

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息(2167, 2191, 2324)	

陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析

吴喜军^{1,2}, 董颖^{1*}, 赵健^{3*}, 刘静¹, 张亚宁¹

(1. 榆林学院建筑工程学院, 榆林 719000; 2. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 3. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为研究陕北矿区内典型河流窟野河水体中多环芳烃(PAHs)的赋存水平、空间分布、来源和生态风险,采用高效液相色谱-二极管阵列检测器串联荧光检测器法,对研究区水体中59个采样点的16种PAHs进行了定量检测分析。结果表明,窟野河水体中 $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 范围为50.06~278.16 ng·L⁻¹,平均值为128.22 ng·L⁻¹;单体浓度范围为0~121.22 ng·L⁻¹,其中蒽的检出浓度最高,平均值为36.58 ng·L⁻¹,其次是苯并[a]蒽和菲;各单体检出率均在70%以上,12种单体的检出率为100%;59个采样点中4环PAHs的相对丰度较大,占比范围为38.59%~70.85%;各采样点间浓度差异显著,浓度高值点主要集中在矿业活动工业区和人口密集区;与国内外其它河流相比,窟野河水体中PAHs浓度处于中等水平。运用正定矩阵因子分解法(PMF),结合特征比值法,对PAHs的来源种类与来源贡献进行了定量分析,表明窟野河中上游工业区水体中PAHs主要来源于焦化和石油类物质排放(34.67%)、煤炭燃烧(30.62%)、薪材燃烧(18.11%)和车辆排放(16.60%);下游居民区主要来源于煤炭燃烧(64.93%)、薪材燃烧(26.20%)和车辆排放(8.86%);并明晰了不同污染源的主要影响区域。生态风险评估结果显示,萘的风险较低,苯并[a]蒽存在高风险,其余单体处于中等风险;59个采样点中仅有12个采样点属于低生态风险区,其余为中等偏高风险等级,且柠条塔工业园区周边水体已临近高生态风险,需尽快采取防控措施。

关键词: 陕北矿区; 多环芳烃(PAHs); 赋存特征; 来源解析; PMF模型; 生态风险

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2040-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205293

Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China

WU Xi-jun^{1,2}, DONG Ying^{1*}, ZHAO Jian^{3*}, LIU Jing¹, ZHANG Ya-ming¹

(1. School of Civil Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The aim of this study was to assess the occurrence level, spatial distribution, pollution source, and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Kuye River of the northern Shaanxi mining area. In total, 16 priority PAHs were quantitatively detected at 59 sampling sites using a high-performance liquid chromatography-diode array detector in series with a fluorescence detector. The results showed that the $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ in the Kuye River ranged from 50.06 to 278.16 ng·L⁻¹, with an average value of 128.22 ng·L⁻¹. The PAHs monomer concentrations ranged from 0 to 121.22 ng·L⁻¹, of which Chrysene had the highest concentration, with average values of 36.58 ng·L⁻¹, respectively, followed by benzo(a)anthracene and phenanthrene. The detection rate of each monomer was more than 70%, of which 12 monomers revealed detection rates of 100%. In addition, the 4-ring PAHs showed the highest relative abundance in the 59 samples, ranging from 38.59% to 70.85%. The PAHs concentrations revealed significant spatial variation in the Kuye River. Moreover, the highest PAHs concentrations were mainly observed in coal mining, industrial, and densely populated areas. Compared with those in other rivers in China and worldwide, the PAHs concentrations in the Kuye River showed a medium pollution level. On the other hand, the positive definite matrix factorization (PMF) and diagnostic ratios were used to quantitatively assess the source apportionment of PAHs in the Kuye River. The results showed that coking and petroleum emissions, coal combustion, fuel-wood combustion, and automobile exhaust emissions contributed to the PAHs concentrations in the industrial areas of the upper reach by 34.67%, 30.62%, 18.11%, and 16.60%, and coal combustion, fuel-wood combustion, and automobile exhaust emissions contributed in the downstream residential areas by 64.93%, 26.20%, and 8.86%. In addition, the results of the ecological risk assessment showed low ecological risks of naphthalene and high ecological risks of benzo(a)anthracene, respectively, whereas the remaining monomers revealed medium ecological risk. Among the 59 sampling sites, only 12 belonged to low ecological risk areas, whereas the remaining sampling sites were at medium to high ecological risks. Moreover, the water area near the Ningtiaota Industrial Park showed a risk value close to the high ecological risk threshold. Therefore, it is urgent to formulate prevention and control measures in the study region.

Key words: northern Shaanxi mining area; polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs); occurrence characteristics; source apportionment; PMF model; ecological risk

收稿日期: 2022-05-27; 修订日期: 2022-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969031, 52169006); 陕西省科技创新团队项目(2022TD-08); 陕西省重点研发计划项目(2020SF-412, 2021SF-442); 榆林高新区科技计划项目(CXY-2021-11, CXY-2021-19); 西北旱区生态水利国家重点实验室开放基金项目(2019KFKT-13); 陕西省教育厅重点科研计划项目(22JS045); 榆林市“科学家+工程师”队伍项目(YLKG-2022-10)

作者简介: 吴喜军(1979~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水资源保护与水污染控制, E-mail: wxj0826@163.com

* 通信作者, E-mail: dyng1010@163.com; zhaojian@cares.org.cn

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 对环境 and 人类具有潜在的毒性、诱变性和致癌性^[1~4], 且具有半挥发性和持续降解的特点, 同时可远距离迁移, 在空气、地表水、沉积物、土壤和生物群等环境中普遍存在^[5~7], 近年来受到越来越多的关注. 国内外学者对环境中的 PAHs 进行了研究, 指出自然环境中的 PAHs 主要来源于工业生产、农业废物、汽车尾气、煤炭燃烧和石化产品排放等人为活动, 并最终通过大气干湿沉降、工业废水排放和地表径流等方式进入周围环境介质中^[8,9], 尤其是地表水体中. 美国环境保护署和加拿大环境部长理事会都对水环境中 PAHs 的最大阈值浓度做了规定^[10]. 近些年, 中国总能源消耗呈现跳跃式增长, 煤炭的开采和使用量增加显著, 对应的 PAHs 排放量也呈现快速增长. 因此, 在煤炭开采区和能源化工区, 监测和分析 PAHs 的污染水平是非常必要的.

榆林地区是我国重要的煤炭生产基地和国家级能源化工基地, 位于黄土高原和毛乌素沙漠接壤地带, 为典型的半干旱内陆气候区, 水资源贫乏^[11]. 境内主要河流——窟野河是黄河的一级支流, 其上游地区分布着大量的正在开采的煤矿, 中游有我国最大的兰炭产业园, 还有火力发电、炼焦和煤制品制造等能源化工生产活动, 下游主要为村镇居民区. 窟野河作为典型的矿区河流, 吸收了区域内煤炭生产加工排放等人类活动产生的 PAHs, 直接导致了其在水体中的积累. 然而, 在陕北矿区这一脆弱的生态环境中, 人们对人为因素如何影响 PAHs 的分布特征和毒性风险还缺乏充分的认识. 基于此, 本文探讨了研究区水体中 PAHs 的浓度水平及空间分布等污染特征, 对其来源种类与来源贡献进行定量分析, 并进行了生态风险评估, 以期对矿区水体污染控制和生态环境治理提供数据支持和理论依据.

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

本研究采用固相萃取高效液相色谱法对陕北矿区典型河流——窟野河水体中 59 个采样点 16 种 PAHs 进行了定量检测分析.

仪器设备: Agilent1200 高效液相色谱-二极管阵列检测器串联荧光检测器 (HPLC-DAD-FLD, 美国安捷伦科技有限公司)、固相萃取装置 (24 位, 美国 Mediawax 公司)、旋转蒸发仪 (N-1000, 日本爱朗有限公司)、氮吹仪 (TTL-DCII, 北京科林仪器有限公司) 等.

分析试剂: 液相色谱纯试剂乙腈、甲醇、二氯甲烷以及 99% 纯度的十氟联苯, 均购自阿拉丁公

司. 16 种 PAHs 混合标液标准物质 Z-013-17 (蔡、蒽烯、芴、苯并[ghi]花、二氢萘、菲、蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、荧蒽、芘、䓑、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽), 购自美国 Accustandard 公司.

1.2 样品采集

在窟野河陕西段和入黄处的黄河干流共选取 59 个采样点位, 其中窟野河采样点 57 个, 黄河干流采样点 2 个. 本次水样采集于 2021 年 10 月, 采样点涵盖窟野河陕西段中上游的煤炭开采、兰炭和炼焦等多元矿业活动工业区, 以及下游的村镇居民区和农业区, 具体采样点位及空间分布见图 1. 使用 JK-8008 采水器 (不锈钢, JKD, 中国) 取样, 采集河道中央水面下 0.5 m 深度表层水, 每个采样点 2 L, 密封于棕色玻璃瓶中低温冷藏.

1.3 预处理方法与仪器分析

将 1 L 水样通过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜 (surface waterman, UK) 过滤后, 利用固相萃取装置进行样品富集, 固相萃取柱选用 C_{18} 柱 (Supelco, 1 000 mg/6 mL). 水样富集前先用 10 mL 二氯甲烷对 C_{18} 柱进行预洗, 然后用 10 mL 甲醇和 10 mL 水各分两次依次活化小柱, 样品富集后用 10 mL 水冲洗 C_{18} 柱, 再用高纯氮气吹柱 10 min. 之后用二氯甲烷进行洗脱, 浓缩后用乙腈定容至 0.5 mL 待测.

使用高效液相色谱-二极管阵列检测器串联荧光检测器测定样品中 PAHs 浓度. 因为蒽烯的浓度无法用荧光检测器测定, 故选用二极管阵列检测器测定其浓度, 其余 15 种 PAHs 单体浓度用荧光检测器测定. 色谱柱选用多环芳烃专用柱 (5 μm $\times$ 250 mm, waters); 流动相为乙腈和水, 流量为 1.2 mL $\cdot$ min⁻¹; 梯度洗脱程序: 乙腈从初始的 65% 以 2.5% $\cdot$ min⁻¹ 的增量至 100%, 保持至出峰完毕; 二极管阵列检测器的波长为 238 nm, 荧光检测器的波长为梯度变化^[12].

1.4 质量保证与质量控制

采用高效液相色谱多点校准外标曲线法测定样品中 PAHs 的质量浓度, 标线线性系数 R^2 为 0.993 7 ~ 0.999 0, 线性良好. 通过实验空白、平行样品和基质加标保证实验过程的精确性. 样品中 PAHs 16 种单体浓度的相对标准偏差为 0.6% ~ 2.4%, 检测限为 0.4 ~ 1.5 ng $\cdot$ L⁻¹, 加标回收率为 79.6% ~ 101.7%. 每批样品进行 10% 的双平行测定, 做 2 个实验空白, 空白实验的测定结果低于检测限, 满足质量控制要求.

1.5 数据处理与分析

PAHs 的浓度数据均为经回收率校正后的数

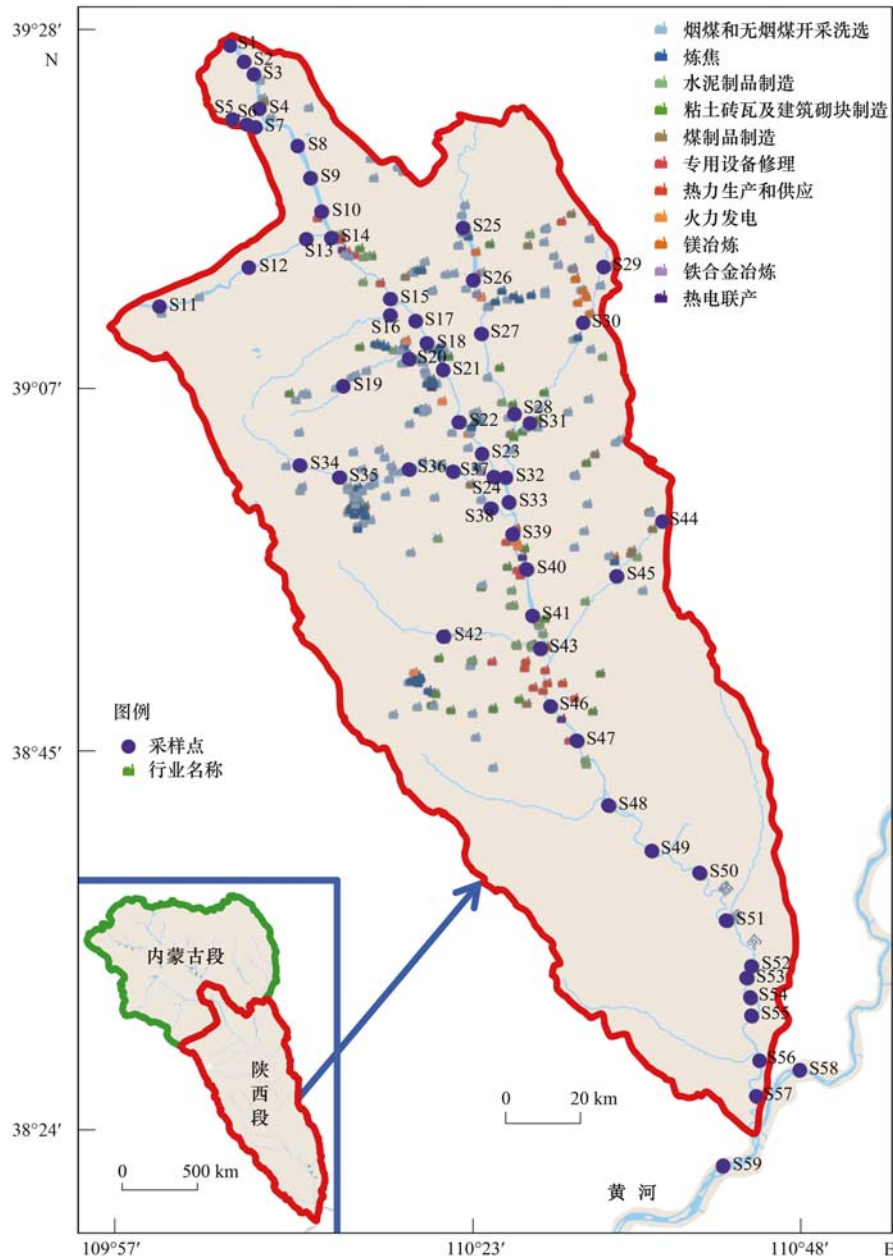


图1 窟野河采样点位分布示意

Fig. 1 Map of the sampling sites in Kuye River

据, 水体样品中未检出的数据以 0 计。数据计算统计由 Excel 2016 完成; 运用 PMF5.0 软件对数据进行正定矩阵因子分解分析; 相关图形绘制由 Origin 8.0 等软件完成。

2 结果与分析

2.1 PAHs 赋存水平

研究区 59 个采样点的 16 种 PAHs 的检出情况及各国标准见表 1。可以看出, 16 种单体在大部分样品中均被检出; 变异系数均大于 0.4, 表明 16 种单体浓度的空间差异显著; 平均值大都高于中位值, 高浓度值较多, 呈正偏态分布, 表明人类活动已经导致水体中 PAHs 浓度积累。 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 范围为

50.06 ~ 278.16 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 128.22 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 中位值为 116.34 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Chry 的检出浓度最高, 平均值和中位值分别为 36.58 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 23.59 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 其次是 BaA 和 Phe。PAHs 单体的检出率均在 70% 以上, 12 种单体的检出率为 100%, BbF 和 BkF 的检出率略低, 分别为 77.97% 和 76.27%, 与这两种组分均为高分子量单体, 具有较高的疏水性有关^[13]。且 BbF 和 BkF 的变异系数最大, 为 1.39 和 1.08, 表明这两种单体浓度的空间差异性较大。

窟野河陕西段 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 的均值 (128.22 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$) 显著高于三峡水库支流 (14.72 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)^[14]、印度 Ganges 河 (31.89 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$)^[15] 和

表 1 窟野河 PAHs 检出情况及各国标准¹⁾

PAHs 组分	Table 1 PAHs concentrations in Kuye River and various national standards							各国标准/ng·L ⁻¹		
	最大值 /ng·L ⁻¹	最小值 /ng·L ⁻¹	平均值 /ng·L ⁻¹	中位值 /ng·L ⁻¹	标准 偏差	变异 系数	检出率 /%	中国	美国	加拿大
萘(Nap)	11.74	1.19	5.98	5.79	2.69	0.45	100.00	—	—	1.1 × 10 ³
苊烯(Acy)	23.53	2.22	10.93	10.93	4.86	0.44	100.00	—	—	—
芴(Flu)	7.80	0.26	4.32	4.34	2.11	0.49	100.00	—	5 × 10 ⁴	3 × 10 ³
苯并[ghi]芘(BghiP)	5.38	0.34	2.10	2.04	1.01	0.48	100.00	—	—	—
二氢苊(Ace)	7.13	0.48	2.96	2.94	1.69	0.57	100.00	—	7 × 10 ⁴	5.8 × 10 ³
菲(Phe)	36.23	0.56	14.76	13.12	9.11	0.62	100.00	—	—	400
蒽(Ant)	5.88	0.16	1.75	1.15	1.50	0.85	100.00	—	3 × 10 ⁵	12
茚并[1,2,3-cd]芘(InP)	19.31	0.44	4.09	2.56	4.29	1.05	100.00	—	1.2	10
荧蒽(Fla)	16.48	2.12	7.77	7.21	3.22	0.41	100.00	—	2 × 10 ⁴	40
芘(Pyr)	14.59	0.98	5.16	4.21	3.42	0.66	100.00	—	2 × 10 ⁴	25
䓑(Chry)	121.22	7.13	36.58	23.59	28.29	0.77	100.00	—	120	—
苯并[a]蒽(BaA)	58.10	6.49	19.93	16.03	12.33	0.62	100.00	—	1.2	18
苯并[b]荧蒽(BbF)	18.95	ND	4.09	1.27	5.71	1.39	77.97	—	1.2	—
苯并[k]荧蒽(BkF)	13.19	ND	3.33	1.50	3.60	1.08	76.27	—	12	—
苯并[a]芘(BaP)	13.35	ND	3.00	2.14	3.15	1.05	91.53	2.8	0.12	15
二苯并[a,h]蒽(DahA)	3.50	ND	1.46	1.47	0.84	0.57	93.22	—	0.12	—
∑ PAHs	278.16	50.06	128.22	116.34	53.00	0.41	100.00	—	—	—

1) “ND”表示未检出,“—”表示无相关标准

澳大利亚 Brisbane(9.45 ng·L⁻¹)^[16],略高于长江下游支流(78.3 ng·L⁻¹)^[17]和美国密西西比河(86.50 ng·L⁻¹)^[18],与淮河上游(140.37 ng·L⁻¹)^[19]和欧洲多瑙河(123 ng·L⁻¹)^[20]相近,但远低于广西鹤山煤田河流(426.98 ng·L⁻¹)^[21]、黄河三角洲(590 ng·L⁻¹)^[22]、大辽河河口(748.76 ng·L⁻¹)^[23]和埃及尼罗河(2 127.55 ng·L⁻¹)^[24]等地.与相关研究对比,研究区水体中 ∑ PAHs 处于中度水平.

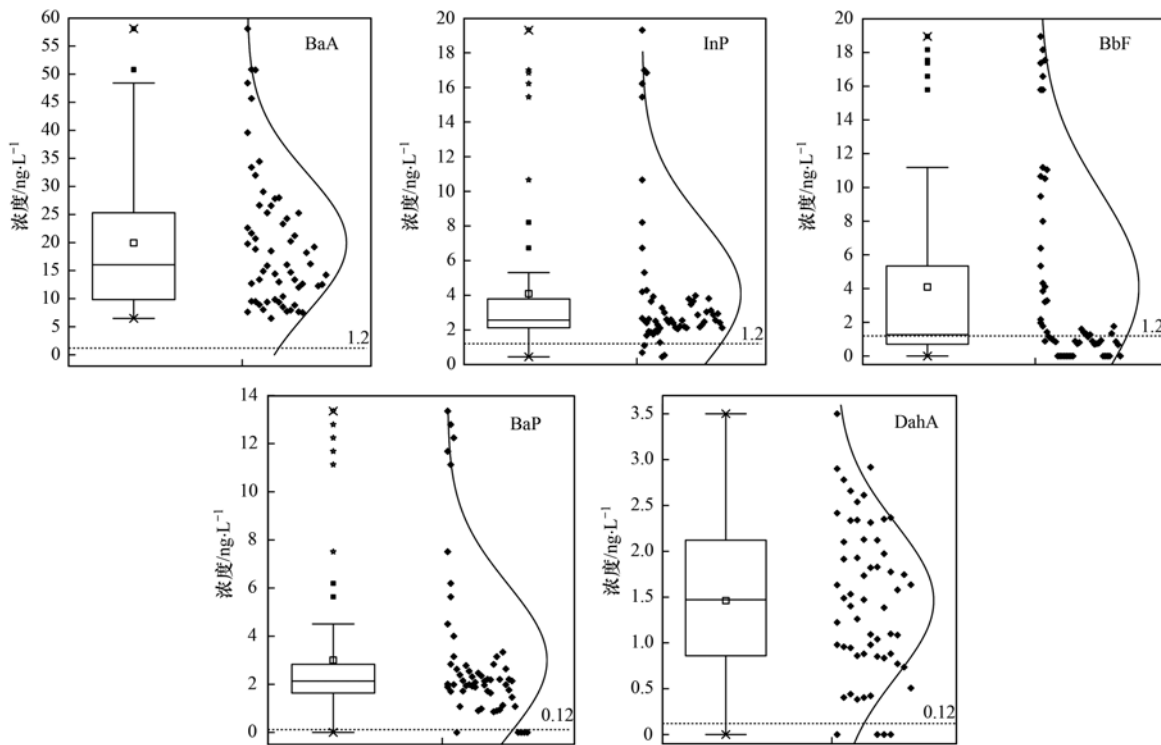
为进一步探讨研究区水体中 16 种 PAHs 单体的赋存水平,将 59 个采样点各单体检出浓度与各国标准对比(表 1).我国地表水环境质量标准(GB3838-2002)^[25]仅对 BaP 浓度做了规定,而美国环保署水质标准(USEPA,2015)^[26]和加拿大环境质量导则(CCME,2015)^[27]对水体中各种 PAHs 单体制定了更严格的规范.出于环境安全考虑,笔者选择 USEPA 水质标准和加拿大环境质量导则中较严格的阈值作为评价标准值.由表 1 可以看出,59 个采样点中强致癌单体 BaP 的最大检出浓度为 13.35 ng·L⁻¹,远超出我国标准,且 100% 采样点中 BaA、93.2% 采样点中 InP、50.8% 采样点中 BbF、91.5% 采样点中 BaP 和 93.2% 采样点中 DahA 的浓度均超过了 USEPA 阈值,见图 2.并且这几种单体都具有潜在致癌性,尤其 BaP 不仅引发肺、胃癌,致畸,还会危害免疫和生殖系统.另外,59 个采样点 ∑ PAHs 均高于美国规定的水生生物暴露于地表水中 PAHs 浓度限值^[28],说明研究区水体中 PAHs 会通过生物富集影响人类健康^[29].因此不能忽视该

地区人类暴露于地表水体中 PAHs 存在的风险.

2.2 空间分布特征

窟野河 59 个采样点 PAHs 的浓度分布见图 3,可以看出,中上游工业区水体中 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 均值为 136.11 ng·L⁻¹,高于下游居民区水体的 126.21 ng·L⁻¹.中上游工业区水体中, $\rho(\sum \text{PAHs})$ 的最高值出现在我国最大的兰炭产业园——柠条塔工业园区采样点 S36 ~ S40,为 227.74 ~ 278.16 ng·L⁻¹,且 Chry 和 BaA 占比最大;第二峰值出现在中国第一产煤大县县城——神木镇采样点 S45 ~ S47, $\rho(\sum \text{PAHs})$ 为 153.95 ~ 185.41 ng·L⁻¹;第三峰值出现在神府东胜煤田腹地中心的大柳塔镇采样点 S13 和 S14,浓度分别为 142.16 ng·L⁻¹ 和 153.96 ng·L⁻¹;采样点 S5、S6、S7、S19 和 S20 的浓度值相对处于较低水平,均位于较为偏僻的区域,远离工业和人类活动的影响.下游水体 ∑ PAHs 峰值出现在人口较密集的居住区:沙峁镇、贺家川镇采样点 S53、S54 和 S57,浓度为 171.47 ~ 207.16 ng·L⁻¹.采样点 S59 位于窟野河入黄处的下游, $\rho(\sum \text{PAHs})$ 为 87.09 ng·L⁻¹,虽略高于上游 S58 的 70.97 ng·L⁻¹,但仍处于较低水平,说明窟野河水体中 PAHs 污染并未对黄河干流造成较大影响.

由前述分析可知,窟野河多个采样点中 BaA、InP、BbF、BaP 和 DahA 的浓度超出 USEPA 阈值,由图 3 可以得到各单体浓度的空间分布情况.其中



虚线表示各单体 USEPA 水质标准; 箱体右侧点据表示 59 个采样点的浓度分布

图 2 研究区 59 个采样点的 PAHs 单体浓度和标准值

Fig. 2 PAHs concentrations and standards of 59 sampling sites in study area

BaA 在柠条塔工业园区采样点浓度最高, 其次是沙峁镇采样点; InP 和 BaP 的浓度分布特征相似, 除最上游的高值区外, 神木镇采样点浓度也较高; BbF 的浓度在大柳塔镇以上区域明显高于其它地点; DahA 高浓度值分布广泛, 且空间差异略小。

由以上分析可知, 各单体浓度的高值点与 $\sum$ PAHs 分布类似, 主要处于矿业活动工业区和城镇附近。柠条塔工业园区内兰炭生产、火力发电、炼焦和煤制品制造等生产结构所占比重较大, 工业生产过程中燃煤产生的 PAHs 通过大气干湿沉降和地表径流的方式进入水体; 大柳塔、神木镇周边的煤炭开采洗选业、煤化工产业和镁铝产业等产生的工业废水及煤炭重卡运输车辆尾气排放也会造成水体中 PAHs 浓度升高; 人口密集居住区的农业生产、生活和机动车尾气排放等同样会引起 PAHs 污染。矿业生产作为当地的支柱产业, 煤炭生产和燃煤产业对 PAHs 的空间分布具有显著影响, 需要引起重视。

2.3 组分特征

根据环数的不同, 可将 16 种 PAHs 单体进行分类, 图 4 为窟野河水体中 PAHs 组分的三元图。从中可以看出, 59 个采样点中 4 环 PAHs (Fla、Pyr、Chry 和 BaA) 的相对丰度较大, 占比范围为 38.59% ~ 70.85%, 平均占比为 51.41%; 其次为 2 ~ 3 环

PAHs, 占比范围为 9.44% ~ 50.79%, 平均占比 33.22%; 5 ~ 6 环 PAHs 的相对丰度较低, 多集中在 20% 以下。5 ~ 6 环高分子量 PAHs 的毒性当量因子往往较 2 ~ 4 环高, 且普遍具有致癌性, 本研究区域只有最上游 S1 ~ S8 采样点的高环 PAHs 相对丰度接近 50%, 其余采样点都以毒性当量因子较低的中低环为主, 毒性风险较低。同时窟野河也因天然径流量锐减^[30], 区域蒸发强烈, 工业用水量增加, 农业灌溉回流等因素对水体中 PAHs 的浓度和组分造成影响^[31, 32]。

3 讨论

3.1 PAHs 的来源解析

3.1.1 特征比值法源鉴别

自然环境中 PAHs 的来源相对比较复杂, 主要有石油源、石油燃烧源和煤及生物质燃烧源等人为来源。不同来源和传输过程决定了其在环境中的结构和组分差异, 因此, PAHs 的组分特征可作为判断污染物来源的重要依据。本研究采用化学性质稳定的 PAHs 同分异构体比值 Fla/(Fla + Pyr) 和 Ant/(Ant + Phe) 来解析污染源, 见图 5。一般认为, 当 Fla/(Fla + Pyr) 大于 0.5 时, 表示 PAHs 污染主要来源于草、薪材、秸秆等生物质和煤的不完全燃烧; Fla/(Fla + Pyr) 介于 0.4 ~ 0.5 之间时, 表示汽油、柴油等石油高温燃烧源及机动车尾气排放; Fla/

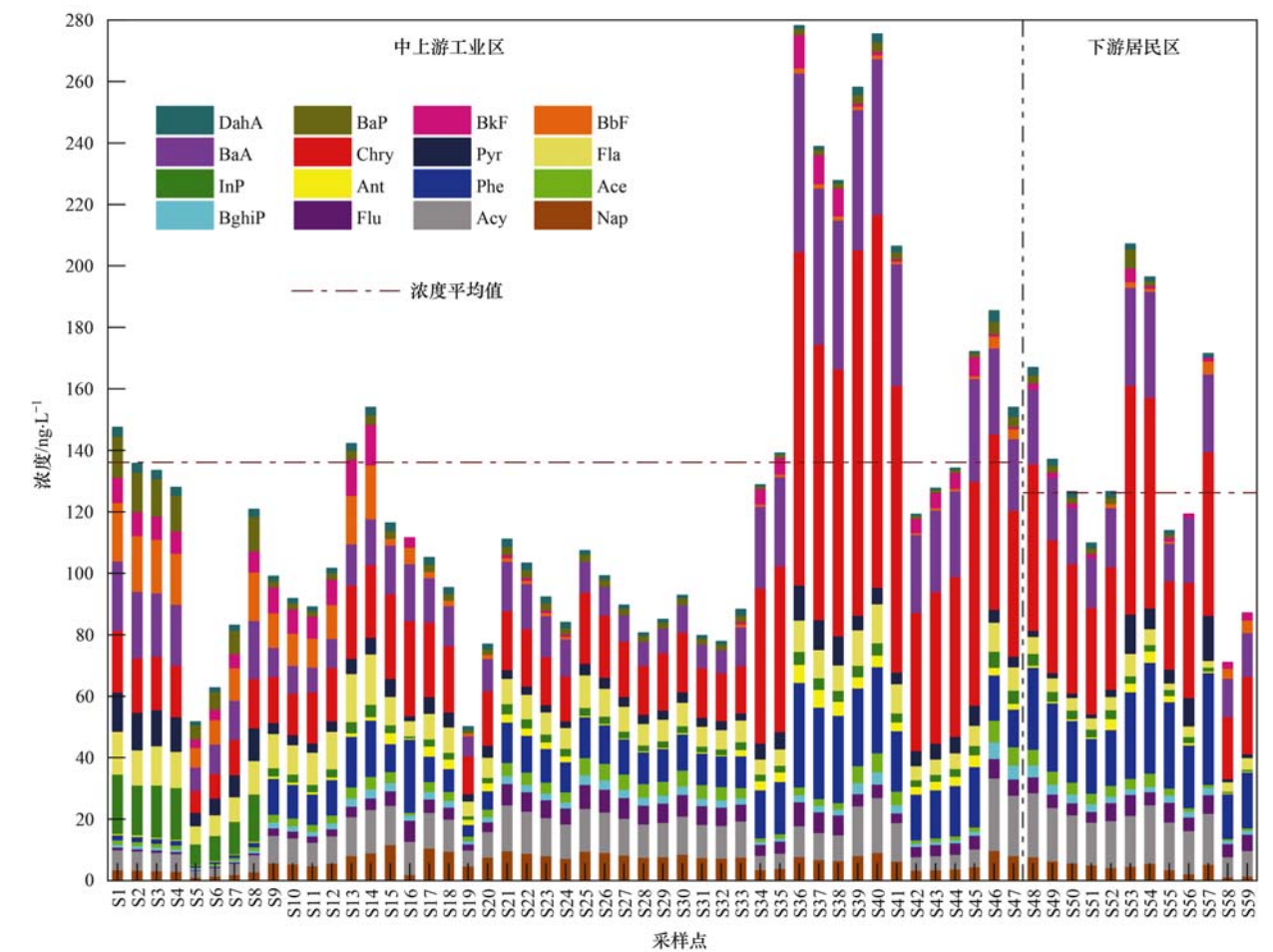


图3 窟野河各采样点 PAHs 浓度

Fig. 3 PAHs concentrations of various samples in Kuye River

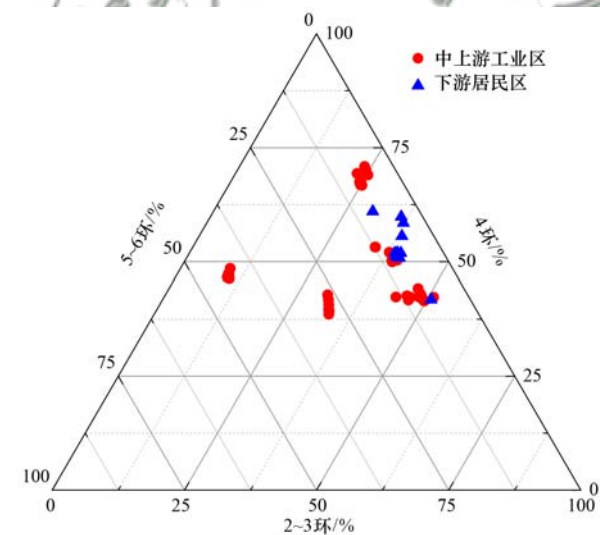


图4 窟野河地表水体中 PAHs 组成的三元图

Fig. 4 Ternary composition diagram of PAHs in the surface water of Kuye River

(Fla + Pyr) 小于 0.4 时,为石油物质泄漏源.同时, $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 大于 0.1 和小于 0.1 分别代表燃烧源和石油源.

从图 5 可知,窟野河中上游工业区水体中约 9% 的采样点 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 的

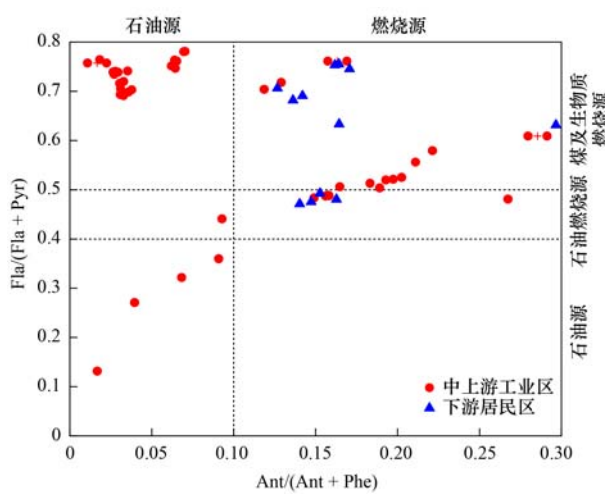


图5 基于特征比值法的 PAHs 源鉴别

Fig. 5 PAHs source identifications by diagnostic ratios

鉴定结果同为石油源,这些点位周边有煤矿分布,易受到煤矿机械工作过程中石油类物质泄漏的影响;约 48% 的采样点为石油与燃烧混合源污染;其它地区 PAHs 污染主要由燃烧引起,其中约 11% 的采样点来源于石油的不完全燃烧,这些采样点大都靠近煤炭运输的主要通道,国道频繁的交通拥堵使机动车辆尾气大量排放,符合石油燃烧为主要来源特征;

其余约 32% 的采样点来源于煤及草、薪材和秸秆等生物质的不完全燃烧. 窟野河下游水体中 Fla/(Fla + Pyr) 和 Ant/(Ant + Phe) 分别大于 0.4 和 0.1, 采样点全部集中在燃烧区, 也充分表明窟野河下游的 PAHs 污染主要来源于煤炭、生物质和石油燃烧. 值得注意的是在窟野河 PAHs 浓度分析中, Chry、BaA 和 Phe 的浓度相对较高. Chry 为汽油燃烧和煤炭燃烧的特征标志, BaA 和 Phe 是煤燃烧的重要信号, 这 3 种化合物浓度相对较高意味着区域内煤炭燃烧较多, 重卡运输车辆尾气排放污染较大, 符合研究区为国家能源化工基地、世界七大煤田的特征. 特征比值法定性解析了污染来源, 为下一步定量分析 PAHs 的来源种类与来源贡献奠定了基础.

3.1.2 PMF 模型分析

为进一步定量解析研究区水体中 PAHs 的来源及其贡献率, 采用美国环保署的多变量受体模型正定矩阵分解模型 (EPA PMF5.0), 分别对窟野河中上游工业区和下游村镇居民区水体中 PAHs 的来源进行定量分析^[33,34]. 模型运行前输入各采样点 PAHs 浓度矩阵及其对应的不确定度矩阵.

当浓度 x_{ik} 低于检出限 MDL 时, 不确定度:

$$\sigma_{ik} = (5/6) \times \text{MDL}$$

当浓度高于检出限时, 不确定度:

$$\sigma_{ik} = \sqrt{(\text{EF} \times x_{ik})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2}$$

误差分数 EF 一般介于 0.05 ~ 0.3 之间, 本研究取 0.2. 设定不同因子数 2 ~ 6 依次运算模型, 权衡较小的 dQ_{Robust} 值、较大的 R^2 和区域明确的可解释因子等确认模型可信度.

窟野河中上游工业区最终因子数确定为 4, 模型迭代运算最佳次数为第 13 次, dQ_{Robust} 为 0.29, 各单体 R^2 范围为 0.47 ~ 0.99, 模型运算结果良好, 获得的最终源成分谱见图 6. 因子 1 主要载荷单体为 Phe、Chry 和 BaA, 均为煤炭燃烧的特征排放物^[35,36], 因此该因子被解释为煤炭燃烧源. 煤炭开采作为当地的支柱产业, 也带动了煤化工产业的发展, 热电联产、火力发电和金属冶炼等相关行业发达, 煤炭作为燃烧能源在区域内大量使用; 同时研究区富有煤炭, 煤炭燃烧是该区域居民生活的主要热源. 因子 2 的识别组分为 InP、BbF、BkF 和 BaP, 这 4 种化合物是汽油和柴油发动机排放的常见特征指示单体^[37,38], 因此该因子被识别为车辆排放源. 与区域内多条国道是煤炭运输的主要通道, 交通运输繁忙有关. 因子 3 主要载荷单体为 Ant, 该单体一般作为薪材燃烧源标志组分^[39], 因此该因子指示是

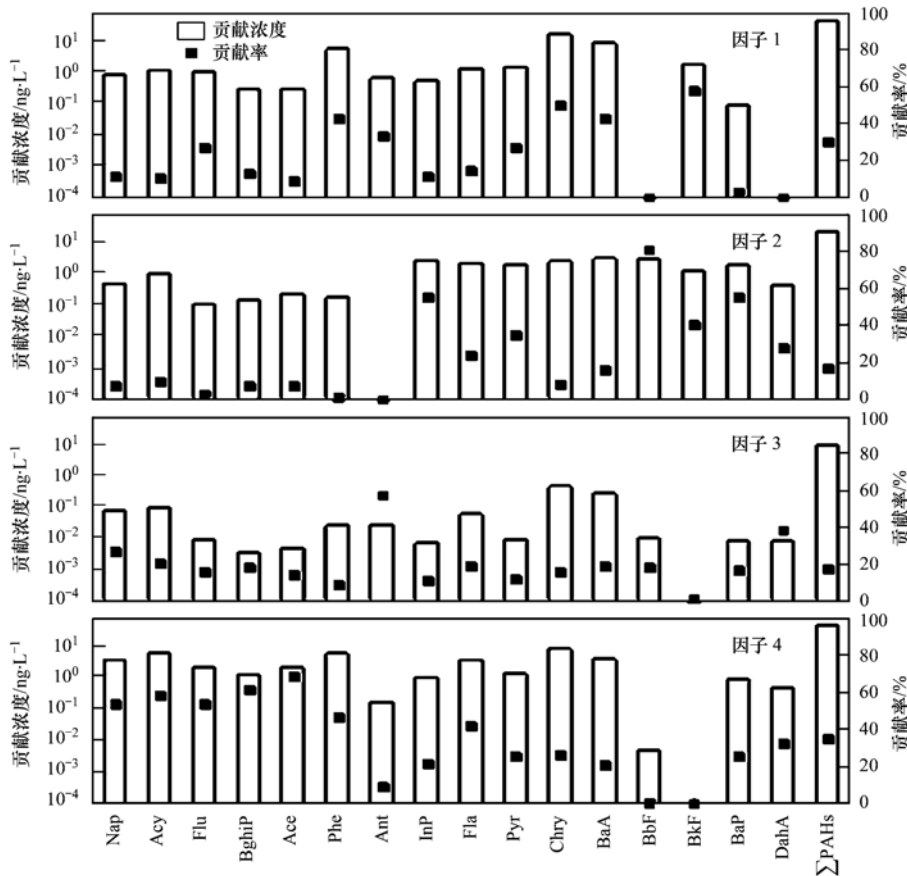


图 6 窟野河中上游工业区水体中 PAHs 的 PMF 源成分谱

Fig. 6 PAHs source profiles obtained from PMF model in industrial areas of Kuye River middle and upper reaches

薪材燃烧源. 研究区农村人口所占比重较大,木材和秸秆等生物质仍然是农村地区生活燃料之一. 因子 4 中 Nap、Acy、Flu 和 Ace 占有较高的载荷,均为 2~3 环 PAHs,这些低环 PAHs 与焦化排放源有关^[40],同时 Nap、Acy 和 Flu 也是石油化工类物质泄漏指示物^[41,42],因此该因子被鉴别为焦化和石油源. 研究区域建有很多炼焦企业,在生产过程中,焦化废气和飞灰中的 PAHs 可通过干、湿沉降进入水体;区域内的煤炭开采业以机采为主,煤矿机械工作过程中会产生一定的石油类物质泄漏,另外煤化工企业和钢铁冶炼行业等排放的工业废水也会引起石油类污染.

从 PMF5.0 计算的各污染源的贡献率来看,对窟野河中上游水体中 PAHs 贡献最大的是焦化和石油源,为 34.67%,其次为煤炭燃烧源(30.62%)、薪材燃烧源(18.11%)和车辆排放源(16.60%). 煤炭产业是榆林地区的支柱产业,区域内分布有大量煤矿、上百家煤化工企业和热电厂,源解析结果与实际情况吻合,中上游河段 PAHs 来源主要为煤炭相关活动.

窟野河下游居民区最终因子数确定为 3, dQ_{Robust} 为 0.08,各单体 R^2 范围为 0.44~0.95,获得的最终源成分谱见图 7. 因子 1 中 Acy、Flu、Phe、Fla、Pyr、Chry 和 BaA 的载荷较高,均为煤炭燃烧源指示物^[43]. 因子 2 主要载荷单体为 Ant 和 BbF,为薪材燃烧源标志组分. 因子 3 中高环单体 BaP 和 DahA 具有较高载荷,这两种化合物均为汽车尾气排

放的典型产物^[44]. 窟野河下游地区为农村居民区,且分布有很多农田,煤炭、秸秆等是该地区居民的主要生活燃料;同时有煤炭运输路线经过该区域,存在一定的交通污染.

从 PMF5.0 计算的各污染源的贡献率来看,对窟野河下游水体中 PAHs 贡献最大的是煤炭燃烧源,为 64.93%,其次为薪材燃烧源 26.20% 和车辆排放源 8.86%. 下游河段 PAHs 主要来源于煤炭和薪材等生活燃料的燃烧.

为明晰不同污染源的主要影响区域,将 PMF 法计算得到的各污染源对 59 个受体采样点的贡献率示于图 8. 煤炭燃烧源与焦化和石油源,这些与煤炭相关的污染源贡献率高值点主要分布在矿业活动区附近,且出现单个采样点的煤炭燃烧源贡献率高达 80%,焦化和石油源高达 99%,说明煤炭产业对周围水体造成了较大的影响. 仅有少量煤炭运输交通枢纽处采样点受车辆排放源的影响比较大,零星分布的个别采样点受薪材燃烧源的影响较大,其余大部分采样点这两类污染源的贡献率都低于 40%,说明车辆排放源和薪材燃烧源对区域水体 PAHs 污染造成的影响较小.

3.1.3 PAHs 源解析结果

近年来榆林地区煤炭产业发展迅速,2021 年煤炭开采量首次突破了 5.5 亿 t,并带动了相关产业的发展,区域水体也受到了一定程度的影响^[45]. 根据研究区水体 PAHs 的分布情况,结合特征比值法和 PMF 受体模型两种源解析方法可知,窟野河中上游

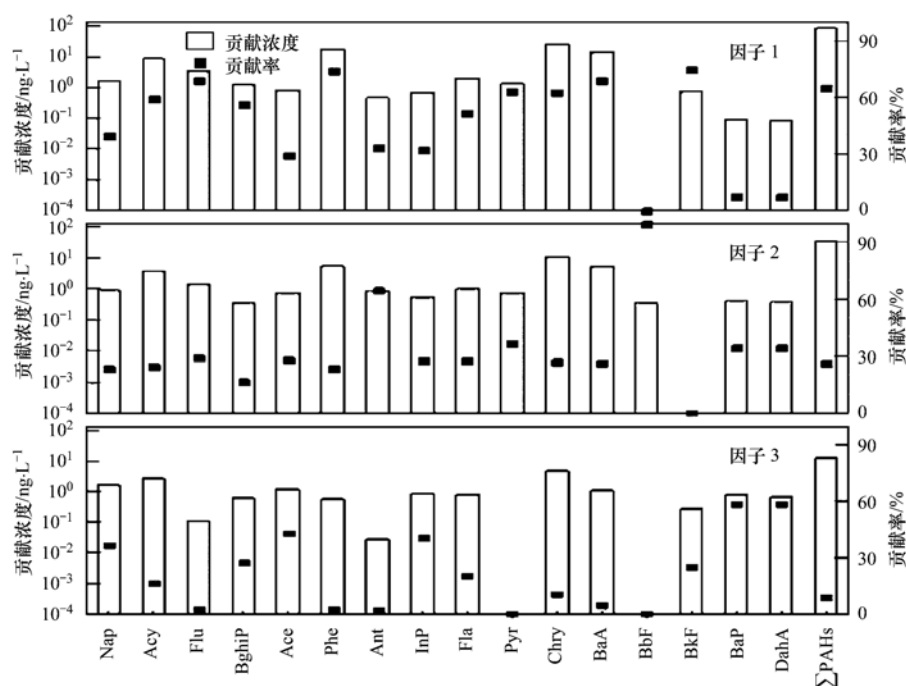


图 7 窟野河下游居民区水体中 PAHs 的 PMF 源成分谱

Fig. 7 PAHs source profiles obtained from PMF model in residential areas of Kuye River downstream

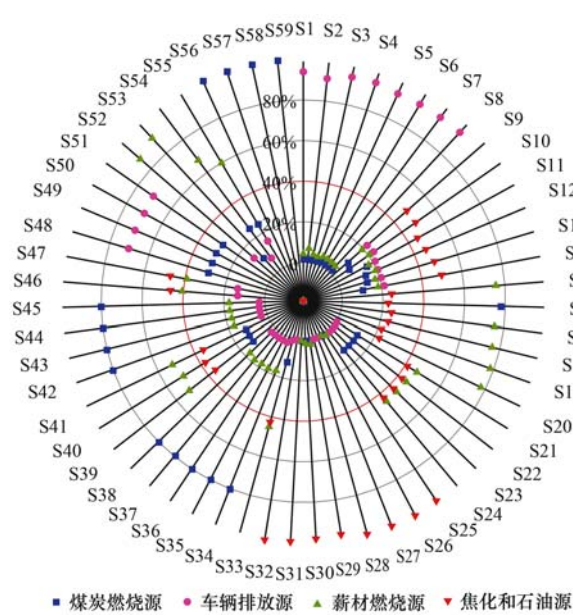


图 8 各污染源对 59 个受体采样点的贡献率

Fig. 8 Contribution ratios of each pollution source to 59 receptor samples

地区工业生产过程中的焦化和石油类物质、煤炭燃烧、机动车尾气排放和薪材燃烧等均对区域水体 PAHs 产生了影响. 下游居民区水体中 PAHs 污染主要来源于农业活动和农村居民生活中煤及草、木材和秸秆等薪材燃烧,且薪材燃烧源的贡献率在下游水体中更高.

一般来说,枯水期水量减少会使水体中 PAHs 浓度增大,同时丰水期降水较多,地表径流量大,也

使更多的工农业生产、交通污染等产生的污染物进入地表水体中,因此季节变化会引起水体中 PAHs 浓度和组成的变化^[46]. 另外,高分子量 PAHs 的辛醇-水分配系数大于低分子量 PAHs,其疏水性更强,更易于向沉积物和颗粒物相分配^[47]. 并且丰水期时径流量大,水流对土壤和沉积物的侵蚀作用增强,水体中悬浮颗粒物浓度增加,使更多土壤和沉积物中的 PAHs 从颗粒相进入溶解相^[48];同时温度升高也会增大 PAHs 从沉积物和悬浮颗粒物上的解析作用. 因此有必要对其他季节窟野河水体中 PAHs 的浓度和组成特征,以及水体和沉积物中 PAHs 的迁移转化规律进一步研究.

3.2 毒性生态风险评估

采用 Kalf 风险商值法^[49]对窟野河水体中 PAHs 的生态风险进行评估,当风险商值大于 1 时,表明该 PAHs 会产生生态风险,值越大,风险越大.

根据: $RQ_{MPCs} = C_{PAHs} / C_{QV(MPCs)}$, $RQ_{NCs} = C_{PAHs} / C_{QV(NCs)}$ 计算了研究区水体中各 PAHs 单体的风险商值,其中 RQ_{MPCs} 和 RQ_{NCs} 分别表示 PAHs 最高和最低允许浓度的风险商值, $C_{QV(MPCs)}$ 和 $C_{QV(NCs)}$ 分别为各单体 PAHs 的最高和最低风险标准浓度值, C_{PAHs} 为各单体实测浓度值. 计算结果表明, Nap 的 RQ_{MPCs} 和 RQ_{NCs} 值均小于 1,为低风险等级,可以忽略; BaA 的 RQ_{MPCs} 和 RQ_{NCs} 值均大于 1,且明显高于其它单体, RQ_{MPCs} 为 1.99, RQ_{NCs} 为 199.28,存在高风险,说明 BaA 会对研究区水体产生严重危害,应立即采取措

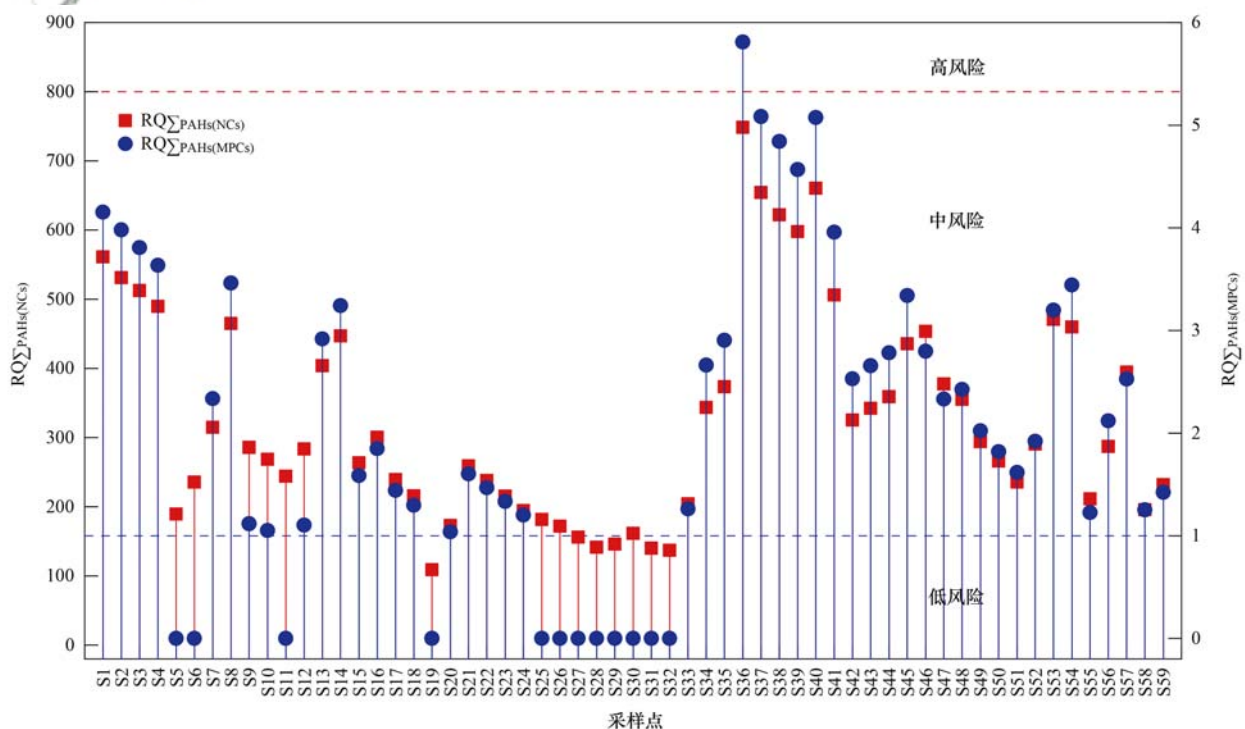


图 9 59 个采样点 $\sum$ PAHs 生态风险商值

Fig. 9 $\sum$ PAHs ecological risk quotient of 59 sampling sites

施降低污染水平; 其余单体的 RQ_{MPCs} 值小于 1, 而 RQ_{NCs} 值大于 1, 处于中等风险, 应加强监管阻止污染加剧。根据:

$$RQ_{\sum PAHs(MPCs)} = \sum_{i=1}^{16} RQ_{i(MPCs)} \quad (RQ_{i(MPCs)} \geq 1)$$

$$RQ_{\sum PAHs(NCs)} = \sum_{i=1}^{16} RQ_{i(NCs)} \quad (RQ_{i(NCs)} \geq 1)$$

分别计算了各采样点 $\sum PAHs$ 最高和最低生态风险商值(图 9)。结果表明, 采样点 S5、S6、S11、S19 和 S25 ~ S32 的 $RQ_{\sum PAHs(MPCs)}$ 值等于 0, 且 $RQ_{\sum PAHs(NCs)}$ 值小于 800, 属于低生态风险区; 其余采样点 $RQ_{\sum PAHs(MPCs)}$ 值大于 1, $RQ_{\sum PAHs(NCs)}$ 值小于 800, 处于中等偏高风险等级。其中 S36 采样点的 $RQ_{\sum PAHs(NCs)}$ 值为 748.40, 已临近高生态风险, 此采样点位于柠条塔工业园区, 工业生产过程产生的 PAHs 使周边水体暴露于较高的生态风险之中, 需尽快制定防控计划。

4 结论

(1) 陕北矿区内典型河流窟野河采集的水体样品中, $\rho(\sum PAHs)$ 在 $50.06 \sim 278.16 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 均值为 $128.22 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 与国内外其它河流相比处于中等水平, 其中中环 PAHs 占比较大。区域内各采样点的 $\sum PAHs$ 均高于水生生物暴露于地表水中的浓度限值, 水体中 PAHs 会通过生物富集影响人类健康。

(2) 采样点间浓度空间差异显著, 各单体浓度的高值点与 $\sum PAHs$ 分布类似, 主要处于矿业活动工业区和城镇附近。

(3) 源解析结果显示, 对窟野河中上游工业区水体中 PAHs 贡献最大的是焦化和石油源, 为 34.67%, 其次为煤炭燃烧源 30.62%、薪材燃烧源 18.11% 和车辆排放源 16.60%; 对窟野河下游居民区水体中 PAHs 贡献最大的是煤炭燃烧源, 为 64.93%, 其次为薪材燃烧源 26.20% 和车辆排放源 8.86%。煤炭燃烧源与焦化和石油源的贡献率高值点主要分布在矿业活动区附近, 煤炭产业对周围水体造成了较大的影响; 大部分采样点的薪材燃烧源和车辆排放源贡献率低于 40%, 二者对区域水体 PAHs 污染影响较小。

(4) 生态风险评估结果显示, Nap 为低风险等级; BaA 存在高风险, 会对研究区水体产生严重危害, 应立即采取措施降低污染水平; 其余单体处于中等风险。59 个采样点均属于中等偏高或低生态风

险区, 但柠条塔工业园区采样点 $RQ_{\sum PAHs(NCs)}$ 值为 748.40, 已临近高生态风险, 需尽快制定防控计划。

参考文献:

- [1] Tong R P, Yang X Y, Su H R, *et al.* Levels, sources and probabilistic health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the agricultural soils from sites neighboring suburban industries in Shanghai[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1365-1373.
- [2] Chen J, Fan B, Li J, *et al.* Development of human health ambient water quality criteria of 12 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and risk assessment in China [J]. *Chemosphere*, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126590.
- [3] Tong R P, Cheng M Z, Zhang L, *et al.* The construction dust-induced occupational health risk using Monte-Carlo simulation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **184**: 598-608.
- [4] 周宇森, 张焕新, 钟玮, 等. 多环芳烃类污染物对斑马鱼胁迫效应的研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2022, **17**(2): 109-117.
Zhou Y M, Zhang H X, Zhong W, *et al.* Advances in research on stress effects of polycyclic aromatic hydrocarbons on zebrafish [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, **17**(2): 109-117.
- [5] 李慧, 李捷, 宋鹏, 等. 东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 147-158.
Li H, Li J, Song P, *et al.* Characteristics and ecological risk assessment of POPs pollution in sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 147-158.
- [6] Khanal R, Furumai H, Nakajima F, *et al.* Carcinogenic profile, toxicity and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons accumulated from urban road dust in Tokyo, Japan [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **165**: 440-449.
- [7] Liu H, Yu X L, Liu Z R, *et al.* Occurrence, characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in arable soils of Beijing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **159**: 120-126.
- [8] 曾超怡, 徐辉, 许岩, 等. 长江重点江段水体中多环芳烃及其衍生物的分布及健康风险[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(12): 4932-4941.
Zeng C Y, Xu H, Xu Y, *et al.* Distribution and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives in surface water of the Yangtze River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(12): 4932-4941.
- [9] 张坤锋, 昌盛, 付青, 等. 内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3005-3015.
Zhang K F, Chang S, Fu Q, *et al.* Pollution characteristics and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in underground and surface drinking water sources in northeast Inner Mongolia [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3005-3015.
- [10] 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.
- [11] 董颖, 李乐, 武宏梅, 等. 基于水源水质变化的 KMnO_4 预氧化技术应用研究[J]. *给水排水*, 2020, **46**(9): 60-64.
Dong Y, Li L, Wu H M, *et al.* Applied on potassium permanganate pre-oxidation technology based on water quality

- change of water source[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, **46**(9): 60-64.
- [12] 金苗, 吴敬禄, 占水娥, 等. 乌兹别克斯坦阿姆河流域水体中多环芳烃的分布、来源及风险评估[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(3): 855-867.
- Jin M, Wu J L, Zhan S E, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in waters of Amu Darya Basin, Uzbekistan[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(3): 855-867.
- [13] Liang M, Liang H D, Rao Z, *et al.* Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment[J]. *Chemosphere*, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127534.
- [14] Zheng B H, Ma Y Q, Qin Y W, *et al.* Distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water in industrial affected areas of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(23): 23485-23495.
- [15] Sharma B M, Melymuk L, Bharat G K, *et al.* Spatial gradients of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air, atmospheric deposition, and surface water of the Ganges River basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1495-1504.
- [16] Shaw M, Tibbetts I R, Müller J F. Monitoring PAHs in the Brisbane River and Moreton Bay, Australia, using semipermeable membrane devices and EROD activity in yellowfin bream, *Acanthopagrus australis*[J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(3): 237-246.
- [17] 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.
- [18] Zhang S Y, Zhang Q, Darisaw S, *et al.* Simultaneous quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs), and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Mississippi River water, in New Orleans, Louisiana, USA [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(6): 1057-1069.
- [19] Liu M L, Feng J L, Hu P T, *et al.* Spatial-temporal distributions, sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water and suspended particulate matter from the upper reach of Huaihe River, China [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 143-151.
- [20] Nagy A S, Simon G, Szabó J, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water and bed sediments of the Hungarian upper section of the Danube River[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(6): 4619-4631.
- [21] Huang H F, Xing X L, Zhang Z Z, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in multimedia environment of Heshan coal district, Guangxi: distribution, source diagnosis and health risk assessment[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, **38**(5): 1169-1181.
- [22] 高晓奇, 王学霞, 汪浩, 等. 黄河三角洲丰水期上覆水中 PAHs 分布、来源及生态风险研究[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(5): 831-836.
- Gao X Q, Wang X X, Wang H, *et al.* Distribution, source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in overlying water during flood seasons from the Yellow River Delta, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(5): 831-836.
- [23] Zheng B H, Wang L P, Lei K, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River estuary and the adjacent area, China[J]. *Chemosphere*, 2016, **149**: 91-100.
- [24] Badawy M I, Embaby M A. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water in Egypt [J]. *Desalination*, 2010, **251**(1-3): 34-40.
- [25] GB3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [26] United States Environmental Protection Agency (USEPA). National recommended water quality criteria[S].
- [27] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Canadian environmental quality guidelines[S].
- [28] Wang Y Z, Zhang S L, Cui W Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in surface water from the Yongding River Basin, China: seasonal distribution, source apportionment, and potential risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 419-429.
- [29] 汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 等. 海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2942-2950.
- Wang H J, Kuang Z X, Zhou X, *et al.* Characteristics, source analysis, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in marine organisms from estuaries of Changhua River in Hainan Province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2942-2950.
- [30] Wu X J, Lenon G P, Dong Y. The calculation of riverine ecological instream flows and runoff profit-loss analysis in a coal mining area of Northern China [J]. *River Research and Applications*, 2020, **36**(5): 760-768.
- [31] 许妍, 陈佳枫, 徐磊, 等. 白洋淀表层沉积物中有机氯农药和全多氯联苯的分布特征及风险评估[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(3): 654-664.
- Xu Y, Chen J F, Xu L, *et al.* Distribution and risk assessment of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surficial sediments from Lake Baiyangdian[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(3): 654-664.
- [32] 王飞, 赵颖. 太原市灌溉区农田土壤中多环芳烃污染特征及生态风险评估[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(1): 160-169.
- Wang F, Zhao Y. Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in agricultural soil from sewage irrigation area of Taiyuan City, Shanxi Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(1): 160-169.
- [33] Liu Y G, Gao P, Su J, *et al.* PAHs in urban soils of two Floridacities: background concentrations, distribution, and sources[J]. *Chemosphere*, 2019, **214**: 220-227.
- [34] Ren C B, Zhang Q Q, Wang H W, *et al.* Characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons of groundwater in Hutuo River alluvial-pluvial fan, China, based on PMF model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(8): 9647-9656.
- [35] 赵健, 周怀东, 富国, 等. 河北西大洋水库沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评估[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(5): 701-707.
- Zhao J, Zhou H D, Fu G, *et al.* Distributions, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Xidayang Reservoir, Hebei Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(5): 701-707.
- [36] Cao Y X, Xin M, Wang B D, *et al.* Spatiotemporal distribution,

- source, and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the urbanized semi-enclosed Jiaozhou Bay, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137224.
- [37] Ilić P, Nišić T, Farooqi Z U R. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination of soil in an industrial zone and evaluation of pollution sources [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, **30**(1): 155-162.
- [38] Riaz R, Ali U, Li J, *et al.* Assessing the level and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil and sediments along Jhelum Riverine system of lesser Himalayan region of Pakistan [J]. *Chemosphere*, 2019, **216**: 640-652.
- [39] 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3645-3655.
- Peng K X, Li R F, Zhou Y C, *et al.* Spatiotemporal distribution and source apportionment of suspended polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3645-3655.
- [40] 邢淑萍, 李林凤, 符耿雪, 等. 唐山某焦化厂污染区地表水 PAHs 污染特征及风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(9): 3586-3597.
- Xing S P, Li L F, Fu G X, *et al.* Characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water in coking areas, Tangshan City, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(9): 3586-3597.
- [41] Miao Y, Kong X S, Li C X. Distribution, sources, and toxicity assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of a heavy industrial city, Liuzhou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(3), doi: 10.1007/s10661-018-6521-x.
- [42] Qiao X C, Zheng B H, Li X, *et al.* Influencing factors and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **402**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123419.
- [43] Qu Y J, Gong Y W, Ma J, *et al.* Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114016.
- [44] 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 等. 基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3904-3912.
- Guan X X, Zhou X P, Lei C N, *et al.* Source apportionment of soil PAHs in Lanzhou based on GIS and APCS-MLR model [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3904-3912.
- [45] Liu J, Liu Y J, Liu Z, *et al.* Source apportionment of soil PAHs and human health exposure risks quantification from sources: the Yulin national energy and chemical industry base, China as case study [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, **41**(2): 617-632.
- [46] Han J, Liang Y S, Zhao B, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) geographical distribution in China and their source, risk assessment analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **251**: 312-327.
- [47] 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 等. 滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4194-4211.
- Wang Y Z, Zhang S L, Kong F Q, *et al.* Seasonal distribution, composition, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in the main stream of the Luanhe River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4194-4211.
- [48] 邓红梅, 陈永亨. 西江水体中多环芳烃的分布特征及来源 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 435-440.
- Deng H M, Chen Y H. Distribution characters and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Xijiang River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(2): 435-440.
- [49] Li Y, Liu M, Hou L J, *et al.* Geographical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in estuarine sediments over China: Human impacts and source apportionment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145279.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qì, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)