

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

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

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

成都市大气 PM_{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源

印红玲,李世平,叶芝祥,杨迎春,梁金凤,游俊杰

(成都信息工程大学资源环境学院,成都 610225)

摘要:应用气相色谱-质谱联用仪定量分析成都市大气 PM_{2.5} 中有机磷酸酯阻燃剂(OPEs)的质量浓度水平,讨论了其分布特征,并采用后向气流轨迹模型及相关性分析探析 PM_{2.5} 中 OPEs 的来源. 结果表明,成都市市区采样点大气 PM_{2.5} 中 $\sum 7\text{OPEs}$ 年平均质量浓度为 $6.46 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,郊区采样点为 $9.38 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 受郊区废旧物质拆解产业和常年主导风向的影响,郊区采样点大气 PM_{2.5} 中 OPEs 的质量浓度高于市区采样点($P=0.013$). 大气混合程度影响郊区和市区 OPEs 的分布,外源污染对成都市 OPEs 贡献小,OPEs 质量浓度高低可能主要受采样点周围局地源的影响.

关键词:有机磷酸酯; 阻燃剂; 污染水平; 来源; PM_{2.5}

中图分类号: X131.1; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3566-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.003

Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM_{2.5} in Chengdu City

YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, YANG Ying-chun, LIANG Jin-feng, YOU Jun-jie

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Organic phosphorus esters (OPEs) in atmospheric PM_{2.5} in Chengdu city was quantitatively determined by using gas chromatography-mass spectrometry. The distribution characteristic was discussed, back trajectory model and correlation analysis were used to study the sources of OPEs in PM_{2.5} in Chengdu city. The results showed that the annual average concentration of $\sum 7\text{OPEs}$ in atmospheric PM_{2.5} in Chengdu city was $6.46 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ for the urban site and was $9.38 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ for the suburb site. Due to the waste material recycling industries in the suburb area and the perennial dominant wind direction in Chengdu, the concentration of $\sum 7\text{OPEs}$ at suburb site was higher than that at urban site ($P=0.013$). The atmospheric mixed degree influenced the distribution of OPEs in rural and urban area. The source of $\sum 7\text{OPEs}$ in atmospheric PM_{2.5} in Chengdu city was mainly from endogenous pollution which was mainly affected by the local sources around the sampling sites, while the contribution of the exogenous pollution was small.

Key words: OPEs; flame retardant; pollution level; sources; PM_{2.5}

随着溴代阻燃剂的逐步禁用,有机磷酸酯(organic phosphorus esters, OPEs)阻燃剂具有良好的阻燃性能及增塑作用被广泛地用于化工、建材、电力、纺织、造纸等行业^[1]. 随着溴代阻燃剂因其毒性和污染水平被禁用^[2~5],OPEs 作为其替代品被大量生产和消费,其释放到环境中的量也越来越多. 由于其具有致癌性、神经毒性、生殖毒性等特性^[6~8],OPEs 潜在的环境危害近年来逐渐受到了重视. 国外已有大量报道环境介质中 OPEs 的质量浓度水平^[9~14],人体暴露水平和健康风险分析的研究^[15~19],也有部分涉及到了 OPEs 的机制研究^[19~22]. 研究者指出城市可能已成为一个潜在的 OPEs 高风险污染区域. 目前国内才刚开始此项工作^[23~25],基础数据甚少.

成都市位于中国西南地区东部,成都平原腹地,是西部地区的科技、商贸、金融中心及交通和通信枢纽. 关于成都市大气 PM_{2.5} 等各环境介质中 OPEs

的浓度、分布及来源研究均为空白. 本研究根据野外采样监测结果,定量揭示 OPEs 在成都市大气 PM_{2.5} 中的污染状况,并分析其污染来源,以期为该区域的 OPEs 的污染防控提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

大气 PM_{2.5} 采样点为 2 个(市区和郊区),市区采样点位于人民南路的气象宾馆楼顶($30^{\circ}35'36.07''\text{N}$, $104^{\circ}3'41.79''\text{E}$),郊区采样点位于下风向的成都信息工程学院航空港校区科教楼楼顶($30^{\circ}35'2.62''\text{N}$, $103^{\circ}59'19.5''\text{E}$). 采样点高度均为

收稿日期: 2015-03-04; 修订日期: 2015-05-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(21407014); 四川省科技支撑计划项目(2015GZ0240); 2014 年度校中青年学术带头人科研基金项目(J201415)

作者简介: 印红玲(1978~),女,博士,教授,主要研究方向为环境污染与监测, E-mail: bellling15@sina.com

19 m. 大气 PM_{2.5}采用石英膜,中流量大气采样器采样(青岛崂山),以 100 L·min⁻¹的速度连续采样约 23 h. 全年采样按照春,夏,秋,冬各季节进行,共计样品量为 44 个,采样时间及气象条件如表 1 所示.

表 1 大气 PM_{2.5} 采样时间及气象条件
Table 1 Sampling time of atmospheric PM_{2.5} and weather conditions

编号	采样起止时间	温度/℃	天气状况
春 1	2014-04-15T10:30:05 ~ 2014-04-16T08:30:05	21.5	晴转雨
春 2	2014-05-04T11:12:00 ~ 2014-05-05T10:12:00	27.4	晴
春 3	2014-05-05T11:25:00 ~ 2014-05-06T10:25:00	25.8	晴
春 4	2014-05-07T10:35:00 ~ 2014-05-08T09:08:00	25.6	晴
夏 1	2014-07-01T11:05:00 ~ 2014-07-02T10:05:00	29.8	晴
夏 2	2014-07-02T08:25:00 ~ 2014-07-03T07:25:00	26.9	晴
夏 3	2014-07-03T08:25:00 ~ 2014-07-04T07:25:00	28.8	晴
夏 4	2014-07-04T08:25:00 ~ 2014-07-05T07:25:00	28.6	晴
夏 5	2014-07-05T08:25:00 ~ 2014-07-06T07:25:00	28.4	晴
秋 1	2014-10-24T09:14:00 ~ 2014-10-25T08:14:00	18.5	阴
秋 2	2014-10-25T09:30:00 ~ 2014-10-26T09:30:00	21.5	阴
秋 3	2014-10-28T09:30:00 ~ 2014-10-29T08:30:00	19.6	阴转雨
秋 4	2014-10-29T09:30:00 ~ 2014-10-30T08:30:00	18	阴转雨
冬 1	2013-12-16T11:22:00 ~ 2013-12-17T10:22:00	12.6	晴
冬 2	2013-12-17T10:30:00 ~ 2013-12-18T09:30:00	9.3	阴
冬 3	2013-12-18T10:30:00 ~ 2013-12-19T09:30:00	7.6	阴
冬 4	2013-12-30T10:30:00 ~ 2013-12-31T09:30:00	6.9	阴
冬 5	2013-12-31T10:00:00 ~ 2014-01-01T09:00:00	6.3	阴
冬 6	2014-01-01T10:00:00 ~ 2014-01-02T09:00:00	7.1	阴
冬 7	2014-01-02T10:10:00 ~ 2014-01-03T09:10:00	8.6	阴
冬 8	2014-01-03T10:00:00 ~ 2014-01-04T09:00:00	8.2	晴
冬 9	2014-01-04T10:00:00 ~ 2014-01-05T09:00:00	8.6	晴

1.2 仪器与试剂

气相色谱-质谱联用仪(日本岛津 GC-MS 2010plus), 蒸发浓缩仪(瑞士 Buchi R- 215/V-700).

7 种目标化合物标准品(Sigmaldrich)分别为: 烷基磷酸酯: 磷酸三丁酯(Tri-n-butyl phosphate, TnBP)、磷酸三异辛酯[Tris(2-ethylhexyl)phosphate, TEHP]、磷酸三丁氧乙酯(Tributoxyethyl Phosphate, TBEP)、芳基磷酸酯: 磷酸三苯酯(Triphenyl Phosphate, TPhP)、卤代磷酸酯: 磷酸三氯乙酯[tri(2-chloroethyl)phosphate, TCEP]、磷酸三氯丙酯(Trichloropropyl phosphate, TCPP)、磷酸三(2,3-二氯丙基)酯(Tridichloropropyl phosphate, TDCPP).

1.3 样品前处理及检测

样品于恒温恒湿箱放置 24 h 后恒重称量,将称重好的样品剪碎置于具塞磨口试管中,加入 20 mL 乙酸乙酯: 丙酮(3:2, 体积比)浸泡 12 h, 超声萃取 30 min, 将萃取液倒入浓缩瓶中, 再加入 10 mL 萃取剂超声 15 min, 合并萃取液. 将萃取液用真空浓缩仪浓缩至约 1 mL, 上样到已活化的氧化: 铝硅胶(3:

1, 体积比)层析柱. 用正己烷淋洗 20 mL 除去杂质后, 用乙酸乙酯: 丙酮(3:2, 体积比)洗脱剂洗脱 20 mL, 将洗脱液浓缩至 200 μL 后定容上机检测^[9,11,14,18,19].

仪器分析条件: GC 条件为: 色谱柱 rti-5ms (30.0 m × 0.25 μm × 0.25 mm), 进样口温度为 280.0℃, 不分流进样, 载气为高纯 He, 流量为 1.00 mL·min⁻¹. 升温程序: 50.0℃ (保持 1 min), 以 15.00℃·min⁻¹升至 200.0℃ (保持 1 min), 以 4.00℃·min⁻¹升至 250℃, 以 20.00℃·min⁻¹升至 300℃ (保持 4 min). MS 条件为: EI 源, SIM 模式, 离子源温度为 200℃, 接口温度为 280℃. 7 种目标化合物的目标离子和参考离子(*m/z*) 分别为: TnBP: 155/99、211、125, TCEP: 249/63、143、251, TCPP: 125/99、201、277、157, TDCPP: 75/99、191、209、381, TPhP: 326/325、77、215, TBEP: 85/100、199、299, TEHP: 99/113、211.

1.4 QA/QC

各 OPEs 组分的标准曲线 *r* 均能达到 0.99 以上. 仪器精密度为 6.4% ~ 9.4%. 计算 4 次空白膜加标的相对标准偏差得出膜加标精密度为 1.1% ~

20.0%, 仪器检测限由 3 倍信噪比 (3S/N) 得到: TnBP 0.22 ng、TCEP 0.41 ng、TCPP 0.33 ng、TDCPP 0.20 ng、TPhP 0.14 ng、TBEP 1.21 ng、TEHP 0.29 ng. 方法检测限基于中流量大气采样器连续 23 h 采样计算得到: TnBP $1.62 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TCEP $2.97 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TCPP $2.36 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TDCPP $1.47 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TPhP $1.01 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TBEP $8.74 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TEHP $2.12 \text{ pg}\cdot\text{m}^{-3}$. 7 种 OPEs 的基质空白加标平均回收率为 73.9% ~ 89.0%.

2 结果与讨论

2.1 成都市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OPEs 的质量浓度水平及季节变化

市区采样点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 7 种 OPEs ($\sum 7\text{OPEs}$) 的年平均含量为 $6.46 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 郊区为 $9.38 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 市区采样点各单体的年平均含量范围为 $0.18 \sim 2.94 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$; 郊区为 $0.47 \sim 3.90 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. 从年平均质量浓度来看, 基本呈现出郊区质量浓度大于市区的趋势. 其中 TnBP、TPhP、TBEP 这 3 种 OPEs 质量浓度均呈现出郊区采样点质量浓度约为市区的 1.5 倍, TEHP 在市区的浓度约为郊区的 1.2 倍, TCEP 和 TCPP 质量浓度则为郊区与市区相当, 唯有 TDCPP 为市区质量浓度是郊区的 2.6 倍. 采用非参检验中威尔科克森符号秩检验 (Wilcoxon Signed-Rank test) 对 $\sum 7\text{OPEs}$ 和检出率大于 40% 的单体 OPE 两两进行秩检验, 得到 $\sum 7\text{OPEs}$ ($P = 0.013$)、TnBP ($P = 0.003$)、TPhP ($P = 0.019$)、TBEP ($P = 0.015$), 说明上述物质在市区和郊区之间的差异具有统计学意义 ($P < 0.05$). 而 TCEP ($P = 0.166$)、TCPP ($P = 0.249$)、TEHP ($P = 0.110$), 说明上述物质在市区和郊区之间的差异不具有统计学意义 ($P > 0.05$). 分析市郊区采样点 $\sum 7\text{OPEs}$ 质量浓度差异的原因, 可能主要有两点: 一是郊区采样点位于成都市常年主导风向 (偏北风) 的下风向, 二是郊区采样点附近存在拆解产业, 拆解过程中大量的废旧物品中 OPEs 释放到环境中导致了郊区 OPEs 质量浓度高于市区. 从 OPEs 总量来说, 与挪威朗伊尔城的监测结果 ($\sum 7\text{OPEs}$ 浓度 $0.01 \sim 1.17 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)^[26] 相比, 成都市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OPEs 浓度高. 与地中海大气颗粒物中 TnBP、TCEP、TDCPP、TPhP 和 TEHP 这 5 种 OPEs 质量浓度之和 ($0.55 \sim 3.11 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) 相比, 成都市

大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中以上 5 种 OPEs 的浓度和 ($0.46 \sim 11.71 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)^[27] 高.

市区采样点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $\sum 7\text{OPEs}$ 平均浓度的季节变化为: 夏季 ($8.84 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季 ($7.63 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季 ($6.80 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 冬季 ($4.21 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$); 郊区采样点则为: 冬季 ($10.33 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季 ($9.17 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季 ($8.72 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季 ($8.69 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$). OPEs 在各季节的质量浓度水平均在同一数量级, 没有明显的夏冬季质量浓度差异的现象, 表明 OPEs 在一定范围内对温度等气象因素不敏感 (表 1 和图 1). 由图 1, 市郊区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 TCPP 和 TPhP 这两种物质在 4 个季节分布均较为集中, 由于两采样点同步进行, 因此可以降低温度等气象因素及物化性质带来的影响, 故这两种物质在成都市浓度分布较为集中的原因之一可能是采样点附近存在较稳定的 TCPP 和 TPhP 的排放源. TnBP 在市区春、夏季与郊区春、冬季质量浓度偏向高值. TDCPP 虽然表现出质量浓度集中的现象, 但其检出率不高, 质量浓度低. TnBP 在市区春、夏季与郊区春、冬季质量浓度偏向高值, 说明在这些季节 TnBP 排放水平可能较高. TCEP 在市区的夏秋两季和郊区的冬季出现了质量浓度不集中的现象. TBEP 在市区和郊区的冬季均有高异常值, 并且郊区大于市区, 说明冬季在成都市可能存在 TBEP 的不稳定排放源. TEHP 在郊区冬季有高异常值出现而市区却无, 同时市区和郊区浓度存在差异, 说明冬季市郊区排放可能存在差异.

从 OPEs 的谱分布来看, 成都市区的单体 OPE 谱分布为 TBEP (41.22%) > TCEP (21.22%) > TCPP (12.06%) > TnBP (11.10%) > TEHP (6.52%) > TPhP (5.30%) > TDCPP (2.58%), 郊区为 TBEP (40.23%) > TCEP (17.21%) > TnBP (12.13%) > TCPP (11.22%) > TEHP (8.21%) > TPhP (6.15%) > TDCPP (4.85%). 成都市区及郊区采样点的首要污染物均为 TBEP, 其次为 TCEP, 此两种 OPE 占 $\sum 7\text{OPEs}$ 的百分比达到 63.44% (市区) 和 57.44% (郊区). 与挪威朗伊尔城 [TnBP (39.01%) > TBEP (22.42%) > TCPP (13.90%) > TDCPP (13.23%) > TPhP (4.48%) > TCEP (4.26%) > TEHP (2.69%)]^[26] 相比, 有一定差异. 朗伊尔城的首要污染物为 TnBP, 其次为 TBEP, 此两种 OPE 占 $\sum 7\text{OPEs}$ 的百分比达到 51.43%. 从谱分布可以看出, 成都市大气颗粒物中氯代磷酸酯和

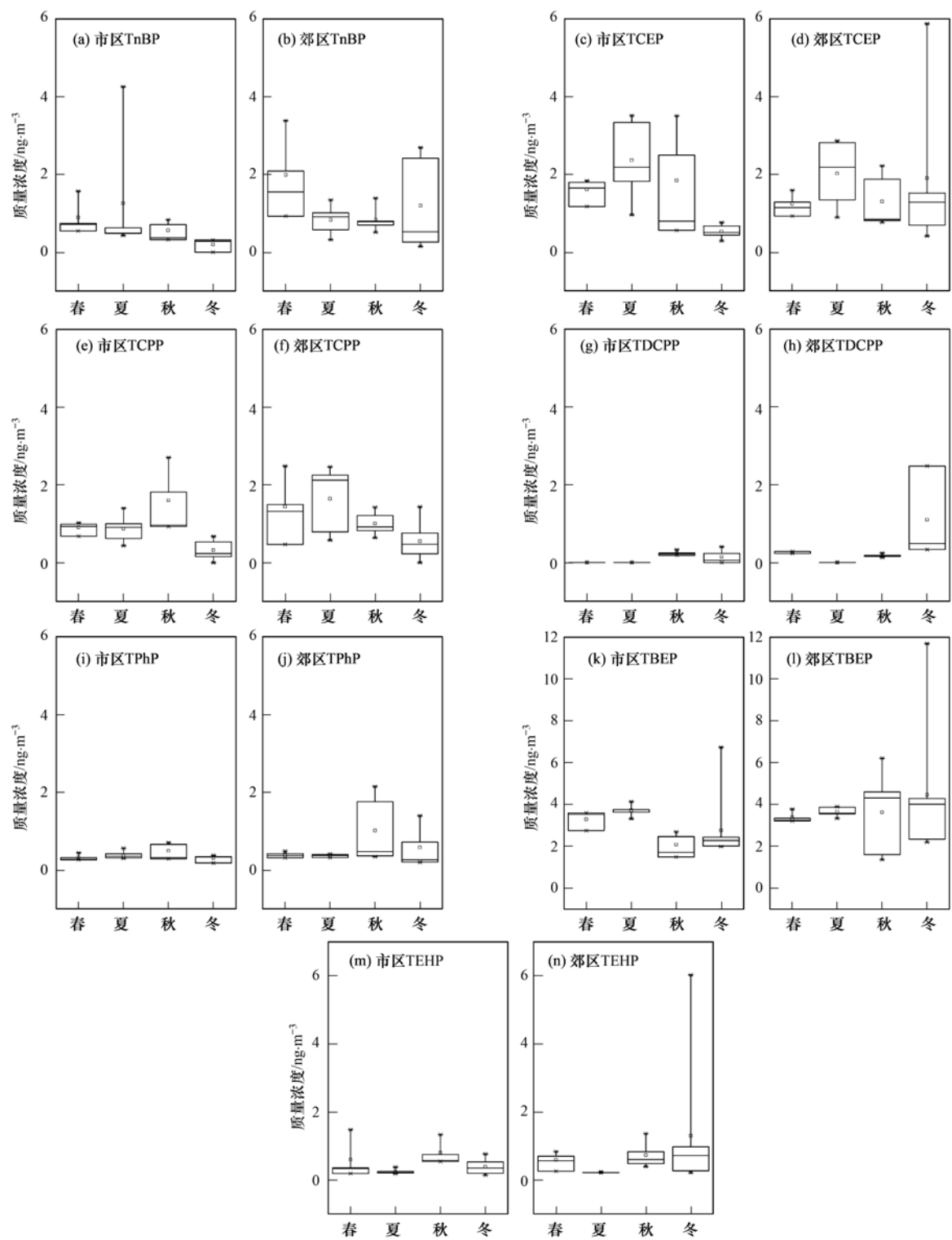


图1 成都市大气 PM_{2.5} 中 OPEs 的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of OPEs in PM_{2.5} in Chengdu City

烷基磷酸酯在总量中相对比例较高,而朗伊尔城仅有烷基磷酸酯在总量中相对比例较高.

2.2 成都市大气 PM_{2.5} 中 OPEs 的来源解析

OPEs 从源释放后即可吸附在停留时间较长的

大气 PM_{2.5} 上,并随大气气团长程传输. 因此,考察采样期间大气气团来源可获得 OPEs 的来源,并解释造成 OPEs 季节差异的原因. 本研究采用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的在线后向气流轨迹

模型获得采样期间成都市的气团来源,如图 2.

由图 2,四季采样期间成都市大气气流来源各有特点. 春季大气气团由成都市东北方向绕道成都市西南方的雅安市,最后由成都市西南方进入市区. 夏季大气气团从正南方越过市区再从西北方向进入市区. 秋季和冬季大气气团均来自于成都市东北方,并分别从成都市东北,东北偏北方进入市区. 各种气团来源对 OPEs 的总体的影响为: 在春、秋和冬季无论气团来自何方, $\sum 7\text{OPEs}$ 郊区是市区的 1.1~2.4 倍,表明外源污染对成都市 OPEs 的贡献

小,两地差异的原因可能主要与局地源的差异有关. 夏季气团在成都市区混合后市区、郊区采样点 $\sum 7\text{OPEs}$ 质量浓度大致相当,其差异不显著 ($P = 0.917$),表明夏季大气混合程度高,导致 OPEs 在局地范围内分布均匀.

上述研究表明 OPEs 来源主要是局地源产生,由于采样点位于不同的城市功能区,因此拟通过相关性分析获得不同功能区的排放特点. 同时,采用 SPSS 软件对 OPEs 进行相关性分析研究,结果如表 2 所示.

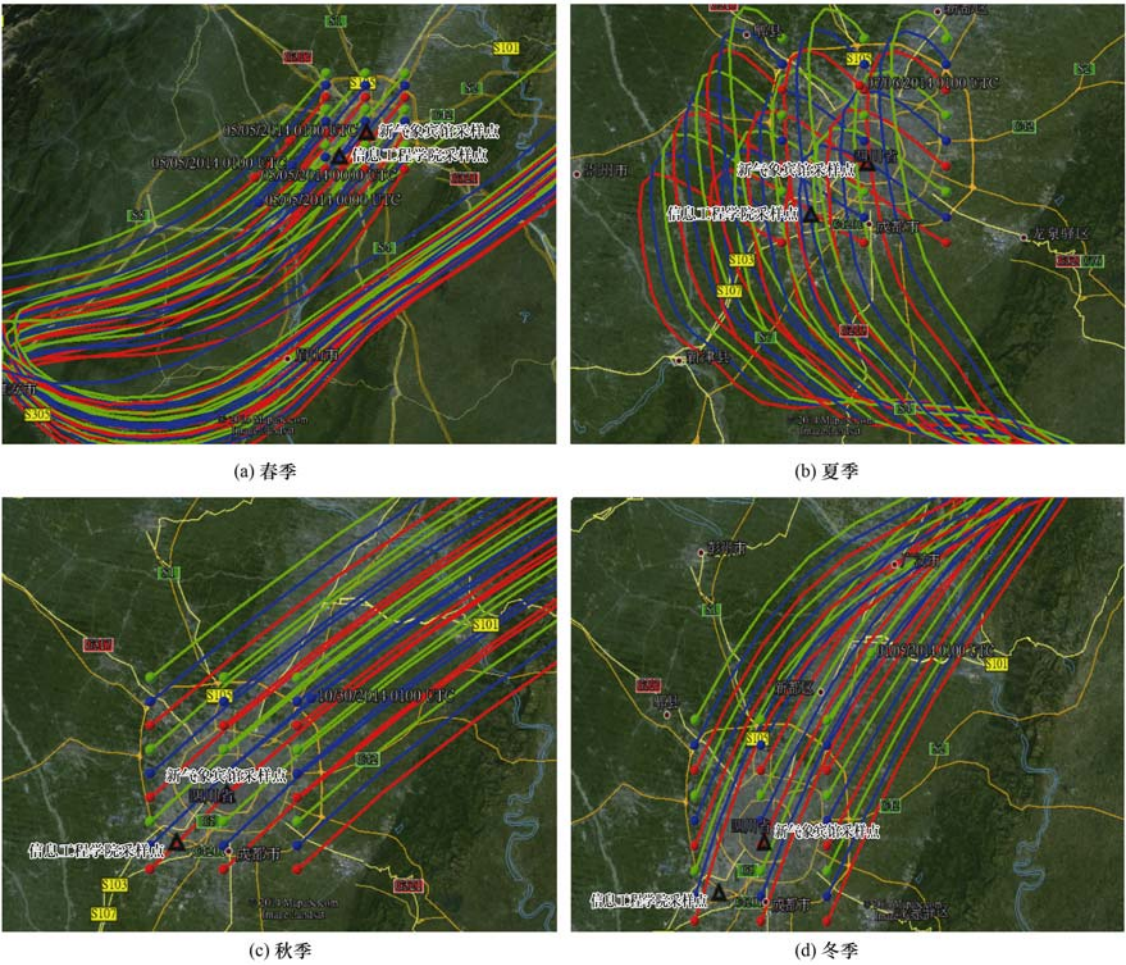


图 2 采样期间成都市大气气团来源

Fig. 2 Sources of atmospheric air mass in Chengdu City during the sampling period

由表 2 可知,市区 TCEP、TPhP 与 TCPP 相关系数 $r > 0.7$,表明他们之间可能具有较强的同源性. TCEP、TCPP 与 TPhP 的相关系数 $r > 0.6$,表明他们之间可能具有同源性. TCEP 虽然表现为浓度不集中呈偏态分布,但是与浓度较为集中的 TPhP 可能具有同源性. TnBP 与 TCEP 之间相关系数 $r > 0.6$,表明这两者之间可能具有同源性,两者浓度分

布均不集中.

由表 3 可知,郊区质量浓度分布不集中的 TCEP 与 TBEP,TEHP 和 TDCPP 之间相关系数 $r > 0.7$,表明它们之间可能具有较强的同源性. 质量浓度分布不集中的物质(除 TnBP 外)之间都可能具有同源性. 而质量浓度分布稳定的 TCPP 和 TPhP 与其他单体之间相关系数均低,表明他们之间可能不具有

同源性。

从相关性来看,市区和郊区两地单体 OPE 的相关情况存在差异,市区质量浓度分布集中的单体之间相关系数大,可能具有同源性。郊区质量浓度分布分散的单体之间相关系数大,可能具有同源性。

综上所述,外源污染对成都市 OPEs 贡献小,OPEs 质量浓度可能受采样点周围局地源的影响更大,市区质量浓度分布集中的单体之间可能具有同源性,郊区质量浓度分布分散的单体之间可能具有同源性。

表 2 市区 OPEs 之间的相关性¹⁾

		Table 2 Correlation between OPEs in the urban area						
		TnBP	TCEP	TCPP	TDCPP	TPhP	TBEP	TEHP
TnBP	Pearson 相关性	1	0.653 **	0.479 *	-0.170	0.352	0.184	-0.053
	显著性(双侧)	—	0.001	0.024	0.449	0.108	0.411	0.814
TCEP	Pearson 相关性	0.653 **	1	0.725 **	0.030	0.665 **	0.281	-0.074
	显著性(双侧)	0.001	—	0.000	0.893	0.001	0.205	0.743
TCPP	Pearson 相关性	0.479 *	0.725 **	1	0.339	0.822 **	-0.034	0.182
	显著性(双侧)	0.024	0.000	—	0.123	0.000	0.879	0.418
TDCPP	Pearson 相关性	-0.170	0.030	0.339	1	0.220	-0.245	0.374
	显著性(双侧)	0.449	0.893	0.123	—	0.325	0.271	0.086
TPhP	Pearson 相关性	0.352	0.665 **	0.822 **	0.220	1	0.163	0.302
	显著性(双侧)	0.108	0.001	0.000	0.325	—	0.468	0.172
TBEP	Pearson 相关性	0.184	0.281	-0.034	-0.245	0.163	1	-0.474 *
	显著性(双侧)	0.411	0.205	0.879	0.271	0.468	—	0.026
TEHP	Pearson 相关性	-0.053	-0.074	0.182	0.374	0.302	-0.474 *	1
	显著性(双侧)	0.814	0.743	0.418	0.086	0.172	0.026	—

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,下同

表 3 郊区 OPEs 之间的相关性

		Table 3 Correlation between OPEs in the suburb area						
		TnBP	TCEP	TCPP	TDCPP	TPhP	TBEP	TEHP
TnBP	Pearson 相关性	1	0.460 *	0.188	0.332	0.255	0.311	0.401
	显著性(双侧)	—	0.031	0.403	0.132	0.252	0.159	0.065
TCEP	Pearson 相关性	0.460 *	1	0.440 *	0.745 **	0.136	0.832 **	0.773 **
	显著性(双侧)	0.031	—	0.040	0.000	0.546	0.000	0.000
TCPP	Pearson 相关性	0.188	0.440 *	1	0.080	-0.054	0.205	0.031
	显著性(双侧)	0.403	0.040	—	0.725	0.813	0.359	0.890
TDCPP	Pearson 相关性	0.332	0.745 **	0.080	1	0.071	0.873 **	0.970 **
	显著性(双侧)	0.132	0.000	0.725	—	0.753	0.000	0.000
TPhP	Pearson 相关性	0.255	0.136	-0.054	0.071	1	0.297	0.179
	显著性(双侧)	0.252	0.546	0.813	0.753	—	0.179	0.426
TBEP	Pearson 相关性	0.311	0.832 **	0.205	0.873 **	0.297	1	0.873 **
	显著性(双侧)	0.159	0.000	0.359	0.000	0.179	—	0.000
TEHP	Pearson 相关性	0.401	0.773 **	0.031	0.970 **	0.179	0.873 **	1
	显著性(双侧)	0.065	0.000	0.890	0.000	0.426	0.000	—

3 结论

成都市市区大气 PM_{2.5} 中 $\sum$ OPEs 年平均含量为 6.46 ng·m⁻³,郊区为 9.38 ng·m⁻³,四季质量浓度均在同一数量级,无明显的季节变化。受郊区废旧物质拆解产业和常年主导风向为偏北风的影响,

郊区大气 PM_{2.5} 中 $\sum$ OPEs 的质量浓度高于市区。外源污染对成都市 OPEs 的贡献小。OPEs 的质量浓度变化可能受采样点周围局地源的影响更多,市区和郊区单体间同源性存在差异。

参考文献:
[1] 王晓伟,刘景富,阴永光. 有机磷酸酯阻燃剂污染现状与研

- 究进展[J]. 化学进展, 2010, **22**(10): 1983-1992.
- [2] 吴辉, 金军, 王英, 等. 典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1230-1237.
- [3] 冀秀玲, 刘洋, 刘芳, 等. 六溴环十二烷转甲状腺素蛋白结合活性及其发育期暴露的甲状腺激素干扰效应研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2191-2195.
- [4] 何畅, 金军, 马召辉, 等. 青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1129-1135.
- [5] 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.
- [6] Grant W M. Toxicology of the eye: drugs, chemicals, plants, venoms[M]. Springfield: Charles C. Thomas Publisher, 1974.
- [7] Bingham E, Cohrssen B, Powell C H. Patty's toxicology. Volume 2: toxicological issues related to metals, neurotoxicology and radiation metals and metal compounds[M]. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [8] World Health Organization. Environmental Health Criteria 218, flame retardants: tris (2-butoxyethyl) phosphate, tris (2-ethylhexyl)-phosphate and tetrakis-(hydroxymethyl) phosphonium salts[R]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2000.
- [9] Tajima S, Araki A, Kawai T, *et al.* Detection and intake assessment of organophosphate flame retardants in house dust in Japanese dwellings[J]. Science of the Total Environment, 2014, **478**: 190-199.
- [10] Shin H M, Mckone T E, Nishioka M G, *et al.* Determining source strength of semivolatile organic compounds using measured concentrations in indoor dust[J]. Indoor Air, 2014, **24**(3): 260-271.
- [11] Salamova A, Ma Y N, Venier M, *et al.* High levels of organophosphate flame retardants in the Great Lakes atmosphere[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2014, **1**(1): 8-14.
- [12] Celano R, Rodríguez I, Cela R, *et al.* Liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry quantification and screening of organophosphate compounds in sludge[J]. Talanta, 2014, **118**: 312-320.
- [13] Cao Z G, Xu F C, Covaci A, *et al.* Differences in the seasonal variation of brominated and phosphorus flame retardants in office dust[J]. Environment International, 2014, **65**: 100-106.
- [14] van der Veen I, de Boer J. Phosphorus flame retardants: properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis[J]. Chemosphere, 2012, **88**(10): 1119-1153.
- [15] Cao Z G, Xu F C, Covaci A, *et al.* Distribution patterns of brominated, chlorinated, and phosphorus flame retardants with particle size in indoor and outdoor dust and implications for human exposure[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(15): 8839-8846.
- [16] Dodson R E, Van den Eede N, Covaci A, *et al.* Urinary biomonitoring of phosphate flame retardants: levels in California adults and recommendations for future studies[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(23): 13625-13633.
- [17] Ali N, Dirtu A C, Van den Eede N, *et al.* Occurrence of alternative flame retardants in indoor dust from New Zealand: Indoor sources and human exposure assessment[J]. Chemosphere, 2012, **88**(11): 1276-1282.
- [18] Van den Eede N, Dirtu A C, Neels H, *et al.* Analytical developments and preliminary assessment of human exposure to organophosphate flame retardants from indoor dust[J]. Environment International, 2011, **37**(2): 454-461.
- [19] Mihajlović I, Miloradov M V, Fries E. Application of Twisselmann extraction, SPME, and GC-MS to assess input sources for organophosphate esters into soil[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(6): 2264-2269.
- [20] Liu Y, Li S M, Liggio J. Technical Note: Application of positive matrix factor analysis in heterogeneous kinetics studies utilizing the mixed-phase relative rates technique[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(17): 9201-9211.
- [21] Liu Y C, Liggio J, Harner T, *et al.* Heterogeneous OH initiated oxidation: a possible explanation for the persistence of organophosphate flame retardants in air[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(2): 1041-1048.
- [22] Liggio J, Liu Y, Harner T, *et al.* OH initiated heterogeneous degradation of organophosphorus compounds[C]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2013.
- [23] 阮伟, 谭晓欣, 罗孝俊, 等. 东江表层沉积物中的有机磷系阻燃剂[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(9): 2394-2400.
- [24] 任照芳, 黄渤, 刘明, 等. 典型线路板回收过程排放颗粒物的主要成分和特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1447-1451.
- [25] Cao S X, Zeng X Y, Song H, *et al.* Levels and distributions of organophosphate flame retardants and plasticizers in sediment from Taihu Lake, China[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, **31**(7): 1478-1484.
- [26] Salamova A, Hermanson M H, Hites R A. Organophosphate and halogenated flame retardants in atmospheric particles from a European Arctic site[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(11): 6133-6140.
- [27] Castro-Jiménez J, Berrojalbiz N, Pizarro M, *et al.* Organophosphate ester (OPE) flame retardants and plasticizers in the open Mediterranean and black seas atmosphere[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(6): 3203-3209.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 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) 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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行