

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

胡国成^{1,3,5}, 郭建阳², 罗孝俊³, 陈社军³, 许木启^{1*}, 戴家银¹, 麦碧娴³, 李凤超⁴

1. 中国科学院 动物研究所, 动物生态与保护生物学重点实验室, 北京 100101
2. 中国科学院 地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002
3. 中国科学院 广州地球化学研究所, 有机地球化学重点实验室, 广东 广州 510640
4. 河北大学 生命科学学院, 河北 保定 071001
5. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

摘要: 研究了白洋淀表层沉积物中US EPA 16种优先控制的多环芳烃(PAHs)的分布特征和污染来源, 其 $w(\text{PAHs})$ 为101.3~1 494.8 ng/g (平均值为353.0 ng/g), 与国内其他的湖泊和河流相比, 整体处于中等污染水平。安州采样点沉积物中 $w(\text{PAHs})$ 最高, 污染最严重; 其次为小田庄、烧车淀、王家寨; 污染较轻的采样点为枣林庄、光淀、圈头和端村。在16种多环芳烃单体中, 菲、荧蒹、芘、苯并[b]荧蒹所占比例较大。 $w(\text{荧蒹})/w(\text{芘})$ 和 $w(\text{菲})/w(\text{蒽})$ 2个比值显示, 白洋淀沉积物中多环芳烃的含量和分布受石化材料燃料、煤炭及薪柴燃烧影响较大。风险评价表明, 安州采样点表层沉积物对生物存在潜在危害, 而其他采样点沉积物潜在风险处于较低水平。

关键词: 多环芳烃; 分布; 来源; 风险评价; 白洋淀; 沉积物

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2009)03-0321-06

Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments from Baiyangdian Lake

HU Guocheng^{1,3,5}, GUO Jianyang², LUO Xiaojun³, CHEN Shejun³, XU Muqi¹, DAI Jiayin¹, MAI Bixian³, LI Fengchao⁴

1. Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
4. College of Life Science, Hebei University, Baoding 071001, China
5. The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The spatial distribution and sources of 16 priority dominated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Baiyangdian Lake in Hebei province were investigated. The total concentration of PAHs ranged from 101.3 to 1,494.8 ng/g dry weight, with an average value of 353.0 ng/g dry weight, which is moderate level when compared with the PAH concentration in lake and river sediments from other areas in China. The order of total concentration of PAHs in sediments was Anzhou > Xiaotianzhuang, Shaochedian, Wangjiazhai > Zaolinzhuang, Guangdian, Quantou and Duancun. Higher proportions of phenanthrene, fluoranthene, perylene, and benzo[b]fluoranthene were found among 16 PAHs in the sediments. Based on fluoranthene/pyrene and phenanthrene/anthracene ratios, the main sources of PAHs were petroleum combustion, biomass combustion, and coal burning. Risk assessment indicated that the sediment in Anzhou site was most likely to pose biological impairment, while low toxicological risk of PAHs was found in other sampling sites.

Key words: PAHs; distribution; sources; risk assessment; Baiyangdian Lake; sediment

收稿日期: 2008-07-02 修订日期: 2008-07-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB403306)

作者简介: 胡国成(1978-), 男, 河北承德人, huc@ioz.ac.cn.

* 责任作者: 许木启(1950-), 男, 湖北武汉人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事水生生态毒理学研究, xumq@ioz.ac.cn

多环芳烃(PAHs)是广泛分布于自然界的一类痕量有机污染物, 人为来源主要是化石燃料(煤、石油)和木柴的不完全燃烧、石油泄漏、工业“三废”及

固体废物的焚烧。自然来源的多环芳烃主要包括森林火灾、火山活动以及生物的内源性合成等自然过程。由于多环芳烃具有较强的致癌性和致突变性,在环境介质中持久存在,且易于在生物体内富集,因此在环境污染物的研究中受到广泛关注。美国环境保护署(US EPA)选定了16种多环芳烃作为水生生态系统中优先控制污染物。多环芳烃具有低溶解性和疏水性,因此,水环境中的沉积物是其主要环境归宿,而且可能通过地球化学循环导致二次污染。

近年来,国内外学者对内陆湖泊、河流、海湾及海岸带等表层沉积物中多环芳烃的浓度分布及危害进行了广泛研究。研究表明,珠江广州河段芳村码头和澳门内港沉积物中多环芳烃含量最高^[13];珠江河口及南海近岸生态风险评价显示,东江及珠江部分河段对生物体存在可能的危害^[4,5];内陆湿地和湖泊,如黑龙江扎龙湿地^[6]、江苏太湖^[7]和云龙湖^[8]及山东南四湖^[9]表层沉积物中多环芳烃的污染程度比经济发达的珠江三角洲地区轻;渤海湾^[10]、胶州湾^[11]及湄洲湾^[12]表层沉积物中由于海水稀释作用多环芳烃的污染程度也比较轻;另外,黄河支流表层沉积物中多环芳烃的污染程度明显重于干流^[13]。目前,除了对表层沉积物中多环芳烃的研究以外,对水体^[14]、大气^[15]及表层土壤^[16]中多环芳烃的研究也有报道。

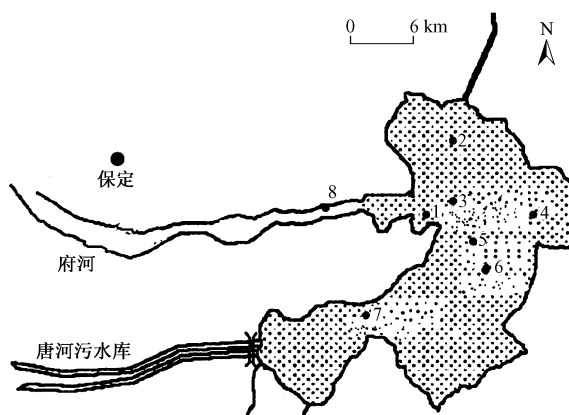
白洋淀位于北京、天津和保定之间,是华北地区最大的浅水性湖泊。20世纪70年代以后,随着白洋淀地区工农业的发展和人口的增加,白洋淀水域污染越来越严重。有资料显示,白洋淀沉积物中重金属污染相当严重^[17],但是对具有致癌、致突变特性的持久性有机污染物研究报道却不多^[18,20]。为了更清楚地了解多环芳烃在白洋淀表层沉积物中的污染程度,有必要对其含量、分布以及污染来源开展较为详细的研究。笔者应用GC-MSD分析手段,参照US EPA方法,检测了白洋淀表层沉积物中16种多环芳烃的含量,结合白洋淀的环境特征和多环芳烃的分子标志物对其分布及污染来源进行初步分析,以期研究白洋淀沉积物中多环芳烃污染源及周边地区环境评价提供依据。

1 材料和方法

1.1 样品的采集

2007年8月选取白洋淀淀区有代表性的小田庄、烧车淀、王家寨、枣林庄、光淀、圈头、端村、安州8个采样点,采用抓斗式采样器采集样品,装入密封

袋后,运回实验室,于 -20°C 保存至分析。采样点分布如图1所示。



1—小田庄;2—烧车淀;3—王家寨;4—枣林庄;
5—光淀;6—圈头;7—端村;8—安州

图1 白洋淀沉积物采样点分布

Fig.1 Map of sediment sampling sites from
Baiyangdian Lake

1.2 样品预处理

样品采集后,经冷冻干燥、研磨、过筛,于密封袋中 4°C 保存备用。准确称取10~15 g样品加入回收率指示物标样,200 mL $V(\text{正己烷})/V(\text{丙酮})$ 为1:1的混合溶剂索氏抽提48 h。提取液浓缩并置换为正己烷后,过 $V(\text{氧化铝})/V(\text{硅胶})$ 为1:2的层析柱进行分离纯化。分别用15 mL正己烷和70 mL $V(\text{二氯甲烷})/V(\text{正己烷})$ 为3:7的混合溶剂淋洗烷烃和多环芳烃组分。多环芳烃组分浓缩定容至200 μL ,加入内标,利用GC-MSD方法(美国HP Agilent 6890-5973),采用内标法和多点校正曲线进行多环芳烃的定量分析^[21]。

1.3 仪器分析条件

DB-*ms* (60 m \times 250 μm \times 0.25 μm)色谱柱。升温程序:80 $^{\circ}\text{C}$ 保持1 min,以10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至180 $^{\circ}\text{C}$,2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至220 $^{\circ}\text{C}$,以8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至290 $^{\circ}\text{C}$,保持30 min;进样口温度280 $^{\circ}\text{C}$;载气为高纯氮气;流量1.5 mL/min;分流进样,分流比为4.5,进样量为1 μL 。

1.4 质量保证与质量控制

用方法空白、加标空白、基质加标、基质加标平行样进行质量控制。氘代回收率指示物控制操作流程的回收率。指示物平均回收率:二氢萘- d_{10} 为72.6% \pm 10.2%;菲- d_{10} 为87.4% \pm 2.6%。最后结果经空白扣除和回收率校正。

2 结果与讨论

2.1 多环芳烃的含量和分布

US EPA 规定的 16 种优先控制的多环芳烃分别为萘、苊烯、苊、芴、菲、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘和苯并[g,h,i]芘,在白洋淀 8 个采样点沉积物样品中均有检出。沉积物中 16 种优先控制的多环芳烃质量分数见表 1。

从表 1 可以看出,白洋淀表层沉积物中 $w(\text{PAHs})$ 为 $101.3 \sim 1\,494.8 \text{ ng/g}$ (平均值为 353.0 ng/g)。从分布特征看,距离安新县城较近的安州采样点沉积物中 $w(\text{PAHs})$ 最高,达到 $1\,494.8 \text{ ng/g}$;小田庄、王家寨和烧车淀采样点沉积物中 $w(\text{PAHs})$ 相对较高;而距离安新县城较远的光淀、圈头、端村和枣林庄 4 个采样点沉积物中 $w(\text{PAHs})$ 均较低。安州、小田庄、王家寨和烧车淀 4 个采样点位于府河入淀口附近,保定市排放的工业废水、农业废水及生活污水经过府河排污渠道直接流入白洋淀,导致这 4 个采样点多环芳烃污染比较严重。另外,安新县有色

金属行业自从 20 世纪 70 年代兴起,已经有 30 多年的历史,拥有各类企业 200 多家,其中大部分集中在安州镇。有色金属材料拆解、冶炼、加工的过程中很有可能产生大量的多环芳烃,导致安州采样点多环芳烃污染最严重;而枣林庄、光淀、圈头和端村 4 个采样点距离安新县城比较远,淀区水体的稀释作用可能导致 $w(\text{PAHs})$ 较低。

从 16 种多环芳烃的组成(见表 1 和图 2)可以看出,在 8 个采样点沉积物中 $w(\text{菲})$, $w(\text{荧蒽})$, $w(\text{芘})$ 和 $w(\text{苯并[b]荧蒽})$ 较高,这 4 种组分总和占 $w(\text{PAHs})$ 的 50% 以上。其中小田庄、烧车淀和王家寨 3 个采样点以 4 环化合物为主,分别占 $w(\text{PAHs})$ 的 36.2%、40.3% 和 36.6%;枣林庄、光淀、圈头、端村 4 个采样点以 2~3 环化合物为主,分别占 $w(\text{PAHs})$ 的 42.9%、43.5%、45.2% 和 43.8%;安州采样点以 5~6 环化合物为主,占 $w(\text{PAHs})$ 的 39.3%。

表 1 白洋淀表层沉积物中多环芳烃的质量分数

项目	采样点								ng/g
	小田庄	烧车淀	王家寨	枣林庄	光淀	圈头	端村	安州	
$w(\text{萘})$	6.0	7.3	21.7	8.9	9.7	7.2	10.0	75.0	18.2
$w(\text{苊烯})$	3.9	2.2	5.6	4.2	4.0	4.3	3.9	17.7	5.7
$w(\text{苊})$	4.2	5.4	4.9	0.8	0.8	0.8	1.1	12.9	3.9
$w(\text{芴})$	7.4	9.4	10.5	7.5	7.2	7.3	10.3	91.1	18.8
$w(\text{菲})$	48.0	40.7	52.2	21.6	20.5	27.7	36.6	183.1	53.8
$w(\text{蒽})$	8.0	10.9	9.6	1.9	1.8	2.2	3.0	41.0	9.8
$w(\text{荧蒽})$	33.1	46.9	43.9	15.8	15.1	13.9	19.4	184.0	46.5
$w(\text{芘})$	23.5	36.9	32.7	10.6	10.1	12.8	14.7	148.9	36.3
$w(\text{苯并[a]蒽})$	12.2	19.2	16.9	3.3	3.1	3.7	5.2	82.4	18.3
$w(\text{ })$	15.1	26.9	20.4	5.9	5.5	5.5	7.9	71.0	19.8
$w(\text{苯并[b]荧蒽})$	33.0	53.9	43.7	12.5	12.5	13.4	18.1	245.5	54.1
$w(\text{苯并[k]荧蒽})$	7.1	13.6	10.0	0.4	0.6	0.3	2.0	79.8	14.2
$w(\text{苯并[a]芘})$	5.6	12.7	9.2	1.5	1.3	1.2	3.2	86.5	15.1
$w(\text{二苯并[a,h]蒽})$	4.1	5.8	5.4	1.0	0.9	0.8	1.3	22.1	5.2
$w(\text{茚并[1,2,3-cd]芘})$	9.4	13.8	11.1	4.2	3.7	3.6	5.4	71.9	15.4
$w(\text{苯并[g,h,i] })$	11.3	17.0	13.5	4.5	4.5	4.7	6.2	82.1	18.0
$w(\text{PAHs})$	231.8	322.8	311.1	104.6	101.3	109.4	148.4	1\,494.8	353.0

2.2 多环芳烃的来源

多环芳烃的主要来源有自然源和人为源 2 种:自然源包括森林大火、火山喷发和生物合成等;人为源包括各种矿物燃料(煤、石油、天然气等)、木材、纸张及其他含氢化合物的不完全燃烧或在还原条件下热解生成^[23]。目前,国内学者利用多环芳烃某些单体的比值来判断其来源,主要包括 $w(\text{荧蒽})/w(\text{芘})$ 和 $w(\text{菲})/w(\text{蒽})$ ^[23]。 $w(\text{荧蒽})/w(\text{芘})$ 大于 1.2,说明多环芳烃来源于煤炭燃烧; $w(\text{荧蒽})/w(\text{芘})$ 等于 1,

说明多环芳烃来源于木材燃烧; $w(\text{荧蒽})/w(\text{芘})$ 小于 1,说明多环芳烃来源于石油燃料的不完全燃烧。一般而言,受油类污染的沉积物中 $w(\text{荧蒽})/w(\text{芘})$ 为 0.8~0.9, $w(\text{菲})/w(\text{蒽})$ 为 4.4~7.9。在小田庄、烧车淀、王家寨、枣林庄、光淀、端村采样点沉积物中 $w(\text{荧蒽})/w(\text{芘})$ 大于 1.2,表明该区域沉积物中多环芳烃主要来源于煤炭燃烧。白洋淀区安新县境内有纯水村 39 个,淀边村 134 个,约 36.48×10^4 人,煤气燃烧及冬季燃煤取暖的生活方式导致 $w(\text{荧蒽})/$

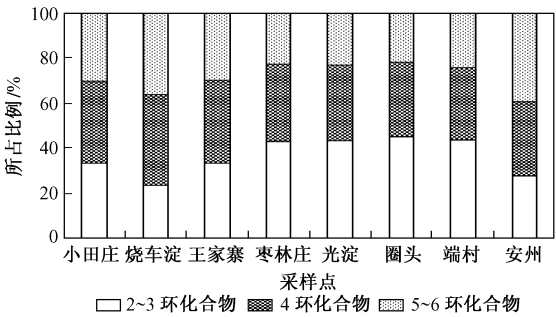


图 2 白洋淀表层沉积物中多环芳烃组成分布
Fig. 2 Composition of PAHs in sediments from Baiyangdian Lake

w (苳) 较高. 另外, 淀区水上村旅游、餐饮产生的垃圾任意排放、堆置, 在雨水冲刷或水位上涨的情况下, 污染物直接进入淀区, 导致淀区水质污染、恶化^[23]. 在圈头和安州采样点沉积物中, w (荧蒹)/ w (苳) 分别为 1.1 和 1.2, 说明多环芳烃主要来源于周边村子秸秆燃烧. 另外, 小田庄、王家寨和安州 3 个采样点沉积物中 w (菲)/ w (苳) 分别为 6.0, 5.4 和 4.5, 在 4.4~7.9 内, 说明这 3 个采样点还受到石油燃料不完全燃烧的污染. 小田庄和王家寨附近淀区中有许多旅游观光游船, 这些游船大部分用柴油或者汽油作为燃料. 每当机器发生故障或是检修时, 附近水面总是漂浮有大片油层^[23].

多环芳烃环数相对丰度可以反映来自热解或石油类污染. 通常高分子量的 4 环及其以上的多环芳烃主要是由于化石燃料高温燃烧, 而低分子量

(2~3 环) 则来源于石油类污染. 从多环芳烃在白洋淀不同采样点沉积物中的分布模式(见图 2) 可以发现: 枣林庄、光淀、圈头和端村 4 个采样点以 2~3 环化合物为主, 受到船只油类污染较为严重; 而其他 4 个采样点以 4 环或 5~6 环化合物为主, 主要由于化石燃料的高温燃烧所致. 白洋淀淀区小型游船对水质污染影响较大; 白洋淀周围区域冬季取暖仍采用燃煤方式, 煤气和无烟煤的不完全燃烧很可能是 4 环或 5~6 环化合物的主要来源.

2.3 与国内其他地区沉积物中多环芳烃质量分数比较

白洋淀表层沉积物与国内其他湖泊、河流、近海沿岸沉积物中 w (PAHs) 的比较见表 2. 白洋淀沉积物中 w (PAHs) 与珠江河口 (191~622 ng/g)^[4]、山东南四湖 (229~610 ng/g)^[9]、江苏太湖 (254~644 ng/g)^[7]、南海近岸带 (75~219 ng/g)^[3] 及湄洲湾 (197~300 ng/g)^[12] 等地处于同一个水平; 与淮河(淮南—蚌埠段) (5~78 ng/g)^[26]、江苏云龙湖 (5~19 ng/g)^[8] 及渤海湾 (25~35 ng/g)^[10] 和台州湾海域 (85~168 ng/g)^[26] 等地相比, 高出 2~27 倍; 而一些工业发达地区的河流、河口、近海岸带, 如黄浦江 (244~4348 ng/g)^[24]、第二松花江中下游 (447~20331 ng/g)^[25]、黄河干流 (2250~2324 ng/g)^[13]、胶州湾 (82~4567 ng/g)^[11] 及香港维多利亚港 (700~26100 ng/g)^[28] 沉积物中的 w (PAHs) 比白洋淀的高 3~20 倍. 综上, 白洋淀表层沉积物中多环芳烃污染程度与国内其他地区相比, 处于中等污染水平.

表 2 国内其他地区河流、湖泊及海湾表层沉积物多环芳烃比较

Table 2 Comparison of concentrations of PAHs in surface sediments from various regions in China

采样点	多环芳烃数量/ 种	w (PAHs)/(ng/ g)	文献来源	
江河	珠江三角洲	25	294~ 1 100(749) ¹⁾	[5]
	珠江河口	16	191~ 622(321)	[4]
	黄埔江	16	244~ 4 348(1 600)	[24]
	第二松花江中下游	5	447~ 20 331(3 789)	[25]
	黄河干流	16	2 250~ 2 324 (2 287)	[13]
	淮河(淮南—蚌埠段)	16	5~ 78(20)	[26]
湖泊	山东南四湖	16	229~ 610(442)	[9]
	江苏太湖	15	254~ 644(410)	[7]
	江苏云龙湖	15	5~ 19(13)	[8]
	黑龙江扎龙湿地	15	57~ 397(142)	[6]
	白洋淀	16	101~ 1 495(353)	
海湾	渤海湾近岸	10	25~ 35(28)	[10]
	南海近岸带	16	75~ 219(135)	[4]
	胶州湾	23	82~ 4 567(1 000)	[11]
	湄洲湾	16	197~ 300(256)	[12]
	台州湾海域	15	85~ 168(139)	[27]
	香港维多利亚港	8	700~ 26 100(5 277)	[28]

1) 括号内为平均值.

2.4 多环芳烃生态风险评价

一般而言, 低分子量(2~3 环) 多环芳烃可呈现显著的急性毒性, 而某些高分子量多环芳烃则具有潜在的致癌性^[29]. LONG 等^[30] 提出用于确定海洋与河口沉积物中有机污染物的潜在生态风险的效应区间低值(Effects Range Low, *ERL*) 和效应区间中值(Effects Range Median, *ERM*), 借助 *ERL* 和 *ERM* 可评估多环芳烃对生物体产生的潜在生态风险效应: 若污染物含量小于 *ERL*, 则产生负面生态效应的可能性不大; 若污染物含量在二者之间, 则具有潜在的生态风险; 若污染物含量大于 *ERM*, 则可能产生严重的生态风险. 将白洋淀表层沉积物样品中 9 种多环芳烃与相应的沉积物生态风险标志水平进行比较^[31] (见表 3), 结果表明, 只有安州采样点的沉积物中 w (芴) 超出相应的 *ERL*, 可能会对生物产生较小的负面影响; 而其他采样点沉积物中多环芳烃的含量均低于 *ERL*. 因此, 白洋淀表层沉积物中多环芳烃生态风险比较低.

表 3 白洋淀沉积物中多环芳烃含量与风险效应低值和风险效应中值比较

Table 3 Comparison of PAHs concentrations in surface sediments from Baiyangdian Lake with effect range low (<i>ERL</i>) and effect range median (<i>ERM</i>) ng/g			
项目	<i>ERL</i>	<i>ERM</i>	实测值
w (芴)	16	500	0.8~ 12.9
w (芴烯)	44	640	2.2~ 17.7
w (蒽)	85.3	1 100	1.8~ 41.0
w (苯并[<i>a</i>] 蒽)	261	1 600	3.1~ 82.4
w (苯并[<i>b</i>] 蒽)	430	1 600	1.2~ 86.5
w ()	384	2 800	5.5~ 71.0
w (二苯并[<i>a, h</i>] 蒽)	63.4	260	0.8~ 22.1
w (荧蒽)	600	5 100	13.9~ 184.0
w (芴)	19	540	7.2~ 91.1
w (蔡)	160	2 100	6.0~ 75.0
w (菲)	240	1 500	20.5~ 183.1
w (苝)	665	2 600	10.1~ 148.9
w (PAHs)	4 022	44 792	101.3~ 1 494.8

3 结论

- a. US EPA 16 种优先控制的多环芳烃在白洋淀表层沉积物中都有检出, w (PAHs) 为 101.3~1 494.8 ng/g , 平均值为 353.0 ng/g . 在所有采样点中 w (菲), w (荧蒽), w (苝) 和 w (苯并[*b*] 蒽) 较高. 多环芳烃组成显示, 2~4 环化合物所占比例较大.
- b. 通过多环芳烃组成特征分析判断, 白洋淀沉积物中多环芳烃来源可能与上游化工厂污染、淀区周边村民燃烧薪柴及游船废物排放等有关.

c. 与国内其他河流、湖泊及海湾表层沉积物多环芳烃相比, 白洋淀沉积物中多环芳烃处于中等污染水平. 风险评估的结果显示, 白洋淀沉积物对周围生物的影响较低.

参考文献(References):

[1] 麦碧娴, 林峰, 张干, 等. 珠江三角洲沉积物中毒害有机物的污染现状及评价[J]. 环境科学研究, 2001, 14(1): 19-24.

[2] MAI B X, FU J M, SHENG G Y, *et al.* Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Peart River Delta, China[J]. Environ Pollut, 2002, 117: 457-474.

[3] CHEN S J, LUO X J, MAI B X, *et al.* Distribution and mass inventories of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in sediments of the Pearl River Estuary and the Northern South China Sea[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40: 709-714.

[4] 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.

[5] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中多环芳烃的来源、迁移及生态风险评价[J]. 生态毒理学报, 2006, 1(1): 17-24.

[6] 刘广民, 尹莉莉, 刘子靖, 等. 扎龙湿地沉积物垂向剖面中多环芳烃分布特征[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3): 36-39.

[7] 袁旭音, 李阿梅, 王禹, 等. 太湖表层沉积物中的多环芳烃及其毒性评估[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 607-610.

[8] 丁文文, 韦萍. 徐州市云龙湖沉积物中多环芳烃的污染研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(34): 11197-11198.

[9] 史双昕, 杨永亮, 石磊. 南四湖表层沉积物中多环芳烃的分布及其来源[J]. 青岛大学学报, 2005, 20(4): 95-99.

[10] 林秀梅, 刘文新, 陈江麟, 等. 渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2005, 25(1): 79-75.

[11] 杨永亮, 麦碧娴, 潘静, 等. 胶州湾表层沉积物中多环芳烃的分布及来源[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 38-43.

[12] 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.

[13] 罗雪梅, 刘昌明, 何孟常. 黄河沉积物中多环芳烃的分布特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2005, 18(2): 48-50.

[14] 杨清书, 麦碧娴, 罗孝俊, 等. 珠江澳门水域水柱多环芳烃初步研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(3): 28-33.

[15] 赵淑莉, 戴天有, 段小丽, 等. 北京城市空气中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 16-20.

[16] 宋雪英, 孙丽娜, 杨晓波, 等. 辽河流域表层土壤多环芳烃污染现状初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 216-220.

[17] 杨卓, 王殿武, 李贵宝, 等. 白洋淀底泥重金属污染现状调查及评价研究[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5): 20-26.

[18] 窦薇, 赵忠宪. 白洋淀水体、底泥及鲫鱼体内 DDT、BHC 污染状况研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(3): 308-312.

[19] 祝心如, 王怡中, 王大力, 等. 白洋淀地区的多氯联苯污染研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(1): 86-90.

[20] 王怡中, 刘季昂, 胡春, 等. 白洋淀地区水中有机污染物的定性

分析[J]. 环境化学, 1995, 14(5): 52-58.

[21] 林峥,麦碧嫻,张干,等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. 环境化学, 1999, 18(2): 115-121.

[22] 包贞,潘志彦,杨日华,等. 环境中的多环芳烃的分布及降解[J]. 浙江工业大学学报, 2003, 31(5): 528-533.

[23] 马敏立,温淑瑶,孙笑春,等. 白洋淀水环境变化对安新县经济发展的影响[J]. 水资源保护, 2004(3): 5-9.

[24] 胡雄星,周亚康,韩中豪,等. 黄浦江表层沉积物中多环芳烃的分布特征及来源[J]. 环境化学, 2005, 24(6): 703-707.

[25] 陆继龙,蔡波,郝立波,等. 第二松花江中下游河段底泥中多环芳烃的初步研究[J]. 岩矿测试, 2007, 26(4): 325-327.

[26] 王庆,丁毅,李玉成,等. 淮河淮南—蚌埠段沉积物中的多环芳烃污染性状研究[J]. 宿州学院学报, 2007, 22(6): 103-106.

[27] 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.

[28] HONG H, XU L, ZHANG L, *et al.* Environmental fate and chemistry of organic pollutions in the sediments of Xiamen and Victoria Harbors [J]. *Mar Pollut Bull*, 1995, 31: 229-236.

[29] WITT G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of the Baltic Sea [J]. *Mar Pollut Bull*, 1995, 31(4): 237-248.

[30] LONG E R, MACDONALD D D, SMITH S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuary sediments [J]. *Environ Manag*, 1995, 19: 81-97.

(责任编辑: 孔 欣)