

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012~2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830)	
《环境科学》征稿简则 (846)	
信息 (838, 861, 913, 935)	

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价

母清林^{1,2}, 方杰¹, 邵君波^{1,2}, 张庆红¹, 王晓华¹, 黄备^{1,2}

(1. 浙江省舟山海洋生态环境监测站, 舟山 316021; 2. 海洋生态系统监测与健康评价联合实验室, 舟山 316021)

摘要: 2013 年对长江口及浙江近岸海域 62 个站位表层沉积物中多环芳烃 (PAHs) 进行了测定。结果表明, 16 种美国 EPA 优先控制的 PAHs 均有检出, PAHs 总量水平 (干重) 为 $31.8 \sim 384 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $131.1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其分布受到陆源输入和点源污染的影响, 高值区域出现在长江口 2 号站位和宁波 21 号站位附近。与国内外其它海区相比, 调查海域 PAHs 总体处于较低污染水平。调查海域沉积物中 PAHs 以 4 环、3 环为主, 来源分析显示 PAHs 主要来源于木柴、煤炭燃烧。利用沉积物质量基准法 (SQGs) 评价结果显示, 调查海域表层沉积物中 PAHs 处于较低的生态风险水平; 按照沉积物质量标准法 (SQSs) 评价结果表明, 调查海域表层沉积物的 PAHs 污染已经具有一定程度的“显见生态负效应”, 需要采取相应的措施进行污染控制和削减。

关键词: 长江口; 浙江近岸海域; 沉积物; 多环芳烃; 分布; 来源; 风险评价

中图分类号: X131; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0839-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.012

Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas

MU Qing-lin^{1,2}, FANG Jie¹, SHAO Jun-bo^{1,2}, ZHANG Qing-hong¹, WANG Xiao-hua¹, HUANG Bei^{1,2}

(1. Zhejiang Provincial Zhoushan Marine Ecological Environmental Monitoring Station, Zhoushan 316021, China; 2. Joint Laboratory of Marine Ecosystem Monitoring and Health Assessment, Zhoushan 316021, China)

Abstract: PAHs contents of surface sediments were tested from 62 sampling sites of the Yangtze River estuary and Zhejiang coastal zone in 2013. The results showed that: 16 kinds of PAHs, which are listed as priority pollutants by EPA, were found in all the samples. The total PAHs level (dry weight) reached $31.8 \sim 384 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the average amount was $131.1 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. The distribution of PAHs was affected by terrigenous input and point source pollution, the high-value zones were found at 2# sampling site of the Yangtze River estuary and 21# sampling site of Ningbo. Compared with other sea areas, the survey sea area was at a low PAHs pollution level. PAHs were primarily tetracyclic or tricyclic, and source analysis showed that most of PAHs were originated from combustion of wood and coal. Based on the Sediment Quality Guidelines (SQGs), the assessment result showed that the PAHs content of surface sediments from survey sea area was at a relatively low level of ecological risk; While according to the assessment result of the Sediment Quality Standards (SQSs), PAHs pollution of surface sediments from survey sea area displayed an “Obviously negative ecological effect” to some extent, and some countermeasures are required to control and eliminate pollutions.

Key words: Yangtze estuary; Zhejiang coastal areas; sediments; PAHs; distribution; sources; risk assessment

多环芳烃 (PAHs) 是一类极具生态和健康风险的重要持久性有机污染物, 广泛存在于各环境介质中, 主要来源于有机物质的不完全燃烧或高温热解。PAHs 大部分都有较强的毒性 (致癌性、致畸性和致突变性), 人类及动物癌症病变有 70% ~ 90% 是环境中化学物质引起的, 而 PAHs 则是环境中致癌化学物质中最大的一类^[1]。20 世纪 80 年代初, 美国环境保护署选定 16 种 PAHs 列入优先控制污染物名单。PAHs 具有低溶解性和疏水性, 因此易与悬浮物结合而沉降于水底, 因此沉积物是 PAHs 的主要环境归宿之一。同时, PAHs 能够通过再悬浮作用又会重新释放到环境中, 从而造成“二次污染”^[1~3]。

长江口是我国最典型的河口, 上海及浙江沿海长江三角洲经济圈是我国经济最发达的地区之一。大气干湿沉降、生活及工业排污、海洋运输、海岸工程、石油泄漏、以及长江、钱塘江、甬江、椒江等地表径流输入, 成为该海域 PAHs 的主要来源。目前, 对于该海域 PAHs 的研究报道主要集中在部分河口区域^[4~7], 对于长江口及浙江近岸海域大面积的研究鲜有报道。本研究对长江口及浙江近岸海域

收稿日期: 2014-08-28; 修订日期: 2014-10-21

基金项目: 浙江省环保科技计划项目 (2009-32, 2009-33); 浙江省公益性技术研究项目 (2014C23002)

作者简介: 母清林 (1980 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋环境监测及生态风险评价, E-mail: m_qinglin@163.com

沉积物中 PAHs 的含量进行了检测,对其分布、组成、来源进行了分析,对其潜在风险进行了评价,以期为该海域 PAHs 污染综合治理提供理论基础及科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2013 年 5~6 月对长江口及其邻近海域以及浙江沿岸海域进行了调查,共设 62 个站位,采样站位见图 1。采用抓斗式采样器采集表层沉积物样品,采样后样品用铝箔包好置于不锈钢盒中, -20°C 冷冻保存。

1.2 样品处理与分析

沉积物粒度采用 Microtrac S3500 型激光粒度仪分析测定。沉积物样品冷冻干燥后,经球磨机研磨过筛后待测。PAHs 样品的前处理及分析过程参照方杰等^[8]的方法。30.0 g 样品经加速溶剂萃取仪用二氯甲烷提取,提取液经 Lc-tech 公司 Freestyle 自动浓缩仪浓缩后,采用 GPC 净化,净化

后溶液再次经 Freestyle 自动浓缩仪浓缩,然后溶剂转换到正己烷,并定容到 1.00 mL,用 GC-MS 测定。如 GPC 净化后基质干扰较大时,可再经过 5% 去活化碱性氧化铝和 2% 去活化硅胶各 5 g 填充铝硅胶柱净化,后浓缩定容上机测定。测定组分包含 16 种 PAHs,分别是萘(NAP)、苊烯(ACY)、苊(ACT)、芴(FLU)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLA)、芘(PYR)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(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(IND)、二苯并[a,h]蒽(DBA)、苯并[g,h,i]芘(BGP)。沉积物中 TOC 采用重铬酸钾氧化-还原容量法分析测定。

1.3 质量控制

选取购自美国 CIL (Cambridge Isotope Laboratories, Inc) 公司的 16 种氘代内标 NAP-d8、ACY-d8、ACT-d10、FLU-d10、PHE-d10、ANT-d10、PYR-d10、BaA-d12、CHR-d12、BbF-d12、BkF-d12、BaP-d12、IND-d12、DBA-d14、BGP-d12 作为定量内标物,以内标法定量。通过全程序空白、平行样品、加标样品为质量控制和质量保证手段,确保样品分析结果准确可靠。所有全程序空白样品 PAHs 均未检出,16 种 PAHs 加标回收率为 60.2%~117.2%,平行样及两次平行加标测定结果 RSD 均小于 20%。

2 结果与讨论

2.1 长江口及浙江近岸海域沉积物中 PAHs 含量及分布特征

长江口及浙江沿岸海域表层沉积物中 PAHs 分析结果表明,16 种 PAHs 均有检出,其含量水平(干重)为 $31.8 \sim 384 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 $131.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。最小值出现在杭州湾中部的 16 号站位,最大值出现在长江口外 2 号站位。其空间平面分布如图 2 所示,沉积物中 PAHs 分布在长江口、杭州湾及舟山北部等北纬 30° 以北的海域的变化趋势与浙江东南部北纬 30° 以南海域呈现不同的等值线分布。在北纬 30° 以北海域,在长江口外 2 号站位附近有一明显高值区域,其含量向东南扩散递减,其原因可能为长江冲淡水中的泥沙沉积,而吸附在悬浮泥沙中的 PAHs 沉积所致;另外,在靠近宁波镇海 21 号站位附近有一相对高值区域,根据国家海洋局海洋环境质量公报,镇海化工区排污口位于 21 号站位附近,因此该高值区域可能受到化工区排污的

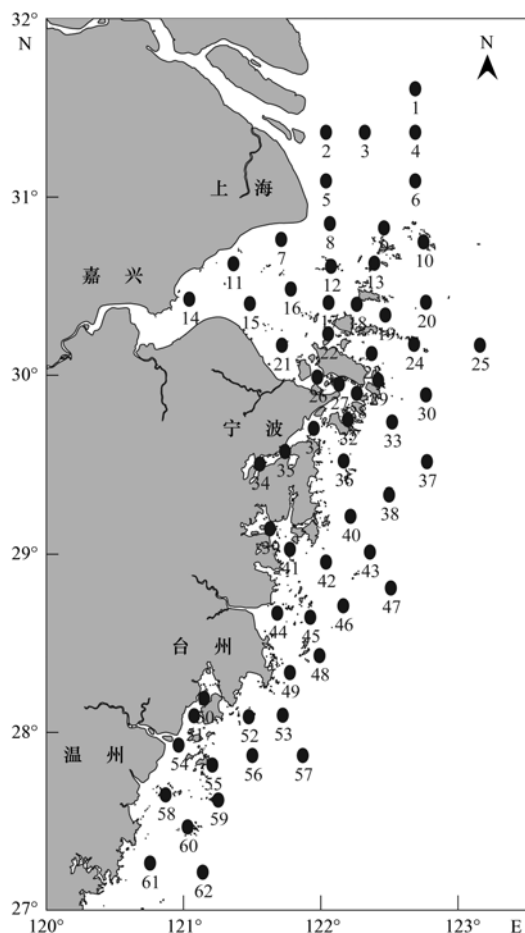


图 1 采样站位示意

Fig. 1 Location of sampling sites

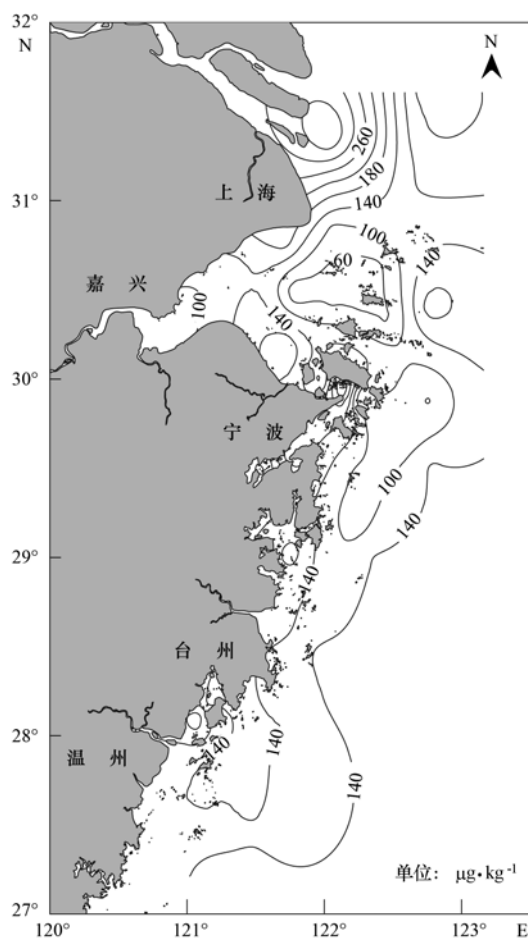


图2 沉积物中 PAHs 含量分布

Fig. 2 Distribution of PAHs in surface sediments

影响。在北纬 30° 以南的浙江东南部沿岸海域, 沉积物中 PAHs 总体含量水平较为接近, 空间分布较为均匀, 在宁波东部与舟山定海南部北纬 30° 附近海域出现一低值区域, 并且在浙江东部海域靠近岸边的区域低于远岸区, 显示该海域沉积物中 PAHs 受陆源影响较小。

多环芳烃在沉积物中的分布受到很多因素影响, 除化合物本身的理化性质外, 沉积物中的有机碳在多环芳烃的吸附和运移过程中起着重要的作用^[9]。表层沉积物中 PAHs 与有机碳 (TOC) 和沉积物粒度的关系分析结果显示, PAHs 与 TOC、粒度没有明显的相关关系, 相关系数 R 分别为 0.119 和 -0.196 ($n = 61$, P 分别为 0.36 和 0.13), 粒度与 TOC 有明显的负相关关系, R 为 -0.585 ($n = 60$, $P = 0.000$)。但是, 在北纬 30° 以北的长江口、杭州湾和舟山以北海域的 1~26 号站位, 去除 2 号站位的异常高值后, PAHs 与 TOC 有明显的线性正相关关系 (如图 3), 相关系数 R 为 0.639 ($n = 25$, $P = 0.001$)。进一步分析不同环数 PAHs 与 TOC 的关系, 2 环、3 环、4 环、5 环、6 环 PAHs 与 TOC 的相关系数 R 分别为 0.461、0.447、0.655、0.648、0.684 ($n = 25$, P 分别为 0.020、0.025、0.000、0.000、0.000), 结果显示高环的 PAHs 比低环 PAHs 与 TOC 具有更好的相关性, 这与赵健等^[10]的研究结果相同。在北纬 30° 以北海域, 由于受长江、钱塘江等入海径流的影响, 悬浮泥

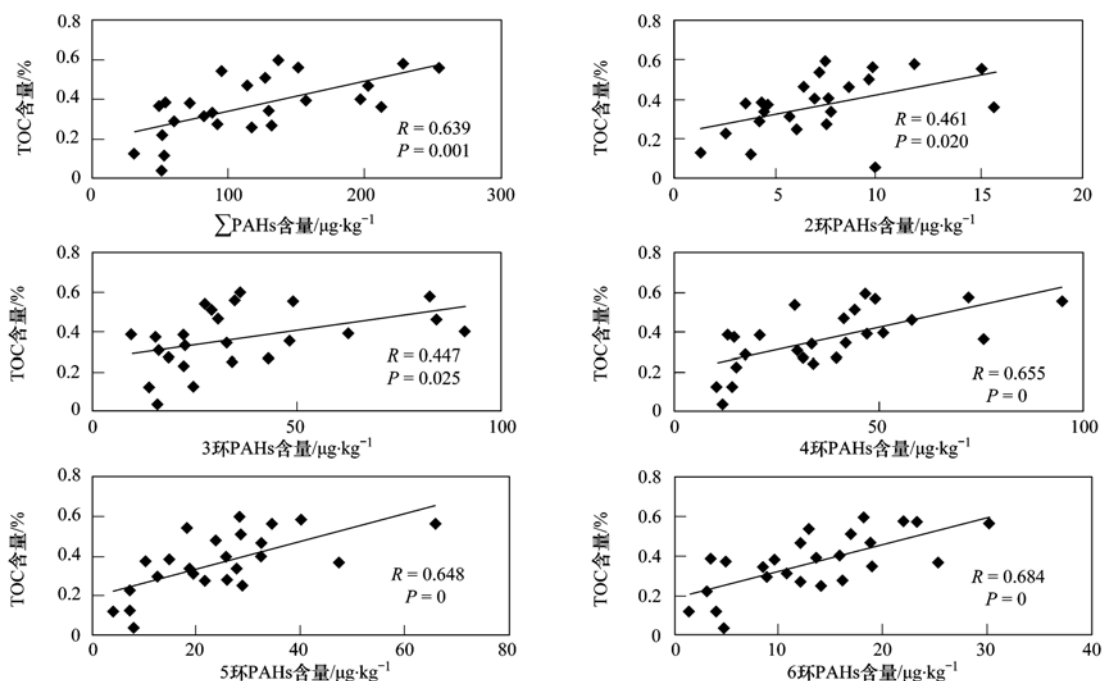


图3 沉积物中 PAHs 含量与 TOC 关系

Fig. 3 Relationships between PAHs content and TOC content in sediments

沙较重,该海域 PAHs 含量变化幅度大,变异系数为 0.53,TOC 变异系数为 0.41,沉积物中 PAHs 的吸附和运移过程受到 TOC 的影响,显示了较好的线性正相关关系. 然而在北纬 30°以南海域,PAHs 与 TOC 相关系数 R 为 $-0.2 (n = 35, P = 0.24)$,没有明显的相关关系. 可能的原因为该海域 PAHs 含量本身变化幅度较小,变异系数为 0.39,沉积物中 TOC 变异系数为 0.27,沉积物中的 PAHs 主要为自然沉降与吸附,受 TOC 的影响较小.

本次调查与国内外其它海区^[4,7,11~21]表层沉积物中 PAHs 含量对比见表 1. 本次调查区域的 PAHs 含量,与长江口南支^[11]、渤海湾潮间带^[14]和南海近岸带^[17]的含量水平相近,与国内厦门湾^[12]、北黄海^[16]、意大利海洋保护区^[18]、韩国 Masan Bay^[21]等相比处于较低的含量水平,同时远低于台湾高雄港^[19]和美国 Casco 湾^[20]沉积物中 PAHs 含量水平. 江敏等^[4]的调查区域属于本研究调查范围内,但是其调查结果远高于本次研究,具体原因尚不明确.

表 1 不同海区表层沉积物中 PAHs 含量比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 PAHs contents in surface sediments from different areas/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

海区	PAHs 种类比较 ¹⁾	含量水平	均值	文献
长江口及浙江近岸海域	16	31.8 ~ 384	131.1	本研究
舟山近海	16	1 017.9 ~ 3 047.1	2 022.4	[4]
台州湾	15	85.4 ~ 167.6	138.6	[7]
长江口南支	15	8.9 ~ 312.2	91	[11]
厦门湾	16	203.98 ~ 1 590.47	670	[12]
湄洲湾	16	196.7 ~ 299.7	256.1	[13]
渤海湾潮间带	16	12 ~ 415	140	[14]
青岛近海	16	255.77 ~ 1 884.07	684.80	[15]
北黄海	14	222.1 ~ 776.3	423.5	[16]
南海近岸带	16	75 ~ 219	135	[17]
意大利 15 个海洋保护区	16	0.7 ~ 1 550	155.26 ± 396.39	[18]
中国台湾高雄港	17	472 ~ 16 201	5 764	[19]
Casco Bay, 美国	23	16 ~ 20 748	2 900	[20]
Masan Bay, 韩国	16	207 ~ 2 670	680	[21]

1) PAHs 种类比较以本研究 16 种 PAHs 为基准,与本研究相比,台州湾和长江口南支少 ACT; 北黄海少 NAP、ACY、ACT、FLU,多总甲基菲; 台湾高雄港多 2-methylnaphthalene; 美国 Casco Bay 多 1-methylnaphthalene、2-methylnaphthalene、2-methylphenanthrene、biphenyl、2,6-dimethylnaphthalene、fluorene、benzo [e] pyrene

2.2 PAHs 组成及来源分析

一般而言,低分子量的 PAHs(2 环和 3 环)主要来源于石油污染,而高分子量的 PAHs(4 环及以上)主要来源于各种燃烧过程,而且前者在环境中更易于被生物富集、降解和光降解,因此它们所占的比例可以在一定程度上反映 PAHs 的来源和存在环境^[22~25]. 环境中 PAHs 来源的识别对于环境污染控制和制定相应的对策具有重要的意义.

各站位表层沉积物中 PAHs 的环数分布情况如图 4 所示. 其中,1 号站位 2 环 PAHs 所占比例接近 20%,34 号、51 号站位 2 环 PAHs 略高于 10%,其余站位 2 环 PAHs 所占比例均低于 10%; 除 18 号站位 5 环所占比例较高以外,其余站位 3 环与 4 环总和均大于 50%. 6 环所占比例在 4% ~ 17% 之间. 1 号、19 号站位 2 环与 3 环总量所占比例高于 50%,其余站位 3 ~ 6 环比例高于 50%. 平均 4 环 > 3 环

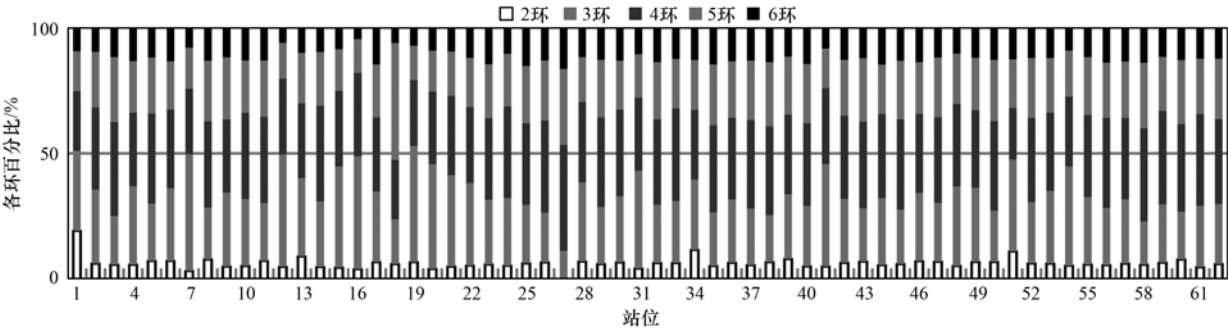


图 4 各站位表层沉积物中 PAHs 环数分布

Fig. 4 Distribution of PAHs with different rings in surface sediments at different stations

>5 环 >6 环 >2 环,这也反映了调查海区表层沉积物中 PAHs 以各种燃烧源为主。

利用同分异构体比值法可判断 PAHs 的来源,常用的 PAHs 同分异构体化合物有: PHE 和 ANT, FLA 和 PYR, IND 和 BGP. PHE 和 ANT 通常用于判断油类排放源和燃烧源,而 FLA 和 PYR, IND 和 BGP 这 2 组稳定性范围大,能较好地保存原始信息可用于判断石油燃烧源和木柴、煤燃烧源^[23~25]. 本研究选择 PHE 和 ANT, FLA 和 PYR, IND 和 BGP 这 3 组同分异构体,运用 ANT/(ANT + PHE)、FLA/(FLA + PYR)、IND/(IND + BGP) 的比值来判别表层沉积物中 PAHs 的来源. 判别方法^[26,27]为:当 ANT/(ANT + PHE) 大于 0.1 时指示为燃烧源,小于 0.1 时指示为石油源;当 FLA/(FLA + PYR)、IND/(IND + BGP) 分别小于 0.4 和 0.2 时指示为石油源,分别在 0.4 ~ 0.5 和 0.2 ~ 0.5 范围内时指示为石油燃烧源,大于 0.5 时指示为木柴、煤等燃烧源。

分别计算表层沉积物中 PAHs 三组同分异构体 ANT/(ANT + PHE)、FLA/(FLA + PYR)、IND/(IND + BGP) 的比值,以 FLA/(FLA + PYR) 为横坐标,其它比值为纵坐标绘制 PAHs 来源判别图,如图

5 所示. 其中 3 组指标均显示 1 号站位沉积物中 PAHs 主要来源于石油燃烧. 从 FLA/(FLA + PYR)、IND/(IND + BGP) 的指标来看,分别均大于 0.4 和 0.2,显示了 PAHs 主要来源于各类燃烧源. FLA/(FLA + PYR) 结果显示除 1 号、7 号站位位于 0.4 ~ 0.5 之间,其余均大于 0.5. IND/(IND + BGP) 结果显示在 0.2 ~ 0.5 之间的站位,北纬 30° 以上有 11 个站位,以下有 22 个站位. 综合分析结果,沉积物中 PAHs 主要为木柴、煤燃烧源,部分为石油燃烧源. 在长江口、杭州湾及舟山嵊泗等北纬 30° 以北海域,受到地表径流的影响,其中大部分站位木柴、煤燃烧源的比例更高. 然而 ANT/(ANT + PHE) 的结果显示有 17 个站位 ANT/(ANT + PHE) 小于 0.1,有 8 个站位 ANT/(ANT + PHE) 约等于 0.1. 进一步分析发现,这部分站位主要集中在杭州湾内的 6、9、10、12、13、14、15、16、17 等站位,镇海化工排污口附近 21 号站位和舟山附近 19、20、24、28 站位,以及象山港内和温州近岸的部分站位. 反映出这些站位虽然主要来源于燃烧源,但也受到石油等污染的影响,部分指标显示石油源,可能与宁波镇海化工园排污和杭州湾内以及部分近岸海域受到了油类污染有关。

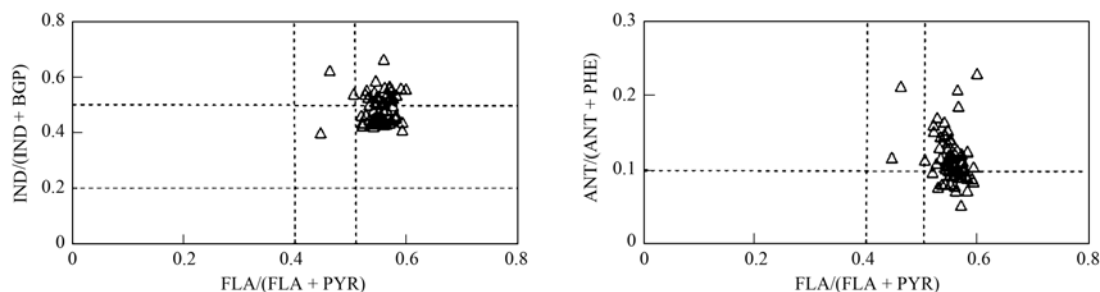


图 5 表层沉积物 PAHs 来源分析

Fig. 5 Source analysis of PAHs in surface sediments

2.3 PAHs 风险评价

通常低环数的 PAHs (2 ~ 3 环) 可呈现显著的急性毒性,而某些高环数的 PAHs (4 ~ 6 环) 则具有潜在的致癌性^[28]. 对 PAHs 的风险评价研究在很多国家先后开展. 目前,我国尚未颁布相关 PAHs 的沉积物质量标准。

沉积物质量基准法 (SQGs) 是评估淡水、港湾和海洋沉积物质量的有用工具. Long 等^[29] 在大量实验的基础上,对于海洋与河口沉积物中 PAHs 潜在生态风险提出了风险效应低值 (effects range low, ERL) 和风险效应高值 (effects range median, ERM), 各 PAHs 组分对应 ERL 和 ERM 见表 2. 若 PAHs 的

含量小于 ERL, 则产生负面生态效应的可能性不大; 若 PAHs 的含量在两者之间, 则具有潜在的生态风险; 若 PAHs 的含量大于 ERM, 则可能产生严重的生态风险. 按照 ERL、ERM 评价本次调查各站位 PAHs 潜在生态风险水平, 其结果表明, 所有站位中, 仅有 7 号站位 ACY 值为 27.3, 处于 ERL 和 ERM 之间, 其余站位各 PAHs 组分含量均低于 ERL 值, 显示出调查海域表层沉积物中 PAHs 处于较低的生态风险水平. 某些 PAHs 如 BbF、BkF、IND 和 BGP 没有最低安全值, 只要存在于环境中就会产生毒副作用^[25]. 在本次调查中, 这些组分均有检出, 应该引起重视。

另外,应用沉积物质量标准法(SQSs)评价沉积物中 PAHs 生态风险.加拿大魁北克省 2006 年颁布的沉积物质量标准^[30]对 PAHs 各组分阈值分得更细致,该标准包含 5 个阈值,分别为生物毒性影响的罕见效应浓度值(REL)、临界效应浓度值(TEL)、偶然效应浓度值(OEL)、可能效应浓度值(PEL)和频繁效应浓度值(FEL),12 种 PAHs 的上述 5 个阈值见表 3,这 5 个阈值的划分可作为环境管理执行对策的参考标准.按照加拿大魁北克省的沉积物质量标准评价研究海域沉积物中 PAHs 的污染水平,其结果如表 3 所示.12 种 PAHs 中有 9 种存在超过 REL 的情况.其中 2 环的 NAP 仅有 2 号站位处于 REL 和 TEL 之间;3 环的 ACY、PHE 分别有 16 个和 14 个站位处于 REL 和 TEL 之间,4 个和 5 个站位处于 TEL 和 OEL 之间,ACT、FLU 分别有 1 个和 3 个站位处于 REL 和 TEL 之间;4 环的 BaA 和 CHR 有 2 号、27 号两个站位处于 REL 和 TEL 之间;5 环的

BaP、DBA 分别有 5 个和 3 个站位处于 REL 和 TEL 之间,BaP 的 2 号、27 号两个站位处于 TEL 和 OEL 之间.其中,3 环的 PAHs 超过标准限值站位数最多.结果显示,2 号、7 号、21 号、27 号站位普遍高于 REL 值,2 号处于长江口南支外,7 号在上海金山附近,21 号处于镇海化工园排污口附近,27 号位于舟山石油储备基地附近,这些站位的特殊地理位置应该引起有关部门关注.根据上述质量标准,当有一个或多个化合物的含量高于 TEL 值时,意味着沉积物对底栖生物产生“显见生态负效应”的概率将随含量的升高而显著增加;若检测到的含量高于周围环境含量,必须识别污染源并采取一定的控制措施;为了防止污染物的进一步输入,需要对沉积区上游(甚至下游)的任何超过 TEL 值的排放源进行监控^[30].因此,长江口及浙江近岸海域表层沉积物的 PAHs 污染已经具有一定程度的“显见生态负效应”,需要采取相应的措施进行污染控制和削减.

表 2 沉积物中 PAHs 的质量评价标准/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

化合物	沉积物质量标准 ^[28]		本次调查范围	加拿大魁北克沉积物 PAHs 质量评价标准 ^[30]				
	ERL	ERM		REL	TEL	OEL	PEL	FEL
NAP	160	2 100	1.04 ~ 24.2	17	35	120	390	1 200
ACY	16	500	0.18 ~ 27.3	3.3	5.9	30	130	340
ACT	44	640	0.13 ~ 5.86	3.7	6.7	21	89	940
FLU	19	540	1.25 ~ 16.8	10	21	61	140	1 200
PHE	240	1 500	4.72 ~ 74	25	42	130	520	1 100
ANT	85.3	1 100	0.26 ~ 12.6	16	47	110	240	1 100
FLA	600	5 100	2.5 ~ 47	47	110	450	2400	4 900
PYR	665	2 600	1.88 ~ 36	29	53	230	880	1 500
CHR	384	2 800	1.58 ~ 30.8	26	57	240	860	1 600
BaA	261	1 600	0.54 ~ 21.8	14	32	120	390	760
BaP	430	1 600	0.46 ~ 40	11	32	150	780	3 200
DBA	63.4	260	0.11 ~ 6.05	3.3	6.2	43	140	200

表 3 表层沉积物中 PAHs 的污染水平分析

沉积物质量 标准范围	各组超标站位									
	NAP	ACY	ACT	FLU	PHE	BaA	CHR	BaP	DBA	
大于 FEL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
PEL ~ FEL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
OEL ~ PEL	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TEL ~ OEL	—	2,7,39,44	—	—	2,15,20,21,41	—	—	2,27	—	—
REL ~ TEL	2	3,4,5,6,19,22,23,25,43, 46,47,49,50,52,53,57	7	2,20,21	3,5,7,9,10,22,27,32, 35,48,53,54,55,62	2,27	2,27	3,5,18,21,35	2,7,27	—
小于 REL	其余	其余	其余	其余	其余	其余	其余	其余	其余	—

3 结论

(1)长江口及浙江沿岸海域表层沉积物中 PAHs 分析结果表明,16 种 PAHs 均有检出,其含量水

平为 31.8 ~ 384 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 131.1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. PAHs 分布受陆源输入和点源污染影响,高值区域出现在长江口 2 号站位和宁波 21 号站位附近;与国内外其它相似海区相比,调查海域 PAHs

处于较低污染水平。

(2) 长江口及浙江沿岸海域表层沉积物中 PAHs 环平均分布为 4 环 > 3 环 > 5 环 > 6 环 > 2 环。PAHs 来源分析显示, 1 号站位为石油燃烧源, 其余站位 PAHs 主要来源于燃烧源, 其中主要为木柴、煤等燃烧源, 部分为石油燃烧源。

(3) 按照沉积物质量基准评价结果显示, 调查海域表层沉积物中 PAHs 处于较低的生态风险水平。按照加拿大沉积物质量标准评价结果显示, 部分站位沉积物中 PAHs 已经超过了 TEL, 说明长江口及浙江近岸海域表层沉积物的 PAHs 污染已经具有一定程度的“显见生态负效应”, 需要采取相应的措施进行污染控制和削减。

参考文献:

- [1] 胡国成, 郭建阳, 罗孝俊, 等. 白洋淀表层沉积物中多环芳烃的含量、分布、来源及生态风险评价 [J]. 环境科学研究, 2009, **22**(3): 321-326.
- [2] Chiou C T, MacGroddy S E, Kile D E. Partition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons on soils and sediments [J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32**(2): 264-269.
- [3] 周怀东, 赵健, 陆瑾, 等. 白洋淀湿地表层沉积物多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 [J]. 生态毒理学报, 2008, **3**(3): 291-299.
- [4] 江敏, Tuan L H, 梅卫平, 等. 舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 [J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2672-2679.
- [5] 王波, 李正炎, 傅明珠, 等. 长江口及其邻近海域表层沉积物中多环芳烃的分布和生态风险评价 [J]. 中国海洋大学学报, 2007, **37**(Sup): 83-87.
- [6] 欧冬妮, 刘敏, 许世远, 等. 长江口滨岸水和沉积物中多环芳烃分布特征与生态风险评价 [J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 3043-3049.
- [7] 江锦花. 台州湾海域表层沉积物中多环芳烃的浓度水平、富集规律及来源 [J]. 海洋通报, 2007, **26**(4): 85-90.
- [8] 方杰, 王凯雄. 气相色谱-离子阱质谱法测定海洋贝类中多残留有机氯农药、多氯联苯和多环芳烃 [J]. 分析化学, 2007, **35**(11): 1607-1613.
- [9] Moon J W, Goltz M N, Ahn K H, *et al.* Dissolved organic matter effects on the performance of a barrier to polycyclic aromatic hydrocarbon transport by groundwater [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2003, **60**(3-4): 307-326.
- [10] 赵健, 周怀东, 富国, 等. 河北西大洋水库沉积物中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 [J]. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 701-707.
- [11] 晁敏, 伦凤霞, 沈新强. 长江口南支表层沉积物中多环芳烃分布特征及生态风险 [J]. 生态学杂志, 2010, **29**(1): 79-83.
- [12] 李庆召, 李国新, 罗专溪, 等. 厦门湾海域表层沉积物重金属和多环芳烃污染特征及生态风险评价 [J]. 环境化学, 2009, **28**(6): 869-875.
- [13] 林建清, 王新红, 洪华生, 等. 湄洲湾表层沉积物中多环芳烃的含量分布及来源分析 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, **42**(5): 633-638.
- [14] 黄国培, 陈颖军, 林田, 等. 渤海湾潮间带表层沉积物中多环芳烃的含量分布和生态风险 [J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1856-1863.
- [15] 王江涛, 谭丽菊, 张文浩, 等. 青岛近海沉积物中多环芳烃、多氯联苯和有机氯农药的含量和分布特征 [J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2713-2722.
- [16] 李斌, 吴莹, 张经. 北黄海表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源 [J]. 中国环境科学, 2002, **22**(5): 429-432.
- [17] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源 [J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 129-134.
- [18] Perra G, Pozo K, Guerranti C, *et al.* Levels and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in superficial sediment from 15 Italian marine protected areas (MPA) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(4): 874-877.
- [19] Chen C W, Chen C F. Distribution, origin, and potential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of Kaohsiung harbor, Taiwan [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **63**(5-12): 417-423.
- [20] Kennicutt M C, Wade T L, Presley B J, *et al.* Sediment contaminants in Casco Bay, Maine: inventories, sources, and potential for biological impact [J]. Environmental Science and Technology, 1994, **28**(1): 1-15.
- [21] Yim U H, Hong S H, Shim W J, *et al.* Spatio-temporal distribution and characteristics of PAHs in sediments from Masan Bay, Korea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **50**(3): 319-326.
- [22] Mai B X, Qi S H, Zeng E Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region off Macao, China: assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(21): 4855-4863.
- [23] Wang X C, Sun S, Ma H Q, *et al.* Sources and distribution of aliphatic and polyaromatic hydrocarbons in sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, **52**(2): 129-138.
- [24] 陈卫峰, 倪进治, 杨红玉, 等. 福州内河沉积物中多环芳烃的分布、来源及其风险评价 [J]. 中国环境科学, 2010, **30**(12): 1670-1677.
- [25] 张明, 唐访良, 吴志旭, 等. 千岛湖表层沉积物中多环芳烃污染特征及生态风险评价 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(1): 253-258.
- [26] 孙玉川, 沈立成, 袁道先. 表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2091-2098.
- [27] 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.
- [28] Witt G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of the Baltic Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, **31**(4-12): 237-248.
- [29] 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.
- [30] 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 [S]. Québec: Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, 2007. 1-39.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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