

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2022.02.016

西藏拉萨河 ^{232}Th 分布特征与所致内照射剂量分析

秦欢欢^{1,2},陈益平¹,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,南昌 330013;
 2. 东华理工大学 水资源与环境工程学院,南昌 330013)

摘要:利用拉萨河中下游和堆龙曲支流 16 个采样点水样,采用 ICP-MS 测量水样中的 ^{232}Th 含量,获得了研究区水体中 ^{232}Th 分布特征与所致内照射剂量。结果表明,拉萨河水体中 ^{232}Th 含量低于全国地表水平均含量和世卫组织规定的饮用水标准,但高于长江流域诸河与额尔齐斯河。 ^{232}Th 含量在中游沿程先降后升,在下游波动变化,在堆龙曲支流沿程下降,同时 ^{232}Th 含量随纬度的增大和经度的减小而上升。 ^{232}Th 与 Cl^- 有一定的同源性,与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 及 TDS 有一定的异源性,说明拉萨河周边碎屑岩颗粒在高温高压、风化等作用下由补给水流向河流输送了 ^{232}Th 和 Cl^- 。拉萨河流域居民由饮水途径所摄入的放射性核素 ^{232}Th 所致的内照射待累积剂量当量平均值低于世卫组织推荐的参考值,说明拉萨河河水的放射性水平是安全的,不会对饮用拉萨河水的居民和动物造成健康危害。

关键词: ^{232}Th ;放射性核素;内照射剂量;分布特征;拉萨河

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1007-7545(2022)02-0106-08

Distribution Characteristics and Induced Internal Radiation Dose of ^{232}Th in Lhasa River, Tibet

QIN Huan-huan^{1,2}, CHEN Yi-ping¹, GAO Bai², SUN Zhan-xue^{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: Contents of ^{232}Th in water samples from 16 sampling points in the middle and lower reaches of Lhasa River and Duilongqu tributary were measured by ICP-MS, and distribution characteristics and induced internal radiation dose of ^{232}Th in the water of the study area were obtained. The results show that content of ^{232}Th in the water body of Lhasa River is lower than the average content of the national surface level and the drinking water standard stipulated by WHO, but higher than that of the rivers in the Yangtze River Basin and Irtysh river. ^{232}Th content drops firstly and then rises along the middle reaches, fluctuates and changes in the downstream, decreases along the Duilongqu tributary, and rises with the increase of latitude and the decrease of longitude. ^{232}Th has some homology with Cl^- and some heterogeneity with Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- and TDS, indicating that clastic rock particles around Lhasa River have transported ^{232}Th and Cl^- from the make-up water to the river under the action of high temperature, high pressure and weathering. The average cumulative dose equivalent of internal exposure

收稿日期:2021-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41807179);江西省科技厅项目

作者简介:秦欢欢(1986-),男,博士,副教授

caused by radionuclide ^{232}Th ingested by residents in Lhasa River Basin is lower than the reference value recommended by WHO, indicating that the radioactivity level of Lhasa River is safe and will not cause health hazards to residents and animals drinking water from Lhasa River.

Key words: ^{232}Th ; radionuclides; internal irradiation dose; distribution characteristics; Lhasa River

钍(Th)是一种分布广泛的天然放射性元素,目前已发现质量数为212~236不等的25种钍同位素,但天然钍几乎全部由 ^{232}Th 组成。全世界的钍矿具有储量大、分布广、品位高、易开采、价格低等特点^[1-2]。 ^{232}Th 可以成为核燃料的有效替代与补充,且能生成易裂变的 ^{233}U 。在全球铀资源消耗量不断增大的情况下,针对钍作为核燃料进行研究正成为全球核能界关注的重点之一。然而,钍是一种毒性大、放射性强的长寿命放射性核素^[3-5](^{232}Th 的半衰期为 1.405×10^{10} a),通过饮水或饮食途径进入人体的放射性核素钍只有一部分可以通过生物代谢过程排出体外,其余则可以直接在人体器官和组织中沉积,给人体带来重金属毒性和放射性核素内照射的双重伤害^[6-7]。在铀矿开采和冶炼过程中产生的放射性核素 ^{232}Th 经降雨淋滤、径流等方式进入地表水体和地下水体中,给河流沿岸的生态环境和居民健康带来潜在的放射性辐射的污染和危害^[8-10]。国内外对钍的放射性分布做了许多调查和评价^[8,11-16],比如WANG等^[11]通过检测到的 ^{232}Th 活度证实了白云鄂博稀土矿附近居民受到高浓度的 ^{232}Th 的危害,丁小燕等^[8]模拟了某铀矿区地下水中钍在不同酸碱度条件下的存在形式及含量变化规律,AMRANE等^[16]研究发现,乌姆-拉比亚河水中的铀和钍浓度与某些化学参数相关,该河流中的铀和钍测量对于监测环境放射性以及了解这些放射性核素在地表水环境中的地球化学行为非常重要。

作为西藏经济发展的“大动脉”,近年来拉萨河受到河流沿线人类活动(地热与矿产开发、城市污水排放等)的剧烈影响,加上高原独特多变的环境状况和生态脆弱性,使得拉萨河流域河流生态环境遭受了不可忽视的污染^[17-19]。拉萨河是河流中下游沿线居民、牲畜和农作物的主要水源,河水中放射性核素 ^{232}Th 的含量关系到流域居民的健康和安全。然而,针对拉萨河水体中放射性核素 ^{232}Th 的研究十分缺乏。因此,本研究通过对拉萨河中下游和堆龙曲支流共16个采样点的水样进行分析,查明拉萨河流域水体中放射性核素 ^{232}Th 的含量与分布特征,估算由饮水途径所致 ^{232}Th 的内照射剂量,这对于拉萨河流域沿线居民的健康和流域的可持续发展都具有重要的实际与科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

拉萨河发源于念青唐古拉山,全长551 km、流域面积32 588 km²,处于冈底斯-念青唐古拉地质构造带中,呈现南北高中间低的地势特点^[20](图1)。拉萨河谷的基岩以中生代的石灰岩和喜玛拉雅期的花岗岩为主,燕山期的花岗岩和第三纪、第四纪的火山喷出岩、碎屑岩为辅。拉萨河流域平均海拔5 400 m,由高山和中高山河谷两种地貌类型组成,具有充足的日照和较低的气温,年均降水量和蒸发量分别为460 mm和1 217 mm^[17]。拉萨河流域可分为上、中和下游,其中上游是人口较少的牧区,中游耕地面积较小但人类活动相对较多,下游是农业发达、人口密度最大的地区。拉萨地区拥有十分丰富的矿产资源,包括有色金属、地热、自然硫等各类矿产,共有大中型矿山12个,其它矿山57个。然而,拉萨地区矿山的大部分选矿厂都建在拉萨河两岸,从这些选矿厂排出的废水只经过简单处理即排入拉萨河,由此对拉萨河的生态环境产生了不可忽略的影响。

1.2 样品采集与分析方法

2017年7月23至29日沿着拉萨河从上到下选择了16个采样点:包括中游6个(LSW1~LSW6)、下游7个(LSW7~LSW13)和堆龙曲支流3个(LSW14~LSW16),利用瞬时采样法进行河水采样,水样采集器是预清洗过的高密度聚乙烯瓶,采样点分布见图1^[21]。由于上游人口稀少,人类活动较弱,因此把采样点LSW1作为“源头”,其余采样点到LSW1的距离为该采样点沿拉萨河的距离。采样时先润洗采集器2~3次,随后逆水流方向进行水样的采集,用0.45 μm的滤膜对水样进行过滤,然后加入6 mol/L超纯硝酸将水样进行酸化至pH<2,包裹好水样瓶,确保不泄露,同时做好标记,样品送至东华理工大学分析测试中心进行测试。采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)Element 2,按照国家环境保护标准HJ 700—2014的标准方法对 ^{232}Th 的质量浓度进行测定。水样经预处理后,采用ICP-MS进行检测,根据元素的质谱图或特征离子进行定性,内标法定量。 ^{232}Th 的方法检出限和测

定下限分别为 $0.05 \mu\text{g/L}$ 和 $0.20 \mu\text{g/L}$ 。使用国家标准中心提供的标准物质进行质量控制, 钇标准溶液证书编号为 GBW(E)080174, 相对标准偏差范围

为 $0.1\% \sim 5\%$ 。 ^{232}Th 质量浓度 C_{Th} (g/L) 换算成活度浓度 R_{Th} (Bq/L) 的公式为 $R_{\text{Th}} = \alpha_{\text{Th}} \times C_{\text{Th}}$, 其中 α_{Th} 为 ^{232}Th 的换算系数, 其值为 $4.0738 \times 10^3 \text{ Bq/g}$ ^[22]。

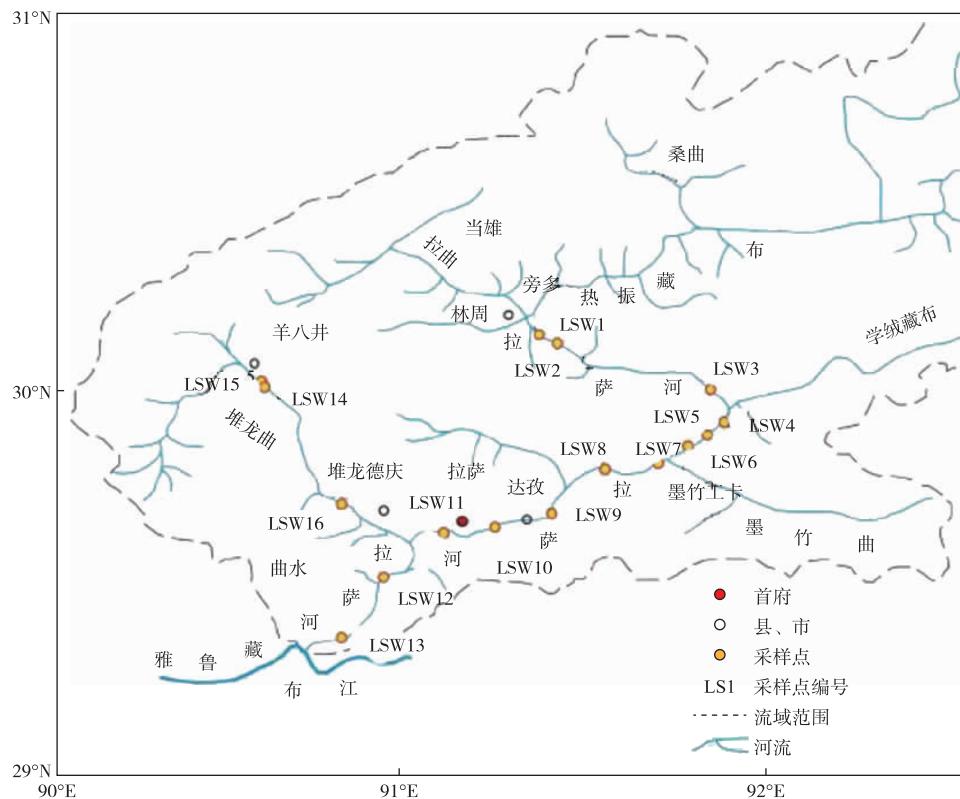


图 1 研究区水系和采样点示意图^[21]

Fig. 1 Schematic diagram of study area water system and sampling points^[21]

1.3 ^{232}Th 所致内照射剂量估算

根据 GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》, 通过饮水途径所致 ^{232}Th 的内照射剂量可通过以下公式进行计算:

$$H_{\text{Th}-50} = K_{\text{Th}} \times R_{\text{Th}} \times V_A$$

其中 $H_{\text{Th}-50}$ 表示待累积剂量当量(Sv), 即人体通过饮水途径摄入放射性核素 ^{232}Th 后 50 年内将要累积的剂量当量; K_{Th} 表示 ^{232}Th 的剂量转换系数(Sv/Bq), 此处取值为 $2.3 \times 10^{-7} \text{ Sv/Bq}$ ^[23]; R_{Th} 为河水中放射性核素 ^{232}Th 的比活度浓度(Bq/L); V_A 表示人一年内的饮水量(L), 一般取值为 730 L 。

2 结果与讨论

2.1 河水中 ^{232}Th 含量与分布特征

表 1 是拉萨河中游、下游和堆龙曲支流 16 个水样中 ^{232}Th 质量浓度和放射性活度浓度的结果。总体来说, 拉萨河水体中 ^{232}Th 质量浓度范围为 $0.487 \sim 0.977 \mu\text{g/L}$, 活度浓度范围为 $(1.984 \sim 3.980) \times$

10^{-3} Bq/L , 平均质量浓度为 $(0.571 \pm 0.117) \mu\text{g/L}$, 活度浓度平均值为 $(2.325 \pm 0.478) \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$, 变异系数为 0.206, 空间波动性较小, 81.25% 的水样中 ^{232}Th 浓度大于 $0.5 \mu\text{g/L}$ 。拉萨河中游 ^{232}Th 平均质量浓度为 $(0.572 \pm 0.065) \mu\text{g/L}$, 平均活度浓度为 $(2.328 \pm 0.261) \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$, 变异系数 0.113; 下游 ^{232}Th 平均质量浓度为 $(0.527 \pm 0.037) \mu\text{g/L}$, 平均活度浓度为 $(2.149 \pm 0.153) \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$, 变异系数 0.071; 堆龙曲支流 ^{232}Th 平均质量浓度为 $(0.670 \pm 0.218) \mu\text{g/L}$, 平均活度浓度为 $(2.733 \pm 0.886) \times 10^{-3} \text{ Bq/L}$, 变异系数 0.326。拉萨河中 ^{232}Th 活度浓度低于全国地表水平均含量 $(6 \times 10^{-3} \text{ Bq/L})$ ^[24], 也比世卫组织(WHO)规定的饮用水标准 (1 Bq/L) ^[25] 低得多。 ^{232}Th 浓度最大($0.977 \mu\text{g/L}$)的水样采自于羊八井上游 5 km 处的采样点 LSW14, 此采样点位于雪山脚下, 水中有牛粪, 水浑浊, 呈乳白色, 水流湍急; ^{232}Th 浓度最小($0.487 \mu\text{g/L}$)的水样采自于巴热村支流的采样点 LWS16, 此采样点水流湍急, 较清

澈,两者相差 1.006 倍。主要原因是²³²Th 所在的采样点 LSW14 靠近羊八井镇,该镇拥有十分丰富的地热资源,一直以来该地的地热电站也处在不断开发当中,由此导致含有放射性核素的大量废水直接排放至堆龙曲支流,从而使得堆龙曲支流河水中²³²Th 含量增加。随着采样点远离羊八井镇,采样点 LSW16 中²³²Th 含量有了显著下降。

表 1 拉萨河水体中²³²Th 质量浓度和放射性活度浓度

Table 1 Mass concentration and radioactivity concentration of ²³²Th in Lhasa River

区域	点号	高程/m	与源头 距离/km	质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	活度浓度/ ($10^{-3} \text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$)
拉萨河中游	LSW1	4 035.33	0.00	0.691	2.815
	LSW2	4 018.45	7.12	0.565	2.302
	LSW3	3 929.30	43.57	0.516	2.102
	LSW4	3 895.17	58.66	0.525	2.139
	LSW5	3 853.21	70.52	0.515	2.098
	LSW6	3 832.16	83.18	0.619	2.522
拉萨河下游	LSW7	3 812.23	94.81	0.514	2.094
	LSW8	3 732.64	121.20	0.512	2.086
	LSW9	3 700.02	138.49	0.610	2.485
	LSW10	3 660.78	158.97	0.514	2.094
	LSW11	3 645.86	170.32	0.495	2.017
	LSW12	3 602.41	202.33	0.548	2.232
堆龙曲支流	LSW13	3 578.07	241.24	0.499	2.033
	LSW14	4 308.61	208.31	0.977	3.980
	LSW15	4 308.46	261.30	0.546	2.224
	LSW16	3 807.74	261.31	0.487	1.984
	平均值	3 857.53	132.58	0.571	2.325
	拉萨河	标准差	215.52	83.76	0.478
拉萨河	变异系数*	0.06	0.63	0.206	0.206

注: * 变异系数无单位

拉萨河中²³²Th 的浓度沿程变化情况如图 2 所

示,从图 2 可以看出,拉萨河中下游和堆龙曲支流²³²Th 的浓度沿程变化表现出不同特点。对于拉萨河中游,²³²Th 的浓度表现出沿程先降后升的 U 型趋势,相关性方程为 $y = 0.00008x^2 - 0.0071x + 0.6573, R^2 = 0.8045$;对于拉萨河下游,²³²Th 的浓度与沿程距离呈五次函数关系,表现出波动变化的趋势,相关性方程为 $y = -7 \times 10^{-10}x^5 + 6 \times 10^{-7}x^4 - 0.0002x^3 + 0.0275x^2 - 2.0748x + 61.266, R^2 = 0.8878$;对于堆龙曲支流,²³²Th 的浓度表现出下降的趋势,相关性方程为 $y = -0.0087x + 2.7871, R^2 = 0.9879$, 沿程距离每增加 100 km,²³²Th 的浓度下降 0.0087 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

图 3 是拉萨河中²³²Th 含量与采样点经纬度之间的关系。在地理分布上,从南到北(纬度增加)拉萨河水体中的²³²Th 浓度整体呈上升的趋势,纬度每增加 1°,²³²Th 浓度大约增加 0.193 $\mu\text{g}/\text{L}$;从西到东(经度增加)拉萨河水体中的²³²Th 浓度整体呈下降的趋势,经度每增加 1°,²³²Th 浓度大约下降 0.0864 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

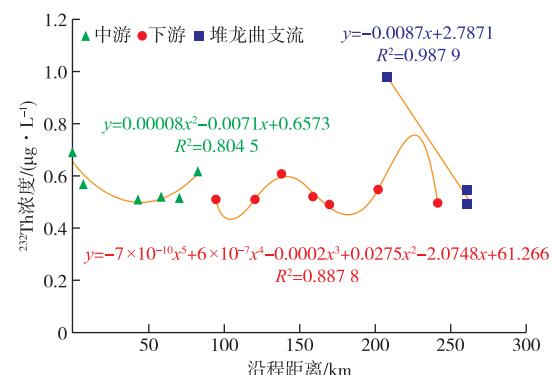


图 2 拉萨河水体中²³²Th 浓度沿程分布曲线

Fig. 2 Distribution curve of ²³²Th concentration in Lhasa River

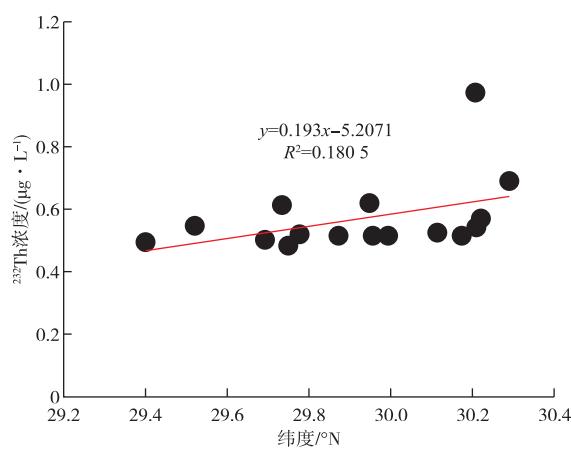


图 3 拉萨河水体中²³²Th 浓度与经纬度变化关系图

Fig. 3 Relationships between ²³²Th concentration and latitude and longitude in Lhasa River

2.2 水化学与 ^{232}Th 含量的关系

拉萨河河水的水化学性质对水体中 ^{232}Th 的含量有一定的影响,图4是拉萨河中 ^{232}Th 含量与主要离子含量的关系图,从图4可以看出, ^{232}Th 浓度与 Cl^- 浓度有一定正相关性,相关性方程为 $y=5.168x-1.0037, R^2=0.3707$,说明拉萨河水体中的 ^{232}Th 与 Cl^- 有内在联系,即它们之间有一定的同源性;而 ^{232}Th 浓度与其它主要离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 及TDS)有一定的负相关性,相关性方程和

R^2 值分别为 $y=-30.392x+42.729 (R^2=0.4458)$ 、 $y=-6.3358x+7.9834 (R^2=0.3627)$ 、 $y=-39.553x+44.198 (R^2=0.3768)$ 、 $y=-86.957x+142.14 (R^2=0.255)$ 、 $y=-154.87x+241.34 (R^2=0.3319)$,这说明拉萨河水体中的 ^{232}Th 与这些离子不具有内在联系,即它们之间具有一定的异源性。由于河水中 ^{232}Th 主要来源于河流周边碎屑岩颗粒,以上分析说明拉萨河周边碎屑岩颗粒在高温高压、风化等作用下由补给水流向河流输送了 ^{232}Th 和 Cl^- 。

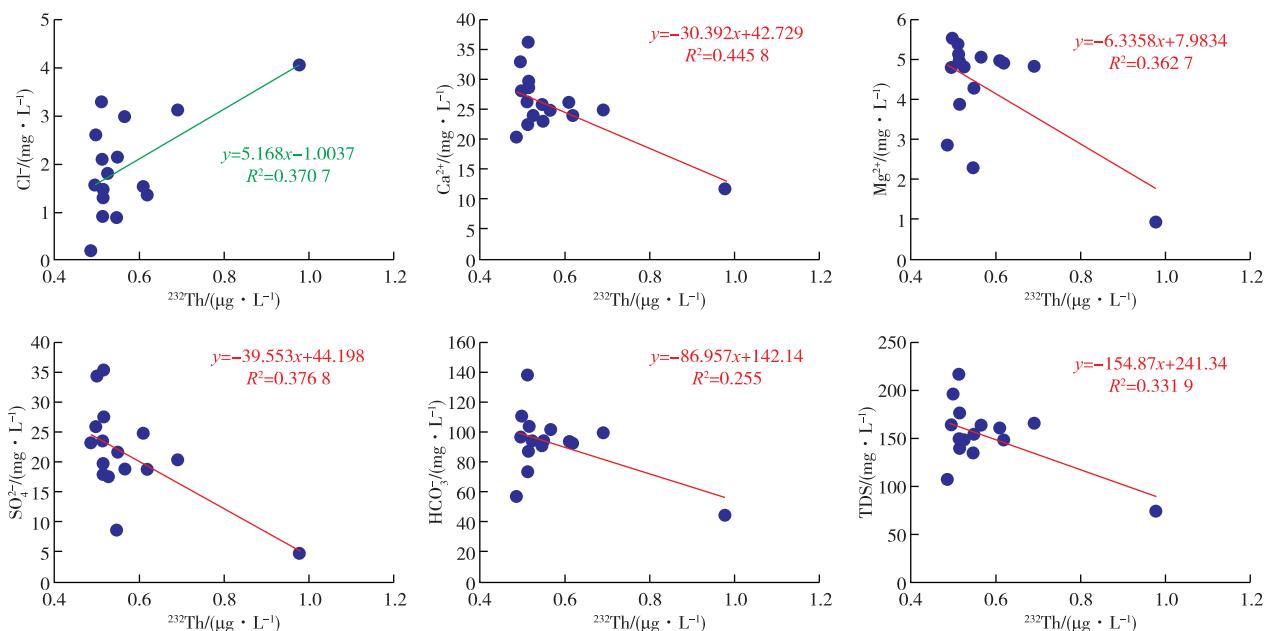


图4 拉萨河水体中 ^{232}Th 含量与主要离子之间的关系图

Fig. 4 Relationships between ^{232}Th content and major ions in Lhasa River

2.3 放射性核素 ^{232}Th 所致内照射剂量

拉萨河是流域内居民和牲畜最重要的饮水来源,因此,通过饮水途径所导致的放射性核素 ^{232}Th 的内照射剂量是重要的研究内容。表2是拉萨河各采样点河水中放射性核素 ^{232}Th 所致内照射剂量的估算结果。由表2可以看出,拉萨河不同采样点河水中居民由饮水途径所摄入的放射性核素 ^{232}Th 最大值为2.905 Bq/a,最小值为1.448 Bq/a,平均值为 (1.698 ± 0.349) Bq/a。放射性核素 ^{232}Th 所致的内照射待累积剂量当量最大值为 6.683×10^{-7} Sv,最小值为 3.331×10^{-4} mSv,平均值为 $(3.904 \pm 0.803) \times 10^{-4}$ mSv。

依据世卫组织的推荐,人体在一年内由饮水途径所摄入的待累积剂量当量的参考值为0.1 mSv。已有针对人和动物的研究证据表明,经受中低剂量的放射性辐射的照射能够增加人和动物患癌症的长期发病率,也可能导致动物遗传畸形发生概率的增大。但是,如果人和动物摄入的水源中放射性核素的待累积剂量当量低于世卫组织的指导水平0.1 mSv,饮用此类水预期不会对人和动物造成放射性有害的危险,即不会造成健康危害。拉萨河不同采样点水样的待累积剂量当量($3.331 \times 10^{-4} \sim 6.683 \times 10^{-4}$ mSv)均小于0.1 mSv,因此,拉萨河河水的放射性水平是安全的,不会对饮用拉萨河河水的居民和动物造成健康危害。

表 2 拉萨河河水中放射性核素²³²Th所致内照射剂量估算

Table 2 Estimation of internal radiation dose caused by radionuclide ²³²Th in Lhasa River

采样点	年摄入量/Bq	待累积剂量当量/ 10^{-4} mSv
LSW1	2.055	4.726
LSW2	1.680	3.865
LSW3	1.535	3.529
LSW4	1.561	3.591
LSW5	1.532	3.523
LSW6	1.841	4.234
LSW7	1.529	3.516
LSW8	1.523	3.502
LSW9	1.814	4.172
LSW10	1.529	3.516
LSW11	1.472	3.386
LSW12	1.630	3.748
LSW13	1.484	3.413
LSW14	2.905	6.683
LSW15	1.624	3.735
LSW16	1.448	3.331
平均值	1.698	3.904
标准差	0.349	0.803

2.4 与其它河流的比较与分析

表 3 是拉萨河河水中²³²Th 含量及所致内照射

剂量与全国其它河流的对比情况。拉萨河河水中的²³²Th 含量(2.325×10^{-3} Bq/L)仅低于长江流域的鄱阳湖水系(2.566×10^{-3} Bq/L)^[26]和全国地表水平均水平(6×10^{-3} Bq/L)^[28], 高于长江流域的川江水系(1.385×10^{-3} Bq/L)^[26]、洞庭湖水系(1.548×10^{-3} Bq/L)^[26]、太湖水系(1.141×10^{-3} Bq/L)^[26]、湘江衡阳段(0.204×10^{-3} Bq/L)^[26]及额尔齐斯河支流(0.1×10^{-3} Bq/L)^[27]和干流(0.08×10^{-3} Bq/L)^[27], 由此计算得到的年摄入量和待累积剂量当量也是这样的大小关系。对于由²³²Th 导致的待累积剂量当量, 拉萨河河水(3.904×10^{-4} mSv)显著小于全国地表水平均水平(10.074×10^{-4} mSv), 与鄱阳湖水系(4.308×10^{-4} mSv)的水平相当, 高于川江水系(2.325×10^{-4} mSv)、洞庭湖水系(2.599×10^{-4} mSv)、太湖水系(1.916×10^{-4} mSv)、湘江衡阳段(0.343×10^{-4} mSv)及额尔齐斯河支流(0.168×10^{-4} mSv)和干流(0.134×10^{-4} mSv)。由此可见, 拉萨河河水中²³²Th 的含量水平及由²³²Th 导致的内照射剂量水平均处于全国中等偏上水平,²³²Th 在拉萨河没有大量富集, 拉萨河放射性核素²³²Th 对流域居民和动物的影响在安全的范围内。

表 3 拉萨河²³²Th 的研究结果与我国其它河湖结果的比较

Table 3 Comparison results of ²³²Th in Lhasa River and other rivers and lakes in China

河湖名称	所属流域	平均活度浓度/(10^{-3} Bq·L ⁻¹)	年摄入量/Bq	待累积剂量当量/ 10^{-4} mSv
川江水系 ^[26]	长江流域	1.385	1.011	2.325
洞庭湖水系 ^[26]	长江流域	1.548	1.130	2.599
鄱阳湖水系 ^[26]	长江流域	2.566	1.873	4.308
太湖水系 ^[26]	长江流域	1.141	0.833	1.916
湘江衡阳段 ^[26]	长江流域	0.204	0.149	0.343
额尔齐斯河支流 ^[27]	额尔齐斯河流域	0.100	0.073	0.168
额尔齐斯河干流 ^[27]	额尔齐斯河流域	0.080 0	0.058	0.134
全国地表水平均 ^[28]	—	6.000	4.380	10.074
拉萨河	拉萨河流域	2.325	1.698	3.904

3 结论

1) 拉萨河河水中²³²Th 平均含量为(0.571 ± 0.117) $\mu\text{g}/\text{L}$, 平均活度浓度为(2.325 ± 0.478) $\times 10^{-3}$ Bq/L, 变异系数为 0.206, 空间波动性较小, 81.25% 的水样中²³²Th 浓度大于 0.5 $\mu\text{g}/\text{L}$, 低于全国地表水平均含量(6×10^{-3} Bq/L)和世卫组织规定的饮用水标准(1 Bq/L), 而高于长江流域诸河与额尔齐斯河。

2) 拉萨河中游下游和堆龙曲支流的²³²Th 平均含量分别为(0.572 ± 0.065)、(0.527 ± 0.037) 和(0.670 ± 0.218) $\mu\text{g}/\text{L}$, ²³²Th 含量在中游沿程先降

后升, 在下游波动变化, 在堆龙曲支流沿程下降。在地理分布上, 拉萨河河水中²³²Th 含量随纬度的增大和经度的减小而上升。

3) 拉萨河河水中²³²Th 含量与 Cl⁻浓度有一定正相关性, 与 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO³⁻及 TDS 有一定的负相关性, 说明²³²Th 与 Cl⁻有一定的同源性, 而与 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、HCO³⁻及 TDS 有一定的异源性, 拉萨河周边碎屑岩颗粒在高温高压、风化等作用下由补给水流向河流输送了²³²Th 和 Cl⁻。

4) 拉萨河流域居民由饮水途径所摄入的放射性核素²³²Th 平均值为(1.698 ± 0.349) Bq/a, ²³²Th 所致的内照射待累积剂量当量平均值为($3.904 \pm$

$0.803) \times 10^{-4}$ mSv, 低于世卫组织推荐的参考值 (0.1 mSv), 拉萨河河水的放射性水平是安全的, 不会对饮用拉萨河河水的居民和动物造成健康危害。

参考文献

- [1] 邱杰, 唐清枫, 陈文凯, 等. 塔木素地下水中的钍种态分布的模拟研究[J]. 山东化工, 2016, 45(16): 130-132.
QIU J, TANG Q F, CHEN W K, et al. The species distribution of thorium in the groundwater of Tamusu and it's influence factors [J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(16): 130-132.
- [2] 宋旺旺, 邓海军, 甘霖, 等. 钍与核能[J]. 科技创新与应用, 2014(35): 33.
SONG W W, DENG H J, GAN L, et al. Thorium and nuclear energy[J]. Technology Innovation and Application, 2014(35): 33.
- [3] ROCK T, INGRAM J C. Traditional ecological knowledge policy considerations for abandoned uranium mines on Navajo Nation[J]. Human Biology, 2020, 92(1): 19-26.
- [4] ERICA J D, JODI R S, KAREN A S, et al. Differential response of human T-lymphocytes to arsenic and uranium[J]. Toxicology Letters, 2020, 333: 269-278.
- [5] 高杨, 高柏, 蒋文波, 等. 某铀矿 ^{238}U , ^{232}Th 污染土壤分布特征及健康风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(8): 145-150.
GAO Y, GAO B, JIANG W B, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of ^{238}U and ^{232}Th contaminated soil in uranium mine[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(8): 145-150.
- [6] 陈飞, 邵宪章, 徐颖, 等. 典型地区茶叶中天然铀和钍含量分布[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(5): 520-522.
CHEN F, SHAO X Z, XU Y, et al. Natural uranium and thorium distribution of teas in typical regions[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2016, 25(5): 520-522.
- [7] 朱寿彭, 李章. 放射毒理学[M]. 江苏 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 147-165.
ZHU S P, LI Z. Radiotoxicology[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 147-165.
- [8] 丁小燕, 高柏, 张春艳, 等. 某铀矿区地下水钍存在形式及饱和指数研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8): 123-127.
DING X Y, GAO B, ZHANG C Y, et al. Study on the existence forms and saturation indexes of thorium in groundwater of a uranium mining area[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(8): 123-127.
- [9] 谢李娜, 周建伟, 郝春明, 等. 湘中锡矿山北矿区地下水化学特征及污染成因[J]. 地质科技情报, 2016, 35(2): 197-202.
XIE L N, ZHOU J W, HAO C M, et al. Hydrochemical characteristics and contaminative causes of groundwater in the north area of Xikuangshan antimony mine, Hunan province[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35 (2): 197-202.
- [10] 孙占学, 刘媛媛, 马文洁, 等. 铀矿区地下水及其生态安全研究进展[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 158-167.
SUN Z X, LIU Y Y, MA W J, et al. A review on the study of groundwater and its ecological securities in uranium mining areas [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 158-167.
- [11] WANG L Q, ZHONG B Q, LIANG T, et al. Atmospheric thorium pollution and inhalation exposure in the largest rare earth mining and smelting area in China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 572(1): 1-8.
- [12] 郑立莉, 周仲魁, 饶苗苗, 等. 华东某铀矿区周边河流表层沉积物的天然放射性评价[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(2): 260-267.
ZHENG L L, ZHOU Z K, RAO M M, et al. Natural radioactivity evaluation of surface sediments of rivers around a uranium mining area in East China[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(2): 260-267.
- [13] 王啸, 高亮, 段喜贵, 等. 天津市地下水和地热流体中天然放射性核素调查与评价[J]. 辐射防护, 2012, 32(4): 248-253.
WANG X, GAO L, DUAN X G, et al. Investigation and assessment of natural radionuclides in groundwater and geothermal fluid of Tianjin city[J]. Radiation Protection, 2012, 32(4): 248-253.
- [14] MOMILOVI M, KOVAEVI J, TANI M, et al. Distribution of natural radionuclides in surface soils in the vicinity of abandoned uranium mines in Serbia[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 185(2): 1319-1329.
- [15] HAROUN K M, EL-TAYEP M A. Measurements for natural radioactive materials at the east & west banks of the River Nile[J]. Science Journal of Analytical Chemistry, 2017, 5(4): 56-65.
- [16] AMRANE M, OUFNI L. Determination for levels of uranium and thorium in water along Oum Er-Rabia river using alpha track detectors [J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2017, 10(3), 246-251.
- [17] 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.

- HE L. Hydro-geochemical characteristics and weathering indicators in Lhasa River Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [18] 龚晨.西藏拉萨河流域水化学时空变化及影响因素研究[D].天津:天津大学,2015.
- GONG C. Study on temporal and spatial variations of water chemistry and its influence factors in Lhasa River Catchments, Tibet[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [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.
- ZHANG F R. Hydrochemical characteristics of Lhasa River Basin and source apportionment of heavy metals in water[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [20] 张丰述.拉萨市城市环境地质评价[D].成都:成都理工大学,2011.
- ZHANG F S. The evaluation of urban environmental geology in Lhasa city [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [21] 秦欢欢,高柏,黄碧贤,等.拉萨河流域河水重金属分布特征及污染风险评价[J].有色金属(冶炼部分),2020(10):79-86.
- QIN H H, GAO B, HUANG B X, et al. Distribution characteristics and pollution risk assessment of heavy metals in Lhasa River Basin[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(10):79-86.
- [22] 齐文.某铀尾矿区及下游河水水环境放射性污染特征研究[D].南昌:东华理工大学,2016.
- QI W. Characteristics of radioactive pollution in the water environment of a uranium tailings mine and the downstream river[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2016.
- [23] 高亮.天津市地下水、地热流体天然放射性评价[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- GAO L. Assessment of natural radionuclides in groundwater and geothermal fluid of Tianjin city[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [24] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组.全国水体中天然放射性核素浓度调查(1983~1990年)[J].辐射防护,1992(2):143-163.
- National Environmental Natural Radioactivity Level Survey Summary Report Preparation Team. National survey of natural radioactive levels in water bodies (1983—1990) [J]. Journal of Radiation Protection, 1992(2):143-163.
- [25] 蒋经乾,李玲,占凌之,等.某尾矿库周边水放射性分布特征及其评价[J].有色金属(冶炼部分),2015(11):60-63.
- JIANG J Q, LI L, ZHAN L Z, et al. Radioactive distribution characteristics and evaluation of water around a tailings pond[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(11):60-63.
- [26] 肖峰.湘江衡阳段水中天然放射性核素调查[D].湖南衡阳:南华大学,2018:2-6.
- XIAO F. The survey of natural radioactive elements of Hengyang section in Xiangjiang river[D]. Hengyang: University of South China, 2018:2-6.
- [27] 李社红,郑宝山,朱建明,等.额尔齐斯河流域及某稀有多金属矿废水铀、钍含量分布及其环境影响[J].矿物学报,2003,23(4):308-312.
- LI S H, ZHENG B S, ZHU J M, et al. Distribution of uranium and thorium in the Irtysh river and upriver wastewater from a rare multi-metal mine [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2003, 23(4): 308-312.
- [28] 沈威,高柏,章艳红,等.临水河天然放射性核素调查及健康风险评价[J].科学技术与工程,2019,19(19):374-379.
- SHEN W, GAO B, ZHANG Y H, et al. Investigation of radionuclides and health risk assessment in Linshui River[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(19):374-379.