清水河流域崇礼区河段沉积物重金属污染特征及风险评价*

李馨竹[1,2**]，张玉虎[1]，侯丽丽[1]，李叙勇[2]，刘玉洁[3]

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院，北京 100048；2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室，北京 100085；3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室，北京 100101)

摘要：评价河流沉积物重金属污染特征及风险有助于识别河流生态环境健康.本文以清水河流域崇礼区河段6处沉积物重金属(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn)为研究对象，采用地累积指数法、污染负荷指数法、富集系数法和潜在生态风险指数法对其分布特征、污染程度和潜在生态风险进行分析，并探讨重金属污染来源.研究结果表明，沉积物中重金属元素As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn的平均质量分数分别为37.85、0.52、82.28、16.04、403.75、19.77、24.40和50.03 mg/kg.地累积指数法与富集系数法显示，As和Cd重金属污染最为严重，各元素污染程度由低到高排序为Mn、Zn、Ni、Cu、Cr、Pb、Cd、As.污染负荷指数法显示，清水河上游到干流中部、由西到东的支沟重金属污染程度升高.主要重金属污染元素(As、Cd、Pb和Cu)潜在生态风险评价显示沉积物为中等生态风险.

关键词：清水河流域；重金属污染；地累积指数法；污染负荷指数法；富集系数法；潜在生态风险指数法

中图分类号：X82 **DOI**：10.19789/j.1004-9398.2021.01.010

0 引 言

近年来，我国经济快速发展，城市化、工业化及农业现代化进程加速，重金属元素通过各种途径进入其周边河流，主要附着在河流沉积物中.沉积物中重金属质量浓度高会导致生物蓄积，同时可导致饮用水污染[1-6]，这将严重影响经济发展及居民日常生活.目前，已经有诸多学者对河流和湖泊沉积物重金属污染的状况和风险进行了研究和评价，如Sakan等[7]通过分析Tisza河流沉积物的颗粒组成，并与沉积物质量标准值进行对比，来确定河流的重金属污染状况；Varol和Sen[8]对底格里斯河沉积物和水体进行重金属检测，并使用地累积指数法和富集系数法对底格里斯河的重金属污染情况做出综合评价，表明大多数重金属污染均源自人类活动；Segura等[9]对Mapocho河底沉积物中的重金属进行总量分析、形态分析及元素间规律分析，来进行河流的重金属污染评价，并总结了流域Cd和Zn重金属元素分布规律；王海等[10]通过对太湖沉积物中重金属的形态特征及迁移转化规律进行河流重金属污染评价；江敏等[11]以滴水湖和引水河道为研究对象，研究了Cu、Cd、Pb、Cr、Zn、Hg和As重金属在表层沉积物中的潜在生态风险性及空间变化特征，进而对滴水湖的污染状况及污染来源进行分析；陈静生等[12]分析了20条中国东部地区河流悬浮物及沉积物中重金属元素的地理分布规律、存在形态和化学行为，并进行重金属污染评价及风险评估研究.

张家口市清水河属于海河流域永定河水系洋河干流的支流，是崇礼地区重要的水资源.随着2022年冬奥会的日益临近，崇礼地区内基础设施建设项目持续增长，可能会导致清水河流域重金属污染问题加重，这将对生态和经济的可持续发展造成一定程度的威胁.因此，全面、准确地评估张家口市清水河流域的重金属污染状况及生态风险具有十分重要的意义.

基于此，本文对张家口市崇礼区清水河流域6处

收稿日期：2020-04-24

* 国家自然科学基金(41771531)；中国科学院青年创新促进会会员项目(2016049)；北京市科技计划课题(Z201100006720001)

** 通信作者：qinqinzhuzi@126.com

沉积物样点进行采样分析,并使用地累积指数法、污染负荷指数法、富集系数法和潜在生态风险指数法对样品中重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn)的分布特征、污染程度和潜在生态风险进行分析,并探讨重金属的污染来源.这不仅可以了解该区域生态系统的生态状况信息,还有助于开展环境管理并对崇礼地区的建设规划提供一定的指导意义.

1　研究区概况及样品采集

清水河是典型的多泥沙季节性山区河流,流域内山峦起伏,崇礼段由西沟、正沟、东沟和清水河干流中部组成(图1).清水河流域崇礼区海拔800~2 000 m,主干道河道宽度100~150 m,河道坡降为4‰~10‰,纵坡较陡,年平均流量3.4 m^3/s.地带性土壤为砂壤土、砂砾石黄土和亚黏土,山体岩性主要为安山岩、流纹岩和片麻岩,区内除北部外,大部分地区岩石风化强烈.崇礼区所属张家口市年均温度3.2~3.7 ℃,平均降水量455.46 mm.西沟为季节性河流,水土流失严重,故未采样.崇礼附近设有污水处理厂、垃圾处理厂和化工厂等企业,为人民生活提供便利的同时,也存在着一定的环境风险.

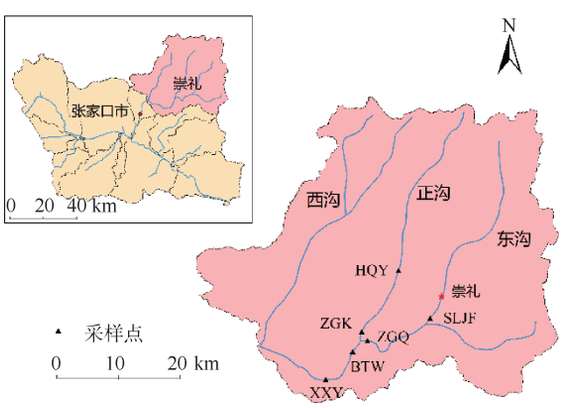


图1　清水河流域崇礼区河段监测点位

注:HQY.红旗营;ZGK.正沟口;SLJF.上两间房;ZGQ.正沟前;BTW.把图湾;XXY.下新营.

在清水河崇礼段的正沟、东沟及干流中部共设置6处采样点,分别为红旗营(HQY)、正沟口(ZGK)、上两间房(SLJF)、正沟前(ZGQ)、把图湾(BTW)和下新营(XXY)(图1).各采样点岸上土地利用类型如表1所示,HQY岸上均为自然土地利用类型,BTW岸上有城镇居民用地,其他采样点岸上均有农田分布.

表1　各采样点岸上土地利用类型

采样点	主要用地类型
HQY	林地、草地
ZGK	农田、林地
SLJF	农田、草地、林地
ZGQ	农田、草地
BTW	农田、草地、城镇居民用地
XXY	农田

本文分别在夏季汛期(7—8月份)和秋季枯水期(9—10月份)对6处采样点河流表层沉积物使用抓斗式采集器进行采集,每个时期每处采样点沿河流向分别采集多个样品,除XXY处秋季采集了4个样品外,其余各处采样点夏、秋季均采集5个样品,共采集59个样品,包括30个夏季样品,29个秋季样品,并将采集的沉积物样品放入聚乙烯自封袋内密封保存,且在袋内外贴上标签,注明采样日期、采样地点、采样编号、样品名称、采样深度和采样者等信息.

2　样品处理和实验分析

样品运输回实验室后,经过冷冻干燥,去除杂质后研磨均匀,过100目筛.采用EPA3052微波消解法对沉积物样品进行前处理[13],然后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定主要重金属(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn)质量分数,具体过程为:(1)称量混合均匀的样品0.100 g,并将其加入到含有减压装置的微波消解罐中;(2)在通风橱中,将(9.0±0.1) mL浓硝酸(HNO_3)和(3.0±0.1) mL浓氢氟酸(HF)加入到消解罐中,密封后,放入微波系统中加热;(3)用CEM Mars6微波消解仪,选择合适的消解程序消解15 min;(4)待反应结束,冷却至室温(25 ℃)后,用真空赶酸系统进行赶酸(赶酸温度为140 ℃),将溶液赶至剩1滴后取出放置于试管架,稍冷后转移至50 mL离心管,用超纯水洗涤消解罐3次,定容至50 mL摇匀待测;(5)将已定容的溶液置于-4 ℃冷藏柜中保存;(6)溶液经0.22 μm水相滤膜过滤后,上机检测;(7)实验过程中采用GSS-3标准物质以及重复样进行质量控制.为保证实验质量及实验结果准确,每次实验均按照国标法严格执行,每批样品都应进行质量控制,增加质量控制样本,进行实验.

3 数据处理

3.1 评价方法

3.1.1 地累积指数法

地累积指数[14](geo-accumulation index,I_{geo})由德国海德堡大学Muller教授提出,此法适用于水环境沉积物中重金属污染程度的定量评价[15-18],其计算公式为

$$I_{geo} = \log_2\left[\frac{C^i}{\left(K \times C_n^i\right)}\right], \tag{1}$$

式中I_{geo}是重金属元素i的地累积指数,C^i是重金属元素i在沉积物中的质量分数,C_n^i是重金属元素i的环境背景值(本文采用河北省土壤元素背景值[19]),K是常数(本文取值为1.5).地累积污染指数分级标准如表2所示.

表2 地累积污染指数分级标准

I_{geo}	分级	污染程度
0	0	无污染
0 ~ ≤1	1	轻-中度污染
1 ~ ≤2	2	中度污染
2 ~ ≤3	3	中-强度污染
3 ~ ≤4	4	强度污染
4 ~ ≤5	5	强-极强度污染
>5	6	极强度污染

3.1.2 污染负荷指数法

污染负荷指数[20](pollution load index,PLI)可以用来高度概括某一区域多种重金属的综合污染程度,此法能分析出多种重金属元素对环境污染的贡献值及其在空间、时间上的沿程变化规律[21-22].计算公式为:

$$I_{PL} = \sqrt[m]{C_{f_1} \times C_{f_2} \times \cdots \times C_{f_m}}, \tag{2}$$

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i}, \tag{3}$$

式中C_f^i为重金属元素i在环境介质中的污染系数;C^i为重金属元素i的质量分数;C_n^i为重金属元素i的环境背景值作为参比值;m为重金属元素的总个数.本方法重金属元素背景值选用河北省土壤元素背景值(同上).PLI的评价标准为:≤1为无污染;>1~2为轻度污染;>2~3为中度污染;>3则达到强度污染.

3.1.3 富集系数法

富集系数[23](enrichment factors,EF)可分析出在人为因素影响下,区域沉积物中重金属的分布特征.此法一般以地壳中含量比较大,且不易受人类活动干扰影响的元素为背景值,一般选用Fe或Al元素.通过对比沉积物微量金属元素i和大量元素Fe或Al标准化比值来判断其富集程度[24-29].计算公式为

$$C_{EF} = \frac{\left(C^i/C_{ref}\right)_{样品}}{\left(B^n/B_{ref}\right)_{基准}}, \tag{4}$$

式中C^i是样品中重金属元素i的质量分数,C_{ref}是校准元素的实测含量值,B^n是环境介质中各重金属元素的背景值,B_{ref}是校准元素在环境介质中的背景值.本文所用的背景值为清水河流域6处采样点,对照土样的重金属平均质量分数.按照Sutherland的标准可划分5个污染程度级别:≤2为无污染-弱污染;>2~5为重度污染;>5~20为显著污染;>20~40为高度污染;>40为极度污染.

3.1.4 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数[30](potential ecological risk assessment,RI)由瑞典科学家Hakanson提出,此法目前多应用于环境风险评价.本方法根据重金属元素性质及其在环境介质中的迁移转化等行为为依据,来对土壤或沉积物中重金属污染进行评价[31],其计算公式为

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i, \tag{5}$$

$$I_r = \sum_{i=1}^{m} E_r^i = \sum_{i=1}^{m} T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^{m} T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i}. \tag{6}$$

式中:E_r^i为重金属i的潜在生态风险系数;T_r^i为重金属i的毒性响应系数;C_f^i为重金属i的污染指数;C^i为表层沉积物重金属i质量分数,C_n^i为河北省土壤元素背景值作为参比值.从"元素丰度原则"和"元素释放度"角度对污染强度进行分级:E_r^i<40或I_r<150为轻微生态风险;40≤E_r^i<80或150≤I_r<300为中等生态风险;80≤E_r^i<160或300≤I_r<600为强生态风险;160≤E_r^i<320或I_r>600为很强生态风险;E_r^i≥320为极强生态风险.

3.2 数据处理与分析

使用Excel 2016处理试验数据,使用ArcGIS 10.2和Origin 2017绘制图形,同时使用SPSS 22.0软件进行相关性分析等.P<0.05为差异有统计学意义.

4 结果与讨论

4.1 沉积物重金属质量分数分析及分布

对清水河流域59个样品沉积物中8种重金属在每处采样点的平均质量分数、标准差及变异系数

进行计算,结果如表3所示.6处采样点中8种重金属As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn平均质量分数分别为37.85、0.52、82.28、16.04、403.75、19.77、24.40和50.03 mg/kg.同时发现HQY和ZGK的重金属As、Cr、Mn、Pb和Zn质量分数低于SLJF、ZGQ、BTW和XXY,且秋季比夏季质量分数略有下降.8种重金属的标准差由低到高排序为Cd、Pb、Ni、Cu、As、Zn、Cr、Mn,变异系数由小到大排序为Pb、As、Mn、Zn、Ni、Cr、Cu、Cd,这说明清水河流域采样点8种重金属的污染分布情况不同.

表3　不同采样点沉积物重金属质量分数

采样点	样品数	不同重金属质量分数/(mg·kg^{-1})							
		As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
$HQY_{夏}$	5	24.73	0.14	70.58	14.11	355.12	20.07	20.87	50.19
$HQY_{秋}$	5	33.95	0.09	91.12	6.37	316.52	10.34	21.47	29.71
$ZGK_{夏}$	5	34.42	0.14	73.88	16.64	401.70	22.73	18.87	52.10
$ZGK_{秋}$	5	39.94	0.13	71.62	16.47	610.57	21.38	17.42	52.54
$SLJF_{夏}$	5	45.91	0.90	122.63	12.03	343.51	16.30	27.96	42.20
$SLJF_{秋}$	5	47.21	0.11	67.65	13.03	403.57	15.21	26.92	43.56
$ZGQ_{夏}$	5	35.19	0.11	129.38	14.68	476.87	20.82	26.96	50.59
$ZGQ_{秋}$	5	47.21	0.11	67.65	13.03	403.57	15.21	26.92	43.56
$BTW_{夏}$	5	31.11	0.15	66.36	24.05	430.58	25.49	30.55	71.51
$BTW_{秋}$	5	42.80	4.10	105.54	24.96	369.9	26.93	24.86	60.49
$XXY_{夏}$	5	34.01	0.14	68.83	21.80	426.92	24.53	26.61	58.23
$XXY_{秋}$	4	37.74	0.15	52.14	15.35	306.12	18.17	23.43	45.65
平均值	59	37.85	0.52	82.28	16.04	403.75	19.77	24.40	50.03
标准差		6.68	1.10	23.38	5.09	78.35	4.69	3.83	10.11
变异系数		0.18	2.12	0.28	0.32	0.19	0.24	0.16	0.20

4.2　沉积物I_{geo}评价

将8种重金属的质量分数及背景值带入公式(1),得出每处采样点沉积物的I_{geo}及所有采样点I_{geo}的平均值,计算结果如表4所示.As在$ZGK_{秋}$、$SLJF_{秋}$和$BTW_{秋}$处样品I_{geo}为1~2,为中度污染(污染级别是2级);其他样品在夏秋两季I_{geo}均为0~1,为轻-中度污染(污染级别1级);Cd元素仅在$BTW_{夏}$处I_{geo}为1~2,为中度污染(污染级别是2级),$ZGQ_{秋}$、$XXY_{秋}$和$BTW_{夏}$处I_{geo}均为0~1,为轻-中度污染(污染级别1级);其余地区$I_{geo}\leq 0$(污染级别0级),基本无污染.Cr元素$SLJF_{夏}$、$ZGQ_{夏}$和$BTW_{秋}$处样品的I_{geo}为0~1之间,为轻-中度污染(污染级别1级),其余采样地区夏秋污染级别均为0级,$I_{geo}\leq 0$,基本无污染.Cu、Mn、Ni、Pb和Zn的地累积指数均为负值,即$I_{geo}\leq 0$(污染级别0级),属于基本无污染.

BTW呈现与ZGK、SLJF和ZGQ相反的污染趋势,夏季基本无污染,秋季为轻-中度污染,这可能与城市交通(机动车尾气排放、机动车轮胎磨损等)、化工企业、金属冶炼、矿产开发、污水处理厂运营等工业生产有关;同时与农业活动中化肥、除草剂和杀虫剂的施用以及垃圾燃烧有关[32-34].

4.3　沉积物PLI评价

将8种重金属(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn)的质量分数及背景值带入公式(2)和(3),得到清水河流域沉积物各采样点污染负荷指数(图2).可知清水河流域沉积物污染呈现出上游轻于干流中部,正沟轻于东沟的趋势,其中上游正沟段基本处于无污染状态,东沟SLJF无污染,但是从ZGQ到XXY均处于轻度污染状态,这可能与北部地势高于南部,同时东沟比正沟城市交通发达、化工企业数量较多有关.另外,HQY段夏季和秋季均处于无污染状态,

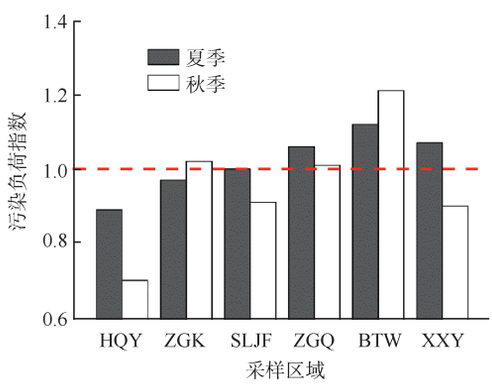


图2　各采样点污染负荷指数对比

表4 不同采样点沉积物重金属元素地累积指数平均值

采样点	样品数	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
$HQY_{夏}$	5	0.25	−0.05	−0.58	−1.24	−1.38	−1.21	−0.63	−1.24
$HQY_{秋}$	5	0.72	−0.72	−0.18	−2.39	−1.53	−2.20	−0.59	−2.02
$ZGK_{夏}$	5	0.75	0	−0.55	−0.99	−1.21	−1.03	−0.78	−1.18
$ZGK_{秋}$	5	1.02	−0.08	−0.74	−0.81	−0.66	−1.07	−0.86	−1.09
$SLJF_{夏}$	5	1.17	0.64	0.26	−1.46	−2.13	−1.52	−0.21	−1.48
$SLJF_{秋}$	5	1.18	−0.40	−0.67	−1.37	−1.19	−1.64	−0.26	−1.44
$ZGQ_{夏}$	5	0.78	−0.33	0.33	−1.17	−0.97	−1.15	−0.26	−1.22
$ZGQ_{秋}$	5	0.84	0.59	−1.00	−0.80	−1.91	−1.18	−0.03	−1.04
$BTW_{夏}$	5	0.57	0.04	−0.63	−0.45	−1.15	−0.86	−0.11	−0.76
$BTW_{秋}$	5	1.04	1.62	0.04	−0.44	−2.56	−0.83	−0.54	−0.98
$XXY_{夏}$	5	0.73	−0.07	−0.61	−0.60	−1.10	−0.92	−0.29	−1.02
$XXY_{秋}$	4	0.89	0.04	−1.00	−1.11	−1.59	−1.36	−0.46	−1.38

ZGQ、XXY秋季优于夏季,污染指数略有下降,SLJF、BTW污染级别基本不变,ZGK夏季劣于秋季,造成这种现象的原因可能与自然和人类活动有关.

4.4 沉积物EF评价

采取Pearson相关性分析对8种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn)进行相关性分析,重金属元素之间的相关关系计算结果如表5所示.Cr与其他重金属元素之间无相关性(P>0.05),因此,选择Cr取代常用的Al或Fe作为背景值[35],B_{ref} =67.5.Cu与Ni、Cu与Zn、Ni与Zn元素间呈正相关且相关性显著(r=0.933、0.819和0.810,P<0.01),这表明所研究重金属的污染源可能相同,地球化学性质相近,经共沉淀或吸附累积等过程,存在于沉积物中.

表5 清水河流域重金属元素之间的相关关系

	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
As	1	0.427**	0.298*	−0.007	0.118	−0.069	0.055	−0.218
Cd	0.427**	1	0.202	0.460**	0.125	0.478**	0.325*	0.202
Cr	0.298*	0.202	1	−0.24	0.004	−0.08	−0.037	−0.238
Cu	−0.007	0.460**	−0.24	1	0.580**	0.933**	0.380**	0.819**
Mn	0.118	0.125	0.004	0.580**	1	0.674**	−0.154	0.487**
Ni	−0.069	0.478**	−0.08	0.933**	0.674**	1	0.258*	0.810**
Pb	0.055	0.325*	−0.037	0.380**	−0.154	0.258*	1	0.486**
Zn	−0.218	0.202	−0.238	0.819**	0.487**	0.810**	0.486**	1

注:*,**分别表示相关系数达到0.05和0.01的显著水平.

各采样点夏秋两季平均EF曲线如图3所示.富集程度最高的2种重金属是As和Cd,其中As在夏季时是重度污染到显著污染,污染级别是2~3级,平均EF在5上下浮动,秋季整体呈现显著污染,除HQY和BTW 2个采样点平均EF略低于5以外,其他地区均>5. 夏季和秋季,As在采样点HQY和ZGK变化趋势相同,但在SLJF、ZGQ、BTW和XXY夏秋2季变化趋势相反,可能与上游地区污水处理厂,矿产开采、冶炼,垃圾处理厂夏秋季节人们工作强度均有关.Cd元素在夏秋两季污染程度主要为无污染-弱污染,仅夏季SLJF和秋季ZGQ 2处采样点为显著污染,考虑清水河流域Cd主要以可还原态为主要赋存形态[36],这可能与河流重金属元素累积迁移有关.其余5种重金属Cu、Mn、Ni、Pb和Zn平均EF均<2,说明此6处采样点Cu、Mn、Ni、Pb和Zn属于无污染-弱污染.

4.5 沉积物RI评价

针对清水河流域重金属污染程度最高的4个元素(As、Cd、Pb和Cu)进行RI评价(表6),重金属元素背景值选用河北省土壤元素背景值,As、Cd、Pb和Cu的T_r^i分别取为10、30、5和5.清水河流域沉积物RI为中等生态风险,各采样点RI由小到大排序为HQY、ZGK、XXY、ZGQ、SLJF、BTW,相比较其他采样地区,HQY段的RI均为最低,这可能与HQY段土地利用类型主要是草地,地势海拔相对高于其他5个地区及该地水流速相对较快有关.此外,从表中

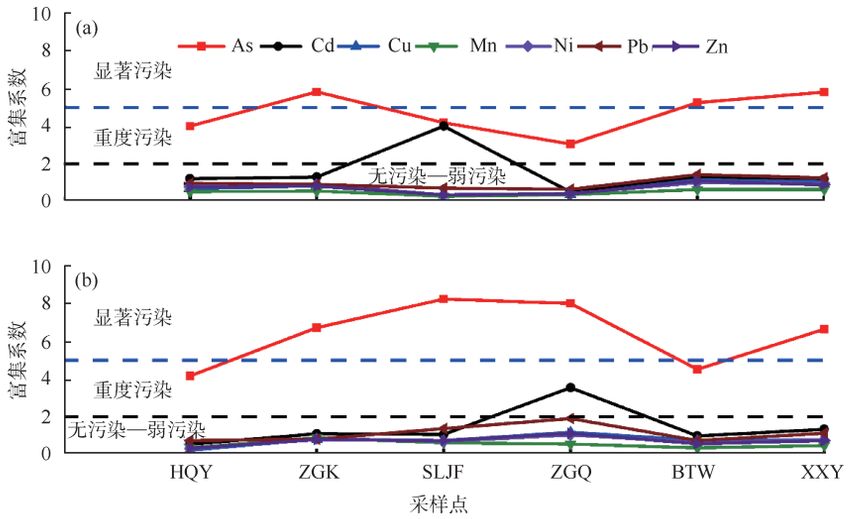


图 3　清水河流域沉积物夏秋两季平均富集系数

(a)夏季;(b)秋季

还观察到沉积物整体呈现出清水河上游正沟段潜在生态风险轻于清水河上游东沟-干流中部.同时水体中沉积物的 RI 从东沟到干流中部有减弱趋势,这可能与该流域地势由东北向西南倾斜有关.BTW 段沉积物的 RI 为 715.84(即属于强生态风险),这可能与 BTW 地处乡道和省道道路交汇处,且区域内含有首都高速环线及加油站和修车厂有关.

表 6　清水河流域沉积物中各重金属生态风险系数(E_r^i)和潜在生态风险指数(I_r)

采样点	样品数	E_r^i				I_r
		As	Cd	Pb	Cu	
HQY	10	21.57	35.11	2.35	4.92	63.95
ZGK	10	27.34	44.68	3.8	4.22	80.04
SLJF	10	34.24	159.57	2.87	6.38	203.06
ZGQ	10	26.39	67.02	3.84	6.81	104.06
BTW	10	27.18	676.6	5.62	6.44	715.84
XXY	9	26.23	44.68	4.34	5.86	81.11
平均值	59	27.16	171.28	3.8	5.77	208.01

5　结　论

通过对清水河流域崇礼区河段沉积物 8 种重金属污染物质量分数的测定,并进行风险评价的研究得出如下结论:清水河流域崇礼区河段沉积物中重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的平均质量分数分别为 37.85、0.52、82.28、16.04、403.75、19.77、24.40 和 50.03 mg/kg.地累积指数法与富集系数法表显示重金属污染最严重的元素是 As 和 Cd,各元素污染程度由低到高排序为 Mn、Zn、Ni、Cu、Cr、Pb、Cd、As.污染负荷指数法显示重金属污染程度整体干流中部高于上游,位于东侧的东沟高于西侧的正沟,这可能与研究区东侧工业开发、农业生产及城市交通有关.主要重金属污染元素(As、Cd、Pb 和 Cu)潜在生态风险评价显示沉积物为中等生态风险,且清水河干流中部潜在风险最高.这可能与其地处道路交汇处及该地区拥有加油站和修车厂有关,因此需要加强此河段的重金属污染控制,以确保清水河流域的水体品质.由于富集系数法所需背景值寻找难度较大,虽用 Cr 代替 Fe/Al 作为背景值,但本研究在该法上仍存在背景值不足的缺点,致使评价结果可能存在一定误差.将在后续研究中寻找更加科学和精确的方法进行评估.

参 考 文 献

[1] SZEFER P, GLASBY G P, PEMPKOWIAK J, et al. Extraction studies of heavy-metal pollutants in surficial sediments from the southern Baltic sea off Poland[J]. Chemical Geology, 1995, 120(1/2): 111-126.

[2] SELVARAJ K, MOHAN V R, SZEFER P. Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India: geochemical and statistical approaches[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 49(3): 174-185.

[3] GLASBY G P, SZEFER P, GELDON J, et al. Heavy-metal pollution of sediments from Szczecin Lagoon and the Gdansk Basin, Poland[J]. Science of the Total Environment, 2004, 330(1/2/3): 249-269.

[4] SMAL H, LIGEZA S, WOJCIKOWSKA-KAPUSTA A, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in bottom sediments of two small dam reservoirs (south-east Poland)[J]. Archives of Environmental Protection, 2015, 41(4): 67-80.

[5] DECENA S C P, ARGUELLES M S, ROBEL L L. Assessing heavy metal contamination in surface sediments in an Urban River in the Philippines[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(5): 1983-1995.

[6] SALAM M A, PAUL S C, SHAARI F I, et al. Geostatistical distribution and contamination status of heavy metals in the sediment of Perak River, Malaysia[J]. Hydrology, 2019, 6(2): 1-19.

[7] SAKAN S M, DORDEVIC D S, MANOJLOVIC D D, et al. Assessment of heavy metal pollutants accumulation in the Tisza river sediments[J]. J Environ Manage, 2009, 90(11): 3382-3390.

[8] VAROL M, SEN B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. Catena, 2012, 92: 1-10.

[9] SEGURA R, ARANCIBIA V, ZUNIGA M C, et al. Distribution of copper, zinc, lead and cadmium concentrations in stream sediments from the Mapocho River in Santiago, Chile[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 91(1/2/3): 71-80.

[10] 王海, 王春霞, 王子健. 太湖表层沉积物中重金属的形态分析[J]. 环境化学, 2002, 21(5): 430-435.

[11] 江敏, 阮慧慧, 梅卫平. 滴水湖沉积物重金属生态风险评价及主成分分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 151-156.

[12] 陈静生, 王飞越, 宋吉杰, 等. 中国东部河流沉积物中重金属含量与沉积物主要性质的关系[J]. 环境化学, 1996, 15(1): 8-14.

[13] U. S. Environmental Protection Agency (1996) Method 3052. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices[M/OL]. [2020-02-04]. https://www. epa. gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3052-microwave-assisted-acid-digestion-siliceous-and-organically-based.

[14] MULLER G. Schwermetalle in den sediments des Rheins-Veran-derngen seitt 1971[J]. Umschan, 1979, 79: 778-783.

[15] AUDRY S, SCHAFER J, BLANC G, et al. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River Reservoirs (France)[J]. Environmental Pollution, 2004, 132(3): 413-426.

[16] ZAHRA A, HASHMI M Z, MALIK R N, et al. Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah-feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan[J]. Sci Total Environ, 2014, 470, 471: 925-933.

[17] KOWALSKA J B, MAZUREK R, GASIOREK M, et al. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination: a review[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, 40(6): 2395-2420.

[18] 乔敏敏, 季宏兵, 朱先芳, 等. 密云水库沉积物中重金属元素分布及形态研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 59-67.

[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: 329-483.

[20] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgolander Meeresunters, 1980, 33: 566-575.

[21] MASHIATULLAH A, CHAUDHARY M Z, AHMAD N, et al. Metal pollution and ecological risk assessment in marine sediments of Karachi Coast, Pakistan[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 1555-1565.

[22] 王婕, 刘桂建, 方婷, 等. 基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(2): 97-103.

[23] SINEX S A, HELZ G R. Regional geochemistry of trace-elements in chesapeake bay sediments[J]. Environmental Geology, 1981, 3(6): 315-323.

[24] PRESLEY B J, TAYLOR R J, Boothe P N. Trace-metal concentrations in sediments of the Eastern Mississippi Bight[J]. Marine Environmental Research, 1992, 33(4): 267-282.

[25] SHARMA V K, RHUDY K B, KOENING R, et al. Metals in sediments of the Upper Laguna Madre[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, 38(12): 1221-1226.

[26] NETO J A B, SMITH B J, MCALLISTER J J. Heavy metal concentrations in surface sediments in a nearshore environment, Jurujuba Sound, Southeast Brazil[J]. Environmental Pollution, 2000, 109(1): 1-9.

[27] MUCHA A P, VASCONCELOS M T S D, BORDALO A A. Macrobenthic community in the Douro estuary: relations with

trace metals and natural sediment characteristics[J]. Environmental Pollution,2003,121(2):169-180.
[28] GUERRA-GARCÍA J M,GARCÍA-GÓMEZ J C. Assessing pollution levels in sediments of a harbour with two opposing entrances:environmental implications[J]. Journal of Environmental Management,2005,77(1):1-11.
[29] OLIVARES-RIEUMONT S,DE LA ROSA D,LIMA L,et al. Assessment of heavy metal levels in Almendares River sediments:Havana City,Cuba[J]. Water Research,2005,39(16):3945-3953.
[30] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution-control: a sedimentological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.
[31] 李莲芳,曾希柏,李国学,等.北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J].环境科学学报,2007,27(2):289-297.
[32] 王铁宇,吕永龙,罗维,等.北京官厅水库周边土壤重金属与农药残留及风险分析[J].生态与农村环境学报,2006,22(4):57-61.
[33] 朱青青,王中良.中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J].地球与环境,2012,40(3):305-313.
[34] 程鹏,李叙勇.洋河流域不同时空水体重金属污染及健康风险评价[J].环境工程学报,2017,11(8):4513-4519.
[35] 游芳,甘定宇,许云海,等.南方某铅锌锰冶炼区周边大气降尘重金属污染水平及风险评价[J].环境污染与防治,2019,41(12):1444-1450.
[36] 王闯,单保庆,唐文忠,等.官厅水库典型入库河流(洋河)表层沉积物重金属赋存形态特征[J].环境科学学报,2017,37(9):3471-3479.

Characteristics and risk assessment of heavy metals pollution in sediments of Chongli District reaches of Qingshui River Basin

LI Xinzhu[1,2], ZHANG Yuhu[1], HOU Lili[1], LI Xuyong[2], LIU Yujie[3]

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048;
2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085; 3. Key Laboratory of Terrestrial Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

Abstract: Assessing on pollution characteristics and risks of heavy metals in river sediments are helpful to identify river ecosystem environment health. This study deals with the degree of heavy metals of As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn in Chongli District reaches of Qingshui River Basin sediments in six sites as the research subject. The geo-accumulation index, pollution load index, enrichment factor and potential ecological risk index were used to assess distribution characteristics, contamination levels, potential ecological risk and possible sources of heavy metals. As the results indicate, the average contents in sediments of As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn heavy metals were 37.85, 0.52, 82.28, 16.04, 403.75, 19.77, 24.40 and 50.03 mg/kg. The analysis of geo-accumulation index and enrichment factor indicated that the heavy metals As and Cd were the main pollution factors and each element of the pollution degree from low to high followed the order: Mn, Zn, Ni, Cu, Cr, Pb, Cd, As. The pollution load index results indicated that overall heavy metals pollution in upstream was lighter than in the middle main stream, and the middle ditch was lighter than the east ditch. Based on the results of potential ecological risk index, for major heavy metal pollution elements As, Cd, Pb and Cu, the ecological risks were moderate risk levels.

Keywords: Qingshui River Basin; heavy metals pollution; geo-accumulation index; pollution load index; enrichment factor; potential ecological risk index

(责任编辑:李拓宇)