

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源: 基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和铅改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法: 以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

三亚河沉积物 PAHs 和 PCBs 的分布、来源及风险评价

詹咏¹, 韦婷婷¹, 叶汇彬¹, 董滨^{2*}, 张领军¹, 黄远东¹

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 多环芳烃 (PAHs) 和多氯联苯 (PCBs) 具有“三致”特性和生物累积效应, 作为两类典型持久性有机污染物, 是环境领域的研究热点之一。本研究考察了三亚河底泥沉积物中 PAHs 和 PCBs 的含量分布和污染状况, 在对其进行空间污染分布分析的基础上进行来源解析, 并采用沉积物质量基准法和质量标准法进行生态风险评价。结果表明, 沉积物中总 PAHs 和总 PCBs 含量范围分别为 265.00 ~ 6 735.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.75 ~ 92.75 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 含量相对较高河段分别为西河上游和东河上游, 与研究区域的工业分布和河流走势有较强的相关性。组成及来源解析表明, PAHs 以低环芳烃为主, 主要来源于石油燃烧污染; PCBs 以七氯联苯和六氯联苯为主, 主要来源于电容器中 PCBs 的迁移。生态风险评价结果表明, 整体上三亚河沉积物中 PAHs 生物毒副作用不明显, 生态风险较低, 但个别采样点 PAHs 单体超标严重, 对生物体暴露会产生严重威胁, 需引起重视; PCBs 生物毒性效应概率为 10% ~ 50%, 偶尔会产生负面生态效应。

关键词: 沉积物; 三亚河; 多环芳烃 (PAHs); 多氯联苯 (PCBs); 污染特征; 风险评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1830-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202008267

Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River

ZHAN Yong¹, WEI Ting-ting¹, YE Hui-bin¹, DONG Bin^{2*}, ZHANG Ling-jun¹, HUANG Yuan-dong¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs), two typical persistent organic pollutants, are the research focus due to their mutagenesis, carcinogenesis, teratogenesis, and bioaccumulation. The content distribution and residual characteristics of PAHs and PCBs were investigated in the sediments from the Sanya River. Source apportionment was further explored based on the analysis of the spatial distribution, and the ecological risk evaluation was carried out with the sediment quality criteria and standards. The results indicate that the content of $\sum$ PAHs and $\sum$ PCBs in the sediment range from 265.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 6 735.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 1.75 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 92.75 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with relatively high contents in the east and west river upstream, respectively, which had a strong correlation with the industrial structure and river movement of the study area. The composition and source apportionment demonstrate that PAHs originated mostly from the combustion of petroleum with low PAHs, and hexa-CB and hepta-CB are the predominant PCBs congeners, primarily resulting from the migration of PCBs in the capacitor. The ecological risk evaluation demonstrates that the biotoxic effect of the PAHs is not obvious, with a low ecological risk. However, several PAHs monomers exceeded the standard significantly in some sampling sites, which should be of concern due to its serious threat of exposure to organisms. The probability of a biotoxic effect of PCBs is 10% - 50%, which occasionally produces a negative ecological effect.

Key words: sediment; Sanya River; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); polychlorinated biphenyls (PCBs); residual characteristics; risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 和多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是两类典型的持久性有机污染物, 具有半衰期长、富集性较强和生物毒性大的特点, “致突变、致癌和致畸”的性质尤其引起学者的重视^[1~3]。Su 等^[4]的研究发现长江三角洲地区航道中的总 PAHs 浓度与北京雾-霾天气的 PAHs 含量相当, 暴露于船舶室内的 PAHs 浓度会让海员面临相当大的致癌风险。河流航道以及周围工业住宅区的燃烧源、泄漏源产生的 PAHs 和 PCBs 在经过大气沉降和地表径流等迁移转化后易汇于河流沉积物, 其长时间的累积和释放会对水生生态系统产生潜在危害, 生物毒性累积作用也会间接影响到人们的生产生活^[5]。汪慧娟等^[6]

的研究发现海南省昌化河口海域的生物体存在中低水平 PAHs 污染, 长期食用可能会有潜在的健康危险; Jafarabadi 等^[7]的研究表明, 波斯湾沉积物、鱼类和水体 PCBs 污染呈现正相关, 食用鱼类会带来接触有害污染物的健康风险。因此对河流沉积物中的持久性有机污染物进行含量考察和风险评价具有重要的实际意义。

三亚河位于三亚市境南部, 进入三亚市区后分

收稿日期: 2020-08-26; 修订日期: 2020-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402504, 2018YFC1900905); 中国长江三峡集团有限公司项目 (202003080)

作者简介: 詹咏 (1970 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: jannet6@163.com

* 通信作者, E-mail: tj_dongbin@163.com

为三亚东河(临春河)和三亚西河,注入三亚港入海,是重要的旅游及运输航行通道. 河流上游建有大型水库作为三亚市供水和灌溉的水源地,河流下游与海水自然交换,形成独特的“山-海-河-城”的城市自然生态景观. 近年来由于三亚市旅游及工商业快速发展,居民和游客的急剧增加,引起河流水质和泥质的改变. 目前已有诸多学者对此展开研究,但研究区域多为三亚湾及三亚市近海海域^[8,9],重金属污染研究居多^[10,11],关于三亚河河流全段沉积物持久性有机污染物^[12]的分布特征及风险评价数据极为有限. 本研究通过对三亚河沉积物中 PAHs 和 PCBs 的含量进行检测,分析探讨了其分布、来源及生态风险,回溯历史污染数据并结合现有研究提出相关建议,以期三亚河水质和泥质管理、针对性地预防和控制区域工农业污染以及当前新区的生态文明建设等提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

于 2019 年 8 月根据三亚河地形及相关历史检测数据在东河和西河共设置 21 个采样点,具体分布见图 1,具体地理位置信息见表 1. 各采样点根据所在河段断面宽度取不少于 3 个泥样,采用抽吸式取样器取河道沉积物(10 ~ 50 cm)约 1 kg. 样品装入聚乙烯塑料瓶在加冰泡沫盒中冷藏保存,运回实验室后样品经冷冻干燥机于 -40℃ 下真空干燥 48 h 以上后保存于 4℃ 冰箱待分析.

表 1 三亚河 21 处采样点位置及名称
Table 1 Geographical information of 21 sampling sites in the Sanya River

位置	采样点	经度(E)	纬度(N)	名称
西河	S1	109°28'51"	18°17'45"	育新路三亚站
	S2	109°29'01"	18°17'19"	凤凰路
	S3	109°29'14"	18°16'52"	水城路
	S4	109°29'46"	18°15'54"	月川桥(迎宾路)
	S5	109°30'25"	18°15'23"	二手车交易市场
	S6	109°30'17"	18°15'23"	新风街
	S7	109°30'20"	18°14'44"	步行桥
	S8	109°30'28"	18°14'10"	三亚大桥
东河	S9	109°32'08"	18°17'49"	荔枝沟路
	S10	109°32'07"	18°17'31"	迎宾路
	S11	109°31'16"	18°17'03"	溪泽三桥
	S12	109°31'15"	18°17'01"	海螺西路
	S13	109°31'15"	18°16'57"	海螺花园北区小桥
	S14	109°31'04"	18°16'48"	山屿湖西门
	S15	109°30'57"	18°16'27"	山屿湖直流交汇处
	S16	109°31'49"	18°16'15"	凤凰路
	S17	109°30'23"	18°15'38"	三亚河东路
	S18	109°30'23"	18°15'48"	丰兴隆大桥
	S19	109°30'49"	18°15'18"	临春桥(新风街)
	S20	109°30'47"	18°14'49"	白鹭公园西边小桥
	S21	109°30'42"	18°14'06"	潮见桥(榆亚路)

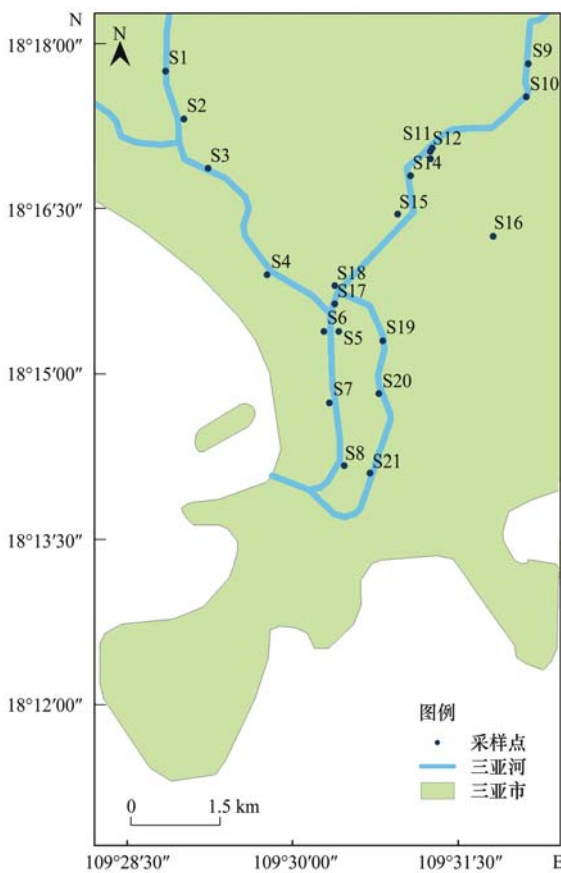


图 1 三亚河沉积物采样点分布示意
Fig. 1 Map of sampling sites in the Sanya River

1.2 样品前处理

前处理过程主要为提取、过滤、脱水、浓缩和净化. 步骤如下: 取 10.00 g 过 200 目筛后沉积物样品,加入适量无水硫酸钠研磨均化至粉末状后放入玻璃纤维滤筒,置于索氏提取器,加入 100 mL 1:1 丙酮: 正己烷溶剂以每小时不小于 4 次的回流速度提取 24 h. 提取液经无水硫酸钠过滤除水加 5 mL 正己烷氮气吹脱浓缩至约 1 mL. 固相萃取净化前用 4 mL 二氯甲烷冲洗、10 mL 正己烷平衡净化柱,再用 3 mL 正己烷和 10 mL 二氯甲烷洗脱 PAHs 和 PCBs,用氮吹洗脱浓缩至约 1 mL 后加 3 mL 乙腈再浓缩至 1 mL 以下,将溶液完全转化为乙腈后准确定容至 1 mL 待仪器分析.

1.3 仪器分析

PAHs 分析采用高效液相色谱仪(LC-5510 Agilent/安捷伦),仪器条件为进样量:10 μL; 柱温:35℃; 流速:1.0 mL·min⁻¹; 流动相以乙腈-水进行梯度洗脱,洗脱程序为:60% 乙腈-40% 水、100% 乙腈-100% 水和 60% 乙腈-40% 水分别洗脱 18、10 和 7 min; 采用紫外检测器检测,检测波长为 254 nm.

PCBs 分析采用气相色谱质谱联用仪(7890GC-

5975MS Agilent/安捷伦),气相色谱条件为进样口温度:270℃,不分流进样;柱流量:1.0 mL·min⁻¹;柱箱温度:40℃,以 20 ℃·min⁻¹升温至 280℃,保持 5 min;进样量:1.0 μL;质谱分析条件为四极杆温度:150℃;离子源温度:230℃;传输线温度:280℃;扫描模式:选择离子扫描(SIM);溶剂延迟时间:5 min.

1.4 质量控制与保证

仪器分析过程中,标准样、空白样和研究样在同一分析条件下进行测定,每 5 个样品做一个平行样和方法空白的测定,空白样品的制备以石英砂代替,无目标化合物检出.标准曲线的相关系数≥0.995,样品的相对标准偏差≤10%,PAHs 和 PCBs 方法检出限分别为 0.013 ~ 0.47 μg·kg⁻¹和 0.039 ~ 0.10 μg·kg⁻¹,平均回收率分别为 70% ~ 86% 和 74% ~ 90%,均在质量控制范围内.

2 结果与讨论

2.1 沉积物中 PAHs 和 PCBs 的污染水平

本研究从三亚河 21 处采样点沉积物样品中检测出了 15 种 PAHs 和 14 种 PCBs 单体.15 种 PAHs 包括:萘(Nap)、苊烯(Acy)、菲(Phe)、苊(Ace)、芴(Flu)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䟽(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)和苯并[ghi]芘(二萘嵌苯)(BghiP),14 种 PCBs 包括:2,4,4-三氯联苯、2,2,5,5-四氯联苯、3,3',4,4'-四氯联苯、3,4,4',5-四氯联苯、2,2',4,5,5-五氯联苯、2,3,4,4',5-五氯联苯、2,3,3',4,4'-五氯联苯、2,2',4,4',5,5-六氯联苯、2,2',3,4,4',5-六氯联苯、2,3',4,4',5,5-六氯联苯、2,3,3',4,4',5-六氯联苯、3,3',4,4',5,5-六氯联苯、2,2',3,4,4',5,5-七氯联苯和 2,3,3',4,4',5,5-七氯联苯.其中 PCBs 单体平均检出量较低无明显变化趋势,研究按照氯原子数将其分为 5 种 PCBs 同族体作进一步讨论,具体分类与含量见表 2.

∑PAHs 和 ∑PCBs 的含量范围分别为 265.00 ~ 6 735.00 μg·kg⁻¹和 1.75 ~ 92.75 μg·kg⁻¹,均值分别为 2 624.98 μg·kg⁻¹和 36.65 μg·kg⁻¹.整体上,三亚河沉积物相对分子质量低(2 ~ 3 环)的 PAHs 平均含量高于相对分子质量高(4 ~ 6 环)的 PAHs,且在大多数采样点中都有检测出.对于具有强致癌性物质 BbF、BaP 和 DahA 在部分采样点未检测出,但仍有部分监测点含量较高,需引起着重关注.特别地,Phe 在 15 种 PAHs 中平均含量最高且检出率为 100%,作为优先控制污染物之一建

议采取相应治理措施.与多环芳烃的污染水平不同,痕量有机化合物多氯联苯在每一采样点均有检出量,同时观察到除七氯联苯外其余 PCBs 平均含量随着相对分子质量增加而增加,这与 PCBs 溶解度随氯原子数的增加而减小,粘稠度随氯原子数增加而增大有较强的相关性.总体而言,PCBs 难溶于水,易沉积,虽然污染水平较低但对生物体存在累积慢性毒性,需引起长期关注.

如表 3 所示,与国内外典型河流湖泊相比,三亚河沉积物 PAHs 污染整体上高于白洋淀、滴水湖、太湖和胡格利等河湖,远低于珠江广州河段和特拉华河河口的 PAHs 污染水平.与何书海等^[12]在 2016 年对三亚河 PAHs 污染水平的研究(PAHs 平均含量为 211 μg·kg⁻¹)相比,其 PAHs 检出量高了近 13 倍,这主要与近年来海南省三亚市旅游业的快速发展以及生产生活排放污染物含量大幅度增加有关,如汽车、邮轮和货船航行使用的化石燃料燃烧、工业园区和商业区的污染排放等.关于三亚河 PCBs 污染水平尚未有相关报道数据,与升金湖以及胡格利河口相比 PCBs 检出量较高,但污染程度远远低于滴水湖和拉各斯潟湖,处于低污染水平.

表 2 沉积物样品中 15 种 PAHs 单体和 5 种 PCBs 同族体的含量¹⁾/μg·kg⁻¹
Table 2 Content of 15 PAHs monomers and 5 PCBs homologue in the sediment from the Sanya River/μg·kg⁻¹

项目	化合物	最低值	最高值	均值
2 环(13.38%)	Nap	ND	2 068.00	355.19
	Acy	5.00	82.00	39.57
	Ace	ND	174.00	46.43
	Flu	8.00	978.50	68.40
3 环(54.69%)	Phe	28.00	4 345.00	958.74
	Ant	39.00	421.00	176.05
	Fla	ND	504.00	162.96
	Pyr	31.00	145.00	83.62
	BaA	ND	290.00	84.95
4 环(12.85%)	Chry	ND	147.00	69.57
	BbF	ND	283.00	87.21
	BkF	ND	145.00	15.95
	BaP	ND	909.00	118.81
5 环(5.08%)	DahA	ND	108.00	16.00
6 环(14%)	BghiP	133.00	501.00	353.50
	三氯联苯(3.01%)	0.28	54.12	1.06
	四氯联苯(13.61%)	0.15	203.51	4.80
	五氯联苯(24.04%)	0.15	145.07	8.48
	六氯联苯(30.88%)	0.12	232.79	10.89
	七氯联苯(28.46%)	0.67	258.66	10.03
	∑PAHs	265.00	6 735.00	2 624.98
	∑PCBs	1.75	92.75	36.65

1) ND 表示未检测出该物质含量,括号内百分数值表示该种或该类物质的含量占比

表 3 国内外河流、港湾沉积物中 PAHs 和 PCBs 含量¹⁾/μg·kg⁻¹

Table 3 Content of PAHs and PCBs in the sediment of the rivers and harbors at home and abroad/μg·kg ⁻¹				
研究年份	研究区域	PAHs	PCBs	文献
2019	拉各斯潟湖(尼日尼亚)	1 430 ~ 5 900	ND ~ 6 410	[13]
2017	特拉华河河口(美国)	3 749 ~ 22 324	18.1 ~ 136.8	[14]
2018	胡格利河口(印度)	3.3 ~ 630	0.28 ~ 7.7	[15]
2015	大冶湖(湖北)	35.94 ~ 2 032.73	—	[16]
2012	滴水湖(上海)	74.03 ~ 579.20	ND ~ 2 254.50	[17]
2016	升金湖(安徽)	0.19 ~ 2.43	0.14 ~ 5.71	[18]
2015	太湖(江苏)	0.77 ~ 4.20	—	[19]
2009	珠江广州河段(广东)	4 787.5 ~ 8 665	—	[20]
2016	白洋淀(河北)	163.20 ~ 861.43	—	[21]
2016	三亚河(海南)	3.23 ~ 493	—	[12]
2019	三亚河	265 ~ 6 735	1.75 ~ 92.75	本研究

1) ND 表示未检测出该物质含量,“—”表示文章中没有相关数据

2.2 三亚河沉积物 PAHs 和 PCBs 的分布特征

三亚河各采样点沉积物 $\sum$ PAHs 和 $\sum$ PCBs 具体含量见图 2。超过 85% 的采样点 $\sum$ PAHs 含量为 1 000 ~ 2 000 μg·kg⁻¹, 2 处采样点 $\sum$ PAHs 含量为 6 000 ~ 7 000 μg·kg⁻¹, 仅有一处采样点 $\sum$ PAHs 含量在 1 000 μg·kg⁻¹ 以下。根据 Baumard 等^[22] 提出的 PAHs 的污染水平等级(低:0 ~ 100 μg·kg⁻¹; 中等:100 ~ 1 000 μg·kg⁻¹; 高:1 000 ~ 5 000 μg·kg⁻¹; 超高:>5 000 μg·kg⁻¹), 三亚河整体沉积物 PAHs 污染属于高等污染水平。PCBs 污染整体偏低, 但污染分布呈现一定的聚集性特征, 如东河上游部分河段污染水平相对偏高。

$\sum$ PAHs 空间污染分布表明(图 3), $\sum$ PAHs 高污染河段主要分布在三亚河的中上游, 其含量分布特征为西河上游 > 西河中游 > 东河中游 > 东河上游 > 三亚河下游。其中, $\sum$ PAHs 含量最高点出现在采样点 3 处, 位于水城路、玉林新路和金水路交汇处, 交通繁忙, 河流断面较窄, PAHs 含量的积累可能与该区域水体交换较为缓慢有关, 污染物较难扩散在一定程度上影响其吸附-降解平衡。特别地, PAHs 含量分布较高的西河上游河段两岸分布有多家轻工业和食品加工厂, 荔枝沟路工业园区距离该河段较近, 工业生产带来的 PAHs 污染可能为主要污染源之一。整体上, PAHs 的分布特征与三亚河所在区域的工业分布和水域交通有较强的相关性。

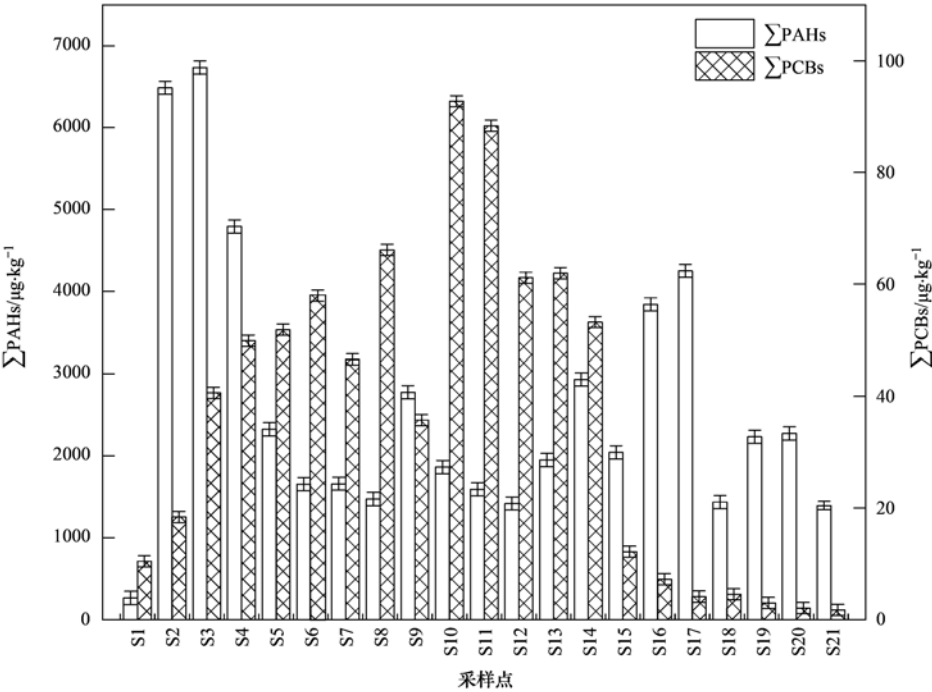


图 2 三亚河各采样点沉积物总 PAHs 和总 PCBs 含量分布

Fig. 2 Content of $\sum$ PAHs and $\sum$ PCBs in the sediment of each sampling site in the Sanya River

由 $\sum$ PCBs 空间污染分布可知(图 4), $\sum$ PCBs 污染分布特征为东河上游 > 西河中下游 > 西河上游 > 东河中下游, 沉积物污染分布特征随两条河流各自的走势有较强的相关性, 西河污染水平随河流自北向南的走势逐渐升高, 东河呈现出相反的趋势, 但河流整体污染水平较低. 其中, PCBs 含量最高点位于东河上游采样点 10 处(迎宾路), 检出量相对较高的河段为东河上游迎宾路南下至山屿湖西门, 沿河两岸分布有多家汽车服务公司、屠宰厂和水泥厂等, PCBs 污染可能源于废旧变压器或剩余油漆等产品处理不当泄漏入河^[23].

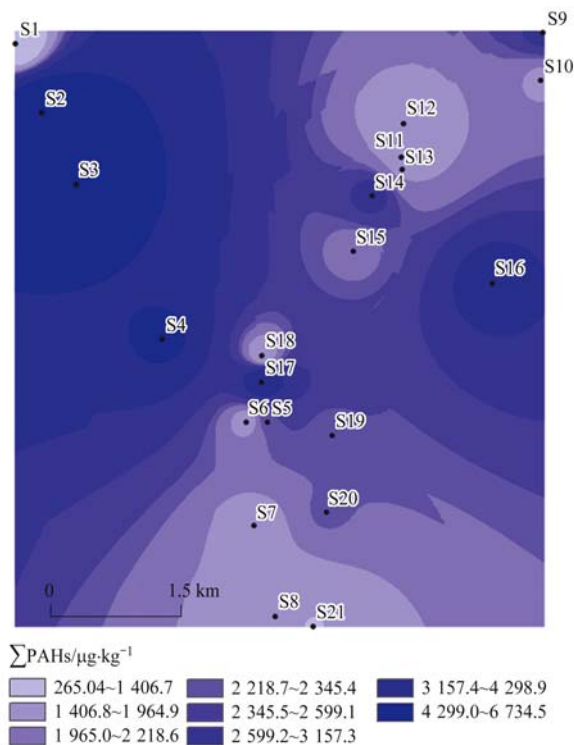


图 3 三亚河沉积物总 PAHs 空间污染分布

Fig. 3 Spatial distribution of $\sum$ PAHs pollution in the sediment of the Sanya River

2.3 沉积物 PAHs 和 PCBs 的组成和来源分析

2.3.1 PAHs 的组成和来源分析

由 PAHs 单体含量占比分布可知(图 5), 15 种 PAHs 中 Phe 的含量占比最高为 36.36%, 其次为 Nap、BghiP 和 Ant, 占比分别为 13.47%、13.41% 和 6.68%. 多环芳烃的亲水性和降解能力与相对分子质量有关, 有研究表明相对分子质量高的 PAHs 较相对分子质量低的具有更强的疏水性, 降解能力差, 易于沉积吸附^[24]. 而本研究 PAHs 以低环数为主, 3 环占比最高为 55.06%, 其次是 2、6、4 和 5 环, 这与先前的研究成果基本一致^[12], 表明 PAHs 污染存在历史残留. 整体而言, 除个别单体外, 低环芳烃(2~3 环)单体平均含量高于高环芳烃(4~6 环)单体平

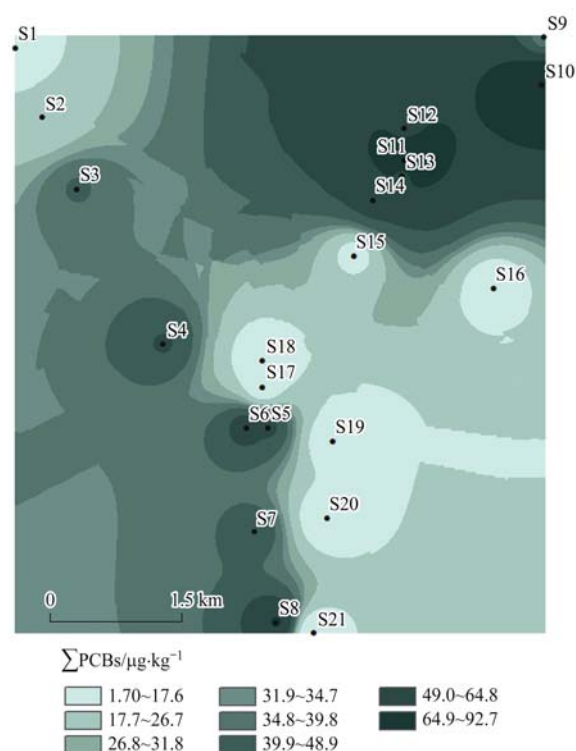


图 4 三亚河沉积物总 PCBs 空间污染分布

Fig. 4 Spatial distribution of $\sum$ PCBs pollution in the sediment of the Sanya River

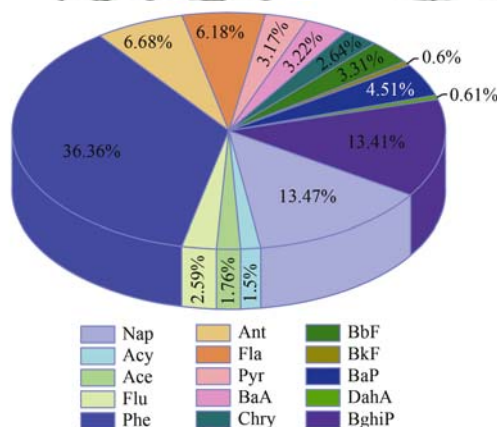


图 5 三亚河沉积物 15 种 PAHs 单体含量占比分布

Fig. 5 Content distribution of 15 PAHs monomers in the sediment of the Sanya River

均含量, 尚处于较易修复治理的状态.

环境中的 PAHs 来源通常根据其同分异构体比值法来确定, 本研究采用 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 法^[21]对 PAHs 来源进行解析. 当 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe}) < 0.1$ 为石油源, > 0.1 为燃烧源; 当 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr}) < 0.4$ 为石油源, > 0.5 主要是木材和煤燃烧源, 在 0.4~0.5 之间为石油及其精炼产品的燃烧来源, 具体来源分析见图 6.

结果如下, 三亚河沉积物 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 的比值范围为 0.01~0.58, 超过 76% 的采样点比值

大于 0.1, 表明沉积物 PAHs 以燃烧源为主. Flu/(Flu + Pyr) 比值范围为 0.1 ~ 0.9, 85% 以上采样点比值小于 0.4, 仅有一处采样点 (S4, 月川桥迎宾路) 比值大于 0.5, 表明沉积物 PAHs 以石油源为主导. 综合结果表明, 三亚河沉积物 PAHs 主要来源于石油燃烧, 同时也受木材、煤及石油精炼产品燃烧或石油泄漏污染影响. 三亚属于国际旅游城市, 道路干线上的交通工具以及河道上邮轮、船舶航行伴随的石油燃料的燃烧是沉积物 PAHs 的重要来源. 结合研究区域工商业分布可知, 三亚河周边建有大量住宅区、商业区及工业园区等, 生产生活带来的燃煤燃烧也是 PAHs 沉降累积的一大来源之一.

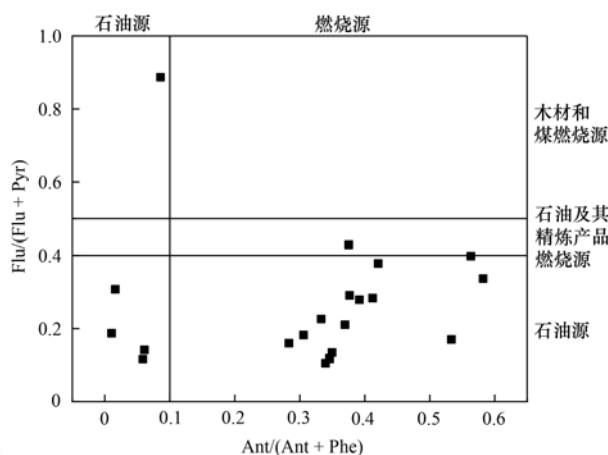


图 6 三亚河沉积物 PAHs 来源解析

Fig. 6 Source apportionment of PAHs in the sediment of the Sanya River

2.3.2 沉积物 PCBs 的组成和来源分析

PCBs 同族体组成特征为除七氯联苯外, 其余 4 种从三氯联苯到六氯联苯同族体含量占比随相对分子质量增加以约 10% 的增长率增加, 六氯联苯占比最高为 30.88%. 整体上三亚河沉积物 PCBs 污染为中高氯联苯污染, 占总 PCBs 污染的 80% 以上, 六氯联苯和七氯联苯污染总量超过一半.

PCBs 污染主要来源于工商业生产生活过程中使用的含 PCBs 产品尤其是电子产品的泄漏和外排^[23], 为进一步判断沉积物 PCBs 的具体来源以及进行污染源排查, 研究采用主成分分析法对三亚河 21 个采样点 5 种多氯联苯含量进行分析. 结果表明, 前两个主成分累计方差贡献率为 95.354%, 第一和第二主成分的贡献率分别为 75.354% 和 19.9%. 将本研究的 5 种 PCBs 同族体成分与 8 种 Aroclor 商业产品^[25]成分进行比较未发现明显的相似性, 说明 PCBs 非来源于单一污染源. 进一步由图 7 可知, 三氯联苯、六氯联苯和四氯联苯与 PC1 有较强的正相关, 其载荷因子分别为 0.957、0.923 和 0.913, 表明沉积

物以低中氯污染为主, 主要来源于国产电容器和变压器, 故可对三亚河附近生产或处理存放变压器或电容器的场地进行相应排查并加强管理, 另远距离的大气输送沉降 PCBs 污染也是需要考虑的因素之一. 七氯联苯在 PC2 上有较高的载荷, 载荷因子为 0.926, 表明还存在高浓度高氯联苯污染, 结合 PCBs 的空间污染分布可知部分河段周边的电子、汽车服务公司以及木材加工、水泥厂产生的进口电容器 PCBs 迁移和木材、煤炭的燃烧可能为主要污染源.

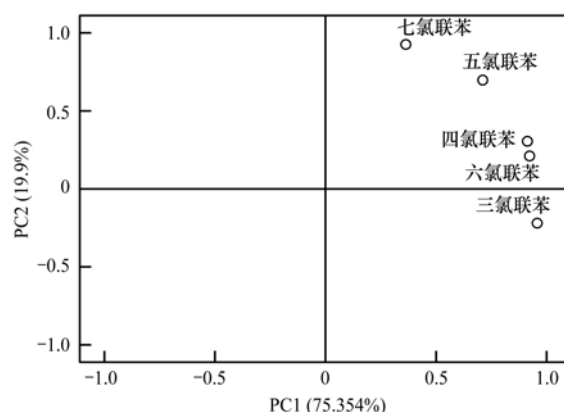


图 7 三亚河沉积物 PCBs 同族体因子载荷

Fig. 7 Loading plot of PCA for PCBs homologue in the sediment of the Sanya River

2.4 沉积物生态风险评价

2.4.1 沉积物 PAHs 生态风险评价

本研究采用 Long 等^[26]提出的质量基准法 (sediment quality criteria, SQGs) 和加拿大^[27]发布的多环芳烃质量标准法 (sediment quality standards, SQSs) 对三亚河沉积物 PAHs 潜在的生态风险进行评价, 具体评价结果见表 4. 在 SQGs 中, PAHs < ERL 表示生物毒副作用不显著; ERL ≤ PAHs ≤ ERM 表示偶尔会产生负面生态效应; PAHs > ERM 表示可能会产生一定的负面生态效应. SQSs 在 SQGs 的基础上将生态风险效应分为 5 个水平, 分别为 REL-罕见效应水平、TEL-临界效应水平、OEL-偶然效应水平、PEL-可能效应水平和 FEL-频繁效应水平.

结果表明, 有 17 处采样点 $\sum$ PAHs 含量小于 ERL 值, 生物毒副作用不明显; 4 处 $\sum$ PAHs 含量在 ERL 和 ERM 之间, 偶尔会产生负面生态效应, 无采样点 $\sum$ PAHs 含量超出 ERM 值或 PEL 值. 总体而言, 三亚河底泥多环芳烃生物毒副作用不明显, 生态风险较低. 对于单体 PAHs, 有 4 处采样点 (S2、S3、S16 和 S17) Phe 的含量超过了 ERM 值和 FEL 值, 尤其是 S2 和 S3 位于凤凰路水城路这一河段, 沿河两岸多是商业区和住宅区, 交通频繁, 菲的含量分

别是 ERM 值的 3 倍和 4 倍,对生物体的暴露存在严重威胁,尤其对底栖生物产生负效应;有 19 处采样点(除 S1 和 S2)BghiP 的含量超过了 ERM 值,生物毒性大于 50%,需引起重视.另外对于强致癌性物质 BbF,其含量虽未超过 ERL,但除采样点 S1 和 S2 外

均有检出量且其为相对分子质量较高的 4 环 PAHs,性质稳定易沉积,长时间难降解.综上,对于单体 PAHs 污染问题需关注其后续含量变化情况,建议采取一定的修复或预防措施,如物理化学、微生物修复和植物修复.

表 4 基于质量基准法和质量标准法 PAHs 生态风险评价结果¹⁾

化合物	质量基准法阈值 ^[26] /μg·kg ⁻¹		质量标准法阈值 ^[27] /μg·kg ⁻¹					含量(本研究) /μg·kg ⁻¹	点位数		
	ERL	ERM	REL	TEL	OEL	PEL	FEL		ND	>ERM	>FEL
Nap	160	2 100	17	35	120	390	1 200	0 ~ 2 068	6		3
Acy	44	640	3.3	5.9	30	130	340	5 ~ 82			
Ace	16	500	3.7	6.7	21	89	940	0 ~ 174	3		
Flu	19	540	10	21	61	140	1 200	8 ~ 978.5			
Phe	240	1 500	25	42	130	520	1 100	28 ~ 4 345		4	4
Ant	85.3	1 100	16	47	110	240	1 100	39 ~ 421			
Fla	600	5 100	47	110	450	2 400	4 900	0 ~ 504	2		
Pyr	665	2 600	29	53	230	880	1 500	31 ~ 145			
BaA	261	1 600	14	32	120	390	760	0 ~ 290	9		
Chry	384	2 800	26	57	240	860	1 600	0 ~ 147	2		
BbF	320	1 880	—	—	—	—	—	0 ~ 283	2		
BkF	280	1 620	—	—	—	—	—	0 ~ 145	15		
BaP	430	1 600	11	32	150	780	3 200	0 ~ 909	16		
DahA	430	1 600	3.3	6.2	43	140	200	0 ~ 110	16		
BghiP	63.4	260	—	—	—	—	—	133 ~ 537	1	19	
∑ PAHs	4 022	44 792	—	—	—	—	—	265 ~ 6 735			

1) ERL(effects range low)表示效应区间低值;ERM(effects range median)表示效应区间中值;REL(rare effect level)表示罕见效应水平;TEL(threshold effect level)表示临界效应水平;OEL(occasional effect level)表示偶尔效应水平;PEL(probable effect level)表示可能效应水平;FEL(frequency effect level)表示频繁效应水平;ND表示未检测出该物质含量;“—”表示文章中没有对应数据

2.4.2 沉积物 PCBs 生态风险评价

鉴于国内尚未制订沉积物 PCBs 评价相关标准,本研究采用质量基准法(SQGs)^[26]和加拿大环境委员会于 2002 年制订的沉积物环境质量标准(Canadian sediment quality guidelines, CA-SQG)^[28]对三亚河 PCBs 污染水平进行风险评价.在 SQGs 中,PCBs < ERL、ERL ≤ PCBs ≤ ERM 和 PCBs > ERM 对应的生物毒性效应概率分别为 < 10%、10% ~ 50% 和 > 50%.在 CA-SQG 中,PCBs < ISQG 表示 PCBs 对生物体的暴露值仍可接受,极少引起生物负效应;ISQG ≤ PCBs ≤ PEL 表示 PCBs 对生物体的暴露存在潜在威胁,可能会引起生物负效应;PCBs >

PEL 表示 PCBs 对生物体的暴露存在严重威胁,会经常引起生物负效应.由于三亚河下游与入海口连接混入了海水,故根据盐度(≥ 2‰为海水型和 < 2‰为淡水型)对各采样点采取不同的评价标准,具体采样点分类和评价结果见表 5.

结果表明,21 个采样点中 9 处 ∑ PCBs 含量小于 ERL 值和 ISQG 值,生物毒性效应 < 10%,极少会引起生物负效应;12 处 ∑ PCBs 含量在 ERL 值和 ERM 值之间且未超过 PEL 值,生物毒性效应为 10% ~ 50%,对生物体的暴露存在潜在威胁,可能会引起生物负效应,无采样点 ∑ PCBs 含量超出 ERM

表 5 基于质量基准法和环境质量标准法 PCBs 生态风险评价结果¹⁾

采样点	总 PCBs 含量 /μg·kg ⁻¹	分类	环境质量评价标准阈值 ^[28] /μg·kg ⁻¹	质量基准法阈值 ^[26] /μg·kg ⁻¹	点位数		
					介于 ISQG 与 PEL 之间	大于 PEL 或 ERM	介于 ERL 与 ERM 之间
S1 ~ S3 和 S9 ~ S13	10.45 ~ 92.75	淡水沉积物	ISQG = 34.1, PEL = 277	ERL = 22.7 ERM = 180	12	0	12
S4 ~ S8 和 S14 ~ S21	1.75 ~ 66.10	海洋与 河口沉积物	ISQG = 21.5, PEL = 189				

1) ISQG(interim sediment quality guideline)表示沉积物临界质量标准;PEL(probable effect level)表示可能效应水平;ERL(effects range low)表示效应区间低值;ERM(effects range median)表示效应区间中值

值或 PEL 值。综上所述, 三亚河 PCBs 生物毒性效应整体在 10%~50% 之间, 尚属于安全范围, 但长期累积效应仍需重视。

3 结论

(1) 三亚河沉积物 $\sum$ PAHs 和 $\sum$ PCBs 含量分别为 265.00~6 735.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.75~92.75 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。PAHs 整体处于高等污染水平, 与历史数据相比显著上升 10 倍以上, 以低环芳烃为主, 主要来源于石油燃烧; PCBs 整体污染程度较低, 以六氯联苯和七氯联苯为主, 主要来源于进口电容器中 PCBs 的迁移。整体而言, 污染分布与研究区域的工业分布和河流走势有较强的相关性, 建议合理规划产业建设, 加强生产管理。

(2) 生态风险评价结果为 PAHs 整体生态风险较低, 但部分采样点 PAHs 单体含量超标, 对生物体暴露存在严重威胁, 建议采取植物、物理化学等修复治理措施。PCBs 整体为低风险和低生物毒性水平, 尚属于安全范围。

参考文献:

- [1] Wolska L, Mechlińska A, Rogowska J, *et al.* Polychlorinated biphenyls (PCBs) in bottom sediments: identification of sources [J]. *Chemosphere*, 2014, **111**: 151-156.
- [2] Ravenscroft J, Schell L M, Akwesasne Task Force on the Environment. Patterns of PCB exposure among Akwesasne adolescents: the role of dietary and inhalation pathways [J]. *Environment International*, 2018, **121**: 963-972.
- [3] Qu C K, Albanese S, Lima A, *et al.* The occurrence of OCPs, PCBs, and PAHs in the soil, air, and bulk deposition of the Naples metropolitan area, southern Italy: implications for sources and environmental processes [J]. *Environment International*, 2019, **124**: 89-97.
- [4] Su P H, Zhang W W, Hao Y J, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon contaminations along shipping lanes and implications of seafarer exposure: based on PAHs in ship surface films and a film-air-water fugacity model [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138943.
- [5] Govaerts A, Verhaert V, Covaci A, *et al.* Distribution and bioaccumulation of POPs and mercury in the Ga-Selati River (South Africa) and the rivers Gudbrandsdalslågen and Rena (Norway) [J]. *Environment International*, 2018, **121**: 1319-1330.
- [6] 汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 等. 海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2942-2950.
- Wang H J, Kuang Z X, Zhou X, *et al.* Characteristics, source analysis, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in marine organisms from estuaries of Changhua River in Hainan Province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2942-2950.
- [7] Jafarabadi A R, Bakhtiari A R, Mitra S, *et al.* First polychlorinated biphenyls (PCBs) monitoring in seawater, surface sediments and marine fish communities of the Persian Gulf: distribution, levels, congener profile and health risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **253**: 78-88.
- [8] 刘建波, 刘洁, 陈春华, 等. 三亚湾表层沉积物中重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学与管理*, 2012, **37**(7): 106-109.
- Liu J B, Liu J, Chen C H, *et al.* Pollution characteristic and ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediment of Sanya Bay[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, **37**(7): 106-109.
- [9] Zhao L, Liu J Q, Cai G Q, *et al.* Distribution, source, and pollution assessment of heavy metals in Sanya offshore area, south Hainan Island of China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111561.
- [10] 甘华阳, 何海军, 张卫坤, 等. 三亚河沉积物中重金属生态风险评价与污染历史[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(11): 1878-1885.
- Gan H Y, He H J, Zhang W K, *et al.* Eco-risk assessment and contamination history of heavy metals in the sediments of Sanya River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(11): 1878-1885.
- [11] 徐方建, 闫慧梅, 田旭, 等. 海南岛东部陆架表层沉积物重金属污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1530-1539.
- Xu F J, Yan H M, Tian X, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in surface sediments in the continental shelf to the east of Hainan Island [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1530-1539.
- [12] 何书海, 曹小聪, 李腾崖, 等. 三亚河表层沉积物中多环芳烃分布、来源解析及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2019, **38**(4): 967-970.
- He S H, Cao X C, Li T Y, *et al.* Distribution, source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Sanya River [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(4): 967-970.
- [13] Benson N U, Fred-Ahmadu O H, Eket S I, *et al.* Occurrence, depth distribution and risk assessment of PAHs and PCBs in sediment cores of Lagos lagoon, Nigeria [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, **37**, doi: 10.1016/j.rsma.2020.101335.
- [14] Kim A W, Vane C H, Moss-Hayes V, *et al.* PAH, PCB, TPH and mercury in surface sediments of the Delaware River Estuary and Delmarva Peninsula, USA [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **129**(2): 835-845.
- [15] Mitra S, Corsolini S, Pozo K, *et al.* Characterization, source identification and risk associated with polyaromatic and chlorinated organic contaminants (PAHs, PCBs, PCBzs and OCPs) in the surface sediments of Hooghly estuary, India [J]. *Chemosphere*, 2019, **221**: 154-165.
- [16] 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、来源及风险评价[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.
- [17] 梅卫平. 滴水湖水系表层沉积物中多环芳烃和多氯联苯分布特征与风险评价[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014. 20-29.
- Mei W P. Distribution and ecological risk assessment of PAHs and PCBs in the surface sediments of Dishui Lake watershed [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. 20-29.
- [18] 李胜生, 谭浩, 陈园园, 等. 升金湖湿地保护区表层沉积物

- 中持久性有机污染物残留特征[J]. 安徽农业科学, 2018, **46**(12): 69-73, 117.
- Li S S, Tan H, Chen Y Y, *et al.* Characteristics of residual persistent organic pollutants in surface sediments of Shengjinhu wetland reserve [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(12): 69-73, 117.
- [19] 康杰, 胡健, 朱兆洲, 等. 太湖及周边河流表层沉积物中 PAHs 的分布、来源与风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 1162-1170.
- Kang J, Hu J, Zhu Z Z, *et al.* Distribution, source and risk assessment of PAHs in surface sediments from Taihu Lake and its surrounding rivers[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 1162-1170.
- [20] 杜娟, 吴宏海, 袁敏, 等. 珠江水体表层沉积物中 PAHs 的含量与来源研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(4): 766-770.
- Du J, Wu H H, Yuan M, *et al.* Study on concentrations and sources of PAHs in the surface sediments from Pearl River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(4): 766-770.
- [21] 高秋生, 焦立新, 杨柳, 等. 白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1616-1627.
- Gao Q S, Jiao L X, Yang L, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of typical persistent organic pollutants in Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1616-1627.
- [22] Baumard P, Budzinski H, Garrigues P, *et al.* Concentrations of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) in various marine organisms in relation to those in sediments and to trophic level [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1998, **36**(12): 951-960.
- [23] 王道玮. 沉积物中多环芳烃和多氯联苯分析方法的建立及其应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013. 7-9.
- Wang D W. Studies on establishment and application of the analysis method for polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in sediment[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. 7-9.
- [24] 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 等. 岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2937-2943.
- Lan J C, Sun Y C, Shi Y, *et al.* Source and contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in karst underground river basin[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2937-2943.
- [25] Mayes B A, McConnell E E, Neal B H, *et al.* Comparative carcinogenicity in Sprague-Dawley rats of the polychlorinated biphenyl mixtures aroclors 1016, 1242, 1254, and 1260[J]. *Toxicological Sciences*, 1998, **41**(1): 62-76.
- [26] Long E R, MacDonald D D. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1998, **4**(5): 1019-1039.
- [27] Environment Canada and Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec. Criteria for the assessment of sediment quality in Quebec and application frameworks: prevention, dredging and remediation [M]. Canada, 2007.
- [28] CCME EPC-98E, Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life[S].

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)