

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM_{2.5} 中稳定碳同位素组成研究 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)

交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)

公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)

兰州及其周边区域大气降水 δ¹⁸O 特征及其水汽来源 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)

O₃/H₂O₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制 何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)

江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)

金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)

崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 韩建刚, 曹雪 (3810)

FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)

深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 边璐, 李田, 侯娟 (3840)

三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)

小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)

湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)

水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)

底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)

4 种人工湿地填料的 f₂ 噬菌体吸附特性 陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)

稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 纪营雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)

nTiO₂ 在水中的分散沉降行为研究 陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)

微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)

两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究 周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)

化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)

珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)

污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)

生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)

亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 严俊霞, 李君剑, 王洪建, 张义辉 (3992)

SiB3 模式对作物区 CO₂ 通量的模拟研究 张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)

缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例 闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)

废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)

典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)

3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究 方婧, 余博阳 (4050)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)

毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)

珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)

利用高通量测序对封存 CO₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究 田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)

酸性矿山水区域废矿石中真核生物多样性分析 李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)

十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)

外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)

电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)

《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯

史双昕,董亮,李玲玲,张辉,李斯明,张天野,黄业茹*

(国家环境分析测试中心,国家环境保护二噁英污染控制重点实验室,北京 100029)

摘要: 2009 年 7 月在江苏省南部城市苏州、无锡和南通采集了 58 个城市道路灰尘样品,使用气相色谱质谱法测定了样品中的 8 种多溴联苯醚 (PBDEs) 和 32 种多氯联苯 (PCBs)。结果表明,样品中 \sum_8 PBDEs 含量范围为 $4.21 \sim 1471 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, \sum_{32} PCBs 含量范围为 $\text{ND} \sim 14.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, PBDEs 的含量远远高于 PCBs。和其他地区城市土壤样品比较,城市道路灰尘中的 PBDEs 含量较高,来自燃料燃烧过程和汽车尾气产生的 PBDEs 不容忽视。城市工业区和中心区样品中 PBDEs 和 PCBs 的含量水平没有显著性差异,而高于景观区。研究发现,在城市工业区存在 PCBs 非故意排放源。PBDEs 同族体单体相对含量分析表明, BDE209 是样品中检测出的最主要的 PBDEs 单体,占 \sum_8 PBDEs 含量的 96.7% (64.1% ~ 99.8%)。样品中的 PCBs 同族体主要为四氯代 PCBs 和六氯代 PCBs,道路灰尘中 PCBs 同族体的分布模式与 PCBs 产品和其他环境介质存在一定差异。

关键词: 城市道路灰尘; 多溴联苯醚; 多氯联苯; 苏州; 无锡; 南通

中图分类号: X131; X508 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4024-07

Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong

SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, ZHANG Hui, LI Si-ming, ZHANG Tian-ye, HUANG Ye-ru

(Key Laboratory of Dioxins Pollution Control for State Environmental Protection, National Research Center for Environmental Analysis and Measurements, Beijing 100029, China)

Abstract: Fifty-eight urban road dust samples were collected in June of 2009 from Suzhou, Wuxi and Nantong, South Jiangsu Province. Eight polybrominated diphenyl ether (PBDE) congeners and thirty-two polychlorinated biphenyl (PCB) congeners were measured using the gas chromatography-mass spectrometry. Concentrations of \sum_8 PBDEs and \sum_{32} PCBs ranged from 4.21 to $1471 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and ND was $14.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the road dust samples, respectively. On the average, levels of PBDEs were much higher than PCBs in samples. Compared with the levels of PBDEs and PCBs in urban soil samples, results indicated that PBDEs levels observed in road dust samples were much higher than urban soil samples collected from other cities. Road dust PBDEs from combustion sources and vehicle emission should be attracted concerns. No significant difference was found between the levels of PBDEs or PCBs in the industrial areas and the urban center area, but was higher than landscape area. The results showed that there were existed unintentional emissions of PCBs in industrial areas. Investigation of compositional pattern of PBDEs indicated that BDE209 was the predominant congener in all samples, contributed 96.7% (64.1% - 99.8%) of \sum_8 PBDEs. The dominant congeners in the \sum_{32} PCBs were tetra-PCBs and hexa-PCBs. The compositional pattern of PCBs congeners found in the road dust was not consistent with that of the commercial PCBs product and other environmental matrix.

Key words: road dust; PBDEs; PCBs; Suzhou; Wuxi; Nantong

多溴联苯醚 (PBDEs) 和多氯联苯 (PCBs) 结构与性质相似,都具有一定的生物毒性,在环境中能够稳定存在,可以通过食物链在生物体内累积,并且能随大气作长距离迁移造成全球性污染,属于典型的持久性有机污染物 (POPs)^[1,2]。2004 年 PCBs 被列入《斯德哥尔摩公约》首批受控 POPs 名单,2009 年商用五溴和八溴联苯醚也被列入公约附件受控范围^[3,4]。研究发现,城市和人类活动密集区是 PBDEs 和 PCBs 污染较严重的区域,城市环境介质中的 PBDEs 和 PCBs 越来越引起人们的重视^[2~6]。

城市大气颗粒物在特定的气象条件下通过降尘

形式返回地面,颗粒物上附着的 POPs 会随之富集到地表灰尘中^[4]。城市道路灰尘是一类特殊的地表灰尘,其中含有来自大气降尘、交通排放、建筑施工等各种来源的颗粒物。因此城市道路灰尘中 POPs 的污染状况可以在一定程度上指示大气颗粒物中 POPs 的污染状况^[7]。目前,国内外已经开展

收稿日期: 2013-01-07; 修订日期: 2013-02-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2009CB42160X); 环境保护公益性行业科研专项 (20100902601)

作者简介: 史双昕 (1973 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境中持久性有机污染物, E-mail: shishuangxin2001@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yrhuang@cneac.com

了许多道路灰尘中 POPs 的研究工作^[7-9],但在 PBDEs 和 PCBs 这两类物质研究上却很少. 作为城市 POPs 迁移转化的一种重要环境载体,城市道路灰尘对城市生态环境和人体健康的危害不容忽视. 首先,道路灰尘中粒径 $< 75 \mu\text{m}$ 的颗粒可以通过再悬浮而进入大气,颗粒物中的 POPs 会通过呼吸或随机摄入尘土等途径进入户外活动居民的体内,尤其是对环卫人员、道路交通警察、商贩、儿童的危害更大^[6]. 其次,城市道路灰尘上附着的 POPs 还可以随道路径流进入水体,危害水体生态环境并最终通过食物链危害人类健康^[4].

苏南地区是中国经济发展最快的地区之一,这里既聚集了数量众多的纺织、机械,电力、化工、船舶、冶金等传统工业企业,又聚集了大量新材料、新能源、电子、信息等新型工业企业,这些工业企业都是 PCBs 和 PBDEs 潜在的污染来源^[1,2]. 随着该地区经济和城市化发展的进一步加快,城市颗粒物污染和 POPs 污染日益严重干扰

了城市居民的生产生活. 本研究分析了苏州、无锡、南通道路灰尘土中 PBDEs 和 PCBs 的含量水平和空间分布特点并探究了其污染来源,这对于了解城市环境 POPs 的迁移归趋规律和保护生态环境都有积极的作用.

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

2009 年 7 月在苏州、南通和无锡共设置了 58 个采样点,分别设 3 类采样区域,代表景观区、中心区和工业园区,采样点位见表 1. 选择城市道路路肩一侧约 $1 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 范围为采集区域,采集道路灰尘使用不锈钢铲、毛刷和棕色玻璃瓶,采样区域内采集 3 个平行样品,将平行样品等量均匀混合作为 1 个有效样品($\geq 50 \text{ g}$). 样品用车载冰箱运回实验室,在阴凉处自然风干,除去小石块、植物枝条等其它非尘土物质,在不锈钢研磨罐中磨细后,过 200 目筛,冷藏待分析用.

表 1 苏州、无锡和南通道路灰尘采样点位和点数¹⁾

Table 1 Locations and amounts of road dust sample in Suzhou, Wuxi and Nantong

城市	景观区	中心区	工业园区
苏州	渔阳山、何山公园、虎丘公园	沧浪区、平江区、金阊区(5)	高新区(6)、工业园区(2)、吴中区
南通	君山、狼山、嵩园	崇川区(9)	港闸工业园区(6)、开发区(2)
无锡	吴文化公园、鼋头渚、梅园	北塘区(2)、崇安区(2)、南长区(3)、锡山区(2)、新区	思柏工业园(2)、滨湖开发区、蠡园工业园、新加坡工业园、扬名工业园

1)(n): 采样点位数

1.2 试剂材料与仪器

1.2.1 化学试剂

实验用正己烷、二氯甲烷试剂:农残级(Tedia 公司,美国). 高纯铜粉:优级纯(加速溶剂萃取, $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸浸泡,蒸馏水洗涤,丙酮洗涤,真空抽干后保存在密封三角瓶中). 无水硫酸钠(450°C 烘烤 6 h); 氢氧化钠、浓硫酸:优级纯(北京化工厂,中国). 硅胶:80 目(正己烷萃取两遍, 160°C 烘烤 12 h, Sigma 公司,美国); 弗罗里土:100 ~ 200 目(正己烷萃取 2 遍, Sigma 公司,美国).

高纯氮气:99.999%,用于加速溶剂萃取;高纯氦气:99.999%,用于 GC/MS 载气.

色谱标准物:8 种 PBDEs 标准溶液:BDE28、47、100、99、154、153、183 ($20 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$) 和 BDE209 ($200 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, AccuStandard, Inc 公司,美国); 碳标记同位素: ^{13}C -BDE28、47、100、99、153、154、183 ($2 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$), ^{13}C -BDE209 ($50 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, Cambridge Isotope Laboratories 公司,美

国). 32 种 PCBs 标准溶液:PCB8、28、52、49、44、37、74、70、66、60、101、99、87、77、82、118、114、153、105、179、138、158、126、166、187、183、128、156、180、169、170、189 ($2 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, AccuStandard, Inc 公司,美国). 碳标记同位素: ^{13}C -PCB28、52、118、153、180、194 ($1 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, Cambridge Isotope Laboratories 公司,美国). 内标: ^{13}C -PCB209 ($100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, AccuStandard, Inc 公司,美国).

1.2.2 仪器

加速溶剂提取仪(ASE-300 Dionex 公司,美国); 气相色谱-质谱联用仪(安捷伦公司 Agilent 7890/5975C,美国); 配负化学源的气相色谱-质谱联用仪(岛津公司 QP2010-plus,日本); 旋转蒸发器(RE111 Büchi 公司,瑞士); 平行蒸发仪(BV180 柴田公司,日本).

1.3 样品处理

1.3.1 加速溶剂提取仪萃取

将 5.00 g 道路灰尘土样品和 5 g 活化铜粉装入加速溶剂萃取仪的 34 mL 萃取池中. 加入 10 ng ^{13}C -PBDEs、 ^{13}C -PCBs 和 100 ng ^{13}C -BDE209 后上机萃取. 萃取溶剂为体积比 1:1 的正己烷和二氯甲烷混合溶剂; 加热温度 100℃; 静态萃取时间为 10 min; 萃取压力为 1.034×10^7 Pa (1 500 psi); 萃取循环次数 2 次. 萃取液浓缩后用正己烷替换, 正己烷相用浓硫酸酸洗, 酸洗后的有机相浓缩至约 1 mL 待净化.

1.3.2 净化分离步骤

浓缩液通过多层复合硅胶柱进行净化, 净化柱由下到上依次装填脱脂棉, 无水硫酸钠 1 g, 活化硅胶 1 g, 弗罗里土 2 g, 活化硅胶 1 g, 2% 氢氧化钠硅胶 3 g, 活化硅胶 1 g, 44% 硫酸硅胶 8 g, 活化硅胶 1 g, 无水硫酸钠 1 g. 40 mL 正己烷活化复合硅胶柱, 125 mL 20% 二氯甲烷/正己烷溶液淋洗. 淋洗液浓缩至 200 μL 加入 50 ng ^{13}C -PCB209 待分析.

1.4 GC/MS 分析

(1) BDE28、47、100、99、153、154、183 仪器分析条件 (Agilent 7890/5975C)

色谱柱: DB-5 30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm df; 进样口温度: 270℃; 色谱/质谱接口温度: 300℃; 电子轰击源 (EI 源); 离子源温度: 230℃; 进样方式: 不分流进样; 程序升温条件: 60℃ (保持 1 min), 以 30℃ \cdot min $^{-1}$ 升至 240℃, 再以 10℃ \cdot min $^{-1}$ 升至 320℃, 保持 5 min.

(2) BDE209 仪器分析条件 (负化学离子源 QP2010-plus)

色谱柱: ZB-5HT 15 m \times 0.25 mm \times 0.1 μm df; 进样口温度: 270℃; 色谱/质谱接口温度: 300℃; 离子源温度: 260℃; 进样方式: 高压不分流进样, 160 kPa (1 min); 程序升温条件: 100℃ (保持 1 min), 以 30℃ \cdot min $^{-1}$ 升至 220℃, 再以 20℃ \cdot min $^{-1}$ 升至 320℃, 保持 5 min.

(3) PCBs 仪器分析条件 (Agilent 7890/5975C)

色谱柱: DB-5 60 m \times 0.32 mm \times 0.25 μm df; 进样口温度: 270℃; 色谱/质谱接口温度: 300℃; EI 源; 离子源温度: 230℃; 进样方式: 不分流进样; 程序升温条件: 60℃ (保持 1 min), 以 30℃ \cdot min $^{-1}$ 升至 240℃, 再以 4℃ \cdot min $^{-1}$ 升至 320℃, 保持 5 min.

1.5 质量控制及保证

方法可靠性采用基体加同位素标回收实验验证, ^{13}C -BDE209 的回收率为 51.3% ~ 142%, 其他化合物回收率为 79.4% ~ 112%. 实际样品中的

PBDEs 含量用 ^{13}C -PBDEs 回收率的值进行校正. 清洁基质 (道路灰尘样品 ASE 萃取后马弗炉 600℃ 烘烤 4 h) 用于全程序空白控制、精密度实验和方法检出限计算. 全程序空白除 BDE209 外, 其它化合物未检出. 平行样及加标平行样 ($n=7$) 结果的相对偏差在 20% 以内. BDE209 的方法检出限 = $3 \times$ 全程空白标准偏差 ($n=7$). 其它化合物的方法检出限 = $3 \times$ 空白基质加标标准偏差 ($n=7$, 加标量 2 ng). BDE209 的方法检出限为 3.9 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 7 种 PBDEs 的方法检出限为 0.06 ~ 0.09 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, PCBs 的方法检出限为 0.04 ~ 0.12 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. GC 系统的污染会引起 BDE209 的降解, 因此样品测试之前必须更换衬管和进样垫, 并截除色谱柱进样口端和质谱端各约 10 cm 以保证系统清洁. 当 ^{13}C -BDE209 回收率低于 50%, 样品在清洁系统后重新进样.

2 结果与讨论

2.1 PBDEs 和 PCBs 的含量水平

苏州、无锡和南通道路灰尘样品中全部检出了 PBDEs, 89.6% 的样品中检测出了 PCBs (表 2). 其中, BDE209 的检出率为 100%, 其他 PBDEs 单体的检出率依次为 PBDE47 (96.6%)、28 (93.1%)、183 (87.9%)、153 (72.4%)、154 (70.7%)、99 (65.1%) 和 100 (51.7%). 32 种 PCBs 有 24 种 PCBs 单体被检出, 检出率较高的 PCBs 单体为 PCB153 (82.8%)、52 (77.6%)、28 (65.5%)、187 (48.3%)、158 (44.8%)、180 (46.6%) 和 101 (39.7%). 相对较高的检出率说明 PCBs 和 PBDEs 是城市道路灰尘中普遍存在的两类污染物. 样品中 \sum_8 PBDEs 的平均含量为 330 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (4.21 ~ 1471 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), \sum_{32} PCBs 的平均含量 2.38 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (ND ~ 14.1 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). PBDEs 的含量比 PCBs 含量高约 2 个数量级, 是这两类 POPs 中的主要成分. BDE209 是样品 PBDEs 中最主要的同族体, 平均浓度占 \sum_8 PBDEs 的 96.7%. 7 种指示性的 PCBs (28、52、101、138、153、180) 含量平均为 1.47 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 \sum_{32} PCBs 的 61.8%.

由于国内外城市道路灰尘中的 PBDEs 和 PCBs 鲜有报道, 本研究结果与其他地区城市土壤样品中文献报道最多的 7 种 PBDEs、BDE209 和 \sum PCBs 的含量加以比较. 道路灰尘土中的 \sum_7 PBDEs 含量为 8.67 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (ND ~ 35.5 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 高于英国

表 2 苏州、无锡、南通道路尘土中 PBDEs 和 PCBs 的含量水平/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ Table 2 Levels of PBDEs and PCBs in road dust samples from Suzhou, Wuxi and Nantong/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	\sum_7 PBDEs	BDE209	\sum_{32} PCBs	\sum_7 PCBs(指示性)
检出率	98.2	100	89.6	89.6
平均值	9.55	322	2.38	1.47
中位值	4.32	272	1.5	1.19
最大值	65.4	1 439	11.8	9.59
最小值	ND	4.01	ND	ND
标准偏差	12.5	361	1.68	1.68

Birmingham ($0.4 \sim 3.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[10], 德国 Mainz ($1.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[11], 中国上海 ($0.02 \sim 3.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[12]. 道路灰尘土中 BDE209 的含量为 $322 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($4.01 \sim 1 439 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 远高于中国上海 ($0.0029 \sim 2.91 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[12], 德国 Mainz ($0.76 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[11] 和科威特 ($3.1 \sim 66.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[4], 而与中国莱州 PBDEs 生产企业周边土壤 ($576 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[13] 和欧洲家庭灰尘土中 BDE209 的含量相当 ($60 \sim 467 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14]. 比较发现, 城市道路灰尘中的 PBDEs 含量比城市土壤高许多, 这与 PBDEs 在城市环境中的污染特点有着密切的关系. PBDEs 属于添加型阻燃剂, 含有 PBDEs 的产品在制造、使用以及废弃拆解过程中, PBDEs 会挥发出来^[1], 其中高溴代 PBDEs 还会附着在颗粒物上释放到城市大气中^[5]. 另外, 垃圾焚烧、冶金、矿物燃料燃烧等过程中, 排放的废气和颗粒物中包含未完全分解和重新生成的 PBDEs^[15], 这部分 PBDEs 也会随飞灰或废气、尾气释放到城市大气中, 大气中这些 PBDEs 会通过降尘富集到地表灰尘土中. 土壤是 PBDEs 重要的环境归宿之一, 城市土壤中的 PBDEs 主要来自大气沉降物, 而单位质量城市土壤中包含的大气沉降物要低于道路灰尘, 这是造成道路灰尘中的 PBDEs 含量较高的重要原因. Luo 等^[9] 在比较中国某电子垃圾拆解地附近道路灰尘土和土壤中的 PBDEs 含量时也得出相同结论.

道路灰尘土中的 \sum_{32} PCBs 含量为 $2.38 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{ND} \sim 14.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 和中国大连土壤中的 \sum_{57} PCBs ($2.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1.3 \sim 4.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[2]、天津土壤中的 \sum_{84} PCBs ($3.56 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.82 \sim 8.88 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[16]、北京土壤中的 \sum_{14} PCBs ($3.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.39 \sim 13 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 含量相当^[17], 而低于欧洲城市土壤中 \sum_{19} PCBs 的含量, 如葡萄牙 Aveiro ($7.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.62 \sim 73 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 苏格兰 Glasgow ($22 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $4.5 \sim 77$

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 瑞典 Uppsala ($5.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $2.3 \sim 77 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 意大利 Torino ($14 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1.8 \sim 172 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 斯洛文尼亚 Ljubljana ($6.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $2.8 \sim 48 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[18]. 比较发现, 苏州、无锡和南通城市道路灰尘中的 PCBs 含量低于或和其他城市土壤的 PCBs 相当, 这与检测的 PCBs 单体种类和各城市的 PCBs 污染程度有关, 也与 PCBs 在城市环境中的污染特点有密切的关系. PCBs 是一种“老” POPs, 在世界范围内禁用了几十年后, PCBs 在大气等环境介质中的含量逐年降低, 新的 PCBs 污染源相对 PBDEs 而言较少, 因此道路灰尘中富集的 PCBs 含量较低. 对于土壤而言, 土壤有机质可以吸附较长历史时期来自大气干湿沉降, 泄露等渠道进入土壤中的 PCBs, 因此城市土壤反映的是一段历史时期 PCBs 累积污染的状况, 而道路灰尘更多的是反映当前大气沉降颗粒物中 PCBs 的污染状况.

2.2 PBDEs 和 PCBs 的空间分布特征

总体上, 景观区样品的 PBDEs 和 PCBs 比中心区和工业区低 (见图 1). 这是因为大多数景观区远离城市或交通要道, 而 PBDEs 和 PCBs 的污染随着距离城市和工业区的增加而降低^[3,19]. 其次是因为所选景观区周边的植被比较茂密, 可以有效吸附和阻挡颗粒物中 PBDEs 和 PCBs 的扩散和沉降^[20], 尤其是倾向吸附于颗粒物上的高溴代 PBDEs 和高氯代 PCBs^[5]. 研究中还发现苏州景观区样品的 PBDEs 和苏州、南通景观区 PCBs 含量较高 (见图 1 和图 2), 这与苏州景观区虎丘点位和南通景区君山狼山点位距离城市中心区或工业区较近 ($< 5 \text{ km}$) 有关.

使用 SPSS 软件对苏州、无锡和南通工业区和中心区样品中 PBDEs 做独立样本 T 检验, 结果发现这两类功能区样品中 PBDEs 的含量均值没有显著性差异 ($P = 0.178 > 0.05$, 95%), 与很多文献报道的工业区环境介质中的 PBDEs 含量明显高于城市中心区不一致^[19]. 这与道路灰尘这种环境介质中颗粒物的来源有密切关系. 一般说来, 城市中心

区交通流量大于工业区,且城市建设规模相对较大.道路灰尘富集汽车尾气和建筑施工释放的颗粒物会较高,而这些颗粒物中含有大量的 PBDEs^[15].另外,本研究在采样点位设置上不针对特定的 PBDEs 污染排放源,因此造成苏州和无锡中心区样品中 PBDEs 含量均值上稍高于工业区.南通的情况不同,南通市的工业以机械、电力、化工、船舶制造等重工业为主,燃烧过程产生的颗粒物排放多且集中,颗粒物中包含大量的 PBDEs^[15],造成了南通工业区样品的 PBDEs 含量均值高于中心区.

苏州、无锡和南通工业区和中心区样品中 PCBs 含量均值也没有显著性差异 ($P = 0.82 > 0.05, 95\%$),但工业区样品 PCBs 的平均含量大于中心区,这与无锡工业区热电厂和苏州某石油添加剂公司附近采样点样品中高含量的 PCBs 有关,这两个点位 PCBs 的含量分别为 $11.7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $14.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于样品平均含量的 $2.38 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,造成工业区样品中 PCBs 的平均含量会高些.这也说明虽然 PCBs 在世界范围内禁用了几十年,城市或城市工业区仍然存在非故意排放源.

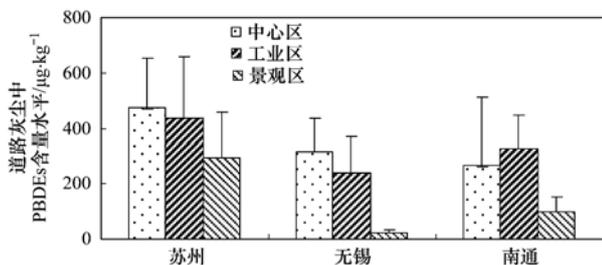


图1 苏州、无锡、南通中心区、工业区和景观区道路灰尘中的 PBDEs 含量

Fig. 1 Levels of PBDEs in road dust samples from urban center area, industrial area and landscape area of Suzhou, Wuxi and Nantong

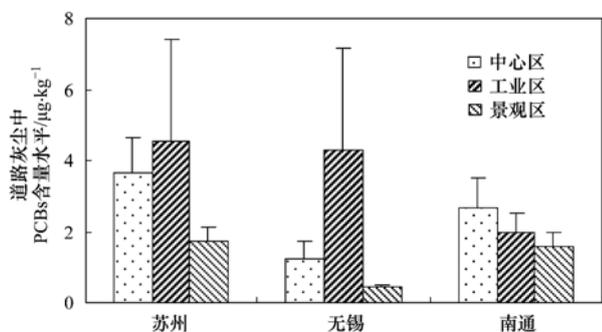


图2 苏州、无锡、南通中心区、工业区和景观区道路灰尘中的 PCBs 含量

Fig. 2 Levels of PCBs in road dust samples from urban center area, industrial area and landscape area of Suzhou, Wuxi and Nantong

2.3 PBDEs 和 PCBs 同族体的分布模式

BDE209 是样品中 \sum_8 PBDEs 中最主要的同族体,含量占 \sum_8 PBDEs 的 96.7% (89.4% ~ 99.8%), BDE183 是另外 7 种 PBDEs 中丰度最高的同族体,占 \sum_7 PBDEs 的 34.2%. BDE209 含量较高与中国使用的溴代阻燃剂(BFRs)主要为十溴联苯醚工业品的事实一致^[12],也与 BDE209 通常吸附在颗粒物上有关^[5]. BDE183 是八溴产品主要成份之一^[21],其他溴代阻燃剂产品中 BDE183 含量很少,燃料燃烧过程中产生的 BDE183 通常低于 BDE47、99 等低溴代的 PBDEs^[15],推断八溴联苯醚阻燃剂在该地区存在一定程度的使用或释放源.八溴产品主要用于电子产品中,电子信息产品制造企业是苏南城市的支柱行业之一,这很可能成为 BDE183 的来源之一.

BDE47、99、153 和 BDE154 是五溴联苯醚(Penta-BDEs)产品的主要组成成分^[21],国际上使用最多的两种五溴联苯醚产品为 Bromkal 70-5DE 和 DE71. 图 3 比较了道路灰尘土、五溴联苯醚产品、室内外灰尘和大气中 6 种 PBDEs 单体之间的丰度比例^[21~25].可以看出,城市道路灰尘与电子废弃物处理地室外灰尘中 PBDEs 丰度分布接近^[23],与其他环境介质和五溴联苯醚产品不同.造成这种现象的原因和五溴联苯醚产品在该地的使用情况有待进一步研究.另外,道路灰尘中 BDE28 比商用五溴联苯醚的丰度高,而低于大气中的比例,可见一部分气溶胶态的低溴代联苯醚,也可以在一定气象条件下富集到道路灰尘中.

道路灰尘样品中 PCBs 异构体的贡献依次为:

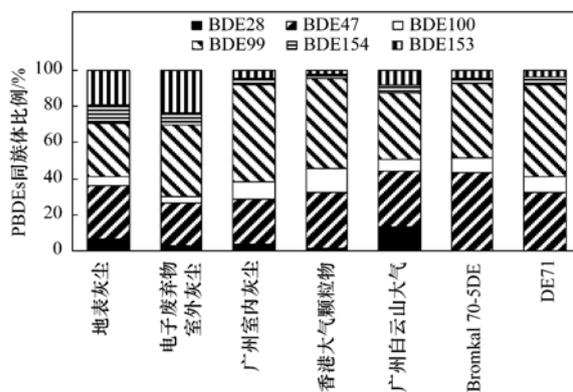


图3 Penta-BDE 在 70-5DE 工业品、大气、室内外尘土和城市道路灰尘中的组成对比

Fig. 3 Comparison of Penta-BDE congener profiles in 70-5DE mixture, DE71, dust from indoor and outdoor, atmosphere and road dust

四氯代 > 六氯代 > 五氯代 > 三氯代 > 七氯代 > 二氯代 PCBs (见图 4)。其中, 四氯代和六氯代 PCBs 占总量的 86.2%。这与我国生产和使用的国产工业 PCBs 异构体分布不同^[26], 与中国一些城市土壤和大气中 PCBs 的异构体分布也不同^[16,17,25,27]。道路灰尘中高氯代 PCBs (六氯和七氯) 明显高于这些环境介质, 这是由于高氯代 PCBs 比低氯代 PCBs 的蒸气压低, 更易吸附在大气颗粒物上, 另外高氯代 PCBs 比低氯代的 PCBs 更稳定、更不易降解^[28], 因此道路灰尘中高氯代 PCBs 的比例高于其他环境介质。另外一个原因可能是由于各地 PCBs 使用情况和现有 PCBs 排放源不同所致, 有文献报道我国太湖流域 PCBs 污染就存在国产 PCBs 产品和进口 Aroclor1254、Aroclor1260 产品的混合污染^[29], 而 Aroclor 产品中高氯代 PCBs 明显高于国产 PCBs。

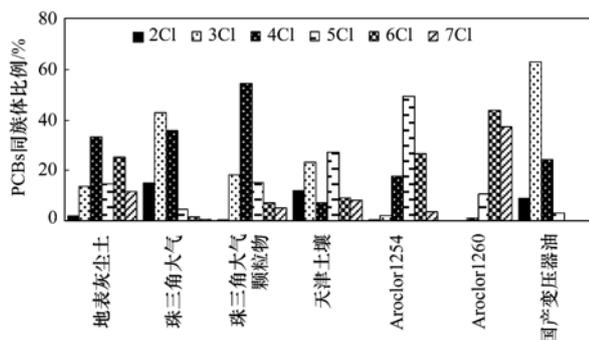


图 4 城市道路灰尘与 PCBs 产品、城市土壤、大气中不同氯代 PCBs 异构体的组成

Fig. 4 Comparison of PCBs composition patterns in PCBs product, urban soils, urban atmosphere and road dust

3 结论

(1) PBDEs 和 PCBs 是苏州、无锡和南通城市道路灰尘中普遍存在两类污染物, 城市道路灰尘中富集的 PBDEs 含量远远高于 PCBs。

(2) 苏州、无锡和南通工业区和中心区样品中 PBDEs 和 PCBs 含量均值没有显著性差异, 而平均含量高于景观区。

(3) 苏州、无锡和南通城市中存在十溴和八溴产品释放源, 在工业区存在 PCBs 非故意排放源。

(4) 富集在城市道路灰尘中的高溴代 PBDEs 和高氯代 PCBs 含量较高。

参考文献:

[1] De Wit C A. An overview of brominated flame retardants in the environment[J]. Chemosphere, 2002, **46**(5): 583-624.
[2] Wang D G, Yang M, Jia H L, *et al.* Levels, distributions and profiles of polychlorinated biphenyls in surface soils of Dalian,

China[J]. Chemosphere, 2008, **73**(1) 38-42.

- [3] Ren N Q, Que M X, Li Y F, *et al.* Polychlorinated biphenyls in Chinese surface soils [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(11): 3871-3876.
[4] Gevaio B, Ghadban A N, Uddin S, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in soils along a rural-urban-rural transect: sources, concentration gradients, and profiles [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(12): 3666-3672.
[5] Chen L G, Mai B X, Bi X H, *et al.* Concentration levels, compositional profiles, and gas-particle partitioning of polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of an urban city in south China [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(4): 1190-1196.
[6] Mandalakis M, Besis A, Stephanou E G. Particle-size distribution and gas/particle partitioning of atmospheric polybrominated diphenyl ethers in urban areas of Greece [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(4): 1227-1233.
[7] Chrysikou L P, Gemenetzi P G, Samara C A. Wintertime size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and organochlorine pesticides (OCPs) in the urban environment: street-vs rooftop-level measurements [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(2): 290-300.
[8] Offenberg J H, Eisenreich S J, Chen L C, *et al.* Persistent organic pollutants in the dusts that settled across lower Manhattan after September 11, 2001 [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(3): 502-508.
[9] Luo Y, Luo X J, Lin Z, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in road and farmland soils from an e-waste recycling region in southern China: concentrations, source profiles, and potential dispersion and deposition [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **407**(3): 1105-1113.
[10] Harrad S, Hunter S. Concentrations of polybrominated diphenyl ethers in air and soil on a rural-urban transect across a major UK conurbation [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(15): 4548-4553.
[11] Thorenz U R, Bandowe B A M, Sobocka J, *et al.* Method optimization to measure polybrominated diphenyl ether (PBDE) concentrations in soils of Bratislava, Slovakia [J]. Environmental Pollution, 2011, **158**(10): 2208-2217.
[12] Jiang Y F, Wang X T, Zhu K, *et al.* Occurrence, compositional profiles and possible sources of polybrominated diphenyl ethers in urban soils of Shanghai, China [J]. Chemosphere, 2010, **80**(2): 131-136.
[13] Jin J, Wang Y, Liu W Z, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in atmosphere and soil of a production area in China: levels and partitioning [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(3): 427-433.
[14] Frederiksen M, Vorkamp K, Thomsen M, *et al.* Human internal and external exposure to PBDEs—a review of levels and sources [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2009, **212**(2): 109-134.

- [15] Wang L C, Lee W J, Lee W S, *et al.* Emission estimation and congener-specific characterization of polybrominated diphenyl ethers from various stationary and mobile sources [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(10): 3108-3115.
- [16] 李志勇, 刘金巍, 孔少飞, 等. 天津市区表层土壤中多氯联苯的污染特征[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(6): 685-690.
- [17] 刘耕耘, 陈左生, 史焯弘, 等. 北京土壤中的 PCBs 含量与组成[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 2013-2017.
- [18] Cachada A, Lopes L V, Hursthouse A S, *et al.* The variability of polychlorinated biphenyls levels in urban soils from five European cities[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(2): 511-518.
- [19] Qin P H, Ni H G, Liu Y S, *et al.* Occurrence, distribution, and source of polybrominated diphenyl ethers in soil and leaves from Shenzhen Special Economic Zone, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **174**(1): 259-270.
- [20] Horstmann M, McLachlan M S. Evidence of a novel mechanism of semivolatile organic compound deposition in coniferous forests [J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30**(5): 1794-1796.
- [21] La Guardia M J, Hale R C, Harvey E. Detailed polybrominated diphenyl ether (PBDE) congener composition of the widely used penta-, octa-, and deca-PBDE technical flame-retardant mixtures [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(20): 6247-6254.
- [22] Deng W J, Zheng J S, Bi X H, *et al.* Distribution of PBDEs in air particles from an electronic waste recycling site compared with Guangzhou and Hong Kong, South China [J]. *Environment International*, 2007, **33**(8): 1063-1069.
- [23] 王璟, 陈社军, 田密, 等. 电子废弃物处理地室内外灰尘中多溴联苯醚的污染及其人群暴露水平[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 173-178.
- [24] 黄玉妹, 陈来国, 许振成, 等. 家庭尘土中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平初步研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 168-172.
- [25] 陈来国, 麦碧娴, 许振成, 等. 广州市夏季大气中多氯联苯和多溴联苯醚的含量及组成对比[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 150-159.
- [26] 降巧龙, 周海燕, 徐殿斗, 等. 国产变压器油中多氯联苯及其异构体分布特征[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(5): 608-612.
- [27] 李春雷, 郝永梅, 麦碧娴, 等. 珠三角地区冬季大气中 PCBs 的空间分布[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(4): 655-659.
- [28] Manz M, Wenzel K D, Detze U, *et al.* Persistent organic pollutants in agricultural soils of central Germany[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **227**(1-3): 187-198.
- [29] 聂明华, 杨毅, 刘敏, 等. 太湖流域水源地悬浮颗粒物中的 PAH、OCP 和 PCB[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(8): 1347-1354.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jun-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行