

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

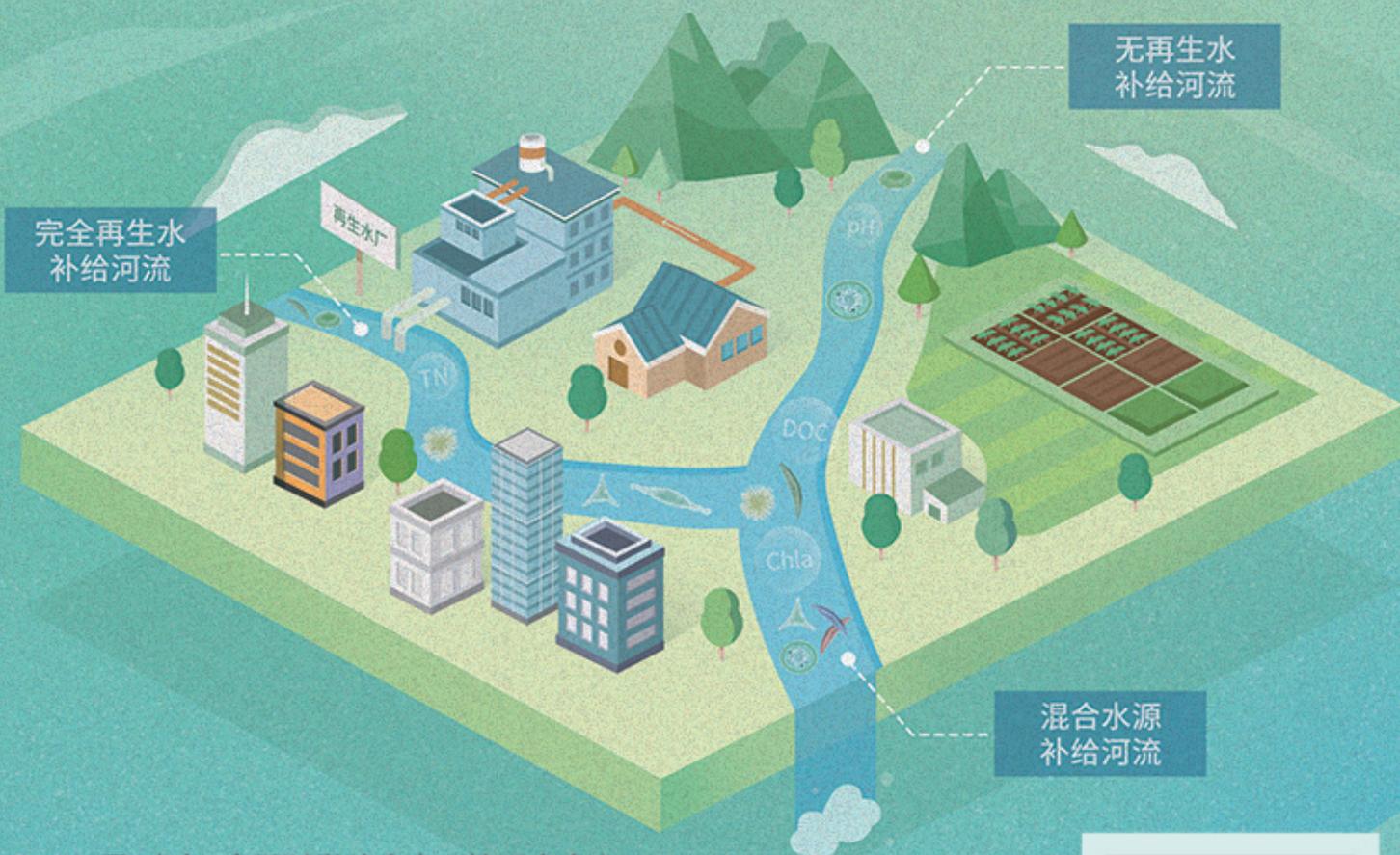
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)

中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)

长株潭城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)

2018~2019 年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)

2015~2021 年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨 (5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)

2011~2019 年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析: 以重庆城口地区为例 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏 (5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉 (5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)

基于 g-C₃N₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 杨旭, 刘贤赵 (5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607, 5741, 5768)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估

昌盛¹, 白云松^{1,2}, 涂响^{1*}, 付青¹, 张坤锋^{1,3}, 潘杨², 王山军¹, 杨光¹, 汪星¹

(1. 中国环境科学研究院, 国家环境保护饮用水源地保护重点实验室, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 3. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 采用气相色谱-质谱法 (GC-MS) 测定了北江中上游流域地表水和沉积物样品中多环芳烃 (PAHs) 和多氯联苯 (PCBs) 类污染物的含量, 分析了 PAHs 和 PCBs 的污染水平和空间分布, 并评估了污染物的健康风险和生态风险. 结果表明, 16 种 PAHs 单体在所有水样和沉积物样品中均被检出, 检出范围分别为 41.82 ~ 443.04 ng·L⁻¹ 和 59.58 ~ 635.73 ng·g⁻¹, 北江中上游 PAHs 的污染水平为中、轻度. 水中 PAHs 以二环芳烃和三环芳烃为主, 沉积物中以三环芳烃和四环芳烃为主. 在水样中检出了 17 种 PCBs, 浓度范围 0.81 ~ 287.50 ng·L⁻¹, 以六氯联苯和七氯联苯为主; 沉积物中检出了 8 种 PCBs, 含量范围 0.13 ~ 3.96 ng·g⁻¹, 以五氯联苯和七氯联苯为主. 整个调查区域内地表水中 PAHs 和 PCBs 的终生致癌风险指数小于 10⁻⁴, 处于中、低水平; 非致癌风险指数均小于 1, 不存在非致癌风险. 采用风险商值 (RQ) 法对地表水中污染物进行生态风险评价, 研究区域内地表水中 PAHs 和 PCBs 生态风险总体处于中低风险水平, 个别点位存在重度风险的污染物单体, 值得引起重视. 采用沉积物质量基准法 (SQGs) 对沉积物中污染物进行生态风险评估, 沉积物中 PAHs 和 PCBs 均处于较低的生态风险水平.

关键词: 北江; 多环芳烃 (PAHs); 多氯联苯 (PCBs); 污染特征; 风险评估

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5534-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202202140

Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beijiang River

CHANG Sheng¹, BAI Yun-song^{1,2}, TU Xiang^{1*}, FU Qing¹, ZHANG Kun-feng^{1,3}, PAN Yang², WANG Shan-jun¹, YANG Guang¹, WANG Xing¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Researches, Beijing 100012, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface water and sediment samples from the middle and upper reaches of Beijiang River basin were determined using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The pollution level and spatial distribution of PAHs and PCBs were analyzed, and the health and ecological risks of pollutants were evaluated. The results showed that 16 PAHs monomers were detected in all surface water and sediment samples, with detection ranges of 41.82-443.04 ng·L⁻¹ and 59.58-635.73 ng·g⁻¹, respectively. The pollution levels of PAHs in the middle and upper reaches of Beijiang River were medium and mild. PAHs in water were mainly composed of bicyclic aromatic hydrocarbons and tricyclic aromatic hydrocarbons, whereas tricyclic aromatic hydrocarbons and tetracyclic aromatic hydrocarbons were mainly in sediments. There were 17 monomers of PCBs detected in the water samples with concentrations in the range of 0.81-287.50 ng·L⁻¹, which mainly consisted of hexachlorobiphenyls and heptachlorobiphenyls. Eight monomers of PCBs were detected in sediments ranging from 0.13 to 3.96 ng·g⁻¹, which were mainly pentachlorobiphenyls and heptachlorobiphenyls. The lifetime carcinogenic risk index of PAHs and PCBs in surface water of the whole survey area was less than 10⁻⁴, and the non-carcinogenic risk index was less than 1, indicating that the carcinogenic risk of PAHs and PCBs was at a medium and low level, and there was no non-carcinogenic risk in surface water. The risk quotients (RQ) method was used to evaluate the ecological risk of pollutants in surface water. The ecological risk of PAHs and PCBs in surface waters in the study area was generally at a low to moderate risk level, including individual points with the presence of heavily risky pollutants that deserve attention. The method of sediment quality guidelines (SQGs) was used to assess the ecological risk of pollutants in sediments. The results showed that PAHs and PCBs were at a low ecological risk level in sediments of Beijiang River.

Key words: Beijiang River; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); polychlorinated biphenyls (PCBs); pollution characteristics; risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 和多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是两类典型的持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs), 具有致癌、致畸、致突变效应^[1,2], 其生物毒性可以通过食物链逐渐向顶端富集; 另外, 其半衰期长, 在环境中持续存在, 能够通

过各种环境介质 (水、大气和生物体等) 进行远距离

收稿日期: 2022-02-20; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3200804-02); 饮用水水源及重大工程项目区环境监管项目 (2110302)

作者简介: 昌盛 (1983 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为饮用水安全保障, E-mail: changsheng83@163.com

* 通信作者, E-mail: tu_xiang@qq.com

传输^[3,4],对自然环境和人类健康存在的风险不可忽视.多环芳烃是一类碳氢化合物,其来源包括森林火灾、细菌合成、石油泄漏和火山喷发等自然来源和焚烧、炼油和车辆尾气排放等人为源,通过地表径流、大气沉降等方式进入自然水体带来负面影响^[5].16种PAHs单体已于1979年被美国环境保护署(EPA)列为优先检测物^[6].多氯联苯是一类人工合成的有机氯化物,是2001年首批进入联合国环境规划署颁布的《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》中12种持久性有机污染物之一,从20世纪70年代美国等西方国家逐步禁止生产PCBs^[7].多氯联苯的来源包括废旧电器产品的拆解和泄漏,工业排放和垃圾焚烧等.多环芳烃和多氯联苯在环境介质中普遍存在,对生态环境和人类健康造成严重威胁.

北江是珠江流域第二大水系,是广东省重要的河流之一.北江拥有众多支流,包括潯江、大燕河、滨河和漫水河等.位于北江中上游是广东省重要的矿产产地,冶金和建材是当地的支柱产业,同时该地区也是我国电子废弃物拆解业的集中地,快速发展的工农业和繁忙的内河运输使北江流域的水环境问

题日益显著,水环境中有毒有害污染物问题较为突出.在北江河流沿线分布着多个集中式饮用水水源,如七星岗、观洲坝、飞来峡库区和北江江口等,研究该流域环境污染水平对当地居民的日常生活和身体健康影响意义重大.目前关于北江流域地表水和沉积物中多环芳烃和多氯联苯类污染物分布特征、污染水平和生态风险的研究较少.本文以北江中上游及其支流为研究对象,对水和沉积物中16种PAHs单体和28种PCBs同类物进行检测分析,分析北江流域PAHs和PCBs的污染水平、对人体健康和生态风险做出评价,以期为北江流域地表水环境质量保障和痕量有机污染物治理提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据前期针对北江中上游周边环境的调研工作,本研究选择北江干流及其支流(潯江、大燕河、漫水河和滨河)布置采样点34个,采样点分布如图1所示.采样时间为2021年11月份(枯水期).使用表层采样器采集水样,表层水采样深度控制在0.5 m,放置于1 L棕色玻璃瓶中,4℃冷藏保存运输,24

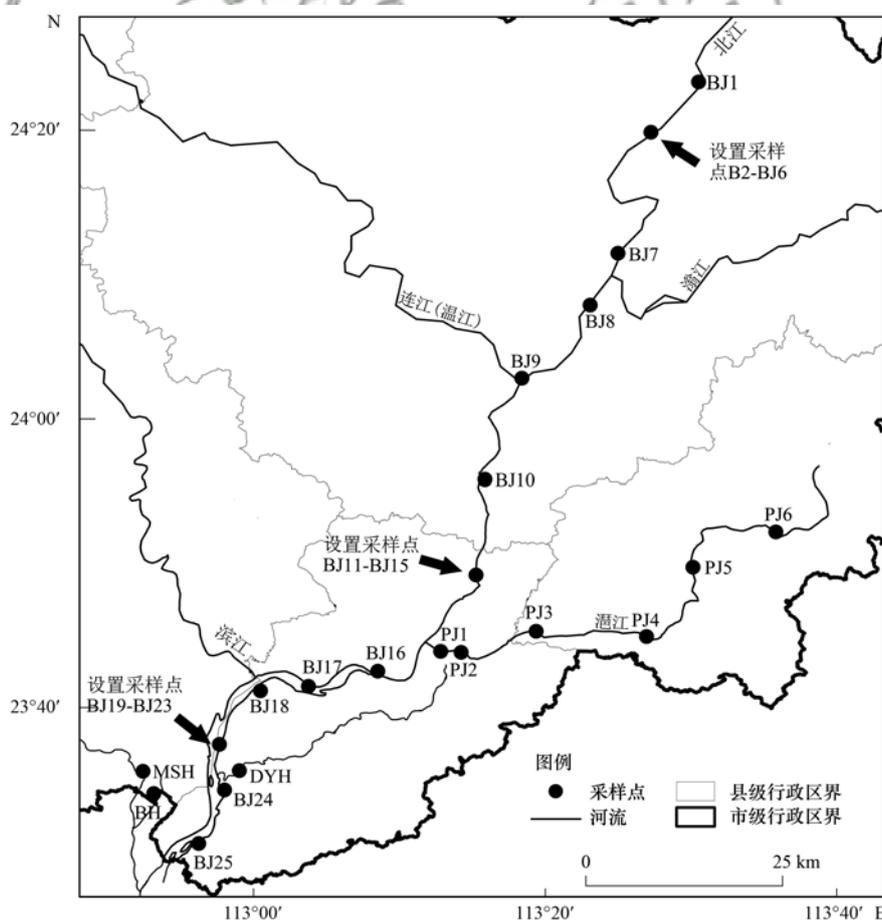


图1 北江流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Beijiang River basin

h 内运至实验室处理分析. 由于当地地质条件和气候变化导致河沙堆积, 此次采样仅采集到 BJ1、BJ3、BJ4、BJ12、BJ15、BJ16、BJ25 和 PJ5 共 8 个点位的沉积物样品. 使用抓式采泥器采集 0~10 cm 深度的沉积物, 取得的样品在 4℃ 下冷藏, 然后在 -56℃ 进行冷冻干燥. 干燥后的样品粉碎后过 50 目筛子. 过筛后样品置于玻璃瓶中, 保存在 -20℃ 的环境下.

1.2 仪器与试剂

仪器: 24 孔固相萃取装置(美国 Mediwax 公司)、RE-52B 型旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂)、KL512 型氮吹仪(北京康林科技有限公司)和 7890A/

5975C 型 GC-MS 联用仪(美国 Agilent 公司).

试剂: 本研究分析测定的 16 种优控 PAHs 和 28 种 PCBs 见表 1. 各物质标准品购自美国 Wellington 公司, 采用固相萃取-气相色谱-质谱(SPE-GC-MS)内标分析法对其进行定性定量分析, HLB(6 mL, 500 mg)固相萃取小柱购自美国 Waters 公司; 二氯甲烷(农残级)和甲醇(色谱纯)购自美国 Merck 公司. 测定 PAHs 选用的替代物为蒽-d12 和二萘嵌苯-d12, 测定 PCBs 的替代物为 2,4,5,6-四氯间二甲苯; 测定 PAHs 和 PCBs 选用的内标物均为十氯联苯, 所有内标物和替代物均购自美国 Supelco 公司.

表 1 北江流域检测的 PAHs 和 PCBs 种类

Table 1 Types of PAHs and PCBs detected in the Beijiang River Basin

多环芳烃	萘(Nap)、萘烯(Acy)、萘(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)和苯并[g,h,i]芘(BghiP)
多氯联苯	DiCBs-8、TriCBs-18、TriCBs-28、TetraCBs-44、TetraCBs-52、TetraCBs-66、TetraCBs-77、TetraCBs-81、PentaCBs-101、PentaCBs-105、PentaCBs-114、PentaCBs-118、PentaCBs-123、PentaCBs-126、HexaCBs-128、HexaCBs-138、HexaCBs-153、HexaCBs-156、HexaCBs-157、HexaCBs-167、HexaCBs-169、HeptaCBs-170、HeptaCBs-180、HeptaCBs-187、HeptaCBs-189、OctaCBs-195、NonaCBs-206 和 DecaCB-209

1.3 预处理与分析

水样预处理: ①选用 HLB 固相萃取小柱对水样进行富集, 富集前用 6 mL 二氯甲烷以及甲醇依次对 HLB 小柱进行预先淋洗, 用 6 mL 超纯水对 HLB 小柱进行活化, 活化后再加入 6 mL 超纯水, 准备上样. ②水样中加入 10 ng 替代物, 开始固相萃取, 处理后的水样通过活化后的 HLB 小柱, 使用真空泵抽滤, 控制溶液流速为 5 mL·min⁻¹, 水样滴完后, 继续抽滤 0.5 h. ③用 10 mL 二氯甲烷洗脱后, 用旋转蒸发仪和氮吹仪浓缩至 0.5 mL, 加入内标物后, 置于 4℃ 冰箱冷藏至开始 GC-MS 分析.

沉积物预处理: 取 10 g 干燥过的样品, 加入一定量的替代物(0.1 mg·kg⁻¹), 搅拌后密闭过夜, 用滤纸包好后放入索氏提取器进行处理, 1:1(体积比)丙酮和甲醇的混合液 220 mL 作为提取液. 索氏提取 12 h 后, 把提取液用 50 g 无水硫酸钠过滤脱水. 脱水后的提取液用旋转蒸发仪(50℃)和氮吹仪(50℃)浓缩至 0.8~1.5 mL, 经过 0.22 μm 滤膜过滤后转移至 1.5 mL 的样品瓶(最后在 0.5~1.0 mL 之间).

测定 PAHs 和 PCBs 时所用 GC-MS 仪器的分析条件如下: 采用 DB-5 石英毛细管色谱柱(0.25 mm × 60 m × 0.25 μm), 载气为氮气, 流速恒定为 1 mL·min⁻¹, 线速度 26 cm·s⁻¹. 进样口温度 250℃, MSD300℃, 电子能量 70 eV, 选择离子模式扫描, 升温程序为: 初始温度 60℃, 保持 2 min; 以 10℃·min⁻¹升至 120℃; 再 4℃·min⁻¹升至 290℃, 保

持 10 min. 最后无分流进样 1 μL. 通过检索 NIST 质谱谱库和色谱峰保留时间进行定性分析, 并采用内标峰面积法和 6 点校正曲线定量.

1.4 质量控制

采用方法空白、回收率实验和精密度对 PAHs 进行质量控制和保证. 在实验过程中, 在每 10 个样品中增 1 个方法空白, 相对标准偏差(RSD) < 20% (n=6). 水样和沉积物中 PAHs 的加标回收率分别为 75%~102% 和 68%~94%. 对 PAHs 样品分别添加萘 d-8、蒽-d12 和二萘嵌苯-d12 作为回收率指示物, PAHs 的回收率范围分别为 78%~106%、73%~107% 和 78%~112%, 水样和沉积物中 PAHs 的检出限范围分别为 0.10~0.99 ng·L⁻¹ 和 0.17~3.63 ng·g⁻¹. 对 PCBs 进行质量控制和保证, 在分析过程中采用样品平行样、内标法定量、空白加标和方法空白, 每 10 个样品为 1 组, 分别设置一个空白加标、基质加标、方法空白和溶剂空白. 每个样品都有替代标准物, 相对标准偏差(RSD) < 20% (n=6). 每个样品均进行 3 次平行测定, 取平均值为最终结果, 方法空白没有物质检出. PCBs 的空白加标回收率、基质加标回收率和替代物回收率分别为 66%~111%、74%~98% 和 64~78%, PCBs 的回收率范围水样和沉积物中 PCBs 的检出限范围分别为 0.24~3.76 ng·L⁻¹ 和 0.05~0.09 ng·g⁻¹.

1.5 风险评价

1.5.1 健康风险评价

为将北江水体中污染物对可能造成人类健康风

险进行表征,参考美国环保署健康风险评估方法,选用终生致癌风险指数(ILCR)和非致癌风险(HI)作为评价指标.水中的污染物进入人体主要由饮用摄入和通过皮肤接触摄入两种方式,本研究将以上两种暴露途径产生的风险之和作为最终健康风险.具体计算公式如下.

每日饮用暴露剂量 $ADD_{dri} [mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}]$:

$$ADD_{dri} = \frac{C_w \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

每日皮肤接触暴露剂量 $ADD_{der} [mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}]$:

$$ADD_{der} = \frac{C_w \times SA \times PC \times ET \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad (2)$$

终生致癌风险指数 ILCR (无量纲):

$$ILCR = ADD_{dri} \times SF_{dri} + ADD_{der} \times SF_{der} \quad (3)$$

非致癌风险指数 HI (无量纲):

$$HI = \frac{ADD_{dri}}{RfD_{dri}} + \frac{ADD_{der}}{RfD_{der}} \quad (4)$$

对于 PAHs,需要根据苯并(a)芘的毒性当量因子将各 PAHs 单体浓度换算为等效浓度[式(5)],然后代入式(1)和式(2)计算终生致癌风险 ILCR 和非致癌风险 HI.

$$TEQ = \sum C_i \times TEF_i \quad (5)$$

式中, C_w 为某物质在水中的检出浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); IR 为日饮水量 ($L \cdot d^{-1}$); EF 为暴露频率 ($d \cdot a^{-1}$); ED 为暴露持续时间 (a); BW 为体重 (kg); AT 为致癌作用发生的平均时间 (d); SA 为皮肤接触表面积 (cm^2); PC 为皮肤渗透系数 ($cm \cdot h^{-1}$); CF 为转化因子 (10^{-9}); ET 为日均暴露时间 ($h \cdot d^{-1}$),以上取值均参考中国人群暴露手册. SF 为致癌斜率因子 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$], RfD 为非致癌参考量 [$(kg \cdot d) \cdot mg^{-1}$],取值参考 EPA 综合风险信息数据库. TEQ 为毒性当量浓度 ($mg \cdot L^{-1}$), C_i 为每种 PAHs 单体浓度 ($mg \cdot L^{-1}$), TEF 为毒性当量因子,无量纲.若 $ILCR < 10^{-6}$,对人体造成的致癌风险可以忽略; $10^{-6} \leq ILCR < 10^{-4}$,说明对人体可能存在致癌风险;若 $ILCR \geq 10^{-4}$,造成的致癌风险不可忽略.

1.5.2 生态风险评估

本研究采用风险商值法(risk quotients, RQ)评价水中 PAHs 和 PCBs 的生态风险,RQ 的计算公式如式(6)所示.若 $RQ < 0.1$ 说明此种污染物的生态风险可忽略;若 $0.1 \leq RQ < 1$ 说明污染物对水环境中的生物存在较低的生态风险;若 $1 \leq RQ < 10$ 说明污染物对水生生物存在中等生态风险;若 $RQ \geq 10$,说明污染物造成重度生态风险,有必要采取措施

加以管控.

$$RQ = MEC/PNEC \quad (6)$$

式中,RQ 为风险商(无量纲);MEC 为污染物在环境中的暴露浓度 ($ng \cdot L^{-1}$);PNEC 为预测无效应浓度 ($ng \cdot L^{-1}$).PNEC 等于污染物的毒性数据与评估因子(AF)的比值.污染物毒性数据从通过 EPA 建立的 ECOTOX 数据库^[8]中查找各污染物单体的 LC_{50} (半致死浓度)或 EC_{50} (最大半效应浓度)和慢性毒性数据 NOEC (最大无影响浓度);评估因子的选取参考欧盟技术导则^[9],本研究中覆盖 3 个营养级,故 AF 取 1 000.

采用沉积物质量基准法(SQGs)^[10]评价沉积物中 PAHs 和 PCBs 的生态风险.通过效应区间低值(effects range low, ERL)和效应区间中值(effects range median, ERM)确定沉积物中污染物潜在的生态风险.含量 $< ERL$ 时几乎对生物不产生毒副作用,污染物含量 $> ERM$ 时对生物可能产生一定的毒副作用,污染物含量介于 ERL 和 ERM 之间,偶尔产生毒副作用.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 污染水平和分布特征

北江流域地表水和沉积物中 PAHs 的检出情况如表 2 所示.在 34 个水样和 8 个沉积物样品中均检测到 16 种 PAHs 单体,每种 PAHs 单体的检出率为 100%.从含量水平看,地表水中 $\rho(\sum PAHs)$ 范围在 $41.82 \sim 443.04 ng \cdot L^{-1}$ 之间,平均值为 $116.90 ng \cdot L^{-1}$,水中检出浓度最高和最低的单体分别为 Nap 和 Acy,平均值分别为 $22.93 ng \cdot L^{-1}$ 和 $1.71 ng \cdot L^{-1}$;沉积物中 $\omega(\sum PAHs)$ 范围在 $59.58 \sim 635.73 ng \cdot g^{-1}$ 之间,平均值为 $209.32 ng \cdot g^{-1}$,沉积物中检出含量最高和最低单体为分别 Phe 和 Acy,平均值分别为 $37.07 ng \cdot g^{-1}$ 和 $1.24 ng \cdot g^{-1}$.根据已有的研究结果,将 PAHs 的污染水平分为 4 个污染等级,对应的含量水平分别为:轻微污染(地表水 $10 \sim 50 ng \cdot L^{-1}$,沉积物 $0 \sim 100 ng \cdot g^{-1}$)、轻度污染(地表水 $50 \sim 250 ng \cdot L^{-1}$,沉积物 $100 \sim 1\,000 ng \cdot g^{-1}$)、中度污染(地表水 $250 \sim 1\,000 ng \cdot L^{-1}$,沉积物 $1\,000 \sim 5\,000 ng \cdot g^{-1}$)和重度污染(地表水 $> 1\,000 ng \cdot L^{-1}$,沉积物 $> 5\,000 ng \cdot g^{-1}$),经比较可以得出本研究除了 BJ4 和 BJ11 这 2 个点位的地表水属于中度污染以外,其他采样点地表水都属于轻度污染;BJ15、BJ16 和 PJ5 这 3 个点位的沉积物属于轻微污染,BJ1、BJ3、BJ4、BJ12 和 BJ25 这 5 个点位的沉积物属于中度污染水平.

表 2 北江流域地表水和沉积物中 PAHs 检出情况

Table 2 Detection of PAHs in surface water and sediments of Beijiang River basin

PAHs 组分	地表水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$			沉积物/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
Nap	48.91	4.39	22.93	12.71	1.92	4.71
Acy	11.15	0.34	1.71	3.89	0.29	1.24
Ace	27.5	0.69	2.51	12.36	0.24	2.53
Flu	17.86	1.36	4.39	21.91	1.88	7.24
Phe	154.91	4.76	22.24	84.16	16.35	37.07
Ant	20.31	0.58	2.6	13.97	1.94	6.41
Fla	36.13	1.44	7.96	111.45	11.02	35.35
Pyr	37.3	1.26	5.86	90.57	7.09	27.19
BaA	13.71	0.25	2.05	47.46	2.19	12.66
Chry	26.69	2.61	7.56	67.97	3.83	18.92
BbF	126.4	2.34	12.53	39.02	2.44	12.77
BkF	55.93	0.25	5.83	16.65	1.08	5.01
BaP	5.01	0.59	2.01	38.17	2.09	11.83
Inp	33.41	0.9	5.31	31.85	2.19	11.50
DahA	27.33	0.18	4.03	6.76	0.45	2.10
BghiP	24.19	0.48	7.4	36.83	2.17	12.78
\sum PAHs	443.04	41.82	116.90	635.73	59.58	209.32

表 3 列举对比了本研究与国内外其他不同河流湖泊地表水与沉积物中 PAHs 的检出情况。 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 含量范围与 2016 年检测情况 ($41.2 \sim 413.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比变化不大,与武汉长江典型饮用水源 ($57.04 \sim 475.79 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 持平,明显低于太湖 ($831 \sim 2425 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和埃及尼罗河 ($1112.70 \sim 4364.30 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 高于安徽池州升金湖 ($54.7 \sim 148.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、俄罗斯莫斯科河 ($50.60 \sim 120.10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和美国密西西比河 ($22.20 \sim 163.40$

$\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。沉积物中 $\omega(\sum \text{PAHs})$ 含量略低于 2016 年北江枯水期的检测情况 ($54.8 \sim 951.8 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 与黑龙江小兴凯湖 ($82.1 \sim 534.6 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 和上海滴水湖 ($74.03 \sim 579.20 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) 相当,低于广州饮用水源地 ($144.55 \sim 1681.0 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 显著低于美国特拉华河 ($3749 \sim 22324 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 高于土耳其伊斯坦布尔湖 ($46.29 \sim 403.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), 显著高于安徽升金湖 ($0.19 \sim 2.43 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。总体而言,北江流域水和沉积物中多环芳烃含量属中、低等水平。

表 3 国内外各河流/湖泊中 PAHs 检出情况对比¹⁾

Table 3 Comparison of PAHs in surface water of lakes and rivers at home and abroad

国家	河流/湖泊	采样年份	地表水 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	沉积物 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
中国	北江及支流	2021	41.82 ~ 443.04	116.90	59.58 ~ 635.73	209.32	本研究
	北江	2016	41.2 ~ 413.8	90.8	54.8 ~ 951.8	285.5	[11]
	武汉长江饮用水源地	2020	57.04 ~ 475.79	173.86	—	—	[12]
	广州饮用水源地	2013	86.15 ~ 177.35	—	144.55 ~ 1681.0	—	[13]
	南京固城湖	2015	184 ~ 365	280	86.70 ~ 1790	424	[14]
	太湖	2018	831 ~ 2425	1762	—	—	[15]
	上海市地表水体	2012	7.29 ~ 400.51	127.36	7.23 ~ 19480.04	738.34	[16]
	安徽升金湖	2019	54.7 ~ 148.0	90.2	0.19 ~ 2.43	—	[17]
	黑龙江小兴凯湖	2019	—	—	82.1 ~ 534.6	219.2	[18]
	衡水湖	2019	—	—	263.68 ~ 2038.99	1010.17	[19]
乌兹别克斯坦	阿姆河	2020	3.19 ~ 779	98.4	—	—	[20]
马来西亚	双溪河	2016	113 ~ 549	—	—	—	[21]
埃及	尼罗河	2005	1112.70 ~ 4364.30	2127.55	—	—	[22]
土耳其	伊斯坦布尔湖	2020	—	—	46.29 ~ 403.9	—	[23]
俄罗斯	莫斯科河	2013	50.60 ~ 120.10	—	—	—	[24]
美国	密西西比河	2007	22.20 ~ 163.40	86.50	—	—	[25]
	特拉华河	2017	—	—	3749 ~ 22324	7544	[26]

1) “—”表示文献中无相关数据

从空间分布来看(图 2), 采样范围内水中 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 峰值出现在 BJ11 ($443.94 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 该点位于飞来峡上游, 周围分布较多旅游景点和度假村, G240 国道和京广铁路从旁经过, 可能是人类活动汽车尾气排放的 PAHs 经过大气沉降地表径流等方式进入地表水中. 另外滨江在 BJ18 点汇入北江后, 下游 PAHs 的浓度有短暂地下降(BJ18 ~ 22), 推测可能是滨江水体中多环芳烃浓度小于北江从而产生了稀释作用, 在后续研究中将对滨江采样进一步

分析与北江多环芳烃含量之间的关系. 此次采样中仅采集到 8 个沉积物样品, BJ4 的 $\omega(\sum \text{PAHs}) = 635.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 显著高于其他点位, 且 BJ4 水中 $\rho(\sum \text{PAHs}) = 307.80 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 也较高, 推测 BJ4 点位白石窑水力发电站右岸分布众多机械设备和塑料制品等生产企业, 可能是工业生产和大型运输车辆尾气排放的多环芳烃造成该点位地表水和沉积物中 PAHs 含量较高.

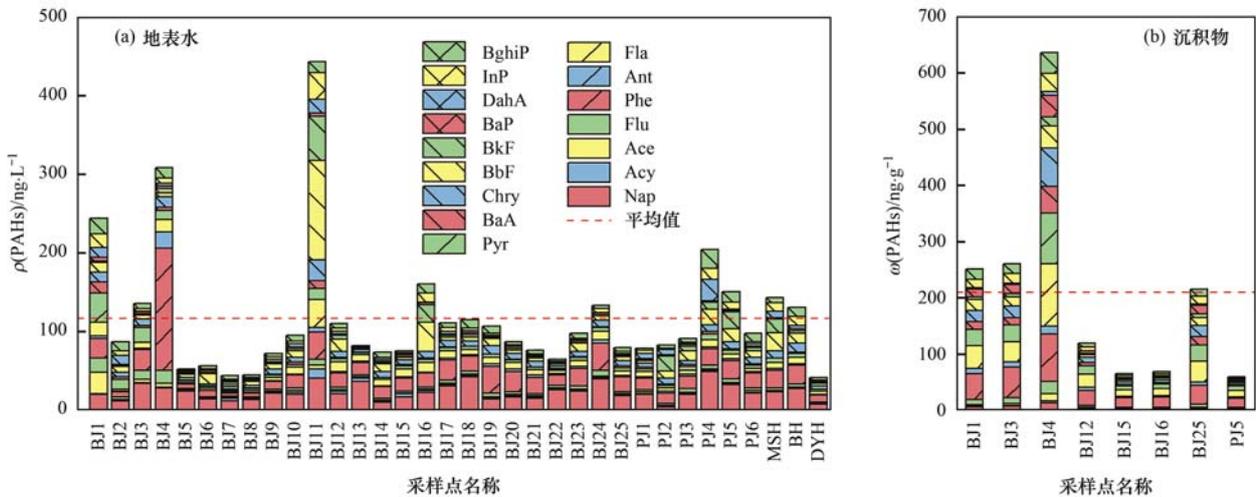


图 2 地表水和沉积物中 PAHs 单体含量

Fig. 2 Concentrations of PAHs monomers in surface water and sediments

从成分组成来看, 将不同的 PAHs 根据分子结构的芳香环个数分类(图 3), 北江流域水中二环芳烃的

占比明显高于沉积物中的占比. 水中 PAHs 以二环芳烃和三环芳烃为主, 质量分数范围分别为 5.31% ~

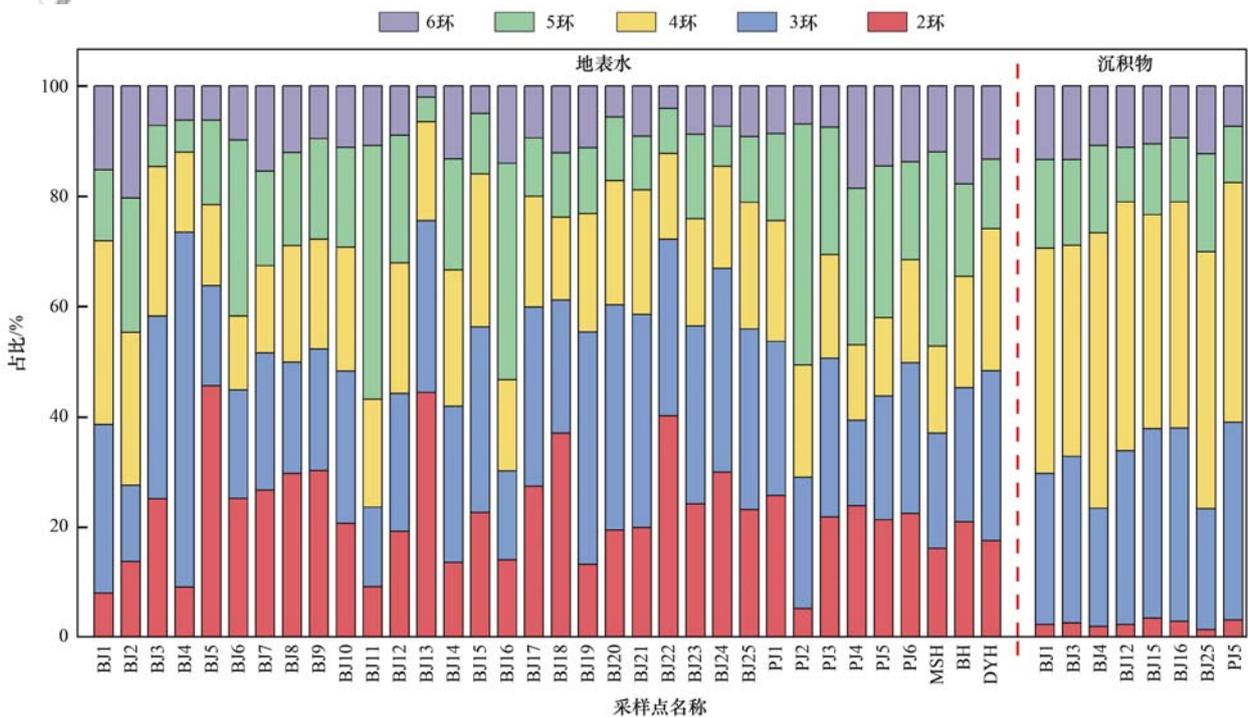


图 3 北江中上游地表水和沉积物中不同环数 PAHs 占比

Fig. 3 Proportions of PAHs with different rings in surface water and sediments of Beijiang River Basin

45.64%和13.83%~64.34%,平均值分别为22.59%和28.15%;沉积物中以三环芳烃和四环芳烃为主,质量分数范围分别为21.44%~35.80%和38.26%~49.93%,平均值分别为29.69%和43.01%。造成这种现象可能的原因是低环芳烃与高环芳烃相比,分子量较小,亲水性更强,更易存在于水中。

2.2 PCBs 污染水平和分布特征

北江流域地表水和沉积物中 PCBs 检出情况见表4。从检出含量来看,在地表水34个点位中共检测到17种 PCBs 单体。水中 $\rho(\sum \text{PCBs})$ 范围在0.81~287.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为38.92 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。检出率最高的物质为 HexaCBs-128 (检出率94.12%); 检出率最低的物质是 HexaCBs-153 (检出率2.94%),仅在一个点位中检出。HeptaCBs-180

该种物质检出浓度最大,范围为 ND ~ 88.31 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值35.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; TetraCBs-66 检出浓度最小,范围 ND ~ 1.20 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值0.69 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在8个沉积物采样点位中检测到 PentaCBs-105、PentaCBs-114、PentaCBs-123、HexaCBs-128、HeptaCBs-170、HeptaCBs-180、HeptaCBs-187 和 HeptaCBs-189 共8种 PCBs 单体。沉积物中 $\omega(\sum \text{PCBs})$ 范围为0.13~3.96 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为0.99 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。检出率最高的物质为 HeptaCBs-170 和 HeptaCBs-180,检出率均为75.00%; 检出率最低的物质是 PentaCBs-105 和 PentaCBs-123,检出率均为12.50%。在沉积物中 PentaCBs-114 含量最大,平均值为1.19 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; HeptaCBs-187 含量最小,平均值为0.05 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

表4 北江流域地表水和沉积物中 PCBs 检出情况¹⁾

Table 4 Detection of PCBs in surface water and sediments of Beijiang River Basin

PCBs 组分	地表水				沉积物			
	最大值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	最小值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	最大值 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	最小值 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	平均值 / $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	检出率 /%
TetraCBs-66	1.20	ND	0.69	11.76	ND	ND	ND	0.00
PentaCBs-105	5.64	ND	2.61	35.29	0.08	ND	0.08	12.50
PentaCBs-114	2.99	ND	1.70	35.29	2.89	ND	1.19	37.50
PentaCBs-118	2.93	ND	1.95	32.35	ND	ND	ND	0.00
PentaCBs-123	3.22	ND	1.77	35.29	0.15	ND	0.15	12.50
PentaCBs-126	5.92	ND	1.95	85.29	ND	ND	ND	0.00
HexaCBs-128	5.81	ND	1.53	94.12	0.22	ND	0.09	37.50
HexaCBs-138	47.62	ND	7.28	88.24	ND	ND	ND	0.00
HexaCBs-153	5.67	ND	5.67	2.94	ND	ND	ND	0.00
HexaCBs-156	24.07	ND	9.57	17.65	ND	ND	ND	0.00
HexaCBs-157	10.04	ND	5.16	26.47	ND	ND	ND	0.00
HexaCBs-167	12.55	ND	5.01	35.29	ND	ND	ND	0.00
HexaCBs-169	26.26	ND	9.13	29.41	ND	ND	ND	0.00
HeptaCBs-170	21.37	ND	3.11	64.71	0.10	ND	0.06	75.00
HeptaCBs-180	88.31	ND	35.00	23.53	1.25	ND	0.50	75.00
HeptaCBs-187	21.77	ND	4.29	55.88	0.08	ND	0.05	37.50
HeptaCBs-189	46.51	ND	7.81	79.41	0.12	ND	0.07	37.50
$\sum \text{PCBs}$	287.50	0.81	38.92	—	3.96	0.13	0.99	—

1) “ND”表示低于检出限

表5列举了国内外地表水和沉积物中 PCBs 检出的浓度范围和平均浓度,并与本研究对比。在本研究中地表水中 $\rho(\sum \text{PCBs})$ 范围为0.81~287.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,低于汾河流域(8~485 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$),显著低于埃及尼罗河三角洲(14 400~20 200 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$),略高于美国密西西比河(22.2~163.4 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$),高于洞庭湖及入湖河流(0.077~10 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、太湖流域水源地(ND~1.04 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)和武汉长江饮用水源地

(ND~24.84 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$); 沉积物中 $\omega(\sum \text{PCBs})$ 范围为0.13~3.96 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,与宁波象山港沉积物 $\omega(\sum \text{PCBs})$ 相当(ND~3.54 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$),低于上海市地表水体(0.99~46.11 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、河北白洋淀(ND~37.61 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)和海南三亚河(1.75~92.75 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$),显著低于尼日利亚的尼日尔三角洲(1 520~3 540 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。总体而言,北江中上游地表水和

表 5 国内外各河流/湖泊中 PCBs 检出情况对比¹⁾

Table 5 Comparison of PCBs in surface water of lakes and rivers at home and abroad

国家	河流/湖泊	采样年份	地表水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$		沉积物/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		文献
			浓度	平均值	含量	平均值	
中国	北江流域	2021	0.81 ~ 287.50	38.92	0.13 ~ 3.96	0.99	本研究
	武汉长江饮用水源地	2020	ND ~ 24.84	9.88	—	—	[12]
	北京潮白河	2018	—	—	0.125 ~ 70.6	5.2	[27]
	海南三亚河	2019	—	—	1.75 ~ 92.75	36.65	[28]
	上海地表水体	2012	ND ~ 34.84	4.42	0.99 ~ 46.11	5.87	[16]
	太湖上游	2019	4.24 ~ 14.46	7.28	1.77 ~ 57.65	18.03	[29]
	汾河流域	2008	8 ~ 485	180	4.44 ~ 79.42	24.941	[30]
	河北白洋淀	2017	—	—	ND ~ 37.61	13.45	[31]
	宁波象山港	2017	—	—	ND ~ 3.54	1.36	[32]
	太湖竺山湾及入湖河流	2017	—	—	11.02 ~ 84.05	26.42	[33]
	太湖流域水源地	2012	ND ~ 1.04	0.54	0.47 ~ 1.29	0.95	[34]
	洞庭湖及入湖河流	2018	0.077 ~ 10	2.7	—	—	[35]
	美国	密西西比河	2007	22.2 ~ 163.4	86.50	—	—
特拉华河		2017	—	—	18.1 ~ 136.8	61.1	[26]
巴基斯坦	奇纳布河	2008	1.4 ~ 8.5	2.8	—	—	[36]
意大利	台伯河	2014	0.19 ~ 6.82	2.03	3.73 ~ 79.30	33.98	[37]
埃及	尼罗河三角洲	2013	14 400 ~ 20 200	—	—	—	[38]
尼日利亚	尼日尔三角洲	2019	—	—	1 520 ~ 3 540	2 020	[39]

1) “—”表示文献中无相关数据

沉积物中 PCBs 含量属于中等水平。

从空间分布来看(图 4), 地表水中 $\rho(\sum \text{PCBs})$ 最高的点位为 PJ3($287.50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 最低的为 MSH($0.81 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$); 沉积物样品中 BJ25 的 $\omega(\sum \text{PCBs})$ 最高($3.96 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), BJ1 的 $\omega(\sum \text{PCBs})$ 最低($0.13 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。

从成分组成来看, 根据分子结构中包含氯原子个

数将 PCBs 进行分类, 不同种类 PCBs 的占比见图 5。水中 PCBs 主要以六氯联苯和七氯联苯为主, 沉积物中主要以五氯联苯和七氯联苯为主。由于多氯联苯是半挥发性持久性污染物, 其挥发性随着氯原子数量的增加而降低^[40,41], 因此可以解释水中高(五、六和七)氯代联苯在水相和沉积物中优势。另外根据前人报道^[42,43], 北江中上游流域周边长期以来电子废弃物拆解产业较为密集, 电子废弃物中高氯代 PCBs 进入水环境可能是造成该种现象的原因之一。

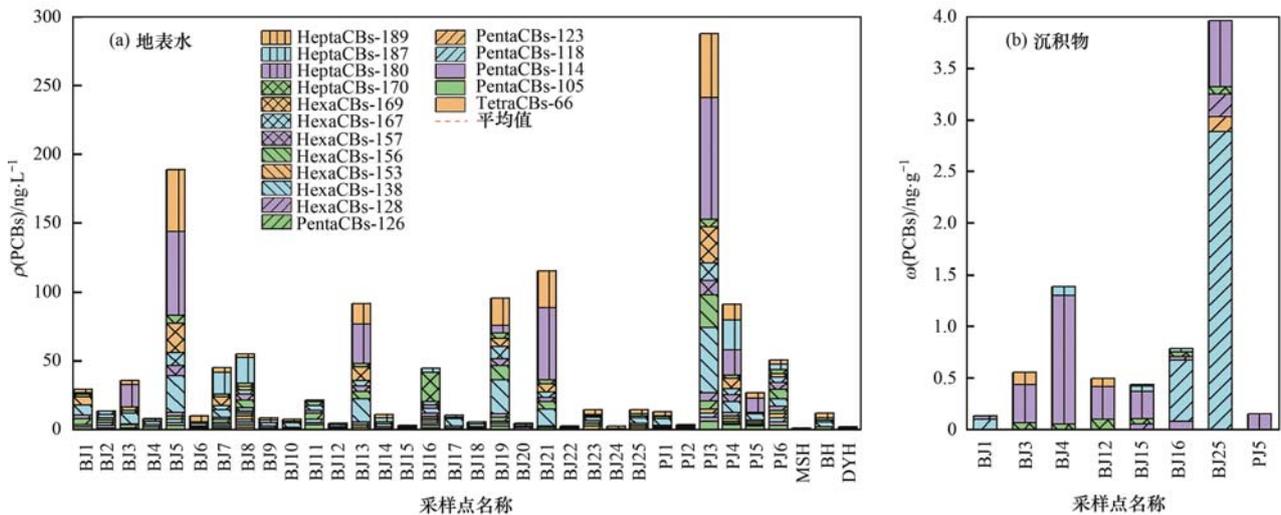


图 4 地表水和沉积物中 PCBs 单体含量

Fig. 4 Concentrations of PCBs monomers in surface water and sediments

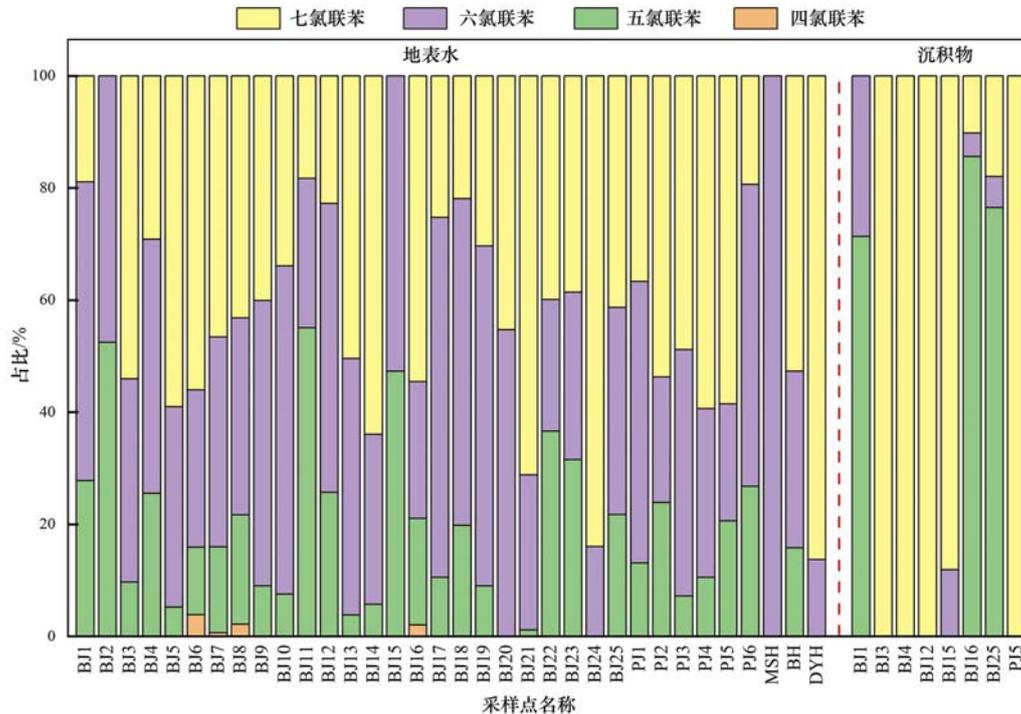


图5 北江中上游地表水和沉积物中不同氯原子数 PCBs 占比

Fig. 5 Proportions of PCBs with different chlorine atomic numbers in surface water and sediments of Beijing River Basin

2.3 PAHs 和 PCBs 风险评价

2.3.1 健康风险评价

北江流域水样中 PAHs 和 PCBs 的健康风险(致癌风险指数 ILCR 和非致癌风险指数 HI)见图 6. 由图 6(a)可知,PAHs 的致癌风险指数范围在 $2.95 \times 10^{-7} \sim 7.96 \times 10^{-6}$ 之间,20 个点位的致癌风险指数小于 EPA 规定的致癌风险阈值(1×10^{-6}),表明这些点位 PAHs 对人类不存在致癌风险,其余 14 个点位致癌风险指数介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,可能存在潜在的致癌风险; PAHs 的非致癌风险指数范围 $3.36 \times 10^{-5} \sim 3.48 \times 10^{-4}$,均远小于 1,低于 EPA 规定的非致癌风险阈值,表明在整个研究区域内 PAHs 对人类的非致癌风险可以忽略.

由图 6(b)可知,水中 PCBs 致癌风险指数范围为 $3.83 \times 10^{-8} \sim 1.36 \times 10^{-5}$,20 个点位的致癌指数小于 EPA 规定的致癌风险限值(1×10^{-6}),PCBs 对人类不足以造成终生致癌风险;有 14 个点位的致癌指数介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,虽然处于可接受范围内,但是这些点位的 PCBs 可能对人体存在一定的健康风险.水中 PCBs 的非致癌风险指数介于 $4.43 \times 10^{-1} \sim 1.24 \times 10^{-3}$,均小于 1,低于非致癌风险阈值,说明以当前水中 PCBs 的浓度对人类造成的非致癌风险可以忽略.

2.3.2 生态风险评价

所有点位地表水中 PAHs 和 PCBs 各单体的风

险商(RQ)值分布如图 7 所示,总的来看,研究区域内大多数点位地表水中的 PAHs 和 PCBs 单体的 $RQ < 1.0$,基本处于低风险和无风险范围,对水生态环境无明显毒害作用.但与此同时存在 2 种 PAHs 单体(Fla 和 BghiP)和 3 种 PCBs 单体(PentaCBs-126、HexaCBs-128 和 HeptaCBs-189)在较多点位(占比 $> 50\%$)处于中等风险($1.0 \leq RQ < 10.0$);并且 2 种多环芳烃(BbF 和 BkF)和 4 种多氯联苯(PentaCBs-126、HeptaCBs-170、HeptaCBs-187 和 HeptaCBs-189)共 6 种物质在个别点位存在重度生态风险($RQ \geq 10.0$),值得引起重视.

将北江流域水体沉积物中各 PAHs 单体含量和 \sum PCBs 含量与 SQGs^[10] 中相应的 ERL 和 ERM 进行比较,结果见表 6.所有沉积物样品中各 PAHs 单体(BJ4 的 Flu 除外)和 \sum PCBs 含量均小于效应区间低值(ERL),表明不存在负面生态风险.值得补充的是,InP 该种单体无效应区间低值,只要存在于环境中就会产生一定毒害作用,本次沉积物样品中 InP 有不同程度地检出,应当引起重视.总体而言,北江沉积物中 PAHs 和 PCBs 存在生态风险的几率较低,处于较低的生态风险水平,建议在以后的工作中加强对 Flu 和 InP 的管控.

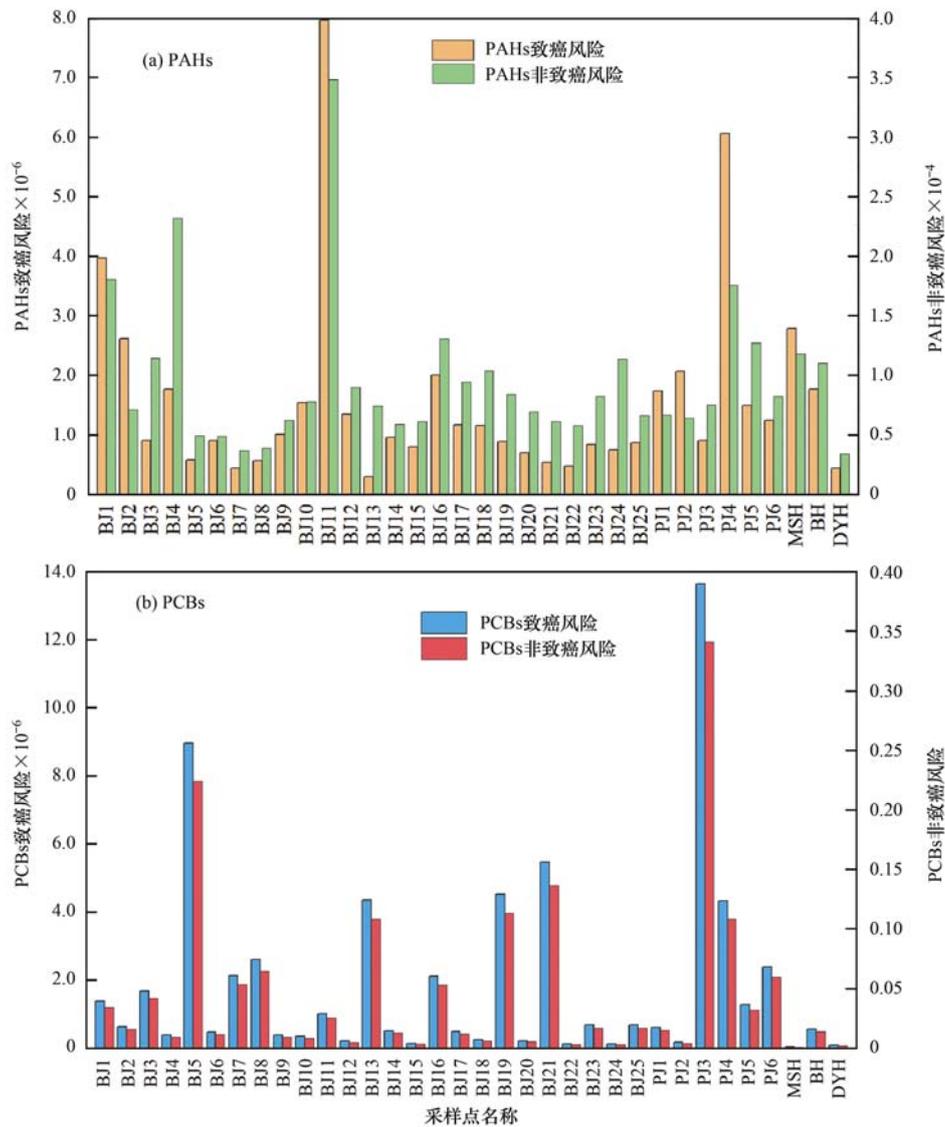


图 6 地表水中 PAHs 和 PCBs 的致癌风险指数和非致癌风险指数

Fig. 6 Carcinogenic and non-carcinogenic risks of PAHs and PCBs in surface water

表 6 沉积物中 PAHs 和 PCBs 含量与 ERL 和 ERM 的比较/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 6 Comparisons of PAHs and PCBs contents in sediments with ERL and ERM/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

污染物种类	评价项目	含量	ERL	ERM
PAHs	Nap	1.92 ~ 12.71	160	2 100
	Acy	0.29 ~ 3.89	16	500
	Ace	0.24 ~ 12.36	44	640
	Flu	1.88 ~ 21.91	19	540
	Phe	16.35 ~ 84.16	240	1 500
	Ant	1.94 ~ 13.97	85.3	1 100
	Fla	11.02 ~ 111.45	600	5 100
	Pyr	7.09 ~ 90.57	665	2 600
	BaA	2.19 ~ 47.46	261	1 600
	Chry	3.83 ~ 67.97	384	2 800
	BbF	2.44 ~ 39.02	320	1 880
	BkF	1.08 ~ 16.65	280	1 620
	BaP	2.09 ~ 38.17	430	1 600
	InP	0.45 ~ 6.76	—	—
PCBs	DahA	2.19 ~ 31.85	430	1 600
	BghiP	2.17 ~ 36.83	63.4	260
	\sum PCBs	0.13 ~ 3.96	22.7	180

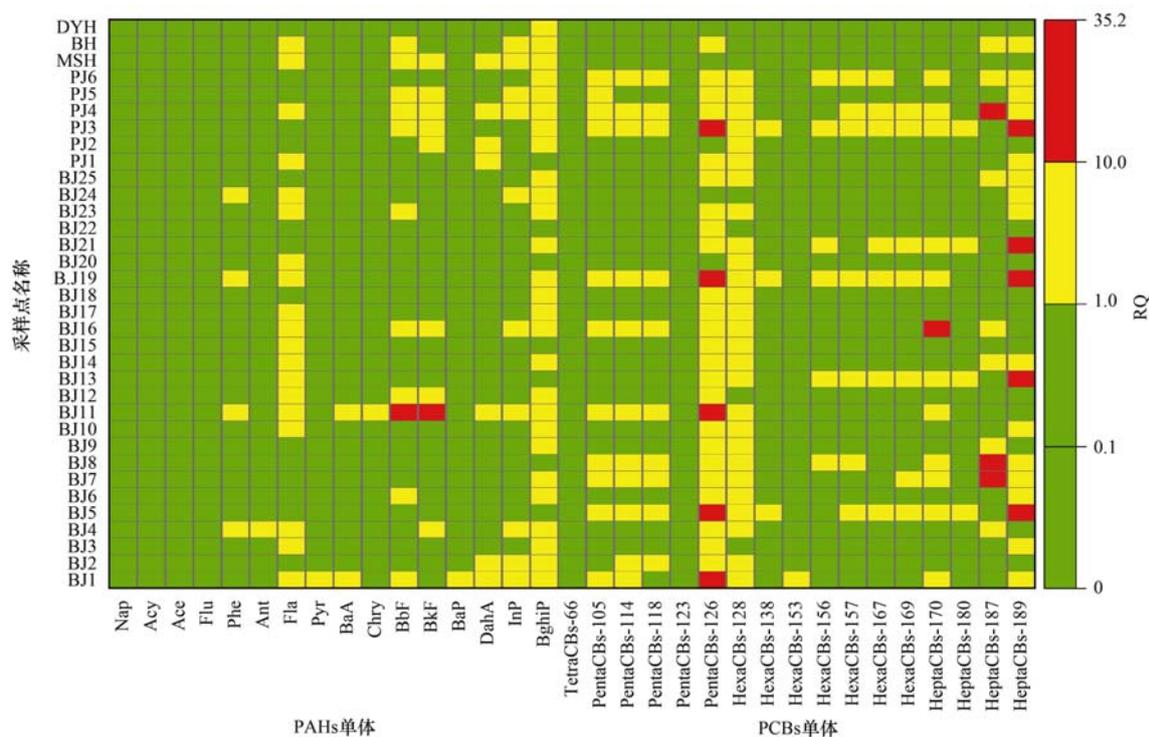


图7 水中 PAHs 和 PCBs 生态风险分布

Fig. 7 Distributions of ecological risks of PAHs and PCBs in surface water

3 结论

(1) 北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 检出范围分别为 $41.82 \sim 443.04 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $59.58 \sim 635.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值分别为 $41.82 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $209.32 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 水中 PAHs 以二环芳烃和三环芳烃为主, 沉积物中以三环芳烃和四环芳烃为主. PCBs 在地表水和沉积物中的检出范围分别为 $0.81 \sim 287.50 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.13 \sim 3.96 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值分别为 $116.90 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.99 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 水中 PCBs 以六氯联苯和七氯联苯为主, 沉积物中 PCBs 主要为七氯联苯和五氯联苯.

(2) 健康风险评价结果显示, 北江中上游地表水中 PAHs 和 PCBs 致癌风险总体处于中低水平, 地表水中 PAHs 和 PCBs 的非致癌风险可以忽略. 生态风险评价结果显示, 研究区域内地表水中 PAHs 和 PCBs 生态风险总体处于中低风险水平, 个别点位存在重度风险的污染物单体, 值得引起重视; 沉积物中 PAHs 和 \sum PCBs 处于较低的生态风险水平, 建议加强对 Flu 和 InP 的管控.

参考文献:

[1] Zhu M H, Yuan Y B, Yin H, *et al.* Environmental contamination and human exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) in China: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **805**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150270.

[2] Kim K H, Jahan S A, Kabir E, *et al.* A review of airborne

polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects[J]. *Environment International*, 2013, **60**: 71-80.

[3] Zhao Z H, Gong X H, Zhang L, *et al.* Riverine transport and water-sediment exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) along the middle-lower Yangtze River, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **403**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123973.

[4] Lu Q, Futter M N, Nizzetto L, *et al.* Fate and transport of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the River Thames catchment-insights from a coupled multimedia fate and hydrobiogeochemical transport model [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 1461-1470.

[5] Wu J H, Wang Z H, Zhang Y F, *et al.* Spatial distribution and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in sea ice and seawater from northern Liaodong Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **174**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113319.

[6] Man Y B, Chow K L, Cheng Z, *et al.* Profiles and removal efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons by two different types of sewage treatment plants in Hong Kong [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **53**: 196-206.

[7] Montuori P, De Rosa E, Sarnacchiaro P, *et al.* Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in water and sediment from Volturno River, southern Italy: occurrence, distribution and risk assessment [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2020, **32** (1), doi: 10.1186/s12302-020-00408-4.

[8] United States Environmental Protection Agency. ECOTOX knowledgebase: home [EB/OL]. <https://cfpub.epa.gov/ecotox/>, 2022-02-10.

[9] European Commission. Technical guidance document on risk assessment [R]. Ispra: European Commission Joint Research Center, 2003.

[10] Long E R, MacDonald D D. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine

- ecosystems[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1998, **4**(5): 1019-1039.
- [11] 昌盛, 樊月婷, 付青, 等. 北江枯水期多环芳烃的污染分布特征与风险评估[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, **50**(1): 57-67.
Chang S, Fan Y T, Fu Q, *et al.* Pollution distribution characteristics and risk assessment of polycyclic-aromatic hydrocarbons in surface water and sediment of Beijiang River [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, **50**(1): 57-67.
- [12] 张坤锋, 付青, 涂响, 等. 武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5836-5847.
Zhang K F, Fu Q, Tu X, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of typical POPs in typical drinking water sources in Wuhan [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5836-5847.
- [13] 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 等. 广州饮用水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3489-3500.
Song Y M, Wang C, Liu S, *et al.* Distribution, sources, and health risk assessment of PAHs in water supply source regions of Guangzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3489-3500.
- [14] Zeng Q F, Jeppesen E, Gu X H, *et al.* Distribution, fate and risk assessment of PAHs in water and sediments from an aquaculture- and shipping-impacted subtropical lake, China [J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 612-620.
- [15] Kong J J, Dai Y X, Han M S, *et al.* Nitrated and parent PAHs in the surface water of Lake Taihu, China: occurrence, distribution, source, and human health risk assessment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **102**: 159-169.
- [16] 王薛平. 上海市地表水体中多环芳烃与多氯联苯的环境行为与风险研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
Wang X P. Environmental behaviors and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in the surface water of Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [17] 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 等. 升金湖水体优先污染物筛选与风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4727-4738.
Gong X H, Ding Q Q, Jin M, *et al.* Screening of priority pollutants and risk assessment for surface water from Shengjin Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4727-4738.
- [18] 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.
- [19] 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 等. 衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1357-1367.
Zhang J W, Wei J, Lü Y F, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Hengshui Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1357-1367.
- [20] 金苗, 吴敬祿, 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, Zhan S, *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.
- [21] Manan T S B A, Khan T, Mohtar W H M W, *et al.* Ecological and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Sungai Perak, Malaysia [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **294**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126124.
- [22] Badawy M I, Embaby M A. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water in Egypt [J]. *Desalination*, 2010, **251**(1-3): 34-40.
- [23] Güzel B, Canlı O, Aslan E. Spatial distribution, source identification and ecological risk assessment of POPs and heavy metals in lake sediments of Istanbul, Turkey [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **175**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.113172.
- [24] Eremina N, Paschke A, Mazlova E A, *et al.* Distribution of polychlorinated biphenyls, phthalic acid esters, polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine substances in the Moscow River, Russia [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **210**: 409-418.
- [25] 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.
- [26] Kim A W, Vane C H, Moss-Hayes V, *et al.* PAH, PCB, TPH and mercury in surface sediments of the Delaware River estuary and Delmarva Peninsula, USA [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **129**(2): 835-845.
- [27] Yang L L, Jin F, Liu G R, *et al.* Levels and characteristics of polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Chaobai River, a source of drinking water for Beijing, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **189**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109922.
- [28] 詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 等. 三亚河沉积物 PAHs 和 PCBs 的分布、来源及风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1830-1838.
Zhan Y, Wei T T, Ye H B, *et al.* Distribution, source, and ecological risk evaluation of the PAHs and PCBs in the sediments from Sanya River [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1830-1838.
- [29] 程加德, 任晓鸣, 邱阳, 等. 太湖上游多氯联苯的分布、来源及风险评估[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(12): 2433-2440.
Cheng J D, Ren X M, Qiu Y, *et al.* Distribution, source and risk assessment of PCBs in the upstream of Taihu Lake Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(12): 2433-2440.
- [30] 赵颖, 王飞, 葛宜虎. 汾河流域沉积物中多氯联苯的分布及生态风险评估[J]. *水资源保护*, 2018, **34**(5): 81-87.
Zhao Y, Wang F, Ge Y H. Distribution of polychlorinated biphenyl in sediments of Fenhe River Basin and its ecological risk assessment [J]. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(5): 81-87.
- [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] 赵宾峰, 祝翔宇, 廖一波, 等. 象山港沉积物与生物体中多氯联苯分布特征与暴露风险[J]. 环境化学, 2020, **39**(10): 2742-2752.
Zhao B F, Zhu X Y, Liao Y B, *et al.* Distribution features and exposure risk of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments and marine organisms from Xiangshan Bay, China [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(10): 2742-2752.
- [33] 徐磊, 刘莎, 秦庆东, 等. 太湖竺山湾及入湖河流沉积物中多氯联苯单体分布及源解析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(11): 4333-4341.
Xu L, Liu S, Qin Q D, *et al.* Distribution and source apportionment of polychlorinated biphenyl congeners in surface sediments from Zhushan Bay and the inflow rivers of Lake Taihu [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(11): 4333-4341.
- [34] 于英鹏, 刘敏. 太湖流域水源地多氯联苯分布特征与污染水平[J]. 生态毒理学报, 2018, **13**(1): 147-153.
Yu Y P, Liu M. Distribution characteristics and pollution level of PCBs in water source area of Taihu River Basin [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, **13**(1): 147-153.
- [35] 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 等. 洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 363-368.
Huang Z F, Zheng B H, Yin D Q, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of 209 polychlorinated biphenyls in Dongting Lake and the inflow rivers [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 363-368.
- [36] Eqani S A M A S, Malik R N, Cincinelli A, *et al.* Uptake of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) by river water fish; the case of River Chenab [J]. Science of the Total Environment, 2013, **450-451**: 83-91.
- [37] Montuori P, Aurino S, Garzonio F, *et al.* Polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in Tiber River and Estuary: occurrence, distribution and ecological risk [J]. Science of the Total Environment, 2016, **571**: 1001-1016.
- [38] Megahed A M, Dahshan H, Abd-El-Kader M A, *et al.* Polychlorinated biphenyls water pollution along the River Nile, Egypt [J]. The Scientific World Journal, 2015, **2015**, doi: 10.1155/2015/389213.
- [39] Irehiewie G O, Iwegbue C M A, Lari B, *et al.* Spatial characteristics, sources, and ecological and human health risks of polychlorinated biphenyls in sediments from some river systems in the Niger Delta, Nigeria [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111605.
- [40] Lin T, Nizzetto L, Guo Z G, *et al.* DDTs and HCHs in sediment cores from the coastal East China Sea [J]. Science of the Total Environment, 2016, **539**: 388-394.
- [41] Conka K, Chovancová J, Stachová Sejáková Z, *et al.* PCDDs, PCDFs, PCBs and OCPs in sediments from selected areas in the Slovak Republic [J]. Chemosphere, 2014, **98**: 37-43.
- [42] 朱智成, 陈社军, 丁南, 等. 珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3066-3072.
Zhu Z C, Chen S J, Ding N, *et al.* Polychlorinated biphenyls in house dust at an E-waste site and urban site in the Pearl River Delta, Southern China: sources and human exposure and health risks [J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 3066-3072.
- [43] 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 等. 岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5448-5457.
Ye K, Sun Y C, Jia Y N, *et al.* Residual characteristics and health assessment analysis of OCPs and PCBs in karst groundwater [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5448-5457.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)