

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20151014005

曾祥英, 刘静, 何丽雄, 等. 太湖西部入湖口沉积物中有机物分布及其潜在指示意义[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 465-472

Zeng X Y, Liu J, He L X, et al. Occurrence of organic pollutants in sediments from several river mouths in western part of Taihu Lake and their potential environmental significance [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(2): 465-472 (in Chinese)

## 太湖西部入湖口沉积物中有机物分布及其潜在指示意义

曾祥英<sup>1,\*</sup>, 刘静<sup>1,2</sup>, 何丽雄<sup>3</sup>, 刘志阳<sup>4</sup>, 于志强<sup>1</sup>, 盛国英<sup>1</sup>, 傅家谟<sup>1</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 广州禾信分析仪器有限公司, 广州 510530

4. 广东省环境科学研究院大气环境研究所, 广州 510045

收稿日期: 2015-10-14 录用日期: 2015-11-16

**摘要:** 太湖作为重要的工农业用水水源以及周边居民饮用水源, 其水质安全受到高度关注。在太湖西部入湖口采集 7 个沉积物样品, 研究了合成麝香、多环芳烃(PAHs)、有机磷酸酯阻燃剂/增塑剂(OPs)和有机氯农药(OCPs)含量水平和分布规律。研究结果表明, 沉积物中多种污染物分布广泛, 含量水平差异较大。其中  $\Sigma 15\text{PAHs}$  含量  $371 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 2.53 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 主要来源于生物质燃烧和化石燃料高温裂解; 沉积物中检出 4 种多环麝香, 主要组分为佳乐麝香(HHCB)( $0.0792 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和吐纳麝香(AHTN)( $0.123 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.29 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 它们指示了太湖水体已遭受一定程度生活污水输入影响; 沉积物中  $\Sigma 6\text{OPs}$  含量范围为  $1.63 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 21.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , 主要污染组分为磷酸三(2-氯丙基)酯(TCPP)和磷酸三(2-氯乙基)酯(TCEP), 并呈现明显的点源排放特征; 沉积物中六六六系列(HCHs)( $0.310 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.11 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和滴滴涕系列(DDTs)( $0.551 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 6.40 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )主要来源于历史残留。位于太湖流域的几个入湖口沉积物中多种污染物含量多高于浙江省辖区 3 个入湖口沉积物。

**关键词:** 太湖; 沉积物; 合成麝香; PAHs; 有机磷酸酯; 有机氯农药

文章编号: 1673-5897(2016)2-465-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Occurrence of Organic Pollutants in Sediments from Several River Mouths in Western Part of Taihu Lake and Their Potential Environmental Significance

Zeng Xiangying<sup>1,\*</sup>, Liu Jing<sup>1,2</sup>, He Lixiong<sup>3</sup>, Liu Zhiyang<sup>4</sup>, Yu Zhiqiang<sup>1</sup>, Sheng Guoying<sup>1</sup>, Fu Jiamo<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Guangzhou Hixin Analytical Instrument Co Ltd, Guangzhou 510530, China

4. Institute of Atmospheric Environment, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China

Received 14 October 2015 accepted 16 November 2015

**Abstract:** Water quality of Taihu Lake, serving as industrial and agricultural use as well as drinking water resource for inhabitants surrounding Taihu Lake, is of great concern. Seven sediments from the Western part of Taihu Lake

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41373107); 广东省科技计划项目(2014B030301060)

作者简介: 曾祥英(1968-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为环境毒害污染物及其风险评估, E-mail: zengxy@gig.ac.cn

adjacent to several river mouths were collected and analyzed for their occurrence and concentrations of four groups of organic pollutants, including synthetic musks, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organophosphate esters (OPs) and organochlorine pesticides (OCPs). Most of the targeted compounds were frequently detected in sediments with concentrations varying significantly. Levels of  $\Sigma 15\text{PAHs}$  were in the range of  $371 \text{ n}\cdot\text{g}^{-1} \sim 2.53 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , which were originated mainly from biomass burning and fuel pyrolysis. Four synthetic musks were detected with HHCB ( $0.0792 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.17 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) and AHTN ( $0.123 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.29 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ) as main components, which indicated that surface water in the Taihu Lake was polluted by domestic sewage. Six OPs analytes were measured at concentrations ranged from  $1.63 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $21.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , with TCPP and TCEP as dominant ones. Meanwhile, OCPs were found in all the sediments, with the concentrations of DDTs and HCHs varied in the range of  $0.551 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 6.40 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$  and  $0.310 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.11 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively. The results indicated that concentrations of these pollutants in sediments adjacent to Taige Canal were higher than those located in Zhejiang Province.

**Keywords:** Taihu Lake; sediments; synthetic musks; PAHs; OPs; OCPs

太湖是我国第三大淡水湖泊,位于长江三角洲下游平原。太湖水面面积  $2\,338 \text{ km}^2$ ,流域面积  $36\,500 \text{ km}^2$ ,地跨浙、苏、皖、沪三省一市,是我国经济最为发达的地区之一,人类活动影响显著。太湖流域河网密布,水量丰沛,是该地区主要淡水资源,也是周边城市重要的饮用水水源。随着流域内工农业生产废水以及生活污水的排放,太湖水质日益恶化,已经形成水质性缺水,成为制约当地经济发展的一个重要因素。国家和当地政府部门都十分关注太湖流域水体污染控制和消减,实施了一系列的专项治理行动,但尚未完全遏制住水体污染的恶化趋势。科研人员对太湖污染也极为关注,主要的研究多集中于 N、P、COD 等污染及其引发的富营养化问题<sup>[1-4]</sup>。近年的研究表明,受人类活动影响,太湖沉积物中广泛检出多环芳烃(PAHs)<sup>[5]</sup>、多溴联苯醚(PBDEs)<sup>[6]</sup>、有机氯农药(OCPs)<sup>[7]</sup>、内分泌干扰素(EDCs)<sup>[8]</sup>以及新型污染物如有机磷酸酯阻燃剂(OPs)<sup>[9]</sup>等有机污染物的分布,其主要输入来源包括河流输入、大气沉降以及地下水渗入等。研究人员基于大量的巡测数据统计,发现入湖河流输入是太湖水体中氨氮、总磷、总氮和高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )的重要输入源,湖区水体中污染物水平与入湖河流含量呈现明显的正相关;污染物进入湖区后,在太湖中有明显的滞留<sup>[1-3]</sup>。但是针对传统持久性有机污染物(POPs)以及新兴污染物的输入研究目前相对较少,有机污染物的输入是否存在类似的输入规律,目前未见公开报道。

本研究选择太湖西部7个主要入湖口,包括太滬港(TG)、殷村港(YC)、社渚港(ShD)、大浦港(DP)、长兴港(CX)、小梅港(XM)和长兜港(CD),分别采集表层沉

积物样品,研究 PAHs、合成麝香、OCPs 和 OPs 含量水平与分布特征,并在此基础上初步评估不同河流的主要污染物、输入特征及其潜在的污染来源。

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 仪器、材料与试剂

16种美国EPA优控PAHs及5种回收率指示物氘代多环芳烃购自Supelco公司(美国);7种OCPs标准品包括六六六系列( $\alpha$ -HCH、 $\beta$ -HCH、 $\gamma$ -HCH、 $\delta$ -HCH)和滴滴涕系列( $p$ 、 $p'$ -DDT、 $p$ 、 $p'$ -DDD、 $p$ 、 $p'$ -DDE)购自Supelco公司(美国);9种合成麝香标准品购自Promochem公司(德国),包括开许梅龙(DPMI)、萨利麝香(ADBI)、粉檀麝香(AHMI)、特拉斯(ATII)、佳乐麝香(HHCB)、吐纳麝香(AHTN)、酮麝香(MK)、葵子麝香(MA)、二甲苯麝香(MX);6种OPs标样从美国Sigma-Aldrich公司购得,包括磷酸三丁酯(TBP)、磷酸三(2-氯乙基)酯(TCEP)、磷酸三(2-氯丙基)酯(TCPP)、磷酸三(1,3-二氯异丙基)酯(TDCPP)、磷酸三苯酯(TPhP)和磷酸三甲苯酯(TTP);回收率指示物氘代磷酸三丁酯( $d_{27}$ -TBP)购自C/D/N Isotopes公司(加拿大);内标六甲基苯(HMB)购自Ehrenstofer-Schäfer Bgm-Schlosser实验室(德国)。

所用溶剂均为色谱纯,其中乙酸乙酯、二氯甲烷、丙酮均购于CNW Technologies GmbH(德国),甲醇和正己烷购于德国Merck Co.公司。实验所用的超纯水来自厦门锐思捷科学仪器有限公司的实验室超纯水系统,使用前要求电阻率为  $18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 。

### 1.2 样品采集、前处理与仪器分析

2011年8月在图1所示的7个采样点,用不锈钢抓斗采集表层0~5cm沉积物,存放于铝箔袋并密封于密实袋中,运回实验室于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存至分析。

样品前处理采用本课题组建立的联合前处理方法<sup>[10]</sup>。在此简述如下:冻干后的样品除去砾石、树根等杂物,经玛瑙研钵研磨过60目筛,置于棕色瓶中保存。准确称取5g沉积物,加入回收率指示物,用二氯甲烷抽提72h,底瓶中加入活性铜片脱硫。样品抽提液浓缩后转换溶剂为正己烷,并经过硅胶/氧化铝净化,收集目标组分。各组分经旋转蒸发仪浓缩至约1mL,再在柔和氮气下浓缩至0.2mL,加入内标六甲基苯,待仪器分析。其中,合成麝香<sup>[11]</sup>和OPs<sup>[9]</sup>通过GC-MS完成分析,PAHs和OCPs则通过GC-MS/MS完成定性定量分析<sup>[12]</sup>,各目标化合物详细的仪器分析条件和定性定量分析参数请见课题组相关文献报道。

### 1.3 质量保证与质量控制

为减少干扰杂质对目标化合物的定性定量分析,在试验过程中实施严格的质量控制和质量保证措施。实验所用的玻璃器皿均经重铬酸钾/浓硫酸洗液处理,再依次用自来水和去离子水冲洗,烘干后于450℃马弗炉内灼烧4h,使用前再用甲醇、二氯甲烷和乙酸乙酯各荡洗3次。在每批次样品分析中加入方法空白、空白加标、基质加标和平行样,所有样品中均加入5种氘代多环芳烃和d<sub>27</sub>-TBP作为回收率指示物,用以控制样品处理中的损失与评估分析数据的准确性。由于萘挥发性较强,在本研究中未计算d8-Nap的回收率,d10-Dih、d10-Phe、d12-Chry和d12-Pery的回收率分别为76.2%±11.3%、94.4%±6.3%、65.9%±12.0%和67.8%±11.4%,d27-TBP的回收率为119.1%±2.8%。部分空白样品中检出低于检测限的Phe、HHCB、AHTN、TBP、TCEP和TCPP,其余化合物均未检出。

在仪器分析时,每天进实际样品前先测试标样,与前一天标样响应差别小于15%方可进行实际样品分析。各目标化合物仪器检测限(LOD)和定量限(LOQ)根据所使用仪器分别计算,其中合成麝香和OPs采用GC-MS完成定性定量分析,其LODs根据7次平行进样分析低浓度标准品(25.0ng·mL<sup>-1</sup>)的标准偏差(SD)计算所得,方法定量限LOQ则定义为两倍的LOD值<sup>[9]</sup>,研究结果显示各目标化合物仪器检测限在0.19ng·g<sup>-1</sup>~0.51ng·g<sup>-1</sup>范围。PAHs和OCPs经GC-MS/MS完成分析,LOD定义为5倍信噪比(S/N),LOQ定义为10倍信噪比,15种PAHsLOD为0.71~4.60pg·g<sup>-1</sup>,7种OCPs0.05~0.70pg·g<sup>-1</sup>。

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 沉积物中污染物含量水平

表1中列出了各采样点沉积物中各目标化合物含量与分布。在所有沉积物中,均检出萘分布(未列入表1)。由于萘挥发性较强,本研究未对萘进行定量分析。

#### 2.1.1 沉积物中PAHs分布

从表1中可以看出,所有采样点沉积物中均检出15种PAHs,但Σ15PAHs含量差别显著,含量水平范围为371ng·g<sup>-1</sup>~2.53×10<sup>3</sup>ng·g<sup>-1</sup>。其中,YC和TG2个采样点含量水平较高,较XM和CD高差不多一个数量级,与梅梁湾重污染区含量大致相当,较太湖东部南部湖区沉积物含量水平稍高<sup>[13]</sup>,高于国内大多数河流但低于珠江主干含量水平<sup>[5,13-16]</sup>。

在本研究中,我们也采用常见的诊断参数初步评估沉积物中PAHs主要来源。在这7个样品中,Ant/Ant+Phe比值范围为0.155~0.554,Flua/Flua+Pyr比值范围为0.501~0.576,Ind/Ind+BghiP比值为0.463~0.518。这些诊断参数表明,该区域沉积物中PAHs主要来源于生物质燃烧和化石原料的高温裂解<sup>[17]</sup>。结果与已有的文献报道结果一致<sup>[5,13,16]</sup>。

#### 2.1.2 沉积物中合成麝香分布

所有样品中均未检出DPMI、ATHI以及3种硝基麝香(MK、MA和MX),所有样品中均检出低于检测限的ADBI和AHMI,以及不同含量的HHCB(0.0792ng·g<sup>-1</sup>~1.17ng·g<sup>-1</sup>)和AHTN(0.123ng·g<sup>-1</sup>~1.29ng·g<sup>-1</sup>)。这与2009年太湖沉积物中含量水平大致相当,且西部主要入湖口YC和TG含量水平要高于东部及湖心沉积物含量水平<sup>[18]</sup>。研究结果还表明,HHCB和AHTN是沉积物中合成麝香的主要组分,这与当地香精香料的使用模式有关;该组成模式与珠三角和上海地区相似,但含量水平则差异显著。珠江主干流经人口稠密的广州市,大量生活污水直接/间接排放进入珠江水体,导致了珠江沉积物中高含量的HHCB(33.5ng·g<sup>-1</sup>~121ng·g<sup>-1</sup>)和AHTN(17.7ng·g<sup>-1</sup>~42.5ng·g<sup>-1</sup>);而西江流经大面积的农村地区,受居民生活影响较小,沉积物中HHCB(2.58ng·g<sup>-1</sup>~3.24ng·g<sup>-1</sup>)和AHTN(3.14ng·g<sup>-1</sup>~3.92ng·g<sup>-1</sup>)含量水平与本研究结果大致相当<sup>[11]</sup>。上海老城区人口密集,上百年来生活污水直接排放进入苏州河,沉积物中HHCB高达56.9ng·g<sup>-1</sup>~552ng·g<sup>-1</sup>,AHTN达到25.8ng·g<sup>-1</sup>~117ng·g<sup>-1</sup><sup>[19]</sup>。自2007年太湖蓝藻爆发后,太湖流域各级政府和太湖管理局

下大力气治理太湖污染,控制污水入湖<sup>[18]</sup>。太湖沉积物中合成麝香显著低于直接受到生活污水排放影响的珠江以及苏州河,说明当地政府截污入湖收效明显。

表1 太湖沉积物中有机污染物含量水平及分布特征

Table 1 Concentrations and distributions of organic pollutants in sediments of Taihu Lake

		CD	CX	XM	YC	TG	ShD	DP
Musks	DPMI	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	ADBI	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
	AHMI	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD	LOD
	ATII	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	HHCB	0.124	0.468	0.0792	1.17	1.03	0.269	0.196
	AHTN	0.196	0.424	0.123	1.29	1.25	0.192	0.188
	MK	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	MX	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	MA	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Total	0.320	0.892	0.202	2.46	2.28	0.461	0.384
PAHs	Acc	1.12	1.26	1.18	13.4	22.9	4.10	2.41
	Dih	0.978	2.87	0.819	9.39	13.1	3.69	3.06
	Flu	3.45	8.57	3.82	33.7	49.3	20.5	11.4
	Phe	26.5	89.4	26.2	240	236	130	78.6
	Ant	6.32	16.4	5.42	293	293	26.5	18.5
	Flua	56.6	263	47.9	355	341	290	194
	Pyr	55.6	245	47.7	304	315	213	160
	BaA	29.9	164	21.6	169	183	109	122
	chry	45.7	160	40.3	203	229	115	115
	BbF	95.1	298	57.9	269	288	169	197
	BkF	20.7	55.0	18.0	38.5	39.5	25.9	40.9
	BaP	39.9	220	28.3	180	181	51.5	164
	Ind	37.3	173	30.7	165	168	39.3	130
	BghiP	40.0	181	33.0	155	156	45.5	133
DiB	9.98	25.4	8.02	18.2	18.6	12.0	17.2	
Total	469	1.90 × 10 <sup>3</sup>	371	2.45 × 10 <sup>3</sup>	2.53 × 10 <sup>3</sup>	1.25 × 10 <sup>3</sup>	1.39 × 10 <sup>3</sup>	
OPs	TBP	0.566	0.703	0.512	3.72	3.39	0.977	0.706
	TCEP	1.20	0.698	LOD	2.32	1.68	6.10	2.42
	TCPP	1.45	LOD	0.706	7.78	1.84	4.22	3.89
	TDCPP	0.579	LOD	0.408	3.87	3.77	0.478	0.617
	TPhP	LOD	0.317	LOD	2.31	3.00	2.57	1.50
	TTP	LOD	0.531	LOD	1.92	1.74	0.703	0.534
	Total	3.80	2.25	1.63	21.9	15.4	15.0	9.67
OCPs	α-BHC	0.079	0.136	0.104	0.310	0.284	0.164	0.0682
	β-BHC	0.214	0.265	0.286	0.554	0.416	0.598	0.175
	γ-BHC	0.0294	0.0957	0.0393	0.0776	0.0593	0.0515	0.0174
	δ-BHC	0.0385	0.0909	0.0506	0.172	0.103	0.130	0.0494
	p,p'-DDE	0.565	0.653	0.729	2.38	1.54	5.44	0.331
	p,p'-DDD	0.268	0.445	0.287	1.46	0.807	0.543	0.145
	p,p'-DDT	0.176	0.180	0.172	1.69	0.484	0.412	0.0750
Total	1.37	1.87	1.67	6.64	3.69	7.34	0.861	

注: ND 表示未检出; LOD 表示低于检测限。

Note: ND, not detected; LOD, below the limits of detection.

### 2.1.3 沉积物中 OCPs 分布

所有沉积物中均检测出不同含量的 HCHs 和 DDTs,其中 HCHs 含量水平为  $0.310 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.11 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ , DDTs 含量为  $0.551 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 6.40 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。太湖沉积物中 HCHs 含量低于珠三角沉积物含量,与辽河沉积物以及 2009 年太湖其他湖区沉积物含量水平大致相当;而 DDTs 含量显著低于珠三角而与辽河沉积物相当,但要明显高于 2000 年监测结果<sup>[13,20-21]</sup>。

在研究区域 7 个沉积物样品中,β-HCH 是主要的 HCHs 异构体,含量范围为  $0.175 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 0.598 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,高值点出现在 ShD;所有样品中均检出较低含量的 γ-HCH( $0.0174 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 0.0957 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )。此外,沉积物中 α-HCH/γ-HCH 比值在 1.42 ~ 4.78,低于工业品 HCHs 中异构体比值(3 ~ 7),HCHs 也显著偏离工业林丹中异构体比值(γ-HCH 含量 > 99%)。我们由此可以推测,太湖西部沉积物中 HCHs 主要来源于历史残留,且部分异构体转化为了最稳定和最难降解的 β-HCH;同时还有一定量的林丹输入<sup>[13,20]</sup>。

所有样品中检出 p, p'-DDT( $0.0750 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.69 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )、p, p'-DDD( $0.145 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 1.46 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和 p, p'-DDE( $0.331 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 5.44 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),高值点出现在 YC 以及 ShD。一般来说,DDT 在厌氧环境下降解生成 DDD,在氧化条件下降解生成 DDE。在本研究中,我们发现 DDE 是 DDTs 的主要组分,同时 DDD/DDE 比值为 0.100 ~ 0.682,表明了研究区域沉积物中 DDT 有一定程度好氧生物降解;而样品的(DDD + DDE)/DDTs 比值均大于 0.5,表明沉积物中 DDTs 主要来源于历史残留,主要为入湖河流携带的农田土壤中残留,研究结果与此前文献报道结果一致<sup>[13,21]</sup>。

### 2.1.4 沉积物中 OPs 分布

各样品中均检出了 6 种 OPs 目标化合物,ΣOPs 含量为  $1.63 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 21.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (均值  $9.96 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),含量水平差异较为显著。YC、TG 和 ShD 3 个样品中 OPs 含量要高于太湖饮用水源地沉积物中 OPs 含量<sup>[9]</sup>和大伙房水库沉积物含量<sup>[22]</sup>,但低于部分珠三角水源地<sup>[23]</sup>和珠江沉积物<sup>[24]</sup>中 OPs 含量水平。

这 7 个样品中 OPs 各单体组成也不尽相同,大致来看 TCP(均值  $3.32 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和 TCEP(均值  $2.40 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )是主要污染物,分布规律与太湖水源地沉积物中 OPs 分布规律相异,与珠三角河流沉积物(包括珠三角水源地)和大伙房水库均不相同<sup>[9,22-24]</sup>,这可能与其在各地用途用量有关。

## 2.2 沉积物中污染物时空分布特征

总体而言,研究区域 7 个沉积物样品中几类化合物含量差异较大,且峰值出现在不同的采样点。图 1 示出了研究区域沉积物中合成麝香、PAHs、OPs 和 OCPs 的空间分布。

从图中可以看出,位于浙江省内的 3 个采样点(CD、CX 和 XM)除长兴港 PAHs 含量( $1.90 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )较高以外,其余几类污染物的含量均处于较低水平;高含量的目标污染物均出现在其余的采样点,例如:合成麝香和 OPs 最高值位于 YC(分别为  $2.46 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和  $21.9 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),其次为 TG(分别为  $2.28 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和  $15.4 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ );PAHs 高值点分别位于 TG( $2.53 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和 YC( $2.45 \times 10^3 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ );OCPs 高值点位于 ShD( $7.34 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和 YC( $6.64 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )。陈雷等<sup>[4]</sup>发现,殷村港、社渚港以及大浦港等河口沉积物中总磷、总氮以及总有机质累积明显,其主要为工业污染和农业污染,也是太湖水体中重要的污染输入来源。本研究中几种污染物的分布规律与陈雷等报道的河口沉积物中总有机质、总氮总磷分布规律相似。

太滬运河是贯通太湖和太湖的主要水力通道,是太湖的主要入湖河流之一,流经武进高新区和 2 个工业集中区,产业主要包括纺织、电镀、医药和化工生产等行业<sup>[25]</sup>;社渚港流域也分布大量的工业企业,包括电器机械、器械制造和压延加工等,工业废水是社渚港流域污染物的主要贡献者<sup>[26]</sup>;宜兴市大浦镇为宜兴市工业十强乡镇,沿河岸修建了化工企业 100 多家,主要包括石油助剂、生物制剂等,因此我们推测沉积物中高含量的 PAHs 和 OPs 可能主要来源于流域内的工业废水<sup>[17,27]</sup>。此外,随着经济的快速发展,太滬运河流域城市化进程加快,城镇生活污水对流域水体污染加剧<sup>[25]</sup>,虽然在严格污染排放管控措施之下<sup>[18]</sup>,作为生活污水的标志物,沉积物样品中 HHCb 和 AHTN 分布已经表明,依然有较大量的生活污水通过殷村港和太滬港输入太湖。太湖和长荡湖沿岸农业发达,化肥和农药用量高,农业面源污染明显,地表径流以及农田土壤改造是流域水体中 OCPs 的重要来源<sup>[25]</sup>。

尤其值得我们注意的是,ShD 样品中测得最高含量的 TCEP( $6.10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),YC 样品中检测出最高含量的 TCP( $7.78 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ )和 TDCPP( $3.87 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ),含量均高于太湖梅梁湾和贡湖沉积物<sup>[9]</sup>,也高于本次研究中其余采样点,呈现出明显的点源排放特征。此外,ShD 中 TCEP 含量已经与珠三角重污染区含量

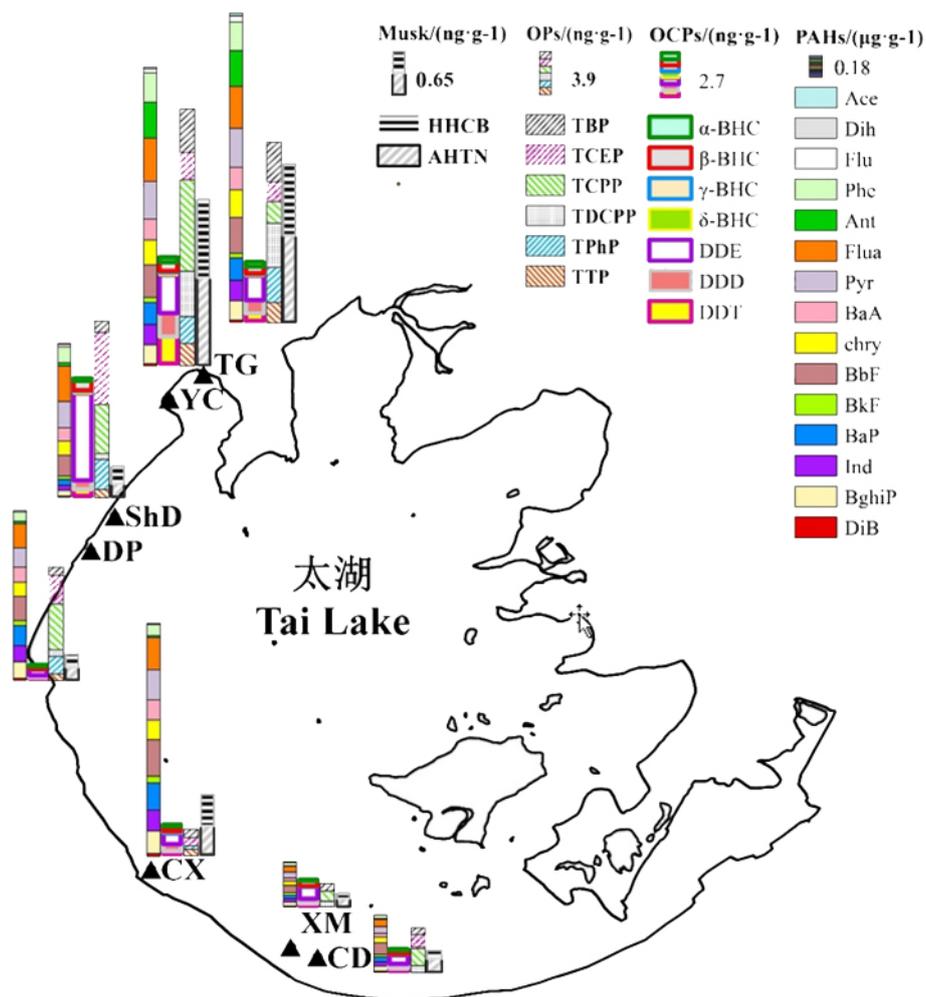


图 1 太湖污染物空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of organic pollutants in Taihu Lake

水平相当<sup>[23-24]</sup>。由于 TCEP 和 TCP 具有较高的水溶解度(分别为  $7\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1\ 100\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和亲水性( $\text{Log}K_{ow}$  分别为 1.44 和 2.59),这些难降解的含氯磷酸酯主要分布在水相中<sup>[28]</sup>。因此我们完全可以推测:大量含氯 OPs 随着入湖河流通过社渚港、太滬港、殷村港输入太湖。太湖作为周边居民的饮用水源,居民通过饮用水暴露 OPs 的潜在健康风险需要引起管理部门高度关注。

浙江省内环太湖河道主要包括苕溪水系、长兴水系和东部平原河流,其中苕溪水系流经湖州后主要通过长兜港以及小梅港进入太湖,而长兴水系则主要通过长兴港等进入太湖。就水文年度而言,浙江省内几乎所有环湖河流均为双向河道,入湖/出湖水量受各水系流域降雨影响,汛期主要以出湖为主。尤其是自 2002 年启动引江济太工程后,太湖水位升高导致了出湖流量明显增加。同时,太湖作为

浅水型湖泊,在风浪作用下沉积物易再悬浮,颗粒物随出湖河流输出。以 2009 年为例,太湖南部湖区与东部湖区出水通量相当,但是南部湖区(包括小梅港和长兜港)悬浮颗粒物占总出湖量的 80%,COD、总氮和总磷等污染物也以输出为主<sup>[1,3]</sup>。因此,我们推测疏水性较强的污染物也易随着颗粒物输出,这可能也是本研究中浙江省内 3 个采样点污染物相对较低的一个重要原因。

综上所述,太湖西部入湖口沉积物中多种污染物分布广泛,但含量水平差异较大。其中,PAHs 含量  $371\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 2.53 \times 10^3\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,诊断参数表明 PAHs 主要来源于生物质燃烧和化石燃料高温裂解。9 种合成麝香目标化合物仅检出 4 种多环麝香,主要组分为 HHCB 和 AHTN,它们指示了生活污水输入对太湖水体的潜在影响。所有样品中均检测出 OPs,总量范围为  $1.63\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1} \sim 21.9\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ,显著的高值点

显示出明显的点源排放特征。沉积物中检出一定含量的HCHs和DDTs,其中 $\beta$ -HCH是主要成分,诊断参数指示它们主要来源于历史残留。

从空间分布看,位于太湖流域的几个入湖口(YC、TG、ShD和DP)沉积物中多种污染物含量均较高;而浙江省辖区内环湖河道3个入湖口沉积物(CX、CD和XM)中含量均较低。太湖运河流域内工业发达,人口也较为密集,集水区工业废水和生活污水可能是PAHs、合成麝香以及OPs重要来源。苕溪水系多为双向河流,太湖高水位期间,风浪冲刷下颗粒物再悬浮并随出湖水流出,部分吸附于颗粒物上的有机污染物也随之流出太湖。

通讯作者简介:曾祥英(1968-),女,博士,副研究员,研究方向为环境毒害污染物及其风险评估。

#### 参考文献(References):

- [1] 燕姝雯,余辉,张璐璐,等. 2009年环太湖入出湖河流水流量及污染负荷通量[J]. 湖泊科学, 2011(6): 855-862  
Yan Z W, Yu H, Zhang L L, et al. Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009 [J]. Journal of Lake Sciences, 2011(6): 855-862 (in Chinese)
- [2] 马倩,冯昕. 河道入湖污染物量计算精度分析[J]. 湖泊科学, 2012(5): 663-666  
Ma Q, Feng X. Calculation precision of pollutant load of rivers [J]. Journal of Lake Sciences, 2012(5): 663-666 (in Chinese)
- [3] 何锡君,王贝,刘光裕,等. 2010-2011水文年浙江省环太湖河道水质水量及污染物通量[J]. 湖泊科学, 2012(5): 658-662  
He X J, Wang B, Liu G Y, et al. Water quality, quantity and pollutant fluxes variations of the rivers surrounding Lake Taihu in Zhejiang Province during hydrological year of 2010-2011 [J]. Journal of Lake Sciences, 2012(5): 658-662 (in Chinese)
- [4] 陈雷,远野,卢少勇,等. 环太湖主要入出湖口表层沉积物污染特征研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 294-299  
Chen L, Yuan Y, Lu S Y, et al. The analysis of pollutant characteristics in surface sediments of the stream inlets and outlets of the main rivers around Taihu Lake [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 294-299 (in Chinese)
- [5] Qiao M, Wang C, Huang S, et al. Composition, sources, and potential toxicological significance of PAHs in the surface sediments of the Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. Environment International, 2006, 32(1): 28-33
- [6] Qiu X, Zhu T, Hu J. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and other flame retardants in the atmosphere and water from Taihu Lake, East China [J]. Chemosphere, 2010, 80(10): 1207-1212
- [7] Zhao Z, Zhang L, Wu J, et al. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides in surface sediments and benthic organisms from Taihu Lake, China [J]. Chemosphere, 2009, 77(9): 1191-1198
- [8] Wang H, Wang C, Wu W, et al. Persistent organic pollutants in water and surface sediments of Taihu Lake, China and risk assessment [J]. Chemosphere, 2003, 50(4): 557-562
- [9] Cao S X, Zeng X Y, Song H, et al. Levels and distributions of organophosphate flame retardants and plasticizers in sediment from Taihu Lake, China [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, 31(7): 1478-1484
- [10] 何丽雄. 典型污水处理厂和河流沉积物中有机磷酸酯的分布与归趋的初步研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014: 20-26  
He L X. Preliminary study on the occurrence and fate of organophosphate esters in typical wastewater treatment plants and river sediment [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2014: 20-26 (in Chinese)
- [11] Zeng X Y, Mai B X, Sheng G Y, et al. Distribution of polycyclic musks in surface sediments from the Pearl River Delta and Macao coastal region, South China [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, 27(1): 18-23
- [12] 刘志阳. 武汉室内灰尘中典型持久性有机物的污染特征及人体暴露风险评估[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 22-25  
Liu Z Y. The pollution characteristics and health risk assessment of typical persistent organic pollutants in indoor dust in Wuhan [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2015: 22-25 (in Chinese)
- [13] 刘楠楠,陈鹏,朱淑贞,等. 辽河和太湖沉积物中PAHs和OCPs的分布特征与风险评估[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 (in Chinese)
- [14] 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 M, Huang S B, Zhu Y G, et al. Ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment s of Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(4): 456-463 (in Chinese)
- [15] 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
- [16] 陈燕燕, 尹颖, 王晓蓉, 等. 太湖表层沉积物中 PAHs 和 PCBs 的分布及风险评价[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 (in Chinese)
- [17] 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
- [18] Che J S, Yu R P, Song Q, et al. Determination of synthetic musks in the sediment of the Taihu Lake by using accelerated solvent extraction (ASE) and GC/MS [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2011, 91(4): 387-399
- [19] 曾祥英, 张晓岚, 钱光人, 等. 苏州河沉积物中多环麝香分布特点的初步研究[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(1): 180-184
- Zeng X Y, Zhang X L, Qian G R, et al. Preliminary study on the occurrence and distribution of polycyclic musks in sediments from Suzhou creek [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(1): 180-184 (in Chinese)
- [20] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧嫻, 等. 珠江三角洲河流及南海近海区域表层沉积物中有机氯农药含量及分布[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1272-1279
- Luo X J, Chen S J, Mai B X, et al. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in surface sediments in Pearl River Delta and its adjacent coastal areas of South China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1272-1279 (in Chinese)
- [21] 袁旭音, 王禹, 陈骏, 等. 太湖沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2003, 24(1): 121-125
- Yuan X Y, Wang Y, Chen J, et al. Organochlorine residues of sediments in Taihu Lake and its risk evaluation [J]. *Environmental Science*, 2003, 24(1): 121-125 (in Chinese)
- [22] 刘静, 曾祥英, 于志强, 等. 超声提取/固相萃取测定固体介质中合成麝香及有机磷酸酯阻燃剂/增塑剂[J]. *分析测试学报*, 2016, 35(1): 61-67
- Liu J, Zeng X Y, Yu Z Q, et al. Determination of synthetic musks and organophosphate flame retardants/plasticizers in solid phase by ultrasound-assisted extraction coupled with solid phase extraction [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2016, 35(1): 61-67 (in Chinese)
- [23] 曹曙霞. 典型环境中有机磷酸酯阻燃剂和增塑剂的污染现状初步研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 71-72
- Cao S X. Preliminary study on the levels and distribution of organophosphate flame retardants and plasticizers in typical environments [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2012: 71-72 (in Chinese)
- [24] 阮伟, 谭晓欣, 罗孝俊, 等. 东江表层沉积物中的有机磷系阻燃剂[J]. *中国环境科学*, 2014(9): 2394-2400
- Ruan W, Tan X X, Luo X J, et al. Organophosphorus flame retardants in surface sediments from Dongjiang River [J]. *China Environmental Science*, 2014(9): 2394-2400 (in Chinese)
- [25] 张文艺, 韩有法, 陆丽巧, 等. 太漏运河流域水环境污染解析[J]. *中国农村水利水电*, 2012(9): 47-50
- Zhang W Y, Han Y F, Lu L Q, et al. An analysis of water environmental pollution in the Taige Canal Watershed [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(9): 47-50 (in Chinese)
- [26] 赵小凤, 黄贤金. 产业结构演变的流域水环境响应研究—以社渚港流域为例[J]. *环境污染与控制*, 2010, 32(1): 9-13, 19
- Zhao X F, Huang X J. Response of water environment to industrial structure evolution: A case in Shedu River Basin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2010, 32(1): 9-13, 19 (in Chinese)
- [27] 田自强, 韩梅, 张雷. 西太湖河网区恢复与退化河岸带湿地生态及水环境功能比较[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2812-2822
- Tian Z Q, Han M, Zhang L. The comparison of ecological and environmental functions of restored and degraded riparian wetlands in the reiform fluvial region of West Taihu Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2812-2822 (in Chinese)
- [28] Zeng X Y, He L X, Cao S X, et al. Occurrence and distribution of organophosphate flame retardants/plasticizers in wastewater treatment plant sludges from the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, 33(8): 1720-1725