

文章编号: 1008 - 2786 - (2012) 3 - 378 - 07

贡嘎山海螺沟水化学主离子特征及其控制因素

周 俊^{1 2} 吴艳宏^{1*}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 ,山地表生过程与生态调控重点实验室 ,四川 成都 610041;

2. 中国科学院研究生院 ,北京 100049)

摘 要: 在系统采集贡嘎山海螺沟水样的基础上 ,综合运用描述性统计、相关性分析、Gibbs 图、阴阳离子三角图和主成分分析法 ,对水化学主离子特征及其控制因素进行了分析。结果表明: Ca^{2+} 和 HCO_3^- 分别平均占阳、阴离子总量的 78.63% 和 67.28%; 源头区总溶解固体含量 (TDS) 与雨水的含量相当 ,全流域 TDS 平均值为 128.36 mg/L; 海螺沟流域水化学类型为 $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 。在源头区 ,由于冰雪融水对径流量补给量较大 ,大气降水的输入作用对源头区水体化学离子的组成具有一定的影响。从全流域看 ,岩石的化学风化是海螺沟水化学主离子来源的主要控制因素 ,蒸发 - 结晶和大气降水的作用影响较小。而碳酸盐岩的风化则是海螺沟流域岩石风化的主要类型。

关键词: 贡嘎山; 水化学类型; Gibbs; 元素比值; 化学风化

中图分类号: P342

文献标识码: A

自然界水体水化学特征主要受河流流经区岩石岩性、气候、土壤、植被、降水的化学性质以及人类活动的影响。而未被污染的河水的水化学性质则主要受地质条件的影响 ,其余因子如气温、湿度、地形和生物等的影响不及总和的 10%^[1]。因此 ,流域中岩石的地球化学作用决定了流域水体主要离子的组成比例^[2]。反之 ,可通过对水体主离子组成的分析 ,识别控制该水体水化学特征的基本过程: 岩石风化、蒸发 - 结晶、以及大气干湿沉降 ,反演流域内地表岩石所经历的地球化学反应过程。利用该原理 ,在对世界范围内雨水、湖水、河水和海水化学组成分析的基础上 ,Gibbs 提出了用于判定控制流域水体主要作用机制的 Boomerang Envelope 模型^[3]。该模型在世界上主要河流系统得到了应用和验证^[4-6]。利用该模型对我国主要大型水系水化学主离子分析的结果表明 ,碳酸盐岩风化和蒸发岩溶蚀作用是中国河水主离子化学组成的控制性因素 ,而铝硅酸盐岩风化的影响较弱^[7]。目前 ,国内学者多将该模型应用

于大型流域 ,如长江水系主要离子化学特征主要受岩石风化的影响 ,其中碳酸盐岩风化和蒸发岩矿对干流水系离子的贡献率为 81% 以上 ,而对支流水系溶质的贡献率约为 72%^[8]; 珠江水体的阳离子起源于岩石风化 ,而氯离子受起源于海洋的大气降水的控制^[9]; 位于北方的黄河主要受蒸发盐和碳酸盐岩风化的控制 ,二者对水体溶质的贡献率约为 75%^[10]。这些大型流域的研究成果为认识区域尺度的地球化学过程具有积极的意义 ,但当对更小空间尺度内地球化学过程及其生态环境影响进行分析时 ,大区域尺度的数据在精度上则略显不足。因此 ,开展将 Boomerang Envelope 模型应用于较小流域的研究不仅是扩大 Boomerang Envelope 模型应用范围的有益尝试^[11] ,而且对获取更高精度的水文地球化学数据具有积极的意义。

海螺沟位于贡嘎山东坡 ,青藏高原东缘 ,属于长江水系 ,是大渡河的支流。由于远离人类活动 ,该地区很少受到人类活动的干扰 ,是研究自然状态下高

收稿日期(Received date) : 2012 - 03 - 07; 改回日期(Accepted) : 2012 - 03 - 14。

基金项目(Foundation item) : 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2 - YW - BR - 21) 资助。 [Supported by the Important Directive Innovative Found of Chinese Academy of Sciences (KZCX2 - YW - BR - 21) .]

作者简介(Biography) : 周俊(1983 -) ,男 ,博士研究生 ,主要从事环境地球化学研究。 [Zhou Jun , born in 1983 , male , Ph D candidate , studying on environmental geochemistry.] E - mail: zhoujun@imde. ac. cn

* 通讯作者(Author for correspondence) : 吴艳宏 [Wu Yanhong] , Tel: 028 - 85257118; E - mail: hwu@imde. ac. cn

山生态系统物理、化学和生态过程的理想区域^[12]。水是山地生态系统物质和能量传输主要载体, 阐明海螺沟径流水化学特征有益于深入认识贡嘎山东坡元素地球化学迁移过程。有研究认为长江上游径流水化学离子受岩石风化的控制^[8, 13], 海螺沟位于长江上游, 但这里化学风化作用较弱, 且冰川和积雪是海螺沟河川径流的重要补给来源, 约有 31% 的径流由冰雪融水补给^[14], 其径流水化学组分是否也主要受岩石风化的影响, 除岩石风化外是否还有其他主要影响因素? 本文将分析海螺沟径流的水化学主离子特征, 并利用 Boomerang Envelope 模型等方法评估控制水体主离子组成的主要因素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贡嘎山是横断山系大雪山的主峰(海拔 7 556 m), 也是四川省的最高峰(图 1), 拥有现代冰川 74 条, 冰川面积 255.1 km²^[15]; 位于中国地貌第一阶梯与第二阶梯的过渡带上, 同时也位于青藏高原高寒气候区与亚热带季风气候区的过渡带上, 因此, 贡嘎山东、西坡地貌、气候、土壤和植被等差异巨大。本文的研究区海螺沟位于贡嘎山东坡, 流域面积 197.2 km²。由于相对高度达 6 km, 各种环境要素随海拔发生急剧变化, 海螺沟具有完整的土壤和植被垂直带谱^[16]。由低到高土壤垂直带谱依次为: 山地淋溶褐土(海拔 1 750 m 以下), 山地黄壤(1 750 ~ 2 200 m), 山地黄棕壤(2 200 ~ 2 400 m), 山地棕壤(2 400 ~ 2 600 m), 山地暗棕壤(2 600 ~ 2 900 m), 棕色暗针叶林土(2 900 ~ 3 600 m), 高山草甸土(3 600 ~ 4 600 m) 和高山寒冻土(4 600 ~ 4 900 m)^[17]。

海螺沟主要受东亚季风的影响。根据中国科学院贡嘎山高山森林生态站(3 000 m 站)的观测, 海螺沟年平均气温 4℃, 1 月平均气温 - 4.5℃, 7 月平均气温 12.7℃, 年降水量约 1 835 mm, 年相对湿度 90% 左右, 年蒸发量约为 327 mm^[14]。研究区内主要岩类为花岗岩(如斜长花岗岩、二长花岗岩)和变质岩(如大理岩和斜长石石英片岩)^[18]。

1.2 采样与分析

根据海拔及海螺沟的水系特点, 于 2010 - 09 从沟源头区(高山灌丛带)向下游沿水系采样, 其中 3 544 m 以上 5 处样点为支流, 其余为干流水样。现

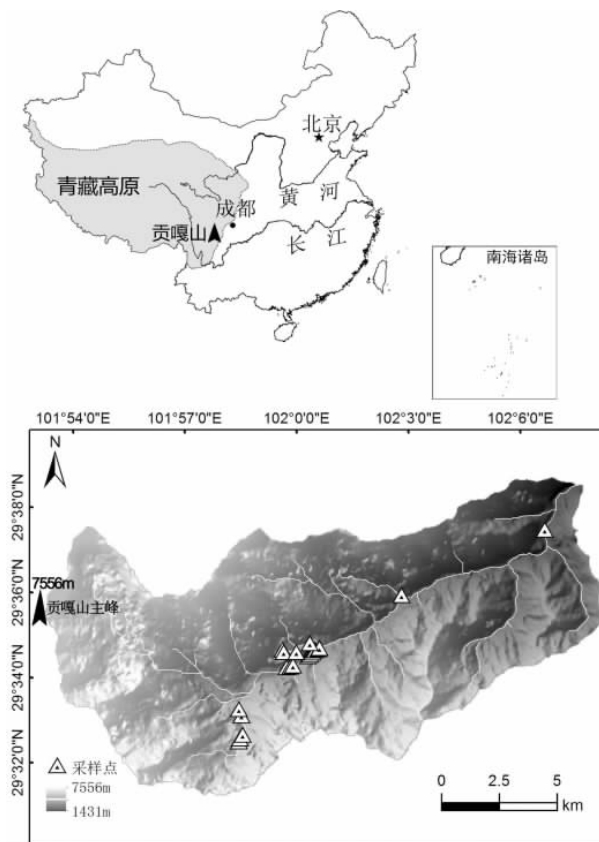


图 1 贡嘎山地理位置与采样点分布示意图

Fig. 1 The location of Gongga Mountain and sampling sites

场测定使用 EUTECHTM[®] pH 6 + (玻璃电极型号 7252101B) 测定 pH 值。pH 计使用前按照 EUTECHTM[®] 提供的校准手册进行校准: 首先使用 pH7 的标准缓冲溶液(P/N: 54X264511)进行校准, 然后使用 pH 的标准缓冲溶液样品(P/N: 54X264528)进行校准。用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜后分为两部分, 一部分用于测定阴离子, 另一部分加入超纯 HCl 用于测定阳离子。样品在测定前保存于 0 ~ 4℃ 的冰箱中。钙和镁离子使用原子吸收法, 钾和钠离子使用火焰光度法, 碳酸根和重碳酸根离子使用酸碱滴定法, 氯离子使用硝酸银滴定法, 硫酸根离子使用比浊法。实验过程中, 每批样品均设置 3 个空白、标准样品, 同时测定平行样。测定工作在中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所理化分析实验室完成, 测试精度为 ± 5%。

本文采用 IBM[®] SPSS 软件(版本号: V19.0)进行主成分分析、因子分析和 Spearman 相关系数分析; 采用 OriginLab[®] Origin 软件(版本号: V8.1)绘制所有图件。

2 结果与讨论

2.1 水化学主离子特征及水化学类型

贡嘎山海螺沟流域水体总体呈偏酸性, pH 值最低值为 4.5, 位于海螺沟干流中段, 最高值为 6.4, 位于流域出口附近, 平均值为 5.3 (表 1)。除出口样点外, 海拔由高到低, 或者由源头到流域出口, pH 无明显的变化, 均未超过 6。海螺沟水体低 pH 值可能是两方面的原因造成的: 1. 由于海螺沟流域温度较低、水分较多, 土壤类型以棕壤和暗棕壤为主, 腐殖质层较厚, 土壤中有有机酸含量较高, 土壤的 pH 值较低, 暗棕壤 A 层的 pH 为 4.8, 棕壤 A 层的 pH 为 5.4^[17], 从而导致水体 pH 值较低。2. 根据中国科学院贡嘎山高山森林生态系统试验站的观测, 2009—2010 年, 海螺沟海拔 3 000 m 左右天然降水的 pH 平均值为 6.7, 林内降雨 pH 平均值为 6.3, 树干径流 pH 平均值为 5.8, 说明森林生态系统林冠层可能对地表水 pH 造成了一定的影响。不过, 造成海螺沟地表径流 pH 值较低的详细原因, 还需要进一步的研究。

为了区分不同河段水化学特征的差异, 本文将

样点分为源头区和干流区两部分, 源头区为海拔 3 500 m 以上的区域, 干流区为其下的区域 (表 1)。源头区水体 TDS 含量 (表 1 中 8 种离子的质量浓度之和) 的变化范围为 11.78 ~ 64.16 mg/L, 平均值为 38.04 mg/L, 含盐量较低, 与一般雨水含盐量相当 (20 ~ 50 mg/L)^[13]; 干流区 TDS 为 84.39 ~ 262.10 mg/L, 平均值为 163.11 mg/L; 两个区域 TDS 间存在显著性差异 ($p = 0.001$)。从全流域来看, TDS 自支流到干流呈现上升的趋势, 平均值为 128.36 mg/L, 高于世界河流 TDS 平均值 115 mg/L^[19], 但低于其下游河流大渡河泸定段的 TDS 平均值 185 mg/L^[20]。

水体阳离子各组分含量在源头区依次为 (表 1): $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$, 在干流区则 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ 两种情况都存在, 但以前者为主。全流域上 Ca^{2+} 始终是最主要的阳离子组分。阴离子含量在全流域的比例都比较一致, 绝大多数样点均为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-}$ 。因此, 海螺沟流域水化学类型在源头区为 $\text{Ca}^{2+} + \text{K}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型, 而在干流区为 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型, 从全流域看则可归结为 $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ 型。这与青藏高原东部长江水系的水化学特征和类型是基本一致的^[20]。

表 1 海螺沟水体主要离子浓度

Table 1 The concentrations of major ion of water in Hailuoguo catchment

/(mg/L)

编号	海拔 /m	pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS	备注
1	3 896	5.7	0.61	0.24	1.67	0.27	-	6.92	0.62	1.46	11.78	源头区
2	3 838	5.6	0.94	0.30	2.21	0.43	-	8.07	0.65	2.21	14.80	源头区
3	3 767	5.3	1.78	0.52	12.71	0.78	-	30.68	0.72	16.98	64.16	源头区
4	3 614	5.6	1.66	0.47	9.87	0.69	-	24.91	0.72	11.27	49.58	源头区
5	3 544	5.5	1.63	0.49	9.49	0.70	-	25.37	0.79	11.38	49.85	源头区
6	3 097	5.1	1.64	0.56	15.87	2.01	-	46.82	0.69	16.79	84.39	干流区
7	3 039	4.7	2.58	0.83	36.19	2.56	-	41.52	0.69	85.67	170.03	干流区
8	3 003	4.7	2.44	1.10	35.34	2.58	-	53.05	0.86	70.33	165.70	干流区
9	2 946	4.5	2.71	0.63	16.40	1.27	-	38.29	0.85	25.11	85.24	干流区
10	2 941	5.1	6.70	0.78	44.22	2.70	-	120.63	0.91	42.93	218.86	干流区
11	2 934	5.5	4.35	1.09	31.68	3.27	-	86.26	0.93	35.31	162.88	干流区
12	2 929	4.5	2.36	0.98	32.94	2.43	-	50.97	0.86	67.21	157.76	干流区
13	2 902	5.7	2.64	0.58	16.85	1.40	-	38.75	1.04	25.61	86.87	干流区
14	2 889	5.6	3.96	0.60	51.76	3.61	-	165.14	0.64	19.56	245.27	干流区
15	2 883	5.3	4.27	0.88	53.14	5.36	-	160.76	0.74	36.96	262.10	干流区
16	2 882	5.6	3.41	0.62	34.98	3.35	-	145.54	0.67	18.82	207.38	干流区
17	2 362	4.8	2.50	0.57	27.72	3.45	-	83.03	0.64	22.99	140.89	干流区
18	1 681	6.4	2.59	1.03	24.90	3.36	-	73.11	0.89	27.13	133.01	干流区

注: - 表示低于检测限, CO₃²⁻ 检测限为 0.24 mg/L

2.2 水体主离子来源及控制因素

通过对世界地表水化学组分的分析, Gibbs 将控制天然河水组分来源的因素分为三个类型: 降水控制型、岩石风化型和蒸发-结晶型, 是定性地判断区域岩石、大气降水及蒸发-结晶作用对河流水化学影响的有效手段^[3]。如图 2 所示, 海螺沟水体化学组成绝大部分都落在 Gibbs 分布模型内, 这也反应了海螺沟远离人类活动, 河水受人为干扰较少。水化学组分大部分落在岩石风化控制区域内, 说明海螺沟流域水化学主离子主要来自于岩石的风化。该判断与整个长江上游水系水体离子的主要来源是一致的^[8]。此外, 值得注意的位于 Gibbs 图最下部边界上的两个组分, 具有靠近大气降水控制端的趋势, 而这两点是海拔最高的两个样点, 此处径流的补给源有 45% 来自于冰雪融水^[14], 说明海螺沟高山区水体离子来源受大气降水的影响较大。

阴、阳离子三角形图可表示河水溶质载荷主要离子的相对丰度和分布特征, 从而揭示不同岩石风化对河水总溶质成分的相对贡献率^[21]。主要受碳酸盐岩风化影响时, 阴离子组分点多落在 HCO_3^- 一端, 而阳离子组分多落在 Ca^{2+} 一端; 主要受蒸发岩影响的河流, 阴离子多落在 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^-$ 线上, 远离

HCO_3^- 一端, 阳离子组分则偏向 $(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$ 端元^[1]。利用阴、阳离子三角图, 可以在已知为岩石风化控制海螺沟水体离子组分的基础上, 进一步确定是哪类岩石的风化控制其组成。由图 2 可知, 在阳离子 $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}-(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$ 组成的三角图中, 组分点主要靠近 Ca^{2+} 端元, 说明海螺沟流域主要受碳酸盐风化的影响; 阴离子 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 三角图则显示元素组分主要落在 HCO_3^- 线上, 且靠近 HCO_3^- 一端。这也说明了海螺沟水体化学成分主要受碳酸盐岩风化的控制。海螺沟的岩类以斜长花岗岩为主, 石灰岩为辅^[18], 但其水体却表现出受碳酸盐岩风化控制的特征。这可能是由于该地区温度较低, 湿度较大^[14], 尽管石灰岩含量较小, 但其更易被风化, 因此海螺沟流域水体主离子组成表现出受碳酸盐岩风化控制的特征。

河流水体离子 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ (摩尔浓度) 散点图及 $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 散点图(图 4) 也表明海螺沟流域水体离子主要来源于碳酸盐岩的风化^[22]。

硅酸盐风化对海螺沟水体阳离子 TZ^+ ($\text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{Mg}^{2+}$) 总量的贡献率, 从另一个角度说明了海螺沟水体离子主要来自于碳酸盐风

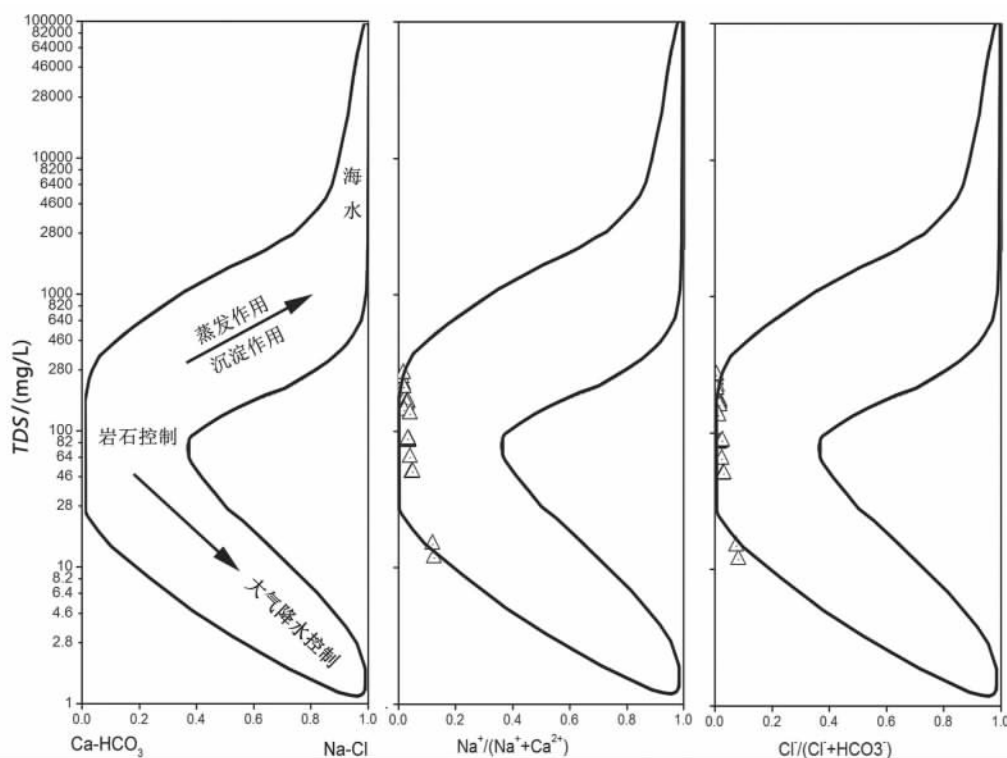


图 2 贡嘎山海螺沟水化学 Gibbs 分布图

Fig. 2 The Gibbs Figure of hydrochemistry in Hailuoguo catchment

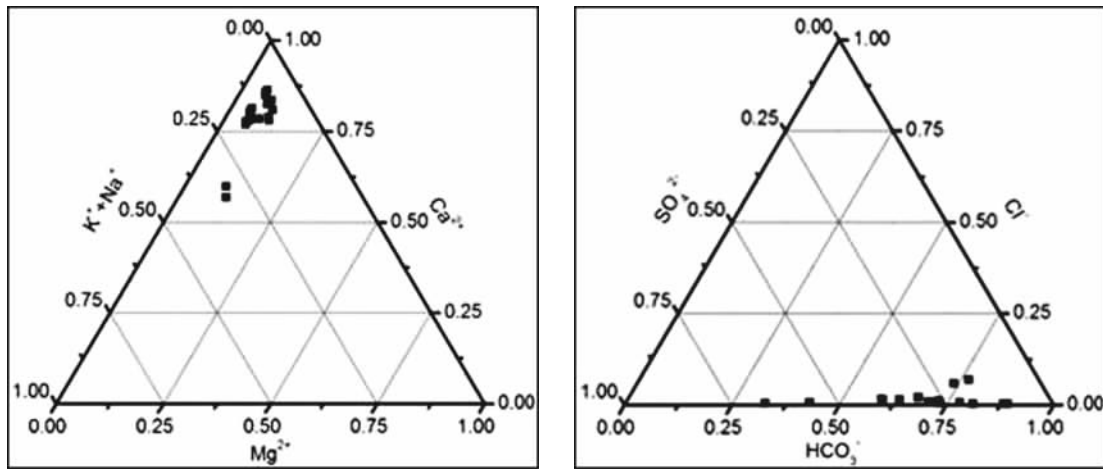


图 3 贡嘎山海螺沟阳离子三角图(左图)和阴离子三角图(右图)/(mg/L)

Fig. 3 Triangular diagrams of anions and cations in water of Hailuoguo catchment/(mg/L)

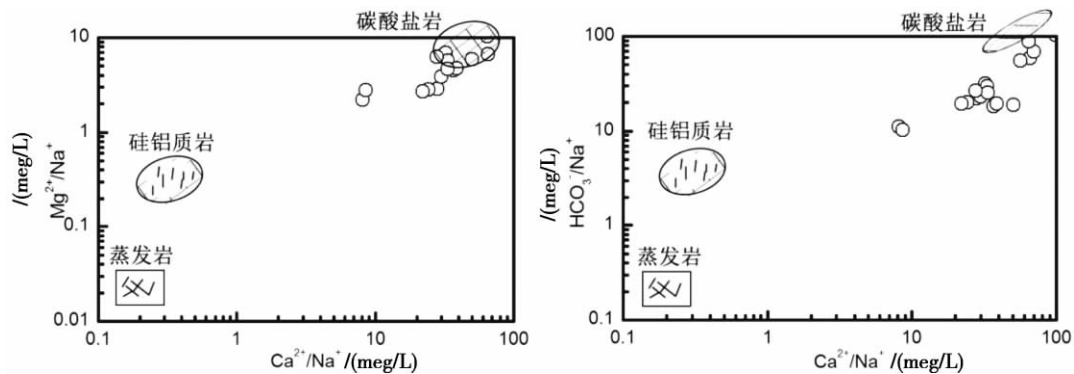


图 4 贡嘎山海螺沟流域水体 $n(\text{Na}^+)$ 的标准化比值混合图解

Fig. 4 The scatter diagram of normalized Na^+ and other ion in water of Hailuoguo catchment

化而非硅酸盐的风化。通常,水体中的 Na^+ 主要来自于石盐溶解和硅酸盐矿物风化, Na^+ ($\text{Na}^+ = \text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) 代表来自于地表硅酸盐风化所供应的那部分 Na^+ , 因此,通常用于指示地表硅酸盐岩风化对河水中阳离子的贡献^[23]。海螺沟 Na^+ 最高值仅为 0.03 mg/L, ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) / TZ^+ 最高值为 0.056 (图 5), 说明硅酸盐岩风化对河水中阳离子的贡献率很低, 表明海螺沟水体中离子的主要来源不是硅酸盐岩的风化。

对除 CO_3^{2-} 外的 7 个离子组分进行主成分分析和因子分析的结果表明,前两个变量的累积贡献率达 82.6%, 其中第一因子占 61.0%, 第二因子占 21.6%, 旋转后两个变量的特征值均 > 1, 可认为所提取的两个变量可代表 7 个离子组分。第一因子与 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 的相关系数较好, 代表了碳酸盐岩类的风化; 第二因子与 Cl^- 、 Na^+ 和 SO_4^{2-} 相关系数较好, 代表石盐如 NaCl 等矿物的风化。

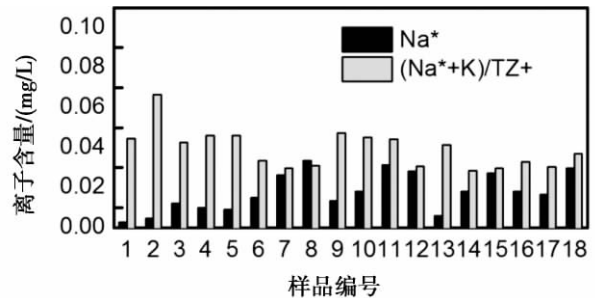


图 5 贡嘎山海螺沟水体 Na^+ ($\text{Na}^+ = \text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) 以及 ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) / TZ^+ 值; $\text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{Mg}^{2+}$

Fig. 5 The values of Na^+ ($\text{Na}^+ = \text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) and ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) / TZ^+ ; $\text{TZ}^+ = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{Mg}^{2+}$

各离子间的相关系数可一定程度上解释离子的来源。 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的相关系数最大(表 2), 表明三者具有较为相同的来源, 即含镁的碳酸盐岩的风化释放而来^[24]。 K^+ 和 Na^+ 一般来自于钠长

表2 海螺沟各离子浓度相关系数

Table 2 The Spearman correlation coefficients of ion in water of Hailuoguo catchment

相关系数	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
K ⁺	1.00						
Na ⁺	0.67*	1.00					
Ca ²⁺	0.80*	0.75*	1.00				
Mg ²⁺	0.76*	0.67*	0.85*	1.00			
HCO ₃ ⁻	0.82*	0.66*	0.88*	0.96*	1.00		
Cl ⁻	0.44	0.62*	0.22	0.11	0.16	1.00	
SO ₄ ²⁻	0.62*	0.90*	0.79*	0.58*	0.56*	0.59*	1.00

* 表示在 0.05 水平上显著相关

石、钾长石和云母等的风化,而天然水中 K⁺ 常低于 Na⁺ [13]。海螺沟水体中,以当量浓度计,K⁺ 的浓度反而高于 Na⁺ 的浓度,二者间的相关系数为 0.67,说明二者的来源具有一定的一致性,而 K⁺ 的浓度更高则可能与海螺沟岩性更偏重钾长石花岗岩有关。Cl⁻ 一般来源于 NaCl 和 MgCl₂ 等岩盐的溶解 [13],其 在海螺沟水体中含量较低,且仅与 Na⁺ 具有显著的相关性,说明 Cl⁻ 主要来自于 NaCl 岩盐的风化。

3 结论

总体来看,海螺沟流域水体主要离子组成中阳离子质量浓度:Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Na⁺,阴离子:HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > CO₃²⁻;TDS 平均值为 128.36 mg/L,变化范围为 11.78 ~ 262.10 mg/L。Ca²⁺ 和 HCO₃⁻ 是占绝对优势的离子,分别平均占阳、阴离子总量的 78.63% 和 67.28%。

尽管冰雪融水是海螺沟径流的重要补给源,但是控制海螺沟流域水体主离子起源的优势机制仍然是岩石的风化作用;在高山区,由于冰雪融水对径流补给量较大,大气降水的输入作用对高山区河流化学离子来源具有一定的影响;由于蒸发量较小,蒸发-结晶作用对水体离子组成的影响较弱。岩石风化作用中以白云岩和大理岩等碳酸盐岩风化作用为主,水化学类型为 Ca²⁺-HCO₃⁻。

致谢:感谢罗辑研究员、余东博士和邴海健博士在采样过程中的大力帮助。感谢审稿专家中肯有益的修改意见。

参考文献(References)

[1] Meybeck M. Global chemical - weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads [J]. American Journal of Science , 1987 287(5) :401 -428

[2] Zhang Licheng ,Dong Wenjiang. Geochemical characteristics of the river system in east China [J]. Geographical Research ,1990 ,9 (2) :67 -75 [张立成 ,董文江. 我国东部河水的化学地理特征 [J]. 地理研究 9(2) :67 -75]

[3] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science ,1970 ,170(3962) :1088 -1090

[4] Gibbs R J. Water chemistry of Amazon river [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta ,1972 36(9) :1061 -1066

[5] Chetelat B ,Liu C Q ,Zhao Z Q ,et al. Geochemistry of the dissolved load of the Changjiang Basin rivers: Anthropogenic impacts and chemical weathering [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta 2008 , 72(17) :4254 -4277

[6] Roy S ,Gaillardet J ,Allegre C J. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river ,France: Anthropogenic impact ,carbonate and silicate weathering [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta ,1999 63(9) :1277 -1292

[7] Hu M H ,Stallard R F ,Edmond J M. Major ion chemistry of some large Chinese rivers [J]. Nature ,1982 298(5874) :550 -553

[8] Wang Yaping ,Wang Lan ,Xu Chunxue ,et al. Hydro - geochemistry and genesis of major ions in the Yangtze River ,China [J]. Geological Bulletin of China 2010 29(2 -3) :446 -456 [王亚平 ,王岚 ,许春雪 等. 长江水系水文地球化学特征及主要离子的化学成因 [J]. 地质通报 2010 29(2 -3) :446 -456]

[9] Chen Jingsheng ,He Dawei. Chemical Characteristics and Genesis of Major Ions in the Pearl River Basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis ,1999 35(6) :61 -68 [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) :61 -68]

[10] Li Jingying ,Zhang Jing. Chemical weathering processes and atmospheric CO₂ consumption in the Yellow River drainage basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology 2003 23(2) :43 -49 [李晶莹 ,张经. 黄河流域化学风化作用与大气 CO₂ 的消耗 [J]. 海洋地质与第四纪地质 2003 23(2) :43 -49]

[11] Ren Dongxing ,Wang Genxu ,Hu Hongchang ,et al. Hydrochemical characteristics of runoff in a typical small permafrost of the Qinghai - Tibetan Plateau [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences 2010 46(1) :7 -13 [任东兴 ,王根绪 ,胡宏昌 等. 青藏高原多年冻土区典型小流域径流水化学特征 [J]. 兰州大学学报:自然科学版 2010 46(1) :7 -13]

- [12] Zhong Xianghao, Zhang Wenjing, Luo Ji. The characteristics of the mountain ecosystem and environment in the Gongga Mountain region [J]. *AMBIO*, 1999, 28(8): 648–654 [钟祥浩, 张文敬, 罗辑. 贡嘎山地区山地生态系统与环境特征 [J]. *人类学杂志*, 1999, 28(8): 648–654]
- [13] Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuo. Introduction to Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Chinese Geology Press, 1993 [沈照理, 朱宛华, 钟佐. 水文地球化学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1–100]
- [14] Cheng Genwei. Hydrological Features of maritime glacier in the region of Mt. Gongga [G] // Chen F. Research on the alpine ecosystem in Gongga Mountain. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1993: 69–78 [程根伟. 贡嘎山海洋性冰川区河流水文特征 [G]. // 陈富斌. 贡嘎山高山生态环境研究. 成都: 成都科技大学出版社, 1993: 69–78]
- [15] Pu Jianchen. Glaciers directory of China VIII—Yangtze River System [M]. Lanzhou: Gansu cultural Press, 1994 [蒲健辰. 中国冰川目录 VIII——长江水系 [M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1994: 1–100]
- [16] Yao Yonghui, Zhang Baiping, Han Fang, et al. Spatial pattern and exposure effect of Altitudinal Belts in the Hengduan Mountains [J]. *Journal of Mountain Science* 2010, 28(1): 11–20 [姚永慧, 张百平, 韩芳, 等. 横断山区垂直带谱的分布模式与坡向效应 [J]. *山地学报* 2010, 28(1): 11–20]
- [17] Yu Dafu. Vertical zonal characteristics of soil in Gongga Mountain [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1984, 15(2): 65–68 [余大富. 贡嘎山的土壤及其垂直地带性 [J]. *土壤通报*, 1984, 15(2): 65–68]
- [18] Zheng Yuanchang, Zhang Jianping, Yin Yigao. Characteristics of environment background value of Hailuoguo soil on Mt. Gongga [J]. *Mountain Research*, 1993, 11(1): 23–29 [郑远昌, 张建平, 殷义高. 贡嘎山海螺沟土壤环境背景值特征 [J]. *山地研究(现山地学报)*, 1993, 11(1): 23–29]
- [19] Zhu Bingqi, Yang Xiaoping. The ion chemistry of surface and ground waters in the Taklimakan Desert of Tarim Basin, western China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(12): 2123–2129 [朱秉启, 杨小平. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因 [J]. *科学通报*, 2007, 52(13): 1561–1566]
- [20] Qin Jianhua, Ran Jing, Du Gu. Major ion geochemistry of the dissolved loads from the Changjiang River on eastern Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, 27(4): 1–6 [秦建华, 冉敬, 杜谷. 青藏高原东部长江流域盆地陆地化学风化研究 [J]. *沉积与特提斯地质* 2007, 27(4): 1–6]
- [21] Huh Y, Tsoi M Y, Zaitsev A, et al. The fluvial geochemistry of the rivers of eastern Siberia: I. Tributaries of the Lena River draining the sedimentary platform of the Siberian Craton [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(10): 1657–1676
- [22] Gaillardet J, Dupre 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
- [23] Sarin M M, Krishnaswami S, Dilli K, et al. Major ion chemistry of the Ganga–Brahmaputra river system—weathering processes and fluxes to the bay of Bengal [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(5): 997–1009
- [24] Chen Jingsheng. Principle of river water quality and water quality of Chinese rivers [M]. Beijing: Science Press, 2006 [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: 10–50]

Major Ion Chemistry of Waters in Hailuoguo Catchment and the Possible Controls

ZHOU Jun^{1, 2}, WU Yanhong¹

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To analyze the major ion chemistry of water in Hailuoguo catchment and possible controls, 18 group of water samples were collected and tools including the descriptive statistics, the correlation matrices, Gibbs Figure, Triangular diagrams of anions and cations and the Principal Composition Analysis were employed. The results show that the contents of Ca²⁺ and HCO₃⁻ account for 78.63% and 67.28% of cations and anions respectively. In the headwater region, the content of TDS (Total Dissolved Solids) is approximately equal to that contained in rain water. The average value of TDS in Hailuoguo catchment is 128.36 mg/L. The hydrochemical type of Hailuoguo catchment is Ca²⁺—HCO₃⁻. The composition of ion in headwaters region is influenced partly by atmospheric deposition because the ice and snow melting water is an important water source of headwaters catchment. For whole catchment, the major ion chemistry of river water is controlled by carbonate weathering, while the effect of evaporation–crystallization and atmospheric deposition is low.

Key words: Gongga mountain; type of hydrochemistry; Gibbs; element ratio; chemical weathering