

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.01.10

引用格式: 刘沛,黄峻川,喻晓. 南伊沟水体水化学及氢氧同位素特征分析[J]. 中国地质调查,2023. 10(1): 91-99. (Liu P, Huang J C, Yu X. Analysis of hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotope characteristics of Nanyi Gully water body [J]. Geological Survey of China. 2023. 10(1): 91-99.)

南伊沟水体水化学及氢氧同位素特征分析

刘沛, 黄峻川, 喻晓

(中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 610036)

摘要: 南伊沟是林芝地区重要水源涵养区,研究南伊沟水体水化学和氢氧同位素特征,揭示“三水转化”规律,对提高林芝地区水体水文地球化学研究程度,支撑当地林水关系研究,服务高原地区水生态保护具有重要意义。运用水化学和氢氧同位素分析方法,分析了地区水化学特征、水岩作用情况和水循环特征。结果表明:南伊沟水体为极低矿化度淡水,地表水水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型;地表水和地下水的水化学离子成分主要受岩石风化控制,离子来源主要受碳酸盐岩溶解和硅酸盐岩风化影响,地表水中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 主要来源于盐岩溶解,同时还受降雨影响,地表水和地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩矿物溶解;地下水和地表水水岩作用较弱,对比上游雅鲁藏布江和拉萨河地表水,大部分 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值具有明显的高度效应和大陆效应;南伊沟枯水年内强烈的不平衡蒸发作用是导致地区大气降雨线斜率和截距偏小的主要原因之一。

关键词: 南伊沟; 水化学; 氢氧同位素

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)01-0091-09

0 引言

天然水体水化学成分是水在运移过程中与周围环境相互作用的结果,反应了水体的补给、运移、排泄等规律及气候变化和人类活动情况^[1],对开展林水关系、水质评价,地表水、地下水和大气水之间的转化关系等研究具有指示作用^[2-3]。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素示踪技术可有效识别不同的补给来源,研究水质演化过程和流域水文循环等^[4-5],具有快速、简便、准确、可定位等优点。水化学结合同位素技术可以有效识别不同水体的补给来源及水质演化过程^[6-7]。Gibbs^[8-9]通过对全球各种水体水化学组成分析,提出了岩石风化、大气降水和蒸发-结晶作用是控制水体水化学组分的三大因素;施则明等^[10]系统采集了阿坝地区地表水样品,查明了地区地表水的氢氧同位素与微量元素特征;秦欢欢

等^[11]利用离子分析和同位素方法分析了拉萨河补给的来源,研究了河流与其他水体的相互作用以及示踪水文循环过程等;刘久潭等^[12]利用拉萨河流域中下游水化学及稳定同位素资料,阐明了水化学组成特征,浅析了地表水-地下水的转化关系。

林芝地区被誉为“西藏江南”,南伊沟是林芝地区重要的水源涵养区,随着当地社会、经济的发展,区内湿地环境保护要求也不断提高。前人曾在南伊沟开展过一些林水关系水化学特征研究^[13-14],但有关水体水化学成分的补给来源,水体的补给、运移和排泄规律等研究尚待深入,亟需开展水资源调查和研究工作。因此,本文采用水体水化学分析方法和氢氧同位素特征分析,研究南伊沟水体水化学和氢氧同位素特征,揭示“三水转化”规律,旨在提高林芝地区水体水文地球化学的研究程度,支撑当地林水关系研究,服务高原地区水生态保护工作。

收稿日期: 2022-06-06; 修订日期: 2023-01-04。

基金项目: 中国地质调查局军民融合地质调查中心“拉萨河流域自然资源综合调查(编号: ZD20220121)”项目资助。

第一作者简介: 刘沛(1989—),男,工程师,主要从事水文地质与水资源调查研究工作。Email: 304789204@qq.com。

通信作者简介: 黄峻川(1991—),男,工程师,主要从事水文地质与水资源调查研究工作。Email: hjunchuan@mail.cgs.gov.cn。

1 研究区概况

南伊沟位于西藏林芝市米林县南部的南伊洛巴民族乡境内,在雅鲁藏布江干流南面,喜马拉雅山脉北麓(图 1)。南伊沟属峡谷地貌,平均海拔约 3 050 m,沟内水体自南向北汇入雅鲁藏布江。研究区气候温和、降雨充沛,降雨一般多集中在夏季。区内主要出露寒武系一新元古界肉切村岩群石英片岩($Pt_3\epsilon R$)(图 1),地层岩性以浅中灰色长石石英片岩、二云石英片岩为主,夹少量大理岩,第四纪沉积物主要为更新统湖积、冰水堆积层以及全新统冲洪积层的含砂砾石层,分布于沟谷及两侧支沟缓坡。区内水文地质条件较简单,主要地下水类型为第四系松散岩类孔隙水(图 1),沟内砂卵砾石层厚度达数十米至百余米,结构较为松散,孔隙发育,水力联系密切。地下水补给以降雨、冰雪融水和河流入渗为主,地表水沿冲沟缓坡径流,同时入渗补给浅层地下水,地下水在重力作用下向沟口径流,最终主要储存于第四系含水介质中,部分补给雅鲁藏布江。地下水总体水质优良,水量丰富,单井涌水量普遍大于 $500\text{ m}^3/\text{d}$ 。

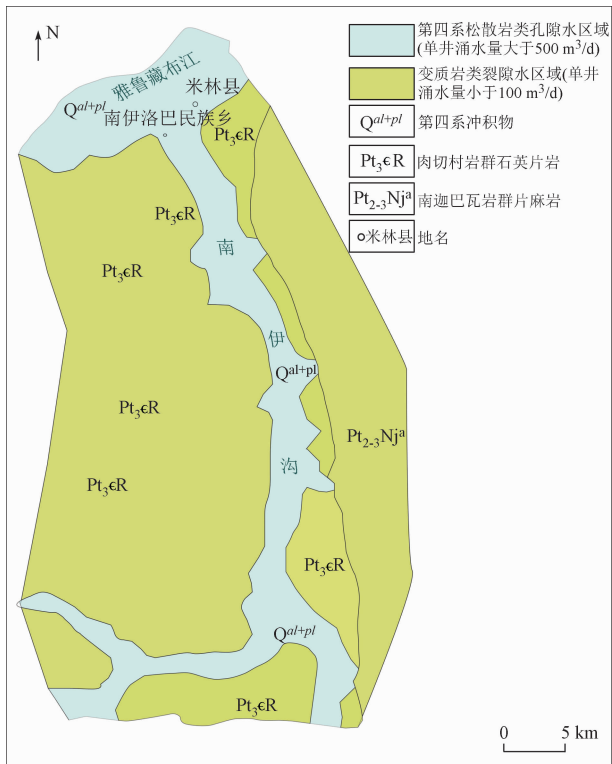


图 1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological sketch of the study area

2 样品采集以及测试

本次研究共采集地表水样 15 组,地下水样 3 组(图 2)。样品采集工作按照《SL 187-96 水质采样技术规程》^[15]相关要求严格执行。取样时,利用全球 GPS 进行定位,水样容器用干净清洁的聚乙烯塑料容器,取样后用聚乙烯薄膜密封瓶口,贮存在暗处 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的地方冷藏保存,并及时送实验室测试。水化学分析委托西藏晟源环境工程有限公司,采用原子吸收分光计测定,测试精度为 $\pm 2\%$ 。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值测定委托深圳市华科精信监测科技有限公司,采用同位素质谱仪测试, $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 值测试精度可达 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 2\text{‰}$ 。

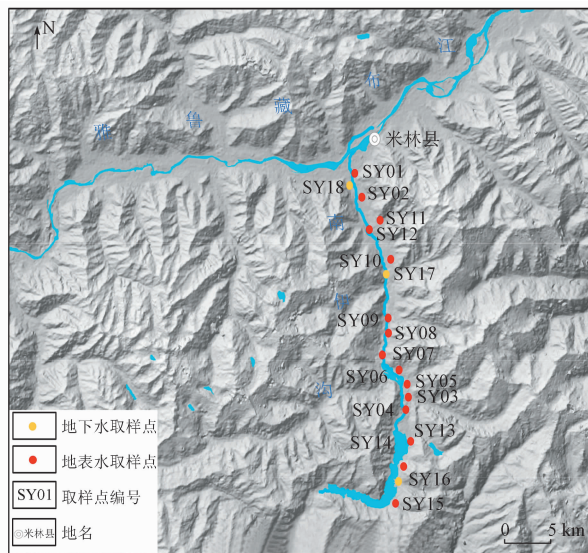


图 2 取样点位置

Fig. 2 Sampling positions

3 结果与讨论

3.1 水化学特征分析

研究区地下水均为取样深度小于 50 m 的浅层地下水。地表水、地下水的水化学成分分析结果见表 1。

南伊沟地表水及地下水 pH 值变化区间为 $[7.5, 8.2]$,呈弱碱性。矿化度为 $4 \sim 60\text{ mg/L}$,为国内少有的天然低矿化度水资源区。由 Piper 三线图(图 3)可知,所有样本水体中离子含量以碱土金属离子和弱酸根离子为主,碳酸盐硬度超过 50%,且碱土金属离子($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)毫克当量浓度大于

碱金属离子($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)毫克当量浓度。结合舒卡列夫分类,综合分析得出:地表水水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型。

表 1 水体水化学成分分析结果
Tab.1 Results of hydrochemical composition analysis

取样点	pH 值	各组分毫克当量浓度/($\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$)								矿化度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	性质
		K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-		
SY01	7.5	0.014	0.017	0.277	0.067	0.011	0.099	0.279	0.001	21	河流
SY02	7.7	0.005	0.007	0.115	0.025	0.000	0.052	0.164	0.001	8	河流
SY03	8.1	0.003	0.004	0.073	0.019	0.011	0.048	0.115	0.001	6	河流
SY04	7.6	0.007	0.009	0.283	0.061	0.011	0.123	0.246	0.001	20	河流
SY05	7.5	0.005	0.029	0.070	0.044	0.012	0.025	0.148	0.001	8	河流
SY06	7.8	0.030	0.031	0.232	0.128	0.011	0.068	0.377	0.001	23	河流
SY07	8.0	0.006	0.007	0.121	0.017	0.000	0.041	0.131	0.001	8	河流
SY08	7.9	0.009	0.011	0.174	0.026	0.000	0.052	0.213	0.001	13	河流
SY09	7.5	0.006	0.012	0.144	0.022	0.011	0.101	0.115	0.001	11	河流
SY10	7.6	0.007	0.009	0.102	0.038	0.011	0.082	0.148	0.001	9	河流
SY11	8.1	0.005	0.007	0.111	0.024	0.000	0.053	0.164	0.001	9	河流
SY12	7.5	0.016	0.021	0.181	0.054	0.000	0.097	0.197	0.001	23	河流
SY13	7.7	0.016	0.004	0.247	0.166	0.000	0.034	0.443	0.002	23	河流
SY14	8.2	0.018	0.007	0.265	0.163	0.000	0.042	0.426	0.002	25	河流
SY15	7.7	0.005	0.010	0.025	0.017	0.000	0.021	0.115	0.002	4	河流
SY16	7.6	0.024	0.023	0.285	0.171	0.000	0.052	0.475	0.002	28	井
SY17	7.7	0.024	0.049	0.300	0.146	0.012	0.095	0.443	0.001	30	泉
SY18	7.6	0.041	0.220	0.570	0.165	0.016	0.108	0.951	0.001	60	井

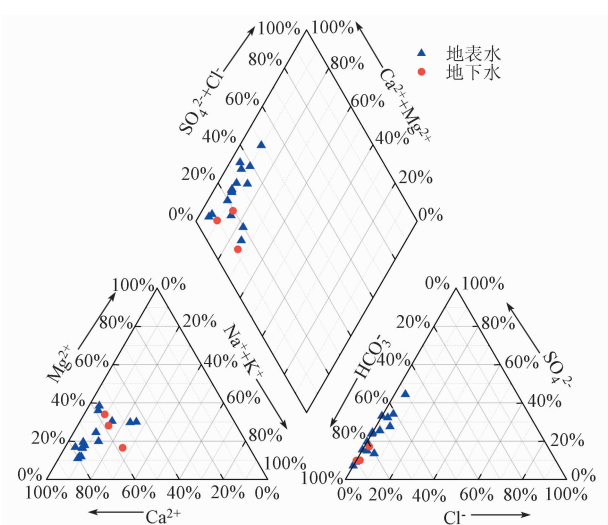


图 3 Piper 三线图
Fig.3 Piper trilinear diagram

3.2 水化学成因分析

由水化学 Gibbs 图(图 4)可知:研究区水体矿化度在 4 ~ 60 mg/L 之间。 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$

毫克当量浓度比值变化区间为 $[0.017, 0.29]$, $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 毫克当量浓度比值变化区间为 $[0, 0.09]$, 水体散点主要分布在 Gibbs 图的左侧中下区域,表明岩石风化是研究区水体水化学的主要控制因素,部分水体散点靠近中心区域,且矿化度小于 100 mg/L ,表明可能还受大气降水影响。

南伊沟两岸岩性主要为长石石英岩夹大理岩;沟内及岸坡为第四系坡洪积堆积物,其物质来源主要为长石石英岩、大理岩等的风化、搬运。利用 $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$ 毫克当量浓度比值关系可研究水体和岩石之间的相互作用^[16-17]。由离子比值端元图(图 5,图 6)可知,研究区地表水及地下水样本的 $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^- / \text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$ 离子毫克当量浓度比值落点多数位于碳酸盐岩溶解与硅酸盐岩风化的控制端元之间,说明地表水和地下水的水化学离子来源受碳酸盐岩溶解和硅酸盐岩风化共同控制,这也与研究区碳酸岩和硅酸盐矿物溶解有关。

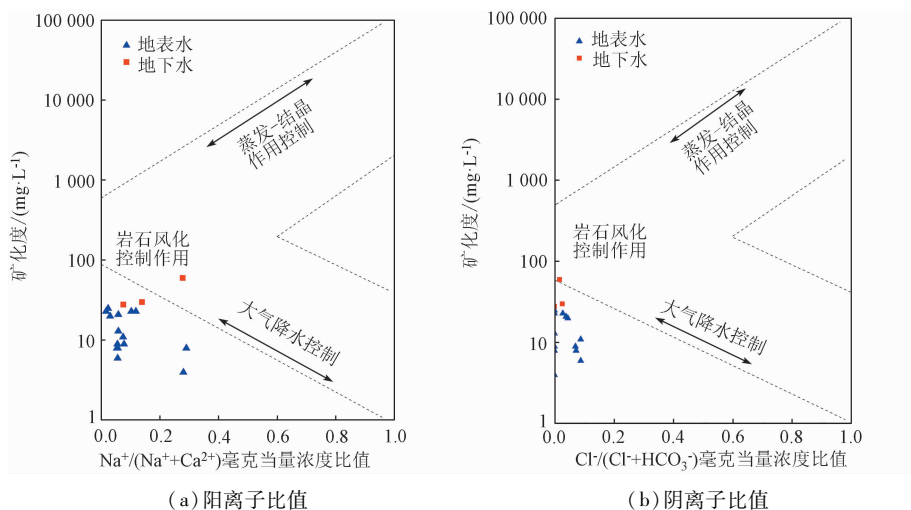
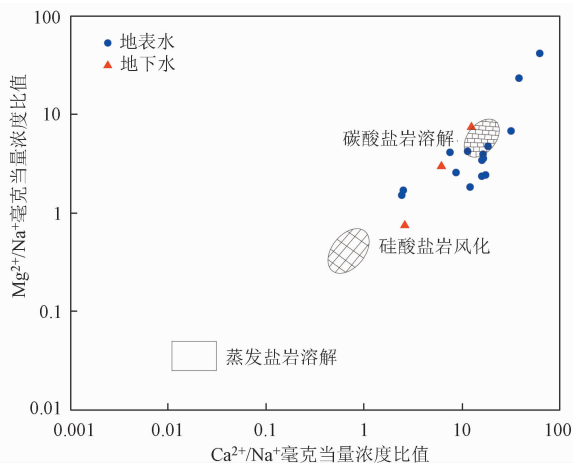
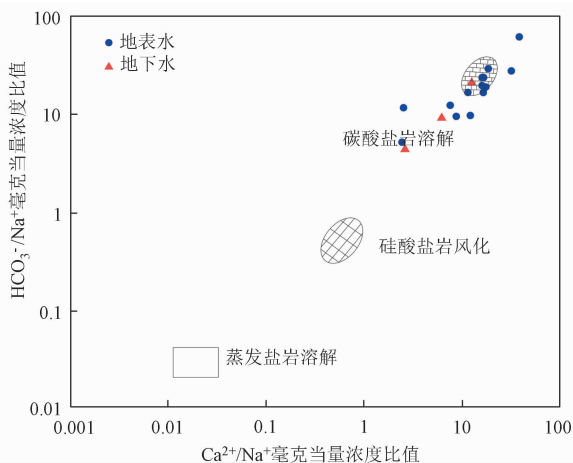


图4 水化学 Gibbs 图

Fig. 4 Gibbs diagram of hydrochemistry

图5 Mg^{2+}/Na^{+} 与 Ca^{2+}/Na^{+} 离子比值端元图Fig. 5 End element diagram of Mg^{2+}/Na^{+} and Ca^{2+}/Na^{+} ion ratio图6 HCO_3^{-}/Na^{+} 与 Ca^{2+}/Na^{+} 离子比值端元图Fig. 6 End element diagram of HCO_3^{-}/Na^{+} and Ca^{2+}/Na^{+} ion ratio

水体中的离子主要来源于大气降水、岩石风化、蒸发盐岩溶解和人为因素等,因此可以通过水体中离子毫克当量浓度比值进行反推。由图 7 可知,地表水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值变化区间为 $[0.36, 2.8]$,地下水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值变化区间为 $[4.03, 13.75]$ 。地表水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值较接近大气降水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值(0.7)^[18] 和海水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值(0.86)^[18],说明海洋大气的搬运对地表水中的 Na^{+} 、 Cl^{-} 产生了影响;而地下水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值明显偏离大气降水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值(0.7)和海水 Na^{+}/Cl^{-} 毫克当量浓度比值(0.86),说明海洋大气的搬运对地下水的影响较小。由图 8 可知,地表水与地下水中的 $Na^{+} + K^{+}$ 与 Cl^{-} 毫克当量浓度变化区间分别为 $[0.007, 0.261]$ 和 $[0, 0.016]$ 。地表水主要分布于 $(Na^{+} + K^{+})/Cl^{-} = 1$ 的等值线附近且偏上的位置,表明除受到盐岩的溶解作用影响,还可能受到其他作用的影响;地下水明显高于 $(Na^{+} + K^{+})/Cl^{-} = 1$ 的等值线,表明其主要来源于盐岩溶解,而地下水中过量的 Na^{+} 、 K^{+} 离子还来源于其他含钠、钾矿物溶解。

通过 $Ca^{2+} + Mg^{2+}/HCO_3^{-}$ 、 $Ca^{2+} + Mg^{2+}/HCO_3^{-} + SO_4^{2-}$ 毫克当量浓度比值关系,可以判定水体中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子的来源^[19]。如图 9 所示,大部分样本位于 $(Ca^{2+} + Mg^{2+})/HCO_3^{-} = 1$ 比值附近,表明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子矿物主要来源于碳酸盐岩矿物溶解。如图 10 所示,地表水和地下水样本基

本分布于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) = 1$ 比值附近,表明水体中 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来源于

碳酸盐岩、石膏的矿物溶解,至于大部分在于比值线以下,则可能与周边地区硫化矿物的溶解有关。

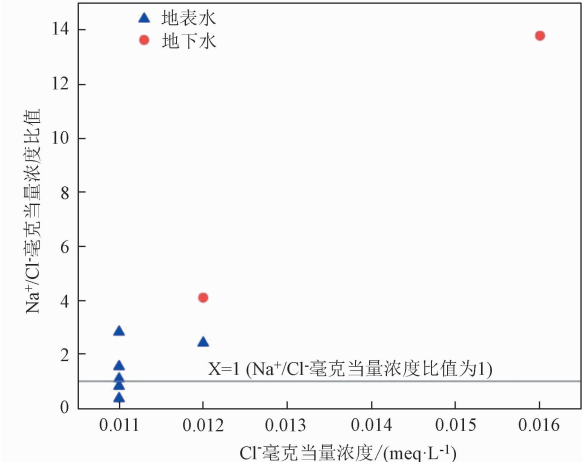


图7 Na^+/Cl^- 与 Cl^- 关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between Na^+/Cl^- and Cl^-

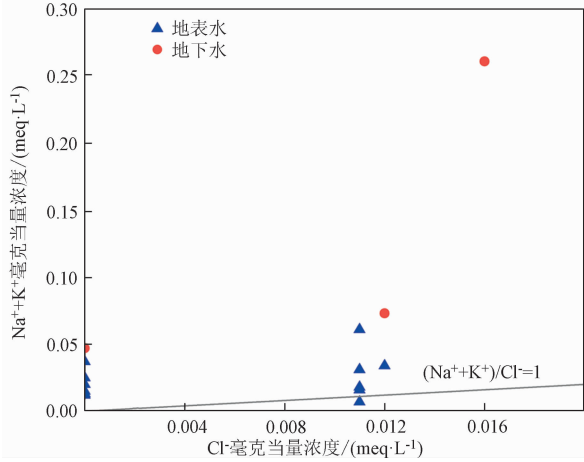


图8 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 与 Cl^- 关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ and Cl^-

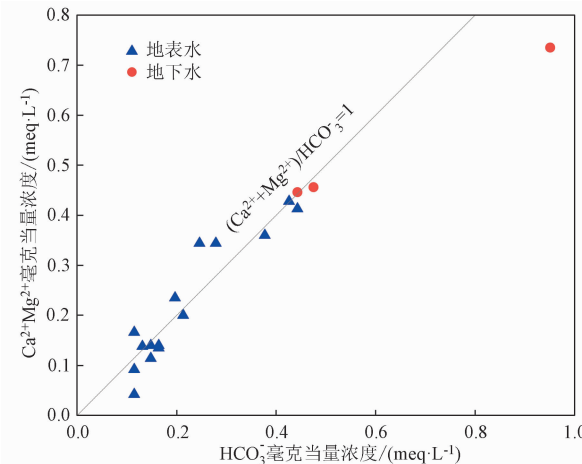


图9 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 HCO_3^- 关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and HCO_3^-

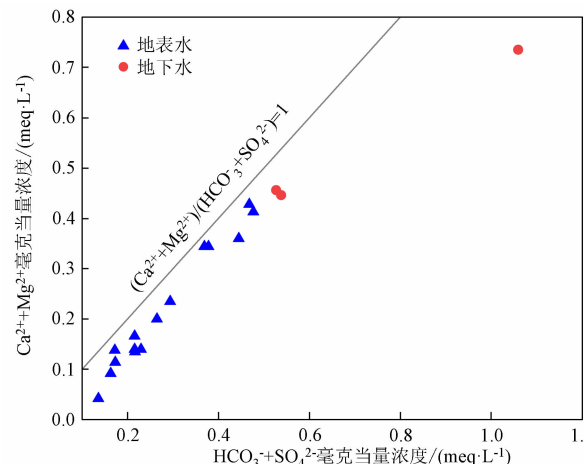


图10 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 关系曲线

Fig. 10 Relationship curve between $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$

3.3 氢氧稳定同位素特征

南伊沟地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-13.52\text{‰} \sim -9.92\text{‰}$ 之间,平均值为 -11.91‰ , δD 值在 $-95.4\text{‰} \sim -65\text{‰}$ 之间,平均值为 -79.58‰ (表2)。与研究区

上游雅鲁藏布江和拉萨河地表水相关数据(表3,图11)相比,存在富重同位素组成,具有明显的高度效应和大陆效应。

表2 南伊沟氢氧同位素特征分析

Tab.2 Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in Nanyi Gully

编号	SY01	SY02	SY03	SY04	SY05	SY06	SY07	SY08	SY09
D/‰	-81.40	-82.10	-84.60	-78.40	-69.00	-65.00	-82.90	-81.70	-83.60
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-12.02	-12.52	-12.21	-12.12	-10.01	-10.82	-12.86	-12.21	-12.38
类型	河流	河流	河流	河流	河流	河流	河流	河流	河流
编号	SY10	SY11	SY12	SY13	SY14	SY15	SY16	SY17	SY18
D/‰	-95.40	-86.40	-81.20	-76.60	-75.40	-66.30	-64.12	-83.40	-66.60
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-13.52	-12.85	-11.82	-10.75	-11.53	-9.92	-10.28	-12.55	-11.21
类型	河流	河流	河流	河流	河流	河流	井	泉	井

注：采样时间为2021年8月。

表 3 雅鲁藏布江干流及拉萨河地表水氢氧同位素特征分析对比^[20]

Tab. 3 Comparative analysis of hydrogen and oxygen isotope characteristics in the surface water of the main stream of Yarlung Zangbo River and Lhasa River ^[20]						
编号	TSY01	TSY02	TSY03	TSY04	TSY05	TSY06
D/‰	-165.60	-121.50	-98.00	-124.30	-129.40	-129.70
δ ¹⁸ O/‰	-19.71	-18.33	-16.10	-17.07	-17.75	-17.23
类型	雅江	雅江	拉萨河	拉萨河	雅江	雅江
采样位置	日喀则	江孜	拉萨	曲水县	桑日县	朗县

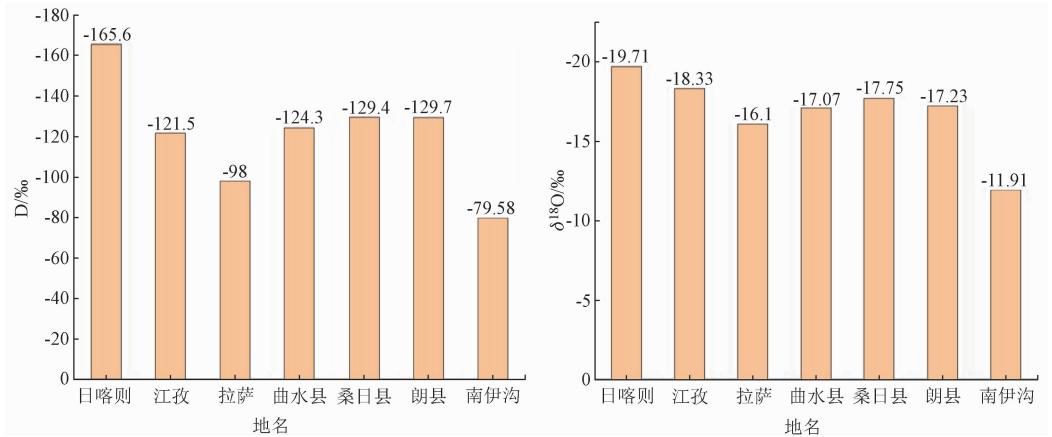


图 11 南伊沟地表水与雅鲁藏布江沿途河流 δ¹⁸O 和 δD 值对比^[20]

Fig. 11 Comparison of δ¹⁸O and δD values between the surface water in Nanyi Gully and Brahmaputra River^[20]

由图 12 可知,南伊沟内分水岭附近(SY15)至沟口(SY01)地表水氢氧同位素组成呈略微下降趋势,靠近分水岭附近(SY15)的 δ¹⁸O 值为 -11.35‰ ~ -9.92‰、δD 值为 -76.6‰ ~ -66.3‰,而南伊沟森林核心景区(SY10)至沟口(SY 01)的 δ¹⁸O 值为 -13.52‰ ~ -11.82‰、δD 值为 -95.4‰ ~ -75.4‰。这一结果看似与传统的氢氧同位素“高度效应”不符,但结合研究区特别的气候条件,这可能与当地的地表水循环存在局部频繁的陆—陆小循环有关。林芝地区年蒸发量为 1 325.3 ~ 2 617.2 mm,印度洋暖流顺雅鲁藏布江河谷向上,同时将当地水蒸汽带向南伊沟深处,在遭遇喜马拉雅山脉阻挡后,气流被迫缓慢上升,发生凝结作用而形成地形雨,其中重同位素优先凝结,导致冲沟上游地表水存在轻微的富重同位素组成现象。

图 13 为研究区大气降水线,研究区降水的 δD 值和 δ¹⁸O 值有明显相关性。斜率、截距数值的大小可以在一定程度上反映水源经历的分馏和蒸发作用的强弱^[21-23]。通过查阅林芝地区降雨资料,2010 年 8 月林芝市降雨量为 160 mm,2021 年 8 月林芝市降雨量为 52 mm,同时选取前人在相近区域(卧龙至林芝段雅江及周边地表水系)2010 年 8 月

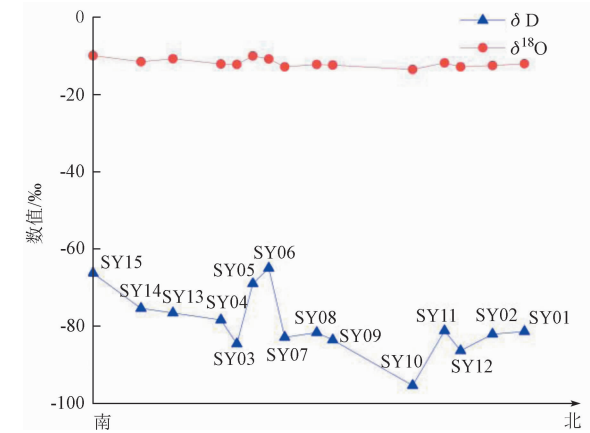


图 12 氢氧同位素空间分布特征

Fig. 12 Spatial distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotopes

丰水期测试氢氧同位素数据^[20],绘制大气降水线方程为 $\delta D = 8.7\delta^{18}O + 21.6$ 。全球大气降水线方程为 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$,与其相比,研究区降水线方程斜率均小于前两者,说明水源较往年同期可能经历了较强的蒸发作用。

氕剩余值(d 值)用方程 $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ 来表示,是地区水源蒸发、凝结过程不平衡程度的直接反映^[22]。一般降水水汽来源于空气相对湿度越低

的干燥地区,其不平衡蒸发越强烈, d 值越高;反之 d 值则越小^[24]。研究区地表水 d 值为 $9.4‰ \sim 21.56‰$,平均值为 $15.35‰$,高于全球大气降雨线(对应 $10‰$)和相近区域 2010 年 8 月同期的 d 值。

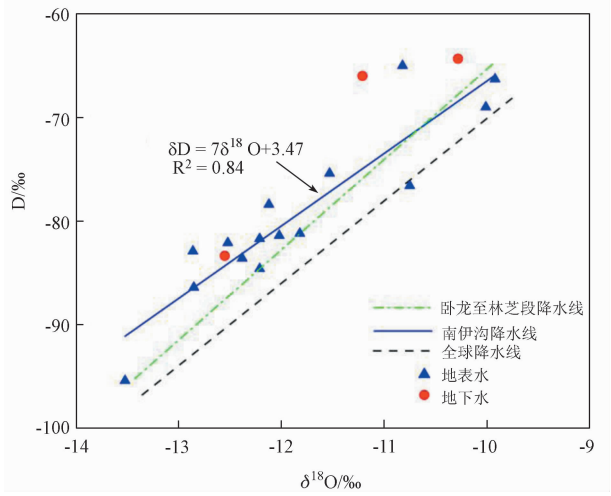


图 13 南伊沟大气降水线

Fig. 13 Atmospheric precipitation line of Nanyi Gully

综上,研究区枯水年相对于干旱的气候条件造成了强烈的不平衡蒸发作用,是影响南伊沟大气降雨线斜率和截距偏小的主要原因之一。

4 结论

- (1) 南伊沟水体整体呈弱碱性,矿化度为 $4 \sim 60 \text{ mg/L}$,是国内少有的天然低矿化度水资源区。地表水水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型,地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型。
- (2) 地表水和地下水的水化学离子成分主要受岩石风化控制,离子来源受碳酸盐岩溶解和硅酸盐岩风化影响。地表水中 $\text{Na}^+、\text{K}^+、\text{Cl}^-$ 的来源除了受盐岩溶解控制外,还受到降雨的影响;地表水和地下水中 $\text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+}、\text{SO}_4^{2-}$ 主要来源于碳酸盐岩、石膏的矿物溶解,其中大部分 $\text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+}$ 来源于碳酸盐岩溶解。
- (3) 南伊沟地表水 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $-11.91‰$, δD 平均值为 $-79.58‰$,与上游雅鲁藏布江和拉萨河地表水相关数据相比,存在富重同位素组成,具有明显的高度效应和大陆效应。南伊沟大气降水线方程为 $\delta\text{D} = 7\delta^{18}\text{O} + 3.47$,枯水年相对于干旱的气候条件造成了强烈的不平衡蒸发,是造成南伊沟大气降雨线斜率和截距偏小的主要原因之一。

参考文献 (References):

[1] 李玉龙,苗卫良,张西营,等. 西昆仑地区苦水湖富锂盐湖湖水化学特征及成盐元素来源[J]. 地球科学,2021,46(11): 4161-4174.

Li Y L, Miao W L, Zhang X Y, et al. Hydrochemical characteristics and salt-formation elements sources of li-rich brines in Kushui Lake, West Kunlun[J]. Earth Sci, 2021, 46(11): 4161-4174.

[2] 郭小娇,王慧玮,石建省,等. 白洋淀湿地地下水系统水化学变化特征及演化模式[J]. 地质学报,2022,96(2): 656-672.

Guo X J, Wang H W, Shi J S, et al. Hydrochemical characteristics and evolution pattern of groundwater system in Baiyangdian wetland, North China Plain[J]. Acta Geol Sin, 2022, 96(2): 656-672.

[3] 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 J Y, Yang Y H, Hu Y C, et al. Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Kashi River Basin, Ili, Xinjiang[J]. Environ Chem, 2021, 40(12): 3815-3827.

[4] 马浩天,甄志磊,武小钢. 汾河源头水源稳定同位素特征及水源解析[J]. 环境化学,2021,40(11): 3432-3442.

Ma H T, Zhen Z L, Wu X G. Stable isotope characteristics of the headstream region of Fenhe River and water resource analysis[J]. Environ Chem, 2021, 40(11): 3432-3442.

[5] 赵春红,申豪勇,王志恒,等. 汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素[J]. 环境科学,2022,43(10): 4440-4488.

Zhao C H, Shen H Y, Wang Z H, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics in the surface water of the Fenhe River basin and influence factors[J]. Environ Sci, 2022, 43(10): 4440-4488.

[6] 周长松,邹胜章,冯启言,等. 岩溶关键带水文地球化学研究进展[J]. 地学前缘,2022,29(3): 37-50.

Zhou C S, Zhou S Z, Feng Q Y, et al. Progress in hydrogeochemical study of karst critical zone: A critical review[J]. Earth Sci Front, 2022, 29(3): 37-50.

[7] 高旭波,向绚丽,侯保俊,等. 水化学-稳定同位素技术在岩溶水文地质研究中的应用[J]. 中国岩溶,2020,39(5): 629-636.

Gao X B, Xiang X L, Hou B J, et al. Application of hydrochemistry coupled with stable isotopes in the study of karst water hydrogeology[J]. Carsol Sin, 2020, 39(5): 629-636.

[8] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Science, 1970, 170(3962): 1088-1090.

[9] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon river [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1972, 36(9): 1061-1066.

- [10] 施泽明,王新宇,倪师军. 四川省阿坝地区地表水地球化学特征[J]. 中国地质调查,2015,2(4):31-35.
Shi Z M, Wang X Y, Ni S J. Characteristics of hydrogen, oxygen isotopes and trace elements in surface water of aba area in Sichuan[J]. Geol Survey China, 2015, 2(4):31-35.
- [11] 秦欢欢,高柏,陈益平,等. 拉萨河夏季氢氧同位素空间分布特征及分析[J]. 地球与环境,2021,49(3):277-284.
Qin H H, Gao B, Chen Y P, et al. Spatial distribution of hydrogen and oxygen isotopes in Lhasa river in summer and the implications[J]. Earth Environ, 2021, 49(3):277-284.
- [12] 刘久潭,李颖智,高宗军,等. 拉萨河流域中下游地区水化学及地表水-地下水转化关系研究[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2020,39(5):10-20.
Liu J T, Li Y Z, Gao Z J, et al. Hydrochemistry and relationship between groundwater and surface water in the middle and lower reaches of Lhasa River basin[J]. J Shandong Univ Sci Technol: Nat Sci, 2020, 39(5):10-20.
- [13] 方江平,项文化,刘韶辉. 西藏南伊沟原始林芝云杉林水文学过程的水化学特征[J]. 林业科学,2010,46(9):14-19.
Fang J P, Xiang W H, Liu S H. Chemical characteristics of hydrological processes in a primeval Picea likiangensis var. linzhiensis forest in Nanyigou of Tibet[J]. Sci Silvae Sin, 2010, 46(9):14-19.
- [14] 刘韶辉,项文化,方江平. 西藏南伊沟原始林芝云杉林土壤水文的物理特征[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(7):15-18,25.
Liu S H, Xiang W H, Fang J P. Soil hydrophysical properties in a primary Picea likiangensis var. linzhiensis forest in Nanyigou of Tibet[J]. J Central South Univ Forest Technol, 2010, 30(7):15-18,25.
- [15] 中华人民共和国水利部. SL 187-96 水质采样技术规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 187-96 Technical Regulation of Water Quality Sampling[S]. Beijing:China Water & Power Press, 1997.
- [16] 林聪业,高柏,华恩祥,等. 拉萨河流域水环境氢氧同位素特征及其指示意义[J]. 有色金属(冶炼部分),2020(11):99-106.
Lin C Y, Gao B, Hua E X, et al. Characteristics and indicative significance of oxygen and hydrogen isotopes in water environment of Lhasa River basin[J]. Nonferrous Met (Extract Metall), 2020(11):99-106.
- [17] 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/OL]. 华北水利水电大学学报:自然科学版,2021:1-12. (2021-11-01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20211029.1838.002.html>.
Guo Y, Gan F P, Yan B K, et al. Hydrochemical-isotopic characteristics of surface water in southwest Tibetan Plateau and controlling factors analysis[J/OL]. J North China Univ Water Resour Electr Power; Nat Sci Ed, 2021:1-12. (2021-11-01). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20211029.1838.002.html>.
- [18] 张涛,何锦,李敬杰,等. 蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素[J]. 环境科学,2018,39(11):4981-4990.
Zhang T, He J, Li J J, et al. Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River basin[J]. Environ Sci, 2018, 39(11):4981-4990.
- [19] 李宗杰,段然,柯浩成,等. 基于水化学特征的长江源区生态水文学研究进展[J]. 冰川冻土,2022,44(1):288-298.
Li Z J, Duan R, Ke H C, et al. Research progress of ecological hydrology based on hydrochemical characteristics in the source region of the Yangtze River[J]. J Glaciol Geocryol, 2022, 44(1):288-298.
- [20] 刘昭. 雅鲁藏布江拉萨-林芝段天然水水化学及同位素特征研究[D]. 成都:成都理工大学,2011.
Liu Z. The Characterization of Hydrochemistry and Isotopic in the Natural Water of Yarlung Tsangpo Lhasa-Nyingchi[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology, 2011.
- [21] 宋泓苇,孟玉川,蒋芳婷,等. 雅鲁藏布江中游地区地表水、地下水同位素特征及其指示作用[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(7):122-128.
Song H W, Meng Y C, Jiang F T, et al. Isotope characteristics of surface water and groundwater in the middle reaches of Yarlung Zangbo River and their indicators[J]. J Arid Land Resour Environ, 2021, 35(7):122-128.
- [22] 董小芳,邓黄月,郑祥民,等. 长江流域降水中氢氧同位素特征及水汽来源[J]. 环境科学与技术,2017,40(4):78-84.
Dong X F, Deng H Y, Zheng X M, et al. Analysis of stable isotope characteristics and water vapor origins in atmospheric precipitation in the Yangtze River basin[J]. Environ Sci Technol, 2017, 40(4):78-84.
- [23] 高志友,王小丹,尹观. 雅鲁藏布江径流水文规律及水体同位素组成[J]. 地理学报,2007,62(9):1002-1007.
Gao Z Y, Wang X D, Yin G. Hydrological rule and isotopic composition of water bodies in Yarlung Zangbo River[J]. Acta Geograph Sin, 2007, 62(9):1002-1007.
- [24] 陈衍婷,杜文娇,陈进生,等. 厦门地区大气降水氢氧同位素组成特征及水汽来源探讨[J]. 环境科学学报,2016,36(2):667-674.
Chen Y T, Du W J, Chen J S, et al. Composition of hydrogen and oxygen isotopic of precipitation and source apportionment of water vapor in Xiamen area[J]. Acta Sci Circumstant, 2016, 36(2):667-674.

Analysis of hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotope characteristics of Nanyi Gully water body

LIU Pei, HUANG Junchuan, YU Xiao

(*Civil – Military Integration Geological Survey Center, China Geological Survey, Sichuan Chengdu 610036, China*)

Abstract: Nanyi Gully is an important water source conservation area in Linzhi. The study of hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotope characteristics of Nanyi Gully water body reveals the law of “three water transformation”, which is of great significance for improving the hydrochemistry research degree, supporting the research on the relationship between local forests and water, and serving the protection of water ecology in the plateau area. The characteristics of regional water chemistry, water – rock interaction and water cycle were analyzed by water chemistry and hydrogen and oxygen isotope analysis methods. The results show that water body of Nanyi Gully is very low salinity fresh water. The chemical types of surface water are $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ type and $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ type, and the chemical types of the underground water are $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ type. The hydrochemical characteristics of surface water and groundwater are mainly affected by the weathering of rocks, and the ions source is mainly affected by the carbonate dissolution and silicate rocks weathering. Na^+ , K^+ , Cl^- ions mainly come from the dissolution of evaporative salt rocks, which is also affected by the rainfall. The Ca^{2+} and Mg^{2+} mainly come from the dissolution of carbonate rock minerals. The water – rock interaction of the underground and surface water in the study area is weak, and most of the $\delta^{18}\text{O}$ and δD values have obvious height effect and continental effect compared with the surface water in Yarlung Zangbo River and Lhasa River. The strong unbalanced evaporation during dry years is one of the main reasons for the small slope and intercept of the regional atmospheric rainfall line.

Keywords: Nanyi Gully; hydrochemistry; hydrogen and oxygen isotopes

(责任编辑: 刘丹)