

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*

赵 健¹, 周怀东^{2**}, 富 国¹, 赵高峰², 陆 瑾², 王雨春², 袁 浩²

(1: 中国环境科学研究院, 北京 100012)

(2: 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 分析了河北西大洋水库沉积物中 16 种多环芳烃的含量及分布状况, 并对其来源和生态风险进行了分析和评估。结果表明, 表层沉积物多环芳烃总含量范围在 422.36–1052.90 ng/g 之间, 且由库区上游到坝前逐渐升高。水库剖面沉积物中多环芳烃总含量在 388.81–1205.56 ng/g 之间, 自底层 20 cm 到表层多环芳烃呈上升的趋势。沉积物中多环芳烃组成以低环的萘和菲, 高环的荧蒽、苯并[b]荧蒽、屈和芘为主。表层和剖面沉积物中多环芳烃总含量与有机碳含量呈正相关关系, 相关系数分别为 0.91 和 0.93; 此外, 有机碳对高环多环芳烃的影响更显著。西大洋水库沉积物中多环芳烃主要来源于化石燃料及生物质的燃烧。总体来说, 西大洋水库沉积物多环芳烃污染处于中等偏低污染水平, 多环芳烃对生态环境的影响目前还处于较低风险水平。

关键词: 西大洋水库; 沉积物; 多环芳烃; 分布; 生态风险

Distributions, sources and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Xidayang Reservoir, Hebei Province

ZHAO Jian¹, ZHOU Huaidong², Fu Guo, ZHAO Gaofeng², LU Jin², WANG Yuchun² & YUAN Hao²

(1: *Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P. R. China*)

(2: *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China*)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of 16 types were measured in sediment from Xidayang Reservoir, Hebei Province, and the possible sources and potential risk assessment also had been analyzed. Total PAHs concentrations varied from 422.36 to 1052.90 ng/g in surface sediment, and increased continuously from reservoir upstream to the front areas of the reservoir dam. The total PAHs concentrations ranged from 388.81 to 1205.56 ng/g in a sediment profile, and increased continuously from the bottom (20 cm under the surface) to the surface sediment. Naphthalene, Phenanthrene, Fluoranthene, Benzo(b) fluoranthene, Chrysene and Pyrene were dominant compounds of PAHs in the sediment. The total PAHs concentration was positively correlated to TOC contents with a correlation coefficient of 0.91 in surface sediment and 0.93 in profile sediment. TOC absorbs more strongly high molecular weight PAHs (HPAHs) than low molecular weight PAHs (LPAHs). The main source of PAHs was originated from combustions of fossil fuels and biomass. In general, PAHs pollution in sediment appeared to be moderate to low leveling in Xidayang Reservoir. Risk assessment suggested that PAHs was no significant biological impairment, suggesting a low toxicological risk up to now.

Keywords: Xidayang Reservoir; sediment; Polycyclic aromatic hydrocarbons; distribution; ecological risk

多环芳烃 (PAHs) 是广泛存在于环境中的一种有机污染物, 部分 PAHs 具有持久性有机污染物的特性。在联合国环境规划署 (UNEP) 和全球环境基金 (GEF) 组织的持久性有毒有机污染物 (PTS) 区域评价计划中, 多环芳烃是被重点关注的污染物质之一^[1]。多环芳烃具有低溶解性和疏水性, 因此在水环境的水相中含量一般很低, 但易于与悬浮物结合而沉降于水底, 因此沉积物是多环芳烃的主要环境归宿之一^[2-4]。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”^[5]。富集在沉积物中的多环芳烃还

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2008ZX07209) 和国家自然科学基金项目 (50721006) 联合资助。2010-09-17 收稿; 2010-12-26 收修改稿。赵健, 男, 1979 年生, 博士; E-mail: zj103823@163.com.

** 通讯作者; E-mail: hdzhou@iwhr.com.

可通过食物链传递给高营养级生物^[6],对人类和其他生物的生存和发展构成潜在危害.国内外研究表明,地表水环境系统中均存在不同程度的 PAHs 污染^[7-18].

西大洋水库位于海河流域大清河水系唐河出山口保定市唐县境内,水库控制流域面积 4420 km²,总库容 11.37 × 10⁸ m³,是一座以防洪为主,兼顾城市供水、灌溉、发电等综合利用的大型水库^[19].目前,关于西大洋水库多环芳烃污染的研究尚未见报道,开展西大洋水库多环芳烃污染调查和风险评价具有重要意义.本文分析了西大洋水库表层和剖面沉积物中多环芳烃的分布特征;根据多环芳烃的组分特征和同分异构体比值初步探讨其主要的污染来源;参照相应的沉积物质量标准,对多环芳烃潜在生态风险进行初步评价.

1 材料与方法

1.1 样品采集

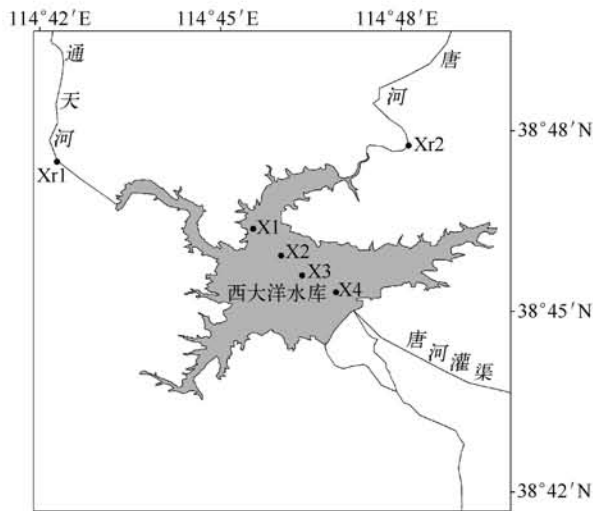


图 1 西大洋水库采样点分布

Fig. 1 The distribution of sampling sites in Xidayang Reservoir

西大洋水库沉积物采样时间为 2007 年 11 月,共计采集 6 个表层沉积物样和 1 个沉积物柱状样.表层沉积物采样点位于库区上游(X1)、1/3 库处(X2)、2/3 库处(X3)和坝前(X4)处,各点位水深分别为 3.0、12、15 和 13 m;以及主要入库支流通天河(Xr1)和唐河(Xr2)河口处,水深分别为 0.5 和 0.3 m.同时,在坝前(X4)采集柱状样(图 1).样品采集后立刻装入不锈钢饭盒,再装入聚乙烯袋中,密封冷藏运回实验室,于 -20 °C 保存至分析.

1.2 样品提取和净化

样品经冷冻干燥、研磨、过筛,备用.准确称取 10 g 样品加入回收率指示物(氘代萘, 2 μl),萃取溶剂:正己烷与二氯甲烷(1/1, V/V,农残级);萃取温度:125 °C;萃取压力:1500 psi;萃取时间:7 min;循环次数:两次;淋洗体积:60 ml;吹扫时间:60 s.提取液用旋转蒸发仪浓缩至约 3 ml(水浴温度 40 °C),并用

1.3 仪器分析条件

氮吹仪浓缩至约 1 ml.使用弗罗里硅土萃取柱净化^[17].5 ml 正己烷对净化柱进行活化,完全转移萃取液至净化柱,用 9 ml 丙酮/正己烷(1/9, V/V)和 5 ml 的二氯甲烷淋洗柱子,将所有淋洗液收集于试管中.经氮吹仪浓缩后用正己烷定容至 1.0 ml.待测液定容后转移至 GC 自动进样样品瓶中,于冰箱中避光保存,待测.

1.4 质量保证与控制

使用美国 HP Agilent 6890-5975 GC/MS 仪测定样品中的 16 种 US EPA 优先控制的多环芳烃的浓度,以相对保留时间和特征碎片离子的峰强度比值对多环芳烃类进行定性分析,采用内标法对多环芳烃进行定量分析^[17].GC/MS 的分析条件为:Agilent DB-5 气相毛细管柱(5% 苯基甲基聚硅氧烷),规格为 60 m × 250 μm × 0.25 μm,升温程序:初始温度 40 °C 保持 1 min,然后以 15 °C/min 速度升至 200 °C,在 200 °C 下保持 5 min,再以 3 °C/min 升至 300 °C,保持 10 min,进样口温度为 280 °C.载气为高纯氮气,流量为 1 ml/min,无分流自动进样 1 μl.

样品检测的同时完成方法空白和程序空白,对每个检测样品都添加回收率指示物氘代萘,其回收率为 73.8% - 108.2%.多环芳烃含量以干重计,16 种多环芳烃的检出限为 0.12 - 0.72 ng/g.方法空白中有微量的萘检出(0.2 ng/g),最后结果经回收率校正和空白扣除.

2 结果与分析

2.1 表层沉积物多环芳烃含量和分布特征

西大洋水库库区多环芳烃总含量范围介于 422.36 - 1052.90 ng/g 之间。其中,库区上游(X1)到坝前(X4)多环芳烃总含量依次为 422.36、646.67、869.72 和 1052.90 ng/g。在坝前位置附近多环芳烃含量较高,这可能是由于作为多环芳烃主要载体的悬浮物在此处大量沉积。此外,两条入库河流,通天河(Xr1)和唐河(Xr2)河口处多环芳烃总含量分别为 53.56 和 337.39 ng/g,低于库区沉积物中的多环芳烃总含量(表 1)。以上结果显示作为流域汇水系统的水库是区域多环芳烃迁移转化的重要赋存“归宿”。

在所分析的 16 种多环芳烃中,除苯并[k]荧蒹未检出外,其余 15 种多环芳烃的检出率为 100%。多环芳烃组分分布显示(表 1),库区上游样点(X1)2-3 环多环芳烃含量较高,占多环芳烃总量达 72%。其余样点 2-3 环多环芳烃占多环芳烃总量的 30%-44%,萘和菲为主要化合物,4 环及其以上多环芳烃占多环芳烃总量的 56%-70%,主要的优势化合物为荧蒹、苯并[b]荧蒹、屈和苊。

表 1 表层沉积物中多环芳烃的含量(ng/g)*
Tab. 1 PAHs concentrations in surface sediments of Xidayang Reservoir

化合物	英文缩写	Xr1	Xr2	X1	X2	X3	X4
萘	NAP	3.48	46.84	198.43	30.03	56.23	98.10
苊烯	ACY	0.53	2.81	2.77	3.97	6.38	7.14
苊	ACE	0.36	2.71	3.72	3.27	5.08	5.12
芴	FLO	1.84	22.33	26.67	51.48	74.18	74.71
菲	PHE	8.14	67.38	69.66	109.55	155.71	147.27
蒽	ANT	1.60	7.00	4.54	12.99	15.86	18.54
荧蒽	FLA	9.00	36.70	25.32	95.19	121.80	152.61
苊	PYR	9.02	27.22	20.18	64.59	77.09	94.36
苯并[a]蒽	BaA	4.51	17.14	9.29	34.92	36.33	51.59
屈	Chr	6.43	30.27	16.40	64.16	76.52	96.72
苯并[b]荧蒽	BbF	3.95	30.27	18.18	75.50	82.66	105.53
苯并[k]荧蒽	BkF	nd	nd	nd	nd	nd	nd
苯并[a]苊	BaP	2.44	15.33	11.93	35.94	44.99	65.79
茚并(1,2,3-cd)苊	IcdP	1.15	15.40	4.35	21.24	59.32	69.83
二苯并(a,h)蒽	DahA	0.08	1.23	0.73	3.71	9.25	10.65
苯并(g,h,i)苊	BghiP	1.01	14.77	10.18	40.14	48.33	54.95
总量	ΣPAHs	53.56	337.39	422.36	646.67	869.72	1052.90
2-3 环(%)		30	44	72	33	36	33
≥4 环(%)		70	56	28	67	64	67

* nd: 低于检出限。

2.2 柱状沉积物中多环芳烃含量和分布特征

西大洋水库不同深度剖面沉积物中多环芳烃总含量介于 388.81 - 1205.56 ng/g 之间(表 2)。从多环芳烃垂直分布来看,多环芳烃主要富集在 0-8 cm 层,基本上自表层以下 20 cm 到表层一直呈上升的趋势,表明近年来多环芳烃污染有加重趋势,值得密切关注。

各层次沉积物多环芳烃组成特征与表层沉积物基本相同,低环的萘和菲;高环的荧蒽、苯并[b]荧蒽、屈和苊为主要多环芳烃组分。就多环芳烃环数组成来看,各层次均表现出以 4 环及其以上多环芳烃为主,占多环芳烃总量的 54%-75%。

2.3 沉积物中多环芳烃与 TOC 的相关性

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^[20]。对多环芳烃含量和有机碳质量分数间的相关性进行分析,

结果显示具有较高的相关性($R^2 = 0.94$). 此外, 表层沉积物二者的 R^2 为 0.91 (图 2a), 剖面沉积物中二者的 R^2 为 0.93 (图 2b). 这表明在西大洋水库区域范围内, 有机碳对多环芳烃的归宿有一定的影响.

表 2 西大洋水库不同深度沉积物中多环芳烃的含量 (ng/g)*
Tab. 2 PAHs concentrations in different depths of sediments of Xidayang Reservoir

化合物	英文简写	0-2 cm	2-4 cm	4-6 cm	6-8 cm	8-10 cm	10-15 cm	15-20 cm
萘	NAP	98.10	28.74	28.36	158.68	25.97	19.61	17.88
苊烯	ACY	7.14	5.29	5.05	10.08	4.13	2.67	2.19
苊	ACE	5.12	3.77	4.70	8.50	2.84	2.26	2.09
芴	FLO	74.71	71.37	54.89	112.89	48.83	27.01	22.49
菲	PHE	147.27	161.49	101.80	237.17	135.20	82.95	75.25
蒽	ANT	18.54	18.32	16.26	24.66	14.24	8.98	8.22
荧蒽	FLA	152.61	146.82	142.17	150.69	107.08	62.20	50.06
芘	PYR	94.36	95.14	84.20	92.97	68.80	46.38	40.19
苯并[a]蒽	BaA	51.59	49.23	47.65	49.45	32.68	24.71	22.01
屈	Chr	96.72	88.73	89.46	94.77	67.24	45.05	40.04
苯并[b]荧蒽	BbF	105.53	99.57	98.20	99.97	72.65	47.83	40.44
苯并[k]荧蒽	BkF	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
苯并[a]芘	BaP	65.79	49.28	50.15	47.00	42.91	27.47	23.80
茚并[1,2,3-cd]芘	IcdP	69.83	61.25	59.71	58.87	40.25	23.61	17.61
二苯并[a,h]蒽	DahA	10.65	9.70	4.21	9.67	7.56	4.78	4.10
苯并[g,h,i]芘	BghiP	54.95	51.94	50.51	50.18	33.56	23.12	19.61
总量	Σ PAHs	1052.90	940.64	837.31	1205.56	703.92	448.61	388.81
2-3 环(%)		33	31	25	46	33	32	33
≥ 4 环(%)		67	69	75	54	67	68	67

* nd: 低于检出限.

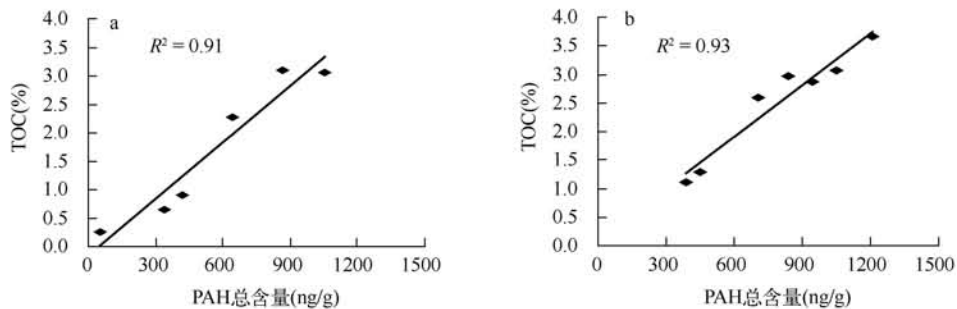


图 2 多环芳烃与 TOC 的关系(a: 表层沉积物;b: 剖面沉积物)

Fig. 2 Relationship between the total PAHs concentration and TOC (a: surface sediment; b: profile sediment)

将各样点总多环芳烃组分分成 2-3 环(低环)和 4 环及其以上(高环)2 组, 分别分析低环和高环多环芳烃与有机碳质量分数的关系. 由于多环芳烃分子具有较强的非极性和疏水性, 沉积物中的有机质对于不同环数的多环芳烃均有较强的吸附作用, 随着苯环数的增加, 多环芳烃组分的辛醇-水分配系数进一步提高, 而水溶性进一步降低, 在水-沉积物平衡体系中则更趋向于分配进入沉积物^[21]. 无论是表层沉积物还是剖面沉积物中, 低环和高环多环芳烃的含量均与有机碳有较好的正相关关系, 且高环多环芳烃组分与有机碳百分含量的相关性更强(图 3 和图 4), 这可能由于高环多环芳烃极性较高, 更容易被有机碳吸附和富集, 影响其在水环境中的分配和迁移过程.

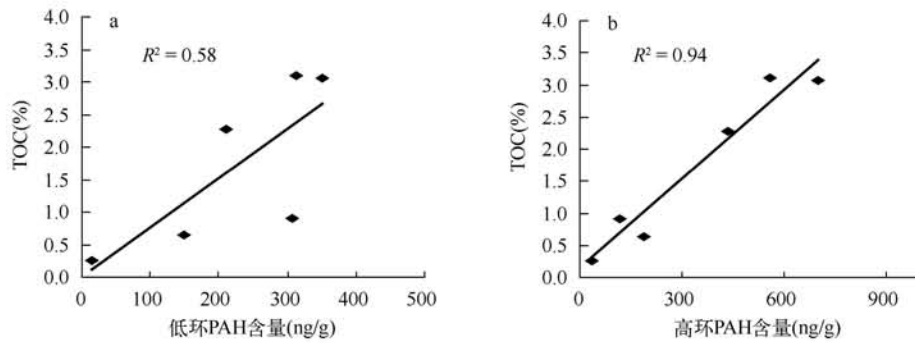


图3 表层沉积物中不同环数多环芳烃与 TOC 的关系(a: 低环;b: 高环)

Fig. 3 Relationship between the PAHs concentration and TOC in surface sediment(a: LPAHs; b: HPAHs)

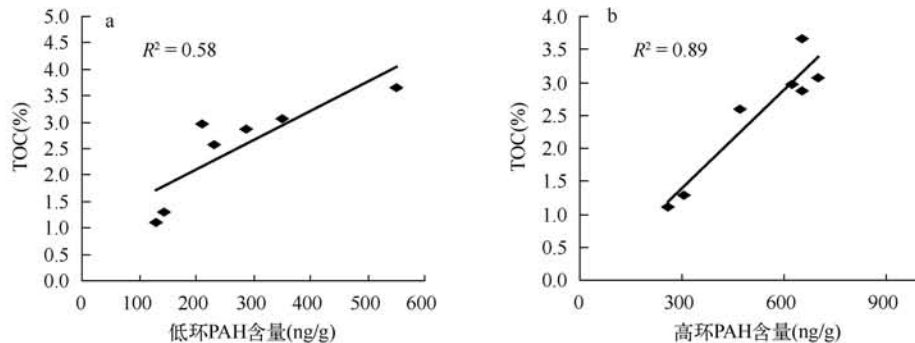


图4 剖面沉积物中不同环数多环芳烃与 TOC 的关系(a: 低环;b: 高环)

Fig. 4 Relationship between the PAHs concentration and TOC in profile sediment(a: LPAHs; b: HPAHs)

2.4 多环芳烃来源分析

环境中多环芳烃的来源比较复杂,不同成因的多环芳烃具有结构和组分上的差异。通常石油类污染和天然成岩过程中会产生较多的低环多环芳烃(LPAHs),而生物质、化石燃料的高温燃烧产物中高环多环芳烃(HPAHs)比重较高^[22]。利用沉积物中低环和高环多环芳烃比值(LPAHs/HPAHs)可以初步判断多环芳烃的污染来源。Soclo等^[23]指出,当LPAHs/HPAHs < 1时,表明多环芳烃主要来自燃烧源,而当LPAHs/HPAHs > 1时,表明多环芳烃主要源于石油类污染。西大洋水库库区上游(X1)表层沉积物中LPAHs/HPAHs > 1(表3),表明该区域多环芳烃主要是来自石油类污染,可能与库区捕鱼、捞沙的机动船只燃油泄漏有关,其余采样点LPAHs/HPAHs比值都小于1。据此可以推断出,沉积物中多环芳烃主要来自燃烧排放污染。

另外,环境介质中某些多环芳烃浓度比值已被用来识别多环芳烃的来源。如菲/蒽、荧蒽/芘、苯并[a]蒽/屈等。根据Yunker等^[24]归纳的结果,荧蒽/(荧蒽+芘)(FLA/(FLA+PYR))小于0.4意味着油类排放来源,大于0.5主要是木柴、煤燃烧来源,位于0.4与0.5之间则意味着石油及其精炼产品的燃烧来源。从FLA/(FLA+PYR)指标来看,所有样点的比值均大于0.5(表3),指示出以草、木柴和煤的燃烧来源为主。

表3 LPAHs/HPAHs、荧蒽/(荧蒽+芘)的比值
Tab. 3 Ratios of LPAHs/HPAHs and FLA/(FLA+PYR)

分子标志物	Xr1	Xr2	X1	X2	X3	X4
LPAHs/HPAHs	0.43	0.79	2.57	0.49	0.56	0.49
FLA/(FLA+PYR)	0.50	0.57	0.56	0.60	0.61	0.62

综上所述,西大洋水库多环芳烃主要来自于化石燃料和生物质的不完全燃烧.这可能与库区周边燃煤、农田作物焚烧等人类活动密切相关.此外,部分区域也受到库区捕鱼、捞沙的机动船只的油类排放污染的影响.

2.5 沉积物污染水平和风险评价

从全球范围来看,沉积物多环芳烃的含量范围为 1 - 760000 ng/g,中等污染程度范围在 1000 - 10000 ng/g 之间^[25].西大洋水库多环芳烃总含量范围为 422.36 - 1052.90 ng/g,平均值为 748 ng/g,低于密云水库(1087.9 ng/g)和官厅水库多环芳烃污染程度(1780.97, 2083.84 和 2084.74 ng/g)^[18],略高于王快水库多环芳烃污染程度(696.5 ng/g)^[26].综上所述,西大洋水库沉积物中多环芳烃污染处于中等偏低污染水平.

通常低环数的多环芳烃(2-3 环)可呈现显著的急性毒性,而某些高环数的多环芳烃(≥ 4 环)则具有潜在的致癌性^[27-28].因此,多环芳烃对环境的生态风险效应受到广泛的关注,国内外在沉积物多环芳烃污染生态风险评价方面做了很多研究,但目前尚未建立起统一的评价标准^[29].Long 等^[30]在大量的实验研究基础上,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效应区间低值(Effects Range Low, ERL)和效应区间中值(Effects Range Median, ERM),以反映沉积物质量的生态风险标志水平.若多环芳烃的浓度小于 ERL,则产生负面生态效应的机率较小.若多环芳烃的浓度在两者之间,则具有潜在的生态风险.若多环芳烃的浓度大于 ERM,则可能产生严重的生态风险.本文借助 ERL 和 ERM 数值对西大洋水库沉积物中的多环芳烃潜在生态风险进行简单的评估,发现绝大多数采样点单个多环芳烃含量和多环芳烃总含量远低于 ERM(表 4),这表明严重的多环芳烃生态风险在西大洋水库沉积物中不存在,虽部分样点 NAP 和 FLO 化合物超过 ERL,存在负面生态效应,但潜在的生态风险较低.

表 4 表层沉积物多环芳烃与沉积物质量标准的比较 (ng/g) *

Tab. 4 Comparison of PAHs in surface sediment and SQS

化合物	英文简写	ERL	ERM	含量范围
萘	NAP	160	2100	30.03 - 198.43(1)
苊烯	ACY	44	640	2.77 - 7.14
苊	ACE	16	500	3.27 - 5.12
芴	FLO	19	540	26.67 - 74.71(4)
菲	PHE	240	1500	69.66 - 155.71
蒽	ANT	85.3	1100	4.54 - 18.54
荧蒽	FLA	600	5100	25.32 - 152.61
芘	PYR	665	2600	20.18 - 94.36
苯并[a]蒽	BaA	261	1600	9.29 - 51.59
屈	Chr	384	2800	16.40 - 96.72
苯并[a]芘	BaP	430	1600	11.93 - 65.79
二苯并[a,h]蒽	DahA	63.4	260	0.73 - 10.65
总量	Σ PAHs	4022	40792	422.36 - 1052.90

* 括号内的数字代表超过 ERL 值的样点数.

3 参考文献

- [1] UNEP. Europe regional report: Regionally based assessment of persistent toxic substances. United Nations Environment Programme, 2002.
- [2] Gearing PJ, Gearing JN, Pruell RJ *et al.* Partitioning of No. 2 fuel oil in controlled estuarine ecosystem, sediments and suspended particulate matter. *Environmental Science and Technology*, 1980, **14**: 1129-1136.
- [3] Knap AH, Williams PJ, Le B. Experimental studies to determining the fate of petroleum hydrocarbons from refinery effluent on an estuarine system. *Environmental Science and Technology*, 1982, **16**: 1-4.
- [4] Chiou CT, MacGroddy SE, Kile DE. Partition characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons on soils and sediments.

- Environmental Science and Technology*, 1998, **32**: 264-269.
- [5] Yuan DX, Yang DN, Wade TL *et al.* Status of persistent organic pollutants in the sediment from several estuaries in China. *Environmental Pollution*, 2001, **114**: 101-111.
- [6] Menzie CA, Potocki BB, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment. *Environmental Science and Technology*, 1992, **26**: 1278-1284.
- [7] 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. 中国环境科学, 2000, **20**(2): 128-131.
- [8] 刘敏, 侯立军, 邹惠仙等. 长江口潮滩表层沉积物中多环芳烃分布特征. 中国环境科学, 2001, **21**(4): 343-346.
- [9] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娟等. 珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源. 环境科学, 2005, **26**(4): 129-134.
- [10] 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. 河海大学学报(自然科学版), 2004, **32**(6): 607-610.
- [11] 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. 青岛大学学报(自然科学版), 2005, **20**(4): 95-99.
- [12] 罗世霞. 红枫湖水体和沉积物中有机污染物——多环芳烃的污染现状及源解析研究[学位论文]. 贵州: 贵州师范大学, 2005.
- [13] 刘现明, 徐学仁, 张笑天等. 大连湾沉积物中 PAHs 的初步研究. 环境科学学报, 2001, **21**(4): 507-509.
- [14] 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. 厦门大学学报(自然科学版), 2003, **42**(5): 633-638.
- [15] 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. 环境科学学报, 2005, **25**(1): 70-75.
- [16] 陈卓敏, 高效江, 宋祖光等. 杭州湾潮滩表层沉积物中多环芳烃的分布及来源. 中国环境科学, 2006, **26**(2): 233-237.
- [17] 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. 生态毒理学报, 2008, **3**(3): 291-299.
- [18] 王学彤. 官厅水库/永定河水系典型有机污染物研究[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [19] 张义科, 张翠君, 张雪松. 西大洋水库浮游植物及其对水质的评价. 河北大学学报(自然科学版), 1999, **19**(1): 45-49.
- [20] Moon JW, Goltz MN, Ahn KH *et al.* Dissolved organic matter effects on the performance of a barrier to polycyclic aromatic hydrocarbon transport by groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, **60**: 307-326.
- [21] 曹启民, 陈桂珠, 缪绅裕. 多环芳烃的分布特征及其与有机碳和黑碳的相关性研究——以汕头国际湿地示范区三种红树林湿地表层沉积物为例. 环境科学学报, 2009, **29**(4): 861-868.
- [22] Mai BX, Fu JM, Sheng GY *et al.* Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China. *Environmental Pollution*, 2002, **117**: 457-474.
- [23] Soclo HH, Garrigues PH, Ewald M. Origin of Polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal sediments: case studies in Cotonou(Benin) and Aquitaine(France) Areas. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, **40**: 387-396.
- [24] Yunker MB, Macdonald RW, Vingarzan R *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**: 489-515.
- [25] Zakaria MP, Takada H, Tsutsumi S *et al.* Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Rivers and Estuaries in Malaysia: A Widespread Input of Petrogenic PAHs. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(9): 1907-1918.
- [26] 赵健, 周怀东, 陆瑾等. 河北王快水库沉积物多环芳烃的分布、来源及生态风险评价. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 647-653.
- [27] Witt G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of the Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, **31**: 237-248.
- [28] Douben PET. PAHs: An Ecotoxicological Perspective. Chichester: John Wiley and Sons, 2003: 377.
- [29] McCauley DJ, DeGrave GM, Linton TK. Sediment quality guidelines and assessment: over and research needs. *Environmental Sciences and Policy*, 2000, **3**: 133-144.
- [30] Long ER, MacDonald DD, Smith SL *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 1995, **19**: 81-97.