

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)
全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析	任晓松, 李昭睿 (1243)
京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式	田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)
太原市“十四五”规划大气污染防治政策的 CO ₂ 协同效益评估	肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)
湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同	李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)
“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径	张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)
郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益	邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)
长江中游城市群城市化对 PM _{2.5} 浓度的多尺度驱动机制	张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)
天山北坡城市群 PM _{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析	王相男, 张喆, 刘方青 (1315)
天津市 PM _{2.5} 碳组分空间差异性来源解析	武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)
贵阳市花溪城区大气 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的变化特征及来源解析	桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)
新乡市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析	刘恒嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)
2017~2018 年冬季菏泽大气 PM _{2.5} 中金属元素特征及健康风险评估	杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)
北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析	潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)
南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析	罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)
苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化	吴也正, 张鑫, 顾钧, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)
长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源	卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张森霖, 黄张根 (1402)
基于 PCA-APCS-MLR 模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析	崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隼 (1415)
重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价	张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)
长江流域微塑料污染特征及生态风险评估	李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)
宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算	丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)
汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估	赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)
宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价	高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)
浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价	钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)
鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析	马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)
杭州湾南岸 20 a 水质净化功能变化及预测	王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)
不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例	代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)
长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素	刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)
富营养化湖泊藻华降解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应	张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛杰 (1539)
紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平	林涛, 苑宇杰 (1553)
再生水消毒副产物的检测、生成与控制	廖雨枫, 王正, 潘旸, 李爱民 (1561)
3 种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性	何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)
基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析	傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)
基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析	赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)
定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPP _{GS} 变化的影响	徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志成, 郭振东 (1615)
基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响	李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)
连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响	鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)
4 种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响	丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)
不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系	邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)
黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征	王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)
覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响	宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)
秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响	胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)
耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响	陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)
基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测	王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)
广西贺州市典型矿区周边耕层土壤 Cd 通量特征	杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娥, 蔡贺清 (1739)
基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估	杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)
湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价	肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)
典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估	沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)
省级尺度土壤 As 迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例	董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)
谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应	易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)
EDDS 对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响	刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)
叶面调理剂对复合污染农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 累积的阻控效应	肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)
民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征	李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制	李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)
养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险	白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)
玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征	高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)
不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应	闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析

马妍¹, 孙晨^{1,2}, 毕筋乐^{1,2}, 张波涛^{2*}, 刘艳^{3*}, 邵鹏³, 刘统^{1,2}, 王圣瑞², 钟文军⁴

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 北京市科学技术研究院分析测试研究所(北京市理化分析测试中心), 北京 100094; 4. 江西省林业科学院湿地生态资源研究中心, 南昌 330032)

摘要: 对鄱阳湖沉积物中16种多环芳烃(PAHs)含量、时空分布及影响因素进行了研究,并对湖体不同区域的PAHs进行定量源解析. PAHs在沉积物中广泛存在,所有点位表层沉积物中 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 范围为203~2 318 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中湖体表层沉积物中PAHs含量高于入湖河流表层沉积物中PAHs含量. 鄱阳湖PAHs环数比例大小依次排列为:4环>5环>6环>3环>2环,4环PAHs组成占主导地位,其含量占 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的比例高达86.11%. 2~3环以及部分4环PAHs包括Flua和Pyr更容易受到SOM的影响,4~6环PAHs更容易受到ORP及重金属等环境因子的影响. 在空间分布上, $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的较高含量位于湖体邻近都昌县与鄱阳县区域,此区域地形相对封闭,与周围区域水流交换量小,不利于污染物的迁移、转化及降解. 在时间分布上,PAHs含量水平的变化与江西省GDP的发展呈现出高度一致性,经济发展和人类活动影响可能是导致PAHs含量水平不断增加的主要原因. 鄱阳湖表层沉积物PAHs的主要来源包括石油污染及石油、煤炭和生物质燃烧源,不同区域PAHs来源存在一定的空间差异. 本研究可为鄱阳湖表层沉积物中PAHs污染情况提供参考,对鄱阳湖生态环境保护和治理具有重要意义.

关键词: 鄱阳湖; 沉积物; 多环芳烃(PAHs); 时空分布; 源解析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1492-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304004

Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake

MA Yan¹, SUN Chen^{1,2}, BI Jia-le^{1,2}, ZHANG Bo-tao^{2*}, LIU Yan^{3*}, SHAO Peng³, LIU Tong^{1,2}, WANG Sheng-rui², ZHONG Wen-jun⁴

(1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Analysis and Testing, Beijing Academy of Science and Technology (Beijing Center for Physical & Chemical Analysis), Beijing 100094, China; 4. Wetland Ecological Resources Research Center, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang 330032, China)

Abstract: The concentrations, spatial-temporal distribution, and influencing factors of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediments of Poyang Lake were studied, and a quantitative source analysis of PAHs in different areas of the lake was conducted. PAHs were widespread within the sediments. The concentrations of $\sum_{16} \text{PAHs}$ in the surface sediments of all sites ranged from 203 to 2 318 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The concentrations of PAHs in the surface sediments of the lake body were higher than those in the surface sediments of the inlet rivers. The ratio of PAHs in Poyang Lake was 4 rings > 5 rings > 6 rings > 3 rings > 2 rings; the composition of 4-ring PAHs was dominant, and its content accounted for 86.11% of $\sum_{16} \text{PAHs}$. The 2- and 3-ring and some 4-ring PAHs, including Flua and Pyr, were more susceptible to SOM, and the 4 through 6-ring PAHs were more susceptible to ORP and heavy metals and other environmental factors. Spatially, the higher concentration of $\sum_{16} \text{PAHs}$ occurred in the area of the lake adjacent to Duchang County and Poyang County, where the terrain was relatively closed, and the water exchange with the surrounding area was less than that in other sections, which was not conducive to the migration, transformation, and degradation of pollutants. In the temporal distribution, the changes in PAHs concentration level and the development of GDP in Jiangxi Province showed high consistency, and the influence of economic development and human activities might have been the main reason for the increasing PAHs concentration level. The main sources of PAHs in surface sediments of Poyang Lake included petroleum pollution and oil and coal and biomass combustion sources, and there were some spatial differences in PAHs sources in different regions. This study can provide a reference for PAHs pollution in surface sediments of Poyang Lake, which is important for the ecological environmental protection and management of Poyang Lake.

Key words: Poyang Lake; sediment; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); spatial and temporal distribution; source analysis

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类含有2个及以上苯环的芳香烃类化合物,是重要的有机化工基础原料,主要应用于医药品制造、染料、塑料制品、杀虫剂、橡胶以及油漆等. 其来源分为自然源和人为源:自然源主要来自陆地、水生植物和微生物的生物合成过程,另外森林和草原的天然火灾及火山的喷发物和化石燃料、木质素和底泥中也存在PAHs;与自然源相比,人为源是

PAHs最为主要的来源,主要包括各种矿物燃料(如煤、石油和天然气等)、木材、纸以及其他含碳氢化合物的不完全燃烧以及车辆和船舶运输中尾气的排放等^[1,2]. 由于PAHs具有辛醇-水分配系数大、溶沸

收稿日期: 2023-04-01; 修订日期: 2023-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077295); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200101, 2018YFD0900805)

作者简介: 马妍(1983~),女,博士,副教授,主要研究方向为环境化学, E-mail: mayan2202@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangbotao@126.com; xgly36@163.com

点高、溶解度小、亲脂性强、蒸气压大和易挥发等特点,导致其容易在不同的环境介质中积累,并可随大气沉降进行远距离迁移^[3]。又因PAHs具有潜在毒性、致癌性、致突变性和生物蓄积性^[4],可通过摄入、皮肤吸收和吸入等方式进入人体从而影响人类健康,因此根据PAHs的危害性,美国环保署(United States Environmental Protection Agency, US EPA)于1976年将16种PAHs列为优先控制污染物^[5],我国也将7种PAHs列入优先控制污染物名单。

鄱阳湖是长江流域最大的通江湖泊,也是我国最大的淡水湖,位于长江中下游南岸,江西省中北部,位于东经115°49′~116°46′、北纬28°24′~29°46′之间。鄱阳湖承纳赣江、抚河、信江、饶河和修河等五大河及博阳河、漳田河和潼津河等小支流之来水,构成完整的鄱阳湖水系^[6],经湖口注入长江。鄱阳湖水系呈辐射状,其流域面积162 225 km²,约占长江流域面积的9%,涉及赣、湘、闽、浙和皖等5省,其中江西省境内面积15.67万km²,占整个鄱阳湖水系的96.6%。鄱阳湖的多年平均注入长江的水量为1 436亿m³,约占长江干流多年平均径流量的15.6%,其水量超过黄、淮和海三河入海水总和^[7]。鄱阳湖湖面随季节变化,最大水深29.19 m,平均水深5.1 m,水位落差大(7 m以上),是典型的过水性、吞吐型和季节性湖泊,具有“高水湖相、低水河相”,“洪水一片、枯水一线”的自然地理特征^[8]。

本课题组研究了鄱阳湖1996~2016年间湖体与出入湖河流之间水质的关联性^[9],发现湖体与5条主要支流的总氮和总磷之间存在较强的相关性;区铭亮等^[10]对鄱阳湖5条主要支流重金属出入湖通量进行了研究,发现湖体与支流的重金属含量之间存在较强相关性;Wang等^[11,12]采用去趋势交叉互相关分析及重标度极差分析对鄱阳湖进出口高锰酸盐指数进行了研究,结果表明湖体与出入湖河流高锰酸盐指数之间存在明显相关性。Zhang等^[13]研究了鄱阳湖雨季和旱季不同环境介质(土壤、水、空气和沉积物)中PAHs的时空分布情况,并使用特征分子比值法对PAHs进行源解析研究;Li等^[14]使用特征分子比值法和正定矩阵因子分解模型法对鄱阳湖表层及柱状沉积物样品中PAHs进行研究,分析了鄱阳湖PAHs的潜在来源。通过文献调研发现,目前缺乏对鄱阳湖入湖河流和湖体PAHs之间关系和鄱阳湖PAHs时空分布的研究。探讨其与经济发展之间关系,将对研究区的环境管理及其环境修复工作具有重要的指导价值。

基于此,本文以鄱阳湖及其入湖河流为研究对象,研究表层和柱状沉积物中的PAHs含量、组成和

分布特征,探究其与人类活动之间的关系。根据鄱阳湖的地势和水文特征等对鄱阳湖进行区域划分,利用皮尔逊相关性分析研究各入湖河流与湖体不同区域之间的关系。利用冗余分析研究PAHs与重金属、盐度和有机质等其他环境因子之间的关系。使用特征分子比值法和正定矩阵因子分解模型法对鄱阳湖不同区域表层沉积物中PAHs潜在来源进行解析,以为鄱阳湖生态环境保护和治理提供科学依据,并为国内外其他连通性湖泊,例如我国的洞庭湖、呼伦湖及南美洲的马拉开波湖和非洲的恩加米湖等的相关研究提供重要借鉴。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究分别于2021年4月下旬的平水期和2021年7月下旬丰水期,对鄱阳湖表层沉积物和柱状沉积物进行采样,根据鄱阳湖流域的地势、独特的水文条件、受长江及“五河”来水的影响、现场勘探情况以及各采样点位之间的相关性分析结果,将其空间分为A、B、C、D和E这5个主要区域,其中A区为受长江影响较大的鄱阳湖北部区域,B区为鄱阳湖国家自然保护区及其毗邻水域,C区为南矶湿地国家级自然保护区及其毗邻水域,D区位于都昌县与鄱阳县以南、长山群岛以北湖区,E区为受饶河影响较大的长山群岛以南的区域,R为入湖河流采样点,Z1为柱状样品采样点,采样点位如图1。

采用不锈钢抓斗底泥采样器获取鄱阳湖表层沉积物样品。将2 kg沉积物样品转移并密封至样品容器中,并置于带有冰袋的保温箱中,样品于12 h内转移至冰箱中冷冻至-20℃。采用自制重力岩芯采样器在湖中心采集柱状沉积物样品(预估深度为60 cm左右),转移至实验室进行分片处理,按顺序分成2 cm或5 cm的薄片,用铝纸进行包裹,放入密封袋进行封存。用多参数水质分析仪(Horiba U-50,日本)测量同点位物理化学值,如温度(*T*)、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO)和氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)。所有沉积物样品在船上时均保存在带冰袋的保温箱中,并尽快转移到实验室进行下一步处理。

1.2 样品前处理和分析方法

使用FD-1A-50+型冷冻干燥机(博医康,北京)对沉积物样品进行48 h的冷冻干燥,冷冻干燥后的样品放入玛瑙研钵中研磨,研磨均匀后,通过50目不锈钢筛网,去掉石块和树根等大颗粒物质,过筛后的样品储存于广口茶色玻璃瓶中密封,转移至冰箱中冷冻-20℃保存。

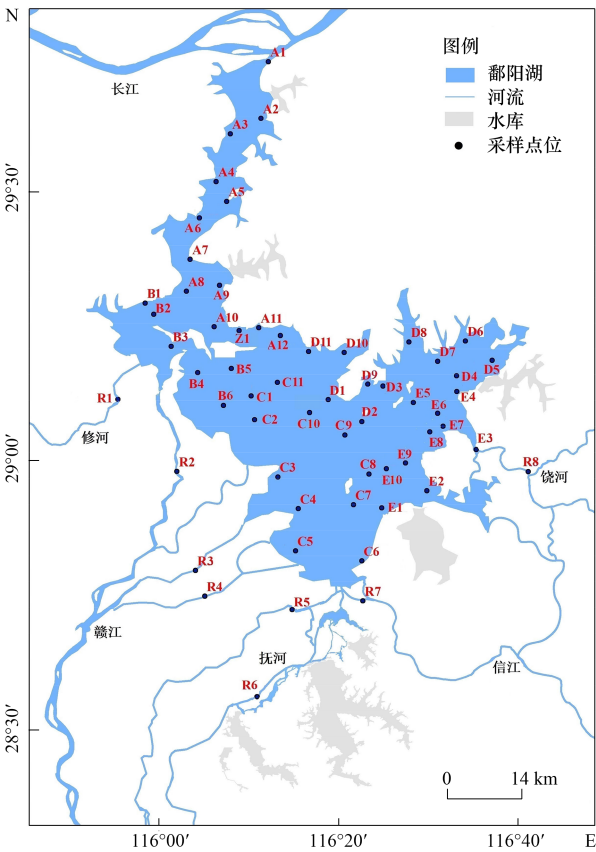


图1 鄱阳湖采样点位示意
Fig. 1 Sampling sites of Poyang Lake

使用加速溶剂萃取系统 (accelerated solvent extraction, ASE, 350, Thermo Fisher Scientific, 美国) 萃取沉积物中的 PAHs. ASE 操作条件为: 萃取溶剂为正己烷和丙酮 (体积比, 1:1); 提取温度 100℃; 提取压强为: 10.34 MPa; 静态提取时间 5 min; 冲洗体积 60%; 循环次数 2 次; 吹扫时间 60 s.

使用岛津气相色谱-质谱联用仪 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS, QP-2010, Shimadzu, 日本) 对 16 种目标 PAHs 的保留时间和特征离子峰进行定性和定量研究, 表 1 为 16 种目标 PAHs 的理化性质信息. 色谱条件为: 进样口温度为 250℃, 进样方式为不分流; 升温程序: 将气相烘箱的温度设置在 60℃, 持续 1 min, 然后在 20℃·min⁻¹ 时提高到 220℃, 在 5℃·min⁻¹ 时提高到 280℃; 载气: 氦气, 流速为 1.0 mL·min⁻¹, 压力为 57.4 kPa; 色谱柱: DB-5MS 色谱柱 (30.0 m×0.25 mm, 0.25 μm). 质谱条件为: EI 离子源, 离子源温度为 250℃, 接口温度为 280℃, 溶剂延迟时间为 5 min, 检测器电压为 0.15 kV. 数据采集方式选择离子扫描模式 (SIM).

1.3 其他参数测定方法

使用高纯锗伽马能谱仪 (GWL-120-15, Ortec, 美国) 测定柱状沉积物样品中 ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 的活度, γ 能谱仪的测定范围为 10 keV~10 MeV, 能量峰效率刻度为 46.84 keV, 测定时间在 24 h 以上, 测量误差小于 5%.

使用荧光光谱仪 (X-MET8000, 日立, 上海) 测定表层沉积物样品中金属的含量, 每个样品平行测定 3 次, 相对偏差在 -3.7%~1.4% 之间, 数据稳定, 重现性好.

使用烧失重法测定沉积物的有机质 (sediment organic matter, SOM), 有机质含量的计算公式见式 (1).

$$SOM(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \times 100 \tag{1}$$

表 1 16 种 PAHs 的理化性质信息
Table 1 Information on the physicochemical properties of 16 PAHs

名称	英文名称	简写	CAS 号	熔点/℃	沸点/℃	lg <i>K</i> _{ow}	环数
萘	naphthalene	Nap	91-20-3	81	218	3.33	2
萘烯	acenaphthylene	Acy	208-96-8	93.9	279	4.08	3
萘	acenaphthene	Ace	83-32-9	90.0	280	4.32	3
芴	fluorene	Flu	86-73-7	115	295	4.17	3
菲	phenanthrene	Phe	85-01-8	101	340	4.55	3
蒽	anthracene	Ant	120-12-7	216	340	4.54	3
荧蒽	fluoranthene	Flua	206-44-0	108	380	5.53	4
芘	pyrene	Pyr	129-00-0	150	399	5.14	4
苯并[a]蒽	benz(a)anthracene	BaA	56-55-3	225	448	5.91	4
䟽	chrysene	Chr	218-01-9	159	437	5.84	4
苯并[b]荧蒽	benzo(b)fluoranthene	BbF	205-99-2	166	446	6.60	5
苯并[k]荧蒽	benzo(k)fluoranthene	BkF	207-08-9	217	480	7.60	5
苯并[a]芘	benzo(a)pyrene	BaP	50-32-8	177	495	6.04	5
二苯并[a,h]蒽	benzo(k)tetraphene	DahA	53-70-3	268	524	6.75	5
苯并[g,h,i]芘	benzo(g,h,i)perylene	BghiP	191-24-2	277	500	6.87	6
茚并[1,2,3-c,d]芘	indeno(1,2,3-cd)pyrene	InP	193-39-5	164	536	7.70	6

式中, M_0 为坩埚置于烘箱中于 105℃ 下恒温干燥至恒重, 冷却至室温后的重量, M_1 为称取 5 g 沉积物样品于坩埚中, 置于烘箱中于 105℃ 下恒温干燥至恒重, 冷却至室温后的重量, M_2 为装有样品的坩埚在马弗炉中煅烧 2~3 h (450℃), 冷却至室温后的重量。

使用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, Malvern, 英国) 测定沉积物样品的粒径, 测定范围为 0.02~2 000 μm , 样品平行分析误差 <5%, 样品粒度组成按以下粒径范围划分: 黏土 (<4 μm)、粉砂 (4~63 μm) 和砂 (>63 μm)。

1.4 质量控制

整个实验过程中所用耗材为玻璃、不锈钢或者聚四氟乙烯材质。为保证数据的准确性, 在分析过程中采用空白实验、加标回收和平行样品等方法控制测定质量, 本研究中所有样品采用 3 个平行样品进行检测, 空白实验中未检测出目标物质, PAHs 回收率为 75.7%~103.6%, 16 种 PAHs 的检出限范围为 1.8~9.7 $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$, PAHs 含量以沉积物干重表示。

1.5 源解析方法

采用特征分子比值法和正定矩阵因子分解模型法 (positive matrix factorization, PMF) 对鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 进行源解析。特征分子比值法是判定环境中 PAHs 来源的最广泛的方法之一, 其判定标准如表 2 所示^[15]。

PMF 模型是 Paatero 和 Tapper 在 20 世纪 90 年代初提出的一种经典的多元因子分析工具, 可应用于大气、土壤和沉积物中 PAHs 的定量源解析^[16, 17]。本研究使用美国环保署发布的 PMF 5.0 模型对鄱阳湖沉积物 PAHs 的潜在来源进行分析, 其计算方法如式 (2) 所示:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} + E_{ij} \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为原始矩阵, 代表第 i 个样品的第 j 个测定指标的含重; G_{ik} 为源贡献矩阵, 代表 k 对第 i 个样品的贡献率; F_{kj} 为源成分矩阵, 代表 k 中第 j 个样品的测定含重; E_{ij} 为残差矩阵。

表 2 PAHs 来源判定标准

Table 2 Criteria for determining the source of PAHs

PAHs	石油燃烧	煤炭燃烧	草和木材燃烧	石油源
Ant/(Ant+Phe)	>0.1	>0.1	>0.1	<0.1
Flu/(Flu+Pyr)	0.4~0.5	>0.5	>0.5	<0.4
BaA/(BaA+Chr)	0.2~0.35	>0.35	>0.35	<0.2
InP/(InP+BghiP)	0.2~0.5	>0.5	>0.5	<0.2

2 结果与讨论

2.1 鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 含量及影响因素

2.1.1 鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 含量及与入湖河流之间的关系

鄱阳湖表层沉积物中 16 种 PAHs 含量范围及检出率如表 3 所示, 16 种 PAHs 均有检出。在入湖河流中, 除 Phe 未检出外, 有 4 种 PAHs 的检出率高达 100%, 其余 7 种 PAHs 的检出率在 42.9%~71.4% 之间, $\omega(\sum_{16} \text{PAHs})$ 范围为 7.34~306.58 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 108.50 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在鄱阳湖湖体中, Nap、BaP 和 DahA 这 3 种 PAHs 的检出率高达 100%, 其余 13 种 PAHs 的检出率在 24.5%~96.2% 之间, $\omega(\sum_{16} \text{PAHs})$ 范围为 5.71~2 112.03 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 321.71 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。无论入湖河流还是鄱阳湖湖体, 16 种 PAHs 中以 Nap、BaP 和 DahA 的检出率最高, 均为 100%, 表明这 3 种 PAHs 在整个鄱阳湖流域广泛存在; 在入湖河流中, 以 $\omega(\text{BbF})$ 、 $\omega(\text{BaA})$ 和 $\omega(\text{InP})$ 的平均值最高, 分别为 15.26、13.77、9.82 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 在鄱阳湖湖体中, 以 $\omega(\text{BbF})$ 、 $\omega(\text{Flua})$ 和 $\omega(\text{Pyr})$ 的平均值最高, 分别为 53.50、42.57、36.42 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与国外湖泊表层沉积物中 PAHs 含量相比^[18, 19], 鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 含量低于加拿大密歇根湖 (均值 2 467.0 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和欧洲埃斯库拉湖 (均值 456.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 中 PAHs 含量, 高于欧洲拉卡尔德拉湖 (均值 142.3 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和日本镇海湾 (均值 208.0 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 中 PAHs 含量; 与我国湖泊表层沉积物中 PAHs 含量相比^[20~25], 鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 含量低于太湖 (均值 1 630.0 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、洞庭湖 (均值 738.3 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和呼伦湖 (均值 596.5 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 中 PAHs 含量, 高于博斯腾湖 (均值 262.3 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 中 PAHs 含量。

采用皮尔逊相关性分析研究了 8 个入湖河流采样点 (R1~R8) 和鄱阳湖湖体 5 个主要区域 (A~E 区) 之间的关系, 可以得出 R1 和 R2 采样点与 B 区各采样点存在强显著的正相关关系, 相关性系数在 0.718~0.969 ($P<0.01$) 之间。R1 和 R2 分别位于修河和赣江北支, 修河是江西省九江市境内最大的河流, 也是长江中下游重要的水源涵养地和沿岸居民的生产和生活用水取水地; 赣江作为长江的重要支流, 是长江下游流域的重要水源, 由于赣江上游是我国有色金属矿产资源十分丰富的地区, 矿产资源的大规模开采导致周边水土环境受到不同程度的污染。湖体 B 区与修河及赣江北支接界, 从而受这两条入湖河流的影响较大, 三者之间存在显著正相关关系。R3~R7 与 C 区 81.8% 的采样点之间存在强显著正相关关系, 相

关性系数在 0.626~0.977 ($P<0.01$) 之间, R3~R7 分别位于赣江中支、赣江南支、抚河西干渠、抚河东干渠和信江, 抚河位于江西省东部, 是鄱阳湖水系主要河流之一, 是江西省第二大河流, 流域农业和矿产资源丰富; 信江是江西省境内较大河流之一, 也是鄱阳湖水系五大河流之一, 流域内农业、森林和矿产资源丰富. 湖体 C 区与这几条河流及支流交界, 从而受其影响较大. R8 与 D 区和 E 区部分采样点之间存在强显著正相关关系, R8 与 D 区 45.5% 的采样点之间的相关性系数在 0.627~0.977 ($P<0.01$) 之间, 与 D 区 27.3% 的采样点之间的相关性系数在 0.558~0.608

($P<0.05$) 之间; R8 与 E 区 40% 的采样点之间的相关性系数在 0.627~0.959 ($P<0.01$) 之间, 与 E 区 50% 的采样点之间的相关性系数在 0.518~0.614 ($P<0.05$) 之间. R8 位于饶河, 饶河流域广大, 是赣东北地区重要的水源地, 流域内有大型水库及配套灌溉渠系, 对与其接界的 E 区及处于 E 区上游的 D 区影响较大. A 区位于鄱阳湖北部, 与长江相连, 更多受到长江来水及渔船和航运等因素的影响^[26]. 总体来看, 鄱阳湖湖体沉积物中 PAHs 含量高于入湖河流沉积物中, 表明河流输入可能是污染物进入鄱阳湖湖体的重要途径^[27], 湖区径流带入的污染物相对较少.

表 3 鄱阳湖湖体和入湖河流沉积物中 PAHs 含量及检出率¹⁾

Table 3 Concentration and detection rate of PAHs in the sediment of lake and inlet rivers of Poyang Lake

PAHs	入湖河流				鄱阳湖湖体			
	Min	Max	Mean	FOD	Min	Max	Mean	FOD
Nap	1.57	16.00	6.95	100	1.61	52.75	9.44	100
Acy	ND	8.08	4.33	57.1	ND	21.67	8.62	94.3
Ace	ND	8.24	2.97	42.9	ND	25.12	5.11	47.2
Flu	ND	2.15	0.91	71.4	ND	23.82	3.71	84.9
Phe	ND	ND	ND	—	ND	78.3	7.29	24.5
Ant	ND	8.20	4.83	71.4	ND	29.65	9.89	94.3
Flua	ND	24.49	8.84	57.1	ND	227.05	42.57	92.5
Pyr	ND	24.05	7.37	57.1	ND	209.89	36.42	94.3
BaA	ND	32.18	13.77	57.1	ND	166.86	30.87	88.7
Chr	ND	24.85	8.77	71.4	ND	194.96	25.75	92.5
BbF	ND	60.21	15.26	42.9	ND	385.77	53.50	90.6
BkF	ND	17.48	5.72	57.1	ND	118.43	15.95	90.6
BaP	0.33	25.72	7.71	100	0.23	227.84	21.74	100
DahA	0.22	27.70	8.50	100	0.34	208.66	21.96	100
BghiP	ND	6.90	2.75	71.4	ND	47.02	4.48	75.5
InP	0.24	32.29	9.82	100	ND	233.57	24.42	96.2
$\sum_{16} \text{PAHs}$	7.34	306.58	108.50	—	5.71	2 112.03	321.71	—

1) Min 表示最小含量, Max 表示最大含量, Mean 表示含量平均值, 单位均为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; FOD 表示检出率, 单位为%; ND 表示小于仪器检测范围或未检出

2.1.2 鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 组成

图 2 为鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 同系物组成, 从中可以看出整个鄱阳湖流域以 BbF、Flua 和 Pyr 这 3 种 PAHs 同系物的含量最高, 与鄱阳湖湖体中平均浓度最高的前 3 种 PAHs 相一致, 三者总占比约为 40%, 三者含量占 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 比例分别为 16.52%、13.02% 和 11.13%. 这主要与 PAHs 的理化性质有关, Flua 和 Pyr 为 4 环 PAHs, BbF 为 5 环 PAHs, 其相对分子质量均在 200 以上, 随着相对分子质量和苯环数的增加, PAHs 单体的挥发性和溶解度减小, 疏水性增大, 具有沸点高、稳定性和亲脂性强等特点, 因此相较于低环 PAHs, 具有较高环数的 PAHs 更容易在沉积物中形成高浓度积累^[28], 这可能也是它们在表层沉积物中检出浓度更高的主要原因. 其中 BbF 是 2B

类致癌物, 主要来源于汽车尾气的排放以及化石燃料燃烧不充分时作为副产物排放, 由于其在人类生活生产中来源广泛^[29], 导致其在鄱阳湖流域 16 种 PAHs 中相对丰度最高, 这与国内其他湖泊沉积物 PAHs 中 BbF 相对丰度较高的结论相吻合. 整体来说, 鄱阳湖 PAHs 环数比例大小依次排列为: 4 环>5 环>6 环>3 环>2 环, 4 环 PAHs 组成占主导地位, 所占比例最大. 相对分子质量高的大环数 (≥ 4 环) PAHs 总量占 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的比例高达 86.11%, 相对分子质量低小环数 PAHs 含量占 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的 14.61%.

2.1.3 鄱阳湖表层沉积物中 PAHs 的影响因素

有研究表明, 环境介质中 PAHs 的迁移转化过程受水体理化性质 (如温度、盐度、营养盐和溶解氧等)、气象条件变化 (如温度、湿度、风向和风速等)

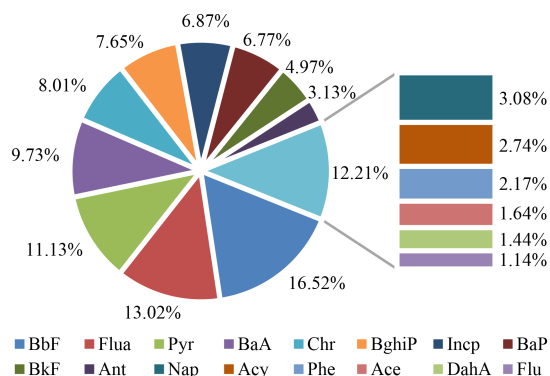


图2 鄱阳湖表层沉积物中PAHs同系物组成

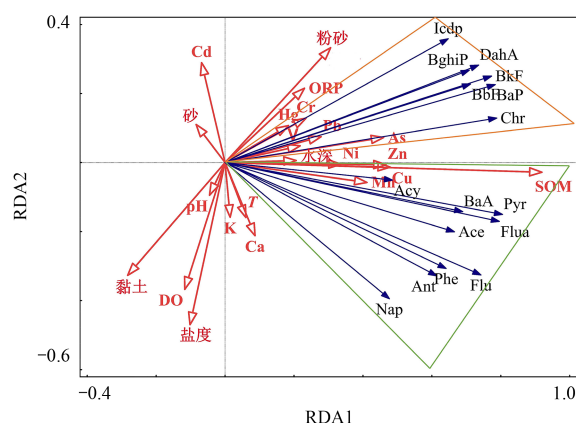
Fig. 2 Composition of PAHs congeners in the surface sediments of Poyang Lake

和土壤/沉积物性质(如有机质、温度、含水率和粒径)的影响,呈现出显著的空间分布特征和季节性污染差异^[30]。采用冗余分析(RDA)和皮尔逊相关性分析研究了鄱阳湖表层沉积物PAHs与其他环境因子之间的关系。从图3和皮尔逊相关性分析结果可以看出,大多数PAHs之间呈现显著正相关关系,相关性系数在0.613~0.999($P<0.01$)之间。低环PAHs(2~3环)包括Nap、Acy、Ace、Flu、Phe和Ant,以及部分4环PAHs包括Flua和Pyr与SOM之间呈现正相关关系($P<0.01$),同时与重金属Mn、Cu、Zn和Ni之间呈现正相关关系(图3中绿色框);高环PAHs(4~6环)包括Chr、BbF、BkF、BaP、DahA、BghiP和Incp与重金属As、Pb、Cr和Hg以及点位水深(depth)之间呈现正相关($P<0.05$)关系(图3中橙色框),表明大部分PAHs在鄱阳湖表层沉积物中具有相似的空间分布,其中低环PAHs更容易受到沉积物SOM的影响,这与PAHs自身的理化性质如相对分子质量、熔沸点、 $\lg K_{ow}$ 和疏水性等有关。有研究表明,SOM的疏水位点可以通过疏水效应、静电相互作用和化学键与PAHs相互作用,成为影响PAHs迁移扩散、生物累积及生物毒性的重要因素^[31,32]。高环PAHs更容易受到样品深度影响,且重金属As、Pb、Cr和Hg的分布相关,这可能与鄱阳湖周边存在大量工矿企业有关^[33]。此外,Ace与黏土之间呈现负相关关系($P<0.05$),说明沉积物粒径越小,越有利于Ace的富集。

2.2 鄱阳湖沉积物中PAHs的时空分布

2.2.1 鄱阳湖表层沉积物中PAHs的空间分布

使用ArcGIS绘制鄱阳湖表层沉积物中 $\sum_{16}$ PAHs的空间分布,以说明不同采样点之间的PAHs浓度变化,如图4所示。较高PAHs浓度位于采样点分区中的D区,即东至饶河入湖口、西至主航道、南至余干县鄱阳湖大道和北至长山群岛一带区域,2环和4环PAHs呈现出与 $\sum_{16}$ PAHs极为相似的空间分布规



蓝色箭头为16种PAHs,红色箭头为环境因子,绿色及橙色框为相关性较强的指标

图3 鄱阳湖表层沉积物PAHs与其他环境因子的关系

Fig. 3 Relationship between PAHs and other environmental factors in surface sediments of Poyang Lake

律。D区域位于湖体邻近都昌县与鄱阳县区域,此区域地形相对封闭,与周围区域水流交换量小,不利于污染物的迁移、转化及降解^[27,34,35];且都昌县隶属江西省九江市,位于江西省北部,居南昌、九江和景德镇“金三角”中心地带,人口密度约74万人,人类活动产生的污染物含量较高;都昌县2021年GDP总值246.85亿元,位于省内各县GDP排名前列,第二产业发达且工业发展迅速;城市化进程快,民间机动车保有量达70826辆,化石能源消耗逐渐增加,城市工业的快速发展导致工业废水和生活污水排放量激增^[36],其中包含的污染物可能会通过河流进入湖体。此外,5~6环PAHs呈现出较为相似的空间分布规律,较高浓度都出现在A区,即受长江影响较大的鄱阳湖北部区域。A区较高浓度的高环PAHs污染可能与它北通长江的重要地理位置有关,该区域是鄱阳湖与长江唯一的连接口,承担着繁重的航运运输工作,因此可能会带来一部分原油污染。与其他环数的PAHs相比,3环PAHs在空间分布上表现出明显差异,较高浓度出现在C区和E区,C区为南矶湿地国家级自然保护区及其毗邻水域,E区为受饶河影响较大的区域,且饶河下游流经景德镇焦化厂并与鄱阳湖主湖区主要污染源赣江毗邻,这可能是导致该区域3环PAHs浓度较高的主要原因。一般来说,低环PAHs是生物质燃烧不完全的产物,例如Acy和Flu是木材燃烧的标志化合物,因此这两个区域较高浓度的3环PAHs污染可能与周边城镇居民烹饪、取暖以及饶河水流带来的PAHs污染有关。总的来说,邻近城市的大量人类活动、汽车尾气排放、工矿企业生产活动以及海洋交通运输业和养殖业的发展,都可能对鄱阳湖的PAHs污染情况产生一定的影响,说明陆源输入是影响污染物分布的一个重要因素。

而采样点位分区中的B区(即鄱阳湖国家自然保护区及其毗邻水域)和C区(即南矶湿地国家级自然保护区及其毗邻水域)表层沉积物中PAHs浓度水平较低。鄱阳湖国家自然保护区建立于1983年,1988年晋升为国家级,1992年2月被《中国生物多样性保护现状评估》确认为具有全球意义的A级保护区,并被国务院指定列入《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》国际重要湿地名录,2000年被世界自然基金会定为全球重要生态区;南矶湿地国家级自然保护区于1997年经江西省人民政府批准为省级自然保护区,2008年1月由国务院批准为国家级自然保护区,地处赣江、鄱阳湖和长江的关键节点,具有良好的通江性,是鲤和鲫等经济鱼类的重要产卵和育肥场所以及长江中下游地区青、草、鲢、鳙、鳊、刀鲚和凤尾鱼等洄游型鱼类的主要洄游通道和避难所,对于鄱阳湖、赣江和长江渔业资源保护与可持续利用具有重要意义。这两个自然保护区区域人口密度较低,受人类活动的影响较小,且具有良好的气候和水文条件,这可能是该区域PAHs浓度水平较低的主要原因。

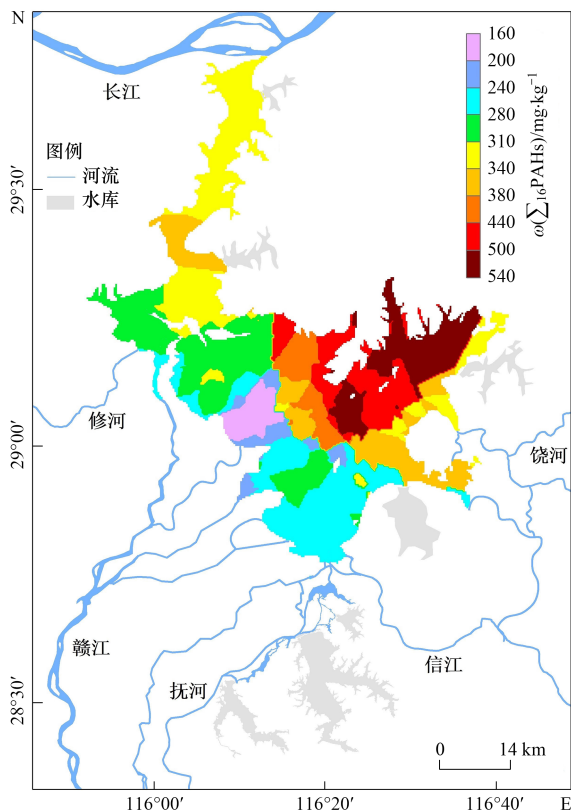


图4 鄱阳湖表层沉积物PAHs空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of PAHs in surface sediments of Poyang Lake

2.2.2 鄱阳湖沉积物中PAHs的时间分布及其与人类活动之间的关系

自然水体沉积物是地表物质长时间迁移的结

果,作为环境演变信息的载体,沉积物连续精确地记录了湖泊和海洋等水体的生态环境演变过程,在恢复历史气候和环境演化方面具有其他自然历史记录无法比拟的优势,因此,沉积物是水生环境中多环芳烃的天然“汇”和“库”^[37]。沉积物不仅是污染物主要的汇集地,而且还记录了周围环境PAHs污染现状、排放历史及排放源等信息^[38],河口和湖泊中PAHs的沉积记录可以反映能源消耗和污染排放的历史变化特征,从而可以提供当地经济发展的图景。根据²¹⁰Pb定年和¹³⁷Cs验证采样点位Z1柱状沉积物样品的同位素结果,计算得出鄱阳湖沉积物的沉积速率为 $1.18 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$,从而得到鄱阳湖柱状沉积物的年代序列为1970~2021年。柱状沉积物 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的时间分布及其与江西省GDP之间的关系如图5。

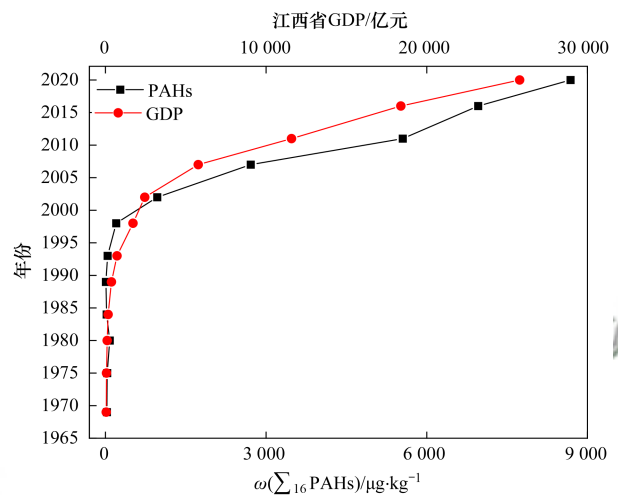


图5 江西省GDP与柱状样品 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 含量关系

Fig. 5 Relationship between GDP and column sample $\sum_{16} \text{PAHs}$ concentration in Jiangxi Province

从图5中可以看出,江西省GDP的发展与历年来PAHs浓度水平的变化呈现出高度一致性,总体来看,鄱阳湖PAH含量与江西省GDP发展均呈现增长趋势。1970~2000年,江西省GDP发展水平较低但处于稳步上升阶段,从1970年的58.37亿元逐步增长到2000年的2003.1亿元,这一阶段由于当地经济发展水平低,工业生产不发达,人口密度低,人类活动影响范围小^[39],PAHs浓度水平也较低。而在“十一五”期间(2006~2010年),江西省包括鄱阳湖流域的经济建设取得较快发展,根据2009年《江西省统计年鉴》初步核算,2008年江西省GDP为6934.2亿元,鄱阳湖生态经济区实现地区生产总值3948.17亿元,占全省GDP的50%以上,其经济增长速度领先于全省经济的发展速度,而鄱阳湖PAHs含量也在这一阶段明显上升,表明“十一五”期间经济的快速发展可能是导致当地PAHs含量增加的主要原因。2010年以后,

江西省城市化进程逐步加快,常住人口数量增加,工业发展提速,化石燃料消耗量增加,人们生活水平大幅提升;而鄱阳湖旅游产业逐渐发展,旅游业规模不断扩大,现代化建设不断增多^[40]. GDP的发展和人类活动的影响^[41]可能是导致PAHs含量不断增加的主要原因.

2.3 鄱阳湖沉积物多环芳烃源解析

根据特征分子比值法的判定标准^[42],由Flua/(Flua+Pyr)值(0~0.4)、InP/(InP+BghiP)值(0~0.2)、Ant/(Ant+Phe)值(0.1~1)和BaA/(BaA+Chr)(0.2~0.4)的比值关系,可以得出鄱阳湖PAHs的潜在来源为石油源与燃烧源. 由于鄱阳湖面积大、覆盖范围广且鄱阳湖PAHs污染属于综合性污染,采用PMF 5.0模型对鄱阳湖各分区PAHs的可能来源进行量化确认,结果如图6. PMF定量解析不同来源的贡献率依次是汽油燃烧占55%、生物质燃烧占22%、柴油燃烧占15%和石油挥发占8%,因此,汽油燃烧、生物质燃烧和柴油燃烧排放的贡献率较高. 从图6可以看出,鄱阳湖A区(受长江影响较大的鄱阳湖北部区域)PAHs主要来源为汽油燃烧,其次为生物质燃烧、柴油燃烧和石油挥发/挥发,A区位于鄱阳湖主航道内,向北直通长江,是重要的船舶港口区,周边渔船以及运输渔货的车辆消耗了大量的石油燃料,渔船、机动车尾气的排放以及渔船上含油废水的直接排放和石油泄漏都有可能该区域受到PAHs污染^[43,44]. B区(即鄱阳湖国家自然保护区及其毗邻水域)PAHs主要来源为煤炭燃烧和柴油燃烧,其次为生物质燃烧,这可能与B区与上游A区的水文交换及沉降过程有关^[45],生物质燃烧排放源可能是由周边城镇居民烹饪、取暖或露天焚烧秸秆等人类活动产生的. C区(即南矶湿地自然保护区及其毗邻水域)PAHs主要来源为生物质燃烧和柴油燃烧,其次为煤炭燃烧和汽油燃烧,C区湿地与小型湖泊较多,人口密度大,与B

区域相似,周边城镇居民的生活排放以及交通尾气的排放可能是该区域PAHs的主要来源. D区(即邻近都昌县及鄱阳县且水文特征较为稳定的区域)PAHs主要来源为汽油燃烧,其次依次为:煤炭燃烧、柴油燃烧、石油泄漏/挥发和生物质燃烧,该区域周边存在许多燃煤工厂,如有色金属冶炼厂、陶瓷厂和焦化厂等的燃煤排放,这可能是该区域PAHs汽油燃烧源和煤炭燃烧源贡献率较高的主要原因. E区(即受饶河影响较大的区域)PAHs主要来源为煤炭燃烧,其次依次为:汽油燃烧、生物质燃烧、柴油燃烧和石油泄漏/挥发,饶河下游流经景德镇焦化厂,周边居民生活使用的燃煤和交通尾气的排放以及露天焚烧秸秆^[46]可能是造成煤炭燃烧、汽油燃烧及生物质燃烧污染的主要原因.

3 结论

PAHs在鄱阳湖沉积物中广泛存在,其中湖体中PAHs含量高于入湖河流中. 鄱阳湖湖体不同区域受5条入湖河流的影响较大,表明河流输入可能是污染物进入鄱阳湖湖体的主要途径. 2~3环以及部分4环PAHs包括Flua和Pyr更容易受到SOM的影响,4~6环PAHs更容易受到ORP及重金属等环境因子的影响. 大部分PAHs在鄱阳湖表层沉积物中具有相似的空间分布, $\sum_{16}$ PAHs的高含量可能与污染物的理化性质、湖泊水文特征、人口密度和人类活动强度等因素有关. 鄱阳湖PAHs含量随时间变化而不断增加,并与江西省GDP的发展呈现出高度一致性,表明经济快速发展和工业化进程加快等人类活动的影响可能是导致PAHs含量不断增加的主要原因. 鄱阳湖表层沉积物PAHs的主要来源包括石油污染及石油、煤炭和生物质燃烧源,不同区域PAHs来源存在差异,航运、工矿企业及周边城镇的人类活动是影响各区域PAHs来源的主要原因.

参考文献:

- [1] 贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 等. 长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2221-2228.
- [2] Jia T Q, Lei R R, Wu S L, et al. Distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in tributary waters of the lower reaches of the Yangtze River, China [J]. Environmental Science, 2020, 41(5): 2221-2228.
- [3] Meng Y, Liu X H, Lu S Y, et al. A review on occurrence and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lakes of China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 2497-2506.
- [4] Singh D K, Kawamura K, Yanase A, et al. Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons, aromatic ketones, carboxylic acids, and trace metals in arctic aerosols: long-range atmospheric transport, photochemical degradation/production at polar sunrise [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(16): 8992-

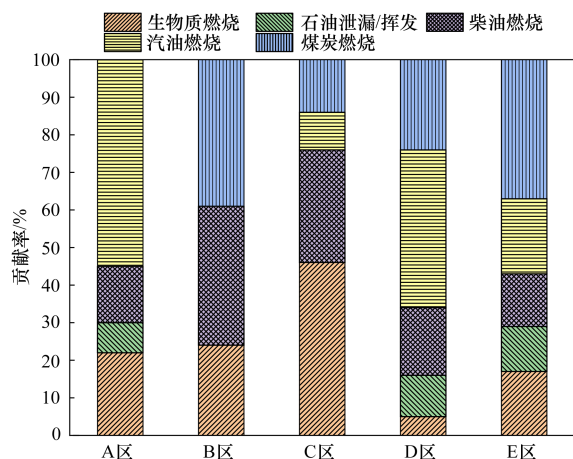


图6 鄱阳湖5个区域PAHs来源组成

Fig. 6 Composition of PAHs sources in five regions of Poyang Lake

- 9004.
- [4] 张千千, 邢锦兵, 王慧玮, 等. 河北省某大型焦化厂地下水中多环芳烃的污染特点、源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 807-815.
- Zhang Q Q, Xing J B, Wang H W, *et al.* Analysis on contamination characteristics, pollution source identification and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons of groundwater in a large coking plant site of province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 807-815.
- [5] Yan W, Chi J S, Wang Z Y, *et al.* Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Daya Bay, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(6): 1823-1830.
- [6] 赵爽, 倪兆奎, 黄冬凌, 等. 基于WQI法的鄱阳湖水水质演变趋势及驱动因素研究[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 179-187.
- Zhao S, Ni Z K, Huang D L, *et al.* Evolution of water quality of poyang lake using WQI method and driving factors identification [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 179-187.
- [7] 王圣瑞. 鄱阳湖生态安全[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [8] 王圣瑞. 鄱阳湖水环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 等. 基于湖泊与出入湖水水质关联性研究: 以鄱阳湖为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4450-4460.
- Huang D L, Ni Z K, Zhao S, *et al.* Correlation analysis of water quality between lake inflow and outflow: a case study of Poyang Lake [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4450-4460.
- [10] 区铭亮, 周文斌, 胡春华. 鄱阳湖水系重金属出入湖通量估算[J]. 广东农业科学, 2012, **39**(4): 114-117.
- Qu M L, Zhou W B, Hu C H. Discussion on the flux of heavy metals from the waters of Poyang Lake River [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, **39**(4): 114-117.
- [11] Wang L L. R/S analysis based study on long memory about CODMn in Poyang Lake inlet and outlet [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, **121**(2), doi: 10.1088/1755-1315/121/2/022040.
- [12] Wang L L, Liu Z H, Shi K, *et al.* Study on long-range correlation about CODMn in Poyang Lake inlet and outlet on the basis of DCCA method [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, **121**(2), doi: 10.1088/1755-1315/121/2/022029.
- [13] Zhang Y C, Qu C K, Qi S H, *et al.* Spatial-temporal variations and transport process of polycyclic aromatic hydrocarbons in Poyang Lake: implication for dry-wet cycle impacts [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2021, **226**, doi: 10.1016/j.gexplo.2021.106738.
- [14] Li Q Y, Wu J L, Zhao Z H. Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Poyang Lake, China [J]. *PLoS ONE*, 2018, **13**(10), doi: 10.1371/journal.pone.0205484.
- [15] 马妍, 程芦, 阮子渊, 等. 近20年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1065-1072.
- Ma Y, Cheng L, Ruan Z Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil of China (2000-2020): temporal and spatial distribution, influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1065-1072.
- [16] Wang X T, Chen L, Wang X K, *et al.* Occurrence, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban (Pudong) and suburban soils from Shanghai in China [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 1224-1232.
- [17] Gong X H, Zhao Z H, Zhang L, *et al.* North-south geographic heterogeneity and control strategies for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chinese lake sediments illustrated by forward and backward source apportionments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **431**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128545.
- [18] Fernández P, Vilanova R M, Grimalt J O. Sediment fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons in European high altitude mountain lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(21): 3716-3722.
- [19] Kannan K, Johnson-Restrepo B, Yohn S S, *et al.* Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Michigan inland lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(13): 4700-4706.
- [20] 张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 等. 大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 170-179.
- Zhang J Q, Hu T P, Xing X L, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of the PAHs in the surface sediments and water from the Daye Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 170-179.
- [21] 杜威宁, 刘敏, 朱俊敏, 等. 淀山湖沉积物PAHs季节分布与风险指数评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3999-4006.
- Du W N, Liu M, Zhu J M, *et al.* Season distribution characteristics and the risk index assessment of PAHs in surface sediments of Dianshan Lake [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 3999-4006.
- [22] 张科. 呼伦湖和查干湖沉积物多环芳烃污染历史与来源分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2019.
- Zhang K. Pollution history and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Hulun and Chagan Lakes [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2019.
- [23] 崔志丹, 冯建国, 焦立新, 等. 松花湖表层沉积物中PAHs及PAEs污染特征[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(9): 1531-1539.
- Cui Z D, Feng J G, Jiao L X, *et al.* Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters in surface sediments of in Songhua Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9): 1531-1539.
- [24] 康杰, 胡健, 朱兆洲, 等. 太湖及周边河流表层沉积物中PAHs的分布、来源与风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 1162-1170.
- Kang J, Hu J, Zhu Z Z, *et al.* Distribution, source and risk assessment of PAHs in surface sediments from Taihu Lake and its surrounding rivers [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 1162-1170.
- [25] 万宏滨, 周娟, 罗端, 等. 长江中游湖泊表层沉积物多环芳烃的分布、来源特征及其生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(6): 1632-1645.
- Wan H B, Zhou J, Luo D, *et al.* Distribution, source characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of lakes along the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Science*, 2020, **32**(6): 1632-1645.
- [26] Wang C L, Zou X Q, Gao J H, *et al.* Pollution status of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from the Yangtze River Estuary and its adjacent coastal zone [J]. *Chemosphere*, 2016, **162**: 80-90.
- [27] Zhang B T, Gao Y M, Lin C Y, *et al.* Spatial distribution of phthalate acid esters in sediments and its relationships with

- anthropogenic activities and environmental variables of the Jiaozhou Bay[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **155**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111161.
- [28] 宋世杰, 黄韬, 周胜, 等. 博斯腾湖流域沉积物中多环芳烃的时空分布、来源及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2780-2790.
- Song S J, Huang T, Zhou S, *et al.* Spatial and temporal distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Bosten Lake watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2780-2790.
- [29] He Y, He W, Yang C, *et al.* Spatiotemporal toxicity assessment of suspended particulate matter (SPM) - bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Lake Chaohu, China: application of a source-based quantitative method[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **727**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138690.
- [30] Martinez A, O'Sullivan C, Reible D, *et al.* Sediment pore water distribution coefficients of PCB congeners in enriched black carbon sediment[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **182**: 357-363.
- [31] Guo X Y, Luo L, Ma Y B, *et al.* Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons on particulate organic matters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**(1-3): 130-136.
- [32] Marini M, Frapiccini E. Persistence of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments in the deeper area of the Northern Adriatic Sea (Mediterranean Sea)[J]. *Chemosphere*, 2013, **90**(6): 1839-1846.
- [33] Liao F, Wang G C, Shi Z M, *et al.* Distributions, sources, and species of heavy metals/trace elements in shallow groundwater around the Poyang Lake, East China[J]. *Exposure and Health*, 2018, **10**(4): 211-227.
- [34] Zhang B T, Gao Y M, Lin C Y, *et al.* Spatial distribution of phthalate acid esters in sediments of the Laizhou Bay and its relationship with anthropogenic activities and geochemical variables[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **722**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137912.
- [35] Liu Z J, Wang X H, Jia S Q, *et al.* Multi-methods to investigate spatiotemporal variations of nitrogen-nitrate and its risks to human health in China's largest fresh water lake (Poyang Lake)[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **863**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160975.
- [36] Ma X H, Wan H B, Zhou J, *et al.* Sediment record of polycyclic aromatic hydrocarbons in Dianchi lake, Southwest China: influence of energy structure changes and economic development[J]. *Chemosphere*, 2020, **248**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126015.
- [37] Wu H C, Wang J F, Guo J Y, *et al.* Sedimentary records of polycyclic aromatic hydrocarbons from three enclosed lakes in China: response to energy structure and economic development[J]. *Environmental Pollution*, 2023, **318**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120929.
- [38] Bigus P, Tobiszewski M, Namieśnik J. Historical records of organic pollutants in sediment cores[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **78**(1-2): 26-42.
- [39] Guo J Y, Wu F C, Luo X J, *et al.* Anthropogenic input of polycyclic aromatic hydrocarbons into five lakes in Western China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(6): 2175-2180.
- [40] Yin S, Tan H X, Hui N, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in leaves of *Cinnamomum camphora* along the urban-rural gradient of a megacity: distribution varies in concentration and potential toxicity[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139328.
- [41] Ma Y, Liu T, Zhang B T, *et al.* Spatial-temporal distributions and influential factors of phthalate acid esters in sediments of three lakes in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(22): 32800-32812.
- [42] 程启明, 黄青, 廖祯妮, 等. 厦门杏林湾水系表层沉积物中 PAHs 分析与风险评估[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 179-185.
- Cheng Q M, Huang Q, Liao Z N, *et al.* Risk assessment and analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments of Xinglin Bay suburb rivers of Xiamen[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 179-185.
- [43] Aziz F, Syed J H, Malik R N, *et al.* Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Soan River, Pakistan: insights into distribution, composition, sources and ecological risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **109**: 77-84.
- [44] Han B, Liu A, He S, *et al.* Composition, content, source, and risk assessment of PAHs in intertidal sediment in Shilaoren Bay, Qingdao, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **159**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111499.
- [45] Gateuille D, Evrard O, Lefevre I, *et al.* Mass balance and decontamination times of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural nested catchments of an early industrialized region (Seine River Basin, France)[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 608-617.
- [46] Wang D G, Tian F L, Yang M, *et al.* Application of positive matrix factorization to identify potential sources of PAHs in soil of Dalian, China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1559-1564.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i>	(1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-rui	(1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao	(1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i>	(1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i>	(1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i>	(1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i>	(1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i>	(1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing	(1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i>	(1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i>	(1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i>	(1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i>	(1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i>	(1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i>	(1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i>	(1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i>	(1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i>	(1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i>	(1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i>	(1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i>	(1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i>	(1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i>	(1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i>	(1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i>	(1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i>	(1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie	(1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i>	(1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, <i>et al.</i>	(1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing	(1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i>	(1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i>	(1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i>	(1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i>	(1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i>	(1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i>	(1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-lie, <i>et al.</i>	(1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i>	(1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i>	(1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming	(1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i>	(1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i>	(1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i>	(1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing	(1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pe, <i>et al.</i>	(1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i>	(1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i>	(1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i>	(1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i>	(1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i>	(1859)