

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.022

海河流域中部表层沉积物中重金属分布特征及污染评价

王利娜^{1,2}, 周俊丽^{1,2}, 赵艳芳^{1,2}, 李 丹^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012;

2. 中国环境科学研究院国家环境保护河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为了解海河流域中部表层沉积物中重金属分布特征和污染现状, 分别测定了 17 个采样点表层沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 共 8 种重金属元素质量比, 并采用相关性分析法、富集系数法、地累积指数法分析其同源性、污染来源及污染程度。结果表明: 海河流域中部表层沉积物中重金属质量比整体上较历史水平有所下降, 8 种重金属元素的污染系数从高到低依次为 Cd (1.98)、Hg (1.80)、Cu (1.37)、Zn (1.18)、Pb (1.12)、Ni (1.07)、Cr (1.02)、As (0.77), Cd 污染相对严重; Cd 和 Hg 的富集系数平均值均高于 1.5, 污染来源以人为输入为主, 其余 6 种重金属元素则主要以自然来源为主; 海河流域中部重金属总体上污染较轻, 个别点位污染等级达到中度污染。

关键词: 重金属; 表层沉积物; 富集系数; 地累积指数; 污染评价; 海河流域

中图分类号: TV213.4; X521

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2021)05-0147-06

Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in the surface sediments in the middle of Haihe River Basin // WANG Lina^{1,2}, ZHOU Junli^{1,2}, ZHAO Yanfang^{1,2}, LI Dan^{1,2} (1. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to understand the distribution characteristics and pollution status of heavy metals in the surface sediments in the middle of Haihe River Basin, the mass ratios of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb in the surface sediments of 17 sampling sites were determined. The homology, pollution source and pollution degree were analyzed by correlation analysis method, enrichment coefficient method and geoaccumulation index method. The results show that the heavy metal mass ratios in the surface sediments in the middle of Haihe River Basin generally decreased compared with the historical level and the pollution coefficients of eight heavy metals were Cd (1.98), Hg (1.80), Cu (1.37), Zn (1.18), Pb (1.12), Ni (1.07), Cr (1.02) and As (0.77) from high to low, wherein Cd pollution was relatively serious; The average enrichment factor values of Cd and Hg were higher than 1.5 with the pollution source mainly from human input, while the rest six heavy metals were mainly from natural sources. The pollution of heavy metals in the middle of Haihe River Basin was relatively light in general with moderate pollution levels at some sites.

Key words: heavy metal; surface sediment; enrichment factor; geoaccumulation index; pollution assessment; Haihe River Basin

重金属是环境介质中具有潜在毒性的一种持久性污染物, 可通过食物链逐步富集积累^[1], 人类活动是重金属污染主要来源之一^[2]。重金属在水中溶解性很低, 容易吸附在沉积物中^[3], 不仅会破坏

生态系统的完整性, 还会直接或间接危害人类健康^[4-7]。因此, 重金属污染一直是国内外诸多学者关注的热点之一^[8-10]。

海河流域是我国重要的经济文化中心^[11], 城市

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07301-002)

作者简介: 王利娜 (1985—), 女, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: lina8509@163.com

通信作者: 周俊丽 (1977—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事水污染治理技术集成研究。E-mail: 563153681@qq.com

发展迅速,随着城市化水平不断提高,流域水系重金属污染问题日益突出。目前,海河流域沉积物中重金属污染研究主要针对海河流域一条或几条河流开展调查^[12-14],流域尺度的研究多集中于中南部^[15]和北部^[16],对于海河流域中部京津冀经济工业圈研究较少。本文选取京津冀经济工业圈中经济发达、城镇密集的北京市、天津市及河北省廊坊作为研究区域,分析表层沉积物中重金属分布特征、污染来源及污染程度,以期海河流域重金属污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2019年11月18—22日,对海河流域中部(115°42'54"E~117°46'6"E,38°33'55"N~40°35'58"N)进行综合调查和样品采集,共设6个采样区域,36个采样断面,其中17个采样点(图1)采集到有效沉积物,其余样点为砂石等硬质河床。17个采样点中,H1、H2、H3属永定河,H4、H5属北运河,H6、H7、H8属潮白河,H9~H13属蓟运河,H14属大清河,H15、H16、H17属黑龙港诸河。表层沉积物样品采用抓斗式采泥器采集,各采样点均采集3个平行样品,装入密封塑料袋中,贴上标签,于4℃下保存。

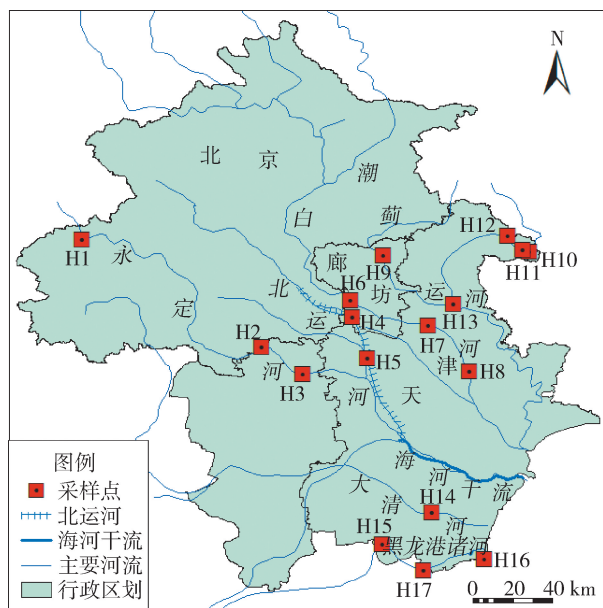


图1 研究区及采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of study area and sampling sites

1.2 样品处理及分析

沉积物中Cd、Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、As的分析采用HJ 803—2016《土壤和沉积物 12种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法》,Hg的分析采用HJ 923—2017《土壤和沉积物 总汞的测

定 催化热解-冷原子吸收分光光度法》。沉积物样品带回实验室后用冷冻干燥机干燥,剔除砾石、植物等杂物,研磨过100目(0.15 mm)尼龙筛备用,用浓盐酸与浓硝酸(3:1)进行微波消解,Cd、Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、As质量比用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent ICP-MS 7900)测定,Hg质量比用测汞仪(海光 HGA-100)测定。

对沉积物样品的检测进行质量控制,结果显示空白值低于样品测定最低值的10%,平行样测定结果相对偏差均小于20%,沉积物标准样品(GSD-15、GSS-27)测定结果回收率均大于80%,加标样品回收率70%~130%,表明符合质量控制要求。以上各样品均平行测定3次,取均值。

1.3 污染来源判定

富集系数(enrichment factor) C_i 可以作为河流沉积物中重金属来源的判定依据^[17-18],其计算公式为

$$C_i = \frac{w_{i\text{实}}/w_{\text{Fe实}}}{w_{i\text{背}}/w_{\text{Fe背}}} \quad (1)$$

式中: $w_{i\text{实}}$ 为沉积物中重金属*i*质量比实测值,mg/kg; $w_{\text{Fe实}}$ 为参比元素Fe质量比实测值,mg/kg(Fe不易受外界因素干扰,常被选做参比元素^[19]); $w_{i\text{背}}$ 为重金属*i*质量比背景值,mg/kg,本文采用河北、北京及天津重金属元素背景值^[19]; $w_{\text{Fe背}}$ 为参比元素Fe质量比背景值,mg/kg。当 $0.5 < C_i \leq 1.5$ 时,污染主要为自然来源(地壳与岩石圈的自然风化);当 $C_i > 1.5$ 时,污染主要为人为输入(人类生活、生产等活动)。

1.4 污染评价

地累积指数 I_{geo} 是研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标^[20],地累积指数法是目前国内外常用的重金属污染评价方法^[21],计算公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{w_{i\text{实}}}{Kw_{i\text{背}}} \quad (2)$$

式中 K 为考虑到成岩作用可能引起背景值波动而设的常数, $K = 1.5$ 。依据 I_{geo} 将沉积物中重金属污染状况划分为7个等级:无污染($I_{\text{geo}} \leq 0$)、轻度污染($0 < I_{\text{geo}} \leq 1$)、偏中等污染($1 < I_{\text{geo}} \leq 2$)、中度污染($2 < I_{\text{geo}} \leq 3$)、偏重污染($3 < I_{\text{geo}} \leq 4$)、重污染($4 < I_{\text{geo}} \leq 5$)和严重污染($I_{\text{geo}} > 5$)。

2 结果与分析

2.1 重金属分布特征

海河流域中部表层沉积物中Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 8种重金属元素质量比平均值分别为75.27 mg/kg、33.07 mg/kg、34.01 mg/kg、102.55 mg/kg、

8.47 mg/kg、0.17 mg/kg、0.11 mg/kg 和 25.32 mg/kg,除 As、Cr、Ni 平均值低于或接近于其相应的背景值外,其他重金属元素均不同程度地超过背景值,污染系数(实测值与背景值比值)从高到低依次为 Cd (1.98)、Hg (1.80)、Cu (1.37)、Zn (1.18)、Pb (1.12)、Ni (1.07)、Cr (1.02)、As (0.77),表明 Cd 污染最严重。这与海河流域以往的研究结果一致^[15-16,22],说明 Cd 污染是海河流域的主要环境问题。

海河流域中部表层沉积物中 8 种重金属元素的空间分布规律相似(图 2),高值区与低值区较吻合。高值区为蓟运河蓟州区的采样点 H12 和黑龙港诸河滨海新区的采样点 H17,低值区为永定河廊坊市的采样点 H2 和潮白河宝坻区的采样点 H8。其中 Cd 质量比峰值出现在位于天津市蓟州区果河桥的采样点 H11;Hg 和 Zn 质量比峰值均出现在位于河北省廊坊市吴村的采样点 H6;Cu 和 Pb 质量比峰值均出现在采样点 H17。将各采样点重金属元素实测值与背景值进行对比可知,Cd 所有采样点均超过其背景值,而 As 只有 18% 采样点超过其背景值。

比较国内主要河流沉积物中重金属元素质量比

(表 1)可以看出海河流域中部表层沉积物中重金属的污染状态。由表 1 可以看出,海河流域中部表层沉积物中 8 种重金属元素平均质量比普遍低于 2006 年调查结果^[12],整体高于淮河和松花江,而 Cu、Cd、Hg 和 Pb 的平均质量比均不同程度低于长江、珠江、辽河。海河流域中部表层沉积物中重金属质量比整体处于中等偏高水平,较历史水平有所降低,这可能与近年来国家对海河流域进行大力整治有关,国家水体污染控制与治理科技重大专项投入大量人力、物力至海河流域水环境污染治理,取得了明显成效。

2.2 重金属污染源分析

2.2.1 重金属同源性分析

吴二威^[13]研究表明,重金属元素常常相伴而生,不同重金属元素之间相关性较高,则说明具有相同或相似的污染源。

表 2 为海河流域中部表层沉积物中重金属质量比相关性分析结果,可以看出 Ni 和 Cr 显著相关,Cu 和 Cr、Ni 均显著相关,Cd 和 Ni、Cu 均显著相关,Hg 和 Zn 显著相关,Pb 和 Cr、Hg 均显著相关,说明 Ni、Cr、Cu、Cd、Pb、Hg、Zn 污染源相同或相似,而 As 有独立的污染来源。

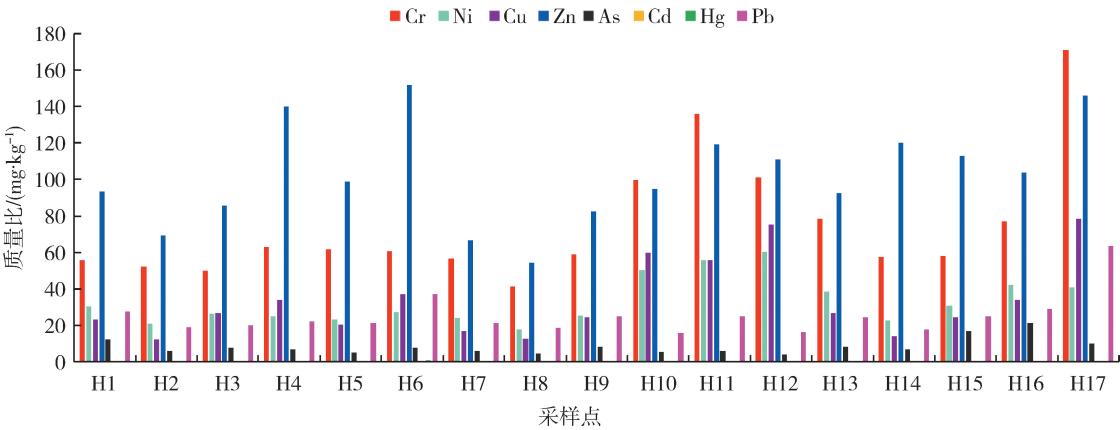


图 2 海河流域中部表层沉积物中重金属质量比空间分布

Fig.2 Spatial distribution of mass ratios of heavy metals in the surface sediments in the middle of Haihe River Basin

表 1 国内主要河流及海河流域中部表层沉积物中重金属质量比

Table 1 Mass ratio of heavy metals in the surface sediments of domestic main rivers and the middle of Haihe River Basin

水系	质量比/(mg · kg ⁻¹)							
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
淮 河 ^[23]	56.1	22.8	69.68		0.17			19.4
长 江 ^[24]	73.3	33.9	111.70	11.68	0.19	0.19		28.4
珠 江 ^[25]	56.4	39.0		5.24	1.40	1.40		59.4
松花江 ^[26]	33.0	21.0						5.5
辽 河 ^[27]	90.3	26.5	37.9	12.30	0.49	0.14		32.9
海 河 ^[12]	100.7	55.8		18.90	0.68	0.56		39.4
海河流域中部平均值	75.27	33.07	34.01	102.55	8.47	0.17	0.11	25.32
海河流域中部范围值	41.1 ~ 171.0	17.7 ~ 60.4	12.5 ~ 78.4	54.5 ~ 152.0	4.2 ~ 21.6	0.1 ~ 0.3	0.01 ~ 0.4	16.0 ~ 63.7
海河流域中部标准差	33.08	12.38	20.25	26.73	4.46	0.06	117.22	10.87

表2 海河流域中部表层沉积物中重金属相关性分析

Table 2 Correlation analysis of heavy metals in the surface sediments in the middle of Haihe River Basin

重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
Cr	1							
Ni	0.736 **	1						
Cu	0.875 **	0.841 **	1					
Zn	0.502 *	0.314	0.546 *	1				
As	-0.018	0.061	-0.068	0.169	1			
Cd	0.512 *	0.612 **	0.620 **	0.501 *	0.272	1		
Hg	0.256	-0.088	0.336	0.734 **	-0.024	0.389	1	
Pb	0.618 **	0.099	0.455	0.563 *	0.307	0.273	0.646 **	1

注：*、** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平（双侧）上显著相关。

2.2.2 重金属来源解析

海河流域中部表层沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb 8 种重金属元素 C_i 平均值分别为 0.87、0.90、1.12、1.07、0.71、1.76、1.69 和 1.03，其中 Cd 和 Hg 的 C_i 平均值均高于 1.5。如图 3 所示，Cd 有 1/2 以上采样点的 C_i 值大于 1.5，超标采样点 50% 位于天津市，40% 位于河北省廊坊市，说明 Cd 在天津市、河北省廊坊市有明显的人为输入源，这与王瑞霖^[28]研究结论相似，可能与当地的有色金属生产、电池生产、电镀和生活污水排放等有关。Hg 有 1/3 样点的 C_i 大于 1.5，超标样点 80% 位于河北省廊坊市，说明 Hg 在廊坊市有明显的人为输入源。燃煤是大气中 Hg 最主要的污染源，且民用蜂窝煤排放的 Hg 含量远高于工业用煤^[29]，大气中的 Hg 可通过沉降及径流进入河流及沉积物中。据历史统计，2012 年北京、天津、河北大气中 Hg 的排放均以燃煤为主，分别占总排放量的 66%、71% 和 54%^[30]，由于近几年北京、天津禁止民用燃煤，由此推断廊坊市 Hg 的来源可能与民用燃煤有关。其余重金属元素的 C_i 平均值均低于 1.5，表明主要以自然来源为主。

2.3 重金属污染程度分析

对海河流域中部表层沉积物中 8 种重金属元

素的地累积指数进行了计算，结果如表 3 所示，总体来看，海河流域中部重金属污染程度不高，大部分采样点属于无污染等级，部分达到轻度污染等级，少量为偏中等污染等级（包括 H11 采样点的 Cd、H4、H17 采样点的 Hg 和 H12、H17 采样点的 Cu），只有 H6 采样点的 Hg 达到中度污染等级。Cd 和 Hg 的污染程度相对较高，主要出现在河北省廊坊市和天津市。

3 结 论

a. 海河流域中部表层沉积物中重金属质量比整体上较历史水平有所下降，但 8 种重金属元素平均实测值大部分超过背景值，污染系数从高到低依次为 Cd(1.98)、Hg(1.80)、Cu(1.37)、Zn(1.18)、Pb(1.12)、Ni(1.07)、Cr(1.02) 和 As(0.77)，Cd 污染相对严重。

b. Cd 和 Hg 的富集系数平均值均高于 1.5，表明污染来源以人为输入为主，Cd 可能与当地有色金属生产、电池生产、电镀和生活污水排放等有关，Hg 的来源可能与民用燃煤有关。

c. 总体上，海河流域中部表层沉积物中重金属污染程度不高，污染等级大多为轻度污染，个别点位达到中度污染，需引起重视。

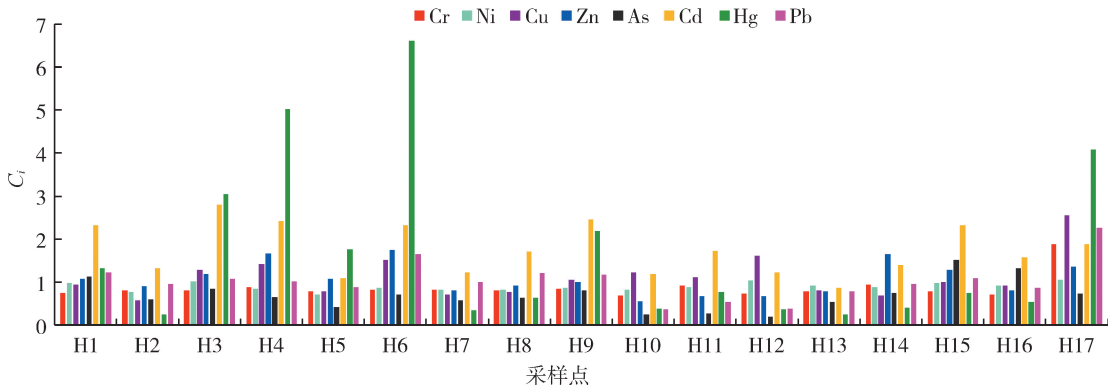


图3 海河流域中部表层沉积物中重金属富集系数

Fig.3 Enrichment factor of heavy metal in the surface sediments in the middle of Haihe River Basin

表3 海河流域中部表层沉积物中重金属地累积指数

Table 3 Geoaccumulation index of heavy metals in the surface sediments in the middle of Haihe River Basin

采样点	地累积指数							
	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
H1	-0.98	-0.62	-0.66	-0.48	-0.40	0.63	-0.17	-0.29
H2	-1.08	-1.14	-1.57	-0.91	-1.50	-0.37	-2.79	-0.84
H3	-1.14	-0.82	-0.47	-0.60	-1.08	0.63	0.76	-0.75
H4	-0.80	-0.89	-0.13	0.11	-1.25	0.63	1.69	-0.60
H5	-0.83	-0.99	-0.84	-0.40	-1.72	-0.37	0.32	-0.68
H6	-0.86	-0.78	0.01	0.22	-1.08	0.63	2.14	0.14
H7	-0.95	-0.96	-1.14	-0.97	-1.46	-0.37	-2.15	-0.67
H8	-1.42	-1.40	-1.51	-1.26	-1.78	-0.37	-1.78	-0.86
H9	-0.90	-0.88	-0.59	-0.66	-0.97	0.63	0.46	-0.44
H10	-0.14	0.11	0.69	-0.46	-1.58	0.63	-1.01	-1.09
H11	0.30	0.26	0.59	-0.13	-1.46	1.22	0.07	-0.45
H12	-0.13	0.38	1.02	-0.23	-1.97	0.63	-1.14	-1.03
H13	-0.49	-0.27	-0.46	-0.49	-1.02	-0.37	-2.14	-0.48
H14	-0.93	-1.02	-1.39	-0.12	-1.25	-0.37	-2.17	-0.92
H15	-0.92	-0.59	-0.59	-0.20	0.03	0.63	-0.98	-0.45
H16	-0.52	-0.14	-0.13	-0.32	0.39	0.63	-0.88	-0.22
H17	0.63	-0.19	1.08	0.17	-0.73	0.63	1.75	0.91

参考文献:

- [1] XIAO R, BAI J H, GAO H F, et al. Distribution and contamination assessment of heavy metals in water and soils from the college town in the Pearl River Delta, China [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40(10): 1167-1173.
- [2] FACCHINELLI A, SACCHI E, MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 313-324.
- [3] 贾艳霞, 尹洪斌, 唐婉莹. 河蚬扰动对不同质地沉积物中重金属生物有效性及毒性的影响 [J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 67-73. (JIA Yanxia, YIN Hongbin, TANG Wanying. Effects of Corbicula fluminea disturbance on bioavailability and toxicity of heavy metals in sediments with different qualities [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 67-73. (in Chinese))
- [4] SURESH G, SUTHARSAN P, RAMASAMY V, et al. Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam Lake sediments, India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 84: 117-124.
- [5] GAO X L, ZHOU F X, CHEN C. Pollution status of the Bohai Sea: an overview of the environmental quality assessment related trace metals [J]. Environment International, 2014, 62: 12-30.
- [6] MAN Y B, SUN X L, ZHAO YG, et al. Health risk assessment of abandoned agricultural soils based on heavy metal contents in Hong Kong, the world's most populated city [J]. Environment International, 2010, 36(6): 570-576.
- [7] 高建华, 李军, 王珍岩, 等. 鸭绿江河口及近岸地区沉积物中重金属分布的影响因素分析 [J]. 地球化学, 2008, 37(5): 430-438. (GAO Jianhua, LI Jun, WANG Zhenyan, et al. Heavy metal distribution and their influence factors in sediments of Yalu River Estuary and its adjacent sea area [J]. Geochimica, 2008, 37(5): 430-438. (in Chinese))
- [8] 李志清, 吴苏舒, 诸晓华, 等. 石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价 [J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 73-78. (LI Zhiqing, WU Sushu, ZHU Xiaohua, et al. Distribution of nutrients and heavy metals in surface sediments of Shijiu Lake and its pollution assessment [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 73-78. (in Chinese))
- [9] LI H M, QIAN X, WANG Q G. Heavy metals in atmospheric particulate matter: a comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(23): 13210-13211.
- [10] 马培, 鲍锦磊. 沙颍河表层沉积物中氮与重金属的分布特征及污染评价 [J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 61-67. (MA Pei, BAO Jinlei. Characterization and ecological risk assessment of nitrogen and heavy metal pollution in surface sediments of Shaying River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 61-67. (in Chinese))
- [11] 刘俐, 熊代群, 高新华, 等. 海河及邻近海域表层沉积物重金属污染及其分布特征 [J]. 海洋环境科学, 2006(2): 40-44. (LIU Li, XIONG Daiqun, GAO Xinhua, et al. Characteristics of heavy metals contamination and distribution in surficial sediment of Haihe River and the adjacent sea area [J]. Marine Environmental Science, 2006(2): 40-44.)

- 2006(2):40-44. (in Chinese))
- [12] 张淑娜,刘伟,王德龙. 海河干流(市区段)表层沉积物重金属污染及变化趋势分析[J]. 干旱环境监测,2008(3):129-133. (ZHANG Shuna,LIU Wei,WANG Delong. Heavy metal pollution and their history trend in the surface sediment of Haihe River[J]. Arid Environmental Monitoring,2008(3):129-133. (in Chinese))
- [13] 吴二威. 海河支流重金属污染特征及 Hg^{2+} 对水生藻类的毒性研究[D]. 石河子:石河子大学,2014.
- [14] 郝红,高博,王健康,等. 滦河流域沉积物中重金属分布特征及风险评价[J]. 岩矿测试,2012,31(6):1000-1005. (HAO Hong, GAO Bo, WANG Jiankang, et al. Distribution characteristic and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Luanhe River[J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(6): 1000-1005. (in Chinese))
- [15] 王瑞霖,程先,孙然好. 海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价[J]. 环境科学,2014,35(10):3740-3747. (WANG Ruilin, CHENG Xian, SUN Ranhao. Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments in the southern and sentral Haihe River Basin [J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3740-3747. (in Chinese))
- [16] 尚林源,孙然好,王赵明,等. 海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价[J]. 环境科学,2012,33(2):606-611. (SHANG Linyuan, SUN Ranhao, WANG Zhaoming, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of rivers in northern area of Haihe River Basin, China [J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 606-611. (in Chinese))
- [17] 苏虹程,单保庆,唐文忠,等. 海河流域典型清洁水系表层沉积物中重金属总体污染水平研究[J]. 环境科学学报,2015,35(9):2860-2866. (SU Hongcheng, SHAN Baoqing, TANG Wenzhong, et al. Heavy metal pollution of the surface sediments in a typical clean river system of Haihe Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2860-2866. (in Chinese))
- [18] ACEVEDO-FIGUEROA D, JIMÉNEZ B D, RODRÍGUEZ-SIERRA C J. Trace metals in sediments of two estuarine lagoons from Puerto Rico [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 336-342.
- [19] 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.
- [20] KRZYSZTOF L, WIECHUŁA D, KORUS I. Metal contamination of farming soils affected by industry [J]. Environment International, 2004, 30(2): 159-165.
- [21] 于常武,王琳,高超. 水体沉积物重金属污染地累积指数法和分级提取评价技术的差异[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 196-199. (YU Changwu, WANG Lin, GAO Chao. Difference between index of geoaccumulation and sequential extraction procedure on evaluating heavy metal pollution in aquatic sediments [J]. Journal of Liaoning University of Technology(Natural Science Edition), 2015, 35(3): 196-199. (in Chinese))
- [22] TANG W, ZHAO Y, WANG C, et al. Heavy metal contamination of overlying waters and bed sediments of Haihe Basin in China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 98: 317-323.
- [23] 贺勇,黄河,严家平. 淮河中下游底泥中的重金属与有机质研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2005, 13(6): 79-82. (HE Yong, HUANG He, YAN Jiaping. Study on the heavy metals and organic matter in sediments from the middle and lower reaches of Huaihe River [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2005, 13(6): 79-82. (in Chinese))
- [24] 沈敏,于红霞,邓西海. 长江下游沉积物中重金属污染现状与特征[J]. 环境监测管理与技术, 2006(5): 15-18. (SHEN Min, YU Hongxia, DENG Xihai. Heavy metals in surface sediments from lower reach of the Yangtze River [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2006(5): 15-18. (in Chinese))
- [25] 刘芳文,颜文,王文质,等. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 海洋环境科学, 2002(3): 34-38. (LIU Fangwen, YAN Wen, WANG Wenzhi, et al. Pollution of heavy metals in the Pearl River Estuary and its assessment of potential ecological risk [J]. Marine Environmental Science, 2002(3): 34-38. (in Chinese))
- [26] 冯丹,白羽军. 松花江哈尔滨江段底质重金属污染状况调查研究[J]. 黑龙江环境通报, 2003(3): 86-87. (FENG Dan, BAI Yujun. Research on the pollution of heavy metal in bottom mud in Harbin part of Songhua River [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2003(3): 86-87. (in Chinese))
- [27] 张婧,王淑秋,谢琰,等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2413-2418. (ZHANG Jing, WANG Shuqiu, XIE Yan, et al. Distribution and pollution character of heavy metals in the surface sediments of Liao River [J]. Environmental Science, 2008, 29(9): 2413-2418. (in Chinese))
- [28] 王瑞霖. 海河流域底泥沉积物及鲫鱼重金属污染风险研究[D]. 北京:北京化工大学,2015.
- [29] 李珊,李洋,梁汉东,等. 北京城郊燃煤汞排放及其对当地空气环境的影响[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1420-1425. (LI Shan, LI Yang, LIANG Handong, et al. Atmospheric mercury emissions from domestic coal and impacts on local environment of suburban Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(12): 1420-1425. (in Chinese))
- [30] 董灿. 我国人为源大气汞排放清单的分析研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.

(收稿日期:2020-04-14 编辑:熊水斌)