

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

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

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露

张文娟, 王利军*, 王丽, 史兴民, 卢新卫

(陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710119)

摘要: 采集西安城区地表灰尘样品 58 个, 利用高效液相色谱(HPLC)分析了地表灰尘中美国环境保护部(U. S. EPA)6 种优控的邻苯二甲酸酯(PAEs)含量, 在此基础上研究了其分布特征、环境来源和人群暴露。结果表明, 西安城区地表灰尘中的 6 种 PAEs 均有不同程度的检出。单体 PAE 的含量从未检出 ~ 183.19 mg·kg⁻¹, 含量顺序为 DEHP > DnBP >> DEP > DMP > BBP > DnOP。6 种 PAEs 总量(∑6PAEs)在 0.87 ~ 250.30 mg·kg⁻¹ 之间, 平均含量为 40.48 mg·kg⁻¹。∑6PAEs 在不同功能区的分布情况为公园 > 交通区 > 商业交通混合区 > 住宅区 > 文教区 > 工业区。∑6PAEs 沿主城区-二环-三环呈现递减趋势。相关分析、主成分分析和聚类分析结果表明, 西安城区地表灰尘中的 PAEs 主要与增塑剂的使用、化妆品和个人护肤品以及建筑材料与室内外装饰材料释放有关。人群不同途径暴露地表灰尘中 PAEs 的日均摄入量顺序为手口摄入 >> 皮肤接触 > 呼吸吸入, 且儿童高于成人。DnBP、DEHP、DEP 和 BBP 日均摄入量(ADD)低于 EU CSTEE 和 U. S. EPA 规定的日耐受量(TDI)与参考剂量(RfD)。

关键词: 邻苯二甲酸酯; 分布; 来源; 暴露; 地表灰尘; 西安城区

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3758-08 DOI: 10.13227/j.hjx.2016.10.012

Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China

ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun*, WANG Li, SHI Xing-min, LU Xin-wei

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: A total of 58 surface dust samples were collected in urban area of Xi'an City. High Performance Liquid Chromatography (HPLC) was used to analyze the concentrations of six phthalic acid esters (PAEs) listed as priority pollutants by United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). Composition, distribution, environmental sources and exposure characteristics of PAEs in the surface dust were further studied. All analyzed PAEs were detected in the surface dust. The concentration of individual PAE compounds varied from not detectable to 183.19 mg·kg⁻¹ and their mean concentrations decreased in the order of DEHP > DnBP >> DEP > DMP > BBP > DnOP. The total concentration of six PAEs (∑6PAEs) ranged from 0.87 to 250.30 mg·kg⁻¹ with an average of 40.48 mg·kg⁻¹, and followed the order of parks > traffic area > mixed business and traffic area > residential area > educational area > industrial area. The ∑6PAEs presented the decreasing trend along the main urban area - the second ring road - the third ring road. The results of correlation analysis, principal component analysis and cluster analysis showed that PAEs in surface dust of Xi'an City were related to the application of plasticizers, the emission of cosmetics and personal care products along with building materials and home decoration materials. The dose order of human exposure to PAEs in surface dust was the direct ingestion by hand and mouth >> dermal adsorption > inhalation via mouth and nose. Meanwhile, the intake dose of children was higher than that of adults. However, the intake dose of DnBP, DEHP, DBP and BBP was lower than the tolerable daily intake (TDI) suggested by European Union Scientific Committee for Toxicity, Ecotoxicity and the Environment (EU CSTEE) and the reference doses (RfD) proposed by U. S. EPA.

Key words: phthalic acid ester; distribution; source; exposure; surface dust; Xi'an City

邻苯二甲酸酯(phthalic acid esters, PAEs)是一类人工合成的有机化合物。一些 PAEs 是典型的环境内分泌干扰物/环境激素类物质,能对人和动物的生殖系统产生严重干扰效应^[1,2]。一些 PAEs 对人和动物还具有潜在致癌、致畸、致突变的“三致效应”^[3]。因此,美国环境保护部(U. S. EPA)已将邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯

(DEP)、邻苯二甲酸苄基丁基酯(BBP)、邻苯二甲酸正二丁酯(DnBP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)

收稿日期: 2016-03-28; 修订日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271510); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM5208); 中央高校创新团队项目(201601009)

作者简介: 张文娟(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染修复技术,E-mail: 1945183120@qq.com

* 通讯联系人,E-mail: wanglijun@snnu.edu.cn

酯 (DEHP) 和邻苯二甲酸正二辛酯 (DnOP) 列为优先控制污染物^[4]。我国地表水环境质量和饮用水质量标准对 DMP、DnBP 和 DnOP 也进行了限定^[5]。然而, PAEs 在工业生产和日常生活中具有十分广泛的应用。PAEs 作为增塑剂主要用来改变和提高产品 (如 PVC 树脂、聚乙酸乙烯酯、纤维素酯、聚亚安酯等) 的可塑性及强度, 作为非增塑剂在家具、玩具、建材、装修、汽车、电子、服装、食品及医疗等行业也有着广泛的应用^[6~9]。但是, PAEs 在塑料及其他相关制品中与聚烯烃类塑料分子之间并非共价键结合, 而是以氢键和范德华力连接, 彼此保留各自相对独立的化学性质, 在生产、使用和处置过程中随着时间的推移可由塑料等制品迁移到环境^[10, 11], 对生态环境和人群健康构成潜在危害。

灰尘是人们生活中经常接触到的一种环境介质。受工业生产、交通运输、建筑行业、金属冶炼等人类活动的强烈影响, 城市地表灰尘中累积了大量有毒有害物质, 如重金属、多环芳烃和 PAEs 等。累积在地表灰尘中的污染物可以通过雨水淋溶和地表径流进入地表水和地下水污染水环境, 在风力、车流等外力作用下再悬浮进入空气影响空气质量, 还可通过灰尘颗粒物的手口摄入、悬浮灰尘颗粒物的口鼻吸入以及灰尘颗粒物与皮肤接触作用进入人体危害健康^[12~15]。因此, 地表灰尘的化学构成和环境质量是环境污染重要的指示剂^[16]。当前, 针对城市地表灰尘中重金属和多环芳烃的污染研究已有大量报道^[15, 17], 然而有关城市地表灰尘中 PAEs 的污染研究报道还比较少见。陈丽旋等^[18]对广州市道路灰尘中 PAEs 的含量和分布进行了研究。

西安是陕西省的省会、西北地区最大的城市。随着城市化、工业化的快速发展, 西安城市环境问题十分突出, 尤其颗粒物污染。因此, 本文以西安市为例, 主要研究城市地表灰尘中 PAEs 的累积水平、构成特征、分布规律、环境来源以及人群暴露等, 以期改善城市环境质量和指导人群进行健康防护提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

西安位于 $107^{\circ}40' \sim 109^{\circ}49' E$ 和 $33^{\circ}39' \sim 34^{\circ}45' N$, 地处关中平原中部, 北临渭河, 南依秦岭, 是陕西省的省会和西北地区最大的城市, 城区面积为 3782 km^2 , 常住人口为 862.75 万。西安具有重要的交通战略地位, 是我国西北通往西南、中原、华

东和华北的交通枢纽。西安也是中国中西部地区重要的科研、教育、国防科技工业和高新技术产业基地, 电子信息产业基地, 航空和航天工业核心基地, 是中国中西部和北方内陆地区的金融中心^[19]。西安属暖温带半湿润大陆性季风气候, 雨量适中, 四季分明, 年平均气温 $13.0 \sim 13.7^{\circ}C$, 年降水量 $522.4 \sim 719.5 \text{ mm}$, 年日照时数 $1646.1 \sim 2114.9 \text{ h}$, 主导风向为东北风。

1.2 样品采集及预处理

在实地调研的基础上, 在西安市三环以内区域布设 58 个地表灰尘采样点 (如图 1), 其中交通区 (马路路面尘) 19 个、商业交通混合区 (商业街路面尘) 10 个、住宅区 (路面尘) 8 个、文教区 (窗台和路面尘) 8 个、公园 (路面尘) 9 个、工业区 (街道路面尘) 4 个。在天气晴好的条件下, 至少持续一周, 于 2014 年 12 月 15 ~ 31 日, 在每个采样点, 利用刷子和簸箕清扫 3 ~ 5 处地表灰尘样品, 现场利用四分法混合成一个综合样品, 每个样品大约重 500 g, 放入棕色玻璃广口瓶中。同时, 使用手持 GPS 定位每一个采样点的经度和纬度, 并记录周围的环境状况。将所采集的地表灰尘样品带回实验室, 自然风干 24 h, 过 1 mm 的不锈钢筛, 剔除砂粒及其他杂草、毛发等外来物, 贮存于棕色广口瓶中, 在 $-4^{\circ}C$ 下冷藏待分析。

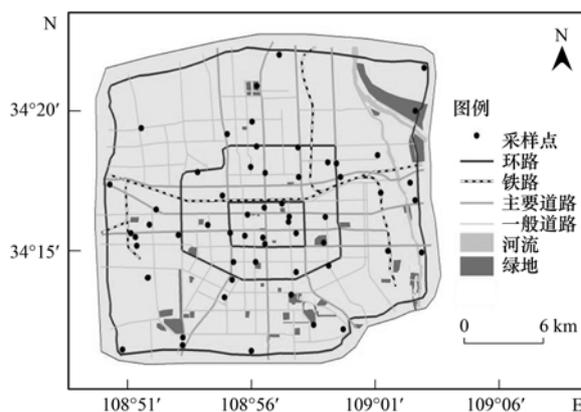


图 1 西安城区地表灰尘采样点示意

Fig. 1 Sampling sites of surface dust in urban area of Xi'an City

1.3 仪器与试剂

美国戴安 Ultimate-3000 型液相色谱仪, 带二极管阵列检测器 (DAD); 大连依利特 Hypersil ODS2 液相色谱柱 ($4.6 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}, 5 \mu\text{m}$); 索氏提取器; 上海亚荣生化仪器厂 RE-52A 型旋转蒸发器; ABSON 公司 NAS-12 型氮吹仪; 玻璃层析柱 ($1 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$)。

正己烷、丙酮、二氯甲烷、甲醇和乙腈均为色谱纯,购自美国 J. T. Baker 公司;层析硅胶(80~100 目,青岛海洋化工厂)和层析氧化铝(100~200 目,国药集团化学试剂有限公司),使用前分别在 180℃ 和 250℃ 活化 6 h 和 12 h,并加入 3% 超纯水活化;无水硫酸钠(分析纯,天津市化学试剂厂),使用前在 450℃ 马弗炉中灼烧 6 h;PAEs 混合标准溶液,含邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸正二丁酯(DnBP)、邻苯二甲酸苄基丁基酯(BBP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)和邻苯二甲酸正二辛酯(DnOP),浓度均为 2 mg·mL⁻¹,甲醇介质,购自美国 Supelco 公司.邻苯二甲酸二环己基酯(DCP,纯度 99.6%)替代标样购自美国 Sigma 公司,并用甲醇准备成 2 mg·mL⁻¹的溶液.将它们配成标准贮备液,用甲醇稀释,配成标准梯度.

1.4 PAEs 的提取与净化

地表灰尘中 PAEs 的提取和净化利用自行摸索的方法.称过 1 mm 不锈钢筛的地表灰尘样品 5 g(精确至 0.001 g)于 50 mL 玻璃离心管中,加入 30 mL 正己烷和丙酮混合溶液(1:1,体积比),超声提取 30 min,以 3 000 r·min⁻¹ 的转速离心 10 min,进行固液分离,将上清液转移到 250 mL 旋转蒸发瓶中,再重复 2 次提取分离过程,合并提取液.将提取液旋转蒸发浓缩至 1~2 mL,加入 20 mL 正己烷,继续旋转蒸发浓缩至 1~2 mL,完成溶剂转换.然后过硅胶/氧化铝层析柱,柱子自下而上依次为 6 cm 氧化铝、12 cm 硅胶和 1 cm 无水硫酸钠.正己烷平衡后装样,用 20 mL 正己烷、70 mL 二氯甲烷和正己烷混合溶液(3:7,体积比)以及 40 mL 丙酮和正己烷混合溶液(2:8,体积比)分别淋洗脂肪烃、芳烃和酯.收集酯的淋洗液,旋转蒸发浓缩至 1~2 mL,转移至氮吹管,在 N₂ 氛围下吹干,用甲醇定容到 1 mL.

1.5 仪器分析

标准梯度和样品中 PAEs 利用美国戴安液相色谱和大连依利特液相色谱柱进行分离测定.淋洗液用 CH₃CN(A)和 H₂O(B),流速为 1.0 mL·min⁻¹,梯度程序为:0~4 min,A 保持 60%,4~5 min,A 由 60% 增加到 70%,5~11 min,A 保持 70%,11~14 min,A 由 70% 增加到 100%,14~22 min,A 保持 100%.柱温箱为 30℃,检测波长采用 225 nm,进样量为 20 μL.样品中 PAEs 化合物采用保留时间进行定性,利用标准曲线进行定量.

1.6 质量保证与质量控制

实验过程中严格禁止使用各种塑料器皿.所有玻璃器皿在重铬酸钾洗液中浸泡过夜,分别用自来水、蒸馏水和超纯水清洗 3 次并烘干,使用前用相应有机溶剂润洗.分别取有机试剂 3 mL 于氮吹管中,在 N₂ 氛围下吹干,用甲醇溶解并定容 1.0 mL,未检测到目标物.过程空白实验结果表明,仅有少量 DMP 和 DEP 检出,分别为 2 μg·L⁻¹ 和 3 μg·L⁻¹.以 3 倍信噪比计算仪器的检出限,DMP、DEP、BBP、DnBP、DEHP 和 DnOP 的仪器的检出限分别为 13、28、6、71、15 和 11 μg·L⁻¹.替代标样回收率在 81%~115%,平均为 97%.基质加标回收率在 77%~121%.同时对 10% 的样品进行重复实验,结果的重现性(以相对标准偏差 RSD 表示)在 10% 以内.

1.7 暴露评价模型

地表灰尘中 PAEs 可以通过手口直接摄入、口鼻呼吸吸入和皮肤接触吸收等途径进入人体危害健康,每种途径人群暴露剂量计算公式为^[20,21]:

$$ADD_{\text{oral}} = C \times \frac{IR_{\text{oral}} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$ADD_{\text{inh}} = C \times \frac{IR_{\text{inh}} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (2)$$

$$ADD_{\text{dermal}} = C \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中,ADD_{oral}、ADD_{inh} 和 ADD_{dermal} 分别表示手口直接摄入、口鼻呼吸吸入和皮肤接触吸收途径长期日平均暴露量,mg·(kg·d)⁻¹;C 表示地表灰尘 PAEs 含量,mg·kg⁻¹;IR_{oral} 表示灰尘摄入速率,mg·d⁻¹,IR_{inh} 表示呼吸速率,m³·d⁻¹;EF 表示暴露频率,d·a⁻¹;ED 表示暴露年限,a;BW 表示体重,kg;AT 为暴露时间,d;PEF 为颗粒物排放因子,m³·kg⁻¹;SA 为暴露皮肤面积,cm²;SL 为皮肤黏着度,mg·(cm²·d)⁻¹;ABS 为皮肤吸收因子.表 1 列出了暴露评价模型参数取值.

2 结果与讨论

2.1 地表灰尘中 PAEs 的含量水平

西安城区地表灰尘中 U. S. EPA 优控的 6 种 PAEs 统计结果见表 2.从中可知,西安城区地表灰尘中 DMP、DEP、BBP、DnBP、DEHP 和 DnOP 的含量范围从未检出到 183.19 mg·kg⁻¹,平均含量分别是 0.93、1.16、0.58、13.42、23.95 和 0.44

表 1 暴露评价模型参数取值

参数	儿童	成人	文献
IR _{oral} /mg·d ⁻¹	250	150	[22]
IR _{inh} /m ³ ·d ⁻¹	7.63	12.8	[10, 22, 23]
EF/d·a ⁻¹	180	180	[24]
ED/a	6	24	[20, 21]
BW/kg	15	58.6	[22]
AT	ED × 365	ED × 365	[20, 21]
SA/cm ²	1 150	2 145	[22]
SL/mg·(cm ² ·d) ⁻¹	0.2	0.07	[24]
ABS	0.001	0.001	[24]
PEF/m ³ ·kg ⁻¹	1.36 × 10 ⁹	1.36 × 10 ⁹	[20, 21]

mg·kg⁻¹, 检出率分别为 93%、76%、97%、100%、100% 和 100%, 含量顺序为 DEHP > DnBP >> DEP > DMP > BBP > DnOP. 6 种 PAEs 的总量 (∑6PAEs) 范围在 0.87 ~ 250.30 mg·kg⁻¹, 平均值为 40.48 mg·kg⁻¹.

表 3 是西安城区地表灰尘和其它城市灰尘介质中 PAEs 含量比较. 从中可知, 西安城区地表灰尘中 DMP 含量比北京室内灰尘低, 但高于广州城区道路灰尘. DnBP 和 ∑6PAEs 含量低于广州城区道路灰尘和北京室内灰尘, 但高于南京室内灰尘中 PAEs 的含量. 与其它城市灰尘介质相比, 西安城区地表

表 2 西安城区地表灰尘中 PAEs 的描述性统计结果¹⁾/mg·kg⁻¹

PAEs	最小值	最大值	中位数	平均值	标准偏差	变异系数
DMP	ND	4.76	0.58	0.93	0.96	1.03
DEP	ND	9.17	0.34	1.16	1.98	1.71
BBP	ND	5.92	0.25	0.58	0.95	1.64
DnBP	0.03	183.19	8.38	13.42	24.49	1.82
DEHP	0.66	162.88	10.69	23.95	33.37	1.39
DnOP	0.02	5.40	0.12	0.44	1.09	2.48
∑6PAEs	0.87	250.30	23.07	40.48	47.85	1.18

1) “ND”表示未检出

表 3 不同城市灰尘介质中 PAEs 含量比较¹⁾/mg·kg⁻¹

地区	介质	DMP	DEP	DnBP	BBP	DEHP	DnOP	∑6PAEs	文献
北京	室内灰尘	18	22	82	46	955	46	1 169	[25]
南京	室内灰尘	ND	1.12	0.13	0.18	0.89	0.10	2.42	[26]
广州城区	道路灰尘	0.12	0.20	19.15	—	98.02	2.65	120.14	[18]
西安市	地表灰尘	0.93	1.16	13.42	0.58	23.95	0.44	40.48	本研究

1) “—”表示未检测, “ND”表示未检出

灰尘中 DEP 和 BBP 含量处于较高水平, DEHP 和 DnOP 含量处于中等水平.

2.2 地表灰尘中 PAEs 的构成特征

西安城区地表灰尘中 PAEs 构成特征见图 2. 从中可知, 西安城区地表灰尘中 PAEs 主要以 DnBP 和 DEHP 为主, 二者约占 ∑6PAEs 的 92%, 其它 PAEs 比例相对较低. 西安城区不同功能区域地表灰尘中 PAEs 也都以 DnBP 和 DEHP 为主, 二者在不同功能区的比重分别为住宅区 (94%) > 交通区 (93%) = 商业混合区 (93%) > 公园 (92%) > 文教区 (88%) > 工业区 (87%), 沿主城区、二环和三环分别为主城区 (96%) > 二环 (94%) > 三环 (89%). 地表灰尘中 PAEs 的构成模式一方面是由于我国增塑剂主要以 DnBP 和 DEHP 为主^[27]. 另一方面是由

于 DnBP 和 DEHP 等分子量相对较大, 水溶性相对较低, 辛醇-水分配系数相对较大, 易被地表灰尘颗粒物吸附并富集, 不易被生物降解^[28~30], 而 DMP 和 DEP 等短链 PAEs 水溶性相对较高, 辛醇-水分配系数相对较小, 易被生物降解^[18]. 同时, PAEs 的构成特征在不同功能区并没有显著差异, 说明不同功能区地表灰尘中 PAEs 来源可能具有一致性.

2.3 地表灰尘中 PAEs 的分布特征

图 3 和图 4 分别为西安城区地表灰尘中单体 PAE 和 ∑6PAEs 在不同功能区域的分布情况. 从中可以看出, DMP 和 DEP 在公园和文教区相对较高, BBP 和 DnOP 在工业区和交通区相对较高, 灰尘中占主导的 DnBP 和 DEHP 以及 ∑6PAEs 在交通区、商业交通混合区和公园较高. 交通区和交通商

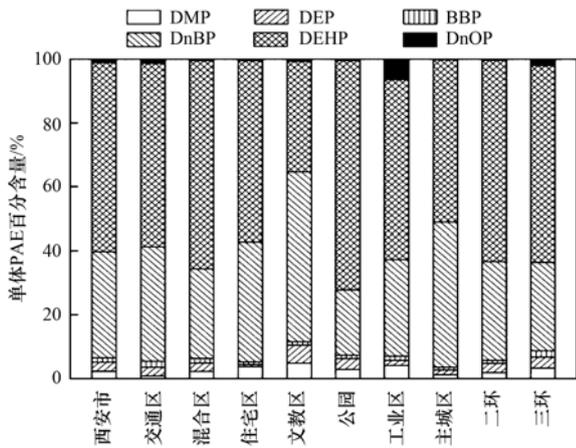


图2 西安城区地表灰尘中 PAEs 的构成特征

Fig. 2 Composition of PAEs in surface dust in urban area of Xi'an City

业混合区地表灰尘中 PAEs 高可能与其周围密集的商业活动场所建筑材料及室内外装修材料中 PAEs 的释放有关; 公园地表灰尘中 PAEs 高可能是由于公园相对城区地面清扫不及时, 造成 PAEs 在地表灰尘中累积. 沿主城区-二环-三环, DEP 和 DnOP 的分布规律为三环 > 二环 > 主城区, DMP 和 BBP 的分布规律为三环 > 主城区 > 二环, 灰尘中占主导的 DnBP 和 DEHP 以及 $\sum 6\text{PAEs}$ 的分布规律为主城区 > 二环 > 三环, 说明西安城区地表灰尘中 PAEs 含量随距城市中心距离的增加而递减.

西安城区地表灰尘中 $\sum 6\text{PAEs}$ 的空间分布特征见图 5. 从中可知, 西安主城区、南二环、西郊和南郊地表灰尘中 $\sum 6\text{PAEs}$ 含量相对较高. 主城区和南二环主要为商业区和住宅区, 南郊主要是文教区和住宅区, 西郊主要是住宅区和工业区, 这些区域人群和建筑物密度相对较大, 暗示地表灰尘中 PAEs 可能与化妆品和个人护肤品以及建筑材料和室内装饰材料等中 PAEs 的释放有关, 同时也与当地工业生产活动中 PAEs 的使用和释放有关.

2.4 地表灰尘中 PAEs 来源

相关分析、主成分分析和聚类分析被用于西安城区地表灰尘中 PAEs 的来源分析. 表 4 是地表灰尘中 PAEs 的相关分析结果. 从中可知, 西安城区地表灰尘中 DMP-DEP、BBP-DEHP 和 DnBP-DEHP 之间存在显著正相关关系, 然而 DnOP 和其它 PAEs 之间不存在显著相关关系. 显著正相关关系暗示两种 PAEs 可能有相同的环境来源或环境行为. 西安

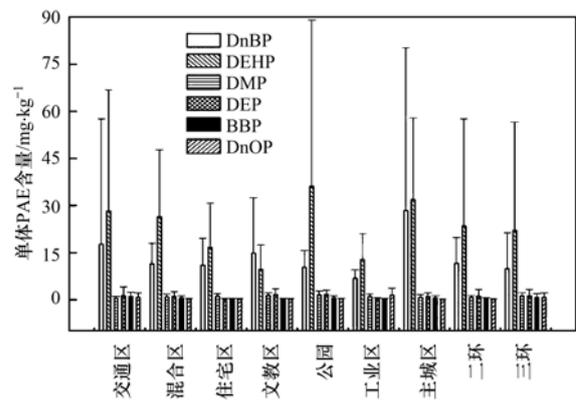


图3 西安城区不同区域地表灰尘中单体 PAE 的分布特征

Fig. 3 Distribution of individual PAE in surface dust from different districts in urban area of Xi'an City

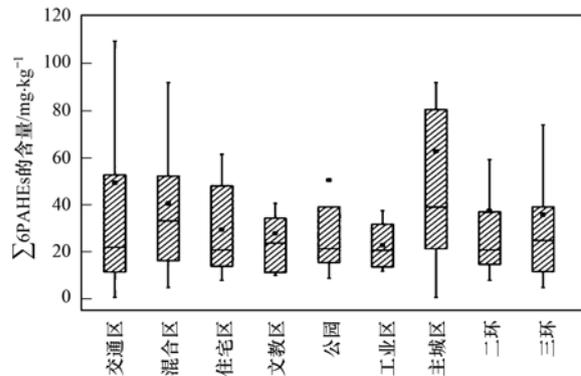


图4 西安城区不同区域地表灰尘中 $\sum 6\text{PAEs}$ 的含量

Fig. 4 Concentration of $\sum 6\text{PAEs}$ in surface dust from different districts in urban area of Xi'an City

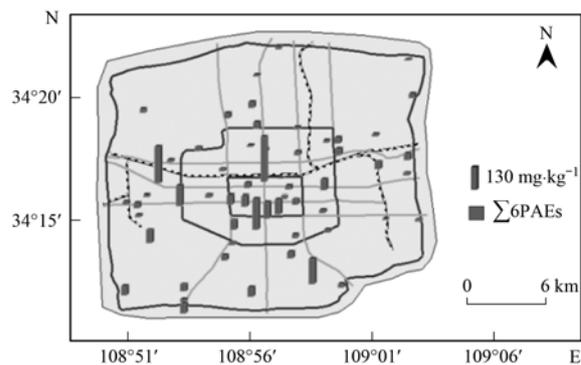


图5 西安城区地表灰尘中 $\sum 6\text{PAEs}$ 空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution of $\sum 6\text{PAEs}$ in surface dust in urban area of Xi'an City

城区地表灰尘中 PAEs 的主成分分析结果见表 5. 从中可知, 主成分分析提取了 4 个特征值大于 1 的主因子, 累积方差贡献率为 83.56%. 因子 1 由 DEP 和 BBP 以及部分 DEHP 构成, 方差贡献率为 27.68%; 因子 2 由 DnBP 和 DEHP 构成, 方差贡献

率为 20.45% ; DMP 和 DnOP 分别构成因子 3 和因子 4, 方差贡献率分别为 17.79% 和 17.64%。图 6 是西安城区地表灰尘中 PAEs 的聚类分析结果。从中可知, 聚类分析将地表灰尘中 PAEs 聚为 4 类: DEP 和 BBP 构成类 1、DnBP 和 DEHP 组成类 2、DMP 和 DnOP 分别为类 3 和类 4, 同时类 1 和类 3 在更高水平形成新类, 聚类分析结果与主成分分析结果基本一致。

PAEs 具有极其广泛的应用, 最主要用作增塑剂。PAEs 占增塑剂市场的 80%, 在聚体中的含量可达 10% ~ 60%, 最常用的是 DnBP 和 DEHP, 长链 BBP 和 DnOP 也经常用作增塑剂^[31, 32]。全世界每年 PAEs 的产量是 600 万 t, 我国 2011 年 PAEs 的使用量已经达到 200 万 t, 且每年对 PAEs 的需求量逐年增加, 我国已成为 PAEs 的主要进口国家^[27, 33, 34]。DMP 和 DEP 通常用于个人护理品、化妆品、涂料、特殊粘合剂和环氧树脂等工业产品^[32, 35, 36], BBP 和

DnOP 也被广泛用于乙烯地板的生产、皮革合成、油墨等^[6, 33, 35]。

西安城区地表灰尘中 PAEs 主要以 DnBP 和 DEHP 为主, 与 DnBP 和 DEHP 在我国主要用作增塑剂相一致, 因此西安城区地表灰尘中 DnBP 和 DEHP 主要与增塑剂使用有关。地表灰尘中 DMP 和 DEP 可能与化妆品、个人护肤品的使用有关, DMP 和 DEP 以及 BBP 与 DnOP 可能还与建筑材料和室内装修材料的使用有关。

2.5 PAEs 暴露分析

表 6 给出了儿童和成人在不同暴露途径下对于地表灰尘中 PAEs 的日均摄入量。从中可以看出, 儿童和成人通过不同途径暴露地表灰尘中 4 种 PAEs 的日均摄入量顺序为手口直接摄入 >> 皮肤接触吸收 > 口鼻呼吸吸入, 其中, 手口直接摄入量约为皮肤接触吸收暴露剂量的 1 000 多倍, 口鼻呼吸吸入剂量相对较少。各种途径中儿童的摄入量总

表 4 西安城区地表灰尘中 PAEs 的相关分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis of PAEs in surface dust in urban area of Xi'an City

	DMP	DEP	BBP	DnBP	DEHP	DnOP
DMP	1					
DEP	0.282 *	1				
BBP	0.024	0.487 **	1			
DnBP	-0.028	0.175	0.016	1		
DEHP	-0.010	0.360 **	0.302 *	0.296 *	1	
DnOP	-0.177	-0.110	0.200	-0.068	0.056	1

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关

表 5 西安城区地表灰尘中 PAEs 主成分分析¹⁾

Table 5 Principal component analysis of PAEs in surface dust in urban area of Xi'an City

PAEs	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	共同度
DMP	0.074	-0.027	0.976	-0.078	0.966
DEP	0.786	0.176	0.304	-0.194	0.779
BBP	0.866	-0.074	-0.054	0.207	0.801
DnBP	-0.031	0.926	0.025	-0.043	0.861
DEHP	0.533	0.576	-0.107	0.047	0.630
DnOP	0.049	-0.016	-0.082	0.983	0.977
特征值	1.661	1.227	1.068	1.058	
方差贡献率/%	27.682	20.449	17.792	17.638	
累计方差贡献率/%	27.682	48.131	65.923	83.560	

1) 加粗的数值为因子载荷大于 0.5

表 6 儿童和成人对 PAEs 的日均摄入量¹⁾/mg·(kg·d)⁻¹

Table 6 ADD values of children and adults via different exposure pathways/mg·(kg·d)⁻¹

PAEs	手口摄入		呼吸吸入		皮肤接触		TDI	RfD
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人		
DEP	9.54E-06	1.46E-06	2.13E-10	9.16E-11	8.77E-09	1.46E-09	0.75	0.8
BBP	4.77E-06	7.31E-07	1.07E-10	4.58E-11	4.38E-09	7.31E-10	0.2	0.2
DnBP	1.10E-04	1.69E-05	2.47E-09	1.06E-09	1.01E-07	1.69E-08	0.1	0.1
DEHP	1.97E-04	3.02E-05	4.41E-09	1.89E-09	1.81E-07	3.02E-08	0.037	0.02

1) TDI 为 EU CSTEE 规定的日耐受量, RfD 为 U. S. EPA 规定的口服参考剂量

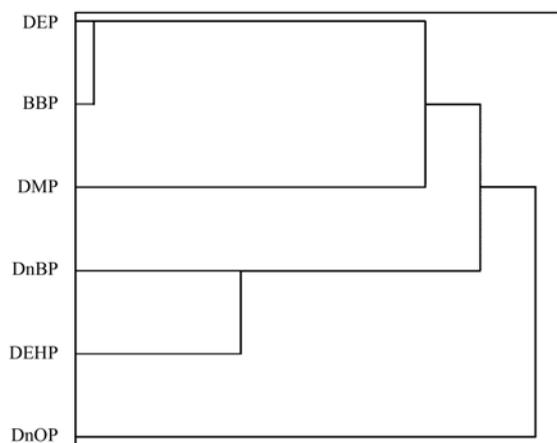


图6 西安城区地表灰尘中PAEs聚类分析
Fig. 6 Cluster analysis of PAEs in surface dust
in urban area of Xi'an City

是高于成人的摄入量,手口摄入、呼吸吸入和皮肤接触3种途径儿童摄入量分别为成人的6.5倍、2.3倍和6倍。由此可见,人群暴露地表灰尘中PAEs主要是以手口直接摄入为主,儿童高于成人,且DnBP和DEHP高于DEP和BBP。DnBP、DEHP、DEP和BBP暴露剂量低于EU CSTE和US EPA规定的日耐受量(TDI)和口服参考剂量(RfD),说明人群暴露城市地表灰尘中DBP、DEHP、DEP和BBP均未超标。

3 结论

(1)西安城区地表灰尘中U.S. EPA优控的6种PAEs均有不同程度的检出,单体PAE的含量从未检出~183.19 mg·kg⁻¹,6种PAEs总量(∑6PAEs)在0.87~250.30 mg·kg⁻¹之间,平均含量为40.48 mg·kg⁻¹。与国内不同城市不同介质中PAEs比较,西安城区地表灰尘中PAEs属于中等水平。

(2)西安城区地表灰尘中PAEs主要以DnBP和DEHP为主。地表灰尘中∑6PAEs在公园和交通区最高,其次是商业交通混合区,住宅区、文教区和工业区相对较低。∑6PAEs沿主城区-二环-三环呈现递减趋势。

(3)西安城区地表灰尘中DnBP和DEHP主要与增塑剂的使用有关,DMP和DEP可能与化妆品、个人护肤品使用有关,DMP和DEP以及BBP与DnOP可能还与建筑材料和室内装修材料的释放有关。

(4)手口直接摄入是人群暴露地表灰尘中

PAEs而产生潜在健康危害的主要途径。人群暴露地表灰尘中DnBP、DEHP、DEP和BBP日均暴露量(ADD)低于EU CSTE和U.S. EPA规定的日耐受量(TDI)和口服参考剂量(RfD)。

参考文献:

- [1] Liu H, Cui K Y, Zeng F, *et al.* Occurrence and distribution of phthalate esters in riverine sediments from the Pearl River Delta region, South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **83** (1): 358-365.
- [2] Caldwell J C. DEHP: Genotoxicity and potential carcinogenic mechanisms-a review [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2012, **751**(2): 82-157.
- [3] Mo C H, Cai Q Y, Tang S R, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in vegetables from nine farms of the Pearl River Delta, South China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, **56** (2): 181-189.
- [4] Fatoki O S, Bormann M, Ravandhalala L, *et al.* Phthalate ester plasticizers in freshwater systems of Venda, South Africa and potential health effects[J]. *Water SA*, 2010, **36**(1): 117-125.
- [5] 周文敏,傅德黔,孙宗光. 中国水中优先控制污染物黑名单的确定[J]. *环境科学研究*, 1991, **4**(6): 9-12.
Zhou W M, Fu D Q, Sun Z G. Determination of black list of China's priority pollutants in water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1991, **4**(6): 9-12.
- [6] Abdel daiem M M, Rivera-Utrilla J, Ocampo-Pérez R, *et al.* Environmental impact of phthalic acid esters and their removal from water and sediments by different technologies-a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **109**: 164-178.
- [7] Wang J, Luo Y M, Teng Y, *et al.* Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **180**: 265-273.
- [8] Zheng X X, Zhang B T, Teng Y G. Distribution of phthalate acid esters in lakes of Beijing and its relationship with anthropogenic activities[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 107-113.
- [9] Guo Y, Kannan K. Challenges encountered in the analysis of phthalate esters in foodstuffs and other biological matrices[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, **404** (9): 2539-2554.
- [10] 刘敏,林玉君,曾锋,等. 城区湖泊表层沉积物中邻苯二甲酸酯的组成与分布特征[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(8): 1377-1383.
Liu M, Lin Y J, Zeng F, *et al.* The distribution and composition of phthalate esters in the sediment of urban lakes in Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(8): 1377-1383.
- [11] 刘庆,杨红军,史衍玺,等. 环境中邻苯二甲酸酯类(PAEs)污染物研究进展[J]. *中国农业生态学报*, 2012, **20**(8): 968-975.
Liu Q, Yang H J, Shi Y X, *et al.* Research progress on phthalate esters (PAEs) organic pollutants in the environment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(8): 968-975.
- [12] Mielke H W, Gonzales C R, Smith M K, *et al.* The urban

- environment and children's health: soils as an integrator of lead, zinc, and cadmium in New Orleans, Louisiana, U. S. A. [J]. *Environmental Research*, 1999, **81**(2): 117-129.
- [13] De Miguel E, Iribarren I, Chacón E, *et al.* Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain) [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(3): 505-513.
- [14] Aelion C M, Davis H T, McDermott S, *et al.* Metal concentrations in rural topsoil in South Carolina: potential for human health impact [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **402**(2-3): 149-156.
- [15] 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(5): 1153-1158.
Chang J, Liu M, Hou L J, *et al.* Concept, pollution character and environmental effect of urban surface dust [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(5): 1153-1158.
- [16] 陈彦芳, 马建华, 董运武, 等. 开封周边地区地表灰尘砷、汞背景值及其应用[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3052-3059.
Chen Y F, Ma J H, Dong Y W, *et al.* Background values of As and Hg in surface dusts in the vicinity of Kaifeng city and their application [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3052-3059.
- [17] Zhang W, Zhang S C, Wan C, *et al.* Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road runoff, dust, rain and canopy throughfall [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **153**(3): 594-601.
- [18] 陈丽旋, 曾锋, 罗丹玲, 等. 城市道路灰尘中邻苯二甲酸酯污染特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(3): 409-413.
Chen L X, Zeng F, Luo D L, *et al.* Study of the distribution characteristics of phthalate esters in road dust of the city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(3): 409-413.
- [19] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征 [J]. *地理学报*, 2011, **66**(9): 1281-1288.
Chen X D, Lu X W, Zhao C F, *et al.* The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior Area of the Second Ring Road, Xi'an [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(9): 1281-1288.
- [20] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund, Vol 1 human health evaluation manual [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989. 15-28.
- [21] U. S. EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 2002.
- [22] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
Li R Z, Zhou A J, Tong F, *et al.* Distribution of metals in urban dusts of Hefei and health risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2661-2668.
- [23] U. S. EPA. Exposure factors handbook [M]. Washington, DC: Office of Research and Development, 1997. 130-134.
- [24] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [25] 林兴桃, 沈婷, 禹晓磊, 等. 室内降尘中邻苯二甲酸酯污染特征分析 [J]. *环境与健康杂志*, 2009, **26**(12): 1109-1111.
Lin X T, Shen T, Yu X L, *et al.* Characteristics of phthalate esters pollution in indoor settled dust [J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, **26**(12): 1109-1111.
- [26] 黄玉娟, 陈永山, 骆永明, 等. 气相色谱-质谱联用内标法测定土壤中 11 种酞酸酯 [J]. *环境化学*, 2013, **32**(4): 658-665.
Huang Y J, Chen Y S, Luo Y M, *et al.* Determination of phthalic acid esters in soft samples by gas chromatography-mass spectrometry with internal standard method [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(4): 658-665.
- [27] 中国石油和化学工业协会. 中国化学工业年鉴 2008 [M]. 北京: 中国化工信息中心, 2009. 50-60.
- [28] Liang D W, Zhang T, Fang H H P, *et al.* Phthalates biodegradation in the environment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **80**: 183-198.
- [29] Staples C A, Peterson D R, Parkerton T F, *et al.* The environmental fate of phthalate esters: a literature review [J]. *Chemosphere*, 1997, **35**(4): 667-749.
- [30] Cartwright C D, Thompson I P, Burns R G. Degradation and impact of phthalate plasticizers on soil microbial communities [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, **19**(5): 1253-1261.
- [31] 陈永山, 骆永明, 章海波, 等. 设施菜地土壤酞酸酯污染的初步研究 [J]. *土壤学报*, 2011, **48**(3): 516-523.
Chen Y S, Luo Y M, Zhang H B, *et al.* Preliminary study on PAEs pollution of greenhouse soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(3): 516-523.
- [32] Zeng F, Cui K Y, Xie Z Y, *et al.* Phthalate esters (PAEs): Emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(2): 425-434.
- [33] Xie Z Y, Ebinghaus R, Temme C, *et al.* Occurrence and air-sea exchange of phthalates in the arctic [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(13): 4555-4560.
- [34] Niu L L, Xu Y, Xu C, *et al.* Status of phthalate esters contamination in agricultural soils across China and associated health risks [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **195**: 16-23.
- [35] Gómez-Hens A, Aguilar-Caballos M P. Social and economic interest in the control of phthalic acid esters [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2003, **22**(11): 847-857.
- [36] Cao X L. Phthalate esters in foods: sources, occurrence, and analytical methods [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2010, **9**(1): 21-43.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN Yu-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《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10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 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