

## 湖州市沿圩湾村河流多环芳烃分布及生态风险评价

湛一涵, 沈路遥, 彭自然, 何文辉, 潘宇迪

### Distribution and ecological risk assessment of PAHs in rivers of Yanweiwan Village, Huzhou

CHEN Yihan, SHEN Luyao, PENG Ziran, HE Wenhui, PAN Yudi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20191002832>

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

##### [牡蛎池中多环芳烃的分布、来源和生态风险评价](#)

Distribution, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal waters in oyster pond  
南方水产科学. 2017, 13(2): 43 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0780.2017.02.006>

##### [崇明岛草鱼池塘沉积物中多环芳烃的分布状况及生态风险](#)

Distribution and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Chongming Island grass carp ponds  
水产学报. 2020, 44(12): 2055 <https://doi.org/10.11964/jfc.20200212167>

##### [海洋生物体多环芳烃污染残留及其健康风险评价研究](#)

Review of assessment on residual contamination and health risk of PAHs in marine organisms  
南方水产科学. 2012, 8(3): 71 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0780.2012.03.011>

##### [环渤海地区养殖水产品中多环芳烃\(PAHs\)污染残留及健康风险评估](#)

Residue levels of PAHs in aquaculture products from Bohai Bay and their health risk assessment  
中国渔业质量与标准. 2015, 5(6): 20 <https://doi.org/10.11964/jfc.201506020>

##### [温州主要入海河流6种重金属的空间分布及风险评估](#)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Six Heavy Metals in Rivers Flowing into Sea at Wenzhou, Zhejiang Province  
水生态学杂志. 2021, 42(1): 42 <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.201903120057>

##### [水产品中多环芳烃的污染和健康风险评价模型研究进展](#)

Research progress of pollution and health risk assessment model for polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic products  
渔业研究. 2015, 37(1): 79 <https://doi.org/10.14012/j.cnki.fjsc.2015.01.012>

文章编号: 1674-5566(2021)02-0284-10

DOI:10.12024/jso.20191002832

## 湖州市沿圩湾村河流多环芳烃分布及生态风险评价

谌一涵, 沈路遥, 彭自然, 何文辉, 潘宇迪

(上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

**摘要:** 为研究太湖沿岸农村河道多环芳烃(PAHs)分布特征、来源及生态风险,采集湖州太湖湖滨典型农村湖州市沿圩湾村 10 个站点的水样和沉积物样,利用高效液相色谱仪(HPLC)测定了美国环境保护署优控的 16 种 PAHs 的含量和组成。结果表明,研究区域 PAHs 含量与其他地区相比总体处于中等偏低水平,风险较低。对水体中 PAHs 污染分布特征分析表明,PAHs 总质量浓度最高的 3 个点均为工业区与居民区混合的区域,分别为 958.39、685.97、858.57 ng/L,主要以低分子量(2~3 环)PAHs 为主。采用比值法和主成分分析法对 PAHs 的来源进行解析,结果表明,该地区主要污染源为秸秆、煤炭的燃烧,伴有少量石油源。采用生物阈值和超标系数对沉积物的生态风险进行评价,结果显示该地区超过 80% 区域不存在生态风险,少数地区存在生态风险概率较低,未出现生态风险概率较高的地区。采用致癌等效质量浓度(TEQ)评价该地区的致癌风险,结果表明工业区和垃圾站的致癌风险较高,致癌等效质量浓度分别为 2.04 和 1.76 ng/m<sup>3</sup>。

**关键词:** 多环芳烃; 分布特征; 来源解析; 风险评价

**中图分类号:** X 522      **文献标志码:** A

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类由两个或两个以上苯环按线形、角形或簇状等稠环方式相连组成的有机化合物<sup>[1]</sup>,主要来源于有机物的不完全燃烧,炼焦、工业和生活中煤炭、石油、生物质燃烧,垃圾焚烧和交通排放等,是一种具有“三致效应”的持久性有机物<sup>[2-3]</sup>。国内外众多学者对河流、湖泊等水体中 PAHs 进行了广泛的研究<sup>[4-10]</sup>。太湖位于长江三角洲南部地区,作为我国第三大淡水湖,工农业发展迅速,但与此同时水环境污染也成为太湖流域的重要问题<sup>[11]</sup>。国内众多学者<sup>[12-14]</sup>对太湖水体、饮用水源地、主要河流中 PAHs 的分布、来源和风险进行了研究,但是,针对太湖流域农村河流中 PAHs 的研究较少。本文选取长兜港(东西苕溪由此汇入太湖)沿岸的沿圩湾村,对其乡村河道布点采样,研究湖州市农村河道中 PAHs 的分布特点、污染来源以及致癌和生态风险,研究结果对于太湖湖滨农村生态环境保护和美丽乡村建设具有参考意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

选取太湖湖滨典型农村河道区域即浙江湖州沿圩湾村作为研究区,是新型农村建设的代表。沿圩湾村位于湖州市太湖沿岸(图 1),东邻长兜港,南邻环渚乡,西邻桥东村,北邻红旗村,整个村的总面积约 0.6 km<sup>2</sup>,耕地面积达 0.4 km<sup>2</sup>。

在研究区域布设了具有代表性的 10 个采样点,分别编号 S1~S10(图 1),其中 S1、S10 位于农田与村落交界处,S2、S9 位于交通主干道附近且 S9 旁有垃圾站,S3、S4、S5、S6 位于工业区与养殖场附近,S7、S8 位于农田区域。

### 1.2 样品采集

于 2016 年 8 月采集表层水体与沉积物等样品。水样采集方法参照《高效液相色谱法测定水中多环芳烃类化合物》(SL 465—2009),使用 5 L 玻璃采水器采集表层水样并存储于棕色广口玻

收稿日期: 2019-10-24      修回日期: 2020-02-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012-004)

作者简介: 谌一涵(1994—),女,硕士研究生,研究方向为环境监测与评价。E-mail:291424199@qq.com

通信作者: 彭自然, E-mail: zrpeng@shou.edu.cn

璃瓶中,往每升水样中加入 50 mg 硫代硫酸钠,待完全溶解后,向水样中加入数滴 6 mol/L 盐酸,使水样 pH 小于 2,防止某些待测组分的氧化和生物降解,置于 4 ℃ 下避光冷藏保存;表层沉积物样

品按照《水质采样技术指导》(HJ 494—2009)要求进行布点采集,采集表层沉积物样品置于密封袋中,于 4 ℃ 下冷藏保存。

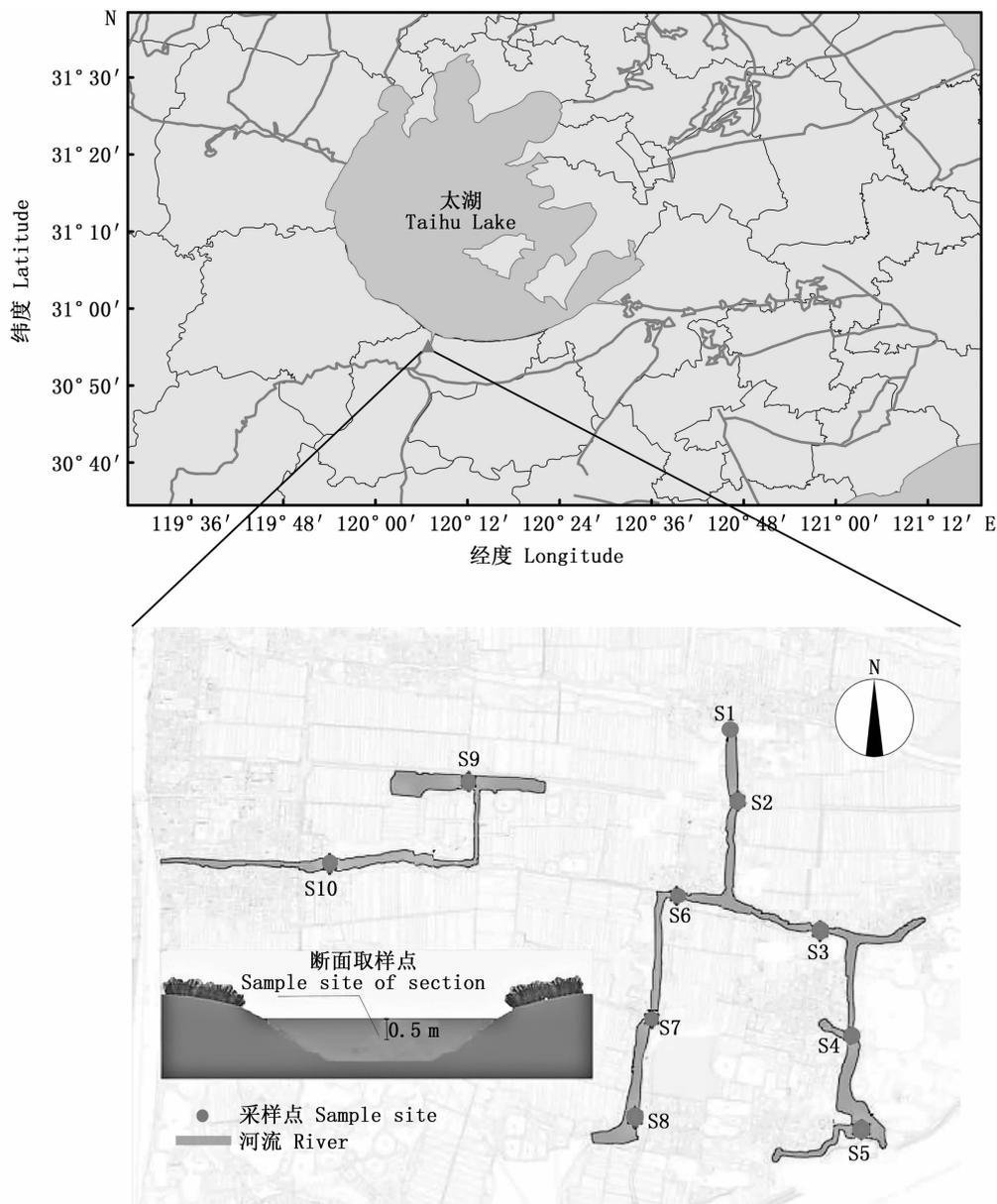


图 1 采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

### 1.3 样品的预处理及测定方法

从冰箱中取出样品,平衡至室温,用 0.75  $\mu\text{m}$  孔径玻璃纤维膜过滤水样,称量后,按同温度下密度换算成水样体积。通过 SUPELCO 固相萃取仪萃取采集 PAHs,萃取前分别用 10 mL 甲醇和超纯水清洗活化 HLB 固相萃取小柱,然后萃取过

滤后的水样,调节流出速度约为 5 mL/min,将滤后 HLB 小柱在真空条件下抽干。用 15 mL 二氯甲烷分 3 次洗脱,收集洗脱液。并用氮吹仪将洗脱液浓缩至近干,用正己烷(色谱纯)准确定容至 1 mL 转移至进样瓶,待测<sup>[15]</sup>。

沉积物经冷冻干燥后研磨过 100 目钢筛,用

电子天平准确称取 5.000 g 过筛样品,加入 2 g  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  和 1 g 清洗后铜粉,以去除沉积物中的水分和硫。在自动索氏提取器中用 100 mL 二氯甲烷和丙酮混合液[ $V(\text{二氯甲烷}):V(\text{丙酮})=1:1$ ]连续抽提 24 h(65 °C)。用氮吹仪将萃取液吹至近干,用正己烷准确定容至 1 mL,再通过经 40 mL 正己烷淋洗的净化柱(净化柱从下至上依次为 1 cm 无水硫酸钠,3.5 g Florisil 硅胶和 1 cm 无水硫酸钠)净化,用 50 mL 二氯甲烷和正己烷混合液[ $V(\text{二氯甲烷}):V(\text{正己烷})=2:3$ ]洗脱目标物,收集洗脱液,并用氮吹仪浓缩至 1 mL,移至 2 mL 棕色进样瓶中待测<sup>[16]</sup>。

所有待测样品均采用 SP-20A 高效液相色谱仪(日本岛津公司)分析测定美国环境保护署优控的 16 种 PAHs 质量浓度。色谱柱型号为 ODS-P(4.6 mm × 250 mm × 5 μm),以乙腈-水为流动相。梯度洗脱程序为 0 ~ 7 min,  $V(\text{水}):V(\text{乙腈})=20:80$ ; 7 ~ 17 min,  $V(\text{水}):V(\text{乙腈})=0:100$ ; 17 ~ 42 min,  $V(\text{水}):V(\text{乙腈})=20:80$ ,保持到 60 min。测定流速为 1 mL/min,紫外检测波长为 254 nm,进样量为 20 μL,外标法定量计算。共检测出 13 种 PAHs,其水体、沉积物检出限分别为萘(ANA, 0.15 ng/L, 1.64 ng/g)、蒽(ANT, 0.14 ng/L, 2.94 ng/g)、荧蒽(FLA, 0.19 ng/L, 3.15 ng/g)、芘(PYR, 0.22 ng/L, 0.94 ng/g)、屈(CHR, 0.46 ng/L, 4.92 ng/g)、苯并[a]蒽(BaA, 0.15 ng/L, 2.59 ng/g)、苯并[b]荧蒽(BbF, 0.13 ng/L, 2.54 ng/g)、苯并[k]荧蒽(BkF, 0.12 ng/L, 1.92 ng/g)、苯并[a]芘(BaP, 0.41 ng/L, 2.12 ng/g)、二苯并[a,h]蒽(DBA, 0.13 ng/L, 0.67 ng/g)、茚并[1,2,3-cd]芘(IPY, 0.15 ng/L, 0.66 ng/g)、菲(PHE, 0.21 ng/L, 1.16 ng/g)、苯并[g,h,i]芘(BPE, 0.62 ng/L, 1.61 ng/g),其中 PHE 与 BPE 只在沉积物中有检出。为保障数据准确,对样品进行质量控制,采用内标定量法进行加标回收率实验,并对所有样品设置平行。样品加标回收率为 71.3% ~ 112.4%,平行样品相对标准偏差在 20% 以下。

## 2 结果

### 2.1 水中 PAHs 质量浓度及分析评价

#### 2.1.1 多环芳烃浓度及分布

沿圩湾村河水多环芳烃质量浓度如图 2 所示,共检测出多环芳烃 11 种,其中 3 环 2 种、4 环 4 种、5 环 4 种、6 环 1 种。低环(2 ~ 3 环)PAHs 分子量低、溶解度高,多以溶解态形式出现,故水中含量高<sup>[17]</sup>。S3、S4、S5 站点多环芳烃质量浓度高于其他站点( $P=0.001$ ),分别为 958.39、685.97、858.57 ng/L,3 个站点位于工业区与养殖场附近,人为活动较多,污染物排放量高于其他区域,使得该区域 PAHs 质量浓度较其他区域高。S7、S8、S10 站点多环芳烃质量浓度较低( $P=0.009$ ),3 个站点周围主要为农田。其他区域多为村庄与农田交界处和道路边缘,PAHs 质量浓度略高于农田区域。可见沿圩湾村的多环芳烃分布主要受人为生产活动影响,住宅区、工业区以及养殖区分布密集的地区,多环芳烃质量浓度相对较高。农田等除正常农业耕作外受人为活动干扰较轻,多环芳烃质量浓度相对较低。将检测所得太湖流域沿圩湾村 PAHs 质量浓度与国内部分流域水体 PAHs 质量浓度(表 1)对比可知,该研究区域水体中 PAHs 质量浓度高于巢湖、滴水湖水系和草海;低于舟山流域与长江中段武汉流域。总体来看其水体中 PAHs 处于中等污染水平。

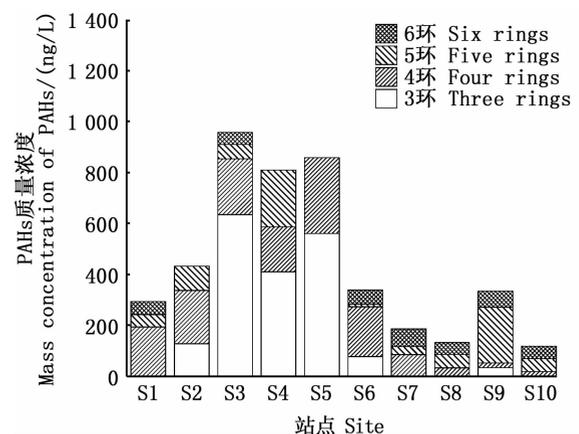


图 2 水体中不同环数 PAHs 质量浓度

Fig. 2 PAHs mass concentrations with different ring number in water sample

表1 国内不同河流湖泊中 PAHs 质量浓度

Tab.1 Mass concentrations of PAHs in different rivers and lakes in China

| 研究区域<br>Research area                             | 质量浓度范围<br>Mass concentration<br>range/(ng/L) | 文献<br>Reference |
|---|--|-----------------|
| 沿圩湾村 Yanweiwan Village                            | 119.50 ~ 958.40                              | 本研究             |
| 巢湖 Chaohu Lake                                    | 95.63 ~ 370.13                               | [18]            |
| 舟山 Zhoushan                                       | 382.30 ~ 816.90                              | [19]            |
| 滴水湖 Dishui Lake                                   | 66.20 ~ 269.00                               | [20]            |
| 草海 Caohai   | 13.40 ~ 694.93                               | [21]            |
| 长江中段武汉<br>Wuhan in the middle<br>of Yangtze River | 242.00 ~ 6 325.00                            | [22]            |

### 2.1.2 来源解析

PAHs 的来源比较复杂,通常用不同 PAHs 异构体的比值来判断燃烧源的特征更为全面。YUNKE 等<sup>[10]</sup>研究发现  $BaA / (BaA + CHR) \leq 0.2$  主要为石油源;  $BaA / (BaA + CHR) \geq 0.35$  为燃烧源;  $0.2 < BaA / (BaA + CHR) < 0.35$  表明两种来源都存在。如图 3 所示, S1、S2、S5、S6 主要污染源为石油源, S3、S4 两个站点石油源和燃烧源均存在, S7、S8、S9、S10 站点主要污染源为燃烧源。结果显示,石油源污染主要分布在居民区和工业区,而燃烧源污染主要分布于农业区和居民区。

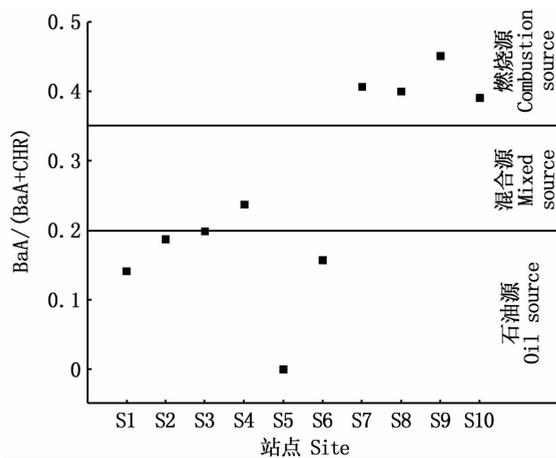


图3 水体中 BaA/(BaA + CHR)

Fig.3 Ratio of BaA and (BaA + CHR) in water

根据多环芳烃的苯环数量,可以将其分为 2~3 环和 4~6 环。通常认为:以石油源为主的多环芳烃污染中,2 环和 3 环的 PAHs (LMW) 所占的比例较高;而以煤炭、木材等化石燃料不完全燃烧的燃烧源为主的多环芳烃污染中,4~6 环

的 PAHs (HMW) 含量较高。当  $LMW / (LMW + HMW)$  比值大于 0.5 时,认为主要污染源为石油源;当  $LMW / (LMW + HMW)$  的值小于 0.5 时,则认为主要污染源为燃烧源<sup>[23]</sup>。吴义国等<sup>[7]</sup>运用该判定方法,对多环芳烃的来源进行了初步判断。沿圩湾村的  $LMW / (LMW + HMW)$  的值如图 4 所示; S1 ~ S6 站点比值大于 0.5,该区域主要污染源为石油源,这 6 个点周边主要为居民区和工业区,石油污染较其他站点严重; S7 ~ S10 站点比值均小于 0.5,主要污染源为燃烧源,该地区主要为农田区域,可能由秸秆等农业废弃物燃烧导致。

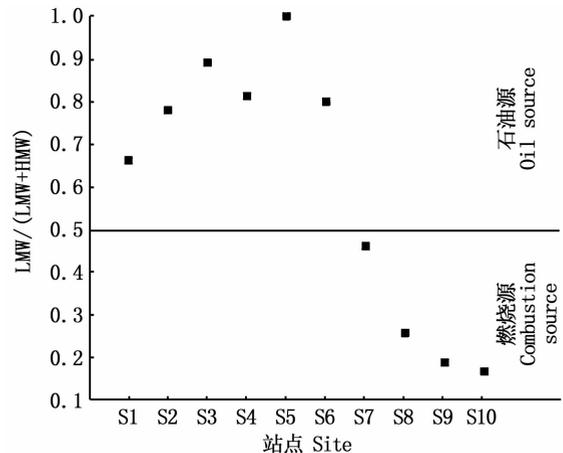


图4 水体中 LMW/(LMW + HMW)

Fig.4 Ratio of LMW and (LMW + HMW) in water

主成分分析法判定污染物来源的方法较为成熟,已有大量学者<sup>[24-26]</sup>使用该方法判定多环芳烃来源。本研究运用 R 语言对 10 个样点的 PAHs 质量浓度进行了主成分分析,提取了特征值大于 1 的 3 个因子(表 2),3 个因子的累积方差贡献率为 95.972%,包含了较高的原始信息量。因子 1 中的载荷以 4~6 环为主,其中 CHR、BaA 为煤炭燃烧源的指示物,FLT 为秸秆燃烧的指示物,因此该因子代表煤炭秸秆等燃烧源<sup>[27]</sup>;因子 2 中 ANT、IPY、CHR 载荷较高,ANT 和 CHR 为煤炭燃烧的指示物<sup>[28]</sup>,IPY 为汽车尾气排放的指示物,则因子 2 定义为煤炭、汽车尾气的混合源;因子 3 中以 BkF、BbF 为主,BkF 来源为汽油的燃烧<sup>[29]</sup>,BbF 为石油等化石燃料不完全燃烧产生<sup>[30]</sup>,则因子 3 定义为石油源。主成分分析表明,沿圩湾村主要污染源来自于煤炭、秸秆等物质燃烧,汽车尾气排放以及少量石油源,其中最

主要的污染源为煤炭、秸秆等物质的燃烧。

表 2 PAHs 主成分分析因子载荷值  
Tab.2 Load value of principal component analysis factors of PAHs

| PAHs   | PC1    | PC2    | PC3    |
|--|--------|--------|--------|
| ANA  | -0.146 | -0.663 | 0.499  |
| ANT  | -0.936 | 0.627  | 0.115  |
| FLA  | -0.307 | -0.636 | -0.524 |
| PYR  | -0.001 | 0.189  | -0.252 |
| CHR  | 0.765  | 0.296  | -0.270 |
| BaA  | 0.008  | 0.025  | -0.009 |
| BbF  | -0.032 | -0.015 | 0.610  |
| BkF  | 0.929  | 0.047  | 0.536  |
| BaP  | 0.110  | 0.003  | 0.159  |
| DBA  | -0.012 | 0.011  | -0.021 |
| IPY  | 0.912  | 0.569  | -0.095 |
| 方差贡献率<br>Variance contribution rate/%              | 74.430 | 18.740 | 2.802  |
| 累积方差贡献率<br>Cumulative variance contribution rate/% | 74.430 | 93.170 | 95.972 |

### 2.1.3 水体 PAHs 致癌风险评价

本文对致癌风险的评价采用以苯并[a]芘(BaP)为参照的致癌等效质量浓度[TEQ(BaP)]<sup>[31-32]</sup>, BaP 致癌性强, 生理毒性特征研究数据充分, 本研究采用以 BaP 为参照的致癌等效因子( $F_{TE}$ )计算检测水体中的 TEQ, 公式为

$$Q_{TE} = C_i \times F_{TE} \quad (1)$$

式中:  $Q_{TE}$  致癌等效质量浓度,  $\text{ng}/\text{m}^3$ ;  $C_i$  为 PAHs 质量浓度,  $\text{ng}/\text{m}^3$ 。

如图 5 所示, 分析得出 S1、S4、S9 站点的 TEQ 较高, 均高于 0.5; S3 站点 TEQ 为 0.1 ~ 0.5; 其余站点的 TEQ 均小于 0.1。其中: 苯并[a]芘致癌贡献率最大, 为 49.9%; 苯并[k]荧蒽、苯并[b]荧蒽、二苯并[a, h]蒽、茚并[1, 2, 3-cd]芘贡献率均在 10% 左右, 合计贡献率为 40.9%; 其余多环芳烃单体致癌贡献率较低。

## 2.2 表层沉积物中 PAHs 质量分数及分析评价

### 2.2.1 沉积物中 PAHs 质量分数及分布

测定湖州沿圩湾村 10 个采样点的 13 种多环芳烃含量, 结果如图 6 所示: S4、S5、S6 等站点位于工业区与养殖区等人为活动剧烈的区域, 沉积物中多环芳烃质量分数较高( $P=0.002$ ); 村庄边缘和道路边缘的沉积物中多环芳烃质量分数次之; 农业区沉积物中的多环芳烃质量分数最低。根据 BRUMARD 等<sup>[33]</sup>的分级标准: 沉积物中

PAHs 质量分数为 0 ~ 100、100 ~ 1 000、1 000 ~ 5 000、> 5 000  $\text{ng}/\text{g}$  时, 分别处于轻度、中度、高度和重度污染。根据该标准, S1、S7、S8 站点处于轻度污染水平, 其余站点均处于中度污染水平。S7、S8 站点位于农田附近, S1 站点虽为居民区, 但周围均为农田, 离工厂较远, PAHs 排放的活动较少, 因此表层沉积物中 PAHs 质量分数偏低。S5 站点位于河流水闸处, 其 PAHs 质量分数较高。同时, 与国内其他农村流域沉积物中 PAHs 质量分数(表 3)相比, 总体来看, 湖州市沿圩湾村 PAHs 质量分数处于中等偏低水平, 这与舒卫平等<sup>[34]</sup>得出的太湖流域低风险结论一致。

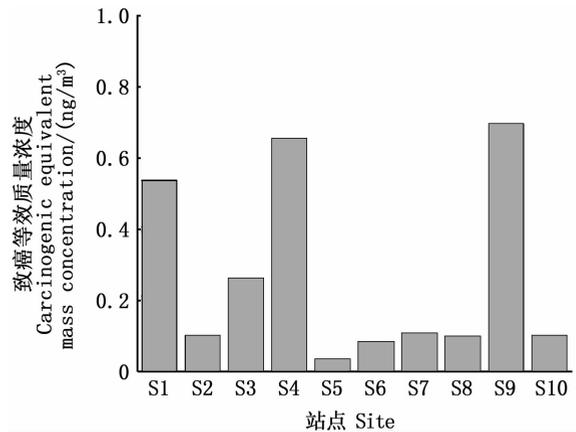


图 5 水体中的致癌等效质量浓度 TEQ (BaP)

Fig. 5 Carcinogenic equivalent mass concentration TEQ (BaP) in water

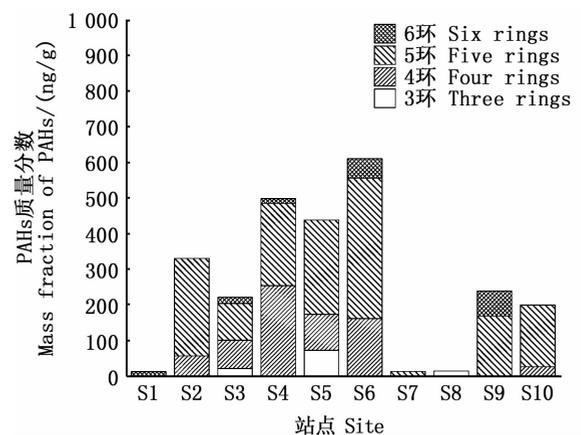


图 6 沉积物中不同环数多环芳烃质量分数

Fig. 6 PAHs mass fraction with different ring numbers in sediments

### 2.2.2 PAHs 生态风险评价

本研究采用超标系数来判断多环芳烃对环

境生态的影响等级<sup>[37]</sup>,公式为

$$K = \omega_{\text{PAHs}}/I \quad (2)$$

式中: $K$ 为超标系数; $\omega_{\text{PAHs}}$ 为多环芳烃的质量分数,ng/g; $I$ 为沉积物中污染物的生物阈值。PAHs对环境生态的影响可以分为3类<sup>[37-38]</sup>,分别为小于10%表示影响很小;介于10%和50%之间表示中度影响;大于50%表示影响严重。超标系数的检验标准<sup>[39]</sup>为 $K < 0.1$ ,则认为无潜在风险, $0.1 \leq K < 3$ ,则认为潜在风险概率较低, $3 \leq K < 7$ ,则认为潜在风险概率中等, $7 \leq K \leq 10$ ,认为潜在风险概率较高, $K > 10$ ,则认为存在生态风险。

表3 国内不同农村流域沉积物中PAHs质量分数  
Tab.3 Mass fraction of PAHs in sediments from different rural areas in China

| 研究区域<br>Research area             | 质量分数范围<br>Mass fraction range/<br>(ng/g) | 文献<br>Reference |
|-----------------------------------|--|-----------------|
| 湖州沿圩湾村<br>Huzhou Yanweiwan Lake   | 12.4 ~ 610.3                             | 本研究             |
| 东江流域 Dongjiang River              | 24.2 ~ 238.5                             | [35]            |
| 兴化市 Xinghua City                  | 673.6 ~ 2 286.8                          | [36]            |
| 吴江市 Wujiang City                  | 219.5 ~ 1 628.6                          | [36]            |
| 宜兴市 Yixing City                   | 93.0 ~ 266.5                             | [36]            |
| 南京市六合区<br>Liuhe district, Nanjing | 45.6 ~ 210.9                             | [36]            |

表4 各点多环芳烃超标系数 $K$ 值表

Tab.4 Table of index  $K$  of polycyclic aromatic hydrocarbons at each site

| 化合物 Compound      | S1 | S2   | S3   | S4   | S5   | S6   | S7   | S8   | S9   | S10  |
|-------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 芘 ANA             | -  | -    | -    | -    | 1.65 | -    | -    | -    | -    | -    |
| 菲 PHE             | -  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0.06 | -    | -    |
| 蒽 ANT             | -  | -    | 0.03 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| 荧蒽 FLA            | -  | -    | -    | 0.19 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| 芘 PYR             | -  | -    | 0.02 | 0.04 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| 屈 CHR             | -  | 0.15 | 0.17 | 0.27 | 0.23 | 0.39 | -    | -    | -    | -    |
| 苯并[a]蒽 BaA        | -  | -    | -    | 0.05 | 0.05 | 0.05 | -    | -    | -    | 0.10 |
| 苯并[b]荧蒽 BbF       | -  | -    | -    | 0.58 | 0.68 | 1.06 | -    | -    | -    | 0.48 |
| 苯并[k]荧蒽 BkF       | -  | 0.22 | 0.37 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| 苯并[a]芘 BaP        | -  | 0.45 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0.05 |
| 二苯并[a,h]蒽 DBA     | -  | -    | -    | 0.73 | 0.73 | 0.87 | 0.21 | -    | 2.66 | -    |
| 茚并[1,2,3-cd]芘 IPY | -  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| 苯并[g,h,i]芘 BPE    | -  | -    | -    | -    | -    | 0.07 | -    | -    | -    | -    |

注: - . 未检出。

Notes: - . Not detected.

### 2.2.3 致癌风险评价

如图7所示:S2和S9站点沉积物TEQ最高,分别为 $2.04 \text{ ng/m}^3$ 和 $1.75 \text{ ng/m}^3$ ;S1和S8站点

本次研究检测的样品中,共有73.8%的数据低于检出限,不存在生态风险。其余检测出多环芳烃的样品中,如表4可知:芘(ANA)在S5站点的 $K$ 值为1.65,潜在生态风险概率较低;菲(PHE)在S8站点的 $K$ 值为0.06,不存在生态风险;蒽(ANT)在S3站点的 $K$ 值为0.03,不存在生态风险;荧蒽(FLA)在S4站点的 $K$ 值为0.19,潜在生态风险概率较低;芘(PYR)在S3、S4站点的 $K$ 值均小于0.1,不存在潜在生态风险;屈(CHR)在S2、S3、S4、S5、S6站点的 $K$ 值均在0.1~3.0,潜在生态风险概率较低;苯并[a]蒽(BaA)在S4、S5、S6站点的 $K$ 值均小于0.1,不存在潜在生态风险;苯并[b]荧蒽(BbF)在S4、S5、S6、S10站点的 $K$ 值均在0.1~3.0,潜在生态风险概率较低;苯并[k]荧蒽(BkF)在S2、S3站点的 $K$ 值均在0.1~3.0,潜在生态风险概率较低;苯并[a]芘(BaP)在S2站点的 $K$ 值为0.45,潜在生态风险概率较低;苯并[a]芘(BaP)在S10站点的 $K$ 值为0.05,不存在潜在生态风险;二苯并[a,h]蒽(DBA)在S4、S5、S6、S7站点的 $K$ 值均在0.1~3.0,潜在生态风险概率较低;苯并[g,h,i]芘(BPE)在S6站点的 $K$ 值为0.07,不存在潜在生态风险。综上可知,研究区总体生态风险较低。

TEQ最低,分别为 $0.01 \text{ ng/m}^3$ 和 $0.0001 \text{ ng/m}^3$ 。根据致癌等效质量浓度可知,研究区域所测站点中S2站点和S9站点致癌风险相对较高。

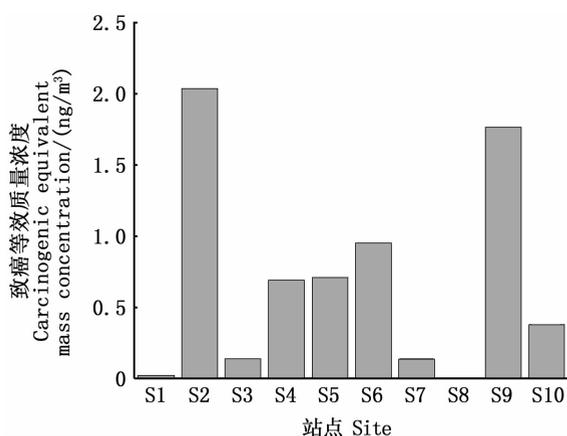


图7 沉积物中致癌等效质量浓度 TEQ(BaP)

Fig.7 The carcinogenic equivalent mass concentration TEQ(BaP) in sediments

### 3 讨论

对水体中 PAHs 质量浓度研究表明,农田附近的水体中 PAHs 的质量浓度低于道路及村庄区域。可见沿圩湾村 PAHs 分布受人类活动影响较大,住宅区、工业区等人口密集区域的 PAHs 质量浓度较高。这与郭雪等<sup>[40]</sup>研究发现人类活动多可能会导致 PAHs 质量浓度高的结论相似。结合文中 3 种 PAHs 来源解析方法得出,湖州市沿圩湾村主要污染来源为煤炭、秸秆的物质燃烧,以居民区和工业区为主的区域污染源主要为石油源,农田区域主要污染源为秸秆、煤炭等物质的燃烧。这与丁爱芳等<sup>[36]</sup>对太湖流域村落农田研究得出的石油源占比较小,燃烧源与混合源为主要来源的结论相近。致癌风险方面,所得结论与陈美丹<sup>[14]</sup>、范清华等<sup>[41]</sup>对太湖流域多环芳烃致癌风险评价一致,致癌风险较低,这是由于沿圩湾村水体 PAHs 多为致癌风险较低的种类。

对沉积物中 PAHs 质量分数研究表明:水闸、工厂、道路处 PAHs 质量分数较高,分布受人为活动影响较大,与水体分布特征一致;高环 PAHs 明显多于低环 PAHs( $P=0.005$ ),由于高环多环芳烃溶解度低且底泥-水分配系数较高,更容易与沉积物中有机碳结合<sup>[42]</sup>,水体高环 PAHs 往往会与沉积物中有机碳结合从而呈现水体-沉积物的转化方向,而低环 PAHs 的性质与高环不同,溶解度高且底泥-水分配系数低,沉积物中低环 PAHs 往往会向水体中迁移,部分低环例如萘则会继续向空气中挥发,使水体和沉积物中 PAHs 存在差异。

沉积物生态风险方面,该区域生态风险较低,80%的研究区不存在生态风险,与舒卫先等<sup>[34]</sup>得出的太湖流域总量和单体生态风险均较低的结论一致。致癌风险方面,沉积物致癌等效质量浓度高于水体致癌等效质量浓度。本文研究表明,沉积物中 PAHs 质量分数与水中 PAHs 质量浓度存在明显差异( $P=0.034$ )。低环与高环 PAHs 溶解度、底泥-水分配系数存在差异<sup>[34]</sup>,使水中低环 PAHs 质量浓度高、高环 PAHs 质量浓度较低,沉积物与之相反。而高环 PAHs 致癌系数高,致癌贡献率更大,使沉积物 PAHs 致癌效应往往高于水体 PAHs 致癌效应。

本次研究对象为单一月份 PAHs,但 PAHs 是一种持久性有机污染物,后续可以采集一定时期的样品,研究 PAHs 在时间上的变化特性;PAHs 致癌效应通常通过食物链、饮水等对人体产生影响,因此对水产品食用风险的探讨也是研究重点。

### 参考文献:

- [1] 宁怡,柯用春,邓建才,等. 巢湖表层沉积物中多环芳烃分布特征及来源[J]. 湖泊科学, 2012, 24(6): 891-898. NING Y, KE Y C, DENG J C, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment in Lake Chaohu [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(6): 891-898.
- [2] CARMICHAEL L M, CHRISTMAN R F, PFAENDER F K. Desorption and mineralization kinetics of phenanthrene and chrysene in contaminated soils[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(1): 126-132.
- [3] 陈卫锋,倪进治,杨红玉,等. 福州内河沉积物中多环芳烃的分布、来源及其风险评估[J]. 中国环境科学, 2010, 30(12): 1670-1677. CHEN W F, NI J Z, YANG H Y, et al. Distribution, sources and ecological risks of PAHs in inland river sediments of Fuzhou City[J]. China Environmental Science, 2010, 30(12): 1670-1677.
- [4] 刘楠楠,陈鹏,朱淑贞,等. 辽河和太湖沉积物中 PAHs 和 OCPs 的分布特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 293-300. LIU N N, CHEN P, ZHU S Z, et al. Distribution characteristics of PAHs and OCPs in sediments of Liaohe River and Taihu Lake and their risk evaluation based on sediment quality criteria[J]. China Environmental Science, 2011, 31(2): 293-300.
- [5] 陈燕燕,尹颖,王晓蓉,等. 太湖表层沉积物中 PAHs 和 PCBs 的分布及风险评估[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2): 118-124.

- CHEN Y Y, YIN Y, WANG X R, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyl in surface sediments of Taihu Lake: the distribution, sources and risk assessment [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(2): 118-124.
- [6] 唐杰, 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.
- TANG 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.
- [7] 吴义国, 方冰芯, 李玉成, 等. 杭埠-丰乐河表层沉积物中多环芳烃的污染特征、来源分析及生态风险评价 [J]. *环境化学*, 2017, 36(2): 420-429.
- WU Y G, FANG B X, LI Y C, et al. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Hangbu-Fengle River: pollution characteristics, potential source and risk assessment [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(2): 420-429.
- [8] 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.
- WANG C, TAN L, LYU Y B, et al. Distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface water from Chongqing section of the Yangtze River [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(1): 18-22.
- [9] 刘海新, 余颖, 席英玉, 等. 福建闽南沿海养殖牡蛎食用健康风险评估 [J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(6): 921-932.
- LIU H X, YU Y, XI Y Y, et al. Health risk assessment of the cultured oyster along the southern coast of Fujian province in China [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(6): 921-932.
- [10] 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.
- [11] 朱洁羽, 王栋, 王远坤, 等. 太湖流域持久性有机污染物特征分析和生态与健康风险评价 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2016, 52(2): 370-381.
- ZHU J Y, WANG D, WANG Y K, et al. Comprehensive analysis and ecological and health risk assessment of persistent organic pollutants in Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, 52(2): 370-381.
- [12] 姜丽丽, 朱洁羽, 王远坤, 等. 太湖饮用水源地多环芳烃分布特征和溯源分析 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2016, 52(2): 361-369.
- JIANG L L, ZHU J Y, WANG Y K, et al. Distribution characteristics and source identification analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water sources in Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, 52(2): 361-369.
- [13] 武建军. 太湖北部多环芳烃的分布特征及来源解析 [D]. 泰安: 山东科技大学, 2011.
- WU J J. Distribution feature and source discrimination of PAHs in northern Taihu Lake [D]. Taian: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [14] 陈美丹. 苏州太湖饮用水源地健康风险评估研究 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(8): 189-192.
- CHEN M D. Health risk assessment of Taihu Water source in Suzhou [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(8): 189-192.
- [15] WU Y L, WANG X H, LI Y Y, et al. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater from the Western Taiwan Strait, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 63(5/12): 459-463.
- [16] 林根满. 石化工业区周边土壤和大气沉降中多环芳烃组成成分特征及源解析 [D]. 上海: 东华大学, 2015.
- LIN G M. Composition, distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and atmospheric deposition around the petrochemical industry region [D]. Shanghai: Donghua University, 2015.
- [17] 李娟英, 石文瑄, 崔昱, 等. 滴水湖水体及沉积物中重金属和多环芳烃的污染分析与评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(1): 96-101.
- LI J Y, SHI W X, CUI Y, et al. Analysis and evaluation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of Lake Dishui [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(1): 96-101.
- [18] 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.
- QIN N, HE W, WANG Y, et al. Residues and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in the water and aquatic products from Lake Chaohu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 230-239.
- [19] 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.
- JIANG M, TUAN L H, MEI W P, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment from Zhoushan Coastal area, China [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2672-2679.
- [20] 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊, 等. 滴水湖水系沉积物中多环芳烃的分布及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(11): 2069-2074.
- MEI W P, RUAN H H, WU H, et al. Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Dishui Lake water system [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(11): 2069-2074.
- [21] 刘丰, 穆祥鹏, 崔巍, 等. 草海水体中多环芳烃污染特征及生态风险评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34

- (11): 2176-2182.
- LIU F, MU X P, CUI W, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water of Lake Caohai, Guizhou Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(11): 2176-2182.
- [22] 冯承莲, 夏星辉, 周追, 等. 长江武汉段水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(11): 1900-1908.
- FENG C L, XIA X H, ZHOU Z, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Wuhan section of the Yangtze River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(11): 1900-1908.
- [23] CHRISTENSEN E R, BZDUSEK P A. PAHs in sediments of the Black River and the Ashtabula River, Ohio; source apportionment by factor analysis[J]. *Water Research*, 2005, 39(4): 511-524.
- [24] 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 等. 温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4226-4236.
- ZHOU J C, CHEN Z L, BI C J, et al. Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4226-4236.
- [25] 陈锋, 孟凡生, 王业耀, 等. 基于主成分分析-多元线性回归的松花江水体中多环芳烃源解析[J]. *中国环境监测*, 2016, 32(4): 49-53.
- CHEN F, MENG F S, WANG Y Y, et al. The research of polycyclic aromatic hydrocarbons in the river based on the principal component-multivariate linear regression analysis [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(4): 49-53.
- [26] 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 等. 松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(12): 4220-4225.
- MA W L, LIU L Y, QI H, et al. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in water of Songhua River Basin during the icebound season [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4220-4225.
- [27] KHALILI N R, SCHEFF P A, HOLSEN T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and, gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(4): 533-542.
- [28] ZAKARIA M P, TAKADA H, TSUTSUMI S, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rivers and estuaries in Malaysia; a widespread input of petrogenic PAHs[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(9): 1907-1918.
- [29] LARSEN R K, BAKER J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere; a comparison of three methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(9): 1873-1881.
- [30] KAVOURAS I G, KOUTRAKIS P, TSAPAKIS M, et al. Source apportionment of urban particulate aliphatic and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) using multivariate methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(11): 2288-2294.
- [31] NISBET I C T, LAGOY P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, 16(3): 290-300.
- [32] JUNG K H, YAN B Z, CHILLRUD S N, et al. Assessment of benzo (a) pyrene-equivalent carcinogenicity and mutagenicity of residential indoor versus outdoor polycyclic aromatic hydrocarbons exposing young children in New York City [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2010, 7(5): 1889-1900.
- [33] BAUMARD P, BUDZINSKI H, GARRIGUES P. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and mussels of the western Mediterranean sea [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, 17(5): 765-776.
- [34] 舒卫先, 李世杰. 太湖流域典型湖泊表层沉积物中多环芳烃污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1409-1414.
- SHU W X, LI S J. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface sediment from two typical lakes in the Taihu Basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1409-1414.
- [35] 郑太辉, 冉勇, 陈来国. 东江流域农村土壤中多环芳烃的分布特征及其健康风险评估[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 657-661.
- ZHENG T H, RAN Y, CHEN L G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the rural soils of Dongjiang River Basin; distribution and human health risks [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 657-661.
- [36] 丁爱芳, 潘根兴, 李恋卿. 江苏省部分地区农田表土多环芳烃含量比较及来源分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 71-75.
- DING A F, PAN G X, LI L Q. Contents and sources of PAHs in top soils of farmlands in parts of Jiangsu, China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2): 71-75.
- [37] 李玉斌, 刘征涛, 冯流, 等. 太湖部分沉积物中多环芳烃生态风险评估[J]. *环境化学*, 2011, 30(10): 1769-1774.
- LI Y B, LIU Z T, FENG L, et al. Ecological risk assessment of PAHs in the sediments from Taihu Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(10): 1769-1774.
- [38] MAI B X, FU J M, SHENG G Y, et al. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 117(3): 457-474.
- [39] 刘征涛, 王一喆, 庞智勇, 等. 近期长江口沉积物中SVOCs的变化及生态风险评价[J]. *环境科学研究*,

- 2009, 22(7): 768-772.
- LIU Z T, WANG Y Z, PANG Z Y, et al. Recent change and risk assessment of semivolatile organic compounds from the sediments in Yangtze River Estuary [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(7): 768-772.
- [40] 郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 等. 滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(7): 2664-2671.
- GUO X, BI C J, CHEN Z L, et al. Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments and soils from Dishui Lake and its water exchange areas[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2664-2671.
- [41] 范清华, 黎刚, 王备新, 等. 太湖饮用水源地水环境健康风险评价[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(1): 6-9.
- FAN Q H, LI G, WANG B X, et al. Environmental health risk assessment of drinking water source of Taihu Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(1): 6-9.
- [42] 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.

## Distribution and ecological risk assessment of PAHs in rivers of Yanweiwan Village, Huzhou

CHEN Yihan, SHEN Luyao, PENG Ziran, HE Wenhui, PAN Yudi

(College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to research pollution characteristics, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from the rural rivers around the Taihu Lake, water and sediment samples were collected from 10 stations in Yanweiwan Village, Huzhou City, a typical rural area around the Taihu Lake. The content and composition of 16 priority PAHs were detected by high performance liquid chromatography (HPLC). The results showed that the survey area was at the medium to low PAHs pollution level and at the low risk, compared with other areas. According to the analysis of the distribution characteristics of PAHs pollution in water, the three sites with the highest mass concentration were the mixed areas of industrial and residential areas, respectively reaching 958.39 ng/L, 685.97 ng/L, 858.57 ng/L, and the PAHs were primarily composed of 2-3 rings. The results of characteristic ratio and principal component analysis indicated that PAHs mainly originated from combustion of straw and coal, and partly from oil pollution. The result of ecological risk assessment of sediments indicated that more than 80% of the area were considered risk-free, and a few areas maybe had a weak ecological risk, and serious ecological risk did not exist. The carcinogenic risk of the survey area was assessed by the carcinogenic equivalent mass concentration (TEQ). Results demonstrated that the industrial area and the garbage station had high potential carcinogenic risk, and the calculated mass concentration TEQ were 2.04 ng/m<sup>3</sup> and 1.76 ng/m<sup>3</sup> respectively.

**Key words:** PAHs; distribution characteristics; source analysis; risk assessment