

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.10.2015012004

史晓宜, 何元庆, 蒲焘, 等. 玉龙雪山周边典型河流的水化学日变化特征[J]. 环境化学, 2015, 34(10): 1895-1900
SHI Xiaoyi, HE Yuanqing, PU Tao, et al. Chemical composition and daily variation characteristics of a typical river catchment in Mt. Yulong region [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(10): 1895-1900

玉龙雪山周边典型河流的水化学日变化特征*

史晓宜^{1,2**} 何元庆^{1,2} 蒲 焘² 何 则² 牛贺文²

(1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州, 730000;
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州, 730000)

摘 要 通过分析于 2009 年 9 月 22 日—28 日期间, 在玉龙雪山周边河流白水河采集的河水样品(采样间隔为 2 h), 对冰雪融水补给径流的日变化特征及其规律进行了深入研究. 结果表明, 白水河水中所测的阴离子以 SO_4^{2-} 含量最高, 其次为 NO_3^- 和 Cl^- ; 阳离子中主要以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主, 其次为 Na^+ 、 K^+ , 不同于冰雪融水中的离子浓度序列 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 反映了流域内基岩岩性对河水化学性质的影响; 水体的 pH 值平均 8.6, 电导率介于 $29.9\text{--}73.5\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间, 日周期波动幅度较大; 受降雨影响时段, 各离子含量峰值通常出现在 16:00 左右, 各离子含量随降雨量的增加呈增加态势(除 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 外); 在无降雨影响下, 随径流量的增加, 各离子含量表现出减小趋势.

关键词 玉龙雪山, 白水河, 水化学特征, 日变化.

Chemical composition and daily variation characteristics
of a typical river catchment in Mt. Yulong region

SHI Xiaoyi^{1,2**} HE Yuanqing^{1,2} PU Tao² HE Ze² NIU Hewen²

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: This study focused on the diurnal variation of major ions in Baishui river around Yulong Mountain. Water samples were collected continuously from 22nd to 28th September, 2009, with a sampling interval of two hours. The samples were analyzed for their chemical composition, and the diurnal variation characteristics and pattern were investigated. The results showed that SO_4^{2-} and NO_3^- were the most abundant anions. Meanwhile water samples were mildly alkaline and were rich in Ca^{2+} and Mg^{2+} cations, which is different from the ion distribution in glacier melt water ($\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$). It reflected the influence of bedrock lithology on the water chemistry in Mt. Yulong area. Mean pH value of the river water was 8.6, and the conductivity varied between 29.9 to 73.5, which showed obvious diurnal fluctuation. The peak value of ion concentrations usually appeared at about 16:00 each day, displaying positive correlations with the amount of rainfall (except for SO_4^{2-} , NO_3^-) during the period of rainfall. With the increase of runoff, concentrations of most ion showed a decreased trend without rain.

Keywords: Mt. Yulong, Baishui river, geochemistry characteristics, diurnal variations.

近年来, 全球气候变暖致使我国许多冰川发生了后退^[1-6], 同时也对冰川消融速度产生了强烈影

2015 年 1 月 20 日收稿.

* 国家自然科学基金(41273010, 41401083); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-G03-04); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所人才基金(Y451181001); 中国博士后基金(2014M552517); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCs-ZZ-2015-01-03)资助.

** 通讯联系人, Tel: 18215106269; E-mail: xyshi14@lzu.edu.cn

响^[7-9].在冰川作用区,受冰川运动以及融水的高速冲刷等因素的影响,地表岩石的物理、化学风化速率要高于大陆平均水平,这对冰川周边区域的环境、生物地球化学循环产生重要的影响^[10-13].消融期内,受径流源以及径流所经地区的时空变化等因素的影响,冰川融水径流化学组成的日变化过程十分显著.

本文研究区地处西部季风气候区,受季风环流、高原季风以及西风环流等多种环流系统的影响,从而表现出干湿季分明、降水主要集中于季风期等南亚季风气候特征,降水量较为丰富且年内变化十分明显,5—10 月降水量占全年降水 60%—90%^[14].同时,玉龙雪山也是我国典型的季风温冰川,具有积累消融量大、冰温高、对气候变化反应敏感等特点,小幅度气温的降低或升高可以引起冰川大幅度的前进或后退,基于这些独特的理化特性,使其成为研究环境变化的良好指示器.此外,研究区内碳酸盐出露较广,使得本区水文系统具有典型的西南岩溶水文运动特点:岩溶发育强烈,岩层的透水性较强,地表水与地下水频繁的相互转换和快速的相互补给,使得主要以冰雪融水和大气降水为补给的白水河的水化学研究具有重要意义^[15].已有研究主要集中在玉龙雪山冰川区的雪坑、不同海拔梯度的降水、周边典型小流域河水的地球化学特征、主要离子来源、氢氧同位素特征及其影响因素等方面的研究^[14,16-22],但就冰雪融水补给河流的日变化特征方面的研究较少.雪山周边河水的离子组成特征不同程度上受到大气干湿沉降、冰雪融水和人类活动的影响,同时受到石灰岩地质地貌条件的影响,从而表现出一系列典型特征.因此,开展对玉龙雪山冰雪融水径流的水化学组成及其控制机理对于理解河水所经地区的岩石岩性、气候、生态环境及区域环境演化趋势具有重要意义^[15].

本研究拟针对玉龙雪山东侧最大的季节性河流白水河,分析河水的离子组成特征及其日变化规律,并与玉龙雪山白水一号冰川的冰雪融水的离子特征作对比,研究白水河水中的离子组成特征及其日变化规律,以期为今后该区域进行更深入的水化学研究积累数据和资料.

1 样品采集及分析

1.1 区域概况

玉龙雪山(27°10′—27°40′N、100°9′—100°20′E)位于青藏高原东南缘、横断山脉的南端,是我国位置最南的现代冰川分布区.第四纪以来在新构造运动、季风气候和冰川作用的影响下形成了丽江盆地及其周边多变的环境特征.区内古生界地层发育不全,下部缺失较多,上古生界二叠系玄武岩、中生界三迭系灰岩、页岩等分布广泛,以页岩、玄武岩为主的第三系主要分布在盆地东北侧及东侧;第四系发育于丽江盆地,为研究区内的主要出露地层^[6].同时,该区域受到西南季风和东南季风的影响,年降雨量大致在 900 mm 左右^[23].由于大量冰雪融水和丰沛降雨影响,使得雪山周边发育有大量的河流,其中较大的河流之一白水河,其流域内分布有 5 条冰川,是玉龙雪山周边最大的一条季节性冰雪融水补给河流,地表径流一般形成于 6 月初,在 8 月达到最大,控制流域面积达到 29.38 km²,流域内岩性以灰岩、玄武岩为主,如图 1 所示.

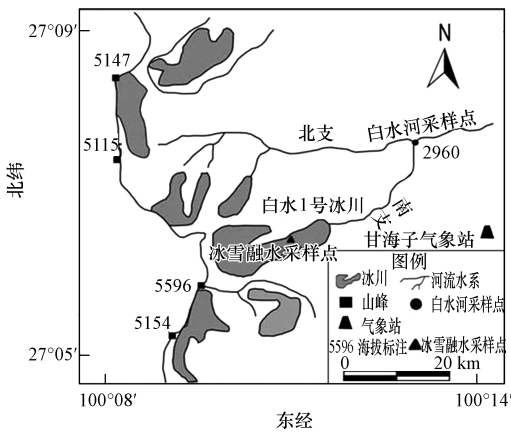


图 1 白水河采样点示意图
Fig.1 Sampling points in Baishui River catchment

1.2 采样及方法

2009 年 9 月 22 日—9 月 28 日在白水河内定点(27°07'43"N,100°13'52"E,2960 m)采样(图 1),采样时间间隔为 2 h,共采集样品 60 个.取样过程中,用河水清洗聚乙烯样品瓶 3 次后再装样,密封并放入玉龙雪山冰川与环境观测研究站内-15 ℃ 的冰箱低温保存.之后以冷冻方式运回中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈国家重点实验室.测试分析前 1 天,放于室内自然融化,测试 pH、电导率和主要的阴阳离子.用 PHS-3B 和 DDS-308A 电导率仪分别测试 pH 值及其电导率,DX320 型离子色谱仪分析了主要阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 NH_4^{+}),ISC1500 型离子色谱仪分析了主要阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-}),其精度可达 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 级,测试数据误差小于 5%.

1.3 其他数据

白水河地区和白水一号冰川区气象数据分别使用玉龙雪山冰川与环境观测研究站架设于甘海子(3046 m)地区的自动气象站,主要包括该区域降水量和白水 1 号冰川(4800 m)观测研究站的常规气象观测资料^[24].白水河日径流量为实测数据.

2 结果与讨论

2.1 水体的 pH 值和电导率

pH 值通常反映水中 H^{+} 的活度,是水化学研究中的重要指标.在白水河采样点 2960 m 处测得水体 pH 和电导率的值可知(图 2),白水河水体呈现碱性,pH 值分布在 8.0—9.3 之间,平均值为 8.6,明显高于降水及冰雪融水,其平均值分别为 6.0、8.2^[21,24].由于雨季白水河流域地表径流主要受到大气降水和冰雪融水的共同补给,径流分割结果表明,在冰雪消融强盛期的 9 月,冰雪融水对白水河径流的贡献率为 62.2%,降水对河水的贡献率为 37.8%^[23],因此,白水河水体的水化学特征受到冰雪融水化学特征的影响较大.

冰雪融水在集流过程中与地表岩石物质相互作用,致使 H^{+} 大量损耗和融水径流 pH 值的升高,使河水碱度逐步加大.白水河周边日降雨量如图 3 所示.日尺度上河水 pH 值不受降水直接影响的情况下,最高值一般出现在 20:00—22:00.已有研究表明,冰雪融水的 pH 值与气温呈反相关关系,且在 21:00—翌日 02:00,随消融减弱 pH 值上升^[25],因此,白水河在仅受融水补给的时段,pH 随时间变化波动较大,与融水 pH 表现出较为一致的趋势特征.

受降水影响的时间段 pH 值略微高于不受降水影响的时间段,主要是由于研究区周边分布有一定范围的石灰岩,受下垫面的自然状况和人类活动活跃性的差异影响,降水样品中 $\text{Ca}^{2+}>\text{SO}_4^{2-}$ ^[24],随着主要的中和酸性离子的 Ca^{2+} 含量的增加,pH 值呈现出一定的增加趋势.

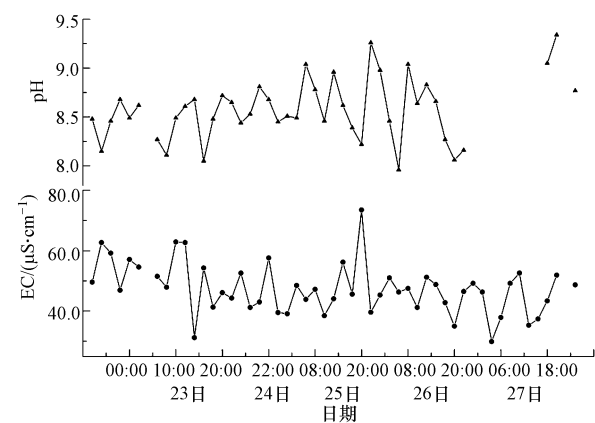


图 2 白水河水体 pH 和电导率日变化规律

Fig.2 Diurnal variation in pH and conductivity of Baishui River water

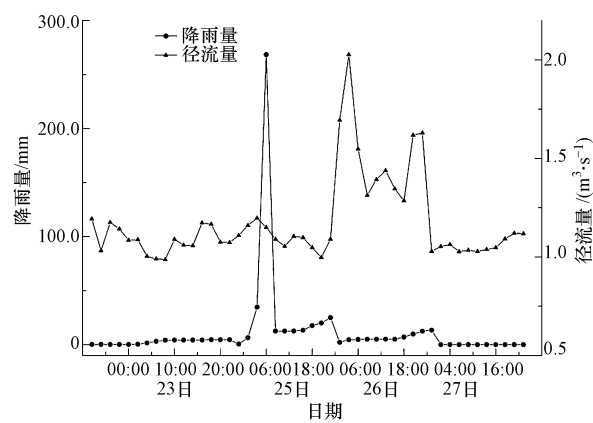


图 3 白水河径流量和周边降雨量

Fig.3 Discharge and precipitation in Baishui River water

电导率(Electrical conductivity, EC)通常代表水体中离子总量的相对大小,是水体中所含总离子综合性指标的反映^[26].白水河水体电导率介于 29.9—73.5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,波动范围较大,其平均值为 47.45 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,明显高于冰雪融水(平均值为 16.02 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)^[25].电导率在不受降水影响的情况下,最小值和最大值分别出现在 04:00、10:00 左右,变化范围较大.在降水影响的情况下,日变化尺度上 EC 变化相对稳定,最小值、最大值的变化趋势为先急剧降低达到最小值后迅速增加,最小值、最大值分别出现在 20:00、04:00 左右,径流量也在 20:00、04:00 左右表现出与 EC 相一致的变化趋势(图 3),说明径流量的增减对可溶性离子含量具有一定程度的影响.

2.2 河水的离子组成特征

白水河定点采样(2960 m)所测样品的主要离子组成如表 1 所示.分析可知,本次水样的离子平衡值 ΔC (阳离子当量浓度减去阴离子当量浓度)为 48.84 meq·L⁻¹,占有离子总和的 92.3%.水体中阳离子明显过剩,线性回归分析表明, ΔC 与 Ca^{2+} 存在显著地相关关系($R^2=0.79, n=60, P<0.01$),进一步证明 ΔC 主要代表碳酸盐和重碳酸盐.在弱碱性条件下, CO_3^{2-} 含量较少,不到二者总量的 5%,分析中可忽略不计,所以推断主要是 HCO_3^- 与过剩的阳离子平衡^[15].

表 1 白水河河水中的主要离子组成($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 1 Major ion composition of Baishui River water($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

	pH	EC	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
最小值	7.96	29.9	15.03	54.80	283.03	8.92	6.74	878.33	2662.6
最大值	9.34	73.5	2891.98	496.50	3309.3	3685.43	2641.36	6824.59	17814.42
平均值	8.58	47.45	137.13	364.22	1152.7	199.22	152.34	5066.19	8217.13

就测试离子来看,阴离子浓度序列为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$,其中, SO_4^{2-} 浓度最大,介于 283.03—3309.30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 1152.70 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其次是 NO_3^- ,介于 54.80—496.50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 364.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;阳离子浓度序列为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较高,平均值分别为 8217.13、5066.19 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.其次是 Na^+ 和 K^+ ,水体中还检测到少量的 HCOO^- 、 NO_2^- 、 F^- ,但其含量较少,分析中忽略不计.

2.3 离子的日变化规律及原因探讨

日尺度上离子含量变化特征在不受降雨影响的情况下表现出一定的规律,如图 4 所示(海拔 2960 m).该研究区位于我国季风区,水汽主要以海洋源为主,借助于海盐示踪法得出 Cl^- 和 Na^+ 的海洋源比重较高,平均比重分别为 74.79%、73.53%,表明其具有非常相近的物质来源^[20].在不受降雨影响的日周期下, K^+ 、 Cl^- 和 Na^+ 的日周期变化规律明显,最大值均出现在凌晨 4:00 左右,其他时间段离子浓度基本稳定,离子浓度不随径流量变化而发生改变,推断 K^+ 、 Cl^- 和 Na^+ 离子浓度还受到其他因素的影响.

在降雨影响的日周期内, K^+ 、 Cl^- 和 Na^+ 含量通常在 16:00 左右达到峰值,随着降雨量的增加且降雨量较小时,径流量通常也在 16:00 左右出现高值,与 3 种离子含量较高值时段保持一致,说明离子含量与径流量之间存在一定的正相关关系.但如图 3 所示,降雨量较大时期,径流量出现峰值的时间无明显规律,因其受到冰雪融水等其他条件的影响.此外,同期所收集降水中的 K^+ 、 Cl^- 和 Na^+ 浓度的平均含量分别为 637.03、566.78、959.55 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2),明显高于水体离子浓度,因此,随着降水量的增加,水体中的离子浓度相对较高.

主导型阴离子 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度空间变化趋势基本一致.最小值、最大值分别出现在 16:00、10:00 左右,两种离子浓度呈现出一致的增加趋势.同时, SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的含量多在下午 16:00 左右达到最小值,由于太阳辐射通常在下午 14:00 左右较为强烈,冰雪消融速率较快,且融水在汇入白水河的过程中达到较大值的时间稍滞后于冰雪融水的形成强烈期,通常在下午 16:00 达到最大,说明在无降雨影响的时段,随着融水量的逐渐增加,河水中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的浓度表现出减小趋势.

已有研究表明,冰雪融水中的 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的浓度分别为 81.33 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.54 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[25],明显低于白水河水体中的离子浓度(SO_4^{2-} 为 1067.88 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 NO_3^- 为 329.82 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),说明冰雪融水在汇入河水的过程中,离子浓度逐渐增加.由图 4 可知, SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度随时间波动较大(尤其是 NO_3^-),表明影响

二者浓度大小的因素较为复杂,可能受到人类活动的影响(如该地区现今仍以传统农业为主,化肥等物质的使用会对离子含量的变化产生一定影响;另一方面,该月份仍是旅游季,各类交通工具的涌入,汽车尾气增加对空气中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度的增加也可能做出一定的贡献^[27]).

降雨影响的日周期内,河水中的 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 浓度变化较为复杂,受到降雨和融水的双重补给,同时段下,与其他离子含量比较,波动明显,出现最大值与最小值的时间并无明显规律.

在冰川输入和输出系统的不同水介质中,可溶性离子浓度变化不仅能够反映其物质来源,同时反映出冰川水资源的空间变化规律^[28].研究区内大量分布的石灰岩、玄武岩等岩石矿物的风化和微弱溶解是该地区水体中可溶性颗粒的主要来源.同时,水岩相互反应也是水化学组分分布的重要影响因素,尤其是对水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子含量变化产生影响.

不受降雨影响的时段,河水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度之和占到阳离子总量的 97% 左右,随时间变化差异较大, Ca^{2+} 浓度整体比较稳定,而 Mg^{2+} 含量自 14:00 开始减小,在 16:00 减小到 $878.33\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,此后表现出上升趋势.随着降雨的出现, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的浓度变化较为复杂,一方面由于该研究区的矿物类型主要以石灰岩、玄武岩为主,融水在汇入河水的过程中,相互之间发生水岩相互反应;另一方面,可能受自然来源(土壤和粉尘)及降水过程中的中和反应的影响^[28],这些均可导致水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量较高且变化较为复杂.

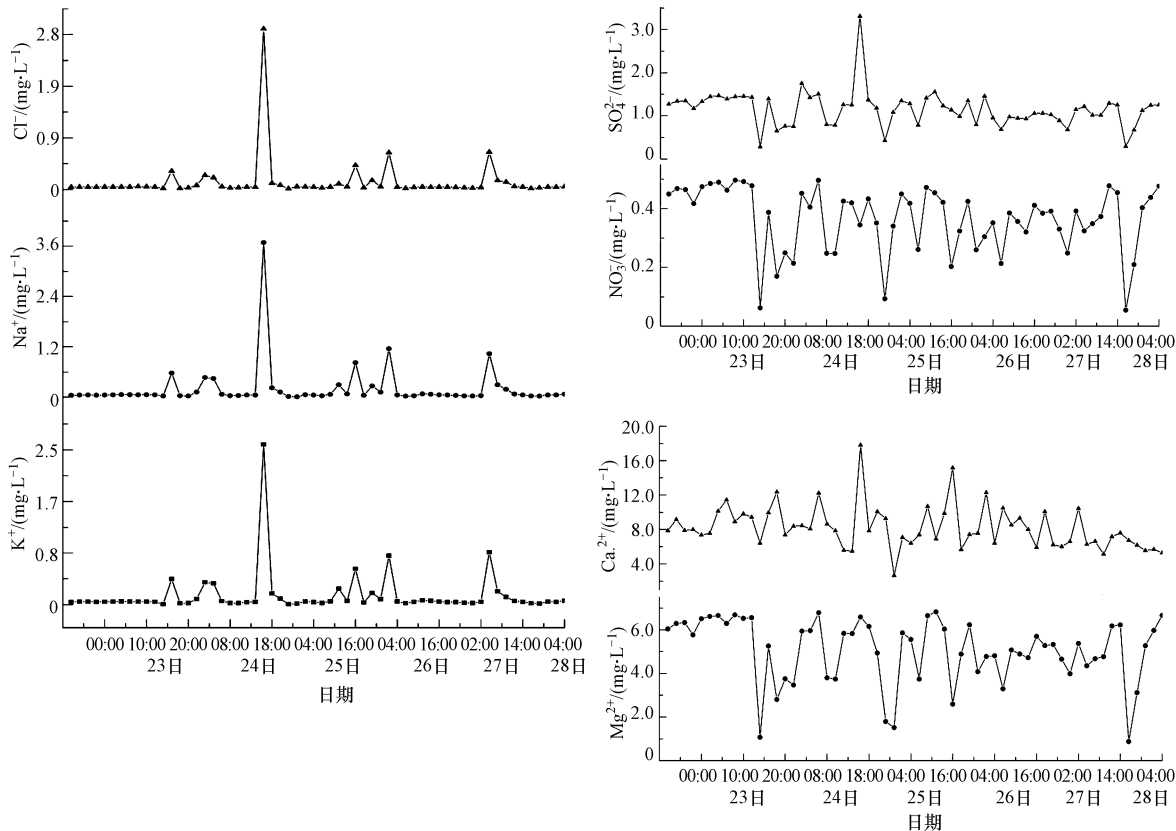


图 4 白水河水体主要离子含量的日变化

Fig.4 Diurnal variation of main ions in Baishui River water

表 2 2009 年在不同水体测得主要离子的平均值($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 2 Mean value of major ion concentration in different water bodies in 2009($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)										
采样点	海拔/m	时间	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	数据来源
降水	2960	9.22—9.28	566.78	219.20	793.56	959.55	637.03	1517.87	3468.68	实测
冰雪融水	4750	8.29—9.3	95.35	1.54	81.33	221.33	87.82	49.02	4073.48	文献[26]
白水河水	2960	9.22—9.28	207.70	329.82	1067.88	319.36	230.20	4423.82	7364.57	实测

3 结论

- (1)白水河水体 pH 和 EC 的平均值分别为 8.6 和 $47.45\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,该值明显高于冰雪融水的平均值 ($16.02\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).可溶性盐的大量增加是电导率远高于冰雪融水的主要原因.
- (2)白水河水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量远高于 Na^{+} 、 K^{+} ,不同于冰雪融水 ($\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^{+}>\text{K}^{+}>\text{Mg}^{2+}$),说明流域内基岩岩性对河水化学性质有重要影响.
- (3)白水河水体中各离子含量具有明显的周期性变化,受降雨影响显著.在降雨影响时段,各离子含量峰值通常出现在 16:00 左右,各离子含量随降水量的增加呈增加态势(除 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 外);无降雨影响下,各离子含量随径流量增加而表现出减小趋势.

参 考 文 献

- [1] 沈永平,刘时银,甄丽丽,等.祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J].冰川冻土,2001,23(3):244-250
- [2] 王建,沈永平,鲁安新,等.气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响[J].冰川冻土,2001,23(1):28-33
- [3] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):153-164
- [4] 王国亚,沈永平,毛炜峰.乌鲁木齐河源区 44a 来气候变暖特征及其对冰川的影响[J].冰川冻土,2005,27(6):813-819
- [5] 叶柏生,丁永建,杨大庆,等.近 50a 西北地区年径流变化反映的区域气候差异[J].冰川冻土,2006,28(3):308-311
- [6] 范弢.云南丽江生态地质环境演化过程与趋势研究[D].昆明:昆明理工大学博士学位论文,2008
- [7] IPCC.IPCC fifth assessment report:Climate change 2013[R].Geneva,Switzerland:IPCC,2013
- [8] Owen L A,Thackray G,Anderson R S,et al.Integrated research on mountain glaciers:Current status,priorities and future prospects[J].Geomorphology,2009,103(2):158-171
- [9] Bolch T,Buchroithner M,Pieczonka T,et al. Planimetric and volumetric glacier changes in the Khumbu Himal,Nepal,since 1962 using Corona,Landsat TM and ASTER data[J].Journal of Glaciology,2008,54(187):592-600
- [10] Hodson A,Tranter M,Vaten G.Contemporary rates of chemical denudation and atmospheric CO_2 sequestration in glacier basin: An Arctic perspective[J].Earth Surface Processes and Landforms,2000,25:1447-1471
- [11] Hodson A,Tranter M,Gurnell A,et al.The hydrochemistry of Bayelva,a high Arctic proglacial stream in Svalbard[J].Journal of Hydrology,2002,257:91-114
- [12] Anderson S P.Glaciers show direct linkage between erosion rate and chemical weathering fluxes[J].Geomorphology,2005,7:147-157
- [13] Feng F,Li Z Q,Jin S,et al.Hydrochemical characteristics and solute dynamics of meltwater runoff of Urumqi glacier No.1, astern Tianshan, Northwest China[J].Journal of Mountain Sciences,2012,9(4):472-482
- [14] 朱国锋,何元庆,蒲焘,等.玉龙雪山地区不同海拔高度降水中常量无机离子特征分析[J].环境科学,2011,31(4):963-970
- [15] 蒲焘.基于水化学与同位素的典型海洋型冰川流域水文过程研究[D].兰州:兰州大学硕士学位论文,2013
- [16] 李宗省,何元庆,庞洪喜,等.我国典型季风海洋性冰川区雪坑中主要阴、阳离子的来源[J].地理学报,2007,62(9):992-1001
- [17] Li Z X,He Y Q,Pang H X,et al.The chemistry of snow deposited during the summer monsoon and in the winter season at Baishui NO. 1 Glacier,Mt.Yulong,China[J].Journal of Glaciology,2009,55(190):221-228
- [18] He Y Q,Theakstone W H,Yao T D,et al.The irregular pattern of isotopic and ionic signals in the typical monsoon temperate-glacier area, Yulong Mountain,China[J].Annals of Glaciology,2002,35(1):167-174
- [19] Pang H X,He Y Q, Lu A G,et al.Synoptic-scale variation of delta $\delta 18\text{O}$ in summer monsoon rainfall at Lijiang,China [J].China Science Bulletin,2006,51(23):2897-2904
- [20] Pang H X,He Y Q,Lu A G,et al.Comparisons of stable isotopic fractionation in winter and summer,at Baishui glacier No. 1 system,Mt Yulong,China[J].Journal of Geographical Sciences,2006,16(3):306-314
- [21] Li Z X,He Y Q,Pang H X,et al.The chemistry of snow deposited during the summer monsoon and in the winter season at Baishui NO. 1 Glacier,Mt Yulong,China[J].Journal of Glaciology,2009,55(190):221-228
- [22] 蒲焘,何元庆,朱国锋,等.玉龙雪山周边典型河流雨季水化学特征分析[J].地理科学,2011,66(6):734-740
- [23] He Y Q, Pu T, Li Z X,et al.Climate change and its effect on Annual Runoff in Lijiang Basin-Mt.Yulong Region,China [J].Journal of Earth Sciences,2010,21(2):137-147
- [24] 王春风.丽江—玉龙雪山地区大气降水 and 气溶胶化学特征研究[D].兰州:兰州大学硕士学位论文,2012
- [25] 朱国锋,蒲焘,何元庆,等.典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征[J].环境科学,2012,32(12):4300-4306
- [26] 康世昌,秦大河,姚檀栋,等.希夏邦马峰北坡地区夏末降水化学特征探讨[J].环境科学学报,2000,20(5):574-578
- [27] Niu H W, He Y Q, Lu X X, et al. Chemical composition of rainwater in the Yulong Snow Mountain region, Southwestern China [J]. Atmospheric Research, 2014, 144(2014):195-206
- [28] 何元庆,姚檀栋,杨梅学.中国典型山地温冰川水化学空间分布特征与近期冰川动态[J].山地学报,2000,18(6):481-488