Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉，孙雪丽，庞博，朱法华，王圣，晏培

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年12月

第42卷 第 12 期
Vol.42 No.12

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷 第12期
2021年12月15日

目 次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 …… 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 …… 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 …… 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 …… 陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖(5594)
基于iLME+Geoi-RF模型的四川省$PM_{2.5}$浓度估算 …… 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍(5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气$PM_{2.5}$中水溶性无机离子特征 …… 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 …… 孙佳傧, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 …… 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)
天津市郊夏季VOCs化学特征及其时间精细化的来源解析 …… 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 …… 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)
典型化工集中区环境空气SVOCs污染特征及来源解析 …… 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 …… 张子金, 林煜棋, 张煜娴, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)
基于排放清单和实地测试的工业VOCs排放特征:以郑州市高新区为例 …… 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)
我国水性建筑涂料VOCs排放特征及其环境影响 …… 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)
VOCs源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 …… 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)
山东省O_3时空分布及影响因素分析 …… 张淼, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)
2020年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 …… 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 …… 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 …… 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)
长江流域总氮排放量预测 …… 丁肇慰, 郑华(5768)
1980~2015年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 …… 姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江(5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 …… 韩谞, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 …… 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 …… 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 …… 李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠(5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 …… 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)
武汉典型饮用水水源中典型POPs污染特征与健康风险评估 …… 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 …… 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 …… 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨萍果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 …… 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水持留改良影响 …… 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 …… 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 …… 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 …… 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 …… 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和ARGs的胁迫影响及后效应 …… 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 …… 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 …… 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 宫健(5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 …… 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 …… 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 …… 强瑀, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 …… 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)
铜仁土壤-水稻重金属积累效应与安全种植区划 …… 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤As的影响 …… 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中Cd的去除 …… 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)
稻田灌溉河流CH_4和N_2O排放特征及影响因素 …… 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田CH_4和N_2O排放的影响 …… 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤N_2O的排放特征及微生物特性 …… 王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 …… 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑀霁(6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 …… 杨建强, 刁华杰, 胡姝娅, 陈晓鹏, 王常慧(6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 …… 向书江, 余泺, 熊子怡, 罗东海, 王蓥燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油葵产量 …… 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录 …… (6091)
《环境科学》征订启事(5593)　《环境科学》征稿简则(5623)　信息(5643, 5835, 5883)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第12期 2021年12月
Vol.42,No.12 Dec.,2021

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估

张坤锋[1,2,3]，付青[1,2]，涂响[1,2*]，昌盛[1,2*]，樊月婷[1,2]，孙兴滨[3]，王山军[1,2]

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室，北京 100012；2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室，北京 100012；3. 东北林业大学林学院，哈尔滨 150040)

摘要：为了揭示武汉典型饮用水水源中典型持久性有机污染物(POPs)的污染特征与风险水平，采用固相萃取-气相色谱-质谱定性定量分析法，对武汉长江及其支流上 18 个典型集中式饮用水水源地，共 26 个采样点水体中多环芳烃(PAHs)、有机氯农药(OCPs)和多氯联苯(PCBs)浓度进行了检测，分析了 POPs 的污染水平，并开展健康风险评估. 结果表明，26 个采样点均有 PAHs 检出，除苯并[k]荧蒽检出率为 88.46% 外，其他 15 种单体检出率均为 100.00%，多环芳烃累积 $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 检出范围为 57.04 ~ 475.79 $ng\cdot L^{-1}$，平均值为 173.86 $ng\cdot L^{-1}$. PAHs 污染程度总体较低，PAHs 主要以中低环芳烃为主，来源于以石油源为主的混合源. 共有 8 种 OCPs 被检出，$\left(\sum \text{OCPs}\right)$ 范围为 ND ~ 4.57 $ng\cdot L^{-1}$，平均值为 0.78 $ng\cdot L^{-1}$，OCPs 浓度水平相对较低. 共有 24 种 PCBs 被检出，$\rho\left(\sum \text{PCBs}\right)$ 范围为 ND ~ 77.49 $ng\cdot L^{-1}$，平均值为 9.88 $ng\cdot L^{-1}$，PCBs 主要以不易降解的高氯联苯为主，部分点位 PCBs 浓度超过我国地表水环境质量标准限值，HeptaCBs-180 物质需要引起持续关注. 健康风险评估结果显示，研究区域内 PAHs 和 PCBs 的致癌风险指数均处于 10^{-6} ~ 10^{-4}，对人体可能产生潜在的致癌风险；OCPs 和 PCBs 的非致癌风险指数均小于 1，不会对人体产生非致癌风险.

关键词：武汉；长江；饮用水水源地；持久性有机污染物(POPs)；健康风险

中图分类号：X52 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2021)12-5836-12 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202105156

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan

ZHANG Kun-feng[1,2,3], FU Qing[1,2], TU Xiang[1,2*], CHANG Sheng[1,2*], FAN Yue-ting[1,2], SUN Xing-bin[3], WANG Shan-jun[1,2]

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: To identify the pollution characteristics and risk level of common persistent organic pollutants (POPs) in drinking water sources in Wuhan, solid-phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPE-GC-MS) was used to analyze 26 water samples from 18 drinking water sources located in the mainstream and tributaries of the Changjiang River, Wuhan. The concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organochloride pesticides (OCPs), and polychlorinated biphenyls (PCBs) were measured, the pollution status of the common POPs was analyzed, and their health risks were assessed. The results showed the presence of PAHs in all the 26 samples. Except for benzo(k)fluoranthene, which had a detection rate of 88.46%, the detection rates of the other 15 PAHs were 100.00%. The detection range of $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ was 57.04-475.79 $ng\cdot L^{-1}$, with an average of 173.86 $ng\cdot L^{-1}$. The pollution levels of PAHs were overall low and the PAHs mainly comprised low and medium cyclic aromatic hydrocarbons derived from a mixed source, and dominated by petroleum derivatives. A total of eight OCPs were detected, and the range of $\left(\sum \text{OCPs}\right)$ was ND-4.57 $ng\cdot L^{-1}$ with a mean concentration of 0.78 $ng\cdot L^{-1}$, which indicated that the concentration levels of OCPs were relatively low. A total of 24 types of PCBs were detected, and the range of $\rho\left(\sum \text{PCBs}\right)$ was ND-77.49 $ng\cdot L^{-1}$ with a mean of 9.88 $ng\cdot L^{-1}$. The PCBs mainly comprised refractory high-chlorinated biphenyls, and the concentrations of PCBs in some samples exceeded the limit of the surface water standard in China. Our results suggest that the concentration of HeptaCBs-180 should be continuously monitored in the future. The results of the health risk assessment showed that the carcinogenic risk indexes of PAHs and PCBs in our study area were in the range of 10^{-6} to 10^{-4}, which may pose a potential carcinogenic risk to humans. The non-carcinogenic risk indexes of OCPs and PCBs were less than 1, and did not pose a non-carcinogenic risk to humans.

Key words: Wuhan; Changjiang River; drinking water sources; persistent organic pollutants (POPs); health risk

---

收稿日期：2021-05-16；**修订日期**：2021-06-05

基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2020-JY-005)

作者简介：张坤锋(1995 ~)，男，硕士研究生，主要研究方向为水污染控制技术，E-mail：Zhangkf1995@163.com

* 通信作者，E-mail：tu_xiang@qq.com；changsheng83@163.com

持久性有机污染物（persistent organic pollutants，POPs）是一类由天然源或人为源产生的、对人体和生态环境产生严重危害的污染物质. 具有毒性大和难以生物降解的特点，能够在环境中长期存在并通过食物链富集，进而通过各类环境介质大范围传播[1]. 其中，多环芳烃（polycyclic aromatic hydrocarbons，PAHs）是一类具有较强溶解性、疏水性和挥发性的碳氢化合物，主要来自于有机物的不完全燃烧；多氯联苯（polychlorinated biphenyls，PCBs）[2] 和有机氯农药（organochloride pesticides，OCPs）[3] 广泛应用于工业生产及动植物病虫害防治. 目前已有研究表明，在我国的长江[4]、太湖[5]、巢湖[6]、白洋淀[7] 和三峡水库[8] 等水体中均检出了 POPs，这其中包括很多重要的饮用水水源地. POPs 具有很强的致癌、致畸、致突变性[9]，可能对内分泌产生干扰效应[10]. 联合国环境规划署早在 2001 年就签署通过了《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》，该公约致力于对 POPs 在生产、流通、使用和处理的全过程进行限制，截至目前已有 30 种物质被纳入其中[11].

保障饮用水安全已经成为世界共识并受到公众及相关部门的重视，确保饮用水安全的前提是必须首先保障饮用水水源地水体的安全. 长江流域作为我国最大的流域，分布着众多的饮用水水源地，其中有 53 个水源地被列入国家重要饮用水水源地，占国家重要饮用水源地的 30%[12 ~ 14]. 作为长江中游城市群的核心，武汉地区的饮用水水源地主要分布在长江、汉江及其支流. 随着长江中游流域经济带的快速发展，流域及周边农业、工业和交通运输服务势必会对武汉饮用水水源地水体造成污染[15]. 近年来，有关饮用水水源地 POPs 污染的研究逐渐增多，而有关武汉典型饮用水水源地 POPs 污染现状的调查还未开展. 本研究针对武汉典型饮用水水源地水体中 POPs 的污染特征进行分析，并对其健康风险进行评估和研究，以期为保护长江流域生态环境和饮用水安全提供数据支持和管理支撑.

1　材料与方法

1.1　试剂与仪器

对水样中 16 种优控 PAHs、29 种 OCPs 和 28 种 PCBs 进行检测（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）内标分析法进行定性定量测定，HLB（6 mL，500 mg）SPE 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 选用的替代物为萘-d8、䓛-d12 和二萘嵌苯-d12，测定 OCPs 的替代物为三苯基磷酸酯，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，测定 OCPs 的内标物为五氯硝基苯；所有替代物和内标物均购自美国 Supelco 公司. 主要仪器如下：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）.

表 1　武汉典型饮用水水源地水体中检测的 POPs 物质

Table 1　POPs detected in typical drinking water sources in Wuhan

多环芳烃（PAHs）	萘（Nap）、苊烯（Acy）、二氢苊（Ace）、芴（Flu）、菲（Phe）、蒽（Ant）、荧蒽（Fla）、芘（Pyr）、苯并[a]蒽（BaA）、䓛（Chry）、苯并[b]荧蒽（BbF）、苯并[k]荧蒽（BkF）、苯并[a]芘（BaP）、茚并[1，2，3-cd]芘（InP）、二苯并[a，h]蒽（DahA）和苯并[ghi]苝（二萘嵌苯）（BghiP）
有机氯农药（OCPs）	五氯苯、α-HCH、六氯苯、β-HCH、γ-HCH、HCH、七氯、艾氏剂、氧化氯丹、环氧七氯 B、环氧七氯 A、γ-氯丹、o，p′-DDE、α-氯丹、α-硫丹、反式九氯、p，p′-DDE、狄氏剂、o，p-DDD、异狄氏剂、β-硫丹、顺式九氯、o，p′-DDT、p，p′-DDD、异狄氏醛、硫酸盐硫丹、p，p′-DDT、异狄氏酮和甲氧滴滴涕
多氯联苯（PCBs）	2，4′-二氯联苯（DiCBs-8）、2，2′，5-三氯联苯（TriCBs-18）、2，4，4′-三氯联苯（TriCBs-28）、2，2′，3，5′-四氯联苯（TetraCBs-44）、2，2′，5，5′-四氯联苯（TetraCBs-52）、2，3′，4，4′-四氯联苯（TetraCBs-66）、3，3′，4，4′-四氯联苯（TetraCBs-77）、3，4，4′，5-四氯联苯（TetraCBs-81）、2，2′，4，5，5′-五氯联苯（PentaCBs-101）、2，3，3′，4，4′-五氯联苯（PentaCBs-105）、2，3，4，4′，5-五氯联苯（PentaCBs-114）、2，3′，4，4′，5-五氯联苯（PentaCBs-118）、2′，3，4，4′，5-五氯联苯（PentaCBs-123）、3，3′，4，4′，5-五氯联苯（PentaCBs-126）、2，2′，3，3′，4，4′-六氯联苯（PentaCBs-128）、2，2′，3，4，4′，5′-六氯联苯（HexaCBs-138）、2，2′，4，4′，5，5′-六氯联苯（HexaCBs-153）、2，3，3′，4，4′，5-六氯联苯（HexaCBs-156）、2，3，3′，4，4′，5′-六氯联苯（HexaCBs-157）、2，3′，4，4′，5，5′-六氯联苯（HexaCBs-167）、3，3′，4，4′，5，5′-六氯联苯（HexaCBs-169）、2，2′，3，3′，4，4′，5-七氯联苯（HeptaCBs-170）、2，2′，3，4，4′，5，5′-七氯联苯（HeptaCBs-180）、2，2′，3，4′，5，5′，6-七氯联苯（HeptaCBs-187）、2，3，3′，4，4′，5，5′-七氯联苯（HeptaCBs-189）、2，2′，3，3′，4，4′，5，6-八氯联苯（OctaCBs-195）、2，2′，3，3′，4，4′，5，5′，6-九氯联苯（NonaCBs-206）和 2，2′，3，3′，4，4′，5，5′，6，6′-十氯联苯（DecaCB-209）

1.2　样品采集

本研究于 2020 年 9 月在湖北省武汉市，选取了 18 个集中式饮用水水源地，共计 26 个采样点位进行了表层水样采集，26 个采样点详细点位分布见图 1.

其中 1 ~ 24 号点位位于长江干流及汉江干流，25 号点位位于长江支流滠水河，26 号点位位于长江支流举水河. 所有水样经 0.45 μm 纤维滤膜过滤

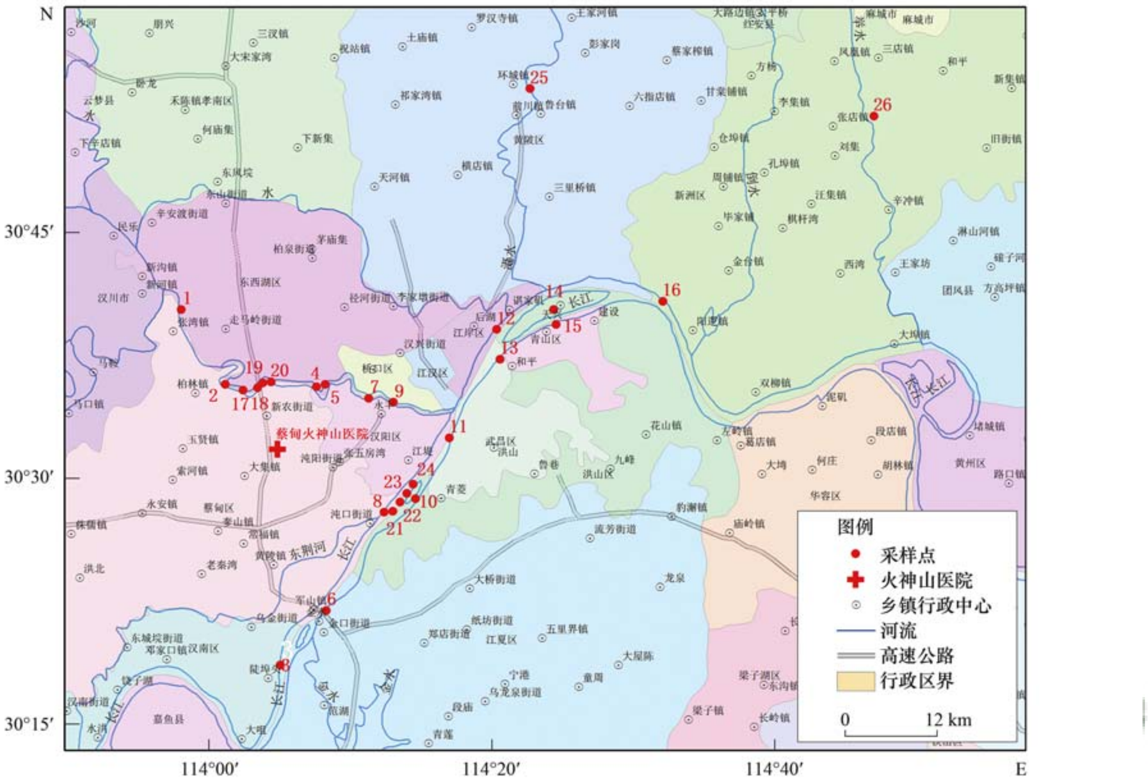

图 1　武汉典型饮用水源水体采样点示意

Fig. 1　Sampling sites of typical drinking water sources in Wuhan

后装入棕色玻璃瓶中，并在4℃下冷藏保存，24 h 内运送到实验室进行处理分析.

1.3　样品的预处理和分析

水样预处理：①HLB 小柱与固相萃取装置连接后，用 6 mL 二氯甲烷以及甲醇，依次对 HLB 小柱进行预先淋洗，期间 HLB 小柱不要流干，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 $mL \cdot min^{-1}$，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. 分析 POPs 时所用 GC-MS 仪器分析条件参考文献[16].

1.4　样品的质量控制

本研究采用了方法空白、回收率实验和精密度对 PAHs 和 OCPs 进行质量控制和保证. 在实验过程中，在每组 10 个样品中增加 1 个方法空白，相对标准偏差（RSD）< 20%（$n = 6$）. 水样中 PAHs 和 OCPs 的加标回收率分别为 77.00% ~ 101.00% 和 68.00% ~ 84.00%. PAHs 和 OCPs 的方法检测限范围分别为 0.09 ~ 1.08 $ng \cdot L^{-1}$ 和 0.07 ~ 0.16 $ng \cdot L^{-1}$. 对 PAHs 样品分别添加萘-d8、䓛-d12 和二萘嵌苯-d12 作为回收率指示物，结果显示 PAHs 的回收率范围分别为 78.30% ~ 105.60%、74.80% ~ 101.70% 和 70.60% ~ 109.75%，16 种 PAHs 的检出限为 0.12 ~ 0.96 $ng \cdot L^{-1}$，方法空白中有少量苊烯（0.12 $ng \cdot L^{-1}$）被检出. 最后的检测结果经回收率校正的空白扣除. 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%（$n = 6$），说明检测数据可靠. 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. 空白加标和基质加标回收率分别为 67.30% ~ 116.70% 和 71.90% ~ 118.20%，检出限为 0.10 ~ 4.30 $ng \cdot L^{-1}$，定量限为 1.80 ~ 5.70 $ng \cdot L^{-1}$.

1.5　健康风险评价

本研究采用美国环保署（EPA）推荐的健康风险评价模型[17]对武汉典型饮用水水源中检出的 POPs 进行健康风险评估，包括致癌风险和非致癌风险，具体公式如下：

致癌风险指数（R）：

$$R = CDI_{oral} \times SF_{oral} \tag{1}$$

$$CDI_{oral} = (CW \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT) \tag{2}$$

式中，R 为终生致癌风险指数；CDI_{oral}为人体每天饮水摄入量[mg·(kg·d)$^{-1}$]；SF_{oral}为物质的致癌斜率参数(kg·d·mg^{-1})，具体数值由相关研究及 EPA 综合风险信息系统(IRIS)确定；CW 为物质在水中检出浓度(mg·L^{-1})；IR 为日饮水量(L·d^{-1})，查阅文献[18，19]，成人为 1.85 L·d^{-1}，儿童为 1.00 L·d^{-1}；EF 为暴露频率 365 d·a^{-1}；ED 为暴露持续时间，参考中国统计数据，成年男性为 74 a，成年女性为 78 a，儿童推荐为 12 a；BW 为体重，成年男性为 67.7 kg，成年女性平均为 59.6 kg，儿童为 26.8 kg[20]；AT 代表暴露时间，计算可知，成年男性为 27 010 d、成年女性为28 470 d和儿童为4 380 d.

非致癌风险指数(HI)：

$$HI = CDI_{oral}/RfD \tag{3}$$

式中，RfD 为非致癌参考量(mg·kg^{-1}·d^{-1})，取值根据 EPA 综合风险信息系统确定.

当致癌风险指数小于 10^{-6}时，不会对人体造成致癌危害；致癌风险指数在 10^{-6} ~ 10^{-4}时，人体暴露可能具有潜在致癌风险，应该重视其健康问题；当致癌风险指数大于 10^{-4}时，将对人体造成致癌危害. 当非致癌风险指数小于 1 时，不会产生非致癌健康风险；当非致癌风险指数大于 1 时，将产生非致癌健康风险.

对于 PAHs，终生致癌风险模型已经广泛应用在 PAHs 对各类人群的健康风险评估[21]，由于优控的系列物质并没有完整的毒性参数，但其作用机制相似，为了确定各单体 PAHs 的毒性大小，本研究引入了毒性当量因子 TEF[22]，其标准设定 BaP 为 1，其他单体 PAHs 的 TEF 值通过与等量 BaP 毒性比较大小而得出，PAHs 致癌风险指数(R)公式如下：

$$R = \frac{TEQ_{BaP} \times IR \times CSF \times EF \times ED}{BW \times AT} \tag{4}$$

$$TEQ_{BaP} = \sum_{i=1}^{n} c_i \times TEF_i \tag{5}$$

式中，TEQ_{BaP} 为 PAHs 基于 BaP 的毒性当量(mg·L^{-1})；CSF 为致癌斜率因子，参考文献[23]，取值为 7.3 kg·d·mg^{-1}；c_i 为单体 PAHs 在水中检出浓度(mg·L^{-1})，其余指标均与公式(2)中相关评价参数一致.

2　结果与讨论

2.1　PAHs 检出结果

PAHs 检测结果如表 2 所示. 从检出率方面来看，除苯并[k]荧蒽检出率为 88.46%(在 4、5 和 22 号点位没有检出)外，其他 15 种物质检出率均为 100%. 检出浓度方面，ρ(萘)最大，达 37.89 ng·L^{-1}，范围为 16.58 ~ 66.21 ng·L^{-1}；其次是菲，平均检出浓度达 27.53 ng·L^{-1}；检出二氢苊最小，平均值为 1.17 ng·L^{-1}，范围为 0.47 ~ 2.13 ng·L^{-1}. 从空间分布方面来看，26 个水体采样点位中，22 号采样点累积 $\rho\left(\sum PAHs\right)$ 最大，为 475.79 ng·L^{-1}，其次是 26 号点位的 401.47 ng·L^{-1}，5 号点位 $\rho\left(\sum PAHs\right)$ 最小，为 57.04 ng·L^{-1}，26 个点位平均 $\rho\left(\sum PAHs\right)$ 为 173.86 ng·L^{-1}. 具体来看，其中 17 ~ 24 号点位于污水处理厂排口下游 500 ~ 4 000 m 范围内，平均 $\rho\left(\sum PAHs\right)$ 为232.93

表 2　武汉典型饮用水水源中 PAHs 检出情况1)

Table 2　Detection of PAHs in typical drinking water sources in Wuhan

PAHs 组分	最大值/ng·L^{-1}	最小值/ng·L^{-1}	平均值/ng·L^{-1}	检出率/%
萘(Nap)	66.21	16.58	37.89	100.00
苊稀(Acy)	2.73	0.54	1.29	100.00
二氢苊(Ace)	2.13	0.47	1.17	100.00
芴(Flu)	9.81	1.37	4.49	100.00
菲(Phe)	62.77	9.72	27.53	100.00
蒽(Ant)	3.31	0.67	1.61	100.00
荧蒽(Fla)	17.51	2.68	8.20	100.00
芘(Pyr)	9.75	1.48	4.55	100.00
苯并[a]蒽(BaA)	15.90	0.79	3.26	100.00
䓛(Chry)	25.33	1.09	5.45	100.00
苯并[b]荧蒽(BbF)	270.24	2.52	25.20	100.00
苯并[k]荧蒽(BkF)	23.22	ND	5.53	88.46
苯并[a]芘(BaP)	15.28	1.49	5.82	100.00
茚并[1,2,3-cd]芘(InP)	67.54	1.46	16.94	100.00
二苯并[a,h]蒽(DahA)	16.01	0.49	4.68	100.00
苯并[ghi]苝(二萘嵌苯)(BghiP)	91.95	1.88	20.24	100.00
$\sum$PAHs	475.79	57.04	173.86	100.00

1)ND 表示未检出

表 3 国内外各地区湖泊和河流水体中 PAHs 对比[1)]/ng·L^{-1}

Table 3 Comparison of PAHs in lake and river waters in different regions of China and abroad/ng·L^{-1}

湖泊河流	采样年份	PAHs 种类	范围	平均值	文献
武汉长江饮用水源地	2020	16	57.04 ~ 475.79	173.86	本研究
北江	2020	16	41.20 ~ 413.80	90.80	[23]
长江下游支流水体	2019	19	37.30 ~ 285.90	78.31	[24]
莫斯科河(俄罗斯)	2013	15	50.60 ~ 120.10	—	[25]
三峡水库	2008	16	13.80 ~ 97.20	30.11	[26]
晋江	2011	16	42.00 ~ 63.00	53.23	[27]
钱塘江	2005	15	70.30 ~ 1 844.40	283.30	[28]
考卡河(哥伦比亚)	2010 ~ 2011	12	52.10 ~ 12 888.20	2 344.50	[29]

1)“—”表示文献中无此数据

ng·L^{-1}；剩余 18 个点位平均 $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 为 147.61 ng·L^{-1}，空间上表现出污水处理厂尾水排口处的 PAHs 污染水平要高于其他饮用水水源地点位. 由表 3 可以看出，武汉典型饮用水源水体中检出 ρ(PAHs)与北江枯水期(41.20 ~ 413.80 ng·L^{-1})和长江下游支流水体(37.30 ~ 285.90 ng·L^{-1})持平、略高于俄罗斯的莫斯科河(50.60 ~ 120.10 ng·L^{-1})、三峡水库(13.80 ~ 97.20ng·L^{-1})和晋江(42.00 ~ 63.00 ng·L^{-1})，明显低于钱塘江(70.30 ~ 1 844.40 ng·L^{-1})和考卡河(52.10 ~ 12 888.20 ng·L^{-1})，总体上武汉典型饮用水水源 PAHs 污染程度较低，但随着长江航运的快速发展，大量船只的尾气排放及燃油泄漏均会加重长江与汉江流域的 PAHs 污染状况，为保障饮用水安全，需要持续关注水源地水质状况.

将武汉典型饮用水水源中检出的 16 种 PAHs 按其含有的苯环数量分为低分子 PAHs(2 ~ 3 环)、中分子 PAHs(4 环)和高分子 PAHs(5 ~ 6 环)[30]，具体各环组成比例见图 2. 武汉典型饮用水水源中 PAHs 主要以 3、4 和 5 环为主，其中 3 环占 PAHs 比例为 31% ~ 33%，4 环占 PAHs 比例为 25% ~ 27%、5 环占 PAHs 比例为 20% ~ 25%，各采样点在环数组成上基本一致. 总体来看，武汉典型饮用水源水体中 PAHs 主要以中低环为主，这是因为低环数 PAHs 亲水性更强，环数越低越容易向水体中聚集[31].

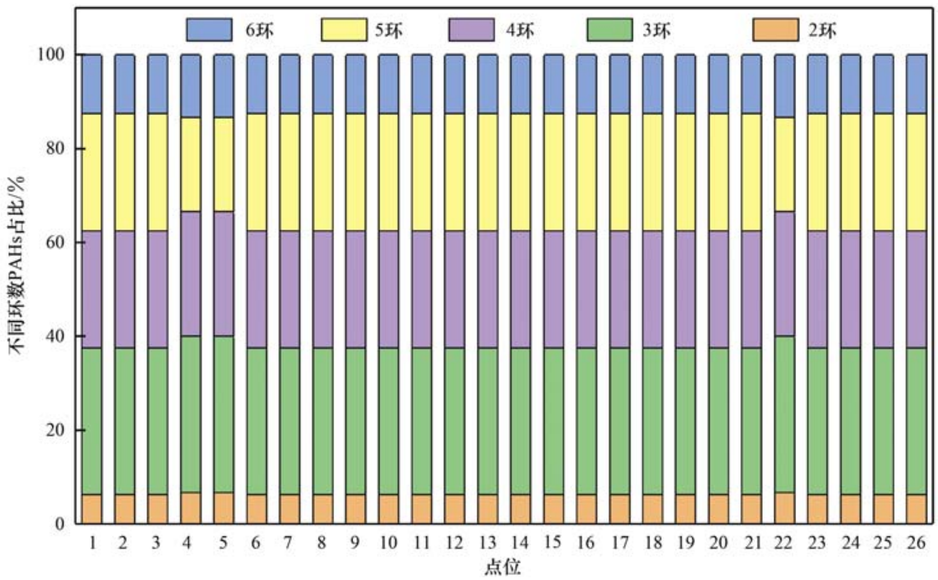

图 2 武汉典型饮用水水源中不同环数 PAHs 组成

Fig. 2 Composition of PAHs with different ring numbers in typical drinking water sources in Wuhan

不同来源的 PAHs 在单体组成上具有一定的差异，为了更好地研究武汉典型饮用水水源中 PAHs 的来源，本研究采用分子比值特征法[32]对几种同分异构单体的浓度比值进行了分析，包括 Ant/(Ant + Phe)、BaA/(BaA + Chry)、Fla/(Fla + Pyr)和 InP/(InP + BghiP). 不同来源 PAHs 的源解析比值组成见表 4.

由图 3 可知，武汉典型饮用水水源中 PAHs 的来源主要是石油源和石油燃烧源，部分点位存在煤及生物质燃烧源. 通过分子比值特征法计算可得，

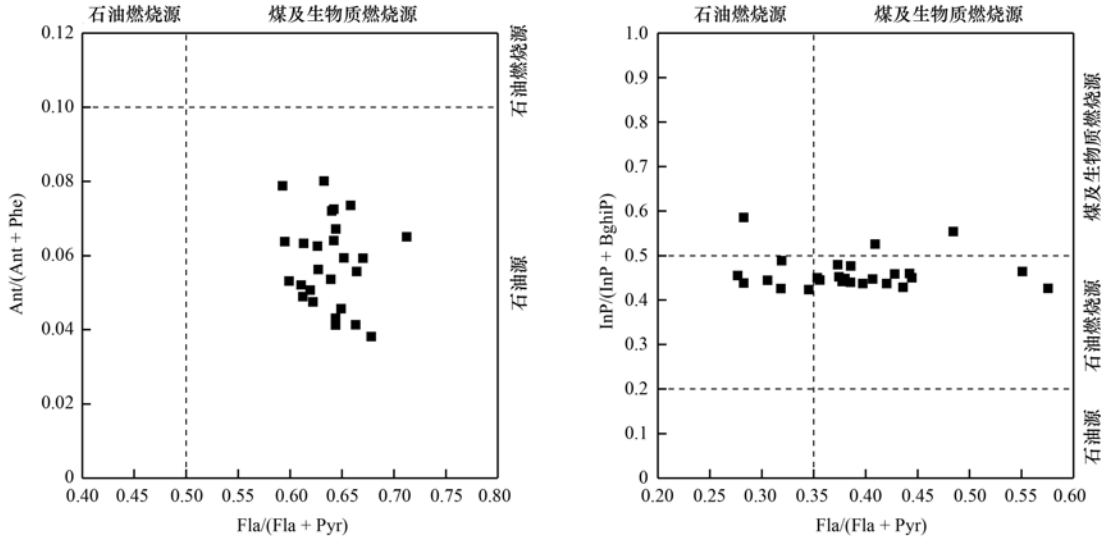

图 3　武汉典型饮用水水源中 PAHs 来源分析

Fig. 3　Source analysis of PAHs in typical drinking water sources in Wuhan

表 4　PAHs 的源解析比值

Table 4　Source resolution discrimination of PAHs

项目	石油源	石油燃烧源	煤及生物质燃烧源
Ant/(Ant + Phe)	<0.10	>0.10	
BaA/(BaA + Chry)	<0.20	0.20 ~ 0.35	>0.35
Fla/(Fla + Pyr)	<0.40	0.40 ~ 0.50	>0.50
InP/(InP + BghiP)	<0.20	0.20 ~ 0.50	>0.50

26 个点位均有石油源,部分点位还有石油燃烧源或煤及生物质燃烧源. 由此可知,武汉典型饮用水水源中 PAHs 的来源受到了石油源、石油燃烧源和煤及生物质燃烧源共同的影响,作为长江航道的重点城市,船舶航运石油燃烧及泄漏和机动车尾气排放都会对水源地水质产生影响.

2.2　OCPs 检出结果

武汉典型饮用水水源中 OCPs 检出情况如表 5 所示. 从检出物质种类来看,在 29 种 OCPs 中,共有五氯苯、六氯苯、γ-氯丹、α-氯丹、2,4′-DDE、4,4′-DDE、顺式九氯和反式九氯这 8 种 OCPs 被检出. 从检出率方面来看,六氯苯检出率最高,达到了 88.46%;其次是五氯苯,检出率为 50%;2,4′-DDE 和 4,4′-DDE 这 2 种物质检出率最低,仅为 3.85%,均只在 9 号采样点检出. 从检出物质浓度来看,ρ(六氯苯)最高,检出范围为 ND ~ 0.69 $ng\cdot L^{-1}$,平均值为 0.24 $ng\cdot L^{-1}$,ρ(4,4′-DDE)最低,平均值仅为 0.02 $ng\cdot L^{-1}$.

各采样点位 8 种 OCPs 的累积浓度如图 4 所示. 9 号点位的 $\left(\sum OCPs\right)$ 最大,为 3.32 $ng\cdot L^{-1}$;其次是 21 号和 1 号点位,$\left(\sum OCPs\right)$ 分别为 2.61 $ng\cdot L^{-1}$ 和 2.53 $ng\cdot L^{-1}$;17 和 20 号点位的 OCPs 均

表 5　武汉典型饮用水水源中 OCPs 检出情况[1)]

Table 5　Detection of OCPs in typical drinking water sources in Wuhan

OCPs	最大值 /$ng\cdot L^{-1}$	最小值 /$ng\cdot L^{-1}$	平均值 /$ng\cdot L^{-1}$	检出率/%
五氯苯	0.49	ND	0.14	50.00
六氯苯	0.69	ND	0.24	88.46
γ-氯丹	0.48	ND	0.08	30.77
α-氯丹	0.58	ND	0.09	34.62
2,4′-DDE	0.67	ND	0.03	3.85
4,4′-DDE	0.60	ND	0.02	3.85
顺式九氯	0.58	ND	0.10	26.92
反式九氯	0.48	ND	0.07	15.38

1) ND 表示未检出

未检出. 26 个点位检出的 $\left(\sum OCPs\right)$ 范围为 ND ~ 3.32 $ng\cdot L^{-1}$,平均值为 0.75 $ng\cdot L^{-1}$. 由表 6 可以看出,武汉典型饮用水水源中 OCPs 的检出浓度与白洋淀表层水体中(0.69 ~ 4.50 $ng\cdot L^{-1}$)、钱塘江杭州段干流(1.32 ~ 6.68 $ng\cdot L^{-1}$)和千岛湖库区(1.90 ~ 7.60 $ng\cdot L^{-1}$)相当,略低于固城湖水体(26.74 ~ 46.12 $ng\cdot L^{-1}$). 由此可知,武汉典型饮用水水源 OCPs 的污染程度相对较轻. 检出物质为六氯苯、五氯苯、九氯、氯丹和 DDE 类,其中六氯苯在我国已有 50 多年的生产历史,是我国 POPs 污染场地的主要污染源之一,六氯苯的主要来源可以分成历史残留污染源和新引入的污染源两类. 虽然六氯苯在我国已经被禁止作为农药直接使用,但由于六氯苯的持久性,使其可以在水体、土壤和沉积物等环境介质中存留数年甚至数十年或更长的时间,另外杀虫剂、杀菌剂、合成橡胶助剂、木材防腐剂和有机合成化工原料的生产等成为六氯苯新的污染来源. 氯丹是一种广谱有机氯杀虫剂,广泛用于控

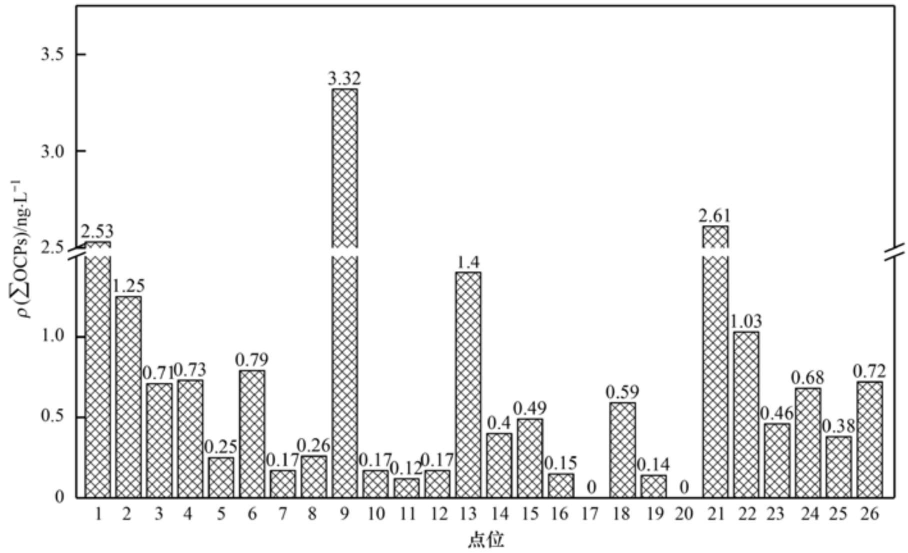

图 4 武汉典型饮用水水源中 $\rho\left(\sum OCPs\right)$

Fig. 4 Distribution of $\rho\left(\sum OCPs\right)$ in typical drinking water sources in Wuhan

表 6 国内各地区湖泊和河流水体中 OCPs 对比1) / $ng \cdot L^{-1}$

Table 6 Comparison of OCPs in lake and river waters in different regions of China/$ng \cdot L^{-1}$

湖泊河流	采样年份	OCPs 种类	范围	平均值	主要检出单体	文献
武汉长江饮用水源地	2020	8	ND ~ 3.32	0.75	六氯苯	本研究
白洋淀	2015	6	0.69 ~ 4.50	1.77	HCHs	[33]
钱塘江杭州段干流	2013	5	1.32 ~ 6.68	—	α-HCH	[34]
千岛湖库区	2011	8	1.90 ~ 7.60	—	p,p'-DDE	[35]
固城湖	2015	19	26.74 ~ 46.12	33.43	HCHs	[36]

1)"—"表示文献中无此数据; ND 表示未检出

制农作物和森林的病虫害,也用于家庭和工业等的白蚁防治.工业合成的 DDT 杀虫剂进入到自然环境中以后,在好氧条件下, DDT 代谢成为 DDE[16],由此表明检出的 DDE 可能来源于 DDT 在长期环境中的降解.

2.3 PCBs 检出结果

武汉典型饮用水水源 PCBs 检出结果如表 7 所示.除 TetraCBs-44、TetraCBs-52、NonaCBs-206 和 DecaCB-209 未被检出外,共有 24 种物质被检出.检出率方面,PentaCBs-105 检出率最高,达到65.38%;其次是 PentaCBs-114 和 PentaCBs-118,分别为 61.54% 和 50.00%;检出率最低的物质为 DiCBs-8、TriCBs-18、TetraCBs-77、TetraCBs-81、PentaCBs-101 和 OctaCBs-195,均只在 1 个点位被检出.检出浓度方面,检出 HeptaCBs-180 浓度最大,范围为 ND ~ 11.79 $ng \cdot L^{-1}$,平均浓度为 1.24 $ng \cdot L^{-1}$; 其次是 HeptaCBs-189,检出范围为 ND ~ 8.70 $ng \cdot L^{-1}$,平均浓度为 0.39 $ng \cdot L^{-1}$; TriCBs-18 浓度最小,平均浓度为 0.01 $ng \cdot L^{-1}$.

各点位 PCBs 组分的累积浓度如图 5 所示.检出最高的组分为 HeptaCBs-180,达 11.79 $ng \cdot L^{-1}$,在 4 号点位出现,远高于我国的滴水湖(0.16 ~ 0.45 $ng \cdot L^{-1}$)[37],略高于南山老龙洞岩溶地下水(1.6 ~ 5.4)[38]检出浓度.其余 PCBs 组分的浓度较低,由表 8 所示,武汉典型饮用水源检出 PCBs 与上海市地表水中(ND ~ 34.84 $ng \cdot L^{-1}$)、北京市地表水中(2.99 ~ 32.7 $ng \cdot L^{-1}$)和太湖上游(4.24 ~ 14.46 $ng \cdot L^{-1}$)污染程度相当,略高于意大利台伯河(0.19 ~ 6.82 $ng \cdot L^{-1}$),远低于埃及尼罗河三角洲水体(14 400.00 ~ 20 200.00 $ng \cdot L^{-1}$).根据我国《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002),允许在水中的 $\rho\left(\sum PCBs\right)$ 限值为 20 $ng \cdot L^{-1}$,而 EPA 规定的水中允许 $\rho\left(\sum PCBs\right)$ 限值为 14 $ng \cdot L^{-1}$, 4 号和 9 号点位 PCBs 显著超标,其余点位 PCBs 均满足我国地表水环境质量标准的限值.4 号和 9 号点位位于汉江下游,这 2 个点位可能受到了城市点源的污染.但是本研究只进行了单次采样检测,不能反映 PCBs 的全年丰度水平,后续还将开展跟踪监测,充分了解 PCBs 污染状况.水体中 PCBs 的

表 7　武汉典型饮用水水源 PCBs 检出情况1)

Table 7　Detection of PCBs in typical drinking water sources in Wuhan

PCBs 同系物	PCBs 物质	最大值/ng·L⁻¹	最小值/ng·L⁻¹	平均值/ng·L⁻¹	检出率/%
Di-CBs 系列	DiCBs-8	0.57	ND	0.02	3.85
Tri-CBs 系列	TriCBs-18	0.25	ND	0.01	3.85
	TriCBs-28	1.34	ND	0.07	7.69
Tetra-CBs 系列	TetraCBs-66	2.04	ND	0.22	23.08
	TetraCBs-77	4.72	ND	0.18	3.85
	TetraCBs-81	3.13	ND	0.12	3.85
Penta-CBs 系列	PentaCBs-101	2.76	ND	0.11	3.85
	PentaCBs-105	3.86	ND	0.87	65.38
	PentaCBs-114	4.22	ND	0.74	61.54
	PentaCBs-118	3.99	ND	0.58	50.00
	PentaCBs-123	4.43	ND	0.43	26.92
	PentaCBs-126	3.85	ND	0.49	30.77
	PentaCBs-128	4.60	ND	0.30	11.54
Hexa-CBs 系列	HexaCBs-138	4.20	ND	0.65	30.77
	HexaCBs-153	4.78	ND	0.22	7.69
	HexaCBs-156	3.83	ND	0.81	46.15
	HexaCBs-157	2.78	ND	0.54	30.77
	HexaCBs-167	4.16	ND	0.51	26.92
	HexaCBs-169	4.10	ND	0.67	30.77
Hepta-CBs 系列	HeptaCBs-170	3.40	ND	0.20	7.69
	HeptaCBs-180	11.79	ND	1.24	30.77
	HeptaCBs-187	2.73	ND	0.21	11.54
	HeptaCBs-189	8.70	ND	0.39	26.92
Octa-CBs 系列	OctaCBs-195	7.98	ND	0.31	3.85

1) ND 表示未检出

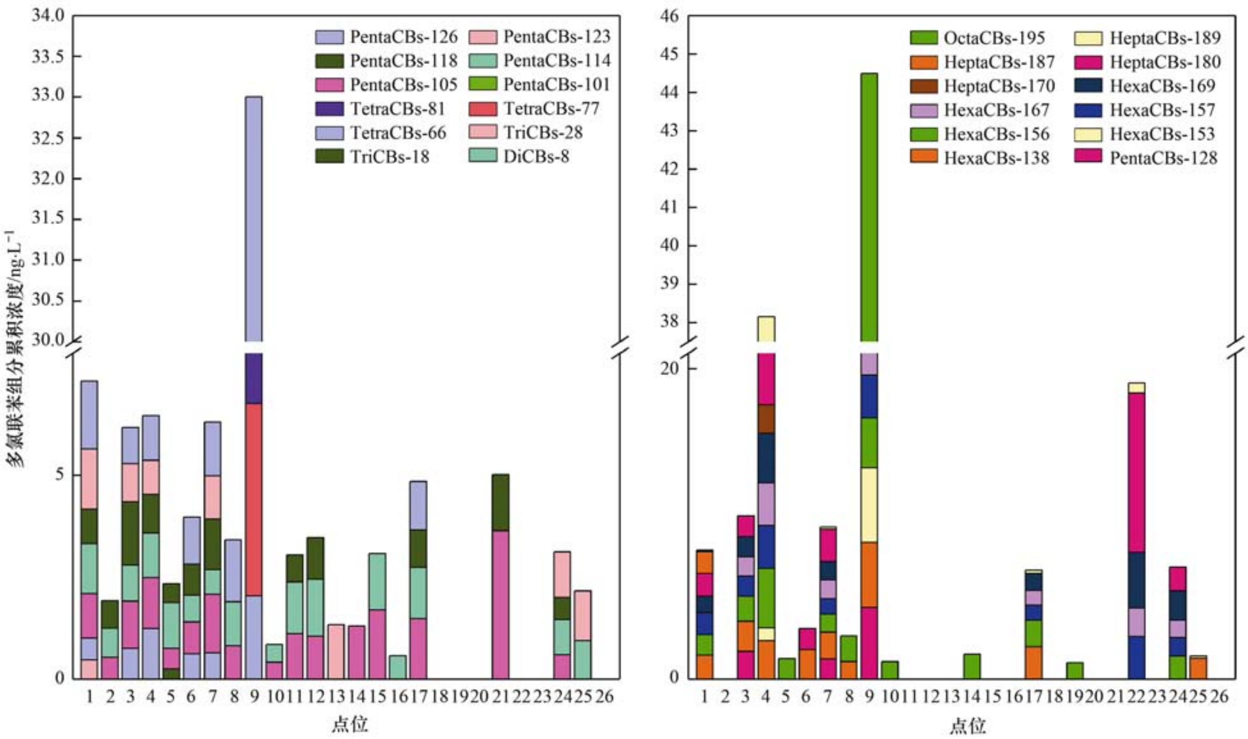

图 5　武汉典型饮用水水源中 PCBs 累积浓度

Fig. 5　Cumulative concentrations of PCBs in typical drinking water sources in Wuhan

赋存特征通常与它们的分子结构和迁移转化有关. 由表 7 可知,武汉典型饮用水水源中 PCBs 同系物的累积浓度排序为:七氯联苯 > 五氯联苯 > 六氯联苯 > 四氯联苯. 由此可知,难降解的高氯联苯同系物在水体中浓度相对更高,这些物质更容易在水体中残留,这与程加德等[40]的研究结果相一致.

表 8 国内外各地区湖泊和河流水体中 PCBs 对比[1)] /ng·L^{-1}

Table 8 Comparison of PCBs in lake and river waters in different regions of China and abroad/ng·L^{-1}

湖泊河流	采样年份	PCBs 种类	范围	平均值	文献
武汉长江饮用水源地	2020	24	ND ~ 77.49	9.88	本研究
上海地表水	2013	14	ND ~ 34.84	4.42	[37]
北京地表水	2015 ~ 2016	8	2.99 ~ 32.70	(10.90 ± 10.40)	[39]
太湖上游	2019	18	4.24 ~ 14.46	7.28	[40]
台伯河(意大利)	2014 ~ 2015	32	0.19 ~ 6.82	2.03	[41]
尼罗河三角洲(埃及)	2013	10	14 400.00 ~ 20 200.00	—	[42]

1)"—"表示文献中无此数据,下同; ND 表示未检出

3 健康风险评估

为了评估人体暴露在低剂量 POPs 下的健康风险,本研究对所检出的 POPs 物质均纳入风险评价范围,在评价时只考虑了通过饮水途径所造成的健康风险. PAHs 各物质的毒性当量因子和致癌斜率因子参考文献[22,23],OCPs 和 PCBs 各物质的致癌斜率因子与非致癌参考剂量见表 9.

表 9 OCPs 和 PCBs 物质致癌斜率因子与非致癌参考剂量参数

Table 9 Carcinogenic slope factor and non-carcinogenic reference dose parameters of OCPs and PCBs

化合物	物质	RfD /mg·kg^{-1}·d^{-1}	SF_{oral} /kg·d·mg^{-1}	文献
OCPs	五氯苯	—	—	
	六氯苯	8×10^{-4}	1.60	[43]
	γ-氯丹	5×10^{-4}	0.35	[44]
	α-氯丹	5×10^{-4}	0.35	[44]
	2,4′-DDE	—	0.34	[44]
	4,4′-DDE	—	0.34	[44]
	顺式九氯	—	—	
	反式九氯	—	—	
PCBs		2×10^{-5}	2.0	[45,46]

3.1 PAHs 健康风险评估

对武汉典型饮用水水源 26 个水样中 PAHs 进行健康风险评估,结果如图 6 所示. 采样点对不同人群的致癌风险指数范围分别为 1.17×10^{-6} ~ 2.22×10^{-5}、1.33×10^{-6} ~ 2.52×10^{-5} 和 1.60×10^{-6} ~ 3.03×10^{-5}. 武汉典型水源地 26 个水样的致癌健康风险指数均处于 10^{-6} ~ 10^{-4} 范围,对人体可能产生潜在的致癌风险,特别是对儿童的健康风险相对更大,这与刘佳等[47]和 Shi 等[48]的研究结果相一致.

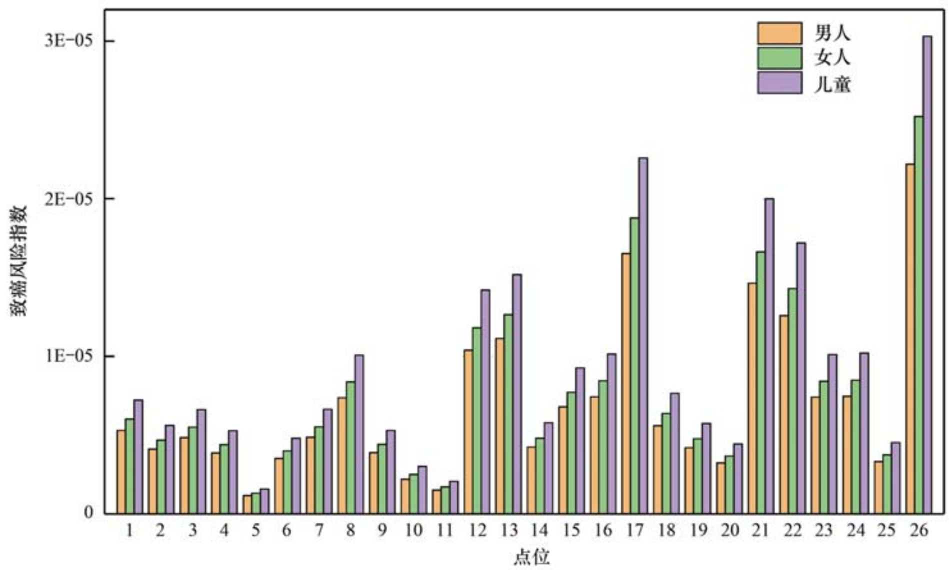

图 6 武汉典型饮用水水源中 PAHs 致癌风险指数

Fig. 6 Carcinogenic risk index of PAHs in typical drinking water sources in Wuhan

3.2 OCPs 健康风险评估

对武汉典型饮用水水源中 OCPs 进行健康风险评估,结果如图 7 所示. 研究区域不同人群 OCPs 暴露致癌风险指数范围分别为 0 ~ 2.72×10^{-7}、0 ~ 3.09×10^{-7} 和 0 ~ 3.71×10^{-7},非致癌风险指数范围分别为 0 ~ 4.67×10^{-4}、0 ~ 5.31×10^{-4} 和 0 ~ 6.38×10^{-4}. 由此可知,研究区域致癌风险指数均低于 10^{-6},表明不会对人体产生致癌风险; 儿童和成人的非致癌风险指数均远小于 1,表明水体中的 OCPs 不会对人体产生非致癌风险.

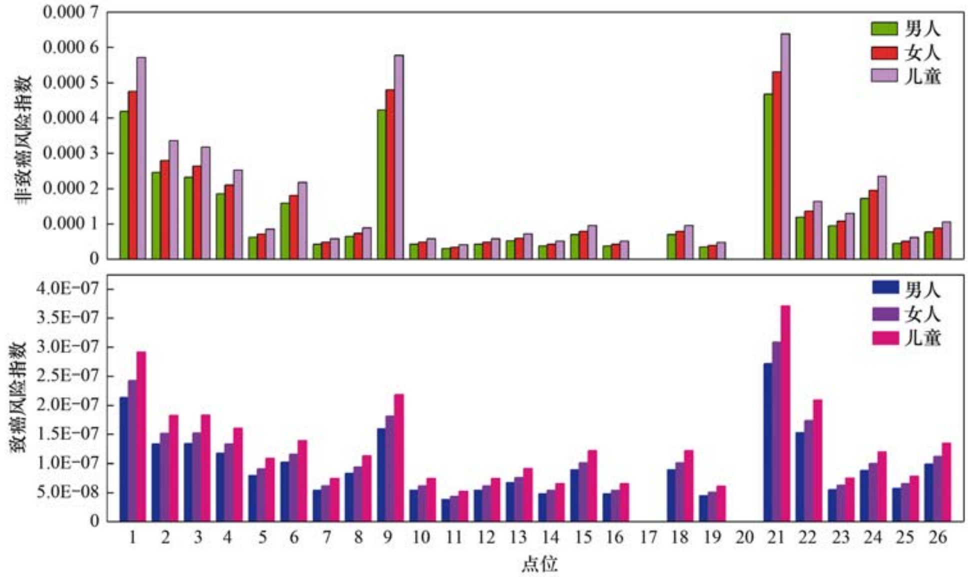

图 7　武汉典型饮用水源水体中 OCPs 致癌和非致癌风险指数

Fig. 7　Carcinogenic and non-carcinogenic risk indexes of OCPs in typical drinking water sources in Wuhan

3.3　PCBs 健康风险评估

对武汉典型饮用水水源中 PCBs 进行健康风险评估，结果如图 8 所示. 成年男性、成年女性和儿童这 3 种不同人群 PCBs 暴露致癌风险指数范围分别为 $0 \sim 4.83 \times 10^{-5}$、$0 \sim 5.51 \times 10^{-5}$ 和 $0 \sim 6.12 \times 10^{-5}$，非致癌风险指数范围分别为 0 ~ 0.11、0 ~ 0.12 和 0 ~ 0.14. 致癌风险指数在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$，对人体可能产生潜在的健康危害；非致癌风险指数均小于 1，不会对人体产生非致癌风险. 因此，建议重视武汉典型饮用水水源中 PCBs 的污染，特别是 HeptaCBs-180 和 HeptaCBs-189 物质，以保障饮用水安全.

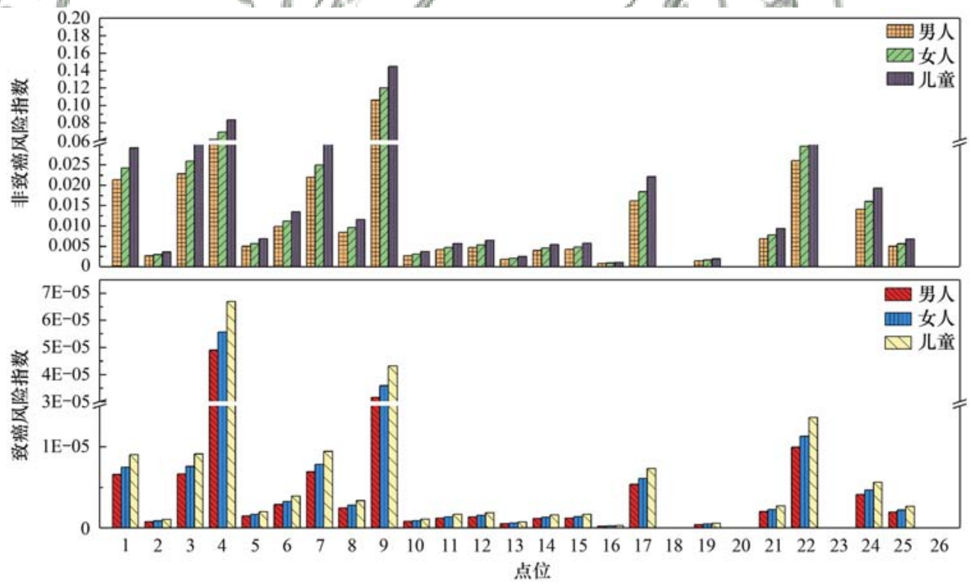

图 8　武汉典型饮用水水源中 PCBs 致癌和非致癌风险指数

Fig. 8　Carcinogenic and non-carcinogenic risk indexes of PCBs in typical drinking water sources in Wuhan

4　结论

（1）武汉典型饮用水水源地 26 个采样点均有 PAHs 检出，萘检出浓度最大，二氢苊检出浓度最小，PAHs 主要以中低环芳烃为主，来源于以石油源为主的混合源. 武汉典型饮用水水源 PAHs 污染程度总体较低，污水处理厂尾水排口处的 PAHs 污染水平相对较高.

（2）武汉典型饮用水水源地共有 8 种 OCPs 被检出，OCPs 浓度水平相对较低. 共有 24 种 PCBs 被检出，PCBs 主要以不易降解的高氯联苯为主，部分点位 PCBs 浓度超过我国地表水环境质量标准限值，HeptaCBs-180 浓度相对较高，需持续关注和跟踪监测.

（3）健康风险评估结果显示，武汉典型饮用水水源 PAHs 和 PCBs 的致癌风险指数均处于 10^{-6} ~

10^{-4}范围,对人体可能产生潜在的致癌风险;OCPs和PCBs的非致癌风险指数均小于1,不会对人体产生非致癌风险.

参考文献:

[1] 员晓燕, 杨玉义, 李庆孝, 等. 中国淡水环境中典型持久性有机污染物(POPs)的污染现状与分布特征[J]. 环境化学, 2013, **32**(11): 2072-2081.
Yuan X Y, Yang Y Y, Li Q X, *et al*. Present situation and distribution characteristics of persistent organic pollutants in freshwater in China[J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(11): 2072-2081.

[2] 韩雪欣, 林娜娜, 刘莎, 等. 羟基氧化铁对太湖底泥中多氯联苯微生物厌氧脱氯的影响[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(6): 1359-1369.
Han X X, Lin N N, Liu S, *et al*. Effects of ferric oxyhydroxide on anaerobic microbial dechlorination of polychlorinated biphenyls in Taihu Lake sediments[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(6): 1359-1369.

[3] 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.

[4] 万宏滨, 周娟, 罗端, 等. 长江中游湖泊表层沉积物多环芳烃的分布、来源特征及其生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(6): 1632-1645.
Wan H B, Zhou J, Luo D, *et al*. Distribution, source characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of lakes along the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(6): 1632-1645.

[5] 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 等. 太湖水体多环芳烃生态风险的空间分布[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(6): 1032-1039.
Guo G H, Wu F C, He H P, *et al*. Spatial distribution of ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surfacewaters of Lake Taihu[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(6): 1032-1039.

[6] 王元, 刘桂建, 刘荣琼. 巢湖湖区及入湖河流表层水体、沉积物中有机氯农药分布及风险评价[J]. 环境化学, 2019, **38**(3): 669-678.
Wang Y, Liu G J, Liu R Q. Distribution and ecological risk assessment of organochlorine pesticides in surface water and sediment samples of Lake Chaohu and its inflow rivers[J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(3): 669-678.

[7] 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.

[8] 林莉, 董磊, 李青云, 等. 三峡库区水体和底泥中多环芳烃和邻苯二甲酸酯类分布和来源[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 660-667.
Lin L, Dong L, Li Q Y, *et al*. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in water and surface sediment from the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(3): 660-667.

[9] Breivik K, Gioia R, Chakraborty P, *et al*. Are reductions in industrial organic contaminants emissions in rich countries achieved partly by export of toxic wastes[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(21): 9154-9160.

[10] Petro E M L, Covaci A, Leroy J L M R, *et al*. Occurrence of endocrine disrupting compounds in tissues and body fluids of Belgian dairy cows and its implications for the use of the cow as a model to study endocrine disruption[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(22): 5423-5428.

[11] Secretariat of the Stockholm Convention. Stockholm convention[EB/OL]. http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/tabid/673/Default.aspx, 2021-01-03.

[12] Yang Z, Wang H, Saito Y, *et al*. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam[J]. Water Resources Research, 2006, **42**(4), doi: 10.1029/2005WR003970.

[13] Chen J, Wu X D, Finlayson B L, *et al*. Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: annual precipitation and runoff[J]. Journal of Hydrology, 2014, **513**: 403-412.

[14] Wang Z Y, Chen Q W, Zhang J Y, *et al*. Characterization and source identification of tetracycline antibiotics in the drinking water sources of the lower Yangtze River[J]. Journal of Environmental Management, 2019, **244**: 13-22.

[15] Wang Z M, Shao D G, Westerhoff P. Wastewater discharge impact on drinking water sources along the Yangtze River (China)[J]. Science of the Total Environment, 2017, **599-600**: 1399-1407.

[16] 暴志蕾, 赵兴茹, 耿梦娇, 等. 长三角地区饮用水源地沉积物中有机氯农药污染特征[J]. 环境化学, 2016, **35**(6): 1237-1245.
Bao Z L, Zhao X R, Geng M J, *et al*. Characteristics of organochlorine pesticides in the sediments from the drinking water source of the Yangtze River delta region[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(6): 1237-1245.

[17] US EPA. IRIS (Integrated Risk Information System)[EB/OL]. http://www.epa.gov/iris, 2021-04-02.

[18] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷): 概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.

[19] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 6~17岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.

[20] 中国统计年鉴. 中国国家统计局按地区划分的人口预期寿命[EB/OL]. http://www.Stats.Gov.cn/tjsj/ndsj/yb2004-c/indexch.htm, 2021-04-10.

[21] Keshavarzi B, Abbasi S, Moore F, *et al*. Contamination level, source identification and risk assessment of potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of an important commercial center in Iran[J]. Environmental Management, 2018, **62**(4): 803-818.

[22] Nisbet I C T, Lagoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992, **16**(3): 290-300.

[23] 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 sedment of Beijiang River[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, **50**(1): 57-67.

[24] 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.

[25] 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.

[26] Wang J X, Bi Y H, Pfister G, *et al*. Determination of PAH, PCB, and OCP in water from the Three Gorges Reservoir accumulated by semipermeable membrane devices (SPMD)[J]. Chemosphere, 2009, **75**(8): 1119-1127.

[27] Yang D, Qi S H, Zhang Y, *et al*. Levels, sources and potential risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in multimedia environment along the Jinjiang River mainstream to Quanzhou Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **76**(1-2): 298-306.

[28] Chen Y Y, Zhu L Z, Zhou R B. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface water and sediment from Qiantang River, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **141**(1): 148-155.

[29] Sarria-Villa R, Ocampo-Duque W, Páez M, *et al*. Presence of PAHs in water and sediments of the Colombian Cauca River during heavy rain episodes, and implications for risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2016, **540**: 455-465.

[30] Amoako J, Ansa-Asare O D, Karikari A Y, *et al*. Levels of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the densu river basin of Ghana[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **174**(1-4): 471-480.

[31] 孙恬, 叶斌, 王延华, 等. 中国湖泊 PAHs 污染现状及其源解析研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(6): 151-160.
Sun T, Ye B, Wang Y H, *et al*. Pollution of PAHs in China's lakes and its source apportionment: a review[J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(6): 151-160.

[32] Chen C F, Chen C W, Dong C D, *et al*. Assessment of toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2013, **463-464**: 1174-1181.

[33] 王乙震, 张俊, 周绪申, 等. 白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 964-978.
Wang Y Z, Zhang J, Zhou X S, *et al*. Seasonal pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in surface water of Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 964-978.

[34] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 钱塘江(杭州段)水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3595-3603.
Tang F L, Zhang M, Xu J F, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in Qiantang River, Hangzhou Section [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3595-3603.

[35] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1735-1741.
Tang F L, Zhang M, Xu J F, *et al*. Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in the water of Lake Qiandao and its major input rivers [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1735-1741.

[36] 阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 等. 固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1346-1356.
Kan K C, Gu X H, Li H M, *et al*. Distribution and risk assessment of OCPs in surface water, sediments, and fish from Lake Gucheng and inflow and outflow rivers[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1346-1356.

[37] 王薛平, 黄星, 毕春娟, 等. 滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2121-2130.
Wang X P, Huang X, Bi C J, *et al*. Spatial distribution characteristics and risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments and soils from the Dishui Lake and its river system[J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2121-2130.

[38] 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价[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.

[39] 邵阳, 杨国胜, 刘韦华, 等. 北京地区地表水中 OCPs 和 PCBs 的污染分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2606-2613.
Shao Y, Yang G S, Liu W H, *et al*. The study of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in surface water around Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2606-2613.

[40] 程加德, 任晓鸣, 邱阳, 等. 太湖上游多氯联苯的分布、来源及风险评价[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.

[41] 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.

[42] 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.

[43] Wu C F, Luo Y M, Gui T, *et al*. Concentrations and potential health hazards of organochlorine pesticides in shallow groundwater of Taihu Lake region, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, **470-471**: 1047-1055.

[44] 冯焕银, 傅晓钦, 张倩, 等. 宁波市郊农业土壤中持久性毒害污染物的残留现状及健康风险评估[A]. 见: 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷)[C]. 昆明: 中国环境科学学会, 2013.

[45] US EPA, Office of Solid Waste Emergency Response, Waste and Cleanup Risk Assessment. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Interim[S]. 2009.

[46] 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.

[47] 刘佳, 丁洋, 祁士华, 等. 韩江流域土壤中有机氯农药的特征分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5127-5134.
Liu J, Ding Y, Qi S H, *et al*. Characteristics of organochlorine pesticides (OCPs) in soil samples of Hanjiang River basin, Southeast China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5127-5134.

[48] Shi W, Zhang F X, Zhang X W, *et al*. Identification of trace organic pollutants in freshwater sources in Eastern China and estimation of their associated human health risks [J]. Ecotoxicology, 2011, **20**(5): 1099-1106.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 12

Dec. 15, 2021

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios ········· LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, *et al.* (5563)

Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy ········· WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, *et al.* (5574)

Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City ········· GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, *et al.* (5585)

Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak ········· CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, *et al.* (5594)

Estimation of $PM_{2.5}$ Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest ········· WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, *et al.* (5602)

Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan ········· LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, *et al.* (5616)

Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang ········· SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, *et al.* (5624)

Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing ········· CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, *et al.* (5633)

Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer ········· WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, *et al.* (5644)

Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang ········· DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, *et al.* (5656)

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones ········· GE Xiang, WU Jian, GAO Song, *et al.* (5663)

Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter ········· ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, *et al.* (5673)

Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone ········· REN He, LU Xuan, LIU Yang, *et al.* (5687)

VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China ········· GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, *et al.* (5698)

WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies ········· WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, *et al.* (5713)

Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province ········· ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, *et al.* (5723)

Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020 ········· QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, *et al.* (5736)

Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement ········· HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, *et al.* (5747)

Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity ········· ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)

Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin ········· DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)

Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015 ········· YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)

Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River ········· HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, *et al.* (5786)

Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}N$ and $\delta^{18}O$ Values ········· XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, *et al.* (5796)

Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir ········· ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, *et al.* (5804)

Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake ········· LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, *et al.* (5814)

Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River ········· WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, *et al.* (5826)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan ········· ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, *et al.* (5836)

Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquiculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China ········· XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, *et al.* (5848)

Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland ········· LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, *et al.* (5857)

Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands ········· ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)

Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil ········· MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, *et al.* (5876)

Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers ········· WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, *et al.* (5884)

Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem ········· NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, *et al.* (5896)

Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants ········· ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, *et al.* (5905)

Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis ········· CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, *et al.* (5912)

Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge ········· GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, *et al.* (5921)

Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites ········· LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, *et al.* (5930)

Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China ········· WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, *et al.* (5938)

Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main *Torreya grandis* Plantation Region in Zhejiang Province ········· WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, *et al.* (5949)

Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China ········· GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, *et al.* (5958)

Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area ········· QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, *et al.* (5967)

Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District ········· ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, *et al.* (5977)

Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren ········· ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, *et al.* (5988)

Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar ········· HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, *et al.* (5997)

Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by *Tagetes patula* L. ········· WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, *et al.* (6006)

Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China ········· WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, *et al.* (6014)

Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH_4 and N_2O Emission in Single Cropping Paddy Field ········· WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, *et al.* (6025)

Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N_2O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid ········· WANG Kai, SHI Lei, MA Long, *et al.* (6038)

Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil ········· KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, *et al.* (6047)

Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland ········· YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, *et al.* (6058)

Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils ········· XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, *et al.* (6067)

Effects of *Enteromorpha prolifera* Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower ········· WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, *et al.* (6078)