

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1108

LIU Feng, LI Zhongqin, HAO Jianan, et al. Study on the hydrochemical and stable isotope characteristics at the headwaters of the Irtysh River in spring[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1):234-242. [刘峰, 李忠勤, 郝嘉楠, 等. 额尔齐斯河源春季水化学及稳定同位素特征研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1):234-242.]

## 额尔齐斯河源春季水化学及稳定同位素特征研究

刘峰<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1,2</sup>, 郝嘉楠<sup>3</sup>, 梁鹏斌<sup>1</sup>, 王芳龙<sup>1</sup>, 张慧<sup>2</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃兰州 730000; 3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 基于2018年4月额尔齐斯河源至富蕴段的河水样品, 综合运用Gibbs图、Piper三线图、相关矩阵分析等方法对河水中主要的化学离子、pH值、电导率、TDS和氢、氧稳定同位素等物理化学指标进行了分析。结果表明: 额尔齐斯河源春季河水呈弱碱性, TDS平均值为72.02 mg·L<sup>-1</sup>, 整体属于低矿化度水。河水中主要离子浓度序列为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>, 其中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Ca<sup>2+</sup>是最主要的阴阳离子。水化学类型从库依尔特河的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>型转变为额尔齐斯河富蕴段的(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)-Ca<sup>2+</sup>型。从源区至富蕴段各离子含量整体呈增大趋势, 但其增加过程受到复杂因素的影响而出现差异。河水离子主要受水-岩风化作用控制, 且以碳酸盐岩(石灰岩、白云岩)为主的风化水解是离子的主要来源, 其次是长石类矿物的风化, 还包括下游人类活动的离子输入等。δD和δ<sup>18</sup>O沿程逐渐增大, 在下游出现了富集现象。

**关键词:** 额尔齐斯河; 水化学; 离子来源; 稳定同位素

**中图分类号:** P641.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)01-0234-09

### 0 引言

自然水体中的可溶性无机离子被视为天然的“示踪剂”<sup>[1]</sup>已被广泛用于识别水体化学组成的基本过程, 如流域岩石风化、水体的蒸发-结晶作用以及大气降水物质输入等<sup>[2]</sup>。水体化学特征受时空分布的影响。在空间上, 天然水化学特征与该区域的自然地理状况(流域气候、地质地貌、水流量、土壤等)密切相关, 在不同的区域内水化学特征及控制因素不同<sup>[3]</sup>。在高寒山区, 人类活动影响有限, 自然环境是水体化学特征的主导因素<sup>[4-6]</sup>; 而平原区受人类活动影响很大, 通常伴随着NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等离子的高值, 在很大程度上与工业和农业活动相关。在时间上, 不同水文季节的水化学特征也不同。当河流处于汛期时, 径流量增大, 其流速也相应地加快, 水岩作用时间变短, 岩石和土壤中的无机矿物

成分尚未融入水中, 使得径流中各离子含量较低; 反之, 则径流中离子含量较高<sup>[7-9]</sup>。

在全球变暖背景下, 国内外学者对世界主要水体中的主离子含量与流域的气候条件及地质岩性的关系进行了大量研究, 代表性工作如对南美亚马孙河<sup>[10]</sup>、北美马更些河<sup>[11]</sup>、亚洲勒拿河<sup>[12]</sup>和布拉马普特拉河<sup>[13]</sup>等的研究。对我国主要河流水化学特征的研究也较为系统, 发现河流的离子组成主要受碳酸盐和蒸发盐岩溶解作用的影响, 而较少地受硅酸盐和铝硅酸盐岩石风化作用的影响<sup>[14-16]</sup>。许多学者针对我国西部高寒山区流域水化学特征及氢、氧稳定同位素进行了大量的研究, 并积累了丰富的数据资料。冯芳等<sup>[17-18]</sup>对乌鲁木齐河流域水化学研究表明, 大气降水的水化学类型为(Ca<sup>2+</sup>+Na<sup>+</sup>)-(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 接近中性; 径流的水化学类型为Ca<sup>2+</sup>-(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 呈弱碱性; 径流中离子来源与

收稿日期: 2018-07-28; 修订日期: 2018-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471058; 91425303); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA2006020103)资助

作者简介: 刘峰(1993-), 男, 甘肃甘谷人, 2017年在河西学院获学士学位, 现为西北师范大学在读硕士研究生, 从事水化学同位素研究. E-mail: 1186059616@qq.com

通信作者: 李忠勤, 研究员, 从事冰川学研究. E-mail: lizq@lzb.ac.cn.

碳酸盐岩、含硫矿物和长石类矿物风化有关。王彩霞等<sup>[19]</sup>、冯亚伟等<sup>[20]</sup>、吴锦奎等<sup>[21]</sup>研究发现, 祁连山老虎沟雪冰融水中的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 表现出明显的消融期随月份波动, 融水径流水化学组成特征也表现出随消融过程而变化。刘昭<sup>[22]</sup>对雅鲁藏布江不同海拔梯度的水化学及同位素特征做了分析, 发现水化学特征及影响因素在空间上表现出差异, 同位素受海拔、温度、降水等效应的影响。

对于阿尔泰山南坡, 特别是额尔齐斯河源区的研究大多集中在土壤、植被、气候等方面<sup>[23-25]</sup>。水化学与氢、氧稳定同位素的研究工作较少, 其中韦虹等<sup>[26]</sup>对额河发源地之一的喀依尔特河河水化学特征做了简要分析。但该研究采样点单一, 对河水中离子空间变化及水-岩作用等方面缺乏论述, 不能全面地反映额尔齐斯河源区的水文地球化学特征。因此, 本研究在此基础上对流域内库依尔特河(额尔齐斯河最东端源头)从河段上游到额尔齐斯河富蕴段沿海拔梯度依次进行了水样的采集, 补测了氢、氧稳定同位素, 通过多种方法交互分析, 以填补该区域的研究空缺。初步探讨了额尔齐斯河源区河水中离子及 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 空间变化及其控制因素, 为该区域水文地球化学和稳定同位素的深入研究积累基础资料, 也为流域水资源评价、管理和生态环境建设提供科学依据。

## 1 研究区概况

额尔齐斯河发源于中国境内阿尔泰山西南坡, 由两支山间源头库依尔特河、喀依尔特河在伊雷木湖汇聚后成为额尔齐斯河(以下简称为“额河”), 在富蕴县城附近出山口后折向西流<sup>[27]</sup>。本文在库依尔特河(以下简称为“库河”)至额河富蕴段(图1)开展了水化学研究。研究区地势北高南低, 流域最高海拔高于3 800 m, 最低海拔低于800 m<sup>[28]</sup>。流域年内温差大, 夏季最高日均温可达30℃以上, 冬季酷寒, 最低气温低至-45℃以下<sup>[29]</sup>。据富蕴气象站多年观测资料<sup>[30-31]</sup>, 1979年以来的年平均降水量约为360 mm。降水年内分配不均, 春季降水较为稀少, 夏、秋季降水较多(均超过100 mm), 降水类型在5-10月以降雨为主, 在11月至次年4月以降雪为主。

研究区内岩类比较齐全, 且主要集中在海西期形成, 有花岗岩、碳酸盐岩(石灰石、白云石)、含硫矿物、长石类矿物(钾长石、钠长石)以及花岗伟

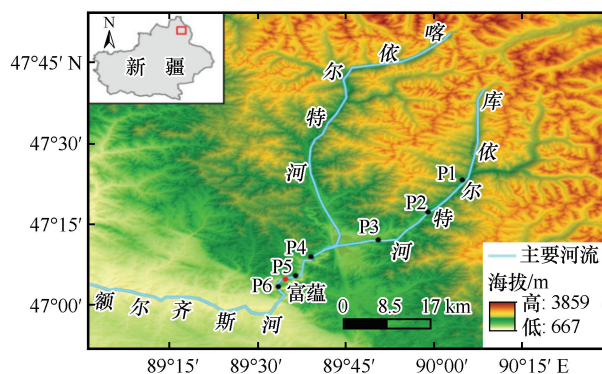


图1 额尔齐斯河源区采样点分布

Fig. 1 Sketch map of sampling points at the headwaters of the Irtysh River

晶岩等<sup>[32]</sup>。土壤类型依次为高山冻土、高山草甸土、山地针叶林土、山地黑钙土、山地栗钙土、棕钙土等<sup>[33]</sup>。自然资源丰富, 特别是有色金属资源富集, 著名的可可托海稀有金属矿区就位于此地。研究区所在的阿尔泰山东部地区是最重要的冬季牧场之一<sup>[34]</sup>。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。随着西部大开发、“一带一路”的实施, 放牧、采矿、水电站的修建及污染物的排放等一系列人类活动, 对流域内水化学组分的变化起着一定的影响。

## 2 数据与方法

野外采样选择在2018年4月进行, 沿库河向下至额河富蕴段, 采集水样共6组, 每组6瓶, 分别用于阴、阳离子和氢、氧稳定同位素等3个检测项目。依次经过高山区、峡谷段、河流出口等典型地形分布区。图1中所示的具体水样点依次为P1~P6, 各样点的海拔见表1。采样时先用河水清洗采样瓶和瓶盖, 选择水流较平缓且尽量靠近河流中间的位置, 使水灌满采样瓶, 避免留有气泡, 并在瓶上标注样品的编号和地理坐标。所有样品均在兰州的冰冻圈科学国家重点实验室进行测定。采用多参数水质分析仪测定pH值和电导率EC, 其精度分别为0.01 pH和1  $\mu S \cdot cm^{-1}$ 。阳离子( $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $NH_4^+$ )和阴离子( $SO_4^{2-}$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ )分别采用美国戴安公司ICS-2500型和Dionex-320型离子色谱仪进行测定。 $HCO_3^-$ 浓度使用酸碱滴定法(使用浓度为0.02 mol·L<sup>-1</sup>的稀盐酸溶液滴定, 指示剂为甲基橙)得出, 详细的分析过程及原理见文献<sup>[35]</sup>。总溶解固体(total dissolved solids, TDS)含量由各离子含量总和减去1/2  $HCO_3^-$ 含量计算得到。氢、氧稳定

同位素使用 DLT-100 型激光液态水同位素分析仪测定, 所测精度  $\delta D$  为  $\pm 2\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  为  $\pm 0.3\text{‰}$ 。

表1 各采样点海拔

Table 1 Altitude of each sampling point

样点	P1	P2	P3	P4	P5	P6
海拔/m	2 396	2 100	1 783	1 174	975	800

3 结果与分析

3.1 河水的水化学特征

如表 2 所示, 河水样品的 pH 值范围为 7.12 ~ 7.64, 平均值为 7.33, 呈弱碱性。EC 介于 48.8 ~ 168.4  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 平均值为 144.23  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 变化较大。Ca<sup>2+</sup> 在所有阳离子中浓度含量最高, 平均值为

16.48  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 占阳离子总量的 54.48%; 其次为 Na<sup>+</sup>, 平均值为 8.58  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; Mg<sup>2+</sup> 与 K<sup>+</sup> 同属于一个量级, K<sup>+</sup> 质量浓度最低。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 是主要的阴离子, 浓度平均值为 52.68  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 占阴离子总量的 65.55%, 远高于其他离子, 浓度较高的还有 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。水体中阴、阳离子质量浓度从大到小依次为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>。由图 2 可知, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在 P5 超过 Ca<sup>2+</sup> 成为仅次于 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的第二大离子。按舒卡列夫水化学类型划分方法<sup>[36]</sup>, 库河段河水主要离子类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup> 型, 额河富蕴段为 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)-Ca<sup>2+</sup> 型。TDS 平均值为 72.02  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 小于 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 属于低矿化度水。EC 与 TDS 具有较好的线性关系  $\text{EC}=2.008\text{ TDS}-0.211$  ( $N=36$ ,  $R^2=0.95$ )。

表2 水体中各项指标的最小值、最大值和平均值

Table 2 The minimum, maximum and average of pH, electrical conductivity (EC) and various ion mass concentrations

数值	pH	EC/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	离子质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )								
			TDS	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
最小值	7.12	48.80	24.40	6.71	2.23	1.02	1.28	26.70	3.05	0.59	1.82
最大值	7.64	281.00	114.00	25.97	24.30	5.56	2.87	70.78	51.43	12.27	8.24
平均值	7.33	144.23	72.02	16.48	8.58	2.97	2.22	52.68	19.13	4.52	4.04
距平值	0.11	20.31	11.46	6.23	5.50	1.54	0.14	6.82	10.11	3.64	1.87

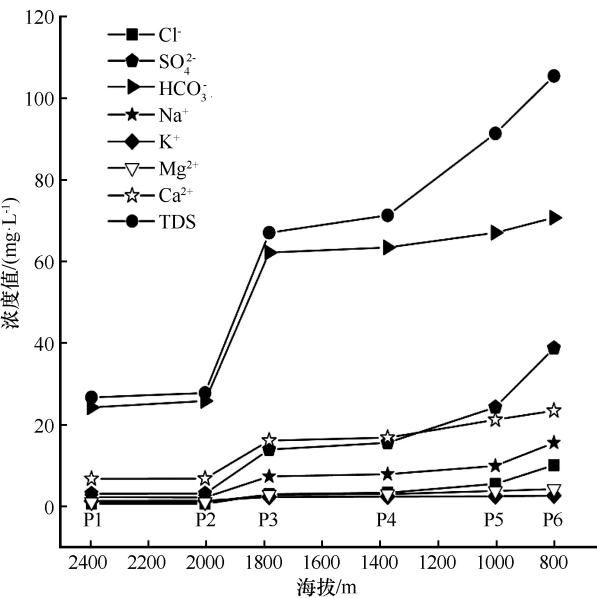


图2 TDS 与各离子浓度随海拔的变化  
Fig. 2 Variations of total dissolved solids (TDS) and various ion mass concentrations along altitude

3.2 主要离子的空间变化

从库河向下至额河富蕴段(P1 ~ P6), TDS 和各离子含量均呈逐渐增加的趋势(图 2)。TDS 从 P1 到

P6, 浓度值持续增加, P6 处河水矿化度达到最高值。此类现象是由于河流从高海拔向低海拔流动过程中地势变缓, 随着河水与河床接触时间的增加, TDS 也相应增加, 符合山区径流的一般规律<sup>[18]</sup>。各离子浓度在 P2 到 P3 峡谷段增幅最为明显, 其中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 从 24.77  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到 62.22  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 增长率为 131.8%; Ca<sup>2+</sup> 从 6.78  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到 16.14  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 增长率为 128.3%; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 从 3.14  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到 13.93  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 增长率为 132.6%。P2 到 P3 为高山峡谷段, 岩石裸露, 且广泛分布, 是水-岩相互作用的主要区域, 此外水流对沿岸土壤的侵蚀和搬运也携带了一定量的离子, 所以各离子含量在这一区间增幅较快。从 P3 到 P6, TDS 继续保持较快的增幅, 而 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的增幅变缓, 但仍为主要的阴离子。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 在 P3 到 P6 过程中增幅明显变大, 从 13.93  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到 38.77  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 增长率为 178.3%, 通过和其他离子对比发现 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 是 P3 到 P6 过程中增幅最大的离子。Ca<sup>2+</sup> 从 P3 到 P6 增幅变缓, 与 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 一样, 仍为主要的阳离子; Na<sup>+</sup> 从 P3 到 P6 增幅变快, 从 7.35  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  上升到 15.57  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 增长率为 111.8%。Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup> 含量和变化

趋势相似,从P1到P6增长幅度不大,尤其是 $K^+$ ,基本无显著变化。

从P3到P6, $HCO_3^-$ 与 $Ca^{2+}$ 增幅变缓,而 $SO_4^{2-}$ 与 $Na^+$ 增幅变快,但其增加的过程受到复杂因素的影响而出现差异。当河水流经硫酸盐岩( $CaSO_4$ )地区时,通过淋溶作用和氧化作用产生大量的 $SO_4^{2-}$ 和 $Ca^{2+}$ 。在弱碱环境下(河水pH平均值为7.33), $HCO_3^-$ 和 $CO_3^{2-}$ 比 $SO_4^{2-}$ 更易与 $Ca^{2+}$ 反应产生沉淀,从而使 $CO_3^{2-}$ 和 $Ca^{2+}$ 对 $SO_4^{2-}$ 的抑制作用降低,使 $SO_4^{2-}$ 含量和占比不断增加<sup>[37]</sup>。当河流流经县城时,人类活动导致的工业和农业污染使河流中 $SO_4^{2-}$ 含量持续增加。 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Cl^-$ 随着河水流动逐渐积累,含量有所增加,但所占比重较低,远不及 $Ca^{2+}$ 、 $HCO_3^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 。天然水中 $Na^+$ 含量一般高于 $K^+$ <sup>[38]</sup>, $Na^+$ 迁移能力强,容易被淋溶及受吸附性阳离子交替作用影响,如附着在胶体上的 $Na^+$ 与 $Ca^{2+}$ 发生交替,使 $Na^+$ 含量和占比增加较快。 $K^+$ 的迁移能力弱,易被土壤或植物吸收,因此 $K^+$ 在全程变化不大<sup>[39]</sup>。

### 3.3 其他离子的空间变化

河水中除了以上主要离子,还检测出 $F^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ 等较低浓度的离子(表3),它们的来源多样且变化复杂。三种离子浓度从库河至额河富蕴段均呈现上升的趋势。其中 $NO_3^-$ 与 $NH_4^+$ 增加较为明显,而 $F^-$ 变化较小。氮循环是重要的生物地球

化学循环,水体中含氮物质(主要表现为 $NO_3^-$ 和 $NH_4^+$ )的研究可以揭示人类活动对水环境的影响。有研究发现 $NO_3^-$ 与 $NH_4^+$ 在一般条件下不稳定,它们之间有成因联系,通常河水中的 $NO_3^-$ 含量较 $NH_4^+$ 大<sup>[40]</sup>。额河源头位于高寒山区,人类活动对河水的影响很小,而在库河出山口至额河富蕴段人为污染逐渐增多。因此,河水中的 $NH_4^+$ 和 $NO_3^-$ 含量也随之增加。 $F^-$ 来源及影响因素单一,因而变化较小。

表3 低浓度离子空间变化

离子	库河上段	库河中段	库河出山口	额河富蕴段
$F^-$	0.12	0.13	0.15	0.20
$NO_3^-$	1.87	1.98	2.29	8.17
$NH_4^+$	0.02	0.01	0.09	0.10

### 3.4 氢、氧稳定同位素的空间变化

此外,还对6个不同海拔的水样点做了稳定同位素 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 进行了简要分析,以研究不同海拔的河水氢、氧稳定同位素变化特征。如图3所示,河水的 $\delta^{18}O$ 介于 $-14.8‰ \sim -12.6‰$ ,平均值为 $-13.7‰$ , $\delta D$ 介于 $-103.2‰ \sim -83.2‰$ ,平均值为 $-93.1‰$ ,整体同位素值偏负,符合高海拔地区稳定同位素值偏负的一般规律<sup>[41-42]</sup>。

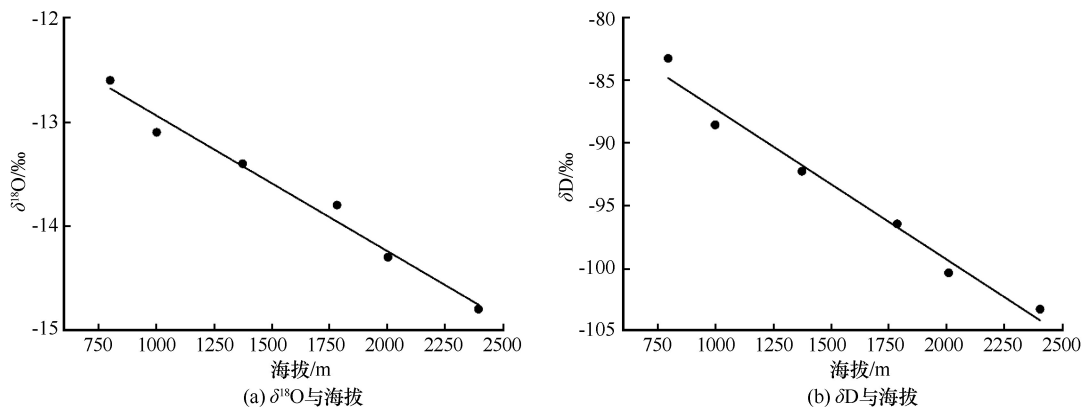


图3 河水样品稳定同位素 $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$ 与海拔之间的关系

Fig. 3 Relationship between stable isotope  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$  and elevation of river water samples

河水中 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 随着海拔的降低逐渐富集,通过对 $\delta^{18}O$ 和 $\delta D$ 沿海拔变化做线性拟合得到 $\delta^{18}O(‰) = -0.0013‰ H(m) - 11.63$  ( $R^2=0.97$ ), $\delta D(‰) = -0.0121‰ H(m) - 75.07$  ( $R^2=0.96$ )。又进一步根据同位素和海拔差得出:海拔每降低100 m, $\delta^{18}O$ 增加量为 $0.08‰ \sim 0.15‰$ , $\delta D$ 增加量

为 $0.91‰ \sim 1.38‰$ 。

### 3.5 离子来源及控制因素

河流水体离子的来源主要包括岩石和矿物的风化、大气的干湿沉降以及人类活动等<sup>[43]</sup>。将河水水化学数据绘于Gibbs图中(图4),纵坐标以对数刻度表示TDS,横坐标以数值表示 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 或

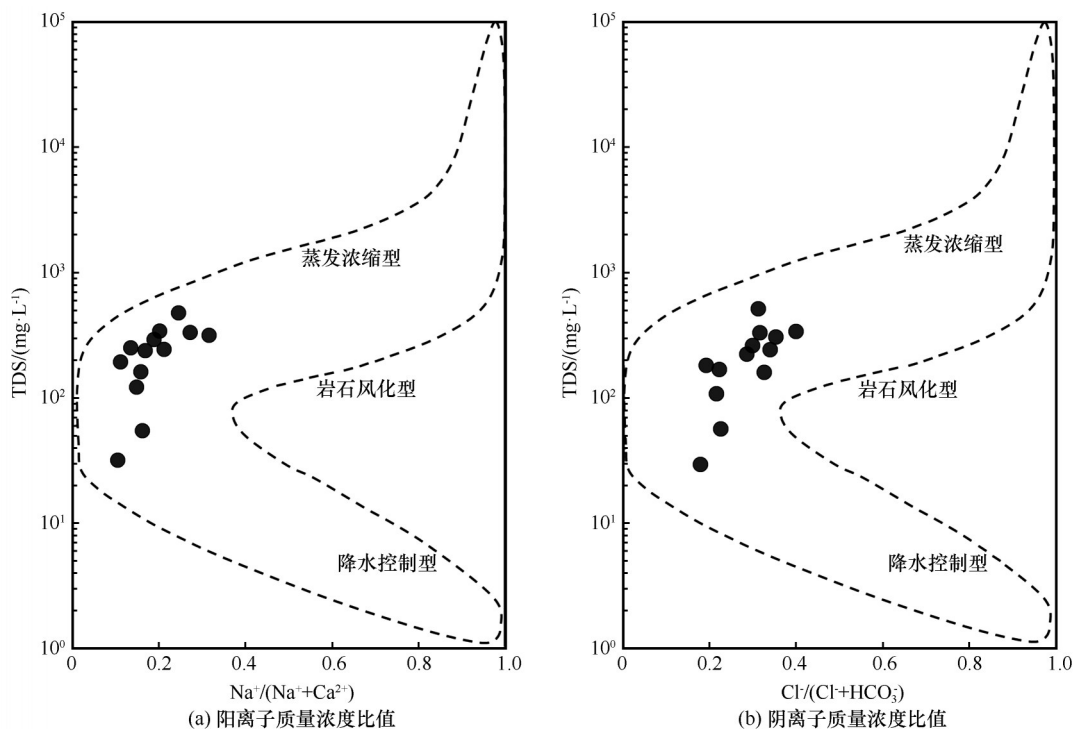
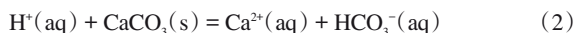
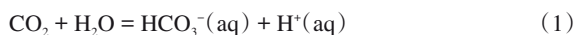


图4 河水样品水化学成分Gibbs图

Fig. 4 Gibbs diagram of chemical composition of river water samples

$\text{Cl}^-/(\text{Cl}^-+\text{HCO}_3^-)$  的质量浓度比值。可知  $\text{Na}^+/( \text{Na}^++\text{Ca}^{2+})$  值主要集中在 0.2 左右, 而 TDS 值主要在  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 一小部分在  $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下, 表明河水水体中离子组成主要受水-岩相互作用的影响。

为进一步确定岩石风化和水体离子间的相关性, 对各离子按当量浓度百分比做Piper三线图(图5)。在三线图中, 阳离子位于  $\text{Ca}^{2+}$  一端, 阴离子主要靠近  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  一端, 表明  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  在水体中占绝对优势, 说明河水水体化学成分主要受碳酸盐岩风化的影响<sup>[44]</sup>。这与阿尔泰山南坡的地质岩性条件相关性较高, 该区土壤类型沿海拔梯度依次为高山草甸土、山地针叶林土、黑钙土、栗钙土, 部分土壤中含有大量的  $\text{CaCO}_3$ , 通过以下化学过程转换生成  $\text{Ca}^{2+}$ , 成为水体中  $\text{Ca}^{2+}$  的主要稳定来源。



式中: aq 表示溶液; s 表示固体。

各离子间的相关系数可以从侧面反映离子的来源。通过分析相关系数矩阵(表4)可知, TDS 与  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  等离子相关性很高, 其与  $\text{HCO}_3^-$  相关系数达到 0.913, 相关性最为显著。而 TDS 与  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$  等离子相关性较低, 这与图2中各离子从库河段至额河富蕴段的变化趋势相对应, 即河水中  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等浓度

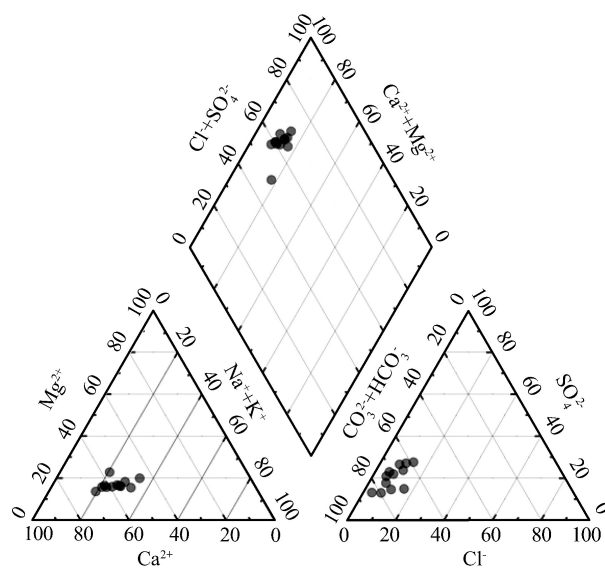


图5 河水化学离子Piper三线图

Fig. 5 Piper three-line diagram of river water chemical ions

较高的离子增量对TDS的增加贡献很大。 $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  存在较好的相关性, 进一步验证了Piper三线图(图5)中的结论( $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  受碳酸盐岩风化的影响)。

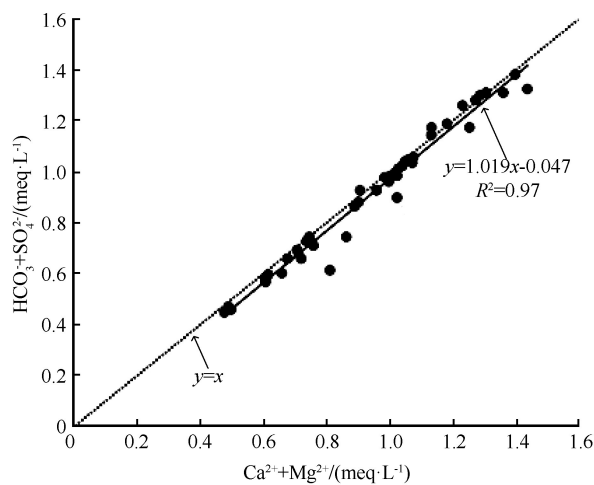
$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  间的相关性较好, 表明它们之间具有共源性。对样品的  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-}$  的当量浓度关系做图分析(图6), 发现

表4 TDS及各离子浓度间的相关系数矩阵

Table 4 Matrix of correlation coefficients between TDS and various ion mass concentrations

	TDS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>
TDS	1								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.91**	1							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.77**	0.44*	1						
Cl <sup>-</sup>	0.41*	0.54**	0.61**	1					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.36	0.65**	0.73**	0.46*	1				
Ca <sup>2+</sup>	0.76**	0.74**	0.78**	0.52**	0.35	1			
Na <sup>+</sup>	0.74**	0.62**	0.79**	0.87**	0.31	0.45**	1		
Mg <sup>2+</sup>	0.36*	0.61**	0.46*	0.71**	0.41*	0.39	0.55**	1	
K <sup>+</sup>	0.32	0.31	0.38	0.62**	0.38	0.61**	0.61*	0.41**	1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.33	0.30	0.57**	0.30	0.63**	0.36*	0.43*	0.31	0.19

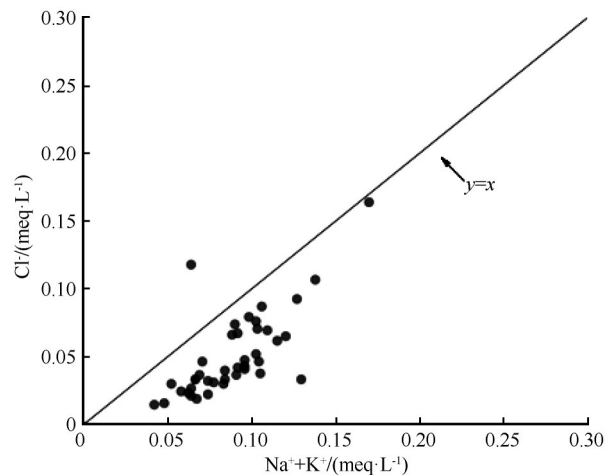
注: \*, \*\*分别表示通过0.05、0.01显著性水平检验

图6 河水HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>的当量浓度比Fig. 6 Equivalent concentration ratio between HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> in river water

大部分样品都分布在1:1关系线上或附近,所有样品中(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)/(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)的平均值为0.95,说明流域内除了碳酸盐风化作用以外,还存在石膏等其他蒸发岩的风化<sup>[45]</sup>。由Ca<sup>2+</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的强相关性(相关系数为0.786)可知,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>可能来自硫酸盐(CaSO<sub>4</sub>)等蒸发岩的风化。

河水中的Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>一般来自于大气降水输入、蒸发岩的风化溶解和人为活动输入<sup>[14]</sup>。研究表明,通过比较Cl<sup>-</sup>/(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)当量浓度的比值可以判断Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>受何种岩性的影响较大<sup>[46]</sup>(图7)。该当量浓度比为1:1时,表明流域内水体中Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>主要受蒸发岩(钾长石、钠长石)溶解作用的影响。研究区河水中Na<sup>+</sup>含量大于Cl<sup>-</sup>,即Cl<sup>-</sup>/(Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)比值点均落在1:1关系线右下侧,这表明Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>的来源除了受蒸发岩影响外,还可能与大气降水或人类

活动输入有关。为论证推测,结合离子间的相关性分析发现,Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>与人为源离子NO<sub>3</sub><sup>-</sup>相关性低,而与海洋性离子Cl<sup>-</sup>有较好的相关性。因此,流域内水体中Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>主要来自蒸发岩(NaCl和KCl)的溶解作用和大气降水的输入。

图7 河水Cl<sup>-</sup>与Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>的当量浓度比Fig. 7 Equivalent concentration ratio between Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> in river water

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的主要来源包括农业活动氮肥的使用、生物质燃烧、人畜排泄物、工业生产污水排放等<sup>[46]</sup>。由离子间的相关性分析可知,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>仅与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>相关性较好,与其他各离子相关性较差,因此NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>主要源于工业和农业生产活动。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在县城含量明显增多,结合相关性分析,表明SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在库河段可能来自于石膏的风化,而在额河富蕴段主要来源于人类活动的离子输入。

F<sup>-</sup>与各离子相关性极低,且F<sup>-</sup>的含量极低(表3),表明来源相对较单一。位于库河下游与富蕴县

城之间的可可托海地区发育了大量花岗伟晶岩脉,有成群成带分布的稀有金属、白云母和宝石等矿床、矿点<sup>[32]</sup>,萤石( $\text{CaF}_2$ )作为花岗岩、伟晶岩、正长岩的次生矿物在可可托海地区广泛分布,可推断研究区河水中 $\text{F}^-$ 主要来源于含氟岩石(萤石)的风化释放。

#### 4 结论

本文通过对额尔齐斯河源区径流样品进行研究分析,得出以下结论:

(1) 额河源区河水pH值介于7.12~7.64,平均值为7.33,呈弱碱性,TDS介于24.4~140.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,整体属于低矿化度水。电导率与TDS相关性较好, $\text{EC}=2.008\text{ TDS}-0.211$  ( $N=36$ ,  $R^2=0.95$ )。 $\text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Ca}^{2+}$ 是浓度最高的阴、阳离子,离子质量浓度序列为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ,水化学类型由库河段的 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ 型转变为额河富蕴段的( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )- $\text{Ca}^{2+}$ 型。

(2) 通过Gibbs图、Piper三线图以及相关系数矩阵分析可知,额河源区春季河水离子主要受水-岩风化作用控制, $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 来源于碳酸盐岩(石灰石和白云石)的风化以及土壤的输送; $\text{SO}_4^{2-}$ 在库河段受石膏的风化作用影响,在额河富蕴段县城附近主要源于人类活动的离子输入; $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Cl}^-$ 主要来自长石类矿物的风化水解,也有大气降水的输入; $\text{F}^-$ 主要来自含氟岩石的风化释放; $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 主要来自生物活动和人类活动污染等。

(3) 额河源区春季河水稳定同位素组成中重同位素从库河段至额河富蕴段随着海拔降低逐渐富集,海拔每降低100 m,  $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ 的增加量分别为0.08‰~0.15‰和0.91‰~1.38‰。

#### 参考文献(References):

- [1] Zhou Jiaxin, Ding Yongjian, Zeng Guoxiong, 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. [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.]
- [2] Han G, Liu C. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China [J]. Chemical Geology, 2004, 204(1/2): 1–21.
- [3] Zhao Aifang. Hydrochemical characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013. [赵爱芳. 天山托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.]
- [4] Pu Jianchen, Wang Ping, Huang Cuilan. Chemical characteristics of glacier ice, snow and water in the Yangtze River source region [J]. Environmental Science, 1988(4): 14–19. [蒲健辰, 王平, 皇翠兰. 长江江源地区冰川冰、雪、水的化学特征[J]. 环境科学, 1988(4): 14–19.]
- [5] Ren Jiawen. A study of chemical characteristics of snow, precipitation and surface water in the basin of the Glacier No. 29 Danghe Nanshan, Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1999, 21(2): 151–154. [任贾文. 祁连山党河南山扎子沟29号冰川区雪、降水和地表水化学特征研究[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 151–154.]
- [6] Wang Jian, Ding Yongjian, Xu Junli, et al. Hydrochemical characteristic analysis of melting water flow in Keqikaer Glacier, Tianshan (West) Mountains [J]. Environmental Science, 2006(7): 1305–1311. [王建, 丁永建, 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(7): 1305–1311.]
- [7] Wang Xiaoyan, Li Zhongqin, Zhou Ping, et al. River water chemical characteristics and controls during the spring flood period in Yushugou basin, Eastern Tianshan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 922–930. [王晓艳, 李忠勤, 周平, 等. 天山哈密榆树沟流域春汛期水化学特征及其控制因素研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 922–930.]
- [8] Wang Xiaoyan, Li Zhongqin, Jiang Chanwen, et al. Hydrochemical characteristics and causes of the summer river water in Yushugou basin, Eastern Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1385–1393. [王晓艳, 李忠勤, 蒋缠文, 等. 天山哈密榆树沟流域夏季洪水期河水水化学特征及其成因[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1385–1393.]
- [9] Feng Fang, Feng Qi, Liu Xiande, et al. A study of hydrochemical characteristics of meltwater runoff of the Urumqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 183–191. [冯芳, 冯起, 刘贤德, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川融水径流水化学特征研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 183–191.]
- [10] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, 36(9): 1061–1066.
- [11] Millot R, Gaillardet J, Dupré B, et al. Northern latitude chemical weathering rates: clues from the Mackenzie River basin [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(7): 1305–1329.
- [12] Huh Y, Tsoi M Y, Zaitsev A, et al. The fluvial geochemistry of the rivers of the 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.
- [13] Galy A, France-Lanord C. Weathering processes in the Gangers-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget [J]. Chemical Geology, 1999, 159(1/2/3/4): 31–60.
- [14] 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.]
- [15] Le Jiaxiang, Wang Dechun. Chinese river water chemistry characteristics [J]. Acta Geographica Sinica, 1963(1): 1–13. [乐嘉祥, 王德春. 中国河流化学特征[J]. 地理学报, 1963(1): 1–13.]
- [16] Chen Jingsheng, Xia Xinghui. Progress in river water chemistry research in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 1999(4): 290–294. [陈静生, 夏星辉. 我国河流化学研究进展[J]. 地理科学, 1999(4): 290–294.]
- [17] Feng Fang, Feng Qi, Li Zhongqin, et al. Analysis on the hy-

- drochemical characteristics in the upper reaches of Urumqi River basin, Eastern Tianshan [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 143 – 155. [冯芳, 冯起, 李忠勤, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区水化学特征分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 143 – 155.]
- [18] Feng Fang, Li Zhongqin, Zhang Mingjun, et al. Hydrochemical characteristics and controls of runoff at the headwaters of the Urumqi River, Eastern Tianshan Mountain [J]. *Resources Science*, 2011, 33(12): 2238 – 2247. [冯芳, 李忠勤, 张明军, 等. 天山乌鲁木齐河源区径流水化学特征及影响因素分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(12): 2238 – 2247.]
- [19] Wang Caixia, Zhang Jie, Dong Zhiwen, et al. Glacier meltwater runoff process analysis based on  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  isotope and chemistry in the Laohugou Glacier basin of the Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(5): 927 – 935. [王彩霞, 张杰, 董志文, 等. 基于氢氧同位素和水化学的祁连山老虎沟冰川区径流过程分析[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(5): 927 – 935.]
- [20] Feng Yawei, Sun Ziyong, Bu Jianwei, et al. The hydrogeochemical characteristics of the river water in the section from Bayi Glacier to Huangzangsi of the Heihe River, Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(3): 680 – 687. [冯亚伟, 孙自永, 补建伟, 等. 祁连山黑河源区八一冰川 – 黄藏寺段河水水文地球化学特征[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(3): 680 – 687.]
- [21] Wu Jinkui, Yang Qiyue, Ding Yongjian, et al. Variations and simulation of stable isotopes in precipitation in the Heihe River basin [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 1857 – 1866. [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.]
- [22] Liu Zhao. The characterization of hydrochemistry and isotopic in the natural water of the Yarlung Tsangpo Lhasa-Nyingchi [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. [刘昭. 雅鲁藏布江拉萨 – 林芝段天然水水化学及同位素特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.]
- [23] Jiang Shengxia, Yuan Yujiang, Qin Li, et al. Analysis on climate and hydrology change characteristics during historical time in the Altai Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(3): 672 – 679. [姜盛夏, 袁玉江, 秦莉, 等. 阿尔泰山历史时期气候水文变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(3): 672 – 679.]
- [24] Li Jie, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Analysis of climate characteristics and trend of the Irtysh River basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(3): 311 – 315. [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.]
- [25] Li Xiangying, Qin Dahe, Han Tianding, et al. Research progress on atmospheric precipitation chemistry in the cryosphere region of western China [J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 3 – 16. [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.]
- [26] Wei Hong, Wu Jinkui, Shen Yongping, et al. Hydrochemical characteristics of snow meltwater and river water during snow-melting period in the headwaters of the Irtysh River, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(4): 1345 – 1352. [韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 等. 额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(4): 1345 – 1352.]
- [27] Jing Xuehui. Study on landscape pattern of vegetation and spatial variation of biodiversity in the Irtysh River basin, Xinjiang [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008. [井学辉. 新疆额尔齐斯河流域植被景观格局与生物多样性空间变化规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.]
- [28] Zhang Wei. Study on snow hydrological processes in the headwater of Irtysh River, Chinese Altai Mountains [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2016. [张伟. 阿尔泰山额尔齐斯河源区积雪水文过程研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2016.]
- [29] Wu Xuejiao, Shen Yongping, Wang Ninglian, et al. Coupling the WRF model with a temperature index model based on remote sensing for snowmelt simulations in a river basin in the Altai Mountains, north-west China [J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(21): 3967 – 3977.
- [30] Gao Shentong, Xu Changchun. Detrended fluctuation analyses on precipitation and air temperature in the headwaters of the Irtysh River basin over the last 50 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 706 – 716. [高沈瞳, 徐长春. 额尔齐斯河流域上游地区近 50 a 来气温和降水变化的 DFA 分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 706 – 716.]
- [31] He Bin, Zhang Wei, Shen Yongping, et al. Comparison of precipitation observed by T-200b and standard rain gauge and precipitation change during 1980 – 2015 in the headwaters of Irtysh River, Chinese Altai Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1192 – 1199. [贺斌, 张伟, 沈永平, 等. 新疆阿尔泰山额尔齐斯河源区不同降水观测方法对比分析及 1980 – 2015 年降水变化研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1192 – 1199.]
- [32] Zhao Jie. Quantitative prediction and estimation on rare metals deposit in Koktokay, Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008. [赵洁. 新疆富蕴可可托海地区稀有金属定量预测与评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.]
- [33] Chen Tingjian, Hu Yukun, Liu Yanyan, et al. Distribution characteristics and storage of soil organic carbon in the southern slope Altai Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(6): 1231 – 1239. [陈廷舰, 胡玉昆, 柳妍妍, 等. 阿尔泰山南坡土壤有机碳密度的分布特征和储量估算[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1231 – 1239.]
- [34] Feng Huilan, Wang Hegen. Land use survey in the eastern region of Altay, Xinjiang [J]. *Economic Geography*, 1982(3): 181 – 186. [鄯慧兰, 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.]
- [35] Li Guanghui. Study on indicator selection in acid-base neutralization titration [J]. *Chemical Management*, 2017(7): 119. [李光辉. 酸碱中和滴定中的指示剂选择研究[J]. *化工管理*, 2017(7): 119.]
- [36] Brown G H. Glacier meltwater hydrochemistry [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(7): 855 – 883.
- [37] Wu Xiaobo, Li Quanlian, Song Gaoju, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of runoff at Qiye Glacier, Qilian Mts. [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(3): 613 – 618. [武小波, 李全莲, 宋高举, 等. 祁连山七一冰川融水化学组成及演化特征[J]. *环境科学*, 2008, 29(3): 613 – 618.]
- [38] Pu Tao, He Yuanqing, Zhu Guofeng, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface-groundwater in Lijiang Basin [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 48 – 54. [蒲焘, 何元庆, 朱国锋, 等. 丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 48 – 54.]

- [39] He Zhengqiang, Li Zhongqin, Chen Tianle, et al. Changing process of hydrochemical composition in stream in glacier area, the Tianshan Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34 (4): 881 – 888. [何正强, 李忠勤, 陈天乐, 等. 天山冰川区山溪河水化学成分变化过程分析[J]. *干旱区研究*, 2017, 34 (4): 881 – 888. ]
- [40] Li Xueli. *Hydrogeochemistry* [M]. 3rd ed. Beijing: Atomic Energy Press, 2010. [李学礼. *水文地球化学* [M]. 3 版. 北京: 原子能出版社, 2010. ]
- [41] Wang Ninglian, Zhang Shibiao, Pu Jianchen, et al. Seasonal variation of  $\delta^{18}\text{O}$  in river water in the upper reaches of Heihe River basin and its influence factors [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 914 – 920. [王宁练, 张世彪, 蒲健辰, 等. 黑河上游河水中  $\delta^{18}\text{O}$  季节变化特征及其影响因素研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 914 – 920. ]
- [42] Lambs L, Balakrishna K, Brunet F, et al. Oxygen and hydrogen isotopic composition of major Indian rivers: a first global assessment [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19: 3345 – 3355.
- [43] Wu Xiaobo, Li Quanlian, He Jianqiao, et al. Hydrochemical characteristics and inner-year process of upper Heihe River in summer half year [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28 (6): 1190 – 1196. [武小波, 李全莲, 贺建桥, 等. 黑河上游夏半年河水化学组成及年内过程[J]. *中国沙漠*, 2008, 28 (6): 1190 – 1196. ]
- [44] Wang Ruijiu. Three-line diagram and hydrogeological interpretation [J]. *Engineering Investigation*, 1983(6): 6 – 11. [王瑞久. 三线图解及其水文地质解释[J]. *工程勘察*, 1983(6): 6 – 11. ]
- [45] Zhang Yanan, Gan Yiqun, Li Xiaoqian, et al. Water chemical characteristics and controlling factors of the Yangtze River in the wet season, 2013 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(4): 645 – 654. [张亚男, 甘义群, 李小倩, 等. 2013 年长江丰水期河水化学特征及控制因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(4): 645 – 654. ]
- [46] Zhu Yiwen. Study on stable isotope and water chemistry characteristics of different water bodies in the catchment area of the Heihe River basin in Xi'an [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017. [朱艺文. 西安黑河流域汇水区不同水体稳定同位素和水化学特征研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017. ]

## Study on the hydrochemical and stable isotope characteristics at the headwaters of the Irtysh River in spring

LIU Feng<sup>1</sup>, LI Zhongqin<sup>1,2</sup>, HAO Jianan<sup>3</sup>, LIANG Pengbin<sup>1</sup>, WANG Fanglong<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. College of Earth and

Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the water samples, collected from the headwaters to Fuyun stream segment of the Irtysh River in April 2018, this study analyzed the hydrogen and oxygen stable isotopes and physicochemical indices [including major chemical ions, pH, electrical conductivity, total dissolved solids (TDS) etc.] by using Gibbs diagram, Piper three-line diagram and correlation matrix analysis comprehensively. Results show that river water presents weak alkalinity and belongs to low salinity water, with a mean TDS of  $72.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  in spring. The rank order for major ions is  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ , of which  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  are the major anions and cations. Hydrochemical type of the river water changes from  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$  to  $(\text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-})$ - $\text{Ca}^{2+}$  from the Kuyrte River to the Fuyun stream segment of the Irtysh River. The ion content increases with flow extension and increases in touching-time with riverbed, but this process has difference due to effect of various factors. River water ions are mainly controlled by water-rock weathering, which are mainly originated from weathering and hydrolysis of carbonate rocks, weathering of feldspar minerals and downstream human activities. The  $\delta\text{D}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  increase gradually along the river and enrichment phenomenon occurs in downstream.

**Key words:** Irtysh River; hydrochemistry; ion sources; stable isotope

(责任编辑: 侯书贵; 编辑: 武俊杰)