

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 ..... 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 ..... 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 ..... 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 ..... 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 传输特征分析 ..... 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 ..... 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP ..... 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 ..... 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O<sub>3</sub> 生成敏感性 & 控制策略解析 ..... 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 ..... 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 ..... 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 ..... 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 ..... 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 ..... 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 ..... 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 ..... 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 ..... 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 ..... 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 ..... 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 ..... 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 ..... 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 ..... 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 ..... 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 ..... 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 ..... 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 ..... 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd<sup>2+</sup> 吸附机制 ..... 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 ..... 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 ..... 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 ..... 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 ..... 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 ..... 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 ..... 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 ..... 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 ..... 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 ..... 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 ..... 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 ..... 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 ..... 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 ..... 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 ..... 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH<sub>4</sub> 产生潜力与产生途径 ..... 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 ..... 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 ..... 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 ..... 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 ..... 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 ..... 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

# 骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估

黄家浩<sup>1,2</sup>, 吴玮<sup>1</sup>, 黄天寅<sup>1</sup>, 陈书琴<sup>3</sup>, 项颂<sup>2</sup>, 庞燕<sup>2\*</sup>

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 3. 安庆师范大学资源环境学院, 安庆 246133)

**摘要:** 通过对骆马湖表层水和沉积物的调查检测, 分析了两类介质中全氟化合物 (PFASs) 的组分结构和赋存特征, 并运用主成分分析法对表层水中此类物质的来源进行了解析, 运用风险商法评估了此类物质的潜在健康风险, 结果表明, 骆马湖表层沉积物中总计检出 14 种 PFASs, 而其表层水中较之前者多检出 1 种 (PFTeA); 表层水中  $\rho\left(\sum \text{PFASs}\right)$  范围为 46.09 ~

120.34  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 沉积物中  $\omega\left(\sum \text{PFASs}\right)$  范围为 2.22 ~ 9.55  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 表层水中质量分数最高的为 PFPeA, 为 38%, 沉积物中质量分数最高的为 PFBA, 为 61%, 骆马湖多介质中 PFASs 组分均以短链物质为主; 骆马湖表层水中 PFASs 的高浓度区域集中在北部河流入湖口, 其浓度呈现由北向南递减的趋势, 沉积物中 PFASs 的高含量区域则向南迁移; 骆马湖沉积物中的  $\sum \text{PFASs}$ 、PFBA 和 PFOS 的分布情况与沉积物中 TOC 含量有关; 主成分分析表明骆马湖表层水中 PFASs 主要来自纺织品阻燃、橡胶品的乳化、食品包装过程和纸类表面处理、金属电镀行业、皮革和纺织品制造行业; 骆马湖表层水中 PFASs 处于较低健康风险水平。

**关键词:** 骆马湖; 全氟化合物 (PFASs); 赋存特征; 来源解析; 健康风险评估

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3562-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202108335

## Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perlyfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake

HUANG Jia-hao<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>1</sup>, HUANG Tian-yin<sup>1</sup>, CHENG Shu-qin<sup>3</sup>, XIANG Song<sup>2</sup>, PANG Yan<sup>2\*</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Resource and Environment, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

**Abstract:** Through the investigation and detection of the surface water and sediments of Luoma Lake, the structure and occurrence characteristics of PFASs (perlyfluoroalkyl substances) in the two types of media were analyzed, and the principal component analysis method was used to analyze the characteristics of such substances in the surface water. The source was analyzed, and the potential health risks of such substances were evaluated using the risk quotient method. The results showed that a total of 13 PFASs were detected in the surface sediments of Luoma Lake, and one more species was detected in the surface water (PFTeA);  $\rho\left(\sum \text{PFASs}\right)$  in the surface water ranged from

46.09 to 120.34  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , and  $\omega\left(\sum \text{PFASs}\right)$  in sediments ranged from 2.22 to 9.55  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ . PFPeA was the major component in surface water, and the mass fraction of PFPeA was 38%. PFBA was the major component in sediment, and the mass fraction of PFPeA was 61%. The multi-media PFASs in Luoma Lake were mainly short-chain substances; the high concentration area of PFASs in the surface water of Luoma Lake was concentrated and distributed at the mouth of the northern rivers. Its concentration showed a decreasing trend from north to south, and the content of PFASs in the sediments showed a decreasing trend from southwest to northeast. The distribution of  $\sum \text{PFASs}$ , PFBA, and PFOS in the sediments of Luoma Lake and the TOC content in the sediment were related; the principal component analysis showed that the PFASs in the surface water of Luoma Lake were mainly from textile flame retardant, rubber product emulsification, food packaging processes and paper surface treatment industries, the metal electroplating industry, and leather and textile manufacturing industries. PFASs in the surface water of Luoma Lake were at a relatively low health risk level.

**Key words:** Luoma Lake; perlyfluoroalkyl substances (PFASs); occurrence characteristics; source analysis; health risk assessment

全氟化合物 (perlyfluoroalkyl substances, PFASs) 是一类人工合成的含氟化合物, 其碳链上的氢原子被氟原子所取代<sup>[1]</sup>。根据基团可以将其分为两大类: 全氟烷基羧酸盐 (perfluoroalkyl carboxylic acids, PFCAs) 和全氟烷基磺酸盐 (perfluoroalkane sulfonic acids, PFSAs)。由于具有很强的碳氟键, 这些分子具有高度的稳定性和抗生物降解性, 因此 PFASs 具

有界面活性、疏水疏油、耐酸和耐高温等独特的理化性质<sup>[2~4]</sup>, 被广泛应用在包括皮革、纸张、衣物的

收稿日期: 2021-08-31; 修订日期: 2021-12-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07301006-006); 安徽省自然科学基金项目 (1908085MD103)

作者简介: 黄家浩 (1997~), 男, 硕士, 主要研究方向为新型持久性有机污染物, E-mail: 676856298@qq.com

\* 通信作者, E-mail: pangyan@caes.org.cn

防污处理和消防泡沫灭火器等大量产品中<sup>[5]</sup>。有研究表明 PFASs 在全球范围内各类环境介质中广泛存在,如在大气<sup>[6,7]</sup>、水体<sup>[8~10]</sup>、沉积物<sup>[11]</sup>和生物<sup>[12,13]</sup>等环境介质中。当前,PFASs 的持久毒性和生物累积性已受到关注<sup>[9,14]</sup>,某些代表性物质如全氟辛酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)和全氟辛烷磺酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)分别在 2009 年和 2019 年被列为斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)。

中国是全球最大的 PFASs 生产国<sup>[15]</sup>,而水体既可容纳 PFASs,也会通过各种途径将之再次释放<sup>[16]</sup>,因此了解 PFASs 在水环境中的分布特征就显得尤为重要。目前有关 PFASs 在水体中的赋存特征、源汇关系和风险评价的研究大多集中在经济较发达地区的水体<sup>[17~19]</sup>和沿海水域<sup>[20,21]</sup>,而对地处中国内陆的淮河流域湖泊较少,如: Cao 等<sup>[22]</sup>对南四湖中表层水和沉积物中 PFASs 的分布趋势和分配特性进行了研究, Yu 等<sup>[23]</sup>研究了淮河表层水中 PFASs 的分布特征。骆马湖是南水北调东线工程在淮河流域中的重要节点,目前针对骆马湖中有机质<sup>[24]</sup>、重金属<sup>[25]</sup>和药品及个人护理品(pharmaceuticals and personal care products, PPCPs)<sup>[26,27]</sup>等污染研究工作正逐步开展,但涉及 PFASs 的研究很少。本研究对骆马湖表层水和沉积物中的 14 种 PFASs 进行了调查,分析了其赋存特征,评价了其污染情况,解析了 PFASs 的污染来源,并评估了 PFASs 的健康风险,以期为骆马湖及其同类水体今后 PFASs 的研究和管控,提供决策依据和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

骆马湖(34°00' ~ 34°11' N, 118°04' ~ 118°18' E)位于江苏省北部,面积为 290 km<sup>2</sup>,容积为 9.18 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,汇水面积约 1 300 km<sup>2</sup>,是淮河流域第三大淡水湖泊、江苏省第四大淡水湖泊,为宿迁和徐州两市共辖<sup>[28]</sup>。该湖不仅是沂河和中运河洪水的主要调蓄湖泊,也是宿迁和新沂两市的重要水源地,同时也是国家南水北调东线输水工程的主要调节湖泊之一,具有重要的生态地位<sup>[29]</sup>。

### 1.2 样品采集

采样时间:2020 年 9 月。

样点布设:采用网格法布点,在均匀性基础上兼顾重点,总计设置 32 个(图 1)。

样品类型和数量:水样 32 个,沉积物 31 个(12 号点地处北部采砂区,局部水深 > 20 m,未能采集沉

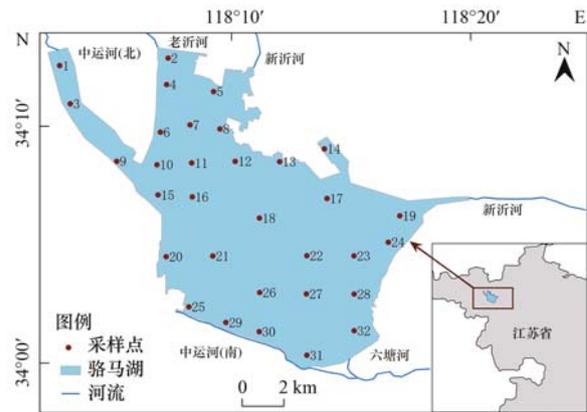


图 1 骆马湖采样点示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Luoma Lake

积物样品)。

样品的采集:水样存放于棕色聚丙烯瓶中,沉积物样放于聚乙烯自封袋中,低温保存并及时运回实验室进行预处理。

### 1.3 试剂及仪器

标准品和内标物质:高纯度混合标准品 PFAC-MXB (native PFCA and PFSA solution/mixture) 包括:全氟丁烷磺酸(perfluorobutanoic acid, PFBA)、全氟戊烷羧酸(perfluoropentanoic acid, PFPeA)、全氟己烷羧酸(perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟庚烷羧酸(perfluoroheptanoic acid, PFHpA)、全氟辛酸羧酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)、全氟壬烷羧酸(perfluorononanoic acid, PFNA)、全氟癸烷羧酸(perfluorodecanoic acid, PFDA)、全氟十一烷羧酸(perfluoroundecanoic acid, PFUnDA)、全氟十二烷羧酸(perfluorododecanoic acid, PFDoDA)、全氟十三烷羧酸(perfluorotridecanoic acid, PFTeDA)、全氟十四烷羧酸(perfluorotetradecanoic acid, PFTeDA)、全氟丁烷磺酸(perfluorobutane sulfonate, PFBS)、全氟己烷磺酸(perfluorohexane sulfonate, PFHxS)、全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS);高纯度混合碳同位素标记品为 MPFAC-MXA (mass-labelled PFCA and PFSA Solution/Mixture), 包括:<sup>13</sup>C<sub>4</sub>-PFBA、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-PFHxA、<sup>13</sup>C<sub>4</sub>-PFOA、<sup>13</sup>C<sub>5</sub>-PFNA、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-PFDA、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-PFUnDA、<sup>13</sup>C<sub>2</sub>-PFDoDA、<sup>18</sup>O<sub>2</sub>-PFHxS 和 <sup>13</sup>C<sub>4</sub>-PFOS。以上标准品和内标物均购于加拿大 Wellington 实验室(纯度均高于 98%)。

试剂和材料:色谱级甲醇(MeOH)、乙腈(ACN)、醋酸铵(NH<sub>4</sub>OAc)、甲基叔丁基醚(MTBE)和四丁基硫酸氢铵(TBAS),购自美国 Fisher 公司, Milli-Q 超纯水, Oasis<sup>®</sup> WAXSPE 柱(Waters 公司,美国), 0.22 μm 聚丙烯滤膜(Pall 公司,美国)。

主要实验仪器:高效液相色谱串联四级杆质谱联用仪(XevoTQD, Waters 公司, 美国)。

#### 1.4 实验方法

本研究参考 Zheng 等<sup>[30]</sup>的方法,采用固相萃取的方式对表层水进行前处理,沉积物的前处理通过超声提取、离子对萃取和液液萃取的复合提取方式来完成。

水样前处理:用 6 mL 含 1% 氨水的 MeOH、6 mL MeOH 和 6 mL 水依次过柱进行活化,后加入 5 ng 相应内标物质到已过滤的样品(1.0 L)中摇匀,将该水样以 3~5 mL·min<sup>-1</sup>的速度流过 WAX 柱。上样结束后,用 6 mL 浓度为 25 mol·L<sup>-1</sup> (pH = 4) 的 NH<sub>4</sub>OAc 和 2 mL MeOH 冲洗小柱,淋洗结束后,分别用 6 mL 含体积分数 1% 氨水的 MeOH 和含体积分数 1% 氨水的 ACN 对目标物质进行洗脱,然后氮吹至近干,最后用流动相溶液定容至 1 mL,转移至冻存管等待上机测定。

沉积物前处理:称取 1 g 过筛后的沉积物样品,加入 5 ng 内标标准品,摇匀后静置一夜,然后加入 1 mL 0.2 mol·L<sup>-1</sup> 氢氧化钠(NaOH)溶液和 1.5 mL ACN 进行碱消解,充分振荡,超声 12 min 后,在 4℃ 的条件下以 10 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 10 min,转移上层清液至新的 15 mL 离心管,重复一次,合并上层清液。将上层清液氮吹浓缩至 2 mL,向剩余的提取物中加入 1 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup> TBAS,用 0.2 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 和 0.5 mol·L<sup>-1</sup> TBAS 将 pH 调至 3.6。所得溶液中加入 6 mL MTBE 进行液液萃取,振荡摇动 5 min,离心 10 min(10 000 r·min<sup>-1</sup>),吸取上清液于 PP 洗脱管中,萃取两次,合并提取液。最后氮吹至近干,用 1 mL 流动相溶液复溶,转移至冻存管等待上机测定。

#### 1.5 液相色谱/质谱条件

水样和沉积物样的定性定量采用超高效液相色谱串联四级杆质谱联用仪(ACQUITY UPLC-ESI/MS/MS)检测目标化合物,色谱柱为 ACQUITY UPLCTM BEH C18 柱(2.1 mm × 50 mm, 1.7 μm, 美国 Waters 公司),柱温保持 35℃,进样量为 20 μL。

液相条件:流动相 A 为 10 mmol·L<sup>-1</sup> 醋酸铵水溶液,流动相 B 为 10 mmol·L<sup>-1</sup> 醋酸铵甲醇乙腈溶液(其中甲醇和乙腈的体积比为 8:2),采用梯度洗脱程序:初始流动相组成为 50% A 和 50% B,于 0~7 min 升至 100% B; 7~7.5 min 降至 50%; 7.5~9 min 保持 50% B。

质谱条件:在负离子模式下扫描,采用多反应检测模式(MRM),电子喷雾离子源(ESI<sup>-</sup>),离子温度保持在 120℃,去溶剂温度为 400℃,以氮气作为锥孔气和脱溶剂气,其流速分别为 50 L·h<sup>-1</sup> 和 800 L·h<sup>-1</sup>。

#### 1.6 质量控制与保障

为确保数据的可靠性,在实验过程中设置运输空白和方法空白,每 5 个样品加入 1 个平行样品。结果显示所有空白均低于检出限,平行样品的相对标准偏差范围为:2.80%~10.27%。

上机检测时,每 10 个样品添加一个溶剂空白和质量控制样品,配置的标曲浓度范围是 0.02~5 ng·mL<sup>-1</sup>,精密度(RSD)在 3.1%~8.6% (n = 7),线性系数 R 均大于 0.99,表层水样品的加标回收率(n = 3)为 68.2%~103.9%、沉积物样品的加标回收率(n = 3)为 65.6%~90.1%,均符合实验精度要求。仪器检测限和定量限分别为仪器信噪比的 3 倍和 10 倍。表层水样和沉积物样的方法检测限(MDL)和回收率的具体数值见表 1。

表 1 表层水和沉积物样品中 PFASs 的方法检出限及回收率

Table 1 Method detection limits and recoveries of PFASs in the surface water and sediment samples

目标污染物	MDLs		回收率(Avg ± SD) %	
	表层水/ng·L <sup>-1</sup>	沉积物/ng·g <sup>-1</sup>	表层水	沉积物
全氟丁酸(PFBA, C <sub>4</sub> )	0.987	0.04	92.5 ± 9.6	69.4 ± 10.7
全氟戊酸(PFPeA, C <sub>5</sub> )	0.062	0.04	81.3 ± 12.7	74.3 ± 13.3
全氟己酸(PFHxA, C <sub>6</sub> )	0.006 5	0.18	97.6 ± 4.2	72.8 ± 11.5
全氟庚酸(PFHpA, C <sub>7</sub> )	0.02	0.18	88.4 ± 14.9	90.1 ± 14.2
全氟辛酸(PFOA, C <sub>8</sub> )	0.008	0.002	103.9 ± 8.3	88.9 ± 9.5
全氟壬酸(PFNA, C <sub>9</sub> )	0.005	0.005	96.1 ± 5.6	75.1 ± 12.8
全氟癸酸(PFDA, C <sub>10</sub> )	0.041	0.005	97.5 ± 4.9	73.7 ± 14.1
全氟十一酸(PFUnDA, C <sub>11</sub> )	0.025	0.005	82.8 ± 9.2	75.2 ± 14.0
全氟十二酸(PFDoDA, C <sub>12</sub> )	0.012	0.005	96.5 ± 3.6	68.5 ± 11.3
全氟十三酸(PFTrDA, C <sub>13</sub> )	0.082	0.2	76.1 ± 7.6	65.6 ± 10.2
全氟十四酸(PFTeDA, C <sub>14</sub> )	0.081	0.2	68.2 ± 4.4	76.0 ± 13.9
全氟丁基磺酸(PFBS, C <sub>4</sub> )	0.211	0.5	72.7 ± 6.1	74.8 ± 13.3
全氟己基磺酸(PFHxS, C <sub>6</sub> )	0.1	0.2	98.1 ± 8.7	75.1 ± 10.1
全氟辛基磺酸(PFOS, C <sub>8</sub> )	0.015	0.18	95.5 ± 5.3	70.5 ± 7.8

## 1.7 健康风险评估

本研究采用 HQ (health risk quotient) 法评估骆马湖水体中 PFASs 的存在对人类健康的潜在风险. 该方法基于饮用水中目标化合物的 MEC (measured environmental concentration) 和 DWEL (drinking water equivalent level), 在本研究中, 人的年龄被划分 3~6、7~11、12~16、17~19、20~24、25~59 和 >60 等 7 个类别. 为了减少 HQ 方法的不确定性和 HQ 值超过 1 的可能性<sup>[31]</sup>, 基于浓度中值数据和浓度范围的第 95% 数据中建立的中等和高暴露情景<sup>[32]</sup>. HQ 表示人类健康风险水平, 计算公式如下:

$$HQ = MEC/DWEL \quad (1)$$

$$DWEL = \frac{P \times ADI \times BW}{DWI \times AB \times FOE} \quad (2)$$

式中,  $P$  为通过饮用水摄入 PFASs 的占比系数, 取 0.2<sup>[33]</sup>;  $ADI$  为接受的每日摄入量 [ $\mu\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ];  $BW$  为平均体重 (kg),  $ADI$ 、 $BW$  和  $DWI$  的参考值

如表 2 所示;  $DWI$  为饮用水摄入量 ( $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $AB$  为胃肠道吸收率, 取 1<sup>[34]</sup>;  $FOE$  为暴露频率, 取 0.96<sup>[35]</sup>. PFASs 通常以混合物的形式出现在水环境中. 为了评估 PFASs 对人体健康的危害, 有必要考虑 PFASs 的累积毒性. 根据漏斗假说理论<sup>[36]</sup>, PFASs 的累积健康风险方程如下:

$$HQ_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n HQ_i = \sum_{i=1}^n \frac{MEC_i}{DWEL_i} \quad (3)$$

式中,  $HQ_{\text{mix}}$  为 PFASs 的累计健康风险值;  $HQ_i$  为第  $i$  个 PFASs 的 HQ 值;  $MEC_i$  为水体样品中第  $i$  个 PFASs 的环境浓度值 ( $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $DWEL_i$  为第  $i$  个 PFASs 的饮水当量水平

本研究借鉴 Thomaidi 等<sup>[37]</sup> 的研究将健康风险评估的等级分为 3 级: 当  $HQ \geq 1$  时, 说明 PFASs 对人类健康产生了不可忽视的不利影响; 当  $0.2 \leq HQ < 1$  时, 说明存在不确定的风险; 当  $HQ < 0.2$  时, 说明 PFASs 对人类健康造成的健康风险可忽略不计<sup>[35,37]</sup>.

表 2 中国不同年龄/性别组的平均体重 (BW)、饮用水摄入量 (DWI) 和 PFASs 每日可接受摄入量 (ADI)

Table 2 Mean body weight (BW), quantity of drinking water intake (DWI), and acceptable daily intake of PFAS values (ADI) for different age/gender groups in China

年龄组	性别	BW /kg	DWI /L·d <sup>-1</sup>	ADI / $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$									
				PFBS	PFHxA	PFHpA	PFHxS	PFOA	PFNA	PFOS	PFDA	PFUnDA	PFDoDA
3~6 岁	男性	19.63	1.08	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
	女性	18.65	1.08	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
7~11 岁	男性	33.84	1.24	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
	女性	31.94	1.24	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
12~16 岁	男性	55.16	1.73	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
	女性	49.44	1.73	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
17~19 岁	男性	63.43	2.26	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
	女性	52.67	2.26	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
20~24 岁	男性	67.20	2.81	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
	女性	53.80	2.81	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
25~59 岁	男性	70.77	2.81	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
	女性	58.37	2.81	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
>60 岁	男性	67.10	2.81	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
	女性	59.45	2.81	500	100	100	5	0.2	4.15	0.15	6	5.05	0.1
文献		[38]	[39]	[40]	[40]	[40]	[40]	[34]	[40]	[41]	[40]	[40]	[40]

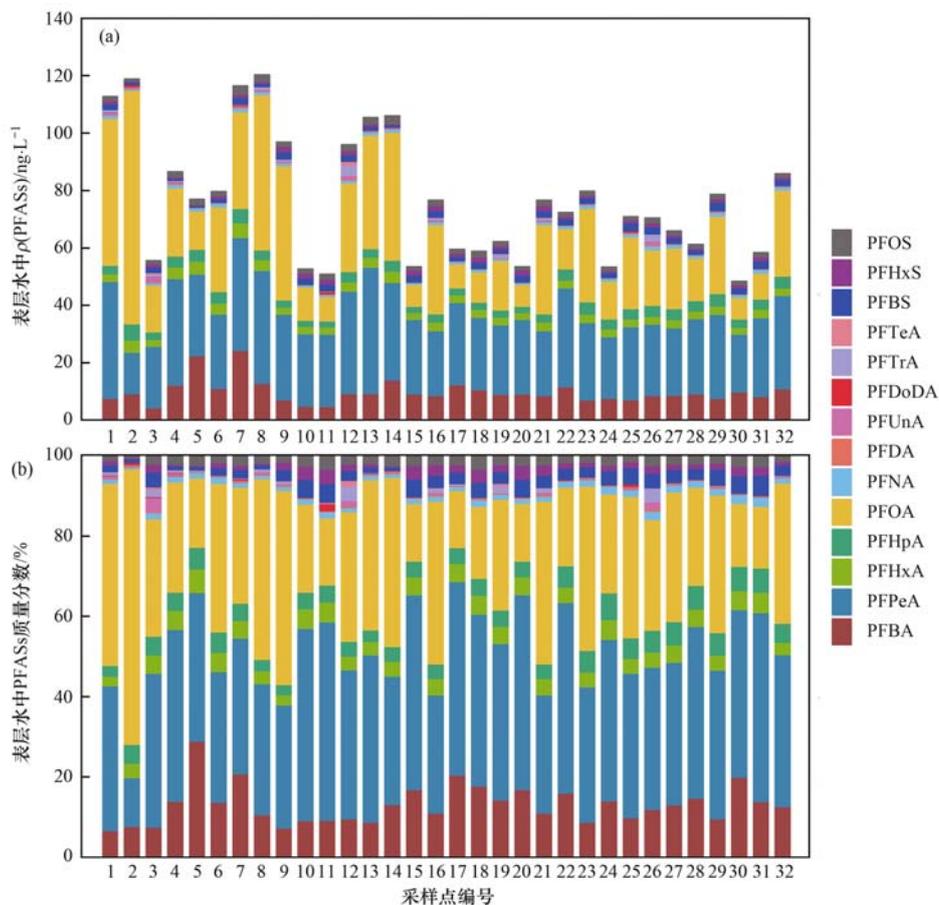
## 2 结果与讨论

### 2.1 表层水和沉积物中 PFASs 的组分特征

在骆马湖表层水中,  $\rho \left( \sum \text{PFASs} \right)$  为 46.09 ~ 120.34  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$  (平均值为 76.35  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 如图 2 所示, 其中 PFCAs 占比为 93.7%, PFASs 占比为 6.3%,  $\sum \text{PFCAs}$  浓度远大于  $\sum \text{PFASs}$  浓度. 这与陈舒<sup>[42]</sup> 所调查的浙江省羧酸类化合物浓度的平均值是磺酸类的二十多倍的情况相似.

根据 OECD 的定义<sup>[43]</sup>, 碳链长度  $\geq 7$  的 PFCAs

和碳链长度  $\geq 6$  的 PFASs 为长链 PFASs. 随着学界对长链 PFASs 危害的认识不断深入, 此类物质的禁用和被短链 PFASs 的替代已成为必然<sup>[44]</sup>. 这种禁用和替代也影响到了此类污染物在环境介质中的赋存状态. 由上可知, 骆马湖表层水中短链 PFASs 质量分数已超过长链 PFASs, 在 PFASs 中达到 56.13%. 其中 PFPeA ( $C_5$ , 浓度平均值为 28.64  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 已成为主要的 PFCAs, PFBS ( $C_4$ , 浓度平均值为 1.98  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 已成为主要的 PFASs. 虽然如此, 骆马湖表层水中长链物质仍不可忽视, PFOA ( $C_8$ , 浓度平均值为 24.69  $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 仍占 PFASs 总质量的 32%.



(a) 表层水中 PFASs 浓度, (b) 表层水中 PFASs 质量分数

图2 骆马湖表层水中 PFASs 的浓度和质量分数

Fig. 2 Concentrations and mass fraction of PFASs in surface water

从组分特征上看,骆马湖表层水中 PFBA 质量分数亦高达 13%,处于所有组分中第 3 位,这说明该湖已经出现了短链 PFASs 替代效应,这与 Wu 等<sup>[19]</sup>的研究成果相符. 与陈舒<sup>[42]</sup>的研究结果相比,骆马湖表层水中 PFOS 浓度较低,但 PFPeA 浓度却处于国内较高水平. 这可能是因为近年来 6:2FTS 已被用作金属电镀行业中 PFOS 的替代品<sup>[45]</sup>,而 PFPeA 是 6:2FTS 的转化产物之一<sup>[46]</sup>. 骆马湖表层水中 PFOA 浓度水平与太湖、长江和秦淮河南京段相当,高于韩国六大河流,远低于氟化工园区直接排放地区<sup>[47]</sup>.

与其他地区相比,骆马湖表层水中  $\sum$  PFASs 浓度处于世界中等水平,高于我国太湖、南四湖、淮河流域地表水和韩国六大河流,与南非瓦尔河浓度相近,低于我国小清河、白洋淀、长江、秦淮河南京段和美国拉斯维加斯过水区(表 3).

与表层水相比,骆马湖沉积物中未能检出 PFTeDA,  $\omega(\sum \text{PFASs})$  范围为 2.22 ~ 9.55  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$  (平均值为 5.61  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),如图 3 所示,PFCA 占比降低为 90.0%,PFSA 占比升高为 10.0%. 由此可

见,水体中 PFASs 较之 PFCA 更易被沉积物吸附. 从组分特征上看,沉积物中 PFBA ( $\text{C}_4$ , 含量平均值为 3.44  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),在 PFASs 中质量分数高达 61%,略低于武倩倩等<sup>[52]</sup>在天津市河流沿岸土壤中调查到的质量分数,其次为 PFHxA ( $\text{C}_6$ , 质量分数为 8%)、PFOS ( $\text{C}_8$ , 质量分数为 8%) 和 PFTrDA ( $\text{C}_{13}$ , 质量分数为 8%).

沉积物中  $\sum$  PFASs 含量同样处于中等水平,从全国来看,高于太湖和南四湖,与长江和秦淮河南京段的含量相近,低于小清河和白洋淀. 与国外比较来看,高于韩国六大河流和南非瓦尔河的含量,低于美国拉斯维加斯过水区含量(表 4). 根据齐彦杰<sup>[53]</sup>的研究结果,2013 年骆马湖沉积物中  $\sum$  PFASs 含量为 0.929  $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,最主要的化合物是 PFOS,本研究发现,骆马湖沉积物中 PFASs 含量较之 2013 年已经增加了 6 倍,且主要化合物已从 PFOS 转变成了短链 PFASs,这表明骆马湖 PFASs 污染呈加剧态势且发生了短链的替代.

## 2.2 表层水和沉积物中 PFASs 空间分布特征

骆马湖表层水中 PFASs 浓度和质量分数前 3 的

表 3 不同研究区表层水中主要 PFASs 比较<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison of PFASs in surface water of different regions

研究区	采样日期 (年-月)	项目	范围 /ng·L <sup>-1</sup>	平均值 /ng·L <sup>-1</sup>	文献
骆马湖	2020-10	PFPeA (C <sub>5</sub> )	14.5 ~ 44	28.64	本研究
		PFOA (C <sub>8</sub> )	7.6 ~ 81.34	24.69	
		∑ PFASs	46.09 ~ 120.33	76.35	
太湖	2009-11	PFOS (C <sub>8</sub> )	3.6 ~ 394	26.5	[17]
		PFOA (C <sub>8</sub> )	10.6 ~ 36.7	21.7	
		∑ PFASs	1.4 ~ 131	43.6	
淮河流域	2011-03	PFOA (C <sub>8</sub> )	6.2 ~ 47	18	[23]
		PFOS (C <sub>8</sub> )	1.4 ~ 25	4.7	
		∑ PFASs	11 ~ 79	28	
南四湖	2013-04	PFOA (C <sub>8</sub> )	34.9 ~ 84.6	61.38	[22]
		PFHpA (C <sub>7</sub> )	1.34 ~ 3.42	2.38	
		∑ PFASs	38.4 ~ 91.4	67.05	
小清河	2013-06	PFOA (C <sub>8</sub> )	15.3 ~ 967.611	101.22	[47]
		PFBA (C <sub>4</sub> )	1.77 ~ 34.306	89.33	
		∑ PFASs	32.2 ~ 1 060.295	165.4	
白洋淀	2016-03	PFHxS (C <sub>6</sub> )	2.07 ~ 1 688	684	[48]
		PFOA (C <sub>8</sub> )	13.6 ~ 441	147	
		∑ PFASs	140.5 ~ 1 828.5	—	
长江和秦淮河南京段	2017 ~ 2018	PFOA (C <sub>8</sub> )	12.5 ~ 66	25.8	[18]
		PFHpA (C <sub>7</sub> )	nd ~ 237.8	—	
		∑ PFASs	13.8 ~ 274.6	—	
韩国六大河流	2010 ~ 2012	PFOS (C <sub>8</sub> )	nd ~ 15.07	3.89	[49]
		PFOA (C <sub>8</sub> )	nd ~ 8.34	2.49	
		∑ PFASs	1.17 ~ 40.63	10.44	
南非瓦尔河	2014-09	PFPeA (C <sub>5</sub> )	5.7 ~ 45	25.8	[50]
		PEOS (C <sub>8</sub> )	0.4 ~ 35.7	5.6	
		∑ PFASs	—	73.43	
美国拉斯维加斯过水区	2019-01 ~ 2019-07	PFHxA (C <sub>6</sub> )	1.5 ~ 187	80.7	[51]
		PFPeA (C <sub>5</sub> )	2.3 ~ 170	52.3	
		∑ PFASs	3.8 ~ 591	223.44	

1) nd 表示低于检出限; “—”表示文献中没有相关数据

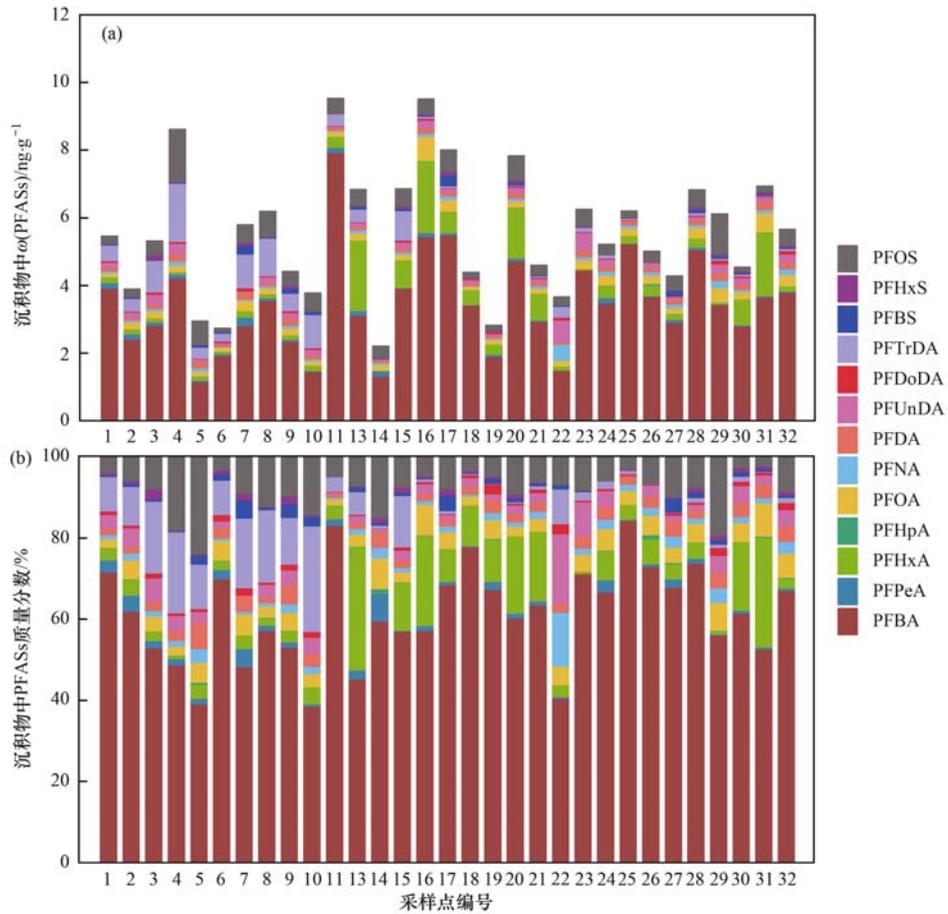
单体组成空间分布特性较为相似(图 4). 骆马湖表层水中 ∑ PFASs 浓度整体呈现出北部高于南部, 这是因为骆马湖流域内工业企业主要分布在北部的新沂市<sup>[54]</sup>这与该地区以前研究中报道的其他新型污染物如内分泌干扰物(endocrine disrupting chemicals, EDCs)和药品及个人护理用品(PCPs)的分布模式相似<sup>[27,55]</sup>, 这表明北部入湖河流是 PFASs 主要污染来源. 根据已有研究, 表层水和沉积物 PFASs 分布规律有较大差异<sup>[56~58]</sup>, 这一现象在本研究中亦得到了证实: 骆马湖表层水中 ∑ PFASs、PFPeA、PFBA 和 PFOA 的高浓度区主要出现在北部入湖河流处, 而沉积物中相应的高含量区向南迁移(图 5).

虽然骆马湖受南水北调的影响<sup>[59]</sup>, 水体对流趋势得到了加强, 但并未完全改变其天然状态下由北

向南的流向. 故其 PFASs 进入沉积物存在一定的向南滞后效应.

由图 5 可知, PFBA 和 PFHxA 在湖区的空间分布特征较为相似, 而 PFOS 在北部入湖河流处的含量较高, 这可能是因为 PFOS 为长链 PFASs 更容易被沉积物吸附<sup>[60]</sup>, 导致其滞后效应变弱. 根据齐彦杰<sup>[53]</sup>的研究, 在受人类活动影响干扰较为强烈地区, PFASs 和介质中 TOC 有较显著的相关性, 骆马湖沉积物中 PFASs 和 TOC 的 Spearman 相关分析结果如表 5 所示.

由表 5 可知, 骆马湖沉积物中 TOC 含量和 PFBA 呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 和 PFOS 呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 而 PFHxA 含量和 TOC 的相关性则没有显著的统计学意义( $P > 0.05$ ), PFASs 各组分和 TOC 的相关性可能是决定其具有不同空间分布规律的重要原因之一.



(a) 沉积物中 PFASs 含量, (b) 沉积物中 PFASs 质量分数

图 3 骆马湖沉积物中 PFASs 的含量和质量分数

Fig. 3 Concentrations and mass fraction of PFASs in sediment

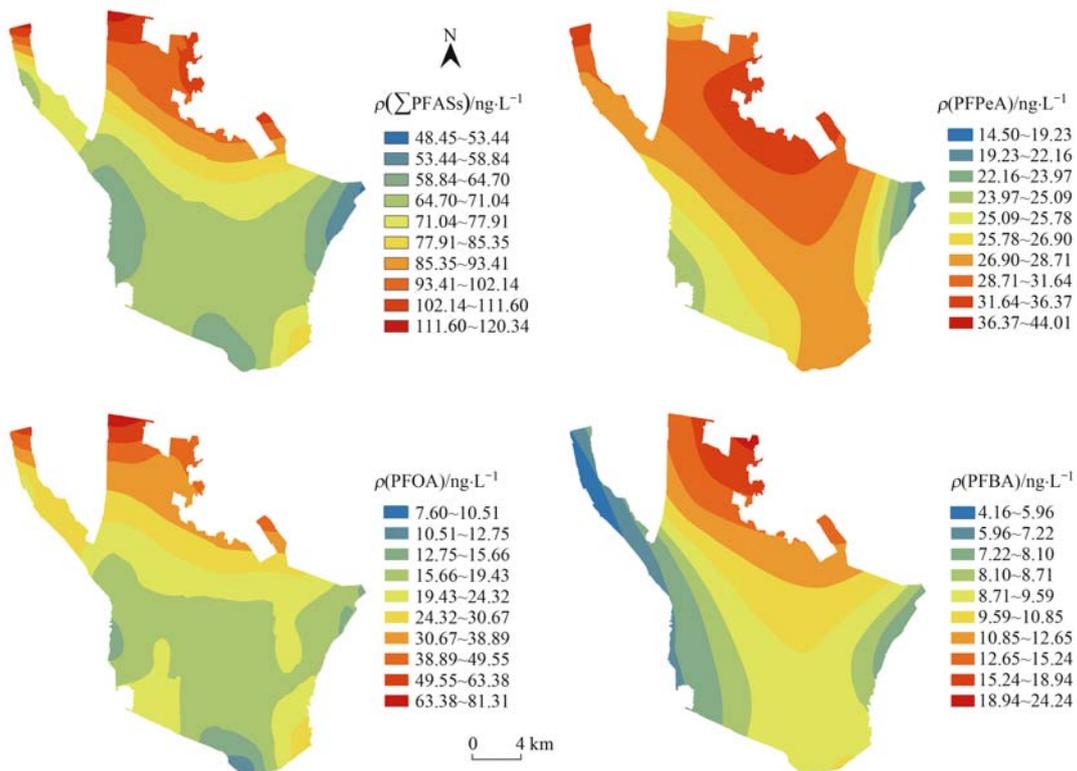


图 4 骆马湖表层水中 PFASs 分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of PFASs in the surface water of Luoma Lake

表 4 不同研究区沉积物中主要 PFASs 比较<sup>1)</sup>

Table 4 Comparison of PFASs in sediment of different regions

研究区	采样日期(年-月)	项目	范围/ng·g <sup>-1</sup>	平均值/ng·g <sup>-1</sup>	文献
骆马湖	2020-10	PFBA(C <sub>4</sub> )	1.15 ~ 7.93	3.44	本研究
		PFHxA(C <sub>6</sub> )	nd ~ 2.1	0.47	
		∑ PFASs	2.22 ~ 9.55	5.61	
太湖	2009-11	PFOA(C <sub>8</sub> )	<0.02 ~ 0.52	0.16	[17]
		PFOS(C <sub>8</sub> )	0.06 ~ 0.31	0.15	
		∑ PFASs	0.26 ~ 1.11	0.51	
南四湖	2013-04	PFOS(C <sub>8</sub> )	0.17 ~ 0.83	0.42	[22]
		PFOA(C <sub>8</sub> )	0.11 ~ 0.44	0.25	
		∑ PFASs	0.47 ~ 1.81	1.09	
小清河	2013-06	PFOA(C <sub>8</sub> )	0.37 ~ 153	20.62	[47]
		PFBA(C <sub>4</sub> )	0.06 ~ 56.9	2.67	
		∑ PFASs	nd ~ 162.33	33.95	
白洋淀	2016-03	PFHxS(C <sub>6</sub> )	nd ~ 20.5	—	[48]
		PFOS(C <sub>8</sub> )	0.11 ~ 8.59	—	
		∑ PFASs	2.22 ~ 16.9	—	
长江和秦淮河南京段	2017 ~ 2018	PFOA(C <sub>8</sub> )	12.5 ~ 66	25.8	[18]
		PFDODA(C <sub>12</sub> )	0.3 ~ 3.0	—	
		∑ PFASs	3.2 ~ 11.4	—	
韩国六大河流	2010 ~ 2012	PFOS(C <sub>8</sub> )	0.01 ~ 0.48	0.12	[49]
		PFDODA(C <sub>12</sub> )	nd ~ 0.28	0.05	
		∑ PFASs	0.03 ~ 1.09	0.35	
南非瓦尔河	2014-09	PFOS(C <sub>8</sub> )	nd ~ 2.36	—	[50]
		∑ PFASs	nd ~ 2.36	—	
拉斯维加斯过水区	2019-01 ~ 2019-07	PFDS(C <sub>10</sub> )	nd ~ 88.2	12.2	[51]
		PFHxA(C <sub>6</sub> )	nd ~ 18.7	2.8	
		∑ PFASs	nd ~ 134.2	26.59	

1) nd 表示低于检出限; “—”表示文献中没有相关数据

表 5 沉积物中主要 PFASs 含量和 TOC 的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation analyses among main PFASs content and TOC in sediments

	TOC	PFOS	PFHxA	PFBA	∑ PFASs
TOC	1.000				
PFOS	0.403 *	1.000			
PFHxA	-0.053	-0.188	1.000		
PFBA	0.548 **	0.415 *	0.384 *	1.000	
PFASs	0.518 **	0.500 **	0.422 *	0.876 **	1.000

1) \* 表述在 0.05 级别(双尾), 相关性显著, \*\* 表述在 0.01 级别(双尾), 相关性极显著

### 2.3 表层水中 PFASs 的潜在来源

源解析对于包括 PFASs 在内的持久性有机污染物的控制变得越来越重要<sup>[18]</sup>, 然而关于骆马湖中 PFASs 的来源却仍不清楚. 已证明各种 PFASs 之间的相关性分析可用于推断 PFASs 的潜在来源<sup>[61]</sup>, 在本研究中表层水的组分特征表明, PFPeA 是最主要的化合物, 具有最高的浓度和检出率, 其次是 PFBA 和 PFOA(图 2). Spearman 相关分析表明(图 6), PFPeA 和 PFOS 呈显著正相关, PFBA 和 PFHxA 呈

显著正相关, PFOA 和 PFDA、PFHpA、PFHxA 呈显著正相关, 表明这些化合物可能共享相似的来源和运输路线<sup>[57]</sup>. 据报道, PFHpA/PFOA 的比值随着距离非大气源距离的增加而增大, 高比值可能是大气沉降的有效示踪剂, 在城市地区为 0.5 ~ 0.9, 在偏远地区为 6 ~ 16<sup>[62]</sup>. 在本研究中 PFHpA/PFOA 均小于 1, 说明骆马湖中 PFASs 的来源不是大气沉降而是直接排放.

KMO 和 Barlett 检验表明, 骆马湖表层水 PFASs 的 KMO 值为 0.663 (>0.6), 球形度检验的 *P* 值为 0.00 (<0.05), 可知本研究数据满足 PCA 分析的条件. 利用 PCA/MLR 进一步量化 PFASs 的潜在来源及其贡献<sup>[63-65]</sup>, 结果表明前 4 个主成分解释了总方差的 86.99% (图 7 中用不同颜色区别每个因子的主要化合物). 由于同组化合物可能来源相似, 骆马湖表层水中的 PFASs 可能主要来源于 4 种不同类型的污染源. 因子 1 主要由 PFHxA、PFHpA 和 PFBA 组成, 占来源贡献总量的 16.94%, PFHxA 和 PFHpA 可被认为是来自皮革和纺织品的生产和降解<sup>[57]</sup>, 因

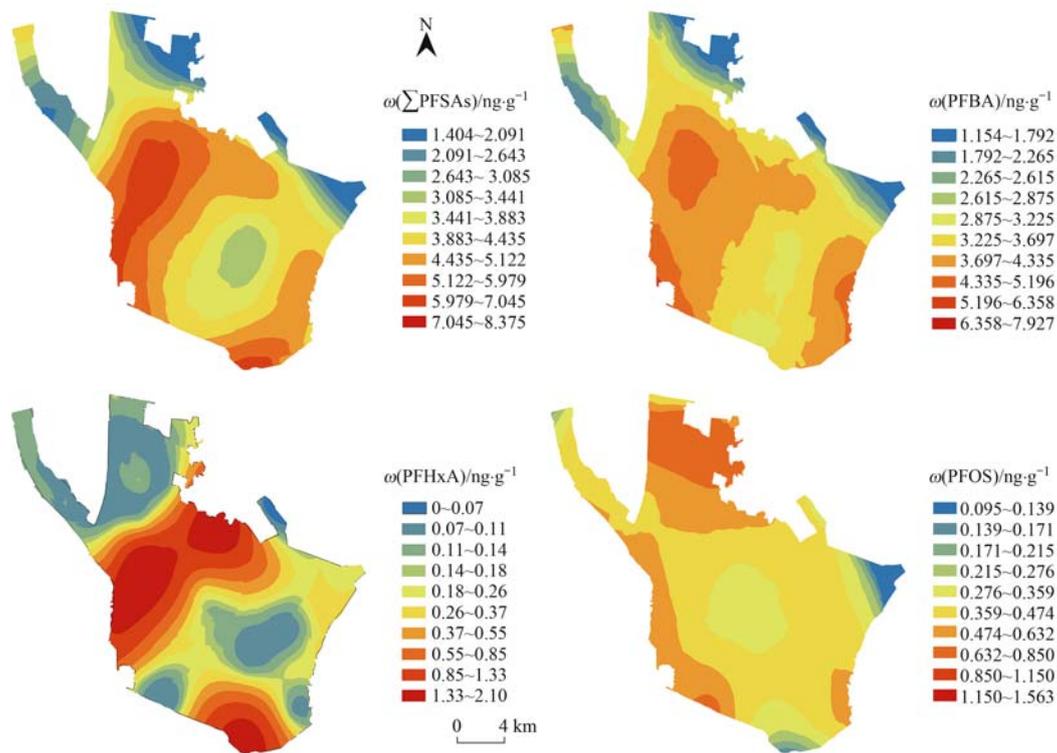
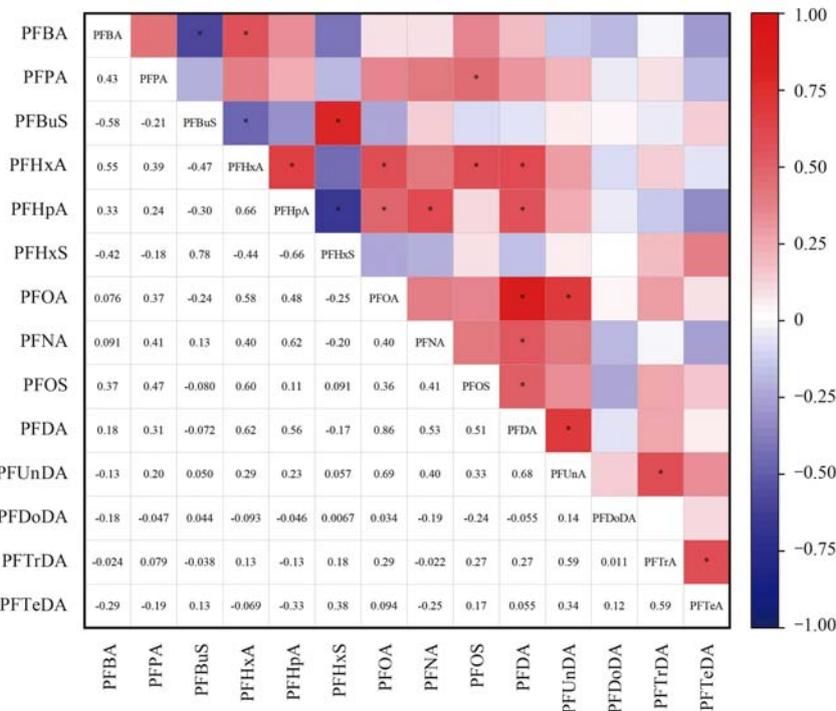


图 5 骆马湖沉积物中 PFASs 分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of PFASs in the sediments of Luoma Lake



\* 表述在 0.01 级别,相关性显著

图 6 骆马湖表层水中单个 PFASs 浓度的斯皮尔曼相关系数

Fig. 6 Spearman correlation coefficients for individual PFASs concentrations in surface waters of Luoma Lake

此可解释来自皮革和纺织品制造等行业. 因子 2 主要由 PFOS 和 PFPeA 组成, 占来源贡献总量的 27.10% PFOS 和 PFPeA 的存在可归因于金属电镀行业的工业排放<sup>[45]</sup>, 因此可解释金属电镀行业的影响. 因子 3 主要由 PFOA 和 PFDA 组成, 占来源贡献

总量的 49.43%, PFDA 的生产是有限的, 被认为是前体化合物的降解产物<sup>[66]</sup>, PFOA 是工业应用中最常用的 PFASs, 主要来源于纺织品阻燃、橡胶品的乳化、食品包装过程和纸类表面处理等<sup>[67]</sup>, 因此可解释来自纺织品阻燃、橡胶品的乳化、食品

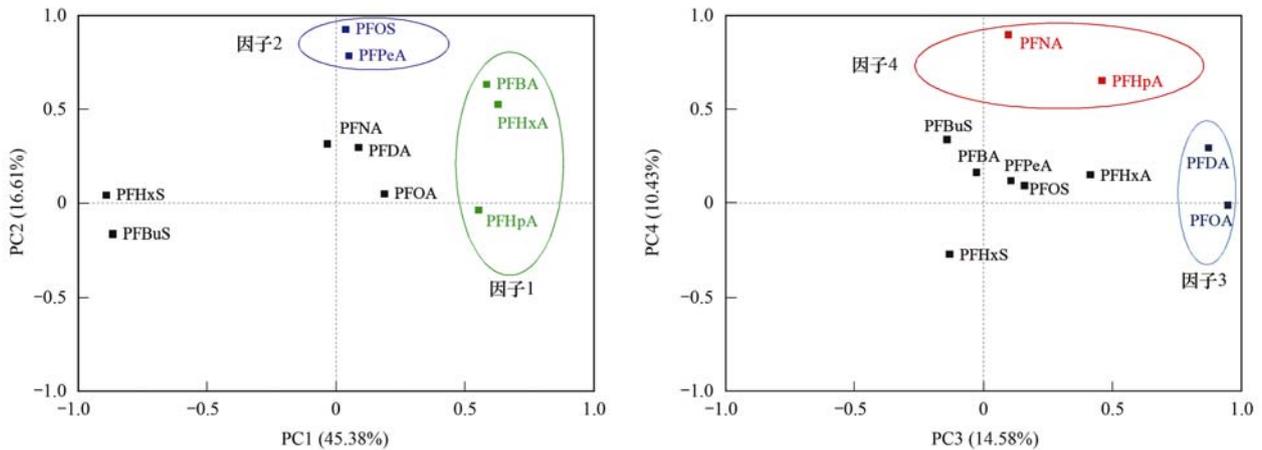


图 7 骆马湖表层水中 PFASs 的子载荷

Fig. 7 Loading factors of PFASs in surface water from Luoma Lake

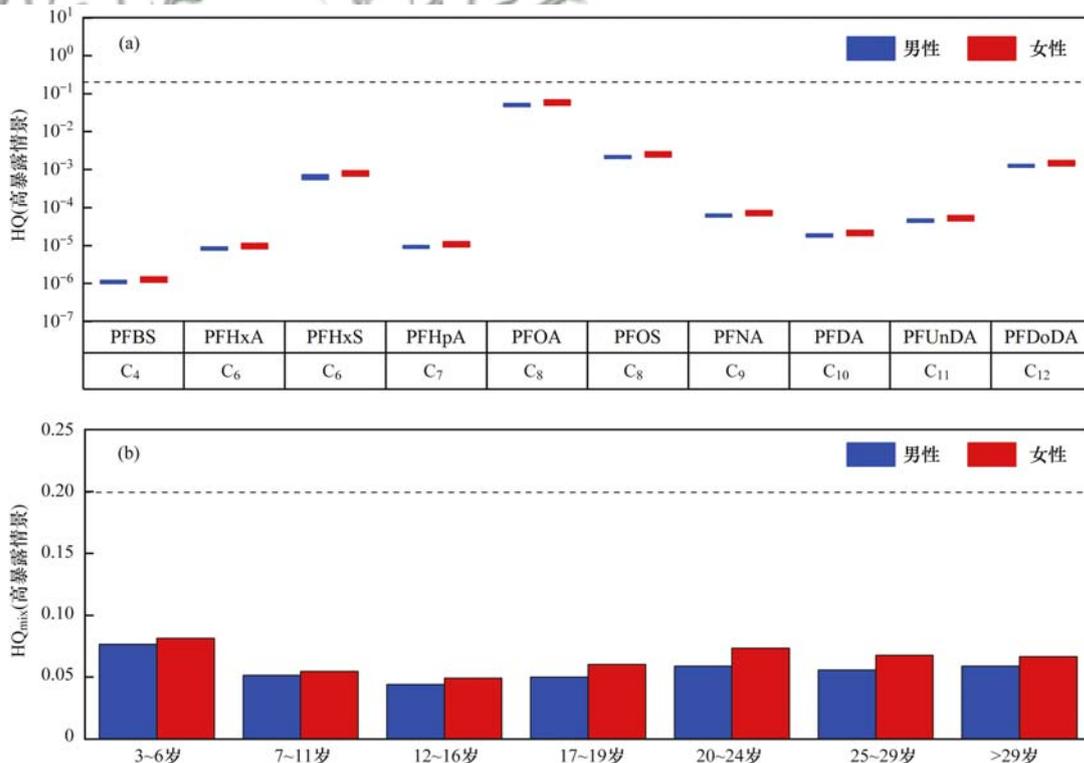
包装过程和纸类表面处理. 因子 4 主要由 PFHpA 和 PFNA 组成占来源贡献总量的 6.53%, PFHpA 和 PFNA 是传统 PFASs, 它们通常应用于含氟聚合物产品<sup>[20]</sup>, 因此可以解释含氟聚合物的生产.

### 2.4 健康风险评估

本研究用式(2)计算了 10 种 PFASs 在不同年龄不同性别中的 HQ 值(因为没有相关毒理学数据<sup>[37]</sup>, 计算不包括 PFTeA、PFTrA、PFBA 和 PFPeA).

健康风险评估如图 8 所示, 结果表明在高暴露背景情况下本研究计算的 PFASs 的 HQ 值全部低于

0.2 的阈值(图 8 中虚线), 其中, C<sub>8</sub> 的 PFOA 和 PFOS 的 HQ 值最高. 在所有的年龄和性别组中 PFASs 的 HQ<sub>mix</sub> 均低于 0.2 的阈值, 说明骆马湖作为宿迁和新沂的饮用水源地健康风险值较低. 其中 3~6 岁和 20~24 岁群体的 HQ<sub>mix</sub> 较高, 说明这两个年龄组对 PFASs 的易感程度更高. 其中 3~6 岁年龄组是因为个体体重较低, 20~24 岁年龄组的 HQ<sub>mix</sub> 值第二高是因为在相同日耗水量的条件下, 其体重低于其他年龄组. 并且由于体重相对较低, 女性的 HQ<sub>mix</sub> 值高于男性, 这说明 PFASs 的累积毒性对女性的风险大于男性.



(a) 各类 PFAS 的健康风险值, (b) PFASs 对于各个年龄段人类的累积健康风险值

图 8 PFASs 在高暴露情景时的健康风险评估

Fig. 8 Health risk assessment of perfluoroalkyl substances (PFASs) in the high-exposure scenario

从各类 PFASs 的 HQ 值和  $HQ_{mix}$  来看,健康风险不大,但 PFASs 长期暴露的直接摄入和生物累积风险不可忽视<sup>[12]</sup>。由于相关毒理学资料的缺乏,本研究并没有评价此次采样中检出含量较高的 PFPeA,并且现有的研究普遍认为膳食是最主要的 PFASs 暴露来源<sup>[68]</sup>,本研究对骆马湖水产品中的 PFASs 含量未作评价,在今后的研究中会重点关注。

### 3 结论

(1) 骆马湖表层水和沉积物中 PFASs 普遍被检出,表层水中  $\rho\left(\sum PFASs\right)$  范围为 46.09 ~ 120.34  $ng\cdot L^{-1}$  (平均值为 76.36  $ng\cdot L^{-1}$ ),沉积物中的  $\omega\left(\sum PFASs\right)$  范围为 2.22 ~ 9.55  $ng\cdot g^{-1}$  (平均值为 5.61  $ng\cdot g^{-1}$ ),其中表层水中的主要组分是 PFPeA ( $C_5$ ,质量分数为 37%) 和 PFOA ( $C_8$ ,质量分数为 33%),沉积物中的主要组分是 PFBA ( $C_4$ ,质量分数为 61%)。短链 PFASs 在骆马湖表层水和沉积物中占主要含量可能是因为前驱体和短链 PFASs 目前已被作为长链 PFASs 的替代品而被广泛使用。

(2) 骆马湖表层水和沉积物中 PFASs 有不同空间分布特征,北部入湖河流是骆马湖表层水中 PFASs 主要污染源,其浓度呈现由北向南递减的趋势,沉积物中 PFASs 的高含量区域则向南迁移,经过 Spearman 相关性分析得到骆马湖沉积物中的 TOC 和  $\sum PFASs$ 、PFBA 极显著相关,和 PFOS 显著相关。

(3) 通过 PCA-MLR 法进一步量化了骆马湖表层水中 PFASs 的潜在来源和贡献。主成分分析表明骆马湖表层水中 PFASs 主要有 4 种不同类型的污染源,多元线性回归计算出的贡献值表明,骆马湖表层水中 PFASs 主要来自纺织品阻燃、橡胶品的乳化、食品包装过程和纸类表面处理等行业,金属电镀行业,皮革和纺织品制造行业。

(4) 健康风险评估表明,在高暴露背景情况下,骆马湖表层水中 10 类 PFASs 单体和其累计值的 HQ 值均未达到健康风险评估的阈值,表明骆马湖表层水中 PFASs 处于较低健康风险水平。同时 3 ~ 6 岁和 20 ~ 24 岁群体对 PFASs 的易感程度更高,PFASs 的累积毒性对女性的风险大于男性。

#### 参考文献:

[1] Park M, Daniels K D, Wu S M, *et al.* Magnetic ion-exchange (MIEX) resin for perfluorinated alkyl substance (PFAS) removal in groundwater: roles of atomic charges for adsorption[J]. *Water Research*, 2020, **181**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115897.

[2] Kissa E. Fluorinated surfactants and repellents (2nd ed.) [M]. New York: CRC Press, 2001.

[3] Buck R C, Franklin J, Berger U, *et al.* Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2011, **7**(4): 513-541.

[4] Shao M H, Ding G H, Zhang J, *et al.* Occurrence and distribution of perfluoroalkyl substances (PFASs) in surface water and bottom water of the Shuangtaizi Estuary, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 675-681.

[5] Giesy J P, Naile J E, Khim J S, *et al.* Aquatic toxicology of perfluorinated chemicals [A]. In: Whitacre D M (Ed.). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* [M]. New York: Springer, 2010. 1-52.

[6] 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.

[7] Bossi R, Vorkamp K, Skov H. Concentrations of organochlorine pesticides, polybrominated diphenyl ethers and perfluorinated compounds in the atmosphere of North Greenland [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **217**: 4-10.

[8] Chen R Y, Li G W, Yu Y, *et al.* Occurrence and transport behaviors of perfluoroalkyl acids in drinking water distribution systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134162.

[9] Chen S, Jiao X C, Gai N, *et al.* Perfluorinated compounds in soil, surface water, and groundwater from rural areas in eastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **211**: 124-131.

[10] Eschauzier C, de Voogt P, Brauch H J, *et al.* Polyfluorinated chemicals in European surface waters, ground- and drinking waters [A]. In: Knepper T P, Lange F T (Eds.). *Polyfluorinated Chemicals and Transformation Products* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 73-102.

[11] Dong W H, Liu B L, Song Y, *et al.* Occurrence and partition of perfluorinated compounds (PFCs) in water and sediment from the Songhua River, China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, **74**(3): 492-501.

[12] Blaine A C, Rich C D, Sedlacko E M, *et al.* Perfluoroalkyl acid uptake in lettuce (*Lactuca sativa*) and strawberry (*Fragaria ananassa*) irrigated with reclaimed water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(24): 14361-14368.

[13] Makowska K, Martin J, Rychlik A, *et al.* Assessment of exposure to perfluoroalkyl substances (PFASs) in dogs by fur analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117435.

[14] Lau C, Butenhoff J L, Rogers J M. The developmental toxicity of perfluoroalkyl acids and their derivatives [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2004, **198**(2): 231-241.

[15] 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.

[16] Prevedouros K, Cousins I T, Buck R C, *et al.* Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(1): 32-44.

[17] Yang L P, Zhu L Y, Liu Z T. Occurrence and partition of perfluorinated compounds in water and sediment from Liao River and Taihu Lake, China [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(6): 806-814.

[18] Dong H K, Lu G H, Yan Z H, *et al.* Distribution, sources and

- human risk of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in a receiving riverine environment of the Nanjing urban area, East China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **381**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120911.
- [19] Wu J, Junaid M, Wang Z F, *et al.* Spatiotemporal distribution, sources and ecological risks of perfluorinated compounds (PFCs) in the Guanlan River from the rapidly urbanizing areas of Shenzhen, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125637.
- [20] Xiao S K, Wu Q, Pan C G, *et al.* Distribution, partitioning behavior and potential source of legacy and alternative per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in water and sediments from a subtropical Gulf, South China Sea [J]. *Environmental Research*, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111485.
- [21] Pan C G, Yu K F, Wang Y H, *et al.* Perfluoroalkyl substances in the riverine and coastal water of the Beibu Gulf, South China: spatiotemporal distribution and source identification[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 297-305.
- [22] Cao Y X, Cao X Z, Wang H, *et al.* Assessment on the distribution and partitioning of perfluorinated compounds in the water and sediment of Nansi Lake, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(10), doi: 10.1007/s10661-015-4831-9.
- [23] Yu N Y, Shi W, Zhang B B, *et al.* Occurrence of perfluoroalkyl acids including perfluorooctane sulfonate isomers in Huai River Basin and Taihu Lake in Jiangsu province, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(2): 710-717.
- [24] 刘倩, 庞燕, 项颂, 等. 骆马湖表层沉积物有机质分布特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(10): 4850-4856.  
Liu Q, Pang Y, Xiang S, *et al.* Distribution characteristics and source analysis of organic matter in surface sediments of Luoma Lake[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(10): 4850-4856.
- [25] 夏建东. 骆马湖沉积物重金属环境行为及源解析研究[D]. 安庆: 安庆师范大学, 2020.  
Xia J D. Study on environmental behaviors and source analysis of heavy metals in sediments of Luoma Lake[D]. Anqing: Anqing Normal University, 2020.
- [26] 陈宇, 许亚南, 项颂, 等. 骆马湖表层沉积物中 PPCPs 的赋存特征及生态风险评估[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(8): 1835-1843.  
Chen Y, Xu Y N, Xiang S, *et al.* Characteristics and ecological risk assessment of PPCPs in surface sediments of Luoma Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(8): 1835-1843.
- [27] 陈宇, 王涌涛, 黄天寅, 等. 骆马湖水体中药品及个人护理品的污染特征及风险评估[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(4): 902-909.  
Chen Y, Wang Y T, Huang T Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Luoma Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(4): 902-909.
- [28] 邹伟, 李太民, 刘利, 等. 苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(5): 1177-1187.  
Zou W, Li T M, Liu L, *et al.* Macrozoobenthic community structure and water quality assessment of Lake Luoma, Jiangsu province, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(5): 1177-1187.
- [29] 申霞, 洪大林, 谈永锋, 等. 骆马湖生态环境现状及其保护措施[J]. *水资源保护*, 2013, **29**(3): 39-43, 50.  
Shen X, Hong D L, Tan Y F, *et al.* Ecological environment of Luoma Lake and protection measures [J]. *Water Resources Protection*, 2013, **29**(3): 39-43, 50.
- [30] Zheng B H, Liu X L, Guo R, *et al.* Distribution characteristics of poly- and perfluoroalkyl substances in the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **61**: 97-109.
- [31] Thomaidi V S, Matsoukas C, Stasinakis A S. Risk assessment of triclosan released from sewage treatment plants in European rivers using a combination of risk quotient methodology and Monte Carlo simulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **603-604**: 487-494.
- [32] Ding J J, Shen X L, Liu W P, *et al.* Occurrence and risk assessment of organophosphate esters in drinking water from Eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **538**: 959-965.
- [33] Post G B, Gleason J A, Cooper K R. Key scientific issues in developing drinking water guidelines for perfluoroalkyl acids: contaminants of emerging concern[J]. *PLoS Biology*, 2017, **15**(12), doi: 10.1371/journal.pbio.2002855.
- [34] Riva F, Castiglioni S, Fattore E, *et al.* Monitoring emerging contaminants in the drinking water of Milan and assessment of the human risk [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2018, **221**(3): 451-457.
- [35] Yang Y Y, Toor G S, Wilson P C, *et al.* Micropollutants in groundwater from septic systems: transformations, transport mechanisms, and human health risk assessment [J]. *Water Research*, 2017, **123**: 258-267.
- [36] Warne M S J, Hawker D W. The number of components in a mixture determines whether synergistic and antagonistic or additive toxicity predominate: the funnel hypothesis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1995, **31**(1): 23-28.
- [37] Thomaidi V S, Tshouridou A, Matsoukas C, *et al.* Risk assessment of PFASs in drinking water using a probabilistic risk quotient methodology [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136485.
- [38] 国家体育总局. 2014 年国民体质监测公报 [EB/OL]. <https://www.sport.gov.cn/n315/n329/c216784/content.html>, 2015-11-25.
- [39] EPA. Exposure factors handbook: 2011 edition (EPA/600/R-09/052F) [EB/OL]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252>, 2011-10-03.
- [40] Schwanz T G, Llorca M, Farré M, *et al.* Perfluoroalkyl substances assessment in drinking waters from Brazil, France and Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **539**: 143-152.
- [41] EFSA. Perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA) and their salts scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain [J]. *EFSA Journal*, 2008, **6**(7), doi: 10.2903/j.efsa.2008.653.
- [42] 陈舒. 中国东部地区典型全氟化合物污染地理分布特征及来源辨析[D]. 北京: 中国地质科学院, 2016.  
Chen S. Distribution and source analysis of typical perfluorinated compounds in the eastern China and the Grand canal [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2016.
- [43] UNEP O. Global PFC Group Synthesis paper on per and polyfluorinated chemicals (PFCs) [EB/OL]. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/synthesis-paper-on-per-and-polyfluorinated-chemicals.htm>, 2020-10-10.
- [44] Pico Y, Blasco C, Farré M, *et al.* Occurrence of perfluorinated compounds in water and sediment of L'Albufera Natural Park (València, Spain) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(4): 946-957.

- [45] Dasu K, Xia X Y, Siriwardena D, *et al.* Concentration profiles of per- and polyfluoroalkyl substances in major sources to the environment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113879.
- [46] Wang N, Liu J X, Buck R C, *et al.* 6:2 Fluorotelomer sulfonate aerobic biotransformation in activated sludge of waste water treatment plants[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(6): 853-858.
- [47] Wang P, Lu Y L, Wang T Y, *et al.* Shifts in production of perfluoroalkyl acids affect emissions and concentrations in the environment of the Xiaoqing River Basin, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **307**: 55-63.
- [48] Guo R, Liu X L, Liu J, *et al.* Occurrence, partition and environmental risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in water and sediment from the Baiyangdian Lake, China[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-61651-6.
- [49] Lam N H, Cho C R, Lee J S, *et al.* Perfluorinated alkyl substances in water, sediment, plankton and fish from Korean rivers and lakes: a nationwide survey[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **491-492**: 154-162.
- [50] Groffen T, Wepener V, Malherbe W, *et al.* Distribution of perfluorinated compounds (PFASs) in the aquatic environment of the industrially polluted Vaal River, South Africa[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1334-1344.
- [51] Bai X L, Son Y. Perfluoroalkyl substances (PFAS) in surface water and sediments from two urban watersheds in Nevada, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **751**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141622.
- [52] 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.
- [53] 齐彦杰. 中国湖泊沉积物中全氟化合物的空间分布、历史沉积行为及源解析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Qi Y J. Spatial distribution, historical deposition behaviors and source apportionment of perfluoroalkyl substances in sediments from the lakes of China [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [54] 王志风. 经济欠发达地区饮用水源地生态补偿研究——以骆马湖为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Wang Z F, Study on the ecological compensation for the drinking water source in the less-developed area—a case of the Luoma Lake, China [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [55] Liu D, Wu S M, Xu H Z, *et al.* Distribution and bioaccumulation of endocrine disrupting chemicals in water, sediment and fishes in a shallow Chinese freshwater lake: implications for ecological and human health risks [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **140**: 222-229.
- [56] Meng L Y, Song B Y, Zhong H F, *et al.* Legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Bohai Sea and its inflow rivers [J]. *Environment International*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106735.
- [57] Li J, Ai Y F, Hu J R, *et al.* Polyfluoroalkyl substances in Danjiangkou Reservoir, China: occurrence, composition, and source appointment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **725**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138352.
- [58] Liu J, Zhao X R, Liu Y, *et al.* High contamination, bioaccumulation and risk assessment of perfluoroalkyl substances in multiple environmental media at the Baiyangdian Lake [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **182**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109454.
- [59] 张柳青, 彭凯, 周蕾, 等. 南水北调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3018-3029.
- Zhang L Q, Peng K, Zhou L, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in key lakes in the middle reaches of the east route of the South-North Water Diversion Project [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3018-3029.
- [60] 刘婕. 白洋淀多介质中PFASs的分布特征和生物富集效应研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2019.
- Liu J. Distribution characteristics and bioaccumulation of poly- and perfluoroalkyl substances in multiple environmental media at the Baiyangdian Lake [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2019.
- [61] Gao Y, Fu J J, Zeng L X, *et al.* Occurrence and fate of perfluoroalkyl substances in marine sediments from the Chinese Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **194**: 60-68.
- [62] Simcik M F, Dorweiler K J. Ratio of perfluorochemical concentrations as a tracer of atmospheric deposition to surface waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(22): 8678-8683.
- [63] Cui Y F, Wang Y H, Pan C G, *et al.* Spatiotemporal distributions, source apportionment and potential risks of 15 pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Qinzhou Bay, South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **141**: 104-111.
- [64] Qi Y J, Huo S L, Xi B D, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of PFASs in surface sediments from five lake regions, China [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep22674.
- [65] Xie L N, Wang X C, Dong X J, *et al.* Concentration, spatial distribution, and health risk assessment of PFASs in serum of teenagers, tap water and soil near a Chinese fluorochemical industrial plant[J]. *Environment International*, 2021, **146**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106166.
- [66] Young C J, Furdul V I, Franklin J, *et al.* Perfluorinated acids in Arctic snow: new evidence for atmospheric formation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(10): 3455-3461.
- [67] 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.
- [68] 姚谦, 田英. 中国人群全氟化合物健康风险评估研究进展 [J]. *上海交通大学学报(医学版)*, 2021, **41**(6): 803-808.
- Yao Q, Tian Y. Research progress in health risk assessment of perfluorinated compounds among Chinese population [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science)*, 2021, **41**(6): 803-808.

## CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China .....	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	.....	.....
.....	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method .....	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Xiamen Port .....	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	.....	.....
.....	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM <sub>2.5</sub> Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter .....	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan .....	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area .....	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 .....	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain .....	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	.....	.....
.....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	.....	.....
.....	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze .....	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors .....	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	.....	.....
.....	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region .....	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake .....	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake .....	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River .....	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff .....	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems .....	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	.....	.....
.....	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin .....	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water .....	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing .....	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition .....	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment .....	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> .....	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors .....	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater .....	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge .....	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 .....	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years .....	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	.....	.....
.....	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt .....	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area .....	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area .....	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China .....	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	.....	.....
.....	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility .....	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan .....	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems .....	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas .....	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	.....	.....
.....	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas .....	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils .....	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	.....	.....
.....	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)