

文章编号: 1674—8247(2022)02—0037—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.02.007

藏东南某隧道水文地质特征及突涌水危险性评价

邹远华 王朋 周航 宋章 徐正宣

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:某铁路隧道位于印度板块与欧亚板块大规模碰撞而隆升的青藏高原东南方,区域地质构造作用强烈,水文地质条件复杂,隧道突涌水成为制约隧道勘察设计和施工的重大难题。通过现场水文地质调查、理论分析计算等方法相结合,对工程区水文地质条件及主要水文地质问题进行了详细的研究、分析和评价。研究表明:(1)藏东南某隧道波里拉组(T_3b)灰岩段多为强富水性,察朗噶组(J_1ch)和甲丕拉组(T_3j)为弱—中等富水性,阿堵拉组(T_3a)、夺盖拉组(T_3d)和土脱组(J_2t)为弱富水性;(2)隧道波里拉组(T_3b)岩溶垂向分带特征较明显,其中3 700~3 900 m高程段岩溶较发育;(3)隧道全长20 247 m,极高危险段654 m,位于波里拉组灰岩中段水平径流带内和阿托卡巴断层处,占比3.23%;高危险段670 m,分布于波里拉组灰岩条带两侧与碎屑岩的接触带附近,占比3.31%。本文研究成果对类似地质条件下的岩溶地区高压富水隧道选线、设计和施工具有一定的参考价值。

关键词:藏东南;隧道;突涌水;危险性评价

中图分类号:U452.1⁺1 **文献标志码:**A

37

Hydrogeological Characteristics of A Tunnel in Southeastern Tibet and Risk Assessment of Water Burst

ZOU Yuanhua WANG Peng ZHOU Hang SONG Zhang XU Zhengxuan

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: A railway tunnel is located in the southeast of the Qinghai-Tibet Plateau, which is uplifted due to the large-scale collision between the Indian Plate and the Eurasian Plate. The regional geological tectonism is strong and the hydrogeological conditions are complex. The water burst in the tunnel has become a major difficulty restricting the survey, design, and construction of the tunnel. Through the combination of on-site hydrogeological investigation, theoretical analysis and calculation, the hydrogeological conditions and main hydrogeological problems in the project area are studied, analyzed, and evaluated in detail. The findings suggest: (1) The limestone section of Bolila Formation (T_3b) in a tunnel in southeastern Tibet is mostly strongly water-rich, the Chalangga Formation (J_1ch) and the Jiapila Formation (T_3j) are weakly-moderately water-rich, and the Adula Formation (T_3a), the Duogaila Formation (T_3d) and the Tutuo Formation (J_2t) are weakly water-rich. (2) The vertical zoning characteristics of karst in the Bolila Formation (T_3b) of the tunnel are obvious, and the karst is relatively developed at the elevation of 3 700~3 900 m. (3) The total length of the tunnel is 20 247 m, and the extremely high dangerous section is 654 m, which is located in the horizontal runoff zone of the middle section of the limestone of the Bolila Formation and the Atuokaba Fault, accounting for

收稿日期:2021-12-16

作者简介:邹远华(1973-),男,高级工程师。

引文格式:邹远华,王朋,周航,等.藏东南某隧道水文地质特征及突涌水危险性评价[J].高速铁路技术,2022,13(2):37-42.

ZOU Yuanhua, WANG Peng, ZHOU Hang, et al. Hydrogeological Characteristics of A Tunnel in Southeastern Tibet and Risk Assessment of Water Burst[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2):37-42.

3.23%; the high-risk section is 670 m long, distributed near the contact zone between both sides of the limestone strip of the Bolila Formation and the clastic rock, accounting for 3.31%. The research results of this paper have a certain reference value for the route selection, design, and construction of high-pressure water-rich tunnels in karst areas under similar geological conditions.

Key words: southeastern Tibet; tunnel; water burst; risk assessment

随着我国铁路网络建设重心的逐步西移,涌现出一大批复杂艰险山区铁路,这些铁路区域地质构造作用强烈,水文地质条件异常复杂,隧道突涌水成为山区铁路隧道勘察设计和施工中最具危害性的地质灾害之一^[1-2]。据施工现场统计,因隧道突涌水灾害造成的重大安全事故高达80%,这不仅会给隧道施工带来困难,造成严重的工期延误和经济损失,甚至会诱发水资源枯竭、引起地表塌陷等环境地质灾害,造成人员伤亡,威胁到社会稳定与经济发展^[3-4]。例如,渝怀铁路圆梁山隧道在施工中发生70余次突涌水事故,突水量达6 900 m³/h,造成9人伤亡及严重的工期延误^[5];宜万铁路野三关隧道多次发生大型突涌水事故,隧道最大涌水量达30万m³/h,造成10人死亡^[6]。因此,进行深埋隧道水文地质特征及突涌水危险性评价研究,对复杂山区铁路前期勘察选线设计、后期施工及支护结构设计都具有非常重要的工程实际意义。

藏东南某隧道位于昌都一思茅地块中部,主要发育母诺向斜、王卡乡背斜及沿母诺向斜核部附近发育的妥坝断裂带,区内构造作用强烈。王卡乡背斜核部出露三叠系波里拉组灰岩,地表常见溶洞、溶腔等大型岩溶形态。隧道南侧的灰岩出露区有大量温泉出露,显示王卡乡背斜内波里拉组碳酸盐岩地层赋存有较为丰富的深循环地下水,可能造成严重的涌突水灾害。因此,本文立足于我国复杂山区隧道建设,以藏东南某隧道为工程依托,通过研究分析隧道地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质特征等,分析岩溶发育程度和

岩溶发育规律,根据岩溶水补径排条件,进行水文地质单位划分。在此基础上,开展隧道突涌水危险性综合评价,以期类似工程地质条件下的深埋长大隧道突涌水防治提供科学依据。

1 隧道工程地质概况

本文研究的铁路东起于成都铁路枢纽,西至拉萨市,途经四川省雅安市、泸定县、康定市,西藏自治区昌都市、波密市、林芝市,初步规划线路全长1 567 km^[7-8]。研究隧道位于青藏高原东南方,进口位于扩达乡乡府北侧卡曲右岸半山坡上,向西穿越母诺山南侧,出口位于王卡乡乡府南侧史曲右岸。

1.1 地形地貌

此隧道位于青藏高原东部山原区的横断山脉北端中西部,隧道全长2 024.7 m,最大埋深约1 113 m,属于典型深埋长大隧道。区域地形地貌受区内地层及构造控制,具有构造剥蚀地貌的显著特征。工程区主要为斜坡沟谷地形,地形起伏落差较大,隧道地面标高3 655~5 045 m,最大相对高差1 390 m,自然坡度一般10°~65°,局部为陡壁,为典型高山峡谷地貌特征的藏东南谷地。

1.2 地层岩性

隧道地质纵断面如图1所示,工程区岩性复杂,地层单元属唐古拉横断山地层区昌都分区,主要包括古生界和中生界地层。其中泥盆系、石炭系及下二叠统以碳酸盐岩为主;上二叠统以砂岩、含有机质的泥页岩

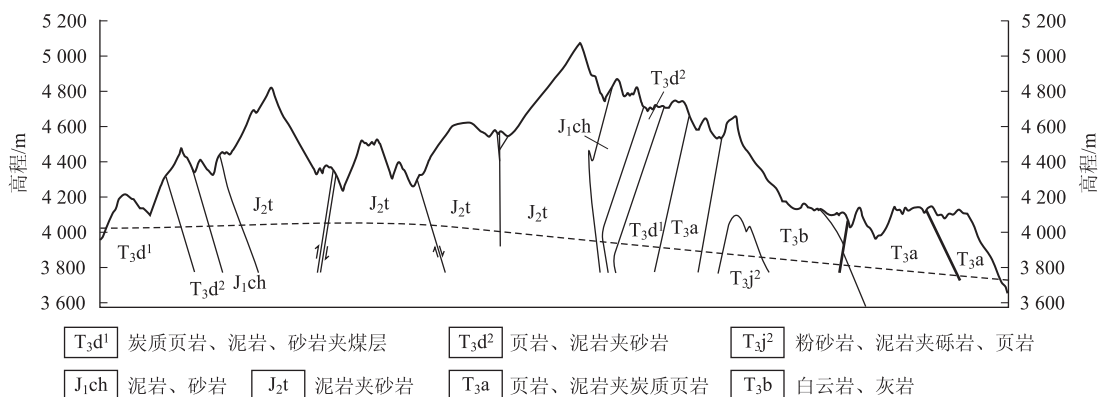


图1 藏东南某隧道地质纵断面图

和煤层为主;上二叠统底部及下三叠统以基性-酸性火山岩为主,夹少量砂页岩;上三叠统至侏罗系主要以砂泥岩夹灰岩为主;上三叠统波里拉组(T_3b)为质地较纯的灰岩、白云岩,是工程区主要的地下水赋存地层。

1.3 地质构造

隧道位于昌都地块中部,东、西两侧分别为金沙江和澜沧江结合带,受印支期东、西两侧双向俯冲挤压,昌都地块内部自侏罗纪起便形成狭长的近南北向中-新生代的沉积盆地。后经持续挤压,沉积盆地产生大量的对冲(和背冲)断裂组合及褶皱,沉积盆地下部老地层抬升剥蚀出露,塑造了工程区区域构造及地层展布格局。隧道工程区穿越多条断层破碎带,区域地质构造作用强烈。

1.4 水文地质特征

隧道工程区各地表径流均属澜沧江水系,地表水系较为发育。隧道前段的向斜地貌区,勇曲次级支流主要沿构造线发育,而在隧道后段的背斜地貌区,史曲次级支流多横穿构造线发育。隧道工程区地下水类型较为齐全,根据工程区水文地质条件,以及赋存运移地

下水的岩石类型、地下水动力特征以及储水空间类型,可将工程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。结合区域地质资料、各含水介质的岩性特征及地下水赋存条件可知,第四系松散土层主要为弱富水性,泥页岩夹砂岩、砂岩夹页岩和砂、泥岩互层等碎屑岩主要为弱富水性和中等富水性,灰岩、白云岩等碳酸盐岩属强富水性。

2 岩溶发育特征

2.1 岩溶发育程度

隧道出口端及其北侧有条带状或岛状出露有上三叠统波里拉组(T_3b)碳酸盐岩,质地较纯。在3 700~3 900 m高程段,灰岩条带多被史曲、勇曲及其各级支流切割,常见规模不等的地下岩溶形态发育,如溶洞、溶腔及显著溶蚀张开的溶隙等。综合分析可知,较具规模的地下岩溶形态多分布在隧道北侧,一般高于河水面(河水面高程约3 780 m),无水或少量渗水,如图2(a)所示;在隧道南侧的勇曲河谷多与河面齐平(高程约3 689 m),可见水流,如图2(b)所示。



(a) 隧道北侧王卡乡东荣学北岸溶洞



(b) 隧道南侧勇曲北岸溶缝形态

图2 藏东南某隧道岩溶发育程度图

结合现场地质调查,波里拉组(T_3b)灰岩段多为强富水性,循环深度及径流量大,隧道涌突水风险高;察朗噶组(J_1ch)和甲丕拉组(T_3j)为弱-中等富水性,地下水在其砂岩段内进行较深的循环,但径流强度较小,局部可能赋存承压水;阿堵拉组(T_3a)、夺盖拉组(T_3d)和土脱组(J_2t)为弱富水性,以表层风化卸荷带内的表层径流为主,循环深度浅,对隧道影响较小。

2.2 岩溶发育规律

隧道出口端所处的王卡乡背斜两翼(或核部)出露有上三叠统波里拉组(T_3b)较纯的灰岩、白云岩。受背斜枢纽起伏影响,该可溶岩段在工程区姆多隆以北呈环形条带状分布,在姆多隆以南的工程区呈不连续岛状出露,多数被上覆阿堵拉组碎屑岩地层覆盖。根据现场调查,4 300 m以上高程段,寒冻风化作用强烈,地表岩溶迹象不明显;3 900~4 300 m高程段,多

顺层发育溶蚀裂隙,岩溶不发育;3 700~3 900 m高程段,地表发育石芽、溶沟,地下发育较大规模的溶洞和溶腔等,岩溶较发育;3 700 m高程以下段,岩溶发育相对较弱,多以(溶蚀)裂隙及小溶孔为主,但其中赋存较为丰富的地下水。这些较大规模溶洞、溶腔的发育多受构造及岸坡卸荷作用控制,在隧道北侧的东荣学南、北两岸分别发育沿王卡乡背斜核部纵张裂隙及岸坡卸荷带发育的大型溶洞、溶腔,分布高程约3 750~3 760 m之间。

3 岩溶水系统

3.1 地下水类型及其含水岩组特征

隧道工程区各地表径流均属澜沧江水系,地表水系较为发育。隧道前段的向斜地貌区,勇曲次级支流主要沿构造线发育,而在隧道后段的背斜地貌区,史曲

次级支流多横穿构造线发育。隧道工程区地表出露的地层主要有土拖组(J₂t)、查朗嘎组(J₁ch)、夺盖拉组(T₃d)、阿堵拉组(T₃a)、波里拉组(T₃b)、甲丕拉组(T₃j)。此外,在地表坡面、坡麓、地势低洼处和河谷地区等还覆盖第四系松散堆积层,按成因主要分为全新统滑坡堆积层(Q₄^{del})粉质黏土,冲洪积层(Q₄^{al+pl})砂砾石土和坡残积层(Q₄^{dl+el})粉质黏土。由于上述各组地层的岩性及其组合特征不同,地下水的赋存形式和条件也不相同。根据地下水的赋存形式和条件,可将工程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 种类型,其含水岩组特征如表 1 所示。

表 1 隧道含水岩组特征统计结果表

地下水类型	含水岩组		岩性特征	富水等级	空间分布
	名称	代号			
第四系松散土类孔隙水	滑坡堆积	Q ₄ ^{del}	粉质黏土	弱	进、出口两侧坡面,对隧道涌水影响不大
	冲洪积	Q ₄ ^{al+pl}	砂砾石土	中	进出口河谷,对隧道涌水无影响
	坡残积层	Q ₄ ^{el}	粉质黏土	弱	洞身低洼处,对隧道涌水影响不大
碎屑岩裂隙水	土拖组	J ₂ t	粘土岩夹石英砂岩,偶夹灰岩	弱	母诺向斜核部,隧道东段
	查朗嘎组	J ₁ ch	岩屑石英细砂岩与泥页岩互层	中	母诺向斜两翼,隧道进口及中部
	夺盖拉组	T ₃ d ²	粘土岩与粉砂质石英砂岩互层	弱	母诺向斜两翼,隧道进口及中部
		T ₃ d ¹	泥页岩及石英砂岩及煤层、煤线	弱	
	阿堵拉组	T ₃ a	石英砂岩与页岩互层	弱	王卡乡背斜南延段核部,隧道西段
	甲丕拉组	T ₃ j ²	粗-细粒石英砂岩夹页岩、灰岩	中	工程区北部,王卡乡背斜北段两翼,对隧道涌水无影响
		T ₃ j ¹	中-粗粒砂岩与砾岩互层夹页岩	中	
	卡香达组	P ₂ k	炭质页岩、粉砂岩夹薄层泥灰岩	弱	工程区北部高山,对隧道涌水无影响
	妥坝组	P ₂ t ²	页岩夹粉砂岩夹薄层煤层	弱	工程区北部高山,对隧道涌水无影响
		P ₂ t ¹	上部:石英砂岩夹页岩,下部:含凝灰质砂岩、砾岩	中	
碳酸盐岩裂隙-溶洞水	波里拉组	T ₃ b	砂屑、砾屑灰岩、白云岩	强	隧道西段及工程区北侧,岩溶涌突水
	里查群	C ₃ lc	灰岩夹少量钙质页岩	强	工程区北侧,对隧道涌突水无影响
	羌格组	D ₃ q	微晶灰岩、鲕粒灰岩夹泥灰岩	强	工程区北侧,对隧道涌突水影响不大

3.2 岩溶水补径排条件

隧道工程区的深层径流主要发育于波里拉组灰岩条带内,受王卡乡背斜构造形变及地形切割影响,背斜北段波里拉组灰岩条带呈环状条带分布,向南因背斜枢纽起伏多次被阿堵拉组覆盖。据调查、测流分析,该灰岩条带内地下水主要排泄点有罗江温泉、娘曲温泉及勇曲灰岩段右岸的泄流排泄,根据径流总量及汇水面积的匹配关系推测,该深层径流系统的补给范围可达东荣学以北的波里拉组环形条带展布区。地下水在背斜北段的波里拉组灰岩出露区接受补给后,顺灰岩条带向深部、向南部径流,穿过东荣学、姆多隆(地表无泉点出露)及上覆的阿堵拉组直至罗江村及娘曲村附近排泄,由于在径流过程

中受地温加热,泉水温度较高,罗江温泉水温 24°,娘曲温泉水温 32°,并在背斜南段灰岩出露区继续接受补给,向南穿过阿堵拉组,在宗多村一带以线状泄流形式排泄于勇曲。

3.3 岩溶水文地质单元划分

岩溶水文地质单元是根据地层岩性、地质构造、地形地貌、可溶岩与非可溶岩的接触关系及空间展布特征、气象和水文等条件的差异性,将工程区划分为若干单元。每个单元的地下水类型、赋水特征及运移规律相同或相似,具备相对独立的边界和补给、径流及排泄条件。根据岩溶水文地质单元划分依据,结合野外调查情况,将此隧道地下水系统划分为 4 个主要水文地质单元,如表 2 所示。

表 2 隧道水文地质单元特征统计表

单元编号	含水介质类型及含水系统结构	边界类型	面积/km ²	径流模数/(L/S·km ²)	排泄区高程/m
I	以弱富水的泥页岩夹砂岩的风化裂隙为主,少量中等富水性的砂岩夹泥岩的构造裂隙;向斜中段	地质边界、地形边界和地表水体(勇曲,排泄边界)	88.35	0.42 (弱富水性)	3 785 ~ 3 988
II	以弱富水的泥页岩夹砂岩的风化裂隙为主,少量中等富水性的砂岩夹泥岩的构造裂隙;向斜仰起端	主要以地形边界为主,地表水体(姆多隆,排泄边界)	114.57	0.42 ~ 1 (弱富水性)	3 995 ~ 3 945
III	强富水的波里拉组灰岩裂隙-溶隙为主,王卡乡背斜两翼及核部	地质边界,地表水体(勇曲,排泄边界)	188.77	9.1 (强富水性)	3 711 ~ 3 691
IV	以强富水的碳酸盐岩裂隙-溶隙和中等富水性的碎屑岩裂隙为主	地质边界,地表水体(排泄边界)	325.26	中等富水性	-

4 隧道涌突水危险性分析

4.1 隧道突涌水危险性评价

隧道突涌水受多种因素的影响,通过结合铁路深埋长大隧道地质资料以及前人学者的研究成果^[9-10],选择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 个一级指标构建突涌水危险性评价体系。根据以往地质灾害危险性评价的成熟经验,借鉴目前复杂岩溶隧道的施工技术和被工程界普遍接受的风险接受准则,将非可溶岩隧道涌突水危险性划分为 5 个等级(如表 3 所示):极高危险(V)、高危险(IV)、中等危险(III)、较低危险低(II)

和低危险(I),分值满分设置为 100 分,5 个等级所对应的 THR 分值依次为 >77、62~77、38~62、23~38、0~23,分值越高,级别越高,突涌水灾害的危险程度越高。

表 3 危险等级划分表

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
单点最大涌水量(m^3/d)		>10 ⁴	10 ³ ~10 ⁴	10 ² ~10 ³	10~10 ²	<10

根据隧道所穿越的地层岩性、地质构造及地貌、水系等地质、水文条件,将隧道分为 19 个区段进行突涌水危险性评价,结果如表 4 所示。

表 4 隧道突涌水危险性评价结果表

序号	里程段			地质条件			THR	危险性等级
	起点	终点	长度/m	地层	岩性	构造		
1	DK 818+340	DK 818+440	100	T ₃ d ¹	炭质页岩、砂岩夹煤层	单斜	18.0	低危险区
2	DK 818+440	DK 820+098	1 658	T ₃ d ¹	炭质页岩、砂岩夹煤层	单斜	37.3	较低危险区
3	DK 820+098	DK 820+677	579	T ₃ d ²	泥岩、炭质页岩、砂岩夹煤层	单斜	31.6	较低危险区
4	DK 820+677	DK 821+406	729	J ₁ c	砂岩、泥岩	单斜	37.3	较低危险区
5	DK 821+406	DK 823+293	1 887	J ₂ t	泥岩及砂岩	单斜	32.6	较低危险区
6	DK 823+293	DK 823+362	69	—	妥坝断裂带	断层	51.0	中等危险区
7	DK 823+362	DK 823+969	607	J ₂ t	泥岩及砂岩	单斜	36.1	较低危险区
8	DK 823+969	DK 829+594	5 625	J ₁ c	砂岩、泥岩,2 条断层	褶皱	38.0	较低危险区
9	DK 829+594	DK 831+817	2 223	T ₃ a、T ₃ d	泥岩及砂岩	单斜	33.3	较低危险区
10	DK 831+817	DK 832+316	499	T ₃ b	灰岩、白云岩	单斜	71.0	高危险区
11	DK 832+316	DK 833+190	874	T ₃ j	砂岩、砾岩夹泥岩	背斜	42.4	中等危险区
12	DK 833+190	DK 834+340	1 150	T ₃ b	灰岩、白云岩(季节变动带)	单斜	57.0	中等危险区
13	DK 834+340	DK 834+972	632	T ₃ b	灰岩、白云岩	单斜	79.0	极高危险区
14	DK 834+972	DK 834+994	22	T ₃ b	阿托卡巴断层	断层	83.0	极高危险区
15	DK 834+994	DK 835+165	171	T ₃ b	灰岩、白云岩	单斜	74.0	高危险区
16	DK 835+165	DK 837+625	2 460	T ₃ a	泥岩夹炭质页岩、砂岩	单斜	37.7	较低危险区
17	DK 837+625	DK 837+651	26	—	红拉山 2 断层	断层	56.9	中等危险区
18	DK 837+651	DK 838+535	884	T ₃ a	泥岩夹炭质页岩、砂岩	单斜	32.8	较低危险区
19	DK 838+535	DK 838+587	52	T ₃ a	泥岩夹炭质页岩、砂岩	单斜	19.1	低危险区

4.2 隧道突涌水风险综合分析

本文充分考虑隧道工程区的地质构造、地层特征、岩性、水文分区特征,并结合隧道涌水量评价以突涌水危险性分区等级研究,综合确定隧道工程区危险性等级划分长度及占比,如图 3 所示。隧道全长 20 247 m,突涌水危险性等级总体以低—较低危险性为主,总长 16 804 m,约占隧道总长的 83%;中等危险区总长 2 119 m,约占隧道总长的 10.5%;高危险段总长 670 m,约占隧道总长的 3.3%,分布于波里拉组灰岩条带两侧与碎屑岩的接触带附近;极高危险段总长 654 m,约占隧道总长的 3.2%,分布于波里拉组灰岩中段水平径流带内及阿托卡巴断层处。

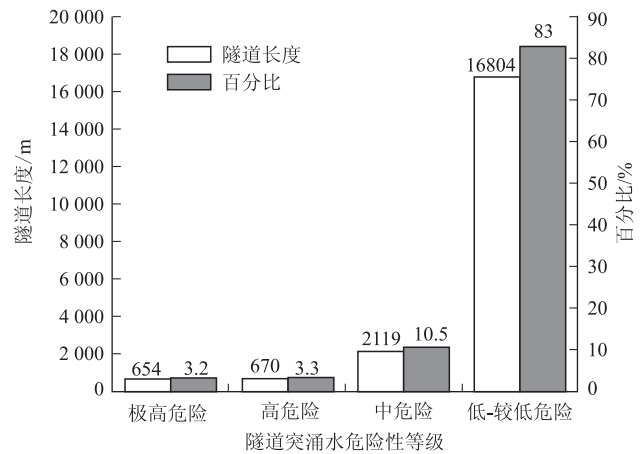


图 3 藏东南某隧道危险性等级划分长度及占比图

5 结论

本文通过对某铁路隧道地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质等条件的研究,分析了岩溶发育程度和岩溶发育规律。根据岩溶水补径排条件,进行了水文地质单元的划分;并在水文地质分区的基础上,进行了隧道涌水量预测和隧道涌突水危险性评价。得出结论如下:

(1)隧道波里拉组(T_3b)灰岩段多为强富水性,察朗噶组(J_1ch)和甲丕拉组(T_3j)为弱-中等富水性,阿堵拉组(T_3a)、夺盖拉组(T_3d)和土脱组(J_2t)为弱富水性。

(2)隧道岩溶垂向分带特征较明显,其中4 300 m以上高程段,寒冻风化强烈,地表岩溶迹象不明显;3 900~4 300 m高程段,岩溶弱发育,多顺层发育溶蚀裂隙;3 700~3 900 m高程段,受控背斜纵张裂隙及河谷岸坡卸荷作用,岩溶较发育。

(3)隧道全长20 247 m,低-较低危险性区长度16 804 m,约占隧道总长的83%;中等危险区长度2 119 m,约占隧道总长的11%;高危险区长度670 m,约占隧道总长的3%,分布于波里拉组灰岩条带两侧与碎屑岩的接触带附近;极高危险区长度654 m,约占隧道总长的3%,分布于波里拉组灰岩中段水平径流带内及阿托卡巴断层处。

参考文献:

- [1] 李术才,许振浩,黄鑫,等.隧道突水突泥致灾构造分类、地质识别、孕灾模式与典型案例[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069.
LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, et al. Classification, Geological Identification, Hazard Mode and Typical Case Studies of Hazard-Causing Structures for Water and Mud Inrush in Tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [2] 王朋,宋章,张广泽,等.CZ铁路隧道重难点地质问题及减灾防治对策[J].铁道工程学报,2020,37(12):89-94.
WANG Peng, SONG Zhang, ZHANG Guangze, et al. Important and Difficult Geological Problems of Tunnel and Its Disaster Reduction and Prevention Measures for CZ Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(12): 89-94.
- [3] 周毅.隧道充填型管道构造突涌水机理与预测预警及工程应用[D].济南:山东大学,2015.
ZHOU Yi. Study on Water Inrush Mechanism and Early Warning of Filled Piping-Type Disaster and Its Engineering Applications in Tunnels[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [4] 许增光,王亚萍,肖瑜,等.长深隧洞突涌水危险性等级指标及评价方法[J].中国公路学报,2018,31(10):91-100.
XU Zengguang, WANG Yaping, XIAO Yu, et al. Risk Rating Index and Evaluation Method for Water Inrush in Long-Deep Tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 91-100.
- [5] 刘招伟,何满潮,王树仁.圆梁山隧道岩溶突水机理及防治对策研究[J].岩土力学,2006,27(2):228-232.
LIU Zhaowei, HE Manchao, WANG Shuren. Study on Karst Waterburst Mechanism and Prevention Countermeasures in Yuanliangshan Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 228-232.
- [6] 郭立,万军伟,陈刚,等.宜万铁路野三关隧道“8.5”突水事故成因分析[J].中国岩溶,2009,28(2):212-218.
WU Li, WAN Junwei, CHEN Gang, et al. Cause of the “8.5” Water Burst Incident at Yesanguan Tunnel along the Yi-Wan Railway[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(2): 212-218.
- [7] 周航,陈仕阔,张广泽,等.基于功效系数法和地应力场反演的深埋长大隧道岩爆预测研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1386-1396.
ZHOU Hang, CHEN Shikuo, ZHANG Guangze, et al. Efficiency Coefficient Method and Ground Stress Field Inversion for Rockburst Prediction in Deep and Long Tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1386-1396.
- [8] 陈仕阔,周航,廖昕,等.川藏铁路高地应力隧道减灾选线[J].地球科学,2022,47(3):803-817.
CHEN Shikuo, ZHOU Hang, LIAO Xin, et al. Line Selection for Disaster Reduction of High Geostress Tunnel on the Sichuan Tibet Railway[J]. Earth Science, 2022, 47(3): 803-817.
- [9] 徐正宣,彭芬.方斗山隧道岩溶水文地质条件及危险性研究[J].高速铁路技术,2017,8(4):28-33.
XU Zhengxuan, PENG Fen. Karst Hydrogeology and Risk Research on Fangdoushan Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(4): 28-33.
- [10] 陈明浩,邓宏科,张广泽,等.昭通隧道岩溶水文地质特征及突涌水危险性评价[J].高速铁路技术,2020,11(6):34-39.
CHEN Minghao, DENG Hongke, ZHANG Guangze, et al. Analysis of Karst Hydrogeological Characteristics and Risk Assessment of Water Inrush for the Zhaotong Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 34-39.