

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 耶海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价

王成龙^{1,2}, 邹欣庆^{1,2*}, 赵一飞^{1,2}, 李宝杰^{1,2}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 2. 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093)

摘要: 为研究长江流域水体中多环芳烃(PAHs)污染特征和生态风险, 于 2015 年 8 月采集了长江干流及主要支流水体样品 19 个. 使用固相萃取方法提取 PAHs, 经净化后, 利用气相色谱-质谱联用仪测定了 16 种优先控制 PAHs ($\sum$ PAHs) 的浓度. 结果表明, 水体中 $\sum$ PAHs 浓度范围为 17.7 ~ 110 ng·L⁻¹, 平均浓度为 42.6 ng·L⁻¹. 水体中 PAHs 主要以低环为主(2~3 环), 占水体 $\sum$ PAHs 总量的 67.7%. 同分异构体比值法表明, 研究区 PAHs 主要来自于化石燃料和木材等生物质燃料燃烧的产物以及石油类物质泄漏和化石燃料燃烧混合产物. 正定矩阵因子分解法(PMF)结果表明, 研究区 PAHs 主要有 4 种来源, 依次为: 生物质和煤炭燃烧混合源 40.1%, 石油源 19.6%, 交通源 17.5%, 焦炭源 22.8%. 生态风险评价结果表明, 低环 PAHs 的生态风险处于较高水平, 各采样点风险熵值表明, 乌江站及下游区域生态风险较高, 但总体看来, 长江流域总体生态风险处于较低水平.

关键词: 多环芳烃; 长江流域; 表层水体; 来源; 分布; 生态风险

中图分类号: X131.2; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3789-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.10.016

Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China: Based on PMF Model

WANG Cheng-long^{1,2}, ZOU Xin-qing^{1,2*}, ZHAO Yi-fei^{1,2}, LI Bao-jie^{1,2}

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Key Laboratory for Coast and Island Development, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: To study the features and ecological risk of PAHs in surface water from Yangtze River, 19 water samples were collected from the main stream and branch of Yangtze River in August 2015. Solid phase extraction method was used to extract PAHs, and the concentrations of the 16 priority PAHs were determined using GC-MS. The results indicated that the concentration of total PAHs ($\sum$ PAHs) in the surface water ranged from 17.7-110 ng·L⁻¹ with an average value of 42.6 ng·L⁻¹. The predominant PAHs in the water were PAHs with 2-3 rings, accounting for 67.7% of $\sum$ PAHs. The results of molecular diagnostic ratios indicated that the origin of PAHs was mostly combustion sources, including fossil fuel and biomass combustion. PMF model was used to quantitatively acquire the source contribution of PAHs, which indicated that four sources were identified and their contribution rates were respectively biomass and coal combustion (40.1%), petroleum source (19.6%), traffic source (17.5%) and coke oven source (22.8%). The results of ecological risk assessment indicated that PAHs with 2-3 rings had a relatively high risk level, and Wujiang station and lower reach had a relatively high risk level based on risk quotient. Overall, the ecological risk of PAHs in the Yangtze River was at a relatively low level.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; Yangtze River; surface water; source; distribution; ecological risk

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类环境中广泛存在的,具有“三致”毒性(致癌性、致畸性和致突变性),可对环境和人体健康造成不良影响的持久性有机污染物^[1~3]. 环境介质中的 PAHs 主要由人类活动产生,包括化石燃料(煤、石油等)和生物质燃料的不完全燃烧、汽车尾气及漏油事件等^[4,5]. 水体中的 PAHs 主要来自大气沉降、地表径流、工业和市政废水及航运等.

PAHs 具有疏水性和亲脂性,进入水体环境中很容易吸附到细颗粒物质表面,并最终沉降到底质沉积物中^[2,6]. 河流作为陆源污染物质(包括 PAHs)入

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-05-05

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CB956503); 国家自然科学基金项目(41471431)

作者简介: 王成龙(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为近海环境持久性有机污染物环境行为及生态效应, E-mail: clwang1991@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zouxq@nju.edu.cn

海的重要途径,对于海洋环境尤其是近岸海域的环境质量有重要影响.因而,了解河流水体中 PAHs 的污染特征对于研究近岸海域水体污染有显著意义.

长江是我国第一大河,同时也是世界上输沙量第四和径流量第三的河流^[7],全长6 300 km,流域面积 1.8×10^6 km²,流域总人口超过4亿^[8,9].据估算,长江流域沿途各省 PAHs 的排放通量约为 9.3×10^3 t·a⁻¹,约为全国排放总量的36.8%^[10].目前,有关长江流域 PAHs 的研究已有相关报道,涉及水体、悬浮物以及沉积物^[2,6,10].但是,相关研究多集中于上游地区,缺乏对于中下游地区,甚至是全流域的整体研究.本研究采集了长江干流及主要支流的水体

样品,对16种优先控制 PAHs 的来源、分布、组成及生态风险进行初步调查分析.

1 材料与方法

1.1 样品采集

长江流域水体样品采集于2015年7月进行,共布设采样站位19个,覆盖了长江干流(13个站位)和主要支流(7个站位),见图1.每个站位采集表层水体5 L,现场将水样经0.7 μm 孔径玻璃纤维滤膜(Whatman, GF/F, 450℃高温灼烧5 h)进行过滤,然后将滤液收集到预先处理好的棕色玻璃瓶中,用冰袋保护尽快运回实验室置于冰箱中4℃保存,一周内完成样品前处理.

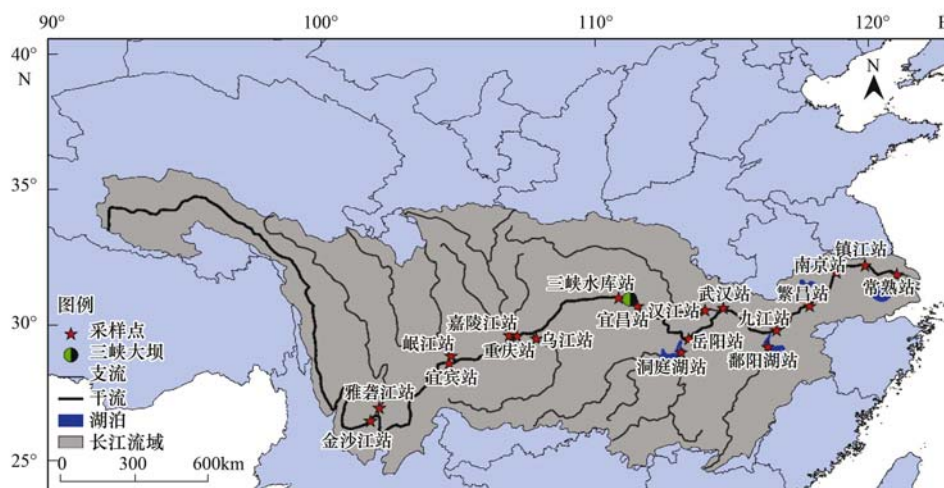


图1 长江流域采样站位

Fig. 1 Sampling sites in Yangtze River basin

1.2 PAHs 分析

1.2.1 仪器与试剂

仪器主要包括:SHIMADZU QP2010 Ultra GC/MS 气相色谱质谱联用仪;C18 固相萃取小柱[Supelco, 500 mg·(3 mL)⁻¹];氮吹仪,旋转蒸发仪.

试剂主要包括:甲醇、二氯甲烷、正己烷、丙酮(均为色谱纯,Tedia公司);16种PAHs混合标准品(美国Supelco公司),包括:萘(Nap)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、苊(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Flo)、芘(Pyr)、苯并(a)蒽(BaA)、䓛(Chr)、苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BaP)、茚并(1,2,3-cd)芘(IcdP)、二苯并(a,h)蒽(DahA)、苯并(ghi)芘(二苯并(a,h)芘(BghiP)).

1.2.2 样品分析

水体样品的前处理主要参考文献[11],采用固

相萃取方法提取 PAHs. 首先,分别用 3 × 3 mL(每次 3 mL,重复 3 次)正己烷、二氯甲烷、甲醇和去离子水对 C18 小柱进行活化;然后,准确量取 2 L 过滤后水样加入 100 mL 甲醇混合均匀后,经 C18 小柱进行固相萃取,萃取完成后通入高纯氮气将小柱干燥;样品洗脱,先加入 1.5 mL 丙酮,继而加入 3 mL 二氯甲烷,重复上述步骤一次,收集洗脱液.将洗脱液通过盛有 10 cm 无水硫酸钠的层析柱脱水,并用 10 mL 二氯甲烷继续淋洗层析柱.脱水后的洗脱液经旋转蒸发仪浓缩至约 1 mL,用 10 mL 正己烷进行置换,并再次浓缩至 1 mL 左右,待上机测试.

本研究中 PAHs 的分析采用岛津 QP2010 Ultra GC/MS,色谱柱为 Rtx-5MS 石英毛细管色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);色谱柱升温程序如下:初始温度 80℃,维持 2 min,然后以 20℃·min⁻¹的速率升温至 180℃,维持 5 min,再以 10℃·min⁻¹的速

率升温至 290℃,维持 15 min;进样口温度 290℃,采用无分流进样,载气为氦气,流速 1.0 mL·min⁻¹. 质谱条件:接口和离子源温度维持在 280℃和 230℃;电子轰击源能量为 70 eV;选择离子检测 (SIM)模式进行数据采集.

1.2.3 质量控制

分析测试过程中设置实验室空白样品,查看实验过程中可能引入的污染,空白样品未检测出目标化合物. 每 12 个样品做一个平行样品,相对误差小于 15%. 目标化合物的定量参考文献[12]采用外标法实现,标准曲线采用 5 个浓度等级(10、50、100、250 和 500 ng·L⁻¹),16 种目标化合物的曲线拟合相关系数均高于 0.999. 16 种目标化合物的回收率介于 74.5%~106.2%之间,各不同化合物的检测限介于 0.12~0.63 ng·L⁻¹之间.

1.3 正定矩阵因子分解法(PMF)

PMF 是一种基于多变量因子分析方法的定量源解析模型,已成功应用于气溶胶、土壤和沉积物中 PAHs 的来源解析^[12~15],并得到了国际上的一致认可. 本研究采用 EPA PMF5.0 模型进行 PAHs 定量源解析,其基本方程如下:

$$X = GF + E \tag{1}$$

式中,样品浓度矩阵(X)为 n 个样品的 m 种化合物的浓度组成($n \times m$); F 为源成分谱矩阵($p \times m$); G 为贡献率矩阵($n \times p$); E 表示残差矩阵($n \times m$). 方程可以转化为下式:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \tag{2}$$

式中, e_{ij} 、 g_{ik} 和 f_{kj} 分别表示残差矩阵、贡献率矩阵和源成分谱矩阵的元素, p 代表不同的 PAHs 来源.

PMF 模型将所有样本残差与其不确定度的和定义为目标函数 Q ,如下式:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \tag{3}$$

式中, u_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种化合物的不确定性,本研究采用 PAHs 浓度测量值的 20% 作为各站位样品的不同种类 PAH 的不确定性文件参与模型运算^[16].

2 结果与讨论

2.1 长江流域表层水体中 PAHs 的分布及组成

长江干流及各主要支流 16 种 PAHs 总浓度 ($\sum$ PAHs)的分析结果如表 1 所示,19 个站点的 $\sum$ PAHs 的分布范围为 17.7~110 ng·L⁻¹,平均值

为 42.6 ng·L⁻¹. 各不同站位 $\sum$ PAHs 浓度如图 2 所示,最低值和最高值分别出现在鄱阳湖站和乌江站. 总体来看,长江流域上游和下游地区 $\sum$ PAHs 浓度均处于相对较高的水平,而三峡水库往下游到长江岳阳段 $\sum$ PAHs 处于相对较低水平. 三峡工程是当今世界上已建成的最大水利枢纽工程,其库区汇集了大量上游来水,可能使得该水域 $\sum$ PAHs 浓度出现冲淡现象,造成 $\sum$ PAHs 浓度相对较低. 沿着三峡大坝往下游,随着沿途流域的汇集作用,使得 PAHs 再次发生聚集,因而水体中 $\sum$ PAHs 浓度出现增高趋势. 此外,长江流域下游地区工业化和城市化程度相比上游较高,因而,其 $\sum$ PAHs 浓度总体较上游略高.

表 1 长江流域表层水体 PAHs 浓度
Table 1 Concentration of PAHs in surface water from Yangtze River Basin

PAHs	浓度范围 /ng·L ⁻¹	平均浓度 /ng·L ⁻¹	检出率 /%
Nap	ND~72.30	13.30	75
Ace	0.13~2.94	1.33	100
Acy	1.78~10.16	4.40	100
Flu	ND~13.68	6.21	90
Phe	0.43~16.56	6.54	100
Ant	1.00~7.04	2.37	100
Flo	1.24~6.02	2.13	100
Pyr	1.17~5.85	2.20	100
BaA	1.15~3.73	2.00	100
Chr	0.96~3.54	1.62	100
BbF	0.63~2.44	1.15	100
BkF	1.09~2.96	1.55	100
BaP	1.18~3.93	1.85	100
IcdP	1.06~2.13	1.31	100
DahA	0.86~1.55	1.02	100
BghiP	1.26~3.82	1.65	100
LMW	6.32~98.81	28.85	
HMW	10.23~24.61	13.78	
$\sum$ PAHs	17.7~109.98	42.60	

PAH 依据其分子量大小和苯环数量可分为低分子量 PAHs (LWM PAHs, 2~3 环) 和高分子量 PAHs (HMW PAHs, 4~6 环). 表 1 中可看出,本研究中 LMW PAHs 的浓度范围介于 6.32~98.81 ng·L⁻¹,平均浓度为 28.85 ng·L⁻¹,明显高于 HMW PAHs 的浓度(介于 10.23~24.61 ng·L⁻¹,平均浓度 13.78 ng·L⁻¹),LMW PAHs 含量占 $\sum$ PAHs 含量的 67.7%. 已有研究表明,PAHs 的水溶性随着自身

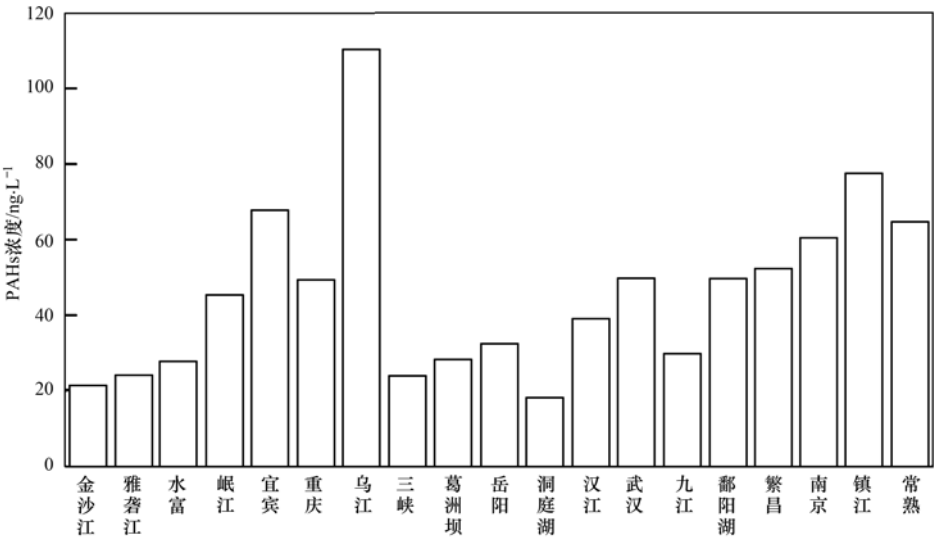


图2 长江流域各采样站位 PAHs 浓度

Fig. 2 Concentration of $\sum$ PAHs in each sampling site from Yangtze River Basin

苯环数量的增加而减小,因而水体中 LMW PAHs 的浓度会明显高于 HMW PAHs^[6]. Yunker 等^[4]认为 LMW PAHs 一般由石油泄漏等事件产生,而 HMW PAHs 则多源于高温燃烧产物,如化石燃料燃烧、汽车尾气等. 因而,两者的比值(LMW/HMW)往往可以用来粗略地判断介质中 PAHs 的来源(比值小于 1 主要由高温燃烧产生,比值大于 1 主要由石油泄漏产生). 本研究中各站位 PAHs 的 LMW PAHs 和 HMW PAHs 占 $\sum$ PAHs 的质量分数如图 3 所示,大部分站位 LMW/HMW 的值均大于 1,但是由于不同

分子量 PAHs 在水中的溶解度有很大差别,因此,此处无法依据 LMW/HMW 比值判断水体中 PAHs 的来源.

2.2 长江流域水体中 PAHs 的来源解析

环境中 PAHs 的来源多种多样,主要包括自然源(石油泄漏和森林火灾等)和人为源(化石燃料燃烧和汽车尾气等). 不同过程产生的 PAHs 其组分有所差异,因而,可以通过判断特征组分的方法来定性和定量地确定 PAHs 的来源^[17]. 本研究尝试利用分子诊断法(MDR)和正定矩阵因子分解法(PMF)对研究区的 PAHs 来源进行定性和定量分析.

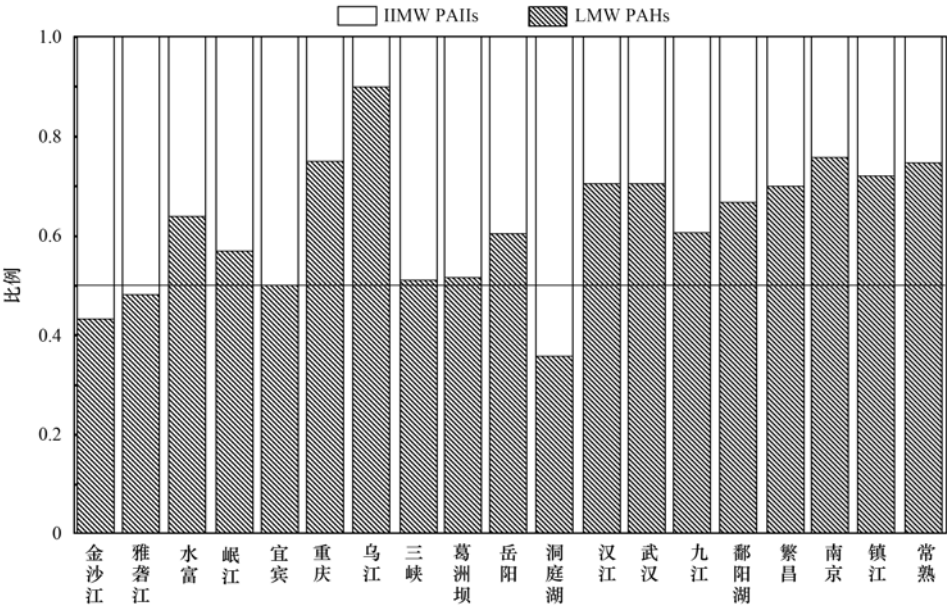


图3 长江流域各站位 LMW PAHs 和 HMW PAHs 质量分数分布

Fig. 3 Percentage variation of LMW PAHs and HMW PAHs at each sampling site from Yangtze River Basin

2.2.1 MDR 法

MDR 法被广泛用于定性解析 PAHs 来源。IcdP/(IcdP + BghiP)、BaA/(BaA + Chr)、Flo/(Flo + Pyr) 以及 Ant/(Ant + Phe) 等比值常被用来解释 PAHs 的可能来源^[4,17,18]。但是,有研究发现 Phe 和 Ant 的环境行为有很大差异,在自然状态下 Ant 比 Phe 更容易发生降解^[19,20]。因而,在利用 MDR 法进行定性源解析时应当尽量谨慎使用 Ant/(Ant + Phe) 比值。本研究最终选 IcdP/(IcdP + BghiP)、BaA/(BaA + Chr) 和 Flo/(Flo + Pyr) 这 3 个指标对研究区 PAHs 来源进行定性解析。具体的判断原则如下: IcdP/(IcdP + BghiP) < 0.2 表示 PAHs 主要来源于石油类物质泄漏,0.2 ~ 0.5 表示来自于石油等液态化石燃料的燃烧, > 0.5 指示源自于木材和煤炭燃烧产生的 PAHs; BaA/(BaA + Chr) < 0.2 表明来源为石油类物质泄漏,0.2 ~ 0.35 之间表示存在石油类泄漏和燃烧产物的混合作用, > 0.35 则表示主要来自于燃烧过程; Flo/(Flo + Pyr) < 0.4 意味着 PAHs 主要由石油类物质泄漏产生,0.4 ~ 0.5 表明来自于液化化石燃料燃烧, > 0.5 则表示来源于木材和煤炭等燃烧。图 4 表示的是长江流域各不同站点 PAHs 同分异构体比值的分布情况。由图 4(a) 可以看出, IcdP/(IcdP + BghiP) 的值除重庆站和鄱阳湖站大于 0.5, 其余各站点均介于 0.2 ~ 0.5 之间; 图 4(b) 显示所有站位的 BaA/(BaA + Chr) 值均超过了 0.35; 图 4(c) 显示 Flo/(Flo + Pyr) 值除常熟站低于 0.4, 其余各站点均超过 0.4。据此可知, 长江流域水体中 PAHs 来源主要有两种: 化石燃料及木材等生物质燃烧的产物(即燃烧产物), 化石燃料燃烧和石油类物质泄漏的混合产物。长江干流各站 PAHs 的来源以化石燃料和生物质燃烧为主, 各支流站点 PAHs 则显示为石油类物质泄漏和化石燃料燃烧的混合源。此外长江流域下游区域 PAHs 来源以混合源为主, 这可能是由于下游航运较为发达, 大量的船舶运输使得溢油事件频发。

2.2.2 PMF 法

本研究以 EPA PMF 5.0 模型对采集自长江流域的 19 个水体样品中的 16 种 PAH 进行定量来源解析。研究中尝试选择 3 ~ 7 种源成分谱进行模型运算, 并采用“Robust”模式消除个别极值产生的影响。结合研究区可能的源成分谱信息, 模型最终运行结果采用 4 因子模式定量解析 PAHs 来源, 其 Q_{robust} 值为 158, 与理论值 $Q_{\text{theoretical}}$ 值 164 较为接近, 因而, 模型结果具有一定可信度。

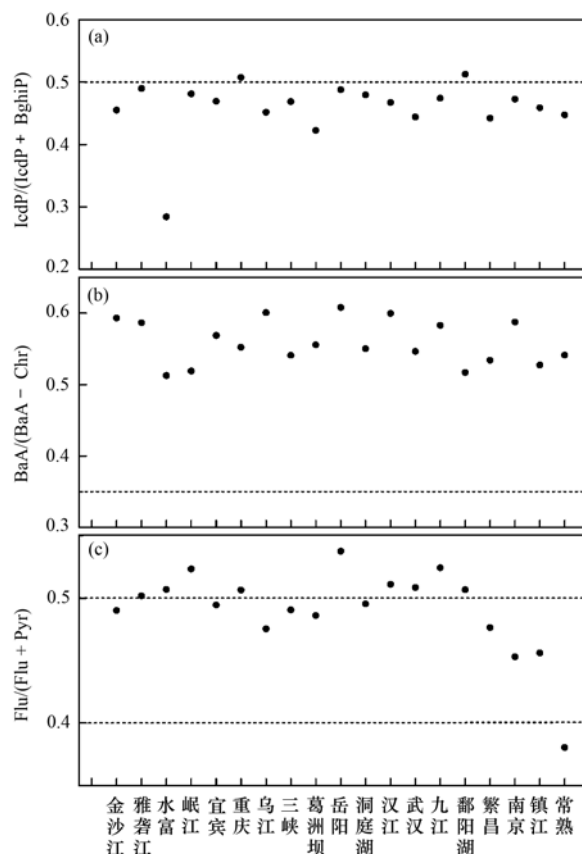


图 4 长江流域各站点 PAHs 同分异构体比值

Fig. 4 Isomer ratio plots of PAHs in all sampling sites of Yangtze River

如图 5 所示。主因子 1 中, Acy、Phe、Flo、Pyr、BaA 和 Chr 具有较高的因子载荷。其中, Acy 是木材燃烧的特征指示物^[12], Phe、Flo、Pyr 和 BaA 常用作煤炭燃烧的特征指示物^[4,5]。据此, 可以将主因子 1 定性为生物质和煤炭燃烧的混合源。长江流域尤其是上游区域社会经济发展较为落后, 农业经济较为发达, 生物质燃料(木材、秸秆等)和煤炭可能是居民生活主要的燃料来源。主因子 2 中, Nap 具有最高的因子载荷, Nap 通常用作石油类物质泄漏的指示物^[17], 主因子 2 可能为石油源。长江作为内陆航运的黄金水道, 其担负的航运任务极其繁重。长江三峡通航管理局数据显示, 2015 年每天通过三峡船闸的各类船舶超过 300 艘^[21]。大量的船舶航行必然导致船舶漏油, 此外, 沿途石化企业排放的废水也可能引入大量石油类物质。主因子 3 中, HMW PAHs 因子载荷较高, 以 BbF、BkF、BaP、IcdP、DahA 和 BghiP 为主, BkF 和 IcdP 常用作柴油燃烧产物的指示物^[15], BbF、BaP、DahA 和 BghiP 是汽油燃烧产物的指示物^[4,5,15]。因此, 主因子 3 被认定为交通源(柴油和汽油燃烧的混合源)。长江流域作为我国经济最发

达的区域之一,有成渝经济圈、长江中游城市群及长江三角洲城市群等大型城市群. 公安部交通局数据显示,2015 年底,我国民用机动车保有量已达到 2.79 亿辆,其中汽车达到 1.72 亿辆(<http://www.mps.gov.cn/n16/n85753/n4449431/4473813.html>). 此外,共有 11 个城市的汽车保有量超过 200 万辆(北京、成都、深圳、上海、重庆、天津、苏州、郑州、杭州、

广州和西安),其中将近一半坐落于长江流域. 大量的汽车消耗了巨量的燃油,产生了大量的汽车尾气并排放到环境中,这必然导致环境中的 PAHs 出现一定程度的增长. 主因子 4 载荷较高为 Flu,代表焦炭源^[12,15]. 由 PMF 模型得到的 4 个源的贡献率依次为: 生物质和煤炭燃烧混合源 40.1%,石油源 19.6%,交通源 17.5%,焦炭源 22.8%.

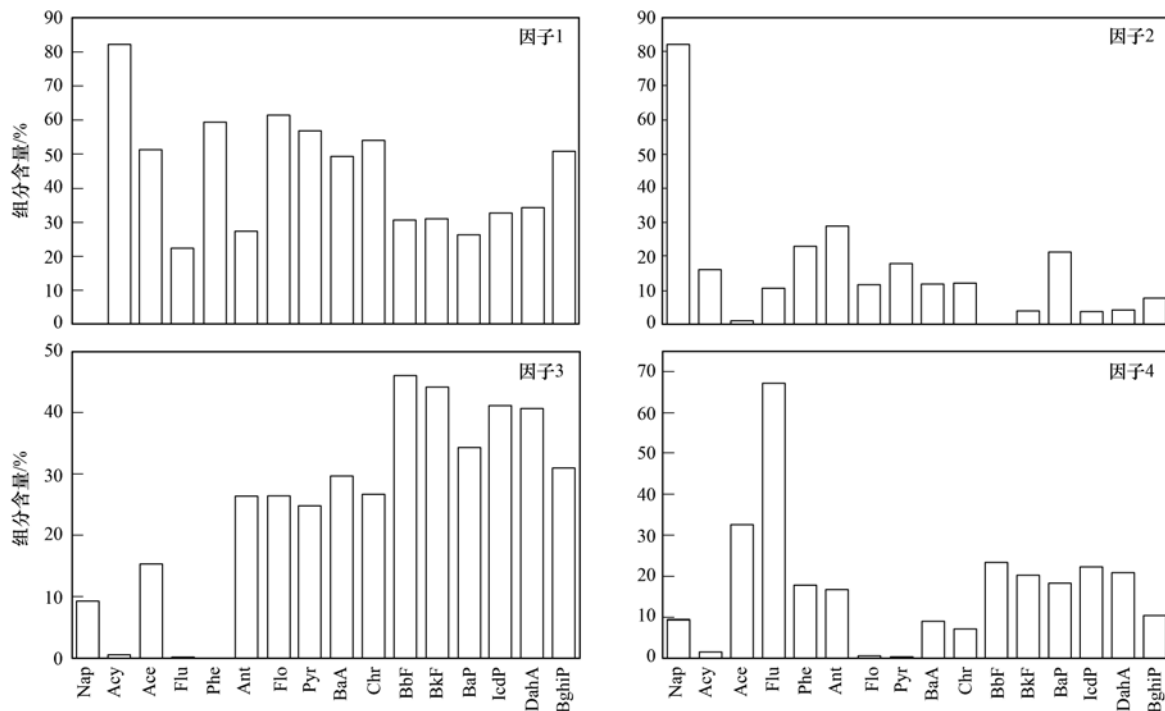


图5 PMF 源成分谱

Fig. 5 Source profiles obtained from the PMF model

2.3 与其他流域水体中 PAHs 含量的对比研究

为了解长江流域水体中 PAHs 的污染状况,将其与其他河流水体中的 PAHs 浓度进行对比研究. 图6 列举了世界范围内的多条河流水体中 PAHs 的污染情况. 由此可知,长江流域水体中 $\sum$ PAHs 浓度与意大利 Tiber 河、美国 York 河、Mississippi 河及德国 Elbe 河的污染程度相当,其浓度远低于黄河和尼罗河及一些小型河流. 此外,可看出长江武汉段 $\sum$ PAHs 浓度明显高于本研究,分析其可能与采样地点有密切联系. 从中可看出中小型河流一般 $\sum$ PAHs 浓度较大,而大河 $\sum$ PAHs 浓度一般较小,这可能与河流的流量有一定关系. 大河由于水量巨大,使得流域汇入其中的 $\sum$ PAHs 被稀释,从而使得浓度下降. 总的来看,长江流域水体中 $\sum$ PAHs 浓度相对于世界范围内的其他河流处于

较低水平.

2.4 长江流域水体中 PAHs 的生态风险评价

水体中溶解态 PAHs 极易容易被生物体利用,从而进入到水生食物网,并在食物网中发生富集. 因此,水体中溶解态 PAHs 对水生生态系统具有潜在的风险,并最终可能对人体产生一定不良影响. 我国地表水环境标准(GB 3838-2002)^[40]规定了水体中 BaP 的浓度不得超过 $2.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,美国环境保护署(EPA)更是对水体中多种 PAHs 浓度的上限进行了限定. 因此,大量研究人员开始研究 PAHs 的潜在生态风险,并发展了一系列生态风险评价方法. Long 等^[41]于 1995 年利用划分不同风险效应区间的方法对研究区 PAHs 的生态风险进行评价. Kalf 等^[42]于 1997 年提出风险熵值(risk quotient, RQ)的方法来评价 PAHs 的生态风险. 随后, Cao 等^[43]于 2010 年在 Kalf 等的基础上引入了相对毒性系数,对风险熵值法进行了改进,并成功运用于多地区水体

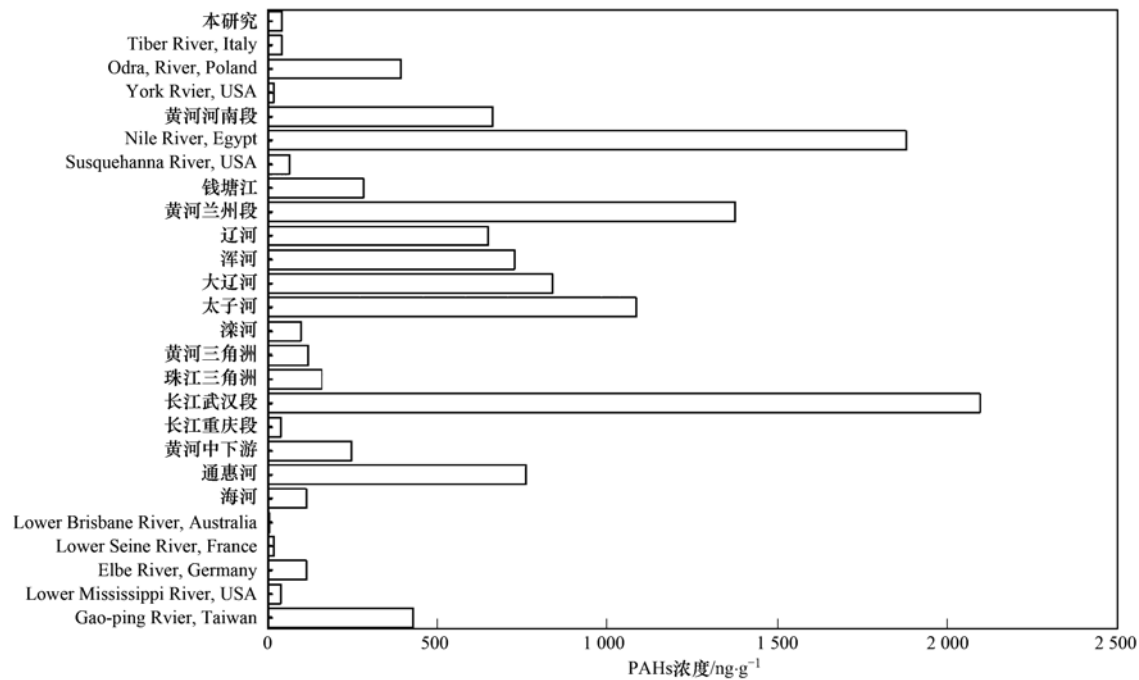


图6 本研究与世界其他地区水体中 PAHs 浓度情况对比^[6,22-39]

Fig. 6 Comparative levels of $\sum$ PAHs in water samples collected from different locations in the world

环境中 PAHs 的生态风险评价^[43,44]. 本研究采用这种改进的风险熵值法对长江流域水体中 PAHs 进行生态风险评价,其具体表述如下:

(maximum permissible concentrations, MPCs) (表2).

公式(4)可以进一步改写为:

$$RQ = \frac{c_{PAHs}}{c_{QV}} \tag{4}$$

$$RQ_{NCs} = \frac{c_{PAHs}}{c_{QV(NCs)}} \tag{5}$$

式中, c_{PAHs} 是介质中 PAHs 的浓度, c_{QV} 为相应介质中 PAHs 的风险标准值,本区域由于没有相关研究,因而采用的是 Kalf 等^[42]提出的最低风险浓度值 (negligible concentrations, NCs) 和最高风险浓度值

$$RQ_{MPCs} = \frac{c_{PAHs}}{c_{QV(MPCs)}} \tag{6}$$

式中, RQ_{NCs} 和 RQ_{MPCs} 分别代表低风险熵值和高风险熵值, $c_{QV(NCs)}$ 和 $c_{QV(MPCs)}$ 分别表示相应介质中 PAHs

表2 各单体 PAHs 的最低和最高风险熵值

Table 2 Risk quotients for negligible and maximum permissible concentrations for individual PAHs					
PAHs	NCs	MPCs	平均浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	RQ_{NCs}	RQ_{MPCs}
Nap	1.4	140	7.34	5.246 111	0.052 461
Ace	1.2	120	1.31	1.089 987	0.010 9
Acp	1.2	120	4.24	3.532 899	0.035 329
Flu	1.2	120	5.46	4.547 954	0.045 48
Phe	5.1	510	6.33	1.242 06	0.012 421
Ant	1.2	120	2.2	1.832 973	0.018 33
Flo	26	2 600	1.97	0.075 851	0.000 759
Pyr	1.2	120	2.06	1.716 154	0.017 162
BaA	3.6	360	1.95	0.542 068	0.005 421
Chr	107	10 700	1.56	0.014 567	0.000 146
BbF	3.6	360	1.11	0.308 704	0.003 087
BkF	24	2 400	1.50	0.062 617	0.000 626
BaP	27	2 700	1.77	0.065 598	0.000 656
DahA	27	2 700	1.26	0.047 247	0.000 472
IcdP	59	5 900	1	0.016 929	0.000 169
BghiP	75	7 500	1.55	0.020 696	0.000 207

的低风险浓度值和高风险浓度值。据此,可以计算 16 种 PAHs 总的风险熵值,公式如下:

$$RQ_{\sum PAHs(NCs)} = \sum_{i=1}^n RQ_{i(NCs)} \quad (RQ_{i(NCs)} \geq 1) \quad (7)$$

$$RQ_{\sum PAHs(MPCs)} = \sum_{i=1}^n RQ_{i(MPCs)} \quad (RQ_{i(MPCs)} \geq 1) \quad (8)$$

依据风险熵值法的生态风险等级划分标准如下: $RQ_{NCs} < 1$ 表示研究区 PAHs 的污染水平可以忽略,当 $RQ_{NCs} > 1$ 且 $RQ_{MPCs} < 1$ 表示研究区处于中度污染水平,若 $RQ_{NCs} > 1$, 且 $RQ_{MPCs} > 1$, 则表示研究区处于严重污染水平,亟需采取相关措施。

16 种单体 PAHs 的风险熵值如表 2 所示,所有单体 PAHs 的高风险熵值均小于 1, Nap、Ace、Acp、Flu、Phe、Ant 和 Pyr 低风险熵值大于 1, 因而此类 PAHs 在研究区可能具有一定的生态风险。 $RQ_{\sum PAHs(NCs)}$ 介于 5.88 ~ 71.81 之间, $RQ_{\sum PAHs(MPCs)}$ 介于 0 ~ 0.72 之间。其中,乌江站生态风险系数最高,下游南京站,镇江站和常熟站生态风险较其他站点略高。总体来看,研究区各站 PAHs 的生态风险处于较低水平。

3 结论

(1) 长江流域表层水体中 PAHs 分析结果表明, 16 种多环芳烃均有检出,除了 Nap 和 Flu 的检出率低于 100%,其余单体 PAHs 的检出率均为 100%。19 个站点的 $\sum$ PAHs 浓度的分布范围为 17.7 ~ 110 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 42.6 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。最低值出现在鄱阳湖站,最高值出现在乌江站,总体看来,下游 $\sum$ PAHs 浓度略高于上游。与世界其他地区的河流相比,长江流域 PAHs 处于较低水平。

(2) 长江流域水体中 PAHs 以低环为主(2 ~ 3 环),占 $\sum$ PAHs 的 67.7%。来源解析表明 PAHs 主要来自于人类活动产生。各不同来源的贡献率分别为:生物质和煤炭燃烧混合源 40.1%、石油源 19.6%、交通源 17.5%、焦炭源 22.8%。

(3) 依据风险熵值法计算的长江流域水体 PAHs 的生态风险表明,流域低环 PAHs 具有相对较高的生态风险。整个流域 $RQ_{\sum PAHs(NCs)}$ 介于 5.88 ~ 71.81 之间, $RQ_{\sum PAHs(MPCs)}$ 介于 0 ~ 0.72 之间,生态风险熵值最高值出现在乌江站,流域下游生态风险相对较高,但是总体来说,整个长江流域的生态风险

处于较低水平。

参考文献:

- [1] Zhang Y X, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004 [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(4): 812-819.
- [2] 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 等. 嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2341-2346.
- [3] 秦宁, 何伟, 王雁, 等. 巢湖水体和水产品中多环芳烃的含量与健康风险[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 230-239.
- [4] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [5] Simoneit B R T. Biomass burning-a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(3): 129-162.
- [6] 王超, 谭丽, 吕怡兵, 等. 长江重庆段表层水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 18-22.
- [7] Eisma D. Intertidal deposits: river mouths, tidal flats, and coastal lagoons [M]. New York: CRC Press, 1998. 459.
- [8] Bianchi T S, Allison M A. Large-river delta-front estuaries as natural "recorders" of global environmental change [J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2009, **106**(20): 8085-8092.
- [9] Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H, *et al.* Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: a case study of the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **536**: 803-812.
- [10] 黄亮, 张国森. 长江流域沉积物中黑碳分布及其与多环芳烃的相关性研究[J]. *地球与环境*, 2015, **43**(2): 159-166.
- [11] GB/T 26411-2010, 海水中 16 种多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法 [S].
- [12] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 375-383.
- [13] 刘春慧, 田福林, 陈景文, 等. 正定矩阵因子分解和非负约束因子分析用于大辽河沉积物中多环芳烃源解析的比较研究 [J]. *科学通报*, 2009, **54**(24): 3 817-3822.
- [14] Larsen III 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] Sofowote U M, McCarry 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.
- [16] Mai B X, Fu J M, Zhang G, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Pearl river and estuary, China: spatial and temporal distribution and sources [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(11-12): 1429-1445.
- [17] Deng W, Li X G, Li S Y, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment of mud areas in the East China Sea using diagnostic ratios and factor analysis

- [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **70**(1-2): 266-273.
- [18] Li B H, Feng C H, Li X, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of PAHs in surficial sediments of the Yangtze Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, **64**(3): 636-643.
- [19] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(4): 636-651.
- [20] Yan B Z, Abrajano T A, Bopp R F, *et al.* Molecular tracers of saturated and polycyclic aromatic hydrocarbon inputs into Central Park Lake, New York City [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(18): 7012-7019.
- [21] 长江三峡通航管理局. 2016 年三峡局安全工作报告 [EB/OL]. <http://www.sxthj.com.cn/main/text?id=25446>, 2016-03-02.
- [22] Patrolocco 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.
- [23] Wolska L, Zygmunt B, Namieśnik J. Organic pollutants in the Odra river ecosystem [J]. Chemosphere, 2003, **53**(5): 561-569.
- [24] Countway R E, Dickhut R M, Canuel E A. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) distributions and associations with organic matter in surface waters of the York River, VA Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2003, **34**(2): 209-224.
- [25] Zhao X, Qiu H R, Zhao Y L, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from the upper reach of the Yellow River, Northwestern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(9): 6950-6956.
- [26] 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.
- [27] Doong R A, Lin Y T. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations in surface sediment and water from Gao-ping River, Taiwan [J]. Water Research, 2004, **38**(7): 1733-1744.
- [28] Li G C, Xia X H, Yang Z F, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow River, China [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 985-993.
- [29] 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.
- [30] Guo W, He M C, Yang Z F, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water, suspended particulate matter and sediment from Daliao River watershed, China [J]. Chemosphere, 2007, **68**(1): 93-104.
- [31] Ko F C, Baker J, Fang M D, *et al.* Composition and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments from the Susquehanna River [J]. Chemosphere, 2007, **66**(2): 277-85.
- [32] 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.
- [33] Wang J Z, Guan Y F, Ni H G, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine runoff of the Pearl River Delta (China): concentrations, fluxes, and fate [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(16): 5614-5619.
- [34] Shi Z, Tao S, Pan B, *et al.* Contamination of rivers in Tianjin, China by polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(1): 97-111.
- [35] Badawy M I, Emababy M A. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water in Egypt [J]. Desalination, 2010, **251**(1-3): 34-40.
- [36] 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.
- [37] Götz R, Bauer O H, Friesel P, *et al.* Organic trace compounds in the water of the River Elbe near Hamburg Part I [J]. Chemosphere, 1998, **36**(9): 2085-2101.
- [38] 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.
- [39] Feng C L, Xia X H, Shen Z Y, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Wuhan section of the Yangtze River, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **133**(1-3): 447-458.
- [40] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准 [S].
- [41] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Management, 1995, **19**(1): 81-97.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行