

# 岩溶隧道综合超前地质预报方法探究

——以叙毕铁路新高坡隧道为例

王小敏<sup>1</sup>, 李瑞林<sup>2</sup>, 王锋<sup>2</sup>

(1. 汉巴南城际铁路有限责任公司, 巴中 636601; 2. 叙镇铁路有限责任公司, 泸州 646699)

**摘要:** 为进一步防控岩溶隧道施工坍塌、突水、涌泥等致灾风险, 更加重视施工过程中的超前地质预报工作, 目前常采取综合超前地质预报方法进行掌子面前方地质条件的探测。其目的在于探查掌子面前方岩溶及溶蚀等灾害体的空间位置、规模形态及充填性质。现有预报技术为以地质法为基础的综合物探技术, 常用物探方法有弹性波法和地质雷达法等。本文以新高坡一级风险隧道为例, 开展超前地质预报实践工作, 通过隧址区地质环境条件调查及隧道岩溶地层发育程度评价, 合理选取综合超前地质预报方案, 准确预报了隧道对应里程段的不良地质现象, 及时调整围岩级别及施工工艺, 有效避免了施工事故, 提升了探测岩溶隧道掌子面前方工程地质与水文地质条件的准确性。

**关键词:** 岩溶隧道; 综合超前地质预报; 地质调查

**中图分类号:** P642; P642.25; U45; U456.3<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A

## STUDY ON COMPREHENSIVE ADVANCED GEOLOGICAL PREDICTION METHOD OF KARST TUNNEL

——TAKE THE XIN GAPO TUNNEL OF XUYONG-BIJIE RAILWAY AS AN EXAMPLE

WANG Xiao-min<sup>1</sup>, LI Rui-lin<sup>2</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>

(1. Hanbanan Intercity Railway Co., Ltd., Bazhong 636601, China;

2. Xuyong Town Railway Co., Ltd., Luzhou 646699, China)

**Abstract:** In order to prevent and control the disaster risk caused by collapse, water inrush and mud gushing in karst tunnel construction, and pay more attention to the advance geological prediction work in the construction process, the comprehensive advance geological prediction method is often used to detect the geological conditions in tunnel face. The purpose is to explore the spatial position, scale and filling properties of karst and dissolution disaster bodies in tunnel face. The present prediction technology is the comprehensive geophysical prospecting technology based on geological method. The common geophysical prospecting methods are HSP and GPR. Taking the high level of risk tunnel which named Xin Gaopo as an example, in advance geological forecast work practice, according to the geological environmental conditions and development degree of karst formation evaluation in tunnel site to choice comprehensive advanced geological prediction scheme, accurate prediction of the tunnel corresponding mileage of bad geological phenomenon, timely adjust the level of surrounding rock and the construction technology, effectively avoid the construction accident, The accuracy of detecting engineering geological and hydrogeological

conditions in front of karst tunnel face is improved.

**Key words:** Karst tunnel; comprehensive advanced geological prediction; geological survey

## 1 引言

随着国家路网逐渐完善,越来越多的隧道工程建设遍布于西南岩溶地区,特别是长大深埋岩溶隧道在西南横断山区、川南斜坡带及川滇高原地区尤为常见。岩溶隧道的建设,常常面临岩溶形态突变、岩溶涌水突泥及岩溶塌陷等洞内工程地质灾害的威胁,严重影响工程施工安全及营运安全。因此,为预报掌子面前方不良地质情况,降低隧道施工危险。

隧道岩溶工程地质问题受到国内外学者关注,重点在研究岩溶发育机理<sup>[1,2]</sup>、岩溶富水致灾构造及其致灾理论<sup>[3,4]</sup>等,形成了岩溶地下水灾害预报探测及防治技术体系<sup>[5]</sup>。而岩溶隧道超前地质预报技术发展至今,已形成以地质调查法为基础、地球物理方法为手段的技术体系<sup>[6,7]</sup>。但是,岩溶隧道面临岩溶形态多样性、岩溶地质问题的复杂性、岩溶及地下水的随机性等一系列问题,要求形成“以地质法为基础的综合物探技术”的岩溶地质超前预报技术体系<sup>[8,9,10]</sup>。在技术方法运用上,强调多方法、多维度的岩溶隧道超前地质预报方法组合<sup>[11,12]</sup>,强化探测针对性,提高预报准确性。本文在前人的研究基础上,以地质调查法为基础,定性判识隧道岩溶发育情况。结合弹性波法(HSP法)和地质雷达法作为

掌子面前方地球物理探测方法。该方案针对岩溶溶洞探测具有较高识别准确率,在叙毕铁路新高坡隧道的溶洞探测中取得了良好的效果。

## 2 工程地质及水文概况

隧道位于云南省镇雄县黑树镇与贵州省毕节市何官囤镇交界处,横穿省界及赤水河、乌江的分水岭。隧道长8100 m,最大埋深约445 m。隧道纵断面如图1所示。隧址区属剥蚀低中山地貌。隧址区范围内出露地层为:第四系人工弃土( $Q_4^{ml}$ )、全新统坡洪积层( $Q_4^{dl+cl}$ )、坡崩积层( $Q_4^{dl+col}$ )、坡残积层( $Q_4^{dl+cl}$ )。下伏地层分别为:三叠系系统茅草铺组( $T_1m$ )、三叠系下统飞仙关组( $T_1f$ )、二叠系上统长兴组( $P_2c$ )、龙潭组( $P_2l$ )、下统茅口组灰岩( $P_1m$ )、断层角砾岩( $Fbf$ )。隧址区位于云南高原北部扬子准地台滇东台褶带,地质构造复杂,断裂、褶曲均较发育。地层岩体破碎,以东西向构造为主,线路多大角度穿越构造线。隧道在区域上位于三眼井向斜北部翘起端,次一级断裂,褶曲相当发育,褶皱主要有:高坡向斜、高坡1#背斜、上扬塘向斜、高坡2#背斜;断层主要有:上扬塘断层、茶木树断层、监羊箐断层。

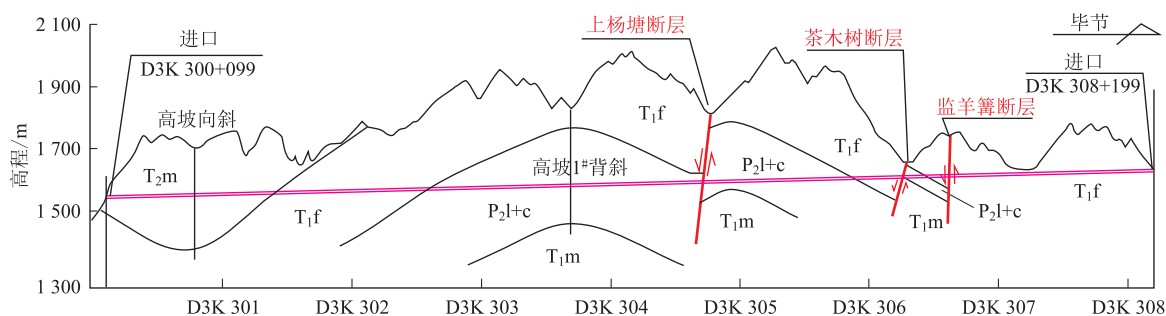


图1 隧道纵断面地质简图

隧道地表树枝状水系及冲沟发育,枝沟大多为季节性流水,沟槽中主沟中常年有水流,由大气降雨补给,流量受季节变化影响不大。主要地表水为隧道进口兰家河沟,线路里程DK 304+780 上扬塘河沟以及线路里程DK 306+300 浅埋段的茶木树河沟。地下水类型主要为赋存于砂岩、泥岩等构造裂隙及风化裂隙之中的基岩裂隙水及茅口灰岩( $P_1m$ )中的岩溶水。

## 3 超前地质预报技术分析

超前地质预报方法可分为地质法和地球物理方法,各方法有其优缺点及适用条件。地质法普适性较好,但超前平行导坑(隧道)法和超前水平钻孔法费用昂贵,耗时较长。地球物理方法则种类繁多,波反射法对于一般岩性或破碎带等反射界面的探测准确度较高,电阻率法则适用于富水地层中。

因此,隧道所处地质环境背景以及同一隧道穿越里程段地质条件的差异,使得隧道施工面对的威胁因素不同。需要根据不同隧道选择对应的超前地

质预报方案,并且随着隧道揭露地质条件变化进行动态调整。如下表 1 所示,不同超前预报方法具有不同特性及适用条件。

表 1 各种超前地质预报技术的特点(据李苍松,有修改)<sup>[13]</sup>

序号	超前预报方法	优缺点	适用条件或特性
I	地质调查法	地质预报基础方法,适用性强	普遍适用
II	地质法 超前平行导坑(隧道)法	直接、有效、准确率高、施工指导作用强	普遍适用
III	超前水平钻孔法	方法简单、直接,但因“一孔之见”常出现判断失误,且钻孔费用昂贵	普遍适用
IV	超前钻孔声波测井及跨孔声波透射法	在超前水平钻孔法基础上结合声波透射,效果更好,需钻孔	
V	地球物理方法 波反射法	地质雷达探测精度高,但预报距离短(10~30 m),在隧道内受水、电、金属等干扰较大;声波反射法占用施工时间小于 0.5 h,无需打孔放炮,预报距离中等(一般 50~70 m),预报效果好;地震法用于地表浅层勘探效果较好,预测距离一般为 100~200 m,但需打孔放炮,工序较复杂,占用施工时间 1.0 h 左右,影响施工	适用于岩溶构造破碎带、可溶岩与非可溶岩界面或其他地表调查岩溶现象发育地段的掌子面前方岩溶地质现象预报
VI	电阻率法	预报距离一般为 30~50 m,能够实施连续探测,不受施工影响,且不干扰施工	对低阻体(特别是水体)反应灵敏,可探测隧道前方的水文地质情况,适用于富水性较强的岩溶地层

## 4 案例分析

案例为新高坡隧道 D3K 300+364 里程上下两层溶洞预报,该处揭露地层属于茅草铺组(T<sub>1</sub>m)。岩性为灰岩夹泥质灰岩、泥岩及盐溶角砾岩,灰岩出露面积较大,岩溶强烈发育。地表岩溶洼地、漏斗、竖井、落水洞、暗河(暗河标高均低于隧道底标高)广泛分布,为隧道岩溶水主要的补给区。根据工程地质特点,采用地质调查法、弹性波法及地质雷达法作为本段岩溶综合超前地质预报手段,并在实施过程中根据地质情况进行预报方法的动态调整。

### 4.1 地质调查

隧道洞身揭露的可溶岩主要分布于 D3K 300+106~D3K 301+400 段,长度约为 1 294 m,主要为

茅草铺组(T<sub>1</sub>m)灰岩,飞仙关组(T<sub>1</sub>f)灰岩夹层、长兴组(P<sub>2</sub>c)灰岩夹层。根据区域地质资料、现场地质调绘和钻探揭示,T<sub>1</sub>m 灰岩出露面积较大,岩溶强烈发育。地表岩溶洼地、漏斗、竖井、落水洞、暗河(暗河标高均低于隧道底标高)广泛分布,为隧道岩溶水主要的补给区。隧址区岩溶水主要赋存于可溶岩的溶孔、溶蚀裂隙及岩溶管道中,分析认为 T<sub>1</sub>f、P<sub>2</sub>c 灰岩夹层的岩溶水主要为溶蚀裂隙型,接受上覆地层补给,水量较少,岩溶水及岩溶下降泉、暗河的形式排出地表。隧道穿越该段岩溶强烈发育,对隧道影响较大,施工时极有可能遭遇溶洞、暗河,在施工中应加强超前地质预测、预报工作,同时做好监测及相关防护工作。统计隧道穿越里程段地表岩溶负地形情况见表 2。

表 2 地表岩溶洼地分布特征

序号	里程位置	地层	岩溶地形	监测预报重点
1	D3K 300+500 左 10 m	T <sub>1</sub> m	岩溶洼地	溶洞,岩溶涌水、突泥
2	D3K 300+610 左 90 m、右 150 m	T <sub>1</sub> m	岩溶洼地	溶洞,岩溶涌水、突泥
3	D3K 300+700 右 240 m	T <sub>1</sub> m	岩溶洼地	溶洞,岩溶涌水、突泥
4	D3K 300+810 左 55 m	T <sub>1</sub> m	岩溶洼地	溶洞,岩溶涌水、突泥
5	D3K 301+250 左 50 m	T <sub>1</sub> m	岩溶洼地	溶洞,岩溶涌水、突泥
7	DK 301+810 左 10 m	T <sub>1</sub> m	岩溶洼地	/

在 D3K 300+780 附近为高坡向斜核部,岩层倾向线路右侧,地下水主要由隧道左侧向右侧排泄,汇入 D3K 300+106~D3K 301+000 右 200 m 的暗河中,于 D3K 300+011 右 247 m 的暗河出口流出。暗河出口直径约 1 m,标高约 1 468 m,水量约 10 l/s,水质清澈透明,人无法进入,发育于 T<sub>1</sub>m 与 T<sub>1</sub>f

的接触带之上,推测暗河沿 S35°E 方向于隧道右侧近于平行延伸 880 m 后沿正 S 方向远离线路延伸,按 5%的暗河纵横推测隧道段的暗河标高约 1 468~1 512 m 之间低于隧道路肩(隧道路肩标高为 1 545~1 565 m)约 30~40 m,隧道洞身的地表水通过溶蚀洼地、漏斗、岩溶管道向隧道右侧排泄进入该

暗河,该暗河对隧道无影响。隧道进口及进口段右侧沟谷较低,低于隧道底标高,而隧道洞身 DK 301+500~+700 段地表河谷与岩溶洞穴交替出现,沟中常年有水,沟底高于隧道底约 90 m。导致 D3K 300+910~DK 301+500 段隧道位于地下水位以下,属岩溶水水平径流带,水头约 0.9~1 MPa。

#### 4.2 弹性波法(HSP)探测

探测范围 D3K 300+293~D3K 300+413,长度 120 m,对现场采集原始波形曲线进行时域和频域分析。测试采用 HSP217 地质超前预报仪,测试

成果判释如图 2 和图 3 所示。

根据探测结果并结合剖面图,分析认为 D3K300+321~D3K300+413 里程段纵波波速出现突降,且反射能谱出现强反射,反射能量频变,特别是在+320、+360 位置附近。结合现场情况及地质条件,判定岩体较前段变差,较破碎-破碎,呈碎裂状或镶嵌碎裂结构,节理裂隙发育。整个段落范围内,破碎带、软弱夹层和岩溶(溶洞、溶腔等)强烈发育,泥质充填,存在涌水、突泥风险,围岩稳定性差-极差。

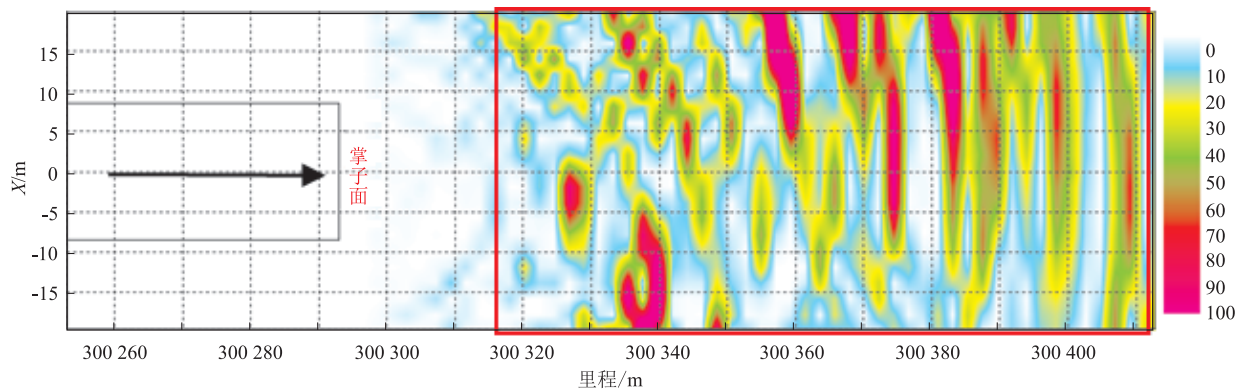


图2 反射波分析成果 XOY 向(测试基准面水平)切片图

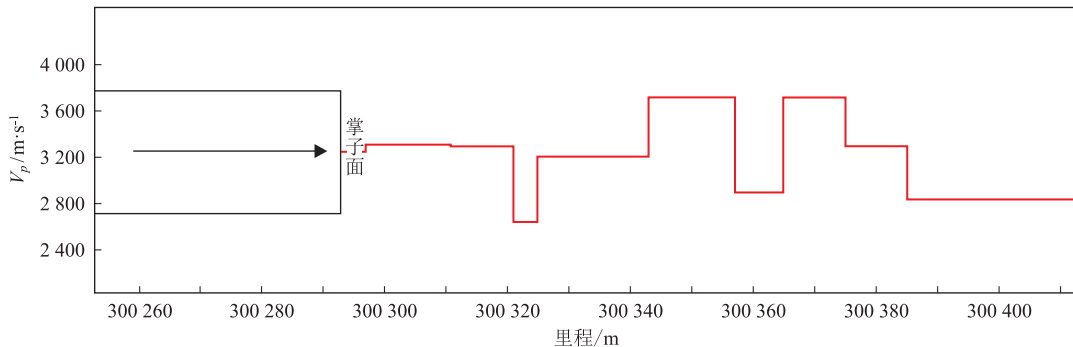


图3 掌子面前方纵波速度图

#### 4.3 地质雷达法

探测工作采用了美国 GSSI 公司生产的 SIR-4000 型地质雷达配置 100 MHz 雷达天线,在掌子面布设横向两条测线进行探测。掌子面测线布置示意图如下图 4。本次地质雷达预报探测范围 D3K 300+345~D3K 300+375,长度为 30 m。数据处理后得到的地质雷达探测成果图见图 5 所示。

根据探测结果并结合剖面图,分析认为 D3K 300+354~D3K 300+375 段电磁波反射强度强烈,分析认为该段岩体较前段岩体完整性差,岩体较破碎,节理裂隙发育,岩体呈碎裂镶嵌状-散体状结构,软弱夹层及破碎带发育,岩溶发育(溶洞、溶腔等),泥质充填,具有涌水、突泥风险,围岩稳定性差。

#### 4.4 综合分析

在新高坡隧道综合超前地质预报中,通过采用地质调查法、弹性波法及地质雷达等多种超前地质预报手段,认为该段风险较大,遭遇溶洞等可能性极大,随后揭露至 D3K 300+364 里程时出现洞径 20 m 左右上下两层斜交溶洞。各方法预报判释结果如下:

(1) 地质调查法判断 D3K 300+106~D3K 301+400 段灰岩地层中,茅草铺组( $T_1m$ )灰岩岩溶发育强烈,隧道穿越段极有可能遭遇溶洞暗河。

(2) 通过掌子面前方弹性波法预报显示,D3K 300+321~D3K 300+413 段岩体较前段变差,破碎带、软弱夹层和岩溶(溶洞、溶腔等)强烈发育,存在

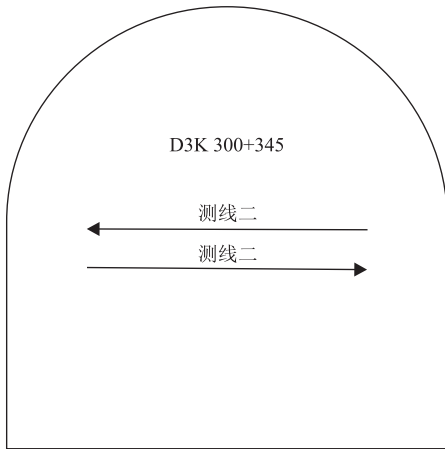


图4 地质雷达探测测线布置示意图

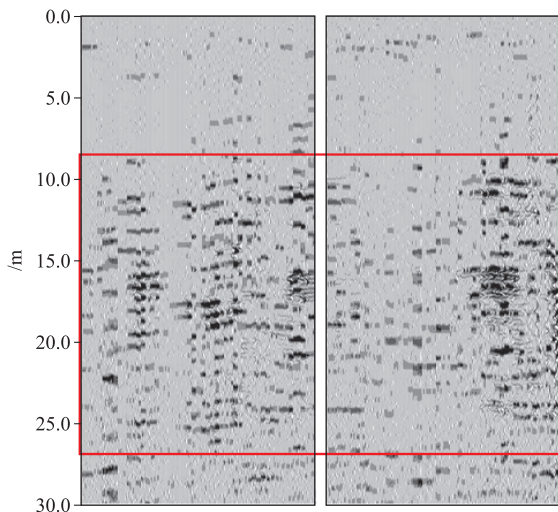


图5 D3K 300+345 掌子面雷达探测图像

涌水、突泥风险,建议调整设计围岩级别为IV级~V级。

(3) 通过地质雷达对 D3K 300+345~D3K 300+375 段进行短临预报显示,该段岩溶发育(溶洞、溶腔等),泥质充填,存在涌水、突泥风险,建议调整围岩级别为IV级。

#### 4.5 揭露情况对比

综合上述各种预报方法的探测结果,可以判释 D3K 300+354~D3K 300+375 段岩性较破碎,节理裂隙发育,岩体呈碎裂镶嵌状-散体状结构,软弱夹层及破碎带发育,岩溶发育(可能存在溶洞、溶腔等),注意防范突泥涌水风险。

隧道施工揭露至 D3K 300+364 里程时,掌子面揭露上下两层大型无充填岩溶溶洞,洞径约 20 m,如图 6 和图 7 所示。上层溶洞腔体长轴方向 30°,无水,洞壁较干燥,溶洞长轴方向近似垂直于隧道中线。下层溶洞长轴方向 85°,洞内无水,洞壁较

湿润,多见乳白色碳酸盐结晶体,溶洞长轴方向与隧道长轴斜交。

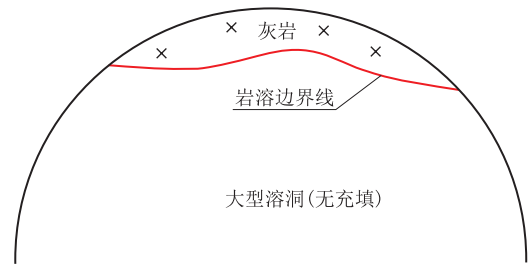


图6 掌子面揭露大型无充填型溶洞

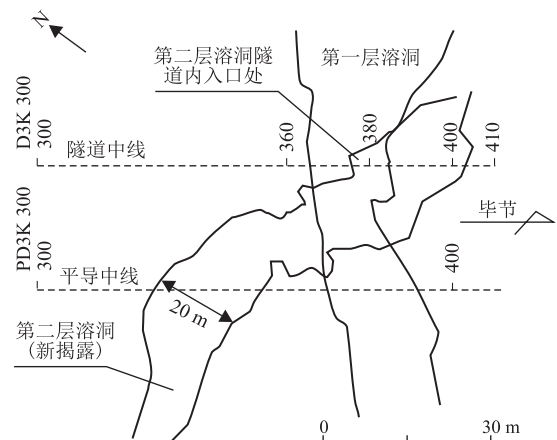


图7 开挖揭露双层溶洞位置关系示意图

## 5 结论

在案例的实践中,以地质法为基础,构建适宜的综合超前地质预报方案,在距离上长距、短距相结合,在方法上探岩、探水相组合,成功预报隧道掌子面前方不良地质体,为隧道工程施工设计方案动态调整提供依据,有效避免了施工事故。岩溶由于其多样性及随机性,给隧道施工带来极大困扰。尤其岩溶富水性强的岩层,涌水突泥风险不仅影响施工安全,还对隧道衬砌结构的耐久性提出严重考验。因此,提升岩溶隧道地质预报准确性,不仅有利于保证隧道施工安全,亦是及时动态调整设计的重要地

质依据。

采用岩溶隧道综合超前地质预报方法,可有效避免单一预报手段的局限性,做到长短结合,定性与定量结合,优势互补。弹性波法具有占用掌子面施工时间短、预测距离适中等优点,地质雷达法探测距离短但是探测精度相对较高,可作为近距离判断岩溶隧道掌子面前方岩溶发育规模、填充物性质的短临手段。如果地质调查或其他证据显示前方岩溶富水性较好,可使用电阻率法、超前地质钻探等手段进一步判断。

#### 参考文献

- [1] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D]. 山东大学, 2009.
- [2] 徐钟, 邓辉, 等. 岩溶隧道涌突水形成机制及岩壁安全厚度研究[J]. 人民长江, 2018, 49(3): 61-66.
- [3] 李术才, 许振浩, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [4] 刘招伟, 何满潮, 等. 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+246.
- [5] 李术才, 刘斌, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [6] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004, 30(1): 7-9.
- [7] 何发亮, 李苍松, 等. 岩溶地区长大隧道涌水灾害预测预报技术[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(5): 21-23.
- [8] 李苍松. 长大岩溶隧道施工地质预报方法综述[A]. 中国铁道学会、西南交通大学编. 2003年中国交通土建工程学术暨建设成果论文集[C]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 612-617.
- [9] 王洪勇. 综合超前地质预报在圆梁山隧道中的应用[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(3): 56-61.
- [10] 李苍松, 何发亮, 等. 武隆隧道岩溶地质超前预报综合技术[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 96-101.
- [11] 梁永国, 胡海强, 刘春辉, 等. 综合超前地质预报在西南岩溶隧道施工中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2012, 23(3): 80-83.
- [12] 祝云华, 刘新荣, 黄明. 超前地质预报在歌乐山隧道施工中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(1): 109-112.
- [13] 李苍松, 高波, 等. 岩溶及地下水超前预报技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2013.

**作者简介:** 王小敏(1982—), 男, 工程硕士, 主要从事铁路和公路建设管理及隧道与地下工程相关研究工作。

E-mail: wangxiaomin1108@163.com