

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

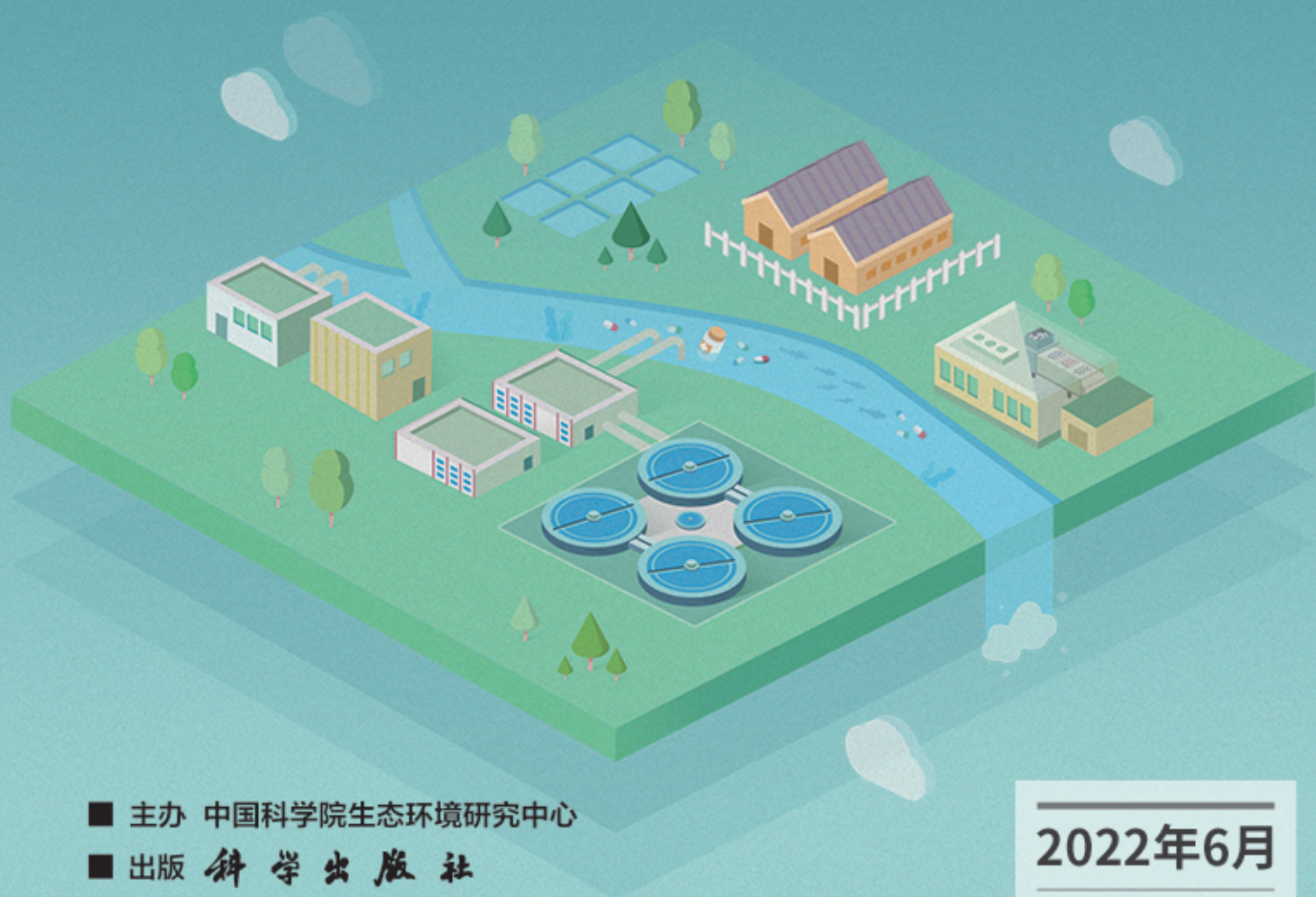
# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期  
Vol.43 No.6

目次

|                                                           |                                                                               |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM <sub>2.5</sub> 浓度影响 .....      | 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)                                         |
| 新冠疫情管控措施对郑州市 PM <sub>2.5</sub> 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 .....     | 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)                                             |
| COVID-19 管控期间苏州市 PM <sub>2.5</sub> 中金属元素浓度变化及来源解析 .....   | 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)                                          |
| 2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 .....                          | 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858) |
| 基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM <sub>2.5</sub> 来源 .....             | 彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)                                        |
| 保定市冬季 PM <sub>2.5</sub> 的氧化潜势特征及其影响来源分析 .....             | 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)                                            |
| 南京江北新区 PM <sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 .....           | 关璐, 丁敏, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)                                                  |
| 广西十万大山背景点 PM <sub>2.5</sub> 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 .....        | 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)                                                  |
| 大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 .....                   | 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)                                   |
| 基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 .....                                | 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)                                         |
| 天津市 PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> 复合污染特征及气象影响分析 ..... | 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)                                 |
| 2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 .....                   | 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)                                                  |
| 河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 .....                                   | 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)                                                  |
| 热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 .....                                   | 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)                                |
| 武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 .....                                | 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)                                         |
| 运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 .....                              | 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)                                       |
| 我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 .....                              | 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)                                                          |
| 长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 .....                            | 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)                                        |
| 内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 .....                        | 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)                                        |
| 不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 .....                          | 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)                                                |
| 高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 .....                            | 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)                                        |
| 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 .....                               | 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)                                                  |
| 东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 .....                            | 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)                     |
| 湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 .....                                | 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)                                                |
| 长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 .....                | 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)                                                 |
| 香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 .....                               | 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)                                            |
| 城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 .....                           | 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)                                                      |
| 2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 .....                    | 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)                                              |
| 嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 .....                           | 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)                                             |
| 近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 .....                         | 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)                                       |
| 长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 .....                           | 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)                                              |
| 高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 .....                            | 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)                                            |
| 不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 .....                           | 陈旭东, 高良敏 (3149)                                                               |
| 生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 .....                                | 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)                                                 |
| 不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 .....                       | 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)                                                           |
| 北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 .....                                | 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)                                  |
| 不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 .....                                  | 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)                                   |
| 可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 .....                         | 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)                                              |
| 4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 .....                                | 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)                                                   |
| 农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 .....                             | 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)                                          |
| 腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 .....                    | 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)                                |
| 2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 .....             | 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)                                       |
| 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征 .....                     | 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)                    |
| 青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 .....                       | 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)                                  |
| 西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 .....                  | 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)                                                 |
| 贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 .....                            | 张倩, 韩贵琳 (3269)                                                                |
| 南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 .....                             | 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)                                            |
| 神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 .....                              | 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)                                                |
| 石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 .....                       | 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)                                               |
| 水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 .....                                      | 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)                                         |
| 改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 .....                         | 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)                                           |
| 土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 .....                                | 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)                                       |
| 小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 .....                              | 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)                    |
| 重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 .....                               | 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)                                       |
| 长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 .....                              | 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)                                    |
| 基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 .....                                | 梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)                                       |
| 《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327) |                                                                               |

# 青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析

温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红\*

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

**摘要:** 为探讨全氟化合物(PFASs)在偏远地区的赋存水平及其来源,采用超高效液相色谱-串联质谱法分析了青藏高原东北部地区18个点位表层土壤中12种PFASs含量水平和分布特征,并对其进行来源解析。结果表明,土壤中有11种PFASs检出,  $\omega(\sum_{11} \text{PFASs})$  范围为  $0.043 \sim 1.573 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $0.398 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 其中单体PFBA的含量最高(平均值为  $0.164 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), PFHxA含量最低(平均值为  $0.005 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 其他单体PFASs含量处于同一水平(平均值为  $0.011 \sim 0.057 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 短链PFASs是该区域PFASs的主要贡献者。PFASs空间分布整体表现为西和北部较高, 东南较低, PFBA存在高山冷凝效应。主成分分析表明, 青藏高原东北部区域土壤中PFASs主要来源于PFASs及其前体物大气传输至此发生的沉降和降解, 少数地区受点源污染直接排放影响, 金属和矿产等工业生产和人类活动是其主要来源。

**关键词:** 全氟化合物(PFASs); 青藏高原; 表层土壤; 分布特征; 源解析

中图分类号: X583 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3253-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110139

## Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau

WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, WU Xiao-juan, HAO Yun-qing, LIU Wei, YIN Hong-ling, FANG Shu-hong\*

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

**Abstract:** Surface soil samples collected at 18 sites from the northeast Tibetan Plateau were used to analyze perfluoroalkyl substances (PFASs) via ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) to study the concentration levels and sources of PFASs. The results showed that 11 PFASs were detected in the soil, and the  $\omega(\sum_{11} \text{PFASs})$  ranged from  $0.043 \sim 1.573 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$  with an average concentration of  $0.398 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ . PFBA displayed the highest concentration level with a mean content of  $0.164 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , whereas PFHxA was at the lowest level ( $0.005 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ). The concentrations of the other PFASs were similar to each other ( $0.011 \sim 0.057 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ). Generally, PFASs contents in the west and north were higher than that in the southeast, and the alpine condensation effect existed for PFBA. The principal component analysis showed that PFASs in surface soils in the northeast Tibetan Plateau region mainly originated from the atmospheric transport of PFASs and their precursors. Few areas were affected by direct emissions of point source pollution, and the main sources were the industrial production of metals/minerals and other human activities.

**Key words:** perfluoroalkyl substances (PFASs); Tibetan Plateau; surface soil; distribution characteristics; source apportionment

全氟化合物(perfluoroalkyl substances, PFASs)是一类人工合成的、其碳原子所连氢原子全部被氟原子取代的新型持久性有机化合物,因其良好的理化性质而常用于化工、纺织和消防等工业及民用领域<sup>[1]</sup>,近年来在各环境介质<sup>[2-5]</sup>及人体<sup>[6]</sup>中被广泛检出。现有的研究表明,PFASs具有一定的生物毒性<sup>[7,8]</sup>,对生态系统及人体<sup>[9]</sup>有不可忽视的潜在风险,因此国际上先后对PFASs进行了管控<sup>[10]</sup>,而其生产逐渐往亚洲地区转移,我国现已成为PFASs的重要生产国。

PFASs全球性远距离传播(long-range atmospheric transport, LRAT)是当下社会各界密切关注的热点之一,受气候地形等影响,PFASs可以通过淋溶和蒸发等形式进入水体和大气,也可以通过干湿沉降、地表径流等方式在土壤中累积<sup>[11]</sup>,周而复始地在不同地区进行跳跃式跃迁,从而到达极地或高原雪山地区,产生POPs的“蚱蜢跳效应”。目前已在南北极、高山雪地等偏远地区的大气<sup>[12]</sup>、积

雪<sup>[13,14]</sup>、海洋<sup>[15]</sup>、沉积物<sup>[16]</sup>和生物<sup>[17]</sup>等介质中检测到PFASs的存在,而我国PFASs的现有研究大多针对沿海地区或工业发达城市,对作为“世界第三极”的青藏高原研究甚少,本研究对我国青藏高原东部区域的表层土壤样品进行分析,通过探讨PFASs在偏远地区的迁移规律及其污染特征,以期补充该地区PFASs基础数据和为探讨PFASs全球性迁移规律提供重要的科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区域及采样信息

青藏高原主要受西风和印度季风影响,其边缘地带具有海拔梯度落差大、气候复杂多变、地形地

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2021-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(21607018); 四川省科技计划项目(2021YJ0384); 大学生创新创业训练计划项目(202110621067)

作者简介: 温祥洁(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为新污染物在环境中的迁移及归趋, E-mail: 1428364891@qq.com

\* 通信作者, E-mail: fsh@cuit.edu.cn

貌复杂、高山草原衔接和生态环境脆弱等特点,对研究 PFASs“蚱蜢跳效应”和偏远地区污染水平具有天然地理优势和重要意义. 本文以青藏高原东北部地区作为研究区域,分别于2019年12月及2020年9月采集18个点位0~5 cm的表层土壤样品(S1~S18). 为避免汽车排放影响,采样点距高速公路1~2 km,采用不锈钢铲子挖取土样,取出土样放在聚丙烯材质的样品袋中,记录好采样时间、经纬度和天气状况,样品带回实验室待分析. 采样点位见图1.

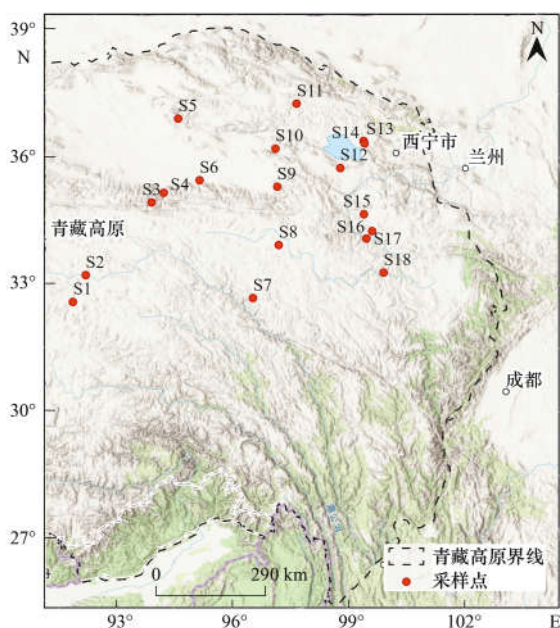


图1 采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites on the map

## 1.2 实验仪器与材料

**仪器:**主要仪器是超高效液相色谱-串联质谱(1290 Infinity II-6465B,安捷伦科技有限公司),其他包括:真空冷冻干燥仪(XHDGJ-10,上海霄汉实业发展)、水浴氮吹仪(JHD-006S,上海极恒实业)、低速台式离心机(TDL-5-A,上海安亭科学仪器厂)和水浴恒温振荡器(SHA-B,江苏金坛宏华仪器厂)等.

**试剂与材料:**甲醇(色谱纯,99.9%,Fisher Chemical,加拿大)、氨水(分析纯,25%,成都市科隆化学品有限公司)和Milli-Q超纯水.一次性PP离心管(德国CNW)和PestiCarb柱(500 mg/6 mL,博纳艾杰尔科技有限公司)等.

**实验标准品:**本研究采用高纯度混合标准品PFAC-MXB和高纯度混合碳同位素标记品PFAC-MXA(Wellington公司),包括:全氟丁烷羧酸(PFBA)、全氟丁烷磺酸(PFBS)、全氟戊烷羧酸(PFPeA)、全氟己烷羧酸(PFHxA)、全氟己烷磺酸(PFHxS)、全氟庚烷羧酸(PFHpA)、全氟辛烷羧酸

(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)、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). 碳标记内标物包括: $^{13}\text{C}_4$ -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

将采集的土样去除杂草、大砂砾等,经冷冻干燥、研磨过筛(100目)后,称取1.000 g土样于50 mL的离心管中,准确加入2 ng的内标混合物PFAC-MXA与土样涡旋混合,静置过夜. 萃取:加入5 mL的甲醇溶液,涡旋30 s,超声萃取30 min,在 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 条件下在振荡器中振荡3 h,在 $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心8 min;上清液转移到15 mL PP管中;重复上述操作3次,将合并后上清液使用柔和高纯氮气浓缩至5 mL左右. 净化:分别吸取5 mL的0.1%氨水甲醇、超纯水和甲醇将Cleanert PestiCarb固相萃取柱活化,以 $1\text{滴}\cdot\text{s}^{-1}$ (全程相同)流速将样品溶液过柱,收集流出液,然后加入8 mL的甲醇进一步洗脱柱子中的目标物,吹干柱体. 将萃取液在氮吹仪上进行浓缩至0.5 mL,过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 尼龙滤膜于进样小瓶中,封存冷藏,待上机检测.

## 1.4 液相色谱/质谱条件

本实验采用超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS, 1290-6465B,安捷伦)及C18色谱柱(Zorbax Eclipse Plus C18,  $2.1\times 50\text{ mm}$ ,  $1.8\text{ }\mu\text{m}$ )对土壤样品进行定性定量分析. 样品进样量为 $5.00\text{ }\mu\text{L}$ ,柱温设为 $35^\circ\text{C}$ ,流速为 $0.3\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . 流动相比比例设置如下: $0.00\sim 0.10\text{ min}$ , A相( $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸铵溶液)为90.0%, B相(甲醇)为10.0%; $0.10\sim 6.00\text{ min}$ , A相由90.0%降为5.0%; $6.00\sim 8.00\text{ min}$ , A相保持在5.0%,后运行3 min. 采用ESI源负离子模式,多反应检测模式(MRM),毛细管电压3000 V,喷雾气压为35 psi(240 kPa),干燥气温度 $250^\circ\text{C}$ .

## 1.5 质量保证与质量控制

为避免对样品产生污染或影响,土壤样品采用不锈钢铲子采集,并放在PP塑封袋保存. 本实验过程中所用容器均为聚丙烯材料,以避免聚四氟乙烯材质引入背景干扰. 实验采用内标定量法,用6个( $0$ 、 $0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.5$ 、 $2$ 和 $5\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ )系列浓度的标准曲线,线性系数 $R>0.99$ . 仪器测定时,每12个样品测定1次 $2\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的标准品以监测仪器稳定性. 回收率实验的加标含量分别为 $2\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $20\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,每组设置3个平行样,内标回收率为78.2%

~124.7%, 实验回收率为 69.6%~121.0% (见表 1), 满足实验要求. 目标化合物的方法检出限 (MDLs) 为空白检出的平均含量加 3 倍标准偏差对应的含量, 若空白中未检出, 则 MDL 为信噪比等于

3 时的含量, 方法检出限结果如表 1 所示. 每个采样点位取 3 个平行样进行前处理分析, 以其均值进行结果讨论, 实验中每批样品设置 1 个空白样品, 空白样品中均未检测出 PFASs 目标化合物.

表 1 土壤中 PFASs 的回收率和方法检出限 (MDL)

| Table 1 Recoveries and method detection limits (MDL) of PFASs in soils |        |                                  |                                   |                        |
|------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 类别                                                                     | 化合物    | 加标 2 ng·g <sup>-1</sup><br>回收率/% | 加标 20 ng·g <sup>-1</sup><br>回收率/% | MDL/ng·g <sup>-1</sup> |
| 全氟烷基羧酸类<br>(PFACs)                                                     | PFBA   | 69.6 ± 1.3                       | 78.6 ± 1.7                        | 0.005                  |
|                                                                        | PFPeA  | 102.1 ± 1.6                      | 91.3 ± 4.9                        | 0.015                  |
|                                                                        | PFHxA  | 93.1 ± 2.4                       | 86.2 ± 1.0                        | 0.010                  |
|                                                                        | PFHpA  | 121.8 ± 7.2                      | 98.3 ± 1.9                        | 0.004                  |
|                                                                        | PFOA   | 109.8 ± 0.9                      | 87.7 ± 1.3                        | 0.006                  |
|                                                                        | PFNA   | 103.3 ± 1.9                      | 85.5 ± 0.3                        | 0.008                  |
|                                                                        | PFDA   | 106.7 ± 3.2                      | 90.9 ± 2.3                        | 0.011                  |
|                                                                        | PFUnDA | 97.5 ± 1.6                       | 84.7 ± 0.0                        | 0.011                  |
|                                                                        | PFDODA | 108.0 ± 6.3                      | 89.6 ± 5.7                        | 0.009                  |
| 全氟烷基磺酸类<br>(PFASs)                                                     | PFBS   | 110.7 ± 8.6                      | 97.4 ± 1.2                        | 0.004                  |
|                                                                        | PFHxS  | 105.6 ± 1.9                      | 93.5 ± 0.5                        | 0.006                  |
|                                                                        | PFOS   | 121.2 ± 5.6                      | 93.9 ± 6.8                        | 0.006                  |

1.6 数据统计分析

本研究使用 IBM SPSS Statistics 25 和 Origin 2021 对数据进行统计分析并作图, 采用 ArcGIS Pro 进行空间制图.

2 结果与讨论

2.1 PFASs 的含量水平及比例特征

本研究对青藏高原东北部区域土壤中的 12 种 PFASs 目标化合物进行分析, 实验空白中未有检出, 所有样品中均有 PFASs 的检出, 说明 PFASs 在青藏高原的普遍存在. 样品含量水平及其检出率见表 2,  $\omega(\sum_{11} \text{PFASs})$  为 0.043~1.573 ng·g<sup>-1</sup>, 平均值为 0.398 ng·g<sup>-1</sup>, 低于安徽城市土壤 (2.69 ng·g<sup>-1</sup>)<sup>[18]</sup> 和天津沿河土壤 (9.73 ng·g<sup>-1</sup>)<sup>[19]</sup> 等, 远低于氟化工园区周边农田土 (224.73~476 ng·g<sup>-1</sup>)<sup>[20,21]</sup>, 与深圳土壤研究背景区 (0.49 ng·g<sup>-1</sup>)<sup>[22]</sup> 和云南农田土壤 (0.39 ng·g<sup>-1</sup>)<sup>[23]</sup> 含量相当, 处于较低含量水平. 其中, 检出频率最高的为 PFBA 和 PFHpA (100%), 其次为 PFOA (94.4%), 然后依次为: PFNA (66.7%) > PFOS = PFDA (61.1%) > PFUnDA (55.6%) > PFHxS = PFDODA (50%) > PFBS (44.4%) > PFHxA (16.7%). PFBA (C4)、PFHpA (C7) 和 PFOA (C8) 在偏远地区呈现出较高的检出频率, 且 PFBA (0.164 ng·g<sup>-1</sup>) 是检出含量最高的 PFASs, 这与 Giorio 等<sup>[24]</sup> 和 Kirchgeorg 等<sup>[25]</sup> 在偏远的阿尔卑斯和极地地区的新雪和冰芯中 PFASs 研究结果类似. 这是由于全球范围内 PFASs 的生产正从中长链 (C ≥ 7) 转向生物毒

性效应较弱的短链 (C ≤ 6), 且 PFASs 前体物 (如氟调聚物和全氟磺胺类物质<sup>[26]</sup>) 在大气传输过程中会发生降解, 从而导致短链 PFASs 在偏远地区普遍存在. 李法松等<sup>[18]</sup> 在安徽部分城市土壤中 PFASs 检出含量最高的为 PFOS, 说明城市土壤中 PFASs 的污染特征与偏远地区存在较大差异, 这可能是受到城市工业生产活动影响. 除 PFBA 外, 其他 PFASs 含量处于同一水平 (平均值为 0.011~0.057 ng·g<sup>-1</sup>), 但 PFHpA (100%) 和 PFOA (94.4%) 检出率高于 PFOS (61.1%), 这与近年来全球范围内逐渐淘汰生产 PFOS 相关产品有关, 但其含量水平证明 PFASs 在环境中的持久性.

通过对研究区域土壤中检出的 11 种 PFASs 贡献率分析发现 (图 2), 除 S5 外, PFBA 在各地 PFASs 含量中贡献率最高 (平均值为 49.7%), 其次为 PFOA、PFHpA、PFOS 和 PFNA (平均值为 9.5%~15.7%), PFBS、PFUnDA、PFHxS、PFDA、PFHxA 和 PFDODA (平均值为 3.3%~5.3%) 对该地区贡献较低, 短碳链 (C ≤ 6) 总贡献率达到 74.0%, 是该区域主要的 PFASs 成分, 这与 Wang 等<sup>[14]</sup> 在青藏高原雪的研究中发现环境中短链 PFASs 含量水平已经超过 PFOA 的结论一致. 而 PFBA 含量远高于其他成分是由于其蒸气压较高, 在污染源排放后可以直接进行 LRAT<sup>[27]</sup>, 同时 PFBA 可由多种前体化合物降解而成, 来源广泛, 所以在偏远地区样品中含量普遍较高, 这与近年来大多地区研究中的情况一致. 在武倩倩等<sup>[19]</sup> 的研究中, PFBA (6.54 ng·g<sup>-1</sup>) 作为天津市土壤中  $\sum \text{PFASs}$  (9.73 ng·g<sup>-1</sup>) 的主要组分,

表 2 研究区域土壤中 PFASs 的含量和检出率<sup>1)</sup>

Table 2 Concentration range and detection rate of PFASs in soils of the study area

| 点位   | PFBA          | PFPeA | PFBS          | PFHxA         | PFHpA         | PFHxS         | PFOA          | PFOS          | PFNA          | PFDA          | PFUnDA        | PFDoDA        | $\sum_{12}$ PFASs |
|------|---------------|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| S1   | 0.360 ± 0.294 | ND    | 0.005 ± 0.008 | 0.024 ± 0.042 | 0.055 ± 0.036 | 0.010 ± 0.010 | 0.072 ± 0.038 | 0.017 ± 0.029 | 0.012 ± 0.021 | 0.013 ± 0.006 | 0.009 ± 0.016 | ND            | 0.577             |
| S2   | 0.217 ± 0.165 | ND    | 0.013 ± 0.001 | ND            | 0.031 ± 0.012 | 0.020 ± 0.006 | 0.069 ± 0.045 | 0.063 ± 0.060 | 0.035 ± 0.016 | 0.021 ± 0.008 | 0.025 ± 0.010 | 0.016 ± 0.003 | 0.508             |
| S3   | 0.088 ± 0.079 | ND    | ND            | ND            | 0.038 ± 0.022 | 0.014 ± 0.004 | 0.061 ± 0.031 | ND            | ND            | ND            | ND            | ND            | 0.201             |
| S4   | 0.196 ± 0.193 | ND    | 0.026 ± 0.023 | 0.016 ± 0.028 | 0.034 ± 0.021 | 0.015 ± 0.006 | 0.063 ± 0.033 | 0.069 ± 0.058 | 0.039 ± 0.026 | 0.014 ± 0.015 | 0.015 ± 0.006 | 0.007 ± 0.006 | 0.496             |
| S5   | 0.034 ± 0.003 | ND    | 0.020 ± 0.002 | ND            | 0.047 ± 0.021 | 0.071 ± 0.026 | 0.140 ± 0.037 | 0.181 ± 0.093 | 0.061 ± 0.029 | 0.002 ± 0.016 | ND            | 0.007 ± 0.009 | 0.586             |
| S6   | 0.641         | ND    | 0.181         | 0.045         | 0.061         | 0.032         | 0.105         | 0.237         | 0.102         | 0.058         | 0.022         | 0.089         | 1.573             |
| S7   | 0.121 ± 0.150 | ND    | 0.008 ± 0.014 | ND            | 0.037 ± 0.030 | 0.020 ± 0.017 | 0.054 ± 0.047 | 0.030 ± 0.031 | 0.052 ± 0.052 | 0.020 ± 0.018 | 0.028 ± 0.024 | ND            | 0.371             |
| S8   | 0.133 ± 0.134 | ND    | ND            | ND            | 0.017 ± 0.008 | ND            | 0.023 ± 0.007 | 0.015 ± 0.014 | 0.013 ± 0.011 | ND            | ND            | ND            | 0.201             |
| S9   | 0.096 ± 0.030 | ND    | 0.015 ± 0.025 | ND            | 0.025 ± 0.011 | ND            | 0.007 ± 0.012 | ND            | ND            | ND            | ND            | ND            | 0.143             |
| S10  | 0.077 ± 0.057 | ND    | 0.003 ± 0.006 | ND            | 0.030 ± 0.008 | 0.011 ± 0.005 | 0.052 ± 0.018 | ND            | 0.014 ± 0.006 | ND            | 0.007 ± 0.002 | ND            | 0.194             |
| S11  | 0.093 ± 0.024 | ND    | ND            | ND            | 0.043 ± 0.026 | ND            | 0.069 ± 0.040 | 0.051 ± 0.003 | 0.099 ± 0.053 | 0.029 ± 0.011 | 0.038 ± 0.009 | 0.011 ± 0.001 | 0.432             |
| S12  | 0.279 ± 0.171 | ND    | ND            | ND            | 0.118 ± 0.017 | 0.027 ± 0.029 | 0.117 ± 0.170 | 0.053 ± 0.091 | 0.047 ± 0.082 | 0.016 ± 0.027 | 0.019 ± 0.033 | 0.018 ± 0.032 | 0.703             |
| S13  | 0.081 ± 0.065 | ND    | ND            | ND            | 0.025 ± 0.009 | ND            | 0.015 ± 0.003 | ND            | ND            | ND            | ND            | ND            | 0.121             |
| S14  | 0.101 ± 0.016 | ND    | ND            | ND            | 0.060 ± 0.047 | ND            | 0.098 ± 0.066 | 0.033 ± 0.063 | 0.076 ± 0.007 | 0.019 ± 0.026 | 0.026 ± 0.013 | 0.007 ± 0.010 | 0.420             |
| S15  | 0.190 ± 0.030 | ND    | ND            | ND            | 0.023 ± 0.004 | ND            | 0.021 ± 0.003 | 0.023 ± 0.001 | 0.021 ± 0.012 | 0.005 ± 0.006 | ND            | 0.003 ± 0.004 | 0.284             |
| S16  | 0.091 ± 0.038 | ND    | ND            | ND            | 0.034 ± 0.008 | ND            | 0.07 ± 0.010  | ND            | ND            | ND            | ND            | ND            | 0.132             |
| S17  | 0.109 ± 0.063 | ND    | ND            | ND            | 0.015 ± 0.006 | ND            | 0.036 ± 0.036 | ND            | ND            | 0.011 ± 0.015 | 0.005 ± 0.002 | 0.010 ± 0.013 | 0.183             |
| S18  | 0.039 ± 0.021 | ND    | ND            | ND            | 0.005 ± 0.006 | ND            | ND            | ND            | ND            | ND            | ND            | ND            | 0.043             |
| 平均值  | 0.164         | ND    | 0.015         | 0.005         | 0.039         | 0.012         | 0.057         | 0.043         | 0.032         | 0.013         | 0.011         | 0.009         | 0.398             |
| 含量范围 | 0.034 ~ 0.641 | ND    | ND ~ 0.181    | ND ~ 0.045    | 0.005 ~ 0.118 | ND ~ 0.071    | ND ~ 0.140    | ND ~ 0.237    | ND ~ 0.102    | ND ~ 0.058    | ND ~ 0.038    | ND ~ 0.089    | 0.043 ~ 1.573     |
| 检出率  | 0             | 0     | 33.3          | 16.7          | 100           | 50.0          | 94.4          | 61.1          | 66.7          | 55.6          | 50.0          | 44.4          | —                 |

1) 数值为均值 ± SD; 除了检出率, 其余单位均为  $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ; ND 表示未检出

贡献率达到 67.0%。

研究区域中 PFASs 含量如图 2, S6 点位的  $\omega(\sum_{11} \text{PFASs})$  最高, 达  $1.573 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , PFBA ( $0.641 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 是含量最高的单体, PFBS ( $0.181 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 和 PFOS ( $0.237 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 也高于其他地区。分析原因有: ①本研究区域常年受西风影响<sup>[14]</sup>, S6 位于格尔木市东侧, 处于格尔木工业园(包括石油化工、金属冶炼产业)和格尔木机场下风口, 而 PFOS 及其盐类常用于金属电镀、消防泡沫、航空等产业<sup>[28]</sup>, 经直接排放或前体物降解而在环境中赋存, 相对于其它无明显点源的点位, 该点位 PFASs 含量较高且污染物种类(11 种检出)较多; ②该点采样当天为沙尘暴天气(其余为晴天), 恶劣天气加速污染物的传输, 使处于污染源下风向的 S6 污染含量水平明显偏高。S18 点位 PFASs 含量最低( $0.043 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 且仅检出 PFBA 和 PFHpA 两种目标 PFASs, 这可能是由于 S18 位于青藏高原东南边缘, 附近为无人类活动现象和污染点源的草原, 生态环境良好, 故 PFASs 污染较少。

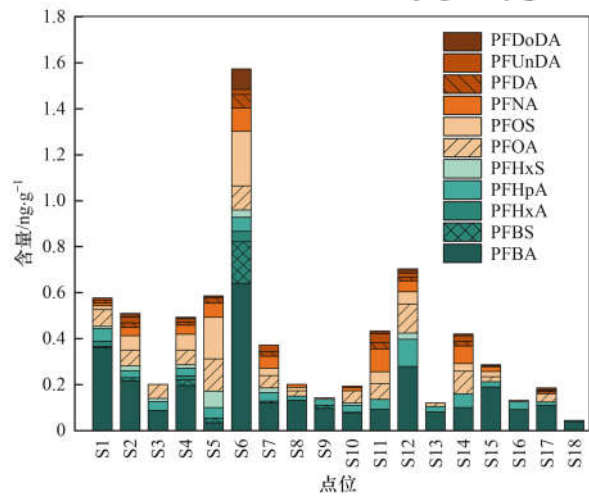


图 2 研究区域土壤中的 PFASs 含量  
Fig. 2 Concentrations of PFASs in soils in the study area

PFASs 一旦进入环境, 其中性和挥发性前体化合物可直接通过大气和附着于颗粒物的方式传输至偏远地区降解<sup>[29,30]</sup>, 或进入水体通过洋流运移<sup>[31]</sup>而扩散至全球, 李冰洁等<sup>[32]</sup>的研究利用 HYSPLIT-4 模型计算采样点气团输送前向轨迹, 发现 PFASs 可随大气在短时间内发生远距离传输。本研究区域地处人类活动较少和工业发展少有涉及的青藏高原, 常年受西风影响, 土壤中的 PFASs 主要来自大气外源性输入<sup>[33]</sup>, 短碳链 PFASs 由于“蚱蜢跳效应”和“高山冷凝效应”<sup>[34]</sup>可逐渐实现从大气到地表的转移而在高海拔地区累积, 中碳链 PFASs 不易被捕集可随大气进行更远距离的传输<sup>[35]</sup>, 而长碳链 PFASs

更易富集在颗粒物中在短程传输途中发生沉降, 这与本实验在偏远地区长碳链 PFASs 检出率和含量水平低相一致, 如图 3 所示, 超过 80% 的点位短碳链贡献率  $\geq 50\%$ 。进一步分析发现, 在排除受点源影响的 S5 和 S6 两个点位后, 对其余 16 个点位的 PFASs 含量与海拔高度进行相关性分析, 结果显示 PFBA(C4) 与海拔高度有显著相关性 (IBM SPSS Statistics 皮尔逊相关性分析,  $r = 0.562$ ,  $P = 0.024$ ), 说明 PFBA 存在显著的高山冷凝效应。其它 PFASs 未发现相关性, 说明海拔高度对其含量分布影响较小。

除 S5 (6.0%) 外, PFBA 是各点位的主要 PFAS [21.4%~89.5% (贡献率范围, 下同), 48.7% (贡献率平均值, 下同)], 其次为 PFOA (4.9%~30.2%, 15.2%)、PFHpA (3.9%~25.8%, 12.1%) 和 PFOS (2.9%~30.9%, 10.5%), 这与近年来各环境介质中检出的 PFASs 比例特征类似。如郑宇等<sup>[34]</sup>的研究发现 PFBA 和 PFOA 为青藏高原雪样中 PFASs 主要贡献者, 武倩倩等<sup>[19]</sup>的研究发现在天津市河水中主要的 PFASs 依次为 PFBA、PFOA、PFHxA 和 PFHpA。值得注意的是, S5 的 PFASs 组成特征与其它点位差异较大, 其 PFBA 贡献率仅为 6%, PFOA (23.8%) 和 PFOS (30.9%) 为主要贡献者, 调查发现 S5 靠近大柴旦行政区, 具有区别于其他点位的以盐湖产业为主而形成的集化工、能源开采、有色金属等产业的工业园区, 而 PFOS 常作为抑雾剂等用于金属电镀产业<sup>[28]</sup>, PFOA 和 PFOS 还可用作采矿浮洗剂等乳化剂或作为涂料和油漆助剂用于金属漆等产业<sup>[36]</sup>, 所以 S5 呈现 PFOA 和 PFOS 占主要贡献的情况。

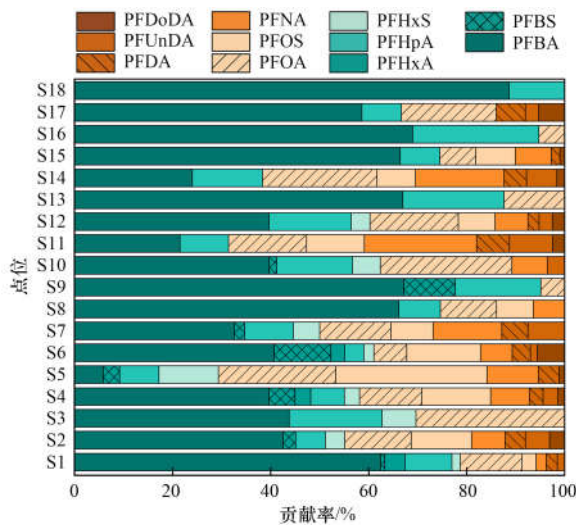


图 3 研究区域土壤中 PFASs 组成  
Fig. 3 Profiles of PFASs in soils of the study area

2.2 PFASs 的空间分布

从样品 PFASs 含量的分布来看(图 4), 研究区

域东南方向 PFASs 含量偏低,且种类相对较少(2~7种),这与草原生态环境良好和青藏高原东南地势低的地貌情况相符。同时发现处于区域中部 S8~S10(平均值为  $0.180 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 的 PFASs 含量低于大部分东部草原地区(S11~S17, 平均值为  $0.290 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), Gai 等<sup>[37]</sup>的研究可以解释这一现象:草原湿地区与高原东部边缘高山峡谷区相比更容易富集挥发性强的污染物质。值得注意的是位于青海湖景区周围(S12~S14)有多种 PFASs 检出,且三点间呈现较大的含量差异( $0.121 \sim 0.703 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ),这是因为 S12( $0.703 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 靠近景区入口,车流量较大,人类活动较多,该点 PFHpA( $0.118 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 含量达到该单体最大值,且 PFHpA 与 PFOA 表现出显著相关( $r=0.761$ ,  $P=0.001$ ),两者具有相似污染源。研究表明 PFHpA 与 PFOA 可用于表面活性剂、纺织和皮革等行业<sup>[19,38]</sup>,因此 S12 有较高 PFASs 污染;而 S13 和 S14 位于景区外东北侧,右侧为海北州县城,不属于可观赏区,人口流动较小,由于风向等气候原因,受景区影响较少, S14 位于景区和县城之间,靠近海北州石油厂,生产生活等人类活动对 PFASs 含量有所贡献。

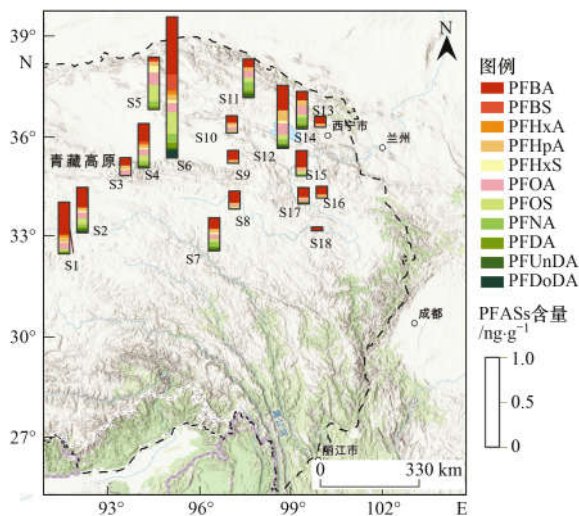


图4 研究区域土壤中 PFASs 的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of PFASs in soils in the study area

在对比同经度的点位发现,受人类活动影响的点位(S5~S7、S12、S14 和 S15) PFASs 含量( $0.284 \sim 1.573 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )要高于其他无明显点源影响的点位( $0.043 \sim 0.577 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ),这是因为 PFASs 被广泛应用于日常生活中,如表面活性剂、防水油衣物、汽油、润滑油和轮胎的使用等会向环境中释放 PFASs<sup>[36,39]</sup>,在其附近的土壤中会富集更多的 PFASs,这与朴海涛等<sup>[40]</sup>和刘晓湾等<sup>[41]</sup>在城市同郊

区中 PFASs 含量分布特征表现出污染水平与人口密度呈正相关性的研究结果类似。

### 2.3 PFASs 的来源分析

主成分分析(principal component analysis, PCA)是分析环境中污染物来源的常见分析方法,可以更直观地阐明环境中污染物可能存在的来源<sup>[42,43]</sup>。本研究对 18 个点位的 11 种检出 PFASs 含量数据进行主成分分析,其主成分负荷图和得分见图 5。主成分因子中,第一因子占比为 61.1%,第二因子占比为 16.5%,第三因子占比为 10.7%,可对研究区域土壤中 88% 的 PFASs 进行解释。不同 PFASs 可作为不同来源的典型标志物,主成分和 PFASs 排放来源可形成相应的关联性<sup>[44]</sup>: PC1 中,PFDA、PFOS、PFDA、PFDoDA、PFBS、PFNA、PFBA、PFHxA 和 PFOA 具有较高载荷( $\geq 0.754$ ),包含 82% 的 PFASs 种类,说明 PC1 所示特征并非点源污染,而为 PFASs 生产使用后排放至大气再经传输后形成的面源污染; PC2 中 PFOA( $0.570$ )和 PFHpA( $0.482$ )的载荷较高,而 PFHpA 与 PFOA 可用于表面活性剂、纺织和皮革等行业<sup>[19,38]</sup>,因此 PC2 可解释来自上述行业的污染源,其特征点位为 S12

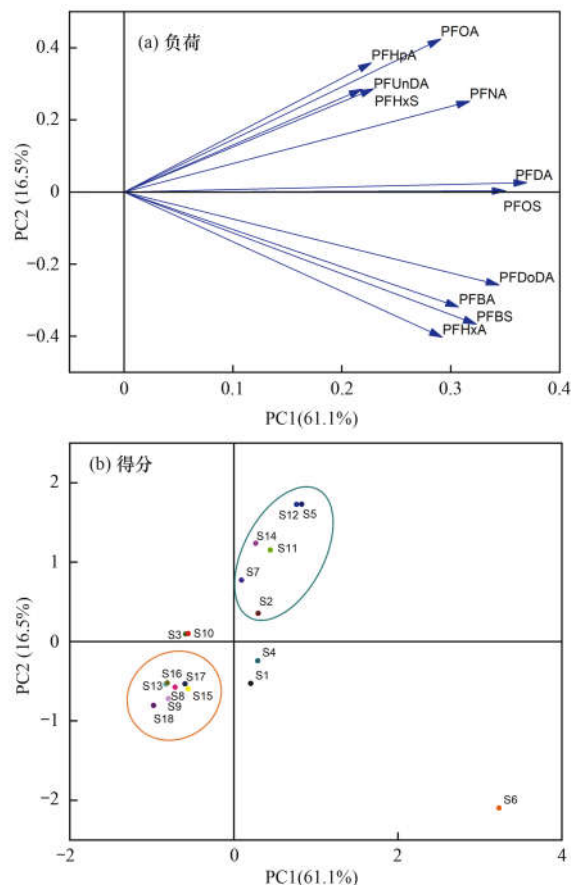


图5 研究区域土壤样品的主成分负荷和得分

Fig. 5 Principal component loading plots and score plots for soil samples from the study area

(PFHpA 和 PFOA 贡献率达 34.8%), 主要由于位于景区入口附近, 人类活动和 PFASs 相关产物使用较多, 符合 PC2 特征解释; PC3 中 PFUnDA (0.684) 为特征指纹, Xiao 等<sup>[45]</sup>的研究指出, PFUnDA 可用作材料制备, 因此, PC3 可解释为主要来源于材料中间体的制备, 本研究区域中 PFUnDA 最高值在 S11 点位 ( $0.038 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 单体贡献率为 19.6%), 该点附近无明显点源污染, 但由于位于北部边缘, 海拔较高 (4109 km), 来自西北地区工厂作业排放的长碳链污染物在此有所沉积富集, 符合 PC3 特征解释。

得分图 5(b) 显示, 组 1 中包括采样点 S8、S9、S13 和 S15 ~ S18, 分布于研究区域东南方向, 附近皆无明显点源污染, PFASs 含量结果显示组 1 点位含量为较低水平 (平均值为  $0.158 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 检出 PFASs 种类较少, 短碳链贡献率为 88.1%, 其中 PFBA (60.9%) 占主要贡献, PFOS 和 PFOA 检出率较低 (3.4% 和 9.6%), 大气中如氟调聚物、全氟磺胺类物质的前体物可转化降解后经干湿沉降于土壤中<sup>[26]</sup>, 使短链 PFASs 在污染水平较低的区域贡献较大, 组 1 的 PFASs 污染特征表现为外源性输入; 组 2 中包含采样点 S2、S5、S7、S11、S12 和 S14, 位于地区地势偏高的研究区域四周边缘, 除 S5 外, 其余点位附近无明显点源, 各点含量处于中等水平 (平均值为  $0.503 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ), PFASs 种类较多且分布较为平均, PFBA、PFOA、PFOS 和 PFHpA 在各地均有明显贡献, 长碳链 PFASs 在组 2 区域比例显著升高, 这是因为组 2 点位有人类和工业活动迹象, 且大多处于靠近北部城市的青藏高原边缘地带, 长碳链 PFASs 吸附在颗粒物上的短距离传输影响显著, 组 2 区域 PFASs 污染来源为城市污染源排放的大气短距离传输过程和人类生产生活排放。

### 3 结论

(1) 对青藏高原东北部地区土壤样品中 12 种目标 PFASs 进行检测与分析, 其中有 11 种 PFASs 检出。研究区域土壤中  $\omega(\sum_{11} \text{PFASs})$  范围为  $0.043 \sim 1.573 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 平均值为  $0.398 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ , 处于较低含量水平。短链 PFASs 检出率及贡献率超过 50%, 是该区域主要的 PFASs, 其中 PFBA (平均值为  $0.164 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 检出含量最高, PFHxA ( $0.005 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 检出含量最低, 其他单体 PFASs 含量处于同一水平 ( $0.011 \sim 0.057 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ )。

(2) 研究区域土壤中 PFASs 含量存在一定空间差异, 除有明显污染点源的 S6 外, 整体表现为西和北部较高, 东南较低, 与其地势地貌和生态环境情况

相符, PFBA 表现出高山冷凝效应。

(3) 主成分分析表明青藏高原东部区域土壤中 PFASs 主要来源于 PFASs 及其前体物大气传输至此发生的沉降和降解, 少数地区受点源污染直接排放影响, 金属和矿产等工业生产和人类活动是其主要来源。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Harrad S, Wemken N, Drage D S, et al. Perfluoroalkyl substances in drinking water, indoor air and dust from Ireland: implications for human exposure[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(22): 13449-13457.
- [3] Gebbink W A, Bignert A, Berger U. Perfluoroalkyl acids (PFAAs) and selected precursors in the Baltic Sea environment: do precursors play a role in food web accumulation of PFAAs? [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(12): 6354-6362.
- [4] Yu N Y, Guo H W, Yang J P, et al. Non-target and suspect screening of per- and polyfluoroalkyl substances in airborne particulate matter in China [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(15): 8205-8214.
- [5] 曾士宜, 杨鸿波, 彭洁, 等. 贵州草海湖泊表层水与沉积物中全氟化合物的污染特征及风险评估[J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1193-1205.  
Zeng S Y, Yang H B, Peng J, et al. Pollution characteristics and risk assessment of perfluorinated compounds in surface water and sediments of Caohai Lake of Guizhou Province [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(4): 1193-1205.
- [6] McDonough C A, Choyke S, Barton K E, et al. Unsaturated PFOS and other PFASs in human serum and drinking water from an AFFF-impacted community [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(12): 8139-8148.
- [7] 谢蕾, 章涛, 孙红文. 全氟烷基化合物在人体肝脏中的富集特征及其与肝损伤的关系[J]. 环境化学, 2020, 39(6): 1479-1487.  
Xie L, Zhang T, Sun H W. Enrichment characteristics of perfluoroalkyl substances (PFASs) in human liver and its association with hepatocyte apoptosis [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(6): 1479-1487.
- [8] 张美, 楼巧婷, 邵倩文, 等. 全氟化合物污染现状及风险评估的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(3): 30-53.  
Zhang M, Lou Q T, Shao Q W, et al. Research progress of perfluorinated compounds pollution status and risk assessment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(3): 30-53.
- [9] 侯沙沙, 王晓晨, 谢琳娜, 等. 氟工厂附近青少年体内全氟化合物(PFASs)暴露特征分析及其与性征发育水平关联性初探[J]. 环境化学, 2020, 39(4): 931-940.  
Hou S S, Wang X C, Xie L N, et al. Exposure to perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances and association with the level of pubertal development of adolescents near a fluorochemical plant [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(4): 931-940.
- [10] Wang Z Y, Cousins I T, Scheringer M, et al. Global emission inventories for C<sub>4</sub>-C<sub>14</sub> perfluoroalkyl carboxylic acid (PFCA) homologues from 1951 to 2030, Part I: production and emissions from quantifiable sources[J]. Environment International, 2014,

- 70: 62-75.
- [11] Milinovic J, Lacorte S, Vidal M, *et al.* Sorption behaviour of perfluoroalkyl substances in soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **511**: 63-71.
- [12] Wong F, Shoeib 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.
- [13] 李雯雯. 环境介质中全氟化合物分析方法的建立及应用 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2015.
- [14] Wang X P, Chen M K, Gong P, *et al.* Perfluorinated alkyl substances in snow as an atmospheric tracer for tracking the interactions between westerly winds and the Indian Monsoon over western China [J]. *Environment International*, 2019, **124**: 294-301.
- [15] Li L, Zheng H Y, Wang T Y, *et al.* Perfluoroalkyl acids in surface seawater from the North Pacific to the Arctic Ocean: contamination, distribution and transportation [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 168-176.
- [16] Macinnis J J, Lehnher I, Muir D C G, *et al.* Characterization of perfluoroalkyl substances in sediment cores from High and Low Arctic lakes in Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 414-422.
- [17] Grønnestad R, Vázquez B P, Arukwe A, *et al.* Levels, patterns, and biomagnification potential of perfluoroalkyl substances in a terrestrial food chain in a nordic skiing area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53** (22): 13390-13397.
- [18] 李法松, 倪升, 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.
- [19] 武倩倩, 吴强, 宋帅, 等. 天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 [J]. *环境科学*, 2021, **42** (8): 3682-3694.
- Wu Q Q, Wu Q, Song S, *et al.* Distribution, sources, and risk assessment of polyfluoroalkyl substances in main rivers and soils of Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (8): 3682-3694.
- [20] Fang S H, Sha B, Yin H L, *et al.* Environment occurrence of perfluoroalkyl acids and associated human health risks near a major fluorochemical manufacturing park in southwest of China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **396**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122617.
- [21] 薛建芳. 氟化工园区周边农田中全氟化合物的动态变化 [D]. 太原: 山西大学, 2018.
- [22] 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.
- [23] 黄楚珊, 马鹏程, 王小娇, 等. 云南省会泽县农田土壤中全氟化合物污染特征研究 [J]. *生态毒理学报*, 2017, **12** (6): 233-241.
- Huang C S, Ma P C, Wang X J, *et al.* Contamination characteristics of perfluorinated compounds in farmland soil from Huize County of Yunnan Province, China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12** (6): 233-241.
- [24] Giorio C, Kehrwald N, Barbante C, *et al.* Prospects for reconstructing paleoenvironmental conditions from organic compounds in polar snow and ice [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, **183**: 1-22.
- [25] Kirchgeorg T, Dreyer A, Gabrieli J, *et al.* Temporal variations of perfluoroalkyl substances and polybrominated diphenyl ethers in alpine snow [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 367-374.
- [26] 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.
- [27] Kaiser M A, Larsen B S, Kao C P C, *et al.* Vapor Pressures of Perfluorooctanoic, -nonanoic, -decanoic, -undecanoic, and -dodecanoic Acids [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2005, **50** (6): 1841-1843.
- [28] Xie S W, Wang T Y, Liu S J, *et al.* Industrial source identification and emission estimation of perfluorooctane sulfonate in China [J]. *Environment International*, 2013, **52**: 1-8.
- [29] Wang C C, Lu Y L, Li Q F, *et al.* Assessing the contribution of atmospheric transport and tourism activities to the occurrence of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in an Alpine Nature Reserve [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133851.
- [30] Armitage J, Cousins I T, Buck R C, *et al.* Modeling global-scale fate and transport of perfluorooctanoate emitted from direct sources [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (22): 6969-6975.
- [31] Ellis D A, Martin J W, De Silva A O, *et al.* Degradation of fluorotelomer alcohols: a likely atmospheric source of perfluorinated carboxylic acids [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38** (12): 3316-3321.
- [32] 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 等. 浙江省大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2022, **43** (2): 639-648.
- Li B J, Chen J Y, Liu Z Z, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of perfluorinated compounds in PM<sub>2.5</sub> in Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (2): 639-648.
- [33] Yamazaki E, Falandysz J, Taniyasu S, *et al.* Perfluorinated carboxylic and sulphonic acids in surface water media from the regions of Tibetan Plateau: Indirect evidence on photochemical degradation? [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2016, **51** (1): 63-69.
- [34] 郑宇, 路国慧, 邵鹏威, 等. 青藏高原东部过渡区水环境中全氟化合物的分布特征 [J]. *环境化学*, 2020, **39** (5): 1192-1201.
- Zheng Y, Lu G H, Shao P W, *et al.* Level and distribution of perfluorinated compounds in snow and water samples from the transition zone in eastern Qinghai-Tibet [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39** (5): 1192-1201.
- [35] Vierke L, Ahrens L, Shoeib M, *et al.* Air concentrations and particle-gas partitioning of polyfluoroalkyl compounds at a wastewater treatment plant [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **8** (4): 363-371.
- [36] 梅胜放. 我国 PFOS/PFOA 的生产、应用以及国内外标准现

- 状[J]. 有机氟工业, 2008, (1): 21-25.
- [37] Gai N, Pan J, Tang H, *et al.* Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface soils from Ruorgai high altitude prairie, east edge of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **478**: 90-97.
- [38] 何宗健, 甘甜, 彭希琰, 等. 环鄱阳湖城市污水处理厂污泥中全氟化合物的污染特征[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, **42**(2): 103-108.
- He Z J, Gan T, Peng X L, *et al.* Pollution characteristics of perfluorinated compounds in sludge from urban wastewater treatment plants around Poyang Lake[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2020, **42**(2): 103-108.
- [39] 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5265-5271.
- Fang S H, Zhu H X, Ye Z X, *et al.* Pollution characteristics and exposure risk assessment of perfluoroalkyl substances in road dust, Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5265-5271.
- [40] 朴海涛, 陈舒, 焦杏春, 等. 大运河丰水期水体中全氟化合物的分布[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 3040-3047.
- Piao H T, Chen S, Jiao X C, *et al.* Geographical distribution of perfluorinated compounds in waters along the Grand Canal during wet season[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 3040-3047.
- [41] 刘晓湾, 赵亮, 张鸿, 等. 深圳市表层土中氟化物组成及分布[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 499-505.
- Liu X W, Zhao L, Zhang H, *et al.* Composition and distribution of the fluoride compounds in topsoil samples of Shenzhen[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 499-505.
- [42] Wei C L, Wang Q, Song X, *et al.* Distribution, source identification and health risk assessment of PFASs and two PFOS alternatives in groundwater from non-industrial areas [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **152**: 141-150.
- [43] Liu B L, Zhang H, Xie L W, *et al.* Spatial distribution and partition of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in rivers of the Pearl River Delta, southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **524-525**: 1-7.
- [44] 孙腾飞. 广州、佛山工业区周边土壤及蔬菜中全氟化合物的污染特征[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
- [45] Xiao F, Halbach T R, Simcik M F, *et al.* Input characterization of perfluoroalkyl substances in wastewater treatment plants: Source discrimination by exploratory data analysis [J]. *Water Research*, 2012, **46**(9): 3101-3109.

环境科学

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                 |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM <sub>2.5</sub> Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region .....                                                                  | QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)                   |
| Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM <sub>2.5</sub> Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China .....                                | ..... HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)     |
| Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> During COVID-19 Control in Suzhou .....                                                                                      | MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)              |
| Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 .....                                                                                                                      | XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)              |
| Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing .....                                                                                              | PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)         |
| Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM <sub>2.5</sub> in Baoding City in Winter .....                                                                               | WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)            |
| Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> in Jiangbei New Area, Nanjing .....                                                                                | GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)              |
| Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi .....                                                                                                    | XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)               |
| Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors; Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example ..... | ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)          |
| Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis .....                                                                                                     | TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)          |
| Characteristics and Meteorological Factors of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Tianjin .....                                                                                             | XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)                |
| Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 .....                                                                                             | ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)                |
| Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province .....                                                                                                                      | YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)             |
| Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn .....                                                                                                                        | ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)                 |
| Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan .....                                                                                                                                              | SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)        |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City .....                                                                                   | WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)       |
| Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China .....                                                                                                                         | FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)                      |
| Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River .....                                                           | ..... WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)      |
| Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia .....                                                     | ..... ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)     |
| Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism .....                                                                                               | SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)  |
| Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors .....                                                                                                 | LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)           |
| Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai .....                                                                                                        | ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)        |
| Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake .....                                                                                   | ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)         |
| Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks .....                                                                                                           | LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)            |
| Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area .....                     | ..... ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)  |
| Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin .....                                                                                                         | CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)       |
| Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water .....                                                                    | ..... CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)    |
| Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 .....                                                                                                    | QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)            |
| Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City .....                                | ..... WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)        |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years .....                                                  | ..... GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)    |
| Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China .....                                                  | ..... TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)     |
| Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data .....                                                                                                      | GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)        |
| Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution .....                                                    | CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)                                   |
| Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution .....                                                                                                                   | SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)              |
| Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water .....                                                                                        | WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)                           |
| Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing .....                                                                                        | XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)           |
| Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation .....                                                                                                                         | ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)          |
| Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron .....                                                                                            | CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)                 |
| Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System .....                                                                                                                             | TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)                |
| Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions .....                                                                                    | GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)             |
| Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis .....                                                                                        | LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)               |
| Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 .....                                                                                      | XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)          |
| Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland .....                                                  | ..... SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)      |
| Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau .....                                                                      | ..... WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253) |
| Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China .....                                                        | ..... LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)       |
| Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province .....                                                                                     | ..... ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)                                 |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin .....                                                                            | DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)            |
| Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey ( <i>Rhinopithecus roxellana</i> ) Habitat in Shennongjia Mountains .....                                                 | ..... YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)     |
| Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation .....                                                         | ..... XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)            |
| Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice .....                                                                                                             | TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)               |
| Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments .....                                                                           | LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)         |
| Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai .....                                                                                                                       | LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)           |
| Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops .....                                                                                                                 | JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)         |
| Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing .....                                                                                                 | LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)            |
| Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 .....                                                                                                                      | LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)          |
| Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data .....                                                                                                           | LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)     |