

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁烷的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息(1490,1496,1586,1743)	

四溴双酚 A 的辐照降解研究

李杰^{1,2}, 徐殿斗², 徐刚¹, 马玲玲², 吴明红^{1*}

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 中国科学院高能物理研究所核分析重点实验室, 北京 100049)

摘要: 研究了甲醇-水溶液中四溴双酚 A (TBBPA) 的电子束辐照降解. 通过测定辐照前后 TBBPA 的浓度变化来研究吸收剂量、初始浓度、pH、自由基清除剂对辐照降解效果的影响. 结果表明, TBBPA 在甲醇-水溶液的辐照降解是还原性逐步脱溴降解过程, 自由电子在降解过程中起主导作用, 降解反应遵循一级动力学方程. 在辐照剂量为 10 kGy 时, 20 mg·L⁻¹ 的 TBBPA 有 91.6% 发生脱溴降解, 当向辐照体系充入氮气并且加入叔丁醇, 可将 TBBPA 的降解效率提高到 100%, 或者调节辐照体系溶液的 pH 值至 12, TBBPA 的降解效率也可以达到 100%. 辐照降解是处理 TBBPA 的一种有效手段.

关键词: 四溴双酚 A; 电子束辐照; 吸收剂量; 脱溴; 降解

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1587-04

Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis

LI Jie^{1,2}, XU Dian-dou², XU Gang¹, MA Ling-ling², WU Ming-hong¹

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. The Key Laboratory of Nuclear Analysis, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The radiation degradation of tetrabromobisphenol A (TBBPA) in methanol aqueous solutions by electron beam was studied. The effects of absorbed dose, initial concentration of TBBPA, pH and different kinds of gas saturated solution on the degradation and debromination of TBBPA were investigated. The results showed that the degradation of TBBPA in methanol-water solution was the process of deoxidize debromination, and the radiolysis degradation of TBBPA followed the first-order dynamical equations. When the absorbed dose was 10 kGy, the degradation efficiency of 20 mg·L⁻¹ TBBPA solution could reach to 91.6%. The degradation efficiency of TBBPA could increase to 100% in nitrogen saturated solution containing *tert*-butanol, or achieve 100% under adjusting the pH value to 12. Radiation degradation is an effective means of removing TBBPA.

Key words: tetrabromobisphenol A (TBBPA); electron beam radiolysis; absorbed dose; debromination; degradation

四溴双酚 A (TBBPA) 化学名为 4,4'-(1-甲基亚乙基)双(2,6-二溴)苯酚, 是目前世界上产量和用量最大的溴系阻燃剂, 被广泛用作反应型阻燃剂溴化环氧树脂中间体、溴代聚碳酸酯等的制造中; 同时 TBBPA 也可以作为添加剂, 应用于环氧树脂、酚醛树脂及不饱和聚氧树脂的生产中^[1]. 我国作为四溴双酚 A 的生产和使用大国, 年产量在 3 万 t 左右^[2]. 由于 TBBPA 化学性质稳定, 在环境介质中有很高的持久性, 同时易于在生物体内富集, 对藻类、软体动物、甲壳动物和鱼体有明显的毒性作用, 被认为是一种类似于持久性有机污染物 (POPs) 的潜在内分泌干扰物, 现已在水、沉积物、土壤、大气环境以及生物体内检出^[3~7]. 其潜在的环境风险危害性不容忽视.

目前针对 TBBPA 的降解研究主要集中在光降解和生物降解方面^[8~11], 有关电子束辐照降解的研究还鲜见报道. 由于其苯环结构和卤原子的存在而具有较强的抗生物降解能力, 卤原子的存在也会抑制苯环裂解酶的活性, 从而增加了其抗生物降解能力, 因而在 TBBPA 的降解过程中, 最重要的步骤便

是脱溴. 电子束辐照作为一种新型的污染物处理方法, 特别适用于难以生物降解的有毒有害有机物的处理, 正受到越来越多的关注. 其作用机制是体系中的水分子受到电子束的照射而瞬间产生大量的高活性化学物质, 这主要包括: 水合自由电子、羟基自由基、氢自由基等, 它们与水体中的污染物分子发生一系列的加成、取代、电子转移、断键等各式反应, 使体系中的难降解物质分解成低毒性或者无毒的小分子物质, 甚至彻底矿化成 CO₂ 和 H₂O^[12~16].

本研究利用电子束辐照 TBBPA 的甲醇-水溶液体系, 探讨了吸收剂量、溶液中 TBBPA 的初始浓度、pH、自由基清除剂等诸多因素对四溴双酚 A 脱溴降解效率的影响, 分析了 TBBPA 脱溴后的主要产物, 并对 TBBPA 的降解机制以及降解反应的动力学进行了初步探究.

收稿日期: 2011-07-08; 修订日期: 2011-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11075171, 10905061, 10505023); “十一五”国家科技支撑计划项目 (2007BAC27B00); 上海市委科委项目 (09XD1401800)

作者简介: 李杰 (1986~), 男, 硕士, 主要研究方向为有机污染物的辐照降解, E-mail: jieli@ihep.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: mhwu@shu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验药品及设备

四溴双酚 A (TBBPA): Acros Organics, 纯度 97%; 30% 双氧水、氢氧化钾、高氯酸: 国药集团化学试剂有限公司, 分析纯; 甲醇: Merck, 色谱纯.

仪器: GJ-II 电子加速器 (上海先锋电机厂), 电子束能量 1.8 MeV, 束流 1 ~ 10 mA 连续可调, 扫描宽度为 100 cm. 样品体积为 10 mL, 厚度为 2 mm, 样品置于往复移动式束下装置上辐照, 样品台距钛窗 30 cm, 电子束流强为 1 mA.

1.2 分析方法

辐照前后 TBBPA 的浓度测定采用 Agilent1200 series 高效液相色谱仪 (配备 UV-Vis 紫外检测器) 进行测定. 测定条件如下: XDB-C18 反相色谱柱 (150 mm × 4.6 mm, 5 μm); 流动相: 甲醇: 去离子水 = 80:20 (体积比); 流速: 1 mL·min⁻¹; 柱温: 27℃; 进样体积: 10 μL, 检测波长: 209 nm.

2 结果与讨论

2.1 初始浓度对 TBBPA 降解效果的影响

取 TBBPA 初始浓度 c_0 分别为 5、10、20、40 mg·L⁻¹ 进行不同吸收剂量的辐照, 结果如图 1 所示.

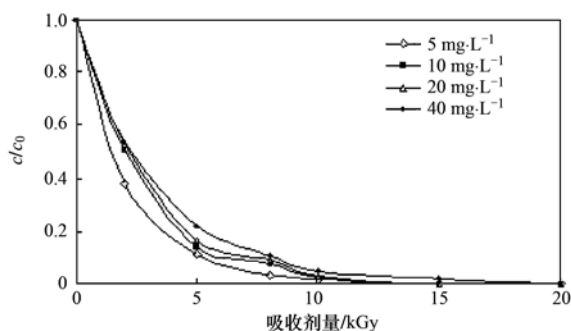


图 1 TBBPA 的不同初始浓度对降解效率的影响

Fig. 1 Effect of initial TBBPA concentration on its degradation rate

由图 1 可见, 随着吸收剂量的增加, TBBPA 的浓度迅速降低, 并且随着初始浓度的增加, TBBPA 的降解效率降低, 但是绝对降解量在增加. 在 5 kGy 的吸收剂量下, 初始浓度为 5、10、20、40 mg·L⁻¹ 的 TBBPA 降解效率依次为 89.7%、86.1%、83.4%、78.3%; 随着吸收剂量增加到 10 kGy, 以上各个浓度下的 TBBPA 降解效率分别为 98.2%、97.5%、91.6%、90.6%, 这表明电子束辐照可有效地降解 TBBPA.

对 TBBPA 的浓度水平与吸收剂量进行回归分

析, 计算结果表明两变量符合一级动力学方程, 如式 (1) 所示.

$$c = c_0 e^{-KD} \quad (1)$$

式中, c_0 为 TBBPA 的初始浓度 (mg·L⁻¹), c 为 TBBPA 的残余浓度 (mg·L⁻¹), D 为吸收剂量 (kGy), K 为剂量常数 (kGy⁻¹). 对式 (1) 取对数得到式 (2). 此方程被广泛应用在有机物的降解描述中^[17,18].

$$\ln c = \ln c_0 - KD \quad (2)$$

根据图 1 的数据, 以 $\ln c/c_0$ 对吸收剂量 D 进行数据拟合, 实验数据与方程的相关性较好 ($R^2 > 98.2\%$). 说明 TBBPA 的电子束辐照降解遵循一级动力学方程.

2.2 自由基清除剂对 TBBPA 降解效果的影响

取 3 组 20 mg·L⁻¹ 的 TBBPA 溶液, 分别通入氧气、空气和氮气直至饱和, 在氮气饱和的 TBBPA 溶液中加入叔丁醇 (浓度为 0.1 mol·L⁻¹), 然后用电子束进行辐照, 主要考察不同自由基清除剂对 TBBPA 降解效率的影响, 结果如图 2 所示.

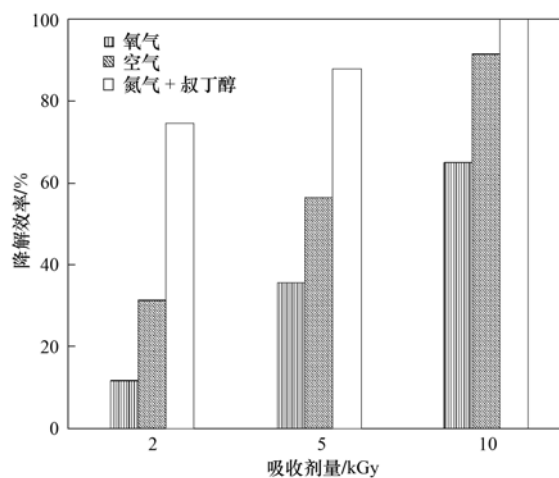
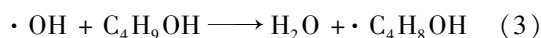
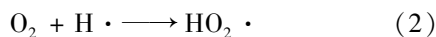
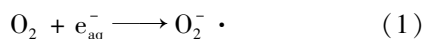


图 2 不同自由基清除剂条件下的 TBBPA 降解效率

Fig. 2 Degradation efficiency of TBBPA under different radicals scavenger

分析图 2 可知, 在相同的吸收剂量下, 分别用氧气、空气饱和以及氮气饱和加入叔丁醇的 TBBPA 溶液, 其降解效率依次是氮气 + 叔丁醇 > 空气 > 氧气, 在 10 kGy 吸收剂量下以氧气饱和的 TBBPA 溶液只有 65% 发生降解, 而在空气饱和或者以氮气饱和加入叔丁醇的环境下, 在 10 kGy 的吸收剂量下 TBBPA 降解效率可分别达到 91.6% 和 100%. 其中以氮气饱和加入叔丁醇的 TBBPA 溶液降解效果最好. 因为氧气是一种 e_{aq}^- 和 $H\cdot$ 清除剂, 能够分别与 e_{aq}^- 和 $H\cdot$ 反应生成 $O_2^{\cdot-}$ 和 $HO_2\cdot$, 而叔丁醇是一种较强的 $\cdot OH$ 清

除剂,反应式为^[19]:



在相同的吸收剂量下,以氧气饱和的 TBBPA 溶液中,还原性活性粒子 e_{aq}^- 和 $\text{H} \cdot$ 的浓度被大大地削弱;而以氮气饱和加入叔丁醇的 TBBPA 溶液中,氧化性活性粒子 $\cdot \text{OH}$ 的浓度被降低. 从而导致各自 TBBPA 降解效率的改变. 这说明 TBBPA 的降解过程可能是一种还原性脱溴过程.

2.3 溶液初始 pH 对 TBBPA 降解效率的影响

用 HClO_4 和 KOH 调节初始浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TBBPA 溶液的 pH 为 3、7、12, 然后进行电子束辐照. 结果如图 3 所示.

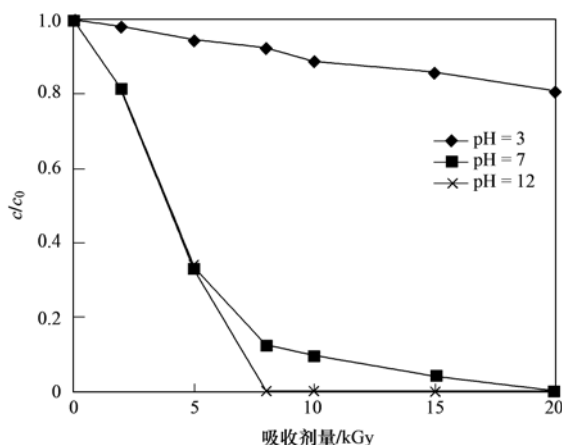
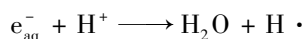


图 3 pH 对 TBBPA 降解效率的影响

Fig. 3 Effect of PH on the degradation of TBBPA

图 3 表明,在 $\text{pH} = 3$ 时, TBBPA 相对浓度值变化非常平缓,降解明显受到抑制,在 20 kGy 的吸收剂量下有超过 80% 的 TBBPA 未被降解;而在 $\text{pH} = 12$ 时,只需 8 kGy 的吸收剂量, TBBPA 就可以降解完全. 由于 TBBPA 的 $\text{pK}_a = 7.5$, 在碱性环境下, TBBPA 大部分以阴离子形式存在,溶解度激增,水合电子和氢原子更容易与 TBBPA 接触反应,因此 TBBPA 的降解效率和降解速度有了大幅度的提高^[20]. 在酸性环境下,水合电子能与氢离子反应生成氢原子,降低了水合电子的浓度,从而引起 TBBPA 降解效率的下降^[21].



2.4 四溴双酚 A 的辐照中间产物分析

图 4 是 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 TBBPA 在辐照 8 kGy 和 15 kGy 后的 HPLC 图,除了保留时间是 5.438 min 的 TBBPA 峰外,色谱图上还出现了其它 4 个主要中间产物的峰,其保留时间分别为 3.975 、 2.992 、

2.398 、 2.019 min . 并且随着辐照的进行这些中间产物的峰面积在逐渐发生变化,结果如图 5 所示. 可能是由于 TBBPA 的降解过程是逐步进行的, TBBPA 的溴原子逐步被取代而产生的三溴双酚 A、二溴双酚 A、一溴双酚 A 以及双酚 A.

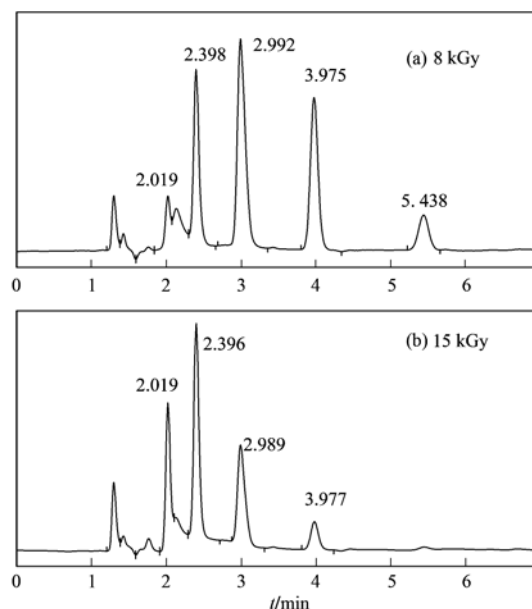


图 4 TBBPA 在辐照 8 kGy 和 15 kGy 后的 HPLC 图

Fig. 4 HPLC chromatogram of TBBPA after an irradiation dose of 8 kGy and 15 kGy

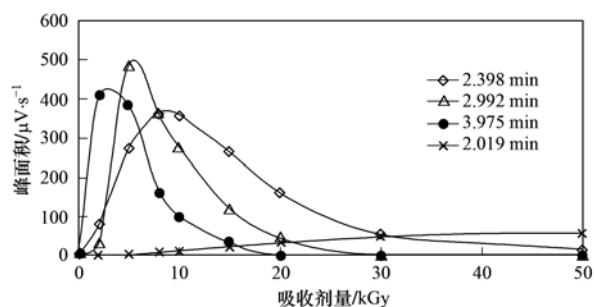


图 5 TBBPA 辐照过程中中间产物在 HPLC 图中峰面积的变化

Fig. 5 Change in concentration of intermediates by radiolysis of TBBPA

3 结论

(1) 电子束辐照可有效降解甲醇-水溶液中 TBBPA, 在初始浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸收剂量为 15 kGy 下即可达到完全去除. 但 TBBPA 的降解产物要彻底的脱溴需要更高的吸收剂量.

(2) 溶液中通入氮气并且加叔丁醇或者调高溶液 pH 值, 能有效地提高四溴双酚 A 的降解效率, 其中 pH 对 TBBPA 的降解效率影响显著.

(3) TBBPA 的降解过程符合一级动力学反应, 并且该过程主要是以水合电子与 TBBPA 进行的还

原性脱溴反应.

参考文献:

- [1] 彭浩, 金军, 王英, 等. 液相色谱-电喷雾离子阱质谱分析土壤中四溴双酚-A[J]. 分析化学, 2007, **35**(4): 549-551.
- [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] 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.
- [4] 张琳, 云霞, 那广水, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定环境水体中的四溴双酚 A[J]. 分析化学, 2009, **37**(A02): 220.
- [5] 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.
- [6] Li Y N, Zhou Q X, Wang Y Y, *et al.* Fate of tetrabromobisphenol A and hexabromocyclododecane brominated flame retardants in soil and uptake by plants[J]. Chemosphere, 2011, **82**(2): 204-209.
- [7] Zhang X L, Luo X J, Chen S J, *et al.* Spatial distribution and vertical profile of polybrominated diphenyl ethers, tetrabromobisphenol A, and decabromodiphenylethane in river sediment from an industrialized region of South China [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(6): 1917-1923.
- [8] Gerecke A C, Giger W, Hartmann P C, *et al.* Anaerobic degradation of brominated flame retardants in sewage sludge[J]. Chemosphere, 2006, **64**(2): 311-317.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Voordeckers J W, Fennell D E, Jones K, *et al.* Anaerobic biotransformation of tetrabromobisphenol A, tetrachlorobisphenol A, and bisphenol A in estuarine sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 696-701.
- [12] 薛军, 胡俊, 王建龙. γ 辐照降解水溶液中氯酚的研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1919-1923.
- [13] Kurucz C N, Waite T D, Cooper W J. The miami electron beam research facility: a large scale wastewater treatment application [J]. Radiation Physics and Chemistry, 1995, **45**(2): 299-308.
- [14] Tobien T, Takac E, Wojnarovits L. Radiolytic degradation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid in dilute aqueous solution: pH dependence [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, **284**(2): 415-419.
- [15] Da Silva M P, Vieira E M. Degradation of alachlor herbicide by gamma radiation from conalt-60 in aqueous and alcohol solution [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, **281**(3): 323-327.
- [16] Getoff N. Radiation-induced degradation of water pollutants - state of the art[J]. Radiation Physics and Chemistry, 1996, **47**(4): 581-593.
- [17] Lau T K, Chu W, Graham N. The degradation of endocrine disruptor di-*n*-butyl phthalate by UV irradiation: A photolysis and product study[J]. Chemosphere, 2005, **60**(8): 1045-1053.
- [18] 刘宁, 徐刚, 吴明红, 等. 邻苯二甲酸二丁酯的电子束辐射降解[J]. 核技术, 2008, **31**(3): 209-213.
- [19] Getoff N. Factors influencing the efficiency of radiation-induced degradation of water pollutants [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, **65**(4-5): 437-446.
- [20] 毛丽, 余益军, 孙兆海, 等. 四溴双酚 A 的水溶性与辛醇/水分配系数及其影响因素初探[J]. 环境化学, 2010, **29**(4): 583-587.
- [21] 吴明红, 包伯荣. 辐射技术在环境保护中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 13-22.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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)

2012年5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行业