

文章编号: 1000-7598 (2012) 01-0227-06

岩溶区隧道暗河的综合预报及治理方案研究

石少帅, 李术才, 李利平, 许振浩, 武 科, 高 阳, 原小帅

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 为确保岩溶区隧道施工安全, 利用综合预报分析方法可准确地对地质异常体进行预测, 可明显减少发生灾害的可能性。以大广南高速公路紫荆山隧道为工程背景, 通过地质分析研究了紫荆山隧道的岩溶发育特征, 利用 TSP (隧道地震预测) 超前地质预报方法对 ZK221+960 处暗河位置进行了准确预报, 并利用地质雷达对暗河的走向进行了短距离探测, 探测结果与实际揭露走向基本吻合。针对紫荆山暗河, 分析了各种暗河处治措施优缺点, 最终制定了泄水洞方案。在保证隧道施工安全和工期的前提下, 对泄水洞方案进行了优化处理, 优化后的处理方案在紫荆山暗河治理中取得了较好的效果, 其结果对类似工程具有一定的借鉴意义。

关 键 词: 岩溶发育特征; 暗河; TSP; 地质雷达; 泄水洞

中图分类号: U 452

文献标识码: A

Comprehensive geological prediction and management of underground river in karst areas

SHI Shao-shuai, LI Shu-cai, LI Li-ping, XU Zhen-hao, WU Ke, GAO Yang, YUAN Xiao-shuai

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to ensure the construction safety of karst tunnel, the unfavorable geological body can be accurately predicted using integrated prediction method so as to significantly reduce the potential for disasters. Setting the Zijingshan Tunnel of the Da-Guang'nan Expressway as the project background, firstly, the developing characteristics of the karst of Zijingshan Tunnel is studied through geological analysis. And then, long-distance detection of unfavorable geology is done with the TSP (tunnel seismic prediction) method; so an accurate prediction of the ZK221+960 underground river's location is obtained; and a short detection of the underground river's direction is done using geological penetrating radar. The detection result is consistent with actual disclosure direction. For the actual situation of Zijingshan Underground River, drainage tunnel program is eventually made after many analysis of various treatment program. Under the premise of ensuring the safety and duration of tunnel construction, the hole drainage program is optimized. The optimized processing program achieves good results in the Zijingshan Underground River's governance, which has some reference significance for the similar engineering.

Key words: karst development features; underground river; TSP; ground penetrating radar; drain tunnel

1 引 言

我国岩溶不良地质发育分布广泛, 随着我国公路交通事业的发展, 越来越多的高速公路需要穿越岩溶地区修建, 隧道区施工面临着许多岩溶地质灾害问题。为确保岩溶区隧道施工安全, 对不良地质体的发育情况进行准确及时超前预报, 是岩溶地区隧道设计与施工中亟待研究与解决的关键问题^[1-3]。

在高风险岩溶隧址区, 岩溶发育形式复杂多样, 在初勘中采用地面调绘、钻探、物探、遥感判译、波速测井等方法, 很难准确地查明水文与地质条件。施工过程中经常出现突水、突泥、塌方、瓦斯燃烧等事件, 给施工带来极大困难, 造成巨大人员伤亡事故。因此, 王梦恕院士^[4]指出, 在岩溶地区探测溶洞的存在直接关系到人身安全, 超前地质预报应该也必须作为工序列入工程成本。

收稿日期: 2010-05-10

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(No. 2009318000008); 国家自然科学基金重点资助项目(No. 51139004); 国家自然科学基金资助项目(No. 51009085, No.50874068); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金项目(No. 2010491311)。

第一作者简介: 石少帅, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事高风险岩溶隧道不良地质超前预报与综合治理方面的研究工作。E-mail: sss_sdu@163.com
通讯作者: 李利平, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 主要从事地下工程地质灾害灾变机理与控制方面的研究工作。E-mail: yuliyangfan@163.com。

目前,隧道不良地质体超前地质预报,根据预报距离可分为长期(长距离)和短期(短距离)两种预报形式。长距离超前地质预报主要采用的是 TSP 探测方法,而短距离超前地质预报主要采用 GPR(地质雷达)探测。TSP 反射地震超前预报方法具有预报距离长(100~150 m),不占用隧道工作面,对施工影响小的优点。而 GPR 地质雷达重复对隧道工作面探测得到的雷达成果图像相似度高,受外界影响较小,预报结果较准确,对 20~30 m 范围内溶洞、暗河、断层破碎带等地质异常反应敏感,在一定程度上可弥补 TSP 对小溶洞等不灵敏的不足^[5-10]。所以,利用综合预报方法可为安全施工提供有利的保障。

据相关资料统计^[11],截止到 1989 年底,我国长岩溶隧道共计 26 座,约占隧道总数量的 40%(其中西南、中南地区 17 座),且在施工过程中均遭受到不同程度岩溶水的危害,其中发生过较大岩溶涌水灾害的有 10 座。而在西南、中南地区 17 座长岩溶隧道中,有近 50%的隧道在施工和运营过程中发生过大型突涌水灾害。如广渝高速华蓥山隧道发生多次突水事故,最大涌水量高达 14 400 m³/d,涌出泥沙上万方;国道 213 线五指山隧道 2005 年 7 月底,当隧道开挖至 K30+900 时,隧道开始出现大的涌水,总涌水量约 4.3×10⁴ m³/d,呈暴雨状和多处大股水射出,射程达 8~10 m。2005 年 11 月 15 日,随着含水地段的不断开挖揭露,总水量增大至 6.6×10⁴ m³/d。2006 年 1 月 21 日,马鹿箐隧道出口平导 PDK255+978 突水,11 人遇难。因此,突发性涌水事故会冲毁机械,造成重大的财产损失和人员伤亡,严重影响施工工期和施工安全。随着我国岩溶区隧道的大量兴建,岩溶水的治理也成为亟待解决的问题。

2 紫荆山隧道隧址区岩溶发育特征

2.1 工程概况

紫荆山隧道位于阳新县龙岗镇郭家冲与郭家垄村之间,设计为分离式隧道,全长 2 349 m。该隧道穿越近东西走向紫荆山山脉,属越岭长隧道,隧道顶板左线最大埋深达 360.5 m,右线设计最大埋深达 361.0 m,纵坡左右线均为-1.85%。

大气降水在山体上部地势低凹处易汇集成地表水体,水量大小受季节性影响变化,地表水向低洼处排泄基本畅通,山顶基本无地表水体。区内地下水类型有第四系松散岩类孔隙潜水和基岩风化裂隙水、岩溶裂隙水及岩溶水 4 种类型,以岩溶水为

主。隧道剖面如图 1 所示。

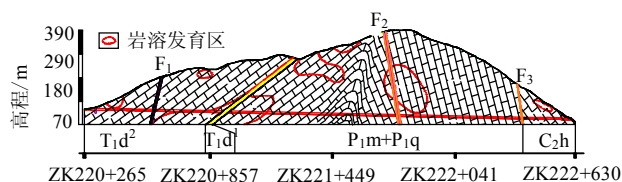


图 1 紫荆山隧道岩溶水文地质剖面图
Fig.1 Karst hydrogeological profiles of Zijingshan tunnel

2.2 隧址区岩溶发育特征

隧址区大地构造属于扬子准地台太子庙台褶皱束,地处大幕山复背斜的倾伏端,隧道通过其次级褶皱徐立中—郭家冲向斜南翼,构造较发育,隧址区 3 条断层有(见图 1),断层带内岩石较破碎。隧道坡面大部分区域基岩裸露,岩溶较为发育,多为岩蚀洼地、溶沟、溶槽、落水洞等,大气降水在山体上部地势低凹处易汇集成地表水体,水量大小受季节性影响变化,积水通过地表形成的岩溶管道下渗,其迳流主要受地形地貌控制,总体迳流方向为由地表岩溶洼地、落水洞等垂直下渗、流向岩溶发育区。

如图 1 所示,隧道穿越主要岩石地层为三叠系大冶组第 2 段(T₁d²)灰色中厚层状灰岩、三叠系大冶组第 1 段(T₁d¹)灰色薄层状灰岩夹黄绿色页岩、二叠系下统茅口组、栖霞组(P₁m+P₁q)灰岩、石炭系黄龙组(C₂h)浅灰色微晶灰岩、志留系茅山组(S₃m)浅灰色砂岩等。其中,ZK220+857 T₁d¹附近页岩地层属于相对隔水区,地表汇水渗入地下后,将会在 P₁m+P₁q 灰岩地层中汇集,且受 F₂断层影响,断层带附近岩体破碎,导水能力强,极易沿断层破碎带发育溶洞与暗河。

总之,隧址区地表水不发育,地下水主要为岩溶水,区内大气降水汇集于山顶岩溶洼地、落水洞等,渗、流补给地下水岩溶水,深部岩溶发育,具有较强的储水能力,F₂断层破碎带附近岩溶发育,隧道施工中易产生较大规模突水、突泥。

3 紫荆山隧道综合超前地质预报

3.1 TSP203 探测原理及数据解释

TSP203 是在设计的震源点用少量炸药激发产生,当地震波遇到岩石波阻抗差异界面(如断层、破碎带、岩性变化、溶洞和地下水等)时,部分地震信号反射回来,部分信号透射进入前方介质。反射的地震信号被高灵敏度的地震传感器接收。数据

通过 TSPwin 软件处理,便可了解隧道工作面前方地质体的性质、位置及规模^[12-14]。

本次预报采用的是 TSP 203plus 系统,预报的范围是 ZK222+040~ZK221+880。图 2、3 分别是深度偏移图和预报结果 2D 视图。

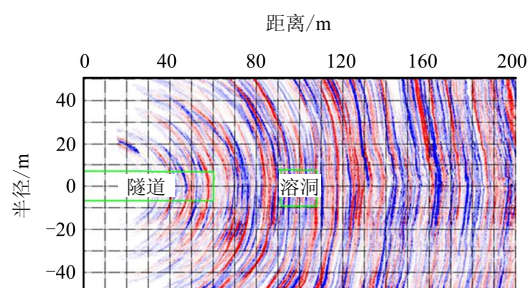


图2 深度偏移图
Fig.2 Maps of depth migration

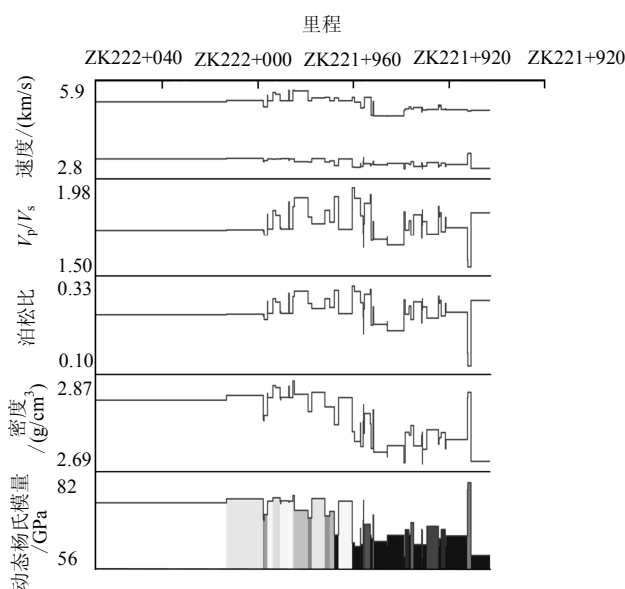


图3 预报结果 2D 视图
Fig.3 2D view of prediction result

根据 TSP 探测成果分析,在 ZK221+969~ZK221+958 段内,纵波、波速大幅降低, V_p 由 6 053 m/s 降为 5 620 m/s,横波 V_s 由 3 306 m/s 降为 3 149 m/s;泊松比明显增加,由 0.25 增大到 0.32;密度显著降低, ρ 由 2.87 g/cm³ 降为 2.76 g/cm³;弹性模量显著降低,由 78 GPa 降为 70 GPa,深度偏移以强烈的负反射开始,以强烈的正反射结束,反射带内正负反射层少、正负相间,反射带内单个反射条带窄,延伸性差。因此,可推断此段有较大溶洞出现。

3.2 地质雷达探测原理及数据解释

地质雷达 (GPR) 利用发射天线向被侧面内部发射电磁波,接收天线接收来自被侧面内部不同介

质面的反射波。电磁波的路径、强度和波形在不同的介质传播时会发生变化,根据接收到的电磁波的双程走时、幅度和波形资料可推断介质的结构。地质雷达能预报被侧面前方地层岩性的变化,对于断裂带特别是含水带、破碎带有较高的识别能力^[15-17]。

本次预报采用 SIR3000 型地质雷达,天线频率为 100 MHz,采集样本点为 512,数据解译图如图 4 所示。

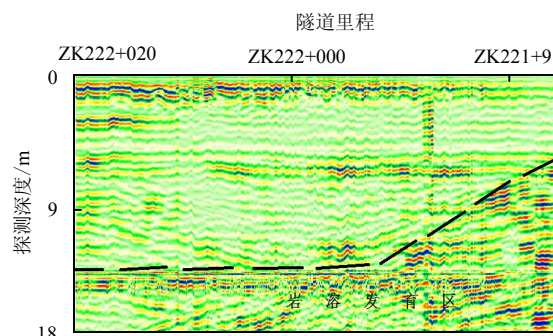


图4 地质雷达解译图
Fig.4 The interpretation map of GPR

分析表明,在 ZK221+975~ZK222+020 段存在一个与隧道轴向呈小角度相交界面(大里程方向处距隧道右边墙远),界面较为清晰,反射强烈,反射主频率低,表明该处岩体富水或夹泥严重。结合现场地质状况以及相关地质资料判断,该处为岩溶、暗河发育区。此外,将界面延伸,与隧道左洞相交处约 K221+960,推测暗河将在 ZK221+998 向小里程方向与右洞相交,相交点比左洞位置低。

3.3 实际开挖及勘测结果验证

2009 年 5 月 25 日,紫荆山隧道左线 ZK221+960 右拱腰(面向广州方向)处,开挖过程中揭露一溶洞(图 5),溶洞与地下暗河相连通。2009 年 5 月 28 日,隧址区普降暴雨,暗河水以约 5 000 m³/h 流量涌入隧道(如图 6 所示)。



图5 溶洞揭露照片
Fig.5 Photo of displaying karst cave



图 6 暴雨后隧道出水情况
Fig.6 Photo of water bursting in the tunnel
after a heavy rainstorm

经山东大学推荐, 指挥部委托中国地质学会洞

穴专业委员会对暗河的规模大小、空间分布进行了勘测, 勘察的暗河走向与隧道关系如图 7 所示。

勘测结果显示, 揭露的暗河的下游段与隧道的左洞相交, 总体上交角约 30° 。从暗河的延伸方向和展布规律来看, 下游将成“之”字形发育, 推测最后与隧道的右洞相交。

对比结果表明, TSP 超前地质预报比较准确地预报了溶洞暗河的位置, 并且地质雷达预报技术准确地探测了暗河的实际展布。因此, 综合超前地质预报可对暗河的探测和治理提供较准确的数据, 并为隧道的施工安全起指导作用。

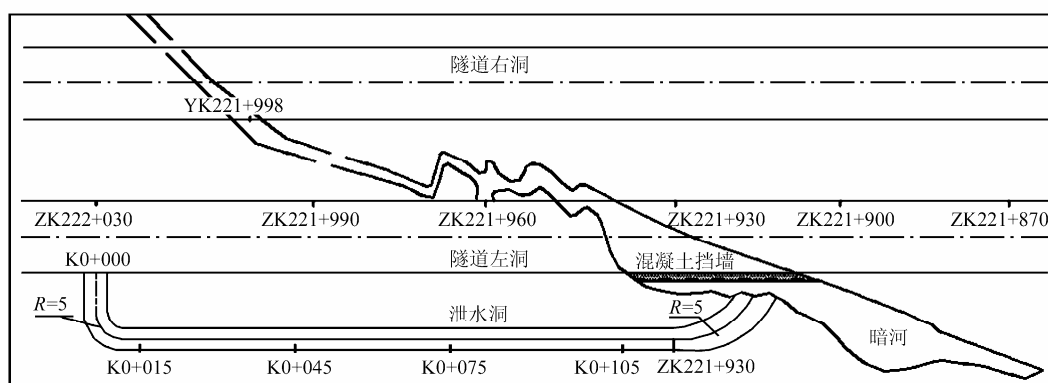


图 7 暗河与隧道关系与泄水洞方案图
Fig.7 Relationship with the tunnel underground river and the program of drain tunnel

4 紫荆山暗河治理

4.1 确定治理方案

工程中突遇溶洞或暗河时, 常常利用引排水法、堵填法、跨越法、绕避法等对暗河和溶洞进行治理^[18-19]。

紫荆山隧道 ZK221+960 暗河情况: 隧道与暗河相交, 即隧道直接穿过暗河, 且暗河流量较大, 久晴时为 $400 \text{ m}^3/\text{h}$, 雨季可达 $5\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

采用堵填法, 会切断整个暗河水的天然通道, 对施工、运营而言, 具有严重的安全隐患, 且对地质环境破坏较大, 所以这种方法适用于已经停止发育, 跨径较小且无水的溶腔处理。

跨越法用于隧道的底部遇到大而深的溶洞或者隧道穿过无填充物的空溶洞且上部有水流下的情况。为防止隧道通过后堵塞原有的岩溶管道, 一般在隧道下部施作涵洞、暗管、小桥、泄水洞等让水能顺利通过。而紫荆山隧道暗河流量较大, 暗河狭窄, 暗河底部与隧道几乎处于同一水平线上, 施作涵洞暗管十分困难, 暗河下游与左右洞都相交, 单

纯用此方法也无法完全治理紫荆山暗河。

绕避法用于突遇难度极大的地质条件, 施工难度大、施工风险高、地质条件与处治措施很复杂时, 隧道才会考虑绕过复杂地质段, 一般不为首选。

引排水法是针对规模较小的含水溶腔保持原有的岩溶管道的通畅, 而对紫荆山这种大型暗河也不适用。

综合分析以上几种方法, 取长补短后确定了“排、堵”结合的方法治理紫荆山暗河。

4.2 排水系统的布置

首先保持和利用好原暗河上游的排泄管道, 不能随意封堵, 在暗河与左洞相交处 (约 ZK221+940~ZK221+910 范围内) 施作混凝土挡墙, 使暗河水不能通过下游管道流向右洞方向, 减小暗河水对右洞的危害, 然后在左洞开挖方向右边墙 10 m 处设置与主洞平行的泄水洞, 将暗河水通过泄水洞排出。

4.3 隧道穿过溶洞的处理

如图 8 所示, 针对左线 DK221+960 揭示的溶腔, 先对溶腔回填 C20 混凝土, 厚度为拱顶以上不

小于4 m。然后洞内设置长度约40 m的 $\phi 108$ mm大管棚,大管棚设置5 m长工作室,工作室开挖后喷8 cm厚C20混凝土。洞内溶腔采用L长度为4.0 m的 $\phi 42$ mm小导管注浆,间距为1.0 m $\times$ 1.0 m,采用1:1水泥浆,注浆压力为0.5 MPa。在保证固结后的松散体在开挖中不坍塌后,才能再开挖,施作初期支护、二次衬砌。

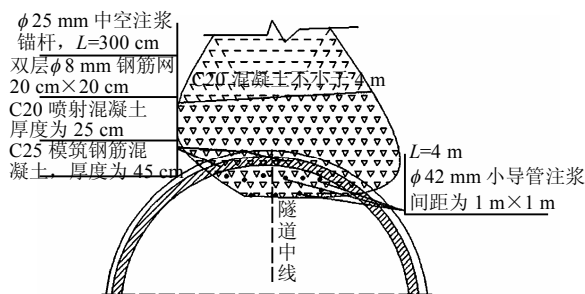


图8 溶腔治理图

Fig.8 Sketch map of salt cavity management

4.4 泄水洞施工方案

为了保证隧道结构和后期运营安全,这种与隧道相交的暗河一般都要设置泄水洞排水。为满足安全排水要求,根据泄水点的标高情况,泄水洞一般采用上坡施工,标高应高于泄水点2 m以上,坡度一般以1%~3%为宜。为保证泄水洞顺利施工,泄水洞施工断面的选择应满足无压泄水与施工现场要求(机械运输及通风要求)。暗河与隧道相接处存在临空面,对隧道主洞与泄水洞的施工造成不便,沿隧道边墙设置一混凝土挡墙。

紫荆山暗河泄水洞方案如图7所示,泄水洞起讫里程为ZK221+930~ZK222+609,全长679 m,与左洞的净距为10 m。根据上述原则,泄水洞采用上坡施工,上坡坡度为2.6%,采取的断面为4.6 m $\times$ 4.6 m。泄水洞的开挖按“短进尺,弱爆破”的原则进行,避免对主洞施工的干扰。

4.5 泄水洞施工方案优化

为了加快施工,不因暗河影响工期,对泄水洞方案进行了优化处理。久晴时,暗河水量约为400 m³/h,旱季时流量会减小,隧道排水沟能满足暗河水的排水要求。如图7所示,隧道开挖泄水洞时已经到旱季枯水期,所以泄水洞在施工到ZK222+030时开始往主洞方向开挖,使泄水洞和主洞连通,利用隧道主洞排水沟进行辅助排水。正洞和泄水洞可以同时开挖,优化后的方案在枯水期暗河流量小的情况下,成功地节约大量工期。

5 结 论

(1) 利用综合预报分析方法对紫荆山暗河进行了准确的预报。这种地质分析先行,然后“长、短”地质预报相结合的预报方法,可对隧道地质资料进行动态修正,准确确定地质异常体的位置和规模,对岩溶隧道暗河探测有一定的借鉴意义。

(2) 在揭露的暗河位置与隧道方位关系不确定的情况下,可利用地质雷达(GPR)的方法先对暗河的边墙和底板进行探测,查清暗河与隧道左右洞的基本方位关系。地质雷达的探测可及时准确地给出暗河与隧道的基本方位关系信息,对制订治理方案提供有利帮助。

(3) 当隧道开挖遭遇暗河横穿时一般都要采用泄水洞方案,根据暴雨后与久晴时的暗河水量与隧址区的气候与降雨情况可优化泄水洞方案。在泄水洞流量小于隧道排水沟排水量时,可优先考虑将泄水洞与隧道在合适的位置(根据隧道情况而定)连通,利用隧道排水沟将暗河水排出,这样可使隧道与泄水洞同时开挖,节约大量工期。改进的泄水洞方案在治理紫荆山暗河起到了很好的效果。

参 考 文 献

- [1] 李术才,李树忱,张庆松,等.岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):217—225.
LI Shu-cai, LI Shu-chen, ZHANG Qing-song, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 217—225.
- [2] 李利平,李术才,张庆松.岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J].岩土力学,2010,31(2):524—528.
LI Li-ping, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 524—528.
- [3] SALIS M, DUCKSTEIN L. Mining under a limestone aquifer in southern Sardinia: a multiobjective approach[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1983, 1(4): 357—374.
- [4] 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,(1):7—9,18.
WANG Meng-shu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. *Railroad Survey*, 2004, (1): 7—9, 18.
- [5] 刘志刚.概论岩溶或地质复杂隧道隧洞地质灾害超前

- 预报技术[J]. 铁道建筑技术, 2003, (2): 1—5.
- LIU Zhi-gang. On advance geological forecast of tunnels on karst or varied geological conditions[J]. **Railway Construction Technology**, 2003, (2): 1—5.
- [6] 张庆松, 李术才, 孙克国, 等. 公路隧道超前地质预报应用现状与技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 766—771.
- ZHANG Qing-song, LI Shu-cai, SUN Ke-guo, et al. Analysis and present state of advance geological forecast technology of highway tunnel[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(4): 640—644.
- [7] ALIMORADI ANDISHEH, MORADZADEH ALI, NADERI REZA, et al. Prediction of geological hazardous zones in front of a tunnel face using TSP-203 and artificial neural networks[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(6): 771—777.
- [8] 李天斌, 孟陆波, 朱劲, 等. 隧道超前地质预报综合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2429—2436.
- LI Tian-bin, MENG Lu-bo, ZHU Jin, et al. Comprehensive analysis method for advanced forecast of geology in tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2429—2436.
- [9] 高炳魁, 朱自强. TSP 超前预报在浅埋隧道中的应用[J]. 西部探矿工程, 2008, (1): 139—141.
- GAO Bing-kui, ZHU Zi-qiang. Application of TSP system in geological advanced prediction of tunnel[J]. **West China Exploration Engineering**, 2008, (1): 139—141.
- [10] 钟世航, 孙宏志, 王荣, 等. 隧道掌子面前方地质预报的现状与发展之路[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(3): 180—185.
- ZHONG Shi-hang, SUN Hong-zhi, WANG Rong, et al. The present situation of the geological prediction in front of tunnel face and its development[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2007, 4(3): 180—185.
- [11] 刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水机理及其防治对策[博士学位论文 D]. 北京: 中国地质大学, 2004.
- [12] 何发亮, 李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 12—14.
- HE Fa-liang, LI Cang-song. The development of geological forecast in tunnel construction[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2001, 38(3): 12—14.
- [13] 许振浩, 李术才, 张庆松, 等. TSP 超前地质预报地震波反射特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 640—644.
- XU Zhen-hao, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Reflection characteristic of seismic wave in TSP advance geological prediction[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(4): 640—644.
- [14] 刘志刚, 刘秀峰. TSP (隧道地震勘探) 在隧道隧洞超前地质预报中的应用与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1399—1402.
- LIU Zhi-gang, LIU Xiu-feng. TSP application and development in tunnel lead forecast[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(8): 1399—1402.
- [15] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [16] 吴俊, 毛海和, 应松, 等. 地质雷达在公路隧道短期地质超前预报中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 154—157.
- WU Jun, MAO Hai-he, YING Song, et al. Application of ground probing radar to short-term geological forecast for tunnel construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24 (Sup.): 154—157.
- [17] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2191—2196.
- LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Study of application of complex signal analysis to predicting karst-fractured ground water with GPR[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2191—2196.
- [18] 王喆, 赵明阶, 林志. 公路隧道施工常见地质灾害问题综述[J]. 公路交通技术, 2009, (1): 102—106, 112.
- WANG Suo, ZHAO Ming-jie, LIN Zhi. Summary of common geologic hazards during highway tunnel construction[J]. **Technology of Highway and Transport**, 2009, (1): 102—106, 112.
- [19] 黄鸿建, 张明庆. 宜万铁路隧道工程岩溶及岩溶水分析与应对[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(2): 22—33.
- HUANG Hong-jian, ZHANG Ming-qing. Techniques to break through the karst cavity by sluice outlets in Maluqing tunnel on Yichang-Wanxian railway[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2009, 46(2): 22—33.