

江苏省中部城镇河流底泥重金属 污染评价及来源分析

刘玮晶, 黄顺生, 金洋, 华明, 赵增玉, 汪子意, 张琦

(江苏省地质调查研究院 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏 南京 210018)

摘要: 为研究河流底泥中重金属的来源以及对环境的危害程度,以江苏省中部某城镇河流底泥为主要研究对象,运用潜在生态风险指数法对重金属污染进行评价,并采用 Pearson 相关分析、R 型聚类分析法对重金属污染来源进行分析。结果表明: Hg、Cd、As、Cu、Ni、Pb、Cr 和 Zn 含量平均值分别为 0.41、0.36、12.04、43.26、48.77、35.95、108.11、140.30 mg/kg; 重金属 Cd、Hg 的危害最强且污染较重, Cd 污染主要与冶炼、化石燃料燃烧、涂料颜料业有关, Hg 污染主要与化石燃料燃烧有关, Cr 污染主要与合金制品制造有关, Cu 和 Ni 污染与电镀加工过程有关, As 和 Zn 污染主要与化工制造业有关。

关键词: 城镇河流底泥; 重金属污染; 污染源; 污染评价; 江苏省中部

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0097-06

Assessment and source analysis of heavy metal pollution in river sediment of a town in central Jiangsu Province

LIU Weijing, HUANG Shunsheng, JIN Yang, HUA Ming, ZHAO Zengyu, WANG Ziyi, ZHANG Qi

(Technology Innovation Center for Ecological Monitoring & Restoration on Land (arable), Ministry of
Natural Resources, Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210028, China)

Abstract: In order to understand the source of heavy metals in river sediment and their impacts on the local environment, we adopted potential ecological risk index method to evaluate the heavy metal pollution of a town in central Jiangsu Province, then Pearson correlation analysis and R-type cluster analysis to analyze the source of the pollution. Results showed that the average contents of Hg, Cd, As, Cu, Ni, Pb, Cr and Zn were 0.41 mg/kg, 0.36 mg/kg, 12.04 mg/kg, 43.26 mg/kg, 48.77 mg/kg, 35.95 mg/kg, 108.11 mg/kg and 140.30 mg/kg, respectively. Among them, Hg and Cd were the most harmful and heavily spread pollutants, Cd pollution was mainly related to smelting, fossil fuel combustion and coating industry, Hg was induced by the fossil fuel combustion, Cr mostly came from the manufacture of alloy products, Cu and Ni were associated with electroplating process, and As and Zn were mainly related to the chemical manufacturing.

Key words: sediment of urban rivers; heavy metal pollution; pollution source; pollution assessment; central Jiangsu Province

1 研究背景

底泥一般指河流等水体底部的沉积物,是水环境的重要组成部分^[1-2]。随着城镇化、工业化的快速推进,很多工业废弃物随管道排入水体中。废弃

物中含有大量重金属,其本身不会迁移降解,会随时间逐渐累积在水体底部的底泥中^[3-9],并且可能通过物理作用、生物作用等反向污染水体质量^[10-11]。这些受到污染的水又可能会经过河网最终进入农田灌溉系统,从而对农田土壤、农产品甚至农业生产造

收稿日期:2020-05-29; 修回日期:2020-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41907141);江苏省自然资源科技项目(KJXM2019011);江苏省耕地污染防治专项(苏财建[2017]123号)

作者简介:刘玮晶(1986-),女,江苏南京人,硕士,高级工程师,研究方向为土壤、水资源调查与评价。

成严重影响^[12]。

底泥重金属污染评价方法有很多,常见的主要有内梅罗指数法^[13]、地质累积指数法、潜在生态风险指数法和污染负荷指数法^[14]等,其中潜在生态风险指数法应用最普遍^[15]。

本次研究区为江苏省中部重要工业城镇,区域内湖塘密布,有极为便利的航运、灌溉、排涝河流网络。研究区工业和农业发达,工业以发电业、化学制品制造业及石油、煤炭等燃料加工行业为主。这些行业的生产活动会直接或间接释放大量重金属,它们随废水被排入河流并沉积在底泥中。因此,作为江苏省重要工业城镇,对研究区河流底泥重金属进行潜在生态风险评价^[16-17]、判断重金属可能的污染来源^[18-19],对其水环境保护和区域污染排放控制^[20]都极具重要意义。

2 材料和方法

2.1 底泥样品采集与测试

研究区河流底泥样品采集于2016年10月—2017年5月,共设置采样点115个,统一由柱状沉积物采样器采集河流底泥物表层0~30 cm范围内的底泥(淤泥)样品,原始重量均大于3 kg,采样点分布见图1。

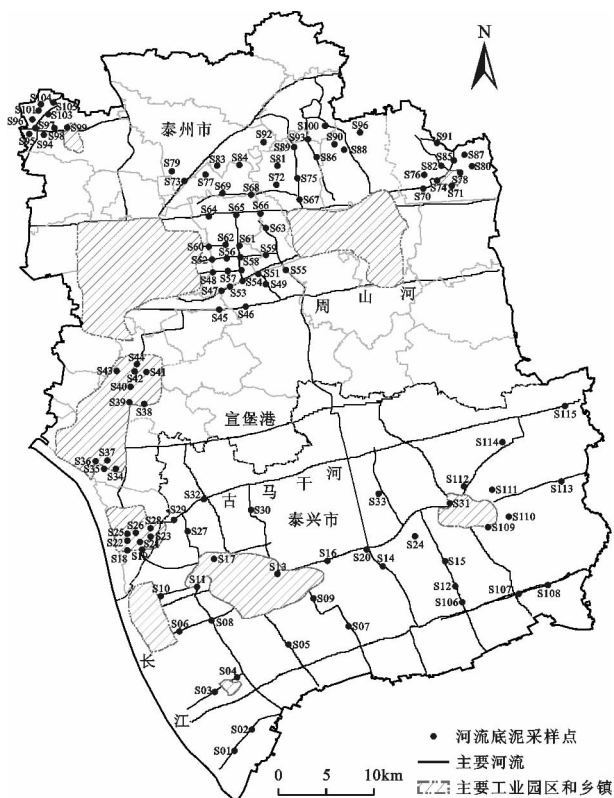


图1 研究区域及采样点分布图

将采集的样品先装入布袋,待排干大部分水分后再装入聚乙烯袋。之后进行风干,取部分样品经低温(40~50℃)烘干、粗碎、中碎、缩分等加工至测试要求。

研究区河流底泥中各重金属的测试方法^[21-22]见表1。

表1 研究区河流底泥各重金属测试方法

重金属	测试方法
砷、汞	原子荧光光谱法
铬、锌、铅	X射线荧光光谱法
铜、镍	电感耦合等离子体原子发射光谱法
镉	电感耦合等离子体质谱法(酸溶)

2.2 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价法能够计算出沉积物中重金属的污染程度,在常见的几种沉积物重金属污染评价方法中应用最为广泛,它综合考虑了重金属危害性及其对生态、环境的影响,能反映一种甚至多种重金属的危害并定量潜在生态风险程度^[23-24]。计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (1)$$

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \cdot C_f^i) \quad (3)$$

式中: E_r^i 为底泥中重金属*i*的潜在生态危害系数; RI 为底泥中多种重金属综合潜在生态危害指数; T_r^i 为底泥中重金属*i*的毒性系数; C_f^i 为研究区底泥中重金属*i*的富集系数; C_s^i 为研究区底泥中重金属*i*的浓度实测值,mg/kg; C_n^i 为计算所需浓度参照值,mg/kg,选取研究区0~20 cm表层土壤背景值。

研究区河流底泥各重金属毒性系数(T_r^i)及计算所需参照值(C_n^i)^[25]见表2。

潜在生态危害系数(E_r^i)和潜在生态危害指数(RI)各自对应的生态危害程度存在细微差别,具体见表3。

3 结果与分析

3.1 研究区河流底泥重金属含量特征

对研究区115件河流底泥样品的各重金属元素含量特征值进行了统计计算,结果见表4,表4中还列出了国外部分地区的水体沉积物重金属含量基准值临界效应浓度(threshold effects levels, TEL)和必然效应浓度(probable effects levels, PEL)以及《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)。分析表4

可知:(1)各重金属含量的最大值与最小值的比值为 8.68 ~ 400。与目前国内外沉积物质量标准相比,本研究区河流底泥重金属平均值含量多处于 TEL 和 PEL 之间,表明河流底泥重金属整体处于中等污染水平^[26-28]。但大部分重金属含量的最大值明显高于沉积物 PEL 值,其中 As、Cr、Hg、Ni 等含量的最大值甚至超过了农用污泥 A 类污染物控制标准^[29],表明研究区局部地段明显存在这些元素的点源污染。(2) Cd、Cu、Hg、Ni 的平均富集因子较大,分别为 2.25、2.92、2.01、2.11,明显超过土壤背景值,说明底泥中这些重金属元素以人为富集为主,其中重金属 Cu 的人为富集最严重。(3) Cr、Hg、Ni 的变异系数均大于 1,其中 Hg 变异系数最大(3.90),表明 Hg 含量空间分布受到局部人为影响最大。其余大部分重金属的变异系数在 0.52 ~ 0.88 之间,为中等。

表 3 潜在生态危害系数和危害指数与污染程度的关系

生态危害系数 E_r^i	污染程度	生态危害指数 RI	污染程度
$E_r^i < 40$	轻微生态危害	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	强生态危害	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	很强生态危害	$RI \geq 600$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$	极强生态危害		

表 4 研究区河流底泥各重金属元素含量特征值统计结果

		mg/kg							
国家和地区	含量特征值	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
本文研究区	最大值	52.10	2.26	1494.00	312	6.00	645.00	125.00	548.00
	最小值	2.95	0.08	51.00	7.99	0.015	18.00	14.40	45.40
	平均值	12.04	0.36	108.11	43.26	0.41	48.77	35.95	140.30
	标准差	8.96	0.31	168.53	35.24	0.56	69.33	18.70	96.48
	变异系数	0.74	0.88	1.56	0.81	3.90	1.42	0.52	0.69
加拿大淡水沉积物	TEL	7.20	0.60	37.00	36.00	0.17	18.00	35.00	123
	PEL	42.00	3.50	90.00	197.00	0.49	36.00	91.00	315
美国佛罗里达近岸海洋沉积物	TEL	7.24	0.68	52.30	18.70	0.13	15.90	30.20	124
	PEL	41.60	4.21	160.00	108.00	0.70	42.80	112.00	271
《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018) A 类		30	3	500	500	3	100	300	1200

注:富集因子 = 土壤中某重金属浓度的平均值/土壤中该重金属浓度的背景值^[15]。

由表 5 可以看出,各重金属潜在生态危害系数 (E_r^i) 均值大小依次为 Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn,对照表 3 发现,除 Hg 外其余 7 种重金属的危害等级较低。Hg 的潜在生态危害系数均

表 2 研究区河流底泥各重金属毒性系数 (T_r^i) 和参照值 (C_n^i)

重金属	T_r^i	$C_n^i / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$
As	10	6.88
Cd	30	0.16
Cr	2	60.91
Cu	5	14.83
Hg	40	0.07
Ni	5	23.09
Pb	5	22.93
Zn	1	70.86

3.2 研究区河流底泥重金属潜在生态风险评价

根据公式(1) ~ (3) 和表 3,对研究区河流底泥中的重金属开展潜在生态风险的计算与评价。计算出的各重金属潜在生态危害系数 (E_r^i) 与相应危害程度见表 5;重金属潜在生态危害指数 (RI) 评价与样点统计结果见表 6。

值高达 81.71,危害程度达到强,同时其潜在生态危害系数最大值高达 3 428.57,危害程度已达到极强,需引起重视。Cd 的危害程度为中等,但其潜在生态危害系数最大值对应的危害程度也已达到极强,同

样需引起注意。

表 5 研究区河流底泥各重金属潜在生态危害系数(E_r^i)和危害程度

重金属	最大值	最小值	平均值	危害程度
As	75.73	4.29	17.5	轻微
Cd	423.75	15	66.64	中等
Cr	49.06	1.67	3.55	轻微
Cu	105.19	2.69	14.58	轻微
Hg	3428.57	8.57	81.71	强
Ni	139.67	3.9	10.56	轻微
Pb	27.26	3.14	7.84	轻微
Zn	7.73	0.64	1.98	轻微

表 6 研究区河流底泥重金属潜在生态危害指数(RI)评价与样点统计结果

多种重金属生态危害程度	样点数	占总样点比例/%
轻微生态危害	61	53.04
中等生态危害	41	35.65
强生态危害	11	9.57
很强生态危害	2	1.74

由表 6 可见,研究区 115 个底泥采样点中,61 个样点的生态危害程度为轻微,占比为 53.04%;41 个样点的生态危害程度为中等,占比为 35.65%;11 个样点的生态危害程度为强,占比为 9.57%;值得注意的是,有 2 个样点达到很强生态危害。

3.3 研究区河流底泥重金属来源分析

采用 Pearson 相关分析和 R 型聚类分析方法,

表 7 研究区河流底泥各重金属元素 Pearson 相关系数矩阵

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	0.238 *	1						
Cr	0.080	0.084	1					
Cu	0.345 **	0.478 **	0.521 **	1				
Hg	0.239 *	0.066	-0.002	0.160	1			
Ni	0.187 *	0.180	0.739 **	0.816 **	0.016	1		
Pb	0.454 **	0.321 **	0.209 *	0.354 **	0.098	0.241 **	1	
Zn	0.651 **	0.345 **	0.273 **	0.653 **	0.115	0.467 **	0.660 **	1

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3.4 研究区河流底泥重金属生态危害程度空间分布特征及来源分析

人类生活和工业生产活动是造成水体底泥重金

属污染的直接原因。本研究区属江苏省中部的重要工业城市,工业生产活动频繁。将每个采样点的多项重金属潜在生态危害程度反映在空间上(见图

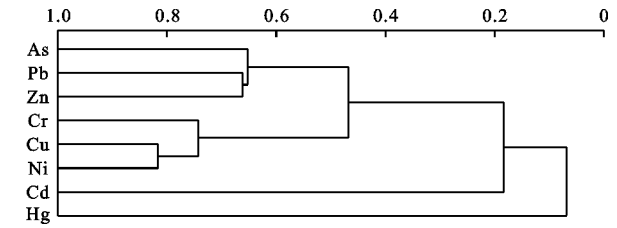


图 2 研究区河流底泥各重金属 R 型聚类分析结果

由表 7 可看出,在 $P < 0.01$ 的水平下,Cu 和 Ni 的相关系数最大,达到 0.816,两者相关性最强;As 和 Cd 均与 Pb、Cu、Zn 之间相关性显著,Cr 与 Cu、Ni 之间相关性显著;Cd、Hg 与其他元素相关性较弱。

由图 2 聚类分析结果可知,研究区河流底泥重金属可分为 3 类。第 1 类包括除 Cd、Hg 以外的 6 种重金属元素,它们再细分为两个亚类:一类是 As、Pb、Zn,这 3 个元素两两之间相关系数较大,另一类是 Cr、Cu、Ni,其两两之间相关性也较强,存在中度正相关;第 2 类是 Cd 元素;第 3 类是 Hg 元素。说明 Cd 和 Hg 的来源途径与其他元素有差异。Cu、Ni 距离最近,即关系最密切,与 Pearson 相关分析中 Cu 和 Ni 存在最大相关性相一致。

Pearson 相关分析及 R 型聚类分析结果表明:As、Pb、Zn 之间、Cr、Cu、Ni 之间具有很强的同源性;Cd、Hg 与其他元素来源途径均不同。推测 As、Pb、Zn 来源相似,Cr、Cu、Ni 来源相似,Cd 和 Hg 分别存在不同的来源。结合实地调查,进一步讨论它们的分布特征和可能来源。

3),可以更直观地看出研究区河流底泥受重金属污染的程度。

由图3发现,西部河流底泥重金属生态危害程度明显高于中、东部地区,这与西部临河一带存在大量工业污染源有关;从西向东大部分底泥样点重金属危害程度下降,这与研究区河流流向由西向东相一致^[30]。

研究区内西部河流底泥重金属潜在生态危害程度最高(图3),表现为重金属Cd和Hg具有强、极强的危害。实地调查发现中、西部底泥很强、强、中等危害点多达8个,这些点附近存在一重要工业园区,聚集了发电业、化学品制造业、涂料颜料业以及石油、煤炭等燃料加工业等数十家大型工业企业。张光贵等^[31]对洞庭湖的重金属来源研究表明,Hg和Cd主要受工矿采冶支配。滕彦国等^[32]在分析整理国内外城市环境地球化学的研究中,发现涂料、颜料制造业在生产过程中会直接或间接释放Cd,化石燃料燃烧会释放Cd、Hg。由此推测,本研究区河流底泥中Cd、Hg含量高、生态危害强与煤炭燃烧、冶炼、涂料行业有较密切成因关系。

西部底泥危害程度严重多以As、Cd、Hg为主要原因,S01样点处出现Zn含量最大值:548 mg/kg,明显高于沉积物PEL值^[26-28]。经调查,西部存在一国家级大型精细化工开发园区,区域内聚集数百家精细化工、基础化工、化工新材料等大规模化工企业,而化学品制造会产生大量重金属,例如As、Cd、Cr、Cu、Hg、Zn等^[32]。因此推测底泥中的As、Cd、Hg、Zn污染与周围大量化工生产活动有关。

研究区北部的S100样点(图3)相比其他样点出现明显的Cr、Ni复合中等危害,Cr含量为研究区最高值,即1494 mg/kg。西部工业园区旁S06样点(图3)出现明显Cu、Ni强生态危害,Cu和Ni含量为研究区最高值,分别为312和645 mg/kg。经实地调查,东北部S100样点附近存在一电线电缆公司,生产过程涉及合金,有研究表明合金生产过程会释放重金属Cr、Ni^[32]。西部Cu、Ni强危害样点S06上游存在一电镀加工公司,主要从事Cu、Ni化学电镀加工,曾被投诉污水处理能力不佳、私加电镀生产线,因此推断Cu、Ni的释放主要来自电镀加工。金文奖等^[33]研究温州鳌江流域表层底泥时也得出相似结论。

综上所述,研究区河流底泥重金属污染主要表现为点源的分布,底泥中重金属Cd与冶炼、化石燃料燃烧、涂料颜料业有关,Hg与化石燃料燃烧有关,

Cr主要与合金制品制造有关,Cu和Ni与电镀加工过程有关,As和Zn与化工制造业有关。



图3 研究区河流底泥重金属潜在生态危害程度空间分布

4 结论与建议

(1)研究区河流底泥样品中,重金属Hg含量平均值为0.41 mg/kg,Cd为0.36 mg/kg,As为12.04 mg/kg,Cu为43.26 mg/kg,Ni为48.77 mg/kg,Pb为35.95 mg/kg,Cr为108.11 mg/kg,Zn为140.30 mg/kg;Hg、Cd、Cu、Ni富集因子较大,表现出明显的人为富集趋势;运用潜在生态风险评价方法可知,Cd和Hg的危害最强。

(2)研究区河流底泥重金属污染主要为As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn,尤其以Cd和Hg的污染较重;其中Cd污染主要与冶炼、化石燃料燃烧、涂料颜料业有关,Hg污染主要与化石燃料燃烧有关,Cr污染主要与合金制品制造有关,Cu和Ni污染与电镀加工过程有关,As和Zn污染与化工制造业有关。

(3)针对研究区河流底泥重金属污染情况,建议动态监测并公开工业园区的污水排放情况、水质、底泥质量和各产品的特征污染物排放情况;建议监测并公开河流下游各取水口的水质和底泥质量等;对河流排污进行实时处理并定期清淤,保障农田灌溉水无污染及居民饮用水安全无害。

参考文献:

- [1] 周潮晖,张庆强,杜乔乔,等. 引滦入津工程黎河河道表层沉积物重金属形态及风险分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):103-107.
- [2] 邵丽娜,任宗明,张高生,等. 烟台近海海域经济类海洋生物体内的 Sn、Hg 的含量分析[J]. 环境科学,2011,32(6):1696-1702.
- [3] 张婷,刘爽,宋玉梅,等. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评价[J]. 环境科学学报,2019,39(3):706-715.
- [4] 徐辉,陈维芳,张思嘉,等. 生物活性剂淋洗对河道底泥重金属毒性和生态风险影响评价[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):74-80.
- [5] ZHU Yuanjie, LU Xinwei, YANG Linna, et al. Accumulation and source of heavy metals in sediment of a reservoir near an industrial park of northwest China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016,10(4):707-716.
- [6] GIRI S, SINGH A K. Risk assessment, statistical source identification and seasonal fluctuation of dissolved metals in the Subarnarekha River, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014,265:305-314.
- [7] 乔敏敏,季宏兵,朱先芳,等. 密云水库入库河流沉积物中重金属形态分析及风险评价[J]. 环境科学学报,2013,33(12):3324-3333.
- [8] 王馨慧,单保庆,唐文忠,等. 典型城市河流表层沉积物中汞污染特征与生态风险[J]. 环境科学学报,2016,36(4):1153-1159.
- [9] 易雨君,王文君,宋劼. 长江中下游底泥重金属污染特征、潜在生态风险评价及来源分析[J]. 水利水电技术,2019,50(2):1-7.
- [10] 杨清伟,束文圣,李慧. 粤北乐昌铅锌矿区水道底泥重金属污染评价[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(6):39-40.
- [11] SAULNIER I, MUCCI A. Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments: Saguenay Fjord, Canada[J]. *Applied Geochemistry*, 2000,15(2):191-210.
- [12] 王妮,潘莉,焦迎迎,等. 四川荣经县农村山区河流水质状况与污染来源分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):46-49.
- [13] BI Shipu, YANG Yuan, XU Chengfen, et al. Distribution of heavy metals and environmental assessment of surface sediment of typical estuaries in eastern China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017,121(1-2):357-366.
- [14] RA K, BANG J H, LEE J M, et al. The extent and historical trend of metal pollution recorded in core sediments from the artificial Lake Shihwa, Korea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011,62(8):1814-1821.
- [15] 李波,喻庆国,危锋,等. 滇西北剑湖表层沉积物重金属分布特征和生态风险[J]. 环境污染与防治,2019,41(4):468-473.
- [16] 祁艳丽,唐永杰,蔡树伯,等. 淡水湖泊沉积物污染评价方法比较——以北大港水库为例[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):26-30+38.
- [17] 齐书蕾,祁士华,傅杨荣,等. 小海高位池沉积物中重金属分布与污染评价[J]. 环境科学与技术,2010,33(8):84-87.
- [18] 张浩,刘明喆,缪萍萍,等. 汛期前后白洋淀主要污染物空间特征及来源分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(5):28-31.
- [19] 田爱军,李冰,屈健,等. 江苏省灌河流域污染特征及污染控制对策[J]. 湖泊科学,2012,24(4):535-540.
- [20] 姜龙杰,陈琳,邱云鹏,等. 溧水水库型饮用水水源地水环境现状及污染源分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):93-99.
- [21] 中华人民共和国国土资源部. 多目标区域地球化学调查规范(1:250000):DZ/T 0258—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [22] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法:DZ/T0279—2016[S]. 北京:地质出版社,2016.
- [23] 徐争启,倪师军,虞先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
- [24] 李波,喻庆国,危锋,等. 滇西北剑湖表层沉积物重金属分布特征和生态风险[J]. 环境污染与防治,2019,41(4):468-473.
- [25] 叶属峰,程金平. 生态长江口评价体系研究及生态建设对策[M]. 北京:海洋出版社,2012.
- [26] MACDONALD D D, INGERSOLL C G, BERGER T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*,2000,39(1):20-31.
- [27] INGERSOLL C G, DILLON T, BIDDINGER G R. Ecological risk assessments of contaminated sediments[C]//Pellston Workshop on Sediment Ecological Risk Assessment. Pensacola:SETAC Press, 1997.
- [28] BURTON J G A. Sediment quality criteria in use around the world[J]. *Limnology*, 2002,3(2):65-76.
- [29] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 农用污泥污染物控制标准:GB 4284—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [30] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J]. 湖泊科学,2003,15(3):252-256.
- [31] 张光贵,黄博. 湖南洞庭湖水系重金属健康风险评价[J]. 水资源保护,2014,30(1):14-17+47.
- [32] 滕彦国,倪师军,林学钰,等. 城市环境地球化学研究综述[J]. 地质论评,2005,51(1):64-76.
- [33] 金文奖,侯平,张伟,等. 温州鳌江流域表层底泥及河岸土壤重金属空间分布与生态风险评价[J]. 浙江农林大学学报,2017,34(6):963-971.