

雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析

严宇鹏^{1,2}, 牛凤霞^{1,2*}, 刘佳^{1,2}, 刘心庭³, 李颖^{1,2}, 彭辉^{1,2**}, 严登华⁴, 肖尚斌^{1,2} (1.三峡库区生态环境教育部工程中心, 湖北宜昌 443002; 2.三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 3.湖北三峡职业技术学院, 湖北宜昌 443000; 4.中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 为探究雅鲁藏布江上游干支流的无机水化学特征, 于2020年8月在雅鲁藏布江上游河源和河流段采集干流水样, 分析了水体主要离子的化学组成和空间变化规律, 并对离子来源进行了解析。结果表明, 雅鲁藏布江上游干流水体中的阴离子以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, 分别占阴离子总量的 71.11%、23.16%; 优势阳离子为 Ca^{2+} 、 Na^+ , 分别占阳离子总量的 47.90%、34.76%; 总溶解性固体变化范围为 43.5~187.3mg/L, 平均值为 116.4mg/L, 水体矿化度较低。干流水的化学类型整体上以 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Na}$ 型为主, 其中河源段杰玛央宗曲和库比曲水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ 型; 从上游向下, 干流 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 等主要离子浓度的沿程变化较为剧烈, 主要受冰川融水和支流汇入的影响。雅鲁藏布江上游干流水化学特征主要受岩石风化作用控制, 主要离子来源于碳酸盐岩及硅酸盐岩风化, 蒸发岩(硫酸盐)溶解也起到一定作用, 而受人为因素的干扰较小。

关键词: 雅鲁藏布江上游; 冰川融水; 水化学特征; 离子来源; 岩石风化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)02-0815-11

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0037

Hydrochemical characteristics and sources of the upper Yarlung Zangbo River in summer. YAN Yu-peng^{1,2}, NIU Feng-xia^{1,2*}, LIU Jia^{1,2}, LIU Xin-ting³, LI Ying^{1,2}, PENG Hui^{1,2**}, YAN Deng-hua⁴, XIAO Shang-bin^{1,2} (1.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2.College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3.Hubei Three Gorges Polytechnic, Yichang 443000, China; 4.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China). *China Environmental Science*, 2022,42(2): 815~825

Abstract: To explore inorganic hydrochemical characteristics of the upper Yarlung Zangbo River, water samples were collected from the main stream and different tributaries in this region in August 2020. The chemical compositions and spatial variations as well as the sources of the main ions were analyzed. Results showed that the main anions in the river were HCO_3^- and SO_4^{2-} , accounted for 71.1% and 23.2% of the total anions, respectively; the main cations were Ca^{2+} and Na^+ , accounted for 47.9% and 34.8% of the total cations, respectively; the total dissolved solids (TDS) ranged between 43.5~187.3mg/L, with an average of 116.4mg/L (this indicated a low salinity of water). The dominate pattern of hydrochemical type in the Yarlung Zangbo River Upstream Basin was $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Na}$, while exhibited $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ pattern in some headwater (i.e., Jiemayangzong river and Kubi river). Then, there existed drastically changes of HCO_3^- , SO_4^{2-} , and Ca^{2+} along the mainstream, which was mainly affected by glacier melt water and the inflow water from different tributaries. In general, in the upper Yarlung Zangbo River, the hydrochemical characteristics was controlled by rock weathering with the ions mainly originated from the carbonate rock and silicate, and the evaporite (sulfate) dissolution was also another source. In contrast, this area was less affected by human activities.

Key words: Upper Yarlung Zangbo River; glacier meltwater; hydrochemical characteristics; ion sources; rock weathering

河流水体的化学成分对气候以及河流所经地区的环境具有指示作用, 其水化学特征能够反映出流域内岩石风化的强弱以及气候变化等信息^[1]。青藏高原是地球上海拔最高的高原, 其与周边地区具有丰富的冰储量, 是雅鲁藏布江、长江、黄河、怒江、澜沧江等多条亚洲主要河流的发源地^[2], 并对东亚和南亚的水文循环和气候变化产生重大影响^[3-4]。近50a来, 随着全球的快速增温, 青藏高原正经历剧烈变化, 整体上呈现出失衡特征, 如冰川加剧退缩、冰川径流增加等, 河流的水化学特征也随之发生变化。

青藏高原河源区域是生态环境和气候变化的敏感区和脆弱区, 容易遭到外界干扰, 一旦破坏将难以恢复^[5-6]。目前关于青藏高原河源区的水化学特征已有学者开展了部分研究, 发现长江源区^[5]冻土融水和黄河源区^[7]河水水化学类型主要受碳酸盐岩和蒸发岩等地壳源的控制; 澜沧江源区^[7-8]和怒江源区那曲^[9]主要离子均来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩风

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察资助项目(2019QZKK0207)

* 责任作者, 讲师, nfxctguedu@yeah.net; **教授, hpeng1976@163.com

化.总体来说,青藏高原河源区河流水化学组分主要受岩石风化控制,主要离子来源于碳酸盐岩风化及蒸发岩的溶解.

雅鲁藏布江(以下简称雅江)发源于喜马拉雅山北麓的杰玛央宗冰川,平均海拔在 3000m 以上,水资源丰富,是西藏最大的河流.目前关于雅江的研究多集中在大气降水及同位素^[10-11]、水文径流变化^[12-14]等,而对河水主要离子水化学特征研究相对较少,且研究区域多集中在雅江中下游,在上游布设点位较少,不能很好地反映上游水化学特征.在雅江中下游的研究发现^[15],雅江干流中下游丰水期河水水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型,主要离子来源为碳酸盐岩及蒸发岩的风化溶解,且存在硅酸盐类矿物风化;雅江全流域^[16]研究表明,干流总溶解性固体(TDS)均值为 204.51mg/L,高于全球河流平均水平,中下游主要离子水化学组分受人为活动影响较大,碳酸盐岩风化也起到重要作用.目前对于青藏高原其他河流源区研究较多,如长江源头、黄河上游、金沙江、澜沧江和怒江等^[17-21],而对于雅江河源和上游干支流冰川融水径流的关注度较低,鲜有关于该区域河流水化学特征的系统性研究.

基于此,本文以雅江上游干支流为研究对象,通过历史资料^[3,22]搜集和实地野外考察,分析了雅江上游干支流主要离子浓度变化、河水水化学组成特征,并对主要离子来源进行了解析,旨在揭示青藏高原冰川融水径流的无机水化学变化特征,并为高原地区典型河流的水源解析及变化趋势预估提供基础支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为雅江上游流域(图 1),流域范围包括河源杰玛央宗曲至里孜段,界于北纬(N)29.5°~31°和东经(E)82°~84.5°,位于西藏自治区日喀则市仲巴县境内,自河源依次流经霍尔巴乡、帕羊镇、亚热乡等 6 个乡镇(总人口 12379 人),雅江上游海拔高度为 4530~5590m,平均坡降为 4.4%^[12,25],段内河长约 268km,占雅江总河长的 13%,段内集水面积约为 26570km²,占流域总面积的 11%.

将雅江上游分为 2 段,从源头至桑木张为河源段,桑木张至里孜村为河流段.河源段主要包含杰玛

央宗曲(正源),以及玛攸藏布和库比曲两条支流.河源段冰川储量丰富,杰玛央宗曲发源于喜马拉雅山北麓的现代冰川,有杰玛央宗冰川、昂若冰川等 18 条,面积 85.59km²;玛攸藏布发源于冈底斯山南坡,有规模较小冰川 5 条,冰川面积为 12.35km²,汇入干流处距离桑木张 12km;库比曲发源于喜马拉雅山北麓的现代冰川,共有阿色甲果冰川等 14 条,面积 119.71km².河流段水系较为发达,研究区包括雅江干流(桑木张-里孜村)、左岸两条支流(来乌藏布、柴曲)和右岸两条支流(列荣藏布、雄曲).

流域地处亚寒带高原半干旱气候区,多年平均降水量仅为 200mm 左右,主要集中在 7~8 月^[23-24],气候干燥、寒冷、风沙大.年径流主要受大气降水、冰川融水以及地下水补给,但不同区域补给类型有一定的区别,丰水期雅江源头主要以冰川融水补给为主^[25].

雅江是一条适应断裂构造带发育的先成河,干流沿着大构造线发育而成(雅江缝合带),支流沿次一级构造发育.河源杰玛央宗曲的右岸分布着蛇绿岩,位于特提斯喜马拉雅带,主要岩石类型为硅酸盐类矿物(灰绿色变质二辉橄榄岩、变质方辉橄榄岩).上游干流主要位于雅江南带分区和北带分区之间,其中南带分区岩石岩性以石英岩屑砂岩、硅质板岩、长石岩屑砂岩为主;北带分区主要分布在柴曲北侧,岩性以钙质岩屑砂岩、长石石英砂岩为主^[26].

1.2 采样点布设

采样时间为 2020 年 8 月(丰水期),在 1 个月内从下游至上游连续采集样品,为保证采样条件的一致性,所有采样均在良好天气条件下进行^[27].依据《水质采样技术指导》(HJ 494-2009)^[28]和雅江上游流域特征,兼顾各支流汇入雅江干流位置及交通便利性,在干流及支流布设采样点,位置如图 1 所示.共选取 53 个采样点,包括河源段 9 个(含干流源头杰玛央宗曲 3 个(Y1~Y3);支流玛攸藏布 4 个(M1~M4)、库比曲 2 个(K1、K2)),河流段 44 个(包含雅江干流 18 个(Y4~Y21);支从来乌藏布 4 个(LW1~LW4)、列荣藏布 3 个(LR1~LR3)、雄曲 3 个(1、2、3)、柴曲 16 个(1~16)).其中,柴曲流域的中游是仲巴县城所在地,人口较为聚集,为对比分析人为因素对高原河流水化学特征的影响,故进行了加密采样分析.

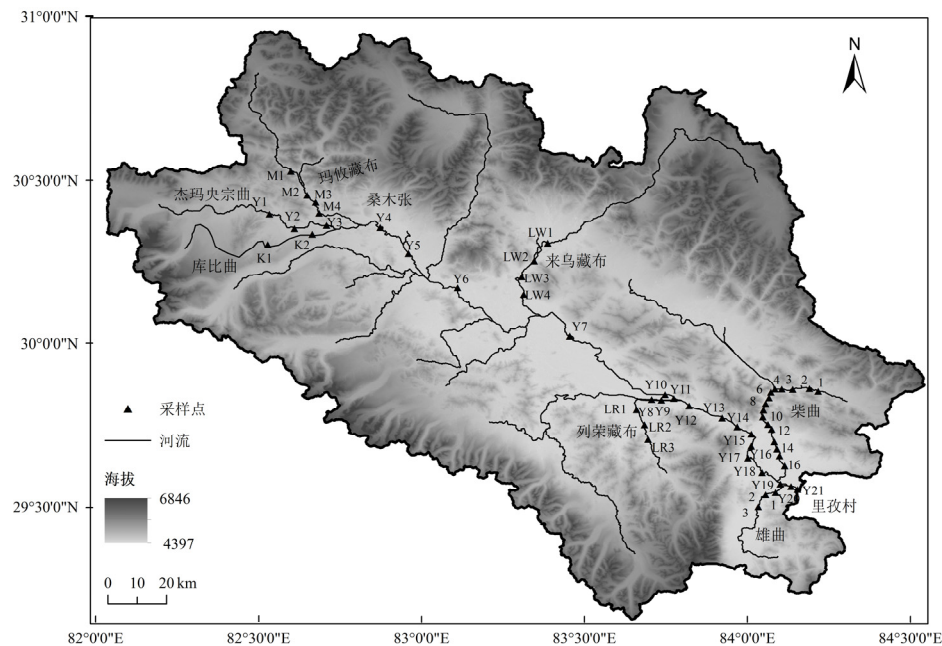


图 1 雅江上游流域采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points in the upper Yarlung Zangbo River

1.3 水样采集与分析

采集河水样品时,取样前先用河水润洗样品瓶 2~3 次,再用河水盛满样品瓶(水样取自水下约 5~10cm 处),密封,标记.将水样过 0.22 μ m 尼龙滤膜,保存在 100mL 聚乙烯(PE)塑料瓶中,并放入 4 $^{\circ}$ C 恒温冷藏箱,将水样运送回实验室进行主要阴阳离子检测^[28].

现场使用多参水质监测仪(YSI-EX02,USA)原位测定采样点的 pH 值(\pm 0.2)、溶解氧(DO)(\pm 1%)等基本理化参数,并用 0.025mol/L 的 HCl 在采集现场滴定 HCO_3^- 浓度, TDS 含量通过溶解组分总和减去 $1/2\text{HCO}_3^-$ 的方法计算得到^[29]; Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 离子浓度在实验室内采用离子色谱仪(盛瀚 CIC-D160 型,中国)分析测定,其测定下限: $\text{Cl}^- \geq 0.02\text{mg/L}$ 、 $\text{NO}_3^- \geq 0.064\text{mg/L}$ 、 $\text{SO}_4^{2-} \geq 0.072\text{mg/L}$ 、 $\text{Na}^+ \geq 0.08\text{mg/L}$ 、 $\text{K}^+ \geq 0.12\text{mg/L}$ 、 $\text{Mg}^{2+} \geq 0.08\text{mg/L}$ 、 $\text{Ca}^{2+} \geq 0.08\text{mg/L}$;检测相对偏差 $\leq 3\%$.

2 结果与分析

2.1 干流水体基本理化性质

如表 1 所示,河源段干支流 pH 值变化相对较小,变化范围为 7.23~7.63,平均值为 7.48,雅江河源段河水整体呈弱碱性;DO 浓度变化范围为 5.62~7.77mg/L,平均值为 6.40mg/L,河源段干支流间 DO

浓度略有差异,排序为库比曲>杰玛央宗曲>玛攸藏布;TDS 含量变化范围为 49.41~110.18mg/L,平均值为 70.73mg/L,低于世界河流平均值 99mg/L^[30],且与雅江干流全流域丰水期^[15]相比含量明显偏低.

表 1 雅江上游干支流基本理化参数

Table 1 Basic physical and chemical parameters in the upper Yarlung Zangbo River

分段	河流	pH 值	DO (mg/L)	TDS (mg/L)
河源段	杰玛央宗曲	7.23	6.53	52.59
	玛攸藏布	7.57	5.62	110.18
	库比曲	7.63	7.77	49.41
	平均值	7.48	6.64	70.73
河流段	干流	7.87	6.51	93.52
	来乌藏布	7.70	7.36	115.93
	列荣藏布	7.80	6.19	135.16
	雄曲	8.53	6.83	112.58
	柴曲	7.93	7.05	161.20
	平均值	7.97	6.79	123.68

河流段干支流 pH 值变化范围为 7.70~8.53,平均值为 7.97,高于河源段 pH 值;DO 浓度在 6.19~7.36mg/L 之间,平均值为 6.64mg/L,略高于河源段 DO 浓度;TDS 变化范围为 93.52~161.20mg/L,平均值为 123.68mg/L,排序为柴曲>列荣藏布>来乌藏布>雄曲>干流,且河流段各支流 TDS 均高于干流.

河源段与河流段 pH 值、DO、TDS 平均值相比,河源段均低于河流段,且河源段干流杰玛央宗曲 TDS 含量明显低于河流段干流.河源段与河流段各支流之间对比,河源段玛攸藏布 DO 值、库比曲 TDS 含量明显低于其他支流,河流段雄曲 pH 值明显高于其他支流,说明雅江上游各支流间的基本理化性质存在一定的差异,这可能受复杂的地形地貌和区域内不同岩石类型的影响.

2.2 干支流水体主要离子组成

如表 2 所示,干支流水体主要阳离子浓度排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 平均浓度依次为 22.92、18.45、4.82 和 1.18 mg/L; 优势阳离子为 Ca^{2+} 、 Na^+ , 分别占阳离子总量的 47.90%、34.76%. 主要阴离子浓度排序为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, 平均浓度依次为 84.73、22.55、4.00 和 0.06 mg/L; 阴离子主要以 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 为主, 分别占阴离子总量的 71.11%、23.16%. 雅江上游干支流河水与其它大河等(表 3)主要离子浓度对比, 发现雅江河水中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度分别高于全球河流均值^[29-31]1.64~

2.94 倍不等,但低于那曲^[9]、长江上游^[33]和仲巴县自然水体^[34]浓度.雅江上游 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度均高于尼洋河^[35], Na^+ 约为其 5.88 倍,而 SO_4^{2-} 浓度低于尼洋河;且虽然雅江上游 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均与拉萨河^[36]浓度相近,但 Na^+ 离子浓度高于其约 3.77 倍,推测为蒸发岩溶解的影响.同印度布拉马普特拉河^[6]相比,两者 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度相近,其主要原因为研究区与布拉马普特拉河同为雅江水系,二者在水文地质环境等方面比较接近,因此二者在主要离子水化学组成上有相似特征.

Piper 三线图可用来分析河水水化学成分及主要离子的相对含量,如图 2 所示.雅江上游流域河源段、河流段样点的阴离子基本都落在三角图中靠近 HCO_3^- 轴,阳离子在三角图中靠近 Ca^{2+} 轴.这说明雅江上游的优势阴离子为 HCO_3^- , 优势阳离子为 Ca^{2+} . 并且根据现场调查记录及搜集相关资料^[26],发现雅江上游区域分布有灰岩等,推测该区域主要受碳酸盐岩风化影响.

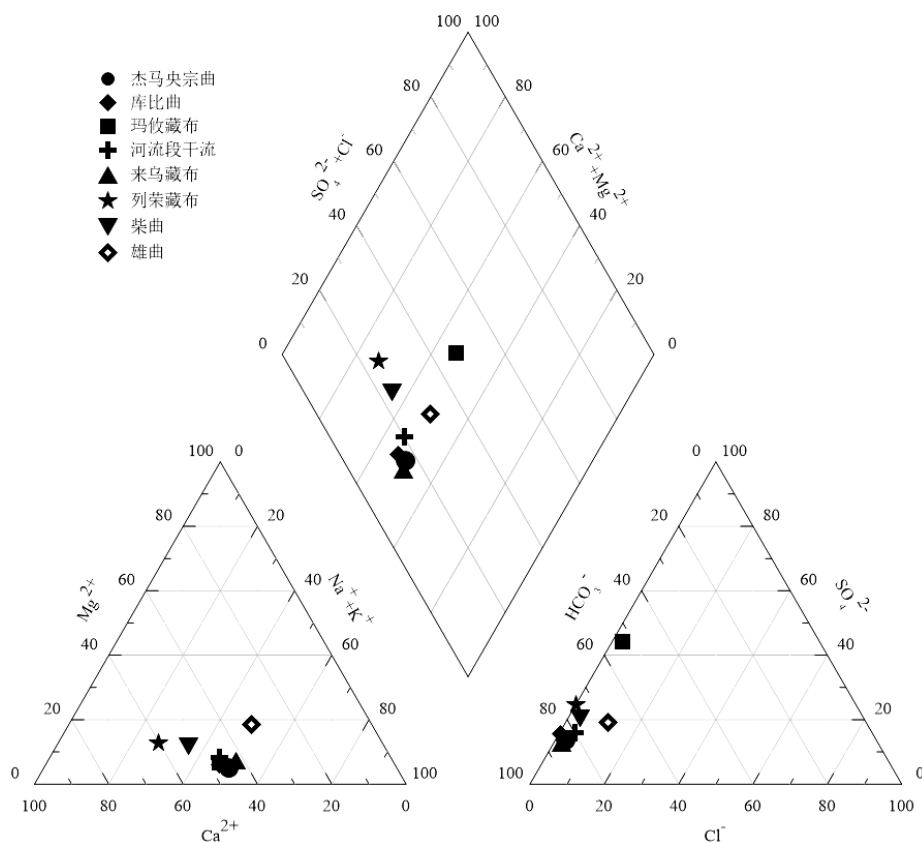


图 2 雅江上游河水阴阳离子 Piper 三线图

Fig.2 Piper ternary plot of anions and cations in the upper Yarlung Zangbo River

表 2 雅江上游干支流主要离子含量(mg/L)
Table 2 Main ion contents in the upper Yarlung Zangbo River (mg/L)

分段	河流	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
河源段	杰玛央宗曲	13.61	0.88	1.49	13.21	1.07	—	5.55	33.55
	玛攸藏布	17.66	1.29	2.73	19.05	2.78	0.17	41.53	49.94
	库比曲	12.42	0.87	1.65	13.46	0.17	—	5.60	30.50
	平均值	14.56	1.01	1.96	15.24	1.34	0.17	17.56	38.00
河流段	干流	18.09	1.20	3.43	19.38	3.67	—	13.61	68.29
	来乌藏布	23.88	1.44	3.66	21.08	2.40	0.22	14.44	97.60
	列荣藏布	12.28	0.88	6.21	29.42	0.33	—	33.93	104.21
	雄曲	24.75	0.76	9.54	16.79	10.80	—	17.66	64.56
	柴曲	19.68	1.33	7.01	31.16	5.44	0.11	33.48	126.00
	平均值	19.74	1.12	5.97	23.57	4.53	0.17	22.62	92.13

注:—表示含量过低未检出。

表 3 雅江及青藏高原部分河流主要离子含量统计(mg/L)
Table 3 Statistics of main ion contents in the Yarlung Zangbo river and some alpine large rivers (mg/L)

河流	pH 值	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
全球河流均值 ^[29-31]	8.00	99.00	8.00	3.30	2.30	6.28	5.80	—	8.40	51.80
雅江干流丰水期 ^[15]	8.58	154.14	29.22	5.29	1.37	5.93	3.70	0.75	34.05	78.15
布拉马普特拉河 ^[16]	8.01	196.00	28.40	11.90	2.70	14.10	6.00	—	14.00	163.70
拉萨河 ^[36]	8.29	181.35	29.82	5.43	1.11	4.90	2.30	—	23.25	84.70
尼洋河 ^[35]	7.30	165.21	20.06	11.71	1.29	3.14	2.75	1.87	51.91	60.21
那曲 ^[9]	8.21	270.57	41.64	15.34	2.91	24.55	9.43	—	44.78	185.88
长江上游 ^[33]	7.98	778.00	53.40	22.90	5.50	157.70	233.70	1.30	114.90	188.50
仲巴县自然水体 ^[34]	7.46	385.00	124.10	12.40	2.30	18.20	86.70	—	39.90	238.00
沱沱河 ^[5,7]	6.00	1201.62	98.05	22.55	16.60	316.30	471.17	—	161.86	207.09
澜沧江河源区 ^[7]	6.50	286.97	74.30	12.96	2.33	17.97	130.30	—	234.64	114.73
黄河源头 ^[47]	6.70	352.96	117.67	22.89	4.00	160.49	284.83	—	82.13	168.40
雅江上游(本研究)	7.73	116.36	22.92	4.82	1.18	18.45	4.00	0.06	22.55	84.73

注:—表示含量过低未检出或数据缺乏。

2.3 主要离子空间变化特征

如图 3 所示,雅江上游干流主要离子 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺,受河源段冰川融水、支流汇入的影响较大.Ca²⁺、SO₄²⁻ 浓度沿程呈现先上升后下降再波动的趋势;HCO₃⁻ 浓度总体上表现为沿程增加。

河源段杰玛央宗曲(Y1、Y2、Y3)主要离子浓度较低,而玛攸藏布的 TDS 含量明显高于其他两条河流.3 条河流均有冰川融水补给,但因受冰川距离及规模的影响导致其主要离子来源有所不同,杰玛央宗曲、库比曲距离冰川较近,冰川融水对主要离子浓度贡献较大.玛攸藏布距离冰川较远且冰川规模较小,受岩石风化影响较大,离子浓度较高.干流样点

Y4 因支流玛攸藏布的汇入离子浓度增加, HCO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、Mg²⁺浓度上升尤为明显。

河流段主要离子浓度由沿程变化的各种环境因素及人类活动强度的共同影响,干流主要离子浓度存在空间异质性.这与各个支流的汇入密不可分,支流来乌藏布的汇入,导致 Y7 点 Na⁺、Mg²⁺、K⁺、HCO₃⁻浓度出现明显上升;由于列荣藏布及其它支流的汇入产生稀释作用,Y8 点主要阳离子和阴离子 HCO₃⁻、SO₄²⁻ 浓度都呈明显下降趋势;由于 Y8~Y12 河道由窄变宽再变窄,导致河面较宽处河水蒸发强烈^[37],区间内阳离子 Ca²⁺、Na⁺、K⁺有较为明显的先下降后上升趋势,阴离子 SO₄²⁻、HCO₃⁻

则表现为先上升后下降的趋势.因为雄曲 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 等离子浓度较高,柴曲 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等离子浓度较高;柴曲汇入贡献大量 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} ,雄曲汇入贡献较多 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- ;导致 Y19 点阳离子 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 均出现陡然上升,阴离子(除 NO_3^- 外)也出现陡然上升,其中 Cl^- 上升趋势尤为明显.而由于雄曲及其他小型支流汇入的稀释

作用,Y20 点后除 K^+ 变化不明显外,其余离子都呈现明显下降趋势.

河流段与河源段相比,主要离子浓度均较高, Cl^- 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 约为河源段的 1.54~2.76 倍.雅江上游干流与全流域干流丰水期^[15]相比,主要离子浓度(Na^+ 除外)均较低,说明雅江源头的冰川融水径流对上游水体影响较大.

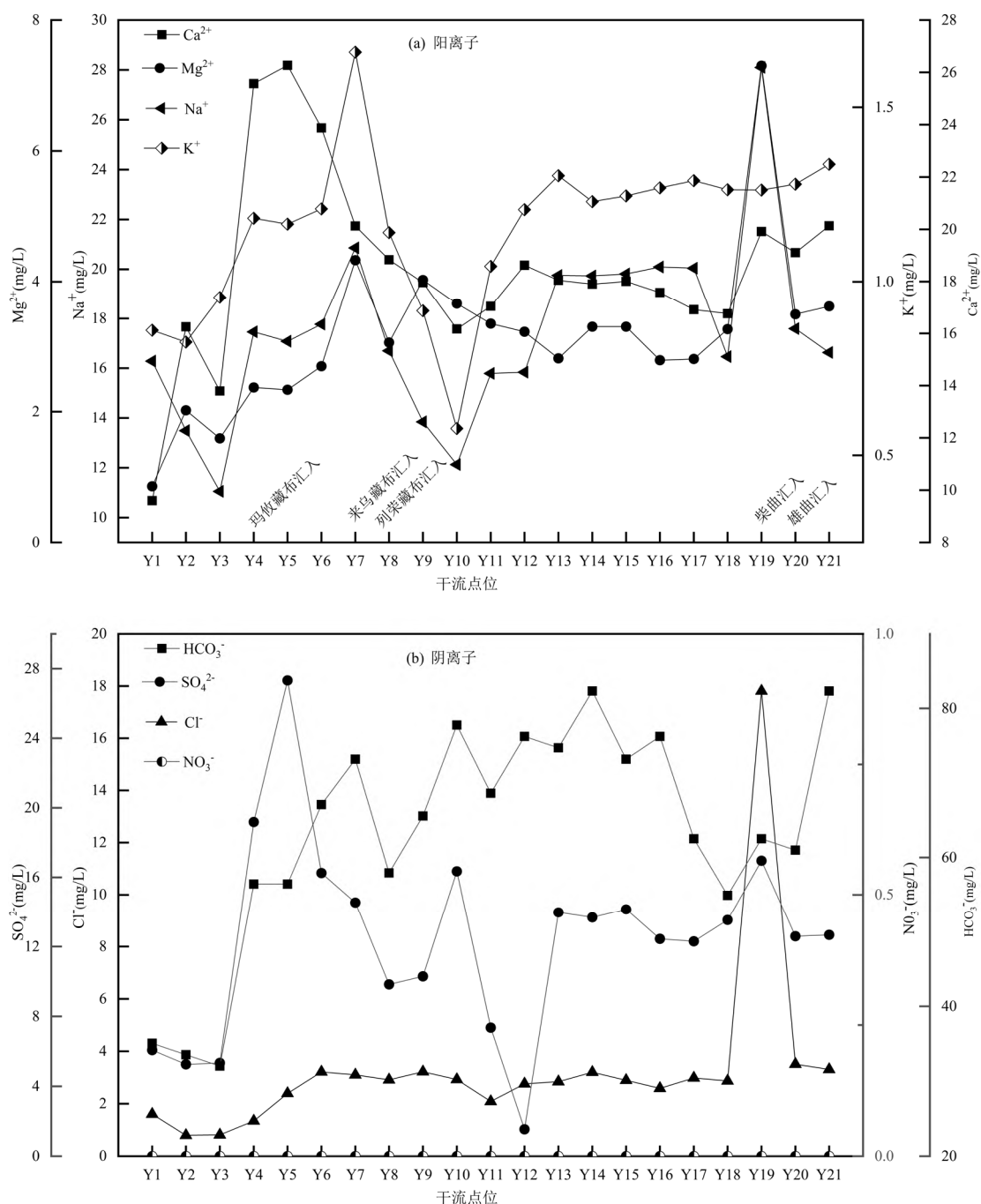


图3 雅江上游干流阴阳离子空间变化

Fig.3 Spatial variations of anions and cations in the mainstream of the upper Yarlun Zangbo River

3 讨论

3.1 主要离子来源解析

对研究区内雅江上游干支流所有采样点进行分析得出: Na^+/Cl^- 平均值为 7.98, 采样点都偏离源于海水的降水 Na^+/Cl^- 参照线 0.86 较远. 且有学者研究表明, 远离海洋地区河流主要离子水化学特征受大气降水影响一般较小^[38-39], 同时印度季风环流对青藏高原地区大气降水起重要作用, 因为青藏高原特殊地貌构造与印度季风的相互作用, 印度季风环流在通过青藏高原的过程中, 由于地形的影响而发生

改变, 到达一定高度的青藏高原会对向北输送的水汽起阻挡作用. 并且雅江下游至上游随着海拔的升高降水量减少, 从而进一步说明大气降水不是雅江上游干流水化学特征的主要控制因素.

Gibbs^[40]将影响河水水化学组成的因素分为大气降水、岩石风化和蒸发结晶. 如图 4 所示, 在雅江上游流域 Gibbs 图中 TDS 的范围为 43.54~187.34 mg/L, $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 为 0.249~0.600, $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 为 0.005~0.329. 流域内所有采样点都落在岩石风化控制区域, 说明雅江上游河水阴阳离子的主要控制类型为岩石风化.

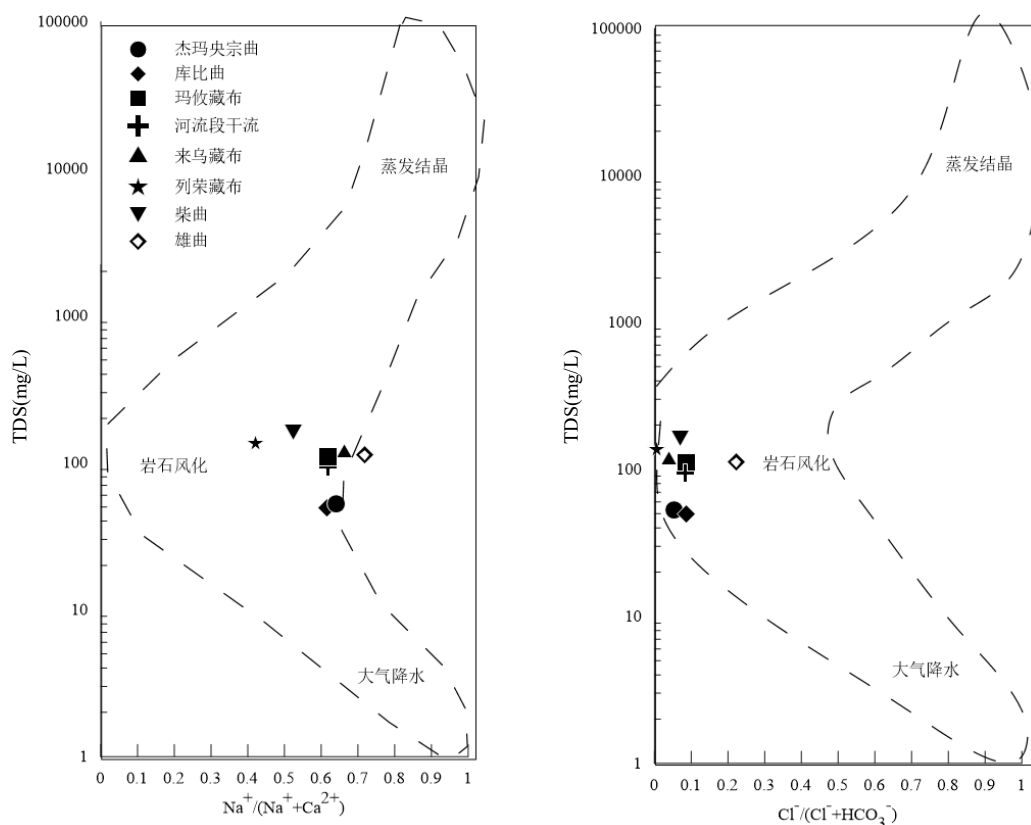


图 4 雅江上游水化学吉布斯(Gibbs)图

Fig.4 Gibbs diagram of hydrochemistry in the upper Yarlung Zangbo River

主要离子比值可表示不同类型岩石风化对水化学组分^[35]的影响, 由图 5(a)所示, $\text{Cl}^- / (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 比值都在偏向 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 一侧, 说明 Na^+ 、 K^+ 并非主要来源于蒸发岩溶解, Cl^- 不足以平衡 Na^+ 、 K^+ , 剩余部分 Na^+ 、 K^+ 可能来源于硅酸盐类矿物(钠、钾长石等)的风化溶解. HCO_3^- 与 Ca^{2+} 比值(图 5b)有部分点落在 1:1 线上, 其余点基本都落在 HCO_3^- 一侧; HCO_3^- 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 比值(图 5c)有较多点落在 1:1 线上, 其余

点较多落在 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 一侧; 这表明雅江上游存在碳酸盐岩风化的情况, 但碳酸盐岩风化不是 HCO_3^- 的全部来源, HCO_3^- 不足以平衡 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 说明还存在其他类型盐岩的风化, 推测为硅酸盐类矿物. $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 比值(图 5d)水样点基本都落在 1:1 线上或集中在 1:1 线附近, 少量点落在 1:1 线的 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 一侧, 说明雅江上游流域内岩石的风化过程主要由硫酸和碳酸共同参与^[41], 也有部

分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 来自于硅酸盐岩风化作用。

结合 Piper 三线图可知,雅江河源段和河流段主要离子水化学类型整体上具有一致性.根据相关分类法^[42]可知,雅江上游干流水化学类型以 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 为主.河源段杰玛央宗曲、库比曲

受冰川融水影响较大,水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型.从 Gibbs 图可看出雅江上游干支流样点在图中分布较为集中,说明雅江上游干支流河水主要离子的控制类型具有一致性,主要为岩石风化,这与雅江干流丰水期^[15]、尼洋河^[35]、那曲^[9]的分析结果相似。

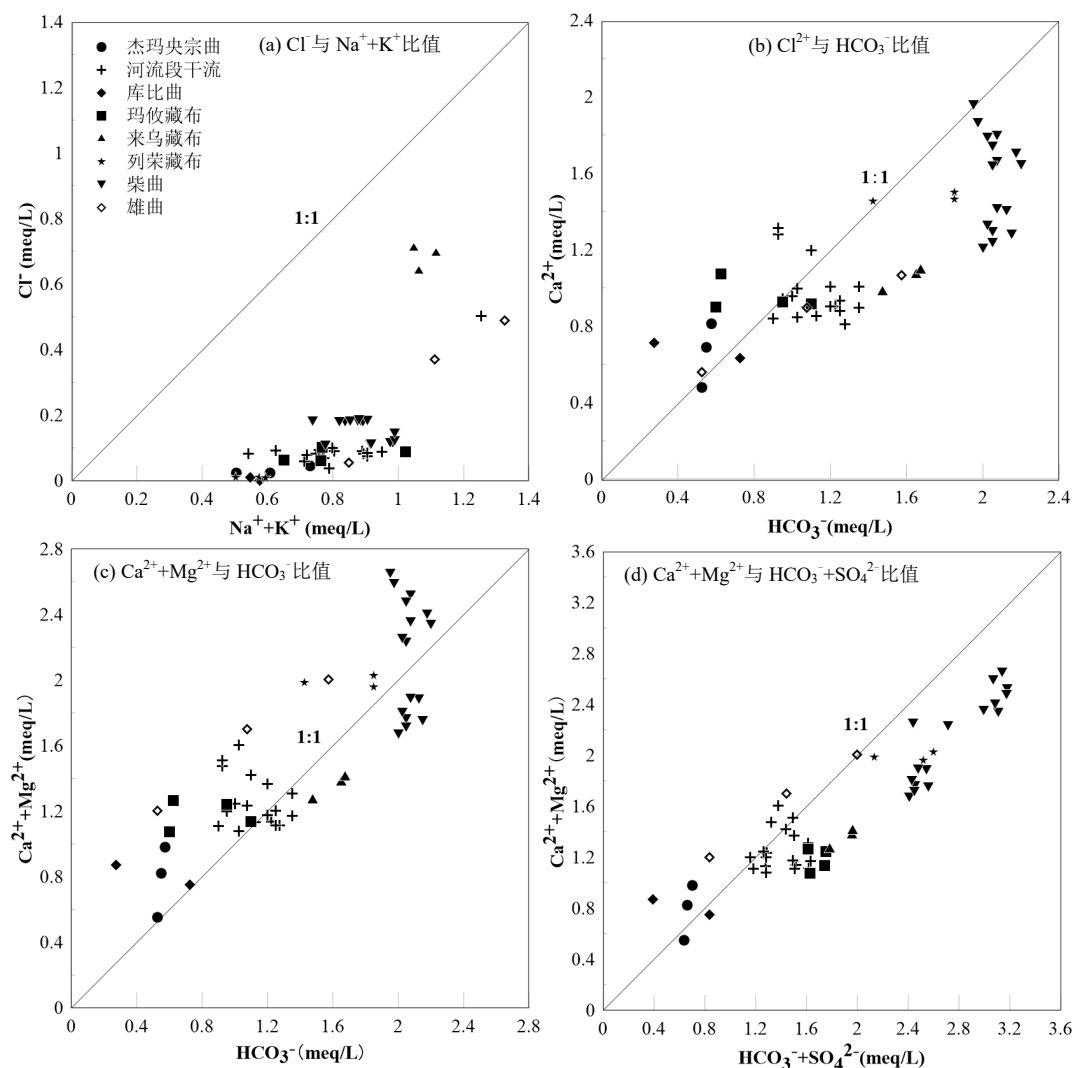


图5 雅江上游主要离子比值

Fig.5 The ratios of main ions in the upper Yarlung Zangbo River

相关性分析可用来揭示离子的来源关系,是研究不同因素之间的依存关系对水体中离子浓度的相关性,可表明离子的物质来源或类似的化学反应过程^[43].由表4可知,TDS与 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 之间均存在显著的正相关关系($P < 0.01$),其中与 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 的相关性最为显著,说明 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 是TDS的重要来源。 HCO_3^- 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 都有着显著的正相关关系,相关系数分别为0.630、0.817、0.526,说明 HCO_3^- 与

Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 有同一来源; SO_4^{2-} 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 也有显著的正相关关系,这说明三者有共同来源,主要来源于白云石、方解石等碳酸盐岩矿物风化的碳酸及硫酸作用溶解^[44]。 NO_3^- 与 K^+ 有着显著的相关关系,相关系数为0.472,受人类活动和农业施肥的影响较大^[38],但由于雅江上游流域 NO_3^- 与 K^+ 浓度过低,故人为因素的影响有限.而 Cl^- 与 Na^+ 呈显著的正相关关系,相关系数为0.694,由于雅江上游流域主要水化学控制类型为岩石风化且受人为活动因

素干扰较小,结合当地水文地质情况,说明雅江上游 流域存在蒸发岩溶解.

表 4 雅江上游主要离子水化学成分相关分析

Table 4 Correlation analysis of main water ions in the upper Yarlung Zangbo River

离子	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS
Na ⁺	1								
K ⁺	0.395*	1							
Mg ²⁺	0.498*	0.041	1						
Ca ²⁺	0.130	0.306*	0.633**	1					
Cl ⁻	0.694**	0.131	0.573**	0	1				
NO ₃ ⁻	0.233	0.472*	0.114	0	0	1			
SO ₄ ²⁻	0.088	0.040	0.609**	0.785**	0.013	0.355*	1		
HCO ₃ ⁻	0.288	0.463*	0.630**	0.817**	0.238	0.473*	0.526**	1	
TDS	0.392*	0.333*	0.800**	0.913**	0.335*	0.449*	0.813**	0.889**	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关,*表示在0.05水平(双侧)上显著相关.

表 5 雅江上游主要离子主成分分析

Table 5 Principal component analysis of main water ions in the upper Yarlung Zangbo River

离子	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Na ⁺	0.551	0.728	0.119
K ⁺	0.452	0.095	0.791
Mg ²⁺	0.798	0.176	-0.525
Ca ²⁺	0.843	-0.42	-0.123
Cl ⁻	0.468	0.785	-0.179
NO ₃ ⁻	0.538	-0.181	0.576
SO ₄ ²⁻	0.711	-0.472	-0.302
HCO ₃ ⁻	0.873	-0.191	0.100
解释变量(%)	45.41	20.69	17.46

注:采用最大正交旋转法,旋转在3次迭代后收敛.

为进一步探究雅江上游流域主要离子的来源和水化学特征,对采样点数据进行主成分分析,筛选出 3 个因子,共解释了 83.56%的变量信息(表 5).主成分 1 解释了 45.41%的方差变异,HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺在主成分 1 具有较大的正荷载,分别为 0.873、0.711、0.843、0.798.碳酸盐岩风化是 HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺的主要来源^[44],将主成分 1 的分析结果与雅江上游流域的水文地质情况结合,以及上述的 Gibbs 图、离子比值图、阴阳离子三线图和相关性分析,揭示了雅江上游流域 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺的主要来源为流域内碳酸盐岩(白云石、方解石等)的风化^[45].主成分 2 解释了 20.69%的方差变异,Cl⁻、Na⁺在主成分 2 中占有较大正荷载.由于天然条件下,蒸发岩溶解对 Na⁺、Cl⁻贡献较大^[4],主成分 2 的结果表明 Cl⁻、Na⁺主要来源于蒸发岩的溶解.主成分 3 中 K⁺、NO₃⁻占较大正荷载,约占 17.46%的方差百分比,

但由于 NO₃⁻浓度较低,故人类活动对雅江上游干支流水体影响有限.

3.2 与其他河流源区水化学特征对比分析

如表 3 所示,雅江上游河水主要离子浓度普遍低于其他河流河源区,这可能与雅江上游受冰川融水影响较大有关.与雅江上游水化学类型相似,雅江中下游水化学类型主要为 HCO₃⁻·SO₄²⁻-Ca·Mg,河水水化学组分主要受碳酸盐岩风化控制.但雅江上游优势阳离子 Na⁺浓度约为中下游丰水期的 3 倍(表 3),这主要与雅江上游受硅酸盐矿物风化溶解相对较强有关.同雅江中下游研究结果一致,雅江中下游泉水^[46]的主要离子组成也为 Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻,而泉水的水化学组成贡献率从大到小依次为碳酸盐岩风化、蒸发岩溶解、硅酸盐风化溶解及人为活动影响.与雅江上游河水水化学特征略有不同,雅江中下游泉水受蒸发岩溶解及人为因素影响相对更大,从而说明雅江中下游与上游水化学特征的主要差别之一为蒸发岩溶解强弱.蒸发岩溶解也影响着位于长江源区的沱沱河,其 TDS 含量、Na⁺、Cl⁻浓度均值都明显偏高,水化学类型主要为 Na-Cl,受蒸发岩溶解影响较大;黄河源区的水化学类型与沱沱河一致,主要离子也来源于蒸发岩溶解^[5,7,47].而怒江源区河流那曲与雅江上游离子来源相似,主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐风化溶解,水化学类型主要为 Ca-HCO₃,但那曲 TDS 含量均值为 271mg/L^[9],明显高于雅江上游(116.36mg/L),这主要因为那曲与雅江上游受岩石风化及冰川融水影响程度不同.澜沧江源区与雅江上游水化学类型差异较大,主要为

Ca-SO₄,这是由澜沧江源区受蒸发岩溶解、含硫矿物氧化等影响,SO₄²⁻浓度明显偏高导致^[7,18]。综上所述,与发源于青藏高原的其他河流源区以及雅江中下游对比分析可知,雅江上游受冰川融水径流的稀释作用较大,TDS含量及主要离子平均浓度均较低。位于青藏高原南部的雅江上游、中下游及北部的怒江源区那曲水化学类型主要由碳酸盐岩风化作用控制,而位于青藏高原北部的长江河源沱沱河、黄河源区及澜沧江源区,水化学类型主要受蒸发岩溶解作用影响。

4 结论

4.1 雅江上游干支流河水整体呈弱碱性,平均 pH 值为 7.73;TDS 平均值为 116.36mg/L。河源段水体矿化度低,TDS 平均值(70.73mg/L)远低于世界河流平均值 99mg/L;河流段平均 pH 值为 7.97,TDS 均值(123.68mg/L)高于河源段。

4.2 雅江上游干支流河水阳离子呈现 Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺>K⁺,阴离子为 HCO₃⁻>SO₄²⁻>Cl⁻>NO₃⁻。优势阳离子为 Ca²⁺、Na⁺,约占 47.90%、34.76%;优势阴离子为 HCO₃⁻、SO₄²⁻,约占 71.11%、23.16%。雅江上游干支流河水水化学类型以 HCO₃·SO₄-Ca·Na 型为主,而河源段支流杰玛央宗曲、库比曲水化学类型为 HCO₃-Ca·Na 型。

4.3 雅江上游干流主要离子浓度空间变化较为剧烈。河源段干流杰玛央宗曲主要离子浓度受杰玛央宗冰川融水影响较大;河流段干流主要离子浓度的空间变化为沿程各支流的汇入及河源段冰川融水的共同作用。

4.4 雅江上游干支流的主要离子组成受岩石风化作用控制,离子主要来源于碳酸盐岩及硅酸盐岩风化,且存在蒸发岩溶解,而受人类活动的影响有限。

参考文献:

- [1] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [J]. *Nature*, 1992,359(6391):117-122.
- [2] 姚檀栋,郭光剑,徐柏青,等.“亚洲水塔”变化与影响 [J]. *中国科学院院刊*, 2019,34(11):1203-1209.
Yao T D, Wu G J, Xu B Q, et al. "Asian water tower" change and its impacts [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11):1203-1209.
- [3] LI F, Zhang Y, XU Z, et al. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,505: 188-201.
- [4] 高坛光,康世昌,张强弓,等.青藏高原纳木错流域河水主要离子化学

- 特征及来源 [J]. *环境科学*, 2008,29(11):3009-3016.
- Gao T G, Kang S C, Zhang Q G, et al. Major ionic features and their sources in the Nam Co Basin over the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science*, 2008,29(11):3009-3016.
- [5] 刘 敏,赵良元,李青云,等.长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(3):1243-1254.
Liu M, Zhao L Y, Li Q Y, et al. Hydrochemical characteristics, main ion sources of main rivers in the source region of Yangtze River [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(3):1243-1254.
- [6] Zhao L Y, Li W, Lin L, et al. Field Investigation on River Hydrochemical Characteristics and Larval and Juvenile Fish in the Source Region of the Yangtze River [J]. *Water*, 2019,11(7):1-20.
- [7] 周长进,董锁成,王 国.“三江”河源地区主要河流的水资源特征 [J]. *自然资源学报*, 2001,16(6):493-498.
Zhou C J, Dong S C, Wang G. Resources characteristics of the major rivers in the source areas of the Changjiang, Huanghe and Lancangjiang [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001,16(6):493-498.
- [8] 黄 露,刘丛强,Chetelat B,等.中国西南三江流域风化的季节性变化特征 [J]. *地球与环境*, 2015,43(5):512-521.
Huang L, Liu C Q, Chetelat B, et al. Seasonal variation characteristics of weathering in the three river basin, southwestern China [J]. *Earth and Environment*, 2015,43(5):512-521.
- [9] Wang F Q, Zhao Y, Chen X, et al. Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Nujiang River on the Tibetan Plateau [J]. *Water*, 2019,11(10):w11102166.
- [10] 宋泓苇,孟玉川,蒋芳婷,等.雅鲁藏布江中游地区地表水、地下水同位素特征及其指示作用 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021,35(7):122-128.
Song H W, Meng Y C, Jiang F T, et al. Isotope characteristics of surface water and groundwater in the middle reaches of Yarlung Zangbo river and their indicators [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021,35(7):122-128.
- [11] 刘佳驹,郭怀成.雅鲁藏布江河水氢氧同位素时空变化特征 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(11):5194-5200.
Liu J J, Guo H C. Temporal and spatial variation characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in Yarlung Zangbo River [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(11):5194-5200.
- [12] 刘 剑,姚治君,陈传友.雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析 [J]. *自然资源学报*, 2007,22(3):471-477.
Liu J, Yao Z J, Chen Z Y. Evolution trend and causation analysis of the runoff evolution in the Yarlung Zangbo River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007,22(3):471-477.
- [13] 高志友,王小丹,尹 观.雅鲁藏布江径流水文规律及水体同位素组成 [J]. *地理学报*, 2007,62(9):1002-1007.
Gao Z Y, Wang X D, Yin G. Hydrological rule and isotopic composition of water bodies in Yarlung Zangbo River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007,62(9):1002-1007.
- [14] 李占玲,徐宗学,巩同梁.雅鲁藏布江流域径流特性变化分析 [J]. *地理研究*, 2008,27(2):353-361.
Li Z L, Xu Z X, GON Z L. Characteristics of runoff variation in the Yarlung Zangbo River basin [J]. *Geographical Research*, 2008,27(2): 353-361.
- [15] 刘久潭,李颖智,高宗军,等.雅鲁藏布江丰水期河水离子组成特征及其控制因素 [J]. *冰川冻土*, 2019,41(3):697-708.
Liu J T, Li Y Z, Gao Z J, et al. Ionic composition characteristics and their controlling factors in the main stream of Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019,41(3):697-708.
- [16] 刘佳驹,赵雨顺,黄 香,等.雅鲁藏布江流域水化学时空变化及其控制因素 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(11):4289-4297.
Liu J J, Zhao Y S, Huang X, et al. Spatiotemporal variations of hydrochemistry and its controlling factors in the Yarlung Tsangpo River [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(11):4289-4297.
- [17] Wu W, Yang J, Xu S, et al. Geochemistry of the headwaters of the Yangtze River, Tongtian He and Jinsha Jiang: Silicate weathering and

- CO₂ consumption [J]. *Applied Geochemistry*, 2008,23(12):3712–3727.
- [18] Tao Z H, Zhao Z Q, Zhang D, et al. Chemical weathering in the Three Rivers (Jingshajiang, Lancangjiang, and Nujiang) Watershed, Southwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015,34(8):2297–2308.
- [19] Liu J, Zhao Y, Li Z, et al. Quantitative source apportionment of water solutes and CO₂ consumption of the whole Yarlung Tsangpo River basin in Tibet, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019,26(27):28243–28255.
- [20] Wu W, Xu S, Yang J, et al. Silicate weathering and CO₂ consumption deduced from the seven Chinese rivers originating in the Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Chemical Geology*, 2008,249(3/4):307–320.
- [21] Wu L L, Youngsook H, Qin J H, et al. Chemical weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society*, 2005,69(22):5279–5294.
- [22] 李明月,孙学军,李胜楠,等.青藏高原及其周边地区冰川融水径流无机水化学特征研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2020,42(2):562–574.
- Li M Y, Sun X J, Li S N, et al. Advances on inorganic hydrochemistry of glacial meltwater runoff in the Qinghai–Tibet Plateau and its surrounding areas [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2):562–574.
- [23] 姚檀栋,周 行,杨晓新.印度季风水汽对青藏高原降水和河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高程递减率的影响 [J]. *科学通报*, 2009,54(15):2124–2130.
- Yao T D, Zhou X, Yang X X. Indian monsoon influences altitude effect of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation/river water on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009,54(15):2124–2130.
- [24] Liu Z, Yao Z, Huang H, et al. Land use and climate changes and their impacts on runoff in the Yarlung Zangbo river basin, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2014,25(3):203–215.
- [25] 柏建坤,李潮流,康世昌,等.雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 [J]. *环境科学*, 2014,35(9):3346–3351.
- Bai J K, Li C L, Kang S C, et al. Chemical speciation and risk assessment of heavy metals in the parts of Yarlung Zangbo surface sediments [J]. *Environmental Science*, 2014,35(9):3346–3351.
- [26] 张计东,张振利,魏文通,等.中华人民共和国区域地质调查报告 [M]. 北京:地质出版社, 2015:39–64.
- Zhang J D, Zhang Z L, Wei W T, et al. *Regional Geological Survey Report of the People's Republic of China* [M]. Beijing: Geological Press, 2015:39–64.
- [27] Pant R R, Fan Z, Rehman F U, et al. Spatiotemporal variations of hydrogeochemistry and its controlling factors in the Gandaki River Basin, Central Himalaya Nepal [J]. *Science of The Total Environment*, 2017,622:770–782.
- [28] HJ 494–2009 水质采样技术指导 [S].
- HJ 494–2009 Water quality—Guidance on sampling techniques [S].
- [29] Xiang H, Sillanpää M, Gjessing E T, et al. Water quality in the Tibetan Plateau: major ions and trace elements in the headwaters of four major Asian rivers [J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(24):6242–6254.
- [30] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999,159(1–4):3–30.
- [31] 周嘉欣,丁永建,曾国雄,等.疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 [J]. *环境科学*, 2014,35(9):3315–3324.
- Zhou J X, Ding Y J, Zeng G X, et al. Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River basin and the possible controls [J]. *Environmental Science*, 2014,35(9):3315–3324.
- [32] 陈静生.河流水质原理及中国河流水质 [M]. 北京:科学出版社, 2006:291.
- Chen J S. *Principles of river water quality and water quality of Chinese Rivers* [M]. Beijing: Science Press, 2006:291.
- [33] Jiang L G, Yao Z J, Liu Z F, et al. Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015,155:76–83.
- [34] 田 原,余成群,雒昆利,等.西藏地区天然水的水化学性质和元素特征 [J]. *地理学报*, 2014,69(7):969–982.
- Tian Y, Yu C Q, Luo K L, et al. Hydrochemical characteristics and element contents of natural waters in Tibet, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(7):969–982.
- [35] 张 涛,蔡五田,李颖智,等.尼洋河流域水化学特征及其控制因素 [J]. *环境科学*, 2017,38(11):4537–4545.
- Zhang T, Cai W T, Li Y Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River basin [J]. *Environmental Science*, 2017,38(11):4537–4545.
- [36] 张清华,孙平安,何师意,等.西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 [J]. *环境科学*, 2018,39(3):1065–1075.
- Zhang Q H, Sun P A, He S Y, et al. Fate and origin of major ions in river water in the Lhasa River basin, Tibet [J]. *Environmental Science*, 2018,39(3):1065–1075.
- [37] 孙 瑞,张雪芹,吴艳红.藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素 [J]. *湖泊科学*, 2012,24(4):600–608.
- Sun R, Zhang X Q, W Y H. Major ion chemistry of water and its controlling factors in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012,24(4):600–608.
- [38] Lewin P. Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water: The Congo Basin case [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993,120(1/2):59–76.
- [39] 胡春华,周文斌,夏思奇.鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析 [J]. *环境化学*, 2011,30(9):1620–1626.
- Hu C H, Zhou W B, Xia S Q. Characteristics of major ions and the influence factors in PoYang Lake catchment [J]. *Environmental Chemistry*, 2011,30(9):1620–1626.
- [40] Gibbs R J. Mechanisms Controlling World Water Chemistry [J]. *Science*, 1971,198(172):870.
- [41] 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,等.贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 [J]. *环境科学*, 2015,36(5):56–63.
- Lue J M, An Y L, Wu Q X, et al. Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang River Basin at wet season in Guizhou province [J]. *Environmental Science*, 2015,36(5):56–63.
- [42] 阿列金.水文化学原理 [M]. 北京:地质出版社, 1960:306.
- A L J. *Principles of water culture* [M]. Beijing: Geological Press, 1960:306.
- [43] Bao Y F, Wang Y C, et al. Phosphorus fractions and its summer flux from sediments of deep reservoirs located at a phosphate–rock watershed, Central China [J]. *Water science & technology: Water supply*, 2018,18(1/2):688–697.
- [44] 刘从强,蒋颖魁,陶发祥,等.西南喀斯特流域碳酸盐岩的硫酸侵蚀与碳循环 [J]. *地球化学*, 2008,37(4):404–414.
- Liu C Q, Jiang Y K, Tao F X, et al. Sulfuric acid erosion and carbon cycle of carbonate rocks in southwestern Karst Basin [J]. *Geochimica*, 2008,37(4):404–414.
- [45] Qin T, Yang P H, Groves C, et al. Natural and anthropogenic factors affecting geochemistry of the Jialing and Yangtze Rivers in urban Chongqing, SW China [J]. *Applied Geochemistry*, 2018,98:448–458.
- [46] Li Y Z, Gao Z J, Liu J T, et al. Hydrogeochemical and isotopic characteristics of spring water in the Yarlung Zangbo River Basin, Qinghai–Tibet Plateau, Southwest China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021,18(8):2061–2078.
- [47] Li X Y, Ding Y J, Han T D, et al. Seasonal and interannual changes of river chemistry in the source region of Yellow River, Tibetan Plateau [J]. *Applied Geochemistry*, 2020,119:104638.

作者简介: 严宇鹏(1997–),男,江西赣州人,三峡大学硕士研究生,主要从事生态水文学研究。