

doi: 10.12029/gc20220416004

马剑飞, 李向全, 张春潮, 付昌昌, 谢小国, 王晓刚, 李欣泽, 张登飞, 白占学, 王振兴. 2025. 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]. 中国地质, 52(1): 347–361.

Ma Jianfei, Li Xiangquan, Zhang Chunchao, Fu Changchang, Xie Xiaoguo, Wang Xiaogang, Li Xinze, Zhang Dengfei, Bai Zhanxue, Wang Zhenxing. 2025. Recharge sources, model and development potential of typical tectonic karst groundwater in the eastern Qinghai–Xizang Plateau[J]. Geology in China, 52(1): 347–361(in Chinese with English abstract).

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

马剑飞^{1,2}, 李向全^{1,2}, 张春潮^{1,2}, 付昌昌^{1,2}, 谢小国^{3,4}, 王晓刚⁵, 李欣泽^{3,4},
张登飞⁶, 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; 3. 四川省地质矿产勘查开发局水文地质工程地质中心, 四川 成都 610081; 4. 四川省华地建设工程有限公司, 四川 成都 610081; 5. 四川省核工业地质调查院, 四川 成都 610052; 6. 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:【研究目的】青藏高原东部分布多处构造岩溶发育区, 岩溶水文地质结构复杂, 补给来源多样、水量丰富。开展岩溶水补给源的分析研究, 总结高原构造岩溶循环规律, 对指导岩溶水资源开发利用、生态保护和防灾减灾具有重要意义。【研究方法】本文在现场调查、流量统测、水化学和稳定同位素分析的基础上, 分析了青藏高原东部典型岩溶区地下水补给来源, 探讨了补给来源和补给过程的影响因素, 构建了构造岩溶地下水补给模式, 并提出了开发利用建议。【研究结果】青藏高原东部典型岩溶大泉主要补给源是大气降水, 通过裂隙溶隙高位直接补给型、高位湖泊持续补给型、汇水洼地持续渗漏补给型、河水渗漏补给型等 4 种模式得到补给。【结论】存在补给模式差异的原因在于青藏高原东部长时期受内外动力耦合作用, 其中内动力控制因素包括岩溶形成演化历史、地质构造和岩性组合; 外动力控制因素主要包括气象、地形地貌和冰川运动。根据岩溶大泉水质和水量特征, 提出 3 种开发利用方式: 第一种为水质为 I~III 类水的岩溶泉, 可直接扩大开发利用程度; 第二种为微咸水, 可与其他水源混合后适当开发利用; 第三种为咸水, 可适当改造作为旅游开发使用。

关键词: 青藏高原东部; 构造岩溶; 地质安全风险调查评价; 地下水; 补给源; 补给模式; 岩溶水文地质; 开发利用; 水文地质调查工程

创新点: (1) 识别了青藏高原东部典型构造岩溶大泉的补给来源, 总结了岩溶水补给模式。(2) 揭示了影响岩溶水补给条件的内外动力因素。(3) 提出了 3 种岩溶水开发利用方式。

中图分类号: P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2025)01–0347–15

Recharge sources, model and development potential of typical tectonic karst groundwater in the eastern Qinghai–Xizang Plateau

MA Jianfei^{1,2}, LI Xiangquan^{1,2}, ZHANG Chunchao^{1,2}, FU Changchang^{1,2}, XIE Xiaoguo^{3,4},

收稿日期: 2022–04–16; 改回日期: 2022–06–02

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211374、DD20221812、DD20230537)和中国地质科学院基本科研业务费项目(SK202205)资助。

作者简介: 马剑飞, 男, 1987 年生, 副研究员, 主要从事水文地质工程地质方面的研究工作; E-mail: majianfei@mail.cgs.gov.cn。

WANG Xiaogang⁵, LI Xinze^{3,4}, ZHANG Dengfei⁶, BAI Zhanxue^{1,2}, WANG Zhenxing^{1,2}

(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. Chengdu Center of Hydrogeology and Engineering Geology, SBGEEMR, Chengdu 610081, Sichuan, China; 4. Sichuan Huadi Construction Engineering Co., Ltd, Chengdu 610081, Sichuan, China; 5. Sichuan Institute of Uranium Geological Survey, Chengdu 610052, Sichuan, China; 6. Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] There are many tectonic karst areas with complex karst hydrogeological structures, diverse recharge sources, and abundant groundwater in the eastern part of the Qinghai–Xizang Plateau. Analyses and research of the recharge sources and details about the controls on groundwater cycling in the tectonic karst on the plateau are important for guiding the development and utilization of karst water resources, protecting the ecology, and preventing and reducing disasters. **[Methods]** Using information from field investigations, flow measurements, hydrochemistry and stable isotope analysis, we analyzed the groundwater recharge sources in the karst areas in the eastern part of the Qinghai–Xizang Plateau, considered the factors that influenced the recharge sources and recharge progress, and made recommendations for the development and utilization of the groundwater. **[Results]** Atmospheric precipitation was the main recharge source of the main karst springs on the eastern Qinghai–Xizang Plateau. There were four main recharge modes, including direct recharge through high–level fissures, continuous recharge from high–level lakes, continuous seepage recharge in catchment depressions, and river seepage. **[Conclusions]** The different recharge modes in the eastern Qinghai–Xizang Plateau developed over sustained time periods because of the coupling of internal factors, such as the history of the karst formation and its evolution, the geological structure, and the lithologic combination, and external factors, such as the meteorology, the landforms, and glacier movements. From our analysis of the characteristics of the water quality and quantity of the karst springs, we developed three categories for the development and utilization of the groundwater resource, namely karst springs with water quality in classes I–III, the development and utilization of which can be expanded; brackish water, which can be developed and utilized after mixing with other water; and salt water, which can be transformed and used for developing tourism.

Key words: eastern Qinghai–Xizang Plateau; geological safety risk investigation and evaluation; tectonic karst; groundwater; recharge source; supply mode; karst hydrogeology; development and utilization; hydrogeological survey engineering

Highlights: (1) The recharge source of typical karst spring in the eastern Qinghai–Xizang Plateau is summarized and the recharge mode is established. (2) The internal and external dynamic factors affecting karst water recharge are revealed. (3) Three development and utilization methods of karst water are put forward.

About the first author: MA Jianfei, male, born in 1987, associate researcher, engaged in research on hydrogeology and engineering geology; E-mail: majianfei@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No. DD20211374, No. DD20221812, No. DD20230537), Chinese Academy of Geological Sciences (No. SK202205).

1 引 言

青藏高原东部是中国重要的生态和水源涵养区,生态环境脆弱。地下水,特别是岩溶地下水具有十分重要的生态和资源维持功能。该区已完成了1:50万(川西地区)至1:100万(西藏东部地区)精度的水文地质调查,对高原地区的岩溶规律建立了初步的认识,支撑了当地开发建设。近年来,随着经济社会的发展和“双碳”战略的实施,该区岩溶地下水的生态维持、资源供给功能重要性进

一步加强,水利、交通等大型工程建设和灾害防治中岩溶水害的影响程度也明显增加,对青藏高原岩溶水文地质特征和规律的认识提出了更高的要求。

在20世纪80年代至21世纪初,部分学者对青藏高原岩溶发育特征进行了研究,为高原岩溶发育特征和影响机理研究奠定了基础(崔之久,1979;崔之久等,1996a, b, 2001;高全洲等,2000, 2002;章典和师长兴,2002)。近五年来,青藏高原东部水文地质调查和研究程度明显加深。罗文艺(2019)、郭长宝等(2021)和张永双等(2021a)从工程水文地质

角度阐述了青藏高原东部岩溶地下水补给、径流和排泄基本特征。李向全等(2021)、康小兵等(2021)阐述了四川巴塘和西藏察雅地区岩溶地貌发育特征。王杜江(2021)、张春潮等(2021)、Ma et al.(2022)分别对西藏八宿县夏里乡、西藏察雅县王卡乡和四川白玉县沙马乡的岩溶地下水补给、径流和排泄过程进行了研究。但总体来说,当前对青藏高原东部岩溶水文地质研究尚处于起步阶段,大多仍处于特定案例分析验证阶段。由于案例较少,对整体规律的总结较为缺乏,需要总结各地区岩溶发育规律,分析岩溶水循环过程,揭示青藏高原岩溶区岩溶水文地质特征,并指导水资源的进一步开发利用。

岩溶水的补给是维持岩溶水流系统运动的能量和物质基础。本文在重点区野外水文地质调查、地下水监测统测、水化学与同位素分析的基础上,分析青藏高原东部典型岩溶区地下水补给来源,计算各补给来源的贡献率,探讨了补给来源和补给模式的影响因素,构建构造岩溶地下水补给模式,为

青藏高原水资源开发利用、生态保护和防灾减灾提供科学依据。

2 岩溶水文地质条件

2.1 碳酸盐岩地层与分布

青藏高原东部碳酸盐岩分布较为广泛,大体可以分为七个区。自东向西分别为:天全—宝兴(I)、康定(II)、巴塘—白玉(III)、贡觉(IV)、察雅(V)、夏里(VI)和波密(VII)(图 1)。自震旦系至古近系都有可溶岩发育,其中以泥盆系、三叠系、二叠系和志留系分布最为广泛。主要岩性为灰岩、白云质灰岩、生物碎屑灰岩、白云岩、大理岩等。各区段所处板块、沉积历史和沉积环境不同,岩性组合和地层较为复杂(表 1)。

2.2 岩溶发育规律

青藏高原东部是板块碰撞和构造活跃的地形急变地区,地形高差显著、构造活动强烈、气候敏感多变,水文地质结构极为复杂,岩溶地貌、岩溶发育

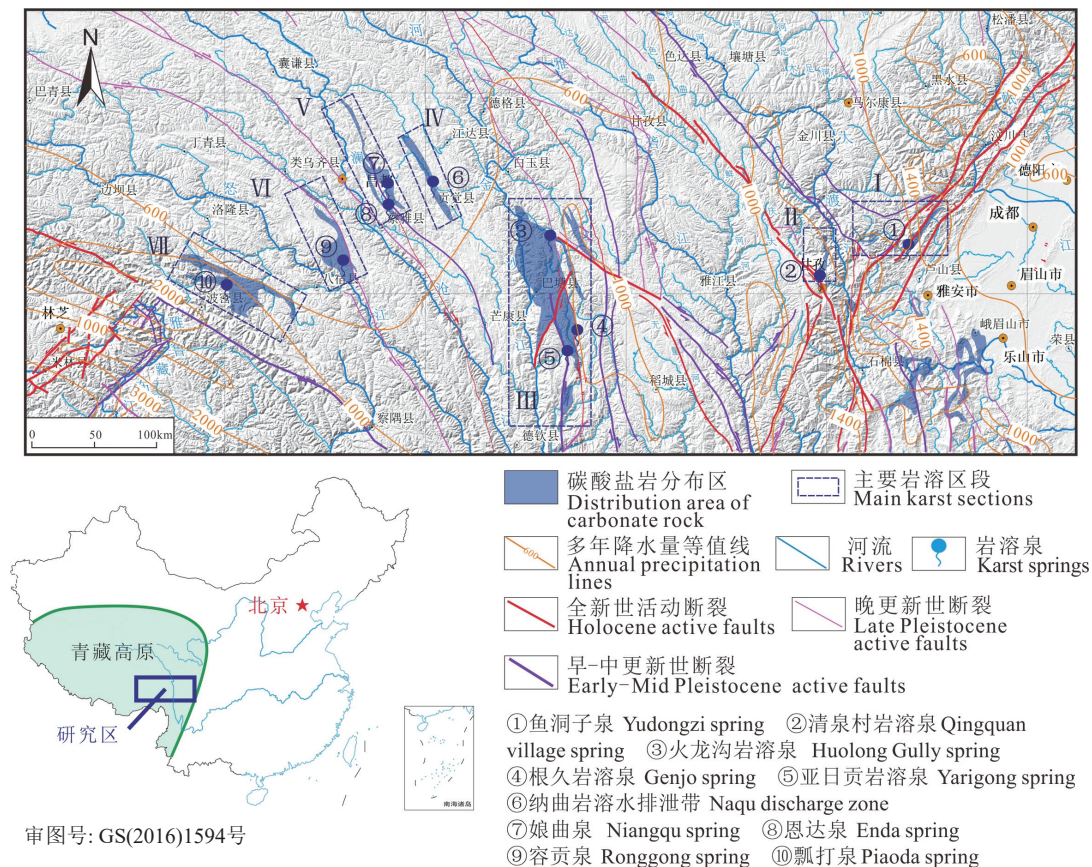


图 1 青藏高原东部构造岩溶分布图
Fig.1 Distribution map of tectonic karst in eastern Qinghai-Xizang Plateau

表 1 青藏高原东部主要碳酸盐岩地层

Table 1 Main carbonate strata in the eastern Qinghai-Xizang Plateau

区段	主要地质年代	主要碳酸盐岩地层
天全—宝兴 (I)	P、K	栖霞组 (P _{1q})、茅口组 (P _{1m})、大溪砾岩 (K _{2E1d})、夹关组 (K _{2j})
康定 (II)	Z、S、D	水晶组 (Z _{2s})、宝塔组 (O _{3b})、大箐组 (OS _d)、石牛栏组 (S _{1s})、通化组 (St)、捧达组 (D _{1-2pd})、养马坝组 (D _{2y})、观雾山组 (D _{2gw})、河心组 (D _{2-3h})、雪宝顶组 (DC _x)
巴塘—白玉 (III)	C、S、D、P	小坝冲组 (C _{1-2xb})、额顶组 (C _{3e})、物洛吃普组 (O _{2-3w})、格扎底组 (S _{1g})、散贡组 (S _{2-3s})、雍忍组 (S _{4y})、格绒组 (D _{1g})、穷错组 (D _{2q})、苍纳组 (D _{2c})、塔利坡组 (D _{3t})、赤丹潭组 (P _{3c})
贡觉 (IV)	D、P、T	丁宗龙组 (D _{2d})、卓戈洞组 (D _{3z})、交嘎组 (P _{2j})、波里拉组 (T _{3b})
察雅 (V)	D、T	卓戈洞组 (D _{3z})、波里拉组 (T _{3b})
夏里 (VI)	T、J	东达村组 (T _{3ddc})、古竹同组 (T _{3gz})、桑卡拉雍组 (J _{2s})、甲丕拉组 (T _{2j})、波里拉组 (T _{3b})
波密 (VII)	Pt、D、C	唐古拉岩群 (Pt _{2-3Nq})、松宗组 (D _{2-3s})、诺错组 (C _{1n})

规律和岩溶水补给、径流和排泄特征与中国北方岩溶和南方岩溶存在明显差异(崔之久, 1979; 王富葆, 1991; 蒋忠诚等, 2011; 许模等, 2020)。主要表现在以下三个方面:

首先, 青藏高原岩溶自新生代以来经历了多期发育过程(崔之久等, 1996a; 高全洲等, 2002), 在垂向上展现出以夷平面、谷肩和现代河谷三个层次的分带性(康小兵等, 2021; 王杜江等, 2021), 呈现出溶孔、溶隙、溶洞、天生桥、落水洞、峰丛等多种岩溶地貌类型(高全洲等, 2000)。伴随着地壳抬升和气候由暖湿转为寒旱, 目前青藏高原东部整体溶蚀作用已逐渐减弱(崔之久等, 1996b; 章典和师长兴, 2002)。其次, 青藏高原东部岩溶受构造影响的特征明显。更新世以来, 岩溶仅主要在构造影响区内发育。活动断裂连通多个高程的岩溶发育带, 岩溶水从补给到排泄都与活动断裂紧密相关, 在区域上表现为活动断裂带富水性强的特点(李向全等, 2021)。最后, 受差异隆升和气候因素影响, 不同地区的岩溶水补径排呈现不同的特点。如康定北郊岩溶泉受大气降水和河水共同补给、快速循环并排泄(马剑飞等, 2022); 格聂山岩溶泉高位补给、快速循环(李向全等, 2021); 察雅娘曲地区岩溶水呈深循环特点, 水化学类型为 SO₄-Na 型, 水温 36℃(张春潮等, 2021)。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 研究方法

岩溶泉流量采用断面-流速法测定。测流设备

为 FP111 测流仪(GlobalWater, US), 设备流量测定范围 0.1~6.1 m/s, 精度为 0.03 m/s。

岩溶泉样品采集于 2020 年 4—5 月或 2021 年 4—5 月, 该时间段处于旱季的中后期。样品采集时, 使用多参数水质分析仪(Hanna Instruments, Italy)现场测试水体的温度、pH 值、电导率等参数。采集的样品进行全分析和 δD 与 δ¹⁸O 测试。用于阳离子分析的水样加入 HNO₃, 使 pH 值降到 2 以下, 其余样品不加保护液。所有样品不留空气, 用封口胶封闭送检。

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, δD 与 δ¹⁸O 测试在自然资源部地下水科学与工程实验室完成, 测试与分析方法见(Ma et al., 2022)。

3.2 数据来源

区域资料来源于 1:25 万~1:20 万区域地质调查成果和 1:50 万区域水文地质调查成果, 气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>), 地形数据来自于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)的公开数据。

4 岩溶泉补给源与补给方式

4.1 主要岩溶泉

研究区分布多处流量超过 100 L/s 的岩溶泉。这些岩溶泉代表着所处地区具有一定规模的岩溶水补给区和径流通道。比较典型的有位于天全—宝兴 (I) 的鱼洞子岩溶泉, 位于康定 (II) 的清泉村岩溶泉, 位于巴塘—白玉 (III) 的火龙沟岩溶泉、根

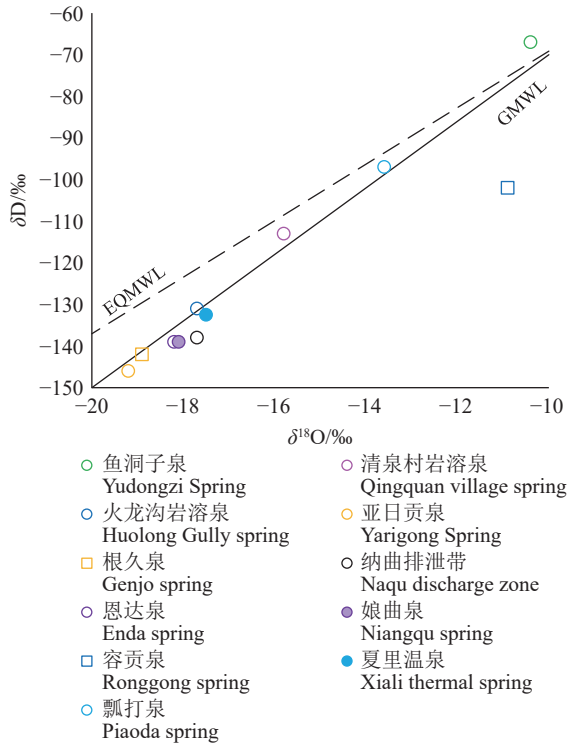


图 2 岩溶泉 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系(GMWL—全球大气降水线; EQMWL—青藏高原东部大气降水线, 引自李维杰等, 2018)
 Fig.2 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ (GMWL—Global Meteoric Water Line; EQMWL—Eastern Qinghai-Xizang Plateau Meteoric Water Line, after Li Weijie et al., 2018)

久岩溶泉、亚日贡岩溶泉, 位于贡觉(IV)的纳曲岩溶水排泄带, 位于察雅(V)的娘曲泉和恩达泉, 位于夏里(VI)的容贡泉和夏里温泉, 以及位于波密(VII)的瓢打泉(图 1)。

通过对岩溶泉 δD 与 $\delta^{18}O$ 关系分析(图 2)可以看出, 大部分岩溶泉都位于大气降水线附近, 即其主要来源是大气降水(Fu et al., 2018; Zhang et al,

2020, 2022; 张英等, 2024; 周殷竹等, 2024)。但大气降水在年内分配不均匀, 无法持续维持岩溶大泉。因此大气降水对岩溶水的补给是通过降雨、冰雪融水、河流溪沟、湖水等(蒋忠诚等, 2019; 张春潮等, 2021; 李向全等, 2021; 马剑飞等, 2022; Wang et al., 2024)具体形式来持续进行的。受地形地貌、地层岩性和构造影响, 以多种形式补给地下水。

4.2 鱼洞子泉

鱼洞子泉位于宝兴县五龙乡, 出露地层为下二叠统灰岩, 从两个泉口涌出, 2021 年 6 月实测流量 927 L/s。泉水水化学类型为 $HCO_3-Ca-Mg$ 型, TDS (总溶解固体) 值为 150 mg/L, 3H 含量为 13.8 TU, 说明岩溶水径流速率较快。据调查, 泉水主要来自于高山区的降雨入渗(图 3)。由于区内降水量较大(1000~1600 mm)、泉水集水范围大、松散层厚度大、植被发育好, 岩溶水能持续以较稳定的流量排泄(中国人民解放军〇〇九三一部队, 1980^①)。

4.3 清泉村岩溶泉

清泉村岩溶泉出露于康定市北部志留系通化组(*St*)。2021 年 5 月实测流量 168 L/s, 且流量动态较为稳定。泉水水化学类型为 HCO_3-Ca 型, TDS 值为 195 mg/L, 3H 含量为 6.8~7.1 TU, 说明泉水为现代水补给, 且径流时间短(邓争荣等, 2012; 赵良菊等, 2014)。

研究表明, 清泉村岩溶泉的补给主要有两种, 其一是海拔 3700~5000 m 高山区的冰雪融水和降雨, 沿可溶岩与非可溶岩接触带附近发育程度较强的垂向裂隙和溶隙补给; 其二是雅拉河河水通过雅拉河断裂(二者平行展布)侧向补给(图 4)(马剑飞等, 2022)。

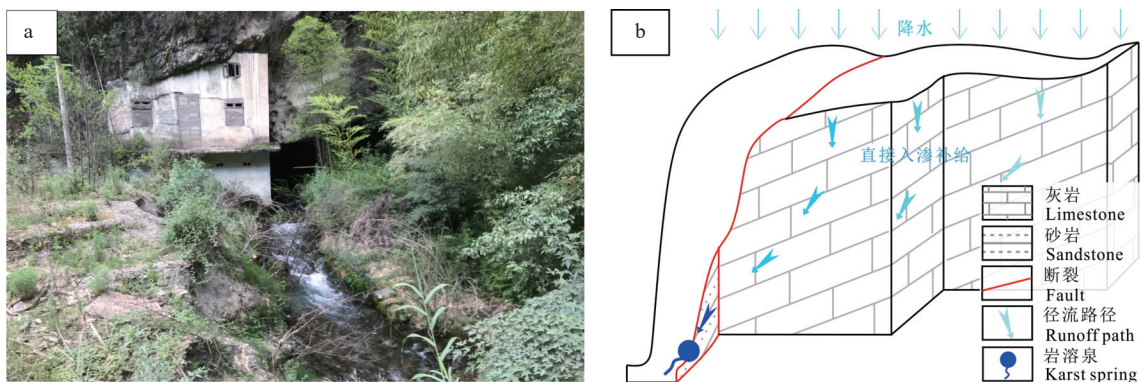


图 3 鱼洞子泉(a)及补给循环过程概化示意图(b)
 Fig.3 Yudongzi spring (a) and schematic diagram of supply process (b)

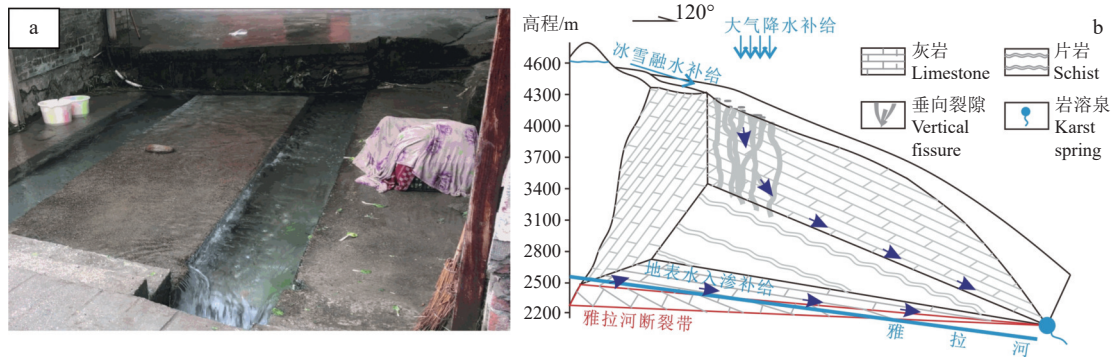


图4 清泉村岩溶泉(a)与补给循环过程概化示意图(b)(据马剑飞等, 2022 改)

Fig.4 Karst spring in Qingquan village (a) and schematic diagram of supply process (b) (modified from Ma Jianfei et al., 2022)

采用端元比例计算的方法,对清泉村岩溶泉补给来源占比进行简略计算。计算公式为:

$$\rho_0(I) = \sum_{i=1}^n P_i \times \rho_i(I) \quad (1)$$

式中 P_i 为水源所占比例,无量纲, $\sum_{i=1}^n P_i = 100\%$; $\rho_0(I)$ 和 $\rho_i(I)$ 为泉水和第 i 种补给来源中特征离子(或特征同位素) I 的浓度。

由于雅拉河河水补给来源主要为高山冰雪和冰川融水,难以利用水中稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 区分河水和冰雪融水,因而此处选用水中稳定离子 Cl^- 计算。通过计算,初步得出 2021 年 5 月雅拉河河水对清泉村岩溶泉的补给量占比约 78.4%(表 2)。说明雅拉河河水的侧向补给是清泉村岩溶泉的主要补给来源。

4.4 火龙沟岩溶泉—根久泉—亚日贡泉

火龙沟岩溶泉、根久泉和亚日贡泉均出露于巴塘—白玉岩溶发育段,该段碳酸盐岩地层分布广泛,岩溶发育和岩溶水补给、径流和排泄均主要受金沙江断裂带控制。三个岩溶泉的补给来源和补给过程具有显著相似性的同时也存在差异。

火龙沟岩溶泉出露于白玉县盖玉乡,出露地层为志留系雍忍组(S_{4Y})灰岩,以泉群形式出露,总流量约 1080 L/s(2020 年 7 月)。据已有研究计算(李向全等, 2021),火龙沟泉的冰雪融水补给占比为

83%,大气降水补给占比为 8%。

火龙沟岩溶泉的补给区位于海拔约 5000 m 的冰川台原区,发育大量沿断裂发育的冰川湖泊和落水洞、岩溶洼地等岩溶地貌。大气降水和冰雪融水一部分形成地表径流排泄,另一部分汇入冰川湖泊。部分湖水通过落水洞、垂直裂隙等渗漏补给地下水。在这个过程中,补给区广泛发育的冰碛物和湖泊起到了一定的调蓄作用,使岩溶水可以持续得到补给;活动断裂对岩溶发育程度、岩溶水补给条件和富集具有明显控制作用(图 5)。

根久泉和亚日贡泉出露于巴塘断裂以南,该段的断裂活动性强于火龙沟岩溶泉出露地区(夏金梧和朱萌, 2020; 杨志华等, 2022),岩溶水的补给来源和补给通道比火龙沟岩溶泉复杂(图 6)。其中根久泉出露于巴塘县波密乡,出露地层为泥盆系塔利坡组(D_3t)白云质灰岩,雨季流量 >300 L/s(2021 年 9 月),旱季流量 160 L/s(2021 年 4 月)。与火龙沟岩溶泉相似,根久泉主要接受大气降水和冰雪融水补给。该区亦分布大量沿斋如隆—乐玉共断裂及其主要分支断裂分布的冰川湖泊,多数湖水冬季结冰但不干涸,也可能是泉水的补给源之一。

以 2021 年 9 月采集的样品稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 为特征值,利用公式(1),计算了根久泉各补给来源的比例,得出冰湖补给占比超过一半(表 3),是泉水的主要来源。另外,与清泉村岩溶泉补给类型相似,定曲河水通过定曲河断裂侧向渗漏补给的可能性也存在,但目前尚无数据佐证。

亚日贡泉出露于下寒武统(C_1)灰质白云岩、大理岩,有两组主要排泄带,2021 年 6 月实测总流量约 390 L/s,2021 年 9 月约为 440 L/s,2021 年 11 月约为 206 L/s。水化学类型为 HCO_3^- -Ca-Mg 型,TDS

表 2 清泉村岩溶泉补给量计算

Table 2 Calculation of karst spring recharge in Qingquan village

计算端元	类型	$\rho(\text{Cl}^-)$ (mg/L)	计算结果
积雪	积雪	6.01	$P_{\text{积雪}}=21.6\%$
PM20	河水	1.05	$P_{\text{河水}}=78.4\%$
PM02	泉水	2.12	

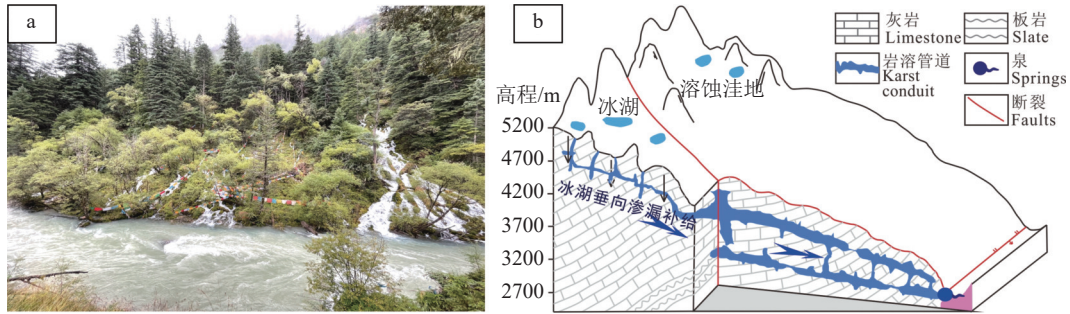


图 5 火龙沟岩溶泉(a)与补给循环过程概化示意图(b)(据李向全等, 2021 修改)

Fig.5 Huolonggou karst spring (a) and schematic diagram of supply process (b) (modified from Li Xiangquan et al., 2021)

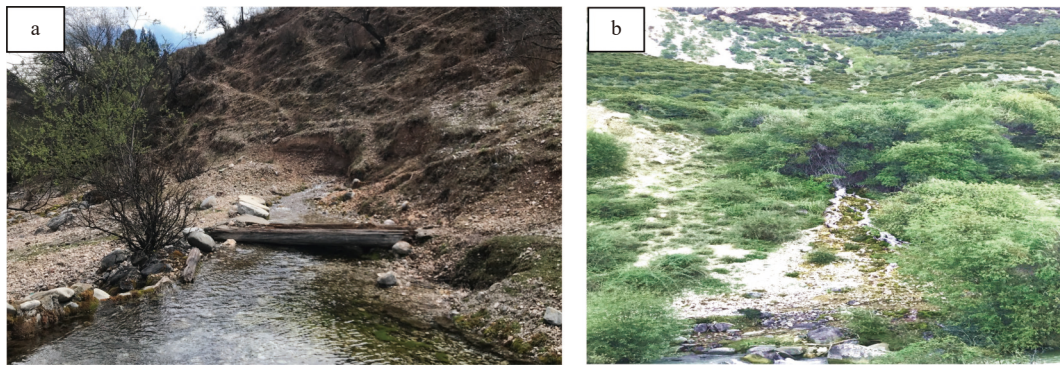


图 6 根久泉(a)与亚日贡泉(b)

Fig.6 Photograph of Genjiu karst spring (a) and Yarigong karst spring (b)

值为 177 mg/L, 岩溶水循环整体较快。泉水出露于斋如隆—乐玉共断裂形成的断层崖下方, 断层崖上方主要为中下寒武统砂岩、砂板岩等非可溶岩, 也无湖泊分布。从地质构造和地层空间展布分析, 该泉的补给源可能来自北部的冰川湖泊水垂向补给和东侧的定曲河河水侧向补给。该泉的成因尚需开展进一步研究。

4.5 娘曲泉—恩达泉

娘曲泉和恩达泉均位于澜沧江断裂带附近, 分属两个不同的岩溶含水层系统, 流量分别为 270 L/s 和 347 L/s。两个泉水均为 $SO_4-Ca \cdot Mg$ 型水, TDS 值分别为 2051 mg/L 和 2562 mg/L, 说明其均经过

了较长的循环过程。两个泉的补给来源均为冰雪融水、大气降水的垂向入渗补给和河水入渗补给。地表水入渗补给占比分别为 79%(娘曲泉)(张春潮等, 2021)和 70%(恩达泉)。

受澜沧江断裂带影响, 可溶岩以 NW-SE 向呈条带状展布; 主要河流(史曲和雅曲勇)的支流受澜沧江断裂分支断裂控制而呈 W-E 或 NE-SW 方向径流。当河水流经可溶岩条带, 会发生不同程度的垂向渗漏, 补给岩溶地下水(图 7)。

4.6 容贡泉

容贡泉出露于怒江构造混杂岩带内, 出露岩性为大理岩。2020 年 8 月实测泉水流量约 180 L/s, 2020 年 10 月流量 105 L/s。容贡泉水化学类型属 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型, TDS 值仅为 93 mg/L, 3H 含量 (8.0 ± 0.9 TU) 与该地降雪融水 (9.5 ± 0.9 TU) 相近, 说明泉水是近源补给, 且径流速度快, 时间短。该泉以西约 1000 m 处分布高原湖泊一处(达拖措), 面积约 2.86 km^2 。湖面整体位于怒江断裂带内的断层夹块中。湖水下渗后沿断裂径流, 并受断裂和不可溶岩阻水而出露成泉(图 8)。

表 3 根久岩溶泉补给来源占比计算

Table 3 Calculation of recharge source proportion of Genjiu karst spring

计算端元	类型	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	计算结果
YRA40	湖水	-127	-16.6	$P_{\text{湖水}}=56.0\%$
BTT42	泉水	-142	-18.9	
波密雪	积雪	-177	-24.1	$P_{\text{积雪}}=36.9\%$
巴塘雨水	雨水	-79	-10.1	$P_{\text{雨水}}=7.1\%$

4.7 夏里温泉

夏里温泉位于夏里岩溶段内,出露于娃拉拥南侧谷底桑卡拉雍组(J_2s)灰岩,旱季流量约 39.35 L/s。据已有研究(王杜江等, 2021),该泉补给高程约为 3750 m,该高程处于次级夷平面与第三级夷平面之间的剥蚀区,岩溶地貌分布广泛,利于降水和积雪融水渗漏补给(图 9)。其中积雪融水是主要补给来源。夏里温泉水化学类型为 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型,

2021年5月现场实测电导率为 360~455 $\mu S/cm$,水温为 31~32 $^{\circ}C$ 。说明夏里温泉的径流速度较快。

4.8 瓢打泉

瓢打泉位于大量冰川覆盖的波密岩溶段,出露地层为诺错组(C_1n)大理岩,2020年8月实测流量 272 L/s。与该区基岩地下水补给和径流过程相似,冰川融水和雨水通过沿大型沟谷发育的嘉黎—易贡断裂带分支断裂,以垂向渗漏补给为主(图 10)。

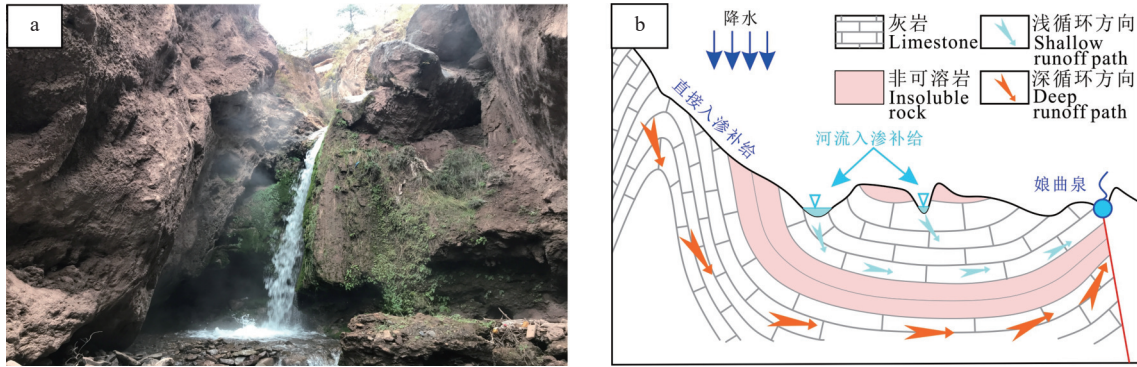


图7 娘曲泉(a)及补给循环过程概化示意图(b)(据张春潮等, 2021 修改)

Fig.7 Niangu karst spring (a) and schematic diagram of supply process (b) (modified from Zhang Chunchao et al., 2021)

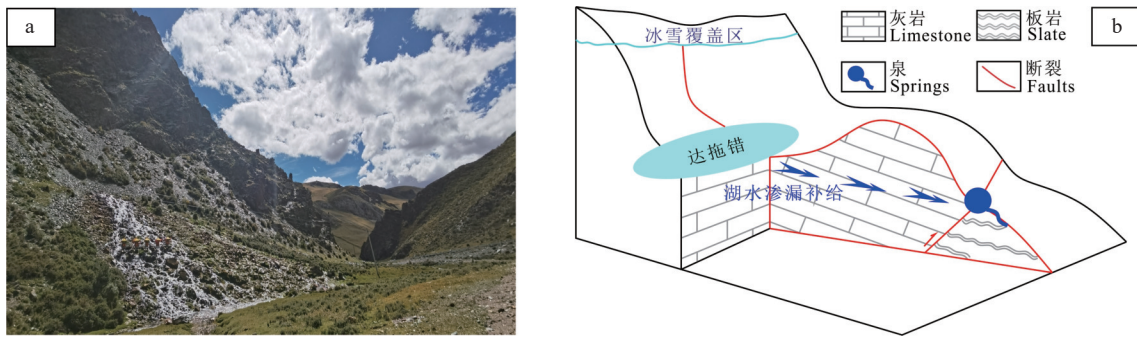


图8 容贡泉(a)及补给循环过程概化示意图(b)

Fig.8 Ronggong karst spring (a) and schematic diagram of supply process (b)

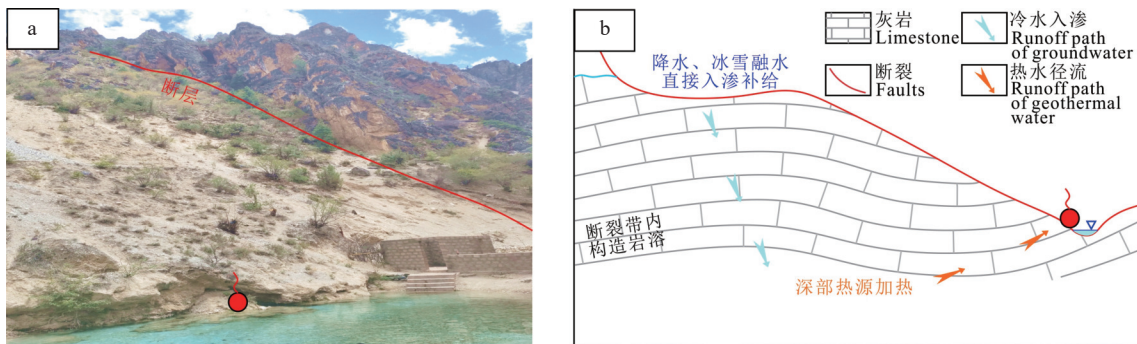


图9 夏里温泉(a)及补给循环过程概化示意图(b)

Fig.9 Xiali thermal spring (a) and schematic diagram of supply process (b)

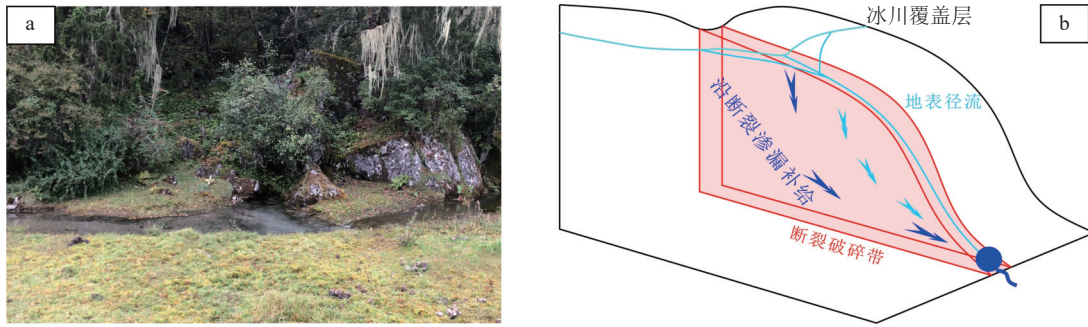


图 10 瓢打泉(a)及补给循环过程概化示意图(b)
Fig.10 Piaoda karst spring (a) and schematic diagram of supply process (b)

根据对该区其他相似地下水补给来源计算结果,冰川融水补给量 38.5%~58.3%(马剑飞等, 2021)。瓢打泉水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型, TDS 值为 660 mg/L, ^3H 含量 (7.8 ± 0.9 TU) 与该地降水的 ^3H 含量 (13.8 ± 1.0 TU) 和中深层地下水 ^3H 含量 (2.9 ± 0.7 TU)(马剑飞等, 2021) 都具有较为明显的差距。因此瓢打泉是浅层地下水和深层地下水混合后排泄。

5 岩溶水补给模式

5.1 岩溶水补给条件的控制因素

高山峡谷区岩溶一般分多个级次发育(崔之久, 1979; 高全洲等, 2002; 康小兵等, 2021)。现处于海拔 4500~4700 m 以上的岩溶地貌形成与中新世以前的热带、亚热带环境(Molnar et al., 1975; 李向全等, 2021), 岩溶发育程度较好。喜山期以来地层急剧抬升后, 又受到长期的冰川作用、冻融作用、风化剥蚀作用, 进一步加剧了裂隙的发育, 为地下水的补给创造了良好的空间条件。

5.1.1 岩溶形成演化历史

青藏高原东部不仅是新构造强烈活动带、高原差异隆升和深切峡谷分布区, 而且是气候变化的敏感区(张岳桥和李海龙, 2016; 潘桂棠等, 2019; 张永双等, 2021b)。强烈的内外动力耦合作用塑造了青藏高原东部岩溶发育受构造控制的典型特征, 也控制着岩溶地下水的补给过程。其中内动力控制因素主要包括板块运动控制的岩溶形成演化历史、地质构造和岩性组合; 外动力控制因素主要包括气象、地形地貌和冰川运动。

5.1.2 地质构造

地质构造是控制岩溶地下水补给的重要因素。复杂的构造, 特别是活动构造, 控制着青藏高

原东部可溶岩地层的展布、岩溶发育的程度和岩溶地下水的循环特征。复杂构造形成的地堑可以形成汇水盆地或高原湖泊, 成为地下水补给来源; 高海拔地表分水岭一带的溶蚀裂隙、落水洞等往往沿断裂发育; 沿构造发育的沟谷与可溶岩地层空间交汇时可以形成补给。

5.1.3 岩性

青藏高原东部可溶岩大多呈条带状分布, 即可溶岩条带两侧均为非可溶岩。在可溶岩与非可溶岩接触部位岩溶发育程度较强(Dausse et al., 2019; Zhao et al., 2022), 易接受补给。可溶岩矿物成分不同, 其溶解度会存在差别, 对补给有直接影响(中国人民解放军〇〇九三一部队, 1980^①), 会造成可溶岩条带内部接受补给能力的差异。

5.1.4 地形地貌

青藏高原东部高山峡谷地貌类型区, 山高谷深坡陡, 大气降水和冰雪融水多形成地表径流, 迅速排泄, 容易形成流量小而数量多的泉水(中国人民解放军〇〇九三一部队, 1980^①)。而夷平面、谷肩、盆地、台原等地区, 地形平缓, 利于形成区域岩溶地下水汇水区(崔之久等, 1996b), 或有高原湖泊分布, 可持续对地下水补给。

5.1.5 气象

受青藏高原东部复杂的地形地貌影响, 各地气象条件差异明显(图 1, 图 11)。在降水量较大的地区, 以裂隙溶隙高位直接补给型和河水渗漏补给为主; 在降水量较小的地区, 以高位湖泊持续补给型和汇水洼地持续补给型为主。

5.1.6 气象

冰川对岩溶地下水补给的影响主要体现在三

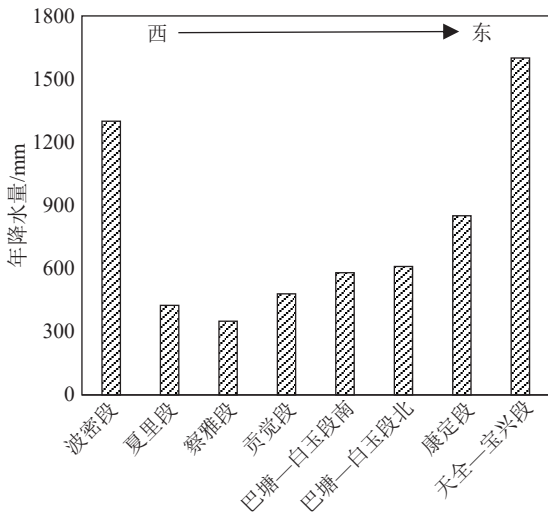


图 11 主要岩溶发育段年均降水量
Fig.11 Average annual precipitation of main karst development sections

个方面: 首先, 随着气候变暖下冰川消融速率加快, 冰川融水的补给量和补给比例均有所提升 (Brown et al., 2002; Castellazzi et al., 2019)。其次, 冰川运动常沿活动构造形成的软弱带进行 (Rivera and Calderhead, 2022), 冰川、冰碛湖、冰蚀湖等分布与

沿断裂发育的溶蚀裂隙、落水洞等有良好的空间一致性, 利于地下水补给。最后, 冰川作用改造了原生地貌形态, 形成“U”型谷、冰蚀台原等地势平缓的地区, 利于地下水补给。

5.2 模式构建

根据主要岩溶大泉补给来源及补给过程的特点, 将青藏高原构造岩溶水补给模式归纳为 4 种类型 (图 12)。

5.2.1 裂隙溶隙高位直接补给型

补给区: 山岭地区、地表水分水岭一带。补给来源: 主要是降雨、冰川、积雪融水等。渗流通道: 溶蚀裂隙、落水洞、垂向发育的风化/构造裂隙。补给特点: 直接入渗补给, 或形成地表径流后入渗补给。典型实例: 清泉村岩溶泉、娘曲泉、瓢打泉。

5.2.2 高位湖泊持续补给型

补给区: 夷平面、谷肩平坦处湖泊分布地区。补给来源: 降水、冰川融水汇入形成的湖泊水。补给特点: 通过穿越湖泊或临近湖泊的断层破碎带、落水洞垂向补给, 湖泊及湖泊周边的松散沉积或堆积层都起到调蓄作用, 持续补给地下水。典型实

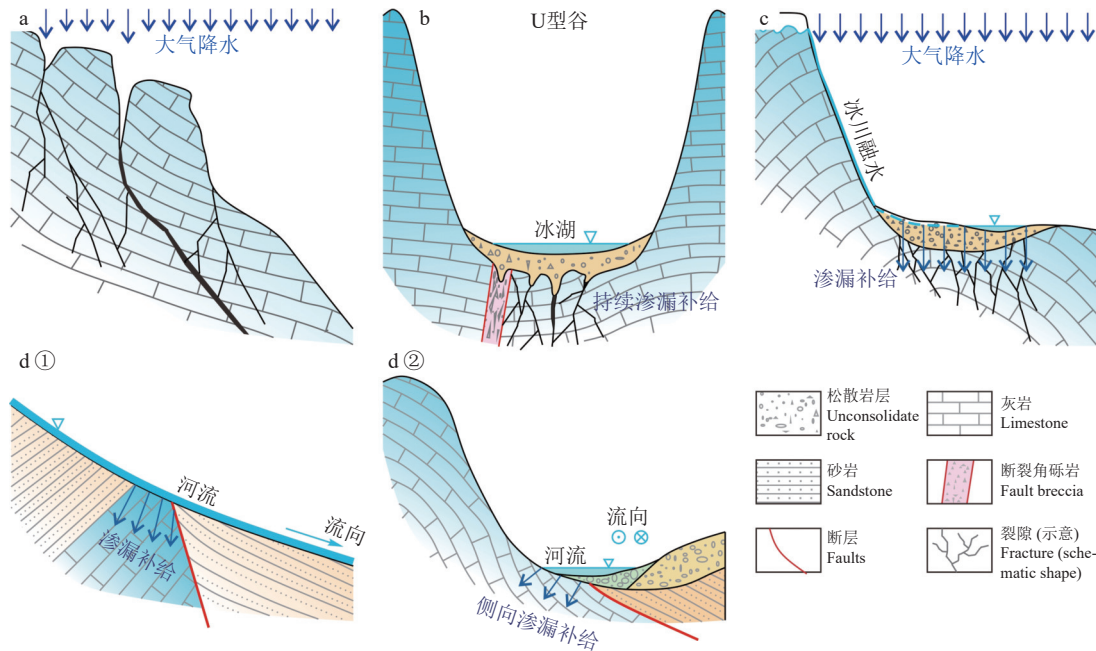


图 12 高原构造岩溶水补给模式示意图

a—裂隙溶隙高位直接补给型; b—高位湖泊持续补给型; c—汇水洼地持续渗漏补给型; d—河水渗漏补给型 (①大角度相交, ②平行或小角度相交)

Fig.12 Schematic diagram of recharge model of tectonic structure karst water

a—Direct recharge through fissure in high-level elevation; b—Continuous recharge by high-level-elevation lake; c—Continuous seepage recharge in catchment depression; d—River seepage recharge (①Intersected on large angle, ②Parallel or intersected on small angle)

例: 火龙沟岩溶泉、根久泉、容贡泉。

5.2.3 汇水洼地持续渗漏补给型

补给区: 中高地势的地形平坦处(如汇水盆地、夷平面), 或类如围塔漏斗的大型岩溶漏斗。补给来源: 降水、冰雪融水。补给特点: 存在直接补给, 也可形成地表径流或小型湖塘间接补给, 具有一定的持续性。典型实例: 鱼洞子泉、夏里温泉。

5.2.4 河水渗漏补给型

断裂附近岩溶发育程度较强, 因此根据断裂与河流展布关系, 又可以分为两种亚型: 其一是大型河流与断裂平行时, 河水侧向补给地下水, 典型实例为清泉村岩溶泉、瓢打泉; 其二是河流(往往是大型河流的支流)与断裂大角度相交时, 河水在通过岩溶段时渗漏补给, 典型实例为纳曲岩溶排泄带、娘曲泉和恩达泉。

需要说明的是, 青藏高原东部岩溶结构复杂、影响因素众多, 地下水的补给来源多样, 补给形式复杂, 甚至可能存在多个主要补给区, 因此各岩溶区段的地下水补给往往是多种模式的组合。

综合岩溶大泉补给模式和补给的控因素, 总结出本文讨论的岩溶大泉补给模式和补给的控因素(表 4)。

5.3 青藏高原构造岩溶水补给模式初判方法

通过比对分析岩溶大泉的补给模式和影响因素, 梳理出青藏高原岩溶大泉补给模式的初步判别方法, 指导水资源利用、生态保护和防灾减灾。

首先可以从是否存在高位裸露岩溶判断。若存在高位裸露岩溶, 且不发育湖泊, 则一般为裂隙

溶隙高位直接补给型和汇水洼地持续渗漏补给型。

其次可以从区域降水量判断。充足的水源补给是岩溶大泉流量维持的基础。对降水不充足的地区, 广阔的汇水面积或持续补给能力是岩溶大泉存在的必要条件。因此巴塘—白玉向西至夏里的补给模式以高位湖泊持续补给型和河水渗漏补给型为主。

第三, 可以从岩溶条带与主要河流的接触关系判断。主要河流与岩溶条带接触, 则具有较大可能性会通过河流渗漏补给。

第四, 可以从是否存在冰川来判断。若存在冰川, 则冰川融水或冰川湖泊可构成岩溶地下水补给源, 补给类型多为裂隙溶隙高位直接补给型或高位湖泊持续补给型。

6 岩溶水开发利用潜力分析

6.1 岩溶水资源量

岩溶大泉的流量代表了所在岩溶系统主要资源量。已掌握的数据显示, 鱼洞子泉占岩溶水系统总流量的 69%, 清泉村岩溶泉占康定北郊岩溶水系统总流量的 97.7%, 火龙沟岩溶泉占所在岩溶水系统总流量的 99.6%, 根久泉和亚日贡泉均占 60% 左右。因此, 对岩溶水的开发利用, 应重点着眼于主要岩溶大泉。

根据 2020 年和 2021 年旱季对岩溶泉的流量统测数据, 计算出岩溶大泉的资源量和岩溶水系统的资源量(表 5)。其中岩溶水总资源量为区内所有岩溶泉流量加和而成, 部分随河流潜流排泄的岩溶

表 4 青藏高原东部典型岩溶大泉补给模式与影响因素

Table 4 Recharge model and influencing factors of typical karst springs in the eastern Qinghai-Xizang Plateau

名称	补给模式	影响因素					
		岩溶演化历史	地质构造	地层岩性	地形地貌	气象	冰川
鱼洞子泉	c	~	非主要	~	主要	非主要	~
清泉村岩溶泉	a, d②	非主要	主要	非主要	~	非主要	非主要
火龙沟岩溶泉	b	主要	主要	~	非主要	非主要	主要
根久泉	d②, b	主要	主要	~	非主要	非主要	主要
亚日贡泉	d②, b	~	主要	非主要	~	~	~
纳曲排泄带	d①	主要	主要	非主要	非主要	非主要	~
娘曲泉	d①, a	非主要	主要	非主要	~	~	~
恩达泉	d①, a	非主要	主要	非主要	~	非主要	~
容贡泉	b	~	主要	~	非主要	非主要	非主要
夏里温泉	c, a	非主要	非主要	~	主要	~	~
瓢打泉	a, d②	非主要	主要	~	主要	非主要	主要

注: ①—大角度相交; ②—平行或小角度相交; ~—非影响因素或成因不确定; a、b、c、d 补给模式见图 12。

表 5 岩溶水资源量与水质评价结果

Table 5 Resources and water quality evaluation results of main karst springs

泉水名称	岩溶区段	岩溶大泉资源量/ 10 ⁸ m ³ /a	岩溶水总资源量/ 10 ⁸ m ³ /a	资源模数/ 10 ⁴ m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹	水质评价结果	超标项	突出项
鱼洞子泉	天全—宝兴	0.292	0.420	1.348	Ⅲ类水	/	亚硝酸盐
清泉村岩溶泉	康定	0.053	0.050	0.680	Ⅱ类水	/	/
火龙沟岩溶泉		0.341			V类水	TDS、硫酸盐	/
亚日贡泉	巴塘—白玉	0.123	0.650	0.311	Ⅰ类水	/	/
根久泉		0.050			Ⅱ类水	/	/
纳曲排泄带	贡觉	0.118	0.140	0.274	Ⅰ类水	/	/
恩达泉	察雅	0.109	0.220	0.258	V类水	TDS、硫酸盐	/
娘曲泉		0.085			V类水	TDS、硫酸盐	/
容贡泉	夏里	0.033	*	*	Ⅰ类水	/	/
瓢打泉	波密	0.086	*	*	V类水	TDS、硫酸盐	/

注：*为不掌握准确数据。

水资源由于无法实测，未计算在其中。

宝兴—天全和巴塘—白玉的岩溶水资源较为丰富，在旱季岩溶水量大于 $0.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，位于金沙江和澜沧江以西的贡觉和察雅的岩溶水量 $0.1 \times 10^8 \sim 0.2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。各可溶岩分布区的资源模数自东向西逐渐减少，最东部的天全—宝兴岩溶水资源模数 $1.348 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，西藏察雅的资源模数仅为 $0.258 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，与年降水量(图 12)变化趋势相同。

6.2 岩溶水质量

依据《地下水质量标准》(G14848—2017)对主要岩溶地下水质量进行了评价(表 5)。在评价的 10 个岩溶泉中，除鱼洞子泉和清泉村岩溶泉外，其余均基本未受到人类活动影响。

岩溶大泉中，Ⅰ~Ⅲ类水 6 个，V类水 4 个。从流量看，Ⅰ类水占比 21%，Ⅱ类水占 8%，Ⅲ类水占 23%，V类水占比最高，达 48%。其中V类水的超标项均为 TDS 和硫酸盐，其成因为地下水沿活动断裂参与深部循环过程中的水岩作用(张春潮等, 2021; 李向全等, 2021; 马剑飞等, 2021)。V类水中，位于察雅可溶岩分布区的两个大泉的 TDS 值超过 2 g/L，无法直接饮用，火龙沟岩溶泉和瓢打泉的 TDS 值分别为 1150 mg/L 和 660 mg/L，可进行饮用水开发利用。同时，所有大泉重金属离子指标全部达标。

6.3 开发利用现状与潜力分析

青藏高原东部大气降水年内分配不均，主要接受大气降水且快速反应的表层岩溶泉流量受季节影响明显。因此，动态较为稳定且水量丰富的岩溶大泉可岩溶区地下水开发利用的主要对象。

综合岩溶水水质和水量因素，本文所提及的岩溶大泉总体可以分成三类。第一类是 6 个Ⅰ~Ⅲ类水的岩溶泉，补给来源多为雨水、河水和湖水短程直接补给，补给模式为裂隙溶隙高位直接补给型、汇水洼地持续渗漏补给型和河水渗漏补给型，即便是湖水补给，其循环过程也较短，水岩作用不充分。第二类是微咸水，包括火龙沟岩溶泉和瓢打泉，补给来源都包括有冰川，由于青藏高原冰川融水本身的 SO_4^{2-} 浓度偏高(李明月等, 2020)，在持续补给的过程中受到强烈蒸发作用和水岩作用又会加剧 SO_4^{2-} 的富集(Ma et al., 2022)，即便水循环速率快，也无法避免水质偏差。第三类是位于察雅的两个岩溶大泉，主要补给来源均为河水(河水渗漏补给型)，但由于参与了深部地下水循环，水化学指标总体偏高。

目前，本文所提及的岩溶大泉的开发利用水平普遍不高(表 6)，应用潜力较大。其中第一类岩溶

表 6 主要岩溶大泉开发利用现状

Table 6 Utilization status of major karst springs

泉水名称	应用门类	备注
鱼洞子泉	工业生产	部分作为厂矿生产用水，大部分汇入河流
清泉村岩溶泉	生活用水	农户生活用水
火龙沟岩溶泉	生活用水	泉水未直接开发利用，汇入河流后下游建立水源地
亚日贡泉	未利用	具有一定宗教属性
根久泉	生活用水	修建水车使用
纳曲排泄带	生活用水	泉水未直接开发利用，汇入河流后下游建立水源地。
恩达泉	农业用水	部分引出供果园灌溉使用
娘曲泉	农业用水	少部分由水渠引出作为娘曲村农业用水
容贡泉	未利用	具有一定宗教属性
瓢打泉	未利用	——

泉可以直接扩大开发利用。第二类泉水由于仅为 TDS 和 SO_4^{2-} 值偏高,可修建水利设施,与地表水混合后使用。第三类水中,娘曲泉由于水温不高,不适合作为旅游项目开发,可改造成一般温泉项目开发;恩达泉作为大流量悬挂泉,可作为旅游景点适当开发。

7 结 论

在野外水文地质调查分析、地下水监测统测、水化学与同位素分析的基础上,结合青藏高原东部主要岩溶发育区段的岩溶发育特征,总结归纳了构造岩溶地下水补给模式,评价了主要岩溶泉资源量和水质,简要分析了开发利用潜力。获得了以下主要认识:

(1) 青藏高原东部分布多处岩溶大泉,其补给主要来源是大气降水,具体形式主要包括河水渗漏补给、高原湖泊持续补给、冰川及积雪融水补给,降水直接入渗所占的比例较小。部分岩溶泉存在多种补给来源。

(2) 根据岩溶大泉补给来源及补给过程的特点,将青藏高原构造岩溶水补给模式归纳为裂隙溶隙高位直接补给型、高位湖泊持续补给型、汇水洼地持续渗漏补给型、河水渗漏补给型等 4 种类型,并讨论了各类型的特点和典型实例。

(3) 存在补给模式差异的原因在于青藏高原东部长期经受内外动力耦合作用,其中内动力控制因素包括岩溶形成演化历史、地质构造和岩性组合;外动力控制因素主要包括气象、地形地貌和冰川运动。

(4) 根据岩溶大泉水质和水量特征,分为三种开发利用方式。第一种为 I~III 类水的岩溶泉,可直接扩大开发利用程度;第二种为微咸水,可与其他水源混合后适当开发利用;第三种为咸水,可适当改造作为旅游开发使用。

注释

① 中国人民解放军〇〇九三一部队。1980. 康定—宝兴地区区域水文地质普查报告(比例尺 1:500 000)[R].

References

Brown G H. 2002. Glacier meltwater hydrochemistry[J]. *Applied*

Geochemistry, 17(7): 855–883.

Castellazzi P, Burgess D, Rivera A, Huang J, Longuevergne L, Demuth M N. 2019. Glacial melt and potential impacts on water resources in the Canadian Rocky Mountains[J]. *Water Resources Research*, 55(12): 10191–10217.

Cui Zhijiu. 1979. Paleokarst in the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Nature*, (9): 24–25 (in Chinese).

Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, Pan Baotian, Chen Huailu. 1996a. Planation surface, paleokarst and uplift of Qinghai–Xizang Plateau[J]. *Science in China (Series D)*, 26(4): 378–386 (in Chinese).

Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, Pan Baotian, Chen Huailu. 1996b. Planation level, karst age and initial height of Qinghai Xizang Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 15(41): 1402–1406 (in Chinese).

Cui Zhijiu, Li Dewen, Feng Jinliang, Liu Gengnian, Li Hongjiang. 2001. Overburden karst, weathered crust and karst (double layer) planation[J]. *Science in China (Series D)*, 31(6): 510–519 (in Chinese).

Dausse A, Leonardi V, Jourde H. 2019. Hydraulic characterization and identification of flow-bearing structures based on multi-scale investigations applied to the Lezkarst aquifer[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26: 100627.

Deng Zhengrong, Wu Shuliang, Yang Yougang, Min Wen, Lei Shibing. 2012. Application of isotopes method on judging supplied source of confined groundwater in riverbed at the dam site of a hydropower station[J]. *Resources Environment & Engineering*, 26(5): 505–508 (in Chinese with English abstract).

Fu C C, Li X Q, Ma J F, Liu L X, Gao M, Bai Z X. 2018. A hydrochemistry and multi-isotopic study of groundwater origin and hydrochemical evolution in the middle reaches of the Kuye River basin[J]. *Applied Geochemistry*, 98: 82–93.

Gao Quanzhou, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, Hong Yun, Wu Yongqiu, Zhang Yechun, Chen Huailu. 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 Quanzhou, Tao Zhen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, Hong Yun. 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).

Guo Changbao, Wu Ruian, Jiang Liangwen, Zhong Ning, Wang Yang, Wang Dong, Zhang Yongshuang, Yang Zhihua, Meng Wen, Li Xue, Liu Gui. 2021. Typical geohazards and engineering geological problems along the Ya'an–Linzi section of the Sichuan–Tibet Railway, China[J]. *Geoscience*, 35(1): 1–17 (in Chinese with English abstract).

Jiang Zhongcheng, Qin Xiaoqun, Cao Jianhua, Jiang Xiaozhen, He Shiyi, Luo Weiqun. 2011. Calculation of atmospheric CO_2 sink formed in karst progresses of the karst divided regions in China[J]. *Carsologica Sinica*, 30(4): 364–367 (in Chinese with English abstract).

- Jiang Zhongcheng, Zhang Jing, Huang Chao, Rong Yuebing, Wu Liangjun. 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 Xiaobing, Yang Sifu, Guan Zhende, Zhang Wenfa, Xu Mo. 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).
- Li Mingyue, Sun Xuejun, Li Shengnan, Zhang Qiangong. 2020. Advances on inorganic hydrochemistry of glacial meltwater runoff in the Qinghai–Tibet Plateau and its surrounding areas[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42(2): 562–574 (in Chinese with English abstract).
- Li Weijie, Wang Jianli, Wang Jialu. 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 Yangtze Basin*, 27(5): 1132–1142 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiangquan, Ma Jianfei, Zhang Chunchao, Wang Zhenxing, Fu Changchang, Bai Zhanxue. 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).
- Luo Wenyi. 2019. Characteristics of water–thermal hazard and hydrogeological route selection in typical section of Sichuan–Tibet railway [C]//Seminar on Construction Technology of Sichuan–Tibet Railway Project(in Chinese with English abstract).
- Ma J F, Li X Q, Liu F, Fu CC, Zhang C C, Bai Z X, Wei S C. 2022. 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: 291.
- Ma Jianfei, Fu Changchang, Zhang Chunchao, Bai Zhanxue. 2022. 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 Jianfei, Li Xiangquan, Zhang Chunchao, Fu Changchang, Bai Zhanxue, Wang Zhenxing. 2021. Transformation characteristics of the large–flow river and groundwater in the fault zone in the glacier–covered area of Bomi in Tibet[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(5): 23–33 (in Chinese with English abstract).
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India–Eurasia collision[J]. *Science*, 189(4201): 419–426.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Ren Fei, Peng Zhimin, Wang Jiakuan. 2019. Recognition of the oceanic subduction–accretion zones from the orogenic belt in continents and its important scientific significance[J]. *Earth Science*, 44(5): 1544–1561 (in Chinese with English abstract).
- Rivera A, Calderhead A I. 2022. Glacial melt in the Canadian rockies and potential effects on groundwater in the plains region[J]. *Water*, 14(5): 733.
- Wang Dujiang. 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).
- Wang Fubao. 1991. Discussion on some problems of karst in Qinghai Tibet Plateau[J]. *Mountain Research*, 9(2): 65–72 (in Chinese).
- Wang Z, Wang L J, Shen J M, Nie Z L, Cao L, Meng L Q. 2024. Groundwater recharge via precipitation in the Badain Jaran Desert, China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 12(1): 109–118.
- Xia Jinwu, Zhu Meng. 2020. Study on tectonic characteristics and activity of middle section of Jinshajiang main fault zone[J]. *Yangtze River*, 51(5): 131–137 (in Chinese with English abstract).
- Xu Mo, Mao Bangyan, Zhang Guangze, Kang Xiaobing, Qi Jihong, Li Xiao, Yi Lei, Yang Sifu. 2020. A preliminary study on correlation of atmospheric CO₂ concentration and karst development in the eastern margin of Qing–Tibet plateau, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 47(6): 724–732 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhihua, Wu Ruian, Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Lan Hengxing, Ren Sanshao, Yan Yiqiu. 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).
- Zhang C C, Hou X W, Li X Q, Wang Z X, Gui C L, Zuo X F, Ma J F, Gao M. 2020. Numerical simulation and environmental impact prediction of karst groundwater in Sangu Spring Basin, China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, (30): 20–32.
- Zhang Chunchao, Li Xiangquan, Ma Jianfei, Fu Changchang, Bai Zhanxue. 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 C C, Li X Q, Ma J F, Wang Z X, Hou X W. 2022. Stable isotope and hydrochemical evolution of shallow groundwater in mining area of the Changzhi Basin, northern China[J]. *Environmental Earth Science*, 81: 294.
- Zhang Dian, Shi Changxing. 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 Ying, Liu Jingtao, Zhou Shiyang, Liu Chunyan, Yang Mingnan, Zhang Yuxi. 2024. Characteristics, controlling factors and effects on human health of groundwater chemical evolution in Wenzhou Plain, lower Oujiang River catchment[J]. *Geology in China*, 51(3): 1059–1073 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Li Xiangquan, Bi Junbo, Ma Jianfei, Liu Feng. 2021a. Key problems on hydro–engineering–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).
- Zhang Yongshuang, Du Guoliang, Guo Changbao, Li Xiangquan, Ren Sanshao, Wu Ruian. 2021b. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Tibet traffic corridor[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 605–617 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Li Hailong. 2016. Late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau and extrusion-related orogenic system[J]. *Geology in China*, 43(6): 1829–1852 (in Chinese with English abstract).
- Zhao L J, Yang Y, Cao J W, Wang Z, Luan S, Xia R Y. 2022. Applying a modified conduit flow process to understand conduit-matrix exchange of a karst aquifer[J]. *China Geology*, 5(1): 26–33.
- Zhao Liangju, Ruan Yunfeng, Xiao Honglang, Zhou Maoxian, Cheng Guodong. 2014. Application of radioactive tritium isotope in studying water cycle of the Heihe river basin[J]. *Quaternary Sciences*, 34(5): 959–972 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yinzhu, Ma Tao, Yuan Lei, Li Fucheng, Han Shuangbao, Zhou Jinlong, Li Yong. 2024. Hydrochemistry-isotope characteristics and quality assessment of groundwater in the Beiluo River Basin, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 51(2): 663–675 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 崔之久. 1979. 青藏高原的古岩溶[J]. *自然杂志*, (9): 24–25.
- 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 潘保田, 陈怀录. 1996a. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升[J]. *中国科学 (D)*, 26(4): 378–386.
- 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 潘保田, 陈怀录. 1996b. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其起始高度[J]. *科学通报*, 15(41): 1402–1406.
- 崔之久, 刘耕年, 李德文, 刘耕年, 李洪江. 2001. 覆盖型岩溶, 风化壳与岩溶(双层)夷平面[J]. *中国科学: 地球科学*, 31(6): 510–519.
- 邓争荣, 吴树良, 杨友刚, 闵文, 雷世兵. 2012. 同位素方法在判定某水电站坝址河床承压水补给源中的应用[J]. *资源环境与工程*, 26(5): 505–508.
- 高全洲, 崔之久, 刘耕年, 洪云, 伍永秋, 张叶春, 陈怀录. 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, 陶贞, 崔之久, 刘耕年, 洪云. 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.
- 郭长宝, 吴瑞安, 蒋良文, 钟宁, 王炆, 王栋, 张永双, 杨志华, 孟文, 李雪, 刘贵. 2021. 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*, 35(1): 1–17.
- 蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 蒋小珍, 何师意, 罗为群. 2011. 中国岩溶作用产生的大气 CO₂ 碳汇的分区计算[J]. *中国岩溶*, 30(4): 364–367.
- 蒋忠诚, 张晶, 黄超, 容悦冰, 吴亮君. 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, 张文发, 许模. 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.
- 李明月, 孙学军, 李胜楠, 张强弓. 2020. 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*, 42(2): 562–574.
- 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, 王振兴, 付昌昌, 白占学. 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.
- 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.
- 马剑飞, 付昌昌, 张春潮, 白占学. 2022. 康定北部高原构造岩溶发育特征与地下水径流带识别[J]. *地质科技通报*, 41(1): 288–299.
- 马剑飞, 李向全, 张春潮, 付昌昌, 白占学, 王振兴. 2021. 西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系[J]. *水文地质工程地质*, 48(5): 23–33.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 任飞, 彭智敏, 王嘉轩. 2019. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. *地球科学*, 44(5): 1544–1561.
- 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.
- 王富葆. 1991. 青藏高原喀斯特的若干问题[J]. *山地研究*, 9(2): 65–72.
- 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.
- 许模, 毛邦燕, 张广泽, 康小兵, 漆继红, 李潇, 易磊, 杨四福. 2020. 青藏高原东缘梯度带大气 CO₂ 含量与岩溶发育相关性初探[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 47(6): 724–732.
- 杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 张永双, 兰恒星, 任三绍, 闫怡秋. 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.
- 张春潮, 李向全, 马剑飞, 付昌昌, 白占学. 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.
- 张英, 刘景涛, 周施阳, 刘春燕, 杨明楠, 张玉玺. 2024. 瓯江流域下游温州平原地下水化学演化特征、控制因素及对人体健康的影响[J]. *中国地质*, 51(3): 1059–1073.
- 张永双, 郭长宝, 李向全, 毕俊攀, 马剑飞, 刘峰. 2021a. 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.
- 张永双, 杜国梁, 郭长宝, 李向全, 任三绍, 吴瑞安. 2021b. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式[J]. *地质学报*, 95(3): 605–617.
- 张岳桥, 李海龙. 2016. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件与挤出造山构造体系[J]. *中国地质*, 43(6): 1829–1852.
- 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.
- 赵良菊, 阮云峰, 肖洪浪, 周茅先, 程国栋. 2014. 氡同位素在黑河流域水循环研究中的应用[J]. *第四纪研究*, 34(5): 959–972.
- 周殷竹, 马涛, 袁磊, 李甫成, 韩双宝, 周金龙, 李勇. 2024. 陕西北洛河流域地下水水化学和同位素特征及其水质评价[J]. *中国地质*, 51(2): 663–675.