

巴岳山岩溶发育规律及选线研究

杨志昆

中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 401120

[摘要]巴岳山隧道位于西南岩溶区, 碳酸盐岩对隧道建设危害极大。通过对岩溶区开展地质环境调研, 本文基本厘清了隧址区岩溶发育特征, 浅析了岩溶发育规律, 针对铁路选线进行了探讨, 为巴岳山隧道工程选线及建设提供了参考。结果表明: 巴岳山发育有溶蚀槽谷、岩溶洼地、漏斗、落水洞、溶洞、暗河等溶蚀地貌形态, 岩溶发育具有顺层性、不均匀性、垂直分带性等特点; 受到既有公路隧道建设、铀矿开采的影响, 局部区域地面塌陷、塘库渗漏干涸, 暗河及井泉流量锐减乃至干涸; 隧址区岩溶地下水系统标高 345.0~410.0m 划分为水平循环带, 410.0m 以上为垂向洞隙带, 标高 345.0 以下为深部循环带; 并行渝蓉高速方案行进行于既有通道环境影响范围内, 对环境影响影响有限, 风险较低, 从岩溶水文角度该方案最优。

[关键词]巴岳山; 岩溶; 发育规律; 选线

DOI: 10.33142/ec.v7i12.14565

中图分类号: U412.32

文献标识码: A

Research on the Development Rules and Route Selection of Rock Solutions in Bayue Mountain

YANG Zhikun

China Railway Eryuan Chongqing Survey and Design Institute Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

Abstract: The Bayue Mountain Tunnel is located in the southwestern karst area, where carbonate rocks pose a great threat to tunnel construction. Through geological environment research in karst areas, this article has basically clarified the characteristics of karst development in tunnel sites, analyzed the rules of karst development, and explored railway route selection, providing reference for the selection and construction of the Bayue Mountain Tunnel project. The results show that Bayue Mountain has developed karst landforms such as dissolution troughs, karst depressions, funnels, sinkholes, caves, and underground rivers. Karst development has characteristics such as bedding, unevenness, and vertical zoning; Affected by the construction of existing highway tunnels and strontium mining, local areas have collapsed, ponds and reservoirs have leaked and dried up, and the flow of underground rivers and springs has sharply decreased or even dried up; The karst groundwater system in the tunnel site area is divided into a horizontal circulation zone at an elevation of 345.0-410.0m, a vertical tunnel gap zone above 410.0m, and a deep circulation zone below an elevation of 345.0; The parallel Chongqing Chengdu Expressway plan travels within the environmental impact range of the existing channel, with limited impact on the environment and low risk. This plan is optimal from the perspective of karst hydrology.

Keywords: Bayue Mountain; karst; developmental pattern; route selection

引言

碳酸盐岩在我国广泛分布, 面积可达 300 万 km^2 以上^[1], 其中重庆可溶岩的分布面积达 3 万 km^2 。碳酸盐岩对隧道建设危害极大, 主要集中于以下 5 个方面, 第一是隧道施工易存在涌水、突泥风险^[2], 第二是溶洞堆积物质地较为松软导致路面出现下沉^[3], 第三是隧道中地下水流失, 使隧道顶部与地面存在塌陷可能^[4], 第四是洞穴的存在使建筑物全部或部分悬空, 极大地降低了隧道的使用可靠度^[5], 第五是可岩溶局部含石膏、氯盐假晶, 水中 SO_4^{2-} 对混凝土具侵蚀性^[6]。

巴岳山隧道是某铁路重要控制性工程, 岩溶强烈发育, 对隧道建设影响较大。因此, 通过对岩溶区开展地质环境调研, 本文基本厘清了隧址区岩溶发育特征, 浅析了岩溶发育规律, 针对线路选线进行了探讨, 为巴岳山隧道工程选线及建设提供了参考。

1 隧址区地质环境概况

1.1 地形地貌

巴岳山位于川东平行岭谷区, 是以西山背斜轴部隆起为主体的“背斜脊状山”, 山体总体呈北北东向。地形高程一般 280~800m, 地形上总体背斜东翼高西翼低。在山体北段(黄山村至王家岚坳)形成岩溶槽谷, 呈“一槽两岭”的地貌景观, 槽谷底部高程一般 370~450m, 东西翼均有横切沟发育。如图 1 所示。

1.2 地层岩性

地层由新到老依次为新生界第四系残坡积层 (Q_4^{e1+dl}); 中生界侏罗系中统沙溪庙组 (J_2S)、新田沟组 (J_2X) 中下统自流井组 (J_{1-2Z})、下统珍珠冲组 (J_{1Z}) 泥岩夹砂岩; 中生界三叠系上统须家河组 (T_3XJ) 砂岩夹页岩, 中统雷口坡组 (T_2I) 泥岩、页岩、泥灰岩, 下统嘉陵江组 (T_1J) 灰岩夹盐溶角砾岩。其中, 中生界三叠系下统嘉陵江组碳

酸盐岩地层是隧道穿越的主要地层，地层厚度达 395~500m，巨厚的碳酸盐岩地层为岩溶发育提供了物质基础与发育空间。

1.3 地质构造

区域构造处于扬子准地台，属于新华夏构造体系的川东褶皱带和南北经向构造体系的川黔南北构造带的结合部，构造基本形态以褶皱为主，构造脊线大致呈 NNE 或 NE 向展布，与褶皱相伴的断裂主要发育在背斜轴部。区内构造行迹主要为西山背斜，该背斜为一狭长而不对称的扭曲背斜，背斜轴向北 45° 东左右，向南渐转为北北东向。

1.4 水文地质特征

(1) 地表水。隧址区地表水系均属嘉陵江水系，多呈树枝状，次有羽毛状，横断面多呈深峡之“V”“U”字形，坡降较大，水流湍急，阶地不发育的特点。隧道进口端分布有梅良寺水库、桥亭水库、拦河堰水库，皆为饮用

水源；洞身段岩溶槽谷内发育季节性溪沟，南北向流动后再沿横切沟流出，向西汇入淮远河，向东流入穆家河，分布有通天河 1 库、通天河 2 库、龙井水库等水库，通天河 1 库为巴岳山重要饮用水源，此外零星分布 8 处矿坑蓄水，其中石塘口矿坑蓄水为龙韵村重要饮用水源。

(2) 地下水。依据地下水赋存条件，水动力特征、含水介质等组合特征，将研究区内地下水划分为松散岩类孔隙水、碎屑岩裂隙层间水、基岩（红层）裂隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水（简称岩溶水）等四个大类。其中岩溶水为区内主要地下水，但受锑矿及已建隧道影响，调查区南北两侧倾没端附近岩溶水量多已衰减或枯竭。

2 岩溶发育特征

研究区自西山期褶皱成山，经历了长期的溶蚀和侵蚀作用，形成了十分丰富的地表、地下岩溶形态，主要有溶蚀槽谷、岩溶洼地、漏斗、落水洞、溶洞、暗河等。

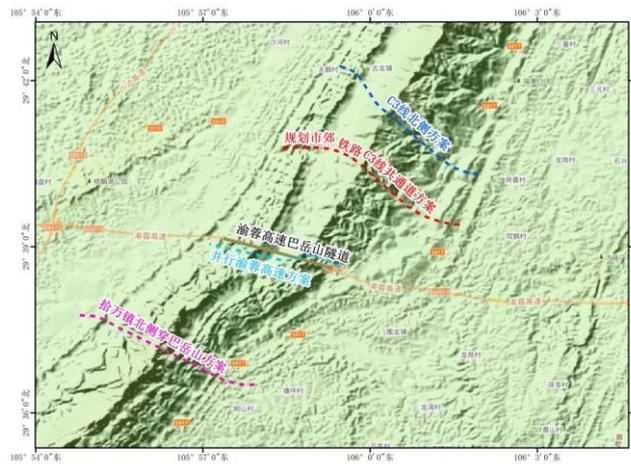


图 1 地形地貌图



岩溶槽谷



岩溶洼地



竖井



落水洞



溶洞



暗河

图 2 地表、地下岩溶形态

2.1 岩溶槽谷

调查区岩溶槽谷地貌分布于嘉陵江组、雷口坡地层,槽谷发育的决定性控制因素是格挡式的地质构造,在这种构造条件下碳酸盐岩呈条带状展布,且外侧有抗侵蚀力强并有相对隔水作用的须家河组砂泥岩地层存在,这些为岩溶槽谷的发育创造了基本条件。出露的灰岩在岩溶作用下剥蚀呈槽谷地形,通常沿构造线走向发育成长条形平行槽谷。

2.2 岩溶洼地

区内岩溶洼地基本上分布在槽谷内的嘉陵江组(T_{1j})地层,少部分在雷口坡组地层中出露,标高一般 380~450m,平面形态多为不规则形。区内洼地底部均覆盖较厚第四系粘性土,厚度一般 3~10m,最低处多伴生有落水洞,常与垂直裂隙或管道相连。洼地是地表水汇集区和向深部集中补给地下水的区域。区内横切沟较发育,未形成大规模暗河系统,大气降水多短途补给,地表水多沿横切沟向槽谷外侧排泄,调查区洼地数量相对较少。

2.3 落水洞、漏斗及竖井

落水洞和漏斗表面形态相似,是地表及地下岩溶地貌的过渡类型。落水洞常与洼地伴生,而漏斗、天窗及竖井常呈串珠状分布,其下往往与暗河有一定联系,因此是判断暗河走向的重要标志。区内落水洞标高一般 380~420m,多已被种地封填或采矿破坏。

2.4 暗河

区内可溶岩未被深切沟切穿,也未发现大规模暗河系统。区内暗河以浅表暗河为主,岩溶地下水短途补给,在槽谷低洼地带以泉或暗河形式排泄,通过冲沟排出岩溶槽谷。区内典型的浅表暗河为张家湾暗河,该暗河由南向北运移。暗河高程 400m,补给途径为“何家坡-张家坡-冉家坡-张家湾”,推测暗河长度 1.2km。受玉峡口锇矿开采疏干影响,现该浅表暗河仅雨季有水流出。据区域资料和调查访问,在锇矿影响前张家湾暗河一年四季不干,水量曾达 30L/S 以上,目前仅丰水期有水。该暗河具有动态变化大,响应快等特点。

2.5 溶洞

区内溶洞延伸方向受构造裂隙和岩性影响,蜿蜒曲折或支状分布,洞口直径一般 1~5m 不等,多数溶洞平时无水,暴雨后可见水流出。根据调查,区内较大规模溶洞主要分布在高程 400~450 附近,如高家溶洞、大龙洞湾、张家湾溶洞等。而根据各采石场和已建隧道钻孔揭露情况,在 380m~400m 段发育竖向岩溶管道,380m 附近发育水平溶洞及岩溶管道。

3 岩溶发育规律

3.1 岩溶发育的顺层性

受岩层的形成过程影响,相邻地层结构、厚度、成分出现较大差异,含隔水特性亦存在较大差异,因此相邻地层岩溶发育程度将出现不同,一般岩层愈厚、结构愈松散,岩溶就愈发育,且形态齐全,规模较大,愈薄、结构愈致

密岩溶化程度较弱。调查区地层呈层状,局部含隔水层相间产出,相邻地层岩体岩溶化特征、规律存在差异,从平面图上看,暗河发育方向与岩层走向、层面倾向基本相同。

3.2 岩溶发育的不均匀性

受诸多因素控制,岩溶在岩体内的发育是不均匀的,甚至是极不均匀的,即岩溶化程度是不同的。在有利的部位可形成规模较大的地下廊道式洞穴,在不利的部位仅有溶隙或小溶孔发育。主要表现在如下两方面:

一是不同时代地层岩溶发育程度具有明显的差异。区内规模较大的、数量最多的洼地、落水洞、岩溶洞穴管道等岩溶形态主要在三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})地层分布,而在雷口组地层中,岩溶形态数量和规模都大幅度地减少。

二是不同地貌部位发育着不同的岩溶形态。从宏观上而言,山脊顶部主要发育垂向岩溶洞隙,水平洞穴罕见;在沟谷两侧分布着水平洞穴的出口;在以上两者之间地带,则垂向和水平向的洞穴相互贯通。从微地貌上来看,岩溶形态主要发育于地形和缓部位,岩溶洼地、落水洞、地下河等均较发育。反之,在陡坡地带,仅有溶隙、溶沟、石芽等小型岩溶发育。山脊两侧地势陡峭,峰丛洼地稀少,溶隙、溶沟、石芽等小型岩溶发育;山脊顶部地形宽缓,峰丛基座相连,发育洼地、漏斗、落水洞等竖向岩溶。

3.3 岩溶发育的垂直分带性

根据调查成果,隧址区溶洞、岩溶管道主要发育在第四系平面内,水平岩溶主要发育在 400~450m 及 380m 附近,在 380~400m 发育竖向岩溶。说明隧址区在四级夷平面内仍存在间歇性抬升。根据收集已建隧道资料及调查成果,隧址区水平岩溶主要发育在 400~450m 及 380m 附近。区内横切沟发育,在岩溶槽谷高程一般 345~430m,横切沟间距 0.6~5km,岩溶水特征为短途补给,临近冲沟排泄。另外根据既有钻孔资料显示岩溶段落水位标高 372.4~428.31m,标高 325m 以上溶蚀较发育。根据渝蓉高速巴岳山隧道和天青石锇矿平洞的涌水量监测数据显示,与降雨的动态响应较为迟缓,其流量峰值滞后降雨峰值时间长,地下水动态变化也相对较小,说明渝蓉高速巴岳山隧道和天青石锇矿平洞皆位于深部循环带内。

综合分析,将该岩溶地下水系统标高 345.0~410.0m 划分为水平循环带,410.0m 以上为垂向洞隙带(竖向补给带),标高 345.0m 以下为深部循环带(饱水带)。

4 相邻工程的影响

调查区已建隧道为渝蓉高速巴岳山公路隧道,对岩溶槽谷地下水影响较大的矿山为天青石锇矿、天青锇化玉峡口锇矿、足锇矿业玉峡口锇矿、苏家湾锇矿。根据影响程度可以进一步划分出严重影响区及一般影响区,严重影响区主要表现为地面塌陷、塘库渗漏干涸,暗河及井泉流量锐减乃至干涸;一般影响区主要表现为暗河及井泉流量出现一定减少,部分出现季节性干涸,塘库水位出现下降。

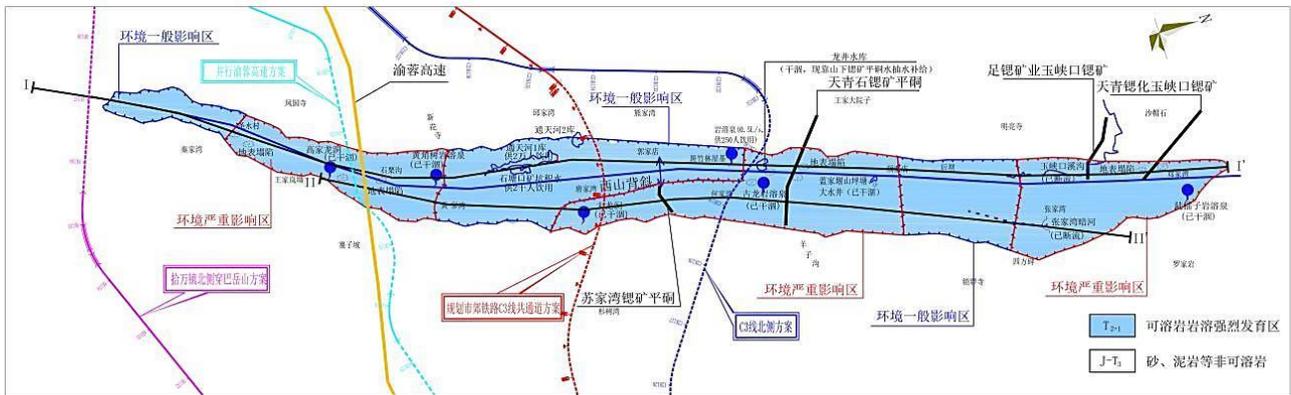


图3 既有地下工程影响示意图

4.1 渝蓉高速巴岳山公路隧道

已建渝蓉高速巴岳山公路隧道穿越地层有三叠系上统须家河组，三叠系下统嘉陵江组，隧道为人字坡，隧道进口高程342m，出口高程304m，隧道穿越可溶岩地层段标高为322.19~346.87m。隧道修建造成通天河1库以南至倾没端岩溶水受到不同程度影响。岩溶区严重影响区内地表大部分井泉已基本枯竭，导致高家龙洞、黄桷树岩溶泉在内的岩溶大泉断流，并产生5处地面塌陷。

4.2 天青石锑矿

天青石锑矿开始掘进后造成了通天河1库以北至后坝地下水不同程度疏干，其中斑竹林屋基以北段至颜家店（距锑矿平硐1~1.3km范围内）受影响较严重，导致包括龙井水库、古龙龙井在内的地表井泉已基本疏干，溪沟断流，水塘干枯，地下水位大幅下降，并产生4处地面塌陷；通天河1库至斑竹林屋基（距锑矿平硐1~3km范围内）、颜家店至后坝（距锑矿平硐1.3~2.4km范围内）地表井泉水量减少，部分仅雨季有水，地下水位下降。

4.3 玉峡口锑矿

天青锑化玉峡口锑矿和足锑矿业玉峡口锑矿位于巴岳山北侧，调这2处锑矿造成了后坝以北至倾没端槽谷段地下水不同程度疏干。其中张家湾以北段（距离天青锑化玉峡口锑矿排水平硐2.7km范围内）受影响较严重，导致张家湾暗河等地地表井泉已基本疏干，玉峡口等溪沟断流，水塘干枯，地下水位大幅下降，并产生2处地面塌陷；张家湾至后坝附近地表井泉水量减少，部分仅雨季有水，地下水位下降。

4.4 苏家湾锑矿

苏家湾锑矿位于西山背斜东翼田家院子一带，锑矿采用地下开采，平硐+暗斜井开拓，机械抽排水，排入槽谷后顺排水渠进入通天河2库，最后进入淮远河，抽水量5L/S，造成了背斜东翼大龙洞以北至何家湾地下水疏干，大龙洞以前一年四季不干，锑矿开采后，仅丰水期有水。

此外，岩溶槽谷地下水还不同程度受到蓝家湾锑矿、土地奎锑矿、干堰塘锑矿及露天矿山等不同程度影响。其

中蓝天湾锑矿、土地奎锑矿、干堰塘锑矿、苏家湾洞口位于槽谷，均开采背斜东翼矿产。蓝天湾锑矿现处于关闭状态，土地奎锑矿、干堰塘锑矿现由天青石锑矿整合后开采。露天矿山开采深度较大，部分路口矿山坑底标高低于原始地面30m以上，开挖及爆破振动造成岩溶水下漏向矿坑底部富集，形成矿坑积水，这对地表井泉也有所影响。

5 选线研究

5.1 水文地质条件评价

隧址区岩溶地下水受破坏相对较小，地下水位较浅。岩溶水短途补给，多以岩溶泉形式就近排泄后沿槽谷横切沟排出。

隧址区岩溶地下水系统标高345.0~410.0m划分为水平循环带，410.0m以上为垂向洞隙带（竖向补给带），标高345.0以下为深部循环带（饱水带），拾万镇北侧穿巴岳山方案穿越岩溶区高程321~325m；并行渝蓉高速方案穿越岩溶区高程314~322m，已建隧道已造成地下水下降，隧道涌水终年不干；规划市郊铁路C3线共通道方案穿越岩溶区高程291~302m；C3线北侧方案穿越岩溶区高程294~305m，靠近天青石锑矿通道，既有锑矿平硐已造成地表水、地下水漏失，平硐涌水量终年不干。结合类似工程经验判断四个方案隧道均处于深部循环带（饱水带）。

隧道各线位穿越岩溶区高程均位于区域第四级夷平面（280~450m）水平岩溶带内，巴岳山总体为封闭型岩溶槽谷，拟建隧道高程低于岩溶槽谷各冲沟高程，遭遇大型岩溶（暗河）的可能性小，但枯水期和丰水期动态变化较大，拟建隧道各线位穿越岩溶水水系统时可能遭遇季节性涌水、突泥问题。

规划市郊铁路C3线共通道方案水头较高，可能遭遇大规模的突水、突泥问题，推测并行渝蓉高速方案和C3线北侧方案靠近既有排水通道，水头较低，遭遇大规模的突水、突泥的可能性较小。拾万镇北侧穿巴岳山方案地表无岩溶出露，遭遇大规模的突水、突泥的可能性较小。

5.2 工程影响预测

拾万镇北侧穿巴岳山方案靠近可溶岩出露区域，由于

隧道标高较低,埋深较大,新建隧道后会严重影响北侧岩溶槽谷段落约 1.4km,进一步降低地下水位,引起地面塌陷,影响附近约 40 户居民生产生活,环境风险较大。

并行渝蓉高速方案与已建渝蓉高速隧道相近,其岩溶区影响范围与已建渝蓉高速公路隧道影响范围基本一致,新建隧道将导致已建隧道影响范围内地下水位进一步下降,由于拟建隧道标高比既有隧道低仅 15m,严重影响范围稍稍向两侧扩展,对地下水环境的影响程度相对较小。

规划市郊铁路 C3 线共通道方案严重影响槽谷岩溶水长度约 3km,范围向北扩展至郭家店,向南扩展至通天河水库,拟建隧道距离通天河水库仅 700m,很有可能造成通天河 1 库、通天河 2 库、石塘口矿坑积水漏失,降低地下水位,影响附近山上山下合计近 22000 人生产生活、灌溉用水,环境风险大。

C3 线北侧方案与天青石锇矿平硐相近,其岩溶区影响范围与锇矿开采严重影响范围基本一致,新建隧道将导致锇矿开采影响范围内地下水位进一步下降,天青石锇矿平硐标高 283m,拟建隧道标高 296m,锇矿平硐标高比铁路隧道低,北侧严重影响范围不变,南侧将扩展至郭家店附近,对南侧的地下水进一步疏干,导致斑竹林屋基岩溶泉漏失,降低地下水位,影响附近 250 人生活用水,存在一定的环境风险。

综上,并行渝蓉高速方案紧邻渝蓉高速巴岳山隧道,对生态环境进一步影响的范围小,施工风险较低,推荐该方案;其次为 C3 线北侧方案、拾万镇北侧穿巴岳山方案、规划市郊铁路 C3 线共通道方案。

6 结论

(1) 巴岳山发育有溶蚀槽谷、岩溶洼地、漏斗、落

水洞、溶洞、暗河等溶蚀地貌形态,岩溶发育具有顺层性、不均匀性、垂直分带性等特点。

(2) 受到既有公路隧道建设、锇矿开采的影响,局部区域地面塌陷、塘库渗漏干涸,暗河及井泉流量锐减乃至干涸。

(3) 隧址区岩溶地下水系统标高 345.0~410.0m 划分为水平循环带,410.0m 以上为垂向洞隙带(竖向补给带),标高 345.0 以下为深部循环带(饱水带)。

(4) 并行渝蓉高速方案紧邻渝蓉高速巴岳山隧道,行进于既有通道环境影响范围内,对环境的影响有限,风险较低,从岩溶水文角度该方案最优。

[参考文献]

- [1]程巧建.隧道岩溶超前探测及溶洞处理技术研究[J].公路,2020,65(5):6.
 - [2]张文勇,刘敏捷.深长岩溶管道对隧道的危害及处治措施[J].青海交通科技,2022,34(6):92-96.
 - [3]周洁.概述岩溶对公路隧道的危害及施工处治对策[J].四川水泥,2020(2):1.
 - [4]唐振兴.隧道工程中岩溶灾害及其防治[J].交通世界,2011(7):2.
 - [5]蔺书钿.岩溶隧洞常见灾害及处理措施[J].山西建筑,2010,36(25):2.
 - [6]段国华.高寨坡隧道水文地质条件分析与岩溶水处理[J].建材与装饰,2017(10):262-263.
- 作者简介:杨志昆(1992—),男,工程师,从事岩土工程勘察工作。