

青藏高原纳木错流域河水主要离子化学特征及来源

高坛光^{1,3}, 康世昌^{1,2}, 张强弓^{1,3}, 周石砦¹, 徐彦伟^{1,3}

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 2. 中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 2006 年 6~10 月对青藏高原纳木错流域你亚曲、曲嘎切、昂曲 3 条河流进行了连续采样, 同时在 2005 年 9 月和 2006 年 9 月 2 次环纳木错考察中采集了其他河水的样品。河水中主要阴离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+})和阳离子(Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-})的分析结果表明, 你亚曲、曲嘎切和昂曲的离子总量(TDS)分别为 79.48、23.44 和 111 mg/L。离子总量明显低于青藏高原及我国其他河流, 且相互之间存在较为明显的差距。3 条河流中, 曲嘎切为重碳酸盐钙型水, 昂曲介于重碳酸盐钠型和重碳酸盐钙型之间, 你亚曲的化学类型介于两者之间。河流水化学的时间变化显著, 而且与流量成一定的反相关关系。利用主成分分析和相关分析得出: 你亚曲河水主要化学成分来源于碳酸盐中的 Ca^{2+} 和 HCO_3^{-} ; 曲嘎切来源于冰川融水以及碳酸盐中的 Ca^{2+} 、 HCO_3^{-} 和 Na^{+} ; 昂曲则来源于蒸发岩中的 Na^{+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^{-} 。

关键词: 主要离子; 离子来源; 河水; 纳木错; 青藏高原

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)11-3009-08

Major Ionic Features and Their Sources in the Nam Co Basin over the Tibetan Plateau

GAO Tan-guang^{1,3}, KANG Shi-chang^{1,2}, ZHANG Qiang-gong^{1,3}, ZHOU Shi-qiao¹, XU Yan-wei^{1,3}

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A preliminary study of major ions in water of three rivers (Niyaqu, Qugaqie, Angqu) in the Nam Co Basin has been carried out in June-October 2006. An obvious difference is found among these rivers, whose ionic characteristics are mainly influenced by the length of rivers and their supply sources. Among the three rivers, the contents of total dissolve solids (TDS) is 79.48 mg/L, 23.44 mg/L, and 111 mg/L in the Niyaqu, Qugaqie, and Angqu, respectively. The hydro-chemical type is C^{Ca} for the Qugaqie, between C^{Na} and C^{Ca} for the Angqu, and between the Angqu and Qugaqie for the Qugaqie. Changes in ionic concentrations are also related with discharges of the rivers. According to principal component analysis and correlation analysis, the main chemical contents derive from Ca^{2+} and HCO_3^{-} in carbonate for the Niyaqu, glacier meltwater and carbonate for the Qugaqie, and Na^{+} , Mg^{2+} and Cl^{-} in evaporates for the Angqu.

Key words: major ion; ionic sources; river water; Nam Co; Tibetan Plateau

全球海拔最高的青藏高原, 分布有众多的河流^[1], 冰川融水是这些河流的重要补给之一。在目前全球变暖的背景下, 青藏高原冰川普遍退缩, 而近年退缩幅度呈逐渐加剧的趋势^[2]。冰川的变化将会对冰川径流的水文和水化学方面产生重大影响。青藏高原河流径流化学成分的研究, 前人已经做了较多工作^[3~7]。但是初期的水体化学研究大都是季节考察性质, 主要为获得地区的水环境背景值, 缺少对其影响和控制因子的分析。对于河水化学控制因子的研究, 尤其是在寒旱区, 还没有较为充分的解释^[8]。

2005 年 6 月, 中国科学院青藏高原研究所在纳木错东南岸设立了纳木错圈层相互作用综合观测研究站(纳木错站, 图 1), 并对纳木错流域入湖河流进行连续和系统的采样。本研究根据 2006 年 7~10 月在纳木错流域东岸、南岸和西岸的你亚曲、曲嘎切和

昂曲 3 条河流以及在 2005 年 9 月和 2006 年 9 月 2 次环湖考察时采集的其他河流样品的主要阴、阳离子分析, 分别采用 Piper 图式和 Gibbs 图式 2 种模型, 并且用数理统计的方法, 着重讨论了河水主要离子的化学特征及其控制要素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

纳木错(30°30'~30°56'N, 90°16'~91°03'E)处于青藏高原中部, 是青藏高原第二大湖泊。湖面海拔

收稿日期: 2007-11-02; 修订日期: 2008-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422004); 中国科学院“百人计划”项目; 科技部基础性工作专项(2006FY110200); 欧盟第六框架项目(FP6-036952)

作者简介: 高坛光(1983~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为冰川水文和水化学, E-mail: gtg2006@itpcas.ac.cn

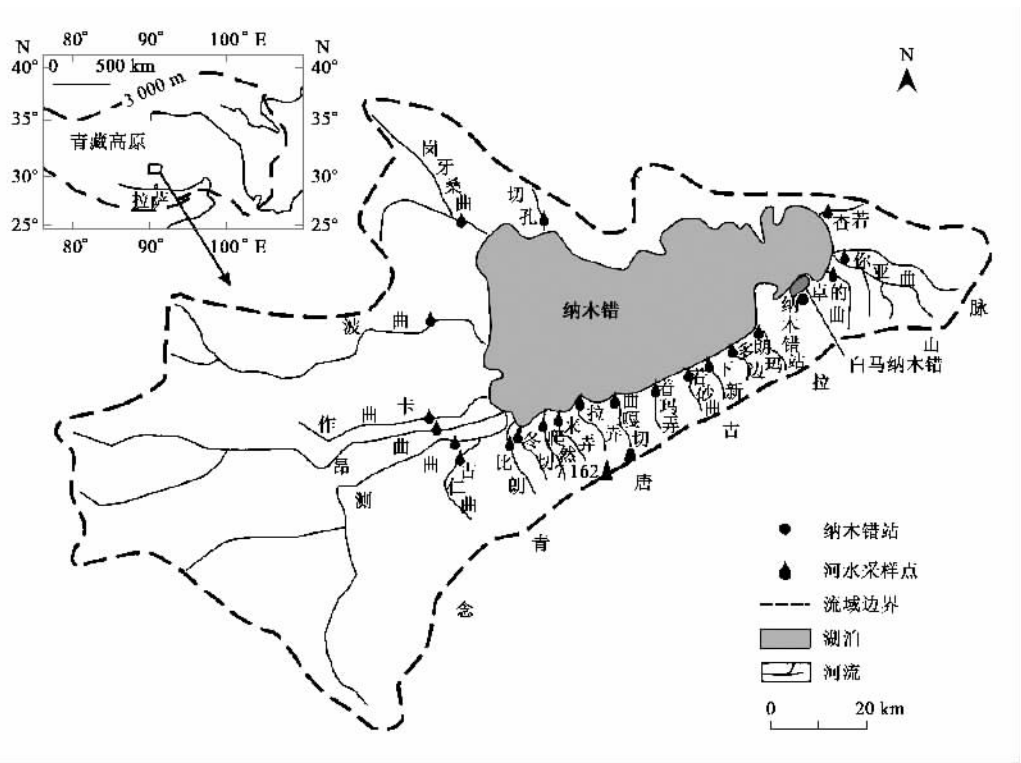


图 1 纳木错水文观测和样品采集点示意

Fig.1 Location map of hydrological observation and sampling sites in the Nam Co Basin

4 718 m,湖水面积1 980 km²,其流域面积为10 600 km²[9],北部和西部是起伏较小的藏北高原丘陵,南部和东南部属于念青唐古拉山脉,整个区域形成了一个封闭的盆地[10].由于该流域处于羌塘高原寒冷半干旱高原季风气候区和藏北高原草原区的东南边缘地带,对区域气候变化极为敏感,每年6~9月受西南季风的影响,相对温暖湿润,是流域的雨季,其他月份主要受西风的影响[11,12].

汇入纳木错的河流有波曲、昂曲、测曲、你亚曲、岗桑牙曲和一系列南岸的平行河流,北岸河流较少.位于西岸的波曲、昂曲、测曲和东岸的你亚曲这4条河流流域面积占总流域面积的57%以上,以地下水补给为主,同时也包括相当一部分积雪和冰川融水补给,产水量较大,是纳木错主要补给河流.与南岸平行的河流大小总共有27条,流域面积占总流域面积的14%,这些河流均发源于念青唐古拉山脉的冰川末端,依靠高山冰雪和冰川融水和降水补给.因此,位于东部、南部和西部的你亚曲、曲嘎切和昂曲基本可以代表纳木错流域的特征.

1.2 样品采集与分析

2006-06-29~2006-10-31,笔者先后对纳木错流域昂曲、你亚曲和曲嘎切3条河流进行定点观测,间隔采样周期为7 d,采集样品41个;于2005年9月和

2006年9月分别进行了2次环湖考察,采集其他河流样品34个;在2006年6月和8月期间,分别对曲嘎切和你亚曲进行了2次加密测量,采集样品24个,总计样品99个(图1).采集样品时带一次性塑料手套,先用样品将预先清洗的聚乙烯塑料样品瓶冲洗3次后装样,带回纳木错站后立即放入冰箱进行低温冷藏,之后样品被运送至中国科学院青藏高原研究所环境实验室.分析前一天,将样品在室温下自然融化,分别用Dionex ISC 2000和Dionex ISC 2500离子色谱仪,分析了主要阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺)和主要阴离子(Cl⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻).其中,离子色谱仪误差低于1 μg/L.空白样品的分析结果显示,样品在采集、运输和实验过程中并没有受到污染.

2 结果与讨论

2.1 河水离子化学特征

河水样品的主要阴、阳离子分析结果见表1.从中可以看出,你亚曲主要离子含量的顺序为:HCO₃⁻>Ca²⁺>SO₄²⁻>Na⁺>Mg²⁺>NO₃⁻>K⁺>Cl⁻;曲嘎切主要离子含量的顺序为:HCO₃⁻>Ca²⁺>SO₄²⁻>Na⁺>NO₃⁻>K⁺>Mg²⁺>Cl⁻;昂曲的主

表 1 纳木错流域河流主要离子含量¹⁾/mg·L⁻¹

Table 1 Major ion concentrations of the rivers in the Nam Co Basin/mg·L⁻¹

离子	你亚曲(31)		曲嘎切(18)		昂曲(16)		环湖(34)	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差
Na ⁺	2.74	0.53	1.14	0.4	8.56	4.20	4.21	3.89
K ⁺	0.76	0.14	0.42	0.13	1.25	0.41	0.77	0.37
Mg ²⁺	2.59	0.72	0.35	0.09	4.5	1.90	4.07	3.39
Ca ²⁺	13.52	2.68	3.78	0.93	13.18	3.93	15.90	8.56
Ca ²⁺	0.44	0.12	0.21	0.13	2.38	0.99	0.69	0.80
SO ₄ ²⁻	7.65	1.74	2.32	1.25	7.87	3.17	11.97	11.67
NO ₃ ⁻	0.78	0.18	0.73	0.23	1.01	0.22	2.94	11.37
HCO ₃ ⁻	51.64	9.18	13.02	2.82	72.99	22.07	62.74	38.85

1)括号内为样品数

要离子顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$. 对 3 条河的主要离子与环湖采样的数据相比较可以发现, 环湖样品离子浓度值均在 3 条河的范围之内, 因此本研究认为这 3 条河流较好地代表了整个纳木错流域的水化学特征.

2.1.1 主要离子含量及相互关系

3 条河流的对比表明, 曲嘎切的离子总量最小, 仅为 23.44 mg/L, 昂曲最高为 111 mg/L, 你亚曲介于

二者之间为 79.48 mg/L. 3 条河流的离子总量与青藏高原许多河流具有相似性(雅鲁藏布江仲巴站为 66.3 mg/L, 朋曲定日站为 127.7 mg/L)^[1, 13], 低于我国其他主要河流(长江大通站常年均值为 162 mg/L; 辽宁铁岭站多年均值为 294 mg/L)^[14].

通过 Piper 图式^[15]分析了 3 条河流水化学的主要离子组成(图 2). 结果显示: ①对于阴离子, 你亚曲、曲嘎切和昂曲均位于 Piper 图阴离子三角的左

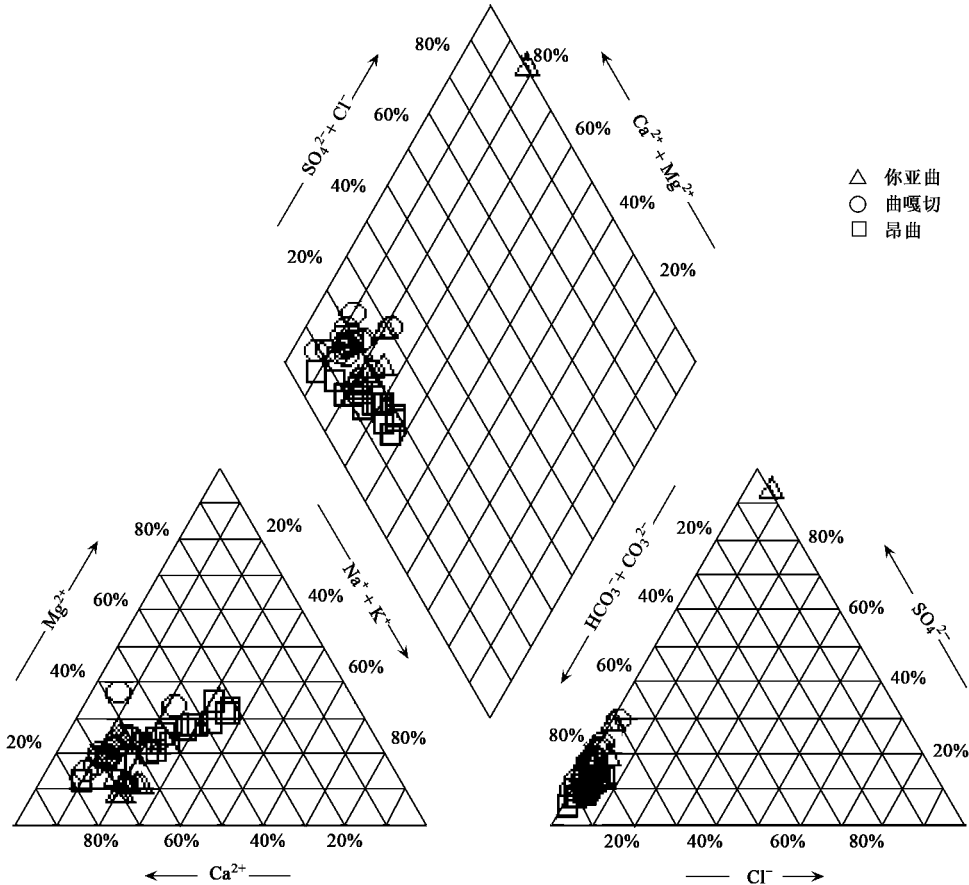


图 2 纳木错流域代表河流主要离子 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram for major ions of the river water in the Nam Co basin

侧,说明 3 条河水的离子组成具有较大的一致性. HCO_3^- 离子为优势离子,分别占全部阴离子的 83.7%、79.5% 和 86.6%. SO_4^{2-} 含量次之,其余为 NO_3^- 离子和 Cl^- 离子,其含量大多低于 1 mg/L.②对于阳离子,你亚曲和曲嘎切均为于三角图的左侧,而昂曲则大部分位于图的中心区域.你亚曲和曲嘎切的优势阳离子均为 Ca^{2+} ,分别占全部阳离子的 67.3% 和 65.5%,其次为 Na^+ 和 Mg^{2+} .而昂曲则主要位于三角图的中心位置,说明并没有明显的优势离子,主要为 Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 离子.③对于不同月份的河水样品,3 条河流的阴离子主要集中在三角图的左下角,分布的范围较小.你亚曲和曲嘎切的阳离子主要集中的三角图的左下角,而昂曲阳离子大部分位于左下角之外,还有部分在三角图的中心地带.在菱形图中可以看出昂曲呈现出接近线性的分布,而你亚曲和曲嘎切基本上呈圆形分布.这说明你亚

曲和曲嘎切的成分相对稳定,而昂曲存在较大的变化,且阳离子的变化比阴离子的变化要大.④在离子组成上,根据文献[16]分类法,曲嘎切和你亚曲属于重碳酸盐-钙型,昂曲属于重碳酸盐-钙钠型.

2.1.2 河水离子浓度空间变化

根据 Piper 图式对 2005 年 9 月和 2006 年 9 月 2 次环湖样品分析发现(图 3、4),纳木错流域河水离子空间变化较大.因为受到南部念青唐古拉山冰川径流的影响,纳木错流域河水中离子浓度基本上呈现出南部较低,其他区域较高的特征.纳木错流域较长的河流如昂曲、侧曲基本上都在流域的西南部,流域面积大,离子含量较高.在离子组成上,阳离子中的钙离子优势性降低, Na^+ 所占的比例增加,在 Piper 图上反映在这些河流接近三角的中心地带;阴离子中, HCO_3^- 的优势性较低, SO_4^{2-} 和 Cl^- 离子的含量相对增加.

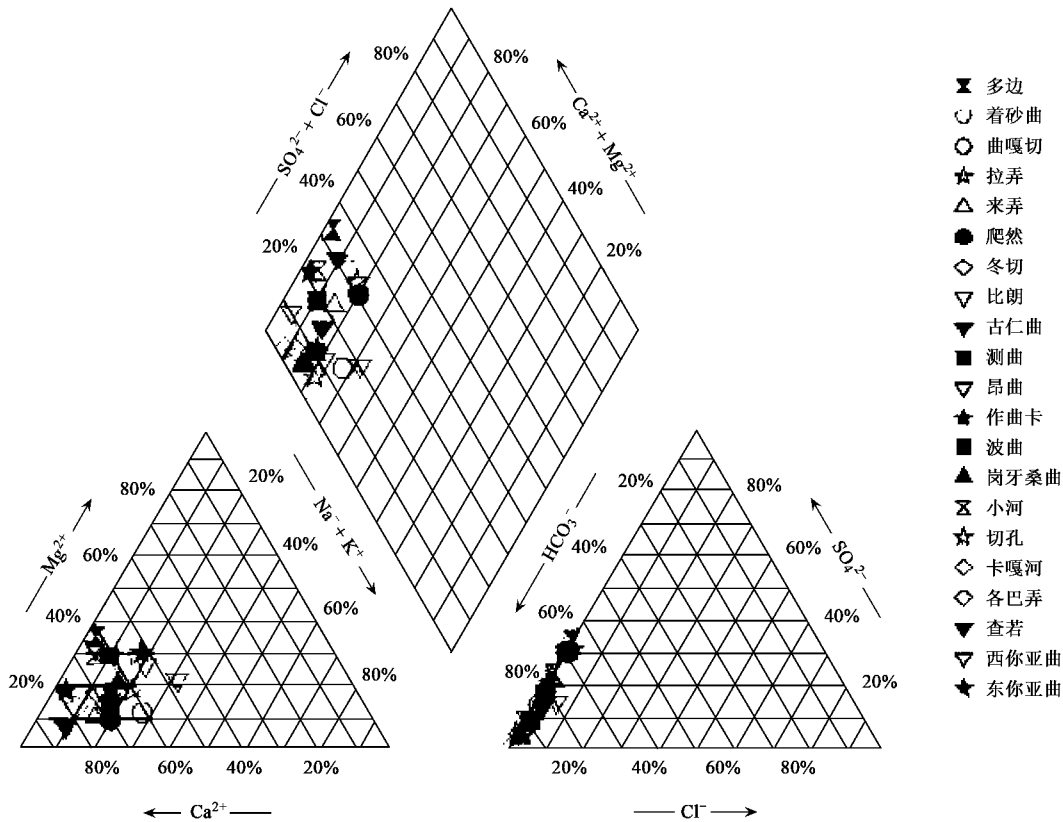


图 3 2005 年 9 月纳木错环湖样品离子浓度 Piper 图

Fig. 3 Piper diagram of ionic concentration in the samplers around the Nam Co Basin in September, 2005

2.1.3 河水离子浓度与径流的关系

前人的研究发现,以积雪和冰川融水补给为主的地区,河水化学成分の日际和月际变化与河水流量变化具有显著的关系^[17,18].通过对你亚曲和曲嘎

切 2 条河流分别在 2006 年 8 月 23~24 日和 7 月 3~4 日获得的 1 次加密数据显示(图 5),河水主要 2 种离子(Na^+ 和 SO_4^{2-})的变化趋势与流量有一定的关系.

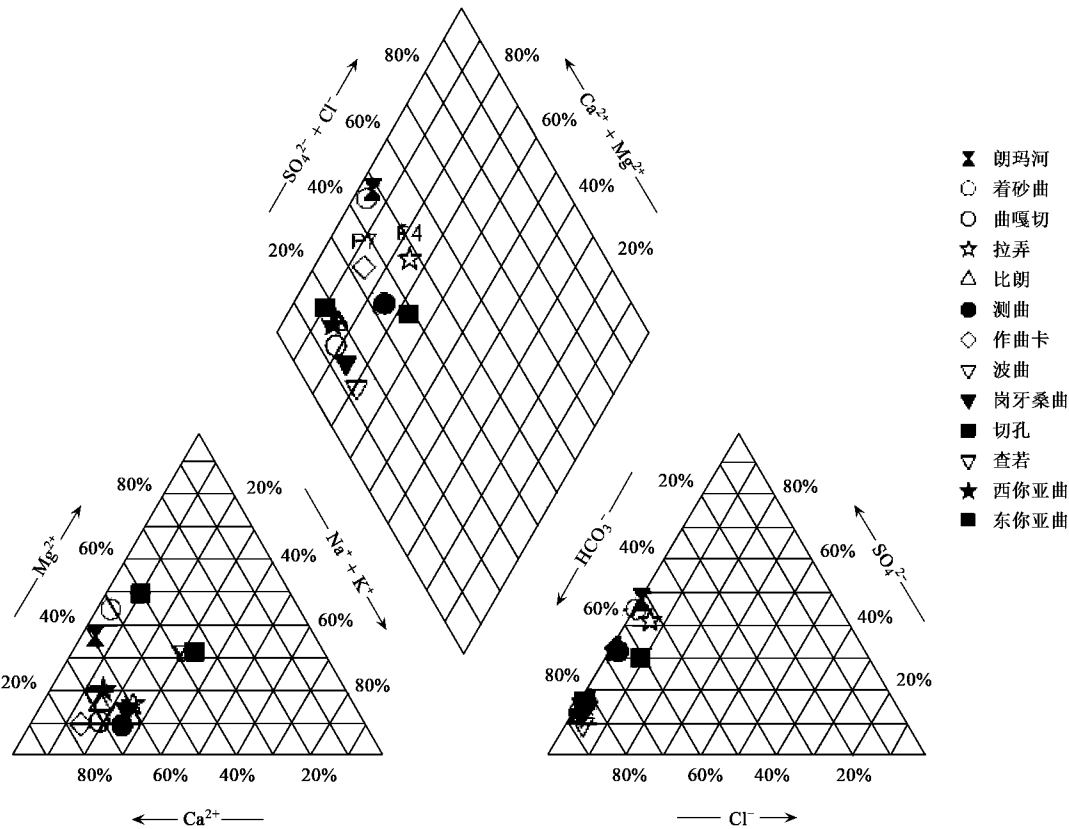


图 4 2006 年 9 月纳木错环湖样品离子浓度 Piper 图

Fig.4 Piper diagram of ionic concentration in the samplers around the Nam Co Basin in September, 2006

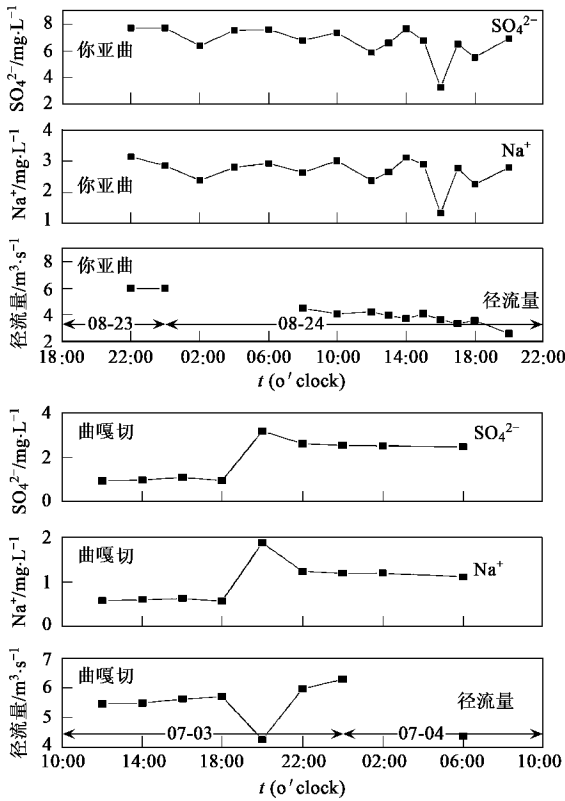


图 5 离子浓度日变化与流量的比较(你亚曲、曲嘎切)

Fig.5 Comparisons between diurnal change of ionic concentration and runoff

从 2 条河流的日变化看出,其主要离子浓度相对稳定,除你亚曲在 18:00 的 1 个低值,没有出现较大的波动.从径流量的变化曲线可以看出,在 8 月 23~24 日之间,你亚曲处于一个洪峰降落的阶段,流量从开始测量到结束呈逐渐下降的趋势,在趋势上与离子变化并无对应.但是排除洪峰的干扰,在流量相对稳定的 12:00 点之后,离子含量的变化与径流变化相对应,而且呈一定的反相关关系,而且这种关系在曲嘎切体现的要更为明显.由于曲嘎切在样品采集时并没有洪峰的干扰,因此离子浓度无论在趋势上还是变化的峰值上都与流量有较好的对应,有一定的反相关关系.这说明纳木错流域的水化学日变化有部分流量的影响.

比较观测期间你亚曲和曲嘎切 2 条河流的 Na^+ 和 SO_4^{2-} 与流量的关系(图 6)发现,除了个别峰值上二者之间的对应不是很明显,但是在整个采样期间的趋势上,离子浓度与径流量同样表现出反相关关系.这是因为径流量增大时,流速增大,水体与河床的接触时间相对较短,土壤及岩石中的可溶性盐溶于水中的含量也相对较少;反之,流量减小时,水中的离子含量增大.另外,流量增大时,对水中离子的稀释作用加强,也会导致离子含量的降低.

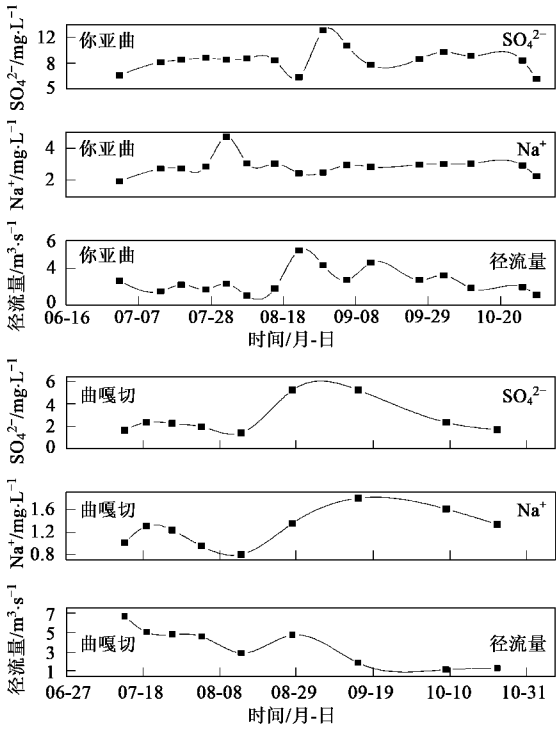


图 6 2006 年观测期间离子浓度(你亚曲、曲嘎切)和流量之间的比较

Fig. 6 Comparisons between ionic concentration and runoff during the observation period in 2006

2.2 河水主要离子来源及控制因素

2.2.1 河水化学成分主要来源

天然水体中的可溶性离子主要来源于岩石和土壤的风化分解^[19],以及部分大气输入(或沉降)^[20].通过 Gibbs 模型可以得出河水主要化学机制^[21~24].纳木错流域 3 条典型河流的水化学资料(TDS 通过离子平衡方程计算得出)点绘于 Gibbs 图中(图 7),位于中间的河流,离子主要来源于岩石风化释放,右下角的河流主要受大气降水补给,右上角河流来源于蒸发作用很强的干旱区域或是海洋.曲嘎切和你亚曲的水化学资料点落于图的左侧,Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺)比值在 0.1~0.3 的范围之内,说明这 2 条河的离子成分主要来源于岩石的风化释放,但是曲嘎切的河水 TDS 值较低,说明其还有相当一部分离子来源于降水的补给.昂曲的水化学资料点落于图的中侧偏右下方,说明虽然其离子主要的来源同曲嘎切和你亚曲一样,均来自于岩石的释放,但是其与岩石的反应程度要远远的高于前两者.这与昂曲的流域面积和长度要远大于曲嘎切和你亚曲有关.

在 Gibbs 的模型之中,并没有考虑的积雪和冰川融水对径流的影响.然而积雪和冰川融水补给河

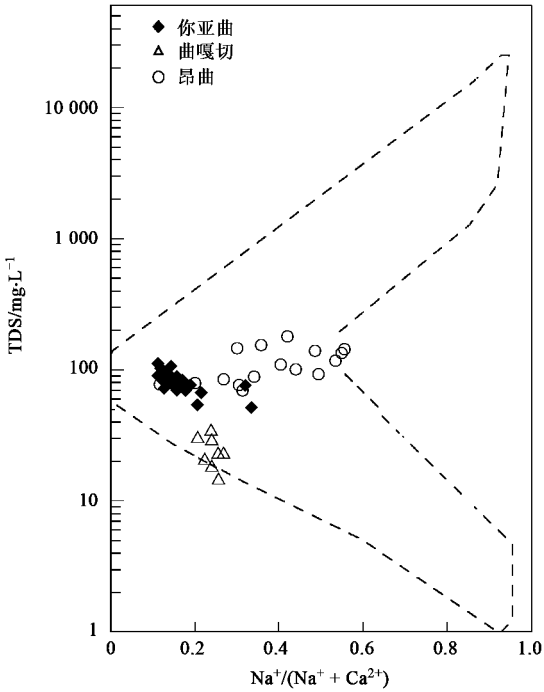


图 7 纳木错典型河流 Gibbs 图式

Fig. 7 Gibbs diagram of the representative rivers in Nam Co Basin

流在青藏高原,尤其是高原的山麓地区是极为普遍的.在纳木错流域大多数河流都有不同程度的积雪和冰川融水补给,尤其是南部水系流程短,流量大,其水量补给中,冰川融水在夏季占到了相当大的比例.冰雪的离子含量较少,融水补给也不如降水补给对岩石的淋溶作用强烈.因此以积雪和冰川融水补给为主的地区,河水的矿化度很低,一般都在 100 mg/L 以下,有的甚至低于 50 mg/L 以下^[1].考虑到曲嘎切的矿化度比你亚曲的要低得多,为更加明显地为冰川补给的河流,所以造成了二者在 Gibbs 图上的差别.

2.2.2 河水离子特征控制因素

为了深入研究河水的主要离子组成与周围环境参数(如岩性)之间的关系,进一步了解河水化学过程,本研究通过数理统计的手段,应用主成分分析法(PCA),来分析纳木错河流的主要离子组成与环境之间的关系^[25].

(1)因子载荷分析

因子分析所得因子载荷如表 2 所示.按公共因子累积方差 > 90% 的筛选要求,因子分析得到了 3 个主要的公共因子,累计方差为整个方差的 93.3% (表 3).其中第 1 因子占 72.1%,第 2 因子占 12.0%,第 3 因子占 9.3%.第 1 因子与 Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 相关性较大,代表以盐岩(Na⁺、K⁺)

和石膏层溶解为主的典型的蒸发岩;第2因子与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 相关性较大,代表碳酸盐岩方解石和白云石的溶解.第3因子与 NO_3^- 的相关性较大,应该代表大气降水和有机氮化合物的分解,同时也代表强烈的生物作用的影响^[26].

表2 纳木错主要河流主要离子成分主成分分析¹⁾

Table 2 Principal component analysis of major ions in the Nam Co Basin

变量	因子		
	第1因子	第2因子	第3因子
Na^+	0.94	—	—
Cl^-	0.94	—	—
K^+	0.88	0.32	—
Mg^{2+}	0.78	0.50	—
Ca^{2+}	—	0.95	—
HCO_3^-	0.67	0.71	—
SO_4^{2-}	0.38	0.69	0.42
NO_3^-	—	—	0.94

1)采用最大正交旋转法, <0.30 者不显示

表3 纳木错河水离子主成分方差累积量

Table 3 Cumulative variance of the principal components for major ions in the rivers of the Nam Co Basin

因子	提取的平方和负载量		
	特征值	方差百分比/%	累计百分比/%
1	5.88	72.1	72.1
2	0.95	11.9	84.0
3	0.74	9.3	93.1

根据表3 计算结果,蒸发岩溶解对 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 方差的贡献率较高,而碳酸盐岩对 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 的方差贡献较低.由此说明,蒸发岩是控制纳木错流域河水 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 离子的主要机制.另外,碳酸盐岩的方解石和白云石的溶解也起到了一定的作用.在 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的整个方差中,蒸发岩的方差贡献率为17.9%和67.2%,而碳酸盐岩的贡献率为95.1%和70.8%,可见虽然碳酸盐岩对于河水的总离子含量贡献不大,但是仍旧是控制河水 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的主要机制. SO_4^{2-} 的方差表明其主要来源为碳酸盐的溶解和酸沉降.

(2)因子得分分析
纳木错流域主要河流的因子得分如图8所示.第1因子和第2因子的因子得分图分为4个区.右上角部分与第1因子、第2因子成正相关,代表河水主要离子含量主要由第1、第2因子控制;右下角部分表明主要离子含量主要由第1因子控制;左上角部分表明主要离子含量由第2因子所控制;左下角部分表明主要离子含量既不由第1因子控制,也不

由第2因子控制.
图8的主要离子得分图表明,昂曲大部分数据位于第1、第2因子的右下角,说明昂曲河水的主要离子受到蒸发岩的控制.你亚曲的第2因子得分最高,说明其受到白云石、方解石的碳酸盐岩的控制较多.曲嘎切并没有受到第1和第2因子的明显控制,说明曲嘎切离子来源岩石风化的程度较前两者要少,可能还受到其他因素的影响.其作为一条典型的冰川径流,流程短流量大,因此主要离子来源受到冰川融水的影响较大.纳木错流域各条河水的流程长短差距较大,所经过的地区地质条件、地表植被均不相同,而且各条河流的补给条件也不一样.这些因素都可能是造成纳木错流域河水离子来源差别的原因.

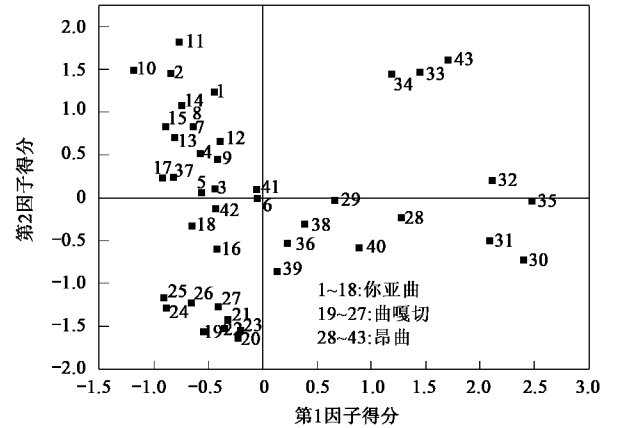


图8 纳木错流域河流主要离子主成分分析的
第1和第2因子得分图
Fig.8 Plots of component scores of the first two components for major ions of the rivers in the Nam Co Basin

3 结论

(1)对纳木错流域2次环湖数据和3条主要河流的离子浓度数据分析表明,纳木错流域离子含量均低于青藏高原及东部其他河流.不同径流之间的离子含量存在较为明显的差距,你亚曲、曲嘎切和昂曲的离子总量(TDS)分别为79.48、23.44和111 mg/L.离子组成具有相对一致性,阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,阴离子以 HCO_3^- 为主,而且优势离子与非优势离子之间相差较大.各条径流都有明显的时间变化,而且与流量成反相关关系.
(2)纳木错流域河水主要受岩石风化的影响,同时降水和冰川融水也起到一定的作用.河水中主要离子的主成分分析表明,纳木错流域的化学侵蚀作用中,主要表现为蒸发盐岩溶解.西南岸的昂曲以蒸

发岩为主,东岸的你亚曲以碳酸盐为主,南岸的曲嘎切主要受岩石和冰川融水的影响.

(3)另外,通过水体的化学组成来研究水化学过程的影响因子是远远不够的,以后的工作中既要考虑到大尺度的地质与气候对水化学的影响,同时也要考虑到区域范围内空间和时间上的影响因素.

致谢:本研究样品由中国科学院纳木错圈层相互作用综合观测站采集,在此向在野外工作的观测站员工表示感谢;曲冬梅工程师进行了所有样品离子浓度的室内分析工作,一并表示感谢.

参考文献:

[1] 关志华.西藏河流与湖泊[M].北京:科学出版社,1984.

[2] 蒲健辰,姚檀栋,王宁练,等.近百年来青藏高原冰川的进退变化[J].冰川冻土,2004,26(5):517-522.

[3] 刘腊山,任贾文,秦大河,珠穆朗玛峰绒布河源区河水化学特征[J].环境科学,2000,21(5):59-63.

[4] 秦翔,秦大河,皇翠兰,等.珠穆朗玛峰北坡绒布冰川区水体的化学特征[J].环境科学,1999,20(1):1-6.

[5] 王建,丁永健,许君利,等.西天山科其喀尔冰川消融径流的水化学分析[J].环境科学,2006,27(7):1305-1311.

[6] 姚檀栋.青藏高原中部冰冻圈动态特征[M].北京:地质出版社,2002.

[7] 赵华标,姚檀栋,徐柏青.慕士塔格卡尔塔马克冰川作用区的水文与水化学特征[J].冰川冻土,2006,28(2):269-275.

[8] Phillips F M, Mills S, Hendrickx M, *et al.* Environmental tracers applied to quantifying causes of salinity in arid-region rivers: results from the Rio Grande Basin, Southwestern USA[J]. Water resources perspectives: evaluation, management and policy, 2003, 50: 327-334.

[9] 宗浩,王成善,黄川友,等.纳木错流域自然生态特征与生物资源保护研究[J].成都理工大学学报(自然科学版),2004,31(5):551-558.

[10] 朱大岗.西藏纳木错地区第四纪环境演变[M].北京:地质出版社,2004.

[11] 游庆龙,康世昌,田克明,等.青藏高原念青唐古拉峰地区气候

特征初步分析[J].山地学报,2007,25(4):497-504.

[12] 袁军,高吉喜.纳木错湿地资源评价及保护与合理利用对策[J].资源科学,2002,24(4):29-34.

[13] 赵继昌,耿冬青,彭建华,等.长江源区的河水主要元素与Sr同位素来源[J].水文地质工程地质,2003,(2):89-98.

[14] 水利电力部水文局.中国水资源评价[M].北京:水利水电出版社,1987.

[15] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses [M]. American Geophysical Union Transactions, 1953.

[16] 阿列金 O A.水文化学原理[M].北京:地质出版社,1960.

[17] 盛文坤,朱守森.天山乌鲁木齐河上中游的水化学特征[J].环境科学,1987,8(4):12-18.

[18] 皇翠兰,蒲健辰.西大滩煤矿冰川区冰川冰、雪和河水的阳离子特征[J].冰川冻土,1995,17(3):283-288.

[19] Lasaga A C, Josep M, Ganor, *et al.* Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(10): 2361-2386.

[20] Gibbs R J. Mechanisms Controlling World Water Chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.

[21] Feth J H. Mechanisms controlling world water chemistry: evaporation-crystallization process[J]. Science, 1971, 172: 870-872.

[22] Kilham P. Mechanisms Controlling the Chemical Composition of Lakes and Rivers: Data from Africa[J]. Limnology and Oceanography, 1990, 35(1): 80-83.

[23] Négrel P. Geochemical Study of a Granitic Area-The Margeride Mountains, France: Chemical Element Behavior and 87Sr/86Sr Constraints[J]. Aquatic Geochemistry, 1999, 5(2): 125-165.

[24] 夏星辉,张利田.岩性和气候条件对长江水系河水主要离子化学的影响[J].北京大学学报(自然科学版),2000,36(2):246-252.

[25] Güler C. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data[J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(4): 455-474.

[26] Yuan F, Miyamoto S. Dominant processes controlling water chemistry of the Pecos River in American southwest[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: 17406-17412.