环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.5
第41卷 第5期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第5期
2020年5月15日

目 次

上海大气 $PM_{2.5}$ 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 …… 周敏(1997)
不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 …… 吴梦曦, 成春雷, 黄渤, 李梅, 陈多宏(2006)
二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 …… 张淑佳, 徐亮, 郭新梅, 黄道, 李卫军(2017)
城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 …… 李欣悦, 张凯山, 邓林俐, 向锌鹏, 武文琪, 殷子渊(2026)
临沂市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素分布特征及来源解析 …… 陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 张楠, 王歆华, 余浩, 杨文, 王晓丽(2036)
西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 …… 谢雯文, 路瑞, 慕飞飞, 戚玉珍, 白文艳, 李彦鹏(2044)
北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 …… 何万清, 王天意, 邵霞, 聂磊, 石爱军(2050)
基于随机森林模型的中国 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素分析 …… 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 程先富(2057)
大气污染联合治理分区视角下的中国 $PM_{2.5}$ 关联关系时空变异特征分析 …… 杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 赵斌, 彭焕华(2066)
基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 …… 王耀庭, 梁加成, 郑祚芳, 李青春, 李威, 窦有俊(2075)
龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 …… 唐春雷, 郑秀清, 梁永平(2087)
三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 …… 唐小娅, 童思陈, 黄国鲜, 许光祥, 李丹(2096)
三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素a垂向分布特征 …… 杨凡, 纪道斌, 王丽婧, 李虹, 李莹杰(2107)
汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 …… 付适, 倪九派, 何丙辉, 李天阳, 唐毅, 钱田, 向可翠(2116)
白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 …… 刘鑫, 史斌, 孟晶, 周云桥, 可欣, 王铁宇(2127)
新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 …… 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 刘明亮, 虞左明, 吴志旭, 郑文婷, 王裕成, 笪文怡, 胡林娜(2137)
不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 …… 张柳青, 石玉, 李元鹏, 郭燕妮, 周蕾, 周永强, 张运林, 杨艳(2149)
水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价 …… 李衍庆, 黄廷林, 张海涵, 温成成, 杨尚业, 林子深, 高欣(2158)
人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 …… 王晨旭, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 徐金兰, 司凡, 张晗, 路林超(2166)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 …… 周石磊, 孙悦, 岳哿丞, 张航, 王周强, 刘世崇, 彭瑞哲, 苑世超, 李再兴, 崔建升(2177)
分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 …… 张海涵, 王燕, 黄廷林, 王晨旭, 路林超, 司凡, 李楠, 刘凯文, 闫苗苗, 苗雨甜(2188)
大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 …… 郭燕妮, 李元鹏, 石玉, 张柳青, 周蕾, 周永强, 张运林, 韩龙飞(2198)
秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 …… 林子深, 黄廷林, 杨尚业, 温成成, 李衍庆, 周石磊, 宋选社(2210)
长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 …… 贾天琪, 雷荣荣, 武小琳, 倪涛涛, 孙树睿, 郭伟, 刘文彬(2221)
太湖水体中NSAIDs的时空分布规律和生态风险评价 …… 廉杰, 李祎飞, 王晓暄, 叶彬, 邹华, 史红星(2229)
8种典型PhACs在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 …… 徐鑫磊, 刘建超, 陆光华(2239)
我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 …… 朱雅, 李一平, 罗凡, 李荣辉, 黄列, 程一鑫, 蒋裕丰(2247)
基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 …… 李永新, 王威, 何姝, 申泰铭(2257)
城郊流域源汇景观格局与水体抗生素的关系 …… 李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊(2264)
城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 …… 聂云汉, 陈浩, 李磊, 朱弈, 赵昕, 贾其隆, 徐慧婷, 叶建锋(2272)
方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 …… 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 吴俊麟, 辛慧敏, 黄良君(2281)
不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 …… 王智巧, 马杰, 陈雅丽, 翁莉萍, 顾亚陶, 李永涛(2292)
向日葵秸秆生物炭强化Fe(Ⅲ)/$S_2O_8^{2-}$ 体系降解苯甲酸 …… 孙鹏, 张凯凯, 张玉, 张延荣(2301)
非活化单过硫酸盐降解柳氮磺胺吡啶:动力学及机制 …… 丁曦, 张学维, 周润生, 宋哲, 严佳颖, 周磊, 修光利(2310)
贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 …… 杨钊, 李江, 向福亮, 李彦澄, 马凯, 谢锋(2320)
新型填料A/O生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮 …… 赵远哲, 杨永哲, 王海燕, 储昭升, 常洋, 董伟羊, 闫国凯, 王欢, 李丛宇(2329)
贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 …… 文刚, 王彤, 黄廷林, 万琪琪, 曹瑞华, 寇莉青, 杨尚业(2339)
连续流SNAD工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 …… 秦嘉伟, 信欣, 鲁航, 张萍萍, 王露蓉, 邹长武, 郭俊元(2349)
不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异 …… 姜滢, 郭萌蕾, 谢军祥, 常尧枫, 谢嘉玮, 陈重军, 沈耀良(2358)
反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 …… 陈亚, 印雯, 张星星, 张钰, 宋吟玲, 吴鹏, 徐乐中(2367)
土壤环境承载力评价体系构建与应用 …… 李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿(2373)
磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 …… 王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 任强, 马晓宇, 王洋洋(2381)
还原增溶强化EGTA淋洗修复重金属污染土壤 …… 张金永, 朱玉婷, 王明新, 韩莹, 葛嘉琦(2390)
不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 …… 付平南, 贡晓飞, 罗丽韵, 王琪, 李花粉(2398)
生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 …… 王舒, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 慈恩, 徐国鑫, 李娇, 高明(2406)
长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 …… 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 吴少君, 卢绪巧, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(2416)
施用生物炭对墁土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 …… 王强, 耿增超, 许晨阳, 郭靖宇, 李倩倩, 刘莉丽, 赵汉红, 杜旭光(2425)
间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N_2O 排放的影响 …… 张珂彬, 刘新亮, 康曼, 王毅, 沈健林, 李勇(2434)
缙云山森林植被类型对土壤产 N_2O 相关功能微生物的影响 …… 王鋆燕, 王富华, 罗东海, 吕盛, 王子芳, 高明(2445)
咸水滴灌对棉田土壤 N_2O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 …… 郭慧楠, 马丽娟, 黄志杰, 李美琪, 侯振安, 闵伟(2455)
有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 …… 储成, 吴赵越, 黄欠如, 韩成, 钟文辉(2468)
模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 …… 王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌(2476)
海洋沉积物中细菌DNA和RNA水平群落差异 …… 李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 贺惠, 甄毓(2485)
2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 …… 周婷, 马姣娇, 徐颂军(2496)
《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209, 2263, 2309)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第5期 2020年5月
Vol.41, No.5 May, 2020

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估

贾天琪[1,2], 雷荣荣[2], 武小琳[2], 倪涛涛[2], 孙树睿[2], 郭伟[1*], 刘文彬[2,3*]
(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古自治区环境污染控制与废物资源化重点实验室, 呼和浩特 010021; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 长江下游地区是我国一个典型的化学工业园区聚集地,化工园区企业生产过程中产生和排放的多环芳烃通过大气沉降、地表径流等方式进入支流水体,并最终汇入长江. 本研究选择了典型的支流水体,开展了多环芳烃的分布特征、源解析和生态风险评估研究. 结果表明多环芳烃单体以低环为主,总浓度为 37.27 ~ 285.88 ng·L^{-1},平均值为 78.31 ng·L^{-1}. PAHs 单体浓度范围 0 ~ 61.35 ng·L^{-1}, 检出率最低单体为苯并[k]荧蒽和苯并[a]芘,其检出率均为 75%. 苯并[a]芘是毒性当量因子最大的 PAHs,其浓度范围为 0 ~ 11.08 ng·L^{-1}. 根据我国《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)规定,饮用水中苯并[a]芘的限值为 10 ng·L^{-1},其中研究区域内无锡市的一个水样(S12)中浓度超出了标准限值,长江下游支流水体的 PAHs 浓度总体处于低至中等的污染水平. 根据比值法和主成分分析的源解析结果,水体中多环芳烃主要受化工排放、汽车尾气的影响,还有部分来自燃煤. 生态风险评估结果显示,水体的生态风险处于中等水平,从长期的环境暴露角度出发,应当考虑采取相应地控制措施,防止进一步污染. 研究结果可为长江下游支流水环境中多环芳烃风险评估以及化工园区的污染控制提供参考.

关键词: 多环芳烃(PAHs); 长江; 水体; 生态风险评估; 来源; 分布
中图分类号: X522 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)05-2221-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201911123

Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China

JIA Tian-qi[1,2], LEI Rong-rong[2], WU Xiao-lin[2], NI Tao-tao[2], SUN Shu-rui[2], GUO Wei[1*], LIU Wen-bin[2,3*]
(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Waste Resource Recycle, Ministry of Education, Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The lower reaches of the Yangtze River are a typical gathering place of chemical industrial parks in China. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emitted in the production process of chemical enterprises enter the tributary water body through atmospheric deposition and surface runoff, and finally merge into the Yangtze River. In this study, the distribution characteristics, source analysis, and ecological risk assessment of PAHs in a series of typical water samples collected in the tributary waters of the Yangtze River were studied. PAH monomers in the samples were mainly low-ring. The total concentration of PAHs was in the range of 37.27 to 285.88 ng·L^{-1} with a mean value of 78.31 ng·L^{-1}, while the monomer concentration of PAHs ranged from 0 to 61.35 ng·L^{-1}. The lowest detection rate was benzo [k] fluoranthene and benzo [a] pyrene at 75%. As a toxic PAH monomer, the concentration of benzo [a] pyrene ranged from 0 to 11.08 ng·L^{-1}. According to "Water Quality Standards for Drinking Water Sources (CJ 3020-1993)" of China, the concentration of benzo [a] pyrene in a water sample (S12) located near Wuxi City exceeded the limit of drinking water standards (10 ng·L^{-1}). Compared with the total concentration of PAHs in rivers in some typical regions of the world, the concentration of PAHs in this study was generally at low to moderate levels. According to the source analysis results of the ratio method and principal component analysis, the concentration of PAHs in water was mainly affected by fossil combustion, automobile exhaust, and chemical emissions. To assess the potential ecosystem risk of PAHs in the investigated area, the risk quotient (RQ) was used. In addition to the DBA monomer, the relative quantities (RQs) (replication) of the remaining monomers were greater than 1, and the RQ (MPCs) values in all the monomers were less than 1, indicating that the ecological risk of water samples was at a medium level. From the perspective of long-term environmental exposure, appropriate control measures should be considered to prevent further pollution. The results can provide reference for PAH risk assessment and pollution control of chemical industrial parks in the lower reaches of the Yangtze River.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); Yangtze River; water; risk assessment; source; distribution

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类环境中普遍存在的持久性有机污染物(POPs),由于其致癌和诱变特性,已经引起了广泛的关注[1]. 根据性质和分子量的不同可将 PAHs 分为两类,即含 2 ~ 3 环的低分子量(低环)PAHs

收稿日期: 2019-11-14; **修订日期**: 2019-12-17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1801602); 国家自然科学基金项目(21677169)
作者简介: 贾天琪(1996 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为 POPs 环境分析与控制对策,E-mail: tqijia@126.com
* 通信作者,E-mail: ndguowei@163.com; liuwb@rcees.ac.cn

(LMW PAHs)和含 4 ~6 环的高分子量(高环)PAHs(HMW PAHs),前者易挥发,具有急性毒性作用,对水生生物有一定的毒性;而后者中某一些具有强致癌、致突变性. 环境中的 PAHs 污染来源可分为自然来源和人为来源,自然来源指 PAHs 可以通过自然过程排放,如森林火灾、火山活动和生物的内源合成等过程,而环境中大多数 PAHs 由人为来源排放,包括化石燃料(即煤和石油等)和其他有机材料(如木材)的不完全燃烧[2]、某些化学工业的排放等[3]. PAHs 通过大气干湿沉降、地表径流、工业废水和生活污水等途径进入环境,并迁移到不同环境介质中[4~7]. 长江下游流经江苏和上海,该地区经济发达,分布着大量化学工业园区,是我国一个典型的化学工业园区聚集地. 化学工业生产和人群活动产生和排放的 PAHs 通过大气沉降、地表径流等方式进入支流水体,并最终汇入长江,可能会对下游地区生态环境产生影响[8~11]. 然而目前相关研究还很不足,有必要对该区域 PAHs 的分布及生态风险进行研究. 本文研究了长江下游地区典型支流水体中 PAHs 的分布特征,采用比值法和主成分分析法(PCA)分析其潜在来源,并采用风险熵数法对水体开展生态风险评估,以期为长江下游支流水环境中 PAHs 风险评估以及化工园区的污染控制提供参考.

1 材料与方法

1.1 化学标准品与主要试剂

19 种 PAHs 混合标准样品:萘(naphthalene, Nap)、2-甲基萘(2-methylnaphthalene, 2-Methylnap)、苊(acenaphthene, Ace)、苊烯(acenaphthylene, Any)、芴(fluorene, Fl)、菲(phenanthrene, Phe)、蒽(anthracene, Ant)、荧蒽(fluoranthene, Flu)、芘(pyrene, Pyr)、苯并[a]蒽[benzo(a)anthracene, BaA]、䓛(chrysene, Chr)、苯并[b]荧蒽[benzo(b)fluoranthene, BbF]、苯并[k]荧蒽[benzo(k)fluoranthene, BkF]、苯并[e]芘[benzo(e)pyrene, BeP]、苯并[a]芘[benzo(a)pyrene, BaP]、苝(perylene, Pery)、茚并[1,2,3-c,d]芘[indeno(1,2,3-cd)pyrene, IcdP]、二苯并[a,h]蒽[dibenz(ah)anthracene, DBA]和苯并[g,h,i]苝[Benzo(ghi)perylene, BghiP];14 种替代标准样品:氘代萘(D8-naphthalene, D8-Nap)、氘代 2-甲基萘(D10-2-methylnaphthalene, D10-2-2-Methylnap)、氘代苊烯(D8-acenaphthylene, D8-Acy)、氘代菲(D10-phenanthrene, D10-Phe)、氘代荧蒽(D10-fluoranthene, D10-Flu)、氘代苯并[a]蒽[D12-benzo(a)anthracene, D12-BaA]、氘代䓛(D12-chrysene, D12-Chr)、氘代苯并[b]荧蒽[D12-benzo(b)fluoranthene, D12-BbF]、氘代苯并[k]荧蒽[D12-benzo(k)fluoranthene, D12-BkF]、氘代苯并[a]芘[D12-benzo(a)pyrene, D12-BaP]、氘代芘(D12-perylene, D12-Pery)、氘代茚并[1,2,3-c,d]芘[D12-indeno(1,2,3-cd)pyrene, D12-IcdP]、氘代二苯并[a,h]蒽[D14-dibenz(ah)anthracene, D14-DBA]和氘代苯并[g,h,i]苝[D12-benzo(ghi)perylene, D12-BghiP];3 种内标化合物:氘代苊(D10-acenaphthene, D10-Ace)、氘代芘(D10-pyrene, D10-Pyr)和氘代苯并[e]芘[D12-benzo(e)pyrene, D12-BeP]均购于美国 Wellington 公司. 农残级的正己烷、丙酮、二氯甲烷均购于美国 J. T. Baker 公司.

1.2 样品采集

根据长江下游(江苏省和上海市)的典型化工园区及长江主要支流水体的分布特征,参考江苏省控断面,确定了研究区域的采样点,研究化工园区排放对长江下游的潜在环境影响. 2019 年 6 月,在长江下游主要支流水体共采集了 12 个水样,其中南通市 3 个采样点,分别为:S1、S3 和 S5;苏州市 2 个采样点,分别为 S2 和 S4;无锡市 3 个采样点,分别为:S6、S7 和 S12;泰州为采样点 S8;镇江为采样点 S9;扬州为采样点 S10;南京市为采样点 S11. 采样点具体分布如图 1 所示. 水体采集参考《水质 湖泊和水库采样技术指导》(GB/T 14581-93)和《水质采样方案设计技术规定》(GB 12997-91),采用 DN-100 型不锈钢采水器(容积为 2 L;直径 20 cm,高 20 cm)采集表层水体(水下约 25 cm). 样品储存于棕色玻璃瓶中,加入 5 mL 甲醇后放入冰箱内冷藏保存.

1.3 样品的前处理与测定

水样中的 PAHs 依据《海水中 16 种多环芳烃的测定气相色谱-质谱法》(GB/T 26411-2010)的方法,采用液液萃取法提取,取 1 L 水样转移至分液漏斗,加入 14 种 PAHs 的替代标准样品后,用 100 mL 的二氯甲烷振荡萃取 3 min,重复 3 次. 经无水硫酸钠过滤后,将所有有机相收集经旋转蒸发仪浓缩至 2 mL. 将样品转移至活化硅胶柱净化,再经旋转蒸发仪和氮吹定容至 1 mL,加入 PAHs 内标化合物进行 GC-MS 分析.

样品采用 Agilent 6890-5975 GC/MS 气质联用仪分析,色谱柱为 DB-5MS 型,规格为 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm,载气为高纯度氦气,采用不分流进样,进样量为 1 μL,色谱柱的升温程序为:初始温度为 50℃,以 20 ℃·min^{-1} 的速度升至 150℃,保持 2 min;再以 12 ℃·min^{-1} 的速度升至 290℃,保持

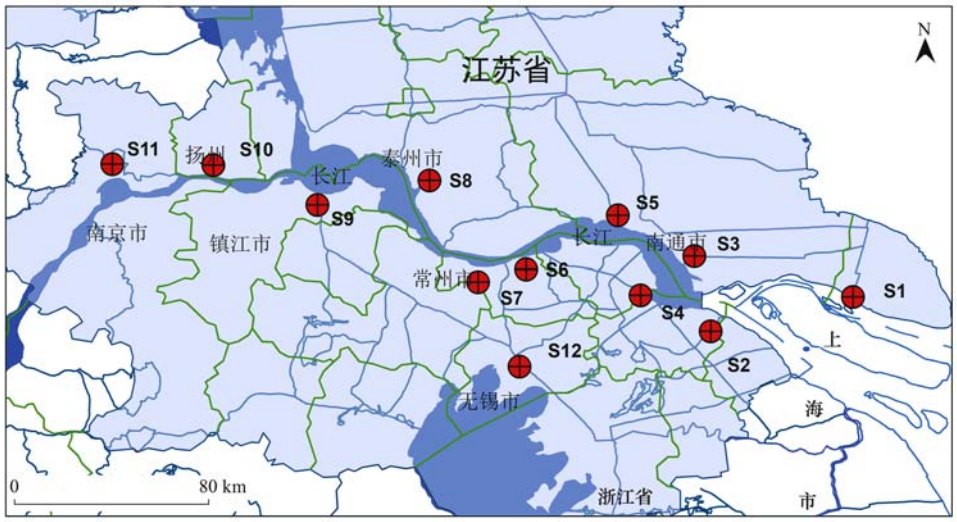

图 1　长江下游支流采样示意

Fig. 1　Sampling of the tributaries of the lower Yangtze River

7 min. 进样口温度 250℃，载气流量 1 mL·min^{-1}. 离子源为 EI 源，选择离子扫描(SIM)模式进行定量分析.

1.4　质量控制与质量保证

水样 19 种 PAHs 的方法检出限范围为 0.5 ~ 0.99 ng·L^{-1}，测试样品中加入 2 个现场空白和 2 个加标空白用于确定背景污染和人为影响情况，小于检出限(not detected, ND)的数据按 0 计算. 空白加标和 PAHs 替代物的回收率在 70% ~ 130% 之间，符合标准方法中质控要求.

2　结果与讨论

2.1　PAHs 含量特征

表 1 显示了长江下游支流水体中 PAHs 浓度的最大值、最小值、平均值和中位值. 水体中 $\sum$PAHs 浓度范围为 37.27 ~ 285.88 ng·L^{-1}，平均值为 78.31 (±88.97) ng·L^{-1}，中位值为 51.10 ng·L^{-1}. PAHs 单体浓度范围 0 ~ 61.35 ng·L^{-1}，浓度最高的单体为苯并[e]芘，浓度为 61.35 ng·L^{-1}；浓度较低的单体为苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、苝、茚并[1,2,3-c,

表 1　长江下游支流水体中 PAHs 单体浓度

Table 1　PAHs monomer concentration in the tributary waters of the lower reaches of the Yangtze River

PAHs 单体	检出率/%	浓度/ng·L^{-1}		
		范围	平均值	中位值
萘	100.00	10.72 ~ 29.52	15.99(±5.09)	14.81
2-甲基萘	100.00	5.67 ~ 13.18	9.02(±2.67)	8.54
苊	100.00	0.55 ~ 1.81	0.85(±0.33)	0.75
苊烯	100.00	0.39 ~ 5.58	1.58(±1.51)	1.10
芴	100.00	1.45 ~ 5.85	2.44(±1.20)	2.11
菲	100.00	4.19 ~ 27.12	9.34(±6.49)	7.00
蒽	100.00	0.27 ~ 3.90	0.99(±1.02)	0.62
荧蒽	100.00	1.21 ~ 33.12	5.94(±8.78)	3.82
芘	100.00	1.18 ~ 30.23	6.71(±8.38)	4.39
苯并[b]荧蒽	100.00	0.76 ~ 28.24	3.14(±7.91)	0.82
苯并[k]荧蒽	83.30	ND* ~ 18.63	3.60(±6.14)	1.06
苯并[e]芘	100.00	0.05 ~ 61.35	7.74(±17.01)	2.56
苯并[a]芘	75.00	ND ~ 14.58	1.69(±4.11)	0.35
苝	91.70	ND ~ 12.66	1.77(±3.55)	0.39
茚并[1,2,3-c,d]芘	75.00	ND ~ 11.08	1.34(±3.12)	0.27
二苯并[a,h]蒽	100.00	0.06 ~ 6.14	1.46(±1.97)	0.69
苯并[g,h,i]苝	100.00	0.05 ~ 13.67	1.82(±3.80)	0.60
苯并[b]荧蒽	83.30	ND ~ 2.33	0.32(±0.66)	0.03
苯并[k]荧蒽	91.70	ND ~ 15.45	2.57(±4.24)	1.19
$\sum$PAHs	—	37.27 ~ 285.88	78.31(±88.97)	51.10

d]芘、苯并[b]荧蒽和苯并[k]荧蒽,在部分样品低于检出限. 检出率最低单体为苯并[k]荧蒽和苯并[a]芘,其检出率均为75%.

苯并[a]芘是毒性当量因子最大的PAHs,其浓度范围为0~11.08 ng·L^{-1}. 根据我国《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)规定,饮用水中苯并[a]芘的限值为10 ng·L^{-1},其中研究区域内无锡市的一个水样(S12)中浓度超出了标准限值,在Cai等[12]和Zhu等[13]的研究中也发现无锡市附近的土壤样品中PAHs浓度较高,应引起足够重视.

PAHs的环数分布见图2,其中2、3、4、5和6环PAHs分别占$\sum$PAHs的43.4%(±16.2%)、22.4%(±7.2%)、18.5%(±9.8%)、11.8%(±10.3%)和3.9%(±3.3%). 水体中以低环PAHs为主,2环和3环的PAHs占比较高,2~3环PAHs共占$\sum$PAHs的65.8%(±21.2%),高环占比相对较低,4~6环PAHs共占$\sum$PAHs的34.2%(±21.2%). 这可能与PAHs的物化性质以及来源有关,影响PAHs在水、土等介质之间质量分配的主要因素为PAHs的辛醇-水分配系数(K_{ow}). 高环的PAHs分子量较大,具有较大的K_{ow}值,较低的水溶性(<0.01 mg·L^{-1}),有亲脂疏水性,易吸附在土壤有机质中而难于迁移[14];而低环PAHs分子量较低(MW<210),具有较小的辛醇-水分配系值(K_{ow}<5),更易存在于水体中,导致水体中低环PAHs相对较高.

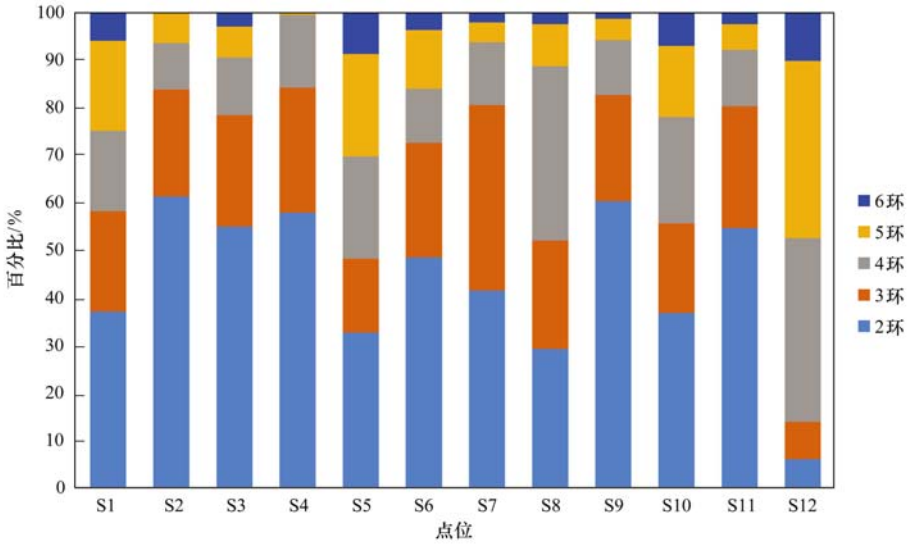

图2 长江下游支流中PAHs的环数分布

Fig. 2 Compositional patterns of PAHs by ring size in the lower reaches of the Yangtze River

2.2 PAHs空间分布

各采样点的$\sum$PAHs空间分布状况如图3所示. 水体中$\sum$PAHs总体分布范围在37.27~285.88 ng·L^{-1},除采样点S7、S8以及S12浓度较高外,其他采样点浓度较低且水平相近. 最高值出现在S12,浓度值为285.88 ng·L^{-1},以高环PAHs为主,占总浓度的88.11%,主要贡献来源于荧蒽和苯并(b)荧蒽两种化合物. 调研发现该工业园区以精细化工、冶金为主,可能含有较多的高环PAHs. S7和S8分别为长江在泰州和无锡的入境断面,其浓度分别为102.65 ng·L^{-1}和104.53 ng·L^{-1}. S7和S8位于工业园区密集区域河段,其主要贡献来源于萘、二甲基萘和菲这3种化合物,以低环PAHs为主. 说明水体中PAHs空间分布可能受到化工园区污染物排放的影响.

2.3 长江下游支流水体与其他典型地区PAHs污染水平比较

表2汇总了全球部分典型地区河水中的PAHs总浓度,比较而言长江下游支流水体的PAHs处于低至中等水平. PAHs的总浓度与Liu等[27]在上海城市河网(46.53~221.54 ng·L^{-1})、Aziz等[25]在苏安河(61~207 ng·L^{-1})以及Wang等[26]在黄河三角洲(64.8~334.6 ng·L^{-1})的研究相差不大,略高于三峡水库[15](13.8~97.2 ng·L^{-1})、晋江[16](42.02~63.00 ng·L^{-1})、三峡水库支流[29](1.92~40.33 ng·L^{-1})、易北河,埃姆斯河,威悉河[22](13~140 ng·L^{-1})和莫斯科河[24](50.6~120.1 ng·L^{-1}),显著低于大辽河口及邻近地区[17](71.12~4 255.43 ng·L^{-1})、鳌江[18](909.9~1 519.8 ng·L^{-1})、黄河(河南河段)[19](144.3~2 360 ng·L^{-1})、钱塘江[21](70.3~1 844.4 ng·L^{-1})和考卡河[23](52.1~12,

图 3　长江下游支流水体中 ∑PAHs 浓度

Fig. 3　Concentration of ∑PAHs in the tributaries of the lower reaches of the Yangtze River

表 2　其他典型地区河水中的 ∑PAHs 总浓度

Table 2　Comparison of concentrations of ∑PAHs in water with other areas

地点	采样年份	PAHs 单体数量	PAHs 浓度范围（均值）/ng·L^{-1}	国家	文献
长江下游支流	2019	19	37.27 ~ 285.88	中国	本研究
三峡水库	2008	16	13.8 ~ 97.2(30.11)	中国	[15]
晋江	2011	16	42.02 ~ 63.00(53.23)	中国	[16]
大辽河口及邻近地区	2013	16	71.12 ~ 4 255.43(748.76)	中国	[17]
鳌江	—	15	909.9 ~ 1519.8	中国	[18]
黄河(河南河段)	2005 ~ 2006	16	144.3 ~ 2 360 (662)	中国	[19]
淮河(上游)	2013	15	79.79 ~ 421.07 (140.37)	中国	[20]
钱塘江	2005	15	70.3 ~ 1 844.4 (283.3)	中国	[21]
下萨克森州的易北河,埃姆斯河,威悉河	2009 ~ 2012	16	13 ~ 140	德国	[22]
考卡河	2010 ~ 2011	12	52.1 ~ 12, 888.2 (2344.5)	哥伦比亚	[23]
莫斯科河	2013	15	50.6 ~ 120.1	俄罗斯	[24]
苏安河	2013	17	61 ~ 207 (134.4)	巴基斯坦	[25]
黄河三角洲	2007	16	64.8 ~ 334.6 (121.3)	中国	[26]
上海城市河网	2015	16	46.53 ~ 221.54 (112.92)	中国	[27]
三峡水库支流	2015	16	1.92 ~ 40.33 (14.72)	中国	[28]
长三角地区	2010	16	12.9 ~ 638.1(201.1)	中国	[29]

888.2 ng·L^{-1})等地.

2.4　PAHs 的污染来源解析

PAHs 的人为来源比较复杂,主要包括化石燃料的不完全燃烧和化工生产排放等[30]. 为解析长江下游支流水体中 PAHs 的来源,采用比值法和主成分分析两种方法识别 PAHs 的来源.

2.4.1　比值法

由于同系物的分布与具有相似特征的有机物含碳物质的形成机制密切相关,可以通过单个 PAHs 化合物的诊断率来确定 PAHs 的来源[31]. Ant、Phe、Flt 和 Pyr 等具有相对稳定的特征, Ant/(Phe + Ant)、Flt/(Flt + Pyr)和 BaA/(BaA + Chr)、IP/(IP + BghiP)的比值被广泛用于 PAHs 来源分析[32]. 水样中 Ant/(Phe + Ant)、BaA/(BaA + Chr)、IP/(IP + BghiP)和 Flt/(Flt + Pyr)的比值见图 4.

由图 4 可以看到, Flt/(Flt + Pyr)的比值在 0.3 ~ 0.55 之间,大部分比值均小于 0.5; Ant/(Phe + Ant)的比值在 0.05 ~ 0.25 之间,大部分比值小于 0.1; BaA/(BaA + Chr)的比值在 0 ~ 1.0 之间,大部分比值大于 0.35;而 IP/(IP + BghiP)的比值大部分小于 0.5. 通常认为, Ant/(Phe + Ant)比值小于 0.1 时,表示 PAHs 主要来自石油源,大于 0.1 主要为燃烧源; 当 Flt/(Flt + Pyr) 比值小于 0.5 时,表示其主要来源为石油源,大于 0.5 为煤和草、木柴等生物燃料的燃烧;当 BaA/(BaA + Chr) 比值小于 0.2 时,其主要来源为石油源,大于 0.35 为燃烧源,介于 0.2 和 0.35 之间为混合源;当 IP/(IP + BghiP)比值小于 0.5 为石油燃烧, 大于 0.5 为生物质或煤的燃

烧[33,34]. 由图 4(a) ~4(c)可知,除 S12、S5 和 S9 外,大部分点位处于燃烧区域内,由此可见,长江下游水体中的 PAHs 主要来源于燃烧.

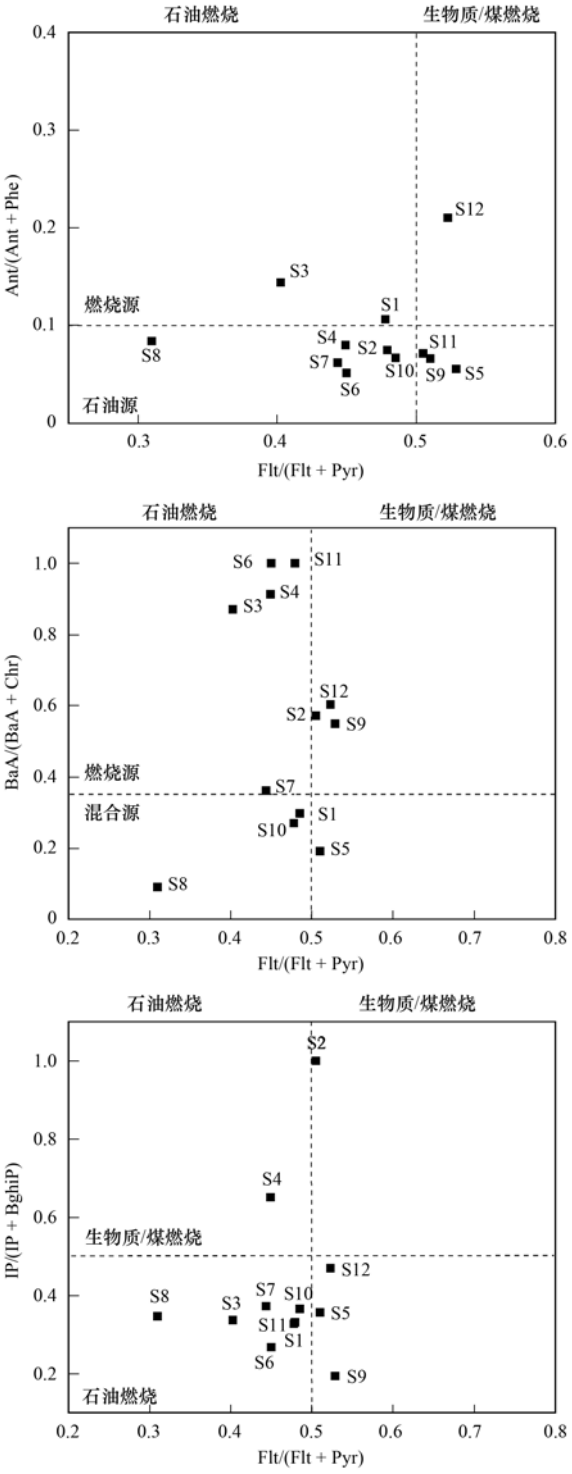

图 4 水中 PAHs 来源的比值法

Fig. 4 Source identification by isomer ratios of PAHs in water

2.4.2 主成分分析法

以 19 种 PAHs 单体作为变量,并参考了已有研究中典型的化工源[3]和燃烧源[29]的 PAHs 数据,采用主成分分析法对 PAHs 来源进行解析,结果如图 5 所示. PC1 解释了总方差的 74.8%,该因子包括低分子量 PAHs (Nap、2-Methyl、Acy、Ace、Ant、Flu 和 Phe). PC2 包含高分子量 PAHs (Flt、Pyr、BaA、Chr、BbF、BkF、BeP、BaP、Pery、IcdP、DBA 和 BghiP). 所有采样点可分为两组,第一组样品共 11 个采样点(S1 ~S11),其 PC1 较高而 PC2 相对较低,表明主要受低环 PAHs 影响较多. 但相较于其他 7 个采样点,S8、S5、S10 和 S1 的 PC2 相对较高,表明采样点还受到高环 PAHs 的影响. 第一组样品与燃烧源较为接近,但可能还受到了其他源的影响. 第二组中共 1 个采样点(S12),该采样点 PC2 较高而 PC1 相对较低,表明主要受高环 PAHs 的影响,采样点与化工源点位非常接近,说明受到了化工排放的影响.

两种方法得出的结论一致:长江下游支流水体中的 PAHs 以燃烧源为主,但是可能还受到了化工排放的影响.

2.5 生态风险评估

本研究只计算美国联邦环保署列入优先控制污染物 16 种 PAHs,采用风险熵值(RQ)对调查区 PAHs 潜在生态风险进行评价. 通过比较水中 PAHs 含量与其相应的质量值[30],计算 RQ 结果如下:

$$RQ_i = C_{PAHs}/C_{QV}$$

式中,C_{PAHs} 为水样中 PAHs 的浓度,C_{QV} 为水样中 PAHs 的相应质量值. 通常,在计算风险熵时,经常使用水中 PAHs 的可忽略浓度(NCs)和最大允许浓度(MPCs). 因此,$RQ_{(NCs)}$ 和 $RQ_{(MPCs)}$ 定义如下:

$$RQ_{(NCs)} = C_{PAHs}/C_{QV(NCs)}$$

$$RQ_{(MPCs)} = C_{PAHs}/C_{QV(MPCs)}$$

式中,$C_{QV(NCs)}$ 是水中 PAHs 的 NCs 质量值,$C_{QV(MPCs)}$ 是水中 PAHs 的 MPCs 质量值.

此外,上述 RQ 的计算方法只适用于评估 PAHs 的 10 个单体生态系统风险,而其他 6 个 PAHs 单体(Acy、Ace、Fl、Pyr、BbF 和 DBA)采用 Cao 等[35]推荐的 NC 和 MPC 值. 本研究认为 $RQ_{(NCs)} < 1.0$ 表示 PAHs 产生的生态风险可忽略不计,而 $RQ_{(MPCs)} > 1.0$ 则表明 PAHs 的污染严重,须立即采取控制和补救措施. 如果 $RQ_{(NCs)} > 1.0$ 和 $RQ_{(MPCs)} < 1.0$,这表明 PAHs 污染可列为中等水平,则可能需要采取一些措施控制污染.

16 种 PAHs 的风险熵值结果如表 3 所示,除 DBA 单体外,其余单体 $RQ_{(NCs)}$ 均大于 1,而所有单体的 $RQ_{(MPCs)}$ 值均低于 1,其中 BbF 单体的 $RQ_{(NCs)}$ 值最高,其 $RQ_{(NCs)}$ 值为 77.43,$RQ_{(MPCs)}$ 值为 0.77,单体 BaA 的 $RQ_{(NCs)}$ 值也较高,其 $RQ_{(NCs)}$ 值为 31.37,$RQ_{(MPCs)}$ 值为 0.31,风险熵值均处于中等偏高的水平,表明这些单体会对长江下游水体造成一定的危害,且水体中 PAHs 造成生态风险处于中等

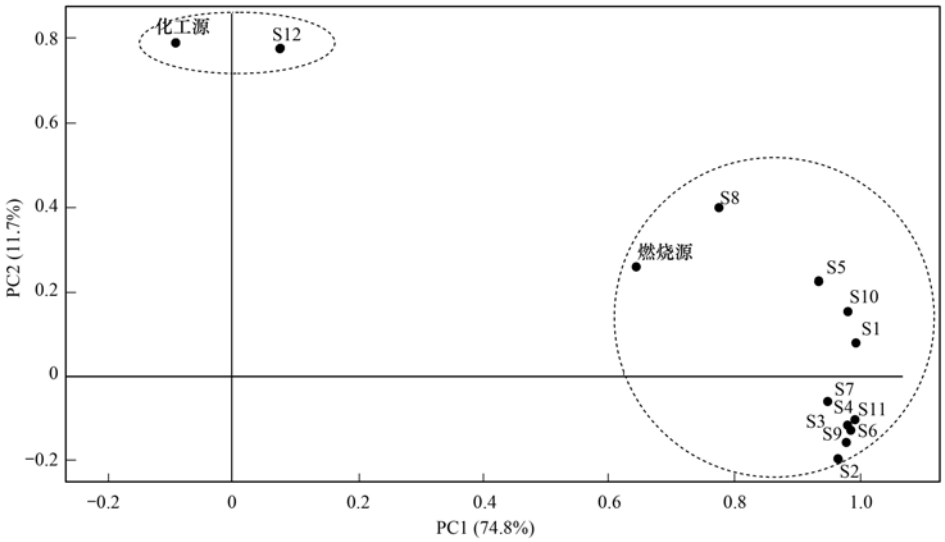

图 5　长江下游支流水体中 PAHs 的主成分

Fig. 5　Main components of PAHs in tributaries of the lower reaches of the Yangtze River

表 3　长江下游支流水体中 PAHs 的风险熵值

Table 3　Risk assessment of PAHs in tributaries of the lower reaches of the Yangtze River

项目	NCs	MPCs	平均浓度 /ng·L^{-1}	$RQ_{(NCs)}$	$RQ_{(MPCs)}$
Nap	12.0	1 200	15.99	1.33	0.01
Any	0.7	70	0.85	1.21	0.01
Ace	0.7	70	1.58	2.26	0.02
Flu	0.7	70	2.44	3.48	0.03
Phe	3.0	300	9.34	3.11	0.03
Ant	0.7	70	0.99	1.41	0.01
Flt	3.0	300	5.94	1.98	0.02
Pyr	0.7	70	6.71	9.59	0.10
BaA	0.1	10	3.14	31.37	0.31
Chr	3.4	340	3.60	1.06	0.01
BbF	0.1	10	7.74	77.43	0.77
BkF	0.4	40	1.69	4.22	0.04
BaP	0.5	50	1.34	2.68	0.03
IcdP	0.4	40	1.82	4.54	0.05
DBA	0.5	50	0.32	0.65	0.01
Bghip	0.3	30	2.57	8.58	0.09
∑PAHs	27.2	2 720	66.06	2.43	0.02

水平,从长期的环境暴露角度出发,可以考虑采取相应地控制措施,防止 PAHs 的进一步污染.

3　结论

(1)在长江中下游支流收集的水样中不同程度检测到了 PAHs, ∑PAHs 浓度范围为 37.27 ~ 285.88 ng·L^{-1}(均值为 78.31 ng·L^{-1}),无锡采样水体中多环芳烃含量最高污染最严重,其浓度为 285.88 ng·L^{-1}. PAHs 单体中 2 环、3 环和 4 环检出率较高, 5 ~6 环检出率相对较低.

(2)通过比值法和主成分分析均得出长江下游支流水体中受低环 PAHs 影响较多,以燃烧源为主;少量在化工园区附近的采样点高环 PAHs 比例较高,说明水体中 PAHs 空间分布受到工业园区污染物排放的强烈影响.

(3)生态风险评估结果显示,在长江中下游支流水体中未发现生态系统风险,除 DBA 单体外,其余单体 $RQ_{(NCs)}$ 均大于 1,而所有单体的 $RQ_{(MPCs)}$ 值均低于 1,但其 PAHs 造成污染可列为中等水平,从长期的环境暴露角度出发,可以考虑采取相应地控制措施,防止 PAHs 的进一步污染.

参考文献:

[1] Bouloubassi I, Roussiez V, Azzoug M, *et al*. Sources, dispersal pathways and mass budget of sedimentary polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the NW Mediterranean margin, Gulf of Lions[J]. Marine Chemistry, 2012, **142-144**: 18-28.

[2] 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.

[3] 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.

[4] Mitra S, Bianchi T S. A preliminary assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon distributions in the lower Mississippi River and Gulf of Mexico[J]. Marine Chemistry, 2003, **82**(3-4): 273-288.

[5] Patrolecco L, Ademollo N, Capri S, *et al*. Occurrence of priority hazardous PAHs in water, suspended particulate matter, sediment and common eels (*Anguilla anguilla*) in the urban stretch of the River Tiber (Italy)[J]. Chemosphere, 2010, **81**(11): 1386-1392.

[6] 董磊, 汤显强, 林莉, 等. 长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2588-2599.
Dong L, Tang X Q, Lin L, *et al*. Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters during high water level periods in the Wuhan section of the Yangtze River, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2588-2599.

[7] 付璐婧, 李一兵, 乔梦, 等. 多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 256-262.
Fu L J, Li Y B, Qiao M, *et al*. Distribution and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in wastewater-receiving rivers in Beijing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 256-262.

[8] Liu Y, Chen L, Huang Q H, *et al*. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of the Huangpu River, Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(8): 2931-2938.

[9] Liu Y, Chen L, Zhao J F, *et al*. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of rivers and an estuary in Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2008, **154**(2): 298-305.

[10] Mai B X, Fu J M, Sheng G Y, *et al*. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2002, **117**(3): 457-474.

[11] Liu M, Hou L J, Xu S Y, *et al*. Organic carbon and nitrogen stable isotopes in the intertidal sediments from the Yangtze Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, **52**(12): 1625-1633.

[12] Cai C Y, Li J Y, Wu D, *et al*. Spatial distribution, emission source and health risk of parent PAHs and derivatives in surface soils from the Yangtze River Delta, eastern China [J]. Chemosphere, 2017, **178**: 301-308.

[13] Zhu Y, Tao S, Sun J T, *et al*. Multimedia modeling of the PAH concentration and distribution in the Yangtze River Delta and human health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2019, **647**: 962-972.

[14] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] Li J W, Shang X, Zhao Z X, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water, sediment, soil, and plants of the Aojiang River waterway in Wenzhou, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **173**(1-3): 75-81.

[19] Sun J H, Wang G L, Chai Y, *et al*. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan Reach of the Yellow River, Middle China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(5): 1614-1624.

[20] Liu M L, Feng J L, Hu P T, *et al*. Spatial-temporal distributions, sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water and suspended particular matter from the upper reach of Huaihe River, China [J]. Ecological Engineering, 2016, **95**: 143-151.

[21] 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.

[22] Siemers A K, Mänz J S, Palm W U, *et al*. Development and application of a simultaneous SPE-method for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), alkylated PAHs, heterocyclic PAHs (NSO-HET) and phenols in aqueous samples from German rivers and the North Sea[J]. Chemosphere, 2015, **122**: 105-114.

[23] 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.

[24] Eremina N, Paschke A, Mazlova E A, *et al*. Distribution of polychlorinated biphenyls, phthalic acid esters, polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine substances in the Moscow River, Russia [J]. Environmental Pollution, 2016, **210**: 409-418.

[25] Aziz F, Syed J H, Malik R N, *et al*. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Soan River, Pakistan: insights into distribution, composition, sources and ecological risk assessment [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **109**: 77-84.

[26] Wang L L, Yang Z F, Niu J F, *et al*. Characterization, ecological risk assessment and source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons in water column of the Yellow River Delta, one of the most plenty biodiversity zones in the world[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **169**(1-3): 460-465.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] Mei Y, Wu F C, Wang L Y, *et al*. Binding characteristics of perylene, phenanthrene and anthracene to different DOM fractions from lake water[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(4): 414-423.

[32] Murray K E, Thomas S M, Bodour A A. Prioritizing research for trace pollutants and emerging contaminants in the freshwater environment[J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(12): 3462-3471.

[33] Nadal M, Schuhmacher M, Domingo J L. Levels of PAHs in soil and vegetation samples from Tarragona County, Spain [J]. Environmental Pollution, 2004, **132**(1): 1-11.

[34] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.

[35] Cao Z G, Liu J L, Luan Y, *et al*. Distribution and ecosystem risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Luan River, China[J]. Ecotoxicology, 2010, **19**(5): 827-837.

HUANJING K0EXUE
Environmental Science (monthly)
Vol. 41 No. 5
May 15, 2020

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Shanghai: Using Hourly Resolved $PM_{2.5}$ Chemical Composition Data ····· ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles ····· WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, *et al.* (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core: Based on Mircro-scale Single Particle Analysis ····· ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, *et al.* (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas ····· LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, *et al.* (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Linyi ····· LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, *et al.* (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China ····· XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, *et al.* (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants ····· HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, *et al.* (2050)
$PM_{2.5}$ Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model ····· XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, *et al.* (2057)
Spatio-temporal Variation of $PM_{2.5}$ Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention ····· YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, *et al.* (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data ····· WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, *et al.* (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment ····· TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir ····· TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, *et al.* (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir ····· YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, *et al.* (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation ····· FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, *et al.* (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake ····· LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, *et al.* (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China ····· SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, *et al.* (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios ····· ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, *et al.* (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir ····· LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir ····· WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period ····· ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, *et al.* (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir ····· ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, *et al.* (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River ····· GUO Yan-ni, LI Yuan-peng, SHI Yu, *et al.* (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer ····· LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, *et al.* (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China ····· JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, *et al.* (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment ····· LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, *et al.* (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on *Daphnia magna* ····· XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with *Eucalyptus* Plantation, Southern China ····· ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, *et al.* (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning ····· LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, *et al.* (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed ····· LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, *et al.* (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff ····· NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, *et al.* (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments ····· BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions ····· WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, *et al.* (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(Ⅲ)/$S_2O_8^-$ System for Degradation of Benzoic Acid ····· SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, *et al.* (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine: Kinetics and Mechanism Investigations ····· DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, *et al.* (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou ····· YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, *et al.* (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers ····· ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, *et al.* (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers ····· WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, *et al.* (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR) ····· QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, *et al.* (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions ··· JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, *et al.* (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitritation and Anaerobic Ammonium Oxidation ····· CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, *et al.* (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity ····· LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, *et al.* (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils ····· WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, *et al.* (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization ····· ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, *et al.* (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties ····· FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, *et al.* (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland ····· WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, *et al.* (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration ····· WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, *et al.* (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil ····· WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, *et al.* (2425)
N_2O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills ····· ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, *et al.* (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain ····· WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, *et al.* (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields ····· GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, *et al.* (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils ····· CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, *et al.* (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest ····· WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, *et al.* (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments ····· LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, *et al.* (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013 ····· ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)