

田祖涛,张俊.花梨隧道岩溶水文地质条件及危险性评估[J].中国岩溶,2019,38(4):552-558.
DOI:10.11932/karst20190412

花梨隧道岩溶水文地质条件及危险性评估

田祖涛,张俊

(中铁二院工程集团有限责任公司,成都 610031)

摘要:花梨隧道是瓮开高速的控制性工程,其地质构造及岩溶水文地质条件较为复杂。采取现场地质调查、钻探、测量、室内岩土物理力学指标试验、电法物探等综合勘察手段,分析花梨隧道含水层岩性组合特征、可溶岩体系分布特征及岩溶水系统性,查清了其岩溶水文地质条件,并对涌突水危险性进行了分级评价。结果表明:(1)花梨隧道地表出露的可溶岩与非可溶岩,分为泥质粉砂岩组成的非可溶岩与灰岩组成的可溶岩两个体系;(2)花梨隧道预测正常涌水量为 $32\ 126.4\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,隧道最大涌水量应按预测涌水量的2~6倍考虑;(3)花梨隧道可溶岩段内岩溶涌突水危险性总体为中等危险,其中极高危险段占总长度的16%。

关键词:花梨隧道;水文地质;涌水量;危险性分级

中图分类号:U452.1 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)04-0552-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

针对高速铁路岩溶区隧道涌水、突泥,大型溶洞,岩溶塌陷等工程地质问题^[1-2],一方面,隧道涌水量的准确预测显得尤为重要。在隧道涌水量预测方法上应用较多的有降水入渗法、简易水均衡法、地下水动力学法以及基于裘布依稳定井流理论导出的各种解析公式等,以及地下水数值模拟技术^[3-5]。但实际应用中由于水文地质条件的复杂性,如何选取合适的涌水量预测方法仍是难题。而另一方面,复杂岩溶区高速公路主要灾害风险评估体系的研究益日渐成熟。何山及周轮等^[6-7]综合采用TSP超前预报系统和地质雷达较为精确地预报了岩溶区隧道的破碎带发育情况,红外探水基本可预报裂隙含水情况。杨培丰及张志成^[8-9]等利用层次分析法、灰色关系分析法和集对理论建立了深长隧道涌突水灾害危险性评价模型并划定危险性等级。雷军及叶志华^[10-11]研究了在岩溶突水地质灾害危险性评价中利用综合分

析法确定影响因子的权重,根据指数确定危险性等级。陈紫云等^[12]建立水文地质模型,对地下水、地表水的补径排关系和渗流场特征,及岩溶空间展布特征展开分析研究,从定性到半定量地预测评估了隧道涌水危险性。目前对岩溶隧道涌突水灾害的主要控制因素及其灾害的形成机制未统一认识,本文总结出影响岩溶隧道涌突水的五大主要影响因子,量化指标,构建风险评估模型,以期对危险性等级评价提供依据。

1 研究区概况

花梨隧道为贵州省江口至都格高速公路瓮安至开阳段最长的隧道工程,亦为瓮开高速的控制工程,隧道全长2 195 m,最大埋深为182 m。花梨隧道位于扬子准地台黔北台隆贵阳复杂构造变形区,隧道进口段位于山体斜坡处,地形较为平缓,地面坡度为15°~35°,出口位于山体斜坡处,地形较为陡峭,地面

第一作者简介:田祖涛(1985—),男,工程师,从事水文地质及工程勘察工作。E-mail:1677019263@qq.com。

收稿日期:2019-04-30

坡度为 $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。隧道横穿山脊,地势起伏较大,坡体植被发育。区内海拔为922.6~1 201.5 m,相对高差有188.9 m;轴线通过段地面高程在938.6~1 155.0 m之间,相对高差有216.4 m;地貌类型属溶蚀—剥蚀型低中山地貌。

2 研究方法

对花梨隧道水文地质条件的勘察以测绘为主,并收集当地区域水文地质普查报告和综合水文地质图,以查明区域地下水的类型、分布和埋藏条件、含水层富水性、地下水的补给、径流、排泄条件、动态特征及岩溶点(如溶洞、暗河出入口、漏斗、落水洞);辅助以EH4电导率成像系统的原理,通过对比钻孔资料,得到该岩溶区存在的隐伏溶洞、断层、暗河等的地球物理特征,进一步解译岩溶地区地下水结构;并结合抽水试验确定岩石的渗透性、连通试验确定暗河及落水洞的连通性。

2.1 隧道涌水量预测

(1)采用大气降水入渗法对隧道涌水量进行预测,具体公式为:

$$Q=1\,000\alpha\times X\times A=32\,126.4 \quad (1)$$

式中: α 为降水入渗系数,通过现场水文试验并结合相关经验值选取; X 为区域内最大日降雨量,本次按多年最大日降雨量173.3 mm计算; A 为隧道通过含水体的地下集水面积, km^2 。

(2)采用单孔抽水试验得出渗透系数,依据稳定流法计算该段隧道涌水量,具体公式为:

$$Q=BK\frac{H^2-h^2}{2R} \quad (2)$$

式中: Q 为隧道涌水量, $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; B 为隧道通过含水层中的长度,m; H 为含水层厚度,m; h 为水位下降曲线在隧道边墙上的高度; K 为渗透系数, $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$; R 为隧道涌水影响半径,m。

2.2 隧道涌突水危险性分级评价

根据区内岩溶发育特征,考虑将隧道涌突水危险性划分为5个等级,其危险程度从高到低分别为极危险(V)、高危险(IV)、中危险(III)、较危险(II)、低危险(I)。分值满分设为100分,危险性越高分值越高,反之亦然。划分的5个等级对应的分值依次为: >75 、 $75\sim 60$ 、 $60\sim 35$ 、 $35\sim 20$ 、 <20 。隧道涌突水危险

性(THK)分值为所选取岩石的可溶性(K_1)、地质构造(K_2)、地表汇流条件(K_3)、地下水循环特征(K_4)、隧道施工位置与埋深(K_5)5个评价指标评分值相加(图1)。

$$THK=5\cdot(0.25K_1+0.13K_2+0.16K_3+0.1K_4+0.36K_5)^{[13]} \quad (3)$$

式中: $K_1=0.75K_{11}+0.25K_{12}$; $K_2=K_{21}$ (断裂或褶皱构造条件);或者 $K_2=0.723\,55K_{21}+0.192\,3K_{22}+0.083\,3K_{23}$ (单斜蓄水构造条件)。

3 工程地质特征

3.1 地层岩性

花梨隧道出露一套寒武系清虚洞组—金顶山组碎屑岩和碳酸盐岩系地层,零星覆盖第四系。与隧道工程有关的地层主要有第四系坡残积黏土($Q_4^{\text{dl+el}}$),坡洪积($Q_4^{\text{dl+pl}}$)软土;下伏基岩为寒武系下统清虚洞组(ϵ_1q)灰岩,寒武系下统金顶山组(ϵ_j)泥质粉砂岩、灰岩。

3.2 地质构造

花梨隧道大里程端发育一条断层,断层破碎带宽约为50 m;断层上盘为寒武系清虚洞组中厚层灰岩,上盘综合产状为: $265^{\circ}\angle 8^{\circ}$;断层下盘为寒武系金顶山组泥质粉砂岩,下盘综合产状为: $65^{\circ}\angle 6^{\circ}$ 。

3.3 洞身围岩分级

洞身围岩分级具体见表1。

表1 洞身围岩分级表
Table 1 Grades of surrounding rock of cave

隧道围岩分级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V级
长度/m	0%	0%	82%	18%

4 水文地质特征

4.1 主要含水岩组及富水性

主要含水岩组及富水性具体见表2。

4.2 地表水及地下水特征

区内未见明显地表水发育,隧道进出口均位于斜坡地带,地面横坡陡,地表水通过斜坡排泄至地势

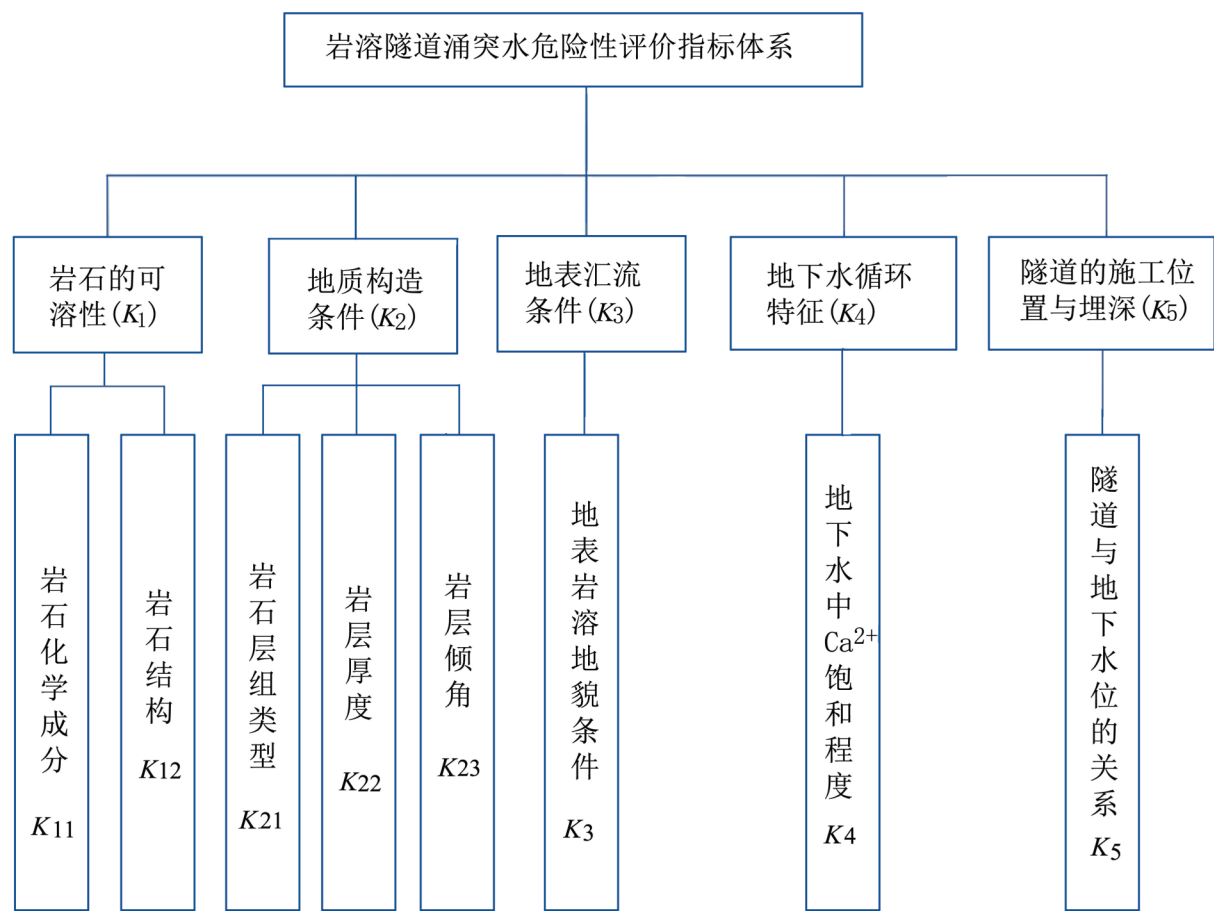


图1 岩溶隧道涌突水危险性评价指标体系

Fig. 1 Index system of risk assessment to karst tunnel water intruding

表2 主要含水岩组及富水性

Table 2 Major aquifer formations and water-holding property

地下水类型	含水岩组及赋存情况	富水性	对隧道的 影响
松散岩类 孔隙潜水	主要赋存于隧道进出口的第四系残坡积层中,基本为透水层,分布面积小,水量贫乏。	弱富水	较小
碎屑岩类 孔隙裂隙水	主要赋存于寒武系下统金顶山组薄至厚层状的泥质粉砂岩中,节理较发育,地下水主要接受降雨入渗补给,地下水露头、涌水量均有限。	弱富水— 中等富水	中等
碳酸盐岩类 溶洞(管道)水	主要赋存于寒武系下统清虚洞组灰岩、寒武系下统金顶山组灰岩中;可溶岩地段隧道顶地表溶沟、石芽、岩溶漏斗发育,有利于降水通过这些通道补给地下水;地下水十分丰富,径流复杂,常以泉点和暗河出露地表。	强富水	极大

低洼处,汇水面积小,水量不大。洞身地带地势较为平缓,地表水通过斜坡排泄至地势低洼的落水洞,通过竖向岩溶管道排泄至地下,其汇水面积小,水量不大。

区内地下水有:第四系孔隙潜水、基岩裂隙水、

岩溶水(图2、图3),其含水量均较弱。隧道附近共发现多处泉点及三处岩溶通道,井泉点水量在勘察期间为0.2~1 L,受季节影响较大。三处岩溶通道(图4)分别为:YK29+762右侧141 m处一岩溶通道

进口(Y1),标高1 012 m,宽2 m,高0.5 m,勘察期水量为2 L·s⁻¹,呈拱形;YK29+910左侧251 m处一岩溶通道出口(Y2),标高976 m,宽2 m,高1 m,常年

出水,勘察期水量为3 L·s⁻¹,呈拱形;Y29+960左侧170 m处一岩溶通道出口(Y3),标高980 m,宽0.8 m,高0.6 m,不出水,呈椭圆形。

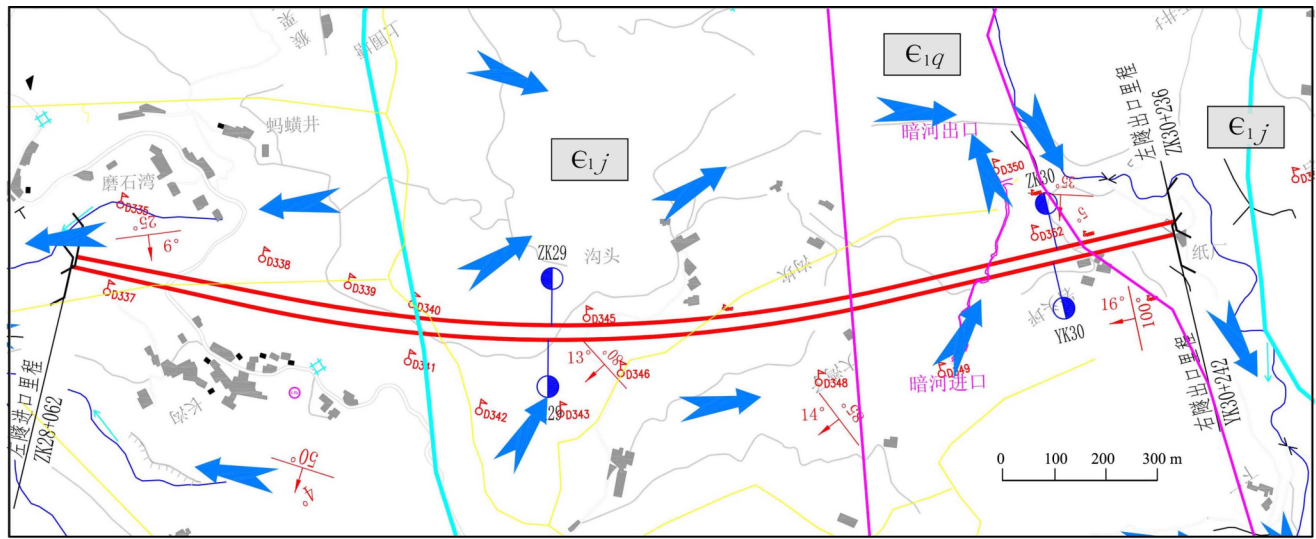


图2 岩溶水文地质图

Fig. 2 Karst hydrogeological map

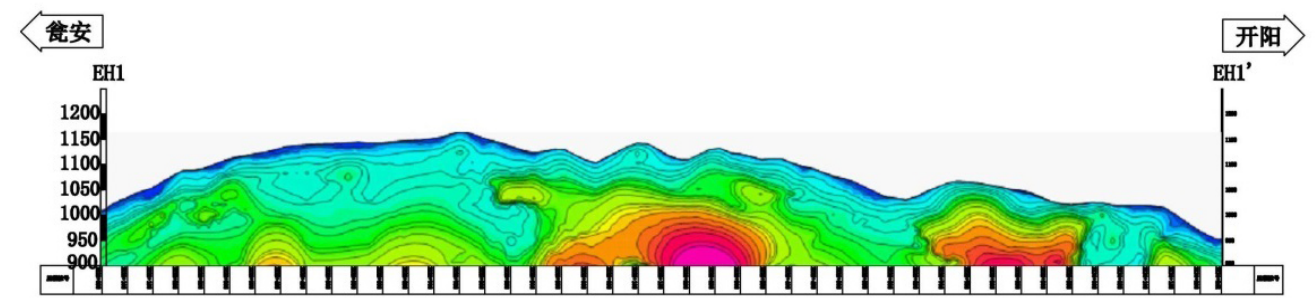


图3 隧道物探(EH-4)成果图

Fig. 3 Geophysical survey of tunnel (EH-4)

4.3 可溶岩体系分布特征

根据花梨隧道地层岩性及地表出露情况,可分为寒武系下统金顶山组泥质粉砂岩组成的非可溶岩体系与寒武系下统清虚洞组灰岩组成的可溶岩体系(图5)。

(1)泥质粉砂岩组成的非可溶岩体系

该段位于隧道小里程端,地表出露泥质粉砂岩,中间发育灰岩夹层厚约25 m,灰岩底部与隧道顶部距离大于50 m,该段长度约1 500 m。由于上层是透水较差的泥质粉砂岩,灰岩得到地表降水的补给有限,地下水活动性较弱,岩溶发育程度不高。

(2)灰岩组成的可溶岩体系

该段位于隧道大里程段,地表大部分地区基岩裸露,下伏基岩为寒武系清虚洞组灰岩与寒武系金顶山组泥质粉砂岩,地表溶沟、石芽、岩溶漏斗发育,岩溶发育强烈;隧道洞身为泥质粉砂岩,该段长度约700 m,隧道顶泥质粉砂岩厚0~40 m,该段出露的泉点数目和流量相对于上一体系明显较大并有一宽50 m的断层破碎带穿过,此地下水活动性强,与隧道建设关系最为密切。

4.4 岩溶发育空间分布特征

(1)在断裂构造带处发育集中



图4 岩溶通道

Fig. 4 Karst passage

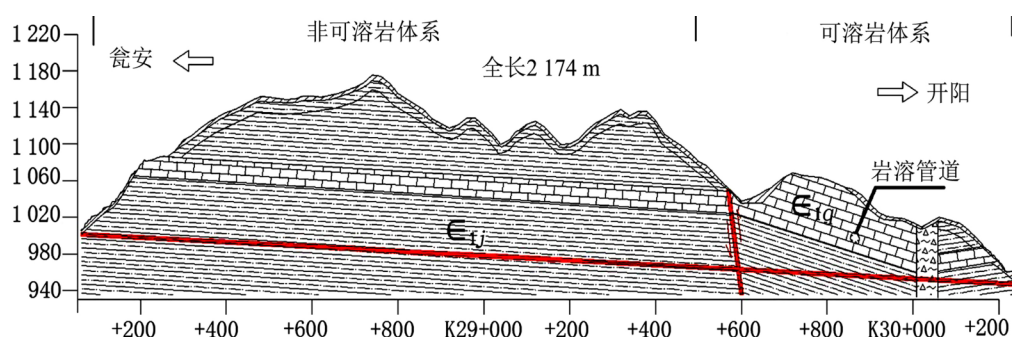


图5 花梨隧道纵剖面图及可溶岩体系示意图

Fig. 5 Longitudinal profile and sketch of soluble rock system of Huali tunnel

花梨隧道发育两处断裂带,断裂带附近岩体破碎有利于地下水进行垂直和水平运移,也有利于地下水对岩体中的可溶岩成分进行溶解和溶滤,因此,沿断层带发育的溶洞较多,规模较大^[14]。

(2)沿岩体顺层发育

地表水顺着层间裂隙流动,这为岩溶的发育提供了十分有利的条件,其岩溶形态有落水洞、漏斗、洼地等。

(3)沿可溶岩与相对隔水层的接触带发育

由于地下水存在沿隔水层底板集中运移的特点和规律,导致这些地段岩体的岩溶化程度、深度也较相邻的可溶性碳酸盐岩类岩体高。

(4)岩石可溶性

一般情况下,可溶性岩岩层越厚,岩溶就越发育。厚层的碳酸盐不溶物含量较少,溶解度较大,故

岩溶化程度高;薄层碳酸盐岩含有较多泥质,溶解度小,故岩溶化程度较弱^[15]。

可溶性岩的结构控制了岩石原始孔隙类型、分布以及孔隙度的大小,从而对其溶蚀性有一定影响。

4.5 隧道涌水量预测结果

隧址区地下水主要接受大气降水补给,地表水大部分以坡面流形式自然排泄,少部分沿基岩节理裂隙、岩层层面等下渗赋存,形成隧道开挖的涌水水源。

(1)采用大气降水入渗法对隧道涌水量进行预测的结果见表3。

(2)隧道于DZ-28-HLSD-5#孔进行抽水试验,其渗透系数 $K=0.35 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。采用稳定流法计算该段隧道涌水量:

表 3 隧道涌水量预测表
Table 3 Predicted tunnel water inflow amount

里程桩号	岩性	最大日降雨量 (X)/mm	集水面积 (A)/km ²	入渗 系数(a)	隧道涌水量/m ³ ·d ⁻¹	
					涌水量	合计
ZK28+062 ~ ZK29+550	泥质粉砂岩	174.6	0.74	0.10	12 920.4	
ZK29+550 ~ ZK30+125	灰岩、泥质粉砂岩	174.6	0.41	0.25	17 896.5	32 126.4
ZK30+125 ~ ZK30+236	灰岩、泥质粉砂岩	174.6	0.075	0.10	1 309.5	

单幅隧道涌水量： $Q = 2\,203 \times 0.35 \times \frac{49^2 - 5^2}{2 \times 162} = 5\,600(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$

双幅隧道涌水量： $Q=5\,600 \times 2=11\,200(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$

通过以上两种方法对隧道涌水量进行计算预测,采用涌水量合计值 32 126.4 m³·d⁻¹,鉴于其涌水量与气候密切相关,区域降水量的增加或雨季降大

暴雨等原因,隧道最大涌水量应按预测涌水量的 2~6 倍考虑。

5 隧道涌突水危险性评价

根据上述对岩溶隧道涌突水危险性分级标准和勘察资料对花梨隧道的 5 个指标进行赋值(表 4)。

表 4 隧道可溶岩段 THK 综合评分
Table 4 Comprehensive evaluation of karst section (THK) of the tunnel

里程	层位	岩性	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	THK	危险 级别
ZK28+056 ~ ZK29+500	∈ _j	泥质粉砂岩	0	13	12	11	12	48	Ⅲ
ZK29+500 ~ ZK29+700	∈ _j	泥质粉砂岩、灰岩	13	16	17	15	15	76	V
ZK29+700 ~ ZK29+950	∈ _{1q} 、∈ _j	灰岩、泥质粉砂岩	8	12	13	12	12	57	Ⅲ
ZK29+950 ~ ZK30+100	∈ _{1q} 、∈ _j	灰岩、泥质粉砂岩	12	17	16	17	16	78	V
ZK30+100 ~ ZK30+251	∈ _j	泥质粉砂岩、灰岩	8	12	13	15	13	61	Ⅳ

ZK29+500~ZK29+700 段危险性等级为 V 级,该段低洼地带易积水,岩溶较发育,地表有洼地、泉点出露;ZK29+950~ZK30+100 段危险性等级为 V 级,这段地下水的径流条件好,岩溶发育,地表有洼地、泉点、岩溶漏斗等。隧道在以上两段通过断层时涌突水危险性较大,在施工中应特别注意对涌突水灾害的防护。

采用大地电磁法,布置 9 个深孔钻探对该隧道进行探查,并与 THK 危险性评价的结果进行对比分析,可知隧道大角度穿越断裂破碎带。物探揭示洞身里程 ZK29+998.0~ZK30+010, ZK30+051~ZK30+088 为相对低阻条带,推测可能存在断层破碎带,经 DZ-30-

HLS-2#深孔钻孔揭示,该处位于可溶岩与非可溶岩接触带附近,小里程端附近又有断层破碎带穿过,地质条件差,施工时,涌突水危险性较大。隧道物探成果、深孔钻探成果与 THK 危险性评价结果基本吻合。

6 结 语

(1)花梨隧道区内金顶山组薄至厚层状的泥质粉砂岩为弱富水—中等富水,地下水主要接受降雨入渗补给,地下水露头、涌水量均有限;清虚洞组灰岩、寒武系下统金顶山组灰岩为强富水,地下水丰富,径流复杂,常以泉点和暗河出露地表;

(2)花梨隧道地表出露的可溶岩与非可溶岩可分为两个体系:泥质粉砂岩组成的非可溶岩体系,该段灰岩得到地表降水的补给有限,地下水活动性较弱;灰岩组成的可溶岩体系,该段出露的泉点数目和流量相对于上一体系明显较大,地下水活动性强,与隧道建设关系最为密切;

(3)预测隧道的涌水量,采用涌水量合计值 $32\ 126.4\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,鉴于其涌水量与气候密切相关,隧道最大涌水量应按预测涌水量的2~6倍考虑;

(4)花梨隧道可溶岩段内岩溶涌突水危险性总体为中危险,其中极高危险段占总长度的16%,其中ZK29+500~ZK29+700段和ZK29+950~ZK30+100段危险性等级为V级,隧道在这两段通过断层时涌突水危险性较大。隧道物探成果、深孔钻探成果与THK危险性评价结果基本吻合。

参考文献

- [1] 宋章,王科,蒋良文,等.岩溶区铁路勘察防治技术研究现状及发展趋势[J].高速铁路技术,2018,9(5):38-42.
- [2] 刘坡拉.岩溶隧道涌水量预测方法及适宜性分析[J].安全与环境工程,2009,16(5):119-122.
- [3] 吴治生.不同地质边界条件岩溶隧道涌水量预测及展望[J].铁道工程学报,2007,11(8):49-64.
- [4] 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.
- [5] 陈英姿.大坳隧道隧址区渗流场与隧道涌水量数值模拟及预测[D].成都:成都理工大学,2014:20-40.
- [6] 何山,张文君,邱波,等.综合超前地质预报技术在育王岭隧道破碎带预报中的应用[J].科技通报,2019,35(2):195-198.
- [7] 周轮,李术才,许振浩,等.隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J].山东大学学报(工学版),2017,47(2):55-62.
- [8] 杨培丰.重庆涂山湖片区岩溶塌陷形成机制及危险性评估[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [9] 张志成,卢浩,李集.一种深长隧道涌突水灾害危险性评价模型及其应用[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):67-71.
- [10] 雷军.宜万铁路施工期隧道岩溶突水地质灾害形成规律与危险性评估方法研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [11] 叶志华,袁永才,徐学军,等.基于关联函数与加权平均法的岩溶隧道突水危险性评价及应用[J].中外公路,2016,36(1):204-208.
- [12] 陈紫云,陈敏,代绍述,等.西南某山区高速公路岩溶隧道的涌水灾害危险性研究[J].地质灾害与环境保护,2017,28(2):60-63.
- [13] 杨艳娜.西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究[D].成都:成都理工大学,2009:110-130.
- [14] 王成亮.铁路隧道岩溶突水灾害风险识别与预警方法研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [15] 冯荣.岩溶隧道施工灾害预警技术研究[D].成都:西南交通大学,2013:50-70.

Karst hydrogeology and risk assessment of the Huali tunnel

TIAN Zutao, ZHANG Jun

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

Abstract The Huali tunnel on the Wengan—Kaiyang railway is a key engineering site, which is complicated by sinkholes, shafts, karst springs, and underground rivers. In this work, the lithologic combination of aquifers, distribution of soluble rock mass and karst water of this karst tunnel are studied by geological investigation, borehole drilling, field measurement, laboratory tests of physical and mechanical parameters and electrical geophysical prospecting. Results show that, (1) The karst groundwater system in the tunnel area can be divided into two hydrogeological units, a non-soluble rock system composed of argillaceous siltstone and a soluble rock system composed of limestone. (2) The normal tunnel water inflow is predicted to be $32\ 126.4\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$, and the maximum gushing water amount in the rainy season should be designed as 2 to 6 times of that in the normal condition. (3) The overall risk of karst water gushing is moderate, while the section with extremely high risk accounts for 16% of the total length.

Key words Huali tunnel, karst hydrogeology, gushing water, risk assessment

(编辑 黄晨晖)