引用格式:马剑飞,李向全,张春潮,等,2022. 金沙江断裂带中段岩溶发育和地下水循环特征 [J]. 地质力学学报,28 (6):956-968. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 20222823

Citation: MA J F, LI X Q, ZHANG C C, et al., 2022. Characterization of karst development and groundwater circulation in the middle part of the Jinshajiang fault zone [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 956-968. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 20222823

金沙江断裂带中段岩溶发育和地下水循环特征

马剑飞^{1,2},李向全^{1,2},张春潮^{1,2},付昌昌^{1,2},王学锋³,谢小国^{4,5},王振兴^{1,2}, 罗 兵^{4,5},白占学^{1,2},赵崇钦¹

MA Jianfei^{1,2}, LI Xiangquan^{1,2}, ZHANG Chunchao^{1,2}, FU Changchang^{1,2}, WANG Xuefeng³, XIE Xiaoguo^{4,5}, WANG Zhenxing^{1,2}, LUO Bing^{4,5}, BAI Zhanxue^{1,2}, ZHAO Chongqin¹

- 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;
- 3. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室,北京 100029;
- 4. 四川省地质矿产开发局水文地质工程地质中心,四川成都 610081;
- 5. 四川省华地建设工程有限责任公司,四川成都 610081
- 1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;
- 2. Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;
- 3. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
- 4. Chengdu Center of Hydrogeology and Engineering Geology, SBGEEMR, Chengdu 610081, Sichuan, China;
- 5. Sichuan Huadi Construction Engineering Co., Ltd, Chengdu 610081, Sichuan, China

Characterization of karst development and groundwater circulation in the middle part of the Jinshajiang fault zone

Abstract: The complex hydrogeological structure and abundant karst water in the carbonate rock distribution area in the Jinshajiang fault zone's middle section are essential threats to engineering safety. Based on karst landform and hydrogeological investigations, the article presents the karst development characteristics in the Jinshajiang fault zone's middle section, and analyzes the recharge source, runoff process, and discharge characteristics of karst water using the methods of hydrochemical and new isotopic dating and tracing. The results show that structures control the spatial distribution of karst and the groundwater circulation in the study area. There are mainly three elevation-level karst development zones in the vertical direction. The development time of the second elevation-level karst is from the late Miocene to the late Pleistocene, and the top of the third elevation-level karst is from the Pliocene to the late Pleistocene. The karst water recharge area is at an elevation of 4400 ~ 4600 m. The primary recharge sources are atmospheric precipitation and glacial lake water. The ²²⁸ Ra/²²⁶ Ra data in the water shows that it is difficult for water sources under the control of a non-fixed-curvature fault to form recharge across the affected area of the fault. The karst water circulates fast, the ⁸⁵Kr age of the karst spring is<15 a, and there is basically no older groundwater mixing. Carbonate rock dissolution and cation exchange are not sufficient during groundwater runoff. In the engineering project, the spatial distribution of karst water runoff channels under the control of active faults, the influence of high-water-pressure and the threat of geological disasters caused by special weather

基金项目:中国地质科学院基本科研业务费项目 (SK202205);中国地质调查局项目 (DD20221812)

This research is financially supported by the Scientific Research Project of the Chinese Academy of Geological Sciences (Grant SK202205), and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221812)

第一作者简介:马剑飞(1987—),男,助理研究员,主要从事水文地质、工程地质研究工作。E-mail: majianfei@ mail.cgs.gov.cn 收稿日期: 2022-06-12;修回日期: 2022-09-10;责任编辑:范二平

conditions should be fully considered.

Keywords: tectonic karst; karst development characteristics; groundwater circulation; new isotope; engineering influence; Jinshajiang fault zone

摘 要: 金沙江断裂带中段碳酸盐岩分布区水文地质结构复杂、岩溶水量丰富,是工程地质安全的重要 威胁之一。文章在岩溶地貌和水文地质调查的基础上,采用水化学和新型同位素测年与示踪的方法,研 究了金沙江断裂带中段岩溶发育特征,分析了岩溶水补给、径流和排泄过程。结果表明: 岩溶空间分布 和地下水补给、径流、排泄均受构造控制; 在垂向上主要存在 3 个高程级别的岩溶发育分区,其中二级和 三级顶部岩溶的发育时间分别为晚中新世至晚更新世和上新世至晚更新世; 岩溶水补给区海拔 4400~4600 m, 主要补给源为大气降水和冰湖水,水中²²⁸ Ra/²²⁶ Ra 数据显示非定曲断裂控制范围内水源难以形成跨断 裂影响范围的补给; 岩溶水循环速度快,岩溶大泉的⁸⁵ Kr 年龄<15 a,且基本没有年龄较大的地下水混合; 径流过程中碳酸盐岩溶蚀和阳离子交换作用不充分。在工程中应充分考虑活动断裂影响下岩溶水径流通 道空间分布、高水压影响和特殊天气条件带来的地质灾害威胁。

关键词:构造岩溶;岩溶发育特征;地下水循环;新型同位素;工程影响;金沙江断裂带 中图分类号:P641;P642 文献标识码:A 文章编号:1006-6616 (2022) 06-0956-13 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222823

0 引言

地下工程水害是岩溶区工程安全的主要威胁。 在中国中西南地区,超过一半的岩溶地下工程曾 发生过严重的涌突水灾害(Li et al.,2021;Xue et al.,2021)。发生该类灾害最为根本的原因,是对 岩溶含水层结构及地下水循环过程认识不够深刻 (Fan et al.,2018;Li et al.,2020)。受气温、降 水、构造活动等因素影响,青藏高原东部高山峡 谷区岩溶发育特征有其特殊性(Zhang,1994;蒋 忠诚等,2019)。特别是在巴塘断裂以南至德钦-中甸-大具断裂的金沙江断裂带中段(夏金梧和朱 萌,2020),叠加活跃的构造活动和广泛分布的冰 川湖泊等因素后,岩溶发育特征和岩溶水循环过 程的复杂程度明显增加。因此,开展岩溶发育和 岩溶水循环特征研究,对工程选址、灾害预测和 分析具有重要意义。

自 20 世纪 60 年代起到 21 世纪初,众多学者 就建立了青藏高原与国内其他地区的岩溶存在差 异的基本认识,并总结了地形地貌(赵天石和高 瑞袖,1985;高全洲等,2002)、岩性(沈继方等, 1991;卢耀如,1999)、气候条件(Zhang,1994; 章典和师长兴,2002)和地表汇水条件(高全洲 等,2000)等导致岩溶发育特征存在差异的因素。 近年来,随着青藏高原地学研究的逐步深入,对 岩溶水文地质条件和构造之间关系有了更多认识 (穆文平, 2018; 钟玲敏等, 2018; 史箫笛等, 2019; 许汉华等, 2020; 康小兵等, 2021)。李向全 等(2021)结合青藏高原隆升历史,提出青藏高 原东部经历了不少于3个岩溶主要发育期,且在垂 向上存在明显的分带特征。各高程级别的岩溶之 间或由构造、地下暗河连通,或单独发育,甚至 形成封闭的蓄水构造, 岩溶水的补给区与排泄区 高差多超过1500 m,估算排泄区静水压力超过10 MPa, 岩溶水流动力强劲(张永双等, 2021)。马 剑飞等(2022a)通过对多个岩溶大泉补给来源和 方式的分析,初步总结了青藏高原东部构造岩溶 地下水的补给模式和影响因素。多位学者通过对 分布在青藏高原东部岩溶大泉的调查研究,提出 了岩溶地貌发育和水循环受断裂影响大的认识 (罗文艺, 2019; 张春潮等, 2021; 王杜江等, 2021; 马剑飞等, 2022b; Ma et al., 2022a, 2022b)。以上研究丰富了高原构造岩溶研究的内 容体系,为后续深入探索奠定了基础。

然而岩溶发育具有极大的不均一和各向异性, 加之青藏高原东部恶劣的自然环境影响,对岩溶 发育和地下水补径排特征的研究程度仍不足以满 足当前社会经济发展的需要。如多级别构造岩溶 发育时间如何界定、各级别岩溶洞穴当前是否仍 在发育、溶蚀速率如何、是否有新的证据来进一 步佐证岩溶水径流受断裂控制、地下水年龄如何 等。这些问题的认识不够深入,可能对未来工程 开发建设带来安全隐患。 针对以上问题,文章在岩溶地貌和水文地质 调查的基础上,借助铀系不平衡测年的方法,研 究了金沙江断裂带中段岩溶发育特征,采用水化 学和新型同位素测年和示踪的方法,分析了岩溶 水的补给来源、径流过程和排泄特征,初步探讨 了对高原构造岩溶的工程影响,为青藏高原岩溶 区资源开发利用和工程建设提供地质科学依据。

1 研究区概况

1.1 地形地貌

研究区位于金沙江四川巴塘县-得荣县段东岸。该地属高山峡谷地貌,地形起伏大,岭谷高差一般超过 1500 m,最高点位于研究区北部地表水分水岭,海拔约 5335 m,最低点位于研究区南部定曲河谷,海拔约 3100 m。

区内山坡坡型复杂,坡度陡,一般 45°~60°, 沿定曲河谷分布的断层崖坡度不小于 75°。研究区 东部山顶由于冰川和溶蚀共同作用,形成以冰蚀 台原为主的冰蚀-溶蚀地貌,地形较为平坦。河谷 形态在剖面上多呈"V"型,仅在研究区南部波密 乡、根久村一带呈"U"型。

1.2 气象与水文

研究区属于高山高原型气候,年均气温 14.8℃。 年均降水量 504 mm,雨季为每年的 6 月至 9 月, 雨季降水量占比超过 90%。

区内主要河流为金沙江一级支流——定曲。 研究区北部为定曲源区,自北向南流出研究区, 于研究区外的得荣县古学乡附近汇入金沙江干流, 全长约 222 km,在研究区内长约 75 km。定曲上游 (测流位置见图 1,测流时间为 2021 年 5 月,无降 水)流量约为 1.6 m³/s,入河口流量为 187 m³/s (四川省地方志编纂委员会,1996)。河流比降大, 动能充沛。

高程 4400 m 以上的冰蚀台原区广泛分布冰川 湖泊,湖面面积 0.1×10⁴~5.0×10⁴ m²,湖水深度 一般 0.4~1.2 m (Ma et al., 2022b)。湖面面积在 雨季略有增加,但受地形限制,湖面面积增加十 分有限。部分湖水可观察到排泄口,以地表水形 式排泄;大部分湖水的排泄口无法直接观察到, 可能以蒸发、地表潜流或下渗补给地下水形式 排泄。

1.3 地质构造与地层岩性

研究区位于金沙江断裂带中段, 断裂分布密

集,构造活动强烈。其中的定曲断裂为晚更新世 活动断裂;研究区西侧的斋如隆断裂分东、西两 支,均为全新世活动断裂(杨志华等,2022),其 余断裂活动性不确定。断裂两侧岩体较为破碎, 为地下水补给和径流提供了空间条件(杨忠平等, 2020;秦宇龙等,2021)。

研究区出露基岩包括印支期石英二长岩 (ηo^{1-b})、寒武系(Є)、奥陶系(Ο)至中上志留 统(S₂₋₃)碎屑岩、碳酸盐岩、泥盆系—石炭系 (C—P)碳酸盐岩、下二叠统(P₁)碎屑岩夹薄 层碳酸盐岩、中下三叠统(T₁₋₂)碎屑岩、变质碎 屑岩。岩层水平分布复杂,倾角27°~48°。碳酸盐 岩分布受活动断裂控制,主要分布在定曲断裂和 斋如隆东支断裂之间。

2 岩溶发育特征调查和样品采集

在研究区开展了岩溶发育特征调查,以获取 岩溶地貌类型、空间位置、发育规模等数据。在 溶洞中采集了次生方解石样品2件,用于测年和岩 溶发育时间分析。样品在中国科学院地质与地球 物理研究所新生代地质与环境重点实验室利用多 接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)进 行测试,年龄分析精度优于5‰。

2021年4-5月(旱季末期)在研究区采集岩 溶泉水样品4件,分别为定曲泉(编号LB)、波密 泉(编号BM)、经筒泉(编号JT)和根久泉(编 号 GJ)。同期还采集了河流样品 5 件 (编号分别为 定曲-1、定曲东-1、定曲-2、定曲东-2、定曲-3)、 冰湖湖水样品 2 件 (编号分别为 Lake-1、Lake-2)、 积雪样品1件,采样位置见图1。在2021年4月和 9月分别采集降雨样品1件。样品采集过程中,使 用多参数水质分析仪(HANNA Instruments[®],意 大利)现场测试水体的 pH 值和电导率参数。随后 对采集的样品进行水质全分析和 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 T (氚)等的同位素测试分析。其中水质全分析在自 然资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成, 阴 阳离子平衡相对误差小于±5%; δD 、 $\delta^{18}O$ 和 T (氚)等同位素测试在自然资源部地下水科学与工 程重点实验室完成,测试精度分别为±1‰、 ±0.1% 和±0.5 TU。

研究区部分水体还采集了镭(Ra)同位素和 稀有气体氪(Kr)同位素。Ra同位素样品采集体



图1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological sketch map of the study area

积为 80~120 L,并在现场完成富集(图 2a);²²⁶ Ra 和²²⁸ Ra 放射性活度测试在华东师范大学河口海岸 学国家重点实验室完成,具体采集和测试方法见 郎琳等(2020)。为研究冰湖水是否存在跨断裂带 影响范围的补给,在斋如隆东支断裂附近的一处 冰湖也采集了镭同位素样品。稀有气体 Kr 同位素 样品采用中国地质科学院水文地质环境地质研究 所研制的地下水溶解性气体膜萃取装置采集(图 2b)。样品采集量均大于 400 L,纯度满足测试要 求。测试工作在中国科学技术大学先进技术研究 院完成。

3 岩溶发育特征

研究区内岩溶地貌主要有溶洞、溶孔、溶沟、 雨痕等类型。溶洞多出露于陡峭的山坡,直径 0.5 m 至数米不等(图 3a—3c)。洞的深度一般不



a-Ra同位素采集与富集; b-⁸⁵Kr样品采集

- 图 2 水体中 Ra 和85 Kr 采样照片
- Fig. 2 Photos of Ra and ⁸⁵Kr sampling
- (a) Ra isotopes sampling; (b) ⁸⁵Kr sampling

大,超过2m深的溶洞较为少见。但主溶洞内一般 发育多个截面直径不超过0.5m的次级溶洞,实测 了部分次级溶洞的深度,测得其发育深度都超过 1.5m(图3c)。

研究区内岩溶发育受构造控制的特征较为明显。主要表现在:①可溶岩地层分布受断裂控制;



a—第一级岩溶,溶洞,海拔约 5000 m; b—第二级岩溶,溶洞 (样品编号 H19),海拔约 4050 m; c—第三级岩溶,溶洞 (样品编号 H60),海拔约 3600 m; d—波密泉 (样品编号 BM),海拔约 3550 m; e—根久泉 (样品编号 GJ; 据马剑飞等, 2022a 修改),海拔约 3450 m; f—定曲泉 (样品编号 LB),海拔约 3670 m

图 3 研究区不同高程的岩溶地貌

Fig. 3 Karst landforms at different elevations in the study area

(a) The first-elevation-level krast (Krast cave at 5000 m);
(b) The second-elevation-level (Krast cave at 4050 m; Sample H19);
(c) The third-elevation-level (Krast cave at 3600 m; Sample H60);
(d) The Bomi Spring at 3550 m (Sample BM);
(e) The Genjiw Spring at 3450 m (Sample GJ; Modified from Ma et al., 2022b);
(f) The Dingqu Spring at 3670 m (Sample LB)

②岩溶地貌主要在断裂,特别是活动断裂附近发育;③受地壳隆升影响,岩溶分多个期次发育, 在垂向上呈现多级别分布的格局。

区内岩溶地貌空间分布不均。经调查统计发现,垂向上主要在3个高程级次发育较好。一级岩

溶发育区海拔4900~5300 m、二级岩溶发育区海拔4000~4300 m, 三级岩溶发育区海拔3400~3600 m (图 3a—3c)。除此高程之外,也有岩溶洞穴发育,但规模和数量都较小。这一规律与李向全等(2021)总结的格聂山地区岩溶发育规律相近。平面上,岩

区内大部分溶洞干涸或有少量地下水渗出。 部分洞内有少量次生方解石以穴珠形态沉积。分 别在二级和三级岩溶顶部的洞穴中采集了次生方 解石(采样位置见图1,H19、H60,采样点照片 见图3b和3c),利用U/Th同位素测试其年龄分别 为36737±11667 a BP和14298±903 a BP(表1)。 由于穴珠的形成需要有广阔平坦的洞底和浅积水 的环境(Donahue,1965),还需要间歇性的流水 和流水带来的外来物质以提供穴珠生长的"碎屑 核心"(翁金桃和茹锦文,1982),一般代表洞穴 的成年期。而后随着地壳抬升和河谷下切,排泄 基准面下降,溶洞干涸、岩溶不再发育。因此可 认为采集穴珠测得的年龄为所在溶洞的岩溶发育 末期。

表 1 不同高程次生方解石的²³⁰Th 年龄

Table 1 230 Th age of secondary calcite at different elevations

样品编号	高程/m	²³⁰ Th 年龄/a BP
H19	4050	36737±11667
H60	3600	14298 ± 903

表 2 水化学和同位素测试结果

Table 2 Test results of hydrochemical components and isotopes

李向全等(2021)提出青藏高原东部二、三 级岩溶发育期分别为中新世晚期至上新世和上新 世至更新世。结合此次测年结果,可以得出研究 区第二级岩溶于中新世晚期开始发育,至更新世 晚期干涸并停止发育;第三级岩溶顶部自上新世 开始发育,至更新世晚期干涸停止发育。

4 岩溶水循环特征

4.1 岩溶水补给来源

泉水、河水、湖水和大气降水(雨水和积雪) 的水化学指标统计数据见表 2。泉水和河水的总溶 解性固体物质(Total Dissolved Solids, TDS)值分 别为 90.00~207.00 mg/L和 52.00~251.00 mg/L, 平均值分别为 162.50 mg/L和 139.20 mg/L,二者 相差不大,但都大于湖水和大气降水。大气降水、 泉水和湖水中主要阴离子为 HCO₃。河水中主要的 阴离子除 HCO₃分,还有 SO₄²⁻(图 4)。Ma et al. (2022b)分析认为河水中的 SO₄²⁻和 Cl⁻主要来源 于畜牧业和人类生活用水影响。上述离子特征一 方面显示了泉水和河水处于水循环末端的特征, 另一方面表明地下水和河水之间的相互关系,更 有可能是地下水补给河水而非河水补给地下水。

		-		1		1							
水体 类型	数据项/ 样品编号*	水化学指标						同位素指标					
		TDS	Ca ²⁺	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Cl	SO_{4}^{2-}	HCO ₃	-11	$\delta \mathrm{D}$	δ^{18} O	Т
					/mg	• L ⁻¹				рп	/‰	/%0	TU
岩溶泉	最大值	207.00	54.83	10.86	0.91	5.75	0.30	9.15	223.50	7.89	-142.00	-18.90	4.70
	最小值	90.00	22.06	7.44	0.16	0.25	0.17	1.35	102.80	7.71	-146.00	-19.50	4.20
	平均值	162.50	42.67	9.66	0.58	3.31	0.22	6.91	175.85	7.82	-143.25	-19.08	4.40
	变异系数	0.31	0.33	0.16	0.54	0.69	0.32	0.54	0.29	0.01	-0.01	-0.02	0.06
河水	最大值	251.00	68.62	11.83	1.50	3.35	1.05	91.31	138.90	8.16	-135.00	-17.90	7.00
	最小值	52.00	10.65	0.84	0.58	1.61	<0.1	7.58	36.28	7.68	-142.00	-18.80	4.30
	平均值	139.20	35.18	5.52	0.89	2.17	_	42.21	84.75	7.89	-138.80	-18.34	5.56
	变异系数	0.67	0.73	0.83	0.41	0.31	_	0.94	0.57	0.02	-0.02	-0.02	0.23
湖水	Lake-1	69.00	18.39	2.83	0.51	0.97	0.10	6.08	66.45	7.35	-127.00	-16.60	8.10
	Lake-2	9.00	1.37	0.10	0.08	0.25	0.15	< 0.20	12.08	7.44			
降雨	4月降雨	9.00	1.31	0.18	0.17	0.33	0.21	0.30	12.08	7.70	-79.00	-10.00	10.00
	9月降雨	15.00	1.79	0.22	0.08	0.33	1.40	2.00	12.02	6.74			
积雪	积雪	10.00	2.11	0.05	0.08	0.09	0.35	1.50	11.42	7.38	-177.00	-24.10	7.20

"*" 该列中岩溶泉和河水列出的为数据的统计值;湖水、降雨和积雪列出的为采样编号,其所在行的数据是样品的测试值

大气降水稳定同位素具有随海拔升高而下降的特征 (Clark and Fritz, 1997),降水入渗至地下水排泄的 过程中则基本保持稳定。因而可利用大气降水稳定同 位素 的 高 程 效 应 间 接 确 定 地 下 水 补 给 区 范 围 (Tesfaldet et al., 2020)。受降水水汽来源、水汽组成

和大气环流等因素的影响,不同地区降水同位素和海拔的关系略有差异。由于研究区尚未开展大气降水的高程效应研究,因而此次将岩溶泉的稳定同位素代入与研究区相近地区的大气降水同位素与海拔的关系式,来计算岩溶泉的补给高程(表3)。



图 4 水化学 Durov 图

Fig. 4 Durov diagram of hydrochemistry

表 3 岩溶泉补给高程计算值

Table 3 Calculated values of the karst water recharge elevation

岩溶泉编号 -	补给高程 h/m							
	δ^{18} 0 = -0.0028 <i>h</i> - 3.93 ^①	δ^{18} 0 = -0.0033 <i>h</i> -4.29 ^②	$\delta^{18}0 = -0.0023h - 10.011^{3}$	$\delta D = -0.0195h - 67.813^{(3)}$	δ^{18} O = -0. 0018h-6. 86 ⁽⁴⁾			
GJ	5346	4427	3865	3804	6689			
LB	5561	4609	4126	4010	7022			
JT	5382	4458	3908	3856	6744			
BM	5346	4427	3865	3804	6689			

注:①引自李维杰等,2018;来自川东、渝、滇、黔等四地监测数据;②引自姚檀栋等,2009;以青海、西藏监测台站为主;③引自张磊等,2021;来自道 孚-康定-石棉-西昌数据;④引自于津生等,1980;来自渝、黔、川、藏东等地数据

根据于津生等(1980)和李维杰等(2018) 提出的关系公式计算出LB、BM、JT和GJ4个岩 溶泉的补给高程均高于5300m。而研究区绝大部 分地区海拔低于5200m,因而这两列计算的结果 在研究区不适用。根据姚檀栋等(2009)的计算 公式,补给高程在4400~4650m之间,为冰川湖 泊分布区;按照张磊等(2021)的计算方法,补 给区高程在3800~4150m之间,这一海拔高程为 陡峭的山体、定曲上游及其支流。从空间上看,以 上两组计算结果是合理的,即大气降水、冰川湖水 和河水都可能是岩溶水的补给源。根据水化学特征, 研究区河水对岩溶地下水的补给可能性较小。综上 可知,区内岩溶水的补给来源主要是位于海拔 4400~4650m之间的大气降水和冰川湖水。

利用水中的 Ra 同位素,进一步分析补给来源的可能性。

岩溶泉²²⁶Ra的活度为 6.27±1.07~8.75±1.06 dpm/100 L, 与冰湖水 3.95±0.78~9.57±1.11 dpm/100 L相近,远低于定曲河水的 14.95±1.16 dpm/100 L。分水岭外冰湖 Lake-2 的²²⁸ Ra 活度为 29.42±2.70 dpm/100 L,明显高于其余样品的 4.28±1.91~13.56±2.13 dpm/100 L。一般来讲, 随着水体盐度的升高,水中碱土金属离子会对 Ra 产生竞争吸附作用,导致 Ra 发生解析,以溶解态 Ra²⁺的形式进入水体。因此除 Lake-2 以外的水 中²²⁶ Ra 和²²⁸ Ra 的活度均表现出随盐度增加的趋势 (图 5a、5b)。

河水的²²⁶Ra 高于其他样品,而²²⁸Ra 与除 Lake-2外的样品相差不多。表明在河水中,²²⁶Ra 有 明显的累积现象。这是由于²²⁶Ra 半衰期长(1600 a), 不会如²²⁸Ra(半衰期 5.75 a)易发生衰减(孔凡 翠等,2021)。也表明镭同位素具有"Lake-1→泉 水→河水"的"传递"过程。

Lake-2 的²²⁶ Ra 和²²⁸ Ra 活度分别是 Lake-1 的 2.42 倍和 5.58 倍。因两个水样的盐度相差不大, 可排除 Ra 同位素吸附/解吸差异的影响。这种现 象应是由于²²⁸ Ra 的半衰期较短所致。这说明 Lake-2 的滞留时间短于 Lake-1,即两个冰川湖泊水的来源



a-盐度/²²⁶Ra; b-盐度/²²⁸Ra; c-²²⁸Ra/²²⁶Ra

图 5 水样²²⁶Ra 和²²⁸Ra 与盐度的关系及²²⁶Ra 与²²⁸Ra 的关系图

Fig. 5 226 Ra and 228 Ra vesus salinity and 226 Ra vesus 228 Ra (a) Salinity vesus 226 Ra; (b) Salinity vesus 228 Ra; (c) 228 Ra vesus 226 Ra

不完全相同。Lake-1 中冰川融水、积雪融水等 "老水"比例大, Lake-2 的补给源更多是来自于现 代大气降水。

当水体来源相同或具有上下游关系时,²²⁶Ra 和²²⁸Ra 活度的比值相近。已有多项研究得出,²²⁶Ra 与²²⁸Ra 的关系显示出很好的线性回归关系 (Young

表 4 研究区主要水体²²⁶Ra和²²⁸Ra活度

Table 4 226 Ra and 228 Ra activity in the water samples from the study area

水样	²²⁶ Ra 活度/	²²⁸ Ra 活度/	²²⁸ Ra/ ²²⁶ Ra
编号	dpm • 100 L ⁻¹	dpm • 100 L ⁻¹	
GJ	6.27±1.07	7.18±2.38	0.91
BM	8.75±1.06	7.00 ± 1.97	3.07
LB	7.56 ± 0.98	4.28±1.91	0.80
Lake-1	3.95 ± 0.78	5.27±1.97	0.57
Lake-2	9.57±1.11	29.42±2.70	1.34
定曲-2	14.95±1.16	13.56±2.13	1.14

et al., 2008; Luo et al., 2017, 2018; Liao et al., 2020)。从图 5c 可以看出,除 Lake-2 外,其余点都位于 1:1线附近,表明其来源具有相似性。对所有点(图 5c 红线)和去除 Lake-2 的点(图 5c 绿线)进行线形拟合,得出的线形关系分别为:

²²⁶ Ra = 0. 1675²²⁸ Ra+6. 6460, $R^2 = 0.1837$ (1)

²²⁶ Ra = 1. 0084²²⁸ Ra+0. 7748, $R^2 = 0.7821$ (2)

可以看出,当增加了 Lake-2 后, R² 值从 0.7821 降到了 0.1837, 拟合关系差, Lake-2 表现 出于其他样品的非同源关系。这说明 Lake-2 并非 区内岩溶泉的主要补给来源,由此判定非定曲断 裂影响带范围内的冰川湖泊,无法产生跨断裂影 响范围的补给。

4.2 岩溶水径流过程

岩溶水径流过程中,主要化学组分受岩石风 化溶滤作用和阳离子交换作用控制(图6)。但各 种水体之间的离子浓度差别并不明显。在岩溶区 出现这种现象,可能有如下原因,一是气候环境 不利于发生水岩作用,溶蚀能力差,二是地下水 径流速度快导致"来不及"与含水介质发生反应。

将研究区内岩溶泉与同属青藏高原东部的其 他岩溶大泉的水化学特征进行对比。位于康定北 部的清泉村泉和白玉县南部的火龙泉径流速度较 快,循环时间短,循环深度浅(马剑飞等,2022b; Ma et al.,2022a);位于察雅县东部的娘曲泉当中 包含深循环岩溶水,循环时间长(张春潮等, 2021)。研究区内的岩溶泉与清泉村泉和火龙泉的 水化学特征相似,与娘曲泉的TDS值和阴离子特 征有明显区别(图4)。这说明研究区内岩溶泉径 流速度快、径流深度浅、地下水径流速度快,导 致水岩作用不强烈(徐一萍等,2020)。

利用氚值(T)和⁸⁵Kr 来分析岩溶水的更新能力。随着水样 TDS 值的增加, 氚值有逐渐减小的 趋势(图 7a)。这说明水的年龄越大, 在循环过程



a $(Ca^{2*}/Na^{*}) / (HCO_{3}^{-}/Na^{*}); b (Na^{*}+K^{*}-Cl^{-}) / (Ca^{2*}+Mg^{2*}-HCO_{3}^{-}-SO_{4}^{2-})$

图 6 研究区水体中离子关系图

Fig. 6 The relationship between ions in the water from the study area

中产生的反应越多。作为补给源的降水、湖水的 氚值大于岩溶泉。所有岩溶泉的氚值都位于 4.2~ 4.7 TU 之间,说明地下水的平均年龄在 5~20 a 之 间(马剑飞等,2022b)。利用⁸⁵Kr 同位素测年法, 使用最新的北半球大气⁸⁵Kr 基线进行矫正 (Bollhöfer et al., 2019; Gao et al., 2021),得出根 久泉(GJ)和定曲泉(LB)两个岩溶泉的年龄分 别为 13.8±0.5 a 和<4.0 a,说明岩溶水径流速度 快,更新能力强。

根据 Loosli et al. (2000) 建议的方法,通过比较 氟和⁸⁵Kr 测量值,获得了对年轻水和老水混合比例的半定量方法(图 7b)。可以看出,GJ和 LB两 点均远离 99% 比例的混合线,即两个岩溶泉的组成几乎都是年龄较小的地下水。

4.3 岩溶泉流量特征

利用"流速-断面"法对研究区内主要岩溶泉 进行多次测流。除 2022 年 5 月测流前存在连续降 雨以外,其余测流日期前均无明显降雨。由图 8 可 以看出,连续降雨对所有岩溶泉都有影响。其余 日期,BM(波密泉)和JT(经筒泉)的波动幅度



a一水样 TDS 与氚值(T)关系; b—岩溶泉⁸⁵Kr 活度与氚值(T) 关系(图中虚线表示根据基于延迟输入函数的活塞流模型计算出 的过去几十年的混合分数,实线表示年轻水占 50% 和 99% 时的模 型计算值; Avrahamov et al., 2018)

图 7 水样 T 值与 TDS 和85 Kr 关系图

Fig. 7 T value vesus TDS value and ⁸⁵Kr value in the water sample (a) TDS value vesus T value in the water sample; (b) ⁸⁵Kr value vesus T value in the karst springs

The dashed lines are mixing lines between an old, T and ⁸⁵Kr free component and groundwater of different ages. The solid lines are the calculated values by the model when the young water accounts for 50% and 99% based on Avrahamov et al., 2018.

略大于样品 GJ (根久泉) 和 LB (定曲泉)。不同 泉的流量波动规律也存在差异,说明地下水径流 通道存在差异,但总体来说所测量的 4 处岩溶泉流 量基流量都较为稳定,同时对大气降水都有较为 快速的响应。这说明岩溶水的基流量是由较大范 围补给和长距离的径流支撑的,同时有现代大气 降水补充 (Gautam et al., 2022)。

岩溶泉流量在 2022 年 5 月出现陡增,这部分 陡增水量对降水的响应时间短,各泉的响应时间 较一致。说明岩溶泉流量当中有一部分是现代大 气降水补给,径流距离短、径流速度快。通过对 研究区 3 个岩溶发育高程级别的地形地貌条件分析,认为现代降雨补给位于地形坡度较为平缓的 海拔 3400~3600 m 的第三级岩溶发育区。岩溶泉 也主要出露于第三级岩溶发育区,地下水接受补 给后快速径流并排泄,从而形成了对大气降水的 快速响应。



图 8 研究区主要岩溶泉多期流量 (GJ、BM 部分数据 源自 Ma et al., 2022b)

Fig. 8 Multi-flow of main karst springs in the study area (Parts of GJ, BM data are from Ma et al., 2022b)

4.4 岩溶水循环过程

研究区岩溶水循环主要受定曲断裂及其分支 断裂控制。岩溶地下水接受大气降水和冰湖水入 渗补给,补给区海拔4400~4600 m。非定曲断裂控 制范围内的大气降水和地表水体(河水、湖水、积 雪、冰川等)难以形成跨流域单元补给。地下水主 要沿定曲断裂自北向南径流。海拔3400~3600 m 的 第三级岩溶发育区,受地势较为平坦的影响,也 存在现代大气降水的补给。在径流过程中受到定 曲断裂各级分支断裂影响,形成多个岩溶排泄点。 排泄区和补给区之间的高差为1000~1400 m,因而 岩溶水具有较强的水动力条件,流速较快。岩溶 水年龄不大于15 a,且此次未发现有滞留的老岩溶 水,含水层更新能力强。岩溶水径流过程中与含 水介质的相互作用以溶蚀和阳离子交换作用为主, 由于径流速度快,水岩作用普遍不强。

5 岩溶水循环特征与工程影响分析

将研究区岩溶泉和已有研究揭示的青藏高原 东部部分岩溶泉的循环特征进行对比分析,初步 总结出青藏高原东部岩溶水循环特征及其对工程 的影响。

(1) 岩溶水的补径排均受断裂控制,特别是 受活动断裂控制。地下水单元位于活动断裂及其 分支断裂控制带内,一般不会产生跨活动断裂控 制范围的补给和径流。

在工程水量预测时,应充分考虑断裂,特别 是活动断裂的分布,来划分地下水单元和计算 单元。

(2)活动断裂可沟通多个高程级次的岩溶区段(李向全等,2021),多在垂向上形成总高差大于1000m的径流通道。因此,在设计和施工时,应充分考虑高水头的影响,适当提高水压挡、排措施标准。

(3)地下水径流方向受断裂控制,可以随断裂展布方向产生大角度变向。在施工过程中应加强超前预报,密切关注岩溶水径流异常情况。

(4)冰川湖泊、河流等地表水是岩溶大泉的 重要补给源,对流量的持续支撑十分重要。可通 过加强对流域周边重点地表水体的监测,预判地 下水循环异变,开展灾害预警。

(5)地下水大多流速快,更新能力强。在地 热异常区,受导水导热深大断裂影响,也存在深 循环的岩溶地下热水。深循环水与其他岩溶水具 有明显的水化学特征差异。因而可重点关注 TDS、 硫酸根离子、水温等特征指标,判断工程、特别 是地下工程所处地下水循环的位置,针对性开展 预防措施。

(6) 岩溶大泉的基流量稳定,部分大泉存在 快速响应大气降水而产生流量剧烈波动的现象。 对位于地下水集中排泄区的工程,在基流量的基 础上,应充分考虑降雨对地下水排泄量的影响, 提升防灾能力。在工人驻地、办公场地选址方面, 也应注意地下水量激增造成的地质灾害。

6 结论

文章通过岩溶调查、水化学和新型同位素分 析等手段,研究了金沙江断裂带中段岩溶发育和 地下水循环特征,并进行了工程影响分析。

(1)研究区岩溶发育受断裂控制的特征较为 明显。在定曲断裂控制范围内存在3个岩溶发育区 段,一级岩溶发育区海拔4900~5300 m,二级岩溶 发育区海拔4000~4300 m,三级岩溶发育区海拔 3400~3600 m。其中二级岩溶发育时间为晚中新世 至晚更新世;三级岩溶顶部岩溶发育时间为上新 世至晚更新世。

(2) 岩溶地下水的补给区位于海拔4400~ 4600 m的冰川湖泊分布区,主要补给源为大气降水和冰湖水。水体中镭同位素特征显示,非定曲断裂控制范围内水源难以形成跨流域单元补给。

(3) 岩溶水循环速度快,根久泉和定曲泉的⁸⁵Kr年龄分别为13.8±0.5 a 和<4.0 a,基本没有年龄较大的地下水混合。由于径流时间短,水岩作用以碳酸盐岩溶蚀和阳离子交换为主,且反应不充分。

(4)在工程当中,应充分考虑构造岩溶发育 的不均一性、高度的各向异性、活动断裂影响下 岩溶水径流通道分布、岩溶水的高水压影响和其 与特殊天气条件带来的地质灾害威胁,保障工程 安全和环境安全。

References

- AVRAHAMOV N, YECHIELI Y, PURTSCHERT R, et al., 2018. Characterization of a carbonate karstic aquifer flow system using multiple radioactive noble gases (³H-³He, ⁸⁵Kr, ³⁹Ar) and ¹⁴C as environmental tracers [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 242: 213-232.
- BOLLHÖFER A, SCHLOSSER C, SCHMID S, et al., 2019. Half a century of Krypton-85 activity concentration measured in air over Central Europe: Trends and relevance for dating young groundwater [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 205-206: 7-16.
- CLARK I D, FRITZ P, 1997. Environmental isotopes in hydrogeology [M]. Boca Raton: CRC Press.
- DONAHUE J, 1965. Laboratory growth of Pisolite grains [J]. Journal of Sedimentary Research, 35 (1): 251-256.
- FAN H B, ZHANG Y H, HE S Y, et al., 2018. Hazards and treatment of karst tunneling in Qinling-Daba mountainous area: overview and lessons learnt from Yichang-Wanzhou railway system [J]. Environmental Earth Sciences, 77 (19): 679.
- GAO C, LIU S Y, FENG J D, et al., 2021. Monitoring atmospheric ⁸⁵Kr by atom counting [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 233: 106604.
- GAO Q Z, CUI Z J, LIU G N, et al., 2000. The fission track ages of the cavernous recrystalline calcites in Tibet plateau and their geomorphologic significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 20 (3): 61-65. (in Chinese with English abstract)
- GAO Q Z, CUI Z J, TAO Z, et al., 2002. The nature, formation age and genetic environment of the Palaeokarst on the Qinghai-Xizang plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 57 (3): 267-274. (in Chinese with English abstract)
- GAUTAM V K, KOTHARI M, SINGH P K, et al., 2022. Analysis of

groundwater level trend in Jakham River Basin of Southern Rajasthan [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 10 (1): 1-9, doi: 10.19637/j. cnki. 2305-7068.2022.01.001.

- JIANG Z C, ZHANG J, HUANG C, et al., 2019. Causes of formation and geo-scientific significance of karst gorge group in Xiangxi geopark [J]. Carsologica Sinica, 38 (2): 269-275. (in Chinese with English abstract)
- KANG X B, YANG S F, GUAN Z D, et al., 2021. Distribution of soluble rock strata and development of karst landforms in the Batang area, west Sichuan plateau [J]. Carsologica Sinica, 40 (3): 381-388. (in Chinese with English abstract)
- KONG F C, YANG Y K, MA Y J, et al., 2021. The distribution and sources of radium isotopes in Da Qaidam Salt Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 33 (2): 632-646. (in Chinese with English abstract)
- LANG L, LIU J A, ZHONG Q Q, et al., 2020. Water mixing in the northern slope of the South China Sea as traced by ²²⁶Ra and ²²⁸Ra [J]. Marine Environmental Science, 39 (4): 511-521. (in Chinese with English abstract)
- LI C S, DING J F, LIAO Y K, et al., 2020. Experimental study on karst dissolution action mechanism under tunnel excavation condition [M] //LI C S, DING J F, LIAO Y K, et al. Groundwater chemical kinetics and fractal characteristics of karst tunnel. Singapore: Springer: 117-148.
- LI S C, WANG X T, XU Z H, et al., 2021. Numerical investigation of hydraulic tomography for mapping karst conduits and its connectivity [J]. Engineering Geology, 281: 105967.
- LI W J, WANG J L, WANG J L, 2018. 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, 27 (5): 1132-1142. (in Chinese with English abstract)
- LI X Q, MA J F, ZHANG C C, et al., 2021. Evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode in Mount Genie and Zaya sections along the Sichuan-Xizang railway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 48 (5): 34-45. (in Chinese with English abstract)
- LIAO F, WANG G C, YI L X, et al., 2020. Applying radium isotopes to estimate groundwater discharge into Poyang Lake, the largest freshwater lake in China [J]. Journal of Hydrology, 585: 124782.
- LOOSLI H H, LEHMANN B E, SMETHIE JR W M, 2000. Noble gas radioisotopes: ³⁷Ar, ⁸⁵Kr, ³⁹Ar, ⁸¹Kr [M] //COOK P G, HERCZEG A L. Environmental tracers in subsurface hydrology. Boston: Springer: 379-396.
- LU Y R, 1999. Study on the evolution of karst hydrogeological environment and its engineering effect [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LUO W Y, 2019. Characteristics of water-thermal hazard and hydrogeological route selection in typical sections of Sichuan-Tibet Railway [C] //Proceedings of Seminar on construction technology of Sichuan-Tibet Railway project. Xi'an: China Railway Society. (in Chinese with English abstract)

- 第6期
- LUO X, JIAO J J, WANG X S, et al., 2017. Groundwater discharge and hydrologic partition of the lakes in desert environment: Insights from stable ¹⁸ O/² H and radium isotopes [J]. Journal of Hydrology, 546: 189-203, doi: 10.1016/j. jhydrol. 2017.01.017.
- LUO X, JIAO J J, MOORE W S, et al., 2018. Significant chemical fluxes from natural terrestrial groundwater rival anthropogenic and fluvial input in a large-river deltaic estuary [J]. Water Research, 144: 603-615.
- MA J F, LI X Q, ZHANG C C, et al., 2022a. Recharge source, mode and development potential of typical tectonic karst groundwater in the eastern Qinghai-Xizang Plateau [J/OL]. Geology in China, (2022-08-22). https://kns. cnki. net/kcms/detail/11.1167. P. 20220822.1417.016. html. (in Chinese with English abstract)
- MA J F, FU C C, ZHANG C C, et al., 2022b. Plateau tectonic karst development characteristics and underground conduits identification in the northern part of Kangding [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 41 (1): 288-299. (in Chinese with English abstract)
- MA J F, LI X Q, LIU F, et al., 2022a. Application of hydrochemical and isotopic data to determine the origin and circulation conditions of karst groundwater in an alpine and gorge region in the Qinghai-Xizang Plateau: a case study of Genie Mountain [J]. Environmental Earth Sciences, 81 (10): 291, doi: 10.1007/s12665-022-10414-9.
- MA J F, LI X Q, ZHANG C C, et al., 2022b. Identification of origin and runoff of karst groundwater in the glacial lake area of the Jinsha River fault zone, China [J]. Scientific Reports, 12 (1): 14661.
- MU W P, 2018. Mechanism of water inrush on faults of coal seam floor and prediction of dewatering rate from karst aquifers in Beiyangzhuang mine [D]. Beijing: China University of Mining and Technology. (in Chinese with English abstract)
- QIN Y L, WU J L, ZHAN H Y, et al., 2021. Discussion on the correlation between active fault and geological disaster distribution in the Ganzi area, western Sichuan Province, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (3): 463-474. (in Chinese with English abstract)
- SHEN J F, SHI Y H, YU Q C, et al., 1991. On the formation condition and prediction-method of karst caves in carbonate rocks [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 16 (1): 61-70. (in Chinese with English abstract)
- SHI X D, KANG X B, XU M, et al., 2019. Hydrochemical characteristics and evolution laws of karst grounderwater in the slope zone of the canyon area, Sichuan-Yunnan Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 93 (11): 2975-2984. (in Chinese with English abstract)
- SICHUAN LOCAL CHRONICLES COMPILATION COMMITTEE, 1996. Annals of Sichuan province [M]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House: 127. (in Chinese)
- TESFALDET Y T, PUTTIWONGRAK A, ARPORNTHIP T, 2020. Spatial and temporal variation of groundwater recharge in shallow aquifer in the Thepkasattri of Phuket, Thailand [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 8 (1): 10-19.
- WANG D J. 2021. Development characteristics of plateau karst and

influences on the engineering in a tunnel area of southeast Tibet [J]. Tunnel Construction, 41 (6): 996-1006. (in Chinese with English abstract)

- WENG J T, RU J W, 1982. Cave pearls [J]. Carsologica Sinica, 1
 (1): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- XIA J W, ZHU M, 2020. Study on tectonic characteristics and activity of middle section of Jinshajiang Main Fault Zone [J]. Yangtze River, 51 (5): 131-137, 159. (in Chinese with English abstract)
- XU H H, HU B, LIU W L, et al., 2020. Study on karst water drainage path in plateau karst area [J]. Yangtze River, 51 (11): 128-133. (in Chinese with English abstract)
- XU Y P, XIANG X Q, YANG G L, 2020. Study on recharge, runoff and drainage of karst groundwater in Nanjiang Grand Canyon in Kaiyang [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 51 (2): 53-59. (in Chinese with English abstract)
- XUE Y G, KONG F M, LI S C, et al., 2021. Water and mud inrush hazard in underground engineering: genesis, evolution and prevention [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 114: 103987.
- YANG Z H, WU R A, GUO C B, et al., 2022. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the Western Sichuan [J]. Geology in China, 49 (2): 355-368. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z P, JIANG Y W, LI B, et al., 2020. Study on the mechanism of deep and large fracture propagation and transfixion in karst slope under the action of mining [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 459-470. (in Chinese with English abstract)
- YAO T D, ZHOU H, YANG X X, 2009. Indian monsoon influences altitude effect of δ¹⁸O in precipitation/river water on the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 54 (16): 2724-2731, doi: 10.1007/s11434-009-0497-4. (in Chinese with English abstract)
- YOUNG M B, GONNEEA M E, FONG D A, et al., 2008. Characterizing sources of groundwater to a tropical coastal lagoon in a karstic area using radium isotopes and water chemistry [J]. Marine Chemistry, 109 (3-4): 377-394.
- YU J S, ZHANG H B, YU F J, et al., 1980. Oxygen isotopic composition of meteoric water in the eastern part of Xizang [J]. Geochimica, 9 (2): 113-121. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C C, LI X Q, MA J F, et al., 2021. Formation model of geothermal water in Chaya of Tibet: perspective from hydrochemistry and stable isotopes [J]. Geoscience, 35 (1): 199-208. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG D, 1994. Distribution of Tibetan karren and their morphogenetic analysis [J]. Carsologica Sinica, 13 (3): 270-280.
- ZHANG D, SHI C X, 2002. CO₂ partial pressure, karst dissolution rate and karst micro-landforms on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 76 (4): 566-570. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L, GUO L S, LIU S W, et al., 2021. Characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes of hot springs in Xianshuihe-Anninghe fault zone, Sichuan Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 37 (2): 589-598. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG Y S, GUO C B, LI X Q, et al., 2021. Key problems on hydroengineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: current status and development direction [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 48 (5): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO T S, GAO R X, 1985. Concealed karst development in eastern part of lower Liaohe river plain, Liaoning Province, and its hydrogeological significance [J]. Carsologica Sinica, 4 (3): 257-266. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG L M, XU M, WU M L, et al., 2018. Development of deep karst under the coupling of multistage flow systems: a case of southern part of the Zhongliang Mountain anticline of the parallel barrier structure in Eastern Sichuan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 45 (1): 45-51. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 高全洲, 崔之久, 刘耕年, 等, 2000. 青藏高原洞穴次生方解石的裂 变径迹年代及地貌学意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 20 (3): 61-65.
- 高全洲, 崔之久, 陶贞, 等, 2002. 青藏高原古岩溶的性质、发育时 代和环境特征 [J]. 地理学报, 57 (3): 267-274.
- 蒋忠诚,张晶,黄超,等,2019. 湘西地质公园岩溶峡谷群成因及其 地学意义 [J]. 中国岩溶,38 (2):269-275.
- 康小兵,杨四福,管振德,等,2021.川西高原巴塘地区可溶岩地层 分布与岩溶地貌发育特征 [J].中国岩溶,40 (3):381-388.
- 孔凡翠,杨英魁,马玉军,等,2021.大柴旦盐湖中镭同位素分布特征来源及示踪意义 [J].湖泊科学,33 (2):632-646.
- 郎琳, 刘建安, 钟强强, 等, 2020.²²⁶ Ra 和²²⁸ Ra 对南海北部陆坡水 团的示踪作用 [J]. 海洋环境科学, 39 (4): 511-521.
- 李维杰,王建力,王家录,2018.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,27 (5):1132-1142.
- 李向全,马剑飞,张春潮,等,2021. 川藏铁路格聂山和察雅段构造 岩溶发育规律及岩溶地下水循环模式研究 [J].水文地质工程地 质,48 (5):34-45.
- 卢耀如,1999. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究 [M]. 北京:科学出版社.
- 罗文艺,2019. 川藏铁路水-热灾害特征及典型段落水文地质选线 探析 [C] //川藏铁路工程建造技术研讨会. 西安:中国铁道 学会.
- 马剑飞,李向全,张春潮,等,2022a. 青藏高原东部典型构造岩溶 地下水补给来源、模式及开发利用潜力 [J/OL]. 中国地质, (2022-08-22). https://kns. cnki. net/kcms/detail/11.1167. P. 20220822.1417.016. html.

马剑飞, 付昌昌, 张春潮, 等, 2022b. 康定北部高原构造岩溶发育

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID): 可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的 语音介绍及更多文章相关资讯 特征与地下水径流带识别 [J]. 地质科技通报, 41 (1): 288-299.

- 穆文平,2018. 北阳庄矿煤层底板断层突水机理与岩溶水疏降水量 预测 [D]. 北京:中国矿业大学(北京).
- 秦宇龙,吴建亮,詹涵钰,等,2021. 川西甘孜地区活动断裂与地质 灾害分布相关性探讨 [J]. 地质力学学报,27 (3):463-474.
- 沈继方,史毅虹,于青春,等,1991. 碳酸盐岩中岩溶洞穴的形成条件及预测方法初探 [J]. 地球科学——中国地质大学学报,16(1):61-70.
- 史箫笛,康小兵,许模,等,2019. 川滇高原斜坡地带峡谷区岩溶水 化学特征及演化规律 [J]. 地质学报,93 (11):2975-2984.
- 四川省地方志编纂委员会,1996.四川省志・地理志(上下册) [M].成都:成都地图出版社:127.
- 王杜江. 2021. 藏东南某隧址区高原型岩溶发育特征及工程影响[J]. 隧道建设, 41 (6): 996-1006.
- 翁金桃, 茹锦文, 1982. 穴珠 [J]. 中国岩溶, 1 (1): 58-65.
- 夏金梧,朱萌,2020. 金沙江主断裂带中段构造特征与活动性研究 [J]. 人民长江,51 (5):131-137,159.
- 许汉华,胡斌,刘文连,等,2020. 高原岩溶区岩溶水排泄路径研究 [J].人民长江,51 (11):128-133.
- 徐一萍,向喜琼,杨根兰,2020. 开阳南江大峡谷岩溶地下水补径 排研究 [J]. 水利水电技术,51 (2):53-59.
- 杨志华,吴瑞安,郭长宝,等,2022. 川西巴塘断裂带地质灾害效应 与典型滑坡发育特征 [J]. 中国地质,49 (2):355-368.
- 杨忠平,蒋源文,李滨,等,2020.采动作用下岩溶山体深大裂隙扩展贯通机理研究 [J].地质力学学报,26 (4):459-470.
- 姚檀栋,周行,杨晓新,2009.印度季风水汽对青藏高原降水和河 水中 δ¹⁸0 高程递减率的影响 [J].科学通报,54 (15): 2124-2130.
- 于津生,张鸿斌,虞福基,等,1980.西藏东部大气降水氧同位素组成特征 [J].地球化学,9 (2):113-121.
- 张春潮,李向全,马剑飞,等,2021. 基于水化学及稳定同位素的西藏察雅地下热水成因研究 [J]. 现代地质,35 (1):199-208.
- 章典,师长兴,2002. 青藏高原的大气 CO₂ 含量、岩溶溶蚀速率及 现代岩溶微地貌 [J]. 地质学报,76 (4):566-570.
- 张磊,郭丽爽,刘树文,等,2021.四川鲜水河-安宁河断裂带温泉 氢氧稳定同位素特征 [J]. 岩石学报,37 (2):589-598.
- 张永双,郭长宝,李向全,等,2021. 川藏铁路廊道关键水工环地质 问题:现状与发展方向 [J].水文地质工程地质,48 (5):1-12.
- 赵天石,高瑞袖,1985. 辽宁省下辽河平原东部隐伏岩溶发育规律 及水文地质意义 [J]. 中国岩溶,4 (3):257-266.
- 钟玲敏,许模,吴明亮,等,2018. 多级水流系统耦合下深部岩溶分 异研究:以川东隔挡式构造区中梁山背斜南段为例 [J].水文地 质工程地质,45 (1):45-51.



968