# 额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征

### 韦虹<sup>12</sup>,吴锦奎<sup>1\*</sup>,沈永平<sup>1</sup>,张伟<sup>12</sup>,刘世伟<sup>12</sup>,周嘉欣<sup>12</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学,北京 100049) 摘要:在 2014年3~4月期间,在连续收集了融雪期额尔齐斯河正源-卡依尔特斯河河水和冰雪融水水样的基础上,综合运用 描述性统计、Gibbs 分析图和 Piper 三线图等方法,对卡依尔特斯河融雪期径流中水化学特征其控制因素等进行了分析.研究 区不同水体在融雪期内,主离子组成以及水化学类型差异显著.河水中总溶解固体(TDS)含量变化范围为24.9~50.3 mg·L<sup>-1</sup>;河水中的优势阳离子为 Ca<sup>2+</sup>和 Na<sup>+</sup>,分别占阳离子总量的61%和17%,河水中优势阴离子为 HCO<sub>3</sub>,占阴离子总量 的95%.河水的水化学类型为 HCO<sub>3</sub>-Ca<sup>2+</sup>.地表水样品的水化学组成落在 Gibbs 分布模型的中部偏左下部分,表明研究区的 水化学离子组成受到岩石风化作用和大气降水作用的共同影响,且岩石风化作用占主导.

关键词:主离子;水化学特征;Gibbs模型;额尔齐斯河;融雪期

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016) 04-1345-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2016. 04.020

### Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River Xinjiang

WEI Hong<sup>1,2</sup>, WU Jin-kui<sup>1\*</sup>, SHEN Yong-ping<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>, LIU Shi-wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Jia-xin<sup>1,2</sup>

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

**Abstract**: To analyze the hydrochemical characteristics of river water and snow meltwater during snow-melting period in the Kayiertesi River , the headwaters of the Ertis River , samples of river water and meltwater were collected every day during March and April , 2014. Furthermore the combination of descriptive statistics , Gibbs Figure and Piper Triangular diagrams of anions and cations were used for hydrochemical analyses. The results showed that the major ion compositions and hydrochemical types were significantly different between river water and snow meltwater. The total dissolved solid (TDS) in the river water ranged from 24. 9 to 50. 3 mg·L<sup>-1</sup>. The major cations of river water were Ca<sup>2+</sup> and Na<sup>+</sup> , accounting for 61% and 17% of the total cation equivalent concentration , respectively. Meanwhile , HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> constituted about 95% of the total anions concentration. The hydrochemical type of river water was HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>. The chemical composition of river water samples located in the middle with a deviation to left of Gibbs model , indicating that the major chemical process of river water was controlled by rock weathering and precipitation but rock weathering played a more important role.

Key words: major ion; hydrochemical characteristics; Gibbs model; Ertis River; snow-melting period

我国寒区分布较广,面积约417.4×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,占 我国陆地面积的43.5%,降水量和冰雪资源丰 富<sup>[1]</sup>.冰川和积雪融水在水资源构成中占有重要的 地位<sup>[2]</sup>.全球气候变暖的大背景之下,积雪对气候 的变化十分敏感,对全球变暖具有明显的反馈响应, 特别是季节性积雪,在干旱区和寒冷区是最活跃的 环境影响因素<sup>[3]</sup>.季节性积雪在我国分布很广,阿 尔泰山和黑龙江北部几乎可达半年左右<sup>[4]</sup>.由于冰 冻圈较少受到人类活动的影响,近年来国内外学者, 多以远离工业污染区的高山冰川-寒区元素含量作 为环境污染地背景值<sup>[5]</sup>.通过对区域水体中元素含 量的长期监测,能够更好地确定背景值,从而更加准 确地反映气候变化趋势,并作为该地区环境质量、 污染水平评价及污染预测的基本依据<sup>[6]</sup>.

寒区旱区水文和冰川积雪的研究是相互促进发

展的<sup>[7]</sup>.特别地 在中国西北地区 研究流域尺度气候变化对山区融雪径流水资源趋势的影响更具有实用性和针对性<sup>[8]</sup>.研究冰雪融水水质的变化对评估区域化学侵蚀、生物地球化学循环及河水来源组成具有重要意义<sup>[9,10]</sup>.

效存德等<sup>[11]</sup> 通过对雪冰的实测电导率值的分 析,以及与前人实测结果相比较,发现青藏高原雪冰 电导率依赖于地壳来源的碱性矿物盐类杂质(如 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等).董志文等<sup>[12]</sup>对祁连山老虎 沟 12 号冰川积雪的主要化学离子特征、来源及环 境意义进行了分析研究,认为来自于粉尘源区的陆

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271085 /41130638); 冰冻圈 国家重点实验室开放基金项目(SKLCS OP-2013-05)

\* 通讯联系人 E-mail: jkwu@lzb.ac.cn

收稿日期: 2015-09-01; 修订日期: 2015-11-20

作者简介:韦虹(1989~),女.硕士研究生,主要研究方向为水化学, E-mail: weihong15@ mails.ucas.ac.cn

源矿物可能对高海拔区域的积雪化学特征有较为明 显的影响 且由于受西风带影响的降水较多 雪坑中 的离子一定程度来源于海洋源. Johannessen 等<sup>[13]</sup> 研究表明 由于积雪融水作用而导致雪层中离子的 "淋溶作用"使得积雪初始融水中的离子含量远高 于雪层中的离子平均含量. 侯书贵<sup>[14]</sup>探讨了"淋溶 作用"的主要影响因素,指出了积雪内不同离子成 分的存在位置的不同会使各离子间出现淋溶性的差 异,并且融-冻循环过程可增强积雪的淋溶作用程度 及其淋溶择优性. 刘凤景等研究表明<sup>[15,16]</sup>,淋溶作 用能够影响融雪径流的化学成分,产生"离子脉冲" 现象 融雪径流的"离子脉冲"作用可引起总控断面 河川径流类似"离子脉冲"的现象. 刘彦广<sup>[17]</sup> 通过 综合运用水化学和同位素示踪技术,并利用端元混 合模型(EMMA),优选参数后定量分割高寒山区不 同高度带河道径流的补给来源.就中国西北地区寒 区旱区研究而言,乌鲁木齐河流域<sup>[16,18]</sup>、黑河流 域<sup>[19~21]</sup>等融雪和河川径流的水文化学过程 以及不 同水体中氢氧稳定同位素等方面的研究已经积累了 大量数据资料,相应的研究成果也比较完善.通过 对河流水化学特征的分析,有助于了解河流的来源、 补给关系 分析流经区域的环境变化 国内目前有大 量的基础研究工作围绕河流水化学展开<sup>[22~24]</sup>.

额尔齐斯河发源于中国新疆维吾尔自治区富蕴 县北部的齐格尔台达坂,河流源头最高点友谊峰在 中国、哈萨克斯坦、俄罗斯、蒙古四国国界上 海拔 为4374m. 额尔齐斯河是北冰洋水系的一条国际河 流 流域水资源的可持续合理利用不仅有利于经济 的持续发展 还能够帮助解决跨境河流的水资源争 端问题,实现水环境的共同保护与水资源的共同开 发<sup>[25]</sup>.额尔齐斯河流域降水主要集中于夏、秋两 季; 流域年均气温自上游到下游逐渐降低 ,流域年 均气温多年来总体呈上升趋势<sup>[26]</sup>.新疆北部阿尔 泰山地区受西风带影响 降水充沛 冬季积雪厚而稳 定 春季融雪径流不仅为阿勒泰及其周边地区提供 了充足的水资源,也构成了额尔齐斯河春季洪水的 重要组成部分<sup>[27]</sup>.同时额尔齐斯河下游哈萨克斯 坦境内东部区域 对于各类水体水化学特征等的研 究结果表明 额尔齐斯河河水主要以上游补给为主, 氢、氧同位素的分布特征与主要离子浓度具有相似 性 但对水体来源的变化的水循环过程的变化更为 敏感<sup>[28]</sup>. 然而相关融雪模型 特别是 SRM 模型在额 尔齐斯河流域的应用和模拟工作开展得比较少 其 中部分原因是因为该流域中对于融雪径流的分析研 究工作较少.

本文利用水文化学基础理论与方法,对额尔齐 斯河源——卡依尔特斯河流域河水及积雪融水的水 化学特征及其成因进行简要分析,为进一步对额尔 齐斯河源区融雪期的产汇流机制、径流补给关系等 方面的研究提供基本数据支持,加深对额尔齐斯河 内小流域的融雪过程的认识.通过确定融雪模型所 需要的水文径流参数提供数据,以期为融雪径流的 模拟和预测提供有效方法,使西北山区宝贵的水资 源得到合理有效的利用.

1 研究区概况

整个野外观测实验依托中国科学院寒区旱区环 境与工程研究所阿尔泰山库威积雪-冻土-水文综合 观测场(始建于 2011 年 8 月)和新疆阿勒泰地区库 威水文站进行.观测场位于额尔齐斯河河源区一级 支流——卡依尔特斯河流域,地理坐标为 47°21′9.1″N 89°39′43.22″E,海拔为1 379 m,行政 区划隶属于新疆阿勒泰地区富蕴县(图 1).



图 1 研究区和采样点位置示意 Fig. 1 Sketch map of the study area and the sampling sites

卡依尔特斯河流域面积2 365 km<sup>2</sup>. 流域年内温 差大,夏季最高日平均气温可达 30℃以上,冬季酷 寒,最低气温低至-45℃以下. 1979 年以来的平均 年降水量约为 360 mm. 降水年内分配不均且春季 降水较为稀少,夏秋季节降水较多(均超过 100 mm),降水类型 5~9 月以降雨为主,11 月至次年 4 月以降雪为主.

积雪持续期从 11 月至次年 4 月,高山上的积 雪可持续到 6 月,11 月为积雪主要形成期,多年 平均降水达 42 mm,约占全年的 12%,年内最大 积雪深度可达 1 m 以上.春季融雪常形成较大的 径流过程.流域内多年冻土和季节性冻土普遍存 在,多年冻土和季节性冻土的临界海拔为 2 200 m<sup>[29,30]</sup>.

研究区域地处内陆,区域冰川属于亚大陆性冰 川<sup>[31]</sup>,河水的化学组成基本不受海洋输入的影响. 阿勒泰地区自然资源丰富,特别是黑色金属、有色 金属资源富集,农牧业、矿产业等发展态势良好,水 利、交通、能源等基础设施日趋完善.研究区域所 在的阿尔泰山东部地区,牧地约占土地总面积的 81.8%<sup>[32]</sup>,是重要的冬季牧场之一.随着西部大开 发战略的实施,放牧、水电站的修建、采矿、航运及 污染物的排放等一系列人为活动,对水化学组分的 变化有着一定的影响.

2 样品采集与数据分析

2014年3月10日至4月7日融雪期间,每日采 集卡依尔特斯河河水水样.采样点位置如图1 所示.

现场测定 pH 值、TDS; 水样现场经 GF/F 滤膜 过滤后,用于离子分析的样品加 1:1的硝酸酸化后, 保存于 20 mL 塑料瓶内待测. 样品的化学离子组成 于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科 学国家重点实验室分析,阳离子( $K^+$ 、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、 Mg<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)使用美国戴安公司(DX-600 型)测 定,阴离子( $SO_4^{2-}$ 、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)使用美国戴安公司离 子色谱(ICS-2500)测定,测试精度均优于 5%.水中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>间平衡关系可知,当 pH 为 6~10 间 时 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>占据绝对优势, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>可忽略不计. 根据溶 液中电荷守恒原理,计算得到 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量.

同时,于2014年融雪期期间,基于原有观测场 气象(温度、湿度、降水)、积雪(积雪深度、分层积 雪温度)的长期常规观测基础之上,于2014年3月 8~23日在对雪层剖面特征观测后进行连续采样: 雪坑(海拔4253 m)自积雪表面向下,在0~10 cm 以每5 cm间距取1个样品,10~30 cm以每10 cm 间距取1个样品,30 cm以上取一个样品.采样严格 按照净化防污染要求进行,用预先在实验室净化处 理过的专用采样瓶对准采样面直接将雪捅进瓶内, 随后立即封闭瓶盖避免蒸发和扩散.在测试分析前 数天将样品取出让其在常温下自然融化 ,以备分析. 具体分析方法同河水水样.

采用 Excel 2013 软件进行基本数据的处理,图 形绘制采用 Origin 7.5 和 Excel 2013 等软件完成. 利用 Gw-chart 软件(USGS 开发),根据积雪融水与 河水中主要离子的当量浓度,绘制出不同水体的水 化学类型图(Piper 三线图),通过绘制 Piper 三线 图,可以直观地表明水体主离子组成变化,从而辨别 其控制单元.利用 SPSS 软件对河水水体中的主要 离子来源进行相关性分析.

3 结果与讨论

3.1 积雪融水与河水中的阴、阳离子组成

实验室分析结果如表 1 所示. 积雪融水水样 pH 值范围为 6.50 ~ 7.25,平均值 6.84,为中性偏弱 酸性;河水水样 pH 范围 7.03 ~ 7.23,呈弱碱性.

河水水样  $Ca^{2+}$ 和  $HCO_3^-$  是占优势的离子 , $Na^+$ 和  $SO_4^{2-}$ 次之. 积雪融水中  $HCO_3^-$  是占优势的离子 ,  $Ca^{2+}$ 和  $SO_4^{2-}$ 次之.

从表 1 中可以看出 ,河水中  $Ca^{2+}$ 和  $HCO_3^-$  的变 异系数相比其他离子要小 ,说明在河水中  $Ca^{2+}$ 和  $HCO_3^-$  的含量相对稳定. 河水的水化学类型为  $HCO_3^--Ca^{2+}$ . 积雪融水中  $HCO_3^-$  与其他离子相比 , 其变异系数较小 ,说明在积雪融水中  $HCO_3^-$  的含量 相对稳定 ,是积雪融水的主要阴离子. 积雪融水的 水化学类型也为  $HCO_3^--Ca^{2+}$ .

河水水样的 TDS 平均值为 38.8 mg•L<sup>-1</sup>,低于 世界河流 TDS 平均值(65.0 mg•L<sup>-1</sup>)<sup>[33]</sup>,这与水样 来自于额尔齐斯河源区有关.通过计算,河水水样 中 Cl<sup>-</sup>/Na<sup>+</sup>的比值平均值为 0.13,与世界平均海水 比值(Cl<sup>-</sup>/Na<sup>+</sup> = 1.15)对比,可以得出雨水海洋输 入对研究区河水溶质贡献很小的结论,这与侯浩 等<sup>[34]</sup>报道中内陆再循环水汽对研究区降水的贡献 显著的结论相一致.

从图 2(a) 可以看出,河水的阳离子分布在三角 图的中间并偏向  $Ca^{2+}$  ( $Na^+ + K^+$ ),更多地靠近  $Ca^{2+}$ 一端,阴离子主要分布在三角图  $HCO_3^-$ 一端, 可能是受碳酸盐风化影响的原因. 从图 2(b) 中可 以看出,积雪融水的阳离子主要分布在  $Ca^{2+}$  ( $Na^+$ + $K^+$ )线上,且  $Ca^{2+}$ 的浓度范围变化较大,同时,阴 离子集中在三角图  $HCO_3^-$ 一端. 同时,阴离子的分 布与积雪融水相似,说明积雪融水与河水的水化学 组成之间具有一定的联系. 表1 河流与积雪融水的水化学特征

项目	水体	最大值/mg•L <sup>-1</sup>	最小值/mg•L <sup>-1</sup>	平均值 ± 标准偏差 /mg•L <sup>-1</sup>	变异系数/%
Ca <sup>2</sup> +	河水	9.33	4. 28	7.66 ± 1.51	20
	积雪融水	0.95	0.04	$0.26 \pm 0.21$	82
Mg <sup>2</sup> +	河水	1.57	0. 57	$1.08 \pm 0.24$	23
	积雪融水	0.13	0.00	$0.01 \pm 0.02$	235
Na <sup>+</sup>	河水	3.95	1.03	2. 41 $\pm 0.66$	28
	积雪融水	0.84	0.01	$0.15 \pm 0.18$	118
K *	河水	4.10	0.00	$1.85 \pm 1.09$	59
	积雪融水	0.20	0.00	$0.05 \pm 0.05$	96
HCO <sub>3</sub> -	河水	47.45	19.87	36. 18 ± 6. 38	18
	积雪融水	3. 91	0.07	$0.94 \pm 0.93$	98
Cl -	河水	1.54	0.14	$0.30 \pm 0.26$	86
	积雪融水	0.42	0.01	$0.07 \pm 0.08$	101
$SO_4^2$	河水	1.44	0. 62	$1.08 \pm 0.26$	24
	积雪融水	0. 69	0.05	$0.20 \pm 0.12$	60
$\mathrm{NH_4^+}$	河水	0. 52	0.00	$0.19 \pm 0.16$	87
	积雪融水	0.96	0.16	$0.44 \pm 0.18$	41
TDS	河水	50.30	24.90	38. 83 ± 5. 97	15
	积雪融水	18.37	2.08	6. 73 ± 2. 87	43
水化学类型	河水			$HCO_3^Ca^{2+}$	
	积雪融水			$HCO_3^{-}$ -Ca <sup>2+</sup>	



#### 图 2 河水及积雪融水的化学离子 Piper 三线图

Fig. 2 Piper figures of chemical ions in the Kayiertesi River water and the snow meltwater

同时,需要引起注意的一点是,积雪融水水样 中,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量较高,说明该地区大气中可能 有 NH<sub>3</sub> 存在,并通过降水过程在雪中富集,通过化 学转换以 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 或 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的形式存在.积雪融水形成 的径流汇入河水后,使得河水水样中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度增 大. 王鹏等<sup>[35]</sup>研究表明,春夏温湿条件有利于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 在气-雪之间的交换,N 的来源与植物、土壤和动物 的生物排放,特别是放牧活动有关.因此需要对该 研究区域冰川积累区大气气溶胶和表层雪样品进行 取样分析,进一步探究卡依尔特斯河流域积雪出现 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 离子浓度较高的原因,以及阿尔泰山 地区 N 循环模式.

#### 3.2 积雪电导率特征

电导率(EC) 是水体中所含总离子综合性指标

的反映,电导率的大小与水样溶液中离子的性质、 浓度及温度等因素密切相关. 根据测得的结果,积 雪融水水样中,电导率的最大值为74.94 S·m<sup>-1</sup>,最 小值为4.13 S·m<sup>-1</sup>,平均值为15.22 S·m<sup>-1</sup>. 根据3 月15~22 日强消融期不同雪层的积雪融水电导率 平均值可以看出,表层和底部积雪的电导率较低,中 间雪层的电导率较高. 这种变化与强消融期内沿积 雪深度的温度廓线相一致(图3).





积雪融水水样的电导率沿雪深变化的这种现象 与雪层中的离子"淋溶作用"密切相关. 离子"淋溶 作用"是可溶性离子在气温、雪层温度、雪层结构、 重力、离子交换等外在因素的影响下,随积雪融水 向下运动的现象. 结合张伟等的研究<sup>[36]</sup> 雪层液态水 含量的变化趋势与雪层温度呈现相反的变化趋势 积 雪表面发生强烈消融 积雪液态水含量较高 在重力 作用下离子随融水向下迁移流失,电导率较低;积雪 液态水含量的极小值出现在整个雪层的中间偏下处, 由于可能存在污化层,可溶性离子发生富集,电导率 也相应出现最大值;在积雪和下垫面接触面附近积 雪液态水含量出现极大值,电导率也出现极小值.通 过分析积雪雪层电导率变化的规律能够发现 融雪径 流中所携带的可溶性离子从固相向液相迁移需要一 定的时间 且各离子迁移的速率不同 ,导致了补给河 水的积雪融水呈波动性变化的趋势.

### 3.3 河水电导率变化

根据测得的结果,河水水样中电导率的最大值

为100 S•m<sup>-1</sup>,最小值为49.2 S•m<sup>-1</sup>,平均值为76.8 S•m<sup>-1</sup>. 比较河水水样电导率与气温、降水的关系,如图4所示.

从图4中可以看出 3月8日至4月7日这段时 间内降水较少.3月8日至3月20日,平均气温一 般低于0℃,河水中各主要离子变化幅度不大[图5 (a)]河水电导率也基本维持不变(图4).在此期 间,积雪融水电导率总体呈波动变化趋势[图5 (b)],说明离子经过淋溶在雪层富集,积雪融水没 有或较少补给进入河水.3月15日河水电导率出现 一个较小的峰值,可能和取样或样品分析引起的误 差有关.3月21日之后,随着平均气温持续上升并 高于0℃河水中 HCO<sub>3</sub>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 呈"脉 冲"式波动下降趋势[图5(a)],这与积雪融水进入 河流系统有关.离子浓度较低的积雪融水进入河 流,引起河流离子浓度的降低和电导率的减小.积 雪开始消融时,河流径流的离子浓度"脉冲"的特 征与刘凤景等<sup>[15]</sup>在乌鲁木齐河的研究相一致.



Fig. 4 Variation of air temperature , precipitation and EC of the river water

#### 3.4 河水化学组分的来源简析

陆地水中溶解盐主要来源于大气循环携带的盐 分、可溶性岩石的风化物及人类活动产生的污染 物.通过分析 Gibbs 半对数坐标图解,以河水中溶 解性固体总量的对数值为纵坐标,以 Na<sup>+</sup>/(Na<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup>)的比值或 Cl<sup>-</sup>/(Cl<sup>-</sup> + HCO<sub>3</sub>)的比值的算术 值为横坐标,可以直观地反映河水主要组分趋于 "降水控制类型"、"岩石风化类型"或"蒸发-结晶 类型"<sup>[37]</sup>.

将河水的水化学数据绘制于 Gibbs 图中,如图6 所示,研究区河水样品的水化学组成大部分落在 Gibbs 分布模型内,说明卡依尔特斯河河水的化学 组分受到了一定的人类活动干扰.河水样品的数据



## 图 5 河水与积雪融水主要离子平均浓度逐日变化

Fig. 5 Daily variations of the mean concentrations of major irons in the river water and the snow meltwater

点落在分布模型的中部偏左一侧,且河水样品的 TDS含量均小于100 mg·L<sup>-1</sup>,Na<sup>+</sup>/(Na<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup>)的 比值小于0.5,处于岩石风化带,且少数河水样品的 水化学数据落在大气降水作用带,说明所研究区域 河水的水化学组成受到岩石风化作用和大气降水作 用的共同影响,且岩石风化作用占主导.

对河水中主要阴、阳离子浓度进行相关性分 析,可以大致判断不同离子的来源是否一致,得到的 结果中如表2所示.

从表 2 中可以看出 ,TDS 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 之间显著相 关 说明 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 对河水溶质贡献程度最大. 另一方 面 ,TDS 和 Cl<sup>-</sup>之间呈反相关 ,说明研究区域 Cl<sup>-</sup> 对 河水 溶质贡献很小或没有贡献. 同时 ,Ca<sup>2+</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 之间显著相关 ,二者可能来源于碳酸岩的风 化. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 间相关性较差 ,说明二者可能没 有相同的来源 ,即能说明河水受到人类活动的干扰



Fig. 6 Hydrochemical Gibb figure of the river water

表 2 河水中总溶解固体及特征离子的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation analysis of TDS and characteristic ions in the river water													
	TDS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$SO_{4}^{2}$ -	Cl -	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2 +</sup>	Na <sup>+</sup>	K *	$\mathrm{Mg}^{2}$ +				
TDS	1												
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.890**	1											
$SO_4^2$ -	0.660**	0. 493 * *	1										
Cl -	-0.063	-0.353	-0.275	1									
$NO_3^-$	0.187	-0.137	-0.070	0. 947 * *	1								
Ca <sup>2 +</sup>	0.726**	0. 539 * *	0. 872 * *	-0.325	-0.115	1							
Na <sup>+</sup>	0.711**	0. 440*	0. 582 * *	0.358	0. 579 * *	0.600**	1						
K <sup>+</sup>	-0.147	-0.387*	-0.285	0.515**	$0.428^{*}$	-0.272	-0.220	1					
Mg <sup>2 +</sup>	0.729**	0. 608 * *	0. 758 * *	-0.316	-0.133	0. 851 * *	0. 563 * *	-0.282	1				

1) \* 为 P < 0.05 , \* \* 为 P < 0.01

较少. 同时 ,Ca<sup>2+</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 之间显著相关 ,由于淋溶 择优性顺序<sup>[14]</sup> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 较其他阴离子更易于被淋溶 , SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 可能来源于硫酸盐的氧化以及积雪融水径流 的补充. 此外 ,河流受到融雪径流补充的程度大小 , 将在今后的研究中通过对稳定同位素的分析等工 作 ,对河水进行径流分割后确定.

4 结论

(1)额尔齐斯河源区积雪融水中 TDS 含量较 低 <sub>P</sub>H 平均值 6.84,基本呈中性.HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是占优势 的离子,水化学类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>.河水水样呈弱 碱性,TDS 小于世界河流 TDS 平均值,Ca<sup>2+</sup>和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是占优势的离子,水化学类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>.

(2) 积雪中的离子在"淋溶作用"的影响下发生 迁移 表现为表层雪和底部积雪的电导率较低,中间 雪层的电导率较高.

(3)在融雪径流补给、气温、径流量变化等的 综合结果作用下,河水电导率变化产生类似融雪径 流的"离子脉冲"现象的结果.

(4) 河水样品的数据点落在 Gibbs 分布模型的 中部偏左一侧,研究区域河水的水化学组成受到岩 石风化作用和大气降水作用的共同影响,且岩石风 化作用占主导.

参考文献:

- [1] 陈仁升,康尔泗,吴立宗,等.中国寒区分布探讨[J].冰川 冻土,2005,27(4):469-475.
- [2] 沈永平,苏宏超,王国亚,等.新疆冰川、积雪对气候变化 的响应(I):水文效应[J].冰川冻土,2013,35(3):513-527.
- [3] 王国亚,毛炜峄,贺斌,等.新疆阿勒泰地区积雪变化特征 及其对冻土的影响[J].冰川冻土,2012,**34**(6):1293-1300.
- [4] 王澄海,王芝兰,崔洋.40余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征[J].冰川冻土,2009,31(2):301-310.
- [5] 王平,刘智. 阿尔泰山友谊峰地区冰、雪及其受冰川融水补 给径流中的微量元素含量[J]. 环境科学,1982,3(3):33-35.
- [6] 袁国映,张晓黎.喀纳斯自然保护区土壤元素背景值及水、 植物中的微量元素含量[J].新疆环境保护,1989,(1):35-48.
- [7] 康尔泗. 我国寒区和干旱区水文研究的回顾和展望[J]. 冰 川冻土,2000,22(2):178-188.
- [8] 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.
- [9] 王建,许君利,张世强,等.天山南坡科其喀尔冰川流域水 化学侵蚀及大气 CO<sub>2</sub> 沉降量分析[J].环境科学,2010,**31**

(4): 903-910.

- [10] 赵爱芳,张明军,李忠勤,等.托木尔峰青冰滩72号冰川径 流水化学特征初步研究[J].环境科学,2012,33(5):1484-1490.
- [11] 效存德,秦大河,任贾文,等.雪冰电导率反映的南、北极 和青藏高原大气环境差异[J].极地研究,1999,11(1):1-7.
- [12] 董志文,任贾文,秦大河,等.祁连山老虎沟12号冰川积雪 化学特征及环境意义[J].冰川冻土,2013,35(2):327-335.
- [13] Johannessen M , Henriksen A. Chemistry of snow meltwater: Changes in concentration during melting [J]. Water Resources Research , 1978 , 14(4): 615-619.
- [14] 侯书贵. 乌鲁木齐河源冬季积雪淋溶作用的实验结果[J]. 冰川冻土,2000,22(4): 362-365.
- [15] 刘凤景, Williams M,杨大庆.天山乌鲁木齐河融雪径流的 "离子脉冲"现象初探[J].科学通报,1997,42(4):417-419.
- [16] 刘凤景, Williams M, 程国栋, 等. 天山乌鲁木齐河融雪和河 川径流的水文化学过程[J].冰川冻土, 1999, 21(3): 213-219.
- [17] 刘彦广.基于水化学和同位素的高寒山区雨季径流过程示踪[D].武汉:中国地质大学,2013.
- [18] 吴素芬,刘志辉,韩萍,等. 气候变化对乌鲁木齐河流域水 资源的影响[J]. 冰川冻土,2006,28(5):703-706.
- [19] 李弘毅,王建. SRM 融雪径流模型在黑河流域上游的模拟研 究[J]. 冰川冻土,2008,30(5):769-775.
- [20] 吴锦奎,杨淇越,丁永建,等.黑河流域大气降水稳定同位 素变化及模拟[J].环境科学,2011,32(7):1857-1866.
- [21] 党素珍,刘昌明,王中根,等.黑河流域上游融雪径流时间 变化特征及成因分析[J].冰川冻土,2012,34(4):920-926.
- [22] 唐文魁,陶贞,高全洲,等.桂江主要离子及溶解无机碳的 生物地球化学过程[J].环境科学,2014,35(6):2099-2107.
- [23] 唐玺雯,吴锦奎,薛丽洋,等. 锡林河流域地表水水化学主 离子特征及控制因素[J]. 环境科学,2014,35(1):131-142.
- [24] 于奭,孙平安,杜文越,等.人类活动影响下水化学特征的 影响:以西江中上游流域为例[J].环境科学,2015,36(1): 72-79.
- [25] 汤奇成,李丽娟.西北地区主要国际河流水资源特征与可持续发展[J].地理学报,1999,54(S):21-28.
- [26] 李捷,夏自强,郭利丹,等.额尔齐斯河流域气候特征及变 化趋势分析[J].河海大学学报(自然科学版),2008,36 (3):311-315.
- [27] 李向应,秦大河,韩添丁,等.中国西部冰冻圈地区大气降水化学的研究进展[J].地理科学进展,2011,30(1):3-16.
- [28] 曾海鳌,吴敬禄,刘文,等.哈萨克斯坦东部水体氢、氧同 位素和水化学特征[J].干旱区地理,2013,36(4):662-668.

- [29] 张廷军,童伯良,李树德.我国阿尔泰山地区雪盖对多年冻 土下界的影响[J].冰川冻土,1985,7(1):57-63.
- [30] 童伯良,李树德,张廷军.中国阿尔泰山的冻土[J].冰川冻 土,1986,8(4): 357-364.
- [31] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等.基于第二次冰川编目的中国 冰川现状[J].地理学报,2015,70(1):3-16.
- [32] 酆慧兰,王和根.新疆阿勒泰东部地区土地利用调查研究 [J]. 经济地理,1982,(3):181-186.
- [33] Meybeck M , Helmer R. The quality of rivers: From pristine stage to global pollution [J]. Global and Planetary Change , 1989 , 1 (4): 283–309.
- [34] 侯浩,侯书贵,庞洪喜.阿尔泰山蒙赫海尔汗冰川不同水体 稳定同位素空间分布特征及水汽来源[J].冰川冻土,2014, 36(5):1271-1279.
- [35] 王鹏,李忠勤,张明军,等.天山乌鲁木齐河源1号冰川 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 沉积特征研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(25): 13921-13923,13947.
- [36] 张伟, 沈永平, 贺建桥, 等. 阿尔泰山融雪期不同下垫面积 雪特性观测与分析研究[J].冰川冻土, 2014, **36**(3): 491-499.
- [37] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962): 1088–1090.

# 《环境科学》再获"百种中国杰出学术期刊"称号

2015 年 10 月 21 日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了"百种中国杰出学术期刊" 获奖名单.《环境科学》连续14次荣获"百种中国杰出学术期刊"称号."百种中国杰出学术期刊"是根据中国 科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多 个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有 广泛影响.