BSO 的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD pattern of BSO

## 2.2 BSO 氧化降解 TBBPA

采用紫外-可见吸收光谱监测在不同条件下初始浓度为  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 TBBPA 的降解情况。由图 2 可知,用  $\text{NaBiO}_3$  为氧化剂时,TBBPA 的浓度只有轻微下降,表明  $\text{NaBiO}_3$  不能有效降解 TBBPA;然而,当 BSO 作为氧化剂时,TBBPA 则能被快速降解,前 30 s,TBBPA 的降解率便高达 70%,7 min 内则已被完全降解;由图 3 可知,用 BSO 氧化降解 TBBPA 时,TBBPA 的 3 个紫外吸收峰发生了强烈的变化,其 310 nm 处的特征峰在 7 min 之内完全消失,表明其发生了脱溴与叔丁碳的断裂反应;而 210 nm 处的苯环  $E_2$  带和 250 nm 处苯环 B 带的吸收峰也明显下降,表明其苯环结构被破坏。这些结果表明,BSO 降解 TBBPA 的过程中存在脱溴过程,而且发生明显的矿化作用。

采用离子色谱监测了 TBBPA 的脱溴情况,TBBPA 的降解液在保留时间为 9.7 min 处出现了  $\text{Br}^-$  的离子色谱峰。用 XPS 测定反应后 BSO 的表面组成,结果如图 4 所示,在结合能为 70 eV 出现了一个明显的 Br 元素的能谱峰。这些结果说明 TBBPA 降解过程中确实发生了 C-Br 的断裂;Br 元素与 Ag 之间具有强相互作用,导致 TBBPA 脱下来的 Br 会有部分吸附在 BSO 的表面。

图 5 为 BSO 氧化降解 TBBPA 过程中的 TOC 变化情况。从中可知,反应 7 min,其 TOC 的去除率可高达 80%,表明 BSO 可快速氧化矿化 TBBPA。

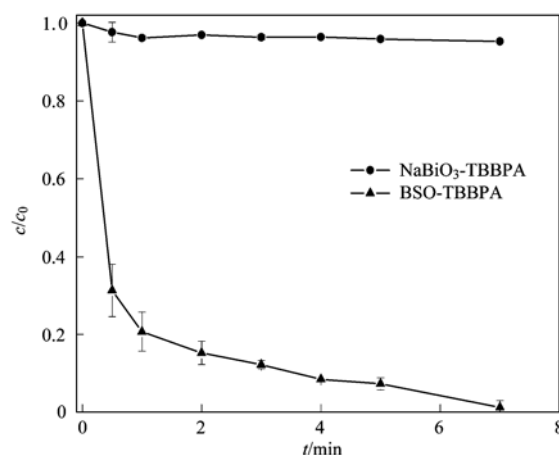


图 2  $\text{NaBiO}_3$  ( $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 与 1-BSO ( $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 氧化降解 TBBPA 的动力学过程

Fig. 2 Kinetic process of TBBPA during its oxidative degradation by  $\text{NaBiO}_3$  ( $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) and 1-BSO ( $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ), respectively

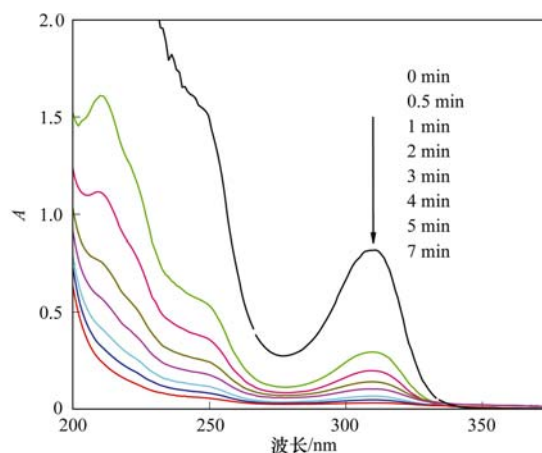


图 3 1-BSO 氧化降解 TBBPA 过程中的紫外-可见吸收光谱变化情况

Fig. 3 UV-Vis spectral changes of TBBPA during its oxidative degradation by 1-BSO

## 2.3 银铋摩尔比对 BSO 性能的影响

图 6 比较了不同银铋摩尔比制备的  $\lambda$ -BSO ( $\lambda$  为 0.01、0.025、0.05、0.1、0.2、1 及 5) 在浓度为  $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  条件下氧化降解  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  TBBPA 的情况。从中可知,随着银铋摩尔比的增加,TBBPA 的降解速率逐渐增大;但当银铋摩尔比达到 1:1 后,再继续增大银铋摩尔比,TBBPA 的降解速度提高不太明显。因此,以下用银铋摩尔比为 1:1 的条件来制备 BSO。

## 2.4 BSO 用量对 TBBPA 降解速度的影响

图 7 为在 TBBPA 的初始浓度  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,BSO 的投加量对 TBBPA 降解效率的影响。从中可知,随着 BSO 用量的增加,TBBPA 的降解速度逐渐



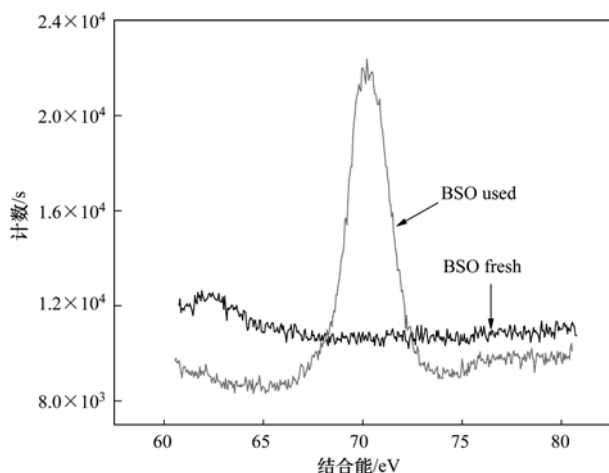


图4 氧化处理 TBBPA 前后 BSO 的 XPS 谱图

Fig. 4 XPS spectra of BSO before and after the oxidative degradation of TBBPA

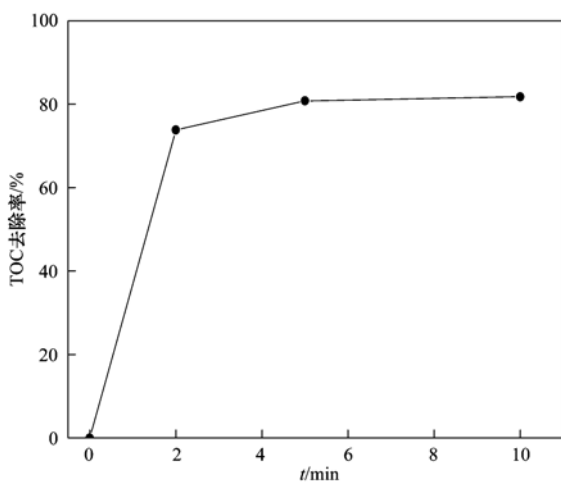


图5 BSO 氧化降解 TBBPA 过程中 TOC 的变化

Fig. 5 TOC removal during the oxidative degradation of TBBPA

加快. 例如, 当 BSO 的浓度由  $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  增加到  $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 在反应开始的 3 min 内 TBBPA 的降解率由 36% 提高到 100%.

## 2.5 TBBPA 降解中间产物的分析

为便于取样分析, 采用银铋摩尔比为 0.2 的 BSO 氧化降解初始浓度为  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 TBBPA, 采用二氯甲烷萃取其降解的中间产物, 萃取液用 BSTFA 硅烷衍生化后, 用 GC-MS 分离与鉴定其中的中间产物. 在未被降解的 TBBPA 经衍生化后, 在保留时间为 34.08 min 出峰 [ $m/z$  688,  $\text{M}-2\text{H}+2\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ ]; 反应 2 min 的降解液的 GC-MS 谱图中出现了 4 个新峰, 保留时间依次为 13.53、15.30、15.51 和 15.85 min. 通过对各组分的分子离子峰的质荷比和碎片断裂方式进行分析, 这 4 个新色谱峰可能的结构如表 1 所示, 均为

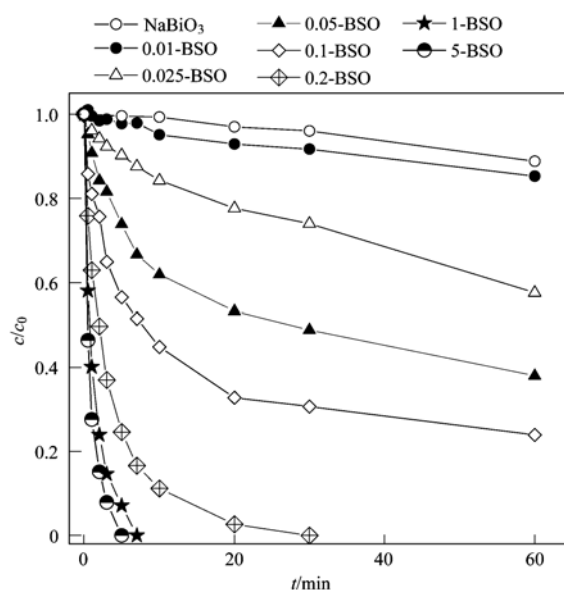


图6 制备 BSO 时不同银铋摩尔比对 TBBPA 降解速度的影响

Fig. 6 Effects of different BSO with varied Ag/Bi molar ratio on the degradation rate of TBBPA

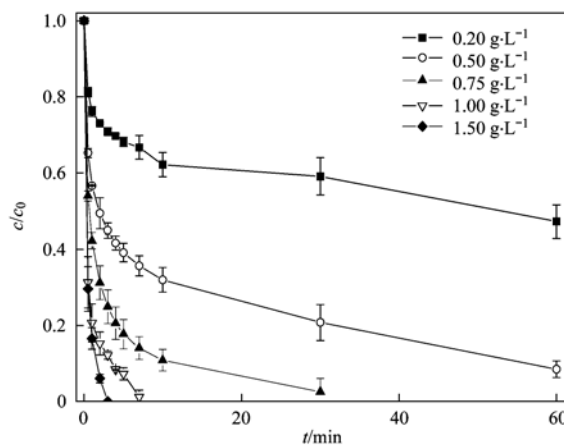


图7 BSO 用量对 TBBPA 降解速度的影响

Fig. 7 Effects of BSO dosage on the degradation rate of TBBPA

单苯环化合物, 与 Han 等<sup>[21,26]</sup> 报道的单线态氧氧化降解 TBBPA 的中间产物相同, 即 BSO 体系产生的单线态氧进攻 TBBPA 分子的中心碳原子, 致使与中心碳原子相连的苯环和异丙基断裂, 再进一步被氧化, 最终被矿化.

## 2.6 TBBPA 降解过程中活性物种的确定

为了考察 BSO 氧化降解 TBBPA 是何种氧化物种在起作用, 分别实验了  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  叔丁醇和  $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NaN}_3$  对 TBBPA 降解速度的影响. 其中叔丁醇是  $\cdot\text{OH}$  的有效淬灭剂, 而  $\text{NaN}_3$  是单线态氧的高效灭活剂. 由图 8 可知, 加入过量的叔丁醇几乎未影响 TBBPA 的降解, 表明  $\cdot\text{OH}$  不是 BSO 氧化降解

TBBPA 的主要活性自由基. 然而,在 10 mmol·L<sup>-1</sup> NaN<sub>3</sub> 存在时,TBBPA 的降解速率明显变慢,反应 5 min 的降解率由 100% 骤降为 46.25%,这说明单线态氧在 BSO 降解 TBBPA 的过程中发挥着重要作用.

BSO 降解 TBBPA 过程中,BSO 中的五价铋将被还原成三价铋,同时部分晶格氧转变成相对键合能较弱的活性氧,并以单线态氧的形式释放出来,从而氧化降解 TBBPA.

表 1 GC-MS 鉴定 TBBPA 降解产生的中间产物<sup>1)</sup>

Table 1 GC-MS identifications of intermediates during the degradation of TBBPA with BSO

| 化合物                                         | 保留时间/min | m/z       | 结构式 |
|---------------------------------------------|----------|-----------|-----|
| tetrabromobisphenol A (TBBPA)               | 34.08    | 544 (688) | ①   |
| 2,6-dibromo-4-(prop-1-en-2-yl) phenol       | 13.53    | 292 (364) | ②   |
| 2,6-dibromo-4-isopropylphenol               | 15.30    | 294 (366) | ③   |
| 2-(3,5-dibromo-4-hydroxyphenyl) acetic acid | 15.51    | 310 (382) | ④   |
| 2,6-dibromo-4-(2-hydroxypropan-2-yl) phenol | 15.85    | 310 (454) | ⑤   |

1) 括弧中的数值为化合物经 BSTFA 衍生化后所对应的 m/z 值

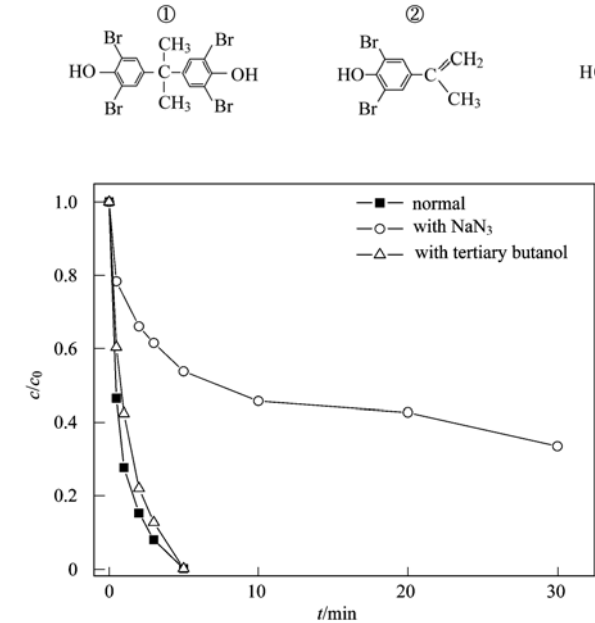


图 8 <sup>1</sup>O<sub>2</sub> 猝灭剂 (NaN<sub>3</sub>) 和 ·OH 猝灭剂 (叔丁醇) 对 BSO 氧化降解 TBBPA 的影响

Fig. 8 Effects of <sup>1</sup>O<sub>2</sub> scavenger (NaN<sub>3</sub>) and ·OH scavenger (tertiary butanol) on the oxidative degradation of TBBPA

3 结论

采用离子交换-共沉淀法制备的铋银氧化物混合物 BSO,它能在室温、无外加能量条件下活化分子氧生成单线态氧,高效快速氧化降解典型溴代阻燃剂 TBBPA. 结果表明,该氧化剂的化学组成(即铋银的摩尔比)和用量对 TBBPA 的降解速率有很大的影响. 在优化的条件下,用投加量为 1 g·L<sup>-1</sup> 的 1-BSO 氧化降解初始浓度为 40 mg·L<sup>-1</sup> 的 TBBPA,在 7 min 可完全降解,且矿化率高达 80%.

参考文献:

[ 1 ] 张小燕,卢其勇. 阻燃剂的生产状况及发展前景[J]. 塑料工业, 2011, 39(4): 1-5.

[ 2 ] 李亚宁,周启星. 四溴双酚-A 的代谢转化与生态毒理效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(2): 263-268.

[ 3 ] 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.

[ 4 ] Law R J, Allchin C R, de Boer J, et al. Levels and trends of brominated flame retardants in the European environment [J]. Chemosphere, 2006, 64(2): 187-208.

[ 5 ] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. Chemosphere, 2002, 46(5): 583-624.

[ 6 ] Eriksson J, Rahm S, Green N, et al. Photochemical transformations of tetrabromobisphenol A and related phenols in water[J]. Chemosphere, 2004, 54(1): 117-126.

[ 7 ] Johnson-Restrepo B, Adams D H, Kannan K. Tetrabromobisphenol A (TBBPA) and hexabromocyclododecanes (HBCDs) in tissues of humans, dolphins, and sharks from the United States[J]. Chemosphere, 2008, 70(11): 1935-1944.

[ 8 ] Bastos P M, Eriksson J, Green N, et al. A standardized method for assessment of oxidative transformations of brominated phenols in water[J]. Chemosphere, 2008, 70(7): 1196-1202.

[ 9 ] Sjödin A, Patterson Jr D G, Bergman Å. A review on human exposure to brominated flame retardants--particularly polybrominated diphenyl ethers[J]. Environment International, 2003, 29(6): 829-839.

[ 10 ] Alae M, Arias P, Sjödin A, et al. An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release[J]. Environment International, 2003, 29(6): 683-689.

[ 11 ] Hakk H, Letcher R J. Metabolism in the toxicokinetics and fate of brominated flame retardants—a review [J]. Environment International, 2003, 29(6): 801-828.

[ 12 ] 刘红玲,刘晓华,王晓祎,等. 双酚 A 和四溴双酚 A 对大型溞和斑马鱼的毒性[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1784-1787.

- [13] 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.
- [14] 罗斯. 还原-氧化两步处理法降解水中典型溴代阻燃剂的研究[D]. 南京: 南京大学, 2011. 1-4.
- [15] Fackler P H. Bioconcentration and elimination of  $^{14}\text{C}$ -residues by Eastern oysters (*Crassostrea virginica*) exposed to tetrabromobisphenol A [R]. Wareham, MA: Springborn Life Sciences Inc., 1989.
- [16] 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.
- [17] Luo S, Yang S G, Sun C, *et al.* Feasibility of a two-stage reduction/subsequent oxidation for treating Tetrabromobisphenol A in aqueous solutions[J]. Water Research, 2011, **45**(4): 1519-1528.
- [18] Zhong Y H, Liang X L, Zhong Y, *et al.* Heterogeneous UV/Fenton degradation of TBBPA catalyzed by titanomagnetite: catalyst characterization, performance and degradation products [J]. Water Research, 2012, **46**(15): 4633-4644.
- [19] 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.
- [20] Xu J, Meng W, Zhang Y, *et al.* Photocatalytic degradation of tetrabromobisphenol A by mesoporous BiOBr: efficacy, products and pathway [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2011, **107**(3-4): 355-362.
- [21] Han S K, Bilski P, Karriker B, *et al.* Oxidation of flame retardant tetrabromobisphenol A by singlet oxygen [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(1): 166-172.
- [22] 闫梦玥, 庞志华, 李小明, 等. 有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2249-2255.
- [23] 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 等. 钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚 A 的研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3507-3512.
- [24] 喻恺. 铋酸钠基钙钛矿型功能材料的可见光催化/直接氧化降解典型有机水相染料研究[D]. 南京: 南京大学, 2012. 68-96.
- [25] Xie Z Y, Ebinghaus R, Lohmann R, *et al.* Trace determination of the flame retardant tetrabromobisphenol A in the atmosphere by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Analytica Chimica Acta, 2007, **584**(2): 333-342.
- [26] Han S K, Sik R H, Motten A G, *et al.* Photosensitized oxidation of tetrabromobisphenol A by humic acid in aqueous solution[J]. Photochemistry and Photobiology, 2009, **85**(6): 1299-1305.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                               |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------|
| Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta                                            | LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>                     | ( 1 )   |
| Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen                                                                                | XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i>                | ( 11 )  |
| Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO <sub>2</sub> over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years                                                   | FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i>             | ( 18 )  |
| Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning                                                                                           | HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i>                  | ( 25 )  |
| Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H <sub>2</sub> ) in the Atmosphere                                        | LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i>        | ( 34 )  |
| Partial Pressure of CO <sub>2</sub> and CO <sub>2</sub> Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir                                         | ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong                    | ( 40 )  |
| Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer                                                            | LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng                  | ( 49 )  |
| Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data                                                                       | ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i>           | ( 56 )  |
| Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed                                                                            | MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling                     | ( 64 )  |
| Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin                                                 | YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i>                | ( 72 )  |
| Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake                                                                             | WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i>             | ( 80 )  |
| Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship                                                           | SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i>    | ( 87 )  |
| Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin                                                          | LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue                            | ( 94 )  |
| Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake                                                                   | DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang                      | ( 107 ) |
| Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth                                                                                                       | WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i>        | ( 114 ) |
| Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir                                                                                                      | CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i>          | ( 121 ) |
| Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region                                                               | WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>               | ( 130 ) |
| Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area                                               | ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>               | ( 136 ) |
| Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water        | SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i>         | ( 143 ) |
| Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region | GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i>                   | ( 151 ) |
| Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)         | ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i>          | ( 163 ) |
| Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City          | LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i>       | ( 172 ) |
| Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen                                                      | CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i>        | ( 179 ) |
| Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain                                                             | WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i>         | ( 186 ) |
| Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China                                                                  | ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i>          | ( 194 ) |
| Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake                                                                                       | CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i>           | ( 202 ) |
| Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide                                                                                                      | CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i>             | ( 209 ) |
| Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon                                                                                                                      | WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i>             | ( 215 ) |
| Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives                                                                                                                | ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i>           | ( 221 ) |
| Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene                                                                                              | ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui                        | ( 227 ) |
| Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process                                                                                | ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i>             | ( 237 ) |
| Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study                                                                                                       | CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i>         | ( 244 ) |
| Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>                                                                                | DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i>           | ( 252 ) |
| Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions                                                                                     | ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i>           | ( 259 ) |
| Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China                                                | ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i>       | ( 266 ) |
| Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province                                                                   | ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i>                | ( 274 ) |
| Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm                                                                                                 | XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i>            | ( 280 ) |
| Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber( <i>Cucumis sativus</i> L.)                                                                    | XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>           | ( 286 ) |
| Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen                                                                                                           | HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i>        | ( 295 ) |
| Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China                                                      | SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i>         | ( 301 ) |
| Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil                                                                                                        | WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i>       | ( 309 ) |
| Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures                             | SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i>              | ( 314 ) |
| Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China                                                                                                       | ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i>    | ( 325 ) |
| Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation                                                                                                         | LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> | ( 333 ) |
| Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor                                                                                                    | XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i>     | ( 338 ) |
| A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide                                                                                                            | LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i>             | ( 343 ) |
| Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China                                                                                     | ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i>           | ( 349 ) |
| Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>                                                                                          | ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i>      | ( 357 ) |
| Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton                                                                                     | LI Man-lu, JIANG Yue-lu                                       | ( 365 ) |

# 《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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