

西溪湿地底泥质量现状与生态风险初步评价

申秀英¹, 潘腊青², 许惠英^{3*}, 童国璋⁴

(1.浙江科技学院生物与化学工程学院, 浙江 杭州 310023; 2.杭州市环境监测中心站, 浙江 杭州 310007; 3.浙江树人大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310015; 4.浙江省环境监测中心, 浙江 杭州 310015)

摘要:为了解西溪湿地底泥质量现状, 2012年9月采集保护区内不同干扰类型的底泥样本, 测试了底泥中重金属和 POPs 中 PCBs、OCPs 和 PAHs 的含量, 并对湿地底泥污染进行了生态风险初步评价。结果表明, 底泥中未检出 PCBs 和 OCPs, 但检测出 14 种 EPA 优控 PAHs, 总 PAHs 的浓度范围为 115.9~217.8 ng·g⁻¹, 低于潜在生态风险的效应区间低值 ERL, 其中列入中国“水中优先控制污染黑名单”的 7 种 PAHs 均有检出并且其总量占 Σ PAHs 1/2 左右(平均为 50.08%); 底泥中 8 种重金属含量平均值低于《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的二级标准, 但 Hg、Zn、Pb、Ni 含量在多个位点已超过一级标准; 分别采用土壤背景值和国家一级标准为参比值对湿地底泥中重金属进行单因子污染风险指数评价, 发现分别有 7 种和 4 种元素的污染指数大于 1; 综合分析不同干扰类型的底泥质量, 发现底泥疏浚能有效降低有机质含量、全氮和 PAHs 含量, 但对全磷、重金属含量则无明显效果, 封闭水体的干塘措施能显著减少污泥量和有机物含量。研究结果表明, 西溪湿地底泥中高环 PAHs 和重金属污染水平可能对西溪湿地生物具有潜在的生物毒性作用及不利的生态影响效应, 其疏浚底泥农用则无生态风险。

关键词:西溪湿地; 重金属; 持久性有机污染物; 风险评价

中图分类号: X820.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2013)06-0053-05

The Quality Status and Preliminary Ecological Risk Assessment of Sediments of Xixi Wetland, China

SHEN Xiu-ying¹, PAN La-qing², XU Hui-ying^{3*}, TONG Guo-zhang⁴

(1. School of Biology and Chemistry, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 2. Hangzhou Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310007, China; 3. College of Biology & Environment Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China; 4. Zhejiang Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310015, China)

Abstract: To understand the quality status of Xixi wetland sediments, sediment samples of different interference type were collected in protection zones in September 2012, the contents of heavy metals, PCBs, PAHs and OCPs in sediment were tested, and the ecological risk of wetland's sediments was preliminarily assessed. The results showed that PCBs and OCPs were not detected in sediments, but 14 priority PAHs from USEPA were detected. Total PAHs concentration was in the range of 115.9 ~ 217.8 ng·g⁻¹, which was under the effects range low (ERL) of potential ecological risk. Among them, total concentration of 7 PAHs blacklisted priority pollutants in China's water was half of the total amount for 14 PAHs (average 50.08%). Although the average content of 8 heavy metals in sediments was lower than the secondary standard of Soil Environment Quality Standard (GB 15618—1995), the Hg, Zn, Pb, and Ni contents had been exceeded first standard in more than one sampling site. Using soil background values and national first standards as reference values, ecological risk of heavy metals in wetland sediments was preliminarily assessed by single factor pollution index method. It was found that pollution index of seven and four heavy metals were greater than 1, respectively. By comprehensive analysis to qualities of various interference type sediments, it had been showed that sediment dredging could effectively reduce the contents of organic matter, total nitrogen and PAHs, but the contents of total phosphorus and heavy

收稿日期: 2013-07-12

基金项目: 浙江省环保科研计划项目(2011A23); 浙江省公益性技术应用研究(分析测试)计划项目(2013C37098)

作者简介: 申秀英(1965—), 女, 浙江金华人, 硕士, 教授, 研究方向为污染生态学。E-mail: sxying01@163.com

* 通信作者: 许惠英 E-mail: xuhy65@163.com

metals had no obvious effect. The dry pond measures of the closed aquifer could significantly reduce the amount of sludge and contents of organic compound in sediments. The results also showed that the pollution levels of high ring PAHs and heavy metals in the Xixi wetland's sediments might have potential biological toxicity and adverse ecological effect to wetland's living things, but there was no ecological risk by using the dredged sediment as farming.

Keywords: Xixi wetland; heavy metal; POPs; risk assessment

沉积物是底栖生物的栖息地和水生植物生长的重要场所,也是水体中营养物、重金属、持久性有机污染物(POPs)的汇和源,在外源得到有效控制的情况下,滞留在沉积物中的污染物随水流、生物扰动等生物或物理因子作用可重新进入上覆水中,仍有可能导致水体在相当长的时期内维持水体质量的不良状态^[1]。由于持久性有毒污染物(重金属、POPs)对生态环境的巨大危害,它在水体沉积物中的状况及对人类及生态系统的影响已受到国内外研究者的广泛关注^[2-3]。

湿地是分布于陆地系统和水体系统之间的过渡生态系统,具有特殊的生态过程和功能,由于人类活动的干扰,我国湿地正遭受不同程度的污染^[3]。西溪湿地是目前国内唯一的集城市湿地、农耕湿地、文化湿地于一体的国家湿地公园,由于地处城市边缘,受工业化和城市化影响深,加上长期的高强度农业开发利用,导致西溪湿地退化污染严重,水质一度达到劣 V 类。2003 年杭州市政府启动了西溪湿地综合保护工程,开展了多项湿地保护项目,在湿地内设置了生态保护区和生态恢复区,生态环境质量逐步好转^[4]。

近年来,对西溪湿地的环境质量已经开展了较多研究^[4-6],但关于湿地沉积物持久性有毒污染物(重金属、POPs)综合污染水平特别是结合水体不同干扰类型的底泥质量现状还少见报道。本文以西溪湿地生态保护区为研究区域,采集不同人为干扰类型的底泥样品,综合分析底泥中主要 POPs 中多氯联苯(PCBs)、有机氯农药(OCPs)、多环芳烃(PAHs)以及重金属的污染水平,并对其生态风险进行初步评价,为全面了解湿地生态环境质量现状和实施有效的保护措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理

根据湿地水系分布及水体干扰类型(河道——通航、不通航;封闭池塘——封闭、半封闭,干塘、未干塘)、底泥沉积干扰类型(深层疏浚、未疏浚)共布置 6 个调查样点(表 1)。底泥样品采集依据国家环境保护行业标准《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—

表 1 西溪湿地采样点概况

采样点编号	水体干扰类型	沉积过程干扰类型
1#	封闭水体	2011 年干塘
2#	河道,不通航(偶有工作小船通过)	未疏浚
3#	半封闭水体(与河道相通)	无
4#	主河道,通航(引钱塘江水)	2011 年疏浚过
5#	封闭水体	未干塘
6#	小支流,水位浅,周围是抛荒地(农田)	无

2002)进行^[7]。利用 Beeker 型底泥原状采样器采集样品,采样点避开河床冲刷、沉积不稳定及水草茂盛、表层易受搅动之处。采样时间为 2012 年 9 月。

样品采集后以聚乙烯塑料袋密封保存,并作好记录及时运回实验室。底泥样品一部分冷冻干燥(用于测 POPs),另一部分室温风干,干燥后样品磨细,全部过 100 目筛,分别装瓶保存,待测。

1.2 分析指标及方法

分析方法:底泥的地球化学指标(有机质含量、pH 值、全氮、全磷、阳离子交换量等)参考《土壤农业化学分析方法》^[8]进行分析;总汞测定(冷原子荧光法)参考《土壤元素的近代分析方法》^[9];总砷(原子荧光法,GB/T 221052—2008),总镉(火焰原子吸收分光光度法,GB/T 17138—1997),铬、铜、镍、镉、铅(电感耦合等离子体-质谱法,US EPA 200.8—1994),多氯联苯(气相色谱法,US EPA 8082A—2000),有机氯农药(气相色谱法,US EPA 8081B—2007),多环芳烃(液相色谱法,EPA 8310)参照中国或美国标准方法测定。

分析指标:多氯联苯测定了 PCB-28、PCB-52、PCB-101、PCB-77、PCB-81、PCB-153、PCB-123、PCB-118、PCB-114、PCB-138、PCB-105、PCB-126、PCB-167、PCB-156、PCB-157、PCB-180、PCB-169、PCB-189 等 18 个指标;有机氯农药测定了 α -六六六、 β -六六六、 γ -六六六、 δ -六六六、六氯苯、七氯、环氧七氯、 α -氯丹、 γ -氯丹、硫丹 I、硫丹 II、硫丹硫酸酯、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、异狄氏剂醛、异狄氏剂酮、o,p'-滴滴涕、p,p'-滴滴涕、p,p'-滴滴涕、p,p'-滴滴涕、甲氧滴滴涕、灭蚊灵等 23 种物质的浓度;多环芳烃(PAHs)

则测定了 EPA 规定的 16 种优先控制污染物(具体种类见表 2)。

重金属标样由国家环保部标样所提供,各 POPs 混合标样为 Accustandard 公司产品,主要试剂正己烷、丙酮等,均为色谱纯。

1.3 主要仪器

QM 201 荧光测汞仪、AFS-9130 原子荧光光度计、PE AAnalyst 800 型原子吸收分光光度计、电感耦合等离子体-质谱仪 XSeries II ICP-MS(X0726)、气相色谱仪 Agilent 6890 NGC、液相色谱仪LCK04SM4877。

2 结果与讨论

2.1 底泥土质特征研究

从各底泥样品的外观看,除 4 号点样品为黄灰色外,其余各样点底泥外观均为深灰色,这可能与 4 号样点位于主河道,曾疏浚(2011 年)并引水钱塘江有关。从味觉看,除 4 号样品外,其余样品均有不同程度臭味,尤以 5 号为重,这与 5 号为封闭水体,多年未曾清淤,也未曾干塘有关。各样点底泥的地球化学指标分析结果见表 3。

从表 3 可见,清淤过的 4 号水体,其底泥有机质含量、全氮含量明显低于其他样点,只有未清淤 2 号河道样点的 36.3%、57.2%,但全磷含量仍保持较高水

表 3 西溪湿地底泥地球化学指标

土样编号	全磷 / g·kg ⁻¹	pH 值	有机质含量/ g·kg ⁻¹	阳离子交换量/ cmol(+)·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹
1	1.316	7.18	0.139	13.39	1.21
2	0.972	6.17	0.157	13.20	1.17
3	0.852	5.58	0.193	9.96	1.27
4	0.966	7.50	0.057	14.56	0.67
5	0.504	6.44	0.241	12.57	1.47
6	0.246	5.96	0.146	9.65	0.89

平,这可能与引入的水质有关。同是未清淤过的封闭水体,干塘过的 1 号水体,其底泥厚度只有 5 号水体的 1/4~1/3,有机质含量只有 57.7%,全氮含量相近,但全磷含量是后者的 2.61 倍,说明对于封闭水体,干塘措施能有效减少底泥有机质和污泥量,但对氮、磷含量基本无作用。

2.2 底泥持久性有机污染物

2.2.1 底泥持久性有机污染物含量水平

对底泥中的持久性有机污染物多氯联苯(PCBs)、有机氯农药(OCPs)和多环芳烃(PAHs)的含量水平进行了检测。所测的 18 种 PCBs 和 23 种 OCPs 指标在各样点均未检出(<0.50 ng·g⁻¹)。PAHs 情况则不同,在各样点除 Acy、Ace 未检出外(<5 ng·g⁻¹),BaA、DBA、BgP 部分检出,其余 11 种主要化合物均 100% 检出,总 PAHs 的浓度范围为 115.9~217.8 ng·g⁻¹,接近钱塘江杭州段(62.6~226.2 ng·g⁻¹)^[10],但低于太湖(264.9~1 703.2 ng·g⁻¹)^[11]、西湖(449.5~881.2 ng·g⁻¹)^[12]。西溪湿地底泥 PAHs 的检测结果见表 2。

从表 2 可见,1 号、2 号、3 号、5 号样点的 PAHs 总量水平接近,平均为 205.1 ng·kg⁻¹,但 4 号、6 号样点浓度明显低于其他 4 个样点,特别是 4 号的 ΣPAHs 只有其平均水平的 56.5%,说明底泥疏浚能有效降低 PAHs 含量,干塘措施及水流状态对 PAHs 含量基本无影响。6 号样点 ΣPAHs 较低,可能与其常年水位浅、底泥供氧较丰富有利于降解有关^[13]。

2.2.2 底泥持久性有机污染物生态风险评价

本次 6 个采样点样品均未检测到 PCBs、OCPs,表明研究区域内的湿地底泥已不存在 PCBs、OCPs 污染风险。这与黄芳等^[5]从西溪湿地中检测出低浓度的 DDTs、HCHs 的报道不同,这可能与他们的采样点是河口底泥有关。

目前,我国仍未制定沉积物中 PAHs 的环境标准,国内报道^[10-11,14]通常采用 Long 等^[15]提出的方法,即潜在生态风险的效应区间低值(Effects Range Low,

表 2 西溪湿地底泥 PAHs 含量 (ng·g⁻¹)

PAHs	底泥中 PAHs 含量						沉积物毒性指标	
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	ERL	ERM
NaP*	24.6	27.6	20.8	15	25.1	42.4	160	2 100
Acy	ND	ND	ND	ND	ND	ND	44	640
Ace	ND	ND	ND	ND	ND	ND	16	500
Flu	8.3	10.1	12.7	7.3	12.2	8.2	19	540
Phe	63.2	51.9	35.8	45.1	45.1	25.8	240	1 500
Ant	1.8	1.7	2.8	1.5	3.2	1.8	85	1 100
Fla*	23.1	24.9	25.8	10.1	27.1	13.9	600	5 100
Pyr	19.5	15.3	23.8	9.1	29.6	15.5	665	2 600
BaA	6.1	9.5	ND	ND	ND	ND	261	1 600
Chr	10.8	8.9	6.9	3.3	8	6.7	384	2 800
BbF*	17.5	13.7	21	7.1	18.9	14.8	—	—
BkF*	6	6.8	15.2	2.3	19.5	3.8	—	—
BaP*	9.8	7.9	2.4	3.6	2.8	5.3	430	1 600
DBA	3	3.4	18.5	ND	7.3	ND	63.4	260
BgP*	12.1	ND	ND	5.9	ND	7.2	—	—
IcP*	12	12.8	11.6	5.6	12	7.5	—	—
ΣPAHs	217.8	194.5	197.3	115.9	210.8	152.9	4 022	44 792

注:ND 为未检出,* 为列入中国“水中优先控制污染黑名单”多环芳烃。

ERL)和效应区间中值(Effects Range Mediam,ERM)法来评估水体沉积物中 PAHs 的生态风险。ERL 和 ERM 的值分别定义为某一类化合物对生物极少产生和经常产生负效应的含量指标,当污染物含量大于 ERM,则产生严重的生态风险;当污染物含量在二者之间,则具有潜在的生态风险;当污染物含量小于 ERL,则不产生负面生态风险,评价时除比较沉积物中 PAHs 总质量分数之外,还应看单一种类的 PAHs 质量分数。从表 2 可见,各采样点总 PAHs 含量(115.9~217.8 ng·g⁻¹)远低于潜在生态风险的效应区间低值 ERL 4 022 ng·g⁻¹,单一种类的 PAHs 也远低于 ERL 值,表明该区域底泥的 PAHs 生态风险水平较低。

值得注意的是,列入中国“水中优先控制污染黑名单”的 7 种 PAHs,除 BgP 部分检出外,其余均 100%检出,并且这 7 种 PAHs 的总量占 Σ PAHs 1/2 左右(平均为 50.08%)。另外,根据 Long 等^[15]的研究,BbF、BkF、BgP、IcP 等没有最低安全值,也就是指这几种 PAHs 只要存在,就会对生物具有毒副作用。在本次调查中发现各样点底泥中,这些化合物均有不同程度的检出,表明沉积物中高环 PAHs 对西溪湿地生物具有潜在的生物毒性作用及不利的生态影响效应,应当引起有关部门注意。

2.3 西溪湿地底泥重金属

2.3.1 西溪湿地底泥重金属含量

西溪湿地底泥重金属含量检测结果见表 4。从表 4 可见,除砷外,底泥中其余 7 种元素含量均超当地土壤背景值^[16],Hg、Zn、Pb 3 种元素含量在多个位点已超过《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)一级标准,2 号、5 号点的 Ni 含量水平甚至超过二级标准。不同干扰类型的底泥重金属含量没有显著差异,在疏浚河道(4 号)和未疏浚(2 号)底泥中除 Cd、Ni 含量有显著降低外,其余各元素含量差别不大;干塘封闭水体(1 号)与未干塘封闭水体(5 号)除 As、Zn、Cr 含量有较大提高外,其余元素含量也无较大变化。但是,在监测的 8 种重金属中,As、Cd、Hg、Ni 含量在各样点间变异系数较大,说明这几种元素空间变异性大^[17]。

2.3.2 底泥重金属污染生态风险评价

采用单因子污染指数^[17-18]对西溪湿地底泥中重金属的污染程度进行评价。

该方法计算公式为: $P_i=C_i/S_i$

式中: P_i 为某一污染物的污染指数; C_i 为沉积物中污染物的实测浓度; S_i 为计算所需的参比值或者标准,

由于国内外尚无统一的标准,本文采用浙江省土壤背景值(表土)^[16]和国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)为参比值。 $P_i>1$ 表示污染, $P_i\leq 1$ 表示未污染,且 P_i 值越大,则污染越严重^[17]。湿地底泥研究区重金属单因子风险指数评价结果见表 5。

从表 5 可见,以土壤背景值为参比值,除 As 外,其余 7 种重金属的污染指数值都大于 1,8 种元素单因子污染指数排列顺序为 Hg>Cd>Cu>Ni>Zn>Pb>Cr>As。土壤环境质量一级标准是保护区域自然生态、维护自然背景的土壤环境质量,二级标准则保证农业生产,维护人体健康。当以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)一级标准为参比值时,Hg、Zn、Ni、Pb 这 4 种重金属的污染指数值稍大于 1,8 种元素单因子污染指数排列顺序为 Hg>Zn>Ni>Pb>Cu>Cr>Cd>As,

表 4 西溪湿地底泥重金属含量(mg·kg⁻¹)

项目	Hg	As	Zn	Cr	Ni	Cu	Cd	Pb
1#	0.12	5.53	117.4	71.1	30.8	33.7	0.15	40.3
2#	0.21	6.24	123.5	73.8	60.0	33.2	0.17	40.6
3#	0.25	5.60	87.4	59.0	36.1	27.4	0.13	31.8
4#	0.18	7.08	105.5	72.4	32.3	30.6	0.09	35.9
5#	0.15	4.77	109.7	60.2	59.8	29.1	0.16	40.9
6#	0.17	2.09	97.9	60.9	28.1	30.6	0.1	23.8
平均值	0.18	5.22	106.9	66.23	37.40	30.77	0.10	35.55
最大值	0.25	7.08	123.5	73.80	59.8	33.70	0.17	40.90
最小值	0.12	2.09	87.40	59.00	28.1	27.40	0.09	23.8
标准差	0.05	1.72	13.09	6.87	14.73	2.40	0.03	6.77
变异系数/%	27.78	32.95	12.25	10.37	39.39	7.80	30.00	19.04
背景值	0.07	7.50	62.10	49.70	20.9	15.00	0.06	22.40
标准值(二级)	0.50	25	250	300	50	100	0.30	300
标准值(一级)	0.15	15	100	90	40	35	0.20	35

注:背景值为浙江省土壤元素背景值^[16],标准值为《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995,pH 值为 6.5~7.5)。

表 5 西溪湿地底泥重金属单因子风险指数

元素	以浙江省土壤背景值为评价标准			以《土壤环境质量标准》一级标准为评价标准		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
Hg	3.85	1.85	2.77	1.67	0.80	1.20
As	0.94	0.28	0.70	0.47	0.14	0.35
Zn	1.98	1.41	1.72	1.17	0.87	1.07
Cr	1.48	1.19	1.33	0.82	0.66	0.74
Ni	2.87	1.34	1.97	1.50	0.70	1.03
Cu	2.25	1.83	2.05	0.96	0.78	0.88
Cd	2.93	1.55	2.30	0.85	0.45	0.67
Pb	1.83	1.06	1.59	1.17	0.68	1.02

以上 2 组单因子污染指数说明西溪湿地底泥重金属含量水平存在一定的生态风险。另外,当以二级标准为参比值时,8 种重金属的污染指数均小于 1,说明西溪湿地底泥重金属虽已有污染,但疏浚底泥农用还是安全的。

3 结论

(1)西溪湿地底泥中未检出 PCBs、OCPs,但检出了 EPA 规定的 14 种 PAHs,总 PAHs 的浓度范围为 $115.9\sim 217.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,远低于潜在生态风险的效应区间低值 ERL。值得注意的是,列入中国“水中优先控制污染黑名单”的 7 种 PAHs,除 BgP 部分检出外,其余均 100%检出,并且这 7 种 PAHs 的总量占 ΣPAHs 1/2 左右(平均为 50.08%)。BbF、BkF、BgP、IcP 等这些“三致”作用化合物的高检出,表明沉积物中高环 PAHs 对西溪湿地生物具有潜在的生物毒性作用及不利的生态影响效应,应当引起有关部门注意。

(2)西溪湿地底泥中的重金属除砷外,其余 7 种元素含量均超当地土壤背景值,Hg、Zn、Ni、Pb 4 种元素含量在多个位点已超过《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)一级标准,但除 Ni 外的其余 7 种元素的含量均未超过二级标准,说明疏浚底泥农用是安全的。采用单因子污染指数对西溪湿地底泥中重金属的污染程度进行评价,发现 Hg、Zn、Ni、Pb 为轻度污染,说明西溪湿地底泥重金属存在一定的生态风险。

(3)综合分析不同干扰类型的底泥质量,发现底泥疏浚能有效降低有机质含量、全氮和 POPs 含量,但对全磷、重金属含量则无明显效果。封闭水体的干塘措施能显著减少污泥量和有机物含量,对 POPs、重金属含量无明显效果,磷元素则起浓缩作用。

参考文献:

- [1] 钟继承,范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 1-10.
- [2] 宋 力,黄民生. 底泥中持久性有毒物质研究现状与展望[J]. 华东师

范大学学报, 2011(1): 73-86.

- [3] 王 健,赵红梅,徐大伟,等. 湿地生态系统中的多环芳烃研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(8): 936-941.
- [4] 缪丽华. 杭州西溪湿地研究综述[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(11): 5043-5044, 5080.
- [5] 黄 芳,马 楠,王建新. 西溪湿地底泥中有机氯农药分布特征及风险评价[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(11): 63-66, 71.
- [6] 邵学新,吴 明,蒋科毅,等. 西溪国家湿地公园底泥重金属污染风险评价[J]. 林业科学研究, 2009, 22(6): 801-806.
- [7] 国家环境保护总局. HJ/T 91—2002 地表水和污水检测技术规范[S].
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 93-102.
- [9] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [10] 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[J]. 中国环境科学, 2006, 26(2): 233-237.
- [11] 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): 1169-1174.
- [12] 王 静. 杭州市空气中 PAHs 污染源及归宿研究[D]. 杭州: 浙江大学博士论文, 2004.
- [13] 陈明华,李春华,叶 春,等. 多环芳烃在低氧沉积物环境中的分布状况[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(2): 104-110.
- [14] 任华堂,韩 凝,夏建新. 我国东部地区环境中多环芳烃的空间分布及生态风险分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 117(增刊 1): 113-124.
- [15] Long E R, Macdonald D D, Smith SL, et al. Incidence of adverse biological effects with in ranges of chemical concentrations in marine and estuary sediments[J]. *Environmental Management*, 1995, 19(1): 81-97.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-382.
- [17] 俞丹宏. 浙江省蔬菜农药残留和重金属污染的监测与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2009.
- [18] 战玉柱,姜 霞,陈春霄,等. 太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J]. 环境科学研究, 2011, 24(4): 363-369.