

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.12
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)

2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)

上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)

外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)

泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)

锆、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)

基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)

养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)

粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估

方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 为了解成都市道路积尘中全氟化合物(PFASs)的污染特征及人群暴露风险, 采用超高效液相色谱-质谱联用仪分析了成都市道路积尘中12种PFASs的含量水平。成都市道路积尘中PFASs的含量为 $0.95 \sim 111 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量为 $(25.6 \pm 37.2) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 说明存在较大的空间差异性。主干道路上PFASs的总含量显著高于支干道路, 支干道路市区含量高于郊区含量。解放路一段、金牛坝路及水碾河路段主要的全氟化合物为全氟丁烷羧酸(PFBA), 比例高达95%。而其它道路中主要的PFASs为全氟辛烷羧酸(PFOA, 24.8%)和全氟辛烷磺酸(PFOS, 24.1%), 说明不同区域PFASs的污染源存在较大差异。成都市儿童和成人通过道路积尘摄入的PFASs分别为 $0.168 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.028 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 说明儿童暴露风险高于成人, 应加强对儿童健康风险的关注。另外, 根据欧盟推荐的每日最大耐受量, 道路积尘中PFOS和PFOA的暴露量不会对成都市居民造成即时伤害。

关键词: 全氟化合物(PFASs); 道路积尘; 主干道路; 支干道路; 风险评估; 成都

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)12-5265-07 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201906186

Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu

FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, YIN Hong-ling, SUN Jing

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

Abstract: To study the pollution characteristics and exposure health risk of perfluoroalkyl substances (PFASs) in road dust, 12 PFASs were analyzed by ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) in this study. PFAS concentrations in road dust ranged from 0.95 to $111 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, with an average concentration of $(25.6 \pm 37.2) \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, suggesting large spatial differences between PFASs in road dust. PFAS concentrations on the main roads were significantly higher than on minor roads, and the minor roads downtown displayed higher concentration levels than suburban minor roads. Perfluorobutanoic acid (PFBA) was the predominant compound in Section 1 of Jie-fang Road, Jin-niu-ba Road and Shui-nian-he Road, while perfluorooctanoic acid (PFOA, 24.8%) and perfluorooctane sulfonate (PFOS, 24.1%) were the main PFASs on other roads, indicating different sources of PFASs in these areas. The total daily dose of PFASs in road dust for children and adults were $0.168 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ and $0.028 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, respectively, suggesting higher exposure risk for children than adults. Therefore, more attention should be paid to children's health risk assessment. Daily doses of PFOA and PFOS in road dust for Chengdu residents were lower than the maximum daily intakes recommended by the European Authority, indicating that there was no immediate health risk to local residents.

Key words: perfluoroalkyl substances (PFASs); road dust; main road; minor road; risk assessment; Chengdu

全氟化合物(PFASs)是一类碳原子连接的氢原子全部被氟原子取代的有机化合物, 主要包括全氟羧酸类(PFCAs)和全氟磺酸类(PFSAs)等。由于PFASs具有化学性质稳定、热稳定、高表面活性及疏水疏油等性能, 被广泛应用于化工、纺织、皮革、消防、日用洗涤剂、炊具制造、杀虫剂、医药、石油化工和铬雾抑制剂等^[1]诸多与人们日常生活息息相关的领域并排放到环境中去。PFASs已在全球不同环境介质中(如水、土壤和大气等)被广泛检出^[2~4], 成为公认的全球性有机污染物。有研究表明, PFOS和PFOA都可能对生物体的生长、发育、生殖系统等产生毒害作用, 而PFOA可能诱发生物体发生癌变^[5~8]。因此, 2009年5月PFOS及其相关产品全氟辛基磺酰氟(PFOSF)被《斯德哥尔摩公

约》第四次缔约方大会列为新增的持久性有机污染物。2015年欧盟将PFOA列为高关注度物质, 自2020年起, 该物质不得生产或投放市场。

国内外有关于PFASs污染现状的研究主要集中于如沉积物、土壤、水、植物、动物及人体^[9~15], 而有关城市道路积尘中的PFASs污染特征的研究非常匮乏。城市道路积尘含有重金属和一些有机污染物^[16, 17], 会随着风、汽车等外力作用下重新进入大气, 成为二次污染源。因此, 本研究通过采集成都

收稿日期: 2019-06-25; 修订日期: 2019-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(21607018); 四川省教育厅科研基金项目(2017Z055); 成都信息工程大学引进人才科研启动项目(KYTZ201605); 成都信息工程大学中青年学术带头人科研基金项目(J201714)

作者简介: 方淑红(1986~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境化学, E-mail: fsh@cuit.edu.cn

市道路积尘,分析了道路积尘中 PFASs 的污染特征,并对其进行健康风险评估,以期为后期 PFASs 的管控提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本文于2016年1月采用吸尘器收集成都市区主干道及支路上路边的道路积尘,样品采集期间均无降雨过程发生.采集样品过200目筛子除

去石子和毛发等杂质,过筛后样品用铝箔纸包装保存.样品采集主干道包括顺城大街、水碾河路、科华南路、高攀东路段、人民南路四段、一环路西段、金牛坝路及解放路一段;支干道路包括槐树街、桂香三路、双城三路、天晖路、琉璃路、芳龄路、东升路及犀安路.每条路段连续采集样品,由于主干道车流量较大,考虑到采样人员的安全性,道路积尘统一从最右边车道采集.采样点位如图1所示.

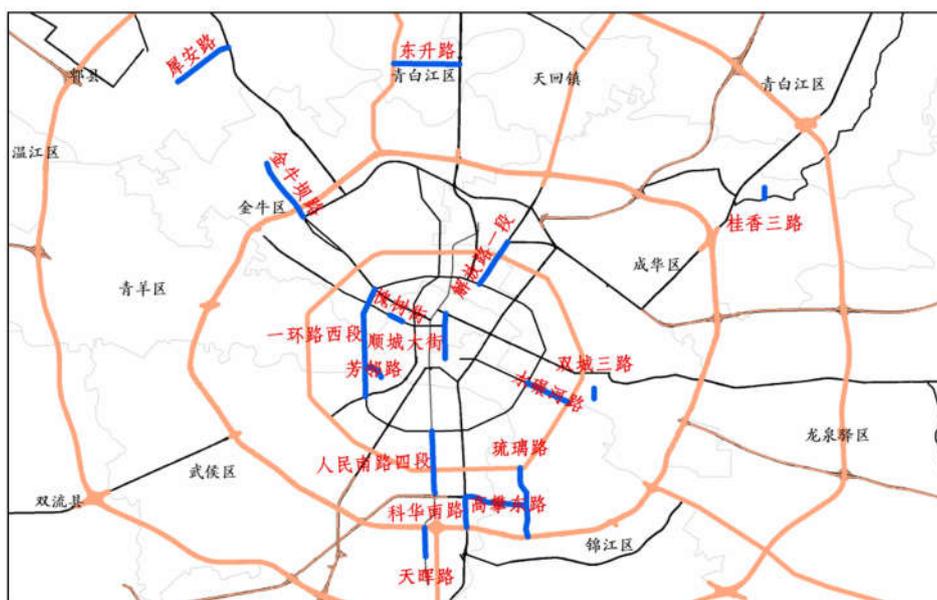


图1 成都市道路积尘采样点位示意

Fig. 1 Map of road in Chengdu City and sampling sites

1.2 实验材料及试剂

甲醇(色谱纯/99.8%,成都市科龙化工试剂厂)、氨水(25%,成都市科龙化工试剂厂)、Milli-Q超纯水.

实验标准品:本研究中的标准样品为高纯度混合标准品 PFAC-MXB (Wellington 公司),含有全氟羧酸类和全氟磺酸类化合物.其中,羧酸类包括:全氟丁烷羧酸(PFBA)、全氟戊烷羧酸(PFPeA)、全氟己烷羧酸(PFHxA)、全氟庚烷羧酸(PFHpA)、全氟辛烷羧酸(PFOA)、全氟壬烷羧酸(PFNA)、全氟癸烷羧酸(PFDA)、全氟十一烷羧酸(PFUnDA)和全氟十二烷羧酸(PFDoDA).磺酸类包括:全氟丁烷磺酸(PFBS)、全氟己烷磺酸(PFHxS)和全氟辛烷磺酸(PFOS).另外,PFAC-MXA 为高纯度混合碳同位素标记品(Wellington 公司),包括: $^{13}\text{C}_4$ -PFBA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFHxA、 $^{13}\text{C}_4$ -PFOA、 $^{13}\text{C}_5$ -PFNA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFDA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFUnDA、 $^{13}\text{C}_2$ -PFDoDA、 $^{13}\text{O}_2$ -PFHxS 和 $^{13}\text{C}_4$ -PFOS.

1.3 样品前处理

准确称取 5.000 g 的道路积尘,转移至 50 mL PP 离心管中,加入 2 ng 混合内标 PFAC-MXA,涡旋

30 s,充分混合后再静置 2 h. 然后加入 5 mL MeOH,涡旋 30 s,使其充分混匀.在摇床上于 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下振荡 10 min,然后超声萃取 10 min, $5000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min. 上清液转移到新的 PP 管中.按上述方法重复萃取一次,上清液合并到同一 PP 管中.萃取液氮吹浓缩至 2 mL. 浓缩液用超纯水稀释至 200 mL,以 $1\text{ 滴}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度过活化后的 Cleanert PEP 柱子 [$500\text{ mg}\cdot(6\text{ mL})^{-1}$,天津博纳艾杰尔科技有限公司]纯化.活化步骤如下:先用 10 mL 甲醇溶液活化,然后用 10 mL 超纯水活化.活化速度均为 $1\text{ 滴}\cdot\text{s}^{-1}$. 样品过完柱后,调节真空泵压力将 PEP 柱子中水份抽干,放置平衡 2 h 后,先用 10 mL 20% MeOH/ H_2O 洗杂质,并抽干.最后用 10 mL 甲醇溶液洗脱目标分析物至 15 mL 离心管中,氮吹近干,用 0.6 mL 甲醇和 0.4 mL H_2O 复溶,复溶液过 0.22 μm 滤膜后转移到进样小瓶中, -20°C 保存待 UPLC-MS/MS 分析.

1.4 仪器分析

采用超高效液相色谱-串联质谱(安捷伦 1290-6470), C18 色谱柱(Zorbax SB-C18, $2.1\text{ mm}\times 50$

mm, 1.8 μm)对目标化合物进行定性及定量分析(ESI源,负离子模式),柱温维持在35.00 $^{\circ}\text{C}$ 。样品进样量为5 μL ,在水(A相)和甲醇(B相)二元流动相的作用下进行分离,流速为0.4 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,流动相梯度为:0.00~0.10 min,A相比例为90%;0.10~6.00 min,A相比例由90%降为5.00%;6.00~8.00 min,A相比例保持为5.00%,保持运行2 min。质谱条件的设定如下:毛细管出口电压3 000 V;雾化气压力241.5 kPa(35 psi);干燥气温度250 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.5 质量控制和质量保证

为了监测预处理过程中的污染,每处理10个实际样品设置2个空白实验。为观测仪器的稳定性,每12个实际样品测定两个浓度分别为1 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和5 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的标准样品。结果显示,仪器波动的标准偏差(RSD)为4.0%~9.8%,处于可接受范围。标准曲线浓度为0、0.1、0.2、1、5和10 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$,线性关系系数均大于0.99。对于没有在空白样品中检测出的PFASs,方法检测限设定为3倍信噪比时的浓度,而在空白样品中检测到的PFASs,其方法检测限为空白样品中浓度的均值加上3倍的标准偏差。在处理数据时,检测值低于MDLs值时,用MDLs值除以 $\sqrt{2}$ 代替,未检出时,用零代替。另外,由于关于道路积尘中PFASs的研究较少,而城市土壤与道路积尘污染源较为接近,因此,本文参考已有研究中报道的土壤中的PFASs的含量水平,对道路积尘进行了0.5 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 的回收率实验,回收率为71.1%~93.5%(表1),结果比较满意。

表1 道路积尘PFASs的方法检出限和回收率

项目	MDL/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	回收率/%
PFBA	0.014	93.5 \pm 7.6
PFPeA	0.028	71.1 \pm 6.8
PFHxA	0.002	78.3 \pm 5.2
PFHpA	0.002	72.2 \pm 6.2
PFOA	0.050	71.1 \pm 5.7
PFNA	0.003	72.4 \pm 5.7
PFDA	0.020	78.7 \pm 5.4
PFUnDA	0.004	73.9 \pm 4.3
PFDoDA	0.005	74.8 \pm 5.1
PFBS	0.006	78.2 \pm 5.0
PFHxS	0.005	78.2 \pm 5.9
PFOS	0.050	71.6 \pm 9.7

数据统计分析及作图采用IBM SPSS Statistics 22 software (International Business Machines Corporation, 美国), Origin 8.5 (Origin Lab, 美国)和ArcMap 10.2 (ESRI, 美国)。

1.6 风险评估

灰尘是人体暴露于污染物的一个重要途径,尤

其是儿童,在玩耍的过程中接触到灰尘,而后无意识地把手放到嘴里或者在吃东西的时候粘到食物上进入体内,进而使机体暴露于污染物中。由于现有的研究已经表明,PFASs具有肝脏毒性、遗传毒性、免疫毒性等生物毒性效应^[18,19],因此,很有必要通过计算当地居民通过灰尘暴露于PFASs的量,然后对当地居民进行健康风险评估。人体暴露于灰尘的3种主要途径为呼吸摄入、皮肤接触摄入和经口摄入,本文根据美国EPA推荐方法进行风险评估^[20],具体公式如下:

$$\text{ADD}_{\text{der}} = \frac{c_d \times \text{SA} \times \text{ABF} \times \text{AF} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{AT} \times \text{BW}} \quad (1)$$

$$\text{ADD}_{\text{inh}} = \frac{c_d \times R_{\text{inh}} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{AT} \times \text{BW} \times R_{\text{PF}}} \quad (2)$$

$$\text{ADD}_{\text{ing}} = \frac{c_d \times R_{\text{inh}} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{AT} \times \text{BW}} \quad (3)$$

式中, c_d 为各PFASs在灰尘中的含量($\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$),本文采用95分位数含量进行最大暴露风险评估;其它各暴露参数如表2所示。

表2 儿童及成人健康风险暴露评价参数

Table 2 Exposure parameters of health risk assessment for children and adults

暴露参数	缩写	儿童	成人
皮肤吸收因子	ABF	0.001 ^[21]	0.001 ^[21]
皮肤黏着度/ $\text{mg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{d})^{-1}$	AF	0.2 ^[21]	0.07 ^[21]
平均暴露时间/d	AT	365 \times ED ^[22]	365 \times ED ^[22]
体重/kg	BW	24 ^[23]	70 ^[24]
转化速率常数/ $\text{kg}\cdot\text{mg}^{-1}$	CF	1 \times 10 ⁻⁶ ^[25]	1 \times 10 ⁻⁶ ^[25]
暴露时间/a	ED	0.6 ^[21, 26]	4.8 ^[21, 26]
暴露频率/ $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	EF	185 ^[21]	180 ^[24]
经手-口摄入速率/ $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	R_{ing}	60 ^[24]	30 ^[24]
呼吸摄入速率/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	R_{inh}	7.63 ^[25]	12.8 ^[25]
颗粒物排放因子/ $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	R_{PF}	1.36 \times 10 ⁹ ^[21]	1.36 \times 10 ⁹ ^[21]
暴露皮肤面积/ $\text{cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$	SA	2 800 ^[21]	5 700 ^[21]

2 结果与讨论

2.1 成都市道路积尘中PFASs的分布特征

12种目标化合物在成都市道路积尘中均有不同程度地检出,说明了PFASs在成都市道路灰尘中的普遍存在。其中,检出频率最高的为PFOA和PFOS,检出率均为94%,然后依次为PFHxA = PFBS (88%) > PFUnDA (81%) > PFBA = PFDA = PFDoDA (69%) > PFNA (63%) > PFHpA (50%) > PFPeA (31%) > PFHxS (6%)。PFOA和PFOS在室内灰尘、土壤、水体及人体中均呈现出较高的检出频率^[27-31],被认为是环境中最常见的全氟化合物。成都市道路积尘中总PFASs的含量为0.95~111 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为(25.6 \pm 37.2) $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,说明存在

较大的空间差异性. 如图 2 所示, 主干道路上 PFASs 的总含量显著高于支干道路 (独立样本 T 检验, $P < 0.05$). PFASs 被广泛应用于汽油、润滑油和汽车轮胎等^[32, 33], 而主干道路车流量大, 交通高峰期道路拥堵, 汽车排放尾气及刹车启动过程中会向环境中释放 PFASs, 因此, 主干道路积尘中 PFASs 含量高于支干道路. 其中, 含量最高的出现在主干道路金牛坝路, 为 $111 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 该路段沿路有较多的汽车维修商铺、汽车销售中心, 尤其是在汽车维修过程中, 如喷漆等工艺会向环境中释放 PFASs^[32], PFASs 进入土壤或大气, 在人类活动的干扰下进入道路积尘. 含量最低的路段在桂香三路 ($0.95 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 该路段位于成都市东三环以外, 车辆较少, 污染源排

放较低. 且周围公园较多, 植被绿化较好, 减少了扬尘等的排放. 另外, 对于支干道路来说, 市区道路积尘中的含量 [$(5.36 \pm 4.80) \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$] 要高于周围郊区道路积尘中 [$(1.06 \pm 0.12) \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$] PFASs 的含量. 这是由于 PFASs 被广泛应用于洗涤剂、纺织品、纸张、油墨等与人们日常生活息息相关的消费品^[34], 成都市区人口密度远高于郊区人口密度, 消费的相关产品也多于郊区, 从而导致市区支干道路上 PFASs 的含量高于郊区. Li 等^[35] 对道路积尘中有机磷酸酯的研究结果同样显示, 有机磷酸酯在人口密集的市区道路积尘中呈现出较高的含量, 且含量从市区到郊区呈现出降低的趋势. 说明人类活动是影响有机物在道路积尘中分布的主要因素.

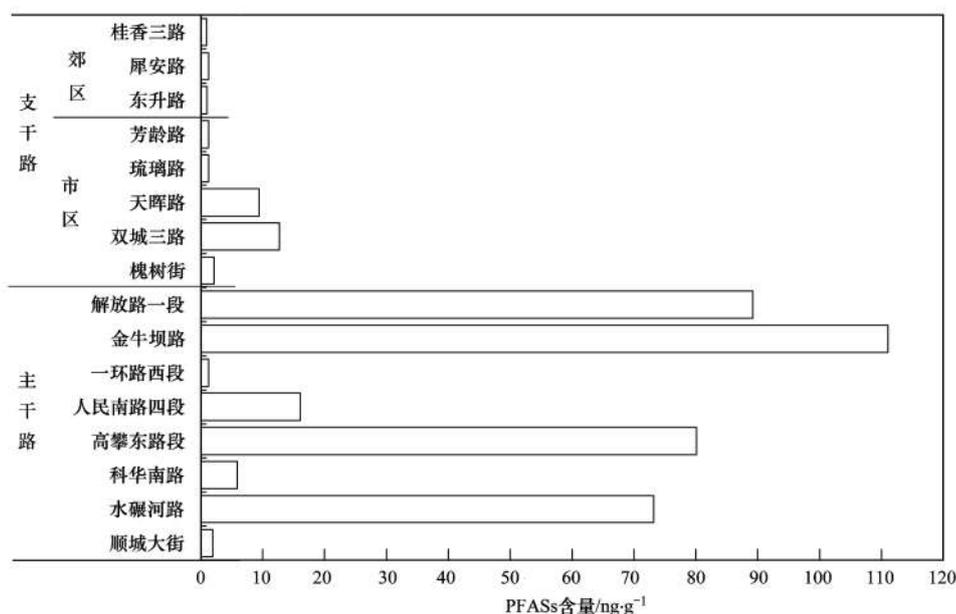


图 2 成都市道路积尘中 PFASs 的含量

Fig. 2 Concentrations of PFASs in road dust collected in Chengdu City

2.2 成都市道路积尘中 PFASs 的比例特征

如图 3 所示, PFASs 的比例特征在成都市道路积尘中存在较大的差异, 说明不同路段 PFASs 的来源不同. 解放路一段、金牛坝路及水碾河路段, PFBA 为主要的全氟化合物, 所占比例高达 95%, 说明有 PFBA 污染源的存在. Yao 等^[27] 和路程等^[36] 发现 PFBA 是天津市和北京市居民区及商铺空气及灰尘中主要的 PFASs. 解放路一段及水碾河路段居民及商业区密集, 居民及商业区 PFBA 通过大气沉降进入道路积尘, 从而导致道路积尘中 PFBA 比例较高. 金牛坝路汽车维修商铺及家具城林立, 涂料和油漆助剂等中的 PFBA 通过大气沉降或者雨水冲刷进入道路积尘. 在其它道路中, 主要的 PFASs 为 PFOA (24.8%) 和 PFOS (24.1%), 然后依次为 PFBS (18.4%) > PFHxA (8.1%) ≈ PFBA (7.0%) > PFNA (5.4%) > PFHpA (3.8%) > PFDA (2.6%) ≈

PFUnDA (2.1%) ≈ PFDODA (2.3%) > PFPeA (1.0%) > PFHxS (0.1%). 这与成都市饮食及自来水中比例特征较为一致, 均以 PFOA 和短碳链的 PFASs 为主^[37, 38], 说明成都市使用的 PFASs 已经向短碳链转变. 现有的研究结果显示, 相较于短碳链的 PFASs, 长碳链的 PFASs 具有更强的生物富集性及生物毒性^[39, 40]. 美国国家环保署于 2010 年宣布, 到 2015 年逐步消除 PFOA 及长碳链的 PFCAs^[41]. 针对全氟化合物的管控, 我国也采取了一系列措施, 将短碳链的 PFASs 及 C6 调聚物作为 PFOA (C8) 替代品, 应用于油墨、半导体材料灭火剂等领域, 从而导致近年来短碳链 PFASs 在环境中呈现出较高的含量和比例.

2.3 成都市道路积尘中 PFASs 的暴露风险评估

如表 3 所示, 儿童经口摄入、皮肤摄入及呼吸摄入的 PFASs 的每日最大摄入量分别为 0.166、

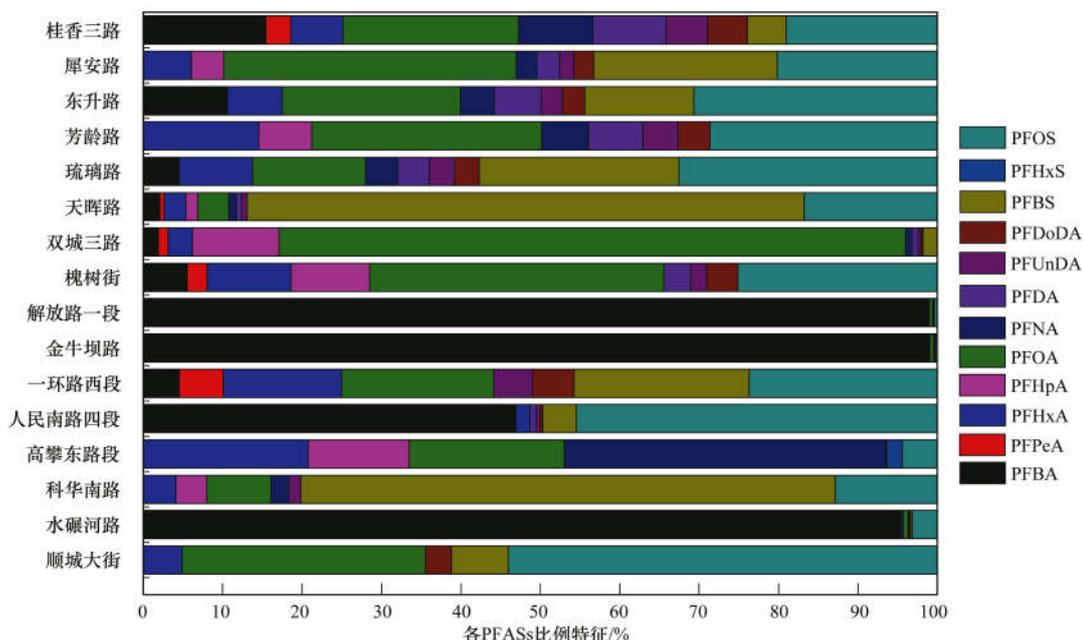


图3 成都市道路积尘中 PFASs 的比例特征

Fig. 3 Proportion profiles of PFASs in road dust of Chengdu City

1.55×10^{-3} 和 $1.55 \times 10^{-5} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 成人对应的分别为 2.77×10^{-2} 、 3.69×10^{-4} 和 $8.70 \times 10^{-6} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 其中, 经口摄入的 PFAS 的量远高于其它两个途径, 说明人体暴露于道路积尘的主要途径是经口摄入. 另外, 在同一暴露途径下, 儿童的暴露量均要高于成人, 经口摄入的约为成人的 6 倍, 皮肤摄入的约为成人的 4 倍, 呼吸摄入的约为成人的 2 倍. 因此, 人们应该更加关注道路积尘中污染物对于儿童健康的影响. 另外, 对于总摄入量来说, PFBA 的日摄入量最高 [儿童: $0.12 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 成人: $2.01 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 然后为 PFOA [儿童: $1.46 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 成人: $2.45 \times 10^{-3} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 和 PFNA [儿童: $1.05 \times 10^{-2} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; 成人: $1.76 \times 10^{-3} \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]. 与

道路积尘的暴露特征不同, 成都市居民饮食暴露的主要化合物为 PFOA [$4.38 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] 和 PFOS [$85.6 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] [38]. 说明不同的暴露途径, 人体暴露于 PFASs 的风险及特征存在较大差异. 已有的研究结果显示 [38], 成都市居民每日通过饮食摄入 PFASs 的量为 $98.0 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 远高于暴露于道路积尘中的含量. 这与 Zhang 等 [42] 对天津、沈阳和武汉等地区的研究结果一致. 天津、沈阳和武汉等地居民通过饮食摄入的 PFASs 的量远远高于通过灰尘摄入的量.

欧盟针对 PFOA 和 PFOS 进行了风险评估, 提出了 PFOS 和 PFOA 的最大日耐受量分别为 $150 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $1500 \text{ ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ [43]. 本研究中, 成都市居民暴露于 PFOS 和 PFOA 的最大剂量均低

表3 经口摄入、呼吸摄入及皮肤接触摄入的 PFASs 的日最大摄入量/ $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

Table 3 High-level daily dose (ADD) for PFASs via ingestion, inhalation and dermal contact of road dust/ $\text{ng} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

目标物	经口摄入		皮肤接触		呼吸摄入		总摄入量	
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
PFBA	1.19×10^{-1}	1.98×10^{-2}	1.11×10^{-3}	2.63×10^{-4}	1.11×10^{-5}	6.21×10^{-6}	1.20×10^{-1}	2.01×10^{-2}
PFPeA	1.15×10^{-4}	1.91×10^{-5}	1.07×10^{-6}	2.55×10^{-7}	1.07×10^{-8}	6.00×10^{-9}	1.16×10^{-4}	1.94×10^{-5}
PFHxA	5.64×10^{-3}	9.40×10^{-4}	5.26×10^{-5}	1.25×10^{-5}	5.27×10^{-7}	2.95×10^{-7}	5.69×10^{-3}	9.53×10^{-4}
PFHpA	4.55×10^{-3}	7.58×10^{-4}	4.24×10^{-5}	1.01×10^{-5}	4.25×10^{-7}	2.38×10^{-7}	4.59×10^{-3}	7.69×10^{-4}
PFOA	1.45×10^{-2}	2.42×10^{-3}	1.35×10^{-4}	3.22×10^{-5}	1.36×10^{-6}	7.59×10^{-7}	1.46×10^{-2}	2.45×10^{-3}
PFNA	1.04×10^{-2}	1.74×10^{-3}	9.71×10^{-5}	2.31×10^{-5}	9.73×10^{-7}	5.44×10^{-7}	1.05×10^{-2}	1.76×10^{-3}
PFDA	1.38×10^{-4}	2.30×10^{-5}	1.29×10^{-6}	3.06×10^{-7}	1.29×10^{-8}	7.21×10^{-9}	1.39×10^{-4}	2.33×10^{-5}
PFUnDA	1.04×10^{-4}	1.74×10^{-5}	9.72×10^{-7}	2.31×10^{-7}	9.74×10^{-9}	5.45×10^{-9}	1.05×10^{-4}	1.76×10^{-5}
PFDoDA	8.79×10^{-5}	1.47×10^{-5}	8.20×10^{-7}	1.95×10^{-7}	8.22×10^{-9}	4.60×10^{-9}	8.87×10^{-5}	1.49×10^{-5}
PFBS	5.89×10^{-3}	9.82×10^{-4}	5.50×10^{-5}	1.31×10^{-5}	5.51×10^{-7}	3.08×10^{-7}	5.94×10^{-3}	9.95×10^{-4}
PFHxS	5.01×10^{-4}	8.36×10^{-5}	4.68×10^{-6}	1.11×10^{-6}	4.69×10^{-8}	2.62×10^{-8}	5.06×10^{-4}	8.48×10^{-5}
PFOS	5.69×10^{-3}	9.49×10^{-4}	5.31×10^{-5}	1.26×10^{-5}	5.32×10^{-7}	2.98×10^{-7}	5.74×10^{-3}	9.62×10^{-4}
PFAS	1.66×10^{-1}	2.77×10^{-2}	1.55×10^{-3}	3.69×10^{-4}	1.55×10^{-5}	8.70×10^{-6}	1.68×10^{-1}	2.81×10^{-2}

于日最高耐受剂量,说明道路积尘中 PFASs 不会对成都市居民造成即时伤害. 虽然如此,由于近年来道路积尘污染严重,除 PFASs 外,道路积尘中的重金属、多环芳烃、有机磷阻燃剂等^[16, 17, 35]也会对居民带来潜在的健康风险,因此,人们应继续关注道路积尘中污染物对人体带来的健康风险.

3 结论

(1) 成都市道路积尘中 PFASs 的含量范围是 0.95 ~ 111 ng·g⁻¹,主干道路上 PFASs 含量显著高于支干道路,且对于支干道路来说,市区含量高于郊区含量.

(2) 解放路一段、金牛坝路及水碾河路段,PFBA 为主要的全氟化合物,所占比例高达 95%. 而其它道路中主要的 PFASs 为 PFOA (24.8%) 和 PFOS (24.1%). 说明成都市道路积尘中 PFASs 的污染特征存在较大差异.

(3) 成都市儿童和成人通过道路积尘摄入的 PFASs 分别为 0.168 ng·(kg·d)⁻¹ 和 0.028 ng·(kg·d)⁻¹,儿童摄入量高于成人. 根据欧盟推荐每日最大允许摄入量,道路积尘中 PFOS 和 PFOA 的暴露量不会对成都市居民造成即时伤害.

参考文献:

[1] William A. EPA and 3M announce phase out of PFOS [EB/OL]. US Environmental Protection Agency. https://archive.epa.gov/epapages/newsroom_archive/newsreleases/33aa946e6cb11f35852568e1005246b4.html, 2000-05-16.

[2] Song X W, Vestergren R, Shi Y L, *et al.* Emissions, transport, and fate of emerging per-and polyfluoroalkyl substances from one of the major fluoropolymer manufacturing facilities in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (17): 9694-9703.

[3] Chen H, Yao Y M, Zhao Z, *et al.* Multimedia distribution and transfer of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) surrounding two fluorochemical manufacturing facilities in Fuxin, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (15): 8263-8271.

[4] Wong F, Shoeb M, Katsoyiannis A, *et al.* Assessing temporal trends and source regions of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in air under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **172**: 65-73.

[5] Yu W G, Liu W, Jin Y H, *et al.* Prenatal and postnatal impact of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on rat development: a cross-foster study on chemical burden and thyroid hormone system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (21): 8416-8422.

[6] Wang F Q, Liu W, Jin Y H, *et al.* Transcriptional effects of prenatal and neonatal exposure to PFOS in developing rat brain [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (5): 1847-1853.

[7] Newsted J L, Jones P D, Coady K, *et al.* Avian Toxicity reference values for perfluorooctane sulfonate [J]. *Environmental*

Science & Technology, 2005, **39** (23): 9357-9362.

[8] Taniyasu S, Kannan K, So M K, *et al.* Analysis of fluorotelomer alcohols, fluorotelomer acids, and short-and long-chain perfluorinated acids in water and biota [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1093** (1-2): 89-97.

[9] Zhou Z, Liang Y, Shi Y L, *et al.* Occurrence and transport of perfluoroalkyl acids (PFAAs), including short-chain PFAAs in Tangxun Lake, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (16): 9249-9257.

[10] Yu N Y, Shi W, Zhang B B, *et al.* Occurrence of perfluoroalkyl acids including perfluorooctane sulfonate isomers in Huai River Basin and Taihu Lake in Jiangsu Province, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (2): 710-717.

[11] Zushi Y, Ye F, Motegi M, *et al.* Spatial distribution and loading amounts of particle sorbed and dissolved perfluorinated compounds in the basin of Tokyo Bay [J]. *Chemosphere*, 2012, **88** (11): 1353-1357.

[12] Myers A L, Crozier P W, Helm P A, *et al.* Fate, distribution, and contrasting temporal trends of perfluoroalkyl substances (PFASs) in Lake Ontario, Canada [J]. *Environment International*, 2012, **44**: 92-99.

[13] Liu W, Jin Y L, Quan X, *et al.* Perfluorosulfonates and perfluorocarboxylates in snow and rain in Dalian, China [J]. *Environment International*, 2009, **35** (4): 737-742.

[14] Zhang Z, Peng H, Wan Y, *et al.* Isomer-specific trophic transfer of perfluorocarboxylic acids in the marine food web of Liaodong Bay, North China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (3): 1453-1461.

[15] Zhang Y F, Beeson S, Zhu L Y, *et al.* Biomonitoring of perfluoroalkyl acids in human urine and estimates of biological half-life [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (18): 10619-10627.

[16] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.

[17] Ma Y K, Liu A, Egodawatta P, *et al.* Quantitative assessment of human health risk posed by polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, **575**: 895-904.

[18] Borg D, Lund B O, Lindquist N G, *et al.* Cumulative health risk assessment of 17 perfluoroalkylated and polyfluoroalkylated substances (PFASs) in the Swedish population [J]. *Environment International*, 2013, **59**: 112-123.

[19] Kristensen S L, Ramlau-Hansen C H, Ernst E, *et al.* Long-term effects of prenatal exposure to perfluoroalkyl substances on female reproduction [J]. *Human Reproduction*, 2013, **28** (12): 3337-3348.

[20] U. S. EPA. Exposure factors handbook 2011 Edition (Final Report) [EB/OL]. <https://efpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252>, 2011-10-03.

[21] U. S. EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [EB/OL]. Solid Waste and Emergency Response. [https://nepis.epa.gov/Exec/Query/Action?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5Ctxt%](https://nepis.epa.gov/Exec/Query/Action?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5Ctxt%5C)

- 5C0000023% 5C91003IJK. txt&User = ANONYMOUS&Password = anonymous&SortMethod = h% 7C- &MaximumDocuments = 1&FuzzyDegree = 0&ImageQuality = r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display = hpfr&DefSeekPage = x&SearchBack = ZyActionL&Back = ZyActionS&BackDesc = Results% 20page&MaximumPages = 1&ZyEntry = 1&SeekPage = x&ZyPURL, 2002- 12.
- [22] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund volume 1: Human health evaluation manual (Part E, supplemental guidance for dermal risk assessment) [EB/OL]. Washington, DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/part_e_final_revision_10-03-07.pdf, 2004-07.
- [23] U. S. EPA. Child-specific exposure scenarios examples [EB/OL]. Washington, D. C.; National Center for Environmental Assessment. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=262211>, 2014-09.
- [24] Li J F, Zhang Z Z, Ma L Y, *et al.* Implementation of USEPA RfD and SFO for improved risk assessment of organophosphate esters (organophosphate flame retardants and plasticizers) [J]. *Environment International*, 2018, **114**: 21-26.
- [25] Li X D, Poon C S Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1361-1368.
- [26] U. S. EPA. Exposure Factors Handbook Chapter 5 (Update): soil and dust ingestion [EB/OL]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=337521>, 2017-09.
- [27] Yao Y M, Zhao Y Y, Sun H W, *et al.* Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in indoor air and dust from homes and various microenvironments in China; implications for human exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(5): 3156-3166.
- [28] Hurley S, Goldberg D, Wang M M, *et al.* Time trends in per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in California women; declining serum levels, 2011-2015 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(1): 277-287.
- [29] Zhang S Y, Kang Q Y, Peng H, *et al.* Relationship between perfluorooctanoate and perfluorooctane sulfonate blood concentrations in the general population and routine drinking water exposure [J]. *Environment International*, 2019, **126**: 54-60.
- [30] 孙殿超, 龚平, 王小萍, 等. 拉萨河全氟化合物的时空分布特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(11): 4298-4306. Sun D C, Gong P, Wang X P, *et al.* Special distribution and seasonal variation of perfluoroalkyls substances in Lhasa River Basin, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(11): 4298-4306.
- [31] 李法松, 倪卉, 黄涵宇, 等. 安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 327-332. Li F S, Ni H, Huang H Y, *et al.* Spatial distribution and source of perfluorinated compounds in urban soil from part of cities in Anhui Province, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 327-332.
- [32] Prevedouros K, Cousins I T, Buck R C, *et al.* Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(1): 32-44.
- [33] Lau C, Anitole K, Hodes C, *et al.* Perfluoroalkyl acids: a review of monitoring and toxicological findings [J]. *Toxicological Sciences*, 2007, **99**(2): 366-394.
- [34] Lindstrom A B, Strynar M J, Libelo E L. Polyfluorinated compounds: past, present, and future [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(19): 7954-7961.
- [35] Li W H, Shi Y L, Gao L H, *et al.* Occurrence, distribution and risk of organophosphate esters in urban road dust in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 566-575.
- [36] 路程. 全氟化合物在典型使用行业中污染特征研究 [D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2014. 27-35. Lu C. The characteristic of perfluorinated compounds contamination in typical industries of China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. 27-35.
- [37] 方淑红, 岳月, 李成, 等. 四川省不同地区自来水中全氟化合物的污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(4): 1234-1240. Fang S H, Yue Y, Li C, *et al.* Health risk assessment and pollution characteristics of perfluoroalkyl substances in tap water of Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(4): 1234-1240.
- [38] 方淑红, 彭光垣, 印红玲, 等. 成都饮食中全氟化合物的污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(5): 1708-1716. Fang S H, Peng G Y, Yin H L, *et al.* Pollution characteristics and human health risk of perfluoroalkyl substance exposure through the diet in Chengdu City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5): 1708-1716.
- [39] Fang S H, Zhang Y F, Zhao S Y, *et al.* Bioaccumulation of perfluoroalkyl acids including the isomers of perfluorooctane sulfonate in carp (*Cyprinus carpio*) in a sediment/water microcosm [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, **35**(12): 3005-3013.
- [40] Fuentes S, Vicens P, Colomina M T, *et al.* Behavioral effects in adult mice exposed to perfluorooctane sulfonate (PFOS) [J]. *Toxicology*, 2007, **242**(1-3): 123-129.
- [41] U. S. EPA. 2010/15 PFOA Stewardship Program Commitments [EB/OL]. <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/dupont.pdf>, 2006-01-25.
- [42] Zhang T, Sun H W, Wu Q, *et al.* Perfluorochemicals in meat, eggs and indoor dust in China; assessment of sources and pathways of human exposure to perfluorochemicals [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(9): 3572-3579.
- [43] European Food Safety Authority (EFSA). Perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA) and their salts Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food chain [J]. *The EFSA Journal*, 2008, **653**: 1-131.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)