

太湖底泥多环芳烃分布及来源解析

武 婷¹, 刘贵荣², 田瑛泽², 杨 勇³, 贾晓波⁴, 张 远⁴, 郭昌胜^{4*}

(1.天津市环境保护宣传教育中心, 天津 300191; 2.南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 3.中国环境监测总站, 北京 100012; 4.中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要:对 29 个太湖底泥样品中 16 种多环芳烃(PAHs)含量进行了调查, 对其空间分布及来源进行了分析。结果表明, 16 种 PAHs 中 15 种被普遍检出(萘烯在大部分底泥中未检出), Σ PAHs 浓度范围为 255.1~1059.4 ng·g⁻¹, 平均 580.5 ng·g⁻¹; 苯并(b)荧蒽浓度水平最高, 平均浓度均超过 80 ng·g⁻¹, 是太湖底泥中含量较高的污染物。空间分析表明, 湖边采集的底泥中 PAHs 浓度较高, 湖心底泥中 PAHs 浓度较低。利用低环/高环比值法、等级聚类法、PCA-MLR 模型解析法分析了污染源类型及贡献, 结果表明, 太湖底泥中 PAHs 的主要来源是汽油、柴油燃烧源以及煤、木材燃烧源, 其中汽油、柴油燃烧源的分担率为 53%, 煤、木材燃烧源的分担率为 46%。利用苯并(a)芘当量浓度(BaPE)对 PAHs 毒性进行评估, 结果表明 BaPE 浓度为(50.37±19.70)ng·g⁻¹。

关键词:多环芳烃; 源解析; 因子分析-多元线性回归; 太湖

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)01-0124-06 doi:10.11654/jaes.2015.01.018

Spatial Distribution and Source Apportionment of PAHs in Sediments from Taihu Lake

WU Ting¹, LIU Gui-rong², TIAN Ying-ze², Yang Yong³, JIA Xiao-bo⁴, ZHANG Yuan⁴, GUO Chang-sheng^{4*}

(1.Center for environmental education and communications of Tianjin, Tianjin 300191, China; 2.Department of Environment Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 4.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are ubiquitous in nature, and are of environmental concern. In this study, a total of 29 sediment samples from the Taihu Lake were used to investigate the spatial distribution and possible sources of 16 priority PAHs. The ratio method, Hierarchical cluster analysis, and Principal Component Analysis with Multiple Linear Regression (PCA-MLR) were employed to determine the potential sources and to quantify their contributions to PAHs in the sediments. The sum of 16 PAHs (Σ PAHs) ranged from 255.1 to 1059.4 ng·g⁻¹, with an average concentration of 580.5 ng·g⁻¹. BbF was the most abundant PAH compound in the sediments, with the average concentration greater than 80 ng·g⁻¹. The concentrations of PAHs were higher at the side of the lake than at the lake center. Gasoline and diesel emissions were the most significant contributors (53%) to PAHs, followed by coal and wood combustions (46%). In addition, BaPE was applied to assess the carcinogenic risk of PAHs in the sediments. The calculated BaPE were (50.37±19.70)ng·g⁻¹, suggesting the potential risk from the sediments. These results would advance our understanding of pollution status and sources of PAHs in the Taihu sediments, which may help propose control measures for PAHs in the sediments.

Keywords: PAHs; source apportionment; Principal Component Analysis with Multiple Linear Regression (PCA-MLR); Taihu Lake

多环芳烃(PAHs)是一种重要的持久性和半挥发性有机污染物, 受到了国内外的广泛关注^[1-5]。研究表

明, 多环芳烃具有溶解度低、蒸汽压小及辛醇-水分配系数高的特点, 因而易被沉积物吸附^[6], 在河流和湖泊底泥中含量较高^[7-8]。太湖地处长三角区域, 由于湖泊周边人口密度大、工业发展迅速, 大量工业企业的煤炭燃烧、机动车尾气等排放的多环芳烃对太湖底泥造成了危害和风险^[9-14]。近年来, 太湖水体和底泥中多环芳烃的研究已逐步得到重视, 如乔敏等^[15]分析了太湖沉积物中 PAHs 的生态和健康风险, 张路等^[16]研究了太

收稿日期: 2014-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178438); 环境保护公益行业科研专项(201209053, 201309031)

作者简介: 武 婷(1982—), 女, 河南南阳人, 硕士, 工程师, 主要从事水污染处理、环境标准、污染物来源和行为等方面研究。

E-mail: nkwtuting@126.com

* 通信作者: 郭昌胜 E-mail: guocs@caes.org.cn

湖底泥和堆场底泥中 PAHs 的分布和潜在生态风险等。目前关于太湖的研究主要针对底泥中 PAHs 的分布和健康风险评估,对于 PAHs 污染源,尤其是定量的来源解析研究则相对较少;其他相关研究主要针对太湖某部分水域进行研究,关于整个太湖水域底泥中 PAHs 研究相对较少。本文在太湖选取了 29 个采样点,对太湖底泥中多环芳烃含量水平的空间分布和来源进行了分析,并对其潜在致癌风险进行了评估,旨在为太湖多环芳烃的污染防治和有效管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

本研究于 2010 年 9 月进行沉积物样品的采集,采样期间,利用 GPS 确定采样点具体位置,29 处采样点分布在太湖各个湖区(图 1)。S1 位于太滬运河与漕桥河交汇处,S2 位于竺山湾,S4 位于梅梁湾,S26 和 S29 位于东太湖,S27 位于西南太湖,S31 位于西太湖(靠近岸边),其他各点均匀设置在太湖湖区区域。使用不锈钢抓斗式采泥器采集湖底表层沉积物(0~10 cm)。沉积物样品在保温箱中运至实验室后冷冻干燥保存(-20℃),研磨过 60 目筛后备用。样品采用加速溶剂萃取方法(ASE)萃取(US EPA 3545):准确称取 5.00 g 样品,加入 100 ng 回收率指示物,并与 5 g 铜粉、2 g 硅藻土充分混匀放入萃取池,萃取液为二氯甲烷·正己烷(体积比 1:1)。样品经加速溶剂萃取、旋转蒸发浓缩后用固相萃取柱净化(US EPA 3620B),12 mL 2% 丙酮/正己烷淋洗,平行蒸发浓缩至 1 mL。选择离子模式(SIM)进行 GC-MS 分析。

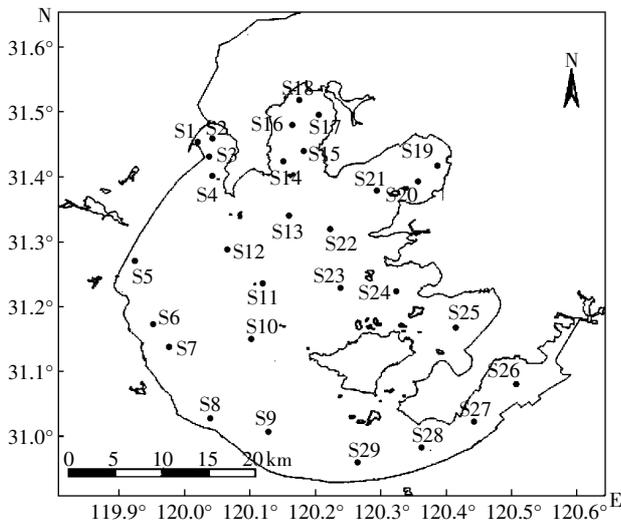


图 1 太湖水域中采样点分布

Figure 1 Locations of sampling sites in Taihu Lake

1.2 样品分析

本研究中测定的 PAHs 主要包括 16 种同类物质:萘(Nap)、苊烯(Acy)、苊(Ace)、芘(Flu)、菲(Phe)、蒽(Aat)、荧蒽(Flua)、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)、茚芘(1,2,3-cd)芘(IcdP)、二苯并(a,n)蒽(DahA)、苯并(ghi)芘(二萘嵌苯)(BghiP)。PAHs 的测定采用安捷伦 HP6890 气相色谱,HP5972MSD 质谱检测联用(HP6890GC-HP5972MSD)。色谱柱为 HP-5MS 石英毛细管色谱柱(50 m×0.32 mm×0.17 μm);载气为氦气,流速 2.0 mL·min⁻¹;柱前压 12.5 Pa;进样口及气质传输线温度 290℃;程序升温起始温度 80℃,维持 5 min,然后以 3℃·min⁻¹的速率升温至 290℃,保留 30 min。

1.3 统计分析

相关性分析、主成分分析、聚类分析、回归分析采用 SPSS 17.0 软件,空间分析采用 Arcgis 9.0 软件,绘图采用 Origin 8.0 软件。

2 结果与讨论

2.1 底泥中 PAHs 含量及空间分布

29 个点位样品的 16 种 PAHs 总量介于 255.1~1 059.4 ng·g⁻¹ 之间,平均值为 580.5 ng·g⁻¹。由图 2 可以看出,靠近湖泊边缘的点位 PAHs 浓度较高,尤其是西北部点位,浓度最高,越接近湖中心 PAHs 浓度越低。这可能是由于湖泊边缘受到周围工业排放和居民生活污染影响较大,而越靠近湖中心受外界影响越小。此外,太湖北岸的河口较多,导致北岸底泥中

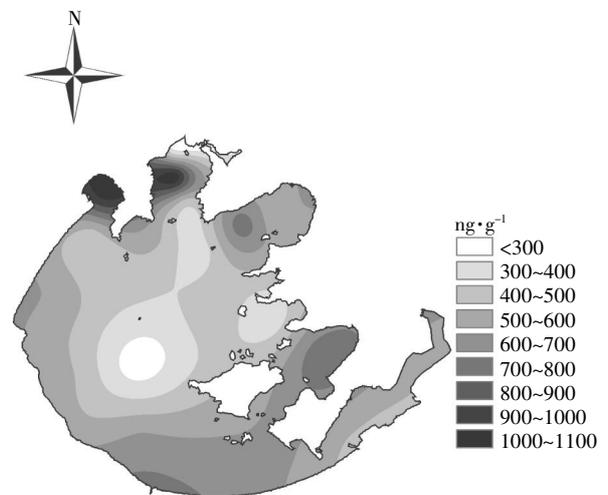


图 2 太湖底泥中 PAHs 空间分布

Figure 2 Spatial distribution of PAHs in sediments in Taihu Lake

PAHs 浓度高于南岸。相关研究调查了太湖枯水季底泥中 PAHs 浓度^[14], 本研究结果表明, 丰水季底泥中 PAHs 浓度较枯水季高, 系因不同季节 PAHs 污染源排放强度不同所致。

由表 1 可以看出, 与国内的其他流域相比, 太湖的 PAHs 浓度低于黄河兰州段、巢湖和海河, 但高于黄河河南段的 PAHs 水平; 与国外的流域比较, 其浓度低于美国的萨吉诺河和日本的 Saginaw 河, 与韩国的马山湾 PAHs 水平大致相当。

表 1 国内外流域底泥中 PAHs 浓度水平

Table 1 Concentrations of PAHs in sediments of different regions

研究区域	采样时间	PAHs 种类数	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	数据来源
太湖	2010	16	580.5	本研究
黄河兰州段	2005	16	1414	[17]
海河	2004	16	27 074	[18]
黄河河南段	2005	16	182.0	[19]
巢湖	—	16	1230	[20]
萨吉诺河流域, 美国	2004	16	2970	[21]
马山湾, 韩国	—	16	680	[22]
Saginaw River, 日本	2004	16	690	[21]

2.2 PAHs 组分分析

通过对太湖底泥中 PAHs 各组分平均浓度进行比较(图 3)可知, 太湖底泥的 16 种 PAHs 平均浓度介于 $5.1\sim 84.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 其中 BbF 浓度水平最高, Acy 的浓度最低, BbF、IcdP、Phe 的平均浓度均超过 $80\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 是太湖底泥中含量较高的污染物。上述组分的浓度与百分含量跟国内外其他水域底泥相比均有不同, 主要由于排放源的强度不同所致。

2.3 PAHs 来源识别

PAHs 来源复杂, 总的来说可分为 2 大类: 高温燃烧和石油类污染。研究^[1, 23-25]表明, PAHs 环数的相对

含量能够反映 PAHs 的来源类型, 大多数研究中使用低环(2 环和 3 环)与高环(4 环及以上)的比值来作为 PAHs 来源的标识^[3, 26]。这是由于: 高环主要来源于高温热解燃烧, 低环则主要来源于石油类污染。以往的研究表明, 低环与高环之比低于 1 时, 表明 PAHs 主要来源于高温燃烧; 该比值高于 1 时, 则主要来自石油类污染^[2, 27-28]。本研究中, 29 个采样点中 PAHs 的低环/高环比值范围在 0.23~0.91 之间, 平均值为 0.52, 表明 PAHs 主要来自于高温燃烧源。

为进一步明确 PAHs 污染源类型, 使用等级聚类分析^[3, 29-30], 对 29 个底泥样品中 PAHs 的主要组分进行聚类。通过对 PAHs 组分进行聚类, 结合标识元素分析, 可以定性分析 PAHs 的主要污染源类型。本研究中, 由于 Acy 在大多数底泥中未检出, 只将 15 种 PAHs 组分纳入 SPSS 17.0 软件中进行聚类分析, 结果如图 4 所示。15 种 PAHs 组分聚为 2 大类: BghiP、BbF、BaP、IcdP、BkF、Chr 等组分聚在一组, 其中 BghiP、BkF、IcdP 是柴油燃烧的标识元素^[31], BaP、BbF、BghiP 等通常是汽油燃烧源排放的重要组分^[31-32], 因此汽油、柴油燃烧排放源可能是太湖底泥中 PAHs 的重要来源; NaP、Ant、Ace、Flu、Phe、Flua、BaA、Pyr、DahA 等组分聚为另一组, 其中 Flu、Phe、Ant、Pyr 等组分通常是燃煤源的特征排放组分, 同时 Phe、Ant 等物质也是木材燃烧的标识元素, 因此煤、木材燃烧也可能是本研究中 PAHs 的另一种重要来源。

2.4 PAHs 来源解析

主成分分析-多元线性回归(PCA-MLR)模型是一种重要的受体模型, 能够定性识别进而定量解析大气、土壤、底泥中污染物的来源, 本研究利用该模型分析太湖底泥中 PAHs 主要污染源类型及分担率。

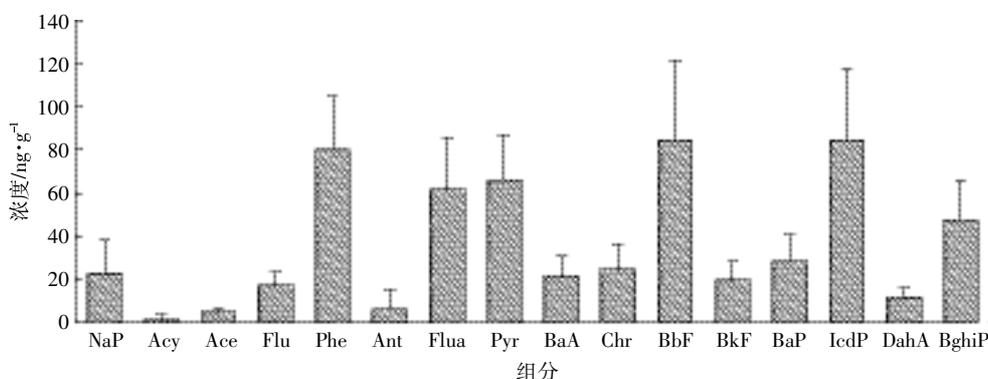


图 3 太湖底泥中 PAHs 各组分平均浓度

Figure 3 Average concentrations of individual PAH compound in sediments in Taihu Lake

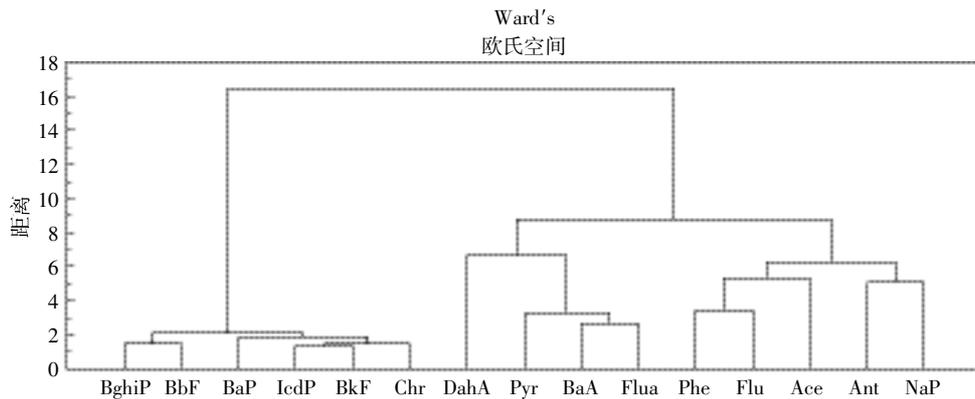


图4 PAH 各组分等级聚类图

Figure 4 Hierarchical clustering of individual PAH compound

将 15 种 PAHs 组分(Acy 未检出)纳入 PCA 模型,经过 Varimax 旋转,提取出 2 个特征值大于 1 的因子。表 2 列出了各因子载荷值,因子 1 中,Chr、BbF、BkF、BaP、IcdP、BghiP 等组分载荷值较高,这些组分是汽油、柴油燃烧的标识元素,因此因子 1 可以识别为汽油、柴油燃烧源。太湖附近公路上的机动车排放以及湖面上捕鱼船的燃油排放,可能是该因子的最主要来源。因子 2 中,NaP、Flu、Phe、Ant 等组分具有较高的载荷值,与等级聚类讨论相似,该因子可能是煤、木材燃烧排放源。太湖周边的工业企业以及农业活动,可能是该因子的主要来源。PCA 的解析结果与等级聚类结果吻合。

根据 PCA 结果,将计算得到的绝对主因子得分作为自变量,与各点位的 PAHs 总浓度进行回归分析,计算各因子的贡献值($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。各因子的分担率,由下式计算得到:

$$\text{分担率}_i = \text{贡献值}_i / \sum \text{PAHs} \times 100\%$$

式中:分担率_i是第 i 个因子的分担率(%);贡献值_i是第 i 个因子的贡献值($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$); $\sum \text{PAHs}$ 是 29 个底泥样品中 $\sum \text{PAHs}$ 浓度的平均值($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。

各因子的分担率计算结果如表 2 所示。汽油柴油燃烧源贡献显著,约占总 PAHs 来源的 53%,而煤、木材燃烧相对较低,约占 46%,这 2 种污染源类总共占据了总 PAHs 来源的 99%。与国内外其他研究相比,太湖底泥中 PAHs 汽油、柴油燃烧源的贡献略低于黄河兰州段底泥中该源类的贡献(61%)^[4]以及汉密尔顿港底泥中该源类的贡献(61%)^[31];而太湖底泥中 PAHs 煤及木材燃烧源的贡献则高于黄河兰州段底泥中该源类的贡献(38%)^[4]以及汉密尔顿港底泥中该源类的贡献(26%)^[31]。源解析结果的差异主要是由于不同水域

表 2 太湖底泥中 PAHs 因子载荷值

Table 2 Factor loadings of PAHs in sediments in Taihu Lake

PAHs	因子 1	因子 2
Nap		0.80
Ace		0.62
Flu		0.84
Phe		0.93
Ant		0.72
FLua	0.68	0.63
Pyr	0.59	0.66
BaA	0.85	0.41
Chr	0.94	
BbF	0.96	
BkF	0.96	
BaP	0.95	
IcdP	0.94	
DahA		
BghiP	0.96	
特征值	7.31	4.46
方差贡献率	48.72%	29.71%
PAHs 来源	汽油、柴油燃烧	煤及木材燃烧
分担率	53%	46%

注:载荷值小于 0.4 未列出。

周边的车船、工业燃煤污染源活动强度不同所致。根据源解析结果,建议对太湖水面上汽油、柴油船舶的活动进行管理和控制,对湖泊周边工业企业、农业活动的煤炭及木材燃烧进行科学管控。

为检验 PCA-MLR 模型解析结果的优劣,将各底泥中 PAHs 的拟合值与测量值回归,如图 5 所示。回归方程表明,拟合得到的截距值为 2.76,斜率为 1.00,相关系数达到 0.99,拟合结果理想。

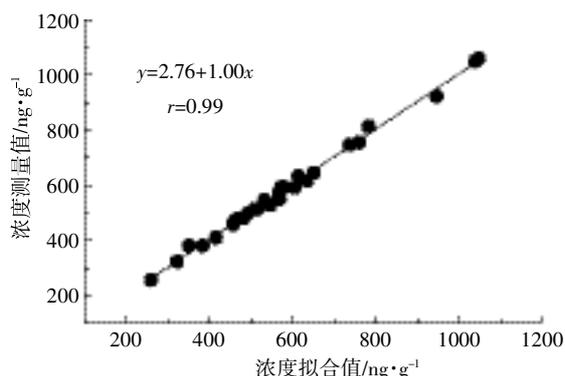


图5 PAHs 浓度拟合值对测量值回归

Figure 5 Regression of modeled and measured Σ PAHs concentrations

2.5 PAHs 毒性评估

PAHs 毒性受到广泛关注。长期以来,研究者利用 BaP 来评估 PAHs 的癌症风险^[33-34]。16 种优控 PAHs 中,除了 BaP 以外,BaA、BbF、BkF、DahA、IcdP 等组分均具有较强的致癌性^[33]。因此,很多研究利用 BaPE (BaP 当量浓度)定量评估底泥中 PAHs 潜在毒性。BaPE 计算公式如下^[32]:

$$[\text{BaPE}]_i = [\text{BaA}]_i \times 0.06 + [\text{BbF}]_i \times 0.07 + [\text{BkF}]_i \times 0.07 + [\text{BaP}]_i + [\text{DahA}]_i \times 0.60 + [\text{IcdP}]_i \times 0.08$$

式中:[BaPE]_i 是第 i 个样品 BaP 当量浓度值,ng·g⁻¹; [BaA]_i 等分别是第 i 个样品中 BaA 等 PAHs 组分的浓度值,ng·g⁻¹。

评估结果表明,太湖底泥中 PAHs 的 BaPE 为 (50.37±19.70)ng·g⁻¹,说明具有一定的潜在毒性。

3 结论

(1)太湖底泥中的 16 种美国环境保护署优先控制 PAHs 中 15 种被普遍检出(Acy 在大部分底泥中未检出)。 Σ PAHs 浓度范围为 255.1~1 059.4 ng·g⁻¹,平均值为 580.5 ng·g⁻¹。空间分析表明,湖边采集的底泥中 PAHs 浓度较高,湖心底泥中 PAHs 浓度较低,这是由于受到周边的工业、农业、交通的影响。16 种 PAHs 中,BbF 含量最高,达到 84.7 ng·g⁻¹。

(2)太湖底泥中 PHAs 的主要来源是汽油、柴油燃烧源以及煤、木材燃烧源。汽油、柴油燃烧源的分担率为 53%,煤、木材燃烧源的分担率为 46%。

(3)太湖底泥中 PAHs 的 BaP 当量浓度为 (50.37±19.70)ng·g⁻¹,说明具有一定的潜在毒性。

参考文献:

[1] 陈华林,陈英旭,沈梦蔚. 西湖底泥对多环芳烃(菲)的吸附性能[J].

农业环境科学学报, 2003, 22(5):585-589.

CHEN Hua-Lin, CHEN Ying-Xu, SHEN Meng-wei. Sorption properties of PAH (phenanthrene) on sediment in West Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22 (5):585-589.

[2] 周玲莉,薛南冬,李发生,等. 黄淮平原农田土壤中多环芳烃的分布、风险及来源[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7):1250-1256.

ZHOU Ling-li, XUE Nan-dong, LI Fa-sheng, et al. Distribution, source analysis and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soils in Huanghuai Plain[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7):1250-1256.

[3] Li W H, Tian Y Z, Shi G L, et al. Concentrations and sources of PAHs in surface sediments of the Fenhe reservoir and watershed, China[J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 2012, 75(1):198-206.

[4] Shi G L, Tian Y Z, Guo C S, et al. Sediment-pore water partition of PAH source contributions to the Yellow River using two receptor models[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(7):1154-1163.

[5] 冯焕银,傅晓钦,赵倩,等. 宁波土壤中多环芳烃的健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):1998-2004.

FENG Huan-yin, FU Xiao-Qin, ZHAO Qian, et al. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Ningbo area, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (10):1998-2004.

[6] 许士奋,蒋新,王连生,等. 长江和辽河沉积物中的多环芳烃类污染物[J]. 中国环境科学, 2000, 20(2):128-131.

XU Shi-fen, JIANG Xin, WANG Lian-sheng, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollutants in sediments of the Yangtze River and the Liaohe River[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(2):128-131.

[7] Manariotis I D, Karapanagioti H K, Chrysikopoulos C V. Degradation of PAHs by high frequency ultrasound[J]. *Water Research*, 2011, 45(8):2587-2594.

[8] 罗固源,朱虹,许晓毅,等. 长江底泥对多环芳烃的吸附行为及荧光分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12):1-5.

LUO Gu-yuan, ZHU Hong, XU Xiao-yi, et al. Sorption behaviors of polycyclic aromatic hydrocarbon on surface sediment in Chongqing section of the Yangtze River[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33 (12):1-5.

[9] 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 Yu-bin, LIU Zheng-tao, FENG Liu, et al. Ecological risk assessment of PAHs in the sediments from Taihu Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(10):1769-1774.

[10] 郭广慧,吴丰昌,何宏平,等. 基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评估[J]. 环境科学, 2012, 33(4):1091-1097.

GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, et al. Uncertainty characterization approaches for ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon in Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(4):1091-1097.

[11] 余云龙,李圆圆,林田,等. 太湖表层沉积物中多环芳烃的污染现状及来源分析[J]. 环境化学, 2013, 32(12):2336-2341.

YU Yun-long, LI Yuan-yuan, LIN Tian, et al. Distribution and sources

- of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Taihu Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(12):2336-2341.
- [12] 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 Wei-xian, LI Shi-jie. 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.
- [13] 刘国卿,张干,金章东,等.太湖多环芳烃的历史沉积记录[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(6):981-986.
- LIU Guo-qing, ZHANG Gan, JIN Zhang-dong, et al. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Taihu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6):981-986.
- [14] Zhang Y, Shi G L, Guo C S, et al. Seasonal variations of concentrations, profiles and possible sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Taihu Lake, China[J]. *Journal of Soil Sediments*, 2012, 12:933-941.
- [15] 乔敏,黄圣彪,朱永官,等.太湖梅梁湾沉积物中多环芳烃的生态和健康风险[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(4):456-463.
- QIAO Min, HUANG Sheng-biao, ZHU Yong-guan, et al. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Meiliang Bay, Taihu Lake[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(4):456-463.
- [16] 张路,范成新,鲜启鸣,等.太湖底泥和疏浚堆场中持久性有机污染物的分布及潜在生态风险[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(1):18-24.
- ZHANG Lu, FAN Cheng-Xin, XIAN Qi-ming, et al. Persistent organic pollutants (POPs) distribution and potential ecological risk on sediment in Lake Taihu and slurry stockyard[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(1):18-24.
- [17] Xu J, Yu Y, Wang P, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments from Yellow River, China[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(7):1408-1414.
- [18] Jiang B, Zheng H L, Huang G Q, et al. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon in sediments of Haihe River, Tianjin, China[J]. *Journal of Environment Sciences*, 2007, 19(3):306-311.
- [19] Sun J H, Wang G L, Chai Y, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan Reach of the Yellow River, Middle China[J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2009, 72(5):1614-1624.
- [20] Wang J Z, Zhang K, Liang B, et al. Occurrence, source apportionment and toxicity assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Chaohu, one of the most polluted lakes in China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, 12:3336-3342.
- [21] Horii Y, Ohura T, Yamashita N, et al. Chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from industrial areas in Japan and the United States[J]. *Archives of Environment Contamination and Toxicology*, 2009, 57(4):651-660.
- [22] 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.
- [23] 段凤魁,贺克斌,马永亮.北京PM2.5中多环芳烃的污染特征及来源研究[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(7):1363-1371.
- DUAN Feng-kui, HE Ke-bin, MA Yong-liang. Concentration and sources of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in PM2.5 in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(7):1363-1371.
- [24] 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.
- [25] Wang H S, Cheng Z, Liang P, et al. Characterization of PAHs in surface sediments of aquaculture farms around the Pearl River Delta[J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2010, 73(5):900-906.
- [26] Feng C L, Xia X H, Shen Z Y, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Wuhan section of the Yangtze River, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 133(1):447-458.
- [27] Soclo H, Garrigues P, Ewald M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal marine sediments: Case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) areas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(5):387-396.
- [28] 焦文涛,吕永龙,王铁宇,等.化工区土壤中多环芳烃的污染特征及其来源分析[J]. *环境科学*, 2009, 30(4):1166-1172.
- JIAO Wen-tao, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu, et al. Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil from chemical industrial areas[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(4):1166-1172.
- [29] Garcia J H, Li W W, Arimoto R, et al. Characterization and implication of potential fugitive dust sources in the Paso del Norte region[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 325(1-3):95-112.
- [30] Shi G L, Feng Y C, Wu J H, et al. Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban particulate matter of Tangshan, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2009, 9:309-315.
- [31] Sofowote U M, Mccarry B E, Marvin C H. Source apportionment of PAH in Hamilton Harbour suspended sediments: Comparison of two factor analysis methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16):6007-6014.
- [32] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U K[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(3):825-832.
- [33] Xu J, Guo J Y, Liu G R, et al. Historical trends of concentrations, source contributions and toxicities for PAHs in dated sediment cores from five lakes in western China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471:519-526.
- [34] Liu W X, Dou H, Wei Z C, et al. Emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of different residential coals in North China[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(4):1436-1446.