

DOI:10.12119/j. yhyj. 202101010

格尔木河表层沉积物重金属污染现状及 潜在生态风险评价

相江芸^{1,2}, 王建萍¹, 何袖辉³, 韩进军^{1,2}, 王二龙^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650111)

摘要:为了解格尔木河环境现状以及格尔木市开发所带来的影响,对格尔木河表层沉积物共计9个采样点的七种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)的浓度分布特征进行了分析,并利用多元统计方法(因子分析、聚类分析及相关性分析)以及不同的污染和生态风险指标进行综合评价,得出以下结论:格尔木河表层沉积物元素Cd主要来源于人类活动输入, I_{geo} 指示元素Cd、Cr在格尔木河下游污染程度达到轻度污染,其它元素无污染, mC_d 指示各采样点的污染程度为无~很低,指标 PLI 指示各采样点的污染程度为低或中等,整个研究区域的 PLI_{zone} 值为1.06,指示研究区域内沉积物的重金属污染程度中等。单元素的潜在风险指数(E_i)指示重金属生态危害程度均很低,各个采样点的潜在生态风险指数(RI)也指示为低等级,但仍要注意人类活动引起的重金属潜在生态危害,尤其是元素Cd的输入。出格尔木市后元素浓度及 I_{geo} 值均逐渐增高, mC_d 、 PLI 及 RI 同样有显著的增长趋势,指示格尔木河受格尔木市人类活动的影响。格尔木河中游(格尔木市区段)相对于格尔木河上游及下游整体均表现为低浓度、低污染及低生态风险,指示格尔木河河道治理对控制重金属污染、改善河流环境及保护生态环境有重要的意义。

关键词:重金属元素; 污染评价; 生态风险评价; 格尔木河; 多元统计分析

中图分类号: X825

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2021)01-0088-11

随着工业化及城市化的加快发展,大量未经处理的污染物进入河流,通过吸附、络合、沉淀等作用,沉积在河流沉积物中。以往研究认为进入河流的重金属有99%沉积到底泥中^[1],同样沉积物中的重金属元素也会通过物理、生物、化学等过程重新释放出来,对生态环境及人类健康构成潜在的威胁^[2-3]。因此,沉积物中的重金属元素常用来指示环境信息^[4],并且相对于河水,沉积物中的重金属元素浓度高、不易受外界干扰并且易于监测^[5]。目前环境最为关注的元素除包括Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等重金属外,也包括类金属元素(如As等),故本文选取As、Cd、Cr、Cu、Ni、

Pb、Zn共七种重金属/类金属元素(统称为重金属元素)为研究对象,并结合元素Al(典型的保守元素,通常为自然来源^[6])进行多元统计分析,以甄别重金属来源。

作为青海省内第二大内陆河,格尔木河对格尔木市的工业、农业及生活用水、达布逊湖的水量及盐类资源补充等均具有重要的意义。研究格尔木河沉积物中重金属元素含量及分布,以及评估格尔木河的污染及生态风险现状,对格尔木市及达布逊盐湖的开发与环境保护具有突出的现实意义。目前格尔木河在水资源方面(尤其是地下水资源)^[7-8]的研究较多,对由重金属污染引起的环

收稿日期:2020-06-24; 修回日期:2020-08-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0406605);国家自然科学基金面上项目(41671521);青海省科技创新平台(2018-ZJ-T10, 2018-ZJ-T03, 2020-ZJ-T03);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0805);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2020-3)

作者简介:相江芸(1988-),女,博士研究生,主要研究方向环境地球化学。

通信作者:王建萍(1972-),女,研究员,博导,主要从事自然资源管理与现代盐湖演化等方面的研究工作。Email: jianpingwang@isl.ac.cn。

境问题涉及较少,多集中于水环境地球化学^[9-11]、水资源开发引起的生态及环境效应^[12-13]等内容。谭红兵等^[9,14]对格尔木河中下游至达布逊湖段进行采样和研究,通过其微量元素含量变化分析了其水环境地球化学特征,认为Pb和Cd出格尔木市后陡增的趋势与当时格尔木市的市政建设及农业活动有关。陈柳竹等^[15]的研究认为,格尔木河流域地表水和地下水中化学组分主要来源于岩石风化淋滤作用。杜仲谋^[16]对格尔木中上游进行系统取样和水化学分析,证实格尔木河水化学变化是自然和人为因素共同作用引起的。李雷明等^[10]采集了格尔木河水样,分析了痕量元素尤其六种重金属(Cu、Zn、Hg、Cd、Cr和Pb)的分布,并对水质现状及生态风险做出评估,认为格尔木河水质处于无污染的理想状态,重金属生态风险为低风险水平。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

格尔木河(图1)位于青海柴达木盆地南缘、格尔木市境内,起源于昆仑山,上游主要有东支的雪水河和西支的昆仑河,向北流经格尔木市并最后汇入达布逊湖,是达布逊湖主要的地表淡水补给源。据格尔木气象站1956~2017年的气象数据资料,格尔木市平均气温为6.4℃,平均降水量为47.9mm,多年平均蒸发量为2092.3mm,河流补给以地下水为主^[14],属于典型的高原内陆盆地干旱气候,主要发育戈壁荒漠、细土平原带、盐沼、湖泊等地貌类型^[17]。近年来格尔木地区山洪频发,尤其是2010年遭遇特大洪水,造成原有的防洪设施严重损毁,河道防洪能力基本丧失。2011年6月格尔木河防洪工程完成规划编制,并于2012年6月开工建设新的防洪工程。

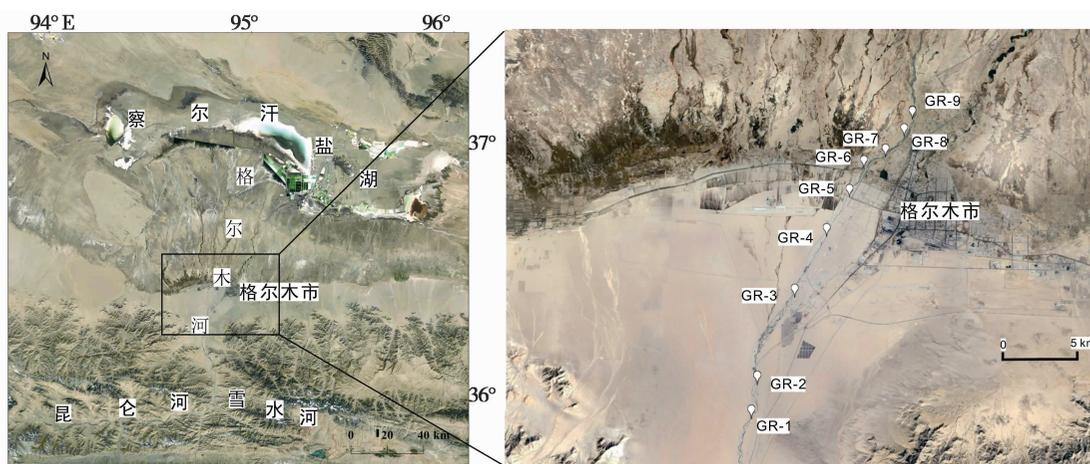


图1 研究区域采样位置图

Fig. 1 The sampling location of the study area

1.2 样品采集和实验方法

本研究于2018年7月沿格尔木河上、中、下游采集表层沉积物样品,共计9个采样点。在采样点GR-1(上游)取柱状沉积物(深度10cm,达到了未受人类活动干扰的深度^[18],以1cm为间隔分割为10个子样品),以沉积物柱底部4个子样品的元素浓度平均值作为背景值^[19]。样品采

用聚乙烯自封袋密封并标记样品编号及位置,运送回实验室,利用冷冻干燥器干燥,取出后称重并采用玛瑙研磨钵碾磨,过200目筛后送至澳实分析检测(广州)有限公司进行微量多元素分析。样品采用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解,蒸至近干后的样品用稀盐酸溶解定容,再用等离子体发射光谱(ICP-AES,产地美国,型号Agilent 7700x)与等离子体质谱(ICP-MS,产地美国,型号Agilent

VISTA) 进行 Al、As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 元素分析,在检测过程中插入空白样、标样(标准物质 GBM908 - 10、MRGeo08、OGGeo08 和 OREAS - 45e)和重复样来控制质量。元素之间的光谱干扰得到矫正后,获取最后的分析结果。在系统设定上,精密度控制相对偏差和准确度控制相对误差均在 10% 以内。

1.3 多元统计分析

多元统计分析(主成分/因子分析、聚类分析及 Pearson 相关性等)常用来分析关联多个对象间的统计规律,从而确定元素间的组合特征并用来解释可能的异常成因,最终通过环境中元素的

组成和分布特征,甄别人为来源和自然来源^[20]。本研究主要采用基于 windows 系统的 IBM 25.0 SPSS 软件来进行因子分析、聚类分析及 Pearson 相关性分析。

1.4 污染及潜在生态风险评价方法

沉积物重金属污染评价通常采用以下几个指标:地累计指数 I_{geo} (Geoaccumulation Index)^[21]、修正过的污染程度 mC_d (modified degree of Contamination)^[22]、污染负荷指数 PLI (Pollution Load Index)^[23]。具体的指标计算公式如下。

$$CF = \frac{C_x^i}{C_b^i} \quad (1)$$

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_x^i}{k \times C_b^i} \quad (2)$$

$$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_x^i}{C_b^i}}{n} \quad (3)$$

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n} \quad (4)$$

$$PLI_{zone} = (PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \times \dots \times PLI_m)^{1/m} \quad (5)$$

其中, C_x^i 和 C_b^i 分别为元素 i 在沉积物中的浓度含量以及背景浓度值; n 为分析的元素数量; m 为采样点的个数; k 是由地质特征引起背景值变动的矫正系数,一般取值 1.5,以削弱岩石圈效应。各个指标均有侧重点和优缺点,一般将几种方法结合起来,以进行更为准确客观地评价^[24]。各个指标对应的污染等级如表 1。

沉积物重金属污染的潜在生态风险通常采用潜在生态风险指数 (RI , potential ecological risk index)^[26] 来进行评价,该指数不仅反映了某一特定环境中的每种污染物的影响,而且也反映了多种污染物的综合影响。 RI 不仅可以评估污染阶段,同时能将生态环境效应与毒物学结合起来以便对污染的潜在危险更好地进行评估。计算公式如下。

表 1 污染评价指标分级

Table 1 The grade of the pollution assessment indicators

$I_{geo}^{[25]}$	等级	污染程度	$mC_d^{[22]}$	污染程度	$PLI^{[23]}$	污染程度
<0	0	无	<1.5	无~很低	≤1	低
0~1	1	轻度	1.5~2	低	1~2	中等
1~2	2	偏中度	2~4	中等	2~5	强
2~3	3	中度	4~8	高	>5	极强
3~4	4	偏重	8~16	很高		
4~5	5	重	16~32	极高		
>5	6	严重	≥32	超高		

$$RI = \sum_{i=1}^n T_x^i \times \frac{C_x^i}{C_b^i} \quad (6)$$

其中, T_x^i 为毒性响应参数($T_x^i = St^i \times \sqrt{5}/\sqrt{BPI}$, BPI 为生物生产指数,一般直接以毒性系数 St^i 来代替 T_x^i),元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的毒性

系数分别为 10、30、2、5、5、5 和 1^[26-28]。其中单个元素 i 的潜在生态风险指数 $E_i = T_x^i \times \frac{C_x^i}{C_b^i}$ 。Hanson^[26] 根据 E_i 和 RI 值的大小,将潜在生态风险指数进行了分级(表2)。

表2 潜在生态风险指数等级

Table 2 The grade of the potential ecological risk index

E_i	单元素污染物生态危害程度	RI	潜在风险等级
<40	低	<150	低
40~80	中等	150~300	中等
80~160	较高	300~600	较高
160~320	高	>600	极高
>320	很高		

2 结果与分析

2.1 元素含量空间分布及特征

格尔木河表层沉积物中元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 的含量统计见表3。对应的含量值分别是 13.7~19.8、0.10~0.15、34~53、17.3~23.6、19.6~25.8、17.8~20.2 及 52~70 $\mu\text{g/g}$, 平均值分别为 15.6、0.12、39、18.9、21.2、18.8、58 $\mu\text{g/g}$, 元素总的含量按大小排列为 Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > As > Cd。表4总结了不同取样位置的含量分布平均值,相对于格尔木河上、下游,格尔木河中游(经过格尔木市的区段)的沉积物重金属浓度最低,与近年来格尔木河道清淤有关,指示河道治理有一定的成效。将本研究的结果与基于1978年开始的区域地球化学调查结果所总结的元素水系沉积物背景值进行对比,元素As的

浓度平均值分别为高寒湖沼景观区水系沉积物和全国水系沉积物背景值的1.20和1.95倍;其它元素含量(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)的平均值均介于高寒湖沼景观区水系沉积物背景值和全国水系沉积物背景值之间。各元素含量分布的变异系数按值的大小分别为Cr(15.60%)、Cd(13.29%)、As(11.81%)、Cu(11.04%)、Ni(9.20%)、Zn(8.71%)、Pb(5.14%)、Al(3.74%),其中元素Cr的变异系数大于15%^[29],意味着中等变异,元素分布不均匀。沿格尔木河上游至下游顺序采集表层沉积物样品,图2列出了格尔木河的重金属元素含量变化,其中采样点GR-1位于上游出口不远处,GR-2位于南山口二级水电站,其后经过砂厂后确定采样点GR-3,从GR-4后开始进入格尔木市区,GR-5位于格尔木河大桥桥底,GR-8后逐渐远离格尔木市区。在离开格尔木市后,元素As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb及Zn含量有明显的增长趋势。

表3 格尔木河表层沉积物元素含量统计

Table 3 The basic statistical parameters of elements concentrations in the surface sediments of the Golmud River $\mu\text{g/g}$

元素	浓度范围	平均值	变异系数/%	高寒湖沼景观区水系沉积物 ^[30]	全国水系沉积物 ^[30]
Al	4.95~5.47	5.14	3.74	/	/
As	13.7~19.8	15.6	11.81	13	8
Cd	0.10~0.15	0.12	13.29	0.13	0.11

续表 3:

元素	浓度范围	平均值	变异系数/%	高寒湖沼景观区水系沉积物 ^[30]	全国水系沉积物 ^[30]
Cr	34 ~ 53	39	15.08	36	54
Cu	17.3 ~ 23.6	18.9	11.04	15	20
Ni	19.6 ~ 25.8	21.2	9.20	19	22
Pb	17.8 ~ 20.2	18.8	5.14	18	22
Zn	52 ~ 70	58	8.71	48	65

单位 $\mu\text{g/g}$, 其中元素 Al 单位%

表 4 格尔木河表层沉积物不同取样位置的元素平均含量

$\mu\text{g/g}$

Table 4 The average elements concentrations in the surface sediments from different sampling sites in the Golmud River

采样位置	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
格尔木河	15.6	0.12	39	18.9	21.2	18.8	58
格尔木河上游	16.3	0.12	39	19.8	21.9	19.7	57
格尔木河中游	14.3	0.11	35	17.6	19.8	18.0	56
格尔木河下游	17.4	0.13	45	21.4	23.9	19.2	65

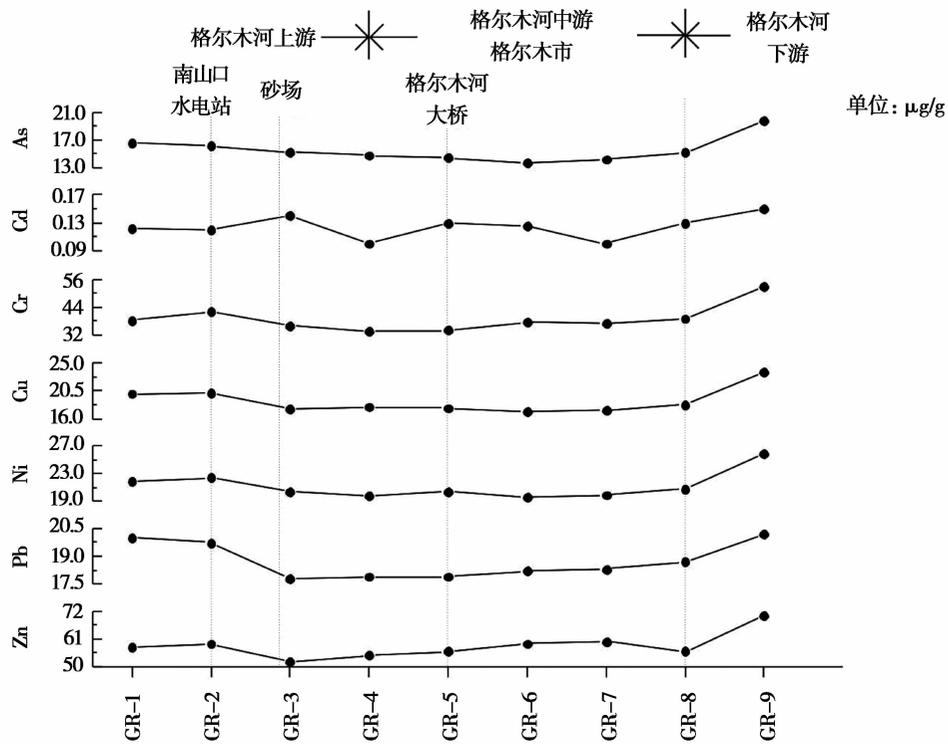


图 2 格尔木河表层沉积物元素空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of elements in the surface sediments of the Golmud River

2.2 多元统计方法

对格尔木河沉积物中元素 Al、As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 进行因子分析,可以提取两个公因子,总方差共解释 91.688 % 的数据信息,其中 PC1 方差贡献率占 69.849 %,特征根值 5.588,PC2 方差贡献率占 21.839 %,特征根值 1.747。表 5 和图 3 给出了旋转后的因子载荷及其空间分布。元素 Al、As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 在 PC1 上表现出较高的载荷,而 Cd 在 PC2 上表现出较高的载荷。同样,对格尔木河沉积物元素 Al、As、Cd、Cr、Cu、

Ni、Pb、Zn 进行聚类分析(谱系图如图 4),可聚为两类,一类为 Cd,另一类为 Al、As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn,与因子分析的结果一致。表 6 中给出了元素间的相关性分析的结果,表明元素 Cd 与其它元素均相关性不显著,而 As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 均与 Al 元素相关性显著,与因子分析及聚类分析结果一致,指示元素 Cd 与其它元素的主要来源不同,认为清淤后的格尔木河沉积物中元素 Al、As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 主要为自然来源,Cd 主要为人类活动输入。

表 5 旋转后的因子载荷

Table 5 The factor loadings of components and that after rotated

元 素	成分矩阵		旋转后的成分矩阵	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Al	0.931	-0.261	0.958	0.135
As	0.968	0.056	0.864	0.439
Cd	0.569	0.808	0.197	0.969
Cr	0.959	0.072	0.849	0.451
Cu	0.989	-0.041	0.922	0.359
Ni	0.989	0.064	0.880	0.456
Pb	0.895	-0.290	0.936	0.093
Zn	0.834	-0.125	0.815	0.220

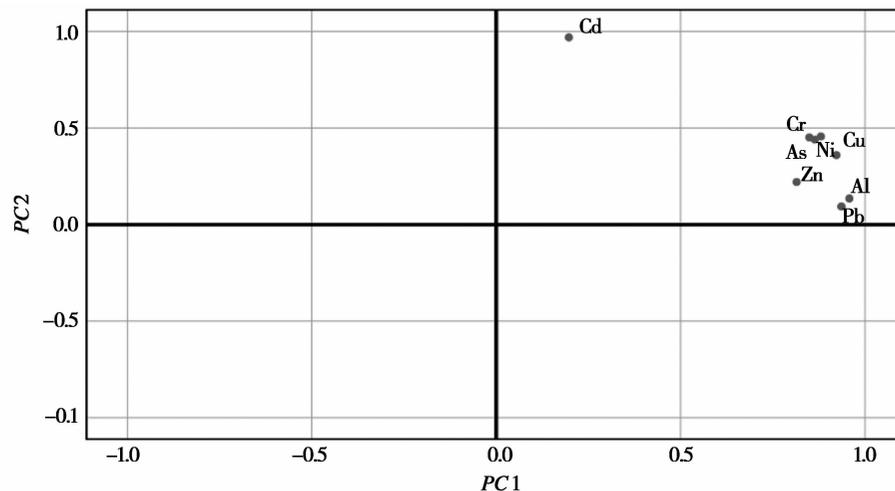


图 3 元素公因子载荷分布图

Fig. 3 The loading plots of the two PCs for the targeted elements

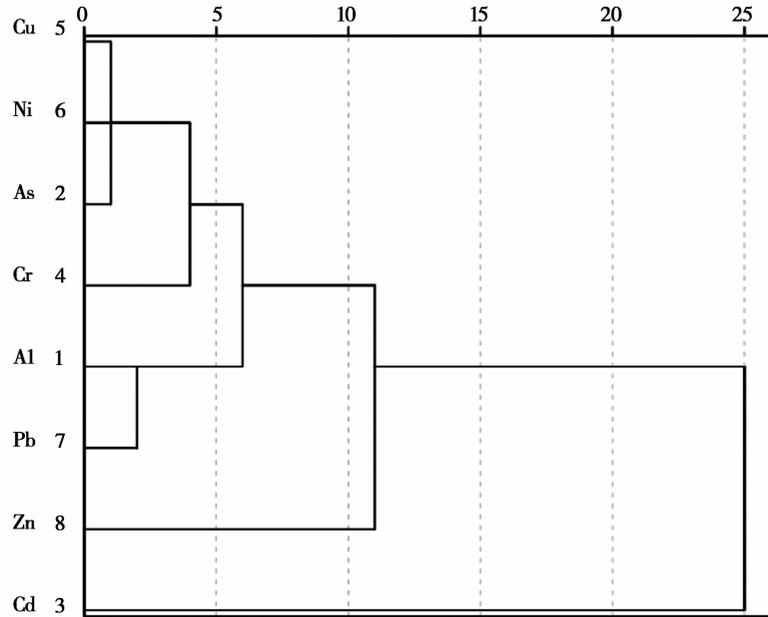


图 4 元素聚类谱系图

Fig. 4 The dendrogram showing clustering of the targeted elements

表 6 格尔木河表层沉积物元素 Pearson 相关性

Table 6 The Pearson correlation coefficients between elements in the surface sediment of the Golmud River

	Al	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Al	1	0.907 **	0.342	0.828 **	0.943 **	0.905 **	0.961 **	0.679 *
As		1	0.582	0.897 **	0.980 **	0.978 **	0.825 **	0.731 *
Cd			1	0.586	0.524	0.604	0.325	0.337
Cr				1	0.920 **	0.943 **	0.795 *	0.894 **
Cu					1	0.988 **	0.884 **	0.796 *
Ni						1	0.842 **	0.806 **
Pb							1	0.688 *
Zn								1

* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著; ** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著

2.3 污染及生态风险评价

应用地累积指数 I_{geo} 对格尔木河表层沉积物的七种元素进行污染评价, 指标计算的结果如表 7。 I_{geo} 结果表明元素 Cd、Cr 局部达到轻度污

染, 均位于格尔木河下游(GR-9, 出格尔木市), 指示元素 Cd 和 Cr 受格尔木市影响, 有一定程度地富集; 其它元素均指示无污染, 但在出格尔木市后 I_{geo} 均有增大的趋势, 反映受格尔木市人类活动的影响。

表7 格尔木河表层沉积物 I_{geo} 指标统计

Table 7 The basic statistical parameters of I_{geo} in the surface sediments of the Golmud River

元素	范围	均值	污染程度
Al	-0.55 ~ -0.41	-0.50	无
As	-0.92 ~ -0.39	-0.74	无
Cd	-0.51 ~ 0.07	-0.21	无~轻度
Cr	-0.58 ~ 0.08	-0.38	无~轻度
Cu	-0.81 ~ -0.36	-0.69	无
Ni	-0.50 ~ -0.11	-0.39	无
Pb	-0.77 ~ -0.58	-0.69	无
Zn	-0.56 ~ -0.14	-0.41	无

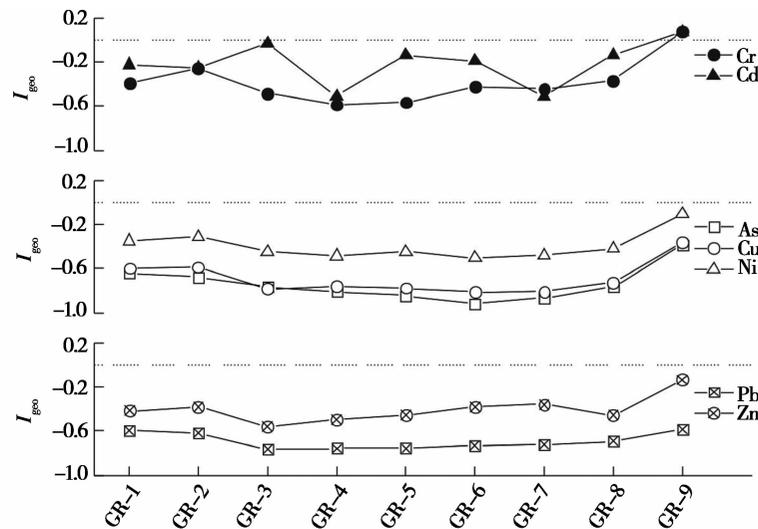


图5 格尔木河沉积物各采样点的 I_{geo} 值分布

Fig. 5 The I_{geo} values of the sediments from the sampling sites in the Golmud River

指标 mC_d 的值的范围变化为 0.97 ~ 1.32, 均值为 1.07, 指示各采样点的污染程度为无~很低; 指标 PLI 的值的范围变化为 0.97 ~ 1.30, 均值为 1.06, 指示各采样点的污染程度为低~中等。各个采样点的 mC_d 和 PLI 变化趋势如图 6, mC_d 和 PLI 的变化趋势一致, 出格尔木市均表现为明显的增长趋势, 相对于格尔木河上游及下游, 格尔木河中游 (格尔木市区范围内) mC_d 和 PLI 的值较低, 同样指示格尔木河河道清淤对改善河流环境有很好的效果。整个研究区域的 PLI_{zone} 值为 1.06, 研究区域内沉积物的重金属元素污染程度中等。

各元素及各采样点的潜在生态风险指数变化

范围及均值如表 8, 单元素的潜在风险指数指示污染物生态危害程度均很低, 其中元素 Cd 的潜在生态风险值相对较高, 相比其它元素高出一个数量级, 由于元素 Cd 的生物累积性及生物可利用性, 会引起较大的生态危害^[31], 故应该重点关注元素 Cd 的输入。RI 值变化如图 6, 各个采样点的潜在生态风险等级也指示为低风险, 但整体在出格尔木市后潜在生态风险显著增大。由于河道清淤, 在格尔木河中游格尔木市区段表现为相对较低的生态风险, 但仍要注意人类活动可能引起的潜在生态危害, 如源于交通、垃圾焚烧以及钢铁制造等的元素 Cd 的输入。

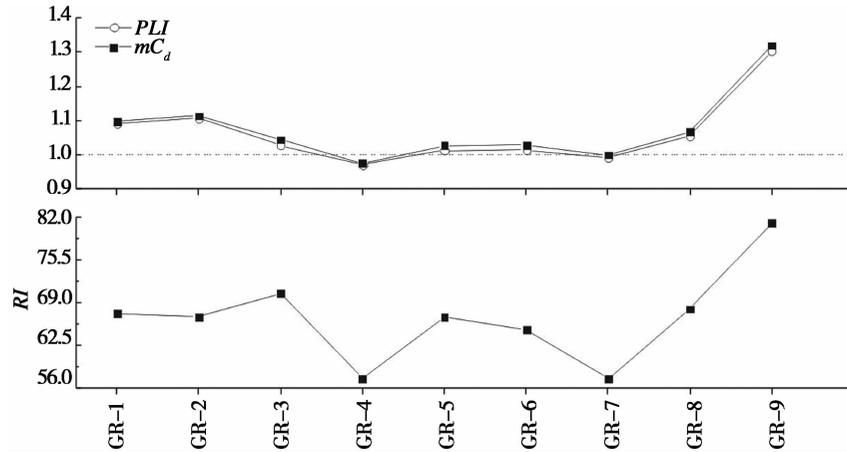
图 6 格尔木河沉积物元素的 mC_d 、 PLI 值及 RI 分布Fig. 6 The mC_d , PLI and RI values of the surface sediments in the Golmud River

表 8 格尔木河表层沉积物生态风险指数统计

Table 8 The basic statistical parameters of E_i and RI in the surface sediments of the Golmud River

元素	范围	平均值	潜在生态风险等级
E_{As}	7.94 ~ 11.48	9.02	低
E_{Cd}	31.58 ~ 47.37	39.19	低
E_{Cr}	2.00 ~ 3.16	2.32	低
E_{Cu}	4.28 ~ 5.85	4.68	低
E_{Ni}	5.29 ~ 6.96	5.73	低
E_{Pb}	4.41 ~ 5.01	4.65	低
E_{Zn}	1.01 ~ 1.37	1.14	低
RI	57.38 ~ 81.20	66.72	低

3 结论

1) 格尔木河表层沉积物中元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 的含量大小分布为 $Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > As > Cd$, 其中 Cr 及 Cd 的变异系数相对较大, 指示元素分布有较大的空间异质性。多元统计分析(因子分析、聚类分析以及相关性分析)结果表明元素 Cd 以人类活动输入为主, 元素 Al、As、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 来源相似, 以自然来源为主。

2) 地累积指数 I_{geo} 指示元素 Cd、Cr 在 GR-9 (格尔木河下游) 采样点的污染程度达到轻度, 其它元素无污染。 mC_d 指示各采样点的污染程度为

无~很低; 指标 PLI 指示各采样点的污染程度为低或中等, 整个研究区域的 PLI_{zone} 值为 1.06, 指示研究区域内沉积物的元素污染程度中等。单元素的潜在风险指数 (E_i) 指示污染物生态危害程度均很低; 各个采样点的潜在生态风险指数 (RI) 也指示为低等级, 仍要注意人类活动引起的潜在生态危害, 尤其是元素 Cd 的输入。

3) 格尔木河下游元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 的浓度及 I_{geo} 值逐渐增高, mC_d 、 PLI 及 RI 同样在出格尔木市后有显著的增长趋势, 指示格尔木河受格尔木市人类活动的影响, 元素逐渐富集并导致潜在生态风险逐渐增大。

4) 格尔木河中游(格尔木市区段)相对于格尔木河上游及下游整体均表现为低浓度、低污染

及低生态风险,指示格尔木河河道治理对控制重金属污染、改善河流环境及保护生态环境有很好的效果。

参考文献:

- [1] Salomons W and Stigliani W M. Biogeochemistry of pollutants in soils and sediments [M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 352.
- [2] Calmano W, Ahlf W, Förstner U. Exchange of heavy metals between sediment components and water [C]. //Broekart J A C, Güçer Ş, Adams F, eds. Metal Speciation in the Environment: NATO ASI series, Vol. G 23. Berlin: Springer-Verlag, 1990: 503 - 522.
- [3] 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.
- [4] Zhu Y J, Lu X W, Yang L N, 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.
- [5] 赵德文. 巢湖表层沉积物汞污染风险评估及磁学诊断[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [6] Kang X M, Song J M, Yuan H M, et al. Speciation of heavy metals in different grain sizes of Jiaozhou Bay sediments: Bioavailability, ecological risk assessment and source analysis on a centennial timescale [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 143(sep.): 296 - 306.
- [7] 王宇航. 格尔木河流域地下水化学演化规律和水循环模式 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [8] 谢世杰. 格尔木新城地下水环境影响效应评价 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [9] 谭红兵. 格尔木河流域水环境地球化学研究 [D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2000.
- [10] 李雷明, 武君, 徐娟, 等. 格尔木河水质现状及生态风险评估 [J]. *盐湖研究*, 2019, 27(1): 89 - 98.
- [11] 赵鹏. 格尔木河冲洪积扇地下水盐污染特征及其机理分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [12] 刘志明, 王贵玲, 杨振京, 等. 格尔木至诺木洪地区水资源开发利用及其环境效应分析 [J]. *地理学与国土研究*, 2001, (3): 68 - 72.
- [13] 宋寿鹏. 格尔木地区水资源开发的环境效应分析 [D]. 西安: 西北大学, 2006.
- [14] 谭红兵, 于升松, 刘兴起. 格尔木河中下游微量元素地球化学变化特征 [J]. *长春科技大学学报*, 2001, (3): 273 - 278.
- [15] 陈柳竹, 马腾, 马杰, 等. 柴达木盆地盐湖物质来源识别 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(4): 101 - 107.
- [16] 杜仲谋. 格尔木河中上游水化学变化及其影响因素 [J]. *盐湖研究*, 2018, 26(1): 25 - 31.
- [17] 张绪财, 金晓媚, 朱晓倩, 等. 格尔木河流域植被指数时空分布及其影响因素研究 [J]. *现代地质*, 2019, 33(2): 461 - 468.
- [18] Xiang J Y, Wang J P, Chen L, et al. Distribution, source identification, and assessment of potentially toxic elements in the sediment core from the estuarine region of the Golmud River to the Qarhan Salt Lake, Qinghai, China [J]. *Minerals*, 2019, 9(9).
- [19] Li Y, Zhou S L, Zhu Q, et al. One-century sedimentary record of heavy metal pollution in western Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240(sep.): 709 - 716.
- [20] 何凯灵. 典型工业化区域(邯郸市与珠江三角洲)土壤重金属空间分布特征及风险评估研究 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2017.
- [21] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1969, 2(3): 109 - 118.
- [22] Abraham G M S, Parker R J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2008, 136: 227 - 238.
- [23] Tomlinson D L, Wilson J G, Hartis C R, et al. Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. *Helgoländer Meeresunters*, 1980, 33: 566 - 575.
- [24] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法 [J]. *海洋地质动态*, 2005, (8): 31 - 36.
- [25] 方小红, 彭渤, 张坤, 等. 沅江入湖河床沉积物重金属污染演化地球化学分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(7): 2586 - 2598.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975 - 1001.
- [27] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 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.
- [28] 张鑫. 安徽铜陵矿区重金属元素释放迁移地球化学特征及其环境效应研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [29] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 490 - 496.
- [30] 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.
- [31] Wang H F, Wu Q M, Hu W Y, et al. Using multi-medium factors analysis to assess heavy metal health risks along the Yangtze River in Nanjing, Southeast China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243(PT. B): 1047 - 1056.

Pollution Status and Potential Ecological Risk Assessment of the Heavy Metals in the Surface Sediments of the Golmud River

XIANG Jiang-yun^{1,2}, WANG Jian-ping¹, HE Xiu-hui³, HAN Jin-jun^{1,2}, WANG Er-long^{1,2}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;

3. Kunming Natural Resources Integrated Survey Center, China Geological Survey, Kunming, 650111, China)

Abstract: In order to study the pollution status of the Golmud River and the possible influence of the Golmud city on the river environment, the distribution characteristics of seven kinds of heavy metal (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) concentrations in the surface sediments of the Golmud River were discussed. Also the multivariate statistical method, including the factor analysis, cluster analysis and Pearson correlation coefficient and different pollution and ecological risk index are conducted for comprehensive evaluation. The conclusions are as follows: the Cd in the surface sediments of the Golmud River is mainly from human activities input; the indices of the I_{geo} indicate elements Cd and Cr in the downstream of the Golmud River of Golmud City are at mild pollution with other elements pollution-free; the indices of the mC_d instruct that pollution levels are free-low; the indices of PLI suggest that each sampling site is at low or medium pollution level; the PLI_{zone} value was 1.06, indicating the element pollution of sediments in the whole area is medium. The potential risk index (E_i) of a single element indicates that the degree of ecological damage of pollutants is very low, and the RI of each sampling point also indicates low level. However, attentions should still be paid to the potential ecological damage caused by human activities, especially the input of element Cd. After leaving Golmud city, the concentrations and the I_{geo} values of the elements gradually increased, while mC_d , PLI and RI also showed a prominent increasing trend, indicating that Golmud River was affected by the human activities from the Golmud City. Compared with the upper and lower reaches of the Golmud River, the urban section of Golmud River shows low concentrations, low pollution and low ecological risk, indicating that river treatment of the Golmud River is of great significance for controlling heavy metal pollution, improving river environment and ecological environment protection.

Key words: Heavy metal; Pollution assessment; Ecological risk assessment; Golmud River; Multivariate statistical analysis