

李艳静,汪光,李开明,等. 潭江表层沉积物中多环芳烃分布特征及其生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(2): 167-173. Li Yanjing, Wang Guang, Li Kaiming, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Tanjiang River[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(2): 167-173.

潭江表层沉积物中多环芳烃分布特征及其生态风险评价

李艳静^{1,2}, 汪光^{2,3*}, 李开明^{2,3}, 陈中颖^{2,3}, 陆俊卿^{2,3}, 刘晓伟^{2,3}

(1.中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;

2.环境保护部华南环境科学研究所国家环境保护水环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 广州 510655;

3.广东省水与大气污染防治重点实验室, 广东 广州 510655)

摘要:为分析潭江沉积物的多环芳烃污染特征及来源,评估其生态风险,对潭江 15 个采样点表层沉积物中 16 种多环芳烃单体的含量进行了测定。沉积物多环芳烃总含量范围为 57.1~1 563.6 ng/g,平均值为 550.5 ng/g。整体来看,潭江沉积物多环芳烃污染处于中等偏污染水平。多环芳烃组成以 4~6 环为主。潭江沉积物同时受到相邻区域远距离迁移和本地燃烧源很大程度的影响,此外石油排放也是中下游沉积物中多环芳烃的重要来源。风险评价结果表明,除最下游的采样点 15 外,潭江各采样点风险均较低,但是在部分采样点某些多环芳烃含量超过了效应区间低值(ERL),可能存在着对生物的潜在危害。

关键词:多环芳烃; 潭江; 表层沉积物; 生态风险评价

中图分类号: X820.4 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2014.02.033 文章编号: 1003-6504(2014)02-0167-07

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments from Tanjiang River

LI Yanjing^{1,2}, WANG Guang^{2,3*}, LI Kaiming^{2,3}, CHEN Zhongying^{2,3},

LU Junqing^{2,3}, LIU Xiaowei^{2,3}

(1.Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2.State Environmental Protection Key Laboratory of Water Environment Simulation and Pollution Control, South

China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China;

3.Key Laboratory of Water and Air Pollution Control of Guangdong Province, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Distribution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment of 15 sites from Tanjiang River in China were analyzed. Results indicated that the concentration of PAHs varied from 57.1 to 1 563.6 ng/g and the average was 550.5 ng/g. In general, it was appeared to be moderate to low level pollution by PAHs in the River. The spectrum of PAHs showed that 4 to 6 ring PAHs were predominant. The sources of long distance migration and local combustion affected the concentration level of PAHs, and discharge of oil also played an important role in most sites of midstream and downstream. Ecological risk assessment result indicated that the degree of ecological risk assessment was all at very low level, except Site 15. Some of PAHs exceeded ERL in some sites, and potential harmful effects on creatures might exist.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; Tanjiang River; surface sediment; ecological risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指 2 个或 2 个以上的苯环以稠环或非稠环形式连接在一起形成的有机化合物。研究发现多种 PAHs 具有潜在的或已证明的致癌性、致突变性和其他毒理

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://hjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@126.com

收稿日期: 2013-06-13; 修回日期: 2013-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(21207046); 广东省自然科学基金项目(S2012010008396, 10451065501005843); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07528-001)

作者简介: 李艳静(1985-)女, 在读博士, 主要研究方向为环境与健康 (电话) 020-85544390 (电子信箱) yanjingxiaomei@126.com; * 通讯作者, 男, 高级工程师, 主要研究方向为毒害污染物生物有效性及健康风险评价 (电话) 020-85558971 (电子信箱) wangguang@scies.org。

效应^[1]。

由于 PAHs 水溶性低,易于被悬浮物吸附并随颗粒物的沉降而沉积到底泥中^[2]。而底泥中 PAHs 能够重新释放到水中,成为新的污染源,一方面影响水生生物,造成生态风险;另一方面通过食物链进入人体,造成健康风险。因此研究底泥中 PAHs 污染状况对于评价水体环境风险具有重要意义^[3]。目前我国对许多河流、河口、湖泊、海岸带、水库、海湾和港口等沉积物中 PAHs 污染水平进行了调查和评价,美国环保局优控的 16 种 PAHs 在我国沉积物中都有检出^[3-30]。

珠江三角洲地区(珠三角)作为我国经济最发达、人口最稠密的地区之一,水体及底泥 PAHs 已有一定的研究^[4-16,19]。这些研究表明珠三角河流底泥受到一定的 PAHs 污染。但是目前珠三角相关研究主要集中于核心区域,对珠三角周边区域研究较少。自从“十一五”广东开始产业转移^[31],一些低端污染较重的产业开始从广深莞佛向周边城市转移。因此,研究珠三角周边区域河流底泥中 PAHs 污染状况,不仅能评价当地的 PAHs 污染水平,而且能通过比较研究探讨产业转移对周边区域 PAHs 污染的影响,分析 PAHs 的来源和污染趋势。

本次研究区域为广东省潭江流域。潭江发源于广东阳江市阳东县牛围岭,自西向东流经江门市的恩平、开平、台山和新会,在新会双水镇附近折向南流,经银洲湖出崖门口注入南海,干流全长 248 km。由于潭江流域位于珠江三角洲西部,劳动力较之广州深圳等地低廉,来自珠三角核心区域的一些产业如电镀、印染纺织、造纸等较重污染的企业这十几年有加速转移至潭江流域的趋势^[32-33]。

本研究通过采集潭江干流的底泥样品,调查了潭江底泥 PAHs 的污染状况,并通过空间分布特征以及珠三角其它区域 PAHs 污染的对比分析,初步了解产业转移对潭江底泥 PAHs 污染的影响,分析了潭江底泥 PAHs 的主要来源,并一步评价了底泥 PAHs 的污染风险。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2010 年 11 月从潭江上游的恩平市至下游入海口的江门市新会区共计 15 个采样点采集了 15 个沉积物样品,采样点的坐标由 GPS 仪定位,各采样点位置见图 1。使用掘式采样器现场采集沉积物样品,采样器内直径 8 cm,长度为 60 cm。采样后置于密封的聚乙烯塑料袋中,送往实验室储存于 4 °C 的冷藏室内冷藏以备分析。

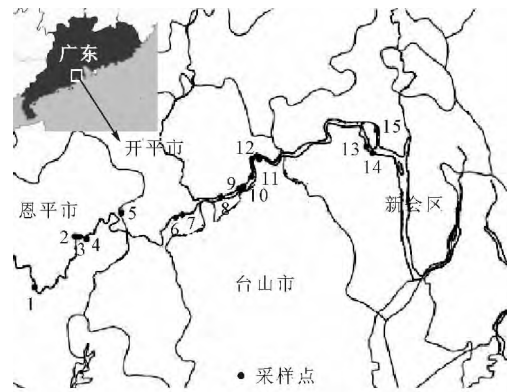


图1 潭江采样点分布示意图
Fig.1 Sediment sampling sites in Tanjiang River

1.2 样品预处理与分析

底泥样品在 -80 °C 超冷冻干燥仪中冷冻干燥,研磨并过 100 目筛。准确称取约 2.5 g 沉积物,以农残级二氯甲烷为提取液,在索氏提取器中连续抽提 48 h,并以纯铜片脱硫。抽提结束后旋转蒸发浓缩至约 2 mL,再加入 10 mL 农残级正己烷以替换溶剂,再次浓缩至 1 mL 左右。浓缩提取液通过硅胶/氧化铝净化柱(SUPELCO)层析分离后用农残级正己烷/二氯甲烷(体积比为 7:3)洗脱出 PAHs。用柔和氮气吹蒸定容至 0.5 mL 转移至 GC 自动进样用的样品瓶中。PAHs 的测定则采用气相色谱-质谱联用仪 HP6890-5973MSD 完成样品分析。

2 结果与分析

2.1 多环芳烃污染状况与分布特征

测定了美国优先控制的 16 种 PAHs 即 2 环的萘(Nap) 3 环的二氢芘(Ace)、芘(Acy)、芴(Fle)、菲(Phe)和蒽(An) 4 环的荧蒽(Flu)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)和屈(Chr) 5 环的苯并[a]芘(Bap)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)和二苯并[a,h]蒽(DahA) 6 环的苯并[g,h,i]芘(BghiP)和茚并[1,2,3-c,d]芘(IcdP)。潭江表层沉积物样品的定量结果显示:15 个站点 16 种优控 PAHs 的检出率在 68.75%~100%之间,总量范围 57.1~1 563.6 ng/g 之间,均值和中位数分别为 550.5 ng/g 和 440.2 ng/g。不同采样点 PAHs 的含量差别较大,见图 2。 Σ PAHs 检出最高的 2 个样点出现在 4 号和 15 号,达到 1 400 ng/g 以上,其余采样点的浓度均 1 000 ng/g 以下,4 号明显偏高的现象显然是受到点源排放的影响,虽然位于上游,但该采样点附近有印染纺织、电镀废水等工业废水排出。15 号是潭江最下游采样点,该处为新会货运码头和渡口,人口密度大,工业化水平也较高,大量的生活污水和工业废水汇入该河段,可认为是人类高强度活动是造成该采样点 PAHs

浓度较高的原因。从图 2 还可以看出,含量最高的单体是 Phe、Pyr 和 Fle,其值均在 800 ng/g 以上,含量最低的均是 3 环的 Ace、Acy 和 An,其值均在 100 ng/g 以下。整体来看潭江沉积物 PAHs 组成中 4 环及其以上

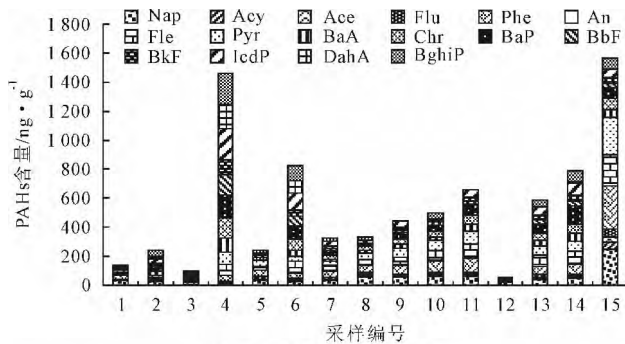


图2 各采样点PAHs含量

Fig.2 The concentration of PAHs in different sampling sites

占绝对优势,表明以高温燃烧源为主,但是不同采样点 PAHs 组成的差别很大,说明各点的污染状况及来源不同,需要采用其它方法进一步分析 PAHs 的来源。

表 1 列出了珠三角地区和国内其它地区水体表层沉积物 PAHs 的污染水平,对比发现,潭江表层沉积物的 PAHs 明显低于经济发达的珠三角地区内其它水体的污染水平,尤其是珠江及珠江广州段,在珠三角地区内处于中下等污染水平。同国内其它水体相比较,潭江表层沉积物 PAHs 含量明显低于国内高度工业化地区,比如黄浦江、辽河及黄河三支流等,同福州内河、太湖的 PAHs 含量接近,却比长江南京段、淮河中下游的含量要高。因此,潭江流域表层沉积物 PAHs 处于中等偏污染水平,周边地区经济快速发展和人类活动已对其造成了负面影响。

表 1 国内一些水体表层沉积物多环芳烃含量

Table 1 Concentrations of PAHs species in surface sediments in some rivers

(ng/g)

研究区域	地点	测定 PAHs 数量	浓度范围	平均值	参考文献
珠三角地区	本研究	16	57.1~1 563.6	550.5	本研究
	珠江	16	1 090.3~6 792.5	3 407.6	[4]
	东江	16	1 158.8~3 951.9	2 216.8	[4]
	西江	16	1 857.8~2 761.7	2 231.3	[4]
	北江	16	38.2~6 470	1 071	[5]
	珠江广州段	16	4 787.5~8 665	7 078	[8]
	珠江三角洲	16	217~2 680	1 028	[9]
	珠江广州大学城段	16	896.1~7 248	3 226.4	[11]
	黄浦江	16	244~2 805	—	[19]
	黄河兰州段	16	960~2 940	1 577.3	[21]
国内其它地区	辽河	15	120.8~22 120	3 281	[22]
	太湖	15	253.6~643.6	410.9	[23]
	福州内河	15	84.3~2 248.1	899.6	[24]
	黄河三支流	10~12	85 241~146 269	—	[25]
	淮河中下游	15	31.1~1 007.8	293.8	[26]
	长江南京段	17	213.8~550.3	341.5	[28]

2.2 多环芳烃的污染来源分析

环境中多环芳烃来源的不同使多环芳烃具有结构和组分上的差异。目前,广泛用于判别 PAHs 来源的方法包括 PAHs 环数相对丰度^[34]和特征比值法。

PAHs 环数的相对丰度可以反映多环芳烃的来源,通常低分子量(2 环、3 环)PAHs 来源于石油类污染和木材、煤等在低至中温范围内的燃烧,高分子量(4 环及以上)则主要来源于化石燃料的高温燃烧^[35]。图 3 显示各潭江表层沉积物中 PAHs 组分的相对比例,整体来看 4~6 环 PAHs 的含量占很大比例,范围在 30%~91%之间,均值是 61%,说明潭江表层沉积物 PAHs 是以化石燃料的高温燃烧源输入为主。这与沿岸工业废水排出和大气沉降密切相关。同国内其它水体(参考文献见表 1)对比发现,与辽河、黄浦江、珠江三角洲地区等类似,4~6 环比例高(超过 50%),2 环和 3 环的比例相对较低(10%~40%)。而黄河兰州段、密云

水库^[27]等区域 PAHs 组成以 2~3 环 PAHs(占 50%左右)为主,说明这些区域石油类污染与化石燃料的高温燃烧均是多环芳烃的主要来源。因为各点位 4~6 环 PAHs 比例差别相对较大,所以本文采用特征比值法来继续对其进行来源分析。

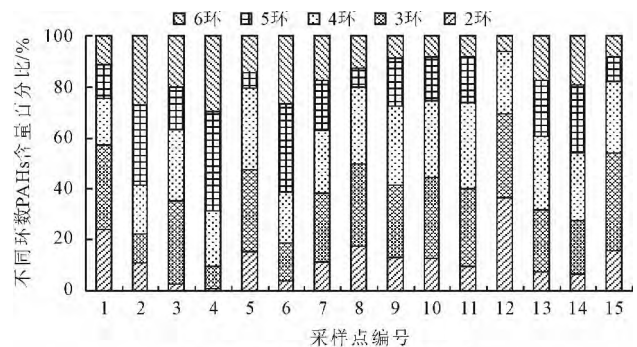


图3 不同环数PAHs所占百分率

Fig.3 The percentage of different rings PAHs concentration to the total PAHs

特征比值法也是用来判断 PAHs 来源最常见的方法。一些特定的多环芳烃同分异构体往往作为示踪来源地指标，利用这些特征比值对潭江流域 15 个采样点表层沉积物中 PAHs 的来源进行了解析。Yunker 等^[36]总结了前人研究得出： $Flu/(Flu+Pyr)<0.4$ 、 $IcdP/(IcdP+BghiP)<0.2$ 表明 PAHs 来源于石油类污染； $0.4<Flu/(Flu+Pyr)<0.5$ 、 $0.2<IcdP/(IcdP+BghiP)<0.5$ 表明来源于石油的燃烧； $Flu/(Flu+Pyr)>0.5$ 、 $IcdP/(IcdP+BghiP)>0.5$ 表明主要来源于煤和木材的燃烧。通过图 4 可判断出 10 号来源于石油类污染，其余点为石油类污染和石油、木材、煤等燃烧源并存的混合来源，当源解析结果为混合来源时，可通过 PPi 值来表征主要污染源类型（计算公式为： $PPi=[Flu/(Flu+Pyr)-0.4]/0.4+[IcdP/(IcdP+BghiP)-0.2]/0.2$ ）。若 PPi 大于 0，则污染主要为燃烧源，反之，主要为石油类污染^[29-30]。通过计算可知只有 12 号的 PPi 小于 0，其余点均大于 0。采样点 10 号和 12 号由于水运、港口及石化工业较多，不可避免会产生石油类物质的泄漏，所以受石油泄漏影响较大。而其它点位沿岸地区经济发达，工厂众多，化石燃料的高温燃烧占主导

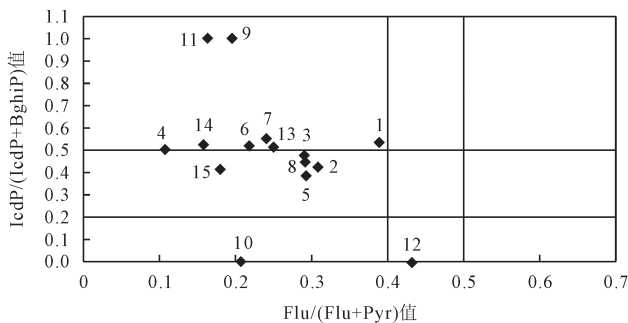


图4 潭江沉积物中PAHs特征比值判源
Fig.4 Source identification with compositional analysis of PAHs in sediments of Tanjiang River

地位，从而导致潭江沉积物 PAHs 是以燃烧源为主的混合来源。

由于 Chr 比其同分异构体 BaA 更易挥发和长距离迁移，因此，通过计算 Chr 与 BaA 比值可判断沉积物中 PAHs 是以本地来源还是以远距离迁移来源为主。当 BaA/Chr 比值比较小时，表明以远距离迁移为主，BaA/Chr 的比值越小表明迁移距离越远；反之以本地来源为主，且 BaA/Chr 的比值越大则表示本地来源所占比重越大^[16]。潭江沉积物中 2 号采样点 Chr 低于检测限，其余采样点 $0.38<BaA/Chr<1$ ，均值为 0.71，表明受到相邻区域污染物远距离迁移很大程度的影响。

2.3 多环芳烃生态风险评价

采用沉积物质量基准法(SQGs)^[37]来评价潭江表层沉积物 PAHs 引起的生态风险，表 2 中列出了用于确定潜在生态风险的 12 种 PAHs 的效应区间低值(ERL，生态有害效应几率<10%)和效应区间中值(ERM，生态有害效应几率>50%)。若污染物浓度<ERL，则极少产生负面生态效应；若污染物浓度>ERM，则经常会出现负面生态效应；若污染物浓度在两者之间，则偶尔发生负面生态效应。由于潭江沉积物中 PAHs 的浓度均远远低于 ERM 值，因此严重的多环芳烃生态风险在潭江表层沉积物中并不存在，但有 11 个采样点的风险系数(RCF)大于 1，既有一半以上的站点可能产生负面生物毒性效应。并且发现 11 个采样点单体芴(Fle)的含量均超过了 ERL 值，Fle 是一种化学致癌物质，应重点研究该该污染物在潭江流域的来源及途径，并积极采取污染控制对策。另外 15 号采样点中的 Nap、Ace、Acy、Fle 和 Phe 含量均超过相应的 ERL 值，且单体 Fle 的风险系数>10，表明发生生物毒性效应的概率较高，存在一定的生态风险。

表 2 潭江表层沉积物中的生态风险评价
Table 2 Comparison of sediment quality guidelines with PAHs of sediments from Tanjiang River

化合物	ERL	ERM	PAHs 含量范围	RCF=PAHs/ERL>1 采样点编号
Nap	160	2100	2.7~249.0	15
Ace	16	500	0.6~31.0	15
Acy	44	640	0.7~50.4	15
Fle	19	540	5.7~198.4	4、5、6、7、8、9、10、11、13、14、15
Phe	240	1 500	8.3~297.6	15
An	85.3	1 100	0.8~19.4	—
Flu	600	5 100	3.7~55.4	—
Pyr	665	2 600	4.8~253.1	—
BaA	261	1 600	2.3~95.0	—
Chr	384	2 800	2.8~135.3	—
BaP	430	1 600	0.0~161.6	—
DahA	63.4	260	0.0~160.4	4、6

注：“—”表示无风险标志水平数值。

3 结论

(1)潭江表层沉积物中多环芳烃含量范围为 57.1~1 563.6 ng/g。采样点所处位置的城镇化水平和人为活动强度的不同是沉积物样品中 PAHs 含量差异的主要原因。与国内其它湖泊、河口和海湾相比,多环芳烃污染处于中等偏低水平,潭江周边地区的经济发展和人类活动已经对环境造成了一定的负面影响。

(2)潭江表层沉积物多环芳烃是以化石燃料高温燃烧源为主的混合来源,这与潭江沿岸城镇化水平高、工业企业多和江面宽阔航运发达有关。此外相邻区域污染物远距离迁移对潭江表层沉积物多环芳烃产生很大程度的影响。

(3)潜在生态风险评价结果表明,最下游 15 号采样点 PAHs 生态风险很高,其余采样点的 PAHs 生态风险均较低,但部分采样点的一些 PAHs 含量超过 ERL 值,可能存在会对环境造成一定负面影响。

[参考文献]

- [1] Menzie A C, Hoepfner S S, Cura J J, et al. Urban and suburban storm water runoff as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to massachusetts estuarine and coastal environments[J]. *Estuaries*, 2002, 25:165-176.
- [2] 李咏梅,王郁,林逢凯,等.多环芳烃在天然水体中的自净机理研究:沉积物对多环芳烃的吸附过程模拟[J]. *中国环境科学*,1997,17(3): 208-211.
Li Yongmei, Wang Yu, Lin Pengkai, et al. Study on self-purification mechanism for PAHs in natural water system-modelling of adsorption process for PAHs on sediments[J]. *China Environmental Science*,1997,17 (3): 208-211.(in Chinese)
- [3] 瞿文川,王苏民,吴瑞金,等.东太湖沉积物中多环芳烃-菲系列化合物的来源探究[J]. *湖泊科学*,2001,13(1):9-14.
Qu Wenchuan, Wang Sumin, Wu Ruijin, et al. Determination and sources recognition of phenanthrene series in the sediments of east Taihu Lake, China[J]. *Journal of Lake Science*, 2001,13(1): 9-14.(in Chinese)
- [4] Xiao J L,She J C, et al.Distribution,source apportionment, and transport of PAHs in sediments from the Pearl River Delta and the northern South China Sea[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 55 (1): 11-20.
- [5] 许静,任明忠,杜国勇,等.北江表层沉积物中多环芳烃的分布与风险评价[J]. *环境科学*,2009,30(11):3269-3275.
Xu Jing, Ren Mingzhong, Du Guoyong, et al. Content analysis and assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Beijiang River,China[J]. *Environmental Science*, 2009,30(11):3269-3275.(in Chinese)
- [6] 麦碧娴,林峥,张干,等.珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究:多环芳烃和有机氯农药的分布及特征[J]. *环境科学学报*,2000,20 (2):192-197.
Mai Bixian, Lin Zheng, Zhang Gan, et al. Organic contaminants in surface sediments from rivers of the Pearl River Delta and estuary:the distributions and characteristics of PAHs and organochlorine pesticides[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000,20 (2):192-197.(in Chinese)
- [7] 唐银健,陈玲,李竺,等.黄浦江表层水体中低环多环芳烃的分布特征[J]. *环境科学与技术*,2007,30(2):1-4.
TangYinjian, Chen Ling, Li Zhu, et al.Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water from Huangpu River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30 (2):1-4. (in Chinese)
- [8] 杜娟,吴宏海,袁敏,等.珠江水体表层沉积物中 PAHs 的含量与来源研究[J]. *生态环境学报*,2010,19(4): 766-770.
Du Juan, Wu Honghai, Yuan Min, et al. Study on concentrations and sources of PAHs in the surface sediments from Pearl River[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2010, 19 (4):766-770.(in Chinese)
- [9] 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.
Luo Xiaojun, Chen Shejun, Mai Bixian, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from rivers of Pearl River Delta and its nearby South China Sea[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(4):129-134. (in Chinese)
- [10] Hong H, Xu L, Zhang L, et al. Environmental fate and chemistry of organic pollutions in the sediments of Xiamen and Victoria Harbours[J]. *Marine Pollution Bulletin*,1995,31:229-236.
- [11] 陆加杰,杨琛,卢锐泉,等.广州大学城珠江水域多环芳烃的污染特征[J]. *中国环境监测*,2009,25(5):86-89.
Lu Jiajie, Yang Chen, Lu Ruiquan, et al. The pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Pearl River around Guangzhou Higher Education Mega Center[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(5):86-89.(in Chinese)
- [12] 邱耀文,张干,郭玲利,等.深圳湾生态系统多环芳烃(PAHs)特征及其生态危害[J]. *环境科学*, 2007,28(5):1056-1061.
Qiu Yaowen, Zhang Gan, Guo Lingli, et al. Characteristics of PAHs in the ecosystem of Deep Bay and their ecological risk [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5):1056-1061.(in Chinese)
- [13] 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]. *生态毒理学学报*,2006,1 (1): 17-24.
Luo Xiaojun, Chen Shejun, Mai Bixian, et al. Source, transport and risk assessment of PAHs in surface sediments from Pearl River Delta[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1

- (1): 17–24.(in Chinese)
- [14] 罗孝俊. 珠江三角洲河流、河口和邻近南海海域水体、沉积物中多环芳烃与有机氯农药研究[D]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2004: 15–17.
Luo Xiaojun. Study of PAHs and OCPs on Water Body and Sediments of Rivers in Pearl River Delta, Pearl River Estuary and Offshore of South China Sea [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2004: 15–17.(in Chinese)
- [15] 刘国卿, 张干, 李军, 等. 多环芳烃在珠江口的百年沉积记录[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 141–145.
Liu Guoqing, Zhang Gan, Li Jun, et al. Over one hundred year sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Pearl River Estuary, South China [J]. Environmental Science, 2005, 26(3): 141–145.(in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 刘现明, 徐学仁, 张笑天, 等. 大连湾沉积物中 PAHs 的初步研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4), 507–509.
Liu Xianming, Xu Xueren, Zhang Xiaotian, et al. A preliminary study on PAHs in the surface sediment samples from Dalian Bay[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4), 507–509.(in Chinese)
- [18] 张先勇, 王轶, 杨宝, 等. 海口湾水体中多环芳(PAHs)浓度及来源研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(2): 102–105.
Zhang Xianyong, Wang Yi, Yang Bao, et al. Distribution and sources of PAHs in Haikou Bay[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(2): 102–105.(in Chinese)
- [19] 胡雄星, 周亚康, 韩中豪, 等. 黄浦江表层沉积物中多环芳烃分布特征及来源[J]. 环境化学, 2005, 24(6): 703–706.
Hu Xiongxing, Zhou Yakang, Han Zhonghao, et al. Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediment of Huangpu River[J]. Environmental Chemistry, 2005, 24(6): 703–706.(in Chinese)
- [20] 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(S2): 1–5.
Luo Guyuan, Zhu Hong, Xu Xiaoyi, et al. Sorption behaviors of polycyclic aromatic hydrocarbon on surface sediment in Chongqing section of the Yangtze River[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(S2): 1–5.(in Chinese)
- [21] 王平, 徐建, 郭炜锋, 等. 黄河兰州段水环境中多环芳烃污染初步研究[J]. 中国环境监测, 2007, 23(3): 48–51.
Wang Ping, Xu Jian, Guo Weifeng, et al. Preliminary study on PAHs in aquatic environment at Lanzhou Reach of Yellow River[J]. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(3): 48–51.(in Chinese)
- [22] 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 Nannan, Chen Peng, Zhu Shuzhen, 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.(in Chinese)
- [23] 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.
Yuan Xunyun, Li Amei, Wang Yu, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Taihu Lake and their toxicity evaluation[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2004, 32(6): 607–610.(in Chinese)
- [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.
Chen Weifeng, Ni Jinzhi, Yang Hongyu, 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.(in Chinese)
- [25] 罗雪梅, 刘昌明, 何孟常, 等. 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): 48–65.
Luo Xuemei, Liu Changming, He Mengchang, et al. Distribution and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment from the Yellow River [J]. Research of Environmental Science, 2005, 18(2): 48–65.(in Chinese)
- [26] 贺勇, 严家平. 淮河中下游底泥中 PAHs 的分布及生态风险评估[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 949–953.
He Yong, Yan Jiaping. Distribution and ecological risk assessment of PAHs in sediments from Huaihe River [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(5): 949–953.(in Chinese)
- [27] 郭建阳, 廖海清, 韩梅, 等. 密云水库沉积物中多环芳烃的垂直分布、来源及生态风险评估[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 626–631.
Guo Jianyang, Liao Haiqing, Han Mei, et al. Temporal distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment core from Miyun Reservoir [J]. Environmental Science, 2010, 31(3): 626–631.(in Chinese)
- [28] 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 Shifeng, Jiang Xin, Wang Liansheng, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollutants in sediments of the Yangtze River and Liaohe River [J]. China Environmental Science, 2000, 20(2): 128–131.(in Chinese)
- [29] 杨敏, 倪余文, 苏凡, 等. 辽河沉积物中多环芳烃的污染水平与特征[J]. 环境化学, 2007, 26(2): 217–220.
Yang Min, Ni Yuwen, Su Fan, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of

- Liaoh River, China[J]. Environmental Chemistry, 2007, 26(2):217-220.(in Chinese)
- [30] 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.
- Hu Guocheng, Guo Jianyang, Luo Xiaojun, et al. Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Baiyangdian Lake[J]. Research of Environmental Science, 2009, 22(3): 321-326.(in Chinese)
- [31] 广东省国民经济和社会发展十一五规划纲[R].
The Fifteenth Guiding Principle of National Economy and Society Development in Guangdong Province[R].(in Chinese)
- [32] 吴年积.浅谈潭江流域开平河段水污染控制规划[J]. 水利科技与经济, 2003, 9(3):194-197.
- Wu Nianji. Brief introduction to water contamination control planning in Kaiping reach of Tanjiang River basin[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2003, 9(3):194-197.(in Chinese)
- [33] 陈志良,李嘉熹.潭江流域水资源开发与保护对策[J]. 水资源保护,2004,20(3):19-22.
- Chen Zhiliang, Li Jiaxi. Measures for development and protection of water resources in Tanjiang River basin[J]. Water Resources Protection, 2004,20(3):19-22.(in Chinese)
- [34] Colombo J C, Pelletier E, Brouchu C, et al. Determination of hydrocarbon sources using n-alkane and PAHs distribution indexes. Case study: Rio de la Plata Estuary, Argentina [J]. Environ Sci Technol, 1989, 23:888-894.
- [35] 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.
- [36] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicator of PAH source and composition[J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(4): 489-515.
- [37] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects with range of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. Environmental Management, 1995,19(1):81-97.

~~~~~

(上接第 148 页)

- [12] 代嫣然,梁威,吴振斌. 低碳高氮废水的人工湿地脱氮研究进展[J]. 农业环境科学学报 2010 29(S) 305-309.
- Dai Yanran, Liang Wei, Wu Zhenbin. Research advances of constructed wetlands for nitrogen removal of wastewater with high nitrogen and low carbon contents[J]. Journal of Agro-environment Science, 2010, 29(S) 305-309.(in Chinese)
- [13] 修海峰. 不同季节潜流与表流人工湿地氨氮去除动力学对比研究[J]. 吉林农业 2011(8) :70-72.
- Xiu Haifeng. Comparison study of removing ammonia nitrogen dynamic between subsurface flow and surface flow constructed wetland[J]. Jilin Agricultural, 2011(8) :70-72. (in Chinese)
- [14] Huang J, J R R, B R. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater[J]. Wat Res, 2000, 34(9) 2582-2588.
- [15] Kadlec H R. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design [J]. Water Sci Technol, 1997, 35(5) :149-156.
- [16] 付玉玲. 水平潜流人工湿地根际微生物多样性研究[M]. 南京: 南京大学 2005, 1.
- Fu Yuling. Study on the Diversity of Rhizospheric Microorganism in Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland [M]. Nanjing: Nanjing University 2005, 1.(in Chinese)
- [17] 王小晓,鲍建国,龚珞军,等. 潜流人工湿地处理农村生活污水动力学研究[J]. 环境科学与技术 2013 36(3) :111-115.
- Wang Xiaoxiao, Bao Jianguo, Gong Luojun et al. Kinetics of rural sewage treatment by constructed wetland[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(3) :111-115.(in Chinese)