

DOI: 10.12401/j.nwg.2023099

某艰险山区铁路隧道岩溶发育特征及 涌突水危险性评价

贾杰¹, 覃礼貌², 于振涛¹, 谢荣强¹, 罗元冲¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 某艰险山区铁路隧道是重要的控制工程, 区域构造运动活跃、工程地质环境极为复杂, 需穿越上三叠统波里拉组灰岩条带, 岩溶突涌水问题突出。为了准确评价隧道涌突水的危险性, 通过地质调绘、深孔钻探等手段, 对隧道水文地质特征进行精细的调查和深入的分析, 探明隧道岩溶发育特征及范围, 将隧址区地下水径流系统分为局部表层、浅层和区域深层径流系统, 并遵循多元、多层次的分析评价思路, 选取不同评价指标, 构建非可溶岩段和可溶岩段隧道涌突水危险性评价体系。评价结果显示, 隧道涌突水问题总体以较低危险性为主, 高和极高危险段仅约占隧道总长的 4% 和 1%, 主要受控于波里拉组灰岩条带和额艾顿断裂带。

关键词: 铁路隧道; 岩溶; 涌突水; 危险性评价

中图分类号: P642.25; U453.6+1 文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0258-10

Karst Development Characteristics and Water Inrush Risk Assessment of Railway Tunnel in a Difficult and Dangerous Mountain Area

JIA Jie¹, QIN Limao², YU Zhentao¹, XIE Rongqiang¹, LUO Yuanchong¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: A railway tunnel in a difficult and dangerous mountain area is an important control project. The regional tectonic movement is active, and the engineering geological environment is extremely complex. In order to prepare to evaluate the risk of water inrush in the tunnel, the hydrogeological characteristics of the Tunnel were investigated and analyzed in depth by means of geological mapping, deep hole drilling, etc. The groundwater runoff system in the site area is roughly divided into local surface runoff system, shallow runoff system and regional deep runoff system, and following the multiple and multilevel analysis and evaluation ideas, different evaluation indicators are selected to construct tunnel surges in the insoluble rock section and the soluble rock section. According to the evaluation system of water inrush risk, it is concluded that the water inrush problem in the Tunnel is mainly of low risk, and the high and extremely high risk sections only account for about 4% and 1% of the total length of the tunnel, which is mainly controlled by limestone (T₃b) and Eaideng fault zone.

Keywords: railway tunnel; karst; water inrush; risk assessment

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2023-04-01; 责任编辑: 贾晓丹

作者简介: 贾杰(1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事铁路工程地质研究。E-mail: 1198006930@qq.com。

某艰险山区铁路横穿川西藏东地区,全长为1018 km;隧道总计69座,总长为841 km,西行穿越川西高山峡谷区、川西山地区(高山原区)、藏东南横断山高山峡谷区,具有强烈的版块运动、复杂的地质条件、显著的地形高差、脆弱的生态环境、恶劣的气候条件等特征,是中国乃至世界山区最为复杂艰险的铁路工程(彭建兵等,2020;赵勇等,2021)。其中,该铁路隧道是重要控制性工程,位于西藏昌都市境内,隧道全长28470 m,最大埋深约为1200 m。隧道洞身工程与水文地质环境极其复杂,尤其必须要穿越上三叠统波里拉组(T_3b)灰岩条带,岩溶影响很大,而岩溶突涌水则是最主要的灾害之一(Bogardi, 1982; 彭建兵等, 2020; 赵勇等, 2021)。

国内外学者针对岩溶区隧道突涌水危险性评价及方法开展了大量研究。李术才等(2013)、周宗青等(2013)选取7个主要致灾因子,建立了勘察和施工阶段的突水风险评价体系、危险性等级评价的属性识别模型。Bogardi(1982)建立了风险随机模型,分析涌突水的空间分布特征。毛邦燕等(2010)建立了隧道突水、突泥危险性分级体系。李利平等(2011)动态评价岩溶区隧道勘察、设计、施工各阶段突涌水的危险性。匡星等(2010)构建了岩溶区隧道施工期岩溶突水地

质灾害系统。然而,由于地质、水文条件的差异性,不同隧道诱发涌突水灾害发生的因素差异性大,指标权重区别较大,笔者在对隧道隧址区水文地质情况开展精细调查和分析的基础上,把隧道划分为非可溶岩段和可溶岩段,遵循多元、多层次的分析评价思路,认真分析和选取促发隧道发生涌突水灾害的影响因子和评价指标,分别构建非可溶岩段和可溶岩段隧道涌突水危险性评价体系,以准确评价隧道涌突水危险性,指导工程建设,并为艰险山区铁路岩溶区隧道突涌水灾害分析评价工作提供一定理论基础,具有理论及现实意义。

1 隧道区域地质背景

1.1 地形地貌与水系

该隧道位于昌都地块中部,总体属构造剥蚀高山地貌,山体总体近南北走向,北高南低。隧道进口位于雄厚的芒康山脉中部史曲西岸,出口位于澜沧江东岸。隧道穿越段山体地形地貌总体为两峰夹一谷,两端山体高耸,隧道埋深大,中段雅曲切割,隧道埋深较浅。

隧址区地表水均属澜沧江水系,主要发育4条河流(图1)。其中:澜沧江干流由北向南流经隧道

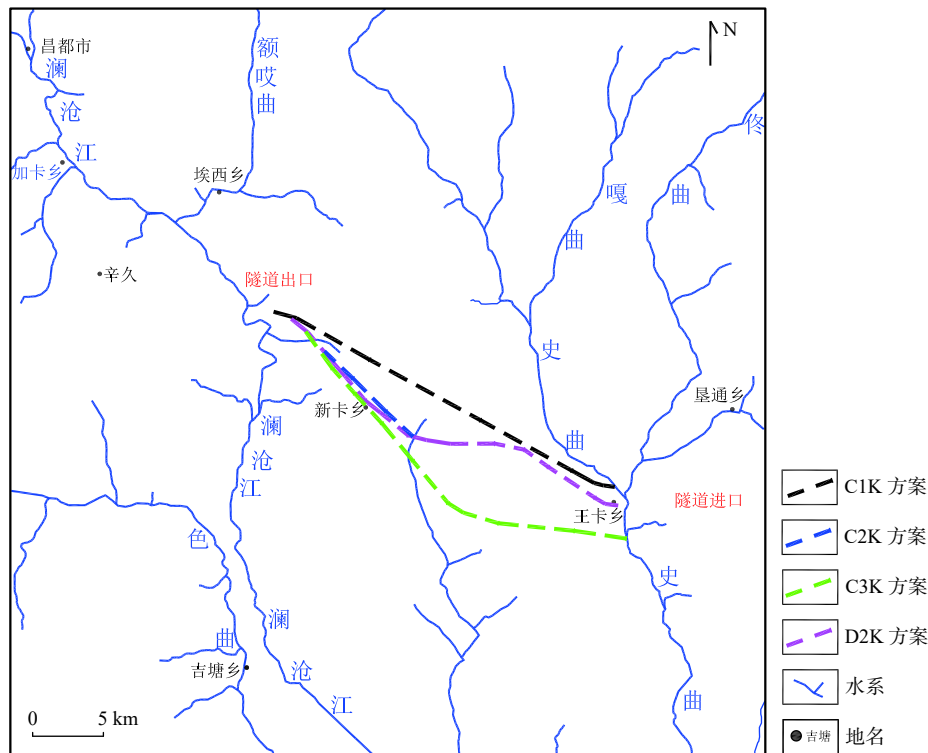


图1 隧址区地形地貌及水系分布图

Fig. 1 Topography, geomorphology, and water system distribution map of the tunnel site area

出口侧,河水面高程约为 3 150~3 160 m;雅曲为澜沧江 2 级支流,由北向南穿过隧道中段上方,隧道上方河水面高程约为 4 200 m,在隧道南侧汇入澜沧江 1 级支流麦曲;史曲为澜沧江 2 级支流,由北向南穿过隧道进口侧,隧道口附近河水面高程约为 3 700 m,在隧道南侧汇入澜沧江 1 级支流麦曲;麦曲位于隧道南侧约 40 km 处,由东向西流经察雅县城,汇入澜沧江,图中河段河水面高程大约为 3 000~3 200 m。

1.2 气象气候

隧址区属于青藏高原温带半湿润区,昼夜温差大,降雨集中,季节分布不均,蒸发量大,相对湿度

小,冬季寒冷漫长。隧址区近 30 年年平均气温为 3.8~5.1℃,年度极端最高气温为 27.2℃,年度极端最低气温为-19.8℃。年平均降水量为 419~423.82 mm。

1.3 地层岩性

隧址区主要出露地层为一套三叠纪—侏罗纪沉积岩(图 2),其中隧址区三叠系波里拉组(T_3b)为一套被额艾顿断裂带破坏的背斜核部地层,地表出露不全,呈 NNW—SSE 向条带状于隧址区中部分布;总体上,该地层为质地较纯的碳酸盐岩夹石膏岩地层,与额艾顿断裂带平行延伸,岩体破碎,地下岩溶发育较为强烈。

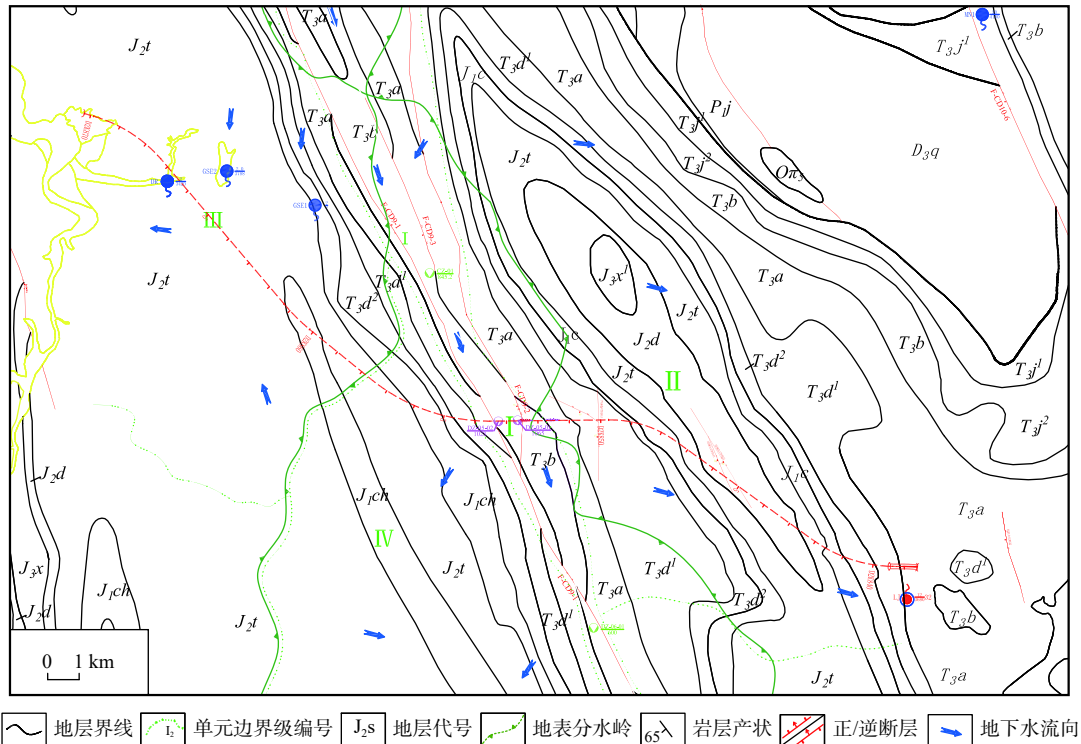


图 2 隧址区地质图

Fig. 2 Geological map of the tunnel site area

1.4 地质构造

隧址区位于昌都地块西部边缘,主要发育额艾顿断裂带。该断裂带主体呈 NW 向 NW 25° 延伸,区域上时而是单条断层,时而发育多条分支断层,断层性质也各不相同。在隧道穿越处,断裂带主要发育 2 条背冲断裂,其中部夹有 1 条较短小的分支断裂。背冲断裂的西侧断层($F_{3.1}$)为额艾顿断裂带的主断层,总体走向 NW 20°~30°,倾向 NE,倾角为 60°~70°,断层破

碎带宽为 60~70 m。背冲断裂的东侧断层(F_3)在隧道南北两侧都切穿波里拉组灰岩,断层倾向 SW 或 NW,断层北段倾角较大约为 75°,南段倾角较缓为约 45°,断层破碎带宽约为 30~80 m;中部分支断裂走向约为 NW 25°,倾向 SW,倾角为 40°~50°,破碎带宽大于 30 m。隧址区沉积岩地层内褶皱较发育,主要包括巴贡向斜、额艾顿背斜、唉曲河向斜、唉曲河背斜、埃西向斜和埃西背斜(图 3)。

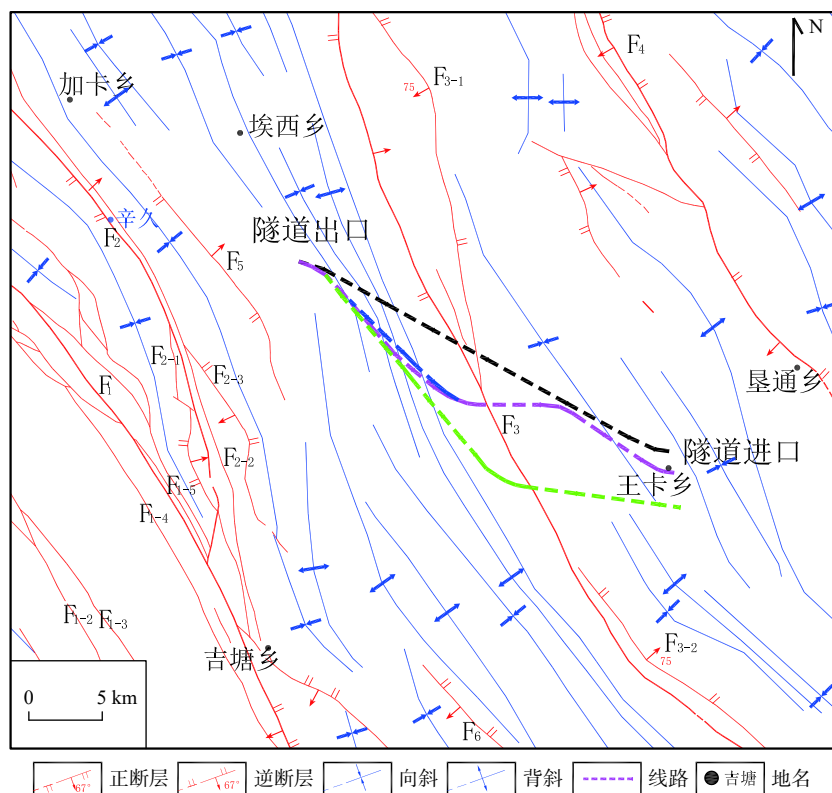


图3 隧址区构造纲要图

Fig. 3 Structural outline map of tunnel site area

2 隧道隧址区岩溶发育特征

隧址区中部地表出露上三叠统波里拉组(T_3b)灰岩,夹石膏岩、角砾状灰岩及泥质灰岩。该地层被额艾顿断裂带围限,或于断层一盘分布,总体呈NNW-SSE向条带延伸。该可溶岩条带NNW-SSE向延伸约60 km,隧道D2K850+470~D2K854+204洞身段将穿越该可溶岩条带(图4),长度约为3 734 m,

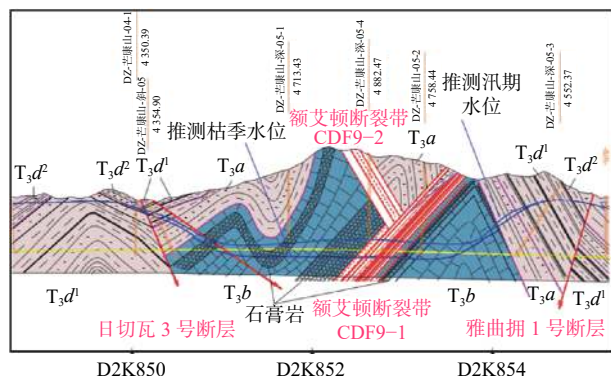


图4 隧道穿越段波里拉组空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of the borila formation in the tunnel crossing section

穿越段轨面高程约为3 743.9~3 801.6 m。

根据隧道实测地质剖面(1:2 000),波里拉组(T_3b)灰岩分布里程为D2K851+765~D2K853+399,岩性为灰色厚层-块状细晶灰岩、灰岩、角砾状灰岩,受额艾顿断裂影响,岩石整体较破碎,剖面上厚度>651.7 m。

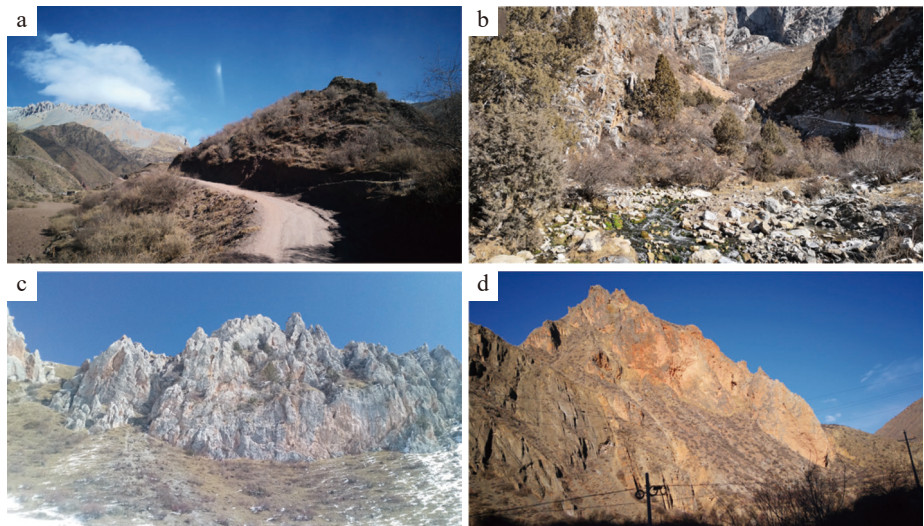
波里拉组主要出露于额艾顿复式背斜核部,并被额艾顿断裂带破坏,断层规模大,厚度可达数百米,岩体破碎,沿断层尚未有溶洞被钻孔揭示,但多为溶蚀破碎带,断层角砾表面溶蚀明显,常见次生泥(水流携带)泥充填,部分断层角砾岩的胶结物已被溶蚀,形成溶孔。断层带是波里拉组灰岩内岩溶发育较强、较深的区段,切穿石膏岩层的断层也是联系石膏岩层顶部及底部灰岩内岩溶地下水的通道(马致远等,1998;王学平等,2010)。

2.1 地表岩溶发育特征

由于波里拉组(T_3b)可溶岩地层抗风化能力较两侧砂、泥岩强,常构成山脊上凸出的石墙及孤峰随山脊蜿蜒延伸,受强烈寒冻风化影响,物理破碎剧烈,化学溶蚀作用较弱,在重力及地表面流作用下,高耸的灰岩山脊以下的坡面上常见碎屑物堆积体(图5)。在地表上看,波里拉组(T_3b)可溶岩条带岩溶发育具有

垂直分带性特征:①一般在 4 500~4 800 m 高程段的突出山脊地带(山顶面),虽寒冻风化作用强烈,常见碎屑坡发育,但仍可见溶沟、溶腔、溶隙、溶孔以及较具规模的溶洞(图 5a、图 5b),表明区内在最早一期夷平作用阶段,岩溶发育较强。② 4 000 m 高程附近(主

夷平面),可见较大规模的溶缝、溶腔及溶洞发育,也有泉点出露(图 5c、图 5d),表明主夷平面形成期,岩溶作用强烈。③在史曲河谷底部(高程约为 3 400 m),虽有索奔大泉出露(高程约为 3 460 m),但岩溶并不发育,多以构造裂隙为主。



a. 波里拉组高耸山脊下(4 500 m 高程)碎屑堆积坡面; b. 江达村地表岩溶地貌(近 4 500 m 高程)
c. 邦迪温泉出露处(4 000 m 高程); d. 隧道南侧索奔大泉处(近 4 000 m 高程)可溶岩地貌

图 5 波里拉组可溶岩条带地表岩溶地貌特征

Fig. 5 Surface karst landform characteristics of soluble rock stripes in the polila formation

2.2 地下岩溶发育特征

根据钻孔所揭示的岩溶发育特征,可将隧址区地下岩溶发育强度分为较强、中等及弱 3 个等级,并统计各级的溶蚀强度特征(表 1)。其中,中等强度溶蚀主要表现为溶蚀破碎带(图 6)和大量发育的陡倾溶蚀裂隙(图 7);弱溶蚀作用主要表现为相对完整的岩体及轻微的溶蚀裂隙及溶孔等。在导水介质上,中等溶蚀作用带主要为松散溶蚀破碎带的孔隙、溶蚀裂隙、溶腔,弱溶蚀作用带则主要为数量较少、轻微溶蚀的裂隙及贯通性较差的溶孔等。中等溶蚀强度带底界高程多为 3 700~3 800 m,而弱溶蚀强度带均未见底(至少 3 500 m 高程以下)。同时,波里拉组(T_3b)内岩

性组合及地质构造也会影响到地下岩溶形态及其发育强度的空间分布。



图 6 波里拉组灰岩的溶蚀破碎带

Fig. 6 The dissolution and fracture zone of the polila formation limestone

表 1 钻孔岩溶发育强度、特征表

Tab. 1 Strength and characteristics of karst development in boreholes

溶蚀强度	岩溶发育特征
较强	孔内见溶洞发育; 导水介质主要为溶洞、溶腔
中等	多为溶蚀破碎带, 岩芯表明发育大量溶孔、溶腔, 裂面锈染、夹泥膜, 局部夹泥层; 主要导水介质为破碎带松散孔隙、溶隙、溶腔, 少部分为溶孔
弱	总体较完整, 多无锈染及泥膜夹层, 偶见溶孔。导水介质主要为发育较少的裂隙、贯通性较差的溶孔

隧道洞身在可溶岩段的穿越高程约为 3 743.9~3 801.6 m。在区域上,该高程段大致处于中等岩溶强度带的底部。但受石膏岩夹层及额艾顿断裂的影响,隧道多数段(褶皱段)实际属于弱-中等溶蚀强度带,在岩溶地下水动力剖面上处于水平径流带上部;少部分断层破碎带属于中等溶蚀强度带,处于水平径流带上部-季节变动带之间。



图7 波里拉组灰岩陡倾溶蚀裂隙

Fig. 7 Steep dip dissolution fractures in the limestone of the polila formation

3 隧道隧址区径流特征

根据地下水的赋存形式和条件,可将隧址区地下水分第四系松散土类孔隙水、碎屑岩的基岩裂隙水和碳酸盐岩裂隙-溶洞水3个类型。

第四系松散土类孔隙水的含水介质主要为粉质黏土,含水性和透水性均较差,是弱含水岩组。

碎屑岩的基岩裂隙水含水岩组主要包括:阿堵拉组(T_3a)、夺盖拉组(T_3d)、察朗噶组(J_1ch)、土脱组(J_2t)和东大桥组(J_2d)。

碳酸盐岩裂隙-溶洞水含水岩组为上三叠统波里拉组(T_3b),其岩性组合特征为亮晶灰岩、含砾屑灰岩(角砾状灰岩)、石膏岩,局部泥(灰)岩。

进一步把隧址区各碎屑岩地层富水等级划分为较弱(或弱-中)和弱。其中:察朗噶组(J_1ch)富水等级较弱(弱-中),地下径流模数为 $1.5\sim 2.0\text{ L/s}\cdot\text{km}^2$;东大桥组(J_2d)、夺盖拉组(T_3d)、阿堵拉组(T_3a)和土脱组(J_2t)富水等级为弱,地下径流模数小于为 $1.0\sim 1.5\text{ L/s}\cdot\text{km}^2$ 。波里拉组灰岩条带为强富水性,地下径流模式为 $6.0\sim 6.5\text{ L/s}\cdot\text{km}^2$ 。

综合考虑含水系统结构、地下水补径排条件、地形地貌等因素,特将隧址区地下水径流系统分为局部表层、浅层和区域深层3大径流系统(图8)。

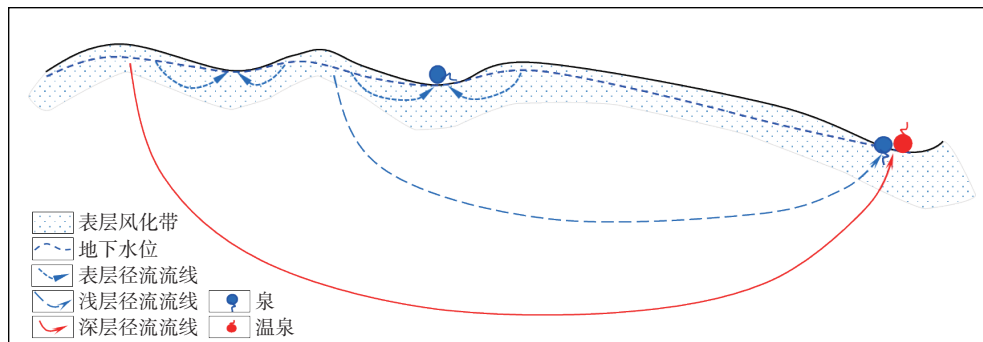


图8 隧址区地下水径流系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of groundwater runoff system in the tunnel site area

3.1 表层径流系统

隧址区表层径流系统主要分布于各中生代碎屑岩表层风化带内,受地层岩性、构造(近南北走向的砂、泥岩互层)控制,各含水岩组导水性能差,补给后的地下水很难向深部运移,多数只能在表层风化带内作短距离的地下径流,具有循环深度浅、径流强度小、径流方向受局部地形控制,以及就近分散排泄于各切沟的特点。一般情况下,表层径流系统影响范围主要位于隧道的浅埋段,对隧道涌突水影响微乎其微。

3.2 浅层径流系统

根据野外水文地质调查,隧址区浅层径流系统主要发育于透水性较强、补给条件较好的波里拉组(T_3b)灰岩条带及察朗噶组(J_1ch)砂岩段内。

(1)波里拉组(T_3b)灰岩条带内的浅层径流系统地下水主要补给于灰岩分布区,而后顺可溶岩地层由北向南做较深的浅层径流,并穿过隧道,集中排泄于史曲右岸索奔一带。因该系统内岩溶发育较强烈,补给区面积广,内部含水介质透水性及富水性强,径流强度大,对隧道涌突水的威胁大。

(2)察朗噶组(J_1ch)中下部主要为一套厚度较大的细-中粒岩屑石英砂岩夹页岩,节理较为发育,裂隙面泥质充填较少,为地下水的活动提供了良好的空间。其中发现3处泉点,2处冷泉,1处温泉,表明灰岩条带西侧察朗噶组砂岩段内存在较深的地下水径流系统,其径流方向多受区域地形影响,由北向南流动,在切割较深的横向沟谷出露地表,但径流强度

不大。

3.3 深层径流系统

隧址区出露 3 处温泉: 邦迪温泉、索奔大泉和渠松温泉。其中, 邦迪温泉和索奔大泉分别出露于波里拉组(T_3b)灰岩条带的西侧和东侧的额艾顿分支断裂附近, 渠松温泉出露于隧道洞身南侧一向斜核部察朗噶组(J_1ch)地层中, 表明隧址区波里拉组灰岩(额艾顿断裂)和察朗噶组内存在地下水的深

部径流系统。邦迪温泉和索奔大泉主要补给于隧道北侧波里拉组灰岩分布区, 入渗补给后的地下水部分进行浅层径流, 部分继续沿断层向深部(超过区域溶蚀基准面)、由北向南运移, 同时因地温梯度增温加热, 产生热对流, 并于隧道洞身南侧史曲处排泄释压(图 9)。因上升过程中被浅层径流稀释、降温, 该径流系统对隧道热害的影响可能不大, 但水量较大。

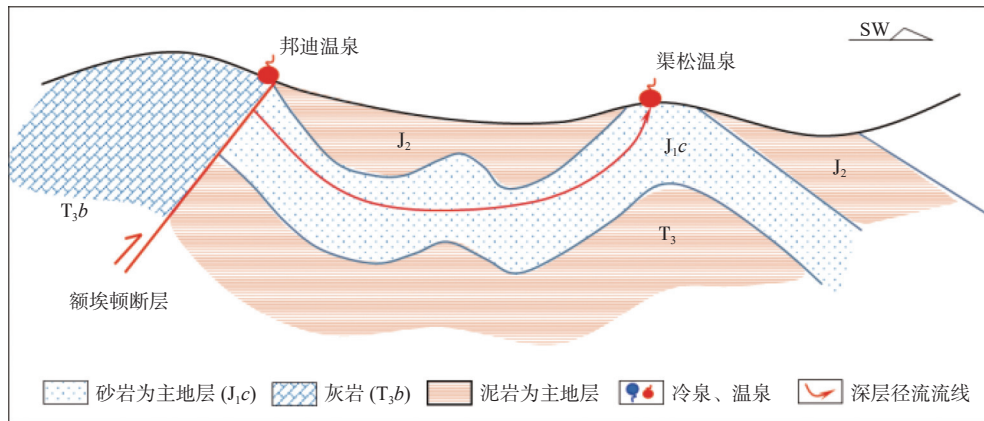


图 9 隧址区砂岩为主的碎屑岩内深层径流系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of deep runoff system in clastic rock dominated by sandstone in tunnel site area

根据隧址区地下含水系统结构特征推测, 渠松温泉地下水补给源主要为西侧灰岩条带内地下水的侧向补给, 补给地点位于邦迪村至嘎亚普巴村一线的额艾顿断裂带西侧分支。此处, 波里拉组灰岩条带通过额艾顿断裂带西侧分支与察朗噶组相接触。受侧向补给的地下水, 顺层向深部运移, 穿过上覆的、复式向斜核部的土脱组(J_2t)地层, 并受地温梯度增温加热, 产生热对流循环, 最后在向斜另一侧的背斜核部出露地表。隧道将多次穿越灰岩条带西侧的察朗噶组地层, 可能面临较大的温泉热害影响, 尤其是穿越复式向斜深部察朗噶组地层时, 可能还面临温泉突水的威胁。

4 隧道隧址区涌突水危险性评价

隧道涌突水受多种因素控制, 其危险性评价应综合考虑多种因素对隧道涌突水的影响, 遵循多元、多层次的分析评价思路, 构建非可溶岩段隧道涌突水危险性评价体系(THR)和可溶岩段隧道涌突水危险性评价体系(THK)(匡星等, 2010; 毛邦燕等, 2010; 沈祥明等, 2010; 李利平等, 2011; 许振浩等, 2011; 罗文艺

等, 2013; 朱珍等, 2015; 徐钟等, 2018)。

4.1 非可溶岩段隧道涌突水危险性评价方法(THR)

在评价非可溶岩隧道涌突水危险性评价中, 根据现场调绘、水文试验数据综合考虑的影响因素有: 岩石的渗透性和力学性质(R_1)、地质构造条件(R_2)、地表汇水条件(R_3)、隧道与地下水位的关系(R_4)和冰川补给(R_5)5 个一级指标, 并对各一级指标进行多层次的划分, 采用 AHP 层次分析法, 构建评价体系(表 2)。

在确定评价指标后, 采用 AHP 确定权重, 得出相应的计算公式为:

$$THR = 5 \times (0.25 \times R_1 + 0.25 \times R_2 + 0.15 \times R_3 + 0.20 \times R_4 + 0.15 \times R_5) \quad (1)$$

其中, 一级指标在二级指标的相互作用下的计算公式为: $R_1 = 0.75 \times R_{11} + 0.25 \times R_{12}$; $R_2 = 0.75 \times R_{21} + 0.25 \times R_{22}$ (断裂和褶皱构造条件)或 $R_2 = 0.7 \times R_{21} + 0.2 \times R_{231} + 0.1 \times R_{232}$ (断裂和单斜储水构造); $R_3 = 0.5 \times R_{31} + 0.5 \times R_{32}$; $R_4 = R_4$ (无二级指标); $R_5 = R_5$ (无二级指标)

最终根据地质类比法, 针对复杂岩溶隧道成熟的施工工艺和被业内认可的风险接受准则, 将非可溶岩隧道涌突水危险性划分为 5 个等级(表 3), 分值越高,

表2 非岩溶隧道涌突水风险性评价体系(THR)

Tab. 2 Risk assessment system for water intrush in non karst tunnels (THR)

岩石的渗透性和力学性质(R_1)	渗透系数(m/d)		> 10	0.1~10	0.01~0.1	< 0.01			
	渗透性分级		强透水	中等透水	弱透水	微透水			
	R_{11} 评分值		18~20	10~18	6~10	0~6			
	岩石力学性质		硬岩	较硬岩-软岩		软岩			
	R_{12} 评分值		14~20	10~14	6~10	0~6			
地质构造(R_2)	断裂构造(R_{21})	破碎带宽(m)		> 50	10~50	5~10	1~5	< 1	
		导水	影响带宽(m)		> 100	20~100	10~20	5~10	< 5
			R_{21} 评分值		18~20	16~18	12~16	8~12	4~8
		阻水	破碎带宽(m)		> 10	5~10	1~5	0.2~1	< 0.2
			影响带宽(m)	> 50	20~50	10~20	5~10	1~5	
	R_{21} 评分值			10~14	6~10	4~6	2~4	0~2	
	褶皱核部(R_{22})	褶皱形态		宽缓型		中缓型		紧闭型	
岩层倾角		< 30°		30°~60°		> 60°			
R_{22} 评分值		0~10		10~16		16~20			
褶皱两翼及单斜地层(R_{23})	岩层厚度(m)		巨厚层		厚层	中厚层	薄层		
			> 1		0.5~1	0.1~0.5	< 0.1		
	R_{231} 评分值		0~2		2~6	6~10	10~12		
	岩层倾角		< 30°		30°~45°	45°~60°	> 60°		
	R_{232} 评分值		0~6		6~10	10~14	14~20		
地表汇水条件(R_3)	地表地貌形态		开口沟谷切割						
			缓坡台地、盆地		陡坡、冰蚀谷	完整斜坡			
	R_{31} 评分值		15~20		10~15	0~10			
	地面坡度		0°~15°		15°~30°	30°~45°			
	R_{32} 评分值		15~20		10~15	5~10			
地下水位(R_4)	隧道位于地下水位以下(m)		0~20	20~100	100~200	200~500	> 500		
	R_4 评分值		18~20	14~18	10~14	6~10	4~6		
冰川补给(R_5)	冰雪覆盖面积(km ²)		0~20	20~50	≥50				
	R_5 评分值		0~12	12~18	18~20				

表3 危险等级划分表

Tab. 3 Hazard level classification table

THR	危险性等级	极高	高	中等	较低	低
	评分	> 77	62~77	38~62	23~38	0~23
	评级	V	IV	III	II	I
	单点最大涌突水量(m ³ /d)	> 10 ⁴	10 ³ ~10 ⁴	10 ² ~10 ³	10~10 ²	< 10

级别越高,灾害的危险程度越高。

4.2 可溶岩段隧道涌突水危险性评价方法(THK)

依据西南山区岩溶隧洞涌突水灾害危险性评价的成果,由岩石的可溶性(K_1)、地质构造因素(K_2)、地表汇水条件(K_3)和隧道所处岩溶分带(K_4)组成了岩溶隧洞涌突水危险性评价的评价指标体系(表4)。

在确定上述评价指标后,采用AHP提取各级影响因素权重,确定其计算公式为:

$$THK_{DG} = 5(0.45K_1 + 0.08K_2 + 0.15K_3 + 0.32K_4) \quad (2)$$

其中,一级指标在二级指标的相互作用下的计算公式为: $627K_1 = 0.75K_{11} + 0.25K_{12}$; $628K_2 = K_2$ (地质构造为断裂或褶皱时);或者 $K_2 = 0.83K_{21} + 0.17K_{22}$ (地质构造为单斜时);

根据计算结果将隧洞涌突水危险性划分为5个等级,分值越高,危险性等级越高,其危险程度越高。

4.3 评价结果

按照上述方法体系,对隧道涌突水危险性进行分段评价,隧道涌突水危险性等级总体以较低危险性为主,总长为25 908 m,约占隧道总长的84%,主要分布于碎屑岩裂隙水含水岩组内;其次为中等危险区,总长为

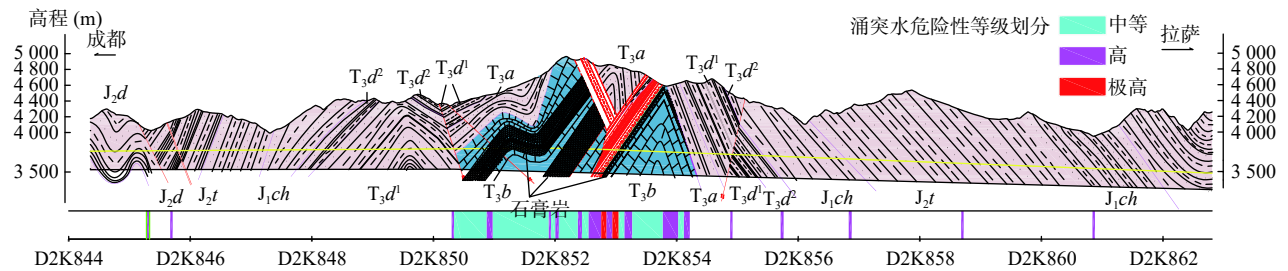
表 4 岩溶隧道涌突水风险性评价体系(THK)

Tab. 4 Risk assessment system for water intrush in karst tunnels (THK)

岩石可溶性 (K_1)	CaCO ₃ 含量(%)	> 75	50~75	25~50	5~25	0~5
	岩石定名	灰岩	白云质灰岩 泥质云灰岩	灰质白云岩 白云岩	泥质灰岩 泥质灰云岩	泥质 白云岩
	K_{11} 评分值	16~20	12~16	8~12	4~8	0~4
	岩石的结构	生物碎屑结构	泥晶结构	粒屑结构	亮晶结构	粗晶结构
	K_{12} 评分值	16~20	12~16	8~12	4~8	0~4
断裂	导水断裂	破碎带宽(m)	> 10	2~10	1~2	0.1~1
		K_2 评分	17~20	14~17	10~14	6~10
	阻水断裂	破碎带宽(m)	> 10	5~10	1~5	0.2~1
		K_3 评分	14~17	10~14	6~10	4~6
地质构造 (K_2)	褶皱形态	宽缓型		中缓型	紧闭型	
	岩层倾角	< 30°		30°~60°	> 60°	
	K_2 评分	0~10		10~16	16~20	
	岩层组合类型	厚层状裂隙-岩溶含水岩组		厚层脉状岩溶-裂隙含水岩组	夹层式层岩-裂隙含水岩组	孔隙-裂隙岩溶含水岩组
单斜	K_{21} 评分	15~20		10~15	4~10	0~4
	岩层倾角	< 15°		15°~30°	30°~45°	45°~60°
	K_{22} 评分	17~20		14~17	10~14	6~10
	K_{23} 评分	16~20		12~16	8~12	4~6
地表环境特征 (K_3)	降雨入渗系数	> 0.7		0.5~0.7	0.3~0.5	0.1~0.3
	K_{31} 评分	16~20		12~16	8~12	4~6
	地面坡度	< 10°		20°~10°	30°~20°	45°~30°
	K_{32} 评分	16~20		12~16	8~12	4~6
隧道岩溶分带 (K_4)	岩溶水垂向分带	垂直渗流带		季节变动带	水平径流带	深部循环带
	K_4 评分	0~6		6~16	14~18	8~12
等级划分	THK值	> 77		62~77	38~62	23~38
	危险性等级	极高危险(V)		高风险(IV)	中等风险(III)	较低风险(II)
	单点涌突水量(m ³ /h)	> 10 ⁴		10 ³ ~10 ⁴	10 ² ~10 ³	10~10 ²

3 483 m, 约占隧道总长的 11%, 主要分布于碎屑岩裂隙水含水岩组中断层破碎带处及隧道浅埋段; 再其次为高危险段, 总长约 1 131 m, 约占隧道总长的 4%, 主

要分布于波里拉组(T_3b)灰岩条带内; 最后为极高危险段, 总长为 183 m, 约占隧道总长的 1%, 分布于波里拉组(T_3b)灰岩+额艾顿断裂带内(图 10)。



带上部;少部分断层破碎带属于中等溶蚀强度带,处于水平径流带上部-季节变动带之间。

(3)隧道隧址区地下水径流系统可分为表层径流系统、浅层径流系统和深层径流系统。表层径流循环深度浅,径流途径短,对隧道影响较小;浅层径流系统和深层径流系统均主要发育于透水性较强、补给条件较好的察朗噶组(J_1ch)中下部砂岩段及波里拉组(T_3b)灰岩条带内。

(4)隧道涌突水问题总体以较低危险性为主,总长为25 908 m,约占隧道总长的84%;而高和极高危险段,总长分别约为1 131 m和183 m,仅约占隧道总长的4%和1%,主要分布于波里拉组灰岩条带和波里拉组灰岩+额艾顿断裂带内。

参考文献(References):

- 匡星,白明洲,王成亮.基于模糊评价方法的隧道岩溶突水地质灾害综合预警方法[J].*公路交通科技*,2010,27(11):100-103.
- KUANG Xing, BAI Mingzhou, WANG Chengliang. Research of Comprehensive Warning of Water Inrush Hazards in Karst Tunnel Based on Fuzzy Evaluation Method[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(11): 100-103.
- 李利平,李术才,陈军,等.基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究[J].*岩石力学与工程学报*,2011,30(7):1345-1355.
- LI Liping, LI Shucai, CHEN Jun, et al. Construction License Mechanism And Its Application Based On Karst Water[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(7): 1345-1355.
- 李术才,周宗青,李利平,等.岩溶隧道突水风险评价理论与方法及工程应用[J].*岩石力学与工程学报*,2013,32(09):1858-1867.
- LI Shucai, ZHOU Zongqing, LI Liping, et al. Theory and method of water inrush risk assessment in karst tunnel and its engineering application[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(09): 1858-1867.
- 罗文艺.岩溶隧道涌水风险评价体系及应用[J].*铁道建筑*,2013,(02):52-56.
- LUO Wenyi. Risk assessment system and application of water gushing in karst tunnel[J]. *Railway Construction*, 2013, (02): 52-56.
- 马致远,刘方.陕西渭北东西部隐伏岩溶地下水的差异[J].*西北地质*,1998,19(01):66-68.
- MA Zhiyuan, LIU Fang. Differences of concealed karst groundwater in eastern and western Weibei of Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 1998, 19(01): 66-68.
- 毛邦燕,许模,蒋良文.隧道岩溶突水、突泥危险性评价初探[J].*中国岩溶*,2010,29(2):183-189.
- MAO Bangyan, XU Mo, JIANG Liangwen. Preliminary study on risk assessment of water and mud inrush in karst tunnel[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(2): 183-189.
- 彭建兵,崔鹏,庄建琦.川藏铁路对工程地质提出的挑战[J].*岩石力学与工程学报*,2020,39(12):2377-2389.
- PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377-2389.
- 沈祥明,刘坡拉,汪继锋.基于层次分析法的铁路岩溶隧道突水风险评价[J].*铁道工程学报*,2010,27(12):56-63.
- SHEN Xiangming, LIU Pola, WANG Jifeng. Evaluation of water-inrush risks of karst tunnel with analytic hierarchy process[J]. *Journal Of Railway Engineering Society*, 2010, 27(12): 56-63.
- 王学平,李稳哲.地质构造对鄂尔多斯盆地南缘岩溶地下水的控制作用[J].*西北地质*,2010,43(03):106-112.
- WANG Xueping, LI Wenzhe. Geological Tectonics Control on the Karstic Water in the South Margin of the Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(03): 106-112.
- 徐钟.复杂岩溶隧道涌突水演化机理及灾害防治研究——以新建叙大铁路为例[D].成都:成都理工大学,2018.
- XU Zhong. Study on the evolution mechanism of water inrush in complex karst tunnels and comprehensive disaster prevention and control - taking the newly-built Xuzhou-Dalian Railway as an example [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- 许振浩,李术才,李利平,等.基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J].*岩土力学*,2011,32(6):1757-1765.
- XU Zhenhao, LI Shucai, LI Liping, et al. Risk assessment of water or mud inrush of karst tunnels based on analytic hierarchy process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(6): 1757-1765.
- 赵勇,石少帅,田四明,等.CZ铁路雅安至林芝段隧道建造面临的主要工程技术难题与对策建议[J].*隧道建设*,2021,41(07):1079-1090.
- ZHAO Yong, SHI Shaoshuai, TIAN Siming, et al. Technical Difficulties and Countermeasure Suggestions in Tunnel Construction of Ya'an-Linzi Section of Sichuan-Tibet Railway[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(07): 1079-1090.
- 周宗青,李术才,李利平,等.岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J].*岩土力学*,2013,34(03):818-826.
- ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Attribute identification model and its engineering application for risk assessment of water inrush in karst tunnels[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2013, 34(03): 818-826.
- 朱珍,王旭春,袁永才,等.基于加权平均法的岩溶隧道突涌水风险评估[J].*公路工程*,2015,40(6):51-54.
- ZHU Zhen, WANG Xuchun, YUAN Yongcai, et al. Risk Assessment of Water Inrush in Karst Tunnels Based on Weighted Average Method[J]. *Highway Engineering*, 2015, 40(6): 51-54.
- Bogardi I. 1982. Bayesian Analysis of Underground Flooding[J]. *Water Resources Research*, 18(04): 1110-1116.