

西藏地表水中砷的分布

王明国^{1,2}, 李社红^{1*}, 王慧¹, 肖唐付¹, 郑宝山¹

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 河南省有色金属地质勘查总院, 郑州 450052)

摘要: 通过系统地采集森格藏布和雅鲁藏布地表水样, 研究了两流域水体中砷的分布. 结果表明不同水体中砷的含量不同, 其由高至低依次为: 热泉水($4\,920\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 1\,520\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=2$) > 盐(咸)水湖水($2\,180\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 3\,840\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=7$) > 井水($194\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=1$) > 淡水湖水($163\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 202\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=2$) > 河水($35.5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 57.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=74$). 森格藏布和雅鲁藏布上游存在高砷河水, 森格藏布河水砷平均含量($58.4\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 69.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=39$)明显高于雅鲁藏布($10.8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 16.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=30$). 采集的热泉水、盐咸湖水、井水以及43.2%的河水样品中砷的含量均高于 $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 森格藏布和雅鲁藏布分别为两流域内居民重要的饮用水源, 居民具有患上地方性砷中毒的风险.

关键词: 砷; 西藏; 地表水; 雅鲁藏布; 森格藏布

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3411-06

Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet

WANG Ming-guo^{1,2}, LI She-hong¹, WANG Hui¹, XIAO Tang-fu¹, ZHENG Bao-shan¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Henan Nonferrous Metals Geological Exploration Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: This research was aimed on studying the arsenic distribution of water in Yarlung Zangbo and Singe Zangbo basins in Tibet. Results showed that arsenic concentrations were different in different types of the water. The sequence of arsenic concentration from high to low was hot spring water ($4\,920\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 1\,520\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=2$), salt lake water ($2\,180\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 3\,840\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=7$), well water ($194\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=1$), freshwater lake water ($163\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 202\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=2$) and stream water ($35.5\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 57.0\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=74$). The high arsenic concentration in surface water in Singe Zangbo and the upstream of Yarlung Zangbo were found. The average concentration of arsenic in water from Singe Zangbo ($58.4\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 69.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=39$) was significantly higher than that from Yarlung Zangbo ($10.8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 16.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=30$). Arsenic concentration in 43.2% of stream water samples and all of the hot springs, saline lakes and well water were higher than $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Yarlung Zangbo and Singe Zangbo are important sources of drinking water for the local people. There is a high risk for the local people who may suffer from chronic arsenic poisoning.

Key words: arsenic; Tibet; surface water; Yarlung Zangbo; Singe Zangbo

西藏位于中国的西南边陲, 青藏高原的西南部, 面积122.84万 km^2 , 平均海拔4000 m以上. 发育雅鲁藏布和森格藏布两大水系, 向南分别流入孟加拉和印度, 其下游分别被称为布拉马普特拉河(Brahmaputra)和印度河(Indus).

在山西、内蒙古、新疆、宁夏、吉林、安徽及西藏邻近的青海存在着在不同程度饮水型砷中毒^[1~3], 同时森格藏布和雅鲁藏布下游的国家孟加拉和印度是世界上受饮水型砷中毒影响最严重的国家, 据估计有千万的当地居民受到高砷地下水的威胁^[4~6]. 对孟加拉和印度所处的布拉马普特拉河(Brahmaputra)和印度河(Indus)流域水体中砷的分布及环境影响研究比较多且深入, 但位于两区域上游的雅鲁藏布和森格藏布(图1), 砷的研究还非常薄弱. 目前西藏虽然暂无饮水型砷中毒的报道, 但其水中砷的安全直接影响着流域内

百万居民的饮水安全.

研究者对内陆地表水中砷的研究较多^[7,8], 对西藏水体中砷的相关研究较少, 尤其是河水中砷的研究. 田立德等^[9]采集森格藏布、雅鲁藏布、当雄等16个河水样品, 其中2个狮泉河水样品中的砷含量也分别高达 $59\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $143\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显高于正常河水的平均含量(通常不超过 $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 该区人口稀少, 矿业和工业等活动较少, 其砷异常不太可能来源于人为活动. 同时, 前人研究表明西藏盐湖、地热水中砷的浓度明显偏高, 通常高于 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 且西藏盐湖星罗棋布、地热近700处^[10~13]. 区域分布较广的可能的砷来源, 对当地居

收稿日期: 2011-12-14; 修订日期: 2012-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41073100)

作者简介: 王明国(1983~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为微量元素地球化学, E-mail: wangmingguo@mails.gyig.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: lishohong@vip.gyig.ac.cn

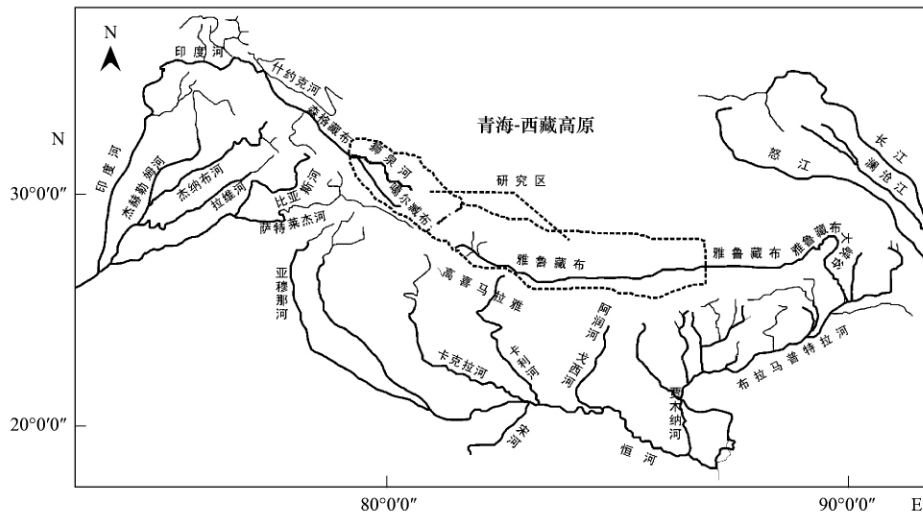


图1 雅鲁藏布和森格藏布地理位置及流域

Fig. 1 Location and basin of Yarlung Zangbo and Singe Zangbo

民和生物存在极大的健康威胁,对两流域地表水体中砷的具体分布以及河流、湖泊、热泉水之间的关系值得深入研究.

李社红等^[14]分别对西藏雅鲁藏布、森格藏布流域河水、沉积物、岩石、土壤及部分湖水、湖底沉积物、热泉水、热泉水沉积物中砷的分布研究以及砷的来源等研究进行了概述,本文为其地表水水体中砷的分布研究中的部分详细成果,通过系统采集森格藏布和雅鲁藏布流域地表水体样品,对两流域不同水体中砷的分布规律进行比较细致的研究.

1 材料与方法

1.1 样品采集与前处理

于2008年5月至2008年6月,沿雅鲁藏布和森格藏布流域采集河流、湖泊、地热和浅层井水等水体样品,全程卫星定位仪(GPS)跟踪布点.

采集地表水样品86件,包括河水74件,湖水9件,热泉水2件,浅层井水1件.水样采集时现场用孔径为0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤,125 mL 高密度聚四氟乙烯(HDPE)瓶盛装,并滴加数滴超纯硝酸酸化至pH < 2,放置于冷藏柜(<4℃)中保存.所有高密度聚四氟乙烯瓶使用前均在实验室用体积分数为20%的硝酸浸泡72 h,并用去离子水冲洗干净,烘干,采样前用样品滤液润洗3遍以上.

1.2 样品测定

样品于中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室测定.分析仪器为AFS-920顺序注射双道原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公

司) 砷灯为高性能空心阴极灯(北京有色金属研究总院),载气为高纯氩气;测定条件为原子荧光电流60 mA,负高压270 V,载流浓度为0.72 mol·L⁻¹,KBH₄溶液的质量分数为1%(介质为质量分数为0.2%的NaOH溶液);As(V)储备液(1000 μg·mL⁻¹)购于国家标准物质中心,于冰箱中4℃保存;配置0、2、4、6、8、10 μg·L⁻¹和0、20、40、60、80、100 μg·L⁻¹两套标准系列,采用手动模式分别绘制标准曲线,其线性相关系数 r 均在0.998($n=5$)以上;每测定5个样品加入与测定样品含量相应的标准溶液进行质量监控;对盐咸湖水和热泉水等高砷样品逐级稀释至标准曲线浓度范围内测定.

2 结果与分析

西藏河流、湖泊、井、热泉等水体样品中砷含量范围和频数分布如图2所示.不同水体中砷含量由高至低依次为:热泉水(4920 μg·L⁻¹ ± 1520 μg·L⁻¹, $n=2$) > 盐(咸)水湖水(2180 μg·L⁻¹ ± 3840 μg·L⁻¹, $n=7$) > 井水(194 μg·L⁻¹, $n=1$) > 淡水湖水(163 μg·L⁻¹ ± 202 μg·L⁻¹, $n=2$) > 河水(35.5 μg·L⁻¹ ± 57.0 μg·L⁻¹, $n=74$).除了56.8%的河水样品外,其它水样中砷的含量均高于世界卫生组织(WHO)推荐的和我国生活饮用水卫生标准规定的10 μg·L⁻¹限值[《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)砷的卫生限量标准],这对当地居民的饮水安全构成了一定的威胁.

2.1 河水中砷的分布

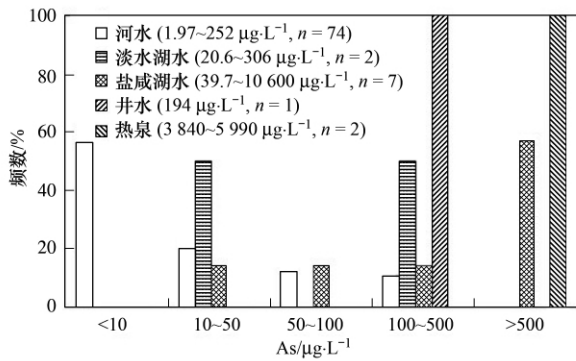


图2 西藏不同水体砷的含量分布

Fig. 2 Arsenic concentration in different water types in Tibet

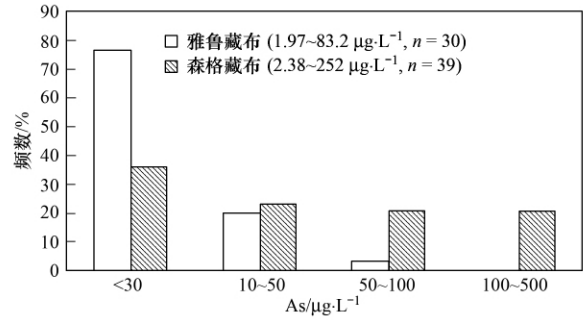


图3 西藏雅鲁藏布和森格藏布河水砷的含量分布

Fig. 3 Arsenic concentration of river waters from Yarlung Zangbo and Singe Zangbo in Tibet

河水中砷平均含量为 $35.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中雅鲁藏布河水中砷的平均含量明显低于森格藏布, 分别为 $10.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 16.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $58.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 69.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值仅为后者的 18.5%。雅鲁藏布河流域 23.3% 的河水样品中砷含量高于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 而森格藏布流域 64.1% 河水样品中砷含量高于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3)。雅鲁藏布和森格藏布是该地区的重要农牧饮用水源, 目前尚无人畜砷中毒的报道。

2.1.1 雅鲁藏布流域河水砷含量分布

雅鲁藏布干流及其各主要支流河水砷的分布如图 4 所示, 高砷河水主要分布于日喀则以西的上游区域, 特别是上游支流多雄藏布 (T9, $83.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 马泉河 (也称当却藏布, T12, $37.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; T10, $37.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 干流沿流向河水中的砷总体呈下降趋势 (图 5), 尤其是日喀则以东向下, 随着低砷河水的汇入稀释和河底沉积物沉积吸附, 河水砷含量明显降低。

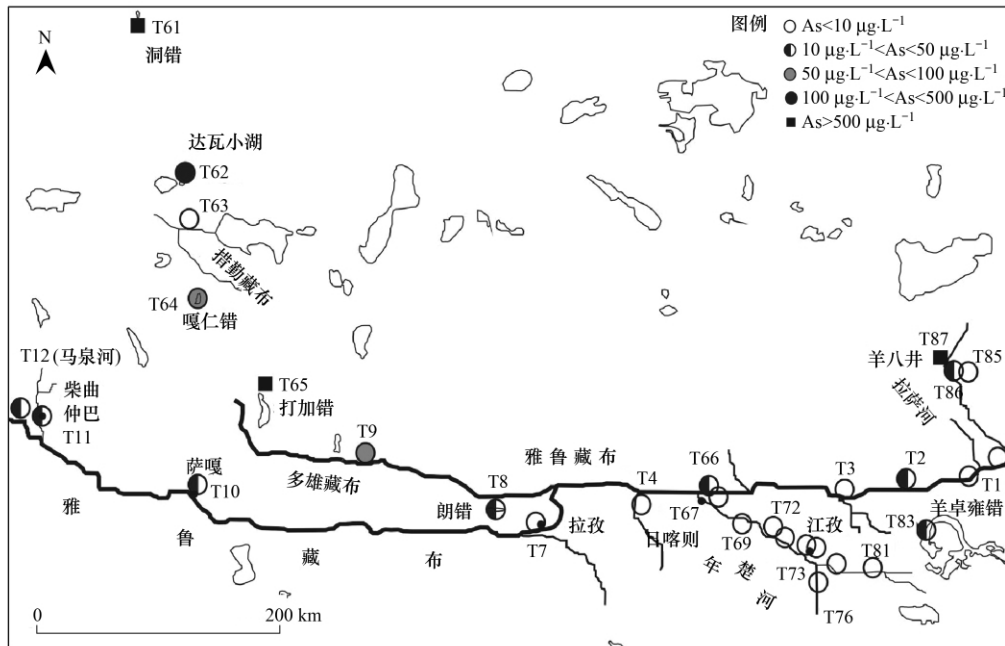


图4 雅鲁藏布江流域水体中砷的分布示意

Fig. 4 Distribution of arsenic concentration in water from Yarlung Zangbo drainage

雅鲁藏布支流年楚河流域江孜盆地下白垩统硅化岩 (硅化泥岩、硅化灰岩) 中存在砷的超常富集, 最高达 $258 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [15], 可能为该流域河水提供高砷物质来源。本次研究在该流域进行了详细系统的采样, 以研究高砷河水与高砷岩层之间是否存在某

种耦合关系, 但结果显示, 该流域河水中砷的含量并不高, 均低于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4)。

2.1.2 森格藏布流域河水砷含量分布

森格藏布干流及其各主要支流河水中砷的分布如图 6 所示。研究表明该流域河水中砷含量普遍较

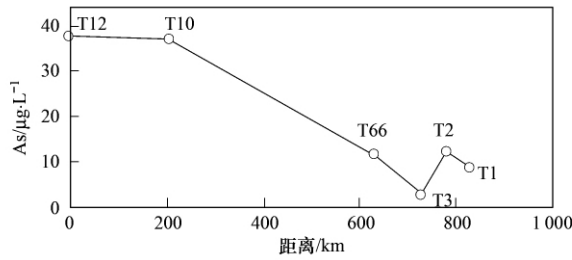


图5 雅鲁藏布江沿流向水砷的变化趋势
Fig. 5 Variation of arsenic concentration in Yarlung Zangbo waters along the flow direction

高,尤其是狮泉河流域,除了个别支流河水外,基本都大于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 甚至 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中朗久河、热玛江梅布河、那果等支流砷含量高,对整个干流高砷的贡献最大.

对于支流噶尔藏布而言,其河水中砷含量从上游向下呈上升趋势(图7). 虽然有部分低砷的支流汇入,但受水量等因素影响,河水的稀释净化作用并不明显,河流沉积物对砷的吸附沉积作用也不显著. 例如,采样点 T23 与 T20 间有一支流 T21 汇入噶尔藏布,该支流河水中砷含量为 $5.56 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,但其河

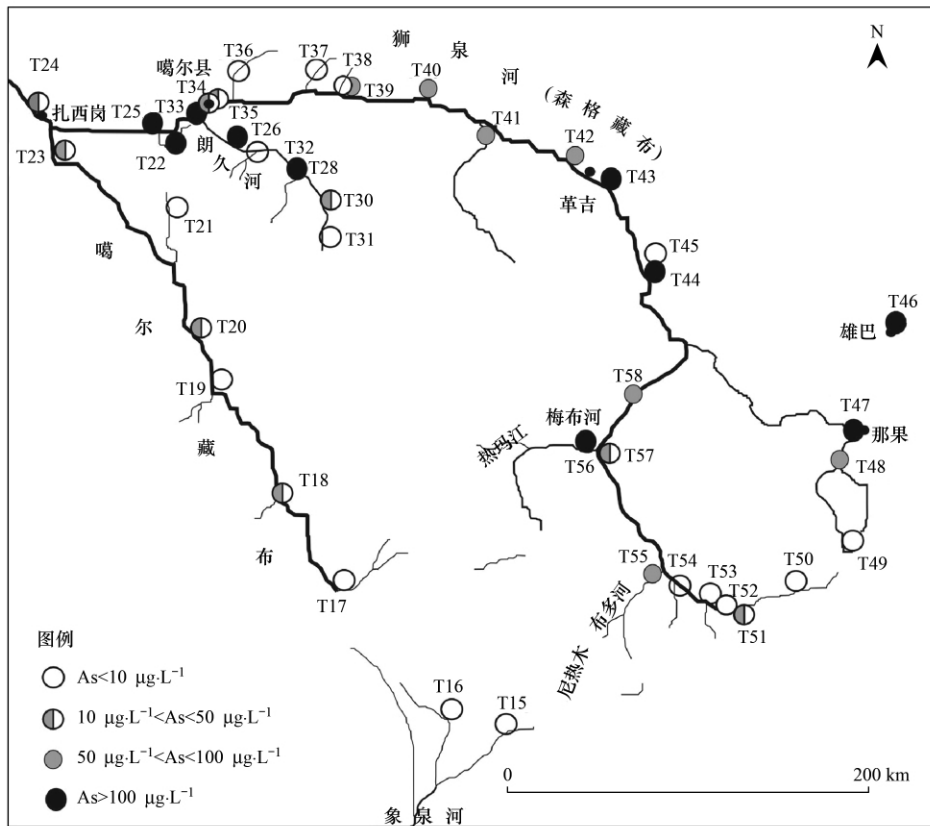


图6 森格藏布流域水体中砷的分布示意
Fig. 6 Arsenic distribution of river water in Singe Zangbo

宽仅约 2 m,深约 30 cm,流速缓,流量小,对噶尔藏布河水中砷的含量影响有限. T24 位于森格藏布与噶尔藏布交汇处下游方向约 6 km 处,受高砷的森格藏布河水汇入影响(如 T25 河水砷的含量为 $129 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),该点河水砷含量明显升高.

对森格藏布(狮泉河)而言,其干流砷含量范围为 $3.10 \sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值达 $68.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 50.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,干流水砷含量沿流向变化较大(图8). 上游河段 T53 ~ T54 河水中砷含量较低,低于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,受尼热木布多河(T55, As $61.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、热玛江热布河(T56, $234 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、那果

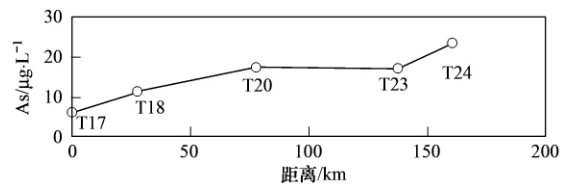


图7 森格藏布流域噶尔藏布河水中沿流向砷的变化趋势
Fig. 7 Variation of arsenic concentration of Gar Zangbo waters in Singe Zangbo along the flow direction

(T47 $252 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 等高砷支流汇入的影响,森格藏布革吉县上游 T43 ($149 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、T44 ($150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 以上干流河段砷的含量明显上升. 革吉县

(T43) 到噶尔县狮泉河镇 (T34) 之间河段随一些低砷支流的汇入以及河流本身的净化作用, 河水砷含量逐渐降低, 但总体水平依然较高。到了噶尔县, 随着高砷的朗久河的汇入, 森格藏布河水中砷含量陡然升高 (T25, $129 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。再向下至扎西岗, 随着与相对低砷、流量较大的噶尔藏布汇合, 河水中砷含量急速降低 (T24, $23.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。河水中的砷受补给源、沉积吸附、稀释及富集等影响, 流域支流较多, 增加干流中砷变化的复杂性。

森格藏布河水补给来源包括地下水、大气降水和冰雪融水, 其中冰雪融水和大气降水中砷的含量通常较低。流域内年平均降水量仅为 71.2 mm , 其中 6~9 月份降水量为 60.0 mm ^[16], 占全年降水量的 84.3%。本次采样时间为 5~6 月, 为丰水期, 雨水补给所占比重相对较大, 若采样时间为枯水期, 河流补给主要为地下水, 河水砷的含量可能要高。

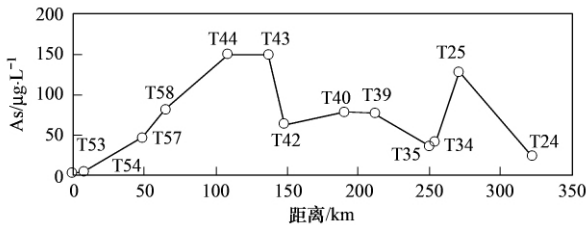


图 8 森格藏布沿流向砷的变化趋势

Fig. 8 Variation of arsenic concentration in Singe Zangbo waters along the flow direction

2.2 湖水中砷的分布

采集西藏盐(咸)湖水样 7 个, 包括朗错、嘎仁错、聂尔错、洞错、达瓦小湖、打加错、别弱则错等, 其砷的含量分别为 39.7、60.8、769、714、260、2 800 和 $10\ 600 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值 $2\ 180 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 3\ 840 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最低值与最高值之间相差约 250 倍。

田立德等^[9]采集的朗错湖水砷含量为 $46.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 与本研究差别不大, 而采集的达瓦小湖湖水砷含量为 $504 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 约为本次研究结果的 2 倍, 差异的产生可能与采集样品的季节、降水及蒸发变化等有关, 更主要的原因可能与样品采集的方法不同有关。田立德等^[9]采集的水样没有现场过滤, 样品采集后于实验室 -15°C 下冰冻保存, 实验前自然融化, 离心, 取上清液加酸测定, 在此过程中可能存在部分悬浮颗粒物中的砷释放进入水中。

同时采集 2 个淡水湖水样, 分别为羊卓雍错和玛旁雍错, 其砷的含量分别为 $20.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $306 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均高于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。淡水湖水中砷的含量较高, 可能主要与强烈的蒸发和高砷地热水的补

给有关。羊卓雍错是青藏高原南部最大的构造成因封闭型内陆湖泊, 湖水主要由降水和冰雪融水补给^[17], 年平均蒸发量约为降水量的 4 倍^[18], 湖水与补给河水中氧同位素结果也显示湖水曾经发生比较强烈的蒸发^[19]; 玛旁雍错是西藏较大的内陆湖, 年平均蒸发量约为降水量的 16 倍, 自 1974~2003 年湖水面积从 782.24 km^2 缩小至 748.08 km^2 ^[20]。除强烈的蒸发外, 砷含量高达 $5\ 990 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的九寺温泉位于该湖西北岸, 可能为其湖水砷的重要补给来源。

2.3 热泉和井水中砷的分布

采集的九寺温泉和羊八井 4 号井地热水中砷的含量分别为 $5\ 990$ 、 $3\ 840 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。羊八井地热水中砷的含量低于 Guo 等^[21]的研究结果 ($5.7 \times 10^3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。结果差异的原因可能与样品采集的地点、井位、井深、时间、热水所附的岩层、地热田当时流量等都有关系。

本次采集革吉县雄巴乡居民饮用浅井井水样 (深约 2.5 m , 样号 TW-46) 一件, 其砷的含量高达 $194 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 远远超过 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的饮用水砷限量标准, 当地居民存在砷中毒的风险。

3 结论

(1) 西藏不同水体中砷含量不同, 其砷含量由高到低依次为: 热泉水 ($4\ 920 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 1\ 520 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=2$) > 盐(咸)湖水 ($2\ 180 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 3\ 840 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=7$) > 井水 ($194 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=1$) > 淡水湖水 ($163 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 202 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=2$) > 河水 ($35.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} \pm 57.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=74$)。

(2) 森格藏布河水砷平均含量明显高于雅鲁藏布, 森格藏布和雅鲁藏布上游存在高砷河水。

(3) 热泉水、盐咸湖水、井水以及 43.2% 的河水中砷的含量均高于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 雅鲁藏布和森格藏布作为两流域内居民主要的饮用水源, 居民具有患上地方性砷中毒的风险。

致谢: 感谢西藏自治区第一区域地质大队李关清主任和贵阳市公路局付光勇同志在采样过程中提供的便利和帮助, 感谢纽约市立大学郑焰教授、杨强博士为研究的实施给予的支持。

参考文献:

- [1] 金银龙, 梁超轲, 何公理, 等. 中国地方性砷中毒分布调查 (总报告) [J]. 卫生研究, 2003, 32(6): 519-540.
- [2] 余慧珍, 吴海坤, 喇翠玲, 等. 2006 年青海省饮用水含砷量检测结果分析 [J]. 中国地方病学杂志, 2007, 26(3): 342.
- [3] 郭华明, 王焰新, 李永敏. 山阴水砷中毒区地下水砷的富集

- 因素分析[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 60-67.
- [4] Chakraborti D, Singh E J, Das B, *et al.* Groundwater arsenic contamination in Manipur, one of the seven North-Eastern Hill states of India: a future danger [J]. *Environmental Geology*, 2008, **56**(2): 381-390.
- [5] Khan M A, Ho Y S. Arsenic in drinking water: a review on toxicological effects, mechanism of accumulation and remediation [J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2011, **23**(5): 1889-1901.
- [6] Routh J, Hjeimquist P. Distribution of arsenic and its mobility in shallow aquifer sediments from Ambikanagar, West Bengal, India [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(4): 505-515.
- [7] 姚庆祯, 张经. 长江口及邻近海域痕量元素砷、硒的分布特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 33-38.
- [8] 黄清辉, 马志玮, 李建华, 等. 2006年春季长江口砷形态分析及其生物有效性[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2131-2136.
- [9] 田立德, 李月芳, 姚檀栋. 青藏高原天然水体中As变化初步研究[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(1): 98-101.
- [10] 郑喜玉, 场绍怪. 西藏盐湖成分及其成因探讨[J]. 海洋与湖沼, 1983, **14**(4): 342-352.
- [11] 郑喜玉. 西藏盐湖微量元素的分布[J]. 海洋与湖沼, 1988, **19**(1): 52-53.
- [12] 赵平, 谢鄂军, 多吉, 等. 西藏地热气体的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2002, **18**(4): 539-550.
- [13] 郑绵平. 中国盐湖资源与生态环境[J]. 地质学报, 2010, **84**(11): 1613-1622.
- [14] 李社红, 王明国, 郑宝山, 等. 西藏雅鲁藏布江及狮泉河流域地表水, 土壤中砷的富集及来源初探[A]. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第12届学术年会论文集[C]. 贵阳, 2009. 368.
- [15] 付伟, 周永章, 杨志军, 等. 藏南江孜盆地白垩统硅化层的地质地球化学特征及其成矿意义[J]. 现代地质, 2005, **19**(2): 267-273.
- [16] 尚可政, 韩晶晶, 杨德保, 等. 西藏西北高原气候变化趋势及预测——以狮泉河站为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2006, **42**(6): 27-32.
- [17] 张荣祖, 郑度, 杨勤业. 西藏自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [18] Tian L, Liu Z F, Gong T L, *et al.* Isotopic variation in the lake water balance at the Yamdruk-tso basin, southern Tibetan Plateau [J]. *Hydrological Processes*, 2008, **22**(17): 3386-3392.
- [19] 高晶, 姚檀栋, 田立德, 等. 羊卓雍错流域湖水氧稳定同位素空间分布特征[J]. 冰川冻土, 2008, **30**(2): 338-343.
- [20] 叶庆华, 姚檀栋, 郑红星, 等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应[J]. 地理研究, 2008, **27**(5): 1178-1190.
- [21] Guo Q H, Wang Y X, Liu W. B, As, and F contamination of river water due to wastewater discharge of the Yangbajing geothermal power plant, Tibet, China [J]. *Environmental Geology*, 2008, **56**(1): 197-205.