水文地质工程地质
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

马剑飞，李向全，张春潮，付昌昌，白占学，王振兴

Transformation characteristics of the large-flow river and groundwater in the fault zone in the glacier-covered area of Bomi in Tibet

MA Jianfei, LI Xiangquan, ZHANG Chunchao, FU Changchang, BAI Zhanxue, and WANG Zhenxing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104013

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

伊犁河支流大西沟河水与地下水转化关系研究

A study of the conversion between the Daxigou river and groundwater

张琛, 段磊, 刘明明, 李瑛, 宋浩　水文地质工程地质. 2019, 46(3): 18-18

贵州洪家渡盆地泉水水化学和碳同位素特征及成因

Characteristics and controls of the hydrochemistry and carbon isotope of thespring water in the Hongjiadu Basin of Guizhou

任坤, 潘晓东, 焦友军, 黄宇, 曾洁, 彭聪, 梁嘉鹏　水文地质工程地质. 2019, 46(3): 9-9

湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算

Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe River Basin of western Hunan

霍俊伊, 于, 张清华, 李亮　水文地质工程地质. 2019, 46(4): 64-72

同位素技术解析安阳河与地下水相互作用

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚　水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31-39

云南勐海县勐阿街温泉水化学和同位素特征及成因

Hydrochemical and isotopic characteristics and formation of the Mengajie hot spring in Menghai county of Yunnan

谭梦如, 周训, 张齐, 刘海生, 余鸣潇, 海阔　水文地质工程地质. 2019, 46(3): 70-70

京津冀水源涵养区水化学环境分析——以承德市兴隆县为例

Hydrochemical environment in a typical conservation area in the Beijing-Tianjin-Hebei region: A case study in Xinglong County of Chengde

鲁重生, 刘文波, 李志明, 武雄, 康伟, 任玉祥　水文地质工程地质. 2020, 47(6): 132-141

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104013

西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

马剑飞[1,2], 李向全[1,2], 张春潮[1,2], 付昌昌[1,2], 白占学[1,2], 王振兴[1,2]
(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地下水科学与工程重点实验室, 河北 石家庄 050061)

摘要: 川藏铁路波密段穿越冰川覆盖区, 分布多条与断裂复合发育的大型河流, 水量丰富, 可与断裂共同构成构造高压涌水突泥灾害风险源。本文通过多期测流和对大气降水、冰川、河流和地下水水化学、同位素特征分析, 研究了大型河流的流量变化特征和地表水与断裂带裂隙水的转化关系。结果表明: 西藏波密冰川覆盖区河水主要接受冰川融水和大气降水补给。雨季河水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值小于旱季, 说明河水雨季和旱季的补给源结构不同。旱季气温低, 以大气降水补给为主; 雨季冰川融水量陡增, 为主要补给源。断裂影响范围内的古乡沟、比通曲和龙冲曲河水流量较大, 均超过 4×10^4 m^3/d, 但年内流量波动幅度小于非断裂带影响范围的河流。河流可渗漏补给断裂带水。浅层循环断裂带水年龄 5 ~ 10 a, 中深层断裂带水年龄超过 4 000 a, 水岩作用较充分。非断裂带影响范围的河流与基岩风化裂隙水存在较密切的水力联系和较频繁的相互转化。研究成果可为青藏高原东部冰川覆盖区铁路隧道高压涌水突泥灾害的早期识别和灾害防范措施制定提供参考。

关键词: 冰川覆盖区; 地表水; 构造裂隙水; 转化关系; 水化学; 川藏铁路
中图分类号: P641.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3665(2021)05-0023-11

Transformation characteristics of the large-flow river and groundwater in the fault zone in the glacier-covered area of Bomi in Tibet

MA Jianfei[1,2], LI Xiangquan[1,2], ZHANG Chunchao[1,2], FU Changchang[1,2], BAI Zhanxue[1,2], WANG Zhenxing[1,2]
(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Science and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*)

Abstract: The Bomi section of the Sichuan-Tibet Railway passes through the glacier-covered area where multiple large-scale river compounded with faults occur. The river water is abundant, leading to a tectonic high-pressure water inrush and mud outburst disaster risk source. This paper studies the flow characteristics of large-scale river and the transformation relationship between surface water and tectonic fissure water through flow measurement and analysis of precipitation, glacier melting water, river water and groundwater hydrochemistry, isotopic characteristics, and hydrogeochemical processes. The results show that the river water in Bomi glacier covered area in Tibet is mainly supplied by glacier melting water and precipitation. In rainy season, the values of $\delta^{18}O$ and δD are less than those in dry season, indicating that the structure of water-supply source is different. During the dry season, the main source of replenishment is precipitation due to the low temperature, and in the rainy season

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-04-15
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211374; 20190505)
第一作者: 马剑飞(1987-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事水文地质工程地质的研究工作。E-mail: majianfei@mail.cgs.gov.cn

the amount of glacier melting increases sharply, which becomes the main source of recharge. The discharge of rivers Guxianggou, Bitongqu and Longchongqu, which are compounded with the fault, is larger than 4×10^4 m^3/d. However, the annual flow fluctuation is less than that of the rivers in the non-fault zone. The river water could supply the fault zone water, forming shallow circulation groundwater of 5−10 a and medium and deep circulation groundwater of more than 4 000 a. There is a close hydraulic connection and frequent mutual transformation between the river and bedrock weathering fissure water in the non-fault zone. The research results can provide references for the early identification of high-pressure water and mud inrush disasters in tunnels and the formulation of disaster prevention measures in the glacier-covered area of the eastern Qinghai-Tibet Plateau.

Keywords: glacier-covered area; surface water; tectonic fissure water; transformation relationship; hydrochemistry; Sichuan-Tibet Railway

涌水突泥灾害是威胁隧道施工安全最严重的地质灾害之一。开展隧址区涌水突泥致灾构造、富水特征和地下水循环过程研究是隧道涌水突泥灾害早期识别和涌水突泥灾害防范措施制定的基础[1－2]。断层类致灾构造是隧道涌水突泥致灾构造的主要类型[3]，是涌水突泥灾害孕灾机制研究的重点之一。断裂的储水能力、物源补给能力是决定灾害威胁大小的重要因素，其中断裂的力学性质[4]、两盘的岩性组合[5]、断裂破碎带内物质组成[6]等方面会影响断裂带的导水、充水能力，物源补给能力与补给量、补给强度和持续性相关，因而断裂带构造裂隙水的补给、径流和排泄特征与断裂带致灾地质构造的规模和破坏性息息相关[7]，是涌水突泥灾害孕灾机制研究的重点之一。

川藏铁路西藏波密段位于高山峡谷区，山高谷深，平均高差超过 2 000 m。海拔 4 000 m 以上的高山区有冰川覆盖。区内发育多条大型河流，水量十分充沛。河流受高位发育的冰川融水和大气降水补给，水力梯度大，水流湍急。该段铁路处于嘉黎—察隅断裂带影响范围内，多条河流与断裂发育位置重合，存在地表水与断裂带空间沟通并形成高压涌水突泥致灾构造的可能性。但由于该区山体陡峭、植被茂盛、地层岩性多样、构造条件复杂，缺乏对断裂带的导水或充水能力、地表水与地下水之间的关联机制、地下水循环过程等方面的认识，难以直接获取证据来开展涌水突泥灾害风险评价。

针对以上问题，本文采用多期测流和对大气降水、冰川、地表水和地下水水化学、同位素特征以及水文地球化学过程的分析，开展了西藏波密冰川覆盖区大型河流的流量变化特征和地表水与构造裂隙水的转化关系研究，对铁路隧道高压涌水突泥灾害的早期识别和工程预案设计具有一定指导作用。

1 研究区概况

1.1 自然地理

西藏波密县位于西藏东南部高山峡谷地貌区。高山区海拔 4 000 ~ 6 000 m，最高点海拔 6 643 m；河谷区海拔 2 000 ~ 2 300 m，相对高差 2 000 ~ 4 000 m[8]，地形高差大、岸坡陡峻。研究区属西藏东部温带山地湿润季风气候，年均气温 8.7 ℃；1 月气温最低，平均为 −0.2 ℃；最高温度一般出现在 7 月，平均温度为 16.4 ℃[9]。研究区降水充沛，多年平均降水量 1 276 mm，5—9 月为雨季，占全年降水量的 84.5%。

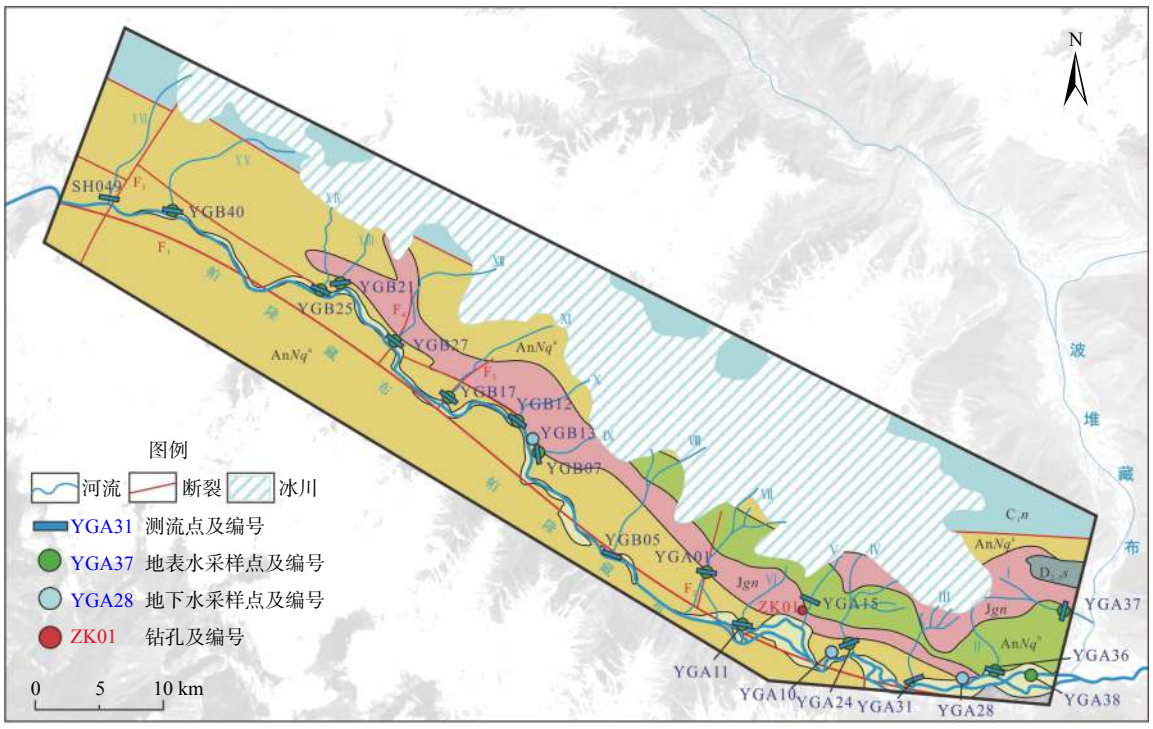
研究区整体属于雅鲁藏布江最大支流帕隆藏布流域。帕隆藏布发源于西藏八宿县阿扎贡拉山，自南东向北西穿过研究区，在林芝地区墨脱县甘登乡附近汇入雅鲁藏布江，年均流量约为 3.12×10^{11} m^3。隧址位于帕隆藏布右岸，共分布 13 条 NE 向大型河流和多条较小规模的河流[10]，自沟顶冰川覆盖区至沟口高差一般大于 2 000 m，平均坡度 260‰，水量大，水流湍急(图 1)。

帕隆藏布两岸海拔 4 000 m 以上的高山区有冰川覆盖，面积约 324.72 km^2。受热辐射和降水量变化影响[11－12]，近 30 年来冰川面积减少了 58.2%，整体处于退缩状态[9, 11－12]，冰川融水量较大且逐年增加。冰川融水径流汇入沟中，为河流的重要补给项。

1.2 地质背景

研究区位于喜马拉雅东构造结东北部，一级构造单元属冈底斯—喜马拉雅造山系。主要断裂为 NW 向的嘉黎—察隅断裂，属全新世活动断裂[13]。小型断裂为张性和压扭性 NE 向断裂，其中古乡—随弄断裂、比通曲断裂、鸭容曲—索通断裂和赛隆卡曲断裂分别与古乡沟、比通曲、龙冲曲和赛隆卡曲的发育位置重合[14]。

研究区出露的基岩包括中—元古代念青唐古拉



Ⅰ–扎隆沟；Ⅱ–噶朗沟；Ⅲ–优易沟；Ⅳ–巴卡沟；Ⅴ–瓦普沟；Ⅵ–坎戈曲；Ⅶ–古乡沟；Ⅷ–角隆曲；Ⅸ–达打隆巴；Ⅹ–来曲；
Ⅺ–比通曲；Ⅻ–龙冲曲；ⅩⅢ–艾母龙曲；ⅩⅣ–加龙坝曲；ⅩⅤ–荼隆隆巴曲；ⅩⅥ–赛隆卡曲
F_1–嘉黎–察隅断裂；F_2–古乡–随弄断裂；F_3–比通曲断裂；F_4–龙冲曲断裂；F_5–赛隆卡曲断裂
AnNq^a–念青唐古拉a岩群；AnNq^b–念青唐古拉b岩群；Jgn–古乡片麻岩套；$D_{2\text{-}3}s$–松宗组石英砂岩、口云质灰岩；C_1n–谐错组板岩、结晶灰岩

图 1　研究区地质地貌与采样点位置图

Fig. 1　Geological geomorphology and location of the samplingof study area

岩群片麻岩夹大理岩、燕山期侵入岩、变质岩、泥盆纪、石炭纪碎屑岩、碳酸盐岩和变质岩。出露的松散岩土体主要为更新世冰积碎石、全新世冲洪积碎石类土、泥石流堆积物等, 主要分布于帕隆藏布河谷、冲沟低海拔处(图 1)。

区内地下水类型分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类。松散岩类孔隙水分布在帕隆藏布河谷、冲沟的河漫滩、阶地中, 呈带状分布。基岩裂隙水分为风化裂隙水和构造裂隙水。风化裂隙水分布于花岗岩、片麻岩、石英岩等硬质岩的风化层; 构造裂隙水呈带状或脉状分布于断裂带中, 其补径排条件和赋存特征是本文讨论的主要内容。

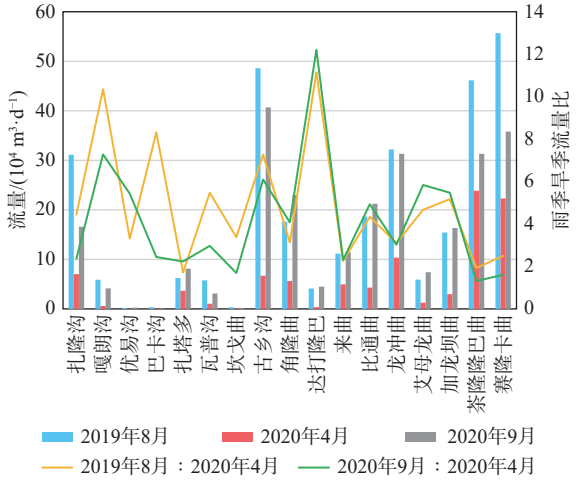


图 2　研究区主要地表水流量统计

Fig. 2　Statistics of the main surface water flow in the study area

2　研究方法与数据获取

在研究区各河流近沟口位置选择水流较平稳、断面形状较规则的位置进行流量测定。共完成了 3 期测流工作: 在 2019 年 8 月 22—25 日和 2020 年 9 月 8—10 日分别开展了雨季流量测定, 在 2020 年 4 月 22—25 日开展了旱季流量测定, 见图 2。

在坎戈曲流域实施水文地质勘察钻孔 1 眼, 孔深 200 m, 目的是对断裂带地下水赋存和径流特征进行研究。在该钻孔进行 3 个落程的抽水试验, 获取了水文地质参数。

2019 年 8 月和 2020 年 4 月, 采集地表水样品各 13 件, 采集当季降水样品各 1 件(2019 年 8 月为降雨样品, 2020 年 4 月为降雪样品), 采集冰川样品 1 件,

采集泉点样品 3 件，结合水文地质勘察钻孔，采集埋深 170 m 地下水样品 1 件（图 1）。采集样品时，使用意大利 HANNA 公司生产的多参数水质分析仪现场测试水样的温度、pH 值、氧化还原电位（Eh）、溶解性总固体（TDS）等参数。对采集的样品进行全分析、δ^2H、δ^{18}O、氚同位素（^{3}H）分析，利用 ^{14}C 同位素测定钻孔 ZK01 地下水样品的年龄。用于阳离子和微量元素分析的水样加入 HNO_3，使 pH 降到 2 以下，其余样品不加保护液。所有样品装瓶后均不留空气，拧紧瓶盖后用封口胶封闭送检。

水样全分析在自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成。阳离子和阴离子测试分别采用 ICP-AES（iCAP 6300, Thermo）和 DX-120（Dionex）型离子色谱仪，执行 DZ/T0064-1993 和 GB8538-2016 标准，测试结果阴阳离子平衡相对误差小于±5%。δ^2H、δ^{18}O、^{3}H 测试在自然资源部地下水科学与工程重点实验室完成。δ^2H 和 δ^{18}O 的测试利用波长扫描-光腔衰荡光谱仪（Picarro L2130i），测试精度分别为±1‰和±0.1‰。^{3}H 分析由超低本底液体闪烁谱仪（1220 Quantulus）计数测定，测试精度为±0.5TU。^{14}C 测年在美国 Beta 实验室利用加速器质谱（AMS）完成，测量精度为 0.123%。

3 结果与讨论

3.1 主要河流流量特征

在实际测定流量的 17 条主要河流中，2019 年雨季河流流量为 0.17×10^4 ~ 55.67×10^4 m^3/d，平均值为 17.96×10^4 m^3/d，离散系数 0.98，流量最大的是赛隆卡曲，最小的是优易沟。有 5 条河水流量超过 30×10^4 m^3/d，分别为扎隆沟、古乡沟、龙冲曲、茶隆隆巴曲和赛隆卡曲。

2020 年雨季河流流量为 0.10×10^4 ~ 40.68×10^4 m^3/d，最大的为古乡沟，最小的为巴卡沟，平均值为 15.03×10^4 m^3/d，离散系数 0.87，略小于 2019 年夏季。有 4 处流量超过 30×10^4 m^3/d，分别为古乡沟、龙冲曲、茶隆隆巴曲和赛隆卡曲。另外，比通曲流量超过了 20×10^4 m^3/d。

2020 年旱季河流流量为 0.10×10^4 ~ 23.86×10^4 m^3/d，最大的为茶隆隆巴曲，最小为坎戈曲；平均值为 5.72×10^4 m^3/d，仅为 2019 年和 2020 年雨季的 1/3 左右。其中茶隆隆巴曲（23.86×10^4 m^3/d）、赛隆卡曲（22.31×10^4 m^3/d）和龙冲曲（10.36×10^4 m^3/d）的河水流量超过 10×10^4 m^3/d，古乡沟（6.68×10^4 m^3/d）、角隆曲（5.63×10^4 m^3/d）和比通曲（4.30×10^4 m^3/d）流量也较大。

对比连续两个雨季和一个旱季各河流流量变化，可以发现研究区河流流量在雨季和旱季差别明显。雨季河流流量与旱季河流流量之比为 1.31 ~ 12.20。其中嘎朗沟、瓦普沟、达打隆巴等河流的流域面积和流量较小，但丰枯期流量差别较大；面积和流量较大的河流（如比通曲、龙冲曲、赛隆卡曲等与断裂复合发育的河流）的流量波动相对较小（图 2），说明这些流域内的地质条件具有较强的地表水流量调蓄能力。

2019 年 8 月和 2020 年 9 月的流量平均相差 1.32 倍。当日照、气温和降水量等气象条件相似时，地表水体得到的补给总量差别不大，说明气象条件对河流流量具有较强的影响。

3.2 水化学特征

地表水、地下水、冰川和降水的水化学指标统计分析见表 1。雨、旱两季河流和地下水的 pH 值均为 7.33 ~ 8.05，基本为中性偏碱性水；大气降水略偏酸性；冰川的 pH 值为 7.45，基本呈中性。地表水各指标的变异系数范围为 0.02 ~ 0.90，同一指标在 2019 年 8 月和 2020 年 4 月的变异系数相差不大，说明研究区河流的水化学指标随季节整体等幅变动。地下水各点中，既包括浅层地下水，又包括钻孔揭露的深层断裂带水，变异系数明显大于地表水，说明不同深度地下水循环过程存在差异。2019 年雨季降水（雪）主要离子浓度小于 2020 年旱季，2019 年 8 月和 2020 年 4 月溶解性总固体（TDS）分别为 10.63 mg/L 和 30.07 mg/L，Ca^{2+}浓度分别为 1.07 mg/L 和 4.15 mg/L，SO_4^{2-}浓度分别为 1.41 mg/L 和 4.33 mg/L。受溶滤作用长期影响，冰川样品各指标浓度明显高于降水浓度。

对比 4 种分类下各指标值的平均浓度，除 Na^++K^+ 和 Cl^-外，各种离子浓度和 TDS（溶解性总固体）都表现出地下水>地表水（2020 年 4 月）>地表水（2019 年 8 月）>降水及冰川。地表水在雨季与旱季离子指标存在差异的原因有两点：其一是雨季降水量较大，产生了稀释作用；其二是雨季地下水与含水介质之间反应时间有限[15]。

河水中主要阳离子为 Ca^{2+}和 Mg^{2+}，主要阴离子为 HCO_3^-和SO_4^{2-}。与河水相似，地下水的水化学类型主要为 $HCO_3\cdot SO_4$—Ca 型，说明地下水与河水存在关联关系。大气降水的水化学类型为 $HCO_3\cdot SO_4$—Ca（2019 年 8 月）和 HCO_3—Ca·Mg（2020 年 4 月）型，冰川的水化学类型为 HCO_3—Ca 型（图 3）。大气降水及冰川水化学类型与地表水和地下水水化学组分存在差异，地下水和河水主要组分受岩石风化溶滤作用影响（图 4），水化学组分主要来自于水—岩相互作用[16－17]。

地下水和地表水中主要阴离子为SO_4^{2-}和HCO_3^-，而

表 1　水样主要水化学指标值

Table 1　Concentration statistics of the main hydrochemical indexes of water samples

样品分类	项目	pH	TDS	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-
			/(mg·L^{-1})							
地表水—2020年4月	最大值	7.99	551.00	5.16	2.84	147.40	23.07	1.75	353.50	158.50
	最小值	7.33	84.00	1.29	0.85	21.95	1.88	1.40	15.19	53.84
	平均值	7.57	248.53	2.65	1.53	62.65	7.79	1.69	118.35	85.86
	标准差	0.18	143.92	1.08	0.58	37.50	5.21	0.13	102.28	27.91
	中位数	7.57	210.00	2.24	1.36	46.16	6.65	1.75	90.23	83.75
	变异系数	0.02	0.58	0.41	0.38	0.60	0.67	0.08	0.86	0.33
地表水—2019年8月	最大值	8.05	196.17	4.39	1.30	56.20	8.69	0.20	80.31	173.20
	最小值	7.48	37.09	0.40	0.47	8.62	0.98	0.05	4.29	27.83
	平均值	7.83	96.18	1.64	0.72	26.20	3.46	0.09	25.15	64.26
	标准差	0.19	55.89	1.15	0.22	16.10	2.26	0.04	22.53	41.16
	中位数	7.90	83.82	1.45	0.69	22.30	3.06	0.08	21.67	52.57
	变异系数	0.02	0.58	0.70	0.31	0.61	0.65	0.45	0.90	0.64
地下水	最大值	7.69	1 325.00	6.28	3.30	340.00	23.04	2.79	848.60	191.40
	最小值	7.50	176.00	4.69	1.02	48.23	3.51	1.75	32.03	122.60
	平均值	7.58	612.50	5.62	1.94	158.11	14.59	2.18	332.11	142.25
	标准差	0.08	462.82	0.58	0.86	118.45	8.55	0.45	336.14	28.48
	中位数	7.57	474.50	5.76	1.73	122.11	15.90	2.10	223.91	127.50
	变异系数	0.01	0.76	0.10	0.44	0.75	0.59	0.21	1.01	0.20
降水及冰川	最大值	7.45	67.37	0.55	5.24	12.57	1.59	1.75	8.50	53.78
	最小值	6.38	10.63	0.39	0.10	1.07	0.08	1.40	1.41	6.52
	平均值	6.80	36.02	0.49	1.85	5.93	1.06	1.52	4.75	31.07
	标准差	0.47	23.54	0.07	2.40	4.86	0.69	0.16	2.91	19.34
	中位数	6.56	30.07	0.54	0.21	4.15	1.51	1.40	4.33	32.90
	变异系数	0.07	0.65	0.15	1.30	0.82	0.65	0.11	0.61	0.62

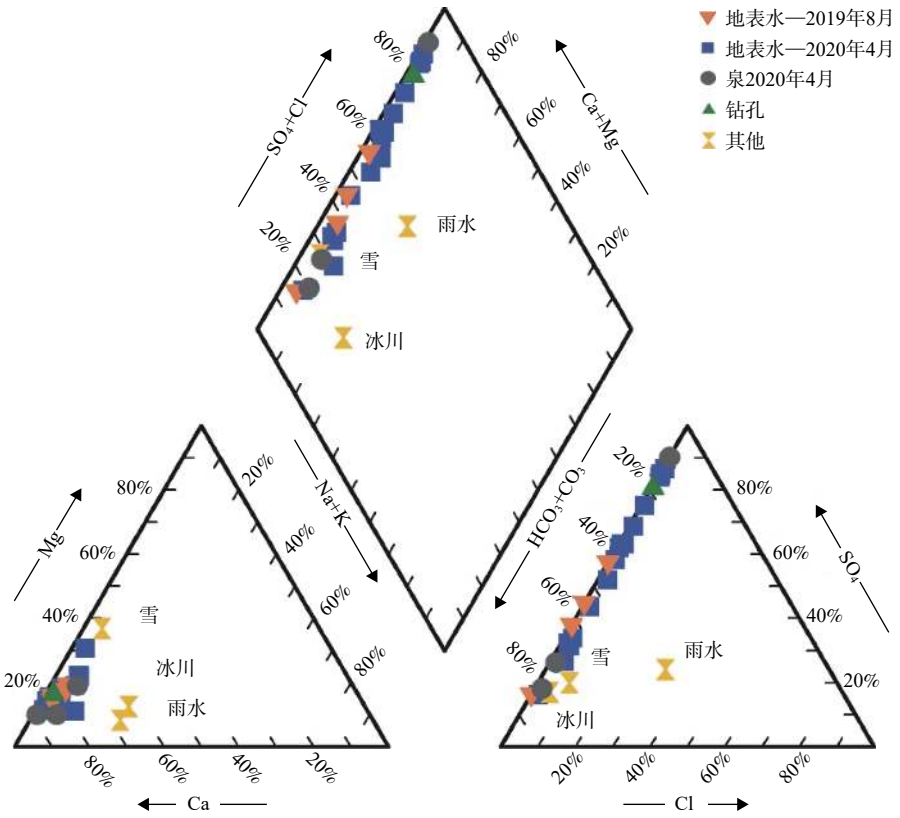


图 3　水化学 Piper 三线图

Fig. 3　Piper diagram of the water samples

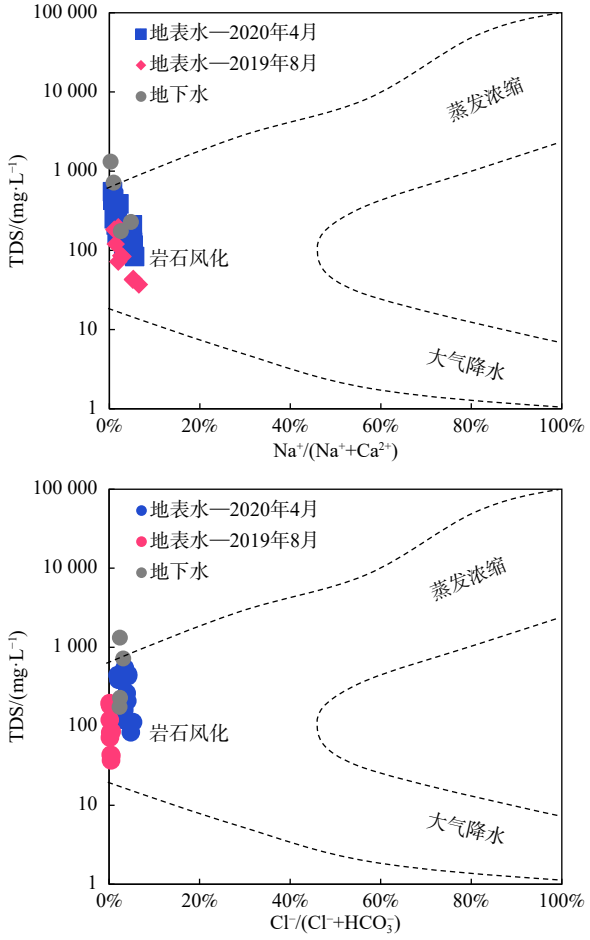


图 4　研究区河水和地下水吉布斯图

Fig. 4　Gibbs diagram of river water and groundwater in the study area

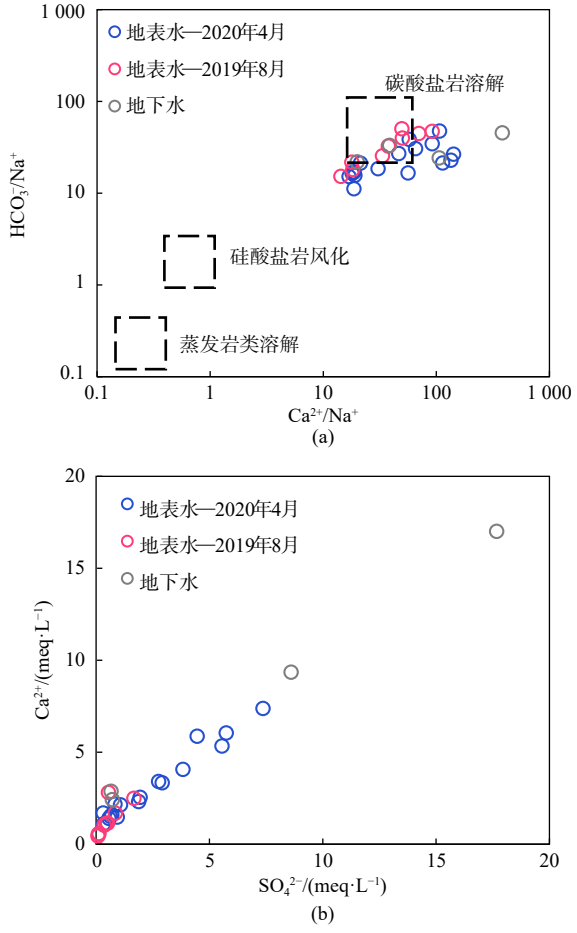


图 5　Ca^{2+}/Na^{+}和HCO_3^-/Na^{+}（a）与 Ca^{2+}和SO_4^{2-}（b）毫克当量浓度关系图

Fig. 5　Milligram equivalent concentration diagram of (a) Ca^{2+}/Na^{+} *vs* HCO_3^-/Na and (b) Ca^{2+} *vs* SO_4^{2-}

降水（雪、雨水）、冰川等补给源中的SO_4^{2-}和HCO_3^-浓度不高，说明在河水和地下水径流过程中，SO_4^{2-}和HCO_3^-发生了富集。有研究表明，青藏高原冰川径流中的HCO_3^-主要来自方解石的风化[18]，SO_4^{2-}主要来自黄铁矿氧化或石膏溶解[15,19]。图 5(a)表明研究区内大理岩、灰岩的方解石溶解贡献了水中的HCO_3^-，图 5(b)说明石膏溶解贡献了水中的SO_4^{2-}。研究区SO_4^{2-}的浓度远大于 Fe，因此铁的硫化矿物的氧化作用对SO_4^{2-}的贡献小于石膏溶解。

地表水和地下水中铁和锰的浓度较高，质量浓度范围分别为 0.014 ~ 9.400 mg/L 和 0.006 ~ 0.343 mg/L，平均值分别为 0.719 mg/L 和 0.032 mg/L。降水样品中铁和锰的浓度低。降水样品中铁低于 0.001 mg/L，2019 年 8 月降水中锰浓度为 0.003 mg/L，2020 年 4 月降水中未检出锰。在排除人类活动影响的前提下，地下水和河水中的铁和锰主要来源于水岩作用。沿嘉黎—察隅断裂带发育挤压破碎带，带内见糜棱岩、断层角砾岩、断层泥，含褐铁矿和锰质矿物[20]。通常还原环境有利于沉积物中 Fe 和 Mn 氧化物的溶解释放[21]，易溶的高价 Fe 和 Mn 氧化物会还原成溶解性更强的离子态 Fe^{2+}和 Mn^{2+}，提升水中铁和锰的浓度[22－23]；酸性环境更利于离子态 Fe 和 Mn 的富集[24]。通过图 6 可以看出，地表水和地下水分布在 Fe^{2+}和 $Fe(OH)_3$ 的界线附近，略偏向 Fe^{2+}区域；Mn 主要以 Mn^{2+}的形式存在。

研究区各条河水中铁和锰浓度存在较大差异，见图 7。河水中 Fe 浓度较高的有古乡沟（9.400 mg/L）、来曲（1.822 mg/L）、龙冲曲（2.058 mg/L）和比通曲（1.381mg/L）和茶隆隆巴曲（0.896 mg/L），明显大于其他河水。河水中 Mn 浓度较大的有古乡沟（0.343 mg/L）、比通曲（0.083 mg/L）和龙冲曲（0.151 mg/L）。古乡沟、比通曲和龙冲曲等与断裂复合发育的地表水体的 Fe 和 Mn 质量浓度较高。

由此可以推断，大气降水和冰川融水补给地表水

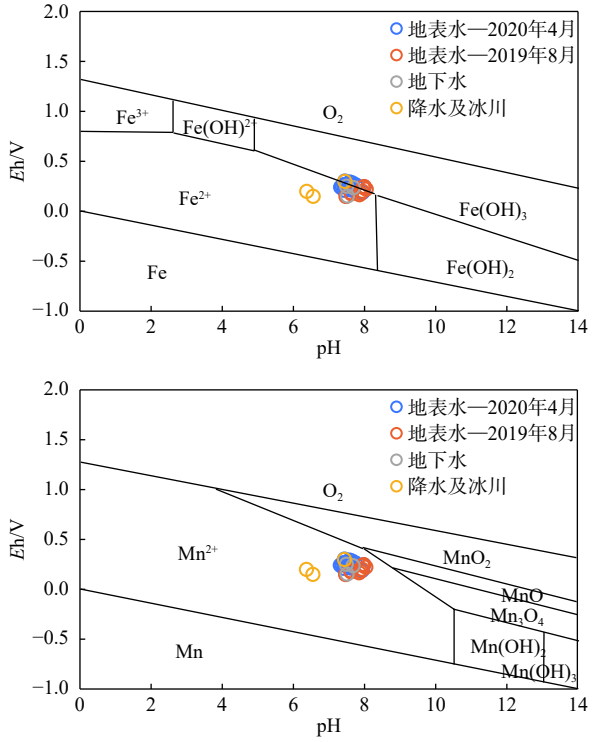


图 6　研究区水体 *Eh*-pH 值关系图

Fig. 6　Relationship between *Eh* and pH in the water samples in the study area

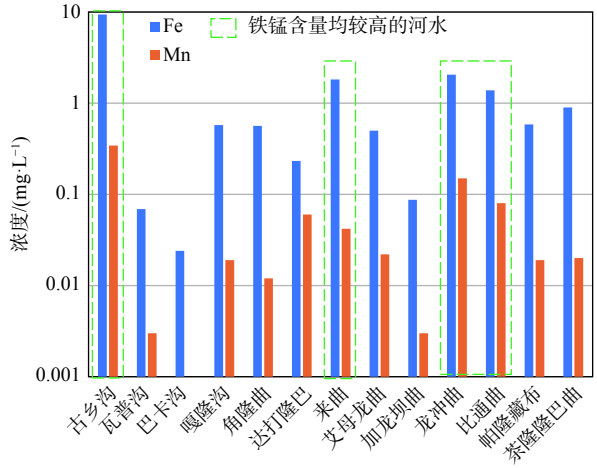


图 7　研究区河水 Fe 和 Mn 的质量浓度

Fig. 7　Concentration of Fe and Mn in river water

后，一部分转化为断裂带地下水，在还原环境下铁锰矿物溶解进入水中，使得地下水中的铁和锰浓度升高。当断裂带与地表水流复合发育，断裂带地下水循环时间长，与含水介质充分相互作用，铁锰浓度高；非断裂影响地区含水介质中铁锰浓度低。地下水最终排泄进入各地表水流中，并与地表水发生混合，汇入帕隆藏布。

3.3　同位素特征

研究区水体氢氧同位素分析测试结果见图 8。所有水点均位于全球大气降水线（GMWL）和青藏高原东部大气降水线附近（青藏高原东部 LMWL）[25]，说明降水是研究区各类型水体的主要补给来源[26－27]。地下水与 2020 年 4 月地表水点高度重合，说明地下水与地表水水力联系紧密。一般来说，在其他环境条件一定时，气温越低，δD 和 δ^{18}O 的值越小[28]。冰川形成时期气温低于现在的气温，图 8 中冰川点的 δD、δ^{18}O 值相比于降水点更小。地表水和地下水是由冰川融水和大气降水共同补给形成的，δD 和 δ^{18}O 值位于在二者之间。

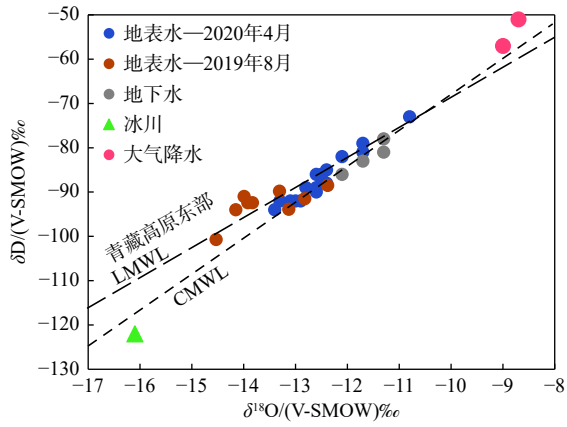


图 8　水样 δD 和 δ^{18}O 关系图

Fig. 8　Plot of δD-δ^{18}O of the water samples

2020 年 4 月气温低于 2019 年 8 月，但图 8 出现 2020 年 4 月各点的 δD 和 δ^{18}O 的值大于 2019 年 8 月的异常现象，这可能是由于河水补给源比例不同造成的。为证明这一推测，选择龙冲曲作为典型流域，利用 δD 和 δ^{18}O 计算雨季和旱季大气降水和冰川融水对地表水补给量的比重（图 9），可以看出 2019 年 8 月冰川补给量占比为 58.3%，2020 年 4 月占比为 38.5%。河水中冰川和大气降水的补给比例不同，造成不同时期地表水中 δD 和 δ^{18}O 的值不同。由此可以看出，雨季冰川融水补给比例大于旱季。

利用氚同位素和 ^{14}C 同位素对地下水循环速率进行半定量分析（表 2）。YGA10、YGA28 和 YGA34 泉水样品的氚含量为 3.9 ~ 6.2TU，根据 Clark 等[29] 的氚方法定年解释，YGA10、YGA28 泉水接受现代地下水补给，地下水年龄 5 ~ 10 a；泉水 YGA34 接受现代地下水补给并混有少量 1952 年以前补给的地下水。3 个泉点地下水循环时间短，更新速率较快，循环深度浅。

在钻孔 ZK01 中约 132 m 埋深处采集了裂隙地下

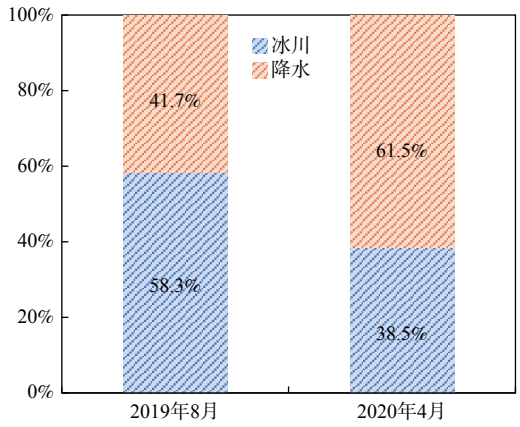


图 9 龙冲曲补给源比例图

Fig. 9 Proportion of the supply sources in Longchongqu

表 2 样品年代半定量对应表

Table 2 Half quantitive corresponding table between content and age

样品类型及编号	氚含量/TU	半定量年龄*	分类
泉-YGA10	6.2±0.9	5 ~ 10 a	浅循环地下水
泉-YGA28	4.1±0.8	5 ~ 10 a	浅循环地下水
泉-YGA34	3.9±0.8	1952年前补给与5 ~ 10 a补给混合水	浅循环地下水
钻孔样品	2.9±0.7	4 640 a	中深循环地下水
地表水-YGA01	5.9±0.9	–	河水与地下水混合
地表水-YGB17	7.0±0.9	–	河水与地下水混合
地表水-YGB30	8.5±1.2	–	河水与地下水混合

注: *钻孔样品为^{14}C测定的表现年龄。

水, 测得氚含量为 2.9 TU, 说明地下水的补给时间早于 1952 年。^{14}C 同位素测试得出该水样的表征年龄为 4 640 a。相比于 YGA10、YGA28 和 YGA34 泉水样品, 钻孔中裂隙地下水的循环深度较大, 更新速率较慢, 属于中深循环的地下水。

YGA01(古乡沟)、YGB17(比通曲)和 YGB30(龙冲曲)河水样品的氚含量为 5.9 ~ 8.5 TU, 高于泉点氚含量, 但低于现代降雨中的氚含量(一般为 10^1 ~ 10^2 TU[29]), 说明河水中存在混入地下水的现象。对比地表水、泉和钻孔采集水样的年龄, 可以推断, 与断裂复合发育的地表水中有地下水的混合, 其中以现代地下水为主。

3.4 冰川融水-大气降水-地下水-地表水转化过程

基于冰川融水、大气降水、河水和地下水等不同水体水化学和同位素组分的差异, 分析研究区多种水体的转化过程。研究发现, 西藏波密冰川覆盖区大型河流的补给受气象条件控制, 径流过程中河水与地下水的转化过程受与河流复合发育的断裂控制。

区内河流发源于帕隆藏布右岸海拔 4 000 m 以上的冰川覆盖区, 河水和地下水水体 δD 和 δ^{18}O 值均落在区域大气降水线附近, 显示其主要接受冰川融水和大气降水补给。在雨季, 河水的 δD 和 δ^{18}O 的值偏向冰川, 而在旱季河水的 δD 和 δ^{18}O 的值偏向大气降水, 说明河水补给来源的比例在旱季和雨季存在差异。旱季大气降水补给量占比大, 雨季冰川融水补给量占优。这可能是由于旱季属全年气温较低的时期, 冰川融水量小。因而大气降水占总补给量的比例超过 60%。雨季集中在气温较高的时期, 冰川融水量激增, 对河水补给的贡献超过大气降水, 约占 58.3%。

河水通常在高海拔处接受补给, 因而河水和地下水相对排泄基准面(帕隆藏布)具有较高的水头。河水沿各沟谷自北西向南东方向径流, 断裂带地下水在河谷附近或以泉的形式、或以线状排泄的方式排泄, 最终汇入帕隆藏布。

河流自高位补给到汇入帕隆藏布的径流过程中, 存在 2 种不同的水体转化过程类型(图 10)。

第一种类型是古乡沟、龙冲曲、比通曲和赛隆卡曲等与断裂复合发育的河流。研究区内所有河流 2019 年雨季与 2020 年旱季流量之比为 1.71 ~ 11.15, 2020 年雨季与 2020 年旱季流量之比为 1.31 ~ 12.20。而与断裂复合发育的河流 2019 年雨季与 2020 年旱季流量之比为 2.50 ~ 7.28, 2020 年雨季与 2020 年旱季流量之比为 1.61 ~ 6.09, 明显小于全区河流的同类流量比值。说明以上几条河流的流量较为稳定。其原因为: 在气温、降水量一定的前提下, 断裂带地下水对河水持续补给, 减小了河水流量在雨季和旱季的变化幅度。

与断裂复合发育的河流流域内岩体完整性差, 利于地表水入渗。地下水接受河水持续的补给, 方向基本与地形坡度保持一致。地下水与含水介质发生水岩作用较为充分, TDS 值升高, 方解石的风化和石膏的溶解使水中SO_4^{2-}和HCO_3^-富集, 水化学类型由补给源的 HCO_3—Ca(Mg)型逐渐变为 $HCO_3{\cdot}SO_4$—Ca 型。裂隙含水介质的还原环境也使地下水中铁、锰浓度升高。

大部分地下水循环深度小, 年龄为 5 ~ 10 a, 更新速率快, 与河流存在密切的水力联系和相互转化。少部分地下水沿断裂向深部径流, 地下水年龄在 4 000 a 以上。即便在断裂带渗透性较好的条件下, 参与中深循环的地下水更新速率也较慢, 水岩作用较充分, TDS 值明显高于河水和浅层循环地下水。地下水与地表水混合后汇入帕隆藏布。

第二种类型是非断裂影响区的河流。基岩风化裂隙水接受河水渗漏补给。风化裂隙发育深度有限,

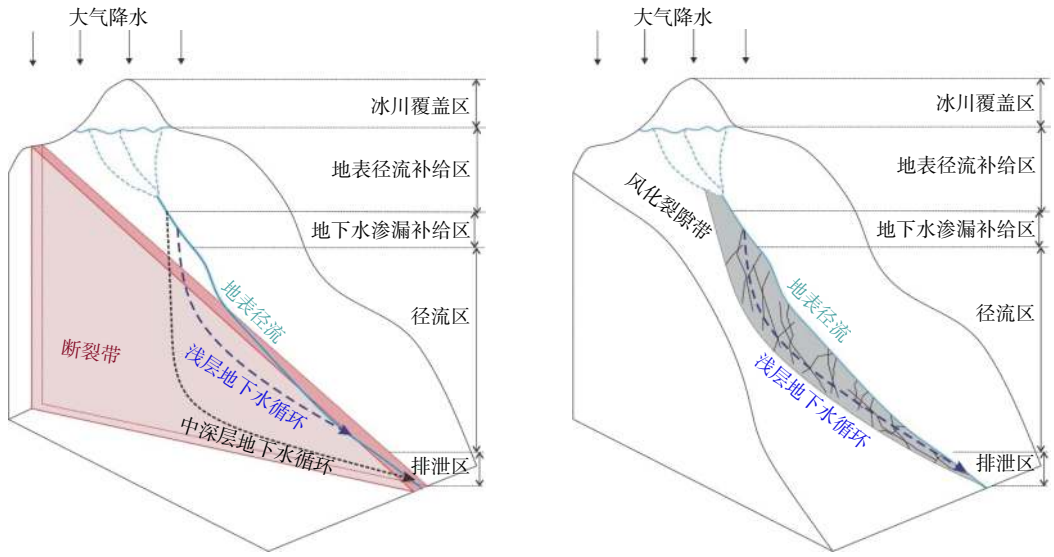


图 10　不同类型水体转化过程模式图

Fig. 10　Transformation process model of different types of water

地下水对河水的补给量和水量调节能力小于第一种类型, 河水在雨季和旱季流量比值大。较弱的还原环境不利于地下水中铁、锰溶解, 地下水中铁、锰浓度低。地下水年龄 5 ~ 10 a, 循环深度浅。临近排泄基准面的河水水化学类型为 HCO_3—Ca 型和 $HCO_3 \cdot SO_4$—Ca 型, 说明混入了少量浅循环的地下水。

从工程建设防灾减灾的角度考虑, 第一种类型的河流, 由于水量大且较为稳定, 水头高, 断裂带地下水与地表水存在较好的水力联系, 因而在施工过程中产生高压涌水突泥灾害的风险较大。在施工过程中, 应充分予以关注, 充分考虑复杂地质构造的致灾风险。

4　结论

(1)西藏波密冰川覆盖区河水主要接受冰川融水和大气降水补给。雨季河水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 值小于旱季, 说明河水雨季和旱季的补给源结构不同。在雨季冰川融水为主要补给源, 旱季以大气降水补给为主。

(2)河水成分及来源与断裂有密切关系。根据河水与断裂空间展布关系, 河流流域内水体径流过程可分为 2 种类型。其一是古乡沟、比通曲、龙冲曲等与断裂带复合发育的河流, 可补给断裂带裂隙地下水。浅层循环断裂带水年龄 5 ~ 10 a, 循环速率快; 中深层断裂带水年龄超过 4 000 a, 循环速率慢, 水岩作用较充分。由于持续接受地下水补给, 年内河水流量波动较小。其二是非断裂影响区内的河流, 河水可补给风化裂隙地下水。地下水循环快, 与河水交换较频繁, 水岩作用程度弱。年内流量波动较大。河水与地下水混合后, 排泄至帕隆藏布。

(3)研究区河水补给区海拔高, 河水流量大, 且与断裂带地下水存在较好的水力联系, 在地下工程建设过程中, 与断裂带复合发育的古乡沟、比通曲、龙冲曲存在高压涌水突泥灾害风险, 应予以高度关注。

参考文献（References）:

[1] LI C S, DING J F, LIAO Y K, et al. Analysis on environmental impact factors of tunnel karst dynamics system in typical areas[C]//Groundwater chemical kinetics and fractal characteristics of karst tunnel. Singapore: Springer Singapore, 2020: 15-49.

[2] 李利平, 朱宇泽, 周宗青, 等. 隧道突涌水灾害防突厚度计算方法及适用性评价[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊1): 41 − 50. [LI Liping, ZHU Yuze, ZHOU Zongqing, et al. Calculation methods of rock thickness for preventing water inrush in tunnels and their applicability evaluation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(Sup1): 41 − 50. (in Chinese with English abstract)]

[3] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041 − 1069. [LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041 − 1069. (in Chinese

with English abstract)]

[4] 白明洲, 许兆义, 王连俊, 等. 深埋隧道岩溶突水灾害的地质条件研究[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(3): 21 − 24. [BAI Mingzhou, XU Zhaoyi, WANG Lianjun, et al. Research on the geological condition of karst water bursting disaster in the course of tunnel caving[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(3): 21 − 24. (in Chinese with English abstract)]

[5] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春. 特长岩溶隧道涌水预测的系统辨识方法[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(4): 50 − 54. [XU Zemin, HUANG Runqiu, LUO Xingchun. Identification of karst water system in long tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(4): 50 − 54. (in Chinese with English abstract)]

[6] 马士伟. 岩溶隧道涌突水地质灾害破坏机理与预警技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011. [MA Shiwei. Study on mechanism of inrush water geological hazard and warning technology of karst tunnel[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2011.(in Chinese with English abstract)]

[7] 李术才, 王康, 李利平, 等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22 − 30. [LI Shucai, WANG Kang, LI Liping, et al. Mechanical mechanism and development trend of water-inrush disasters in karst tunnels[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(1): 22 − 30. (in Chinese with English abstract)]

[8] 高波, 王军朝, 张佳佳, 等. 帕隆藏布流域(波密-索通)典型冰碛物-崩滑型物源冰川泥石流发育特征分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 176 − 182. [GAO Bo, WANG Junchao, ZHANG Jiajia, et al. Analysis of the development characteristics of typical glacial debris flow that has materials source of moraine and colluvial or slide deposits in the Parlung River (Bomi-Suotong)[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(19): 176 − 182. (in Chinese with English abstract)]

[9] 赵聪, 梁京涛, 王军朝, 等. 帕隆藏布流域(波密-然乌段)冰川动态变化遥感分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 56 − 62. [ZHAO Cong, LIANG Jingtao, WANG Junchao, et al. Remote sensing analysis of glacier dynamic changes in Parlung Zangbo river[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21): 56 − 62. (in Chinese with English abstract)]

[10] 邓桃, 姚令侃, 黄艺丹, 等. 海洋型冰川塑造地貌特征与铁路选线程式[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(1): 28 − 33. [DENG Tao, YAO Lingkan, HUANG Yidan, et al. Landform characteristics of marine glaciers and railway route selection program[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(1): 28 − 33. (in Chinese with English abstract)]

[11] 刘宗香, 苏珍, 姚檀栋, 等. 青藏高原冰川资源及其分布特征[J]. 资源科学, 2000, 22(5): 49 − 52. [LIU Zongxiang, SU Zhen, YAO Tandong, et al. Resources and distribution of glaciers on the Tibetan Plateau[J]. Resources Science, 2000, 22(5): 49 − 52. (in Chinese with English abstract)]

[12] 许君利, 刘时银, 张世强, 等. 塔里木盆地南缘喀拉米兰河克里雅河流内流区近30a来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 312 − 318. [XU Junli, LIU Shiyin, ZHANG Shiqiang, et al. Glaciers fluctuations in the Karamilan-Keriya River watershed in the past 30 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 312 − 318. (in Chinese with English abstract)]

[13] 罗锋. 川藏铁路某冰川泥石流桥梁安全净空高度研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 92 − 97. [LUO Feng. Case study on the safe clearance height of bridge project crossing a glacial debris flow of Sichuan-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(7): 92 − 97. (in Chinese with English abstract)]

[14] 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 等. 川藏铁路雅安—林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J]. 现代地质, 2021, 35(1): 1 − 17. [GUO Changbao, WU Rui'an, JIANG Liangwen, et al. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an-Linzhi section of the Sichuan-Tibet Railway, China[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 1 − 17. (in Chinese with English abstract)]

[15] LI X Y, HE X B, KANG S C, et al. Diurnal dynamics of minor and trace elements in stream water draining Dongkemadi Glacier on the Tibetan Plateau and its environmental implications[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 1104 − 1118.

[16] 王利杰, 曾辰, 王冠星, 等. 西藏山南地区沉错湖泊与径流水化学特征及主控因素初探[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 737 − 745. [WANG Lijie, ZENG Chen, WANG Guanxing, et al. Chemical characteristics and impact factors of the Drem-tso Lake and supplying runoff in the Southern Tibet[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 737 − 745. (in Chinese with English abstract)]

[17] 孙英, 周金龙, 魏兴, 等. 巴楚县平原区地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境化学, 2019, 38(11): 2601 − 2609. [SUN Ying, ZHOU Jinlong, WEI Xing, et al. Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the plain area of Bachu County[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(11): 2601 − 2609. (in Chinese with English abstract)]

[18] LI X Y, DING Y J, LIU Q, et al. Intense chemical

weathering at glacial meltwater-dominated Hailuogou basin in the southeastern Tibetan Plateau[J]. Water, 2019, 11(6): 1209.

[19] 李明月, 孙学军, 李胜楠, 等. 青藏高原及其周边地区冰川融水径流无机水化学特征研究进展[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 562 − 574. [LI Mingyue, SUN Xuejun, LI Shengnan, et al. Advances on inorganic hydrochemistry of glacial meltwater runoff in the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 562 − 574. (in Chinese with English abstract)]

[20] 王保弟, 王冬兵, 唐渊, 等. 川藏铁路交通廊带地质图及说明书(1∶250 000)[R]. 成都: 中国地质调查局成都地质调查中心, 2019. [WANG Baodi, WANG Dongbing, TANG Yuan, et al. Geological map and manual of Sichuan-Tibet Railway traffic corridor (1∶250 000)[R]. Chengdu: Chengdu Center of China Geological Survey, 2019. (in Chinese)]

[21] 张小文, 何江涛, 黄冠星. 石家庄地区浅层地下水铁锰分布特征及影响因素分析[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 206 − 218. [ZHANG Xiaowen, HE Jiangtao, HUANG Guanxing. Distribution characteristics and cause analysis of iron and manganese in shallow groundwater in Shijiazhuang area[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 206 − 218. (in Chinese with English abstract)]

[22] KHOZYEM H, HAMDAN A, TANTAWY A A, et al. Distribution and origin of iron and manganese in groundwater: case study, Balat-Teneida area, El-Dakhla Basin, Egypt[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(16): 1 − 16.

[23] 余东, 周金龙, 陈劲松, 等. 新疆喀什地区高铁锰地下水空间分布特征及成因分析[J]. 环境化学, 2020, 39(11): 3235 − 3245. [YU Dong, ZHOU Jinlong, CHEN Jinsong, et al. Spatial distribution characteristics and genesis of groundwater with high iron and manganese content in Kashi Prefecture, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(11): 3235 − 3245. (in Chinese with English abstract)]

[24] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区地下水铁的分布特征及其成因[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 531 − 538. [HUANG Guanxing, SUN Jichao, JING Jihong, et al. Distribution and origin of iron in groundwater of the Zhujiang delta[J]. Geology in China, 2008, 35(3): 531 − 538. (in Chinese with English abstract)]

[25] 李维杰, 王建力, 王家录. 西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1132 − 1142. [LI Weijie, WANG Jianli, WANG Jialu. Characteristics of the stable isotopes in precipitation and the source of water vapor in different terrain in the southwest region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1132 − 1142. (in Chinese with English abstract)]

[26] 杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 等. 基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 160 − 168. [YANG Nan, SU Chunli, ZENG Hanfu, et al. Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 160 − 168. (in Chinese with English abstract)]

[27] 张春潮, 侯新伟, 李向全, 等. 三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 62 − 71. [ZHANG Chunchao, HOU Xingwei, LI Xiangquan, et al. Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 62 − 71. (in Chinese with English abstract)]

[28] 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 Xubo, XIANG Xuanli, HOU Baojun, et al. Application of hydrochemistry coupled with stable isotopes in the study of Karst water hydrogeology[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(5): 629 − 636. (in Chinese with English abstract)]

[29] CLARK I D, FRITZ P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. New York: Lewis Publishers, 1999.

编辑: 张若琳