

西藏拉萨河重金属含量特征与健康风险评估

秦欢欢^{1,2}, 高柏², 孙占学^{1,2}

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
2. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了解拉萨河水中重金属含量, 2017年7月对拉萨河中下游和堆龙曲支流16个采样点进行水样采集, 测量As、Cd、Cu、Zn和Mn等5种重金属浓度, 评价了这些重金属经饮水途径导致的人体健康风险。水样测试结果表明: 研究区水体中5种重金属浓度大小为Zn > Mn > Cu > As > Cd, 未超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的限值, 在水质上也符合I和II类标准(依据来自《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002))。As、Cu和Mn高浓度主要分布在下游, 而Zn高浓度主要分布在中游。健康风险评估结果表明: 化学致癌物重金属的健康风险远大于非致癌物重金属, As是拉萨河水中主要的化学致癌物重金属, 贡献了71.1%的致癌风险。拉萨河重金属经饮水途径导致的健康风险总体处于可接受的安全水平。对于相同的健康风险而言, 儿童比成人更易受到影响, 其承受的危害会更大, 因而需要采取更严厉的监管措施来管理儿童饮水问题。

关键词: 健康风险评估; 重金属; 化学致癌物; 非致癌物; 拉萨河

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)04-0001-07

Concentration properties and health risk assessment of heavy metals in Lhasa River, Tibet

QIN Huanhuan^{1,2}, GAO Bai², SUN Zhanxue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to investigate the content of heavy metals in Lhasa River, water samples were collected from 16 sampling points in the middle and lower reaches of Lhasa River and the Duilonqu Tributary in July 2017. The concentrations of five heavy metals (As, Cd, Cu, Zn and Mn) were measured and the human health risks caused by these heavy metals via drinking water were evaluated. The results show that the concentrations of these five heavy metals in the water of the study area are as follows: Zn > Mn > Cu > As > Cd, which do not exceed the limit values specified in the Standards for Drinking Water Quality (GB 5749—2022). Moreover, the water quality of the study area also meets class I and II standards (according to the Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838—2002)). The high concentrations of As, Cu and Mn are primarily distributed in the lower reaches of Lhasa River and those of Zn are in the middle reaches. The results of health risk assessment show that the health risk of chemical carcinogen heavy metals is much greater than that of non-carcinogen heavy metals. As is the leading chemical carcinogen heavy metal in Lhasa River, contributing 71.1% of the carcinogenic risk. The health risks caused by heavy metals via drinking water ingestion in Lhasa River are generally at an acceptable safety level; however, children are more susceptible than adults to the same health risk, which poses a greater threat to their health. Therefore, stricter regulatory measures are needed to manage children's drinking water problems.

Key words: health risk assessment; heavy metal; chemical carcinogen; non-carcinogen; Lhasa River

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2022-04-20

基金项目: 江西省科技厅项目

作者简介: 秦欢欢(1986-), 男, 江西南昌人, 博士, 副教授, 研究方向为水体污染防治和地下水污染模拟。

1 研究背景

各种自然环境中广泛存在的重金属是一种无法被降解的、潜在的有毒环境污染物^[1-2],大部分重金属对人体具有致癌性^[3],且其在环境中赋存的过程具有富集性、持久性和放大性等特点^[4-6],很容易对人体的神经和消化系统、肾和肝等组织和器官造成严重的损害^[7-9],故而得到了全世界的广泛关注。国内外许多研究人员都对重金属及其健康风险进行了研究^[1-2,5-6,10-14],主要采用美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency, US EPA)确定的评价模型,取得了较好的效果,展现了该方法的科学性和有效性。张莉等^[1]对福建九龙江流域主要干流和支流水样中7种重金属引起的健康风险进行了初步评价,黄宏伟等^[2]对广西漓江流域水样中9种重金属引起的健康风险进行了评价,他们的研究表明化学致癌物重金属经饮水途径对人体产生的健康风险远大于其他重金属,而且儿童比成人受到的健康威胁程度更大。通常来说,饮水途径是人体接触水中重金属的重要途径^[15]。通过饮水,水中化学致癌物重金属及非致癌物重金属会进入人体,对人体组织和器官产生严重甚至不可逆的毒害作用,容易引起多种心血管疾病和肺癌、肝癌等癌症^[16-17]。因此,对河流水中重金属的污染情况及其引起的健康风险进行研究,既与研究区人群饮水安全息息相关,又对研究区水环境污染的防治与管理具有重要意义。

拉萨河是西藏自治区经济发展的“大动脉”,生态环境具有多变性和脆弱性,近年来受到沿线人口增长、城镇扩张及地热与矿产开发等人为因素的影响,拉萨河水体遭受了不可忽视的污染,对流域居民健康造成了潜在的风险和危害^[18-19]。根据现有研究成果,拉萨河水中存在重金属As、Fe、Cu和Pb超标的情况^[19-20]。重金属在河流中来源十分广泛,持续时间也很长,具有不可逆性,会不断地富集与迁移,对流域生态环境造成潜在与持续的危害^[21]。拉萨河是西藏地区居民的主要水源,重金属很容易通过饮水进入人体。因此,通过定量的调查研究来评价重金属污染对拉萨河沿岸居民身体健康的潜在影响,可以为居民饮水健康的保障提供理论的指导和数据的支撑。

本研究以拉萨河为研究区域,通过对拉萨河16个采样点的水样进行分析,查明拉萨河水中5种重金属As、Cd、Cu、Zn和Mn的含量与分布特征,采用US EPA健康风险评估模型,估算由饮水途径导致

的重金属健康风险,定量阐述重金属与流域居民人体健康之间的关系,为拉萨河水质安全保障、健康风险防控和可持续发展提供科学的依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

拉萨河全长551 km,地势上呈南北两边高中间低的特点^[22](图1),地貌上包括高山河谷及中高山河谷,日照充足,气温却较低,平均降水量为460 mm/a,平均蒸发量为1 217 mm/a^[18]。研究区可分为上游、中游和下游3部分,上游是传统的牧区,居住在其中的人口较少;中游是人类活动较多的区域;下游是人口密度大的农业活动区。研究区矿产资源丰富,拥有各类大中小型矿山69个,绝大多数矿山均建设在拉萨河沿岸,这些矿山产生的废水几乎直接排向拉萨河,对拉萨河的水质及河流沿岸的生态环境产生了非常恶劣的影响。

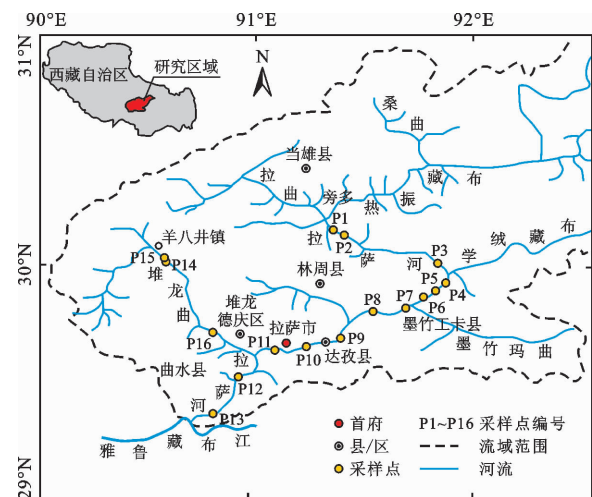


图1 研究区位置、水系及水样采样点示意图

2.2 样品采集方法

本文研究所用到的水样采集时间为2017年7月23日至2017年7月29日,采用瞬时采样法,使用高密度聚乙烯瓶从拉萨河中游(P1~P6)、下游(P7~P13)到堆龙曲支流(P14~P16)共选择了16个点位进行水样采集(图1)。将经过润洗2~3次的采集器逆着水流在河流上层采集河水,然后使用0.45 μm的滤膜过滤采集到的河水样品,随后使用6M超纯硝酸酸化采集到的水样,直至水样的pH小于2为止,密封包裹并标记好经过酸化的水样,将采集到的所有水样寄送至东华理工大学进行测定。水样中5种重金属As、Cd、Cu、Zn和Mn的质量浓度测定的仪器为ICP-MS Element 2,测定的方法采用

《水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700—2014)确定的标准方法。

2.3 健康风险评价方法与参数确定

水中对人体有害的物质包括化学致癌物、放射性物质等基因毒物质和非致癌物等躯体毒物质^[2,12-13]。本研究采用 US EPA 确定的健康风险评价模型,考虑研究区儿童和成人两类人群经饮水途径摄入的化学致癌物重金属及非致癌物重金属导致的致癌健康风险和非致癌健康风险,两类健康风险评价模型如下:

$$\begin{cases} \text{Risk}^c = \sum_{i=1}^m \text{Risk}_i^c \\ \text{Risk}_i^c = \frac{1 - \exp(-D_i^c \cdot Q_i^c)}{70.6} \\ D_i^c = \frac{WDU^T \cdot C_i^c}{W^T} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \text{Risk}^n = \sum_{j=1}^k \text{Risk}_j^n \\ \text{Risk}_j^n = \frac{D_j^n \times 10^{-6}}{70.6 \times RfD_j^n} \\ D_j^n = \frac{WDU^T \cdot C_j^n}{W^T} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Risk^c 和 Risk^n 分别为化学致癌物和非致癌物经饮水途径导致个人患癌的年总风险, a^{-1} ; Risk_i^c 和 Risk_j^n 分别为在饮水的方式下化学致癌物 i 和非致癌物 j 导致个体发生癌症的年度风险, a^{-1} ; D_i^c 和 D_j^n 分别为经饮水途径摄入的化学致癌物 i 和非致癌物 j 每单位体重平均每日暴露剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,表示人类经饮水途径单位体重每日暴露于化学致癌物或非致癌物的剂量; Q_i^c 为经饮水途径摄入的化学致癌物 i 的致癌强度系数, $\text{kg}/(\text{d} \cdot \text{mg})$; RfD_j^n 为经饮水途径摄入的非致癌物 j 的参考剂量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,其为美国环境保护局(US EPA)提出的一项非致癌物风险评估指标,是环境介质中外源化学物质日均暴露剂量的估计值,在终生接触的水平下,非致癌物或非致突变效应物的风险预计将降低到无法检测的水平;70.6为西藏当地居民人均寿命^[23], a ; C_i^c 和 C_j^n 分别为化学致癌物 i 和非致癌物 j 的质量浓度, mg/L ; WDU^T 为 T 年龄组人群的日均饮水量, L/d ,儿童和成人日均饮水量分别为1.0和2.2 L/d ^[24-25]; W^T 为 T 年龄组人群的平均体重, kg ,儿童和成人平均体重分别为22.9和64.3 kg ^[24-25]。

鉴于各类有毒化学物质对人体健康的危害具有

复杂性与多样性,包括拮抗、协同和相加等作用^[2],且通常情况下水中这些物质浓度均较低,故假定有毒化学物质之间呈现相加作用,不存在拮抗和协同作用^[2]。于是,经饮水途径导致的 T 年龄组人群的总健康风险 Risk^T 如下:

$$\text{Risk}^T = \text{Risk}^c + \text{Risk}^n \quad (3)$$

本研究涉及5种重金属,As和Cd为化学致癌物,Cu、Zn和Mn为非致癌物。化学致癌物As和Cd的致癌强度系数分别为15.0和6.1 $\text{kg}/(\text{d} \cdot \text{mg})$ ^[26],非致癌物Cu、Zn和Mn的参考剂量分别为0.005、0.3和0.14 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ^[26]。

3 结果分析与讨论

3.1 研究区重金属含量与分布特征

拉萨河水中5种重金属As、Cd、Cu、Zn和Mn浓度统计结果见表1。表1显示,Mn浓度跨度范围最大,为ND(未检出)~21.70 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。5种重金属在拉萨河水中平均浓度($\mu\text{g}/\text{L}$)排序为:Zn(4.32) > Mn(4.05) > Cu(3.95) > As(2.28) > Cd(0.09)。与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)相比,As、Cd、Cu、Zn和Mn浓度均未超过规定限值;同时,依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),As、Cd、Cu和Zn的含量均符合I类和II类水质标准,说明拉萨河水水质总体上处于良好水平,可用于集中式生活饮用水的水源。变异系数是污染物浓度平均变异程度的量度,其数值大于0.5则表明研究区某处的浓度存在不均匀的分布,揭示该处可能存在因异物流入导致点源污染的概率^[22]。As和Cd的变异系数分别为0.43和0.19,均小于0.5,表明研究区As和Cd浓度分布相对均匀,拉萨河沿程出现As和Cd点源污染的可能性很小。而Cu、Zn和Mn的变异系数分别为1.26、0.93和1.59,均大于0.9,表明这3种重金属具有明显的空间差异,人为因素对其影响较大,局部地区可能受到某些污染源的强烈影响。

与国内外不同河流中重金属平均浓度(表2)相比,拉萨河水中重金属浓度处于偏下水平,且显著低于国内外其他河流,但As浓度高于赣江和岷江,Cd浓度高于漓江、九龙江和巫妖河(越南),Cu浓度高于漓江、赣江和加泰罗尼亚河(西班牙),Zn浓度高于汉江(陕西段)和加泰罗尼亚河(西班牙),Mn浓度高于九龙江、湘江、岷江和加泰罗尼亚河(西班牙)。由表2还可以看出,不同流域中Zn和Mn浓度变动较大,这可能是由于不同流域受到工农业污染物排放影响不同所致。

表1 拉萨河水中重金属浓度统计

重金属	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	卫生标准	水质标准	
							I类	II类
As	0.65	4.27	2.28	0.97	0.43	10	50	50
Cd	0.067	0.13	0.09	0.02	0.19	5	1	5
Cu	0.12	14.00	3.95	4.96	1.26	1000	10	1000
Zn	0.51	15.80	4.32	4.00	0.93	1000	50	1000
Mn	ND	21.70	4.05	6.45	1.59	100	-	-

注：“ND”为此处结果未检出，以0为其数值参与计算；“-”表示此处无相关数据。“变异系数”无量纲；“卫生标准”为《生活饮用水卫生标准(GB 5749—2022)》确定的标准；“水质标准”为《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》确定的标准。

表2 国内外不同河流中重金属平均浓度

河流	所属区域	As	Cd	Cu	Zn	Mn
漓江 ^[2]	广西	2.77	0.03	0.78	14.33	28.52
九龙江 ^[1]	福建	12.39	0.08	17.85	154.89	-
长江(南京段) ^[27]	江苏	13.20	4.70	10.70	9.40	5.40
汉江(陕西段) ^[28]	陕西	10.74	3.21	7.76	-	42.20
黄河(甘肃至内蒙古段) ^[29]	甘肃、内蒙古	7.30	23.19	36.27	52.46	597
赣江 ^[30]	江西	2	1	2	12	83
湘江 ^[31]	湖南	12.24	1.34	20.33	84.57	-
嘉陵江 ^[32]	重庆	ND	4	100	180	38
岷江 ^[33]	四川	1	ND	5	28	-
加泰罗尼亚河 ^[34]	西班牙	2.90	1.20	1.30	1.90	-
哈拉兹河 ^[35]	伊朗	55.35	2.65	13.25	52.75	116
巫妖河 ^[36]	越南	39.10	-	4.50	51.10	216.20
拉萨河(本研究)	西藏	2.28	0.09	3.95	4.32	4.05

注：“ND”为此处结果未检出；“-”表示此处无相关数据。

图2为研究区不同河段重金属平均浓度直方图。由图2可以看出，拉萨河不同河段的As、Cu和Mn浓度分布具有相似的变化规律，高浓度主要分布在拉萨河下游；Zn高浓度主要分布在拉萨河中游，其次是下游和堆龙曲支流；与其他重金属相比，Cd在中游、下游和堆龙曲支流的浓度均较小。总体来看，拉萨河重金属高浓度主要分布在下游和中游，可能与中下游矿产开发、城镇化增长、工农业生产等人类活动较密集有关系。拉萨河水中Cu、Zn和Mn浓度相对较高，这3种金属是矿产开发中向河流排放的典型重金属，而矿产开发是拉萨河中下游非常重要的人类活动，由此对拉萨河造成了一定的污染。此外，城镇居民生活污水和工业废水直接向拉萨河排放也是造成拉萨河下游重金属含量相对较高的主要原因。堆龙曲支流的地热资源得到了大量开发，此过程产生的地热废水向堆龙曲支流排放是造成该支流污染的主要原因。

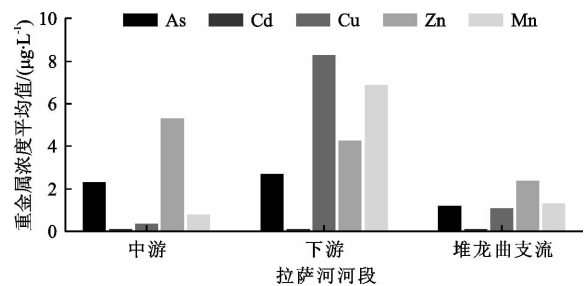


图2 拉萨河不同河段水中5种重金属平均浓度直方图

一般而言，重金属之间是否具有同源关系可以由它们之间的相关性来进行分析和研究，具有良好相关性的重金属之间具有潜在的同源性或者具有一定的相似的迁移过程。表3为拉萨河5种重金属之间的相关矩阵，从表3中可以看出，Cd与Cu ($R = 0.519, p < 0.01$)、Cd与Mn ($R = 0.655, p < 0.01$)以及Cu与Mn ($R = 0.442, p < 0.01$)具有极显著正相关关系，表明Cd、Cu和Mn之间具有同源性(相似的污染来源)或相似的迁移转化过程。As与Zn

($R = 0.256, p < 0.05$)具有显著正相关关系,说明As和Zn之间具有同源性。

表3 拉萨河水中重金属相关矩阵

重金属	As	Cd	Cu	Zn	Mn
As	1.000	-0.106	0.172	0.256**	0.018
Cd		1.000	0.519*	0.067	0.655*
Cu			1.000	0.111	0.442*
Zn				1.000	0.021
Mn					1.000

注:“*”表示数据在0.05水平上表现为显著,“**”表示数据在0.01水平上表现为显著。

3.2 重金属健康风险评价

根据拉萨河水中重金属浓度数据,利用US EPA确定的健康风险评价模型及相关参数,可以计算重

金属对拉萨河流域儿童和成人的健康风险,结果如表4所示,P1~P16各采样点个人年总健康风险见图3。从表4可以看出,儿童的健康总风险($2.973 \times 10^{-5} a^{-1}$)明显高于成人的健康总风险($2.330 \times 10^{-5} a^{-1}$),大约是成人的1.28倍。原因在于儿童身体结构比成人更敏感,更容易受到重金属的影响,因而重金属对儿童的危害也更大,这与文献[2]、[37]、[38]的结果一致。图3表明,除儿童组的采样点P12和P13外,儿童组和成人组在不同采样点总健康风险均低于US EPA推荐的最大可接受值($1 \times 10^{-4} a^{-1}$)和国际辐射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)推荐的最大可接受值($5 \times 10^{-5} a^{-1}$),说明拉萨河水体由重金属引起的总健康风险总体上处于安全水平,但需要对儿童在饮水安全方面进行更加严格的管控。

表4 拉萨河水中重金属污染物平均个人年健康风险

重金属类型	重金属	儿童		成人	
		范围	均值	范围	均值
化学致癌物	As/ $10^{-6} a^{-1}$	6.02 ~ 39.56	21.14	4.72 ~ 31.01	16.56
	Cd/ $10^{-6} a^{-1}$	2.45 ~ 16.10	8.60	1.92 ~ 12.62	6.74
非致癌物	Cu/ $10^{-11} a^{-1}$	1.42 ~ 173.19	48.90	1.11 ~ 135.70	38.31
	Zn/ $10^{-11} a^{-1}$	0.11 ~ 3.26	0.89	0.08 ~ 2.55	0.70
	Mn/ $10^{-11} a^{-1}$	0.06 ~ 9.59	1.57	0.08 ~ 7.51	1.23
总计/ $10^{-6} a^{-1}$		8.48 ~ 55.66	29.73	6.65 ~ 43.62	23.30
ICRP推荐的最大可接受值/ $10^{-5} a^{-1}$			5		
US EPA推荐的最大可接受值/ $10^{-4} a^{-1}$			1		

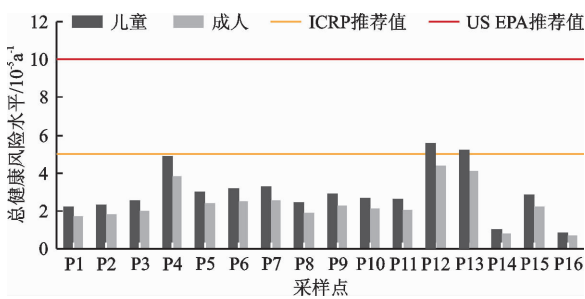


图3 拉萨河流域各采样点个人年总健康风险直方图

表4显示了拉萨河重金属通过饮用水引起的致癌风险的数量级在 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 之间,As致癌风险值显著大于Cd致癌风险值。As和Cd致癌风险值范围分别为 $0.472 \times 10^{-5} \sim 3.956 \times 10^{-5} a^{-1}$ 和 $0.192 \times 10^{-5} \sim 1.610 \times 10^{-5} a^{-1}$,均低于ICRP和US EPA推荐的最大可接受风险值。对拉萨河流域不同人群,As致癌风险平均值占总致癌风险比例为

71.1%,而Cd致癌风险占比则为28.9%,As在拉萨河占据了主导地位,贡献了绝大多数致癌健康风险。由此可见As是拉萨河最主要的致癌污染物,在对拉萨河进行管理时需加强对As浓度的监测,确保As致癌风险处于可接受范围。非致癌物重金属经饮水途径产生的健康风险的数量级在 $10^{-13} \sim 10^{-9}$ 之间,即居民因饮水摄入的重金属对其身体健康产生的威胁或导致的死亡的概率为 $1/10^9$ 及以下。化学致癌物重金属健康风险远大于非致癌物重金属健康风险,前者是后者的 $10^4 \sim 10^7$ 倍。非致癌物重金属平均健康风险顺序为 $Cu > Mn > Zn$,儿童和成人经饮水途径摄入非致癌物重金属的健康风险范围分别为 $6 \times 10^{-13} \sim 1.73 \times 10^{-9} a^{-1}$ 和 $8 \times 10^{-13} \sim 1.36 \times 10^{-9} a^{-1}$,远低于 $1 \times 10^{-6} a^{-1}$,因此可认为拉萨河非致癌物重金属健康风险处于可接受水平。根据本研究的结果,拉萨河重金属浓度总体上低于国内其他

主要河流,均处于国家规定的水质标准限值以下,适合作为饮用水水源。但是,经过相关健康风险评价计算,有两个采样点在儿童组的总健康风险值方面超过了 ICRP 推荐的最大可接受风险值,这需要引起足够重视。因此,对于拉萨河的水质,在进行常规监测的同时需进行健康风险管理,进而有助于掌握拉萨河的水质情况及健康安全状况,有针对性地进行相应的风险管理,制定相应的污染防治策略。

本文采用较成熟的健康风险评价模型对拉萨河水中的重金属污染情况进行了评价,模型中采用了经过大量学者研究确定的参数,这对于研究区的重金属健康风险评价研究工作来说具有较好的适用性与科学性。然而,本文对拉萨河重金属健康风险评价是一种初步的研究,只考虑了5种重金属污染物,且仅考虑了经饮水途径导致的健康风险,缺少了对呼吸和皮肤接触等途径导致健康风险的评价,而且模型参数的选取还有一定程度的不足,这些使得本文研究具有局限性。在未来的研究中,可以采取一些措施来加强对拉萨河重金属健康风险评价的研究,包括增加重金属评价的种类、考虑多种暴露途径的影响、增加水样采集的时间和数量、采用更符合拉萨河流域的模型参数等,从而从更综合的角度定量衡量拉萨河水中重金属污染导致的健康风险,使本文的研究更具有实际和科学意义。

4 结 论

(1)拉萨河水中重金属平均浓度($\mu\text{g/L}$)排序为: $\text{Zn}(4.32) > \text{Mn}(4.05) > \text{Cu}(3.95) > \text{As}(2.28) > \text{Cd}(0.09)$,未超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的限值,在水质上也符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的 I 和 II 类标准。 As 和 Cd 空间分布较均匀, Cu 、 Zn 和 Mn 分布存在显著空间差异性, As 、 Cu 和 Mn 高浓度主要分布在中游,而 Zn 高浓度主要分布在中游。与国内外其他主要河流相比,拉萨河水中重金属浓度处于偏下水平,且显著低于国内外其他河流。

(2)拉萨河水中化学致癌物重金属的健康风险远大于非致癌物重金属, As 为拉萨河水中主要的化学致癌物重金属,贡献了71.1%的致癌风险,应作为拉萨河水质管理的优先管控对象。拉萨河重金属经饮水途径导致的健康风险总体处于可接受的安全水平。对于相同的健康风险而言,儿童比成人更易受到影响,重金属对儿童的危害也更大,因而需要采取更严厉的监管措施来管理儿童饮水问题。

参考文献:

- [1] 张莉,祁士华,瞿程凯,等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学,2014,34(8): 2133-2139.
- [2] 黄宏伟,肖河,王敦球,等. 漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学,2021,42(4):1714-1723.
- [3] STEINEMANN A. Rethinking human health impact assessment [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(6): 627-645.
- [4] FARAHAT E, LINDERHOLM H W. The effect of long-term wastewater irrigation on accumulation and transfer of heavy metals in *Cupressus sempervirens* leaves and adjacent soils [J]. Science of the Total Environment, 2015, 512-513: 1-7.
- [5] 段小龙,郝凯越,黄德才,等. 林芝市饮用水源地健康风险评价[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3):97-101.
- [6] DEVIĆ G, SAKAN S, ĐORĐEVIĆ D. Assessment of the environmental significance of nutrients and heavy metal pollution in the river network of Serbia [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(1): 282-297.
- [7] LI Hanhan, CHEN Liujun, YU Lin, et al. Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 1076-1084.
- [8] ELEONORA W, DAWN I, RAFAL K, et al. Human health risk assessment case study: An abandoned metal smelter site in Poland [J]. Chemosphere, 2002, 47: 507-515.
- [9] LI Yongli, LIU Yunguo, LIU Jingling, et al. Effects of EDTA on lead uptake by *Typha orientalis Presl*: A new lead-accumulating species in southern China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 81(1): 36-41.
- [10] TANG Wenzhong, SHAN Baoqing, ZHANG Hong, et al. Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1-3): 945-951.
- [11] MITRA A, CHOWDHURY R, BANERJEE K. Concentrations of some heavy metals in commercially important finfish and shellfish of the River Ganga [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(4): 2219-2230.
- [12] 刘昭,周宏,曹文佳,等. 清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学,2021,42(1):175-183.
- [13] 刘昭,周宏,刘伟,等. 清江流域地下水重金属含量特征及健康风险初步评价[J]. 环境工程,2021,39(5): 196-203.

- [14] 耿雅妮,杨宁宁,董洁,等. 宝鸡市饮用水源地重金属健康风险评价[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 73-77.
- [15] KERGER B D, PAUSTENBACH D J, CORBETT G E, et al. Absorption and elimination of trivalent and hexavalent chromium in humans following ingestion of a bolus dose in drinking water [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1996, 141(1): 145-158.
- [16] SHAKOOR M B, NAWAZ R, HUSSIAN F, et al. Human health implications, risk assessment and remediation of As-contaminated water: A critical review [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 756-769.
- [17] WEI Binggan, YE Bixiong, YU Jiangping, et al. Blood pressure associated with arsenic methylation and arsenic metabolism caused by chronic exposure to arsenic in tube well water [J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2017, 30(5): 333-342.
- [18] 何柳. 拉萨河流域水文地球化学特征及其风化指示[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
- [19] 张凤熔. 拉萨河流域水化学特征及水体重金属源解析[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [20] JIANG Dongsheng, HU Zhenzhen, LIU Feng, et al. Heavy metals levels in fish from aquaculture farms and risk assessment in Lhasa, Tibetan Autonomous Region of China [J]. *Ecotoxicology*, 2014, 23(4): 577-583.
- [21] 赵雨顺. 拉萨河流域沉积物重金属含量分析及家庭用水健康风险评价[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [22] 张丰述. 拉萨市城市环境地质评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [23] 国家卫生健康委. 西藏人均预期寿命比解放初期提高35岁[EB/OL]. (2019-05-23) [2022-07-07] <https://www.cn-healthcare.com/article/20190523/content-519423.html>.
- [24] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 0~5岁)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [25] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [26] 田莘冉, 丁文广, 张慧琳, 等. 2011-2015年甘肃省部分区域水环境健康风险评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(1): 142-151.
- [27] WU Bin, ZHAO Dayong, JIA Haiyan, et al. Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing Section, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(4): 405-409.
- [28] LI Siyue, ZHANG Quanfa. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1-3): 1051-1058.
- [29] ZUO Hang, MA Xiaoling, YANG Kai, et al. Distribution and risk assessment of metals in surface water and sediment in the upper reaches of the Yellow River, China [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2016, 25(8): 917-940.
- [30] 许燕颖, 刘友存, 张军, 等. 赣江上游典型流域水体三氮及重金属空间分布特征与风险评价[J]. *地球与环境*, 2020, 48(5): 574-583.
- [31] ZENG Xiaoxia, LIU Yunguo, YOU Shaohong, et al. Spatial distribution, health risk assessment and statistical source identification of the trace elements in surface water from the Xiangjiang River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12): 9400-9412.
- [32] 刘跃晨, 王云, 吴树宝, 等. 重庆嘉陵江干流饮用水水源地水质分析与健康风险评价[J]. *水文*, 2013, 33(3): 91-96+46.
- [33] 乔飞, 时瑶, 秦延文, 等. 岷江干流重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(6): 602-609.
- [34] CARAFA R, FAGGIANO L, REAL M, et al. Water toxicity assessment and spatial pollution patterns identification in a Mediterranean river basin district: Tools for water management and risk analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(20): 4269-4279.
- [35] NASRABADI T. An index approach to metallic pollution in river waters [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2015, 9(1): 385-394.
- [36] NGUYEN T T, MINORU Y, MAIKO I, et al. Source discrimination of heavy metals in sediment and water of To Lich River in Hanoi City using multivariate statistical approaches [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(10): 8065-8075.
- [37] 焦伟, 牛勇, 李斌, 等. 基于化学形态分析的城市道路灰尘重金属健康风险评价与人为来源解析[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(12): 2269-2275.
- [38] 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2675-2685.