

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.013

北京市特征河流沉积物重金属污染评价与来源解析

胡 明^{1,2}, 薛 娇^{1,3}, 严玉林^{1,2}, 金桂琴^{1,2}, 王培京^{1,2}, 邱彦昭^{1,2},
杨兰琴^{1,2}, 刘 操^{1,2}

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 流域水环境与生态技术北京市重点实验室,
北京 100048; 3. 辽宁大学 环境学院, 辽宁 沈阳 110036)

摘 要: 为研究北京城市特征河流沉积物中重金属污染特征和生态风险, 基于河流功能定位、流域特色和治理方式等特点, 选取萧太后河作为研究对象, 采用地累积指数法、潜在生态危害指数法和内梅罗综合污染指数法开展河流沉积物污染评价, 并采用主成分分析法开展河流重金属来源识别与解析。评价结果表明, 萧太后河整体重金属污染程度相对较低, 仅在部分河段存在一定的 Hg 和 Cd 等重金属污染, 其他点位的大部分重金属含量处于较低水平。地累积指数评价结果表明, 8 种重金属的平均地累积指数的大小排序为 $Cd > Hg > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Pb$; 潜在生态危害指数评价结果表明, E 值的大小排序为 $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Zn > Cr$, 城中和河流交汇处的综合潜在生态危害指数达到很强的生态风险, 且这些区域的内梅罗综合污染指数较高。萧太后河重金属污染来源于生活源、自然源和工业源。河流中沉积物重金属含量在河流汇合口处较高, 对于河流汇合口附近的沉积物淤积情况应引起重视。

关键词: 河道沉积物; 重金属污染; 生态风险; 地累积指数法; 潜在生态危害指数法; 内梅罗综合污染指数法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)23-0073-09

Assessment and Trace Back to Source of Heavy Metal Pollution in Typical River Sediments in Beijing

HU Ming^{1,2}, XUE Jiao^{1,3}, YAN Yu-lin^{1,2}, JIN Gui-qin^{1,2}, WANG Pei-jing^{1,2},
QIU Yan-zhao^{1,2}, YANG Lan-qin^{1,2}, LIU Cao^{1,2}

(1. Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Water Environment and Ecological Technology for River Basins, Beijing 100048, China; 3. School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: To investigate the pollution characteristics and ecological risk of heavy metals in typical river sediments in Beijing, geoaccumulation index, potential ecological risk index and Nemerow comprehensive pollution index methods were used to evaluate sediment pollution in Xiaotaihou River based on characteristics of the river function, watershed characteristics and treatment methods, and the sources of heavy metals in river were identified and analyzed by principal component analysis. The overall heavy metal pollution level of Xiaotaihou River was relatively low, only some sections of the river were

polluted by heavy metals such as Hg and Cd, and contents of most of the heavy metal at other points were at low levels. The evaluation results showed that the average geoaccumulation indices of the eight heavy metals in a descending order were Cd, Hg, Zn, Cu, Ni, As, Cr and Pb. The potential ecological risk indices showed that the values of E in a descending order were Hg, Cd, As, Cu, Ni, Pb, Zn and Cr. The comprehensive potential ecological risk index of the urban area and the river confluence reached a very strong ecological risk, and the Nemerow comprehensive pollution indices in these regions were high. The heavy metal pollution in Xiaotaihou River was originated from domestic sources, natural sources and industrial sources. The contents of heavy metals in the river sediment were higher at the confluence of the rivers. Therefore, attention should be paid to the deposition of the sediment near the confluence.

Key words: river sediment; heavy metal pollution; ecological risk; geoaccumulation index; potential ecological risk index; Nemerow comprehensive pollution index

2018年出版的《水务统计年鉴》表明,截至2018年底,北京市监测的五大水系中,潮白河系水质最好,永定河系、蓟运河系和大清河系次之,北运河系水质总体较差。伴随北京市水环境治理进程的推进,黑臭水体治理、生态清洁小流域建设、中小河道治理等工程全面开展,然而在河流治理过程中,关于内源河流沉积物的处理与处置成为制约水环境取得实质成效的关键。

沉积物是水体污染物重要的“储存库”,重金属等污染物通过降雨径流、污水排放、大气沉降等方式进入水体后,再通过吸附、络合、絮凝、沉淀和再悬浮等各种物理化学过程,在沉积物与水体中发生动态输移^[1]。因此,沉积物充当包括重金属在内的污染物的“源”和“汇”,在污染物的迁移转化过程中具有重要意义。

重金属作为沉积物中一类特殊的污染物,具有持久性、易迁移性、生物毒性等特征,给水生态环境以及人体健康都带来了严重威胁^[2]。河流清淤是一种彻底根治内源污染的有效方法,在内源清除、河道疏通、行洪排涝等方面都能起到很好的作用^[3],然而沉积物中重金属的含量在很大程度上决定了沉积物处理与处置的方法,尤其是资源化途径优选^[4]。因此,开展河流沉积物重金属污染风险评价,对于评价河流沉积物污染现状、科学选取沉积物资源化处置方法都十分有意义。

河流沉积物的重金属污染风险评价主要围绕重金属含量、重金属形态分布以及空间分布特征等方面开展,主要涉及的重金属包括 Hg、Cd、Cr、Pb、As、Mn、Cu、Zn、Ni 等^[5]。在评价标准方面,通常选用地球化学背景值和环境背景值,例如选用地球化学背

景值研究沉积物源及构造背景^[6]、选用研究区域环境背景值开展入库河流重金属风险评价^[7]等,此外还有些研究选用《国家无公害水产品中有毒有害物质限量》(GB/T 18108—2008)、《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)等开展相关评价^[8-9]。在实际评价过程中,对评价标准的选取可以结合研究区域特征、评价目标要求和参数时效性等因素综合而定。在评价方法方面,国内外常用的重金属污染风险评价方法包括地累积指数法、沉积物富集系数法、沉积物质量基准法^[10]、潜在生态危害指数法、污染负荷指数法^[5]、内梅罗综合污染指数法^[11]等,陈明等^[5]综合分析了各种评价方法的优缺点、适用性和应用范围,建议根据评价目的、评价对象和区域因地制宜地选取评价方法。

萧太后河隶属于北运河的二级支流,流域涉及中心城区、城中村、乡村、环球影城以及副中心等特征区域,在摘除“黑臭水体”的帽子后,持续再生水补给维持河道水体功能,与北京市大多数河流类似,具有防洪和景观河道的双重功能,都属于非常规水源补给型河流。基于上述分析,选取北京市特征河流——萧太后河作为研究对象,以北京市背景值作为评价标准,选用地累积指数法、潜在生态危害指数法、内梅罗综合污染指数法评价其沉积物重金属污染风险,并对污染源进行了分析。

1 材料与方法

1.1 研究区域

萧太后河发源于北京城的东南护城河,自西北向东南流动,在通州张家湾汇入凉水河,河道全长约为 22.5 km,流域面积为 102 km²,横跨北京市朝阳区与通州区。2017 年底前,水体水质接近《地表水

环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的Ⅳ类水标准,部分水质指标达到Ⅲ类水标准。尽管萧太后河已经成功摘除了“黑臭水体”的帽子,但是在降雨期间以及部分支流汇合口处的水环境质量仍然不容乐观,河流沉积物淤积情况十分严重,随时都有重返黑臭的可能。

由于萧太后河流域面积较大,基于行政边界将其划分为朝阳段和通州段两部分,朝阳段起于河首、终于通马路口子桥,流域面积为61.7 km²;通州段则起于通马路口子桥、终于凉水河入口,流域面积为40.3 km²。

1.2 样品采集与前处理

基于萧太后河现状水质调研,在全河道内设置21个取样点位(从上游至下游依序编号),其中朝阳段有13个点位、通州段有8个点位,具体采样点布置如图1所示。



图1 采样点位置

Fig.1 Location of sampling points

采用抓泥斗抓取表层约30 cm的沉积物,装入密封袋内存于保温箱中。样品经冷冻干燥后,去除杂质,研磨过100目筛。重金属各指标的检测参照《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005/29)。

1.3 重金属评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法通过对比土壤或沉积物中重金属含量与地球化学背景值的关系,直观反映外源重金属在区域土壤或沉积物中的富集程度,目前已经广泛应用于土壤和重金属污染程度的定量评价。计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / K \times B_n) \quad (1)$$

式中: C_n 为元素 n 在沉积物中的实测含量值,mg/kg; K 为考虑当地岩石差异可能引起的背景值变动而取的系数,通常定为1.5; B_n 为重金属元素 n 的地球化学背景值。

1.3.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法用于评价重金属污染风险以及生态危害,综合反映重金属对生态环境影响潜

力^[12]。计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_0^i} \quad (2)$$

式中: E_r^i 为单因子污染物的生态危害系数; T_r^i 为重金属的毒性响应系数,采用Hakanson制定的标准化重金属毒性响应系数作为评价依据,查阅相关文献得到Zn、Cr、As、Cu、Ni、Pb、Cd、Hg的毒性响应系数分别为1、2、10、5、5、5、30、40; C_r^i 为某一种重金属的污染系数; C_s^i 为底泥中重金属元素的实际浓度; C_0^i 为重金属元素背景值;RI为多种重金属综合潜在生态危害指数。

1.3.3 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法表示沉积物的综合污染程度,目前广泛应用于环境评价研究^[13]。具体计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i)^2 + (\max P_i)^2}{2}} \quad (3)$$

式中: P_i 为指标 i 的单因子指数; P 为内梅罗综合污染指数; n 为指标 i 的个数。

1.3.4 主成分分析法

基于降维原理,在尽可能少损失原有信息的基础上,将多个彼此相关的变量转化成少数彼此独立的综合变量^[1]。本研究采用SPSS21开展主成分分析,通过选取特征根大于1的因子,基于原始变量在各主成分中因子载荷大小,开展重金属来源识别和解析。

2 北京市土壤环境背景值

沉积物重金属风险评价标准直接决定了评价结果的科学性和合理性,标准的选择异常重要。目前大多数关于沉积物中重金属的评价标准,采用研究区域属地的环境背景值。基于此,本研究借助中国知网、Web of Science等数据库,通过背景值的文献引用追溯到最原始的文献,关于北京市土壤环境背景值的调研数据如表1所示。各重金属背景值的调查或实测数据均来自特定背景,为了避免以一概全,选用这些背景值的平均值作为本研究的土壤环境背景值。与现有的中国水系沉积物背景值^[14]相比,本研究所取背景值的大部分重金属元素均比较相近,仅Hg元素所取的背景值与中国沉积物中的背景值相差较大。综上,本研究所选取的背景值具有一定的科学性。

表 1 不同文献来源的北京市土壤环境背景值

Tab.1 Background value of soil environment in Beijing from different literature sources

mg · kg⁻¹

编号	Hg	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	文献来源
1	0.579	7.09	0.119	29.8	18.7	26.8	24.6	57.5	[15]、[16]
2	0.06	7.9	—	51.8	14.3	20.2	—	47.3	[17]
3	0.04	8.1	—	58.1	20	24.1	—	56.7	[17]
4	0.03	8.6	—	59.3	19.8	25.9	—	69	[17]
5	—	8.4	0.1	51.9	8.7	19.0	9.1	40.4	[18]
6	0.4	13	0.3	—	45	—	20	95	[19]
7	0.080 9	8.90	0.124 1	—	26.0	28.4	24.5	79.9	[20]
8	0.20	8.85	0.16	50.18	21.79	24.07	19.55	63.69	本研究

3 结果与讨论

3.1 重金属含量及污染特征

研究区内 Pb、Cd、Cr、As、Cu、Zn、Ni、Hg 含量范围分别为:7.07~24.50、0.12~0.80、24~46、1.6~16.4、14~66.8、47.3~337、15.8~33.3 和 0.06~4.55 mg/kg(见表 2)。总体而言,从各重金属含量的平均值来看,通州段重金属含量约是朝阳段的 1.16 倍,通州段重金属富集情况较朝阳段严重。以本研究设定的北京市土壤背景值来看,Pb、Cr、As 和 Ni 的含量在背景值范围内,其他 4 种重金属的含量大于背景值,其中超标较大的是 Hg 和 Cd,平均值约

是背景值的 3.75 倍和 2.19 倍。研究区域的重金属含量与北京市其他河流相比,不同重金属表现出不同的富集效果。以本研究区域中超标较多的 Hg 和 Cd 为例,本研究的 Hg 含量均大于现有已研究的北京河流^[1,21-24],Cd 含量大于凉水河^[21]和永定河^[24],但小于其他已研究河流^[22-24]。与我国其他河流^[15,25-26]相比,Hg 含量也相对较高,但 Cd 仅高于中国水系沉积物^[15],小于我国其他区域的河流^[25-26]。由上述研究结果可知,萧太后河目前主要存在较高的 Hg 和 Cd 富集,是后续沉积物治理与资源化应关注的重点。

表 2 萧太后河沉积物的重金属含量

Tab.2 Heavy metal contents in sediments of Xiaotaihou River

项 目		Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn	Ni	Hg
朝阳段	最小值/(mg·kg ⁻¹)	7.19	0.12	24	1.6	14.7	54.1	15.8	0.067
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	23.40	0.80	46	16.4	59	269	23.1	2.71
	平均值/(mg·kg ⁻¹)	12.79	0.35	33.73	6.81	26.79	127.72	19.44	0.56
	标准差	4.17	0.21	5.98	4.04	11.82	66.71	2.36	0.68
	变异系数/%	33	61	18	59	44	52	12	122
通州段	最小值/(mg·kg ⁻¹)	7.07	0.16	31.5	2.79	14	47.3	18	0.06
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	24.50	0.60	40.9	13.1	66.8	337	33.3	4.55
	平均值/(mg·kg ⁻¹)	13.91	0.35	36.5	7.49	29.85	126.56	23.36	0.97
	标准差	5.15	0.17	3.58	4.18	15.40	89.39	4.27	1.42
	变异系数/%	37	48	10	56	52	71	18	146
全河段	最小值/(mg·kg ⁻¹)	7.07	0.12	24	1.6	14	47.3	15.8	0.06
	最大值/(mg·kg ⁻¹)	24.50	0.80	46	16.4	66.8	337	33.3	4.55
	平均值/(mg·kg ⁻¹)	13.22	0.35	34.79	7.07	27.96	127.28	20.93	0.75
	标准差	4.60	0.20	5.37	4.10	13.38	76.15	3.75	1.05
	变异系数/%	35.0	56.3	15.0	58.1	48.0	59.8	18.0	146.3
北京市土壤背景值/(mg·kg ⁻¹)		19.55	0.16	50.18	8.85	21.79	63.69	24.07	0.20

变异系数是反映一组数据离散程度的指标^[13],变异系数越大,说明重金属含量的空间离散程度越大,受外界影响越显著,河流沉积物中重金属受人为活动影响较大^[27]。由表 2 可知,就变异系数而言,

Hg、Zn、As 和 Cd 的变异系数最大,分别为 146.3%、59.8%、58.1% 和 56.3%,由于 As 的含量均在背景值范围内,在此不多加分析。由上述可知,Hg、Zn 和 Cd 元素在河流沉积物中含量分布极为不均匀,基于

这3种重金属含量在河流空间变化的分布可知,Hg含量异常高出现在点位1、5、16、20和21,点位1、5和16处于人口比较多的区域,点位20和21分别为玉带河入萧太后河入口处、萧太后河入凉水河入口处;Zn含量异常高同样出现在点位1、5、16、20和21;Cd含量异常高同样出现在点位1、5、16和20。由上述分析可知,人为活动对上述3种重金属富集影响严重。

3.2 地累积指数评价

萧太后河沉积物重金属含量的地累积指数评价结果如图2所示。可知,所研究的8种重金属的平均地累积指数大小排序为 $Cd > Hg > Zn > Cu > Ni > As > Cr > Pb$,其中前3种重金属的平均地累积指数大于0且小于1,从平均值来看萧太后河重金属污染属于轻度污染。从河流所属区域来看,通州段重金属的平均地累积指数基本高于朝阳段和整个河段(Zn除外),通州段是萧太后河重金属污染较严重的区域。从各重金属的地累积指数波动范围来看,Hg、Cd、As和Zn的波动幅度较大,尤其是Hg的地累积指数在 $-2.31 \sim 3.94$ 之间波动,由此说明Hg在某些点位的富集效应十分明显,达到强污染程度,在通州段其波动幅度更大,污染程度更严重,由该重金属引起的污染应引起重视。对于Cd、Zn而言,尽管也存在较大波动,但最大值仍在2以内,即最大值也处于中度污染范围内,相对Hg而言富集效应较小。该研究结论与文献[1]、[22]、[24]的评价结论类似,均表现出Cd和Hg有较大的地累积指数,且均处于中度污染范围内。

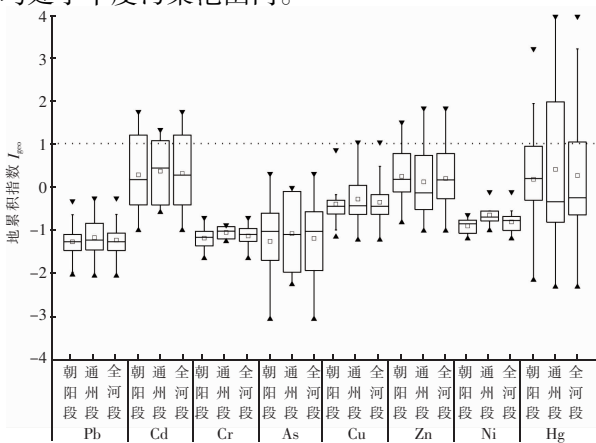


图2 萧太后河沉积物中重金属的地累积指数

Fig. 2 Index of geoaccumulation (I_{geo}) of heavy metals in sediments of Xiaotaihou River

3.3 潜在生态危害指数评价

萧太后河重金属潜在生态危害指数评价结果如图3所示。

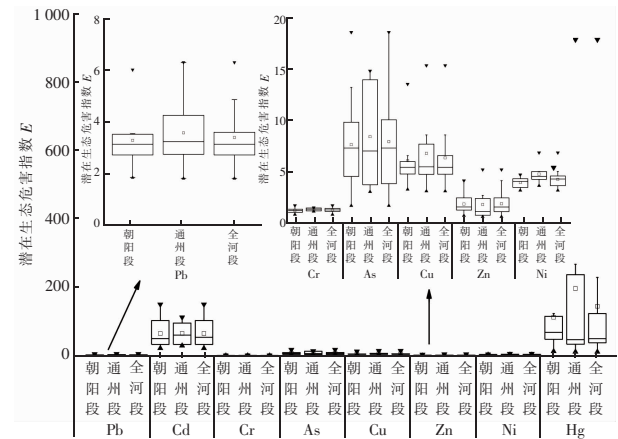


图3 萧太后河沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Fig. 3 Potential ecological risk index of heavy metals in sediments of Xiaotaihou River

从图3可以看出,研究区域中单一污染物的 E 值大小排序为 $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Zn > Cr$,仅前两种重金属的 E 值超过40,其他重金属 E 值均在40以下,整体而言该河流的潜在生态危害较小。对于Hg而言,通州段的 E 值明显高于全河流和朝阳段,达到196,处于很强的生态风险,而整个河流的 E 值为144,处于较强的生态风险。对于Cd而言,通州段的 E 值稍高于全河流和朝阳段,平均值为65.4,处于中等生态风险。对于其他重金属,尽管在不同河段存在一定的差异,同时也存在一定的波动,但其最大值均低于40,表明由这些重金属导致的生态风险较小。

萧太后河各点位的综合生态危害指数表明,点位20和点位2的RI值最大,分别达到1071和707,均处于很强的生态风险。点位20为玉带河入萧太后河入口,结合现场取样情况可以看出,该点位不仅沉积物淤积深度较大,而且沉积物的臭味大、颜色重,因此该点位应该引起高度重视,应该作为优先处置的点位。点位2处于小武基村,由于周边城中村居民生活源不间断输入,造成该点位的沉积物污染状况也不容乐观。对于点位5、16和21,其RI值处于较强生态风险水平,其中点位16和21分别为南大沟入萧太后河以及萧太后河入凉水河的入河口。由上述分析可知,萧太后河各支流汇合口附近的生态风险较其他地方大,应引起重视。

3.4 内梅罗综合污染指数

萧太后河沉积物中重金属含量的内梅罗综合污染指数计算结果如图4所示。可以看出,所有点位的内梅罗综合污染指数均在2.0以内,说明萧太后河整体重金属污染较轻。其中点位5、2、20、16、4、7和19的内梅罗综合污染指数较大,均处于1.0~2.0的范围内,即处于轻度污染范围内,这与上述两种方法的评价结果类似。此外,点位6、10、14、18和21位于警戒线范围,其他点位均处于清洁范围。从取样点位所在区域来看,朝阳段的内梅罗综合污染指数无论是最大值还是大于1.0的点位数量均大于通州段,因此从内梅罗综合污染指数来看,朝阳段的重金属污染较通州段严重,这与上述两种方法的结论不同,这可能与各种评价方法自身特点相关。与其他两种方法相比:内梅罗综合污染指数法在评价过程中完全以现有的检测数据为基础,不需要借助和参考土壤环境背景值,因此该评价方法摒弃了因土壤环境背景值选取不当而造成评价失真的可能;内梅罗综合污染指数法也存在一定的不足,无法评估重金属带来的潜在生态危害等。但是与其他两种方法类似,该方法也能够找出萧太后河中污染较严重的点位,尽管各点位的严重程度有所差异。综上所述,本研究选取的3种评价方法形成优势互补,能够较好地指导重金属污染评价工作的开展。

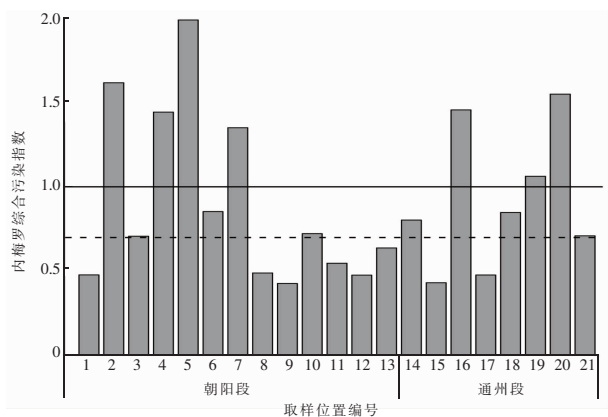


图4 萧太后河沉积物中重金属的内梅罗综合污染指数

Fig. 4 Nemerow comprehensive pollution index of heavy metal in sediments of Xiaotaihou River

4 底泥污染物来源识别

为全面分析萧太后河污染物的来源,本研究选择萧太后河流域内21个底泥采样点的表层底泥中重金属含量作为变量对其进行主成分分析。KMO值和Barlett值分别为0.786和148.1($P < 0.05$),说

明主成分分析法对数据集可以起到很好的分析效果。采用主成分分析提取出前3个主成分,解释了总方差的88.81%,表明这3个主成分可以代表原始数据的大部分信息,进一步对变量进行解释,采用最大方差正交旋转法得到各因子变量的载荷分布,见图5。

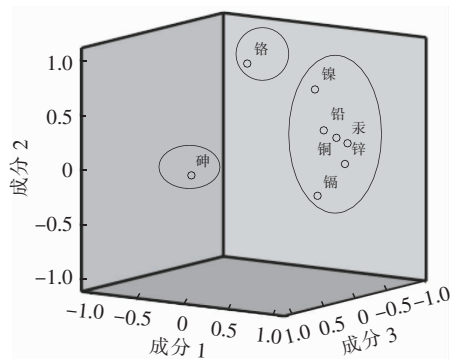


图5 萧太后河沉积物中重金属的因子载荷

Fig. 5 Factor loading plot of heavy metals in sediments of Xiaotaihou River

第一主成分的贡献率为59.47%,在铅、铜、汞、锌、镉和镍等重金属含量上有较高的正载荷。铅、铜、汞、锌和镍的最大值均出现在玉带河与萧太后河汇合口附近,镉的最大值出现在朝阳区西直河村附近。结合现场取样可知,在两河的汇合口附近无论是水质状况还是底泥淤积情况都很严峻,由于该汇合口处于两条河流末端,不排除末端累积效应,对污染源识别有影响。基于上述考虑,选择污染相对严重的点位进行分析。点位1和点位5中上述5种重金属含量较高,这两个点位都为城中村(小武基村和西直河村),因此初步推断铅、铜、汞、锌、镉和镍来源于河道周边居民的生活源。该结论与现有的研究成果^[1]有所区别,这可能与该河道的功能定位相关,萧太后河更多的是城市泄洪型河道,在黑臭水体治理之前,河道中的主要污染物来自于生活源,尽管治理后河道水质得到明显改善,但是由于城中村的存在,仍无法完全避免生活源入河而造成的影响。

第二主成分的贡献率为16.06%,在铬含量上有较高的正载荷。铬的最大值出现在通州段的口子村(点位13)和朱家堡村(点位14)附近。经Pearson相关性分析表明,铬与其他金属元素都不存在显著相关,同时,在含量最高的两个点位均低于北京市土壤环境背景值。因此,第二主成分主要反映自然源对沉积物的影响,这一结论与桃江河的研究结论类似^[13]。

第三主成分的贡献率为13.26%,在砷含量上有较高的正载荷。砷的最大值出现在朝阳段化工路孔井小区(点位5)附近。有研究表明,砷来源于农药、化肥等人类活动^[26],来源于颜料、墨水制造等工业废水及城市污水^[28],采矿作业以及砷含量较高的硫磺铁矿等工业生产^[29]。结合取样点位的历史,一段时间内该区域分布着一些化工类企业,因此将这类污染源定义为工业源。

5 结论

基于北京市特征河流——萧太后河,选用地累积指数法、潜在生态危害指数法和内梅罗综合污染指数法开展河流沉积物中重金属污染评价,评价结果表明:

① 通州段重金属含量约是朝阳段的1.16倍,通州段重金属富集情况较朝阳段严重。Hg、Cd、Zn和Cu的含量高于北京市土壤背景值,其中超标较大的是Hg和Cd,平均值分别约是背景值的3.75倍和2.19倍。

② 基于地累积指数的评价结果表明,8种重金属的平均地累积指数大小排序为Cd>Hg>Zn>Cu>Ni>As>Cr>Pb,其中Hg的地累积指数在-2.31~3.94之间波动,由该重金属引起的污染应引起重视。

③ 基于潜在生态危害指数的评价结果表明,E值大小排序为Hg>Cd>As>Cu>Ni>Pb>Zn>Cr,其中Hg在河流中达到很强的生态风险水平。点位20、2的综合潜在生态危害指数达到很强的生态风险,这些点位应优先安排治理。

④ 基于内梅罗综合污染指数的评价结果表明,萧太后河整体内梅罗综合污染指数较低,其中点位5、2、20、16、4、7和19的内梅罗综合污染指数处于轻度污染范围,其他点位均处于警戒线及以下。

⑤ 主成分分析结果表明,萧太后河重金属污染来源于生活源、自然源和工业源。

参考文献:

[1] 王永刚,伍娟丽,王旭,等.北京市中心城河流表层沉积物重金属污染评价[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):74-80,107.
WANG Yonggang, WU Juanli, WANG Xu, et al. Assessment on heavy metal pollution of the surface sediments from rivers in Beijing central district [J].

South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 74-80, 107 (in Chinese).
[2] ZHAO G M, YE S Y, YUAN H M, et al. Surface sediment properties and heavy metal contamination assessment in river sediments of the Pearl River Delta, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 136: 300-308.
[3] 王阿华.城市建成区黑臭河道治理难点分析及措施探讨[J].中国给水排水, 2019, 35(18): 23-26.
WANG Ahua. Analysis on the difficulties and treatment measures of black-smelly river in urban built-up area [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 23-26 (in Chinese).
[4] 余慧娟,许士国,朱林.水库沉积物资源化利用基础研究——以碧流河水库大堡库区为例[J].农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1977-1985.
YU Huijuan, XU Shiguo, ZHU Lin. Fundamental study on the utilization of sediment in reservoir; a case study of Dapu Area in the Biliuhe Reservoir [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(9): 1977-1985 (in Chinese).
[5] 陈明,蔡青云,徐慧,等.水体沉积物重金属污染风险评估研究进展[J].生态环境学报, 2015, 24(6): 1069-1074.
CHEN Ming, CAI Qingyun, XU Hui, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(6): 1069-1074 (in Chinese).
[6] 廖婉琳,肖龙,张雷,等.新疆西准噶尔早石炭世沉积地层的物源及构造环境[J].地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(3): 485-503.
LIAO Wanlin, XIAO Long, ZHANG Lei, et al. Provenance and tectonic settings of early carboniferous sedimentary strata in western Junggar, Xinjiang [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(3): 485-503 (in Chinese).
[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估[J].环境科学学报, 2013, 33(12): 3324-3333.
QIAO Minmin, JI Hongbing, ZHU Xianfang, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of inflow rivers of Miyun Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(12): 3324-3333 (in Chinese).
[8] 安立会,郑丙辉,张雷,等.渤海湾河口沉积物重金属污染及潜在生态风险评估[J].中国环境科学, 2010,

- 30(5):666-670.
- AN Lihui, ZHENG Binghui, ZHANG Lei, *et al.* Occurrence of heavy metals in surface sediments from estuaries in Bohai Bay and their ecological risk assessment[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(5):666-670(in Chinese).
- [9] 胡国成, 许振成, 彭晓武, 等. 广东长潭水库表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(6):1166-1171.
- HU Guocheng, XU Zhencheng, PENG Xiaowu, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment from Changtan Reservoir, Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6):1166-1171(in Chinese).
- [10] 高博, 李强, 周怀东, 等. 水体沉积物重金属质量基准研究综述[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2013, 11(2):99-106.
- GAO Bo, LI Qiang, ZHOU Huaidong, *et al.* Review of heavy metal quality criteria in river sediments[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2013, 11(2):99-106(in Chinese).
- [11] 霍雪萍. 汾河流域沉积物中重金属分布及潜在风险评价[J]. *太原科技大学学报*, 2017, 38(5):397-404.
- HUO Xueping. Distribution of heavy metals in sediments of Fen River and potential risk evaluation[J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2017, 38(5):397-404(in Chinese).
- [12] 赵胜男, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海沉积物重金属生物活性及环境污染评估[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(3):481-489.
- ZHAO Shengnan, LI Changyou, SHI Xiaohong, *et al.* Bioavailability and environment pollution evaluation of sediments heavy metals in Wuliangsu Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(3):481-489(in Chinese).
- [13] 陈明, 胡兰文, 陶美霞, 等. 桃江河沉积物中重金属污染特征及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(5):1599-1606.
- CHEN Ming, HU Lanwen, TAO Meixia, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and risk assessment in sediments of Taojiang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(5):1599-1606(in Chinese).
- [14] 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]. *水资源与水利工程学报*, 2016, 27(6):26-30, 38.
- QI Yanli, TANG Yongjie, CAI Shubo, *et al.* Comparison of evaluation methods of the freshwater lake sediment pollution: a case study of Beidagang Reservoir[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(6):26-30, 38(in Chinese).
- [15] 史长义, 梁萌, 冯斌. 中国水系沉积物39种元素系列背景值[J]. *地球科学*, 2016, 41(2):234-251.
- SHI Changyi, LIANG Meng, FENG Bin. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. *Earth Science*, 2016, 41(2):234-251(in Chinese).
- [16] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(1):117-122.
- CHEN Tongbin, ZHENG Yuanming, CHEN Huang, *et al.* Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122(in Chinese).
- [17] 夏增禄, 李森照, 李廷芳. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京:气象出版社, 1987.
- XIA Zenglu, LI Senzhao, LI Tingfang. Background Values of Soil Elements and Their Research Methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1987(in Chinese).
- [18] 李廷芳, 刘宝元. 北京地区土壤背景值图的编制[J]. *地理学报*, 1989, 44(1):11-21.
- LI Tingfang, LIU Baoyuan. Mapping of soil background content in Beijing area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(1):11-21(in Chinese).
- [19] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1988.
- LI Jian, ZHENG Chunjiang. Data Manual of Environmental Background Value[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988(in Chinese).
- [20] 黎彤. 地球和地壳的化学元素丰度[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- LI Tong. Abundance of Chemical Elements in Earth and Crust[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990(in Chinese).
- [21] 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.
- China National Environmental Monitoring Centre. Background Values of Soil Elements in China[M].

- Beijing: China Environmental Science Press, 1990 (in Chinese).
- [22] 黎小红,常松,李兆欣,等. 北京市凉水河表层沉积物重金属污染评价[J]. 北京水务,2018(2):34-37.
LI Xiaohong, CHANG Song, LI Zhaoxin, *et al.* Assessment on heavy metal pollution of the surface sediments from Liangshui River of Beijing, China [J]. Beijing Water,2018(2):34-37(in Chinese).
- [23] 朱先芳,唐磊,季宏兵,等. 北京北部水系沉积物中重金属的研究[J]. 环境科学学报,2010,30(12):2553-2562.
ZHU Xianfang, TANG Lei, JI Hongbing, *et al.* Analysis of heavy metals in sediments of the water system in the north of Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010,30(12):2553-2562(in Chinese).
- [24] 吴金莲. 北京城市流域底泥重金属形态特征及其生态风险评价[J]. 水土保持研究,2017,24(5):321-328.
WU Jinlian. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of watershed in Beijing [J]. Research of Soil and Water Conservation,2017,24(5):321-328(in Chinese).
- [25] 何博,赵慧,孟晶,等. 快速城市化区域河网沉积物重金属污染风险评价与管控对策[J]. 环境科学学报,2019,39(8):2771-2779.
HE Bo, ZHAO Hui, MENG Jing, *et al.* Risk assessment and management of heavy metals in river sediments from the rapid urbanization region of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2019,39(8):2771-2779(in Chinese).
- [26] 方明,吴友军,刘红,等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报,2013,33(2):563-569.
FANG Ming, WU Youjun, LIU Hong, *et al.* Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2): 563-569 (in Chinese).
- [27] 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).
- [28] JHA A K, BOSE A, DOWNEY J P. Removal of As(V) and Cr(VI) ions from aqueous solution using a continuous, hybrid field-gradient magnetic separation device[J]. Separation Science and Technology, 2006, 41(15):3297-3312.
- [29] ZHANG H, MA D S, HU X X. Arsenic pollution in groundwater from Hetao Area, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2002, 41(6):638-643.
- 作者简介:胡明(1986-),男,湖北鄂州人,博士,高级工程师,主要从事营养盐和重金属在沉积物-水界面的输移过程研究。
E-mail: mhu2010@sina.com
收稿日期:2020-02-04
修回日期:2020-02-20

(编辑:任莹莹)

积极践行人与自然和谐共生理念
全面加强水生态文明建设