

张吉友. 酒泉市北大河沉积物重金属污染、来源及生态风险评估[J]. 净水技术, 2024, 43(9): 151-157, 181.

ZHANG J Y. Assessment of contamination, source analysis and ecological risk for heavy metals in Beida River sediments of Jiuquan City[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(9): 151-157, 181.

## 酒泉市北大河沉积物重金属污染、来源及生态风险评估

张吉友\*

(肃州区城市供排水服务中心, 甘肃酒泉 735000)

**摘要** 文章采集河西地区典型的干旱区绿洲酒泉市肃州区的北大河表层沉积物, 基于相关性分析、主成分分析、地累积指数和潜在生态风险指数, 研究了沉积物中 5 种重金属 (As、Cd、Cr、Pb 和 Hg) 的污染特征、来源和生态风险。结果表明: 各重金属浓度在嘉峪关与酒泉交界和银达泉湖交界较低, 污水厂汇流区和鸳鸯池入口较高; Cd、Cr、Pb 和 Hg 主要来源于部分工业生产和污水厂, As 为自然来源; 河道全域均不存在 As 和 Cr 的污染, 但存在轻微的 Cd、Hg 和 Pb 污染, 其中 Cd 和 Hg 具有较大的潜在生态风险, 在河道污染防治过程中应注重 Cd 和 Hg 的控制。研究揭示了酒泉市北大河沉积物的重金属污染状况, 主要的污染物类型及其来源, 为河道沉积物治理提供了重点和方向。

**关键词** 沉积物 重金属 污染 来源 生态风险

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)09-0151-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.09.019

### Assessment of Contamination, Source Analysis and Ecological Risk for Heavy Metals in Beida River Sediments of Jiuquan City

ZHANG Jiyu\*

(Suzhou District Urban Water Supply and Drainage Service Center, Jiuquan 735000, China)

**Abstract** In this paper, surface sediments of the Beida River in Suzhou District, Jiuquan, a typical arid zone oasis in the west of the river was collected, and the pollution characteristics, sources and ecological risks of five heavy metals (As, Cd, Cr, Pb and Hg) in the sediments based on correlation analysis, principal component analysis, geo-accumulation index and potential ecological risk index was studied. The results showed that the concentration of each heavy metal was lower at the junction of Jiayuguan and Jiuquan and the junction of Yinda and Quanh, and higher at the confluence area of the wastewater plant and the entrance of Yuanyang Pond. Cd, Cr, Pb and Hg were mainly from some industrial production and WWTP, and As was a natural source. There was no As and Cr pollution in the whole area of the river, but there were slight Cd, Hg and Pb pollution, among which Cd and Hg had greater potential ecological risk, and the control of Cd and Hg should be paid attention to in the process of river pollution prevention and control. This study reveals the status of heavy metal pollution in the sediments of the Beida River in Jiuquan, the main types of pollutants and their sources, and provides a focus and direction for river sediment management.

**Keywords** sediment heavy metal pollution source ecological risk

水环境中的金属污染物因其毒性、富集性、持久性和累积性而引起学者们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。在人口快速增长和城市高速发展的背景下, 随着居民的密集活动和工农业生产的不断推进, 世界各地的河流中汇入了大量的污染物, 尤其是重金属<sup>[3-4]</sup>。污染

生境中的重金属残留可在微生物、水生动植物中积累, 不但危及水生生态安全, 还会通过食物链进入人体, 造成健康问题<sup>[5-6]</sup>。自然或人为源向河流系统排放的重金属在输运过程中主要分布在液相与河床沉积物之中<sup>[7]</sup>, 在吸附、水解和沉淀的作用下, 小部分游离金属离子在液相中溶解, 其他多以沉积物的形式在底泥中富集<sup>[8]</sup>, 但是沉积物在适当的条件下又会经过物理、化学和生物过程, 以“源”的形式释

[收稿日期] 2023-05-09

[通信作者] 张吉友(1973—), 男, 主要从事市政给排水、污水处理技术研究, E-mail: 215953196@qq.com.

放重金属至水体中<sup>[9]</sup>。由于水体和悬浮物的排放波动和低停留时间等特点,仅对水中重金属的测量研究是不充分的,而沉积物具有较长的滞留时间,对其进行研究具有重要意义。

酒泉市肃州区是河西地区典型的干旱区绿洲和重要的生态屏障,并且是中国西北重要的农产品生产基地,内部矿产资源丰富,拥有大量依靠有色金属、石油和钢铁等资源建立的重工业企业,在丝绸之路经济带和西部大开发的背景下,工农业快速发展造成资源大量消耗的同时,也可能造成大量的水体沉积物重金属污染。研究表明,中国河流沉积物均受到不同程度的重金属污染,例如京津冀河流底泥受 Cd、Zn 和 Cr 影响较大,且存在较强的 Cd 生态风险<sup>[10]</sup>;长江中游干流沉积物中 Cd 的污染较为严重<sup>[11]</sup>;黄河兰州段城市河道 Cr 和 Ni 的综合污染程度较高<sup>[12]</sup>。北大河是肃州区人民生活和工农业生产重要的水源,发源于祁连山脉,靠降水和冰雪融水补给,对区域绿洲保持具有重要的作用。在历史粗犷的工农业生产下,北大河长期接纳工业废水和生活污水,其中工业废水主要来自于电力、石化、冶金、有色、建材等领域,一方面,生产废水来自企业生产过程中的“跑冒滴漏”,另一方面,则是污水处理未达标、相关环保设施建设落后,导致部分生产废水直排,进而引起河流重金属污染<sup>[13]</sup>。虽然近些年对北大河进行了强力的整治,但水中的重金属因其难降解的特点,将在沉积物中大量累积,而北大河作为酒泉市肃州区农业用水的主要来源,最终进入绿洲灌溉渠道,将会导致农作物重金属富集,进而威胁人体健康。因此,研究北大河沉积物中的重金属污染状况对于准确了解酒泉市肃州区重金属污染程度,预测其对生态系统的影响具有重要的理论和现实意义。有关水系沉积物重金属污染的研究关注的重金属主要包括 Cu、Pb、Zn、Fe、Mn、As、Ni、Cr、Cd 和 Hg 等。大量研究<sup>[14]</sup>揭示,我国水体沉积物中 Cd 污染最为严重,大多达到了中度/重度污染水平,其次是 Hg、As 和 Pb,肃州区电力、石化、冶金、有色、建材等行业是这些元素的潜在来源。此外,生态环境部在《关于进一步加强重金属污染防治的意见》中提出,重点防控的重金属污染物是 Pb、Hg、Cr、Cd、As 和 Tl,其中对 Pb、Hg、Cr、Cd 和 As 5 种重金属污染物排放量实施总量控制。因此,本研究通过测定分析北大河沉积物中 As、Cd、Cr、Pb 和 Hg 的浓度,了解重

金属的污染特征和潜在的生态风险,以期为城市河道重金属污染防治提供科学的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区和样品采集

酒泉市肃州区位于祁连山北麓、东接肃南县和高台县,西临嘉峪关市,北抵金塔县,属河西走廊平原“扇顶-扇裙-扇缘”三阶地带,城市主要集中在北大河上游的冲积平原上(图 1),在发展中形成了工业园、产业园等 33 个分布大量电力、石化、机械制造等相关企业。该地属典型的大陆性气候,年均气温为 7.3℃,年均降水量为 87.7 mm,且主要集中在夏季,年均日照时数为 3 033.4 h,年均风速为 2.4 m/s,具有气候干燥、降水少、蒸发强烈日照长、冬冷夏热温差大、秋凉春旱多风沙的特点。地貌平坦开阔,地势平缓,略呈倾斜,西南高,东北低,河流自西向东汇入黑河。

本研究于 2022 年 9 月在北大河上游、中上游、中下游和下游设置 4 个点位,每个点位分别采集 3 个平行样品,其中上游选择主城区以西的酒泉和嘉峪关的交界处,中上游选择主城区东部的银达镇和泉湖镇的交界处,中下游选择远离主城区的肃州区污水厂汇流处,下游选择鸳鸯池水库的入口处。河流长约为 40 km,采样间距为 10~15 km。利用彼得森采泥器(PSC-1/16)采集各区域 0~15 cm 的表层沉积物,剔除其中的石粒、植物残体等杂物,并装入带有编号的聚乙烯自封袋中,带回实验室,经风干后平铺在牛皮纸上,用木棒碾碎并过 100 目筛后进行元素测定。研究区概况及采样点如图 1 所示。

### 1.2 样品测定

测定样品所需的溶液均用超纯水(CSR-1-10, > 18.2 M $\Omega$ ·cm)进行配制。取 0.5 g 样品于聚四氟乙烯容器中,并加入 10 mL HNO<sub>3</sub>-HCl 混合溶液(5.55% HNO<sub>3</sub> 和 16.75% HCl),封闭后,使用自动消解仪(DigestLinc ST60)进行消解,然后将消解后的样品转移到聚四氟乙烯量筒中,摇匀后冷却 20 min,用超纯水稀释至 50 mL,静置 2 h,过滤后进行测定<sup>[15]</sup>。参考《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定》(GB/T 22105.1—2008)和《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定》(GB/T 22105.2—2008),采用原子荧光光度计

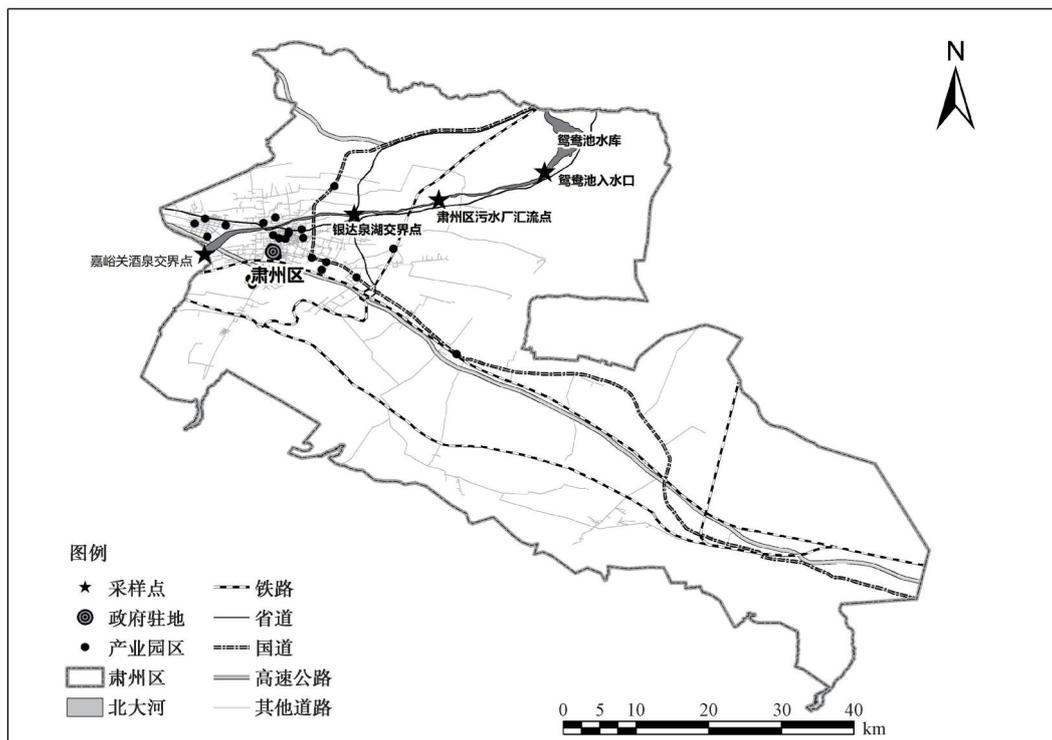


图1 研究区概况及采样点

Fig. 1 Overview of Study Area and Sampling Points

(AFS-930)测定 Hg 和 As 的浓度;参考《土壤中重金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(DB65/T 3974—2017),采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS X series II)测定 Pb、Cd 和 Cr 的浓度,为减小测量误差,对所有样品均进行 3 次测量,并采用沉积物中重金属质控样(QCM-CW001)对所采用方法的精密度进行了检验,相对标准偏差均在 20% 以下。

### 1.3 数据分析

(1)地累积指数是研究土壤中重金属污染水平的定量指标,如式(1)<sup>[16]</sup>。

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_i}{1.5 \times B_i} \right) \quad (1)$$

其中: $I_{geo}$ ——地累积指数;

$C_i$ ——土壤中元素  $i$  的测定质量分数, mg/kg;

$B_i$ ——同一元素的本底值,mg/kg。

目前我国没有沉积物重金属评价的标准值,所以,本研究采用甘肃省土壤重金属背景值作为本底值进行计算,As、Cd、Cr、Pb 和 Hg 的土壤背景值分别为 12.60、0.116、70.20、0.020 和 18.80 mg/kg<sup>[17]</sup>,式(1)中 1.5 为校正系数。

(2)潜在生态风险指数由 Hakanson 最早提出,包含了生态和环境综合效应以及元素毒性,综合考虑了各种重金属的污染状况<sup>[18]</sup>,计算如式(2)。

$$R = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_r^i) = \sum_{i=1}^n \left( T_r^i \times \frac{C_i}{B_i} \right) \quad (2)$$

其中: $R$  和  $E_r^i$ ——综合和单因子潜在生态风险指数;

$T_r^i$ ——元素  $i$  的毒性系数;

$C_r^i$ ——元素  $i$  的污染指数;

$B_i$ ——兰州市土壤重金属背景值,mg/kg。

根据 Hakanson 的报告,As、Cd、Cr、Pb 和 Hg 的毒性系数分别为 10、30、2、40 和 5。

(3)采用 Pearson 相关分析(0.01 显著性水平)检验被测变量之间的相关程度,并表征其来源的共性。使用标准化数据集进行主成分分析,利用主成分分析提取各指标的公因子方差,然后比较样品之间的组成格局,确定各因素的影响<sup>[19]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 描述性统计

北大河沉积物中重金属浓度特征如表 1 所示。

与甘肃省土壤背景值相比,北大河沉积物中各重金属均存在一定的富集,且超出背景值样品的比例分别为 Pb(100.00%)>Cd(95.83%)>Hg(54.17%)>As(20.83%)>Cr(4.167%),说明北大河沉积物中均存在 Pb 的富集,大部分沉积物存在 Cd 和 Hg 的富集,少部分沉积物存在 As 和 Cr 的富集。另外各金属的平均质量分数依次为 Cr(57.75 mg/kg)>Pb(26.63 mg/kg)>As(11.26 mg/kg)>Cd(0.224 mg/kg)>Hg(0.046 mg/kg),但各重金属平均浓度超标倍数与其平均浓度却不成正比,依次为 Hg(2.30)>Cd(1.93)>Pb(1.42)>As(0.89)>Cr(0.82),这表明不能依靠重金属浓度来确定土壤污染,他们取决于超

出背景值的大小。

变异系数(CV)反应监测指标含量在不同采样点的分散程度,由于受人类活动的影响不同,各指标的空间分布差异较大,其中 CV 越大,离散度越高<sup>[20]</sup>。根据常用的分类标准,样本的变异程度一般可分为 3 个等级:弱变异(CV<10%)、中等变异(10%≤CV≤100%)和强变异(CV>100%)<sup>[21]</sup>。由表 1 可知,除 Cr 外,各指标的变异程度均在中等变异以上,表明沉积物中重金属(Cr 除外)浓度具有高度的离散性和空间分布的不均匀性,而 Cr 浓度的空间分布较为均匀。

表 1 沉积物中重金属描述性统计

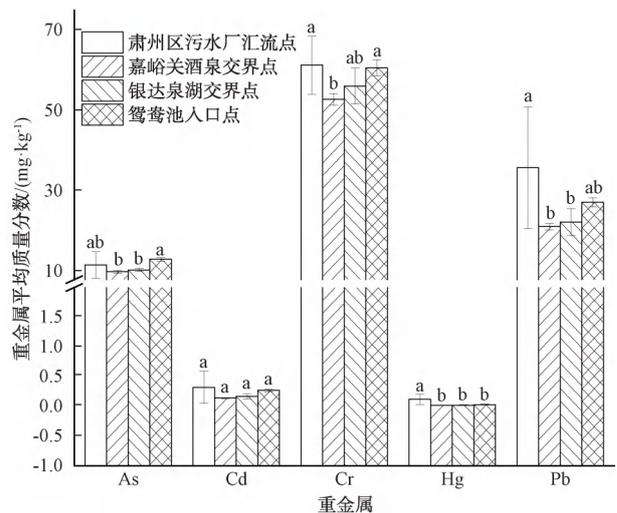
Tab. 1 Descriptive Statistics of Heavy Metals in Sediments

重金属	最大值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	最小值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	平均值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	标准差	CV	甘肃省环境背景 值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	超标比例	平均值 超标倍数
As	18.40	8.46	11.26	2.077	18.44%	12.60	20.83%	0.89
Cd	0.864	0.095	0.224	0.156	69.58%	0.116	95.83%	1.93
Cr	73.90	51.20	57.75	5.617	9.726%	70.20	4.167%	0.82
Hg	0.249	0.008	0.046	0.061	132.8%	0.020	54.17%	2.30
Pb	66.00	19.50	26.63	9.697	36.41%	18.80	100.00%	1.42

## 2.2 重金属浓度分布特征

北大河不同区域沉积物重金属的平均浓度如图 2 所示,可看出重金属具有较明显的空间分布特征。重金属 As 在鸳鸯池入口点的浓度最高,其次为肃州区污水厂汇流点,银达泉湖交界点和嘉峪关酒泉交界点最低,且银达泉湖交界和嘉峪关酒泉交界两个区域 As 的浓度与鸳鸯池入口点相比均具有显著的差异性;重金属 Cd 在 4 个区域均没有显著的差异性,表明 4 个区域 Cd 的浓度比较相近;重金属 Cr 的浓度表现为肃州区污水厂汇流点>鸳鸯池入口点>银达泉湖交界点>嘉峪关酒泉交界点,其中肃州区污水厂汇流点和鸳鸯池入口点 Cr 的浓度差异性不显著,但两者均与嘉峪关酒泉交界点具有显著的差异;肃州区污水厂汇流点 Hg 的浓度最高,且与其他 3 个区域均呈现显著的差异性,而后三者之间差异性均不显著;Pb 的浓度大小排序与 Cr 相同,其中银达泉湖交界点和嘉峪关酒泉交界点两个区域的 Pb 浓度与肃州区污水厂汇流点具有显著的差异性。总的来说,研究区各重金属浓度在中下游和下游较高,上游和中上游较低,下游主要受到污水处理厂的影响,

说明污水处理厂虽然能去除大量的有机污染物,但对于重金属的去除效率较低,从而增加了对下游重金属浓度的贡献度。



注:a 和 b 表示差异性,相同字母表示无显著差异,不同字母表示差异性显著。

图 2 不同样点沉积物重金属的平均浓度

Fig. 2 Average Concentrations of Heavy Metals in Open-Ditch Sediments of Different Regions

### 2.3 重金属来源分析

相关性分析可以说明重金属的共源性,相关系数越接近 1,两个变量越有可能来自同一污染源<sup>[22]</sup>。北大河沉积物中重金属浓度的相关系数如表 2 所示,Cd、Cr、Hg 和 Pb 之间具有极显著的相关性( $P < 0.01$ ),相关系数在 0.727~0.924,表明它们可能来自同一污染源,而 As 与其他任何重金属之间的相关性均不显著,说明 As 可能有单独的来源。

表 2 沉积物中重金属浓度的相关系数

Tab. 2 Correlation Coefficient of Heavy Metals Concentration in Sediments

重金属	As	Cd	Cr	Hg	Pb
As	1.000	-	-	-	-
Cd	0.018	1.000	-	-	-
Cr	0.236	0.804**	1.000	-	-
Hg	0.231	0.818**	0.727**	1.000	-
Pb	0.201	0.924**	0.780**	0.921**	1.000

注:\*\*表示在置信度为 0.01 时,相关性是显著的。

主成分分析通过降低变量的维度,更有效地展现变量间细微的关系<sup>[23]</sup>,为进一步探究研究区排污沟渠沉积物中重金属的来源,对重金属进行主成分分析(表 3)。运用 KMO 和 Bartlett 球形度来检验主成分分析数据的适用性,本研究的 KMO 和 Bartlett 球形度值分别为 0.701 和 0,说明主成分分析是可靠的<sup>[24]</sup>。利用特征值 $>1$ ,经过最大正交旋转方差后共提取 2 个主成分(PC1 和 PC2),累积方差贡献率为

表 3 沉积物中重金属主成分分析结果

Tab. 3 Results of Principal Component Analysis of Heavy Metals in Sediments

成分	初始特征值			重金属	各项的负载	
	总计	方差百分比	累积		PC1	PC2
1	3.537	70.743%	70.743%	As	0.251	0.621
2	1.944	19.884%	90.627%	Cd	0.937	0.262
3	0.203	6.068%	96.695%	Cr	0.886	-0.021
4	0.131	2.611%	99.305%	Hg	0.931	0.249
5	0.035	0.695%	100.000%	Pb	0.972	0.179

### 2.4 重金属污染及风险特征

地质累积指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征,而且可以用来区分人类活动对环境的影响。Förstner 等<sup>[26]</sup>根据地累积指数的值,把重金属划分为 7 个污染等级,分别为 0 级(无污染, $I_{geo} < 0$ )、1 级(轻度污染, $0 \leq I_{geo} < 1$ )、2 级(偏中度污染, $1 \leq I_{geo} < 2$ )、3 级(中度污染, $2 \leq I_{geo} < 3$ )、4 级(偏重度污染,

90.627%,表明这两个主成分可以代表原始数据的大部分信息。

PC1 的方差贡献率为 70.743%,其中 Cd、Cr、Hg 和 Pb 的浓度具有较高的负载(0.886~0.972),说明这 4 种重金属可能来自于同一类污染源,这与相关性分析的结果相符(表 2)。本研究中的工业企业主要分布于主城区内部,从重金属的浓度分布可知,Cd、Cr、Hg 和 Pb 重金属的高浓度地区均分布在中下游和下游区域,上游的嘉峪关酒泉交界点重金属浓度最低,说明主城区内部的电力设备、钢铁制造等工业企业在城市发展前期的无序排放,导致大量含重金属废水汇入北大河,在河流的运移作用下,于中下游和下游沉降富集。另外,虽然污水处理厂对重金属有一定的处理效果,但尾水中残余痕量重金属的长期累积也是造成中下游和下游沉积物污染的重要因素。因此,PC1 可归因于工业污染和污水厂排放;PC2 的方差贡献率为 19.884%,主要表现在重金属 As 具有较高的负载(0.621),通过相关性分析可知 As 与其他各重金属均不存在显著的相关性(表 2),并且 As 的平均浓度低于研究区土壤环境背景值,虽然 As 浓度属于中等变异强度,但其变异系数相对较小,接近弱变异水平,该变异可能由采样点地质条件影响导致,所以可认为 PC2 主要代表自然源的影响,该结论与肃州区邻近的嘉峪关市研究结果一致<sup>[25]</sup>。

$3 \leq I_{geo} < 4$ )、5 级(重度污染, $4 \leq I_{geo} < 5$ )和 6 级(极重度污染, $I_{geo} \geq 5$ )。兰州市排污沟渠沉积物中重金属的污染水平如表 4 所示。

表 4 中地累积指数的平均值表明,除了 Cd 属于轻度污染以外,其他重金属均无污染,所以样品中 As 和 Cr 的地累积指数均小于 0,表明北大河沉积物没有被 As 和 Cr 污染。但 Cd、Hg 和 Pb 的指数最大

表 4 沉积物中重金属的地累积指数

Tab. 4 Geo-Accumulation Index of Heavy Metals in Sediments

项目	As	Cd	Cr	Hg	Pb
最大值	-0.039	2.312	-0.511	3.053	1.227
最小值	-1.160	-0.873	-1.040	-1.907	-0.532
平均值	-0.768	0.162	-0.873	-0.069	-0.147

值均大于 1,说明一些地区存在该 3 种重金属造成的沉积物污染,并且污染较严重的地区存在 Pb 的偏中度污染,Cd 的中度污染和 Hg 的偏重度污染。

为了进一步说明重金属的污染特征,对不同区域沉积物重金属的地累积指数进行了分析,如图 3 所示。As 和 Cr 在任何区域均不存在污染,Cd 的污染主要分布在污水厂汇流点和鸳鸯池入口点,Hg 和 Pb 的污染均分布在污水厂汇流点,表明研究区重金属的污染主要与工业和污水厂排放有关,在后期的环境保护政策中应着重于工业区的治理,加强污水厂对重金属的处理。

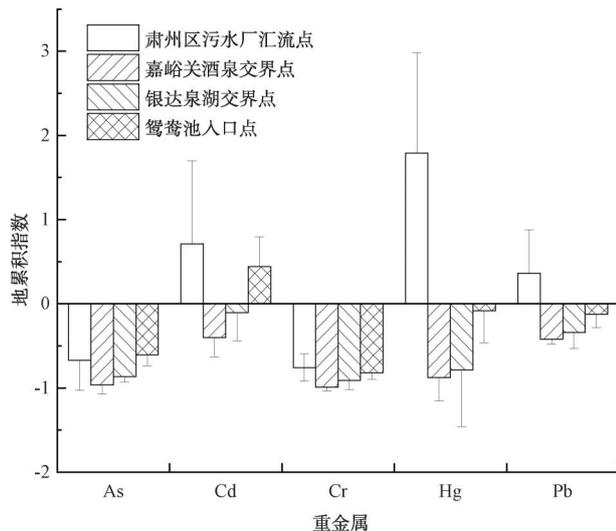


图 3 不同样点沉积物重金属的地累积指数

Fig. 3 Geo-Accumulation Index of Heavy Metals in Sediments of Different Regions

表 5 沉积物中重金属的潜在生态风险

Tab. 5 Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Sediments

类别	重金属	最小值	最大值	平均值	各风险等级样品比例				
					低风险	中等风险	较强风险	强风险	极强风险
单因子潜在生态风险	As	6.714	14.60	8.939	100.00%	0.00	0.00	0.00	0.00
	Cd	24.57	223.4	57.92	41.67%	50.00%	4.17%	4.17%	0.00
	Cr	1.469	2.105	1.645	100.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00
	Hg	16.00	498.0	92.17	37.50%	41.67%	8.33%	4.17%	8.33%
	Pb	5.186	17.55	7.083	100.00%	0.00	0.00	0.00	0.00
综合潜在生态风险	-	67.51	748.0	167.8	70.83%	16.67%	-	8.33%	4.17%

由于重金属毒性的不同,其所造成的潜在生态风险也有差异,北大河沉积物中重金属的潜在生态风险如表 5 所示。根据 Hakanson 的报告,单因子潜在生态风险 ( $E_r^i$ ) 共分为 5 个等级,分别为低风险 ( $E_r^i < 40$ )、中等风险 ( $40 \leq E_r^i < 80$ )、较强风险 ( $80 \leq E_r^i < 160$ )、强风险 ( $160 \leq E_r^i < 320$ ) 和极强风险 ( $E_r^i \geq 320$ );综合潜在生态风险共分为 4 个等级,分别为低风险 ( $R < 150$ )、中等风险 ( $150 \leq R < 300$ )、强风险 ( $300 \leq R < 600$ ) 和极强风险 ( $R \geq 600$ )。对于综合潜在生态风险,样品占各风险等级的比例表现为低风险 (70.83%) > 中等风险 (16.67%) > 强风险 (8.33%) > 极强风险 (4.17%),总体上只有 29.17% 的样品属于中等以上风险,另外 70.83% 的样品属于低风险,说明研究区排污沟渠沉积物总体生态风险较小,但也不排除部分地区存在较强的风险。平均单因子潜在生态风险指数依次为 Hg (92.17) > Cd (57.92) > As (8.939) > Pb (7.083) > Cr (1.645),其中 As、Cr 和 Pb 均为低风险,而 Cd 和 Hg 具有中等以上风险的样品比例分别为 58.34% 和 62.50%,并且 8.33% 的样品中 Hg 具有极强的潜在生态风险,表明研究区沉积物中可能对生态造成较大危害的重金属为 Cd 和 Hg,虽然研究区 Cd 和 Hg 的浓度较小(表 1),但两者较大的毒性系数决定了其较强的生态风险<sup>[27]</sup>。

### 3 结论

本研究为酒泉市肃州区北大河沉积物中的重金属的分布、来源和污染水平提供了相关信息。沉积物中重金属主要分布在肃州区污水厂汇流所在的中下游和鸳鸯池水库入口所在的下游,长期的工业行为和污水厂排放是重金属的主要人为污染源;As、Cr 和 Pb 超过背景值水平较低,生态风险较小,Cd 和 Hg 的污染程度较高,具有较大的潜在生态风险,在

河道污染治理方面应该引起重视。随着肃州区的快速发展,必须考虑并实施必要的河流污染控制措施,例如加强监测与评估、强化工业企业管理、鼓励技术创新与应用、推动产业结构调整、加强法律法规建设、加强宣传与教育等。该研究为肃州区河道修复相关政策决策提供了科学依据以及数据支撑。在今后的研究中,应进一步研究更多的污染物,例如 Ni、Cu、Zn、多氯联苯(PCB)、多环芳烃(PAH)等,以确保全面了解河流沉积物污染及其对生态环境和人类健康的风险。

### 参考文献

- [ 1 ] KLUSKA M, JABŁOŃSKA J. Variability and heavy metal pollution levels in water and bottom sediments of the Liwiec and Muchawka Rivers (Poland)[J]. *Water*, 2023, 15(15): 2833. DOI: 10.3390/w15152833.
- [ 2 ] SZARA M, BARAN A, KLIMKOWICZ-PAWLAS A, et al. Ecotoxicological characteristics and ecological risk assessment of trace elements in the bottom sediments of the Rożnów reservoir (Poland) [J]. *Ecotoxicology*, 2020, 29: 45 - 57. DOI: 10.1007/s10646-019-02137-8.
- [ 3 ] SOOMRO S E H, SHI X T, GUO J L, et al. Anthropocentric perspective on climatic variability, potentially toxic elements, and health risk assessment in the Mansehra district: A case study of the Kunhar River, Pakistan[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2023, 14(4): 1132-1146.
- [ 4 ] XIE Y F, HUO X D, HU C H, et al. Contamination, ecological risk and source apportionment of heavy metals in the surface sediments in the Hailar River, the upper source of the Erguna River between China and Russia[J]. *Sustainability*, 2023, 15(4): 3655. DOI: 10.3390/su15043655.
- [ 5 ] 贾磊, 刘文涛, 唐得昊, 等. 三亚湾及周边海域表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(12): 22-31.
- JIA L, LIU W T, TANG D H, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Sanya Bay and its surrounding waters[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(12): 22-31.
- [ 6 ] CHEN Z W, XU J, YANG F, et al. Comprehensive monitoring and ecological risk assessment of heavy metals in soil and surface water of Chishui River Basin in Upper reaches of the Yangtze River [J]. *Water*, 2023, 15(11): 2069. DOI: 10.3390/w15112069.
- [ 7 ] BRIFFA J, SINAGRA E, BLUNDELL R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans[J]. *Heliyon*, 2020, 6(9): e04691. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691.
- [ 8 ] DEBNATH A, SINGH P K, SHARMAY C, et al. Metallic contamination of global river sediments and latest developments for their remediation[J]. *Journal of Environmental Management*. 2021, 298: 113378. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113378.
- [ 9 ] XIE H L, YANG X, XU J Q, et al. Heavy metals pollution and potential ecological health risk assessment in the Yangtze River reaches[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(2): 109489. DOI: 10.1016/j.jece.2023.109489.
- [10] 华德伟, 布多, 肖方景, 等. 京津冀地区主要水系沉积物中重金属污染状况研究[J]. *应用化工*, 2023, 52(11): 3124-3128.
- HUA D W, BU D, XIAO F J, et al. Research on heavy metal pollution in the main water sediment in Beijing - Tianjin - Hebei region[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(11): 3124-3128.
- [11] 郭杰, 王珂, 于琪, 等. 长江中游近岸表层沉积物重金属污染特征分析及风险评估[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(11): 4625-4636.
- GUO J, WANG K, YU Q, et al. Pollution characteristics of the heavy metals and their potential ecological risk assessment in nearshore sediments of the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(11): 4625 - 4636.
- [12] 李军, 焦亮, 李开明, 等. 黄河兰州段城市河道重金属污染特征及健康风险评价[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(15): 81-88.
- LI J, JIAO L, LI K M, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metal contamination from urban river surface sediments in the Lanzhou reach of the Yellow River[J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(15): 81-88.
- [13] 张文, 刘晓燕, 向国立, 等. 酒泉市工业污染现状及治理措施研究[J]. *资源节约与环保*, 2021, 36(2): 83-84.
- ZHANG W, LIU X Y, XIANG G L, et al. Study on the current situation of industrial pollution in Jiuquan city and its control measures [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2021, 36(2): 83-84.
- [14] 范成新, 刘敏, 王圣瑞, 等. 近 20 年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2021, 36(4): 346-374.
- FAN C X, LIU M, WANG S R, et al. Research progress and prospect of sediment environment and pollution control in China in recent 20 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(4): 346-374.
- [15] KORMOKER T, PROSHAD R, ISLAM S, et al. Toxic metals in agricultural soils near the industrial areas of Bangladesh: Ecological and human health risk assessment [J]. *Toxin Reviews*, 2019, 40(4): 1135-1154.
- [16] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geology, Environmental Science*, 1969, 2(3): 108-118.

(下转第 181 页)

安: 西安工程大学, 2018.

WANG Y G. Research and design of sewage treatment process in an industrial park in Tongchuan City [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.

[5] 刘林富. 多模式 A<sup>2</sup>/O+高效沉淀+V 型滤池用于地下式污水

厂[J]. 中国给水排水, 2023, 39(10): 64-65.

LIU L F. Multi-mode A<sup>2</sup>/O+ high-efficiency sedimentation+V-type filter for underground sewage plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(10): 64-65.

(上接第 157 页)

[17] 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.

[18] HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

[19] DUAN K X, ZHAO B W, ZHANG S L, et al. Contamination characteristics, source analysis, and ecological risk assessment of toxic metals and metalloids in agricultural soil in Yuzhong, China [J]. Journal of Environmental Quality, 2021, 50: 122-133. DOI: 10.1002/jeq2.20163.

[20] 李玉峰, 赵中秋, 祝培甜, 等. 基于土壤重金属污染风险管控的土壤质量评价: 以某县市级市为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 207-215.

LI Y F, ZHAO Z Q, ZHU P T, et al. Soil quality assessment based on risk control of heavy metal pollution in soil: A case study of an industrial city in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 207-215.

[21] WANG F T, HUANG C S, CHEN Z H, et al. Distribution, ecological risk assessment, and bioavailability of cadmium in soil from nansha, pearl river delta, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(19): 3637. DOI: 10.3390/ijerph16193637.

[22] 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 M, HU L W, TAO M X, et al. Heavy metal pollution

characteristics and risk assessment in sediments of Taojing River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(5): 1599-1606.

[23] 杨子鹏, 肖荣波, 陈玉萍, 等. 华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4823-4835.

YANG Z P, XIAO R B, CHEN Y P, et al. Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in South China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4823-4835.

[24] VAROL M, ŞEN 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. DOI: 10.1016/j.catena.2011.11.011.

[25] 杨博, 张波, 闫培洁, 等. 甘肃省嘉峪关市酿酒葡萄园土壤重金属空间分布特征及风险评价[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(6): 777-786.

YANG B, ZHANG B, YAN P J, et al. Spatial distribution characteristics and risk assessment of soil heavy metals in wine-making vineyard in Jiayuguan City, Gansu Province [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2021, 47(6): 777-786.

[26] FÖRSTNER U, AHLF W, CALMANO W, et al. Sediment criteria development [M]. Berlin: Springer, 1990.

[27] HU B F, ZHAO R Y, CHEN S C, et al. Heavy metal pollution delineation based on uncertainty in a coastal industrial city in the Yangtze River Delta, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(4): 710. DOI: 10.3390/ijerph15040710.