

塔里木盆地克里雅河流域水化学特征及成因分析*

纳麦提·托合提^{1,2}, 张峰^{2†}

(1. 喀什大学 生命与地理科学学院, 新疆 喀什 844006; 2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 为探讨克里雅河流域的水化学特征及其成因, 于2014年夏季与2015年冬季实地采集了21个河水、8个地下水和1个高山湖水样品, 并对样品的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等主要阴阳离子和相关的pH值、电导率、TDS值、硬度等因素进行测定, 然后分析了流域水化学的时空变化特征、水化学类型以及水化学的成因. 结果显示:(1) 随着海拔高度的降低, 硬度、TDS值和主要离子含量明显增高. (2) 夏季除了pH值外, 其他参数和主要离子含量均低于冬季, 或因夏季径流量大, 河水对化学离子的稀释作用较冬季显著而引起. (3) 夏季和冬季中上游河水中的阳离子浓度分别为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, 阴离子浓度分别为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 与 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, 水化学类型分别为 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ 型和 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 型; 冬季下游河水中的阴离子和阳离子浓度分别 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 水化学类型为 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$ 型; 地下水阴、阳离子浓度分别 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 水化学类型为 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$ 型. (4) 中游、上游河水水化学成分受岩石风化作用的控制为主, 而地下水和下游河水则以塔里木盆地极端干旱气候的蒸发-结晶作用影响为主. (5) 于田绿洲的地下水与河水的水化学特征均表现出来自人类活动的影响.

关键词: 塔里木盆地; 克里雅河; 水化学; TDS值; 阳离子

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2020.03.20.0002

中图分类号: P592 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2021)02-0220-09

引文格式: 纳麦提·托合提, 张峰. 塔里木盆地克里雅河流域水化学特征及成因分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(2): 220-228.

英文引文格式: Namat T, ZHANG F. The analysis of water chemical characteristics and its causes in the Keriya River, Tarim Basin[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38(2): 220-228.

The Analysis of Water Chemical Characteristics and its Causes in the Keriya River, Tarim Basin

Namat Tohti^{1,2}, ZHANG Feng²

(1. College of Life and Geographical Sciences, Kashgar University, Kashgar Xinjiang 844006, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830046, China)

Abstract: To understand hydrochemical characteristics and its origin of the Keriya River Basin, we conducted field investigation in during summer of 2014 and winter of 2015, and collected 21 surface water samples, 8 groundwater samples and 1 high mountain lake water samples. The samples contents of Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- and the pH values, conductivity, total dissolved solids (TDS), hardness were measured. The spatial and temporal variation of water quality, hydrochemical types, origin and its causes were analyzed. The results showed that: (1) Hardness, TDS, major ion contents obviously increased with the decreasing of altitude. (2) Due to the large runoff in summer, the river water has a significant dilution effect on chemical ions. Except the pH values, other parameters and main ion contents are lower than those in winter. (3) The cations in the upper and middle reaches of the river in summer and winter are $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ and $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, respectively. The anions are $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ and $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, respectively. Hydrochemical types are $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ type and $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ type, respectively. In winter, anions and cations in the lower reaches of the river are $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ and $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, respectively. Hydrochemical

* 收稿日期: 2020-03-20

基金项目: 国家自然科学基金联合项目(U1178303; U1503381).

作者简介: 纳麦提·托合提(1989-), 男, 硕士生, 主要从事干旱区资源与环境的研究, E-mail: namatjan1@126.com.

† 通讯作者: 张峰, 男, 副教授, 主要从事干旱区资源与环境的研究, E-mail: zhang-f-eng@sohu.com.

type is $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$ type. In the groundwater, the anions and cations are $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ and $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, respectively. Hydrochemical type is $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$ type. (4) Hydrochemical compositions of middle and upper reaches are dominated by rock weathering, but Evaporation and crystallization from the extreme arid climate in the Tarim Basin control the chemical compositions of groundwater and downstream water in the Keriya River. (5) Human agricultural production activities such as pesticides, urea caused groundwater pollution in the Keriya Oasis.

Key words: Tarim Basin; Keriya River; water chemistry; TDS; cation

0 引言

水是影响干旱与半干旱地区最重要的生态因子^[1,2],对社会经济可持续发展影响大^[3].河流水化学条件通过地表水和地下水的水质来影响绿洲生态系统^[4].塔里木盆地四周分布着约54 923.9 km²的绿洲,占塔里木盆地总面积约10%^[5],自古就是人类文明繁衍和生息之地^[6],其河流水化学状况及影响因素则是开发利用盆地水资源时需要特别重视的问题. Berner E K认为,地质和气候因素在流域水化学中起着决定性作用^[7];王双合等学者认为河流的水化学特征对其所经地区的岩石和气候等有着指示意义^[7,8]. Meybeck M研究了流域地貌、面积、径流量以及人类活动等因素对水化学的影响^[9].

塔里木盆地受极端干旱气候与地貌的影响^[10],盆地内天然水表现出矿化度普遍较高的水化学特征^[11,12],克里雅河也不例外^[13]. Hiroki Takamura^[14]把克里雅河分为4个河段进行分析,并把水化学与支流的流入、盆地气候、地下水补给等相结合;朱秉启^[11]、吕明强^[13]、邵跃杰^[15]等学者先后对包括克里雅河在内的塔里木盆地的河流水化学进行了测定,但工作仅限于克里雅河的部分河段;缺少专门而系统的研究,对季节性变化涉及不多.

本文将克里雅河流域作为研究对象,以保护流域水环境和生态系统为目的,在不同季节沿流域不同位置采集了地表水和地下水样品进行测定,分析克里雅河流域的水化学特征及其成因,研究成果可为克里雅河水的地球化学研究、水资源保护以及水资源的合理开发利用提供有用数据.

1 研究区概况

克里雅河发源于青藏高原北缘昆仑山乌什腾塔格山北坡,自南向北流,河流出山后中游形成于田绿洲,下游塔克拉玛干沙漠腹地形成达里雅博依天然绿洲,最终消失于沙漠中.河流上游由库拉甫河和喀什塔什河两大支流组成,从两大支流汇合点到于田绿洲为中游,于田绿洲以下为下游,上中下游海拔高度分别为2 600~6 100 m、1 400~2 600 m与1 100~1 400 m^[16].河流上游均为高山区,分布大量的岩浆岩和变质岩;中游上部为洪积冲积扇砾石平原,中部为亚沙土、沙壤土的农业平原,下部为盐土平原;下游达里雅博依天然绿洲为复合型沙丘和植被相间分布的三角洲,植被主要以胡杨、芦苇和怪柳为主^[17].在克里雅河上游海拔约4 800 m昆仑山,还分布着大气降水和冰雪融水补给的封闭湖泊,如乌鲁克库勒湖^[18](图1).

克里雅河总长约770 km,其中沙漠河段长420 km,流域总面积约7 358 km²,其中山区和沙漠占的比例极大^[19].克里雅河径流量的71%来自冰川和积雪融水,20%来自地下水补给,降水补给占9%,降水主要集中在山区^[20].据克里雅河水文站资料(新疆维吾尔自治区和田水文水资源勘测局提供),1957—2009年流域多年平均气温11.72 °C,平均降水量50.17 mm,平均蒸发量2 423 mm,多年平均径流量约7.31×10⁸ m³,最大、最小径流量分别为10.76×10⁸ m³(1966年)和4.92×10⁸ m³(1993年);冬春夏秋季径流量分别占总径流量的7.2%、11.9%、66.4%和14.5%,径流量年际变化小,季节变化较大^[21].

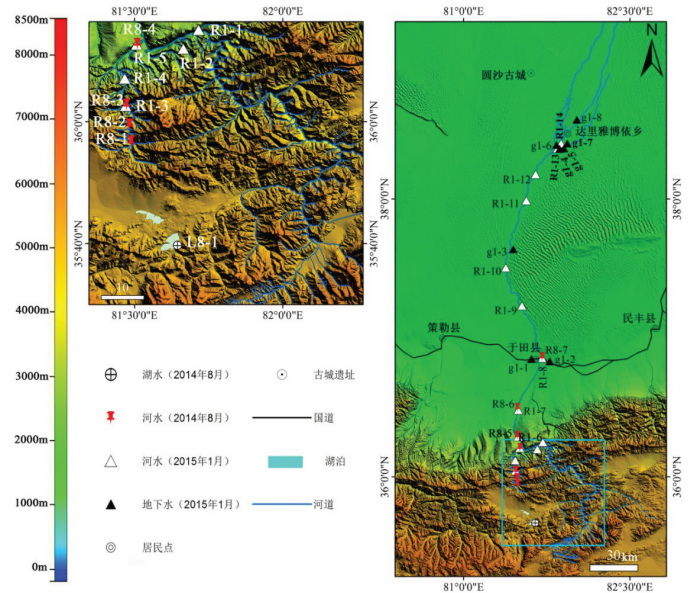


图1 克里雅河流域DEM及样品采样点位置示意图

Fig 1 DEM and distribution of sampling points in the Keriya River Basin

2 样品采集与数据处理

分别于2014年8月和2015年1月从克里雅河上游的乌鲁克库勒湖至下游海拔1 100 m的塔克拉玛干沙漠腹地达里雅博依天然绿洲采集到高山湖水1个(2014年8月),河水21个(其中:2014年8月采集7个,2015年1月采集14个),地下水8个(2015年1月)(图1)。河水样品采自河流的上中下游,地下水则来自于田人工绿洲和达里雅博依天然绿洲。样品用聚乙烯瓶密封,记录坐标,在新疆大学绿洲生态教育部重点实验室测定。

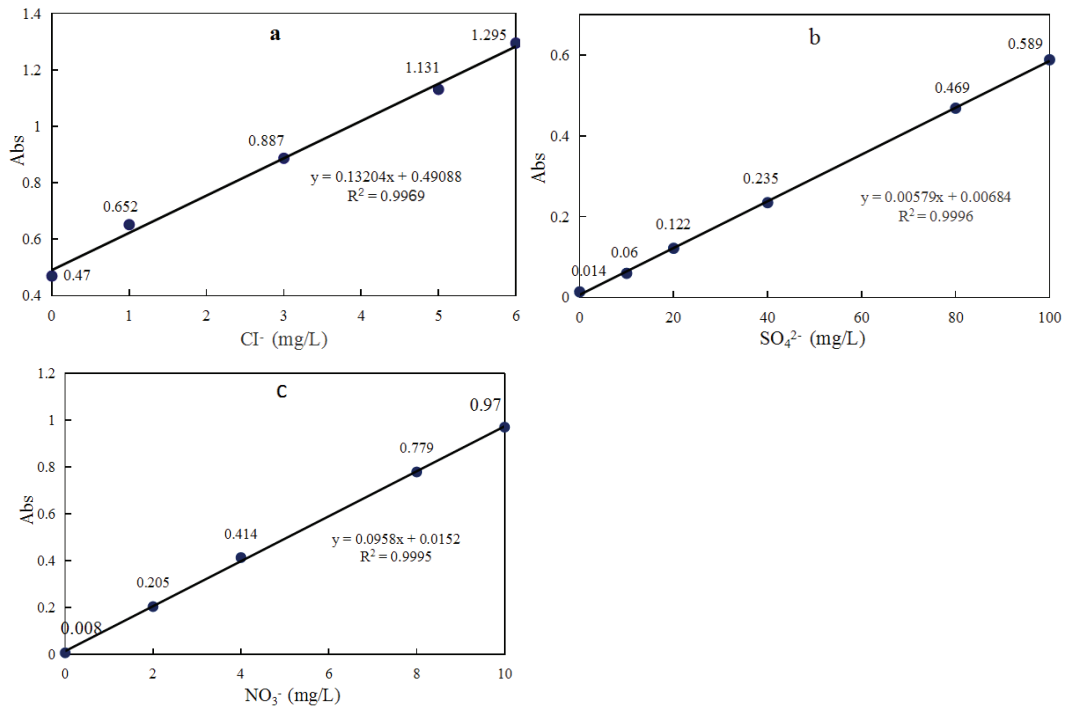


图 2 阴离子标准曲线
Fig 2 Standard curve of anions

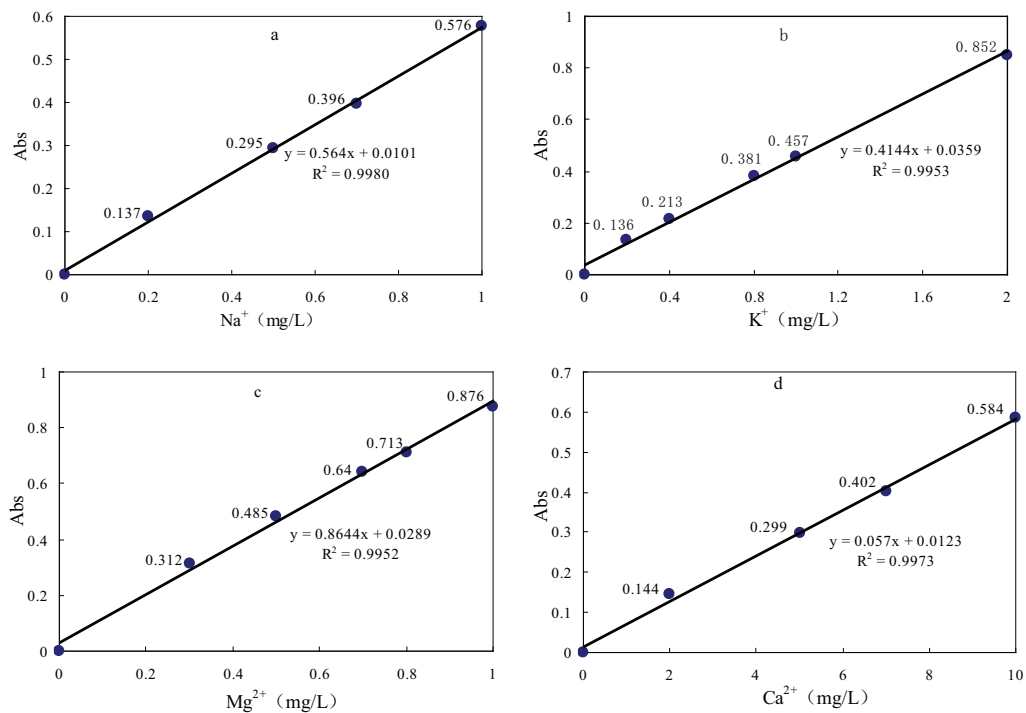


图 3 阳离子标准曲线
Fig 3 Standard curve of cations

pH值和可溶性固体总量(TDS)分别使用梅特勒托利多仪器有限公司FE20型pH计和FE30型电导率仪测定,测定前先用仪器所配的标样进行仪器校正,每次测完5个样品做标样校正;Cl⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻等阴离子使用北京普析通用仪器有限责任公司生产的TU-1810型紫外分光光度计测定,先分别配置Cl⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻不同浓度的标准溶液(北京世纪奥科生物技术有限公司制),分别测定标准溶液在特定波段光的吸光度(Abs),然后绘出标准溶液浓度与其吸光度之间的标准曲线(图2),再测定样品吸光度,根据样品的吸光度计算出样品中该离子的浓度;Na⁺、K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺等阳离子使用北京普析通用仪器有限责任公司生产的TAS-990AFG型原子吸收分光光度计以火焰法测定,先配置标准溶液(北京世纪奥科生物技术有限公司制),分别测定它们的吸光度,根据标准溶液浓度和其吸光度(Abs),然后绘制出标准曲线(图3),最后测定待测水样的吸光度,根据吸光度来推算样品中该离子的含量;HCO₃⁻是根据阴阳离子含量以离子平衡法估算^[22-24];硬度采用德国度,以每10 mg/L CaO为1度^[25],根据Ca²⁺和Mg²⁺的含量,通过方程:硬度=(2.5×C_{Ca} + 4.1×C_{Mg})/17.8 mg/L得出^[26]。

3 结果与分析

3.1 克里雅河流域水化学成分

表 1 克里雅河流域天然水水化学成分(L:湖水,R:河水,g:地下水)

Tab 1 Water chemistry of natural water along the Keriya River (L: lake water, R: surface water, g: groundwater)

样品号	采样时间	pH值	电导率(μS/cm)	TDS(mg/L)	硬度(德国度)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)
L8-1	8月	8.95	32 300	17 281	58.9	0	1 120	3 930	0.6	230	1 393	255.4	0.3
R8-1	8月	7.78	1 097	587	22.5	139.8	177.4	115.3	4.2	4.2	30.4	68.7	47.4
R8-2	8月	7.28	414	221	6.1	19.8	93.5	21.7	4.5	0.8	15.2	8.7	29.1
R8-3	8月	7.97	608	325	10.4	51	111.3	94.9	2.4	2.8	34.3	22.2	37.9
R8-4	8月	7.85	619	331	10.3	55.7	101.1	49.2	2.4	4.1	15.4	19.6	41.5
R8-5	8月	7.99	403	216	7.9	24.7	43.8	156.5	1.3	3	28.7	15.9	30.5
R8-6	8月	8.05	414	221	6.3	26.5	45.5	79.4	2.0	2.1	15.5	15.7	19.2
R8-7	8月	8.07	515	276	8.6	45.5	63.3	171	1.5	5.5	49.7	19.4	29.7
R1-1	1月	7.84	1 053	563	12.5	133.5	83.9	218.7	2.9	12.7	97.9	33.2	34.9
R1-2	1月	7.71	1 695	907	29.6	244	368.6	180.4	3.9	10.7	152.2	58.0	115.7
R1-3	1月	7.61	1 023	547	23.8	137	127.8	302.6	4.5	7.6	63.2	45.3	95.3
R1-4	1月	7.69	1 193	638	22.2	196.6	165.8	222.4	3.6	9.6	101.7	46.8	81.4
R1-5	1月	7.84	1 060	567	20.9	155.4	162.6	253	3.9	9.7	96	41.7	80.3
R1-6	1月	8.03	1 074	575	15.3	172.2	111.1	167.2	3.9	12.5	94.3	36.3	49.2
R1-7	1月	8.06	1 036	554	14.4	179.8	106.2	206.9	2.8	12.7	118.9	37.3	41.3
R1-8	1月	8.60	1 004	537	13.4	128.9	137.3	141.5	5.7	12.1	84.5	34.6	38.9
R1-9	1月	8.34	2 640	1 412	26.1	537.4	339.5	464.4	3.3	14.2	194	85.6	45.8
R1-10	1月	8.26	3 380	1 808	28.8	728.4	448.5	320.3	3.6	21.9	228	94	50.6
R1-11	1月	8.28	3 820	2 044	33.0	771.2	515.5	354.4	3.8	32.2	262	115.1	46.5
R1-12	1月	8.29	3 880	2 076	34.6	789.6	512.1	332.9	3.4	24.3	381	112.2	62
R1-13	1月	8.25	4 580	2 450	44.4	1026	657.0	466.1	3.3	39.2	285	154.7	62.1
R1-14	1月	8.19	5 390	2 884	51.5	1 129.6	736.4	475.7	5.0	50.7	463	181.3	69.4
g1-1	1月	7.26	2 080	1 113	34.9	223.6	229.5	488.4	109.2	18.5	138.9	97	89.7
g1-2	1月	7.43	2 890	1 546	37.2	450.2	467.0	442.6	53.4	25.9	127	116	74.4
g1-3	1月	7.75	3 180	1 701	30.2	702.4	294.6	483.1	0.6	20.5	148	93.2	62.4
g1-4	1月	7.76	7 260	3 884	53.3	1 496.4	1 031.7	915.4	0.8	66.3	570	195.7	58.8
g1-5	1月	7.86	4 790	2 563	47.7	1 041.2	678.9	472.3	1.0	42.9	254	162.6	72.9
g1-6	1月	7.58	6 070	3 247	66.4	1 190.8	849.6	1 215.7	0.9	96.5	511	238.8	80.8
g1-7	1月	7.87	5 370	2 873	55.6	1 197.2	718.1	524.2	1.0	45.6	344	196.4	74.1
g1-8	1月	7.81	3 990	2 134	39.0	814	594.0	475.2	3.0	39.5	224	132.4	60.6

克里雅河流域河水pH值范围在7.28 ~ 8.60,平均值为8.0;电导率、TDS值和硬度(德国度)范围分别在403 ~ 5 390 μS/cm、216 ~ 2 884 mg/L和6.1 ~ 51.5,平均值分别为1 757 μS/cm、940 mg/L和21.1;河水中的Na⁺、K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺等主要阳离子含量分别为15.2 ~ 463 mg/L、0.8 ~ 50.7 mg/L、8.7 ~ 181.3 mg/L和19.2

~ 115.7 mg/L, 平均值分别为133.9 mg/L、13.9 mg/L、59.3 mg/L和52.8 mg/L, 各阳离子的相对标准差(RSD)分别为0.58%、0.61%、0.24%和0.60%; Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 等阴离子含量范围分别为19.8 ~ 1 129.6 mg/L、43.8 ~ 736.4 mg/L、21.7 ~ 475.7 mg/L和1.3~5.7 mg/L, 平均值分别为318.7 mg/L、243.3 mg/L、228.3 mg/L和3.4 mg/L, 各阴离子的相对标准差均低于1% (表1)。

克里雅河流域地下水pH值范围7.26 ~ 7.87, 平均值为7.67, 稍低于河水pH值; 电导率、TDS值和硬度(德国度)范围分别2 080 ~ 7 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、1 113 ~ 3 884 mg/L和30.2 ~ 66.4, 平均值分别为4 453.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、2 382.6 mg/L和45.5, 均高于河水; 地下水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等阳离子含量分别为127 ~ 570 mg/L、18.5 ~ 96.5 mg/L、93.2 ~ 238.8 mg/L和58.8 ~ 89.7 mg/L, 平均值分别为289.6 mg/L、44.5 mg/L、154 mg/L和71.7 mg/L; Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 等阴离子含量分别为223.6 ~ 1 496.4 mg/L、229.5 ~ 1 031.7 mg/L、442.6 ~ 1 215.7 mg/L和0.6 ~ 109.2 mg/L, 平均值分别为889.5 mg/L、607.9 mg/L、627.1 mg/L和21.2 mg/L (表1)。

乌鲁克库勒高山湖水pH值、电导率和TDS分别为8.95、32 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和17 281 mg/L, 在所有样品中值最高; 硬度为58.9, 第二高值。与河水和地下水相比, 湖水中的 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 和 Mg^{2+} 等离子含量最高, 分别为1 120 mg/L、3 930 mg/L、1 393 mg/L、230 mg/L、255.4 mg/L; 而 Cl^- 、 NO_3^- 和 Ca^{2+} 等离子含量却最低, 分别为0 mg/L、0.6 mg/L、0.3 mg/L, 呈现出因水不能流出, 盐分长期溶解累积的全封闭性湖泊水化学特征(表1)。

3.2 水化学类型分布特征

在夏季, 克里雅河流域中上游河水阳离子中没有绝对优势离子(含量超过50%), 大部分样品阳离子以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主, 除了样品R8-1和R8-2的水化学类型分别为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^--\text{HCO}_3^--\text{Mg}^{2+}-\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}-\text{Na}^+$ 型外, 其他样品的水化学类型均为 $\text{HCO}_3^--\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}-\text{Na}^+$ 型; 在冬季, 中上游河水阳离子以 Na^+ 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主, Cl^- 和 SO_4^{2-} 的含量也较多, 水化学类型为 $\text{HCO}_3^--\text{Cl}^--\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}$ 型, 与前人研究^[11]基本一致; 冬季下游河水阳离子中 Na^+ 占绝对优势, 含量均超过50%, 阴离子中没有出现优势离子, 主要以 Cl^- 为主, 其次为 SO_4^{2-} , 水化学类型为 $\text{Cl}^--\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+-\text{Mg}^{2+}$ 型(图4)。

流域地下水阳离子以 Na^+ 和 Mg^{2+} 为主, Na^+ 占优势, 阴离子含量均较高, 以 Cl^- 为主, 水化学类型为 $\text{Cl}^--\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^--\text{Na}^+-\text{Mg}^{2+}$ 型, 与下游河水接近, 可能与冬季克里雅河河水接受地下水补给有关。乌鲁克库勒高山湖水阳、阴离子中 Na^+ 和 HCO_3^- 占绝对优势, 分别占阳、阴离子含量的86.4%和77.8%, 水化学类型为 $\text{HCO}_3^--\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+$ 型(图4)。

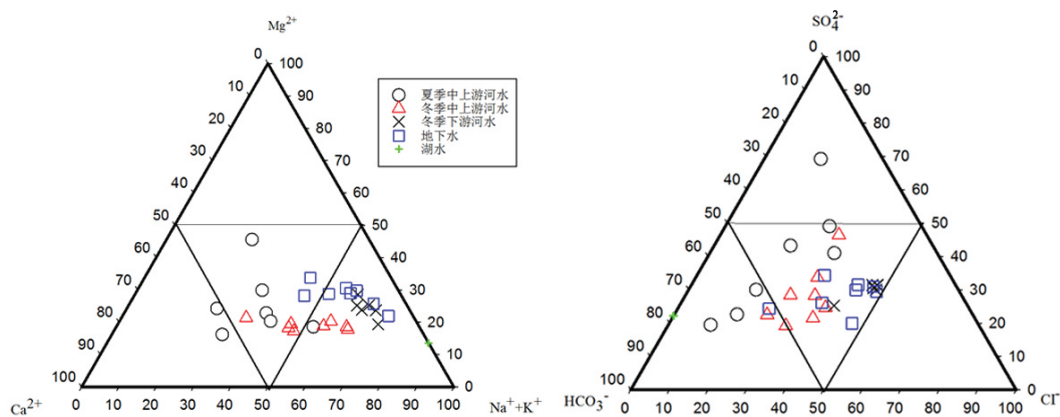


图4 克里雅河流域天然水的水化学组成三角图

Fig 4 Ternary diagram showing the water chemical types in the Keriya River Basin

4 讨论

4.1 水化学成分沿流域变化的原因

由图5可以看出, 在夏季, 中上游河水TDS值、硬度和各离子含量均较低, 可能与夏季克里雅河径流量大(占年总径流量的66.4%), 河水对化学离子的稀释作用有关。与中上游河水相比, 冬季下游河水的pH值、TDS值、硬度和各离子含量明显增高, 这可能与上下游地质不同、下游岩石的溶解时间长、水量少、日照强烈等诸多因素有关。与河水相比, 地下水TDS值、硬度及各离子含量普遍较高, 尤其是沙漠腹地天然绿洲地下水; 地下水中的各离子含量接近于冬季下游河水, 但空间上的变化较大(图5), 与前人研究一致^[14], 这可能与冬季地下水

补给河水密切相关。随着海拔高度的降低, 河水TDS值、硬度和主要离子含量逐渐增高, 水质下降, 冬季比夏季明显; 在河流出山口, 由于河流两条支流汇合水量增多, TDS值和其他离子含量出现有所降低, 河水稀释作用明显。

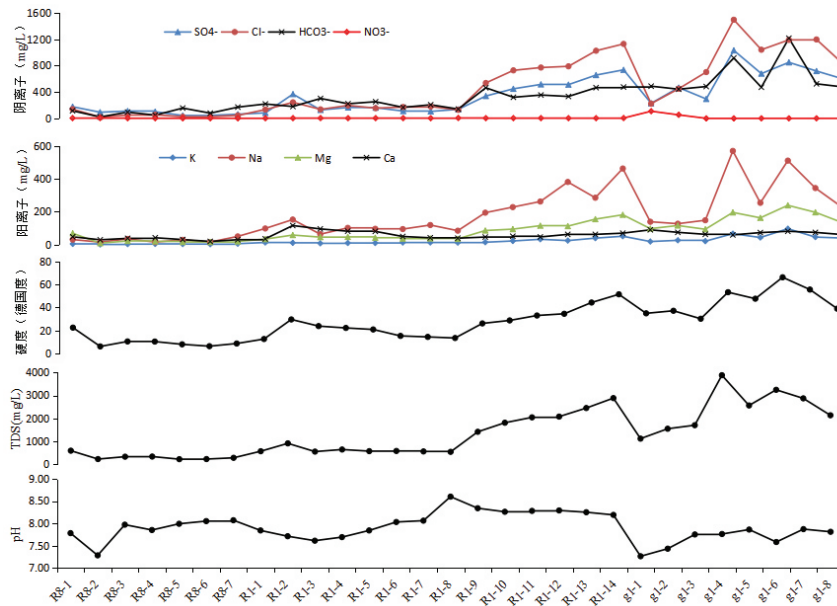


图 5 克里雅河流域河水和地下水水化学成分的变化

Fig 5 The variation of Water chemistry in river water and groundwater along the Keriya River

4.2 水化学离子的成因

Gibbs根据世界主要河流、湖泊及海洋水的TDS与 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 、TDS与 $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 的关系, 将水化学成分的成因机制分为: 降水控制型、岩石风化控制型和蒸发-结晶控制型等三类^[27]。以该方法, 克里雅河流域天然水远离大气降雨作用带, 而无论冬季还是夏季, 中上游河水均受到岩石风化作用的影响, 与夏季相比, 冬季河水更接近于蒸发-结晶作用带, 这可能与冬季地下水补给河水有一定的关系; 对下游河水和地下水而言, 两者的TDS值、 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ 和 $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 比值都较高(图6), 说明下游河水和地下水受到蒸发-结晶作用的控制, 表现出典型的干旱区河流的水化学特征^[28], 可能与塔里木盆地的极端干旱气候有关。

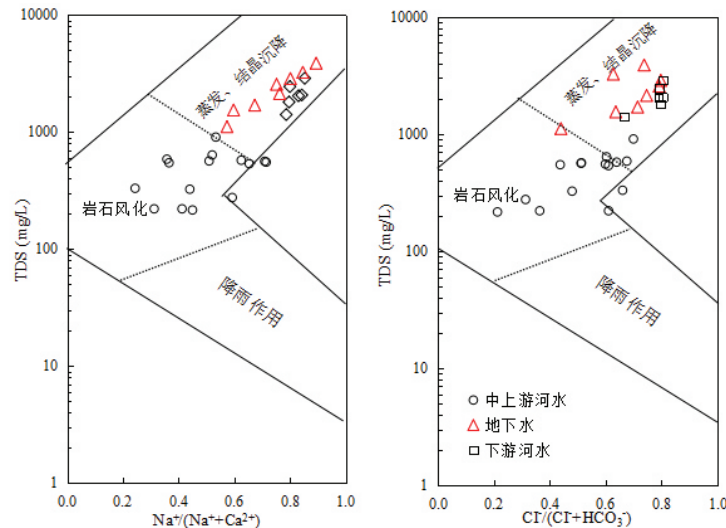


图 6 克里雅河流域河水和地下水Gibbs图

Fig 6 Gibbs plot of showing the water chemical types in the Keriya River Basin

4.3 水化学成分的来源

受到风化作用的岩石根据其化学性质分为蒸发岩、碳酸盐岩和硅酸盐岩^[29], 它们对全球河流溶解物的贡献率分别占17.2%、50%和11.6%^[30]. 天然水中的 Na^+ 和 K^+ 来源于蒸发岩或硅酸盐的溶解, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 则来源于碳酸盐、蒸发岩或硅酸盐岩, SO_4^{2-} 和 Cl^- 来源于蒸发岩, 而 HCO_3^- 来源于碳酸盐矿物^[31].

从图7(a)中可以看出, 除了湖水和2个中上游河水以外, 其他样品都处在 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 与 HCO_3^- 的 $y = x$ (1 : 1)线下方, 且离 $y = x$ 线较远, 说明河水和地下水化学成分中蒸发岩来源大于碳酸盐, 湖水则相反. 由图7(b)可以看到, 除了湖水外, 其他数据点都处于 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 的 $y = x$ 线下方, 且离线较远, 说明碳酸盐并不是水中所有 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的来源. 图7(c)显示, 除了湖水外, 其他样品处于 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 的 $y = x$ 线上或离线很近, 暗示蒸发岩中 KCl 和 NaCl 的溶解可能是河水和地下水中 Cl^- 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 的主要来源. 由图7(d)和7(e)可以看出, 所有数据点都接近于 Na^+ 与 SO_4^{2-} 的 $y = x$ 线和 Na^+ 与 HCO_3^- 的 $y = x$ 线, 说明硫酸盐矿物的溶解也是水中 Na^+ 的重要来源, 同时说明湖水中的 Na^+ 来源于硫酸盐(图7(e)). 图7(f)显示, 大多数点接近于 SO_4^{2-} 与 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的 $y = x$ 线, 表明水中的部分 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源于硫酸盐矿物的溶解.

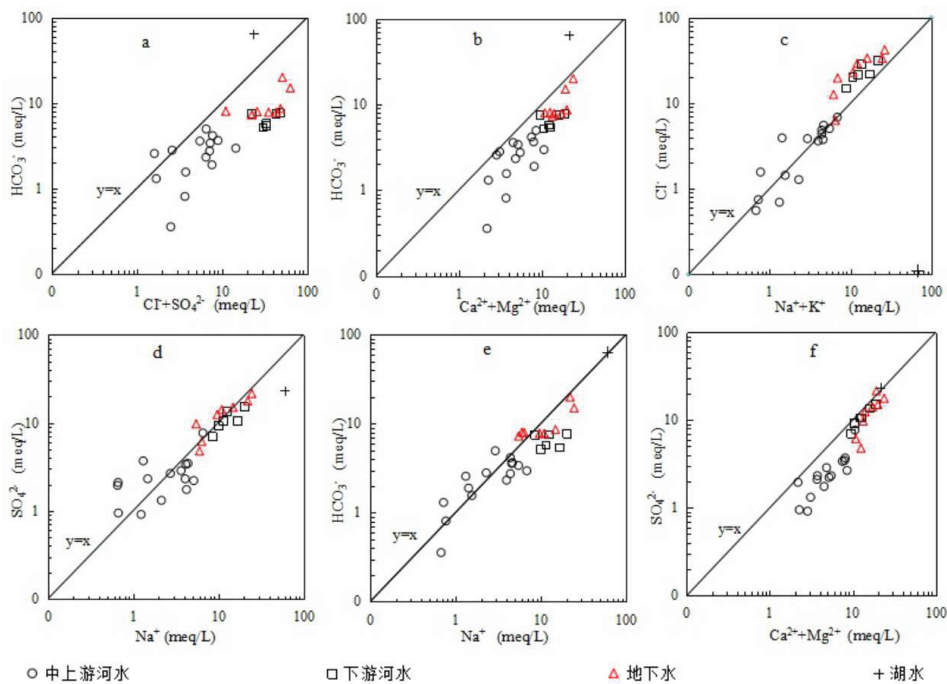


图 7 克里雅河流域水主要离子比例关系

Fig 7 Ratio of major ions in the Keriya River Basin

在天然水中 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 H_2PO_4^- 等离子的含量较高, 意味着生物或人类活动对该水体的水化学有一定的影响^[32], 受到农业污染影响的水中 NO_3^- 的含量较高^[33]. 研究显示, 于田绿洲地下水中 NO_3^- 的含量很高, 分别为109.2 mg/L和53.4 mg/L, 远远超过河水中的 NO_3^- 含量最高值5.7 mg/L和达里雅博依天然绿洲地下水中的最高值3.0 mg/L, 说明于田绿洲地下水受到人类农业生产活动的影响较大; 同时, 对河水而言, 于田绿洲河水中的 NO_3^- 含量最高(样品R1-8), 很可能与受到农业污染的地下水补给河水有关.

5 结论

(1) 克里雅河流域水质从上游至下游逐渐下降. 在冬季和夏季, 克里雅河流域中上游河水属于硬度为软水至中等硬水的淡水, 水质冬季比夏季差; 冬季下游河水属于硬度为中等硬水至硬水的微咸水; 地下水均为硬水, 其中于田绿洲地下水为微咸水, 而沙漠腹地地下水则为咸水; 湖水为过咸硬水.

(2) 中上游河水中的阳离子, 夏季和冬季分别为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, 阴离子分别为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 与 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, 水化学类型分别为 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$ 型和 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 型; 冬季下游河水中的阴离子和阳离子分别为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 水化学类型为 $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$ 型; 地下水阴阳离子分别为 $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 水

化学类型为 Cl^- - SO_4^{2-} - HCO_3^- - Na^+ - Mg^{2+} 型。可见,不同季节和河流不同部位的水化学成分差异显著。河流越往下游,由于河水与岩石接触的时间越长、河水流速越慢、流量越少以及日照越强烈的原因,克里雅河流域河水的TDS和主要离子含量逐渐增高。在冬季,除了pH值外,克里雅河流域河水的TDS值、硬度和主要离子含量均高于夏季。

(3) 克里雅河流域水化学组成受到岩石风化作用和蒸发-结晶作用的控制,气候、人类生产活动和季节变化的影响较大,其中中上游河水受到岩石风化作用的控制,而下游河水和地下水则受到塔里木盆地极端干旱气候蒸发作用的影响。

(4) 克里雅河流域于田人工绿洲地下水在一定程度上受到人类农业生产活动的污染,冬季地下水补给河水导致于田人工绿洲河水中 NO_3^- 增高。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,李卫红,徐海量,等.塔里木河下游地下水位对植被的影响[J].地理学报,2003,58(4):542-549.
CHEN Y N, LI W H, XU H L, et al. The influence of groundwater on the vegetation in the lower reaches of Tarim River, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 542-549. (in Chinese)
- [2] 陈亚宁,崔旺诚,李卫红,等.塔里木河的水资源利用与生态保护[J].地理学报,2003,58(2):215-222.
CHEN Y N, CUI W C, LI W H, et al. Utilization of water resources and ecological protection in the Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 215-222. (in Chinese)
- [3] 胡汝骥,樊自立,王亚俊,等.中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J].自然资源学报,2002,17(3):322-326.
HU R J, FAN Z L, WANG Y J, et al. Groundwater resources and their characteristics in arid land of Northwestern China[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 322-326. (in Chinese)
- [4] 陈永金,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河下游地下水化学特征对输水响应的阶段性研究[J].环境科学,2006,27(7):1299-1304.
CHEN Y J, CHEN Y N, LI W H, et al. Three stages of the groundwater chemical properties reacting on the intermittent water deliveries in lower Tarim River, China[J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1299-1304. (in Chinese)
- [5] 梁剑鸣,周杰.塔里木盆地绿洲与河流径流量的关系[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):50-54.
LIANG J M, ZHOU J. Relationship between oases distribution and stream runoff in the Tarim Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 50-54. (in Chinese)
- [6] 夏倩倩,马家驹,张峰.塔克拉玛干沙漠腹地克里雅河尾间圆沙三角洲沙质沉积物粒度特征[J].新疆大学学报(自然科学版),2014,31(1):12-16.
XIA Q Q, MA J J, ZHANG F. The grain size parameters measurement of sediment at the Yuansha Delta in central Taklimakan Desert[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2014, 31(1): 12-16. (in Chinese)
- [7] BERNER E K, BERNER R A. The global water cycle[M]. New Jersey: Geochemistry and Environment, Prentice Hall, 1987.
- [8] 王双合,胡兴林,赵治文,等.甘肃省河流天然水化学特征的分布规律及控制因素分析[J].冰川冻土,2010,32(2):373-380.
WANG S H, HU X L, ZHAO Z W, et al. The spatial pattern of natural hydrochemistry features of the river in Gansu province and its controlling factors[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 373-380. (in Chinese)
- [9] MEYBECK M. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads[J]. American Journal of Science, 1987, 287: 401-428.
- [10] 杨利普.塔里木盆地水资源与环境保护[J].自然资源,1983(3):30-32.
YANG L P. Water resources and environmental protection in tarim Basin[J]. Natural Resources, 1983(3): 30-32. (in Chinese)
- [11] 朱秉启,杨小平.塔克拉玛干沙漠天然水体的水化学特征及其成因[J].科学通报,2007,52(13):1561-1566.
ZHU B Q, YANG X P. Hydrochemical characteristics and Reasoning Analysis of natural waters in the Taklamakan desert[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(13): 1561-1566. (in Chinese)
- [12] 樊自立,季方.塔里木河水化学变化及其控制途径[J].地理学报,1991,46(3):319-326.
FAN Z L, JI F. The Hydrochemical change of Tarim river and its control way[J]. Acta Geographica Sinica, 1991, 46(3): 319-326. (in Chinese)
- [13] 吕明强.塔里木盆地河流水化学特征[J].水科学进展,1993,4(1):51-56.
LYU M Q. The hydrochemistry characteristics of Interior Rivers in Tarim Basin[J]. Advances in Water Science, 1993, 4(1): 51-56. (in Chinese)
- [14] HIROKI T. Environment and Human Activities in the Southern Part of the Taklimakan Desert[M]. Shinagawa: Published by

- Institute of Environmental Sciences, Rishsho University, 2004, 41-49.
- [15] 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(5): 1021-1029.
SHAO Y J, LUO G M, WANG J, et al. Hydrochemical characteristics and formation causes of main ions in water of the Keriya river, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2018(5): 1021-1029. (in Chinese)
- [16] 周兴佳, 李保生, 朱峰, 等. 南疆克里雅河绿洲发育和演化过程研究[J]. 云南地理环境研究, 1996, 8(2): 44-57.
ZHOU X J, LI B S, ZHU F, et al. The research on the development and evolution of the oasis of Keriya river in southern Xinjiang[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1996, 8(2): 44-57. (in Chinese)
- [17] 朱震达, 陆锦华, 江伟铮, 等. 塔克拉玛干沙漠克里雅河下游地区风沙地貌的形成发育与环境变化趋势的初步研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 1-10.
ZHU Z D, LU J H, JIANG W Z, et al. Study on formation and development of aeolian landform and trend of environmental change at lower reach of the Keriya river, Taklamakan desert[J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(2): 1-10. (in Chinese)
- [18] 李栓科. 中昆仑山区封闭湖泊湖面波动及其气候意义[J]. 湖泊科学, 1992(1): 19-30.
LI S K. Fluctuation of closed lake level and its climatic significance on the middle Kunlun mountains[J]. Journal of Lake Sciences, 1992(1): 19-30. (in Chinese)
- [19] 樊自立, 季方. 克里雅河中下游自然环境变迁与绿色走廊保护[J]. 干旱区研究, 1989, 6(3): 16-24.
FAN Z L, JI F. The changes of natural environment and the green corridor protection in middle-lower reaches of the Keriya river[J]. Arid Zone Research, 1989, 6(3): 16-24. (in Chinese)
- [20] YA X, ZHU Z, JAEKEL D, et al. Late Quaternary palaeoenvironment change and landscape evolution along the Keriya River, Xinjiang, China: The relationship between high mountain glaciation and landscape evolution in fore land desert regions[J]. Quaternary International, 2002, 97-98: 155-166.
- [21] 陈荷生. 水在克里雅河流域生态地理环境中的作用[J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 38-53.
CHEN H S. Effect of water Eco-geographic environment of the Keriya River Valley[J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(2): 38-53. (in Chinese)
- [22] MITAMURA O, SEIKE Y, KONDO K, et al. First investigation of ultraoligotrophic alpine Lake Puma Yumco in the pre Himalaya, China[J]. Limnology, 2003, 4: 167-175.
- [23] MURAKAMI T, TERAH H, YOSHIYAMA Y, et al. The second investigation of Lake PumaYum Co located in the Southern Tibetan Plateau, China[J]. Limnology, 2007, 8: 331-335.
- [24] 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初步研究[J]. 湖泊科学, 2008, 20(5): 591-599.
JU J T, ZHU L P, WANG Y, 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. (in Chinese)
- [25] 霍崇仁, 王禹良. 水文地质学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 312-320.
HUO C R, WANG Y L. Hydrological Geology[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1988: 312-320. (in Chinese)
- [26] 弗里泽R A, 彻里J A. 地下水[M]. 吴静方, 译. 北京: 地震出版社, 1979: 287-295.
FREEZE R A, CHERRY J A. Groundwater[M]. WU J F, Trans. Beijing: Earthquake Press, 1979: 287-295. (in Chinese)
- [27] GIBBS R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.
- [28] SARIN M M, KRISHNASSWAMI S. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river systems[J]. India Nature, 1984, 312: 538-541.
- [29] 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.
XIE C J, GAO Q Z, TAO Z. Review and perspectives of the study on chemical weathering and hydrochemistry in river basin[J]. Tropical Geography, 2012, 32(4): 331-337. (in Chinese)
- [30] CHEIKH B. Isotope techniques for monitoring groundwater salinization[J]. Hydrogeology Journal, 2001(9): 217-218.
- [31] CHEN J S, WANG F Y, XIA X H, et al. Major element chemistry of the Changjiang[J]. Chem Geol, 2002, 187: 231-255.
- [32] YANG X. Chemistry and late Quaternary evolution of ground and surface waters in the area of Yabulai Mountains[J]. Western Inner Mongolia, China Catena, 2006, 66: 135-144.
- [33] JUN X, ZHANG D J, JIN W, et al. Major ion chemistry, weathering process and water quality of natural waters in the Bosten Lake catchment in an extreme arid region, NW China[J]. Environ Earth Sci, 2015, 73: 3697-3708.

责任编辑: 赵新科