

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0034

YANG Qin, HAN Tianding, LI Xiangying, et al. Hydrochemical characteristics and controlling factors in the source region of Shule River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):568-579. [杨琴, 韩添丁, 李向应, 等. 疏勒河源区水化学特征及其控制因素分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2):568-579.]

疏勒河源区水化学特征及其控制因素分析

杨 琴^{1,2}, 韩添丁¹, 李向应^{3,4}, 秦 甲^{1,5}, 成 鹏⁶, 蒲红铮⁷

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 4. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127;
5. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 6. 乌鲁木齐市
气象局, 新疆 乌鲁木齐 830002; 7. 重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054)

摘 要:以疏勒河源区为研究区,自2018年12月至2019年11月分别采集河水、泉水和雪样样品44个、4个和7个,综合运用Piper三线图、Gibbs图、离子比值法定性分析不同水体水化学特征及控制因素,利用质量平衡法(正向地球化学模型)量化不同来源对不同季节河水水化学成分的贡献率。结果表明:疏勒河源区不同水体水化学特征存在差异,TDS含量为泉水>河水>冰川融水>雪水,河水水化学类型冬季为 HCO_3^- - Mg^{2+} - Ca^{2+} 型,春季为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} - Na^+ 型,夏、秋季均为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} 型,泉水和雪水分别为 HCO_3^- - Ca^{2+} - Mg^{2+} 型、 HCO_3^- - Ca^{2+} 型;受多种因素共同影响,不同季节河水主离子时空变化均存在差异;河水和泉水水化学组成受岩石风化作用控制,主离子来源于以白云石为主的碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化和盐岩、石膏、硫酸盐矿物等蒸发岩溶解;正向地球化学模型计算结果表明冬春季河水阳离子主要来源于硅酸盐岩风化溶解,夏秋季碳酸盐岩对河水阳离子贡献率大于硅酸盐岩,总体河水阳离子主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩风化。

关键词:疏勒河源区;水化学;控制因素;贡献率

中图分类号: P332.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0568-12

0 引言

河流是全球水循环重要组成部分,在元素地球化学循环中起着重要作用,不仅连接海陆间能量交换,且水化学特征能反映流域岩石风化过程及 CO_2 消耗等信息^[1]。自然界地表水体水化学组成受岩性、气候、地形、土壤、植被和人类活动共同影响^[2],岩石类型对水化学特征起决定作用^[3]。由于地理环境制约,高寒山区受人类活动影响较小,水体化学物质含量能代表未受人类活动影响的水化学本底值^[4],可反映自然状况下水文地球化学特征。

气候变暖影响高寒山区径流水文过程,冰川退缩与多年冻土退化影响径流补给^[5-6],改变径流

水化学组成。由于冰川运动及冰川融水高速冲刷等影响,冰川作用区物理化学风化速率远高于大陆平均水平,对冰川周围环境及生物地球化学循环具有重要影响^[7],亦改变冰雪融水补给型河流水化学特征。通过对乌鲁木齐河源^[8]、克里雅河^[9]河流水化学特征的研究表明,河水主离子浓度受流量影响,存在明显年内变化且与径流量呈相反趋势。补给特征亦影响河水水化学组成,研究表明,黑河上游化学物质含量季节变化主要受降水影响^[10],乌鲁木齐河上游丰水期河流水化学特征受降水、冰川融水和地下水共同影响^[11]。通过定性分析发现新疆吉木乃诸河河水主离子来源于碳酸盐风化和含硫矿物的氧化^[12],额尔齐斯河源各离

收稿日期: 2020-06-05; 修订日期: 2020-08-26

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际创新合作专项(2018YFE010010002); 科技部科技基础资源调查专项(2018FY100502); 国家自然科学基金项目(41771040; 41877156; 41671053); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19070501); 甘肃省科技计划项目(20JR5RA545); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLCs-OP-2020-12); 重庆理工大学科研启动基金项目资助

作者简介: 杨琴, 硕士研究生, 主要从事寒区水文与环境研究. E-mail: yangqin@lzb.ac.cn

通信作者: 韩添丁, 研究员, 主要从事寒区水文与环境研究. E-mail: tdhan@lzb.ac.cn

子变化影响因素不同^[13], 乌鲁木齐河源区主离子来源于碳酸盐、黄铁矿和长石类矿物风化^[14], 黑河流域河水水化学受方解石和石膏风化溶解影响^[15]。定量分析表明雅鲁藏布江流域枯水期主离子主要来源于碳酸盐风化, 阳离子贡献率达 46.3%^[16], 碳酸盐风化对湄公河阳离子贡献率达 35.7%~72.3%^[17], 而内陆河塔里木河流域则存在差异, 以蒸发岩溶解为主, 占阳离子总量的 58.3%^[18]。此外, 相对于外流河, 西北内陆河水化学特征具有较高的 TDS^[19]。

目前疏勒河流域研究包括径流变化及气候因素影响^[20~23]、径流模拟预测^[24]、多年冻土分布及影响因素^[25~26]、基流变化^[27]等方面。虽对流域及上游水体水化学组成及控制因素进行相应研究^[28~29], 但未对源区进行系统采样, 具体分析不同季节河水水化学组成及控制因素, 尤其对于不同来源对河水水化学组成贡献率研究较少。本文主要利用 Gibbs 图、Piper 三线图和离子比值等方法定性分析疏勒河源区水体水化学组成及控制因素, 利用质量平衡法定量分析不同来源对不同季节河水水化学组成的贡献率, 可为疏勒河源区水化学研究提供基础资料, 有助于理解疏勒河源区水文地球化学过程。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

疏勒河流域位于青藏高原北部、祁连山西段, 为河西走廊三大内陆河流域之一, 地理位置介于 92°11'~99°00' E, 38°00'~42°48' N 之间。研究区为疏勒河源区(图 1), 年均气温为 -4.0℃, 年均降水量为 388.2 mm, 主要集中在 5—9 月生长季, 占全年降水量的 90%^[30]。区内尕斯库勒水文断面控制面积为 4 210 km², 冰川面积为 233.3 km²; 苏里水文断面控制面积为 1 908 km², 冰川面积为 51.8 km²^[31]。研究区主要由疏勒南山、托勒南山和疏勒河谷地组成, 地势东南高, 西北低, 河流为东南到西北流向。各时代地层出露较全, 以下古生界海相火山岩为主体, 上覆泥盆世以来的陆相或海陆交互相地层。在尕斯库勒一带由石英砂岩、粉砂岩、板岩、灰岩组成, 托勒南山、疏勒南山下部以碎屑岩为主, 上部以碳酸盐岩为主; 苏里、尕斯库勒地区石炭系由砾岩、砂岩、粉砂岩、白云岩组成; 二叠系岩性主要为红色砂岩和砾岩; 三叠系为陆相碎屑岩; 侏罗系为陆相含煤碎屑岩系。区域内矿藏资源包括非金属矿藏和金属矿藏, 前者包括煤矿、硫磺、石膏、盐岩等, 后者有铜和少量黄铁矿等。由于研究区人口分布较少, 平均每平方公里不足一人, 且均以放牧为主^[32], 因此本

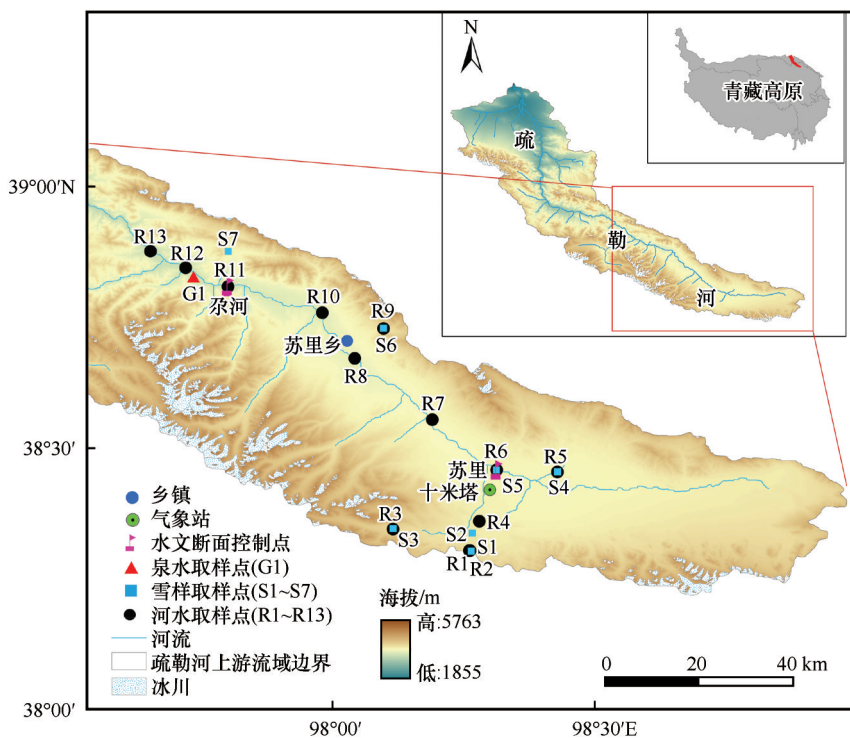


图 1 研究区位置及采样点分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area and the sampling sites

文忽略人类活动对水化学特征的影响。

1.2 样品采集与分析

自2018年12月至2019年11月在疏勒河源区干支流共采集河水样品44个(2018年12月,2019年4月、7—8月和11月,分别采样7个、8个、19个和10个,用以代表疏勒河源区冬、春、夏、秋季河水水化学特征),泉水样品4个,雪样7个(10月采集),采样点位置及相关信息如图1和表1所示。河水采样时选取自然流动处活水,并用水样将聚乙烯瓶清洗三次后取样,泉水在泉眼出露处采取,其取样方法和河水相同,均装入聚乙烯瓶中。雪样为降落在地表的新雪,用以代表降雪水化学特征,采样时戴一次性聚乙烯手套,先将新雪表层受污染部分去除,再采集远离地表的部分,雪样先采集在聚乙烯保鲜袋中,待自然融化后将雪水装入聚乙烯瓶中。样品采集时无连续降水事件发生。所有的水样在采集后立即封存,并运送至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低温保存,分析处理前取出。总溶解固体(TDS)和电导率(EC)的测定仪器为型号DDSJ-308A的电导率仪,其测定误差为 $\pm 0.5\%$ 。pH由雷磁PHS-3E型pH计测定,精度

为 ± 0.01 。阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+})和阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-})分别采用Dinex公司的DX-600离子色谱仪和ICS-2500离子色谱仪测定,测定误差均小于 $\pm 1\%$,所有离子检测限度均为 $1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ [33]。水溶液中 CO_3^{2-} 与 H^{+} 含量呈反比,当pH小于8.3时, CO_3^{2-} 含量可以忽略不计[34],由于全部水样中pH最大值为8.26(表2),因此本文 CO_3^{2-} 含量均忽略不计。 HCO_3^{-} 含量通过离子平衡计算[35]。TDS实测值和TDS计算值的相关性分析表明,两者相关系数为0.81,通过了0.01的显著性检验,表明本文数据质量是相对可靠的。

2 结果与分析

2.1 各水体水化学组成及其类型

疏勒河源区各水体水化学组成主要特征值如表2所示。河水四季TDS均值介于 $376.31\sim 479.63\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间,泉水、雪水均值分别为 $624.75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $6.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。王彩霞等[36]于2012—2013年消融季在老虎沟12号冰川末端采集融水径流,结果表明冰川融水径流TDS均值为 $61.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对比发现,不同水体TDS顺序为泉水>河水>冰川融水>雪水,表明河水受地下水和冰雪融水共同补给影响。河水四季EC均值介于 $640.50\sim 839.00\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}$ 间,泉水、雪水均值分别为 $1233.50\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $9.56\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。河水四季pH均值介于7.26~7.83间,泉水、雪水均值分别为7.27和8.01,呈弱碱性。河水春、夏、秋季阳离子平均质量浓度依次为 $\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^{+}>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^{+}$,冬季为 $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{Na}^{+}>\text{K}^{+}$,四季阴离子质量浓度均为 $\text{HCO}_3^{-}>\text{SO}_4^{2-}>\text{Cl}^{-}>\text{NO}_3^{-}$;雪水阳离子浓度依次为 $\text{Ca}^{2+}>\text{Na}^{+}>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^{+}$,阴离子浓度大小为 $\text{HCO}_3^{-}>\text{SO}_4^{2-}>\text{NO}_3^{-}>\text{Cl}^{-}$;泉水阴阳离子质量浓度大小顺序与冬季河水相同,可能与冬季以地下水补给为主有关。

为进一步确定水化学组成特征,利用Piper三线图[37]和舒卡列夫分类确定其水化学类型,即毫克当量百分数大于25%的离子参与水化学分类。如图2所示,河水、泉水、雪水阴离子(除个别点)均靠近 HCO_3^{-} 端元, HCO_3^{-} 为优势阴离子。阳离子分布存在差异,冬季阳离子介于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 端元之间,当量浓度占阳离子总量的均值分别为38.14%和41.13%,水化学类型为 $\text{HCO}_3^{-}\text{-Mg}^{2+}\text{-Ca}^{2+}$ 型;春季河水样点存在偏向 $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ 轴的趋势, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ 占阳离子总量的37.44%、35.87%和26.69%,为 HCO_3^{-} -

表1 采样点信息

Table 1 Sampling sites information

样品类型 (样品数量)	采样点	经度/E	纬度/N	海拔/m	样品 数量	备注
河水(n=44)	R1	98°15'44"	38°18'13"	4 088	1	支流
	R2	98°15'40"	38°18'13"	4 088	1	支流
	R3	98°06'56"	38°20'45"	4 160	4	支流
	R4	98°16'48"	38°21'02"		1	支流
	R5	98°25'45"	38°27'16"	3 806	2	支流
	R6	98°18'45"	38°27'28"	3 813	8	干流
	R7	98°11'20"	38°33'15"	3 732	4	干流
	R8	98°02'31"	38°40'15"	3 643	4	干流
	R9	98°05'49"	38°43'42"	4 026	2	支流
	R10	97°58'46"	38°45'27"	3 610	2	支流
	R11	97°48'01"	38°48'29"	3 461	7	干流
	R12	97°43'08"	38°50'39"	3 390	4	干流
	R13	97°39'06"	38°52'33"	3 344	4	干流
雪样(n=7)	S1	98°15'52"	38°18'10"	4 088	1	
	S2	98°15'59"	38°20'14"	3 995	1	
	S3	98°06'56"	38°20'45"	4 160	1	
	S4	98°25'45"	38°27'16"	3 806	1	
	S5	98°18'45"	38°27'28"	3 813	1	
	S6	98°05'49"	38°43'42"	4 026	1	
	S7	97°48'01"	38°52'33"	3 490	1	
泉水(n=4)	G1	97°44'03"	38°49'36"	3 415	4	

表2 疏勒河源区各水体水化学特征值

Table 2 Hydrochemical characteristic values of river water, spring water and snow water in the source region of Shule River														
水样(样品数量)	季节(样品数量)	特征值	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	EC	pH	水化学类型
河水(n=44)	春(n=8)	最大值	76.68	37.00	151.10	3.30	129.11	1.48	56.93	656.57	881.00	1 718.00	7.39	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ ·Mg ²⁺ ·Na ⁺
		最小值	25.16	17.68	16.35	1.52	9.88	0.25	6.73	5.25	338.00	658.00	7.13	
		中值	44.44	25.53	25.06	1.97	33.10	0.49	20.27	253.55	424.50	933.63	7.25	
		均值	46.91	25.67	43.47	2.24	43.77	0.64	24.16	294.58	479.63	824.50	7.26	
	夏(n=19)	最大值	123.27	72.50	247.32	3.96	168.34	1.59	93.18	949.67	1 118.00	2 170.00	7.74	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ ·Mg ²⁺
		最小值	20.92	9.26	8.88	0.82	6.14	0.19	2.27	176.00	109.80	208.00	6.62	
		中值	63.87	27.76	21.96	1.54	21.91	0.73	10.64	354.04	396.00	915.58	7.51	
		均值	76.55	33.68	41.80	1.72	49.62	0.72	19.59	420.84	471.08	772.00	7.53	
	秋(n=10)	最大值	142.09	92.64	251.74	4.45	173.24	1.77	37.64	1 332.93	725.00	1 377.00	7.54	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ ·Mg ²⁺
		最小值	61.99	18.64	15.41	1.36	11.06	0.41	7.31	293.63	228.00	434.00	7.17	
		中值	94.56	43.73	32.91	2.08	28.77	0.78	17.18	532.94	337.50	719.50	7.34	
		均值	94.34	47.09	55.49	2.34	49.64	0.85	18.04	583.00	379.10	640.50	7.33	
	冬(n=7)	最大值	64.75	33.03	39.79	2.67	146.17	7.26	150.07	350.46	544.00	959.00	8.06	HCO ₃ ⁻ -Mg ²⁺ ·Ca ²⁺
		最小值	26.36	15.98	8.23	1.09	5.52	0.26	5.07	162.38	179.20	316.00	7.72	
		中值	33.66	24.34	23.66	1.93	24.44	0.58	24.16	243.88	475.00	664.57	7.87	
		均值	40.04	24.84	24.65	1.92	44.64	1.62	31.52	239.81	376.31	839.00	7.83	
雪水(n=7)		最大值	1.90	0.06	0.24	0.14	0.41	0.12	0.15	6.43	11.67	22.10	8.26	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺
		最小值	0.74	0.04	0.19	0.06	0.03	0.04	0.02	2.91	2.14	4.09	7.87	
		中值	1.31	0.04	0.22	0.10	0.08	0.08	0.05	4.67	5.04	11.76	8.04	
		均值	1.29	0.04	0.22	0.09	0.13	0.09	0.07	1.01	6.20	9.56	8.01	
泉水(n=4)		最大值	172.52	54.36	29.50	3.52	86.17	1.00	29.25	747.38	728.00	1 418.00	7.58	HCO ₃ ⁻ -Ca ²⁺ ·Mg ²⁺
		最小值	95.32	35.18	15.73	1.45	30.92	0.30	8.56	431.61	440.00	835.00	7.11	
		中值	99.98	42.19	25.88	2.44	61.82	0.40	15.06	489.91	665.50	1 180.00	7.31	
		均值	116.95	43.48	24.25	2.46	60.18	0.52	16.98	539.70	624.75	1 233.50	7.27	

注: 阴阳离子和TDS的单位均为mg·L⁻¹, EC的单位为μS·cm⁻¹。

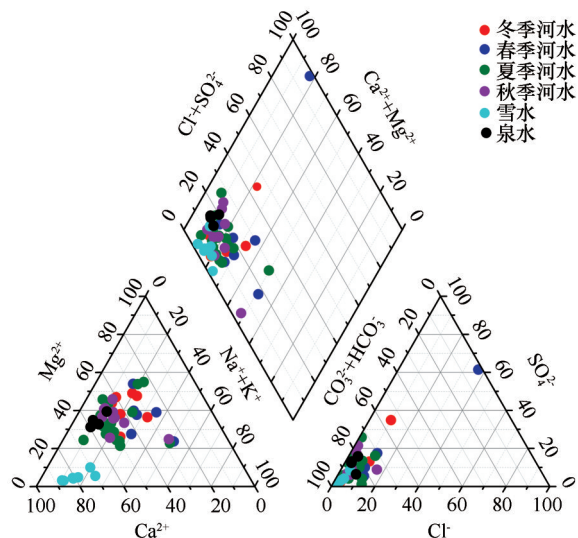


图2 疏勒河源区不同水体主要离子的Piper图

Fig. 2 Piper figures of river water, spring water and snow water in the source region of Shule River

Ca²⁺·Mg²⁺·Na⁺型;夏、秋季河水和泉水阳离子分布相对聚集,Ca²⁺、Mg²⁺分别占阳离子总量的46.89%和

33.76%、45.22%和35.88%、54.81%和34.54%,水化学类型均为HCO₃⁻-Ca²⁺·Mg²⁺型;雪水阳离子靠近Ca²⁺端元,当量浓度占阳离子总量的均值为79.08%,其水化学类型为HCO₃⁻-Ca²⁺型。

2.2 河水主要离子浓度的时空变化特征

2.2.1 季节变化特征

以研究区不同时间取样的均值代表河水主要离子季节变化(图3)。TDS含量冬季最低,春至秋季呈递减趋势,可能由于春季积雪融化,携带大量富集主离子的粉尘进入河流^[29],春季存在高值;夏季径流量增加至最大值^[20],冰川融水径流溶解质含量在此期间增加后逐渐减少^[38],虽然冰川融水径流、地下水和降水补给增加溶解质的补给量,但径流量增加造成的稀释作用更显著,因此其浓度降低。阳离子Ca²⁺、Mg²⁺浓度变化相同,冬季至秋季呈增加趋势,变化范围分别为40.04~94.34 mg·L⁻¹和24.84~47.09 mg·L⁻¹。Na⁺在夏季略微下降,整体亦呈增加趋势。K⁺

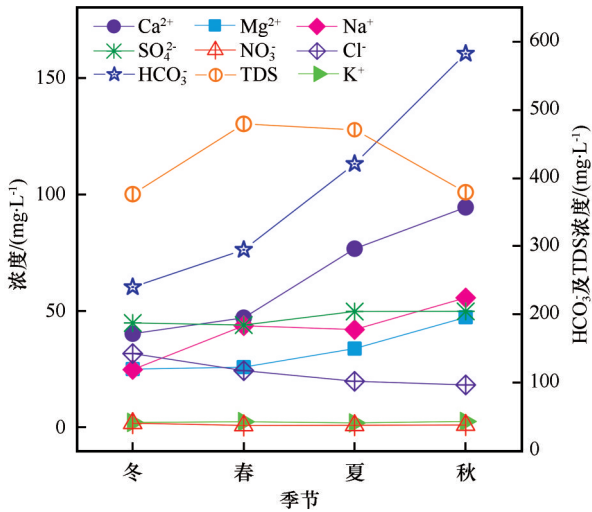


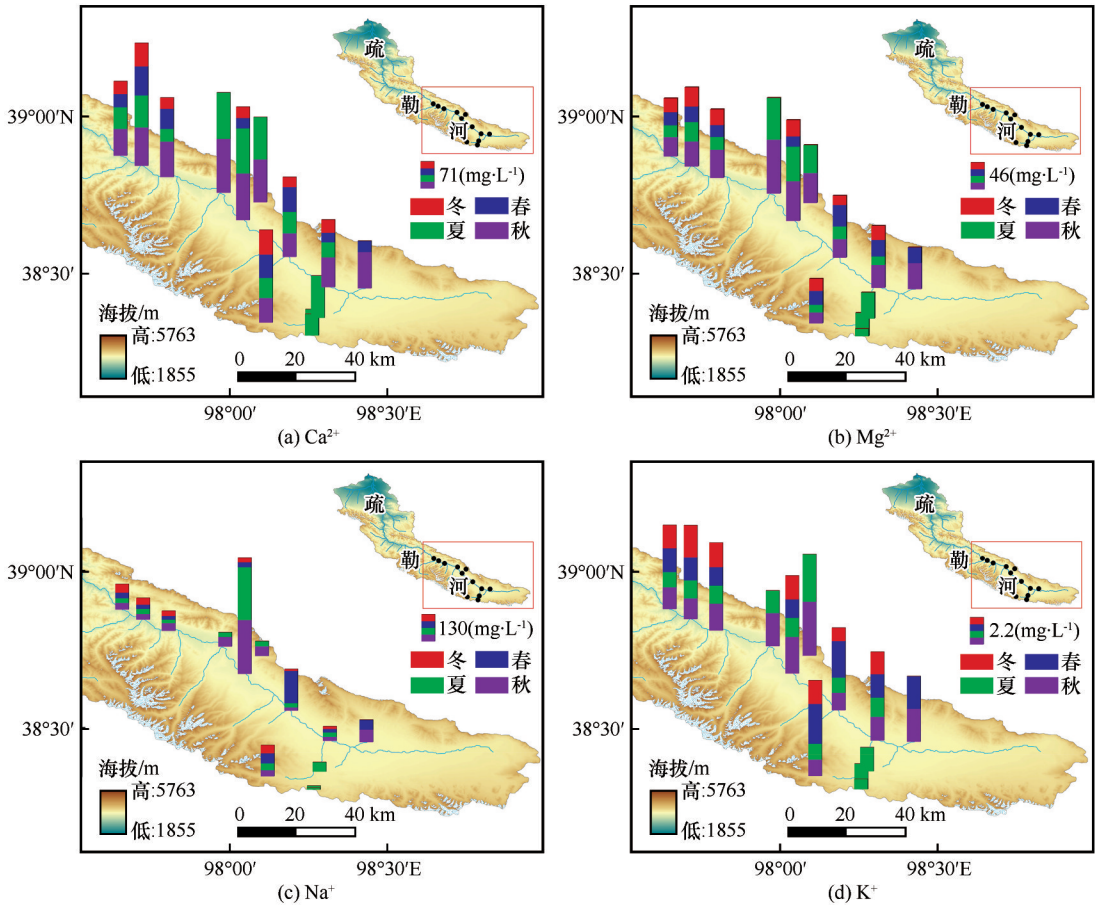
图3 疏勒河源区河水主要离子浓度季节变化
Fig. 3 Seasonal variation of major ions concentrations in the source region of Shule River

含量较低,变化范围为 $1.72\sim2.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其变化与 Na^+ 一致,均在夏季出现略微下降。阴离子 HCO_3^- 浓

度较高,冬季至秋季呈增加趋势,变化范围为 $239.81\sim583.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 SO_4^{2-} 四季变化不大,介于 $43.77\sim49.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,夏秋季相对较高。 Cl^- 冬季至秋季呈下降趋势,最小值为 $18.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 NO_3^- 浓度较低,其浓度在冬季最大。综上,除 Cl^- 和 NO_3^- ,各离子浓度均值均在秋季达到最大值。

2.2.2 空间变化特征

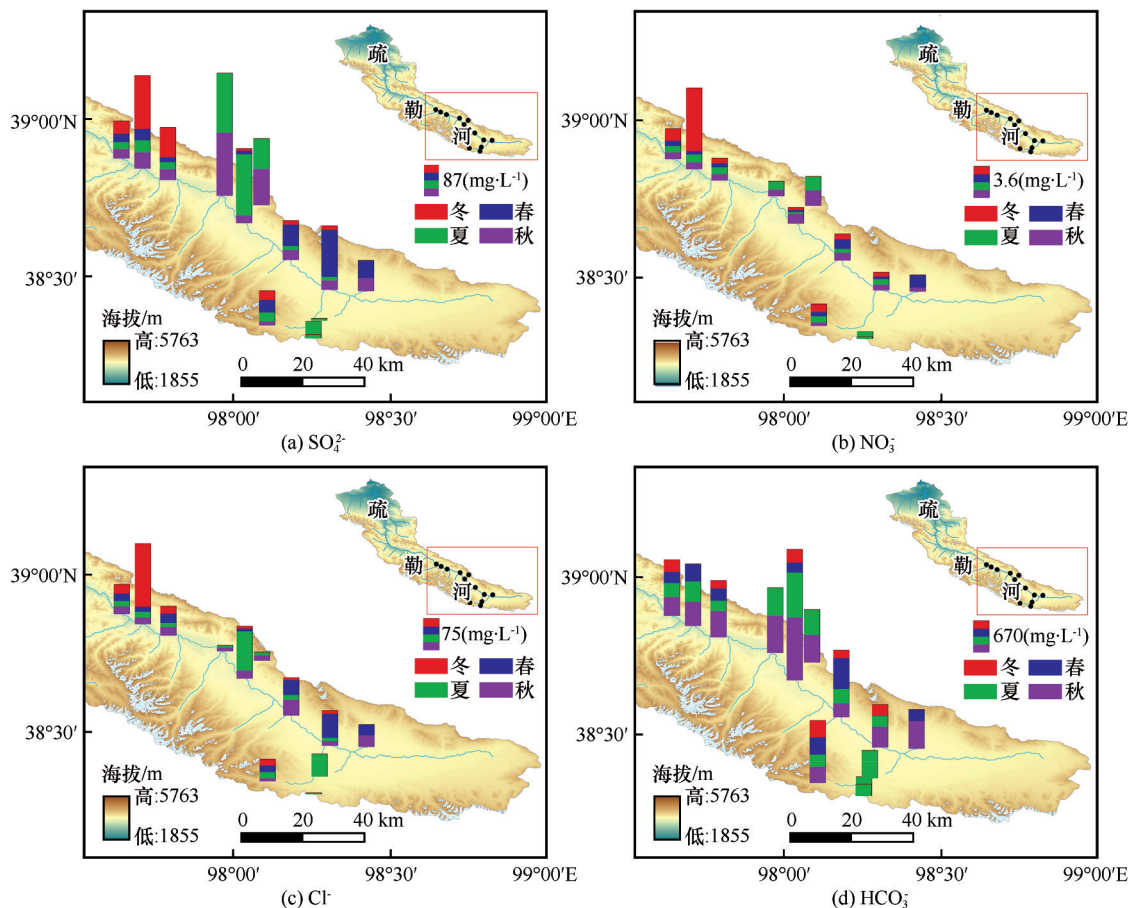
河水主离子浓度变化是径流量、水-岩相互作用、水文地质条件、补给来源等多种因素混合作用结果,在不同的空间位置其浓度存在差异性。源区河水主离子空间变化如图4~5所示,根据海拔高度和地质条件,将采样点划分为三类:R1~R7($>3\,700\text{ m}$)、R8~R10和R11~R13($<3\,500\text{ m}$)取样点。源区冬季径流为地下水补给^[20],径流变化稳定,除 Ca^{2+} 、 HCO_3^- ,其余离子浓度在R11~R13样点均值相对高于R1~R7取样点。干流采样点各离子浓度(除 HCO_3^-)沿水流方向呈增加趋势,可能为冬季水流相



注:图例中的浓度值为该离子浓度最大值的一半

图4 疏勒河源区河水阳离子空间变化

Fig. 4 Spatial variation of river water cations in the source region of Shule River (The concentration value in the legend is half of the maximum concentration of the ion)



注: 图例中的浓度值为该离子浓度最大值的一半

图5 疏勒河源区河水阴离子空间变化

Fig. 5 Spatial variation of river water anions in the source region of Shule River (The concentration value in the legend is half of the maximum concentration of the ion)

对缓慢,水-岩相互作用增加河水溶解质浓度。春季积雪融水携带积雪表面尘埃物质进入河水,增加河水溶解质含量。对比发现,R1~R7取样点主离子浓度相对高于R11~R13样点,可能是因为海拔较高的R1~R7样点对于积雪融水的补给更为敏感。夏秋季除 NO_3^- ,其余离子均在R8~R10地理位置处达到最大值,其中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 在R8~R10取样点的浓度均大于其余样点,当河水流经碳酸盐岩和硫酸盐岩区域时会产生较多的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} ,说明该区域可能分布相对较多的碳酸盐岩和硫酸盐岩矿物。结合地质地貌图,苏里乡镇附近分布泥盆-三叠系构造层^[39],存在碳酸盐岩、石膏层和煤层^[40],进一步佐证上述结论。此外,由于煤层中硫化物的存在, SO_4^{2-} 亦有部分来源于硫化物氧化溶解。夏季干流采样点各离子浓度(除 Ca^{2+} 、 NO_3^-)沿水流方向呈减小趋势,秋季(除 Cl^- 、 SO_4^{2-})亦呈减小趋势。

3 讨论

3.1 水体主要离子来源及控制因素

利用Gibbs图定性分析水体水化学组分的来源^[41],其中 $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和 $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 采用质量浓度比。由图6可知,疏勒河源区四季河水基本均处于Gibbs图中部偏左侧,TDS介于 $100 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Na}^+(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值冬、春、夏、秋季均值分别为0.37、0.43、0.31和0.31, $\text{Cl}^-(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值分别为0.18、0.16、0.04和0.04,表明河水水化学离子组分主要受岩石风化作用控制,个别点偏离岩石风化,其地理位置处于图4中 Na^+ 高值区,其TDS亦较大,蒸发作用可能是局地离子浓度和TDS较大的原因。此外,泉水与河水分布相似,受岩石风化作用控制,表明地下水补给对河水的重要影响。雪水由岩石风化和大气降水共同控制。利用Na标准化的摩尔比值^[42]分析河水和泉水主要受何种岩石风化溶解的影响,确定其控制端元。硅酸盐

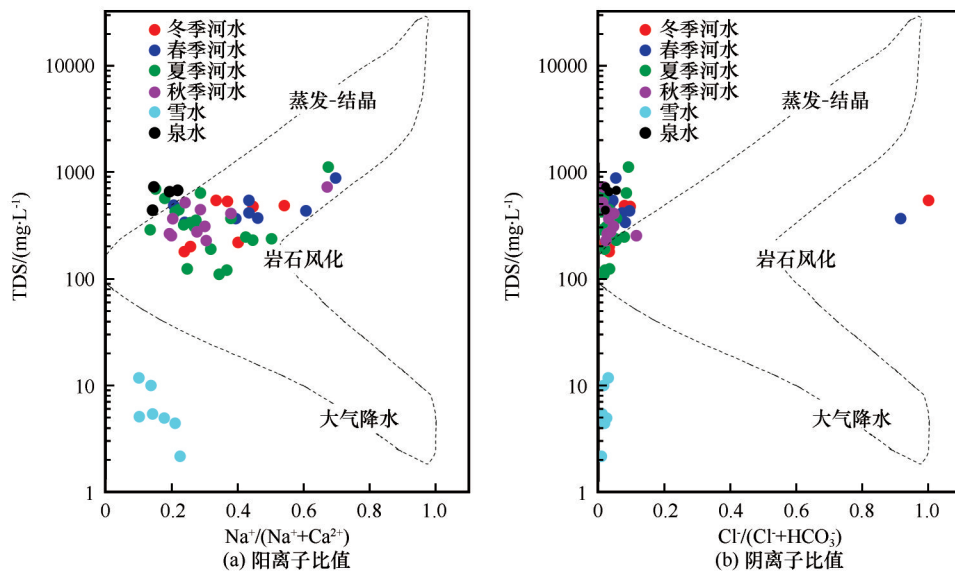


图6 疏勒河源区不同水体主要离子的Gibbs图

Fig. 6 Gibbs figure of river water, spring water and snow water major ions in the source region of Shule River

岩风化产生的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值分别为 0.35 ± 0.15 和 0.24 ± 0.12 , 碳酸盐岩风化为 50 ± 20 和 20 ± 8 , 蒸发岩为 0.17 ± 0.09 和 0.02 ± 0.01 [43]。如图7所示, 疏勒河源区各季河水和泉水基本均位于硅酸盐岩和碳酸盐岩控制端元之间, 表明主要受硅酸盐岩和碳酸盐岩风化溶解的共同控制, 而蒸发岩溶解对两者的影响相对较小。

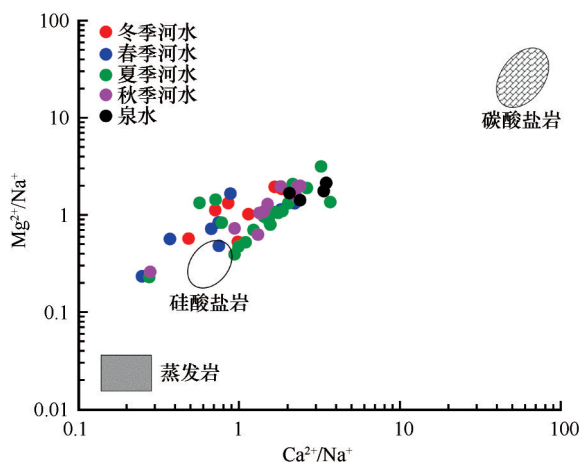


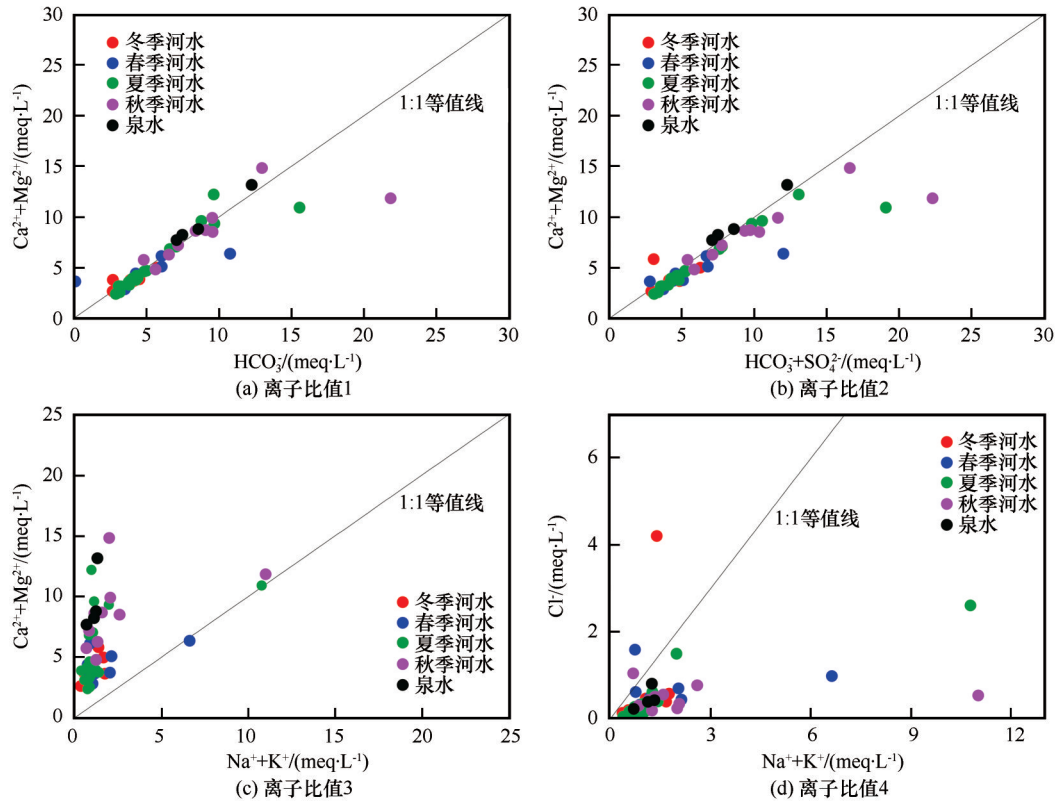
图7 疏勒河源区Na标准化摩尔比值混合端元图

Fig. 7 The scatter diagram of normalized Na^+ and other ions in river water and spring water in the source region of Shule River

水体中离子间相互关系可以反映离子来源 [44-45]。图8为疏勒河源区水体主要离子当量浓度比值图。 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 可判别不同岩石风化的相对强度 [18], 如图8(c)所示, 河水和泉水样点基

本均靠近 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 一侧, 暗示碳酸盐岩风化溶解对水体的影响强于蒸发岩。 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 散点图基本依附于 1:1 等值线 [图8(a)], 表明河水和泉水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐岩矿物风化 [46], 且仍有部分存在其他来源。水体 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值大于 1, 指示 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要源于碳酸盐矿物溶解, 比值小于 1 指示硫酸盐或硅酸盐溶解, 等于 1 则指示既有碳酸盐矿物溶解, 又有硅酸盐矿物溶解 [28], 可进一步确定其来源。河水仅有个别点远离 1:1 等值线, 其余样点和泉水均接近 1:1 等值线且多位于其下方 [图8(b)], 表明河水和泉水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 既有碳酸盐矿物溶解, 又有硅酸盐矿物溶解。通过相关性分析, 冬春季 SO_4^{2-} 和 Cl^- 相关性显著 ($P < 0.01$), 两者具有同源性, 夏秋季 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 间相关性较强 ($P < 0.05$), 进一步说明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 部分来源于石膏和含 Mg^{2+} 硫酸盐矿物等蒸发岩溶解。

$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 一般用来判断水体中碳酸盐岩矿物的溶解, 一般两者均相对较低的水体以方解石溶解为主, 较高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值和较低 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值的水体以白云石溶解为主 [15]。冬季 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值分别为 $0.27 \sim 1.03$ 和 $0.54 \sim 1.58$, 春季为 $0.23 \sim 1.34$ 和 $0.60 \sim 1.53$, 夏季为 $0.14 \sim 0.88$ 和 $0.37 \sim 2.35$, 秋季为 $0.22 \sim 1.78$ 和 $0.48 \sim 1.09$, 泉水为 $0.14 \sim 0.24$ 和 $0.53 \sim 0.82$, 具有相对较高的 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值和较低的 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 比值, 表明河水和泉水中碳酸盐岩溶解均以白云石风化溶解为主, 研究区白云岩的存在进一步佐证此结论。



注: 1: 1 等值线为 $y=x$ 函数线, 表明比率为 1

图 8 疏勒河源区主要离子比值

Fig. 8 Proportion of major ions in the source region of Shule River (The 1:1 contour line is the function image of $y=x$, which indicate the ratio of 1)

当蒸发岩溶解对水化学组成起主要作用时, Cl^- 与 Na^++K^+ 的比值应等于 1^[47], 图 8(d) 所示, 94% 的样点比值均靠近 Na^++K^+ 侧, Na^++K^+ 显著高于 Cl^- , 表明除蒸发岩溶解, 河水、泉水 Na^+ 、 K^+ 主要来源于硅酸盐岩矿物溶解。

综上, 疏勒河源区河水和泉水主离子来源于以白云石为主的碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化溶解和盐岩、石膏、含 Mg^{2+} 硫酸盐等蒸发岩溶解。

3.2 不同来源对河水溶解组分的贡献率

河水溶解组分来源于大气降水、岩石风化(蒸发岩、硅酸盐岩和碳酸盐岩)和人为输入, 利用质量平衡法(正向和反向地球化学模型)可定量计算不同来源对河水离子的贡献率^[48], 本文通过正向地球化学模型进行估算。河水中化学离子 X 的质量平衡方程如下所示^[49-50]:

$$(X)_{\text{riv}} = (X)_{\text{rain}} + (X)_{\text{eva}} + (X)_{\text{car}} + (X)_{\text{sil}} + (X)_{\text{anth}} \quad (1)$$

式中: riv 表示河水; rain 表示大气降水; eva, car, sil 分别表示蒸发岩、碳酸盐岩和硅酸盐岩矿物; anth 表示人类活动, 其单位均为摩尔浓度。由于疏勒河源区受人类活动影响较小, 因此 $(X)_{\text{anth}}$ 忽略不计。

3.2.1 大气降水

大气输入对于河流溶质载荷的影响可通过该地雨雪的化学成分来衡量^[51]。利用 2018 年 6 月至 8 月十米塔降水和 2019 年 10 月降雪数据, 结合相关研究数据(表 3), 校正大气降水输入。由于降水中 Cl^- 来源简单, 主要来源于海盐离子, 常用于校正降水其余离子对地表水水化学贡献值。经过校正的大气降水阳离子浓度 $(X)_{\text{rain}}$ 为: $(X)_{\text{rain}} = (X/\text{Cl}^-)_{\text{rain}} \times (\text{Cl}^-)_{\text{rain}}$, 其中 $(X/\text{Cl}^-)_{\text{rain}}$ 表示降水中主要阳离子与 Cl^- 的比值, $(\text{Cl}^-)_{\text{rain}}$ 表示降水中 Cl^- 浓度。用河水中 Cl^- 的最小值 ($63.83 \text{ } \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 表示大气降水对河水 Cl^- 的输入, 即 $(\text{Cl}^-)_{\text{rain}} = 63.83 \text{ } \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。估算均值见表 4, 冬、春、夏、秋季大气输入分别占河水阳离子总量的均值为 15.21%、12.29%、12.95% 和 7.32%。

3.2.2 蒸发岩溶解

研究区内蒸发岩主要包括盐岩 (NaCl) 和石膏 (CaSO_4), 假设 Cl^- 均来源于大气降水和蒸发岩溶解, 蒸发岩溶解产生等量的 Na^+ 和 Cl^- , 则 $(\text{Na}^+)_{\text{eva}} = (\text{Cl}^-)_{\text{eva}} = (\text{Cl}^-)_{\text{riv}} - (\text{Cl}^-)_{\text{rain}}$; 假设 SO_4^{2-} 来源于大气降水和石膏 (CaSO_4), 则 $(\text{Ca}^{2+})_{\text{eva}} = (\text{SO}_4^{2-})_{\text{eva}} = (\text{SO}_4^{2-})_{\text{riv}} -$

表3 疏勒河源区降水水化学组成(单位:umol·L⁻¹)

Table 3 Hydrochemical composition of precipitation in the source region of Shule River (unit: umol·L⁻¹)

位置	时间(年·月)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	文献来源
苏里	2009-04—2009-10	155.00	166.67	52.17	51.28	40.63	59.15	1 618.03	[21]
苏里	2012-11—2013-11	279.45	57.94	204.88	50.23	90.31	128.97		[20]
尕河	2009-04—2009-10	177.50	125.00	26.09	17.95	20.83	36.62	554.10	[21]
十米塔	2018-06—2018-08	68.29	8.60	19.19	5.87	3.68	10.06	154.39	本文
源区*	2019-10	32.24	1.83	9.41	2.43	1.33	1.98	16.50	本文

注: *表明为源区7个雪水数据均值。

表4 疏勒河源区不同季节河水阳离子不同来源贡献率
Table 4 The contribution of cations from different sources
in the source region of Shule River

来源	贡献率/%			
	冬	春	夏	秋
大气降水	15.21	12.29	12.95	7.32
蒸发岩	17.59	18.05	11.75	12.89
硅酸盐岩	36.21	35.54	37.29	37.30
碳酸盐岩	30.99	34.12	38.01	42.49

(SO₄²⁻)_{rain}。结果表明研究区冬、春、夏、秋季蒸发岩溶解的Ca²⁺、Na⁺浓度总和分别占河水阳离子总量的17.59%、18.05%、11.75%和12.89%。

3.2.3 硅酸盐岩风化

假设河水中Na⁺主要来源于大气降水、蒸发岩和硅酸盐岩溶解,则硅酸盐岩风化对于河水Na⁺的贡献为:(Na)_{sil}=(Na)_{riv}-(Na)_{rain}-(Na)_{eva}。由于蒸发岩、碳酸盐岩溶解的K⁺很少,因此假设K⁺除大气输入外均来源于硅酸盐岩风化。采用硅酸盐岩端元浓度比值(Ca²⁺/Na⁺)_{sil}=0.35和(Mg²⁺/Na⁺)_{sil}=0.24^[36],估算硅酸盐风化对河水Ca²⁺、Mg²⁺的贡献^[7,52],计算方程为:(Ca²⁺)_{sil}=(Ca²⁺/Na⁺)_{sil}×(Na⁺)_{sil}, (Mg²⁺)_{sil}=(Mg²⁺/Na⁺)_{sil}×(Na⁺)_{sil}。计算得到冬季R12样点硅酸盐岩贡献率为负值,可能为忽略NaCl以外氯化物含量所带来的不确定性^[52]。冬、春、夏、秋季硅酸盐岩风化对河水阳离子贡献率均值分别为36.21%、35.54%、37.29%和37.30%。

3.2.4 碳酸盐岩风化

碳酸盐岩对于河水Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺的贡献率可通过排除法得到,即:(∑cation)_{car}%=100-(∑cation)_{rain}%- (∑cation)_{eva}%-(∑cation)_{sil}%,结果显示,冬、春、夏、秋季碳酸盐岩对河水阳离子贡献率分别为30.99%、34.12%、38.01%和42.49%。

综上,各季河水中阳离子主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩风化,两者贡献率达到67.20%~79.79%,其次为蒸发岩,贡献率为11.75%~

18.05%,大气降水的贡献率相对最小,这与Na标准化的摩尔比值分析结论相符。

4 结论

(1)疏勒河源区各季河水TDS均值介于376.31~479.63 mg·L⁻¹间,不同水体TDS顺序为泉水>河水>冰川融水>雪水。河水中HCO₃⁻为绝对优势阴离子,阳离子以Ca²⁺、Mg²⁺为主,春季水化学类型为HCO₃⁻-Ca²⁺·Mg²⁺·Na⁺型,夏、秋季为HCO₃⁻-Ca²⁺·Mg²⁺型,冬季为HCO₃⁻-Mg²⁺·Ca²⁺型。

(2)疏勒河源区河水主离子浓度存在季节变化,除Cl⁻、NO₃⁻,其余离子冬季至秋季均呈增加趋势,秋季浓度最高;空间上,受多种因素共同影响,不同季节河水主离子浓度的空间变化存在差异。

(3)疏勒河源区河水和泉水水化学组成受岩石风化控制,主要来源于以白云石为主的碳酸盐岩风化、硅酸盐岩风化和盐岩、石膏、含Mg²⁺硫酸盐矿物等蒸发岩溶解。雪水受岩石风化和大气降水共同控制。

(4)不同来源对各季河水阳离子贡献率不同,通过正向地球化学模型估算得出疏勒河源区冬春季河水阳离子来源均以硅酸盐岩风化溶解为主,贡献率分别为36.21%、35.54%;夏季贡献率为碳酸盐岩(38.01%)>硅酸盐岩(37.29%)>大气降水(12.95%)>蒸发岩(11.75%),秋季为碳酸盐岩(42.49%)>硅酸盐岩(37.30%)>蒸发岩(12.89%)>大气降水(7.32%),总体上河水阳离子主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩矿物风化。

参考文献(References):

[1] Xie Chenji, Gao Quanzhou, Tao Zhen. Review and perspectives of the study on chemical weathering and hydrochemistry in river basin[J]. Tropical Geography, 2012, 32(4): 331-337. [解晨骥, 高全洲, 陶贞. 流域化学风化与河流水化学研究综述与展望[J]. 热带地理, 2012, 32(4): 331-337.]

[2] Chen Yang, Bai Jingwen, Yang Jing, et al. Hydro-geochemistry of surface waters in the northeast slope of Mt. Gongga and

- its controls [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2019, 37(4): 497-503. [陈洋, 白景文, 杨靖, 等. 贡嘎山东北坡地表水地球化学特征及影响因素[J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(4): 497-503.]
- [3] Zhu Bingqi, Yang Xiaoping. The ion chemistry of surface and ground waters in the Taklimakan Desert of Tarim Basin, western China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15): 2123-2129.
- [4] Zhao Aifang. Hydrochemical characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbintan 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.]
- [5] Niu Li, Ye Baisheng, Li Jing, et al. Effect of permafrost degradation on hydrological processes in typical basins with various permafrost coverage in Western China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 41(1): 85-92. [牛丽, 叶柏生, 李静, 等. 中国西北地区典型流域冻土退化对水文过程的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 41(1): 85-92.]
- [6] Zhang Jiutian, He Xiaojia, Shangguan Donghui, et al. Impact of intensive glacier ablation on arid regions of northwest China and its countermeasure [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 848-854. [张九天, 何霄嘉, 上官冬辉, 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 848-854.]
- [7] Han Tianding, Li Yuping, Qin Jia, et al. Hydrochemical changes and influencing factors in the Dongkemadi region, Tanggula Range, China [J]. *Water*, 2018, 10(12): 1856.
- [8] Feng Fang, Feng Qi, Li Zhongqin, et al. Analysis on the hydrochemical 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.]
- [9] Shao Yuejie, Luo Guangming, Wang Jian, et al. Hydrochemical characteristics and formation causes of main ions in water of the Keriya River, Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(5): 1021-1029. [邵跃杰, 罗光明, 王建, 等. 新疆克里雅河上游主要离子化学特征及其成因[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1021-1029.]
- [10] 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.]
- [11] Sun Congjian, Li Weihua, Chen Yaning, et al. Isotopic and hydrochemical composition of runoff in the Urumqi River, Tianshan Mountains, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1521-1537.
- [12] 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. [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.]
- [13] Liu Feng, Li Zhongqin, Hao Jianan, et al. Preliminary study on hydrochemical and stable isotope characteristics at the headwaters of 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初步研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 234-242.]
- [14] 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.]
- [15] Yang Qiu, Xiao Honglang, Zhao Liangju, et al. Hydrological and isotopic characterization of river water, groundwater, and groundwater recharge in the Heihe River basin, northwestern China [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(8): 1271-1283.
- [16] Wang Lei, Wang Zhaohan, Yao Zhijun, et al. Study on chemical weathering and consumption of CO₂ during dry season in the Yarlung Zangbo River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(1): 118-126. [汪磊, 王兆涵, 姚治军, 等. 雅鲁藏布江流域枯水期化学风化及 CO₂ 消耗[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(1): 118-126.]
- [17] Kajita H, Ota Y, Yoshimura T, et al. Seasonal and spatial variations of chemical weathering in the Mekong basin: from the headwaters to the lower reaches [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2020, 26(2): 137-159.
- [18] Xiao Jun, Jin Zhangdong, Ding Hu, et al. Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim River basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 54(2): 162-173.
- [19] Wu Weihua. Hydrochemistry of inland rivers in the north Tibetan Plateau: constraints and weathering rate estimation [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 468-482.
- [20] Yang Chunli, Lan Yongchao, Wang Ninglian, et al. Mountainous runoff changes and climate factors analysis of the Shule River basin in 1958-2015 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(12): 1894-1899. [杨春利, 蓝永超, 王宁练, 等. 1958-2015 年疏勒河上游出山径流变化及其气候因素分析[J]. *地理科学*, 2017, 37(12): 1894-1899.]
- [21] Lan Yongchao, Hu Xinglin, Xiao Shengchun, et al. Study on climate change in mountainous region of Shulehe River basin in past 50 years and its effect to mountainous runoff [J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(6): 1636-1644. [蓝永超, 胡兴林, 肖生春, 等. 近 50 年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J]. *高原气象*, 2012, 31(6): 1636-1644.]
- [22] Zhang Peng, Zhang Yu, Luo Ying, et al. Response of runoff at mountainous area of Shule River to climate change of upstream [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2013, 24(5): 165-172. [张鹏, 张钰, 罗颖, 等. 疏勒河出山口径流对上游气候变化的响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(5): 165-172.]
- [23] Xu Haojie, Yang Taibao, Zhang Xiaoxiao. Climate change in upstream area of Shule River and its effects on runoff-yield in last 50 years [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(4): 39-52. [徐浩杰, 杨太保, 张晓晓. 近 50 年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(4): 39-52.]
- [24] Li Peidu, Si Jianhua, Feng Qi, et al. Analysis and simulation on annual runoff variation characteristics of Shule River [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2): 52-60. [李培都, 司建华, 冯起, 等. 疏勒河年径流量变化特征分析及模拟[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 52-60.]
- [25] Li Jing, Sheng Yu, Wu Jichun, et al. Characteristics of permafrost ground temperatures and influencing factors in the upstream of the Shule River in western Qilianshan Mountains [J].

- Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2011, 47(2): 37-43. [李静, 盛煜, 吴吉春, 等. 祁连山西段疏勒河上游流域的多年冻土地温特征及影响因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 37-43.]
- [26] Wu Jichun, Sheng Yu, Li Jing, et al. Permafrost in source areas of Shule River in Qilian Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 64(5): 571-580. [吴吉春, 盛煜, 李静, 等. 疏勒河源区的多年冻土[J]. 地理学报, 2011, 64(5): 571-580.]
- [27] Dong Weiwei, Ding Yongjian, Wei Xia. Variation of the base flow and its causes in the upper reaches of the Shule River in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 661-669. [董薇薇, 丁永建, 魏霞. 祁连山疏勒河上游基流变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 661-669.]
- [28] Guo Xiaoyan. Study on the hydrological processes in Shule River basin by using isotopic tracers and hydrochemical method [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2015. [郭小燕. 基于稳定同位素和水化学的疏勒河流域水文过程研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2015.]
- [29] Zhou Jiabin, 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.]
- [30] Wu Jinkui, Chen Junwu, Wu Hao, et al. Comparative study of evapotranspiration in an alpine meadow in the upper reach of Shulehe River basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(1): 97-103. [吴锦奎, 陈军武, 吴昊, 等. 疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研究[J]. 地理科学, 2013, 33(1): 97-103.]
- [31] Zhou Jiabin. Mouti-methods study on runoff components in alpine regions: a case study of the upper reaches of Shule River basin [D]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, 2019. [周嘉欣. 寒区河流径流组成的多方法研究——以疏勒河上游为例[D]. 兰州: 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2019.]
- [32] Tianjun County Records compilation Committee. County local records of Tianjun[M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 1995: 65-123. [天峻县县志编纂委员会. 天峻县志[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1995: 65-123.]
- [33] Wang Shaoyong, He Xiaobo, Wu Jinkui, et al. Chemical characteristics and ionic sources of precipitation in the source region of the Yangtze River[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4431-4439. [汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 等. 长江源区大气降水化学特征及离子来源[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4431-4439.]
- [34] Chen Jingsheng, Tao Shu, Deng Baoshan, et al. Water environmental chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987: 45-66. [陈静生, 陶澍, 邓宝山, 等. 水环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 45-66.]
- [35] Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuosang. Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 86-92. [沈照理, 朱宛华, 钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 86-92.]
- [36] Wang Caixia, Zhang Jie, Dong Zhiwen, et al. Glacier meltwater runoff process analysis based on δD 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.]
- [37] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1944, 25(6): 914-928.
- [38] Dong Zhiwen, Qin Dahe, Chen Jizu, et al. Dust influences on alpine glacier meltwater in Laohugou glacier basin of western Qilian Mountains[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 207-216. [董志文, 秦大河, 陈记祖, 等. 粉尘颗粒物对祁连山老虎沟冰川融水理化性质的影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 207-216.]
- [39] Su Qi, Yuan Daoyang, Xie Hong, et al. Geomorphic features of the Shule River drainage basin in Qilianshan and its insight into tectonic implications[J]. Seismology and Geology, 2016, 38(2): 240-258. [苏琦, 袁道阳, 谢虹, 等. 祁连山西段疏勒河流域地貌特征及其构造意义[J]. 地震地质, 2016, 38(2): 240-258.]
- [40] Tong Kui. The mesozoic and cenozoic tectonic characteristics and tectonic evolution of the southern margin of central Qilian, in the Shulehe area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. [童隳. 中祁连南缘疏勒河地区中—新生代构造特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.]
- [41] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [42] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. Chemical Geology, 1999, 159(1): 3-30.
- [43] Liu Songtao, Zhang Dong, Li Yuhong, et al. Water sources and factors controlling on hydro-chemical compositions in the Yiluo River basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1184-1196. [刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1184-1196.]
- [44] Zhang Tao, Cai Wutian, Li Yingzhi, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River basin[J]. Environmental Science, 2017, 38(11): 4537-4545. [张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4537-4545.]
- [45] Zhang Yan, Wu Yong, Yang Jun, et al. Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi town, Langzhong city [J]. Environmental Science, 2015, 36(9): 3230-3237. [张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3230-3237.]
- [46] Jü Jianting, Zhu Liping, Wang Yong, et al. Composition spatial distribution and environmental significance of water ions in Lake Pumayum Co and its catchment, Southern Tibet[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(5): 591-599. [鞠建廷, 朱立平, 汪勇, 等. 藏南普莫雍错流域水体离子组成与空间分布及其环境意义[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 591-599.]
- [47] Sun Rui, Zhang Xueqin, Wu Yanhong. Major ion chemistry of water and its controlling factors in the Yamzhog Yumco basin, south Tibet[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(4): 600-608. [孙瑞, 张雪芹, 吴艳红. 藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 600-608.]
- [48] Moon S, Huh Y, Qin J H, et al. Chemical weathering in the Hong (Red) River basin: rates of silicate weathering and their controlling factors [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(6): 1411-1430.
- [49] Gao Quanzhou, Tao Zhen, Huang Xiakun, et al. Chemical

- weathering and CO₂ consumption in the Xijiang River basin, south China[J]. *Geomorphology*, 2009, 106(3-4): 324-332.
- [50] Galy A, France-Lanord C. Weathering processes in the Ganges-Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1-4): 31-60.
- [51] Wu Weihua, Yang Jiedong, Xu Shijin, et al. Geochemistry of the headwaters of the Yangtze River, Tongtian He and Jinsha Jiang: silicate weathering and CO₂ consumption [J]. *Applied Geochemistry*, 2008, 23(12): 3712-3727.
- [52] Noh H, Huh Y, Qin J H, et al. Chemical weathering in the Three Rivers region of eastern Tibet[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(7): 1857-1877.

Hydrochemical characteristics and controlling factors in the source region of Shule River

YANG Qin^{1,2}, HAN Tianding¹, LI Xiangying^{3,4}, QIN Jia^{1,5}, CHENG Peng⁶, PU Hongzheng⁷

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 4. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 5. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 6. Urumqi Meteorological Bureau, Urumqi 830002, China; 7. School of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: The source region of Shule River basin was selected as the study area, and the samples of river water, spring water and snow were collected between December in 2018 to November in 2019. Hydrochemical characteristics and controlling factors of different waters were analyzed qualitatively by Gibbs figure, Piper Triangular diagram and the ratio of ions. The contribution of rain (atmospheric), evaporite, carbonate, and silicate weathering in different seasons was quantified by mass budget equations of cations (the forward model). The results showed that the concentration of the total dissolved solids (TDS) was ordered by spring water>river water>glacier meltwater>snow water. Hydrochemical types of river water were HCO₃⁻·Mg²⁺·Ca²⁺ in winter, HCO₃⁻·Ca²⁺·Mg²⁺·Na⁺ in spring and HCO₃⁻·Ca²⁺·Mg²⁺ in summer and autumn. Hydrochemical types of spring water and snow water were HCO₃⁻·Ca²⁺ and HCO₃⁻·Ca²⁺·Mg²⁺, respectively. Due to the influence of many factors, the temporal and spatial variations of major ions in river water were different. Hydrochemical composition of river water and spring water was controlled by rock weathering, snow water was controlled by rock weathering and precipitation. The major ions of river water and spring water were derived from carbonate weathering which dominated by dolomite, silicate weathering and evaporite dissolution of halite, gypsum and sulfate minerals. The contribution of cations from atmospheric and rock weathering was different in different seasons. On the whole, the cations in river water were mainly derived from silicate weathering in winter and spring, the contribution ratio were 36.21% and 35.54%, respectively. The contribution ratio was ordered by carbonate>silicate>rain>evaporite in summer and carbonate>silicate>evaporite>rain in autumn. In general, the cations of river water mainly come from carbonate and silicate weathering.

Key words: source region of Shule River; hydrochemistry; controlling factors; contribution ratio

(责任编辑: 张强弓; 编辑: 周成林, 庞瑜)