

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾珺杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价砷在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐珺, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析

李法松^{1,2,3}, 倪卉¹, 黄涵宇¹, 徐志兵¹, 张倩¹, 李长霞¹, 黄文秀¹, 金陶胜²

(1. 安庆师范大学资源环境学院, 安庆 246011; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 教育部环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 3. 中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 为探究安徽省城市土壤中全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)的污染特征、空间分布及潜在的来源. 2013 年采集安徽省 7 个城市共 11 个土壤样品, 利用超高效液相色谱-串联质谱联用分析了 15 种 PFCs 的含量, 并运用主成分分析-线性回归法解析其可能来源. 结果表明, 被调查的 11 个城市土壤样品中的 $\sum$ PFCs 的含量(以干重计, 下同)范围为 1.15 ~ 5.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均含量 2.69 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 含量最高的单体 PFCs 是全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS), 含量范围为 n.d. ~ 3.56 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值含量为 0.96 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次是全氟辛烷羧酸(perfluorooctane acid, PFOA), 含量范围为 n.d. ~ 2.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 均值含量为 0.64 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; $\sum$ PFCs 含量最高地区是滁州地区(5.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 以 PFOS 和 PFOA 为主, 其次为宣城市泾县(4.04 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 而其中 PFOS 含量高达 3.56 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 占 $\sum$ PFCs 的 88.1%, 这可能与该地发达的造纸行业有关; 与我国其他地区土壤中 PFCs 含量相比, 安徽省被调查地区的城市土壤中 PFCs 的含量居于中等水平; 安徽省部分城市土壤中 60% 的 PFCs 可以有 4 个因子进行解释, 代表性 PFCs 有 PFOA、全氟丁烷磺酸(perfluorobutane sulfonate, PFBS)、全氟十二烷羧酸(perfluorododecanoic acid, PFDoA)、全氟丁烷羧酸(perfluorobutane acid, PFBA)和 PFOS.

关键词: 全氟化合物; 空间分布; 来源; 安徽省; 城市土壤

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0327-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201605019

Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China

LI Fa-song^{1,2,3}, NI Hui¹, HUANG Han-yu¹, XU Zhi-bing¹, ZHANG Qian¹, LI Chang-xia¹, HUANG Wen-xiu¹, JIN Tao-sheng²

(1. College of Environmental Resources, Anqing Normal University, Anqing 246011, China; 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to explore the spatial distribution and source of perfluorinated compounds (PFCs), eleven mixed urban soil samples were collected from 7 cities in Anhui Province in 2013. Fifteen individual PFCs were detected by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS), and principal components analysis was used to trace the different sources of PFCs in urban soil. The results showed that the total concentration of PFCs ($\sum$ PFCs) ranged from 1.15 to 5.98 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ dry weight (dw), with an average concentration of 2.69 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. perfluorooctane sulfonate (PFOS) with a concentration range of n.d. – 3.56 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ and an average concentration of 0.96 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ was the dominant PFC contaminant, followed by perfluorooctane acid (PFOA) with a concentration range of n.d. – 2.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ and an average concentration of 0.64 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. The highest $\sum$ PFCs concentration in all selected mixed urban soil samples was from Chuzhou City with the value of 5.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, followed by Jingxian County of Xuancheng City (4.04 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$). Interestingly, the PFOS concentration was as high as 3.56 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in Jingxian County, accounting for 88.1% of the total PFCs concentration, which might be influenced by paper industry in this area. Comparing to other soil samples in China, $\sum$ PFCs concentration of urban soil from Anhui Province was at middle level. Over 60% of $\sum$ PFCs in urban soil of Anhui province could be attributed to the four principal components, represented by PFOA, perfluorobutane sulfonate, perfluorododecanoic acid, perfluorobutane acid and PFOS.

Key words: perfluorinated compounds (PFCs); spatial distribution; source; Anhui Province; urban soil

收稿日期: 2016-05-03; 修订日期: 2016-08-10

基金项目: 环境污染过程与基准教育部重点实验室(南开大学)开放基金项目(KL-PPEC-2013-05); 国家自然科学基金项目(21477057, 21577157)

作者简介: 李法松(1978 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境化学, E-mail: fsli@rcees.ac.cn

全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs) 由于具有优良的表面活性、既疏水又疏油、同时具有耐热、耐酸碱等特性,被广泛用于表面活性剂、润滑剂、农药、不粘锅涂料、食品包装、泡沫灭火剂等^[1]. 研究表明 PFCs 具有一定的环境持久性、潜在的生物富集毒性和长距离迁移等环境效应^[2-7], 包括全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)及其盐类、全氟辛烷磺酰氟在内的 PFCs,在 2009 年被联合国规划署(UNEP)列入新的持久性污染物(persistent organic pollutants, POPs) 优控名单,并于 2010 年 8 月 26 日正式生效^[8].

土壤是 PFCs 在环境中重要归趋场所之一, PFCs 能够通过点源污染、大气干湿沉降、地表径流等进入土壤^[9,10]. 同时,与其他的 POPs 类似,土壤中 PFCs 也可能通过蒸发、扩散、淋溶和雨水冲刷等方式进入大气、地表水^[11]. 有研究表明,随着土壤深度增加, PFCs 的含量有增加的趋势,表明 PFCs 可能会向地下渗透,对地下蓄水层存在潜在的威胁^[12]. 另外土壤中的 PFCs 能够通过土壤-植物-动物/人类等途径进入食物链,影响人类和生态系统^[13,14]. 因此调查土壤中的 PFCs 可以更好地弄清 POPs 在环境中的迁移转化及可能的生态风险.

目前国内对土壤中 PFCs 的研究相对较少,主要集中在流域、农田、河口、滨海等地区土壤^[10,15-17],而关于城市土壤中 PFCs 的报道相对较少,集中在珠三角、深圳等几个城市^[18,19],其他城市土壤中 PFCs 分布特征鲜见报道.

安徽省地处我国中部地区,近年来随着中部崛起,安徽省经济飞速发展,城市化进程加快,中部地区作为沿海城市淘汰产业转移基地,使得该地区生态环境问题日益突出^[20,21],亟需开展如 PFCs 等持久性污染的调查研究.

本文选取安徽省 7 个城市土壤作为研究对象,分析研究土壤中 15 种 PFCs 及其前体物的含量分布,并运用主成分分析-线性回归法解析其可能来源,以期对地区的 PFCs 环境风险评价及污染控制提供重要的科学依据.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

仪器: Waters ACQUITY UPLC/TQD (美国); Supelco 固相萃取装置(美国).

试剂:全氟丁烷磺酸(PFBS, 98%)、全氟辛烷磺酸(PFOS, 99%)、全氟十二烷羧酸(PFDoA,

95%)购自 Sigma-Aldrich (美国);全氟丁烷羧酸(PFBA, 98%)、全氟戊烷羧酸(PFPeA, 98%)、全氟己烷羧酸(PFHxA, 98%)、全氟庚烷羧酸(PFHpA, 98%)、全氟十一烷羧酸(PFUnA, 96%)购自 Matrix Scientific(美国);全氟辛烷羧酸(PFOA, 98%)购自 Strem Chemicals (法国)、全氟壬烷羧酸(PFNA, 98%)、全氟癸烷羧酸(PFDA, 98%)购自 Fluoro Chemical(英国);全氟己烷磺酸(PFHxS, 98%)购自 Fluka (加拿大), ¹³C 标记全氟辛烷羧酸(¹³C₈-PFOA, 99%)购自 Cambridge Isotope Laboratories(美国), ¹³C 标记全氟辛烷磺酸(¹³C₄-PFOS, 98%)、6:2 不饱和氟调醇(6:2FTUCA, 98%)、8:2 不饱和氟调酸(8:2FTUCA, 98%)、¹³C 标记 8:2 不饱和氟调酸(¹³C₂-8:2FTUCA, 98%)、氮甲基磺酰氟酰胺(*N*-Me-FOSA, 98%)购自 Wellington Laboratories(加拿大). 甲醇、醋酸铵、氨水以及实验用水均为色谱级.

Waters Oasis® WAX (6 cc, 150 mg) 固相萃取柱(美国 Waters 公司).

1.2 样品采集

2013 年 2 ~ 4 月期间,采集安徽省 7 个城市共 11 个土壤混合样品,采集点分布如图 1 所示. 依据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)中的城市土壤采样要求,采用网格布点法,每个城市土壤混合样品至少设置 10 个采样点,避开公路、铁路、工厂等干扰,取表层城市土壤(0 ~ 20 cm)混匀,用甲醇清洗过的不锈钢铁铲采集,装入聚丙烯塑料袋中,运回实验室后, -20℃ 保存.

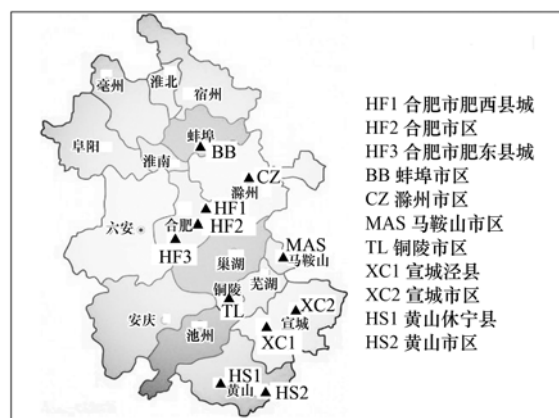


图 1 安徽省城市土壤采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of urban soil in Anhui Province, China

1.3 样品前处理及分析方法

表层土壤样品前处理方法与文献[4, 22]提取沉积物中 PFCs 类似,具体如下:冷冻干燥表层土壤,准确取 1 g 左右干燥的土壤样品于 15 mL 聚丙

烯离心管中,添加 0.5 mL Milli-Q 水,然后加入 5 ng 内标(^{13}C PFOA、 ^{13}C PFOS 和 ^{13}C 8:2 FTUCA)。用甲醇溶液提取 3 次(每次分别 2.5、1.5 和 1.0 mL),涡旋混合后,振荡 10 min,40℃ 下超声 20 min,最后 $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 8 min 分离。萃取液分离后,用 150 mg Envicarb particles 净化,振荡 15 min, $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心分离 10 min。净化后的萃取液氮定容吹至 0.5 mL。进样分析前,萃取液用 0.2 μm 尼龙滤膜过滤,转移至 2 mL HPLC 进样瓶中。

色谱条件:色谱柱为 ACQUITY UPLC BEH C18, 2.1 mm $\times$ 50 mm(美国 Waters 公司);流动相 A:甲醇,流动相 B:2.0 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵水溶液;流速:0.40 mL $\cdot\text{min}^{-1}$,柱温 40℃,进样量 10 μL ;采用梯度洗脱方式,洗脱程序:0 ~ 0.8 min, 25% A; 0.5 ~ 5 min, 25% ~ 85% A; 5 ~ 5.1 min, 85% ~ 100% A; 5.1 ~ 7 min, 100% A; 7 ~ 9 min, 100% ~ 25% A。

质谱条件:采用电喷雾离子化源(ESI),负离子模式;毛细管电压 -2.75 kV,离子源温度 150℃,去溶剂温度 350℃;去溶剂气流速 700 L $\cdot\text{h}^{-1}$,锥孔气流速 20 L $\cdot\text{h}^{-1}$ 。扫描方式为多反应监测模式(MRM)。

1.4 质量控制和结果保证

用甲醇/0.01% 氨水(7/3)配制浓度范围为 0.02 ~ 80 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的标准工作液,添加内标含量为 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在标准曲线浓度范围内,线性相关系数 >0.99 。以信噪比为 10 确定最低定量限(LOQ)。各物质在土壤样品中分别为 0.01 ~ 0.10 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。各类物质在土壤样品中的加标回收率为 78% ~ 128%, RSD = 5.3% ($n=3$)。

2 结果与讨论

2.1 PFCs 在安徽省部分城市土壤中的含量分布

安徽部分城市 11 个采样点城市土壤中 PFCs 含量如图 2 所示,其含量及空间分布如图 3 所示。在所有被检测的 15 种 PFCs 中,仅 PFPeA、PFHxA 和 6:2FTUCA 未被检出,其他 12 种 PFCs 均有检出,其中 PFDA 检出率为 100%,其他检出率高的有 PFOS (检出率 90.9%)、8:2FTUCA (90.9%)、N-Me-FOSA (90.9%)、PFUnA (63.6%)、PFOA (54.5%)、PFDoA (45.4%)。所有样品中 PFCs 总含量($\sum$ PFCs, 以干重计,下同)范围为 1.15 ~ 5.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量 2.69 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。15 种 PFCs 中含量最高的是 PFOS,含量范围为 n. d. ~ 3.56 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,均值含量为 0.96 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其次是 PFOA 含

量范围为 n. d. ~ 2.89 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,均值含量为 0.64 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,其他长链全氟羧酸类的含量也相对较高,PFDA (均值含量为 0.44 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,检出率 100%) 和 PFDoA (均值含量为 0.20 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。其中 PFOS 占 $\sum$ PFCs 的百分比为 0 ~ 88.1%,其次为 PFOA (0 ~ 49.0%)、PFDA (0 ~ 45.2%) 和 PFDoA (0 ~ 38.0%)。值得关注的是作为 PFCs 易挥发性前体物的 8:2FTUCA、N-Me-FOSA 的含量虽然普遍较低,但是检出率较高(大于 90%),表明安徽省这类前体物质可能是 PFCs 的一个重要来源,另外这类前体物质易挥发,大气沉降可能是土壤中这类物质的一个主要途径^[1,23]。

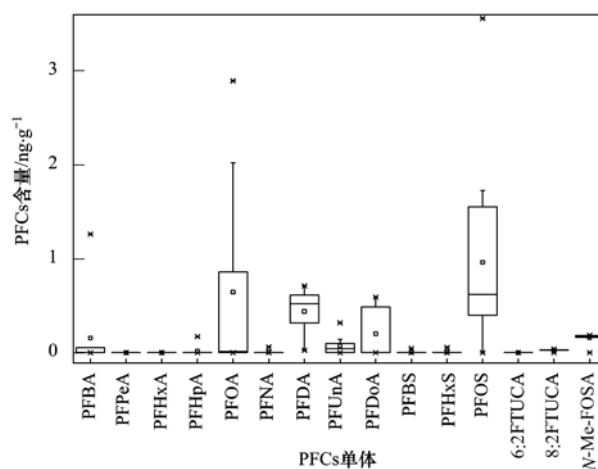


图 2 安徽省部分城市土壤中 PFCs 含量

Fig. 2 Concentrations of PFCs in surface urban soils in part of cities from Anhui Province

从不同城市土壤空间分布来看(如图 3), $\sum$ PFCs 含量最高的是 CZ 点,该采样点分布在安徽

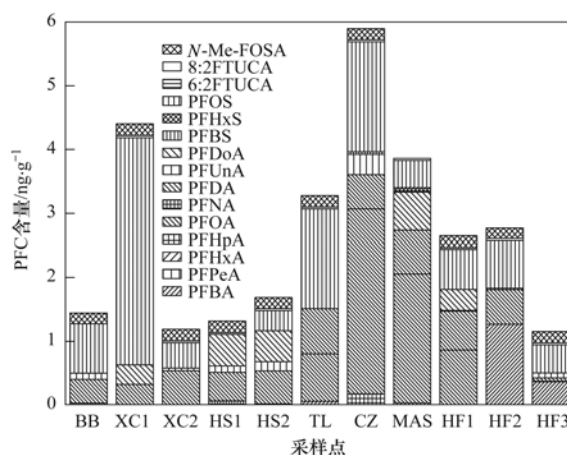


图 3 安徽省部分城市土壤中 PFCs 组成和空间分布

Fig. 3 Composition and spatial distribution of PFCs in surface urban soils in part of cities from Anhui Province

省滁州地区,含量高达 $5.89\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,分析该地区 PFCs 的主要组成表明,PFCs 主要以 PFOA 为主,含量高达 $2.89\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,占 $\sum\text{PFCs}$ 的 49%,其次为 PFOS,含量为 $1.73\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,占 $\sum\text{PFCs}$ 的 29.3%. XC1 点的 $\sum\text{PFCs}$ 也高达 $4.04\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,含量仅次滁州地区,该采样点位于安徽省宣城市泾县,分析该地区 PFCs 组成,发现主要以 PFOS 为主,含量高达 $3.56\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,占 $\sum\text{PFCs}$ 的 88.1%,其他单体 PFCs 则与安徽省其他城市组成相似,调查表明安徽省泾县是我国著名的宣纸生产地,有很多宣纸生产厂家,可能是造成该地区 PFOS 含量异常偏高有关,而如此异常的土壤 PFOS 值得进一步关注. 其次为马鞍山地区(MAS) $3.86\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和铜陵地区(TL) $3.28\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 另外作为近年来经济飞速发展和城市急剧扩张的省会城市合肥,PFCs 的含量相对较低,处于中等水平,3 个采样点的 $\sum\text{PFCs}$ 含量范围 $1.15\sim2.76\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 值得关注

的是作为 PFOA 潜在替代品的 PFBA 在该地区含量检出值相对较高,在 HF2 点高达 $1.26\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,值得进一步研究.

2.2 与国内外其他地区土壤中 PFCs 含量比较

表 1 列出了近年来国内被调查的不同地区的土壤样品中 PFCs 的含量分布范围,包括农田土壤、城市土壤、流域周边土壤、湖库周边土壤,而有研究也表明 PFOS 和 PFOA 是各类环境介质中含量最高的 PFCs. 可以看出本研究所考察的安徽省部分城市土壤中 PFCs 的含量居于中等水平,低于深圳市部分功能区和上海农用地报道值,与东江流域表层土壤、天津滨海区表层土壤及北京官厅水库内的 PFCs 水平相近. 而 PFOS 含量范围在 n. d. $\sim 3.56\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,远低于滨海新区、深圳市部分功能区土壤和上海农用地土壤的报道值. PFOA 的含量与北京官厅水库内土壤含量报道值相近,低于上海农用地土壤和东部部分农村地区土壤的报道值.

表 1 国内被调查地区土壤中 PFCs 含量分布¹⁾

Table 1 Comparison of PFCs concentrations in surface soils of different areas in China

研究区域	采样年份	PFOS 含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	PFOA 含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	$\sum\text{PFCs}/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
东部部分农村地区土壤	2015	0.02~0.08	0.34~14.5	—	[16]
深圳市城市土壤	2014	0.10~91	n. d. ~ 9.8	0.1~98	[19]
东江流域表层土壤	2013	0.7~1.3	0.2~0.7	2.2~5.5	[17]
珠江三角洲城市土壤	2009	0.05~2.4	0.02~1.2	0.09~2.6	[18]
淮河流域表层土壤	2008	n. d. ~ 0.21	n. d. ~ 0.2	n. d. ~ 1.2	[15]
天津滨海区表层土壤	2008	n. d. ~ 9.4	n. d. ~ 0.9	1.3~11	[24]
天津郊区	2008	0.02~2.4	n. d. ~ 0.5	0.02~2.4	[25]
官厅水库	2008	n. d. ~ 0.9	n. d. ~ 2.8	0.1~8.5	[26]
渤海北部	2008	n. d. ~ 0.7	n. d. ~ 0.5	n. d. ~ 1.7	[27]
上海农用地	2007	9.2~10.4	3.3~35.2	14.4~63.6	[10]
本研究	2013	n. d. ~ 3.56	n. d. ~ 2.9	1.15~5.89	

1) n. d. 表示未检出

2.3 PFCs 来源解析

应用主成分分析法对安徽省部分地区城市土壤检出率较高的 9 种 PFCs 进行源解析,结果如表 2 所示.

结果表明,安徽省部分城市土壤中 60% 的 PFCs 可以有 4 个因子进行解释. 结合线性回归分析,因子 1 中 PFOA、PFUnA、PFBS 具有较高载荷,可以解释该地区 14.2% 的 PFCs 来源,因子 2 中 PFDoA 具有较高载荷,可以解释该地区 4.4% 的 PFCs 来源,因子 3 中 PFBA 和 8:2FTUCA 具有较高载荷,可以解释该地区 37.4% 的 PFCs 来源,因子 4 中 PFOS 具有较高的载荷,可以解释该地区 43.8% 的 PFCs 来源. 从表 2 可以看出,因子 1 中 PFOA 和 PFBS 占

表 2 安徽省部分城市土壤中 PFCs 的因子载荷

Table 2 Loadings factors of PFCs in surface urban soils in part of cities from Anhui Province

PFCs	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
PFBA	—	—	0.930	—
PFOA	0.907	—	—	—
PFDA	—	—	—	—
PFUnA	0.764	—	—	—
PFDoA	—	0.794	—	—
PFBS	0.988	—	—	—
PFOS	—	—	—	0.941
8:2FTUCA	—	—	0.669	—
N-Me-FOSA	—	—	—	—
特征值	2.85	1.88	1.66	1.10
方差贡献率/%	28.3	21.6	20.9	12.4

有很高的比例, PFOA 来源于塑料橡胶品的乳化、纺织品阻燃纸类表面处理和消防灭火剂等^[1]. 而随着 PFOS 被限制使用, PFBS 作为其短链的替代品有越来越多的应用, PFBS 一般被认为主要来自于电化学氟化过程^[28]. 因子 2 中 PFDoA 作为长链的 PFCA 可能由油漆油墨助剂、皮革及纸制品整理黏合剂添加的 PFCs 前体物质 FTOHs 氧化形成^[1]. 因子 3 中占有比例较高的 PFBA 和 8:2 FTUCA 主要来源于大气沉降, 有研究表明 FTOHs 的物质降解可形成 FTUCA 中间产物并最终生成 PFBA^[28,29], 路程^[30]对天津和北京地区的室内降尘中 PFCs 进行分析, 也表明 PFBA 是主要的降尘中最主要的 PFCs, 高于 PFOA 和 PFOS 的含量. 因子 4 中则以 PFOS 为主, PFOS 主要来源于电镀行业、石化行业以及电子产品加工行业等^[1].

3 结论

(1) 分析安徽省被调查的 11 个城市土壤中的 PFCs 的含量范围为 $1.15 \sim 5.89 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均含量 $2.69 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 15 种被调查的 PFCs 中有 12 种被检出, 含量最高单体 PFCs 的是 PFOS, 含量范围为 n. d. $\sim 3.56 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值含量为 $0.96 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次是 PFOA 含量范围为 n. d. $\sim 2.89 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 均值含量为 $0.64 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其他长链全氟羧酸类的含量和检出率也相对较高, 另外挥发性前体物的 8:2 FTUCA、N-Me-FOSA 的含量虽然普遍较低, 但是检出率较高 (大于 90%).

(2) 分析不同城市土壤中 PFCs 空间分布表明, $\sum$ PFCs 含量最高地区是安徽省滁州地区, 含量高达 $5.89 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 以 PFOS 和 PFOA 为主. 其次为宣城市泾县, $\sum$ PFCs 也高达 $4.04 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 主要以 PFOS 为主, 含量高达 $3.56 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 占 $\sum$ PFCs 的 88.1%.

(3) 安徽省被调查地区的城市土壤中 PFCs 的含量居于中等水平, 与东江流域表层土壤、天津滨海区表层土壤及北京官厅水库土壤的 PFCs 水平相近.

(4) 主成分分析表明, 安徽省部分城市土壤中 60% 的 PFCs 可以有 4 个因子进行解释, 代表性 PFCs 有 PFOA、PFBS、PFDoA、PFBA 和 PFOS.

参考文献:

[1] Prevedouros K, Cousins I K, Buck R C, et al. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates[J]. Environmental Science &

Technology, 2006, 40(1): 32-44.

- [2] Wang T Y, Wang P, Meng J, et al. A review of sources, multimedia distribution and health risks of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in China[J]. Chemosphere, 2015, 129: 87-99.
- [3] Sun J X, Peng H, Hu J Y. Temporal trends of polychlorinated biphenyls, polybrominated diphenyl ethers, and perfluorinated compounds in Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) eggs (1984-2008) [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(3): 1621-1630.
- [4] Li F S, Sun H W, Hao Z N, et al. Perfluorinated compounds in Haihe River and Dagu Drainage Canal in Tianjin, China[J]. Chemosphere, 2011, 84(2): 265-271.
- [5] Sun H W, Li F S, Zhang T, et al. Perfluorinated compounds in surface waters and WWTPs in Shenyang, China: mass flows and source analysis[J]. Water Research, 2011, 45(15): 4483-4490.
- [6] 张明, 唐访良, 俞雅云, 等. 钱塘江(杭州段)表层水中全氟化合物的残留水平及分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4471-4478.
- Zhang M, Tang F L, Yu Y Y, et al. Residue concentration and distribution characteristics of perfluorinated compounds in surface water from Qiantang River in Hangzhou section [J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4471-4478.
- [7] 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 等. 深圳近岸海域全氟化合物的污染特征[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2028-2037.
- Liu B L, Zhang H, Xie L W, et al. Pollution characteristics of perfluorinated compounds in offshore marine area of Shenzhen [J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2028-2037.
- [8] 郝薛文, 李力, 王杰, 等. 全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 3106-3118.
- Hao X W, Li L, Wang J, et al. Status quo, uncertainties and trends analysis of environmental risk assessment for PFASs[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 3106-3118.
- [9] Milinovic J, Lacorte L, Vidal M, et al. Sorption behaviour of perfluoroalkyl substances in soils [J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 63-71.
- [10] Li F, Zhang C J, Qu Y, et al. Quantitative characterization of short-and long-chain perfluorinated acids in solid matrices in Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(3): 617-623.
- [11] Jones K C, De Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science[J]. Environmental Pollution, 1999, 100(1-3): 209-221.
- [12] Xiao F, Simcik M F, Halbach T R, et al. Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in soils and groundwater of a U. S. metropolitan area: migration and implications for human exposure[J]. Water Research, 2015, 72: 64-74.
- [13] Ruan T, Lin Y F, Wang T, et al. Identification of novel polyfluorinated ether sulfonates as PFOS alternatives in municipal sewage sludge in China [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6519-6527.
- [14] Rich C D, Blaine A C, Hundal L, et al. Bioaccumulation of perfluoroalkyl acids by earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to contaminated soils [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 881-888.

- [15] 孟晶, 王铁宇, 王佩, 等. 淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3188-3194.
Meng J, Wang T Y, Wang P, *et al.* Spatial distribution and composition of perfluorinated compounds in soils around the Huaihe River[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3188-3194.
- [16] 陈舒, 焦杏春, 盖楠, 等. 中国东部农村地区土壤及水环境中全氟化合物的组成特征和来源初探[J]. 岩矿测试, 2015, **34**(5): 579-585.
Chen S, Jiao X C, Gai N, *et al.* Composition and source of perfluorinated compounds in soil and waters from the rural areas in Eastern China[J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, **34**(5): 579-585.
- [17] 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 等. 东江流域表层土中全氟化合物的空间分布及来源解析[J]. 地球与环境, 2015, **43**(3): 302-307.
Liu B L, Zhang H, Xie L W, *et al.* Spatial distribution and source of perfluorinated compounds in surface soils around the Dongjiang River[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(3): 302-307.
- [18] 胡国成, 郑海, 张丽娟, 等. 珠江三角洲土壤中全氟化合物污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 37-42.
Hu G C, Zheng H, Zhang L J, *et al.* Contamination characteristics of perfluorinated compounds in soil from Pearl River Delta, South China[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(S1): 37-42.
- [19] 张鸿, 赵亮, 何龙, 等. 不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2698-2704.
Zhang H, Zhao L, He L, *et al.* Pollution fingerprints and sources of perfluorinated compounds in surface Soil of different functional areas[J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2698-2704.
- [20] 江永红, 刘冬萍. 安徽经济发展对资源环境的压力分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, **21**(8): 152-157.
Jiang Y H, Liu D P. Analysis of pressure of economic development upon resources and environment in Anhui Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, **21**(8): 152-157.
- [21] 李莉, 蔡黎琳, 周敏. 2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2327-2336.
Li L, Cai J L, Zhou M. Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in Eastern and Middle China in December, 2013 [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [22] 李法松, 何娜, 王若男, 等. 全氟化合物在天津大黄堡湿地多介质分布研究[J]. 环境化学, 2011, **30**(3): 638-644.
Li F S, He N, Wang R N, *et al.* The distribution of perfluorinated compounds in multiple environmental media from Dahuangpu wetland natural conservation, Tianjin, China [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(3): 638-644.
- [23] 何鹏飞, 张鸿, 李静, 等. 深圳市大气中全氟化合物的残留特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1240-1247.
He P F, Zhang H, Li J, *et al.* Residue characteristics of perfluorinated compounds in the atmosphere of Shenzhen [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1240-1247.
- [24] Wang T Y, Lu Y L, Chen C L, *et al.* Perfluorinated compounds in a coastal industrial area of Tianjin, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2012, **34**(3): 301-311.
- [25] Pan Y Y, Shi Y L, Wang J M, *et al.* Pilot investigation of perfluorinated compounds in river water, sediment, soil and fish in Tianjin, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, **87**(2): 152-157.
- [26] Wang T Y, Chen C L, Naile J E, *et al.* Perfluorinated compounds in water, sediment and soil from Guanting Reservoir, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, **87**(1): 74-79.
- [27] Wang T Y, Lu Y L, Chen C L, *et al.* Perfluorinated compounds in estuarine and coastal areas of north Bohai Sea, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(8): 1905-1914.
- [28] OECD. OECD Guideline for the testing of chemicals, Section 1: adsorption-desorption using a batch equilibrium method [R]. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD/OCDE 106), 2000.
- [29] 何娜, 周萌, 汪磊, 等. 6-2 氟调醇在活性污泥中的降解[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 383-388.
He N, Zhou M, Wang L, *et al.* Biodegradation of 6-2 fluorotelomer alcohol in activated sludge [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(2): 383-388.
- [30] 路程. 全氟化合物在典型使用行业中污染特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. 17-24.
Lu C. The characteristics of perfluorinated compounds contamination in typical industries of China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. 17-24.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172