

引用格式:李瀛,杨余辉. 伊犁喀什河流域丰水期氢氧稳定同位素及水化学特征[J]. 山地学报, 2023, 41(6): 811-823.

LI Ying, YANG Yuhui. Stable hydrogen and oxygen isotopes and hydrochemical characteristics of the Ili Kashi River basin of China during Wet Season [J]. Mountain Research, 2023, 41(6): 811-823.

伊犁喀什河流域丰水期氢氧稳定同位素 及水化学特征

李 瀛, 杨余辉*

(新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘 要: 气温升高加速高山冰雪消融,造成伊犁喀什河的水文循环及水量平衡发生变化。关于该流域水汽来源、水体补给等问题的研究大都基于年际变化分析、氢氧稳定同位素的季节性对比,缺少针对丰水期、枯水期的特征分析,不利于系统探究丰水期及枯水期水体水化学控制因素或水体补给情况的个别差异。本文利用 2018—2021 年丰水期在新疆伊犁喀什河流域采集的不同水体水样,运用不同水体氢氧稳定同位素方程线比对及离子比值法,综合 Piper 三线图、Gibbs 图等分析区域水体水化学、氢氧稳定同位素特征,探讨水体补给问题。结果表明:(1)研究区水体均呈弱碱性。地表水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,地下水受石膏溶解影响, SO_4^{2-} 含量增加,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$ 型;(2)岩石风化作用是研究区地表水与地下水水化学性质的主要控制因素。地表水受到降水的轻微影响但不显著、井水受蒸发-浓缩作用影响;地表水离子主要来源是硅酸盐矿物或石膏,地下水离子主要来源为碳酸盐、石膏或硅酸盐矿物;(3)综合地表水与地下水水化学及不同水体氢氧稳定同位素特征分析,得出流域 5—8 月河水的主要补给来源是降水及冰雪融水,9 月河水的主要补给来源是地下水及降水。本文对伊犁喀什河流域不同水体进行水化学及氢氧稳定同位素组成分析对了解流域水体补给关系、丰富内陆河流域的水文循环研究、保护当地水资源平衡和水环境具有重要意义。

关键词: 伊犁喀什河;氢氧稳定同位素;水化学;水体补给关系

中图分类号: X143

文献标志码: A

在全球变暖的影响下,中国西北干旱区湖泊萎缩、河川径流量减少,区域水资源合理开发利用及保护受到极大限制。新疆喀什河位于西天山山区,是伊犁河的三大源流之一,融水与季节性积雪融水是喀什河流域重要的水源补给^[1]。气温升高加速高山冰雪消融,区内大气降水、地表水、积雪融水及地下水之间的转化,改变整个流域的水文循环及水量平衡,影响了区域环境生态的稳定性。

水体中的主要离子以及氢氧稳定同位素具有相对稳定的化学性质,可以反映水体在水循环过程中

与周围环境的相互作用,对地表水的水循环过程具有指示作用^[2-8],被广泛应用于各种水体转化关系等水文学问题^[9-17]。开展喀什河流域丰水期氢氧稳定同位素及水化学特征分析,对揭示流域水循环机理,促进规范管理流域水资源以及提升水资源有效利用具有重要意义。

国内学者对伊犁喀什河流域的水化学与氢氧稳定同位素研究已经逐渐从大气降水、地表水等单一水体的水化学与氢氧稳定同位素特征^[18-22]以及水汽来源分析^[23]扩大到研究流域内不同水体组分特

收稿日期(Received date): 2023-06-29;改回日期(Accepted date): 2023-11-11

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41761004)。[National Natural Science Foundation of China(41761004)]

作者简介(Biography): 李瀛(2000-),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向:干旱区水资源。[LI Ying(2000-),female, born in Tangshan, Hebei province, M. Sc. candidate, research on water resources in arid area]E-mail: xjnu_liying@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 杨余辉(1980-),男,博士,教授,主要研究方向:干旱区水资源。[YANG Yuhui(1980-),male, Ph. D., professor, research on water resources in arid area]E-mail: yangyuhuiw@sohu.com

征进而分析不同水体之间的相互转化^[24-26],明确了流域内氢氧稳定同位素夏季富集、冬季贫化的特征,岩石风化、蒸发-浓缩是流域地表水水化学的主控因素^[19-24],影响其组分构成。喀什河流域地表径流受到大气降水、地下水、积雪融水及裂隙基岩水的补给,但对研究区水化学与氢氧稳定同位素的特征分析、水体补给、水资源利用等研究,大多基于氢氧稳定同位素与水化学的年际变化或月际变化,缺乏针对丰水期、枯水期的特征分析,没有明晰丰水期或枯水期内水化学控制因素的其他可能及水体补给的细微差别。

本文聚焦流域丰水期的不同水体特征分析,对伊犁喀什河流域内不同水体进行水化学与氢氧稳定同位素特征分析,结合 Gibbs 图、Piper 三线图、离子比值、水体方程线比对等方法,分析流域水体水化学类型、控制因素及离子来源,综合水化学与氢氧稳定同位素特征分析讨论丰水期河水与其他水体的补给关系。本研究对喀什河氢氧稳定同位素及水化学特征的研究及水文循环有进一步补充意义,可以为区域合理开发、利用水资源提供参考。

1 研究区概况

喀什河,又称哈什河,发源于天山山脉,与依连哈比尔尕相连接,地势东高西低,河道顺直,在伊宁县墩麻扎附近与巩乃斯河相交汇后汇入伊犁河。河流全长 304 km,流域面积 8656 km²,冰川融水补给量为 5.52 × 10⁸ m³,是伊犁河的第二大支流。喀什河流域北为天山山脉的博罗科努山和依连哈比尔尕山,南为天山支脉阿吾拉勒山,形成喀什河谷地,呈羽毛状,地形四面环山,平均海拔为 2800 ~ 3500 m,属于温带大陆性气候,区域内气候差异明显,昼夜温差大,夏季降水丰富,年平均降水量达 400 mm,山地气候特征明显。

流域内植被主要为亚高山草甸;海拔 2800 m 以下区域内为森林、草原;下游的尼勒克县山前倾斜平原,拥有丰富的光热资源,为流域内主要灌区和农牧业生产基地^[27]。流域内地质条件主要有以片麻岩、石英片岩、大理岩为主的变质岩和花岗岩,以砂岩和凝灰岩为主的碎屑岩;多层结构的砾质土体主要有由泥岩、砂岩、砾岩构成的互层强风化岩组,其中泥岩含有较多的石膏和其他易溶盐类^[28]。

2 水样采集与测试

根据该流域水系的分布状况,于 2018—2021 年 5—9 月收集大气降水和河水样品,后为满足研究需要,于 2020—2021 年 5—9 月进行补充实验,收集地下水样品,采样点分布如图 1、表 1 所示。河水样品及地下水样品每隔 3 d 采集一次,共采集大气降水

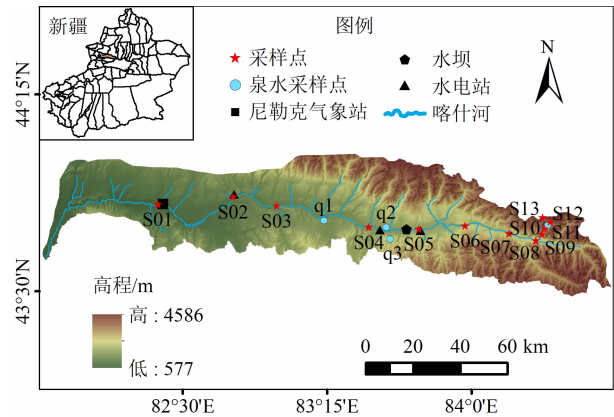


图 1 伊犁喀什河流域水体采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of water sampling points in the Kashi River basin, Ili, China

表 1 伊犁喀什河水体采样点位置

Tab. 1 Water sampling locations of the Kashi River in Ili, China

采样点	纬度	经度	海拔/m
S01	43°49′32.1″N	82°22′26.18″E	964
S02	43°50′37.45″N	82°46′55.29″E	1198
S03	43°48′12.93″N	83°09′11.50″E	1381
S04	43°43′10.63″N	83°30′6.71″E	1606
S05	43°42′25.73″N	83°45′0.6″E	1770
S06	43°43′12.56″N	84°02′8.18″E	1983
S07	43°39′8.40″N	84°21′20.82″E	2251
S08	43°40′26.78″N	84°24′37.78″E	2600
S09	43°41′13.39″N	84°25′16.60″E	2731
S10	43°42′33.99″N	84°26′40.75″E	3004
S11 (泉水)	43°42′56.83″N	84°26′39.02″E	3207
S12 (融雪水、融冰水)	43°43′59.88″N	84°25′14.47″E	3426
S13 (融雪水、融冰水)	43°42′32.59″N	84°26′57.21″E	3453
79 团	43°48′11″N	83°19′12″E	1488
q1 (泉水)	43°45′40″N	83°15′29″E	1441
q2 (泉水)	43°42′33″N	83°34′35″E	1681
q3 (泉水)	43°41′04″N	83°35′51″E	1908

样品 96 个、地表水(河水)样品 125 个、地下水(泉水和井水)样品 32 个、积雪融水样品 3 个,并在 7 月进行不同海拔采样点地表水的采集,最后分别进行氢氧稳定同位素测定与水化学测试,共得到数据 539 个。

采集过程中避免水样污染产生误差,所有样品均密封冷藏保存,避免样品蒸发分馏导致检测值误差较大。检测时待样品恢复室温后用孔径为 0.45 μm 的滤膜抽滤,以防杂质污染或损害仪器,过滤后进行数据检测。

通过液态水同位素分析仪(LGR DLT-100)进行样品的初步测量,测量后的样本 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 精度分别达到 0.3‰和 0.1‰。测量结果用 VSMOW 进行校正。主要离子指标在中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室进行测定。使用电感耦合等离子发射光谱仪(美国安捷伦 735ICP-OES)测试水体中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} ,水体中的 K^{+} 、 HCO_3^{-} 和 CO_3^{2-} 使用梅特勒 G20 型电位滴定仪测试, Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 使用离子色谱仪(美国戴安 ICS-5000)测试,离子浓度测试精度均达到 0.01 mg/L。pH 值采用电位测定法,测试精度达 0.01。矿化度(TDS)的测定方法为残渣烘干-重量法,测试精度达 0.01 mg/L。

3 结果

3.1 不同水体水化学特征

3.1.1 地表水与地下水水化学特征分析

地表水体 pH 在 6.08 ~ 8.22 波动,平均值为

7.92;地下水体 pH 偏高,在 7.68 ~ 8.43 变动,平均值为 8.17,两种水体均呈弱碱性(表 2)。地表水体矿化度的变幅为 35.4 ~ 539.6 mg/L,地下水体矿化度的变幅为 712.87 ~ 1045.31 mg/L,地表水的变化幅度较大。

如表 2 所示,河水中各阳离子含量由大到小为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$;阴离子的含量由大到小为: $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{CO}_3^{2-}$ 。水样数据中 CO_3^{2-} 的含量为零,是因为 CO_3^{2-} 和 HCO_3^{-} 在水体中的相对含量取决于水体的 pH 值,当 $\text{pH} < 8.3$ 时,水体中仅存在 HCO_3^{-} 。根据水样测试结果,研究区河水和地下水 pH 值基本小于 8.3,因此流域水体中仅存在 HCO_3^{-} [29]。地下水中各阴、阳离子含量排序与河水基本一致,阳离子含量由大到小为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^{+}$,阴离子的含量由大到小为: $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-} > \text{CO}_3^{2-}$ 。

3.1.2 地表水与地下水水质参数相关性分析

各离子之间大多存在较强相关性(表 3)。其中,下三角中 Mg^{2+} 和 Na^{+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 、 Na^{+} 和 SO_4^{2-} 之间均存在着极强的相关性,相关系数分别为 0.99、0.96 和 0.95。地表水矿化度与 HCO_3^{-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 都具有相对强的相关关系,这说明 HCO_3^{-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 均是喀什河流域地表水矿化度的贡献者 [30]。

上三角中, Ca^{2+} 和 K^{+} 之间的相关性极为显著,其相关系数为 0.95; Na^{+} 和 SO_4^{2-} 之间的相关性较为显著,相关系数为 0.79; Ca^{2+} 、 K^{+} 都与 Na^{+} 之间存在着强烈的负相关关系,相关系数分别为 -0.92 和 -0.96。地下水矿化度与 HCO_3^{-} 、 Ca^{2+} 和 K^{+} 存

表 2 地表水与地下水水化学特征统计

Tab. 2 Statistics of hydrochemical characteristics of surface water and groundwater

水体类型	特征值	主要离子化学组分								
		pH	TDS	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}
地表水	最大值	8.22	539.60	160.53	36.19	32.37	17.94	392.68	238.91	23.16
	最小值	6.08	35.40	2.10	0.20	0.15	0.44	2.58	1.58	0.11
	平均值	7.92	202.19	37.24	4.83	3.29	1.91	97.69	19.74	1.80
地下水	最大值	8.43	1045.31	149.32	57.79	142.28	4.51	435.31	244.83	33.49
	最小值	7.68	712.87	35.68	35.53	74.59	1.29	265.73	192.67	26.37
	平均值	8.17	892.33	117.36	50.28	112.29	3.08	350.04	221.17	31.19

注:pH 无量纲,其余组分单位为 mg/L。

表 3 地表水与地下水水质参数相关性系数矩阵

Tab.3 Correlation between surface water and groundwater parameters

指标	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS
Ca ²⁺	1	0.95 **	-0.16	-0.92 **	0.75 **	-0.03 *	-0.69 **	0.74 **
K ⁺	0.64 **	1	-0.38	-0.96 **	0.65 **	-0.13	-0.78 **	0.66 **
Mg ²⁺	0.90 **	0.71 **	1	0.41 **	-0.19	0.37 **	0.56 **	-0.12
Na ⁺	0.86 **	0.76 **	0.99 **	1	-0.53 **	0.22	0.79 **	-0.53 **
HCO ₃ ⁻	0.85 **	0.62 **	0.93 **	0.89 **	1	0.16 **	-0.43 **	0.86 **
Cl ⁻	0.80 **	0.82 **	0.88 **	0.93 **	0.71 **	1	0.65 **	0.26
SO ₄ ²⁻	0.87 **	0.75 **	0.95 **	0.96 **	0.79 **	0.94 **	1	-0.36 **
TDS	0.37 **	0.04	0.25 **	0.18 *	0.40 **	0.04	0.10	1

注：* 表示相关性在 0.01 水平上显著，* 表示相关性在 0.05 水平上显著；上三角为地下水水质参数，下三角为地表水水质参数。

在较强的相关关系,这说明这三种离子均是喀什河流域地下水矿化度的主要贡献者。

利用 Piper 图上数据点的分布可以看出不同水体的化学组成特征(图 2)。伊犁喀什河流域地表水中的阳离子大部分聚于阳离子三角图的左下角,表明 Ca²⁺ 在地表水中占优势;在阴离子三角图中所有数据点均偏向左下角,说明 HCO₃⁻ 在阴离子中占主导地位。因此,流域内地表水的主要水化学类型为 HCO₃-Ca 型。同样,地下水数据点聚集在阴离子三角图的左下部分以及阳离子三角图的中下部分,表明地下水的水化学类型为 HCO₃-SO₄-Na-Ca 型。

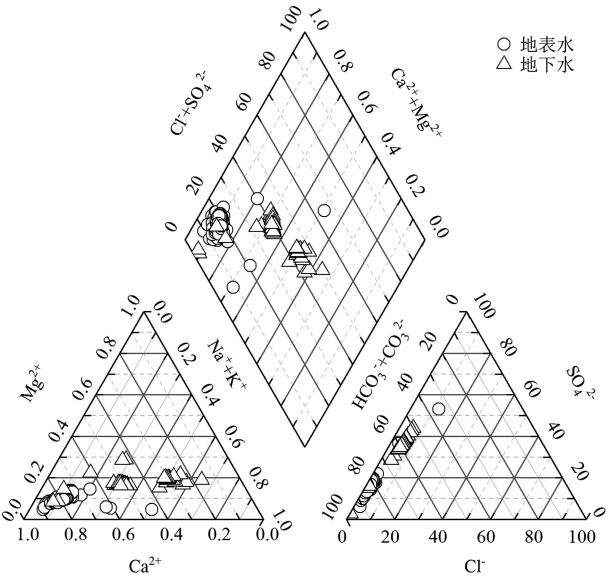


图 2 伊犁喀什河流域地表水与地下水水化学 Piper 图
Fig.2 Piper of surface water and groundwater hydrochemistry
in the Ili Kashi River, China

3.2 氢氧稳定同位素与过量氦特征分析

3.2.1 氢氧稳定同位素特征分析

流域内大气降水分析数据显示,降水中 δ¹⁸O 和 δD 的变化范围分别是 -19.4‰~3.6‰、-128.36‰~9.91‰,平均值分别为 -7.62‰、-45.84‰,δD 的变幅大。拟合得到当地丰水期的大气降水线(LMWL):δD=6.61δ¹⁸O+4.54(R²=0.89,n=96)。河水 δ¹⁸O 和 δD 的变化范围分别是 -18.53‰~-3.84‰和 -104.86‰~-14.18‰,平均值分别为 -13.28‰和 -84.55‰。河水线方程(LRWL)为 δD=5.75δ¹⁸O-8.16(R²=0.70,n=124)。地下水 δ¹⁸O 和 δD 的变化范围分别是 -15.75‰~-10.38‰和 -99.87‰~-84.95‰,平均值分别为 -13.53‰和 -94.68‰。地下水线为 δD=2.44δ¹⁸O-61.61(R²=0.54,n=58)。积雪融水的 δ¹⁸O 和 δD 的变化范围分别是 -22.46‰~-9.81‰和 -167.54‰~-56.87‰,平均值分别为 -16.97‰和 -119.75‰。积雪融水线为 δD=8.77δ¹⁸O+29.04(R²=0.99,n=3)。

由于地下水数据不完整,因此仅选择 2021 年 5—7 月地下水数据进行分析,同时,为了排除年际变化对水体氢氧稳定同位素的影响,选择同时段大气降水和地表水数据进行不同水体补给关系分析。拟合得到喀什河流域丰水期不同水体 δD 和 δ¹⁸O 关系图(图 3)。总体来看,研究区不同水体 δD 和 δ¹⁸O 之间具有较好的线性关系,但由于受蒸发程度及补给来源的影响,各水体之间的斜率和截距有差别,且各水体方程线间互有不同程度偏离,说明各水体间

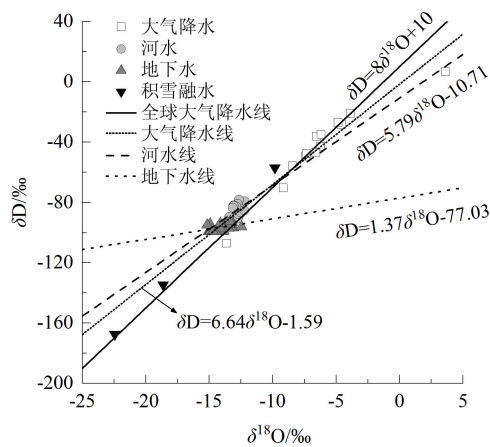


图3 不同水体中 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系

Fig. 3 Relationship between $\delta^{18}O$ and δD in different water bodies

补给关系密切。

3.2.2 不同水体过量氘特征分析

研究区不同水体的过量氘值变幅如表 4 所示, 通过过量氘的变化可以分析出蒸发、水汽来源等影响因素的变化。过量氘变化较大, 说明其蒸发与水汽来源等影响因素变化大。

表 4 不同水体过量氘值

Tab. 4 D-excess values in different water bodies

d-excess 数值类型	过量氘值/‰			
	大气降水	河水	地下水	积雪融水
最大值	53.78	43.49	26.39	21.64
最小值	-32.75	10.85	3.65	12.11
平均值	15.10	21.66	13.59	15.97

以 $d\text{-excess} = 10\text{‰}$ 为界, 可以看出大气降水数据中过量氘较小的数据主要集中在 5 月下旬至 6 月 (图 4), 该时段降水受到较强烈的二次蒸发作用影响, 过量氘较低且部分出现负值。同时段河水过量氘较低, 且同月的大气降水过量氘相较于地下水的过量氘更低, 说明这个时段内河水的补给源应该是大气降水。

积雪融水的过量氘数据仅有三个, 分别是 21.64‰ (采集于 9 月)、 14.17‰ (采集于 7 月) 和 12.11‰ (采集于 7 月)。前人研究表明^[31], 过量氘低说明冰雪融速快、相对融雪量大。因此可能是 9 月温度下降, 相对融雪量减少而导致 9 月份过量氘偏大。同时, 河水过量氘逐月增大, 表明随着温度升

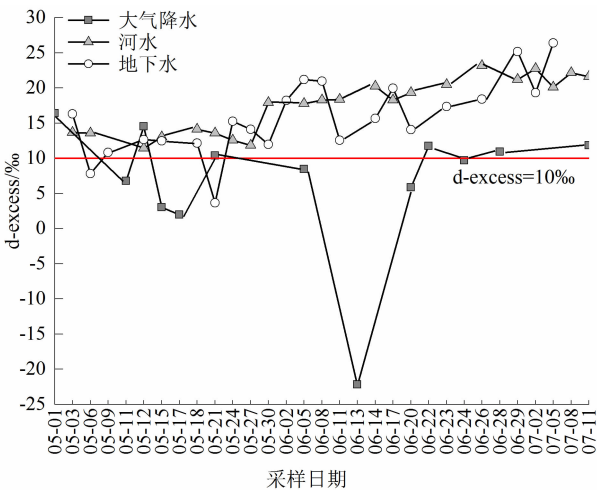


图 4 不同水体过量氘对比图

Fig. 4 Comparison of d-excess in different water bodies

高, 积雪融水对河水的补给比例增加, 导致河水过量氘不断增大。

3.2.3 不同海拔同位素与沿程过量氘特征

利用 2021 年 7 月不同海拔同位素数据进行分析, 河水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 海拔变化分别为 $-93.38\text{‰} \sim -80.22\text{‰}$, $-14.44\text{‰} \sim -12.28\text{‰}$ 。 δD 和 $\delta^{18}O$ 在海拔 1606 m 处, δD 和 $\delta^{18}O$ 出现最大值, 分别为 -80.22‰ , -12.28‰ ; 在 2600 m 处出现最小值, 分别为 -93.38‰ 和 -14.44‰ 。

河水的氢氧稳定同位素 (图 5a) 与过量氘 (图 5b) 海拔变化特征为: 海拔 1000 ~ 1600 m, δD 和 $\delta^{18}O$ 值随海拔增加而富集、过量氘降低; 海拔 1600 ~ 2600 m, δD 和 $\delta^{18}O$ 值处于一个随海拔增加而振荡贫化的状态、过量氘随海拔升高而增大; 海拔 2600 m 以上, δD 和 $\delta^{18}O$ 值继续随海拔增加而富集, 但相较于 1600 m 以下的低海拔 δD 和 $\delta^{18}O$ 值较为贫化, 而过量氘在 2250 m 以上随海拔升高而降低。

4 讨论

4.1 地表水、地下水主要离子来源分析

Gibbs 图可以判读水体水化学特征的控制因素, 图 6a 表明流域内地表水受岩石风化作用影响较大, 虽然具有一定的降水影响特征, 但并不明显。由于泉水和井水水体的水化学影响因素有差别, 故将泉水数据和井水数据分开作图分析。泉水与地表水的影响因素一致, 都受到岩石风化作用影响 (图

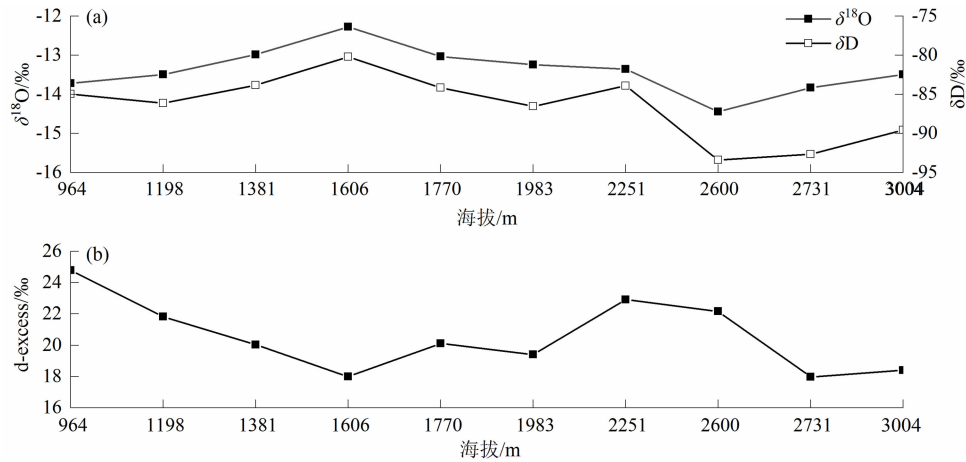


图 5 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、d-excess 变化图: (a) $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 沿程变化图; (b) d-excess 沿程变化图

Fig. 5 Variation of $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD and d-excess: (a) altitude variation of $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD ; (b) altitude variation of d-excess

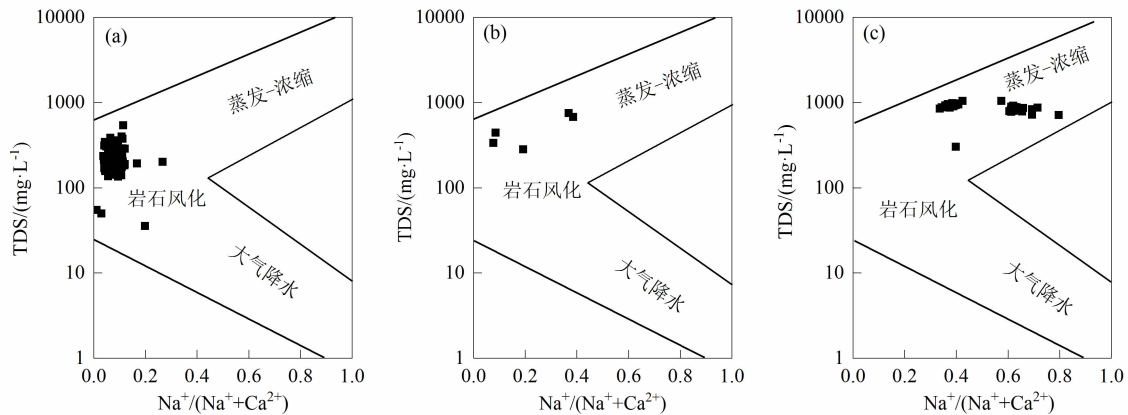


图 6 水体 Gibbs 图: (a) 地表水; (b) 泉水; (c) 井水

Fig. 6 Gibbs of water: (a) surface water; (b) spring water; (c) well water

6b)。井水数据点落在 Gibbs 图 6c 的中上部分, 表示其受岩石风化作用和蒸发-浓缩作用的双重影响。

离子比值法可以判断地表水与地下水中受到岩石风化作用影响的离子源于何种矿物的溶解。 Cl^- 主要来源于盐岩的溶解, 同时盐岩的溶解会释放等浓度的 Na^+ [32], 已有研究表明 [33], $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 浓度之比可用于确定 Na^+ 和 K^+ 的主要来源, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 浓度比为 1:1, 则说明 Na^+ 和 K^+ 主要源于岩盐溶解, 反之则来源于硅酸盐矿物。($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 与 ($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) 可以判断流域水化学是否是碳酸盐岩或者石膏的溶解控制, 如果该区水样中的 ($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) / ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) 的当量浓度比值为 1:1, 说明该区水化学受碳酸盐岩或石膏的溶解控制 [34-35]。且据前人研究 [36], $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 的比值能够进一步揭示 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的来源: $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$

=1, 说明其来源于碳酸盐 (白云石) 的溶解; $1 < \text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 2$, 说明更多来源于碳酸盐 (方解石) 的溶解; $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} > 2$, 则说明有石膏或硅酸岩的溶解。

图 7a 显示数据点均落于 1:1 等值线以上, 说明地表水中的 Na^+ 和 K^+ 主要来源于硅酸盐矿物的溶解; 图 7b 显示数据点几乎均匀分布于 1:1 等值线以上, 说明还应该其他的阳离子平衡多出阴离子的量, 说明地表水中的离子还有其他来源; 图 7c 显示水样的 $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 均大于 2, 表明该流域还有石膏或硅酸岩的溶解。综合分析可知, 地表水中的离子主要源于硅酸盐或石膏的溶解。地下水关系图 (图 7d、图 7e) 的分析与地表水 (图 7a、图 7b) 具有一致性, 但图 7f 显示水样的 $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 几乎全落于小于 2 的区域, 表明该流域主要是碳酸盐的溶解, 综合分

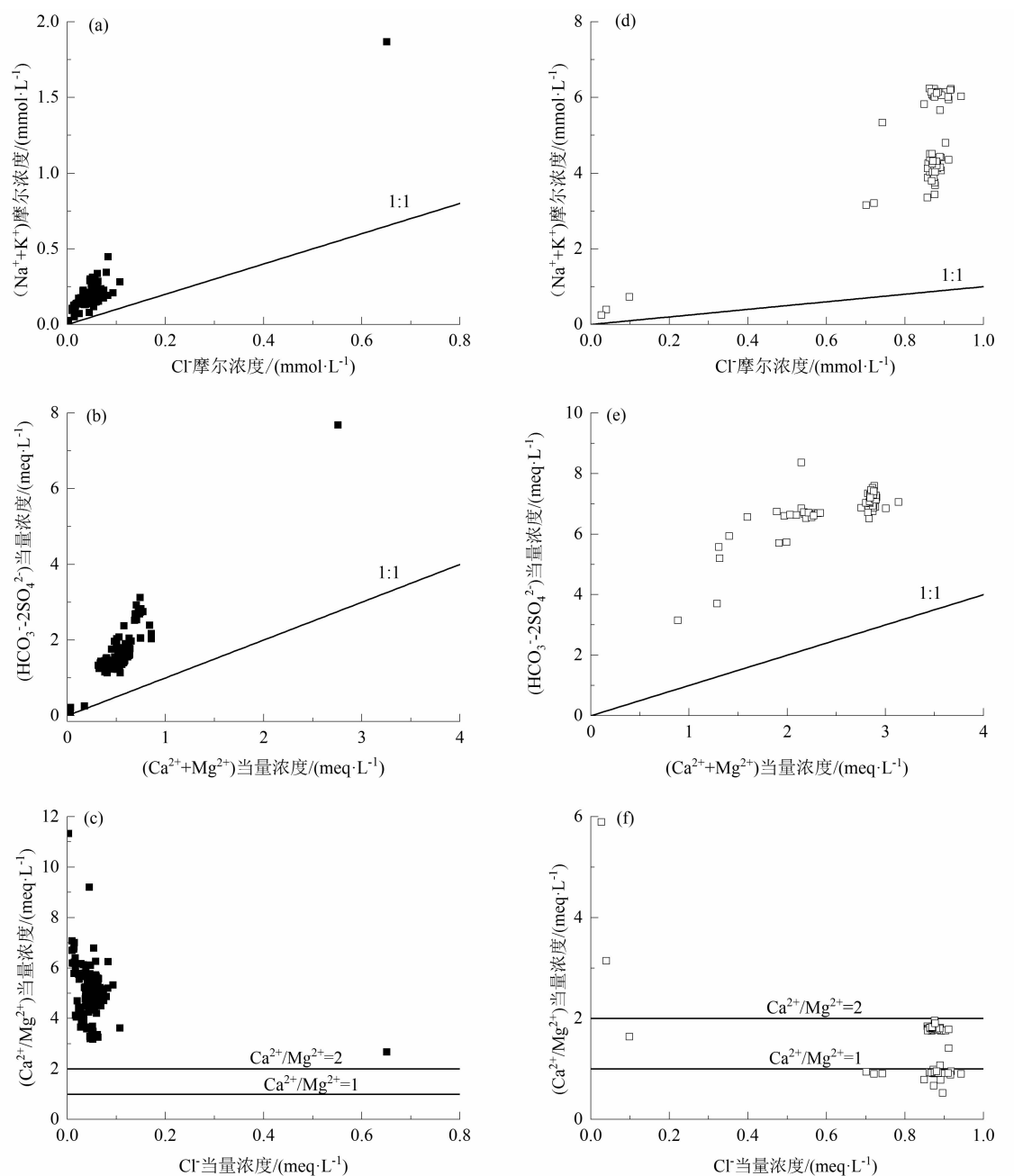


图7 离子浓度关系图:(a~c)地表水离子浓度关系图;(d~f)地下水离子浓度关系图

Fig. 7 Relationship of ion concentration: (a~c) surface water ion concentration; (d~f) groundwater ion concentration

析表明地下水中的离子主要来源于碳酸盐、石膏或硅酸盐矿物的溶解。

4.2 流域河水补给来源分析

已有研究指出^[13,37],水体中氢氧稳定同位素组成与离子质量浓度、矿化度关系不显著,说明水体主要受补给来源的影响;反之,则说明水体受蒸发作用引起氢氧稳定同位素的分馏,使得氢氧稳定同位素偏重,相应的离子质量浓度、矿化度等也会升高。表5中显示二者之间相关性并不显著,说明流域内地

表径流与地下径流主要受补给来源的影响;地下水的相关性更不显著是由于蒸发过程和与降雨混合对地下水的影响程度不同所致^[38]。由于表层岩石中含有盐矿物,当地下水流经岩石时,溶解的盐矿物会增加地下水的TDS值,由前文Gibbs图分析可知,喀什河流域水体的主要控制因素是岩石风化作用,因此地表水及地下水与盐类矿物的水岩交互作用可能改变它们的同位素组成和矿化度,且地下水矿化度大于地表水矿化度,说明地下水与矿物的交互作用

更强。

流域内地表水化学类型与前人研究的塔里木河^[39]、吉木乃诸河^[40]水化学类型一致,与乌鲁木齐河水化学类型有差异。前人研究指出,乌鲁木齐河水化学类型为 Ca-HCO₃-SO₄ 型^[41],这是由于乌鲁木齐河流域山区岩石表面存在大量硫铁矿以及氧化铁,硫铁矿在水和氧气的作用下生成氧化铁以及 SO₄²⁻,导致乌鲁木齐河水中 SO₄²⁻ 离子浓度更高。

根据喀什河流域地表水与地下水离子浓度变化表(表 6)可知,地表水 SO₄²⁻ 离子浓度增加但变幅较小,说明随着丰水期到来,地表水受地下水的流动补给作用较弱,冰雪融水沿途产生水岩交互作用较强。7 月,地表水离子浓度略微降低,这是由于大气

降水补给地表径流比例较高,稀释了河水的离子浓度,同时河水氢氧稳定同位素值增大说明河水接受冰雪融水补给;8 月,河水离子浓度略微升高,说明大气降水的补给比例逐渐减少,稀释作用减弱,同时积雪融水补给逐步减少;9 月,河水离子浓度迅速增加,可能是在冰雪融水补给逐渐减少的基础上接受了地下水补给。

流域不同水体在不同时段进行着复杂的补给与交换^[42],而氢氧稳定同位素可以有效地应用于示踪流域水文循环过程^[38]。根据不同水体 δ¹⁸O、δD 关系图(图 3)可知,流域内丰水期大气降水线斜率小于全球大气降水线,这是由于蒸发作用强烈而导致水体氢氧稳定同位素富集,符合西北干旱区云下二

表 5 地表水及地下水水化学参数与氢氧稳定同位素相关性系数矩阵

Tab. 5 Correlation between δ¹⁸O, δD and hydrochemical parameters in surface water and groundwater

指标	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TDS	δD	δ ¹⁸ O
Ca ²⁺	1	0.11	0.08	0.40	0.50 *	-0.04	0.08	-0.15	-0.27	-0.28
K ⁺	0.64 **	1	-0.08	0.04	-0.05	0.29	0.35	-0.11	-0.07	-0.34
Mg ²⁺	0.90 **	0.71 **	1	0.33	0.02	0.28	0.31	-0.18	-0.30	0.33
Na ⁺	0.86 **	0.76 **	0.99 **	1	0.84 **	0.23	-0.17	0.06	-0.23	-0.27
HCO ₃ ⁻	0.85 **	0.62 **	0.93 **	0.89 **	1	-0.001	-0.25	0.12	-0.10	-0.35
Cl ⁻	0.80 **	0.82 **	0.88 **	0.93 **	0.71 **	1	0.74 **	0.13	-0.06	0.29
SO ₄ ²⁻	0.87 **	0.75 **	0.95 **	0.96 **	0.79 **	0.94 **	1	0.01	-0.11	0.37
TDS	0.37 **	0.04	0.25 **	0.18 *	0.40 **	0.04	0.10	1	0.14	0.25
δD	-0.27 **	-0.10	-0.27 **	-0.24 **	-0.33 **	-0.11	-0.21 *	-0.15	1	0.43 *
δ ¹⁸ O	-0.33 **	-0.04	-0.23 **	-0.16	-0.27 **	-0.05	-0.18 *	-0.27 **	-0.83 **	1

注: ** 表示相关性在 0.01 水平上显著, * 表示相关性在 0.05 水平上显著;上三角为地下水相关系数,下三角为地表水相关系数。

表 6 地表水与地下水离子浓度月平均值

Tab. 6 Monthly average ion concentrations in surface water and groundwater

水体类型	月份	主要离子化学组分/(mg · L ⁻¹)							
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	TDS
地表水	5	35.61	4.41	3.24	1.91	98.19	13.19	1.83	203.59
	6	31.58	4.05	2.92	1.79	80.32	14.40	1.71	162.16
	7	27.81	3.36	2.33	1.72	73.44	14.29	1.34	164.22
	8	39.99	5.31	3.44	1.62	106.94	20.66	1.79	223.75
	9	47.73	7.51	5.61	2.86	124.12	35.56	3.28	234.35
地下水	5	145.98	49.52	94.33	4.13	366.17	214.30	31.35	366.17
	6	147.80	49.29	97.56	4.18	382.60	213.28	31.05	382.60
	7	149.06	48.11	95.66	4.23	377.74	213.05	31.00	377.74

次蒸发强烈,大气降水氢氧稳定同位素富集的特征^[43]。河水线处于其他不同水体线之间,说明河水接受大气降水、积雪融水、地下水的混合补给,河水线相较于地下水线更靠近当地大气降水线,指示出河水最主要补给源是大气降水且更容易受到大气降水的影响。相较于降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 变幅,河水变幅较小,由于河水在不同水体的综合补给作用下,氢氧稳定同位素变化较为稳定。

喀什河流域河水的补给来源依次为大气降水、冰雪融水、地下水,但不同时段主要补给源不同,这与已有研究^[44]对同为干旱区的乌鲁木齐河水体补给分析结果有一定差异:前人研究发现,乌鲁木齐河5—9月地表径流的主要补给来源是地下水^[45],其次是降水和冰川融水,但夏季(5—8月)与初秋(9月)相比,夏季时由于温度较高,冰川融水对河水的补给贡献相对更大。伊犁喀什河5—8月河水的主要补给来源是降水及冰雪融水;9月河水的主要补给来源是地下水及降水。总体来说,5—8月时段乌鲁木齐河主要补给来源是地下水,而伊犁喀什河主要补给源是降水和积雪融水。

对地表径流不同海拔的氢氧稳定同位素数据分析可知,地表水氢氧稳定同位素随海拔增加而贫化。这是因为随着海拔增加温度降低,且中海拔地带植被相对繁茂,在植物蒸腾水汽的循环作用下,云下二次蒸发被削弱。但流域高海拔地带,氢氧稳定同位素再次富集,这与已有研究^[46]认为博尔塔拉河上游同位素值低源于受到同位素值较低的积雪融水补给的结论不一致,可能是由于本研究区高海拔地区在7月相对温度较高、融雪量大,积雪融水的氢氧稳定同位素更为富集,导致流域高海拔地区氢氧稳定同位素再次呈现富集趋势。

5 结论

运用水化学与氢氧稳定同位素分析技术,结合Gibbs图、Piper三线图、离子比值、氢氧稳定同位素关系图等方法,分析喀什河流域水体水化学类型、控制因素、离子来源及水体补给关系。主要结论如下:

(1)流域内丰水期地下水和地表水水质为弱碱性,地表水矿化度的变化幅度较大。河水中主要离子浓度顺序为: $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^-$ 。地下水中主要离子浓度顺序为:

$\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{K}^+$ 。通过舒卡列夫分类法进一步得出伊犁喀什流域地表水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型;地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$ 型。

(2)岩石风化是流域地表水环境的主要影响因素且有受到降水影响趋势;泉水受到岩石风化作用影响;井水既受到岩石风化作用的影响,也受到蒸发-浓缩作用的影响。结合离子比值法分析,得出地表水离子主要来源是石膏或硅酸岩矿物,地下水离子的主要来源是碳酸盐、石膏或硅酸盐矿物。

(3)通过对水样数据拟合,得出当地大气降水线(LMWL)为 $\delta\text{D} = 6.61\delta^{18}\text{O} + 4.54$ ($R^2 = 0.89, n = 96$);河水线方程(LRWL)为 $\delta\text{D} = 5.75\delta^{18}\text{O} - 8.16$ ($R^2 = 0.70, n = 124$);地下水线(GWL)为 $\delta\text{D} = 2.44\delta^{18}\text{O} - 61.61$ ($R^2 = 0.54, n = 58$);积雪融水线(SMWL)为 $\delta\text{D} = 8.77\delta^{18}\text{O} + 29.04$ ($R^2 = 0.99, n = 3$);研究区地表水氢氧稳定同位素随海拔增加呈富集-贫化-富集趋势,但总体呈贫化状态。

(4)通过数据分析及讨论可知本研究区河水的补给来源依次为大气降水、冰雪融水、地下水,但时间不同,主要补给源不同;5—8月河水的主要补给来源是降水与冰雪融水;9月河水的主要补给来源是地下水与降水。

参考文献 (References)

- [1] 周永超. 天山西部喀什河流域积雪覆盖时空变化及其对气温、降水的响应[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2019: 2-9. [ZHOU Yongchao. Temporal and spatial variation of snow cover and its response to temperature and precipitation in the Kashi River Basin in the western Tianshan Mountains [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2019: 2-9]
- [2] 郭艺, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 青藏高原西南地区地表水水化学同位素特征及控制因素分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 96-107. [GUO Yi, GAN Fuping, YAN Baikun, et al. Hydrochemical - isotopic characteristics of surface water in southwest Tibetan Plateau and controlling factors analysis [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(6): 96-107] DOI: 10.19760/j. newu. zk. 2022081
- [3] GIBBS R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1972, 36(9): 1061-1066.
- [4] 寇文杰. 基于EXCEL的地下水化学舒卡列夫分类方法[J]. 工程勘察, 2013, 41(5): 48-50+96. [KOU Wenjie. Groundwater chemical Shoka Lev classification method based on EXCEL [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2013, 41(5): 48-50 +

- 96]
- [5] SQUILLACE P J, THURMAN E M, FURLONG E T. Groundwater as a nonpoint source of atrazine and deethylatrazine in a river during base flow conditions [J]. *Water Resources Research*, 1993, **29** (6): 1719–1729. DOI: 10.1029/93WR00290
- [6] 张贵玲, 角媛梅, 何礼平, 等. 中国西南地区降水氢氧同位素研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2015, **37**(4): 1094–1103. [ZHANG Guiling, JIAO Yuanmei, HE Liping, et al. Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in southwest China: Progress and prospects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, **37**(4): 1094–1103] DOI: 10.7522/j.issn.1000–0240.2015.0122
- [7] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 1961, **133**(3465): 1702–1703.
- [8] DANSGARD W. Stable isotopes in precipitation [J]. *Tellus*, 1964, **16**(4): 436–468.
- [9] 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 等. 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1920–1929. [WANG Yushan, YIN Dechao, QI Xiaofan, et al. Hydrogen and oxygen isotopic characteristics of different water and indicative significance in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1920–1929] DOI: 10.13227/j.hjxx.202108202
- [10] 宋献方, 刘鑫, 夏军, 等. 基于氢氧同位素的岔巴沟流域地表水—地下水转化关系研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, **17**(1): 8–20. [SONG Xianfang, LIU Xin, XIA Jun, et al. Interactions between surface water and groundwater in Chabagou catchment using hydrogen and oxygen isotopes [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, **17**(1): 8–20] DOI: 10.16058/j.issn.1005–0930.2009.01.001
- [11] 宋献方, 李发东, 于静洁, 等. 基于氢氧同位素与水化学的潮白河流域地下水水循环特征[J]. *地理研究*, 2007, **26**(1): 11–21. [SONG Xianfang, LI Fadong, YU Jingjie, et al. Characteristics of groundwater cycle using deuterium, oxygen 18 and hydrochemistry in Chaobai River Basin [J]. *Geographical Research*, 2007, **26**(1): 11–21]
- [12] 孙从建, 陈伟. 基于稳定同位素的海河源区地下水与地表水相互关系分析[J]. *地理科学*, 2018, **38**(5): 790–799. [SUN Congjian, CHEN Wei. Relationship between groundwater and surface water based on environmental isotope and hydrochemistry in upperstream of the Haihe River Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, **38**(5): 790–799] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.05.017
- [13] 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, 等. 巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 173–182. [SHEN Beibei, WU Jinglu, JILILI Abuduwaili, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics of the Lake Balkhash catchment, Kazakhstan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 173–182] DOI: 10.13227/j.hjxx.201905220
- [14] 艾永平. 鄱阳湖丰水期水化学特征分析[J]. *江西科学*, 2013, **31**(4): 488–490. [AI Yongping. Analysis of the water chemistry characteristics of Poyang Lake [J]. *Jiangxi Science*, 2013, **31**(4): 488–490] DOI: 10.13990/j.issn1001–3679.2013.04.037
- [15] 刘久潭, 李颖智, 高宗军, 等. 雅鲁藏布江丰水期河水离子组成特征及其控制因素[J]. *冰川冻土*, 2019, **41**(3): 697–708. [LIU Jiutan, LI Yingzhi, GAO Zongjun, et al. Ionic composition characteristics and their controlling factors in the main stream of the Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, **41**(3): 697–708] DOI: 10.7522/j.issn.1000–0240.2019.0520
- [16] 刘兵, 王贺, 姜永海, 等. 基于水化学和氢氧同位素的东宫河流域不同水体转化关系研究[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(9): 1979–1990. [LIU Bing, WANG He, JIANG Yonghai, et al. Transformation relationship of different water body in Donggong river basin based on hydro–chemistry and hydrogen–oxygen isotopes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(9): 1979–1990] DOI: 10.13198/j.issn.1001–6929.2020.05.11
- [17] 梅世杰, 曾妍妍, 周金龙. 渭干河流域浅层地下水水化学特征及成因分析[J]. *环境化学*, 2023, **42**(10): 1–10. [MEI Shijie, ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Weigan River Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, **42**(10): 1–10] DOI: 10.7524/j.issn.0254–6108.2023020908
- [18] 任杰, 田慧云, 姜纪沂, 等. 基于对应分析法伊犁河谷西部平原区地下水水化学特征[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(18): 32–39. [REN Jie, TIAN Huiyun, JIANG Jiyi, et al. Chemical characteristics of groundwater in western plain of Yili Valley based on correspondence analysis [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(18): 32–39]
- [19] 艾力哈木·艾克拉木, 周金龙, 张杰, 等. 伊犁河谷西北部地下水水化学特征及成因分析[J]. *干旱区研究*, 2021, **38**(2): 504–512. [AILIHAMU Aikelamu, ZHOU Jinlong, ZHANG Jie, et al. Chemical characteristics and genesis analysis of groundwater in northwest Yili River Valley [J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(2): 504–512] DOI: 10.13866/j.azr.2021.02.22
- [20] 刘兵. 伊犁河水化学特征及影响因素分析[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2021: 42–45. [LIU Bing. Chemical characteristics of Yili River and analysis of its influencing factors [J]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2021: 42–45]
- [21] 杨景燕, 杨余辉, 胡义成, 等. 新疆伊犁喀什河流域地表水水化学特征及控制因素[J]. *环境化学*, 2021, **40**(12): 3815–3827. [YANG Jingyan, YANG Yuhui, HU Yicheng, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Kashi River Basin, Ili, Xinjiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(12): 3815–3827] DOI: 10.7524/j.issn.0254–6108.2021042108

- [22] 张勇军, 杨余辉, 胡义成, 等. 新疆喀什河流域水化学时空变化特征及灌溉适应性评价[J]. 干旱区地理, 2023, **46**(4): 583 – 594. [ZHANG Yongjun, YANG Yuhui, HU Yicheng, et al. Temporal and spatial variation characteristics of hydrochemistry and irrigation adaptability evaluation in Kashi River Basin, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2023, **46**(4): 583 – 594] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2022.274
- [23] 曾康康, 杨余辉, 胡义成, 等. 喀什河流域降水同位素特征及水汽来源分析[J]. 干旱区研究, 2021, **38**(5): 1263 – 1273. [ZENG Kangkang, YANG Yuhui, HU Yicheng, et al. Isotopic characteristics and water vapor sources of precipitation in the Kashi River Basin [J]. Arid Zone Research, 2021, **38**(5): 1263 – 1273] DOI: 10.13866/j.azr.2021.05.08
- [24] 曾康康. 伊犁喀什河流域不同水体同位素特征及水汽来源分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2021: 13 – 36. [ZENG Kangkang. Isotopic and water vapor source analysis of different water area of Kashi River basin [D]. Urumqi: XinJiang Normal University, 2021: 13 – 36]
- [25] 冯先成. 伊犁喀什河流域山区水化学与同位素特征及水体补给关系分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2022: 7 – 53. [FENG Xiancheng. Hydrochemical and stable isotopic characteristics and analysis of water supply sources in the Kashi River Mountain Area of Ili [D]. Urumqi: XinJiang Normal University, 2022: 7 – 53]
- [26] FENG Xiancheng, YANG Yuhui. Hydrochemical and stable isotopic spatiotemporal variation characteristics and their environmental significance in the Kashi River Mountain Area of Ili, Xinjiang, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2022, **44**(3): 799 – 816. DOI: 10.1007/s10653-021-00959-2
- [27] 周建勤, 朱金兆, 武红旗. 伊犁喀什河流域生态景观格局分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, **8**(1): 1131115. [ZHOU Jianqin, ZHU Jinzhao, WU Hongqi. Analysis of ecological landscape pattern in Kashi River Basin of Yili [J]. South-to-North Water Transfers and Water Scienceand Technology, 2010, **8**(1): 113 – 115] DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2010.01.030
- [28] 王小丽. RS 与 GIS 支持下的伊犁谷地地质灾害风险评价——以尼勒克县滑坡为例[D]. 西安: 长安大学, 2013: 14 – 19. [WANG Xiaoli. Geological hazard risk assessment on Ili Valley based on RS and GIS: A case study of landslide in Nilka county [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013: 14 – 19]
- [29] 何明霞, 张兵, 王义东, 等. 白洋淀地表水和地下水的稳定氢氧同位素特征[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020, **40**(6): 62 – 67. [HE Mingxia, ZHANG Bing, WANG Yidong, et al. Stable hydrogen and oxygen isotopic characteristics of surface water and underground water in Baiyangdian Lake [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2020, **40**(6): 62 – 67] DOI: 10.19638/j.issn.1671-1114.20200610
- [30] 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]. 西安: 西北师范大学, 2013: 23 – 27. [ZHAO Aifang. Hydrochemical characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbintan, Tomur Peak [D]. Xi'an: Northwest Normal University, 2013: 23 – 27]
- [31] 尹观, 倪师军, 范晓, 等. 冰雪消融的同位素效应及氘过量参数演化——以四川稻城水体同位素为例[J]. 地球学报, 2004, **25**(2): 157 – 160. [YIN Guan, NI Shijun, FAN Xiao, et al. Isotopic effect and the deuterium excess parameter evolution in ice and snow melting process: A case study of isotopes in the water body of Daocheng, Sichuan province [J]. Acta Geosciencia Sinica, 2004, **25**(2): 157 – 160]
- [32] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水? 地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4202 – 4210. [KONG Xiaole, YANG Yonghui, CAO Bo, et al. Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River Basin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4202 – 4210] DOI: 10.13227/j.hjx.202012227
- [33] 董维红, 孟莹, 王雨山, 等. 三江平原富锦地区浅层地下水水化学特征及其形成作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, **47**(2): 542 – 553. [DONG Weihong, MENG Ying, WANG Yushan, et al. Hydrochemical characteristics and formation of the shallow groundwater in Fujin, Sanjiang Plain [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, **47**(2): 542 – 553] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201702203
- [34] KHAIRY H, JANARDHANA M R. Hydrogeochemistry and quality of groundwater of coastal unconfined aquifer in Amol – Ghaemshahr Plain, Mazandaran province, northern Iran [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **71**(11): 4767 – 4782. DOI: 10.1007/s12665-013-2868-z
- [35] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4003 – 4010. [ZHANG Tao, WANG Mingguo, ZHANG Zhiyin, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake Basin [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4003 – 4010] DOI: 10.13227/j.hjx.202002080
- [36] XIAO Jun, JIN Zhangdong, ZHANG Fei, et al. Major ion geochemistry of shallow groundwater in the Qinghai Lake catchment, NE Qinghai – Tibet Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, **67**(5): 1331 – 1344. DOI: 10.1007/s12665-012-1576-4
- [37] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, **35**(4): 104 – 112. [WANG Jingzhong, WU Jinglu, ZENG Haiao, et al. Characteristics of water isotope and hydrochemistry in Hetao Plain of Inner Mongolia [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, **35**(4): 104 – 112]
- [38] YANG Kunhua, HAN Guilin. Controls over hydrogen and oxygen isotopes of surface water and groundwater in the Mun River catchment, northeast Thailand: Implications for the water cycle

- [J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, **28**(3): 1021 – 1036. DOI: 10.1007/s10040-019-02106-9
- [39] 王建, 韩海东, 许君利, 等. 塔里木河流域山径流水化学特征研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(4): 1576 – 1587. [WANG Jian, HAN Haidong, XU Junli, et al. Hydrochemical characteristics of the mountain runoff in Tarim River Basin, China [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(4): 1576 – 1587] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0171
- [40] 宋梦媛, 李忠勤, 王飞腾, 等. 新疆吉木乃诸河水体氢氧同位素和水化学特征[J]. *环境化学*, 2020, **39**(7): 1809 – 1820. [SONG Mengyuan, LI Zhongqin, WANG Feiteng, et al. Hydrogen and oxygen isotopes and hydrochemical parameters of water samples from the Jimunai River Basin, Xinjiang [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(7): 1809 – 1820] DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019050402
- [41] 吴丽娜, 孙从建, 贺强, 等. 中天山典型内陆河流域水化学时空特征分析[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(5): 149 – 156. [WU Lina, SUN Congjian, HE Qiang, et al. Analysis of temporal and spatial variation of hydrochemical characteristics of the typical inland river in the middle of Tianshan Mountains [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(5): 149 – 156] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.05.023
- [42] 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3030 – 3038. [ZHANG Hehuizi, YU Kunxia, LI Zhanbin, et al. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in different water bodies in hilly and gully regions of the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3030 – 3038] DOI: 10.13227/j.hjxx.201811014
- [43] SUN Congjian, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Isotopic time-series partitioning of streamflow components under regional climate change in the Urumqi River, northwest China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2016, **61**(8): 1443 – 1459. DOI: 10.1080/02626667.2015.1031757
- [44] 张鑫, 孙从建, 周思捷, 等. 中国西北部高山区多尺度降水稳定同位素的时空变化成因分析[J]. *地理研究*, 2023, **42**(5): 1393 – 1409. [ZHANG Xin, SUN Congjian, ZHOU Sijie, et al. Assessment of spatial and seasonal variability on multi-scale precipitation isotopes in the high mountains in Western China [J]. *Geographical Research*, 2023, **42**(5): 1393 – 1409] DOI: 10.11821/dlyj020220736
- [45] KONG Yanlong, PANG Zhonghe. Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation of discharge [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **434**: 121 – 129. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.02.029
- [46] 郝帅, 李发东, 李艳红, 等. 艾比湖流域降水、地表水和地下水稳定同位素特征[J]. *干旱区地理*, 2021, **44**(4): 934 – 942. [HAO Shuai, LI Fadong, LI Yanhong, et al. Stable isotopes characteristics of precipitation, surface water and groundwater in Ebinur Lake Basin [J]. *Arid Land Geography*, 2021, **44**(4): 934 – 942] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.04.06

Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes and Hydrochemical Characteristics of the Ili Kashi River Basin of China during Wet Season

LI Ying, YANG Yuhui *

(College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: The Ili Kashi River is a second-largest tributary of the Ili River. Warmer temperatures accelerate the melting of alpine ice and snow, causing changes in the hydrological cycle and water balance of the Ili Kashi River. Previous research on water vapor sources, water recharge and other issues in the basin was mostly based on interannual variation analysis, seasonal comparison of stable isotopes, but lacked of characteristic analysis of those in wet season and dry season, which was not conducive to systematically exploring the individual differences of hydrochemical control factors or water recharge in wet season and dry season.

In this paper, water samples were collected at different sites in the Ili Kashi River basin, Xinjiang, China during the wet seasons from 2018 to 2021. The characteristics of hydrochemistry and stable isotope of water bodies in the basin were analyzed by using Piper triplet diagram and Gibbs diagram. Then it investigated the provision of

water recharge to the basin based on comparison of stable isotope equation lines of different water bodies and ion ratio method.

It found that (1) all water bodies in the basin were weakly alkaline. The hydrochemical type of surface water in the basin was $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type; the groundwater was hydrochemical type of $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na-Ca}$ type, subject to gypsum dissolution with increased SO_4^{2-} content. (2) Rock weathering was the main controlling factor for the hydrochemistry of surface water and groundwater. Surface water was slightly but not significantly affected by precipitation, and well water was affected by evaporation and concentration. The main source of surface water ions was silicate minerals or gypsum, and the main source of groundwater ions was carbonate, gypsum, or silicate minerals. The spatial variation of runoff hydrochemistry showed different trends of change at different elevations. (3) By comprehensive analysis of surface water and groundwater hydrochemistry and stable isotope characteristics of different water bodies, it was concluded that the main recharge sources in the basin from May to August were precipitation and ice-snowmelt water. The primary sources of recharge to the river in September were groundwater and precipitation.

This paper analyzed the hydrochemistry and stable isotope composition of different water bodies in the Ili Kashi River basin, which is of great significance for understanding the recharge relationship of water bodies in the basin, enriching the study of hydrological cycle in inland river basins, and protecting the balance of local water resources and the water environment.

Key words: the Ili Kashi River; stable isotopes; hydrochemistry; water recharge analysis

(责任编辑 李嵘)