

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

李向全, 马剑飞, 张春潮, 王振兴, 付昌昌, 白占学

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

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

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡一中村段岩溶塌陷成因

An analysis of the cause of karst collapses near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway
周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 谢浩, 申豪勇, 王佳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 146-146

典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究

Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie
冯海波, 董少刚, 张涛, 李铤, 刘晓波, 李政葵, 王超 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 163-163

江汉平原东北部地区高铁锰地下水成因与分布规律

Distribution and genesis of high Fe and Mn groundwater in the northeast of the Jianghan Plain
蔡玲, 胡成, 陈植华, 王清, 王宁涛, 常威, 黄琨 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 18-25

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring
张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71

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

基于GIS的地下水资源分区研究及承载本底评价

Evaluation of natural carrying capacity and zoning of groundwater resources based on GIS
高萌萌, 李瑞敏, 刘琼, 王轶, 李小磊 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 184-190



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104005

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

李向全^{1,2}, 马剑飞^{1,2}, 张春潮^{1,2}, 王振兴^{1,2}, 付昌昌^{1,2}, 白占学^{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: 川藏铁路建设面临高原构造岩溶高压突水突泥重大地质安全风险, 开展高原构造岩溶发育规律与岩溶地下水循环模式研究对隧道突水突泥灾害早期预测具有重要意义。文章分析研究了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。研究表明, 研究区构造岩溶发育具有明显的层序规律和高程分带性, 一至四级岩溶发育区分别形成于中新世之前、中新世晚期至上新世、上新世和上新世至更新世, 高程依次为 4 900 ~ 5 300 m、4 000 ~ 4 300 m、3 700 ~ 3 800 m 和 2 900 ~ 3 200 m。活动断裂对岩溶水分布、富集具有明显控制作用, 晚更新世以来的活动断裂沟通岩溶发育区段, 形成特有的高原岩溶蓄水构造条件。岩溶地下水系统可分为高位补给区、远程管道径流区和集中排泄区, 高位补给区位于一级岩溶发育区, 三、四级岩溶发育区为岩溶水集中排泄区, 常出露流量大于 100 L/s 的岩溶大泉。岩溶水流系统可分为浅部水流系统和深部水流系统。岩溶大泉主要接受冰雪融水补给, 具有水压高、流程长和深循环的动力特征。低温状态下冰雪融水高 CO₂ 饱和浓度和 SO₄²⁻ 产生的盐效应促进了高 TDS 硫酸型岩溶水的形成。

关键词: 川藏铁路; 构造岩溶; 发育规律; 地下水; 循环模式

中图分类号: P641.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0034-12

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

LI Xiangquan^{1,2}, MA Jianfei^{1,2}, ZHANG Chunchao^{1,2}, WANG Zhenxing^{1,2},
FU Changchang^{1,2}, BAI Zhanxue^{1,2}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *Key Laboratory of Groundwater Sciences and Engineering, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*)

Abstract: Construction of the Sichuan-Tibet Railway may face significant geological safety risks of water inrush and mud inrush in the plateau tectonic karst region. It is of great scientific and practical significance to carry out research on the evolution regularity of the plateau tectonic karst and the relevant karst groundwater circulation mode for the early prediction and identification of the water inrush and mud inrush disaster in the railway tunnel to be built. Based on the field survey and published literatures, this paper makes an in-depth analysis and draws some conclusions. The tectonic karst development shows obvious sequence characteristics and elevation zonation. The

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: 李向全(1966-), 男, 博士, 二级研究员, 主要从事水文地质、重大工程地质安全方面的研究。E-mail: 1711309960@qq.com

通讯作者: 马剑飞(1987-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事水文地质、工程地质方面的研究。E-mail: majianfei@mail.cgs.gov.cn

first level to fourth level karst development areas were formed before Miocene, late Miocene to Pliocene, Pliocene and Pliocene to Pleistocene, and occur in the elevation range of 4 900–5 300 m, 4 000–4 300 m, 3 700–3 800 m and 2 900–3 200 m, respectively. Active faults obviously control the distribution and enrichment of karst groundwater. Since the late Pleistocene, active faults have connected different karst areas and formed unique storage conditions for the tectonic karst groundwater in the plateau region. Karst groundwater system can be divided into high recharge area, remote pipeline flow area and concentrated discharge area. The high recharge area occurs in the first-level karst evaluation area, and the third-level and fourth-level are the concentrated discharge area which generally contain the outcropping springs with a discharge of more than 100 L/s. The groundwater system is appropriately divided into shallow and deep groundwater flow system. Karst springs are mainly supplied by ice and snow melting water, and exhibits the dynamic characteristics of the high water pressure, long flow path and deep water groundwater circulation. High CO₂ saturation concentration of the melting water and the salt effect of sulfate promote the formation of high TDS sulfuric acid karst groundwater of low temperature.

Keywords: Sichuan-Tibet Railway; tectonic karst; evolution regularity; groundwater; water circulation model

高原深埋长隧道高压突水突泥灾害是川藏铁路建设面临的重大地质安全风险类型之一。川藏铁路雅安—林芝段穿越4个一级构造单元,13条晚更新世以来的活动断裂带,沿线分布75套碳酸盐岩地层^[1-2],复杂的地质构造条件和高寒气候特征造就了较为独特的高原构造岩溶类型。铁路经过的构造岩溶发育区段表现为岩溶管道发育、岩溶水量丰沛和高压高水头等水文地质特征,极易发生隧道高压突涌水灾害,直接影响铁路安全施工及运行维护。

川藏铁路沿线区域水文地质调查及研究程度总体偏低,川西地区水文地质调查精度为1:50万,藏东地区仅为1:100万。近年来,中国地质调查局相关直属单位有针对性地开展铁路廊道1:25万和重点隧道区1:5万水文地质地地质调查工作。国铁集团针对川藏铁路设计线路开展了大量的水文地质勘查工作,积累了较丰富的地质资料^[3]。

在高原岩溶研究方面,部分学者对高原岩溶形态及成因进行了初步研究,对上新世以前形成的古岩溶地貌特征,以及现代冰川作用与高寒风化对岩溶发育的影响进行了探索研究^[4-7]。许模等^[8]针对川藏铁路岩溶突涌水灾害评价做了大量研究工作。近期,中国地质科学院水文地质研究所结合地质调查项目,编制了铁路廊道区域1:25万水文地质图,划分了水文地质单元,对重点隧道区开展了构造岩溶高压突涌水风险评价工作^[9-10]。

在前期研究基础上,本文重点针对高原构造岩溶的发育规律、形态特征和岩溶地下水循环模式进行深入分析,为深埋隧道岩溶高压突水突泥灾害防治提供参考依据。

1 研究区地质概况

格聂山研究区位于金沙江左岸的碳酸盐岩地块(图1)。区域构造上跨越金沙江构造结合带、中咱—中甸地块2个次级构造单元,分布斋如隆—乐玉共断裂(北段为俄德西—红军山断裂)、定曲河断裂(北段为降曲—色伊断裂)和岗通隆断裂等NNW向断裂,以及巴塘断裂等NE向断裂。岩断裂层主要分布于斋如隆—乐玉共断裂和定曲河断裂之间,以上寒武系、泥盆系、石炭系和二叠系碳酸盐岩地层为主(图2)。

察雅研究区位于西藏自治区察雅县东北部。区域构造上位于澜沧江断裂带东部,发育有澜沧江断裂、雅曲勇断裂、王卡—杂拉铺断裂、阿托卡巴断裂和格日玛断裂。岩溶地层以泥盆系、二叠系和三叠系碳酸盐岩地层为主,受区域构造控制,呈NNW向条带状分布(图3)。

2 高原构造岩溶层序规律

2.1 高原构造岩溶发育级次

格聂山和察雅地区构造岩溶发育具有明显的层序规律和高程区间,垂向由上至下大体分为四级岩溶发育级次。一级岩溶发育区,海拔高程为4 900~5 300 m,岩溶地貌形态以大型落水洞、天生桥和角峰为主;二级岩溶发育区,海拔高程为4 000~4 300 m,岩溶地貌形态以中、小型溶洞、溶隙为主;三级岩溶发育区,海拔高程为3 500~3 700 m,岩溶形态以大、中型溶洞、溶隙为主;四级岩溶发育区,海拔高程为2 900~3 200 m,岩溶形态以大、中型溶洞、溶隙为主(图4)。三、四级岩溶发育区通常发育岩溶大泉,是岩溶地下水集中排泄区。



图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Location map of the study area

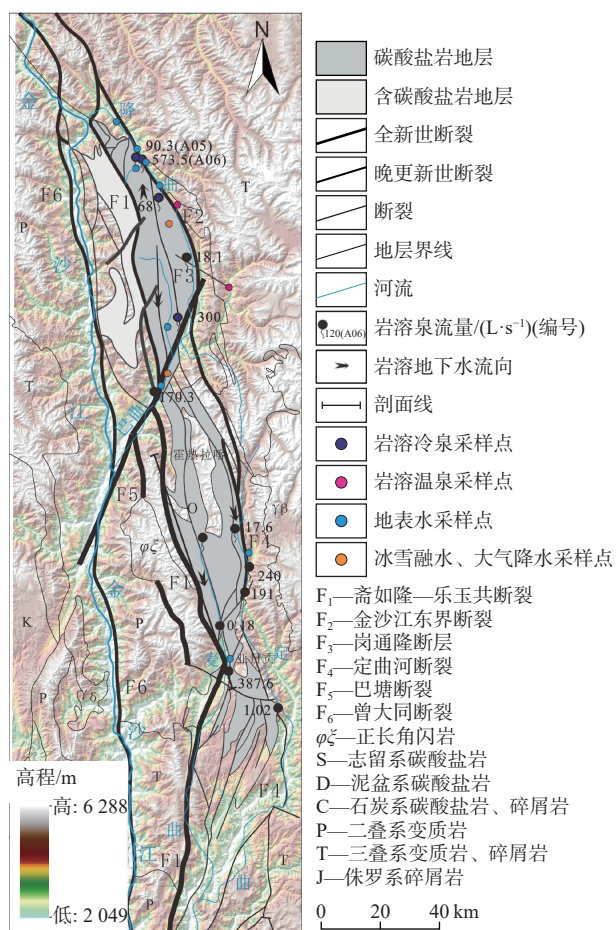


图 2 格聂山地区水文地质简图

Fig. 2 Hydrogeological sketch map of the Genies Mountain

格聂山地区目前发现四级岩溶发育区。以霍热拉喀—亚日贡水文地质剖面为例(图 5),一级岩溶发育区位于霍热拉喀分水岭一带,海拔高程在 5 000~5 200 m 之间,广泛发育溶蚀洼地、落水洞和角峰等岩溶地貌,溶蚀洼地最大者长 800 m,宽 500 m,深大于 80 m。由

于溶蚀洼地的汇水漏失作用,形成众多的“干海子”(图 6)。该区常年积雪,大气降水、冰川融水和地表水通过沿构造发育的古岩溶通道渗漏补给地下水,是岩溶地下水的高位补给区。二级岩溶发育区,位于南部德仁多一带,海拔高程 4 000~4 200 m;可见沿斋如隆—乐玉共断裂分布的岩溶洞穴溶隙,有岩溶泉群出露,泉流量 10~100 L/s。三级岩溶发育区位于东侧定曲河谷,沿定曲河断裂发育,海拔为 3 500~3 600 m,出露岩溶大泉,泉流量 10~330 L/s。四级岩溶发育区位于南部亚日贡麦曲河谷一带,海拔高程为 2 900~3 200 m,发育有沿构造线分布的大型岩溶洞穴和溶隙,洞口直径最大可达 3 m,可见深度约 5 m。由于接近区域侵蚀基准面,为区域岩溶水集中排泄区,有大型泉群出露,最大泉流量可达 470.74 L/s,众多岩溶大泉在此高程区间出露排泄(图 7)。

察雅地区目前发现三级岩溶发育区。以察雅县雅曲勇水文地质剖面为例(图 8),一级岩溶发育区位于 4 700~4 900 m 高程区,发育落水洞、溶隙、溶孔等岩溶地貌,常年积雪覆盖,是岩溶水补给区。二级发育区位于 4 200~4 600 m 高程区,主要发育中小型溶洞、溶孔、溶蚀裂隙等,溶洞直径 0.1~4.0 m,有少量岩溶泉水出露,流量约为 2 L/s。三级岩溶发育区位于 3 500~3 700 m 高程区,大型溶洞、溶隙发育,溶洞直径可达 16 m,出露岩溶大泉,如恩达泉流量 347.22 L/s。

2.2 高原隆升对岩溶的区域性控制作用

青藏高原自始新世开始缓慢隆升,并逐渐加速,自上新世晚期至更新世以来,出现快速隆升^[1]。整体抬升过程中有短暂停留,层状地貌发育,由高到低依次发育二级夷平面和二级谷肩。一级夷平面海拔高程 5 000~5 200 m,形成于中新世之前;二级夷平面海拔

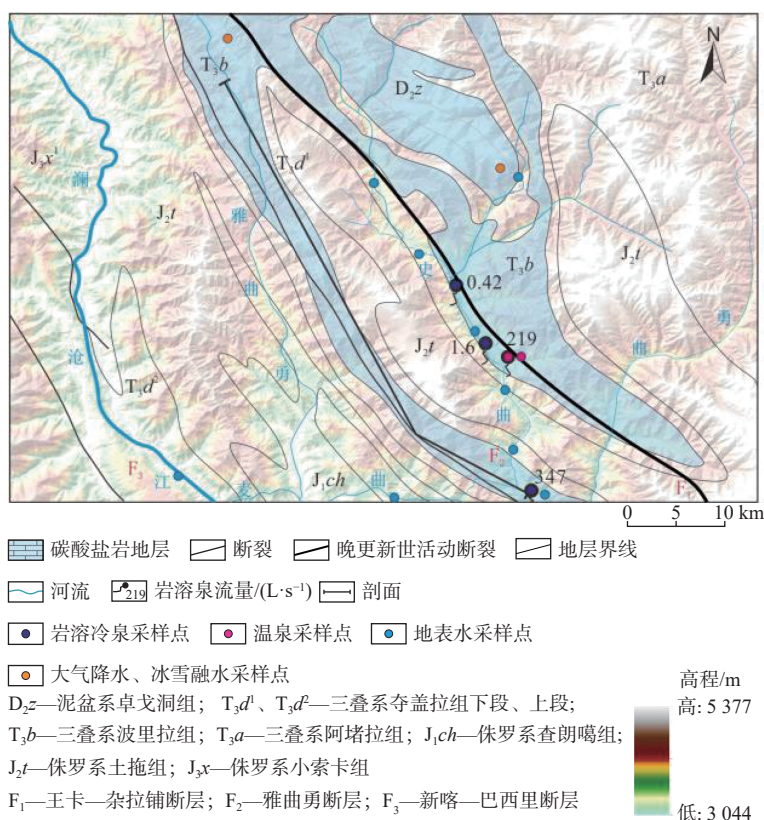


图3 察雅地区水文地质简图

Fig. 3 Hydrogeological sketch map of Zaya County

高程 4 300 ~ 4 800 m, 形成于中新世晚期至上新世 (7.0 Ma.B.P—3.6 Ma.B.P); 一级谷肩海拔高程 3 400 ~ 3 500 m, 二级谷肩海拔高程 2 900 ~ 3 000 m, 形成于上新世至更新世^[12-13]。

高原岩溶发育层序规律明显受到高原隆升作用的控制。对比四级岩溶发育区, 在地貌上分别与一级高原夷平面、二级高原夷平面、一级谷肩和二级谷肩相对应, 夷平面、谷肩形成期, 地壳隆升相对缓慢, 也正是岩溶发育时期。

3 构造岩溶发育的岩性、构造控制作用及地下水动态特征

3.1 地层对岩溶发育的控制作用

格聂山地区岩溶含水岩组由上古生界碳酸盐岩组成(图9), 主要包括: 泥盆系下统格绒组(D_{1g})白云岩及中上统结晶灰岩; 石炭系顶坡组(Cd)结晶灰岩及鲕状结晶灰岩; 二叠系下统冰峰组(P_{1b})和上统赤丹潭组(P_{3c})结晶灰岩、鲕状灰岩及生物灰岩等, 层厚质纯, 岩溶较发育。方解石含量绝大部分在 90% 以上, 平均 94.46%。岩溶裂隙率 2.34% ~ 4.18%, 平均 3.17%。地下水丰富, 泉水露头多且流量大。本次调查中, 大

于 10 L/s 的泉 24 个, 其中, 流量为 100 ~ 500 L/s 的泉有 12 个, 累积流量 2 708.78 L/s, 约占出露泉水总量的 85%。

上寒武统额顶组(C_{3e})大理岩夹片岩、千枚岩, 奥陶系、志留系结晶灰岩、白云质结晶灰岩及白云岩夹片岩、千枚岩, 层薄且富含硅质, 岩溶不发育。方解石含量为 60.93% ~ 94.81%, 平均 83.57%。岩溶裂隙率 0.73% ~ 3.63%, 平均 2.66%。地下水不甚丰富。

察雅县工作区的可溶岩地层主要为泥盆系卓戈洞组(D_{2z})、二叠系交嘎组(P_{2j})和三叠系波里拉组(T_{3b})碳酸盐岩。三叠系波里拉组(T_{3b})岩性以灰岩、生物碎屑灰岩和白云岩为主, 可溶性较强, 岩溶洞穴、溶隙发育, 地下水丰富, 泉水多流量大, 恩达泉、娘曲泉都在本套地层出露; 泥盆系卓戈洞组(D_{2z})岩性主要为泥灰岩、白云岩、生物碎屑泥晶灰岩, 可溶性较差, 发育部分表层泉, 流量不大; 二叠系交嘎组(P_{2j})含泥质泥晶灰岩, 岩溶发育相对最差。

3.2 地质构造对岩溶发育的控制作用

格聂山地区断裂带、褶皱带附近由于应力集中, 岩石遭强烈挤压, 裂隙发育。断裂带附近裂隙率约达 3%。在拉伸应力作用下, 背斜轴部裂隙发育程度强于

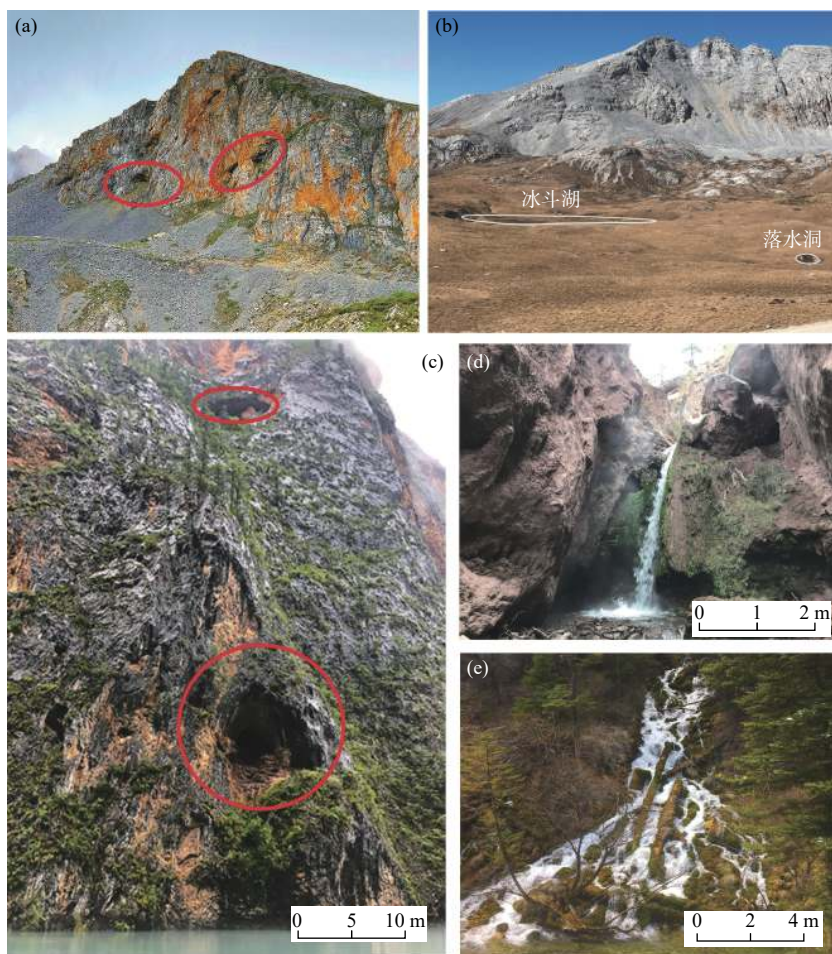


图 4 不同级次构造岩溶地貌

Fig. 4 Tectonic karst landforms of different levels

(a)一级岩溶, 格聂山, 溶蚀洞穴; (b)二级岩溶, 格聂山, 落水洞; (c)三级岩溶, 格聂山, 溶洞; (d)三级岩溶, 察雅, 岩溶泉; (e)四级岩溶, 格聂山, 岩溶泉

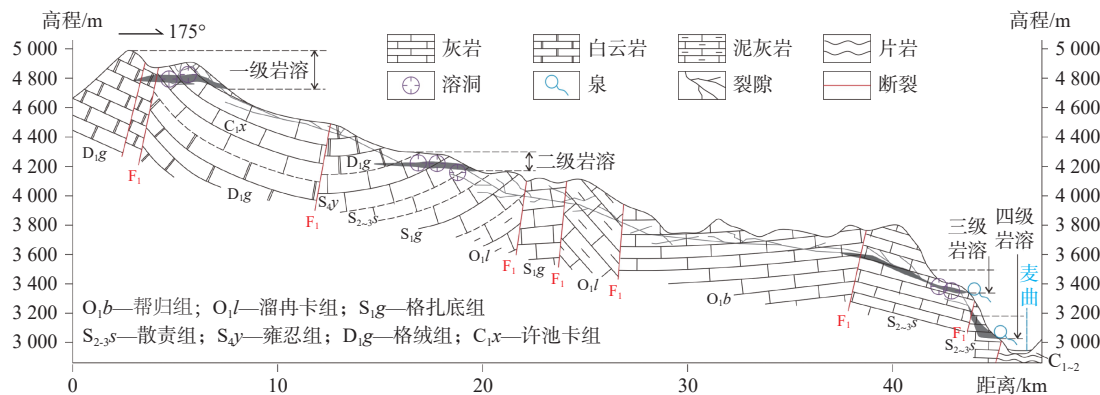


图 5 格聂山地区亚日贡水文地质剖面图

Fig. 5 Hydrogeological section in Yarigong of the Genie Mountain

注: 剖面多次穿越斋如隆—乐玉共断裂(F_1)。

受挤压的单斜岩层和向斜轴部, 平均裂隙率为 1.77%。经长期溶蚀作用, 这些部位岩溶发育率较高, 构造影响区内的岩溶发育率远高于非影响区, 70% 的岩溶洞穴、溶隙发育在构造影响区内, 岩溶泉点多沿构造线分布。

如巴塘以南至亚日贡地区, 古生界泥盆系、石炭系和二叠系碳酸盐岩地层呈近南北向分布于斋如隆—乐玉共断裂和定曲河断裂之间, 受断裂影响构造岩溶发育。断裂外侧被中下三叠系砂、板岩和中下寒武系片岩、千枚岩、火山岩围隔, 成为岩溶水系统的隔水

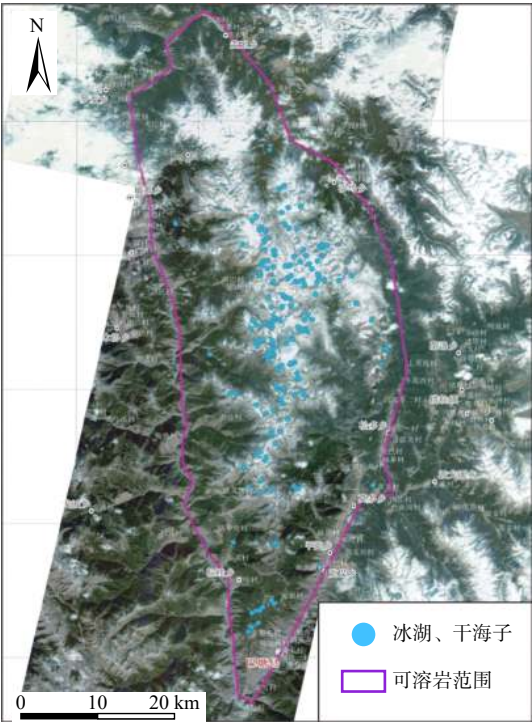


图 6 格聂山地区高位冰湖、干海子遥感解译图
Fig. 6 Interpretation of the high-level glacial lake of the Genie Mountain

边界。由于定曲河与麦曲河沿断裂发育,且切割深,造成岩溶水向东、西两侧河谷集中排泄的有利条件,成为岩溶水的集中排泄区,仅 100 L/s 以上的泉就有 6 个,排泄量达 1 080 L/s。同时,由于该区断裂发育,岩层破碎,促进了岩溶发育,致使富水性较差的奥陶系和志留系碳酸盐岩地层中的泉水也普遍增大,可达 60 L/s。

受澜沧江断裂带和昌都以东宽缓复背斜构造体系影响,西藏察雅县段的可溶岩地层沿雅曲勇断层和王卡—杂拉铺断层以 NNW 向呈条带状展布,分别为雅曲勇岩溶带和史曲岩溶带。恩达岩溶大泉出露于

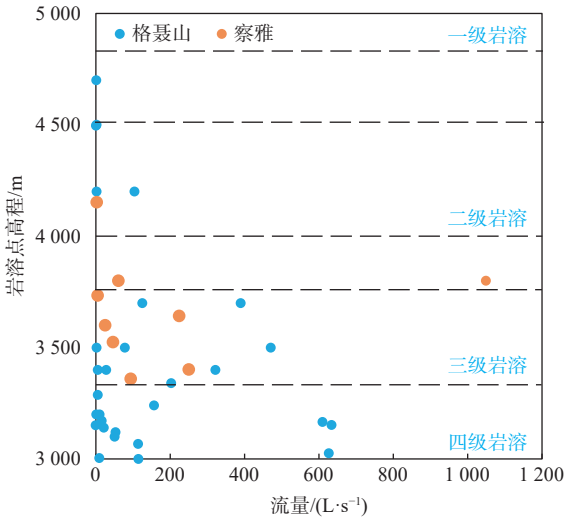


图 7 格聂山和察雅地区构造岩溶统计
Fig. 7 Statistics of tectonic karst in the Genie Mountain and Zaya County

雅曲勇断层带上,娘曲泉出露于王卡—杂拉铺断层带上。

3.3 活动断裂对岩溶发育的控制作用

通过对格聂山、察雅构造控水特征分析,发现活动断裂对岩溶水赋存有明显控制作用。根据前期学者^[14-15]研究,金沙江构造带活动性以巴塘断裂为界,北段主要活动时代在始新世至早—中更新世,最新活动可延至晚更新世。巴塘断裂以南至德钦—中甸—大具断裂之间的中段,金沙江主断裂断错了晚更新世—全新世地层,属更新世—全新世活动断裂。由于几层岩溶带多形成于上新世以前,只有活动断裂能够使几层岩溶发育带得以连通,从而构成了完整的岩溶水补给、径流、排泄的蓄水构造条件。区域上表现为活动断裂带岩溶水富水性强,岩溶大泉多,非活动断裂带,岩溶水富水性明显偏弱。所以金沙江构造带巴塘断裂以北区段岩溶发育程度较弱,巴塘断裂以南区段岩溶发育程度高,出露的岩溶大泉个数和流量都多

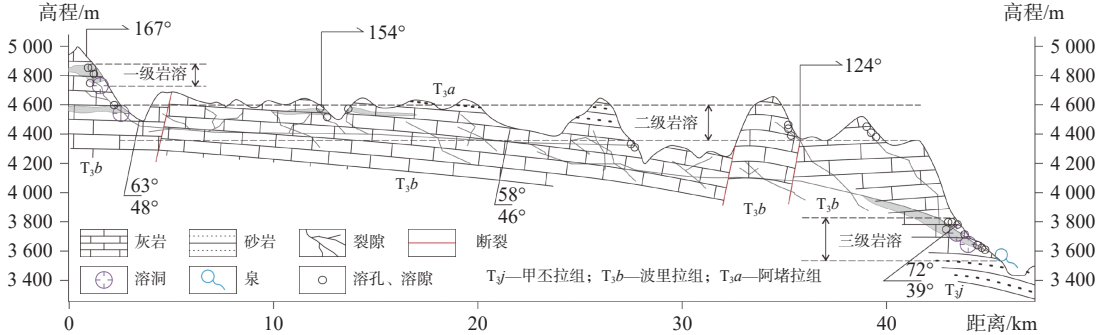


图 8 察雅县雅曲勇水文地质剖面图
Fig. 8 Hydrogeological section in Yaquyong of Zaya County
注:剖面多次穿越雅曲勇断裂。

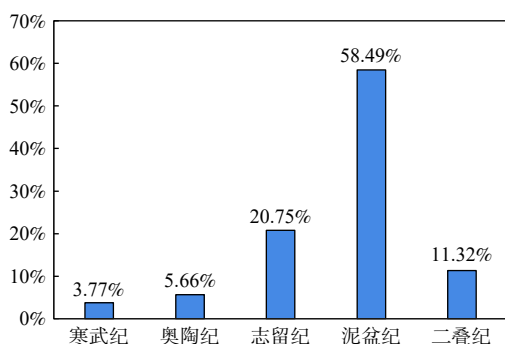


图 9 构造岩溶发育地层时代占比

Fig. 9 Proportion of the tectonic karst developed strata

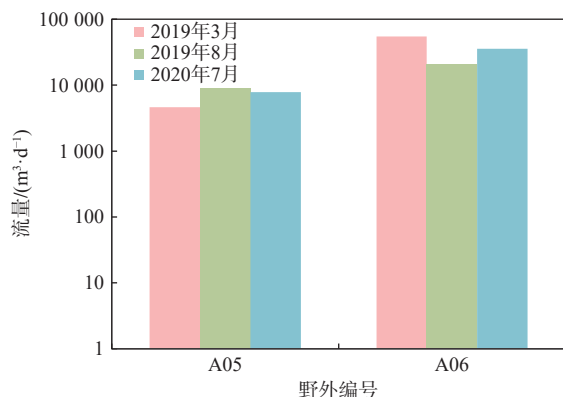


图 10 格聂山地区岩溶泉三期流量对比图

Fig. 10 Comparison of karst spring flow measured on three times in the Genie Mountain

于巴塘断裂以北区段,在巴塘断裂以南,岩溶水沿斋如隆—乐玉共断裂和定曲河断裂自北向南径流,在亚日贡附近集中排泄。根据前期 1:25 万地质调查^[1],察雅地区更新世活动断裂雅曲勇断层和王卡—杂拉铺断层均有岩溶大泉发育。

值得指出的是,在金沙江构造带北段,红军山断裂、降曲—色依断裂为晚更新世活动断裂(图 1),存在封存岩溶水的可能性,由于格聂山隧道从附近通

过,应加强该区岩溶水文地质调查研究。

3.4 岩溶地下水动态特征

为查明研究区岩溶大泉流量及动态特征,分别于 2019 年 3 月和 8 月、2020 年 7 月分 3 次对格聂山及察雅地区部分岩溶泉点开展了测流工作。测得格聂山地区部分岩溶泉水单点流量为 0.37~573.49 L/s;察雅地区岩溶泉水单点流量为 2.23~343.88 L/s。通过同一泉点 3 期流量对比,发现泉水流量丰枯季节波动幅度不大,整体保持稳定(图 10)。

对格聂山降曲某支流水文动态监测站监测数据进行分析。采用逐日小波数字滤波法^[16-17],应用 MATLAB2018 软件进行了基流分割,计算得到基流量为 5.2 L/s。结果表明,9—次年 2 月地下水径流量约占总径流量的 76%;其余的径流量为地表水汇流(图 11)。说明本区地下水泄流量较大,受终年高山冰雪补给,地下水资源丰富,动态稳定。

4 水化学同位素特征

为研究察雅、格聂山典型构造岩溶分布区岩溶水水化学同位素特征,在区域水文地质调查基础上,系统采集了岩溶地下水、地表水、冰雪融水及大气降水样品。察雅及格聂山研究区分别于 2020 年 5 月、2019 年 4 月完成野外样品采集,共 60 组样品,其中察雅研究区 26 组,格聂山研究区 34 组。样品用于常量组分、微量组分以及氘氧氟同位素(D、¹⁸O、T)测试(表 1)。水样的温度、pH 值、电导率(EC)、溶解性总固体(TDS)等易变性指标采用便携式 HANNA 多参数水质测试仪现场测定,碱度在 24 h 内滴定。其他离子指标和氘氧氟同位素送至中国地质科学院水文地质环境地质研究所地下水科学与工程重点实验室测试。

4.1 水化学特征

察雅及格聂山构造岩溶发育区的岩溶泉水主要

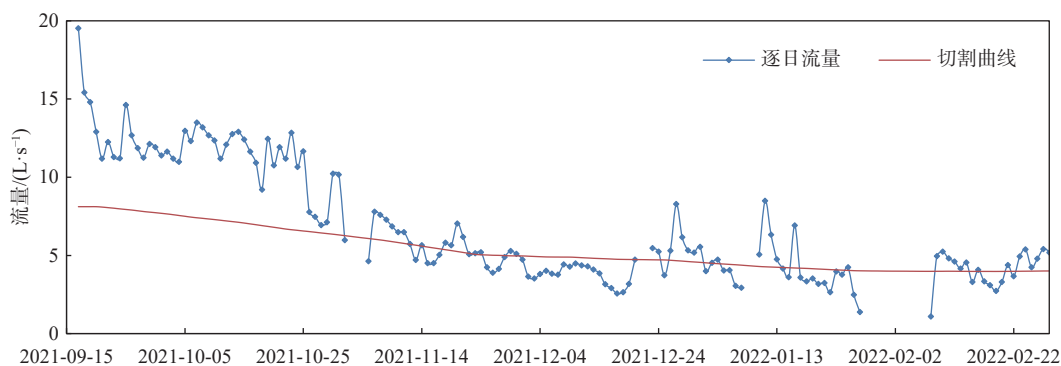


图 11 降曲某支流监测流量的逐日动态及滤波基流分割曲线

Fig. 11 Daily dynamics of monitoring flow of a tributary of Jiangqu and the division curve of filtering base flow

表 1 研究区样品水化学组分及氢氧同位素含量
Table 1 Chemical compositions and hydrogen and oxygen isotope content of the water samples in the study area

研究区	样品类型	水化学组分含量/(mg·L ⁻¹)							
		TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
察雅	温泉	1255	2.40	14.54	271.10	58.9	4.89	754.00	215.40
		2051	3.45	35.10	422.10	95.05	5.59	1360.00	263.20
	冷泉	159.1	0.45	1.77	48.61	4.70	1.75	14.36	155.40
		2562	0.63	5.59	586.20	100.10	2.10	1752.00	203.80
		286.5	0.66	3.98	57.95	22.01	1.75	102.30	178.70
	地表水	107.40 ~ 232.70	1.04 ~ 2.37	3.95 ~ 13.30	19.33 ~ 52.81	4.23 ~ 30.08	1.05 ~ 1.75	4.31 ~ 24.71	110.60 ~ 256.60
121.70 ~ 273.50		0.67 ~ 1.20	3.71 ~ 6.11	20.77 ~ 61.44	9.67 ~ 15.85	1.40 ~ 1.75	23.02 ~ 107.10	95.71 ~ 155.40	
格聂山	温泉	1002	18.38	119.60	208.30	26.93	8.73	76.83	476.20
		1015.72	15.40	274.00	2.15	0.15	40.66	48.96	993.60
	冷泉	114.70 ~ 287.60	0.22 ~ 1.79	0.01 ~ 13.24	30.39 ~ 72.21	5.62 ~ 17.12	0.09 ~ 2.10	5.21 ~ 35.21	122.60 ~ 274.60
		242.11 ~ 330.34	0.87 ~ 2.00	2.39 ~ 4.49	59.50 ~ 85.40	15.2 ~ 28.40	0.33 ~ 1.53	45.90 ~ 103.12	204.10 ~ 228.80
		1014.00 ~ 1331.00	0.67 ~ 2.17	262.4 ~ 310.6	57.90 ~ 61.10	6.15 ~ 37.62	1.75 ~ 2.45	579.60 ~ 754.80	189.2 ~ 299.00
	1150.00	0.52	320.2	42.70	5.97	1.75	695.90	157.40	
	地表水	101.80 ~ 216.45	0.25 ~ 1.50	0.07 ~ 3.31	26.40 ~ 59.90	2.60 ~ 10.60	0.10 ~ 1.75	2.90 ~ 28.19	97.63 ~ 194.80
		140.20 ~ 239.50	0.42 ~ 3.19	1.14 ~ 4.61	29.59 ~ 65.20	6.96 ~ 12.00	0.10 ~ 2.10	38.53 ~ 65.90	84.95 ~ 164.50
研究区	样品类型	水化学类型	pH	同位素含量			T/TU		
				δD/‰	δ ¹⁸ O/‰				
	察雅	温泉	SO ₄ ·HCO ₃ —Ca·Mg	7.18	-138	-16.3	4.7		
			SO ₄ —Ca·Mg	7.35	-139	-18.1	3.4		
		冷泉	HCO ₃ —Ca	7.99	-135	-17.7	6.9		
			SO ₄ —Ca·Mg	7.17	-139	-18.2	4.3		
			HCO ₃ ·SO ₄ —Ca·Mg	7.63	-135	-18.2	7.4		
	地表水	HCO ₃ —Ca·Mg	7.19 ~ 8.52	-134 ~ -122	-17.3 ~ -16.2	6.1 ~ 11.6			
		HCO ₃ ·SO ₄ —Ca·Mg	7.23 ~ 8.40	-128 ~ -122	-17.0 ~ -16.3	8.2 ~ 16.4			
	格聂山	温泉	HCO ₃ —Ca·Na	6.74	-142	-18.5	1.1		
			HCO ₃ —Na	8.79	-154	-18.8	—		
		冷泉	HCO ₃ —Ca·Mg	7.66 ~ 8.30	-131 ~ -127	-17.8 ~ -16.8	4.9 ~ 8.0		
			HCO ₃ ·SO ₄ —Ca·Mg	8.00 ~ 8.08	-126 ~ -122	-16.9 ~ -15.8	<12.4		
			SO ₄ ·HCO ₃ —Na·Ca	7.69 ~ 7.92	-132 ~ -127	-17.1 ~ -16.9	2.9 ~ 9.0		
			SO ₄ —Na	7.79	-131	-17.7	8.1		
			地表水	HCO ₃ —Ca·Mg	7.55 ~ 8.28	-127 ~ -119	-16.8 ~ -15.8	6.4 ~ 9.6	
		HCO ₃ ·SO ₄ —Ca·Mg		7.01 ~ 8.29	-129 ~ -124	-17.5 ~ -16.8	4.4 ~ 15.2		

阳离子为 Ca²⁺、Na⁺和 Mg²⁺, 主要阴离子为 HCO₃⁻和 SO₄²⁻(图 12), 溶解性总固体为 159.10 ~ 2 562.00 mg/L。其中表层岩溶泉(冷泉)的溶解性总固体为 159.10 ~ 286.50 mg/L, 水化学类型为 HCO₃—Ca 型和 HCO₃·SO₄—Ca·Mg 型, 呈碱性低 TDS 特征。岩溶大泉溶解性总固体为 1 002.00 ~ 2 562.00 mg/L, 均为硫酸型水, 察雅研究区水化学类型为 SO₄—Ca·Mg 型水, 格聂山研究区为 SO₄—Na 型水, 呈碱性高 TDS 特征。

4.2 同位素特征

利用环境同位素进一步分析了岩溶水的起源及循环转化特征。所采集的岩溶水、地表水的 δD—δ¹⁸O 关系如图 13 所示。

结果表明, 岩溶泉水大部分沿全球大气降水线分

布, 说明岩溶水主要来源为大气降水^[18-19]。依据氦、氧同位素特征, 研究区内岩溶水大致可分为 2 类: 一是浅层岩溶水, 沿大气降水线分布, 与区内地表水分布范围基本一致, TDS 多小于 300 mg/L, 表明地下水循环较快, 水岩作用不充分, 与地表水之间存在密切的转化关系; 二是深层岩溶水, 主要为深循环岩溶大泉, 分布于大气降水线左下方, TDS 均大于 1 000 mg/L, 说明地下水主要来源于远程补给, 径流时间长, 水岩作用强烈。鲁江温泉和热坑 1 号两处岩溶温泉同位素“氧漂移”现象最为明显, 表明强烈的水—岩作用, 使得水中¹⁸O 同位素富集, 漂移程度反映了水与围岩的氧同位素交换程度的大小。岩溶泉水的氦含量集中分布于 3.0 ~ 16.4 TU 之间, 仅格聂山热坑泉水氦含量为

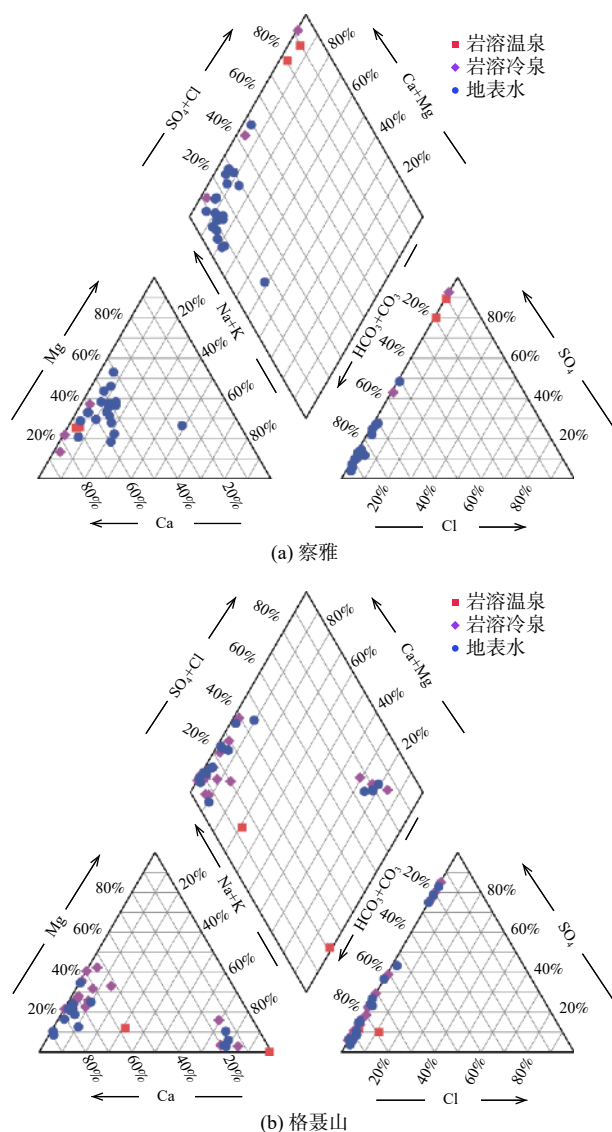


图 12 察雅和格聂山研究区水样 Piper 图

Fig. 12 Piper diagrams of the water samples in the study area of Chaya County and Genie Mountain

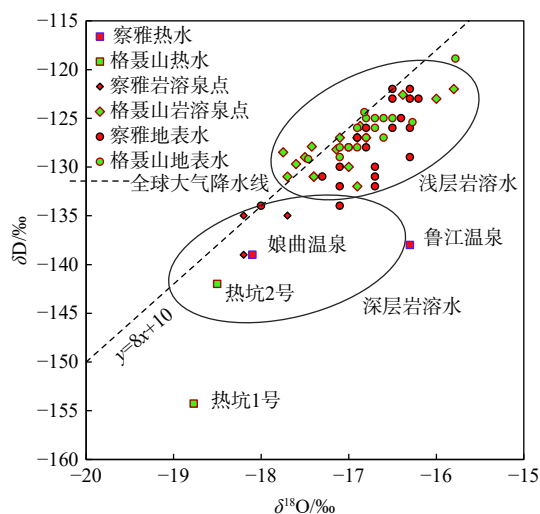
1.1 TU, 说明岩溶水主要受核爆以来的现代降水补给。

4.3 混合作用分析

由于岩溶大泉氧同位素易受水岩作用的影响, 因此利用氘同位素(D)和 Cl^- 离子开展质量平衡计算, 分析地下水的混合状况。选择补给区冰雪融水、雨水作为浅层水端元; 选择深部岩溶水作为深层水端元。利用三端元混合模型, 选取察雅研究区的恩达泉及格聂山研究区的火龙沟泉两处典型岩溶大泉, 进行混合比例计算:

$$\delta\text{D} = \sum_{i=1}^3 X_i (\delta\text{D})_i$$

$$\text{Cl}^- = \sum_{i=1}^3 X_i (\text{Cl}^-)_i$$

图 13 察雅和格聂山研究区水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图Fig. 13 Plot of δD vs. $\delta^{18}\text{O}$ in the study area of Chaya County and Genie Mountain

$$\sum_{i=1}^3 X_i = 1$$

式中: δD ——混合水的氘同位素组成/‰;

$(\delta\text{D})_i$ ——冰雪融水、大气降水、深层岩溶水的氘同位素组成/‰;

Cl^- ——混合水的氯化物含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

$(\text{Cl}^-)_i$ ——冰雪融水、大气降水、深层岩溶水的氯化物含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

混合比例计算结果表明, 两处岩溶大泉均以冰雪融水补给为主, 察雅恩达泉冰雪融水补给占比达 71%, 大气降水补给占比为 22%; 格聂山火龙沟泉冰雪融水补给占比达 83%, 大气降水补给占比为 8% (图 14)。冰雪融水是构造岩溶发育区岩溶大泉的主要补给来源。

4.4 岩溶大泉的水文地球化学成因分析

为深入揭示低温冰雪融水对碳酸盐岩的溶蚀作用机制, 利用 PHREEQC 软件模拟了冰雪融水的水岩作用过程, 进而分析岩溶大泉水文地球化学成因。岩溶大泉主要接受高程约 5 000 m 的冰雪融水补给, 在大气压及 CO_2 分压保持稳定的情况下, 冰雪融水中侵蚀性 CO_2 饱和浓度随着温度的上升而下降, 导致方解石的饱和浓度也随之下降, 见图 15(a), 如冰雪融水自 0 ~ 5 °C, CO_2 饱和浓度减小了 6.67 mmol/L, 方解石和白云石的饱和浓度分别减小了 0.89, 1.12 mmol/L, 表明在冰水混合物状态下, 冰雪融水的侵蚀能力最强。对于 Na_2SO_4 型的冰雪融水而言, 在冰水混合物 (0 °C) 状态下, 随着水中 Na_2SO_4 含量的升高, 方解石的饱和浓度值逐渐上升, 上升速率随着 Na_2SO_4 浓度的升高而逐渐减缓, 见图 15(b)。

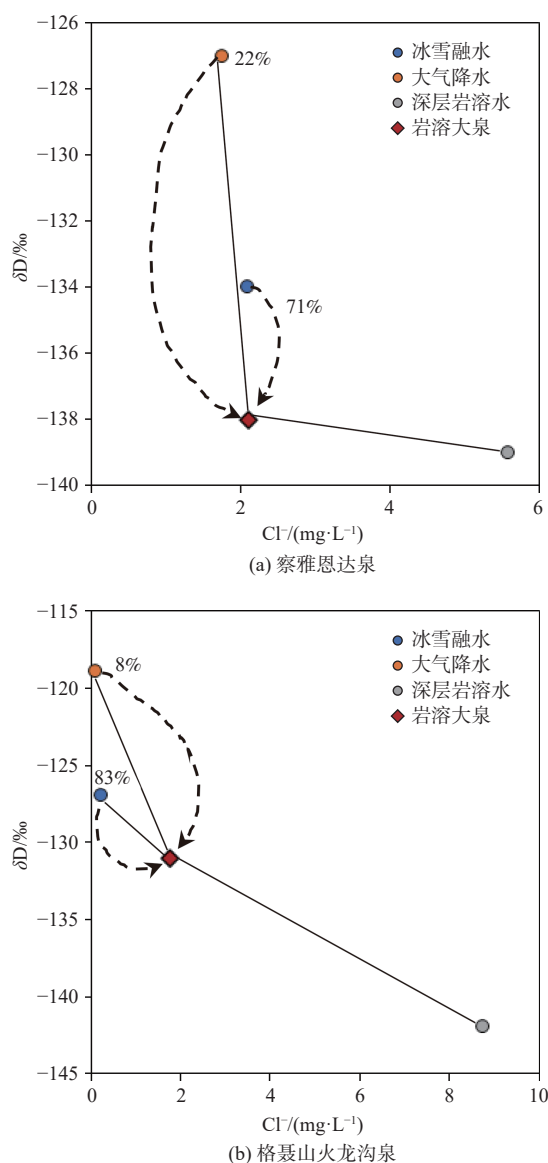


图 14 察雅恩达泉 (a) 及格聂山火龙沟泉 (b) 岩溶大泉典型混合模式

Fig. 14 Typical mixed patterns of the Chaya Enda spring (a) and the Huolonggou Spring of the Genie Mountain (b)

在反应初期, 1 mmol 的 Na_2SO_4 能分别促进 0.190 mmol 方解石和 0.096 mmol 白云石的溶解, 这是因为 SO_4^{2-} 产生的盐效应和 SO_4^{2-} 与各种阳离子形成的离子团会增大碳酸盐的溶解度。因此, 补给区较低温度、 SO_4 —Na 型的冰雪融水, 有助于促进方解石和白云石的溶解, 使得地下水 TDS 含量迅速升高, 进而形成高 TDS 的岩溶大泉。

4.5 构造岩溶水文地质结构及循环模式

在深入分析高原岩溶水文地质条件基础上, 构建了区域高原构造岩溶地下水循环模式(图 16)。

研究区发育四级岩溶发育区段, 晚更新世以来活

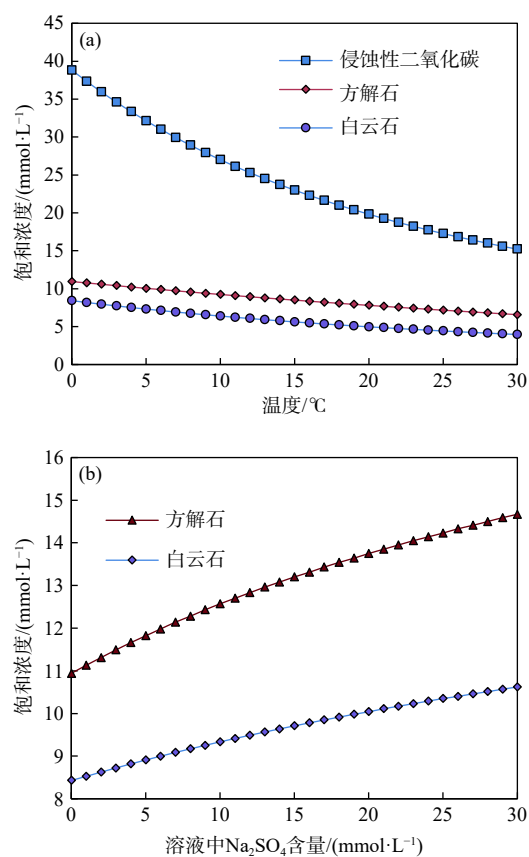


图 15 温度和 Na_2SO_4 影响下碳酸盐和侵蚀性二氧化碳的饱和浓度变化

Fig. 15 Changes in the saturation concentration of carbonate and $CO_2(g)$ under the influence of temperature and Na_2SO_4 mineral

动断裂沟通岩溶发育区段, 形成特有的高原区域岩溶蓄水构造条件。

高原构造岩溶地下水系统, 区域上可分为高位补给区、远程管道径流区和集中排泄区。(1)高位远程补给区, 位于海拔约 5 000 m 的冰川台原区, 也是一级岩溶发育区, 发育溶蚀洼地、落水洞等岩溶地貌, 大气降水、冰川融水、地表水通过落水洞等渗漏补给地下水。(2)远程管道径流区, 主要由活动断裂带和二、三级岩溶发育区构成, 为岩溶地下水径流排泄通道, 同时通过断裂带、二、三级岩溶发育区接受地表水和浅层地下水渗漏补给。(3)集中排泄区, 主要位于三、四级岩溶发育区, 常出露流量大于 100 L/s 的岩溶大泉。

岩溶水流系统, 可分为浅部水流系统和深部水流系统, 浅部水流系统主要是自一级岩溶发育区至二级岩溶发育区构成的岩溶水流系统, 循环深度较浅, 出露岩溶泉流量较小; 深部水流系统主要是由一级岩溶发育区至三、四级岩溶发育区构成的岩溶水流系统, 循环深度大, 以出露岩溶大泉为特征。

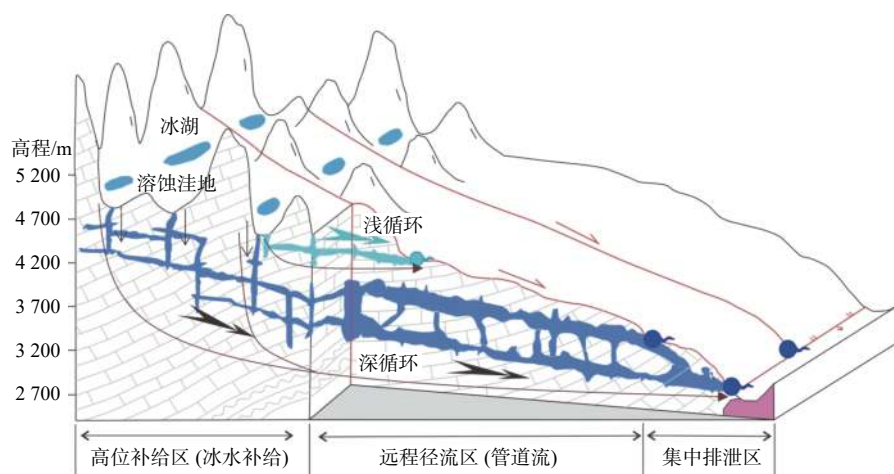


图 16 川藏铁路交通廊道构造岩溶地下水循环模式示意图

Fig. 16 Circulation mode of tectonic karst groundwater along the Sichuan-Tibet Railway

地下水运动主要受构造控制,方向多与构造线一致,可跨越多个分水岭,边运移、边汇集,属单向汇流型。地下水径流途径较长,补给区至排泄区可达数十公里,水岩作用时间较长,TDS明显偏高。地下水循环深度大,补给区与排泄区高差多在1000 m以上,且常导致水温偏高,个别已与低温温泉水温相当。

5 结论

(1)研究区构造岩溶发育具有明显的层序规律,大体分为四级岩溶发育区,一级岩溶发育区位于海拔高程4900~5300 m,形成于中新世之前;二级岩溶发育区位于海拔高程4000~4300 m,形成于晚中新世至上新世;三级岩溶发育区位于3700~3800 m,形成于上新世;四级岩溶发育区位于海拔高程2900~3200 m,形成于上新世至更新世。

(2)活动断裂对岩溶水分布、富集具有明显控制作用,晚更新世以来活动断裂沟通岩溶发育区段,形成特有的高原区域岩溶蓄水构造条件。

(3)岩溶地下水系统可分为高位补给区、远程管道径流区和集中排泄区,高位补给区位于一级岩溶发育区,三、四级岩溶发育区为岩溶水集中排泄区,常出露>100 L/s的岩溶大泉。

(4)岩溶水流系统可分为浅部水流系统和深部水流系统,浅部水流系统主要是自一级岩溶发育区至二级岩溶发育区构成的岩溶水流系统,深部水流系统主要是由一级岩溶发育区至三、四级岩溶发育区构成的岩溶水流系统。

(5)岩溶大泉均以冰雪融水补给为主,冰雪融水补给占比在70%以上,大气降水补给占比低于25%。岩溶大泉TDS值偏高,一般大于1 g/L,为硫酸型水。

参考文献 (References) :

- [1] 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)]
- [2] 潘桂棠,王立全,张万平,等.青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1:1 500 000)[M].北京:地质出版社,2013:1-208. [PAN Guitang, WANG Liqian, ZHANG Wanping, et al. The geotectonic map and instructions of the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent areas (1:1 500 000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-208. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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)]
- [4] 崔之久.青藏高原的古岩溶[J].自然杂志,1979(9):24-25. [CUI Zhijiu. Paleokarst in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Journal of Nature, 1979(9): 24-25. (in Chinese)]
- [5] 高全洲,陶贞,崔之久,等.青藏高原古岩溶的性质、发育时代和环境特征[J].地理学报,2002,57(3):267-274. [GAO Quanzhou, TAO Zhen, CUI Zhijiu, et al. The nature, formation age and genetic environment of the palaeokarst on the Qinghai-Xizang plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(3): 267-274. (in Chinese with English abstract)]

- [6] 王富葆. 青藏高原喀斯特的若干问题[J]. 山地研究, 1991, 9(2): 65 – 72. [WANG Fubao. Some problems of Karst on Qinghai-Xizang plateau[J]. Journal of Mountain Research, 1991, 9(2): 65 – 72. (in Chinese)]
- [7] 朱学稳. 西藏高原喀斯特的物质及“残余峰林”质疑[J]. 中国岩溶, 1994, 13(3): 220 – 228. [ZHU Xuewen. The nature of Tibet plateau karst and the query concerning “relict fenglin karst”[J]. Carsologica Sinica, 1994, 13(3): 220 – 228. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 许模, 毛邦燕, 张广泽, 等. 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), 2020, 47(6): 724 – 732. [XU Mo, MAO Bangyan, ZHANG Guangze, et al. A preliminary study on correlation of atmospheric CO₂ concentration and Karst development in the eastern margin of Qinghai-Tibet plateau, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(6): 724 – 732. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 李向全, 马剑飞, 郭长宝, 等. 川藏铁路金沙江构造结合带(格聂山隧道段)地质安全风险评价专题报告[R]. 北京: 中国地质调查局川藏铁路建设地质安全风险评价指挥部, 2020. [LI Xiangquan, MA Jianfei, GUO Changbao, et al. Report on the geological safety risk assessment of the Jinsha River structural junction (Genie Mountain Tunnel section) of the Sichuan-Xizang Railway[R]. Beijing: Geological Safety Risk Assessment Headquarters of Sichuan-Xizang Railway Construction of China Geological Survey, 2020. (in Chinese)]
- [10] 张春潮, 李向全, 马剑飞, 等. 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, 2021, 35(1): 199 – 208. [ZHANG Chunchao, LI Xiangquan, MA Jianfei, et al. Formation model of geothermal water in Chaya of Tibet: Perspective from hydrochemistry and stable isotopes[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 199 – 208. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 肖序常, 王军. 青藏高原构造演化及隆升的简要评述[J]. 地质论评, 1998, 44(4): 372 – 381. [XIAO Xuchang, WANG Jun. A brief review of tectonic evolution and uplift of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Geological Review, 1998, 44(4): 372 – 381. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 蒋复初, 吴锡浩. 青藏高原东南部地貌边界带晚新生代构造运动[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25(2): 162 – 168. [JIANG Fuchu, WU Xihao. Late Cenozoic tectonic movement in geomorphologic boundary belt of southeastern Qinghai Xizang plateau[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(2): 162 – 168. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 潘保田, 高红山, 李炳元, 等. 青藏高原层状地貌与高原隆升[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 50 – 57. [PAN Baotian, GAO Hongshan, LI Bingyuan, et al. Step-like landforms and uplift of the Qinghai-Xizang plateau[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(1): 50 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴富饶, 蒋良文, 张广泽, 等. 川藏铁路金沙江断裂带北段第四纪活动特征探讨[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(4): 23 – 28. [WU Fuyao, JIANG Liangwen, ZHANG Guangze, et al. Discussion on quaternary activity characteristics of northern section of Jinshajiang fault zone along Sichuan-Tibet Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 23 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 夏金梧, 朱萌. 金沙江主断裂带中段构造特征与活动性研究[J]. 人民长江, 2020, 51(5): 131 – 137. [XIA Jinwu, ZHU Meng. Study on tectonic characteristics and activity of middle section of Jinshajiang Main Fault Zone[J]. Yangtze River, 2020, 51(5): 131 – 137. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 马晓婧, 刘强, 潘继花, 等. 基于数字滤波法的拒马河基流分割及演变规律研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 659 – 663. [MA Xiaojing, LIU Qiang, PAN Jihua, et al. Baseflow separation and temporal changes in the Juma River, China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(5): 659 – 663. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 徐榕焱, 王小刚, 郑伟. 基流分割方法研究进展[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 352 – 359. [XU Ronghan, WANG Xiaogang, ZHENG Wei. Research progresses in baseflow separation methods[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 352 – 359. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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 Xinwei, 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)]
- [19] 王振, 郭华明, 刘海燕, 等. 玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 18–26. [WANG Zhen, GUO Huaming, LIU Haiyan, et al. Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 18–26. (in Chinese with English abstract)]