DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2020. 05. 014

格尔木河水化学特征及成因

汪生斌[1,2],祁泽学[1,2],王万平[1,2],张国强[1,2]

(1. 青海省环境地质重点实验室,青海 西宁 810007; 2. 青海省环境地质勘查局,青海 西宁 810007)

摘要:为探究格尔木河水化学沿程变化情况,于 2019 年 7—8 月在该区采集 33 组水样进行测试分析,采用 Piper 三线图解法和 Gibbs 图解法,分析了格尔木河从源头至入湖口的水化学特征、形成原因以及主要离子来源。结果表明:格尔木河水体沿程水化学呈现由 HCO_3-Ca-Mg 型到 HCO_3-Cl-Na-Ca-Mg 型再到 HCO_3-Cl-Na-Mg-Ca 型的演变特征,到溢出带北侧 Cl^- 和 Na^+ 逐步占主导地位;水化学类型的主要形成原因为溶滤作用和蒸发浓缩作用;主要离子来源为石盐、碳酸盐以及硫酸盐等的风化溶解。

关键词:水化学;离子来源;Piper 三线图解法;Gibbs 图解法;格尔木河

中图分类号:X131. 2 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2020)05 - 0093 - 06

Hydrochemical characteristics and causes of formation of the Golmud River // WANG Shengbin[1,2], QI Zexue[1,2], WANG Wanping[1,2], ZHANG Guoqiang[1,2] (1. *Key Lab of Geo-environment Qinghai Province*, *Xining* 810007, *China*; 2. *Environmental Geological Prospecting Bureau of Qinghai Province*, *Xining* 810007, *China*)

Abstract: In order to explore the hydrochemical changes along the Golmud River, 33 groups of water samples were collected and tested in this area from July to August 2019. Piper triangle graphic method and Gibbs graphic method were adopted to analyze the hydrochemical characteristics, causes of formation and main ion sources of the Golmud River from source to inlet . The results show that the hydrochemistry along the Golmud River changes from the type of HCO_3-Cl-Na-Ca-Mg to the type of HCO_3-Cl-Na-Mg-Ca, with Cl^- and Na^+ gradually dominating on the north side of overflow zone. The main causes of formation of hydrochemical types include lixiviation and evaporation concentration effect. Sources of ions are mainly from the weathering dissolution of halite, carbonate, sulfate and so on.

Key words: hydrochemistry; ion source; Piper triangle graphic method; Gibbs graphic method; Golmud River

研究流域地表水体离子组成特征及空间分布情况能够揭示流域内相关水文地质特性和人类活动对水体的影响。国内外已经在这方面开展了大量研究,Martin 等[1]对世界各大主要河流的离子输送情况进行了汇总分析;依据影响河流中主要溶解物质的化学组分的不同形式,Gibbs[2]将河流的天然溶质分为风化控制、结晶控制以及降水控制 3 种类型;乐嘉详等[3]分析了我国近 500 条河流水化学特征及其时空变化规律;陈静生等[4-13]对我国长江、黄河、珠江以及西藏、苏北等进行了较为长期的水化学研究。前人对格尔木河流域地下水水化学特征及演化、区域的地下水流系统及地下水形成的环境演化研究较多[14]。早期,谭红兵等[15]对格尔木河水化学特征进行了研究,唐启亮等[16-18]也进行了相关研究。在空间尺度上,研究包括针对格尔木河中上游[5,16]、中下游[17]及全河流段[19]的水化学分析,但分析的水化学组分尚不具有系统性。因此,本文对格尔木河 2019 年沿程水化学情况进行分析,探讨其水化学沿程变化特征,以期为格尔木地区水资源的合理开发和利用提供参考。

1 研究区概况

格尔木河位于柴达木盆地南缘,发源于柴达木盆地南部的昆仑山,流经格尔木市,最终汇入中国最大的钾盐基地——察尔汗盐湖。流域位于东经 94°25′~95°19′,北纬 36°09′~37°07′,自南向北延

基金项目:青海省科技厅项目(2018-ZJ-740)

作者简介:汪生斌(1985—),男,高级工程师,主要从事水文地质、环境地质和工程地质研究。E-mail: 269376833@qq.com

通信作者:祁泽学,工程师。E-mail: 595798744@qq.com

伸。作为柴达木盆地最大的河流之一,格尔木河既是格尔木市重要的供水水源地,又是盐湖区成盐物质的重要补给源,同时也涵养着中下游的植被生态和农业,兼具资源、经济和生态多重功能。雪水河和昆仑河是格尔木河两条主要的补给河流,流经冲洪积平原至溢出带后以泉集河的形式溢出地表,主要的泉集河有格尔木东河、格尔木西河、红旗河、金水河、巴水河、清水河等。格尔木河水系如图 1 所示。流域内气候高寒干旱,少雨多风,日照时间长,昼夜温差大,属典型的高原内陆盆地干旱气候。多年平均气温 4.88 ℃,多年平均降水量 42.29 mm,多年平均蒸发量 2 626.94 mm,相对湿度 35% 。

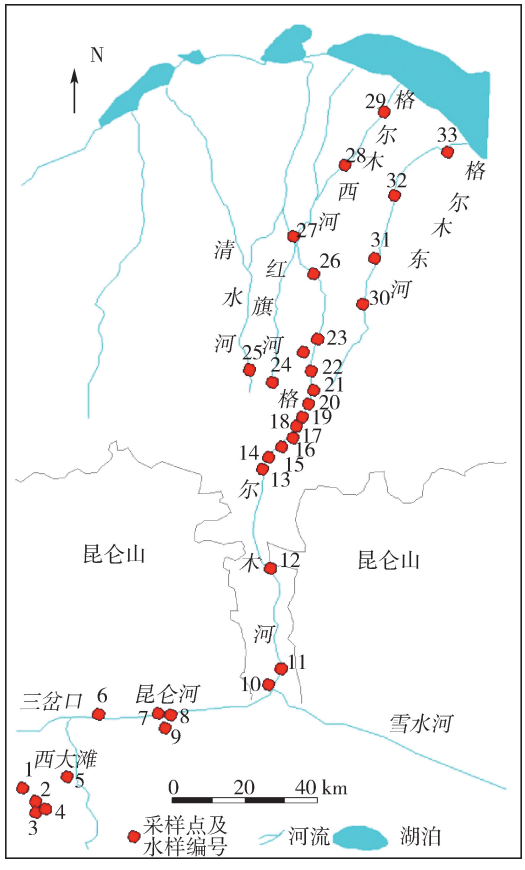


图 1　格尔木河水系与采样点位置

Fig. 1　River system and location of collected water samples of the Golmud River

2　研究方法

为研究格尔木河整个河流的水化学特征以及主要离子来源,沿着西大滩的冰川融水途径三岔口与纳赤台、昆仑河与雪水河的交界点,由此向北穿过格尔木市,直抵察尔汗盐湖,取样路径全长约 187 km。采样的时间段为 2019 年 7—8 月,共采集 33 组水样(图 1)。严格按照取样规范将采集的水样密封保存后送青海省环境地质重点实验室,检测各主要阴阳离子的浓度。根据格尔木地区的水文地质条件,结合水样的测试结果,利用 Piper 三线图解法和 Gibbs 图解法分析格尔木河的水化学特征。

3　结果与分析

3.1　主要离子的沿程变化特征

图 2 为格尔木河主要离子的沿程变化,图中“距离”指离河水源头的距离。由图 2 可见,格尔木河各主要离子沿程呈明显的空间变化特征,根据各组水样统计分析,格尔木河水体主要阳离子为 Na^+、Ca^{2+} 以及 Mg^{2+},主要阴离子为 Cl^-、HCO_3^- 以及 SO_4^{2-}。

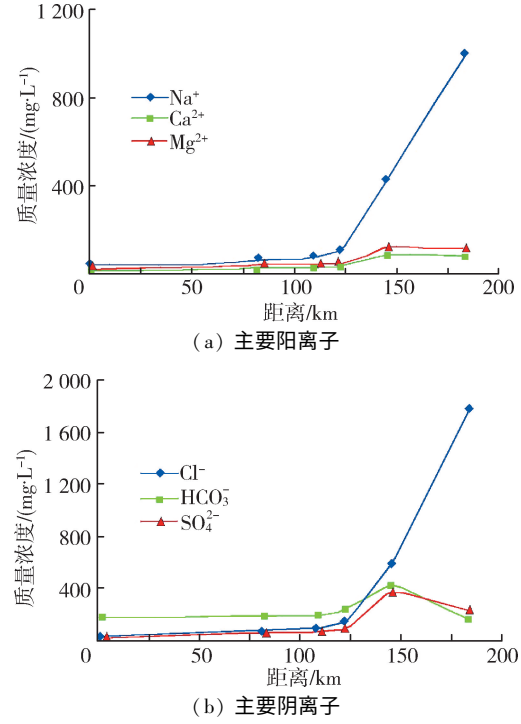


图 2　格尔木河主要离子沿程变化

Fig. 2　Trend of main ions along the Golmud River

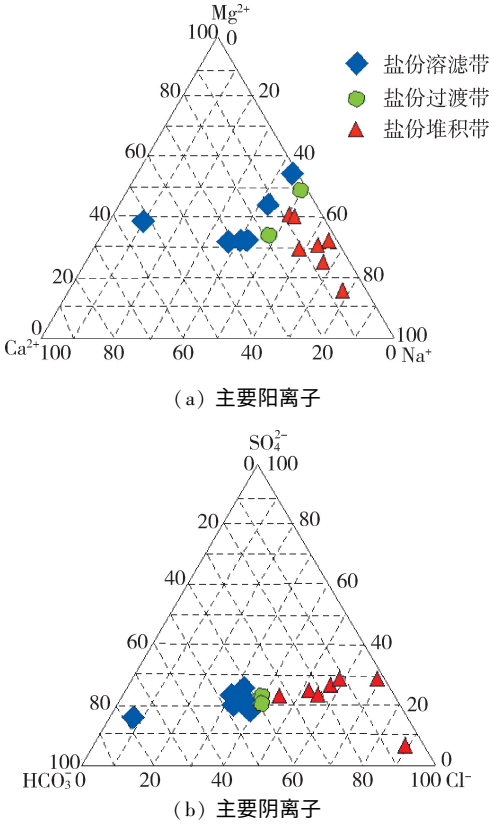
a. 主要阳离子沿程变化。①Na^+ 质量浓度:在河水源头为 6.88 mg/L、出山口为 55.10 mg/L、山前冲洪积扇为 62.96 mg/L、溢出带前缘为 91.64 mg/L,自溢出带以北,Na^+ 质量浓度急剧增加,由盐沼平原区 423.16 mg/L 至入湖口增加到 996.32 mg/L;②Ca^{2+} 质量浓度:在出山口为 40.48 mg/L、山前冲洪积扇为 37.47 mg/L、盐沼平原区为 82.55 mg/L、入湖口为 75.04 mg/L;③Mg^{2+} 质量浓度:沿程变幅小于 Na^+,但整体亦呈现上升趋势。

b. 主要阴离子沿程变化。①Cl^- 质量浓度:变化趋势与 Na^+ 基本一致,在河水源头为 8.62 mg/L、出山口为 74.20 mg/L、山前冲洪积扇为 87.10 mg/L、溢出带前缘为 135.49 mg/L,之后急剧增加,盐沼平原区为 580.68 mg/L、入湖口为 1 775.82 mg/L;②HCO_3^- 质量浓度:变化趋势与 Ca^{2+} 基本一致,在河水源头为 171.96 mg/L、盐沼平原区为 448.32 mg/L,随后减

少,入湖口变为 159.68 mg/L;③SO_4^{2-} 质量浓度:沿程变化与 HCO_3^- 趋势基本一致,在河水源头为 28.15 mg/L、盐沼平原区为 396.80 mg/L,随后减少,入湖口变为 208.10 mg/L。

3.2 水化学类型分析

自山区至达布逊湖,格尔木河水的水化学类型逐渐由单一变为复杂,为能较为准确地描述水化学类型的沿程变化情况,利用 Piper 三线图解法,绘制 Piper 三线图进行分析,结果见图 3。



(a) 主要阳离子

(b) 主要阴离子

图 3 格尔木河主要离子 Piper 三线图

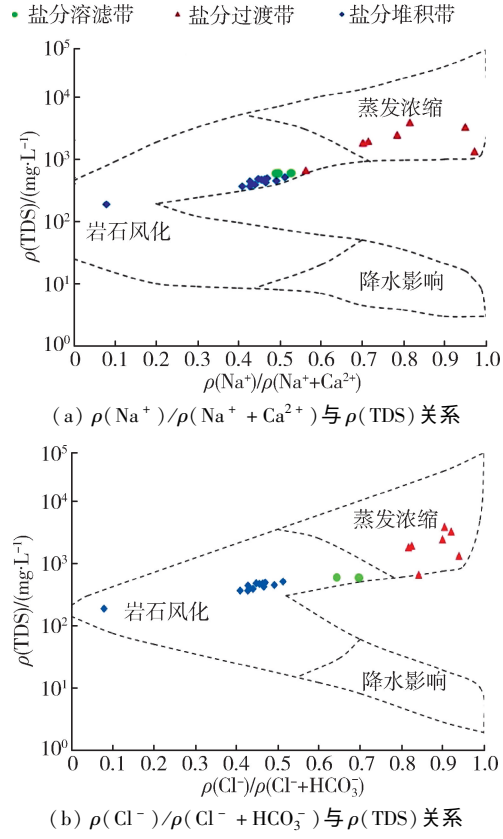
Fig. 3 Piper diagram of major ions in the Golmud River

由图 3 可知,山区格尔木河源头(冰川融水)的水化学类型为 HCO_3-Ca-Mg 型,至山前格尔木河上游(昆仑河与雪水河的交界处)变为 HCO_3-Cl-Na-Ca-Mg 型,出山口处变为 HCO_3-Cl-Na-Mg-Ca 型,河流中下游溢出带附近变为 Cl-HCO_3-Na-Mg 型,溢出带以北至盐沼平原带水变为 Cl-SO_4-Na-Mg 型,再向北至盐湖入湖口变为 Cl-Na 型,可见格尔木河水体沿程水化学类型呈现明显的分带性。

4 水化学成因分析

4.1 河水中主要离子的 Gibbs 图

Gibbs 图能较为直观地评价河水的化学组成、形成原因和相互间的关系,图 4 为格尔木河主要离子 Gibbs 图,纵坐标为河水中总溶解固体(TDS)质量浓度的对数坐标,横坐标为普通坐标,代表主要阳离子 $\rho(Na^+)/\rho(Na^+ + Ca^{2+})$ 或者主要阴离子 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^- + HCO_3^-)$ 的比值。Gibbs 图将影响河流化学组分的因素分为 3 个区:左中部的岩石风化区、右上部的蒸发浓缩区以及右下方的降水影响区。由图 4 可见,格尔木河化学组分主要受岩石风化以及蒸发浓缩作用控制,在溢出带以南河流样品基本都落在 $\rho(Na^+)/\rho(Na^+ + Ca^{2+})$ 或 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值小于 0.5 的范围内,表明溢出带以南的河水离子成分主要源于岩石风化过程;在溢出带以北至达布逊湖的水样点 $\rho(Na^+)/\rho(Na^+ + Ca^{2+})$ 或者 $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^- + HCO_3^-)$ 比值较高,样品点主要分布在 Gibbs 图的右上方,说明该段河流的离子主要受控于蒸发浓缩作用。



(a) $\rho(Na^+)/\rho(Na^+ + Ca^{2+})$ 与 ρ(TDS) 关系

(b) $\rho(Cl^-)/\rho(Cl^- + HCO_3^-)$ 与 ρ(TDS) 关系

图 4 格尔木河主要离子 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of major ions in the Golmud River

根据 Gibbs 图的分析结果,可将格尔木河河水离子分为盐分溶滤带、盐分堆积带以及盐分过渡带。各带特征分别为:①盐分溶滤带地面坡度大,河床沉积物矿物成分以方解石、白云石为主,因此河水与河床之间的溶蚀作用较大,加之温度的变化急剧,生物作用、各种地质营力的剥蚀作用和岩石的风化作用成为影响此带水化学特征的主要因素;②盐分堆积带地形较为平坦(地面坡度小于 3‰),水动力条件较差,土壤颗粒较细,潜水埋深较浅(小于 2 m),气候干旱,蒸发作用强烈;③盐分过渡带水化学影响因素介于岩石风化与蒸发浓缩之间。山前戈壁区-冲

洪积扇区–冲湖积平原区总体规律为:在山前戈壁砾石区以及冲洪积平原区,格尔木河河水的水化学过程主要为水岩反应以及 Ca^{2+} 的溶解,且随着地面坡度的降低其过程逐渐减弱;至冲湖积平原区,河水的水化学特征主要为地下水位埋深变浅,蒸发作用加强,土壤盐渍化增加,土壤中的 Na^+ 析出,蒸发浓缩作用强烈。

4.2 河水中主要离子的溯源分析

河水中的各离子来源主要受自然环境以及人类活动等因素的影响,当河水中离子间关系密切(相关性较好)时,可以判断溶质的来源或相对应的物理化学反应。将采样点各指标的质量浓度进行 Pearson 相关性分析,结果见表1。可见,在盐分溶滤带(冲洪积平原区)在 $P=0.01$ 水平上,Na^+ 与 Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^- 均显著相关,Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 显著相关,Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 显著相关,Cl^- 与 SO_4^{2-}、HCO_3^- 显著相关,SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 显著相关,且 TDS 与 Na^+ 正相关、与 Ca^{2-} 负相关,说明该地段物理化学作用中的风化溶滤占主导。在盐分过渡带与盐分堆积带(湖积平原区与盐沼平原区),在 $P=0.01$ 水平上,Na^+ 与 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^- 以及 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 高度相关,TDS 与 Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-} 高度正相关,说明该地段物理化学作用中的蒸发浓缩作用占主导地位。可见,格尔木河的 TDS 主要贡献者为 Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}。

表1 河水中主要离子的相关系数

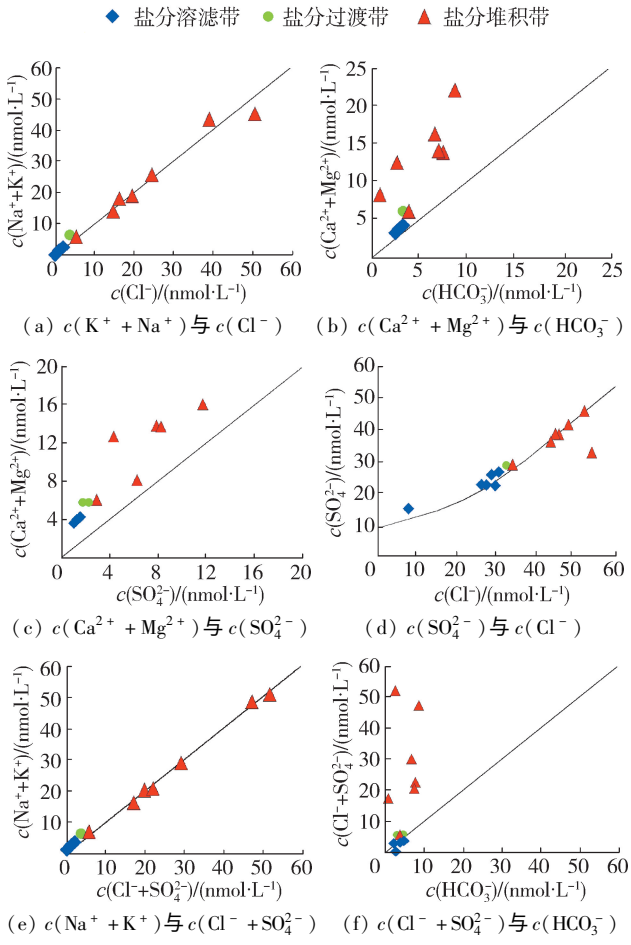
Table 1 Correlation coefficient of major ions in river

指标	盐分溶滤带						
	TDS	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
TDS	1						
Na^+	0.99**	1					
Ca^{2+}	−0.22	−0.26	1				
Mg^{2+}	0.73**	0.76**	−0.81**	1			
Cl^-	0.98**	0.97**	−0.11	0.63*	1		
SO_4^{2-}	0.87**	0.86**	−0.51	0.86**	0.76**	1	
HCO_3^-	0.85**	0.84**	−0.15	0.66**	0.79**	0.71**	1

指标	盐分过渡带与盐分堆积带						
	TDS	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
TDS	1						
Na^+	0.99**	1					
Ca^{2+}	0.79**	0.75**	1				
Mg^{2+}	0.90**	0.83**	0.73*	1			
Cl^-	0.95**	0.98**	0.70*	0.72*	1		
SO_4^{2-}	0.81**	0.72*	0.68*	0.97**	0.5800	1	
HCO_3^-	0.4400	0.3300	0.71*	0.64*	0.1900	0.68*	1

注:** 表示在 $P=0.01$ 水平上显著相关;* 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

一般情况下河水中的 Na^+ 主要源自石盐溶解及含 Na^+ 岩石的风化,K^+ 主要源于钾长石及白云母等的风化。图5为格尔木河水体中主要离子的相互关系。格尔木河水体中的 Na^+ 和 Cl^- 的浓度不相等,其物质的量的比值为 0.86 ~ 1.29,平均值为 1.14,表明格尔木河河水中 Na^+ 不仅源于石盐溶解,部分还源于其他含 Na^+ 岩石的风化。由图5(a)可见,$c(K^+ + Na^+)$ 与 $c(Cl^-)$ 比值基本在 1∶1 线上,表明河水在进行上述过程的同时还受到蒸发作用的影响;由图5(b)可见,在盐分溶滤带(冲洪积平原区),$c(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 与 $c(HCO_3^-)$ 较接近,样品 $c(Ca^{2+} + Mg^{2+})/c(HCO_3^-)$ 的比值在 1∶1 线附近,这说明在该区域 Ca^{2+}、Mg^{2+} 主要来自碳酸盐的风化;由图5(c)可见,在盐分过渡带与盐分堆积带(湖积平原区与盐沼平原带),由于受到强烈的蒸发作用使得 $c(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 远高于 $c(HCO_3^-)$ 和 $c(SO_4^{2-})$;由图5(d)可见,$c(Cl^-)$ 与 $c(SO_4^{2-})$ 具有显著的相关性,说明 Cl^- 与 SO_4^{2-} 具有同源性,表明 SO_4^{2-} 主要来自 Ca、Mg 的硫酸盐矿物;由图5(e)可见,$c(Na^+ + K^+)$ 与 $c(Cl^- + SO_4^{2-})$ 也具有显著的相关性,这表明 K_2SO_4 与 Na_2SO_4 也存在共同的来源;由图5(f)可见,在盐分堆积带,河水中 $c(Cl^- + SO_4^{2-})$ 与 $c(HCO_3^-)$ 的比值非常的大,这说明主要以蒸发浓缩作用为主。



(a) $c(K^+ + Na^+)$ 与 $c(Cl^-)$ (b) $c(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 与 $c(HCO_3^-)$

(c) $c(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 与 $c(SO_4^{2-})$ (d) $c(SO_4^{2-})$ 与 $c(Cl^-)$

(e) $c(Na^+ + K^+)$ 与 $c(Cl^- + SO_4^{2-})$ (f) $c(Cl^- + SO_4^{2-})$ 与 $c(HCO_3^-)$

图5 格尔木河河水中主要离子的相互关系

Fig. 5 Corrilation of the main icons in the Golmud River

另外,土壤盐渍化从盐分过渡带开始出现,在盐分堆积带则表现得十分显著,盐壳厚度大于0.16 m。该地区的合川沉积物中存在有斜长石、方解石、白云石、白云母、伊利石、石盐,这些矿物的溶解对 K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^- 具有贡献作用。$c(Ca^{2+}+Mg^{2+})/c(Na^++K^+)$ 可以用来评价不同的岩石对水中离子的相对贡献,在碳酸盐地区这个比值相对较高,在蒸发区域这个比值较低。通过对样品的 $c(Ca^{2+}+Mg^{2+})/c(Na^++K^+)$ 进行计算,只有河水的形成区即冰川融水的比值较高为 9.7;而在盐分溶滤带的样品该比值在 1.19 ~ 1.64 之间,平均值为 1.37;盐分过渡带该比值在 1.06 ~ 1.14 之间,平均值为 1.11;盐分堆积带该比值在 0.29 ~ 1.02 之间,平均值为 0.63。由此可见,在盐分溶滤带,尤其是河水的形成区,主要以碳酸盐风化为主。

5 水化学对水文地质条件的指示意义

水化学成分的形成是地表水与周围环境长期作用的结果,影响因素众多,主要分为溶滤作用、蒸发浓缩作用、阳离子胶体吸附作用以及地貌气象等外界环境作用。由上述分析可知,格尔木河冲洪积扇区水化学成分主要为溶滤作用和蒸发浓缩作用共同影响的结果。

溶滤作用主要发生在高山区,地层以元古界为主,岩性多为灰岩、砂岩、片岩、泥岩等,河水主要来源于南部降水和冰雪融水,该区域水力坡度大,岩水交替强烈,河水在径流过程中与硅酸盐岩、碳酸盐岩以及硫酸盐岩等相互溶解,故而水化学作用主要以溶滤作用为主,形成了大部分 $\rho(TDS)<500$ mg/L 的 HCO_3-Ca(Ca·Na)和 HCO_3·SO_4-Ca(Ca·Na)型水。细土平原区地貌主要以第四纪冲湖积和湖积平原为主,岩性多为淤泥和黏土,垂向的水循环占主导,该地区主要成分为芒硝及盐类等,可能发生的溶滤作用化学式见式(1),作用后形成高矿化度的 Cl·SO_4-Na·Mg 和 Cl-Na 型水。溶滤作用是山区地下水水化学成分形成的主要作用之一。

$$Na_2SO_4\cdot 10H_2O+2H_2O=\!=\!=2Na^++SO_4^{2-}+12H_2O \quad (1)$$

蒸发浓缩主要是水去盐留的过程,伴随着蒸发的盐分急剧浓缩,直接表现为矿化度增大。其主要发生在接近地表水位埋深较浅的潜水含水层,地下水排泄处。格尔木河从山前冲洪积扇至细土平原,潜水水位逐渐变浅,毛细上升高度增大,流域潜水运动由水平径流为主转化为垂直交换为主,蒸发成为潜水的主要排泄方式。流域地下水水化学类型由以 HCO_3^- 为主转化为以 Cl^- 为主,水化学组分以 Na^+、Cl^- 为主,$\rho(TDS)$ 由 500 mg/L 左右上升到 1 077.21 mg/L,Na^+、Cl^- 离子浓度之比为 1∶8。蒸发浓缩作用是溢出带以北至盐湖区细土平原带地下水化学成分形成的主要作用之一。

人类活动主要通过排放废污水和改变地下水的形成条件来影响地下水的水化学成分。从本次取样结果来看,格尔木地区地下水水质总体良好,受人类活动干扰较小。研究时段格尔木河的水化学组分及水化学类型与谭红兵[15]及杜仲谋等[18-19]的研究结果相比未发生明显变化。

6 结 论

a. 格尔木河水化学组分阳离子以 Na^+、Ca^{2+} 以及 Mg^{2+} 为主,阴离子以 Cl^-、HCO_3^- 以及 SO_4^{2-} 为主。格尔木河河水沿程水化学类型呈现明显的分带性,即河源头为 HCO_3-Ca-Mg 型,河上游为 HCO_3-Cl-Na-Ca-Mg 型,出山口处为 HCO_3-Cl-Na-Mg-Ca 型,溢出带附近为 Cl-HCO_3-Na-Mg 型,溢出带以北为 Cl-SO_4-Na-Mg 型,盐湖入湖口变为 Cl-Na 型。

b. 格尔木河水 Na^+ 源于石盐溶解以及部分其他含 Na^+ 岩石的风化;Ca^{2+}、Mg^{2+} 主要来自碳酸盐的风化;SO_4^{2-} 主要来自 Ca、Mg 的硫酸盐矿物;K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^- 等部分源于斜长石、方解石、白云石、白云母、伊利石、石盐这些矿物的溶解。

c. 格尔木河水水化学类型形成与岩石的溶滤作用和蒸发浓缩作用密不可分,且不同区域主次不同,河水源头至出山口以溶滤作用为主,溢出带以北以蒸发浓缩作用为主。人类活动对格尔木河水水化学组分产生的影响较小。

参考文献:

[1] MARTIN J M, MEYBEEK M. ELemental mass-balance of material carried by major world river [J]. Marine Chemistry, 1979, 7: 173-206.

[2] GIBBS R J. Mechanisms contronlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170: 1880-1090.

[3] 乐嘉祥,王德春. 中国河流水化学特征[J]. 地理学报, 1984, 4(3): 213-217. (LE Jiaxiang, WANG Dechun. Hydrochemical characteristics of Chinese rivers[J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 4(3): 213-217. (in Chinese))

[4] 陈静生,王飞越,何大伟. 黄河水质地球化学[J]. 地学前缘, 2006(1): 58-73. (CHEN Jingsheng, WANG Feiyue, HE Dawei. Water quality geochemistry of the Yellow River[J]. Earth Science Frontiers, 2006(1): 58-73. (in Chinese))

[5] 佟浩,杨凤根,李汝君. 奎河与沿岸地下水水化学特征

及形成作用分析[J]. 水资源保护,2015,31(6):109-114. (TONG Hao, YANG Fenggen, LI Rujun. Analysis on hydro-chemical characteristics and formation mechanism of Kuihe River and its coastal groundwater [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (6): 109-114. (in Chinese))

[6] 张利田,陈静生. 我国河水主要离子组成与区域自然条件的关系[J]. 地理科学,2000(3):236-240. (ZHANG Litian, CHEN Jingsheng. The relationship between the composition of major ion of river of China and regional natural factors[J]. Scientia Geographica Sinica,2000(3): 236-240. (in Chinese))

[7] 蓝家程,孙玉川,胡宁. 重庆老龙洞岩溶地下水化学特征及影响因素[J]. 水资源保护,2018,34(3):37-44. (LAN Jiacheng, SUN Yuchuan, HU Ning. Hydrochemical characteristics of Laolongdong karst groundwater and its impact factors[J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (3):37-44. (in Chinese))

[8] 陈静生,何大伟. 珠江水系河水主要离子化学特征及成因[J]. 北京大学学报(自然科学版),1999,35(6): 786-773. (CHEN Jingsheng, HE Dawei. Chemical characteristics and genesis of major ions in the Pearl River Basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,1999,35(6):786-773. (in Chinese))

[9] 陈静生,夏星辉,张利田. 长江、黄河、松花江60—80年代水质变化趋势与社会经济发展的关系[J]. 环境科学学报, 1999, 19 (5): 500-505. (CHEN Jingsheng, XIA Xinghui, ZHANG Litian. Relationship between water quality changes in the Yangtze, Yellow and Songhua Rivers and the economic development in the river basins [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19 (5): 500-505. (in Chinese))

[10] 唐然,温忠辉,束龙仓,等. 绥化市地下水水化学特征及水质现状评价[J]. 水资源保护,2013,29(4):19-25. (TANG Ran, WEN Zhonghui, SHU Longcang, et al. Hydro-chemical characteristics and water quality assessment of groundwater in Suihua City [J]. Water Resources Protection,2013,29(4):19-25. (in Chinese))

[11] 周长进,董锁成,李岱. 疏勒河流域水化学特征及其保护[J]. 水利水电科技进展,2004,24(2):16-18. (ZHOU Zhangjin, DONG Suocheng, LI Dai. Hydrochemical characteristics and protection in Shule River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004,24(2):16-18. (in Chinese))

[12] 董涛,谭红兵,张文杰. 西藏地区盐湖锂的地球化学分布规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43 (3): 230-235. (DONG Tao, TAN Hongbing, ZHANG Wenjie, ZHANG Yanfei. Geochemical distribution of lithium in saline lakes in Tibet [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(3):230-235. (in Chinese))

[13] 郑欣虹,陈建生. 苏北灌南地下水补给源同位素地球化学分析[J]. 水资源保护,2018,34(1):24-30. (ZHENG Xinhong, CHEN Jiansheng. Isotope geochemistry analysis of groundwater recharge source in Guannan, Northern Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection,2018, 34(1):24-30. (in Chinese))

[14] 李健,王辉,魏丽琼. 格尔木河流平原区地下水同位素及水化学特征[J]. 西北地质,2007,40(4):94-100. (LI Jian, WANG Hui, WEI Liqiong. Isotopic and hydrochemical characteristics of groundwater in the Golmud River Basin[J]. Northwestern Geology,2007,40 (4):94-100. (in Chinese))

[15] 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,2001.

[16] 唐启亮,张西营,苗卫良,等. 格尔木河流河水钾硼锂元素分布特征及富集规律[J]. 盐湖研究,2016,24(2): 26-31. (TANG Qiliang, ZHANG Xiying, MIAO Weiliang, et al. Distribution charateristics of K, Li and B and their enrichments rule in the water of Golmud River Drainage Area[J]. Journa of Salt Lake Research,2016,24(2):26-31. (in Chinese))

[17] 王艺涵,刘胤序,刘海红,等. 青海典型内陆河流域地表水化学组成及其重金属分布特征[J]. 生态学杂志, 2018,37(3):734-742. (WANG Yihan, LIU Yinxu, LIU Haihong, et al. Chemical composition and heavy metal distribution in surface water of typical inland rivers in Qinghai[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(3): 734-742. (in Chinese))

[18] 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):26-31. (DU Zhongmou. Hydrochemical changes of water from the upper-middle reaches of Golmud River and their influencing factors[J]. Journal of Salt Lake Research,2018,26(1):26-31. (in Chinese))

[19] 谭红兵,刘兴起,于升松. 格尔木河中下游—达布逊湖段水化学变化特征研究[J]. 湖泊科学,2001(1):43-50. (TAN Hongbing, LIU Xingqi, YU Shengsong. Character of hydrachemistry in Golmud River-Dabsan Lake water[J]. Journal of Lake Sciences,2001(1):43-50. (in Chinese))

(收稿日期:2019-08-09 编辑:王 芳)

