

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

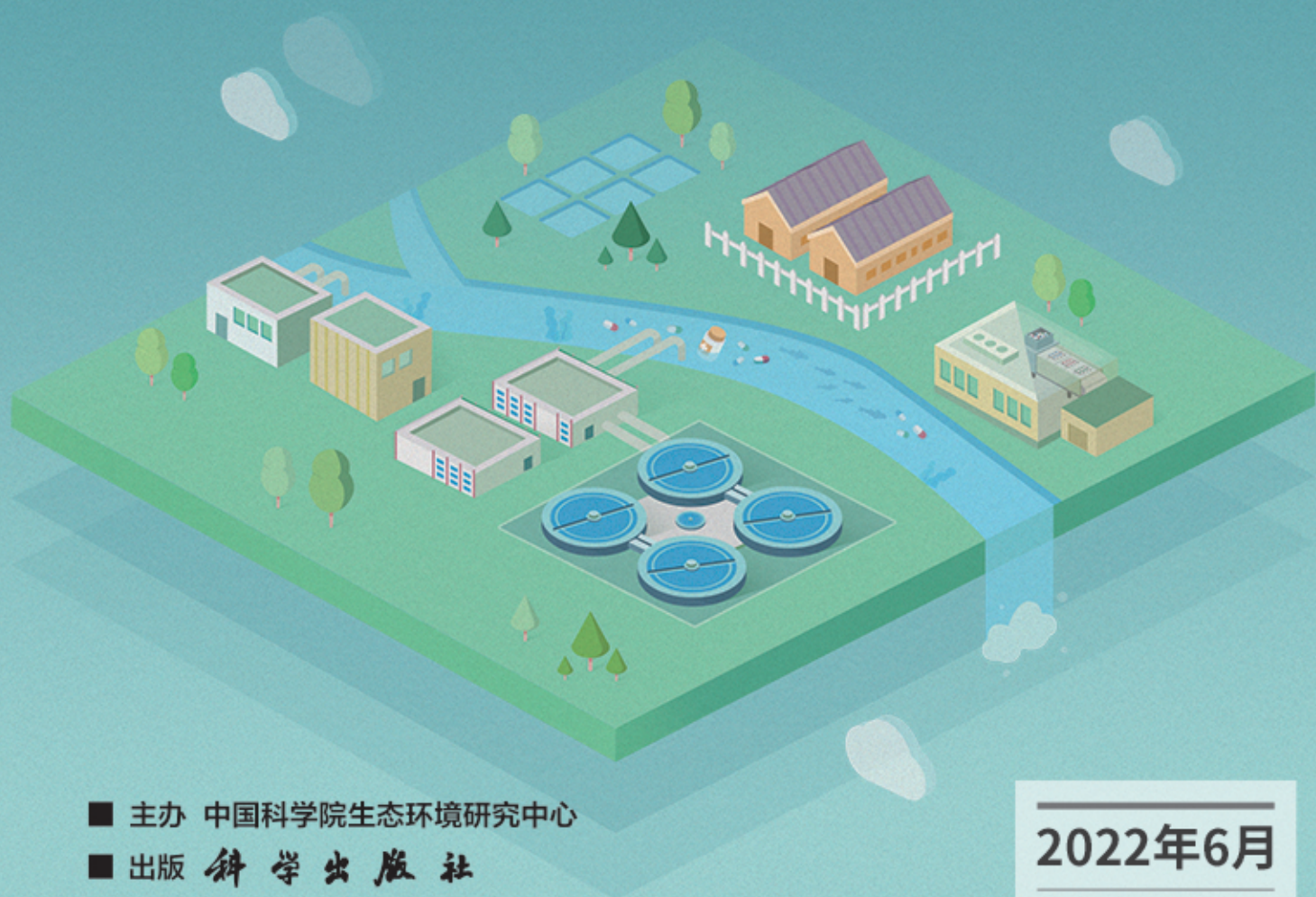
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险

张坤锋^{1,2,3}, 昌盛^{1,2*}, 付青^{1,2}, 樊月婷^{1,2}, 王恩瑞^{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: 多环芳烃是水环境中普遍存在的有害污染物, 了解多环芳烃的污染特征与风险水平对饮用水源地的可持续发展及饮水安全具有重要意义。为此, 采用固相萃取-气相色谱-质谱定性定量分析法对内蒙古东北部地区的满洲里和新右旗饮用水源 33 个(包含 22 个地下水和 11 个地表水)采样点中多环芳烃的残留进行了测定, 分析了多环芳烃的污染水平并进行了健康和生态风险评估。结果表明, 研究区域饮用水源水体 33 个采样点均有 PAHs 检出, 除苯并[k]荧蒹、苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽这 3 种单体检出率范围为 36.36%~95.45% 外, 其余 13 种 PAHs 单体检出率均为 100%。 $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 检出范围为 42.76~

164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 90.82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中地表水和地下水中 $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 检出范围分别为 66.39~164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 42.76~147.70 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。检出的 PAHs 单体 ρ (萘)最大, 平均值达 36.91 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, ρ (蒽)最小, 仅为 0.81 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中地下水与地表水采样点中各 PAHs 单体检出浓度没有明显差异($P>0.05$)。PAHs 的污染处于国内外中等水平, 主要以中低环为主(3~4 环)。采用比值特征法和主成分分析法对研究区域地下水和地表水中 PAHs 的来源进行解析表明, 研究区域饮用水源水体中 PAHs 主要受到煤及生物质燃烧和石油燃烧的影响, 部分地表水水源水体受到石油源的影响。健康和生态风险评估结果表明, 饮用水源地水体不会对人体造成健康风险, 生态风险处于中等水平, 但其中苯并[b]荧蒹(BbF)单体产生风险较高应引起持续关注, 从饮用水源地的可持续发展与饮水安全角度出发, 应考虑采取必要监管与保护措施以防止进一步的污染。结果为饮用水源地 PAHs 的污染治理与防控提供了科学依据。

关键词: 多环芳烃(PAHs); 饮用水源地; 污染特征; 源解析; 风险评估

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3005-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202110173

Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia

ZHANG Kun-feng^{1,2,3}, CHANG Sheng^{1,2*}, FU Qing^{1,2}, FAN Yue-ting^{1,2}, WANG En-rui^{1,2}, SUN Xing-bin³, 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: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are hazardous and ubiquitous pollutants in the aquatic environment, and understanding the pollution characteristics and risk levels of PAHs is of great significance to the sustainable development of drinking water sources and drinking water safety. Hence, PAHs residues were measured qualitatively and quantitatively with solid-phase extraction-gas chromatography-mass spectrometry (SPE-GC-MS) in 33 water samples (including 22 groundwater and 11 surface water samples) of the drinking water sources in the Manzhouli and Xinyouqi areas of northeast Inner Mongolia, and assessments of the pollution level of PAHs and the health and ecological risks were carried out. The results showed that PAHs were detected in all 33 sampling points of Manzhouli drinking water sources, except for benzo[k]fluoranthene, benzo[a]pyrene, and dibenzo[a,h]anthracene, with detection rates ranging from 36.36% to 95.45%; the detection rates of the other 13 PAHs monomers were 100%. The detection range of $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ was 42.76-164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, and the mean value was 90.82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. The detection ranges of $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ in surface water and groundwater were 66.39-164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ and 42.76-147.70 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The concentration of the detected naphthalene was the highest, with a mean value of 36.91 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, and the concentration of anthracene was the lowest, with a mean value of 0.81 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; there were no significant differences among the concentrations of all the PAHs monomers of the surface and groundwater ($P>0.05$). The pollution of PAHs was at a median level in China and abroad, mainly in the middle and low loops (3-4 loops). The analysis of the sources of PAHs in groundwater and surface water in Manzhouli using the ratio feature method and principal component analysis showed that the PAHs in the drinking water source water bodies in the Manzhouli area were mainly affected by the combustion of coal and biomass and oil, and some surface water sources were affected by the oil source. The human health and ecological risk assessment results showed that the water body of drinking water would not cause health risks to the human body, and the ecological risk was at a medium level; however, the high risk of benzo[b]fluoranthene (BbF) monomer production should be continuous cause for concern. From the perspective of the sustainable development of drinking water sources and drinking water safety, the necessary supervision and protection measures should

收稿日期: 2021-10-23; 修订日期: 2021-11-03

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2020YSKY-009); 饮用水水源及重大工程项目区环境监管项目(2110302)

作者简介: 张坤锋(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水污染控制与安全保障, E-mail: Zhangkf1995@163.com

* 通信作者, E-mail: changsheng83@163.com

be considered to prevent further pollution. The results of this research provide a scientific basis for the pollution control and prevention and control of PAHs in drinking water sources.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); drinking water sources; pollution characteristics; source analysis; risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一类在环境中普遍存在的持久性有机污染物^[1]. 因其具有疏水性、热稳定性和生物累积效应而使其在环境中持续存在, 进而对人体健康和生态环境造成严重风险^[2]. PAHs 化合物具有潜在的毒性、诱变性和致癌性^[3,4], 因此美国环境保护局 (USEPA) 已经宣布将 16 种 PAHs 单体列为优先控制的环境污染物^[5]. 环境中的 PAHs 来源主要有森林火灾、火山喷发和生物内源合成等的自然排放以及化石燃料、有机材料和工业排放等的人为排放. 当前, 与其他持久性有机污染物 (其中大多数在世界范围内已被禁止) 不同, 环境中的 PAHs 是由于工业过程、农业废物、汽车尾气、煤炭燃烧和石化产品排放等人类活动从初级来源释放的, 人为排放的 PAHs 最终通过大气沉降、雨水冲刷和地表径流的方式源源不断地进入各种环境介质中, 特别是流域水环境. 目前已有研究表明, 在我国的七大流域 (长江、黄河、海河、松花江、珠江、淮河、辽河)^[6]、美国^[7]、加拿大^[8] 和澳大利亚^[9] 等世界范围的水库、湖泊和河流地表水及地下水中均有不同程度的 PAHs 检出. 其中, 地下水作为全球淡水的主要来源, 占地球可用淡水总量的 97%, 其余 3% 主要是地表水^[10]. 因此, 地下水在世界许多地区均被认为是最重要的公共供水来源^[11].

满洲里和新右旗位于内蒙古自治区东北部, 由于地理位置、气候、降水量和水系等因素导致其水

资源短缺, 周边居民的生产生活用水主要依靠傍河浅层地下水和流经该地区的克鲁伦河及海拉尔河两大流域的地表水源^[12,13]. 近年来有关流域中有机物的污染研究逐渐增多, 但有关满洲里和新右旗两个地区饮用水源中 PAHs 的污染还未见相关报道, PAHs 在饮用水源地的污染会对生态和人体健康造成严重的危害. 通过对这两地区不同类型饮用水源中 PAHs 的分布特征、污染来源和风险进行综合研究, 以期在水源地污染控制和流域水资源及生态的可持续发展提供重要的科学依据.

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

本研究采用固相萃取-气相色谱-质谱 (SPE-GC-MS) 法对满洲里饮用水源水体中 16 种优控多环芳烃进行了定性定量检测分析. 主要试剂: 系列标准物质购自美国 Wellington 公司, 具体见表 1; HLB (6 mL, 500 mg, 美国 Waters) SPE 固相萃取小柱; 农残级 CH_2Cl_2 和色谱纯级 CH_3OH (购自美国 Merck); 测定时所选用的替代物为萘-d8、蒽-d12 和二苯并[a,h]蒽以及内标十氯联苯均购自美国 Supelco 公司. 主要仪器: 12 孔固相萃取装置 (美国 Mediawax 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 饮用水源水体 PAHs 检测单体物质

Table 1 Same lineage of PAHs was detected in the drinking water sources

16 种检测单体同系物	萘 (Nap)、萘烯 (Acy)、二氢萘 (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)、苊并[1,2,3-cd]芘 (InP)、二苯并[a,h]蒽 (DahA) 和苯并[ghi]芘 (二苯并[a,h]芘, BghiP)
-------------	--

1.2 样品采集与处理

本研究选择内蒙古东北部的满洲里与新右旗地区, 根据满洲里和新右旗地区饮用水源地分布及关联地表水体的地理区位情况, 本研究于 2020 年 8 月在呼伦贝尔市的满洲里和新右旗地区地下饮用水 (水井) 及海拉尔河和克鲁伦河流域地表水源选取了共 33 个采样点位 (见图 1), 其中包含地表水体采样点 11 个 (编号为 S1 ~ S11) 和地下水体采样点 22 个 (编号为 G1 ~ G22). 每个采样点采集 3 个平行样品 (地表水采自水面下 0.5 m 水深处), 采集后的水样放置于预先准备好的用丙酮清洗过的棕色玻璃瓶

中, 放置于装有冰块的保温箱中, 最后尽快运送至 4℃ 的冰箱中保存并在 24 h 内处理.

水样的预处理方法参考之前所做的研究^[14], 具体步骤如下: ①首先将 1 L 水样通过 0.45 μm 滤膜过滤. ②将固相萃取小柱与 12 孔的萃取装置连接, 然后依次用 6 mL 的二氯甲烷和甲醇对萃取小柱进行活化, 期间固相萃取小柱不要流干, 然后再用 6 mL 的超纯水对小柱进行活化和淋洗各一次, 以备上样. ③在水样中加入 10 ng 替代物后进行固相萃取, 处理后的水样通过活化后的 HLB 小柱, 同时使用真空泵抽滤, 控制溶液流速在 5 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 待水样滴

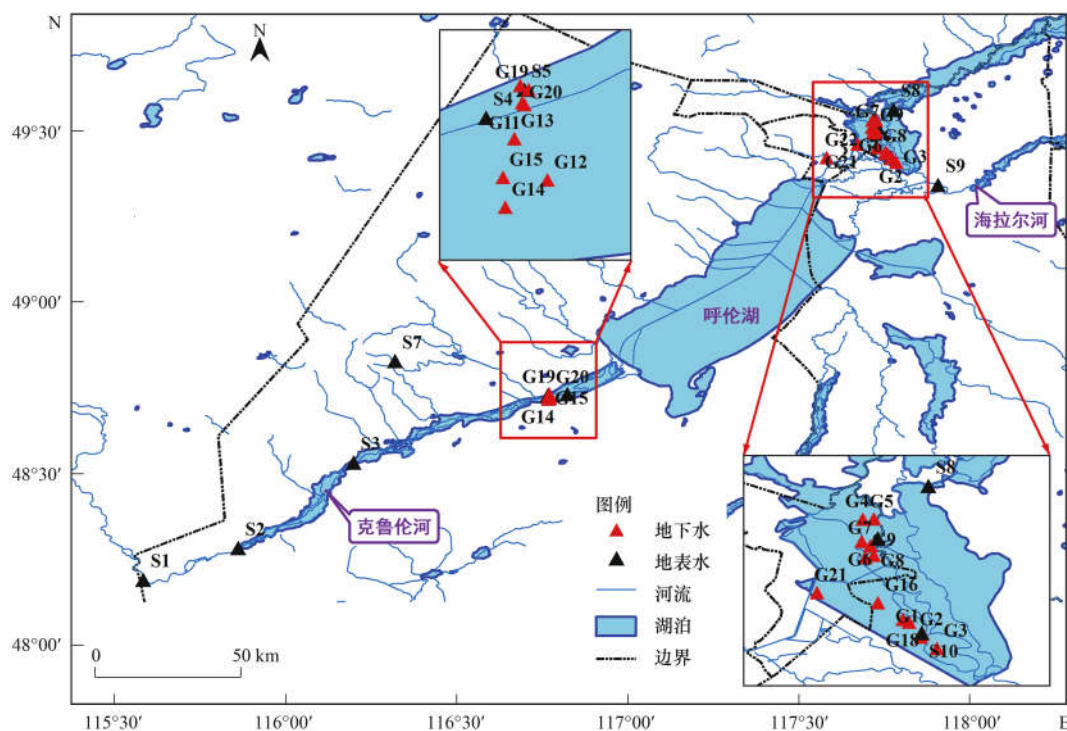


图1 饮用水源地水体采样点示意

Fig. 1 Sample sites of the drinking water sources

完后,继续抽滤 0.5 h. ④用 10 mL CH_2Cl_2 洗脱样品后用旋转蒸发仪和氮吹仪将其浓缩至 0.5 mL,最后加入十氯联苯内标物后进行 GC-MS 分析. 分析时所用 GC-MS 仪器分析条件参考文献[15].

1.3 质量控制

在样品分析前,初始精密度和回收率的测定方法如下:在样品的制备和提取等处理步骤中均采用 3 个平行的水样,在每批 10 个样品中增加 1 个方法空白,方法空白中目标化合物均未检出(未达到检出限). 对多环芳烃样品分别添加蔡-d8、蒽-d12 和二苯并[a,h]蒽-d12 作为回收率指示物,16 种 PAHs 检出限以 3 倍信噪比(S/N)来确定. 利用以上几种质控分析方法得出,本研究中每种化合物浓度的相对标准偏差(RSD) < 20% ($n=6$),水体中多环芳烃的检出限为 0.09 ~ 0.25 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,加标回收率分别为 75.45% ~ 108.67%、77.34% ~ 99.89% 和 69.98% ~ 115.00%.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 的检出情况

采用 SPE-GC-MS 对研究区域地下及地表饮用水源水体中 PAHs 进行定量检测, $\sum \text{PAHs}$ 表示 16 种单体化合物的总和. 由表 2 可知,研究区域饮用水源中 16 种 PAHs 单体均被检出. 从检出率来看,除苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘和二苯并[a,h]蒽这 3 种 PAHs 单体在地下水和地表水中检出率范围分别为

59.09% ~ 95.45% 和 36.36% ~ 90.91% 以外,其中检出率最低的单体为苯并[a]芘,在地下水和地表水中分别为 59.09% 和 36.36%,其余 13 种 PAHs 单体在 33 个采样点中均被检出.

从检出浓度来看,研究区域饮用水源地水体中 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 检出范围为 42.76 ~ 164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 90.82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其中地表水中 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 检出范围为 66.39 ~ 164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 103.67 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$;地下水中 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 检出范围为 42.76 ~ 147.70 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 84.39 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 由图 2(b) 可知,蔡(Nap)、蒽(Acy)、二氢蒽(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、荧蒽(Fla)、苯并[a]蒽(BaA)和苯并[a]芘(BaP)这 8 种单体在地下水中的最大检出浓度高于地表水体,平均检出浓度蒽(Acy)、苯并[a]蒽(BaA)和苯并[a]芘(BaP)这 3 种单体地下水高于地表水,这可能由于相对于地表水,地下水迁移较慢不利于 PAHs 的降解所致;此外,PAHs 还可以被地下水系统中的沉积物和碳酸盐等吸附,这些条件都会有利于地下水中有有机污染的富集[16]. 16 种 PAHs 单体中,个别成分的浓度在不同地点及不同 PAHs 单体之间存在很大差异,其中蔡浓度最大,在地下水和地表水体中的平均值分别为 35.46 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 39.82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其次是菲(Phe)和苯并[b]荧蒽(BbF),其在地下水的浓度平

均值分别为 15.32 ng·L⁻¹和 5.03 ng·L⁻¹,在地表水中的浓度平均值分别为 16.00 ng·L⁻¹和 11.04 ng·L⁻¹,蒽浓度最小,其在地下水和地表水中的浓度平均值分别仅为 0.79 ng·L⁻¹和 0.86 ng·L⁻¹.

此外,由图 2(a)可以看出,在研究区域饮用水源 33 个点位中,地表水中的 S11 点位处 $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 最大为 164.50 ng·L⁻¹,且苯并[b]荧蒽(BbF)和萘(Nap)浓度占比最大,其次是地表水的 S4 点位, $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 为 161.20 ng·L⁻¹,地下水中的 G9 和 G20 点位的 $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 分别为 147.70 ng·L⁻¹和 131.48 ng·L⁻¹,由图 1 可知, $\rho\left(\sum \text{PAHs}\right)$ 较大的地表水点位均靠近人口较为密集的居住区,因此工农业生产和汽车尾气的排放均会导致 PAHs 污染.这可能是由于人为源排放的 PAHs 经过大气沉降、雨水冲刷和地表径流方式直接进入了地表水体,造成地表水体中的 PAHs 浓度

略高于地下水;而对于地下水,G9 点位的井深为 136 m 且距离海拉尔河 1 066 m,这可能是深井中 PAHs 不易降解从而得到了富集的原因^[16].为了进一步探究研究区域地下和地表水饮用水源中 PAHs 浓度水平的差异性,本研究利用单因素方差分析对 16 种 PAHs 单体浓度进行了分析,结果表明,研究区域饮用水源水体地下水与地表水采样点中各 PAHs 单体检出浓度不具有明显的差异性($P>0.05$).最重要的是将研究区域 PAHs 检出浓度与中国国家标准以及其他国家标准进行对比(表 2),由表 2 可知,研究区域各 PAHs 单体及总浓度均低于国家生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006),但值得注意的是,苯并[a]芘(BaP)的最大检出浓度接近于国家标准,且菲(Phe)、荧蒽(Fla) 苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chry)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)和苯并[ghi]芘(二苯并[a,h]芘,BghiP)这 8 种单体检出浓度高于了荷兰国家标准,需要引起重视.

表 2 饮用水水源中 PAHs 检出情况¹⁾
Table 2 Concentrations of the detected of PAHs in the drinking water sources

PAHs 组分	地下水				地表水				中国标准 /ng·L ⁻¹	荷兰标准 /ng·L ⁻¹
	最大值 /ng·L ⁻¹	最小值 /ng·L ⁻¹	平均值 /ng·L ⁻¹	检出率 /%	最大值 /ng·L ⁻¹	最小值 /ng·L ⁻¹	平均值 /ng·L ⁻¹	检出率 /%		
萘(Nap)	84.81	15.90	35.46	100.00	62.72	17.91	39.82	100.00	—	100
苊烯(Acy)	2.56	0.44	1.05	100.00	2.25	0.61	0.98	100.00	—	—
二氢苊(Ace)	4.97	0.81	1.90	100.00	3.54	1.25	2.05	100.00	—	—
芴(Flu)	7.79	1.50	3.81	100.00	6.99	2.19	4.15	100.00	—	—
菲(Phe)	25.29	7.26	15.32	100.00	23.88	8.29	16.00	100.00	—	20
蒽(Ant)	1.75	0.36	0.79	100.00	1.78	0.56	0.86	100.00	—	20
荧蒽(Fla)	6.62	2.26	3.87	100.00	6.47	2.29	4.39	100.00	—	5
芘(Pyr)	3.37	1.31	2.02	100.00	19.44	1.18	4.05	100.00	—	—
苯并[a]蒽(BaA)	16.31	0.57	1.75	100.00	4.44	0.43	1.23	100.00	—	2
蒽(Chry)	5.84	1.06	2.26	100.00	14.55	0.75	3.56	100.00	—	2
苯并[b]荧蒽(BbF)	28.50	1.74	5.03	100.00	61.61	2.43	11.04	100.00	—	—
苯并[k]荧蒽(BkF)	4.80	ND	1.84	95.45	10.62	ND	3.06	90.91	—	1
苯并[a]芘(BaP)	8.74	ND	1.82	59.09	5.89	ND	1.26	36.36	10	1
茚并[1,2,3-cd]芘(InP)	7.64	0.98	2.81	100.00	16.66	0.82	3.74	100.00	—	0.4
二苯并[a,h]蒽(DahA)	5.10	ND	1.22	77.27	14.82	ND	2.62	81.82	—	—
苯并[ghi]芘(二苯并[a,h]芘,BghiP)	9.46	0.64	3.42	100.00	21.92	1.38	4.85	100.00	—	2
$\sum \text{PAHs}$	147.70	42.76	84.39	100.00	164.50	66.39	103.67	100.00	2 000	—

1) ND 表示低于检出限未检出; $\sum \text{PAHs}$ 表示 16 种 PAHs 单体总和; 中国标准为 2006 年生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006); 荷兰标准为荷兰地下水水质标准(1990); “—”表示未查到相关标准

2.2 饮用水源水体中 PAHs 的组成

图 3 揭示了饮用水源地地表和地下饮用水源中 PAHs 的组成.从中可以看出地表和地下水源水体中 PAHs 均以 3~4 环为主,在地表水和地下水中的占比分别为 60.00%~69.23%和 56.25%~68.46%,由此可知饮用水源地地下和地表饮用水中 PAHs 的组成相似,这些结果与以往的研究相

似^[17,18].这可能是因为与高分子量(high molecular weight, HMW)的 PAHs 相比,低分子量(low molecular weight, LMW)的 PAHs 具有更强的水溶性,相反由于 HMW 的 PAHs 辛醇-水的分配系数高且具有疏水性,导致 HMW 的 PAHs 更容易在沉积物中沉积^[19].因此,随着时间的推移,水中的 HMW 化合物最终会转移到沉积物中^[20].然而,本研究中

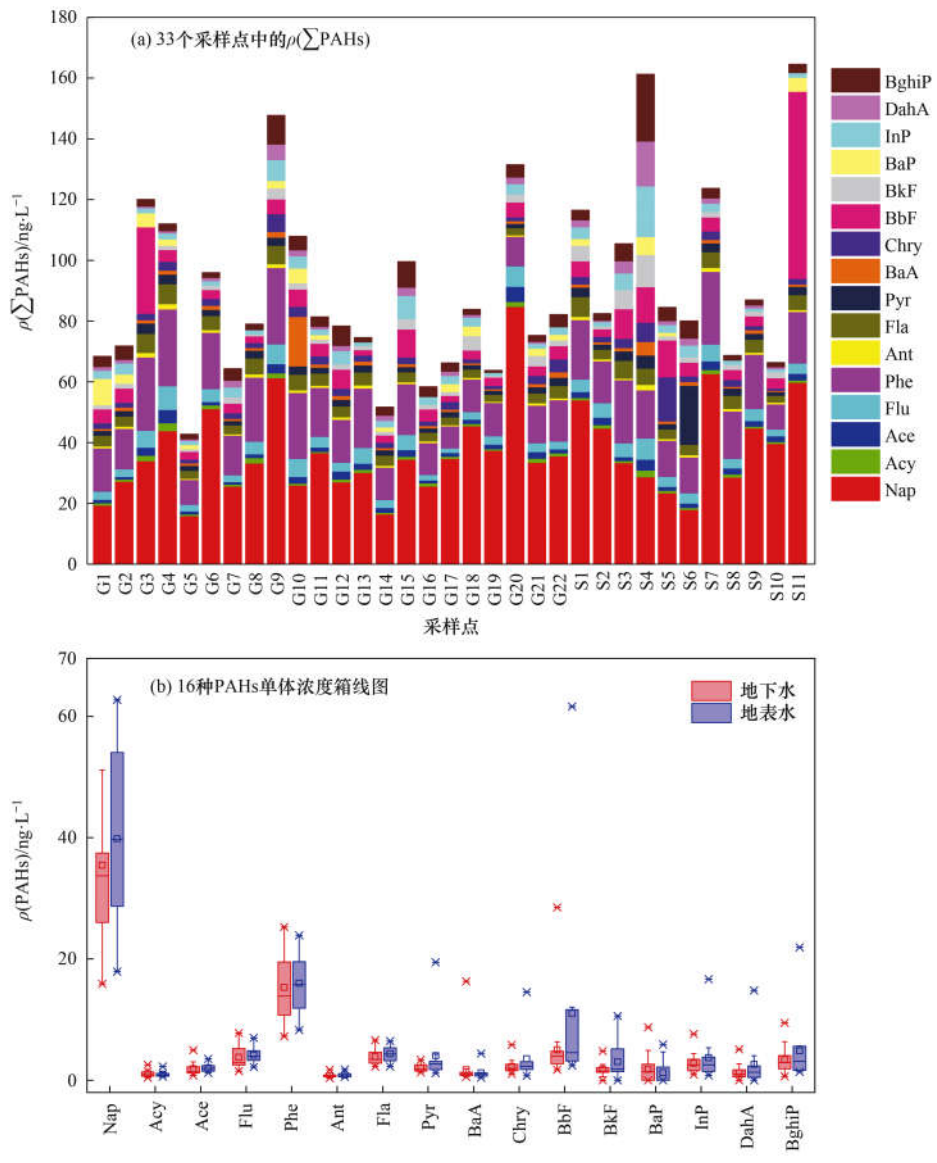


图 2 饮用水源水体中 PAHs 浓度

Fig. 2 Concentrations of detected PAHs in the drinking water sources

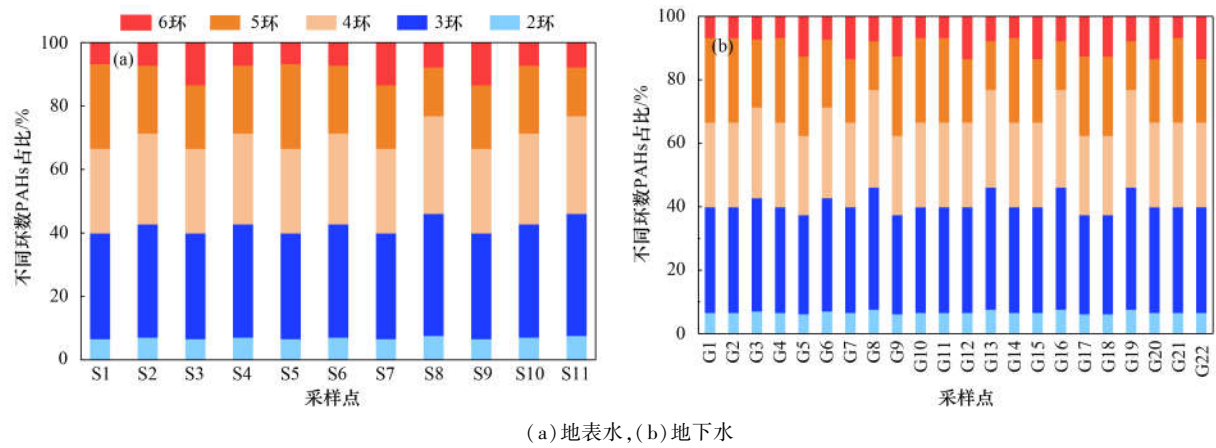


图 3 饮用水源水体中各种环数 PAHs 占比

Fig. 3 Proportion of PAHs content of different ring numbers in the drinking water sources

高分子量(5~6环)的PAHs占比稍高(23.25%~28.33%),这可能与近期排放中HMW的PAHs的存在有关^[21]。

2.3 饮用水源中PAHs与国内外水体的对比

国内外典型河流、湖泊和水库地表水及部分地下水中PAHs的检出情况汇总见表3。研究区域饮用

水源地地表水体中 PAHs 的检出范围为 55.39 ~ 164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 略低于国内武汉长江饮用水源地 (57.04 ~ 475.79 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、上海城市河网 (46.53 ~ 221.54 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和长三角饮用水源地 (4.25 ~ 407.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 远低于国外埃及尼罗河 (1 112.70 ~ 4 364.30 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。污染水平与国外美国密西西比河 (22.20 ~ 163.40 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、国内三峡水库水体 (3.90 ~ 107.60 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和国内于桥水库 (13.70 ~ 104.10 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 相当。但是研究区域 PAHs 浓度高于国内三峡水库支流 (1.92 ~ 40.33 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和国外加拿大 Athabasca 区地表水 (ND ~ 91.90 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。

表 3 国内外水体中 PAHs 的浓度¹⁾

Table 3 Concentration of PAHs in water bodies of China and abroad

水体性质	河流/湖泊	国家	采样年份	检出 PAHs 单体数	$\sum$ PAHs 浓度范围 (平均值)/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	主要环数	文献
地表水	满洲里和新右旗饮用水源	中国	2020	16	42.76 ~ 164.50 (90.82)	3 ~ 4	本研究
	武汉长江饮用水源地	中国	2020	16	57.04 ~ 475.79 (173.86)	3 ~ 5	[14]
	三峡水库支流	中国	2015	16	1.92 ~ 40.33 (14.72)	3 ~ 4	[22]
	于桥水库	中国	2014	13	13.70 ~ 104.10 (55.20)	2 ~ 3	[15]
	上海城市河网	中国	2015	16	46.53 ~ 221.54 (112.92)	2 ~ 3	[23]
	长三角饮用水源地	中国	2016	16	4.25 ~ 407.00 (121.00)	2 ~ 4	[19]
	三峡库区水体	中国	2016	16	3.90 ~ 107.60 (39.90)	2 ~ 3	[24]
	密西西比河	美国	2007	16	22.20 ~ 163.40 (86.50)	2 ~ 4	[7]
	加拿大 Athabasca 区地表水	加拿大	2017	9	ND ~ 91.90 (33.70)	2 ~ 4	[8]
	印度 Ganges 河	印度	2014	16	3.60 ~ 61.45 (31.89)	—	[25]
	澳大利亚 Brisbane	澳大利亚	2002	15	6.67 ~ 11.54 (9.45)	2 ~ 3	[9]
地下水	埃及尼罗河	埃及	2005	16	1 112.70 ~ 4 364.30 (2 127.55)	—	[26]
	淳沱河冲洪积扇地下水	中国	2015	16	ND ~ 333.40 (58.00)	2 ~ 4	[27]
	黄河口地下水	中国	2013	16	8.51 ~ 402.86 (54.64)	3 ~ 4	[16]
	柳州市地下水	中国	2015	16	105.87 ~ 854.47 (271.6)	4	[28]
	太湖苏南地下水	中国	2007	15	4.00 ~ 32 449.00 (4 420.00)	3 ~ 4	[29]
	梅里达城地下水	墨西哥	2008	15	30.00 ~ 19 500.00 (—)	3 ~ 4	[30]

1) ND 表示低于检出限未检出,“—”表示文献中无相关数据

2.4 饮用水源水体中 PAHs 的来源解析

2.4.1 比值特征法源解析

环境中赋存的 PAHs 的来源比较复杂,由于不同来源的 PAHs 在单体组成与含量具有差异,本研究采用比值特征法来解析 PAHs 的来源^[31,32]。鉴于低分子的 PAHs 单体稳定性较差,已有研究中普遍采用 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$ 、 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 等稳定性较好的单体的比值(见表 4)来解析环境中 PAHs 的来源^[33],主要包括了石油源、石油燃烧源和煤及生物质燃烧源这 3 种人为源。由图 4 可知,饮水水源地下水和地表水中的 PAHs 均主要来自煤及生物质燃烧和石油燃烧,另有部分地表水源水体中 PAHs 来源于石油源。由此可知,石油源、石油燃烧源和煤及生物质燃烧源均对研究区域饮用水源水体中 PAHs 产生了影响。

2.4.2 主成分分析法源解析

为了进一步明确各种人为源的贡献率,本研究

地下水方面,研究区域饮用水源地地下水检出浓度低于国内的淳沱河冲洪积扇地下水 (ND ~ 333.40 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、黄河口地下水 (8.51 ~ 402.86 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和柳州市地下水 (105.87 ~ 854.47 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$), 远低于国内太湖苏南地下水 (4.00 ~ 32 449.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和国外墨西哥梅里达城地下水 (30.00 ~ 19 500.00 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。因此,研究区域地表水饮用水源中 PAHs 的污染在国内外水体中处于中等水平,高于部分饮水水源水体,地下水饮水水源污染水平较低,从保障饮水安全的角度出发,应该关注相关污染,以确保为公众提供优质饮用水。

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
$\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$	0.10	0.10	
$\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry})$	0.20	0.20 ~ 0.35	0.35
$\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$	0.40	0.40 ~ 0.50	0.50
$\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$	<0.20	0.20 ~ 0.50	>0.50

使用 SPSS 经过方差极大标准化旋转后对研究区域地下和地表水源水体提取了特征值大于 1 的主成分,其中在地下水和地表水中分别提取出了 2 种和 3 种主成分,它们累积分别占数据集方差的 86.746% 和 76.639% (表 5)。在地下水源中,第一主成分贡献率为 72.715%,它所表示的单体为 Acy 、 Ace 、 Flu 、 Fla 、 Chry 、 Phe 和 Pyr ,其中 Fla 、 Pyr 、 Chry 和 Phe 表示煤炭等物质燃烧^[34], Acy 表示薪柴生物质燃烧源^[35],由此可认为第一主成分表示煤炭及木材的燃烧源;第二主成分贡献率为 14.031%,

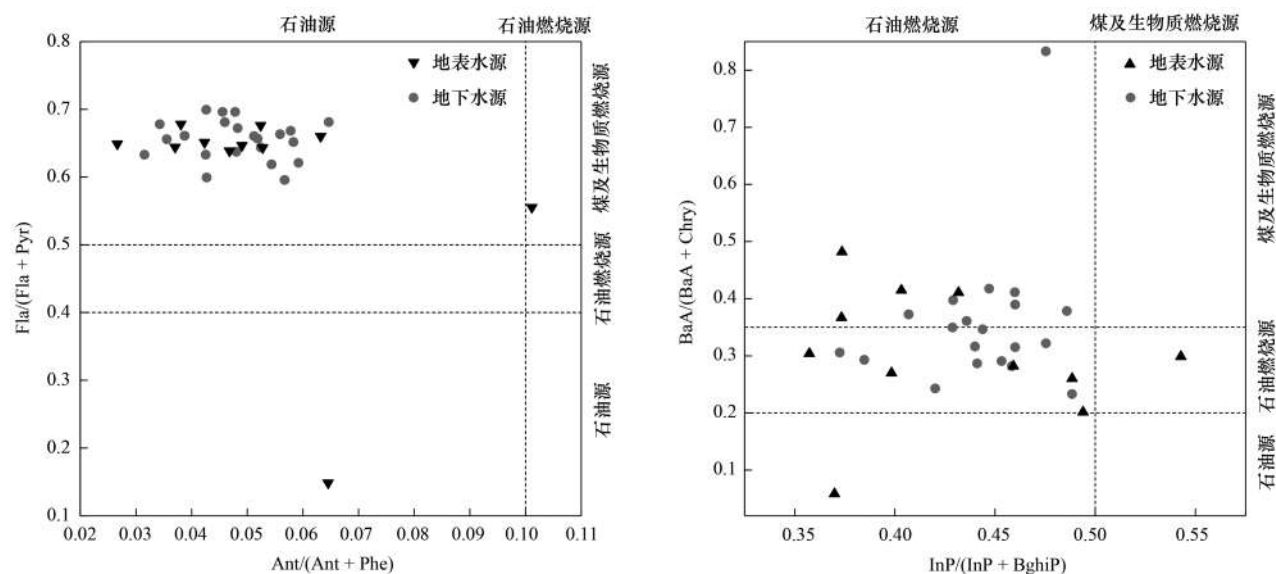


图 4 饮用水源水体中 PAHs 来源解析

Fig. 4 Source analysis of PAHs in the drinking water sources

表 5 PAHs 的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of PAHs

PAHs 单体	地下水		地表水		
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC3
Nap	0.099	-0.032	0.275	0.540	-0.491
Acy	0.533	0.475	0.742	0.343	-0.221
Ace	0.675	0.308	0.670	0.363	-0.408
Flu	0.603	0.596	0.835	0.384	-0.128
Phe	0.503	0.289	0.623	0.576	0.312
Ant	0.203	0.781	0.828	0.300	0.111
Fla	0.852	0.143	0.707	0.433	0.369
Pyr	0.706	0.016	0.155	-0.151	0.146
BaA	-0.098	0.338	0.332	-0.109	0.482
Chry	0.569	0.359	0.343	-0.263	0.143
BbF	0.030	0.792	0.178	0.211	0.402
BkF	0.389	-0.219	0.647	-0.552	-0.230
BaP	-0.225	0.352	0.355	-0.179	0.589
InP	0.246	0.189	0.770	-0.591	-0.100
DahA	0.372	0.154	0.780	-0.568	-0.124
BghiP	0.223	0.243	0.768	-0.584	-0.073
特征值	6.897	4.262	5.963	2.795	1.584
方差/%	72.715	14.031	47.268	18.471	10.903
累积方差/%	72.715	86.746	47.268	65.739	76.639

表示 Flu、Ant 和 BbF 等物质,其中 BbF 为交通石油燃烧排放源, Ant 为煤燃烧源^[36],故认为第二主成分表示石化燃料的燃烧源.地表水源中 3 个主成分的累积方差贡献率为 76.639%,其中第一主成分表示 Acy、Ace、Flu、Phe、Ant、Fla、BkF、InP、DahA 和 BghiP 这 10 种单体,其中 BkF、DahA 和 BghiP 表示交通排放源^[37],Flu、Phe、Ant 和 Fla 表示煤炭燃烧源, Acy 和 Ace 表示木材生物质燃烧源;第二主成分表示 Nap 和 Phe,其中 Nap 表示石油泄漏源^[38,39],Phe 表示煤炭燃烧源;第三主成分表示 BaP 单体,表示交通排放源.两种源解析方式得出的结果

均表明,研究区域地下水和地表水水体中 PAHs 的污染均受到了煤及木材等生物质的燃烧和机动车石油燃烧排放的混合源污染,部分地表水体还受到了石油泄漏产生的污染.

3 风险评价

3.1 健康风险评价

人体直接饮用摄入是饮用水源地水体中 PAHs 暴露的主要途径.终生致癌风险模型已经广泛应用于 PAHs 对各类人群的健康风险评估中^[40,44].由于本研究中 16 种优控 PAHs 单体并没有完整的毒性

参数,但各单体的毒性作用机制相似,因此本研究引入了毒性当量因子 TEF^[41] 来确定 16 种 PAHs 单体的毒性,其中各化合物毒性当量因子见表 6. 在此模型中,将 BaP 设定为 1,其他 15 种 PAHs 单体的 TEF 值通过与等量 BaP 毒性比较大小而得出,PAHs 的致癌风险指数(R)的计算见公式(1)和公式(2):

$$R = \frac{TEQ_{BaP} \times IR \times CSF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

$$TEQ_{BaP} = \sum_{i=1}^n C_i \times TEF_i \quad (2)$$

式中,IR 为每日饮水摄入量(L·d⁻¹),其取值参考文献[42~44],成人和儿童分别取值 1.85 和 1.00; TEQ_{BaP} 为基于 BaP 的毒性当量浓度(mg·L⁻¹); EF 为每年暴露天数(d·a⁻¹),取值 365; CSF 为致癌斜率系数,本研究取值为 7.3 kg·d·mg⁻¹^[45]; ED 为暴露时间,成人男性和女性分别取值 74 a 和 78 a,儿童取值为 12 a^[46]; AT 为时间,由(ED×EF)计算可知男人、女人和儿童分别为 27 010、28 470 和 4 380 d; BW 为体重(kg),本研究分别取值 67.7、59.6 和 26.8; C_i 为各单体 PAHs 在水中的检出浓度(mg·L⁻¹),计算时按照地下水和地表水所对应浓度进行取值.

对研究区域饮用水源水体中 PAHs 进行健康风险评估,结果如图 5 所示. 饮用水源水体中 PAHs 暴露对成年男性、成年女性和儿童所产生的致癌风险范围分别为 1.13×10⁻⁷~1.69×10⁻⁵、1.28×10⁻⁷~1.92×10⁻⁵ 和 1.54×10⁻⁷~2.31×10⁻⁵,其中地下水平均致癌风险为 2.15×10⁻⁶ 和 3.83×10⁻⁶. 根

据 US EPA 定义,PAHs 对人体的暴露风险均处于可接受范围内(10⁻⁶~10⁻⁴),但是仍然超过了风险阈值(10⁻⁶). 值得注意的是,儿童的风险高于成人,这与之前的研究结果一致^[14, 47]. 这可能是由于儿童更容易受到污染物的危害. 进一步说明为了更好地保障饮水健康与水生态安全,确需进行全面的污染物分布与毒性学特性调查.

表 6 16 种 PAHs 单体毒性当量因子

Table 6 Toxicity equivalent factors for 16 PAHs compound			
PAHs 单体	TEF _i	PAHs 单体	TEF _i
Nap	0.001	BaA	0.1
Acy	0.001	Chry	0.01
Ace	0.001	BbF	0.1
Flu	0.001	BkF	0.1
Phe	0.001	BaP	1
Ant	0.01	InP	0.1
Fla	0.001	DahA	1
Pyr	0.001	BghiP	0.01

3.2 生态风险评价

本研究采用风险熵值(RQ)法^[45]对饮用水源水体进行生态风险评价,并将所检出的 16 种优控 PAHs 单体均纳入评价范围. 通过水体中检出 PAHs 单体的质量浓度与其质量的比值来计算 RQ 值,具体见公式(3):

$$RQ = c_{PAHs} / c_{QV} \quad (3)$$

式中, c_{PAHs} 为样品中各 PAHs 单体的浓度(ng·L⁻¹),计算时分别取各单体在地下水和地表水中的平均浓度; c_{QV} 为各单体所对应的风险值(ng·L⁻¹); 通常在研究中采用 PAHs 的最低风险标准浓度值 c_{QV-NCs}

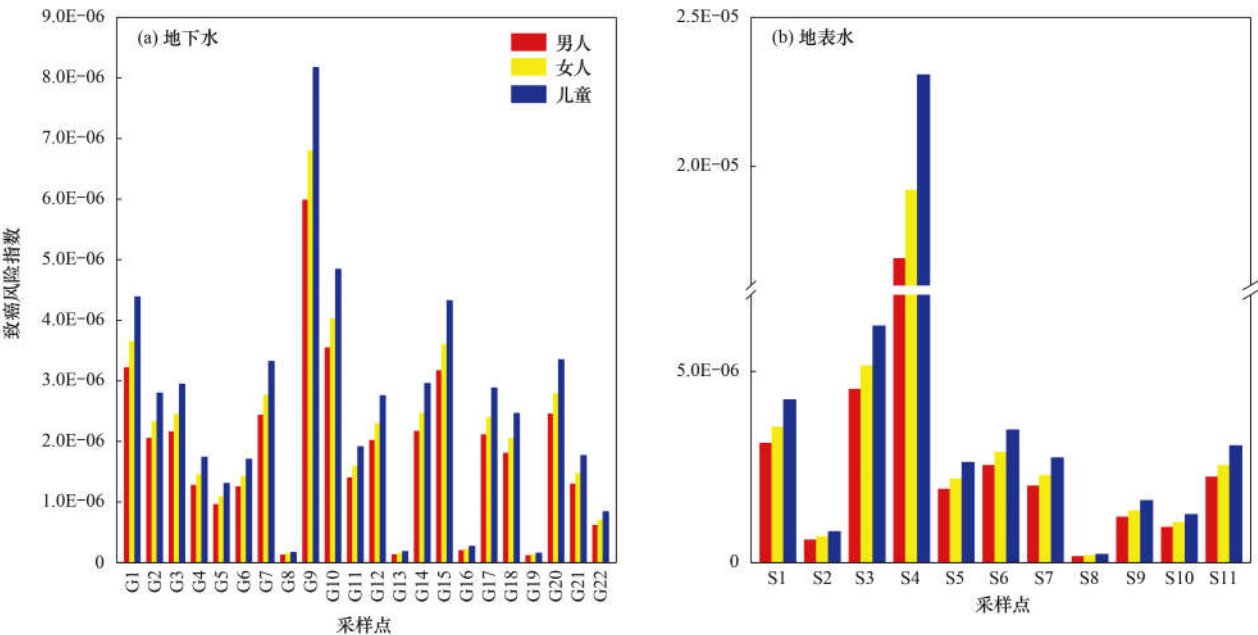


图 5 饮用水源地 PAHs 健康风险评估

Fig. 5 Health risk assessment of PAHs in drinking water sources

($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)和最大允许浓度值 $c_{\text{QV-MPCs}}$ ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 来计算风险熵值,具体见公式(4)和公式(5):

$$\text{RQ}_{\text{NCs}} = c_{\text{PAHs}}/c_{\text{QV-NCs}} \tag{4}$$

$$\text{RQ}_{\text{MPCs}} = c_{\text{PAHs}}/c_{\text{QV-MPCs}} \tag{5}$$

式中, RQ_{NCs} 和 RQ_{MPCs} 分别为最小和最大生态风险熵值.值得注意的是,由于生态风险评价的RQ熵值法只适用萘(Nap)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、苯并[a]蒽(BaA)、䟽(Chry)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)和苯并[ghi]芘(二苯并[a,h]芘,BghiP)这10种PAHs单体,所以本研究采用Kalf等^[48]的研究中所采用的忽略浓度(the negligible concentrations, NC)和最大允许浓度(the maximum permissible concentrations, MPC)值对饮用水源中16种PAHs单体进行生态风险评价,其中 $\text{NCs} = \text{MPCs}/100$.对于生态风险熵RQ,本研究认为当 RQ_{NCs} 小于1时所产生的生态风险可以忽略;当 RQ_{NCs} 大于1且 RQ_{MPCs} 小于1时说明会产生中等强度的生态风险,应该加强污染监管,以防止水

体进一步污染;当 RQ_{MPCs} 大于1时表明PAHs所产生的风险极大,应该立刻采取有效措施降低PAHs的污染水平.

由表7可以看出,研究区域地下水饮用水源中16种PAHs单体的风险熵值 RQ_{MPCs} 均小于1,除䟽(Chry)外其余15种PAHs单体的 RQ_{NCs} 值均大于1;地表水中16种PAHs单体的 RQ_{NCs} 值均大于1,除苯并[b]荧蒽(BbF)外其余15种PAHs单体的 RQ_{MPCs} 值均小于1,由此可知,在地下水饮用水源中,除䟽(Chry)所产生的生态风险可忽略不计之外,其它15种PAHs单体均可产生中等水平的生态风险,在地表水饮用水源中苯并[b]荧蒽(BbF)会产生较高的生态风险,其余15种PAHs单体均会产生中等强度生态风险.保障饮用水源地的可持续发展与饮水安全至关重要,这不仅因为饮用水源地关系着人类的饮水健康,它们还是动植物的生态中心,从而应该加强研究区域饮用水源水体污染物的检测调查并采取相关措施控制污染.

表7 地下和地表饮用水源中PAHs的生态风险熵值
Table 7 Ecological risk assessment of PAHs in the underground and surface drinking water sources

PAHs 单体	NCs	MPCs	地下水			地表水		
			RQ_{NCs}	RQ_{MPCs}	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	RQ_{NCs}	RQ_{MPCs}	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$
萘(Nap)	12	1200	2.96	0.03	35.46	3.32	0.03	39.82
芴(Acy)	0.7	70	1.51	0.02	1.05	1.40	0.01	0.98
二氢芴(Ace)	0.7	70	2.71	0.03	1.90	2.93	0.03	2.05
芴(Flu)	0.7	70	5.45	0.05	3.81	5.93	0.06	4.15
菲(Phe)	3.0	300	5.11	0.05	15.32	5.33	0.05	16.00
蒽(Ant)	0.7	70	1.12	0.01	0.79	1.23	0.01	0.86
荧蒽(Fla)	3.0	300	1.29	0.01	3.87	1.46	0.01	4.39
芘(Pyr)	0.7	70	2.88	0.03	2.02	5.79	0.06	4.05
苯并[a]蒽(BaA)	0.1	10	17.46	0.17	1.75	12.34	0.12	1.23
䟽(Chry)	3.4	340	0.66	0.01	2.26	1.05	0.01	3.56
苯并[b]荧蒽(BbF)	0.1	10	50.34	0.50	5.03	110.37	1.10	11.04
苯并[k]荧蒽(BkF)	0.4	40	4.60	0.05	1.84	7.64	0.08	3.06
苯并[a]芘(BaP)	0.5	50	3.65	0.04	1.82	2.52	0.03	1.26
茚并[1,2,3-cd]芘(InP)	0.4	40	7.03	0.07	2.81	9.35	0.09	3.74
二苯并[a,h]蒽(DahA)	0.5	50	2.45	0.02	1.22	5.25	0.05	2.62
苯并[ghi]芘(二苯并[a,h]芘,BghiP)	0.3	30	11.42	0.11	3.42	16.17	0.16	4.85
∑ PAHs	27.2	2720	3.10	0.03	84.37	3.81	0.04	103.66

4 结论

(1)研究区域饮用水源水体中16种PAHs单体均被检出,且以中低环(3~4)为主, $\rho(\sum \text{PAHs})$ 范围为42.76~164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为90.82 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其中地下水和地表水 $\rho(\sum \text{PAHs})$ 检出范围分别为66.39~164.50 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和42.76~147.70 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.地下水与地表水中各PAHs单体检出浓度不具有明显的差异性($P>0.05$).少量位于人口密

集区域点位浓度较高,说明水源地水体中PAHs空间分布受到人类活动排放的影响.

(2)比值特征法和主成分分析法结果表明,研究区域饮用水源水体中PAHs是以石油燃烧源和煤及生物质燃烧源为主的混合源,部分地表水源水体存在石油源.

(3)健康风险评估显示,饮用水源地水体中PAHs暴露不会对人体产生健康危害,但是儿童暴露风险高于成人;生态风险评估显示,生态风险处于中等水平,但其中苯并[b]荧蒽(BbF)单体产生风险较高应引起持续地关注,从饮用水源地的生态

可持续发展与饮水安全角度出发,应考虑采取必要措施以防止进一步地污染。

参考文献:

- [1] 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 Xiaoxinghai Lake in the northeast China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 147-158.
- [2] Tian Y Z, Li W H, Shi G L, *et al.* Relationships between PAHs and PCBs, and quantitative source apportionment of PAHs toxicity in sediments from Fenhe reservoir and watershed[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **248-249**: 89-96.
- [3] Chen J, Fan B, Li J, *et al.* Development of human health ambient water quality criteria of 12 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and risk assessment in China[J]. *Chemosphere*, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126590.
- [4] Samanta S K, Singh O V, Jain R K, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons: environmental pollution and bioremediation[J]. *Trends in Biotechnology*, 2002, **20**(6): 243-248.
- [5] Manoli E, Samara C, Konstantinou I, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in the bulk precipitation and surface waters of Northern Greece[J]. *Chemosphere*, 2000, **41**(12): 1845-1855.
- [6] 范博, 王晓南, 黄云, 等. 我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2101-2114.
Fan B, Wang X N, Huang Y, *et al.* Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water bodies in seven basins of China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2101-2114.
- [7] 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.
- [8] Birks S J, Cho S, Taylor E, *et al.* Characterizing the PAHs in surface waters and snow in the Athabasca region: implications for identifying hydrological pathways of atmospheric deposition[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **603-604**: 570-583.
- [9] Shaw M, Tibbetts I R, Müller J F. Monitoring PAHs in the Brisbane River and Moreton Bay, Australia, using semipermeable membrane devices and EROD activity in yellowfin bream, *Acanthopagrus australis*[J]. *Chemosphere*, 2004, **56**(3): 237-246.
- [10] Jurado A, Walther M, Díaz-Cruz M S. Occurrence, fate and environmental risk assessment of the organic microcontaminants included in the Watch Lists set by EU Decisions 2015/495 and 2018/840 in the groundwater of Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 285-296.
- [11] Szekeres E, Chiriac C M, Baricz A, *et al.* Investigating antibiotics, antibiotic resistance genes, and microbial contaminants in groundwater in relation to the proximity of urban areas[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 734-744.
- [12] 张坤锋, 昌盛, 赵少延, 等. 克鲁伦河流域地下水饮用水水源中挥发性有机物的污染特征与风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2021, **11**(6): 1083-1091.
Zhang K F, Chang S, Zhao S Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of volatile organic compounds in groundwater drinking water sources in Klulun River Basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, **11**(6): 1083-1091.
- [13] 张坤锋, 赵少延, 孙兴滨, 等. 海拉尔河及傍河地下水饮用水源中挥发性有机物的污染特征与风险[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2021, **49**(5): 74-82.
Zhang K F, Zhao S Y, Sun X B, *et al.* Pollution characteristics and risks of volatile organic compounds in drinking water sources of Hailar River and nearby rivers groundwater[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, **49**(5): 74-82.
- [14] 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.
- [15] 昌盛, 赵兴茹, 付青, 等. 输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2530-2538.
Chang S, Zhao X R, Fu Q, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water of Yuqiao Reservoir watershed during the water delivery period[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2530-2538.
- [16] Li J, Li F D, Liu Q. PAHs behavior in surface water and groundwater of the Yellow River estuary: evidence from isotopes and hydrochemistry[J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 143-153.
- [17] 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 等. 岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3722-3730.
Lan J C, Sun Y C, Tian P, *et al.* Contamination and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and in karst underground river catchment[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3722-3730.
- [18] Liu J, Qi S H, Yao J, *et al.* Contamination characteristics of organochlorine pesticides in multimatrix sampling of the Hanjiang River Basin, southeast China[J]. *Chemosphere*, 2016, **163**: 35-43.
- [19] Liu C Y, Huang Z F, Qadeer A, *et al.* The sediment-water diffusion and risk assessment of PAHs in different types of drinking water sources in the Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **309**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127456.
- [20] Dachs J, Méjanelle L. Organic pollutants in coastal waters, sediments, and biota: a relevant driver for ecosystems during the anthropocene? [J]. *Estuaries and Coasts*, 2010, **33**(1): 1-14.
- [21] Zheng B H, Wang L P, Lei K, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River estuary and the adjacent area, China[J]. *Chemosphere*, 2016, **149**: 91-100.
- [22] Zheng B H, Ma Y Q, Qin Y W, *et al.* Distribution, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water in industrial affected areas of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(23): 23485-23495.
- [23] Liu S, Liu X R, Liu M, *et al.* Levels, sources and risk assessment of PAHs in multi-phases from urbanized river network

- system in Shanghai [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 555-567.
- [24] 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.
- [25] Sharma B M, Melymuk L, Bharat G K, *et al.* Spatial gradients of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air, atmospheric deposition, and surface water of the Ganges River basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1495-1504.
- [26] Badawy M I, Embaby M A. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water in Egypt [J]. *Desalination*, 2010, **251** (1-3): 34-40.
- [27] 昌盛, 耿梦娇, 刘琰, 等. 滹沱河冲洪积扇地下水中多环芳烃的污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36** (7): 2058-2066.
- Chang S, Geng M J, Liu Y, *et al.* Pollution characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons in the groundwater of Hutuo River pluvial fan [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36** (7): 2058-2066.
- [28] 苗迎, 孔祥胜, 李成展. 重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (1): 239-247.
- Miao Y, Kong X S, Li C Z. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in a Karst groundwater system in a strongly industrial city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (1): 239-247.
- [29] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析 [J]. *环境科学*, 2008, **29** (7): 1806-1810.
- Cui X H, Li B H, Chen H H. Contamination characteristics and pollutant sources analysis on PAHs in shallow groundwater in suburb of Taihu Plain [J]. *Environmental Science*, 2008, **29** (7): 1806-1810.
- [30] López-Macias R, Cobos-Gasca V, Cabañas-Vargas D, *et al.* Presence and spatial distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater of Merida City, Yucatan, Mexico [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, **102** (4): 538-543.
- [31] Yang H H, Lee W J, Chen S J, *et al.* PAH emission from various industrial stacks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, **60** (2): 159-174.
- [32] Zhang L F, Dong L, Ren L J, *et al.* Concentration and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in the surface water of the Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24** (2): 335-342.
- [33] 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.
- [34] 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 等. 温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源 [J]. *环境科学*, 2012, **33** (12): 4226-4236.
- Zhou J C, Chen Z L, Bi C J, *et al.* Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban rivers of Wenzhou City [J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (12): 4226-4236.
- [35] Masclet P, Cachier H, Lioussé C, *et al.* Emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons by savanna fires [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, **22** (1-2): 41-54.
- [36] Sofowote U M, McCarty B E, Marvin C H. Source apportionment of PAH in Hamilton Harbour suspended sediments; comparison of two factor analysis methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (16): 6007-6014.
- [37] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (4): 1587-1596.
- Ge W, Cheng Q Q, Chai C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from Shandong [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (4): 1587-1596.
- [38] Dobbins R A, Fletcher R A, Benner Jr B A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in flames, in diesel fuels, and in diesel emissions [J]. *Combustion and Flame*, 2006, **144** (4): 773-781.
- [39] Miao Y, Kong X S, Li C X. Distribution, sources, and toxicity assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of a heavy industrial city, Liuzhou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190** (3): 164.
- [40] 张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 等. 大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评估 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (1): 170-179.
- Zhang J Q, Hu T P, Xing X L, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of the PAHs in the surface sediments and water from the Daye Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (1): 170-179.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 张坤锋, 昌盛, 涂响, 等. 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 [J]. *环境科学*, 2022, **43** (2): 878-886.
- Zhang K F, Chang S, Tu X, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of DBPs in typical drinking water sources in Wuhan under the COVID-19 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (2): 878-886.
- [45] Meng Y, Liu X H, Lu S Y, *et al.* A review on occurrence and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lakes of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 2497-2506.
- [46] 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](http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/yb2004-c/indexch.htm), 2021-09-30.
- [47] 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.
- [48] Kalf D F, Crommentuijn T, van de Plassche E J. Environmental quality objectives for 10 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, **36** (1): 89-97.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)