

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙,彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤,李金香,杨妍研,程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅,李洁,肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任巍,徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚,朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎,孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡,毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161)	《环境科学》征订启事 (4365)
信息 (4123,4132,4409)	

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋

薛南冬¹, 陈宣宇², 杨兵¹, 秦普丰³, 龙雨^{1,3}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 湖南省环境保护科学研究院, 长沙 410007; 3. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 利用 Level(Ⅲ)逸度模型模拟了浙东某废旧电器拆解区域多溴联苯醚(PBDEs)3种同系物在大气、水体、土壤和沉积物中的分布及迁移通量。在稳态假设条件下3种PBDEs同系物在环境介质中浓度的模型模拟值与实测值吻合较好,验证了模型的可靠性,通过参数灵敏度分析表明PBDEs的基本性质如蒸气压、正辛醇/水分配系数、在介质中的半衰期是影响化合物在环境相中浓度分布的主要因素。研究发现,在废旧电器拆解区大气中PBDEs对下风向的地区可能造成一定程度的污染;当环境系统达到平衡时,在废旧电器拆解区PBDEs主要蓄积在土壤和沉积物中,占有环境介质中PBDEs的95%以上,土壤和沉积物是PBDEs污染的重要二次污染源;PBDEs在介质间的迁移以大气-土壤和水体-沉积物途径为主;废旧电器拆解区土壤中降解是PBDEs在环境中消减最主要途径。研究结果将为废旧电器拆解区PBDEs污染的风险评估和控制提供依据。

关键词: 多溴联苯醚(PBDEs); 多介质逸度模型; 废旧电器拆解区域; 迁移; 归趋

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4326-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201604160

Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model

XUE Nan-dong¹, CHEN Xuan-yu², YANG Bing¹, QIN Pu-feng³, LONG Yu^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Hunan Research Academy of Environmental Sciences, Changsha 410007, China; 3. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The multimedia fugacity model (Ⅲ) was used to simulate the distribution, transfer and fate of typical polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in air, water, soil and sediment in an electrical equipment dismantling area in eastern China. The modeling data were compared with monitored values in air, soil and sediment for validation purpose. Moreover, the transfer fluxes between different compartments were analyzed in order to infer the main transfer process. Parameters of the model were tested and the key parameters were identified using sensitivity analysis method for BDE47 and BDE209. The results of sensitivity analysis indicated that vapor pressure, the $\lg K_{ow}$ value and half-life had significant influence on concentrations of PBDEs in different media. The results showed that when the system reached equilibrium, most of the PBDEs would be accumulated in soil and sediment. The air advection outflow and soil degradation were the major routes for PBDEs to disappear in the area. The results will provide the basis for the risk management of PBDEs contamination.

Key words: polybrominated diphenyl ethers (PBDEs); multimedia fugacity model; electrical equipment dismantling area; transfer; fate

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 作为一类溴系阻燃物质, 常被广泛地添加在电器设备、电子元器件、塑料、建材及纺织品中。PBDEs 具有性质稳定、低水溶性、低挥发性、高亲脂性、易在环境中积累等特点, 是一类新型环境有机污染物^[1~5]。随着电子电器产业的高速发展, PBDEs 的生产量和消耗量不断增加^[6], 而在 PBDEs 生产、使用和废物处置过程中往往导致大气、水体、土壤、沉积物中 PBDEs 污染^[7~10]。尤其在废物处置中涉及电子、电器拆解领域, 由于其拆解技术落后, 缺乏环境保护及规范管理措施, 容易造成环境污染。目前, 关于 PBDEs 的环境行为研究大多集中

在水生食物网模型^[11~14]、长距离迁移^[15,16]、室内污染物来源及分布^[17,18]等探讨, 但关于 PBDEs 在多介质环境中迁移及归趋的实测和模拟研究较少, 尤其是在 PBDEs 污染场地如废旧电器拆解区域中相关研究未见报道。关于有机污染物在多介质中的迁移转化相继提出了有毒物质迁移模型^[19]、暴露分析模拟系统^[20]、多相非稳态平衡模型^[21]、逸度模型^[22,23]等。逸度模型是一种用逸度代替浓度算法的

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571481); 国家环境保护公益性行业科研专项(20150934)

作者简介: 薛南冬(1964~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为有机污染物环境修复与控制技术, E-mail: xuend@craes.org.cn

模型,通过该模型揭示有机污染物在环境介质各相中的迁移和归趋,具有算法简便、参数少、结果直观等优点. 本研究以我国浙东某废旧电器拆解区域为例,通过逸度模型模拟环境介质(空气、水、土壤及沉积物等)中 PBDEs 迁移与归趋,研究 PBDEs 在环境中的分布和相间迁移及其关键决定因素,以期为区域 PBDEs 污染的风险评估和控制提供依据.

1 材料与方法

1.1 模型框架

逸度是一热力学量,它表示物质脱离某一相的倾向性的大小. 当系统处于相间平衡时,各相的逸度相等. 在低浓度时,浓度与逸度存在线性关系,可通过逸度容量来确定相间平衡. 逸度模型是一种用逸度代替浓度算法的模型,通过该模型揭示有机污染物在环境介质各相中的迁移和归趋. Level III 模型是考虑物质的稳态输入和输出,假定物质在各相间处于非平衡状态,计及平流迁移、相邻两相间的扩散迁移和物质在相内发生的各种反应(光解、水解、氧化还原、生物降解等),并假定这些过程均为一级过程,根据稳态假设和质量平衡关系建立涉及各个主相的迁移量平衡方程. 该模型将研究区域分

为大气、水体、土壤和沉积物这 4 个环境主相,每个主相中分为多个子相,大气主相包括气子相和气溶胶子相;水体主相包括水子相和悬浮物子相;土壤主相包括土壤气、土壤固体和土壤水这 3 个子相;沉积物主相包括固体沉积物子相和水子相. 不同相之间所涉及的过程包括化合物在相邻相间的迁移、大气平流、各相中的降解、水相流动、沉积物掩埋等.

本研究拟选用 Level III 逸度模型来模拟 PBDEs 的环境多介质迁移和归趋,结合研究区域内环境介质中 PBDEs 的实测浓度,考察各环境相及其子相的逸度、逸度容量、PBDEs 在各环境介质间的迁移通量[D , $\text{mol} \cdot (\text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}$]、迁移速率及系统平衡时 PBDEs 在各相中的浓度等.

1.2 模型参数

模型的输入参数主要包括研究区域的环境参数如大气、水、土壤、沉积物等环境介质的深度和密度、在各环境介质中有机碳含量(见表 1)、PBDEs 理化性质如在水中溶解度、辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$)、蒸气压、在大气、水、土壤、沉积物中的半衰期^[23]和模型的环境多介质之间迁移参数(见表 2).

表 1 研究区域的环境介质模型参数^[24]

Table 1 Model parameters for multimedia in the study area						
相	深度/m	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	有机碳含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	气相体积比	水相体积比	固相体积比
大气	2 000	1.19	—	1	—	2×10^{-11}
水	10	1 000	—	—	1	5×10^{-6}
土壤	0.2	2 400	0.02	0.2	0.2	0.6
沉积物	0.1	1 500	0.04	—	0.3	0.7
颗粒物	—	1 500	0.02	—	—	1

表 2 环境多介质相间迁移参数^[24]

Table 2 Transport parameters in multimedia fugacity model			
参数	数值	参数	数值
气温/ $^{\circ}\text{C}$	17	气侧大气-土壤传输系数/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	5
风速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	9.72	水侧水-沉积物传输系数/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	9.59×10^{-9}
水流速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	3.6	水-土壤迁移速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	1.0×10^{-5}
降水速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	3.74×10^{-5}	土壤中气相迁移速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	0.02
相面积/ m^2	4.15×10^6	气侧气-水迁移速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	3
水体面积/ m^2	4.2×10^5	水侧气-水迁移速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	0.03
清洗速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	200 000	沉积物沉降速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	5.00×10^{-7}
干沉降速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	10.8	沉积物再悬浮速率/ $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$	2.00×10^{-7}

以我国浙东某废旧电器拆解区为研究区域^[27],该区域主要拆解废旧的变压器、电机等电器,估计区域面积为 $4.15 \times 10^6 \text{ m}^2$,模型中相面积按 $4.15 \times 10^6 \text{ m}^2$ 计算. PBDEs 的排放量根据当地废旧电器年

处理量 250 万 t 估算. 2003 年,美国及欧盟等地区相继颁布了对电子电气设备中多溴联苯醚类化合物的使用限制,规定 PBDE 的最大允许量为 0.1%,而所研究区域拆解的废旧电器主要来源于欧美国家及

东亚的日本,因此,本研究中废旧电器中的 PBDEs 含量按 0.1% 计算. 根据刘峰等^[25]的研究结果,典型废旧电器中 PBDEs 的浸出率为 0.04% ~ 0.44%,考虑到在自然条件和实验中条件的差异,故取最小浸出率 0.04% 来计算 PBDEs 排放量. 因而,研究区域内 PBDEs 的排放量估算为 1 t. 另外,1990 年代来,十溴联苯醚的需求量占 PBDEs 总需求量的 81% ~ 83%,其次为五溴联苯醚占 11%,其他产品生产较少^[26]. 因此,本研究中 BDE209、BDE99、BDE47 的排放量按 8:1:1 的比例计算为 0.8、0.1 和 0.1 t.

本课题组前期研究显示,研究区域偏上风向某点大气中 PBDEs 浓度为 $1861.2 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$,上游水体中 PBDEs 未检出^[27],因此,模型中大气平流输入 PBDEs 的浓度定为 $1861.2 \text{ pg} \cdot \text{m}^{-3}$,水体平流输入 PBDEs 的浓度则为 $0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 模型验证

(1) 模拟结果有效性验证

通常通过实测数据与模型结果比较来验证模型,可以接受的结果差值是在一个数量级之内,如果结果差值较大,则需要对模型调整^[28,29]. 图 1 可见,研究区域内水、土壤、沉积物中 3 种 PBDEs 同系物浓度的实测值^[28~30]与模拟值吻合度较高,仅沉积物中 BDE47 与 BDE99 的浓度模拟值略高于实测值,但在一个数量级的合理范围内.

(2) 参数灵敏度

为了确定输入参数灵敏度的方法是假定模型的每个参数依次按照预先设定的步长或分割点变化,得出模拟结果的相对变化量与参数的相对变量之比^[30],公式为:

$$S_i = [(Y_{i+1} - Y_i)/Y_i] / [(X_{i+1} - X_i)/X_i]$$

式中, S_i : 某一参数灵敏度系数; Y_i : 所模拟的状态量; X_i : 某一输入的参数.

设置参数变化 +10% 计算其灵敏度系数 S_i . $S_i > 2$, 表示该参数对模型的灵敏度极显著, $2 \geq S_i > 1$, 表示参数对模型的灵敏度较显著, $1 \geq S_i \geq 0.95$, 表示参数对模型的灵敏度显著, $S_i < 0.95$, 表示参数对模型灵敏度不显著^[28]. 对 BDE47 和 BDE209 模拟的灵敏度系数见表 3.

从表 3 可以看出,各参数对 BDE47 的灵敏度要远小于 BDE209. 同时,不同介质中,各参数对沉积物的灵敏度最大,其中蒸气压、 $\lg K_{ow}$ 、半衰期等参数的灵敏度都达到了 85 以上. 参数对水体中

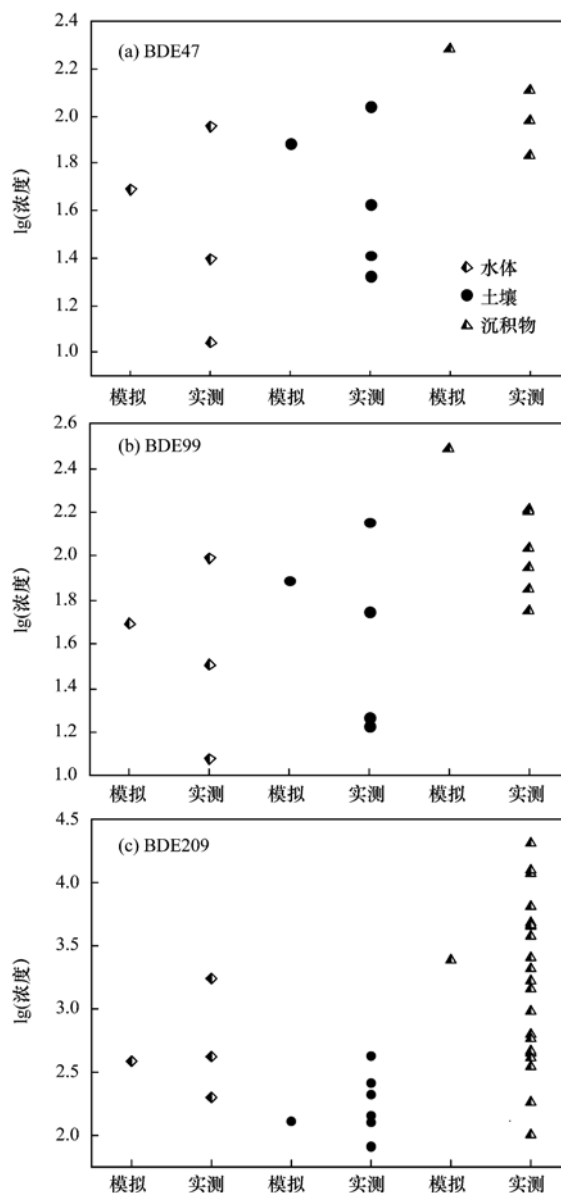


图 1 PBDEs 模拟浓度与实测浓度的对比

Fig. 1 Comparison between the calculated and the observed concentrations of PBDEs

BDE47 和 BDE209 的模拟结果的灵敏度都较小,绝大多数都在 0.1 以下. 参数对土壤中 PBDEs 模拟灵敏度比水中 PBDEs 模拟结果的灵敏度要大,但远远低于对沉积物的灵敏度. 可见,与 PBDEs 基本性质相关的参数如蒸气压、 $\lg K_{ow}$ 、在介质中的半衰期是影响其在环境中浓度分布的最主要因素.

通过模拟结果有效性验证和参数灵敏度分析可以看出,Level III 多介质逸度模型模拟可较准确地反映研究区域 PBDEs 的污染情况,该模型适用于研究区域内 PBDEs 多介质环境中迁移及归趋的模拟.

2.2 模拟结果

2.2.1 PBDEs 在环境介质中的分布

表 3 参数灵敏度分析

Table 3 Sensitivity analysis of parameters

参数名称	BDE47			BDE209		
	$S_{\pm}$	$S_{\text{水}}$	$S_{\text{沉}}$	$S_{\pm}$	$S_{\text{水}}$	$S_{\text{沉}}$
蒸气压	-0.037	9.25	-1.92	5.72	0.03	85.02
$\lg K_{\text{ow}}$	0	0.12	17.60	14.40	0.05	85.15
土壤半衰期	1	0.02	4.57	7.23	0.03	85.05
沉积物半衰期	0	0.02	5.60	7.23	0.05	92.16
土壤密度	-0.89	0.02	4.57	-0.71	0	0
土壤深度	-5.4	-0.02	-8.42	-0.71	0	0
沉积物密度	0	0.02	-1.87	-0.71	0	-1.74
沉积物深度	-5	0.02	-8.56	0	0	-0.91
土壤固体体积分数	-0.89	0	4.57	-0.71	0	0
沉积物固体体积分数	0	0.02	-1.03	-0.71	0	-0.91
颗粒物体积分数	0	0.02	4.26	0	0.03	-0.49
颗粒物有机质含量	0	0	5.63	0	0	0.41

模型模拟结果显示,在大气、水、土壤及沉积物中,BDE47 的浓度分别为 $6.54 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $48.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $77.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $192 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$;BDE99 的浓度分别为 $6.23 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $49.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $79.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $311 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; BDE209 的浓度分别为 $44.6 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $386 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $129 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $2\,436 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。表 4 列出达到平衡时 PBDEs 在环境介质中的量(kg)及所占比例(质量分数)。平衡时,BDE47 在土壤和沉积物中所占比例分别为 95.5% 和 4.15%,BDE99 分别为 93.3% 和 6.39%,BDE209 分别为 74.2% 和

24.6%,由此可见,PBDEs 在土壤中所占的比例最大,其次为沉积物中,3 种 PBDEs 的同系物在土壤和沉积物中占环境中总量的 95% 以上,说明土壤和沉积物是 PBDEs 在环境中的主要储库。同时,从表 4 中大气、水、土壤及沉积物中 BDE47、BDE99、BDE209 浓度的变化,可以看出,随溴代程度升高,PBDEs 在沉积物中的富集比例增加,这可能是因为高溴代的 PBDEs 具有更高的 $\lg K_{\text{ow}}$ 值而更容易在有机物较丰富的沉积物中富集,因而 BDE209 在沉积物中的含量明显增加。

表 4 3 种 PBDEs 同系物在环境介质中的含量及所占比例

Table 4 Contents of three congeners of PBDEs and proportions in environmental media according to the model

PBDEs	量值/kg(比例/%)			
	大气	水	土壤	沉积物
BDE47	0.054 3(0.124)	0.103(0.235)	41.8(95.5)	1.82(4.15)
BDE99	0.051 7(0.113)	0.104(0.225)	42.9(93.3)	2.94(6.39)
BDE209	0.370(0.395)	0.812(0.866)	69.5(74.2)	23.0(24.6)

从环境介质中不同 PBDEs 同系物的分布来看(图 2),大气和水中 PBDEs 同系物的组成结构基本一致,均是 BDE47 和 BDE99 分别占 10% 左右,BDE209 约占 80%,沉积物中 PBDEs 的组成结构也与前两者较为相似,只是 BDE47 的含量有所降低,3 种 PBDEs 同系物所占比例分别为 6.65%、10.6%、82.85%。而在土壤中 PBDEs 的结构组成则发生了较大变化,BDE47 和 BDE99 所占比例显著升高,分别占 27.1% 与 27.8%,BDE209 仅占 45% 左右。

2.2.2 PBDEs 在环境介质间的迁移

模拟 3 种 PBDEs 同系物在多介质环境中的迁移情况如图 3。可以看出,大气、水体的平流输出和土壤降解是环境中 PBDEs 减少的主要途径,其中土壤降解的贡献量最大,大气平流输出次之,水体的平

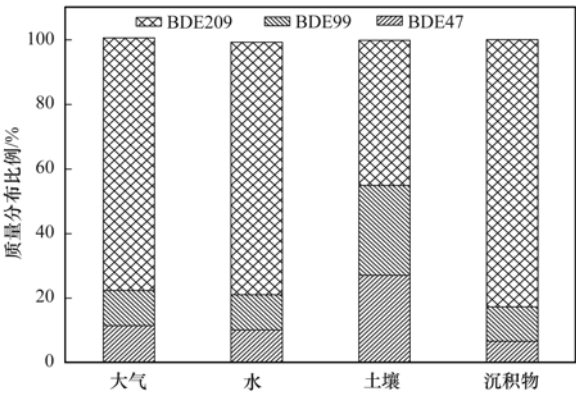
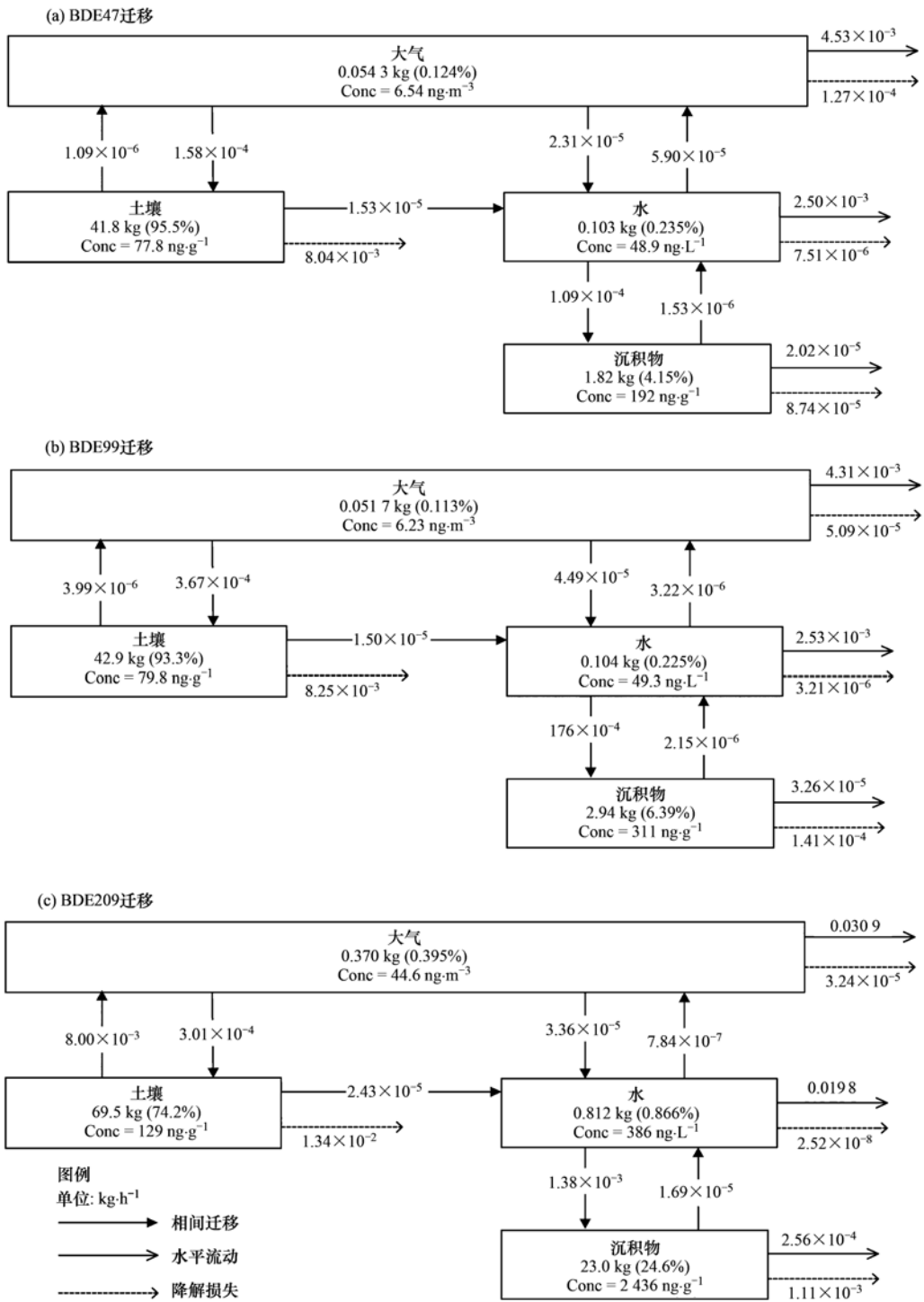


图 2 3 种 PBDEs 同系物在大气、水、土壤及沉积物等不同介质(相)中的分布

Fig. 2 Mass distributions of PBDEs in air, water, soil and sediment



Conc 表示 PBDEs 含量
图 3 PBDEs 的环境多介质迁移归趋模拟

Fig. 3 Estimated rates of movement and transformation of PBDEs in multimedia

流输出最小. 其他几种途径对环境中 PBDEs 减少的贡献较前三者相差 2~3 个数量级. 另外, 沉积物中两种途径的贡献都较小, 这可能是造成沉积物中的 PBDEs 浓度高、使其成为 PBDEs 在环境中重要的蓄积库的另一重要原因.

PBDEs 介质间的迁移则以大气-土壤、水-沉积物迁移为主, 最终赋存在土壤和沉积物中, 这可能与其低水溶性和高 $\lg K_{ow}$ 有关. BDE47 在大气-水体和水体-大气之间的交换速率相差较小, BDE99 次之, 而 BDE209 相差较大, 大气-水体净迁移速率随着溴

程度的增加而增加。而在大气中降解以 BDE47 降解速率最快,随着溴代程度增加,降解速率依次降低,这说明低溴代的 PBDEs 则更容易在大气中被降解。而由于高溴代的 PBDEs 具有较低的蒸气压^[24],更容易从大气沉降。因此,尽管低溴代的 PBDEs 更容易在大气中被降解,但空气平流输出依然是其迁出大气相的主要途径。另外 3 种同系物在大气与土壤和水体与沉积物之间的迁移速率相差不大。在 PBDEs 的损失途径上,BDE47 和 BDE99 的损失途径基本相同,主要有大气平流输出,在土壤及大气中的降解,而 BDE209 主要的损失途径是沉积物中的降解、大气平流和在土壤中降解,而在大气中降解速率有所降低。从以上 PBDEs 在环境中的迁移降解速率分析可以推测:大气中 PBDEs 对下风向的地区造成一定程度的污染,土壤降解是污染物在该区域环境中减少的重要途径;大气中 PBDEs 可能随着干湿沉降、扩散等过程进入到该区域的水体、土壤及沉积物中。

3 结论

以我国浙东某废旧电器拆解区为研究对象,通过模拟值与实测值比较以及模型参数敏感度分析表明多介质逸度模型 Level(Ⅲ)适用于模拟 PBDEs 在废旧电器拆解区环境中的迁移与归趋。研究结果表明:在废旧电器拆解区大气中 PBDEs 对下风向的地区可能造成一定程度的污染;PBDEs 在介质间的迁移以大气-土壤和水体-沉积物途径为主,土壤和沉积物是 PBDEs 的最终储库,废旧电器拆解区土壤和沉积物是 PBDEs 污染的重要二次污染源。废旧电器拆解区土壤中降解是 PBDEs 在环境中消减最主要途径。

参考文献:

- [1] Routti H, Letcher R J, Chu S G, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and their hydroxylated analogues in ringed seals (*Phoca hispida*) from Svalbard and the Baltic Sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3494-3499.
- [2] Leung A O W, Luksemburg W J, Wong A S, *et al.* Spatial distribution of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in soil and combusted residue at Guiyu, an electronic waste recycling site in southeast China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(8): 2730-2737.
- [3] Darnerud P O, Risberg S. Tissue localisation of tetra- and pentabromodiphenyl ether congeners (BDE-47, -85 and -99) in perinatal and adult C57BL mice [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(3): 485-493.
- [4] Darnerud P O, Wong J, Bergman Å, *et al.* Common viral infection affects pentabrominated diphenyl ether (PBDE) distribution and metabolic and hormonal activities in mice [J]. *Toxicology*, 2005, **210**(2-3): 159-167.
- [5] Branchi I, Capone F, Vitalone A, *et al.* Early Developmental Exposure to BDE 99 or aroclor 1254 affects neurobehavioural profile: interference from the administration route [J]. *Neurotoxicology*, 2005, **26**(2): 183-192.
- [6] de Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(5): 583-624.
- [7] Corsolini S, Covaci A, Ademollo N, *et al.* Occurrence of organochlorine pesticides (OCPs) and their enantiomeric signatures, and concentrations of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the Adélie penguin food web, Antarctica [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **140**(2): 371-382.
- [8] Akutsu K, Kitagawa M, Nakazawa H, *et al.* Time-trend (1973-2000) of polybrominated diphenyl ethers in Japanese mother's milk [J]. *Chemosphere*, 2003, **53**(6): 645-654.
- [9] Ikononou M G, Rayne S, Addison R F. Exponential increases of the brominated flame retardants, polybrominated diphenyl ethers, in the Canadian Arctic from 1981 to 2000 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(9): 1886-1892.
- [10] Betts K S. Flame-proofing the Arctic? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(9): 188A-192A.
- [11] Bhavsar S P, Gandhi N, Gewurtz S B, *et al.* Fate of PBDEs in Juvenile lake trout estimated using a dynamic multichemical fish model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(10): 3724-3731.
- [12] Gandhi N, Bhavsar S P, Gewurtz S B, *et al.* Development of a multichemical food web model: application to PBDEs in Lake Ellasjøen, Bear Island, Norway [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(15): 4714-4721.
- [13] Mattila T J, Verta M. Modeling the importance of biota and black carbon as vectors of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the Baltic Sea ecosystem [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(13): 4831-4836.
- [14] Wu J P, Luo X J, Zhang Y, *et al.* Biomagnification of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls in a highly contaminated freshwater food web from South China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(3): 904-909.
- [15] Gouin T, Harner T. Modelling the environmental fate of the polybrominated diphenyl ethers [J]. *Environment International*, 2003, **29**(6): 717-724.
- [16] Wania F, Dugani C B. Assessing the long-range transport potential of polybrominated diphenyl ethers: a comparison of four multimedia models [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(6): 1252-1261.
- [17] Jones-Otazo H A, Clarke J P, Diamond M L, *et al.* Is house dust the missing exposure pathway for PBDEs? An analysis of the urban fate and human exposure to PBDEs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(14): 5121-5130.
- [18] Zhang X M, Diamond M L, Ibarra C, *et al.* Multimedia modeling of polybrominated diphenyl ether emissions and fate indoors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(8): 2845-2850.
- [19] Schnoor J L, McAvoy D C. Pesticide transport and bioconcentration model [J]. *Journal of the Environmental*

- Engineering, 1981, **107**(6): 1229-1246.
- [20] Burns L A, Cline D M, Lassiter R R. Exposure analysis modeling system (EXAMS): user manual and system documentation [R]. EPA-600/3-82-023. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1982.
- [21] Yoshida K, Shigeoka T, Yamauchi F. Multi-Phase non-steady state equilibrium model for evaluation of environmental fate of organic chemicals [J]. Toxicological & Environmental Chemistry, 1987, **15**(3): 159-183.
- [22] Mackay D. Finding fugacity feasible [J]. Environmental Science & Technology, 1979, **13**(10): 1218-1223.
- [23] 田慧, 郭强, 毛潇萱, 等. 广州地区典型多溴联苯醚迁移和归趋行为模拟 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(3): 758-765.
- Tian H, Guo Q, Mao X X, *et al.* Simulating the transfer and fate of typical PBDEs in Guangzhou [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(3): 758-765.
- [24] 唐纳德·麦凯. 环境多介质模型—逸度方法 [M]. 黄国兰, 陈春江, 孔庆宁, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [25] 刘锋, 徐红, 徐明德, 等. 典型电子废物中多溴联苯醚的模拟浸出释放特征 [J]. 环境科学研究, 2014, **27**(2): 203-209.
- Liu F, Xu H, Xu M D, *et al.* Simulation study on leaching release characteristics of polybrominated diphenyl ethers from the typical electronic waste [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(2): 203-209.
- [26] 刘汉霞, 张庆华, 江桂斌, 等. 多溴联苯醚及其环境问题 [J]. 化学进展, 2005, **17**(3): 554-562.
- Liu H X, Zhang Q H, Jiang G B, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers and its related environmental problems [J]. Progress in Chemistry, 2005, **17**(3): 554-562.
- [27] 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 等. 废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚(PBDEs)的污染特征与生态风险 [J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3731-3739.
- Chen X Y, Xue N D, Zhang S L, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in river sediments from an electrical equipment dismantling area [J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3731-3739.
- [28] 李静, 吕永龙, 王铁宇, 等. 苯并(a)芘的环境多介质迁移和归宿模拟 [J]. 环境工程学报, 2008, **2**(2): 279-284.
- Li J, Lü Y L, Wang T Y, *et al.* Simulation of multi-media transfer and fate of benzo [a] pyrene [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, **2**(2): 279-284.
- [29] 王学彤, 王飞, 贾金盼, 等. 电子废物拆解区河流沉积物中多溴二苯醚的污染水平、分布及来源 [J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1088-1093.
- Wang X T, Wang F, Jia J P, *et al.* Levels, distribution and possible sources of polybrominated diphenyl ethers in river sediments from an electronic waste recycling area [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1088-1093.
- [30] 吴有方, 方利江, 丁中原, 等. 广州地区 PBDEs 长距离迁移潜力和总持久性模拟 [J]. 中国环境科学, 2012, **32**(3): 426-432.
- Wu Y F, Fang L J, Ding Z Y, *et al.* Simulation of long-range transport potential and overall persistence of PBDEs in Guangzhou [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(3): 426-432.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行