

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, 丁铨, 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, 陈恒蕤, 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_{2.5} 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_{2.5} 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 O₃ 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 Cd²⁺ 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 CH₄ 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)

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¹, 李瑞飞², 周亦辰¹, 卓泽铭¹, 张晋^{3,4}, 李梅^{1,5,6*}, 李雪^{1,5,6*}

(1. 暨南大学质谱仪器与大气环境研究所, 广州 510632; 2. 德累斯顿工业大学城市水资源管理研究所, 德累斯顿 01062; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098; 4. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 5. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 510632; 6. 广东省大气污染在线源解析系统工程技术研究中心, 广州 510632)

摘要: 多环芳烃(PAHs)是具有三致效应的一类典型持久性有机污染物, 具有较高的生态风险. 随着工业不断发展, 地表水已成为 PAHs 重要的汇. 由于其疏水性特征, PAHs 易附着在地表水悬浮颗粒物表面, 逐渐积累并可以随地表水长距离迁移而扩大其污染区域, 对人体健康和生态环境造成威胁. 因此, 对地表水悬浮颗粒物中 PAHs 长时间尺度的时空分布特征和输入源的定量解析研究, 可为生态管控和环境政策的制订, 提供重要理论依据. 对典型地表水悬浮颗粒物中 16 种优控 PAHs 长期监测数据进行分析, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法评估了 PAHs 时间变化趋势和突变点; 利用小波分析研究其周期变化规律; 采用特征比值法和正定矩阵因子分解(PMF)模型分析 PAHs 的来源, 并从拟合优度、因子交换现象和 PMF 基础运行重现性等方面评估了源解析结果的不确定性. \sum_{16} PAHs 含量时间变化分析表明, 研究区域地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量呈现显著递减趋势($P < 0.05$), 平均值最大为 6 239 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (2006 年), 最小为 2 760 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (2016 年). 7 种致癌性 PAHs: 苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、䈔和苯并[a]蒽的含量均呈显著递减趋势($P < 0.05$); 苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽和茚苯[1,2,3-cd]芘的含量无明显变化趋势. 2002~2016 年期间研究对象中 PAHs 含量的时序变动主要受 10 a(第一主周期)和 5 a(第二主周期)特征时间尺度的控制. \sum_{16} PAHs 含量空间分布分析表明, \sum_{16} PAHs 含量中位值从大到小依次为: 中游(6 168 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、上游(5 407 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和下游(3 412 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 研究期间上游 \sum_{16} PAHs 含量无明显变化趋势, 中游和下游 \sum_{16} PAHs 含量均呈显著递减趋势($P < 0.05$). 从方差分析结果可以看出, \sum_{16} PAHs 含量表现出显著的空间差异($P < 0.05$), 上游和中游含量显著高于下游. 源解析结果表明地表水悬浮颗粒物 PAHs 的主要输入源为交通源、燃煤源和生物质燃烧源, 贡献率分别为 40.9%、33.7% 和 25.4%. 与 2002~2009 年相比, 2010~2016 年期间交通源贡献率下降了 25.9%, 燃煤源和生物质燃烧源贡献率分别上升了 4.8% 和 21.1%. 研究结果可为地表水污染防控和生态风险防范提供科学依据.

关键词: 多环芳烃(PAHs); 时空变化特征; 小波分析; 源解析; 不确定性分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3645-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202109272

Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water

PENG Ke-xing¹, LI Rui-fei², ZHOU Yi-chen¹, ZHUO Ze-ming¹, ZHANG Jin^{3,4}, LI Mei^{1,5,6*}, LI Xue^{1,5,6*}

(1. Institute of Mass Spectrometry and Atmospheric Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Institute of Urban and Industrial Water Management, Technische Universität Dresden, Dresden 01062, Germany; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 5. Guangdong-Hongkong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 510632, China; 6. Guangdong Provincial Engineering Research Center for On-Line Source Apportionment System of Air Pollution, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are a type of typical environmental pollutant with carcinogenic effects and high ecological risk. With the development of industry, surface water acts as a primary sink for PAHs. Owing to their low solubility, a significant amount of PAHs are adsorbed onto suspended particulate matter in surface water, which presents a serious risk to human health and the ecological environment. To protect human health and aquatic organisms, a systematic assessment of the trends in PAHs exposure risk is essential. Based on long-term monitoring data from 2002 to 2016, this study systematically evaluated the spatiotemporal distribution and source apportionment of PAHs adsorbed on suspended particulate matter in surface water. The results of the Mann-Kendall test indicated that pollution levels of PAHs decreased from 2012 to 2016. The maximum average content was 6 239 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the minimum was 2 760 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, chrysene, and

收稿日期: 2021-09-30; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077156); 广东省科技创新战略专项(2019B121205004); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515011130)

作者简介: 彭珂醒(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地表水环境污染源解析, E-mail: 190070167@qq.com

* 通信作者, E-mail: m. li@hxmass.com; tamylee@jnu.edu.cn

benzo(a)anthracene showed significant declines from 2002-2016 ($P < 0.05$). Levels of benzo(a)pyrene, dibenzo(a,h)anthracene, and indeno(1,2,3-cd)pyrene were steady. Wavelet analysis showed that the pollution level of PAHs had significant periodic oscillations for surface water. Midstream and downstream \sum_{16} PAHs showed significant declines from 2002-2016 ($P < 0.05$), whereas upstream \sum_{16} PAHs were steady. ANOVA analysis showed that the spatial difference was significant and occurred in the following order; midstream ($6\,168\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > upstream ($5\,407\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > downstream ($3\,412\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Diagnostic ratio analysis and the positive matrix factorization model suggested that the major sources of PAHs were traffic sources, coal burning sources, and biomass combustion sources, which accounted for 40.9%, 33.7%, and 25.4%, respectively. The contribution of traffic sources decreased by 25.9%. The contributions of coal burning sources and biomass combustion sources increased by 4.8% and 21.1% from 2002-2009 to 2010-2016, respectively. These results provide scientific reference for risk analysis and the control of PAHs pollution in surface water.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); temporal and spatial variation characteristics; wavelet analysis; source apportionment; uncertainty analysis

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指一类由两个或两个以上苯环组成的持久性有机污染物^[1]. 环境中 PAHs 主要是人为源^[2,3], 如工业排放^[4]、交通排放^[5]、石油泄漏^[6] 和生物质燃烧等^[7], 可通过大气干湿沉降^[8]、地表径流^[9]、工业废水^[10] 和生活污水^[11] 等途径进入环境. PAHs 水溶性差且难降解, 容易在地表水悬浮颗粒中富集^[12,13]. 以悬浮颗粒物作为介质, PAHs 可以在水体中远距离迁移, 从而扩大了其对生态和人类健康的风险^[14]. 因此, 对地表水悬浮颗粒物中 PAHs 的系统研究是协助生态管控和环境政策制定的重要基础.

受体模型是通过对样品进行分析, 定性识别污染源类型, 并定量确定各污染源贡献率的一类源解析技术^[15], 主要包括 UNMIX 模型^[16]、主成分分析/多元线性回归 (principal component analysis-multiple linear regressions, PCA/MLR) 模型^[17]、化学质量平衡 (chemical mass balance, CMB) 模型^[18] 和正定矩阵因子分解 (positive matrix factorization, PMF) 模型等^[19]. 相较而言, UNMIX 模型需要大量样本数据, 对数据质量要求较高; PCA/MLR 解析出的来源贡献率可能出现负值; CMB 模型需要建立本地源谱库, 且不能鉴别谱库以外的污染源类型; 而 PMF 模型不需要建立本地源谱库, 解析结果非负, 且可通过误差估计合理处理异常值, 有效利用数据^[20]. 目前, PMF 模型已被广泛应用于大气^[21]、水体^[22] 和土壤^[23] 等环境介质中 PAHs 的来源解析. 然而, PMF 源解析结果的不确定性分析鲜有报道.

本研究以地表水悬浮颗粒物中 PAHs 为目标污染物, 通过 Mann-Kendall 趋势检验法和小波分析解析 2002~2016 年间 PAHs 时空变化特征, 采用特征比值法和 PMF 模型探究主要输入源变化趋势, 并对 PMF 源解析结果的不确定性进行了讨论, 以期为 PAHs 时空变化规律和输入源响应机制研究提供方法参考.

1 材料与方 法

1.1 研究数据

本文以欧洲典型河流弗赖贝格穆尔德河为研究

对象. 弗赖贝格穆尔德河是易北河的左侧支流, 主要位于德国萨克森州. 弗赖贝格穆尔德河的源头位于捷克共和国, 距德国边境约 5 km, 在弗赖贝格穆尔德河与茨维考穆尔德河汇合处 307 km, 穆尔德河汇入德绍以北的易北河^[24].

根据欧盟水框架指令 (European Water Framework Directive, WFD), 弗赖贝格穆尔德河沿岸建立了 9 个监测站, 监测地点覆盖弗赖贝格穆尔德河的上、中和下游, 分别为 Brücke am Katzenstein (U1)、Berthelsdorf (U2)、Muldenhütten (U3)、Hilbersdorf (U4)、Halsbrücke 1 (M1)、Obergruna (M2)、uh. Siebenlehn (M3)、uh. Döbeln (D1) 和 Mdg. in Erlin (D2), 具体分布如图 1 所示. 悬浮颗粒物样品于 2002 年 10 月至 2016 年 12 月采集, 共采集 203 个样品, 其中每个季度至少采集一次样品. 按照采样年度划分, 2002 年共采集 2 个悬浮颗粒物样品, 2003 年共采集 8 个悬浮颗粒物样品, 2004 年共采集 12 个悬浮颗粒物样品, 2005 年共采集 24 个悬浮颗粒物样品, 2006 年共采集 27 个悬浮颗粒物样品, 2007 年共采集 19 个悬浮颗粒物样品, 2008 年共采集 24 个悬浮颗粒物样品, 2009 年共采集 16 个悬浮颗粒物样品, 2010 年共采集 11 个悬浮颗粒物样品, 2011 年共采集 8 个悬浮颗粒物样品, 2012 年共采集 4 个悬浮颗粒物样品, 2013 年共采集 14 个

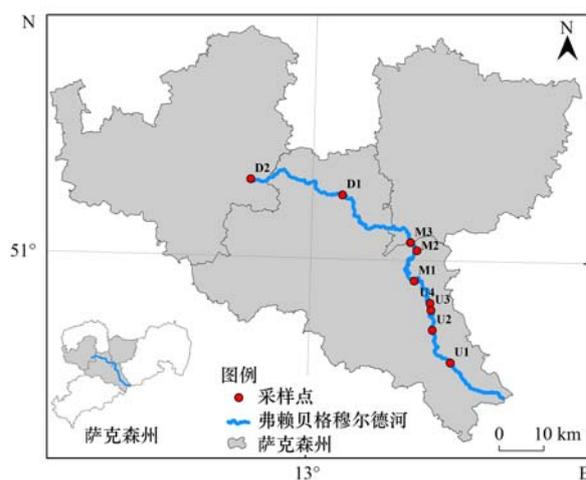


图 1 研究区域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in study area

悬浮颗粒物样品, 2014 年共采集 12 个悬浮颗粒物样品, 2015 年共采集 16 个悬浮颗粒物样品, 2016 年共采集 6 个悬浮颗粒物样品. 德国环境与农业公共运营公司 (Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, BfUL) 根据美国环保署 (US EPA) 610 方法、德国 DIN 38407-F 39 标准和 DIN ISO 28540 标准分析了地表水悬浮颗粒物中 16 种优控 PAHs, 包括萘 (naphthalene, Nap)、苊烯 (acenaphthylene, Acy)、二氢苊 (acenaphthene, Ace)、芴 (fluorene, Flu)、菲 (phenanthrene, Phe)、蒽 (anthracene, Ant)、荧蒽 (fluoranthene, Fla)、芘 (pyrene, Pyr)、䓛 (chrysene, Chry)、苯并 [a] 蒽 [benzo (a) anthracene, BaA]、苯并 [b] 荧蒽 [benzo (b) fluoranthene, BbF]、苯并 [k] 荧蒽 [benzo (k) fluoranthene, BkF]、苯并 [a] 芘 [benzo (a) pyrene, BaP]、二苯并 [a, h] 蒽 [dibenzo (a, h) anthracene, DahA]、茚芘 [1, 2, 3-cd] 芘 [indeno (1, 2, 3-cd) pyrene, InP] 和苯并 [ghi] 茚 [benzo (ghi) perylene, BghiP].

1.2 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验法

本研究利用 M-K 趋势检验法对研究区域 2002 ~ 2016 年地表水悬浮颗粒物中 PAHs 含量数据进行时间变化趋势和可能突变年份分析. M-K 趋势检验法是一种非参数统计检验方法, 其优点是不需要样本服从某种分布, 较少受异常值干扰, 定量化程度高, 检测范围广, 计算方便^[25]. 对于样本个数为 n 的时间序列 x , 在时间序列随机独立的假定下定义统计量:

$$UF_k = \frac{|S_k - E(S_k)|}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, $UF_1 = 0$, 秩序列 S_k 为第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数, $E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 为 S_k 的平均值和方差. UF_k 为标准正态分布, 是按照时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出来的统计量序列. 给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则 $U_\alpha = \pm 1.96$, 如果 $|UF_k| > |U_\alpha|$, 则否定无趋势的零假设, 表明序列存在明显的趋势变化. 再按照时间逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1 = 0$.

1.3 小波分析

小波分析 (wavelet analysis) 可通过探究 PAHs 含量时间序列时域-频域多尺度的周期性和趋势性特征, 分析 PAHs 含量的多层次演变规律, 揭示 PAHs 含量时间序列的多种周期并对其进行时间定位^[26]. 连续小波变换和小波方差的公式如下^[27]:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \cdot \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

$$\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (3)$$

式中, $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为一个给定的能量有限信号或平方可积函数; $\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数; $\text{var}(a)$ 为小波方差; a 和 b 分别为伸缩尺度和平移参数.

1.4 正定矩阵因子分解 (PMF) 模型

PMF 模型将样品含量数据矩阵分解成因子贡献 (\mathbf{G}) 和因子成分谱 (\mathbf{F}) 两个矩阵, 通过多线性多次迭代算法识别因子数量和因子贡献^[28].

$$\mathbf{X}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{G}_{ik} \mathbf{F}_{kj} + \mathbf{E}_{ij} \quad (4)$$

式中, p 为因子个数; i 为第 i 个样品; j 为第 j 种元素; \mathbf{X}_{ij} 为 i 个样品 j 种元素含量构成的 $i \times j$ 矩阵; \mathbf{G}_{ik} 为因子 k 对每个样品 i 的贡献; \mathbf{F}_{kj} 为对于每个来源的物种分布; \mathbf{E}_{ij} 为残差矩阵.

设计目标函数 Q , 并将其最小化:

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{\mathbf{E}_{ij}}{\mathbf{u}_{ij}} \right)^2 \quad (5)$$

式中, m 为样品数量; n 为元素数量; \mathbf{u}_{ij} 为不确定度.

1.5 不确定性分析方法

本研究主要通过 3 个方面探讨 PMF 模型结果的不确定性: 拟合优度、因子交换现象和 PMF 基础运行重现性. 在基础运行过程中, 使用了决定系数 (R^2) 来进行拟合优度分析^[29]. 决定系数 (R^2) 可以根据以下函数计算:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中, \hat{y}_i 为站点 i 的预测值; y_i 为站点 i 的测量值; \bar{y} 为站点 i 的平均测量值; n 为站点数量.

DISP 法是通过依次扰动因子成分谱矩阵 \mathbf{F} 中的参数多次重复运行 PMF 模型, 评估因子交换百分数和 Q 下降百分数来得到不确定性估计^[30]. 基本方程如下所示:

$$dQ = Q(\mathbf{F}_{kj} = d) - Q \quad (7)$$

式中, $Q(\mathbf{F}_{kj} = d)$ 表示限定 \mathbf{F}_{kj} 为一个固定可行值, 并最小化所有其他 \mathbf{G} 和 \mathbf{F} 矩阵因子元素时获得的最小平方和值; Q 为最小化的目标函数.

采用 BS 诊断 PMF 基础运行重现性, 它可通过重构样品将模型分解为 BS 因子载荷矩阵和贡献矩阵, 得到 BS 因子与各基本因子匹配率, 实现对 PMF

模型中旋转模糊度的随机误差和部分效应的不确定性估计^[31].

2 结果与讨论

2.1 地表水 PAHs 含量趋势特征及突变点

2002 ~ 2016 年期间地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量描述性统计见表 1. 2002 ~ 2016 年期间地表水悬浮颗粒物中 $\omega\left(\sum_{16} \text{PAHs}\right)$ 年平均值为 $4\,547 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与马来西亚兰加特河的 $4\,139 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[32] 接近, 但远低于意大利热那亚沃尔特里港的 $12\,650 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[33] 和挪威港的 $39\,000$

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[34]. 16 种优控 PAHs 均检出, 除 Ace 外, 其他 15 种 PAHs 的检出率均为 100.00%. 单体组分中含量较高的分别为 Fla、Pyr 和 Phe, 最高的是 4 环的 Fla, 介于 $39 \sim 2\,600 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $877 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 2002 ~ 2016 年期间地表水悬浮颗粒物中 $\omega\left(\sum_{16} \text{PAHs}\right)$ 介于 $432 \sim 13\,505 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $5\,020 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, \sum_{16} PAHs 含量受 Fla 影响大. 7 种致癌性物质: BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、DahA 和 InP 的含量占 \sum_{16} PAHs 的 47.7%. 致癌性最强为 BaP, 其含量范围为 $51 \sim 1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $396 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

表 1 研究区域地表水 PAHs 描述性统计¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of the surface water PAHs in study area

PAHs	环数	最小值 $/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值 $/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	中位数 $/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 $/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 $/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	检出率/%
Nap	2	3	470	55	76	66	100.00
Acy	3	3	110	29	32	19	100.00
Ace	3	ND	88	25	28	17	99.51
Flu	3	4	160	36	43	30	100.00
Phe	3	20	1 400	420	469	262	100.00
Ant	3	3	430	110	128	83	100.00
Fla	4	39	2 600	770	877	460	100.00
Pyr	4	51	2 000	610	697	353	100.00
Chry	4	19	1 000	410	427	195	100.00
BaA	4	16	1 000	400	416	188	100.00
BbF	5	56	1 100	370	409	188	100.00
BkF	5	37	990	290	321	163	100.00
BaP	5	51	1 000	370	396	175	100.00
DahA	5	3	270	67	80	51	100.00
InP	6	22	970	310	344	178	100.00
BghiP	6	20	760	260	277	135	100.00
$\sum_{7\text{care}} \text{PAHs}$	NA	281	6 050	2 249	2 393	1 059	100.00
$\sum_{16} \text{PAHs}$	NA	432	13 505	4 724	5 020	2 250	99.97

1) NA 表示物质无相关数据, ND 表示未检出

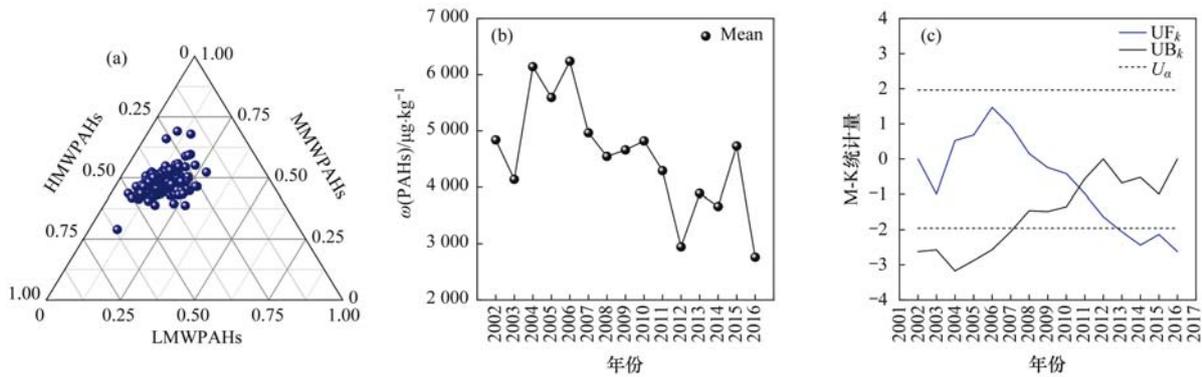
2002 ~ 2016 年期间地表水 \sum_{16} PAHs 的含量中, 不同环数 PAHs 的质量分数平均值为: 4 环 (48.1%) > 5 环 (24.0%) > 3 环 (14.0%) > 6 环 (12.4%) > 2 环 (1.5%). 从图 2(a) 可以看出, 含 2 ~ 3 环的低环多环芳烃 (LMWPAHs) 占总量的 5.9% ~ 27.9%, 平均值为 15.2%; 含 4 环的中环多环芳烃 (MMWPAHs) 占总量的 28.9% ~ 69.1%, 平均值为 47.8%; 含 5 ~ 6 环的高环多环芳烃 (HMWPAHs) 占总量的 17.3% ~ 61.6%, 平均值为 36.9%. 地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 以 MMWPAHs 和 HMWPAHs 为主.

根据研究区域地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量长时间变化 [图 2(b)] 和 M-K 趋势检验 [图 2

(c)] 可将 2002 ~ 2016 年地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量分为 3 个阶段: 缓慢降低的“中值”阶段 [2002 ~ 2003 年, $(4\,487 \pm 351) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$]、波动变化的“高值”阶段 [2004 ~ 2008 年, $(5\,497 \pm 743) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] 和显著降低的“低值”阶段 [2009 ~ 2016 年, $(3\,969 \pm 850) \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$].

研究区域自 2002 年开始地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量呈波动缓慢降低趋势 [图 2(b)], 2002 年地表水悬浮颗粒物中 $\omega\left(\sum_{16} \text{PAHs}\right)$ 平均值为 $4\,838 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 2006 年达到 $6\,239 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 之后快速降低至 2016 年的 $2\,760 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

M-K 趋势检验统计量 UF_k 表明 [图 2(c)], 2002 ~ 2012 年期间 UF_k 曲线均在 95% 置信区间范



(a) 地表水不同环数 PAHs 组成比例; (b) \sum_{16} PAHs 含量年度变化趋势; (c) M-K 趋势检验

图 2 2002 ~ 2016 年地表水 PAHs 组成比例和变化趋势

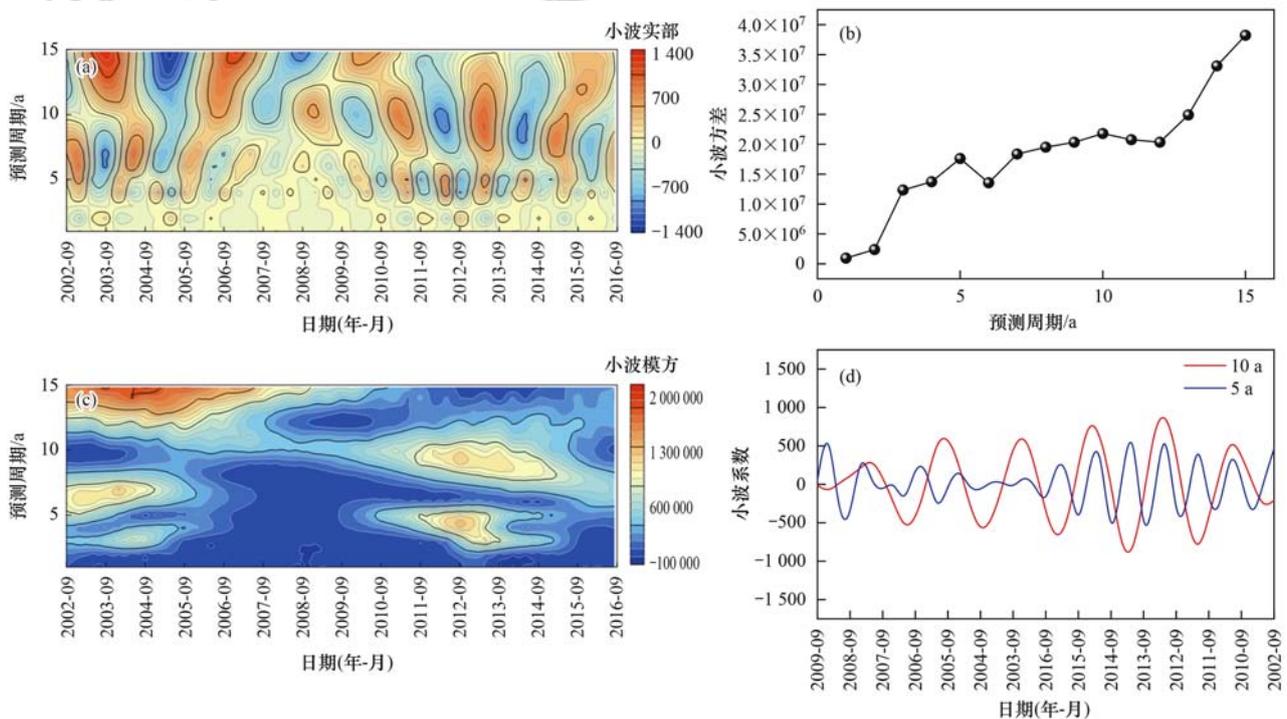
Fig. 2 Composition ratio and temporal variations in surface water from 2002 to 2016

围内呈波动下降趋势, 2013 年左右 UF_k 曲线超过 0.05 显著水平后呈缓慢下降趋势, 2010 年左右 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界直线之间, 即 \sum_{16} PAHs 含量在 2010 年出现明显突变, 考虑到当时的洁净能源新政策, 推测是洁净能源占比增加影响了地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量.

2.2 地表水 PAHs 含量的周期规律

为揭示长时序 \sum_{16} PAHs 的动态特征, 采用小波分析方法对 2002 ~ 2016 年期间地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量进行处理, 得到小波分析各参数 (图 3). 研究区域地表水 2002 ~ 2016 年

\sum_{16} PAHs 小波系数 (实部) 等值线图显示了 2 个可能的时间尺度: 2 ~ 6 a 和 7 ~ 15 a [图 3(a)], 其中 7 ~ 15 a 的时间尺度在 2002 ~ 2016 年期间均有较强周期性变化, 即稳定的全局性, 中间尺度 10 a 存在显著的“高-低-高-低-高-低”变动特征, 而时间尺度 2 ~ 6 a 的全局性较弱. 从小波方差的变动中可以看出存在 2 个较大的峰值 [图 3(b)], 分别对应于 10 a (第一主周期) 和 5 a (第二主周期). 从图 3(c) 可以看出, 7 ~ 15 a 具有的能量最强, 周期性最显著, 但其分布具有区域性 (2002 年 9 月至 2008 年 9 月); 而 2 ~ 6 a 能量较弱且为局域性分布, 即周期性不显著. 依据各主周期的小波系数实部变动趋势可以看



(a) 小波系数 (实部) 等值线; (b) 小波系数方差变化; (c) 小波系数 (模方) 等值线; (d) 污染主周期 (10 a 和 5 a) 的小波系数 (实部) 变动

图 3 研究区域 2002 ~ 2016 年 \sum_{16} PAHs 小波分析

Fig. 3 Wavelet analysis of \sum_{16} PAHs from 2002 to 2016 in study area

出[图 3(d)],在 10 a 特征尺度上 \sum_{16} PAHs 含量变化周期为 2 a 左右,经历了 6 个周期;5 a 特征尺度上 \sum_{16} PAHs 含量变化周期为 1 a 左右,经历了 13 个周期.

2.3 地表水 PAHs 含量空间分布特征

研究区域地表水中 PAHs 含量在上、中和下游之间存在较大差异,见图 4(a). $\omega(\sum_{16} \text{PAHs})$ 中位值从大到小依次为:中游($6\ 168\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、上游($5\ 407\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和下游($3\ 412\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 水体悬浮颗粒物中 $\omega(\sum_{16} \text{PAHs})$ 分布范围的 25%~75% 区间于 2002~2016 年间落在 $2\ 593\sim 7\ 075\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内. 地表水上、中和下游中 7 种致癌性 PAHs 含量分别占 \sum_{16} PAHs 含量的 48.3%、47.0% 和 47.9%,各区域的致癌性 PAHs 含量占比与整体研究区域的致癌性 PAHs 含量占比相似.

采用单因素方差分析(ANOVA)探讨研究区域地表水上、中和下游 \sum_{16} PAHs 含量的空间分布特征. 从方差分析结果可以看出, \sum_{16} PAHs 含量表现出显著的空间差异($P < 0.05$),并表现为上游和下游显著高于中游的变化模式. 除 Nap、Ace 和 Flu 外,其余单体 PAHs 含量均表现为上游和下游显著高于中游($P < 0.05$),表明大多数单体 PAHs 在空间分布格局模式大致相同.

应用 M-K 趋势检验法分别研究上、中和下游 \sum_{16} PAHs 含量的时间变化趋势. 结果表明:本研究期间,地表水上游悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量无明显变化($P > 0.05$);中游和下游悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量呈显著递减趋势($P < 0.05$),Kendall 等级相关系数分别为 -0.202 和 -0.242 ,在 95% 的置信区间范围内,泰尔森估算的斜率分别为 -0.53 和 -0.31 ,各区域的 \sum_{16} PAHs 含量与整体研究区域的 \sum_{16} PAHs 含量时间变化趋势较为一致.

由图 4(b)可见,地表水悬浮颗粒物中含 2~3 环的 LMWPAHs 总量为 $(776 \pm 1\ 429)\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.57,在空间分布上属于中等变异;含 4 环的 MMWPAHs 总量为 $(2\ 417 \pm 4\ 183)\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.47,在空间分布上属于中等变异;含 5~6 环的 HMWPAHs 总量为 $(1\ 827 \pm 2\ 873)\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.45,在空间分布上属于中等变异. PAHs 单体变异系数均 > 0.1 ,且 < 1 ,属于中等

变异.

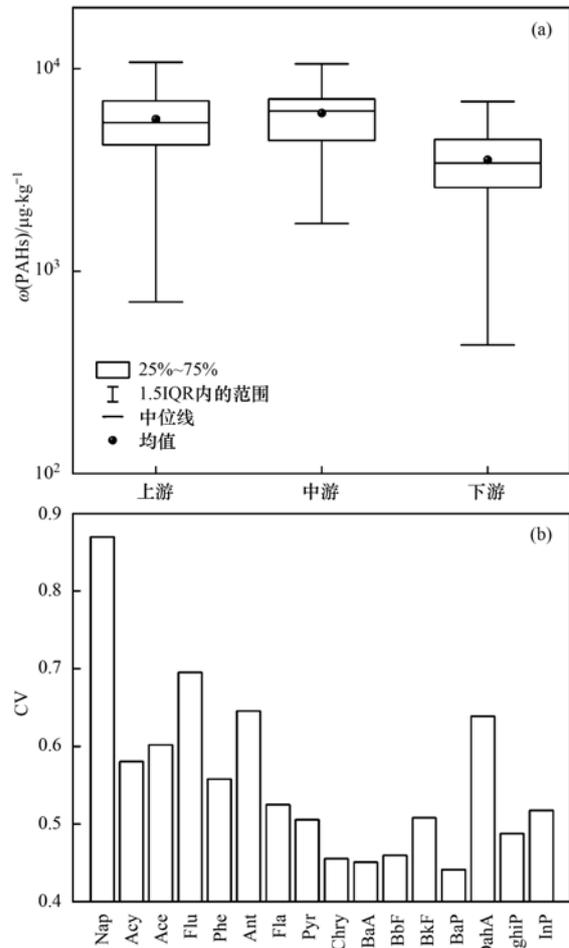


图 4 \sum_{16} PAHs 含量在地表水中的空间分布和变异系数

Fig. 4 Spatial distribution and coefficient of variation of \sum_{16} PAHs content in surface water

2.4 PAHs 源解析

特征比值法是一种评估 PAHs 来源的常用方法,判断 PAHs 来源的指数包括 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 这 4 组特征比值. 本研究利用这 4 组同分异构体总量占比来初步判断研究区域地表水悬浮颗粒物中 PAHs 的来源. 其中, $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值小于 0.10,来源为石油源,大于 0.10 为燃煤源和生物质燃烧源^[35]; $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 小于 0.40 为石油源,0.40~0.50 为石油燃烧源,大于 0.50 为生物质燃烧源^[36]; $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 小于 0.20 为石油源,介于 0.20 和 0.35 之间为燃煤源,大于 0.35 为交通源^[37]; $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 比值小于 0.20 表示 PAHs 主要来源是石油源,在 0.20~0.50 之间表示来源为交通源,大于 0.50 即为燃煤源和生物质燃烧源^[38]. 地表水悬浮颗粒物中 PAHs 特征比值结果如图 5 所示,可以看出 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 比值集中在 0.10~0.55 之间,表明主要来源为燃煤源和生物质燃烧

源; Fla/(Fla + Pyr) 比值主要集中在 0.50 ~ 0.80 之间, 表明主要来源为生物质燃烧源; BaA/(BaA + Chry) 比值集中在 0.35 ~ 0.65 之间, 表明主要来源为交通源; InP/(InP + BghiP) 比值集中在 0.30 ~ 0.75 之间, 表明主要来源为交通源、燃煤源和生物质燃烧源. 地表水悬浮颗粒物中 PAHs 污染源为混合源, 主要为交通源、燃煤源和生物质燃烧源.

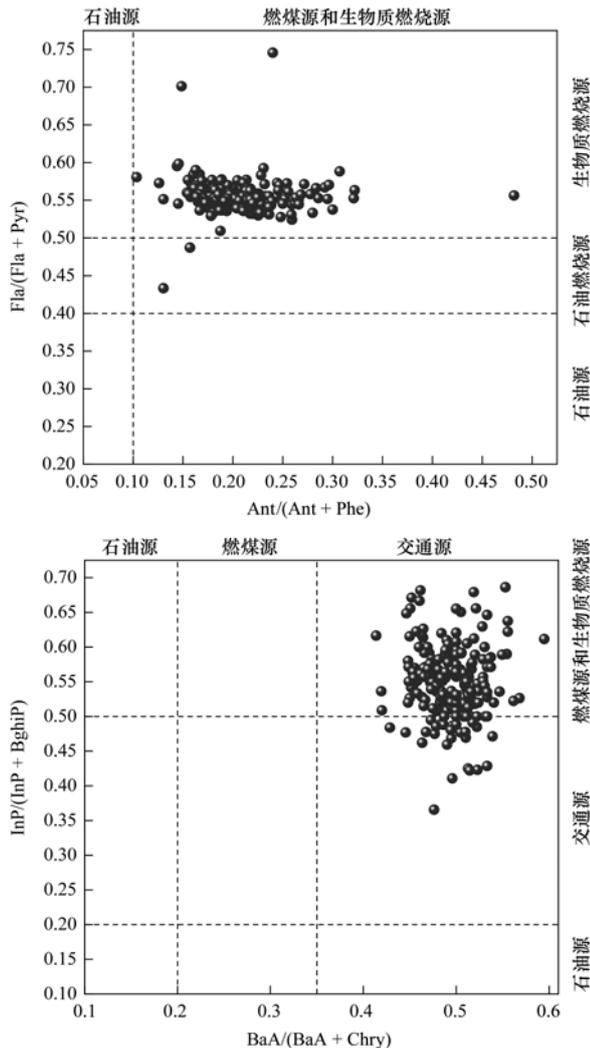


图5 地表水中 \sum_{16} PAHs 特征比值

Fig. 5 Multiple characteristic ratios of PAHs in surface water

由于 PAHs 同分异构体的理化性质和环境行为不完全相同, 其进入环境后在不同环境介质中的比例不是恒定的, 因此本研究结合 PMF 模型对源解析结果进行进一步探讨. 运用 PMF 模型对 \sum_{16} PAHs 来源进行解析, 随机选取 30 作为初始起点进行迭代计算, 取 2 ~ 5 个基本因子分别运算, 对比发现选择基本因子数为 3 时, 模型运算在第 13 次最佳.

PMF 模型运行结果见图 6, 2002 ~ 2009 年期间, 3 个基本因子对 \sum_{16} PAHs 来源的贡献率分别为 53.9%、14.8% 和 31.3%. 主因子 1 中 InP、DahA

和 BghiP 的载荷较高, 其载荷贡献率分别达到 78.1%、75.4% 和 73.6%. 其中, InP 被认为是柴油燃烧指示物^[39], 不同于柴油燃烧, DahA 和 BghiP 被认为是汽油燃烧的标志性组分^[40], 综上所述主因子 1 代表交通源, 这可能与研究区域周围交通线路分布密集有关. 主因子 2 中 Nap 和 Ace 的载荷较高, 其载荷贡献率分别达到 100.0% 和 54.4%. 其中, Nap 和 Ace 与生物质燃烧活动有关^[41,42], 识别为生物质燃烧源, 这可能与河流附近居民日常利用木材采暖和农田中秸秆燃烧有关. 主因子 3 中 Fla 和 Pyr 的载荷较高, 其载荷贡献率分别达到 52.7% 和 50.4%. 其中, Fla 和 Pyr 是燃煤排放的标志物种^[43,44], 故其指示的 \sum_{16} PAHs 来源是燃煤源, 结合流域环境情况这可能是研究区周围的工业活动大多使用煤作能源的影响.

2010 ~ 2016 年期间, 3 个基本因子对 \sum_{16} PAHs 总来源的贡献率分别为 36.1%、35.9% 和 28.0%. 主因子 1 中 Pyr 和 Fla 的载荷较高, 其载荷贡献率分别达到 59.9% 和 59.5%. 其中, Fla 和 Pyr 是燃煤的特征物, 故其指示的 \sum_{16} PAHs 来源是燃煤源. 主因子 2 中 Nap、Flu、Ant 和 Ace 的载荷较高, 其载荷贡献率分别达到 96.7%、80.2%、68.5% 和 61.2%. 其中, Nap 和 Ace 为生物质燃烧重要标志物, 故主因子 2 指示的是生物质燃烧源. 主因子 3 中 BkF、InP 和 DahA 的载荷较高, 其载荷贡献率分别达到 61.6%、57.4% 和 54.0%. 其中, 有研究表明 InP 和 BkF 在柴油车尾气中载荷较高^[45], DahA 主要是汽油燃烧的特征产物, 故主成分 3 指示的 \sum_{16} PAHs 来源是交通源. 综上, 研究区域地表水中 PAHs 主要来源于交通源、燃煤源和生物质燃烧源.

由图 7 可知: ①研究期间地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 主要有 3 个来源: 源 1 为生物质燃烧源、源 2 为燃煤源和源 3 为交通源. ②2002 ~ 2009 年期间, 生物质燃烧源贡献率为 14.8%, 燃煤源贡献率为 31.3%, 交通源贡献率为 53.9%. ③2010 ~ 2016 年期间, 生物质燃烧源贡献率为 35.9%, 燃煤源贡献率为 36.1%, 交通源贡献率为 28.0%. 2010 ~ 2016 年生物质燃烧源贡献率较 2002 ~ 2009 年有明显上升, 可能与农场秸秆燃烧和生物质燃烧工艺的发展等城市面源污染产生的 \sum_{16} PAHs 排放经降雨和地表径流输入到水体中有关.

2.5 源解析不确定性分析

对于拟合优度而言, 诊断的重点是在模型预测值和实测值的决定系数 (R^2), 以评估模型可靠性.

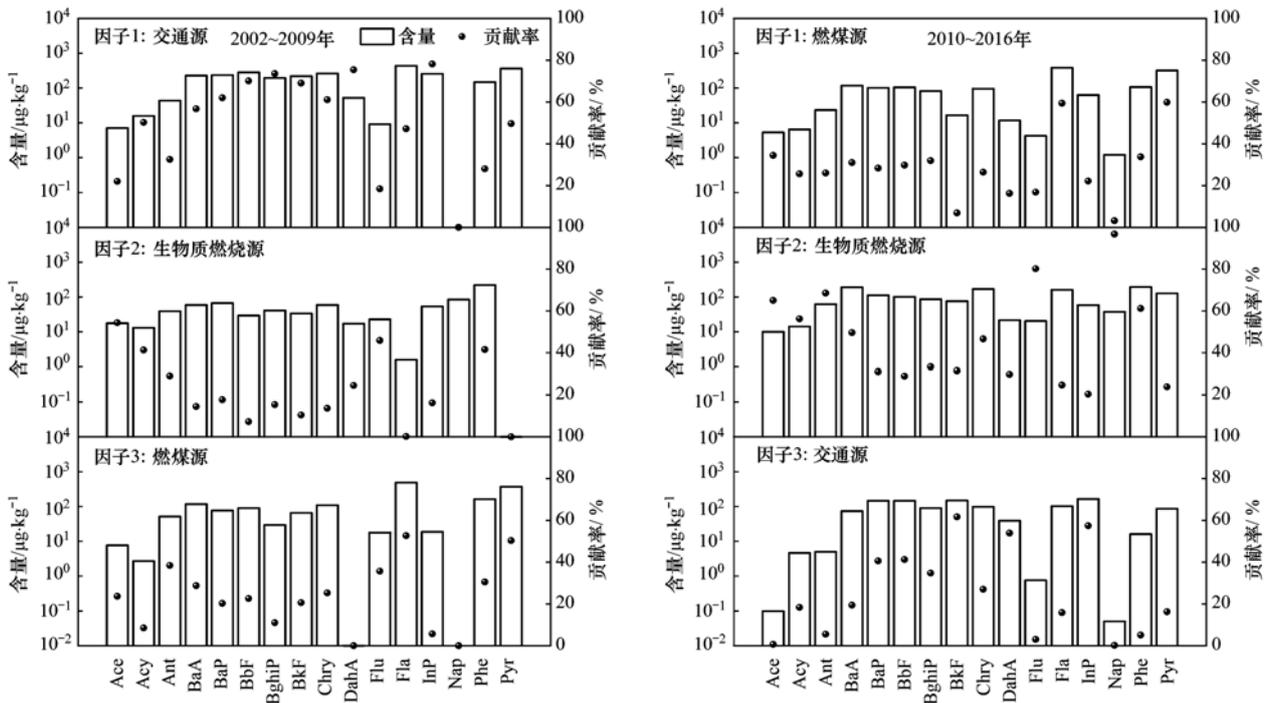


图 6 基于 PMF 模型的地表水 \sum_{16} PAHs 源解析

Fig. 6 Source profiles of \sum_{16} PAHs obtained with the PMF model

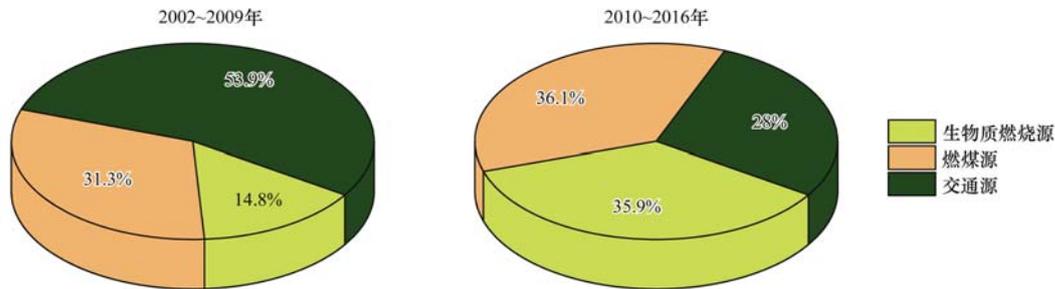


图 7 PAHs 源贡献率

Fig. 7 Contribution of identified PAHs sources

本研究中大多数 PAHs 预测含量和测量含量的决定系数(R^2)高于 0.80(表 2). 较高的 R^2 值表明 PMF 模型中预测的含量很好地解释了测量含量的值和变化^[46].

对于 DISP 而言, 诊断的重点是评估因子交换百分数($swaps$)和 Q 下降百分数(dQ). 若 dQ 值太大则认为出现因子身份识别发生互换情况, 即因子交换现象; 若 dQ 值在 1.00% 范围内且因子交换百分数为 0%, 则认为 Q 变化不显著, 未发生因子交换现象. 对于 BS 而言, 诊断的重点是通过重构样品计算得到 BS 因子与各基本因子相匹配的百分数, 即匹配率, 以此评估因子中每个变量分配的不确定性, 较高的匹配率被认为是较理想的基础运行重现性^[47]. 由表 3 可以看出, 在 3 基本因子情景下, DISP 运行阶段 dQ 值均在 0.30% 内, 因子交换百分数均为 0%, BS 因子与各基本因子匹配率均为 80% 以上,

表 2 2002 ~ 2016 年实测值与 PMF 模型预测值之间的关系

Table 2 Relation between observed values and predicted values of PMF model from 2002 to 2016

PAHs	2002 ~ 2009 年			2010 ~ 2016 年		
	截距	斜率	R^2	截距	斜率	R^2
Phe	27.23	0.93	0.95	22.29	0.90	0.97
Pyr	38.48	0.93	0.94	-3.93	1.01	0.99
Chry	5.65	0.97	0.92	26.64	0.91	0.97
BaA	11.98	0.95	0.91	14.55	0.95	0.96
BghiP	38.14	0.84	0.90	42.92	0.82	0.84
InP	41.39	0.85	0.89	65.62	0.71	0.76
BbF	24.99	0.91	0.87	25.76	0.93	0.89
BaP	44.04	0.86	0.87	22.06	0.91	0.89
Fla	117.34	0.84	0.84	16.36	0.97	0.99
BkF	72.18	0.73	0.81	29.11	0.85	0.80
Flu	10.82	0.75	0.74	8.03	0.62	0.72
Nap	28.73	0.57	0.69	13.77	0.54	0.60
Ant	41.87	0.64	0.69	3.46	0.96	0.96
Ace	6.02	0.79	0.65	2.15	0.81	0.78
DahA	33.27	0.48	0.62	30.11	0.55	0.64
Acy	14.87	0.48	0.59	2.97	0.86	0.80

表明该方案下 Q 变化不显著, 未发生因子交换现象, 该情景方案较稳定。

表 3 PMF 和误差估计诊断总结

Table 3 Summary of PMF and error estimate diagnostics

诊断	2002 ~ 2009 年	2010 ~ 2016 年
错误代码	0	0
$dQ/\%$	0.12	0.29
swaps/ $\%$	0	0
匹配率/ $\%$	81, 81, 100	86, 100, 92

3 结论

(1) 自 2002 年开始研究区域地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 含量呈波动缓慢降低趋势, M-K 趋势检验表明, \sum_{16} PAHs 含量在 2010 年出现明显突变。2002 ~ 2016 年期间研究区域地表水悬浮颗粒物中 PAHs 含量的时序变动主要受 10 a (第一主周期) 和 5 a (第二主周期) 这 2 个特征时间尺度的控制。

(2) 单因素方差分析表明, 地表水悬浮颗粒物中 \sum_{16} PAHs 总量分布表现为上游和中游显著高于下游的变化模式 ($P < 0.05$), 且 PAHs 单体变异系数均大于 0.1, 小于 1, 属于中等变异。

(3) 源解析结果表明, 地表水悬浮颗粒物 PAHs 主要输入源为: 交通源、生物质燃烧源和燃煤源, 其对 \sum_{16} PAHs 的贡献率分别为 40.9%、25.4% 和 33.7%。2010 ~ 2016 年与 2002 ~ 2009 年相比, 交通源贡献率下降了 25.9%, 生物质燃烧源和燃煤源贡献率分别上升了 21.1% 和 4.8%。

参考文献:

- [1] Abdel-Shafy H I, Mansour M S M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation [J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2016, **25**(1): 107-123.
- [2] Li R F, Hua P, Zhang J, *et al.* Effect of anthropogenic activities on the occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic suspended particulate matter: evidence from Rhine and Elbe Rivers [J]. Water Research, 2020, **179**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115901.
- [3] Li R F, Zhang J, Krebs P. Consumption- and income-based sectoral emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons in China from 2002 to 2017 [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(6): 3582-3592.
- [4] Li R F, Hua P, Cai J L, *et al.* A sixteen-year reduction in the concentrations of aquatic PAHs corresponding to source shifts in the Elbe River, Germany [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **223**: 631-640.
- [5] Su B J, Zhang G H, Zhuo Z M, *et al.* Different characteristics of individual particles from light-duty diesel vehicle at the launching and idling state by AAC-SPAMS [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **418**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126304.
- [6] Li W L, Park R, Alexandrou N, *et al.* Multi-year analyses reveal

different trends, sources, and implications for source-related human health risks of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in the Canadian Great Lakes basin [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(4): 2254-2264.

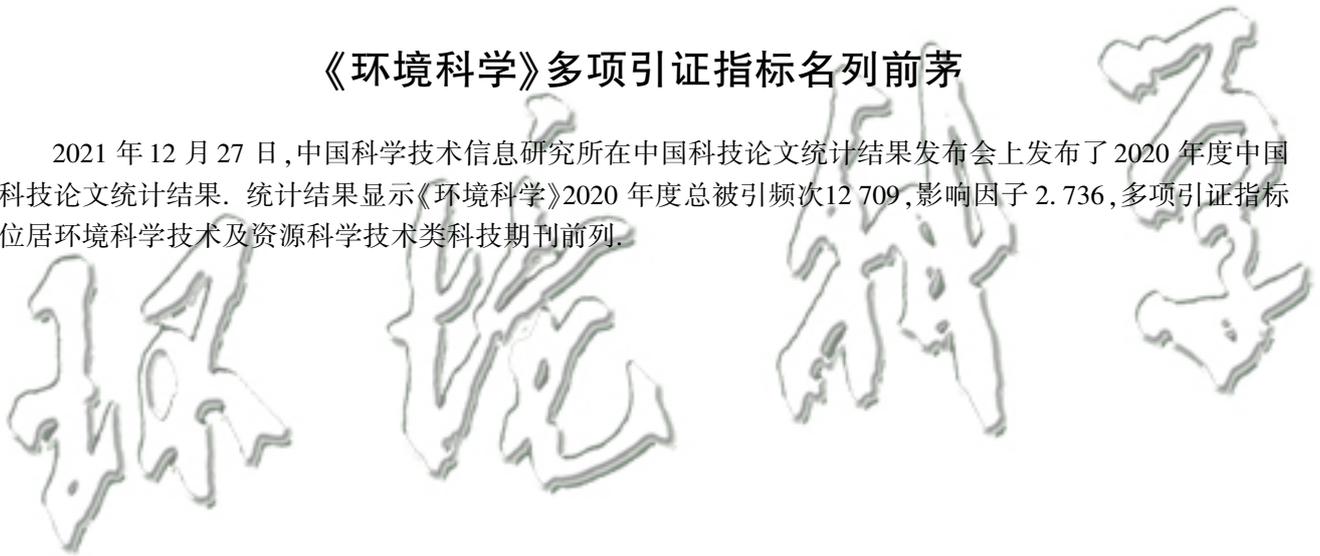
- [7] Li J, Zhang G, Li X D, *et al.* Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China [J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 145-155.
- [8] 孔祥胜, 祁士华, 黄保健, 等. 广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降 [J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 746-753.
- Kong X S, Qi S H, Huang B J, *et al.* Atmospheric deposition of PAHs in Dashiwei karst Tiankeng group in Leye, Guangxi [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 746-753.
- [9] 张巍, 张树才, 万超, 等. 北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析 [J]. 环境科学, 2008, **29**(6): 1478-1483.
- Zhang W, Zhang S C, Wan C, *et al.* PAH sources in road runoff system in Beijing [J]. Environmental Science, 2008, **29**(6): 1478-1483.
- [10] 刘大超, 徐秋萍, 张洵, 等. 基于逸度方法评价巢湖流域 PAHs 在水体-沉积物间扩散过程 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 930-939.
- Liu D C, Xu Q P, Zhang L, *et al.* Assessing the water-sediment diffusive process of PAHs in Chaohu Lake watershed: a fugacity based approach [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 930-939.
- [11] 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.
- Jia T Q, Lei R R, Wu X 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.
- [12] Sun J H, Wang G L, Chai Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan Reach of the Yellow River, Middle China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(5): 1614-1624.
- [13] Li R F, Cai J L, Li J F, *et al.* Characterizing the long-term occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons and their driving forces in surface waters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127065.
- [14] Guo W, He M C, Yang Z F, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River watershed, China [J]. Chemosphere, 2007, **68**(1): 93-104.
- [15] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染源解析研究综述 [J]. 土壤通报, 2018, **49**(1): 232-242.
- Li J, Wu J, Jiang J Y, *et al.* Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(1): 232-242.
- [16] 蔡昂祖, 张海霞, 王小剑, 等. Unmix 模型污染源解析研究进展及应用前景 [J]. 土壤通报, 2021, **52**(3): 747-756.
- Cai A Z, Zhang H X, Wang X J, *et al.* Review on the pollution source apportionment by Unmix model and application prospect [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(3): 747-756.
- [17] 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 等. 华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 [J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 619-628.
- Su Y W, Liu W J, Mao Y, *et al.* Characteristics and sources analysis of water-soluble inorganic pollution in PM_{2.5} during

- summer in Central China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (2): 619-628.
- [18] 王晓军, 陈倩, 董韶妮, 等. 烟台市 PM_{2.5} 空间分布特征与来源解析[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(4): 53-60.
Wang X J, Chen Q, Dong S N, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Yantai city [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(4): 53-60.
- [19] Chen W T, Shao M, Lu S H, *et al.* Understanding primary and secondary sources of ambient carbonyl compounds in Beijing using the PMF model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3047-3062.
- [20] Huang S L, Rahn K A, Arimoto R. Testing and optimizing two factor-analysis techniques on aerosol at Narragansett, Rhode Island[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33** (14): 2169-2185.
- [21] 薛国艳, 王格慧, 吴灿, 等. 长三角背景点夏季大气 PM_{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 554-563.
Xue G Y, Wang G H, Wu C, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of n-alkanes and PAHs in summertime PM_{2.5} at background site of Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 554-563.
- [22] 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 等. 银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40** (7): 3068-3077.
Tian D N, Dang L H, Ding R M, *et al.* Distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface waters of the Yinchuan wetlands [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3068-3077.
- [23] 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 等. 宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2490-2501.
Yang F, Luo H X, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics, source apportionment, and risk assessment of topsoil PAHs in the core area of the Ningdong energy and chemical industry base [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (5): 2490-2501.
- [24] Nguyen T H, Helm B, Hettiarachchi H, *et al.* Quantifying the information content of a water quality monitoring network using principal component analysis; a case study of the Freiburger Mulde river basin, Germany [J]. *Water*, 2020, **12** (2), doi: 10.3390/w12020420.
- [25] Wang Z Y, Hua P, Li R F, *et al.* Concentration decline in response to source shift of trace metals in Elbe River, Germany: a long-term trend analysis during 1998-2016 [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **250**: 511-519.
- [26] Su X Q, An J L, Zhang Y X, *et al.* Prediction of ozone hourly concentrations by support vector machine and kernel extreme learning machine using wavelet transformation and partial least squares methods [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11** (6): 51-60.
- [27] Yao Y R, He C, Li S Y, *et al.* Properties of particulate matter and gaseous pollutants in Shandong, China: daily fluctuation, influencing factors, and spatiotemporal distribution [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 384-394.
- [28] Wang Z Y, Shen Q S, Hua P, *et al.* Characterizing the anthropogenic-induced trace elements in an urban aquatic environment: a source apportionment and risk assessment with uncertainty consideration [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **275**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111288.
- [29] Dong L A, Zhang J. Predicting polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water by a multiscale feature extraction-based deep learning approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **799**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149509.
- [30] Brown S G, Eberly S, Paatero P, *et al.* Methods for estimating uncertainty in PMF solutions: examples with ambient air and water quality data and guidance on reporting PMF results [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **518-519**: 626-635.
- [31] Efron B, Tibshirani R. *An introduction to the bootstrap* [M]. Florida: CRC press, 1994.
- [32] Bakhtiari A R, Zakaria M P, Yaziz M I, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and n-alkanes in suspended particulate matter and sediments from the Langat River, Peninsular Malaysia [J]. *Environmentasia*, 2009, **2**(2): 1-10.
- [33] Salvo V S, Gallizia I, Moreno M, *et al.* Fungal communities in PAH-impacted sediments of Genoa-Voltri Harbour (NW Mediterranean, Italy) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50** (5): 553-559.
- [34] Oen A M P, Cornelissen G, Breedveld G D. Relation between PAH and black carbon contents in size fractions of Norwegian harbor sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **141** (2): 370-380.
- [35] 李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 等. 沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 379-388.
Li J K, Song X Y, Wei J B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Shenyang north new area [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 379-388.
- [36] 陈志强, 赵利容, 刘贝贝, 等. 湛江湾柱状沉积物 n-alkanes 和 PAHs 组合分子特征及其环境指示作用[J]. *海洋学报*, 2016, **38**(8): 115-123.
Chen Z Q, Zhao L R, Liu B B, *et al.* The molecular characteristic of n-alkanes and PAHs in core sediments of Zhanjiang Bay and its environmental indication significance [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, **38**(8): 115-123.
- [37] Mancilla Y, Mendoza A, Fraser M P, *et al.* Organic composition and source apportionment of fine aerosol at Monterrey, Mexico, based on organic markers [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(2): 953-970.
- [38] Guillon A, Le Ménach K, Flaud P M, *et al.* Chemical characterization and stable carbon isotopic composition of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons issued from combustion of 10 Mediterranean woods [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(5): 2703-2719.
- [39] 王学彤, 贾英, 孙阳昭, 等. 典型污染区河流表层沉积物中 PAHs 的分布、来源及生态风险[J]. *环境科学*, 2010, **31** (1): 153-158.
Wang X T, Jia Y, Sun Y Z, *et al.* Distribution, possible source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments from a typical contaminated area [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 153-158.
- [40] Hassanien M A, Abdel-Latif N M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust over Greater Cairo, Egypt [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **151**(1): 247-254.
- [41] Bourotte C, Forti M C, Taniguchi S, *et al.* A wintertime study of PAHs in fine and coarse aerosols in São Paulo City, Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3799-3811.
- [42] Kulkarni P, Venkataraman C. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Mumbai, India [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(17): 2785-2790.
- [43] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic

- aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [44] Tian F L, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Sources and seasonal variation of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Dalian, China: factor analysis with non-negative constraints combined with local source fingerprints [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(17): 2747-2753.
- [45] 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 等. 基于 GIS 和 PMF 模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- Xia Z S, Wang Y Y, Zhong Y X, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil PAHs in Shizuishan city based on GIS and PMF model[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5656-5667.
- [46] Tian Y Z, Shi G L, Han S Q, *et al.* Vertical characteristics of levels and potential sources of water-soluble ions in PM₁₀ in a Chinese megacity[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 1-9.
- [47] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. PMF 模型解析土壤重金属来源的不确定性[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(2): 716-725.
- Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Uncertainty analysis of soil heavy metal source apportionment by PMF model [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 716-725.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2021 年 12 月 27 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了 2020 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2020 年度总被引频次 12 709, 影响因子 2. 736, 多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ²⁺	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)