



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eng](http://www.elsevier.com/locate/eng)



Research  
Tunnel Engineering—Article

## TBM 施工隧洞不良地质超前预报实践——以吉林省中部城市引松供水工程为例

李术才, 聂利超, 刘斌

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

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 7 April 2017

Revised 13 July 2017

Accepted 30 July 2017

Available online 14 December 2017

#### 关键词

TBM 隧洞

综合超前预报

地质分析

三维激发极化法

地震法

不良地质体

### 摘要

由于隧洞掘进机(TBM)施工具有快速、安全、高效的显著优势,采用TBM施工的隧洞越来越多。然而,TBM施工对地层的适应性较差,在施工过程中遭遇的诸如溶洞、断层或破碎带等不良地质,往往会造成突水突泥、塌方、卡机等灾害,严重危及施工安全。因此,提前探明掌子面前方的不良地质体及其含水情况极为重要。针对TBM施工隧洞的复杂环境,本文以吉林引松供水工程TBM施工隧洞为依托,综合运用地质分析、三维激发极化与地震超前地质预报方法,提出了适用于TBM隧洞施工期的综合超前地质预报技术体系,对TBM施工隧洞掌子面前方的溶洞、断层破碎带等不良地质进行了准确的预报。避免了隧洞突水突泥、塌方、卡机灾害的发生,对于TBM施工隧洞不良地质超前预报与TBM安全高效掘进具有一定借鉴意义。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

全断面隧洞掘进机(tunnel boring machine, TBM)施工隧洞具有掘进速度快、成洞质量高、经济效益显著、施工环境文明等优势,故而被广泛应用于隧洞建设中[1,2]。欧美发达国家的隧洞工程中,绝大多数选用TBM方法施工。中国的隧洞建设中也越来越多地选择TBM施工方法[3-5]。然而,TBM施工对于复杂地质条件的适应性较差,当TBM穿越断层破碎段落或岩溶发育段落等不良地质发育段落时,往往面临卡机、塌方、突涌水等重大工程安全事故[6,7]。一旦事故发生,往往造成巨大的工程损失。例如,克什米尔地区一处TBM隧

洞掘进由于揭露充水剪切带造成长达280天的重大延误[8];印度Dul Hasti水电站引水隧洞施工过程中,遭遇数次突水、突泥安全事故,历时12年方才完工[9,10]。针对TBM施工过程中不良地质灾害源导致的重大工程安全事故,国内外学者在TBM施工隧洞超前地质预报方法与技术方面开展了大量的研究工作。TBM机械以及金属机械带来的强电磁干扰,使许多地球物理手段无法使用[11,12]。此外,TBM隧洞的地质勘察空间有限。德国GET(Geo Exploration Technologies GmbH)公司开发了基于聚焦频域激发极化法的隧洞超前探测(BEAM)技术[13]。德国地球科学研究中心(GFZ)研发的地震综合成像系统(ISIS)[14],可得到隧洞掌子面前方一定空

\* Corresponding author.

E-mail address: [lishucaisdu@sdzu.edu.cn](mailto:lishucaisdu@sdzu.edu.cn) (S. Li).

间范围内的反射信息，并进行分析解译。总的来说，由于TBM施工隧洞的复杂探测环境，目前TBM施工隧洞可用的超前地质预报方法以地震波法和电阻率法为主。地震波探测方法对围岩破碎区域探测效果较好，但对水体响应不敏感。现有的TBM隧洞电阻率法无法实现含水构造的三维形态表征。目前尚没有可以实现TBM隧洞不良地质破碎区域和含水情况综合探测的技术。针对TBM施工隧洞的复杂环境，作者团队提出了地震超前地质预报方法，采用了一种适用于TBM隧洞的观测模式，能准确地识别TBM施工隧洞掌子面前方的断层破碎带。同时提出了一种用于TBM施工隧洞的三维激发极化法超前地质预报方法，采用前向聚焦观测方式可以提高探测距离，降低TBM干扰，能实现TBM施工隧洞掌子面前方的含水构造的三维成像，为TBM复杂环境不良地质的超前预报提供了一种可行的途径。

本文依托吉林引松供水工程TBM施工隧洞，开展了长期的超前地质预报应用与研究，采用地质分析、三维激发极化法与地震法超前地质预报方法相结合的思路，提出了TBM施工隧洞综合超前地质预报技术体系。在地质分析的基础上，针对具体的工程地质情况选择超前地质预报方法，具有探测效率高、针对性强、适应TBM施工特点的优势。采用TBM施工隧洞综合超前地

质预报技术体系，多次探明了断层破碎带与含水构造，保障吉林引松供水工程TBM安全高效掘进。

## 2. TBM 施工隧洞综合超前地质预报技术体系

当TBM掘进穿越岩溶发育段落时，面临着溶洞溶腔、岩溶管道等含导水构造引发突水涌泥灾害的风险。TBM穿越断层地质构造发育段落时，由于围岩质量差，在开挖扰动下面临着围岩塌方、TBM卡机等风险。可见充填岩溶含水构造和断层破碎带等是TBM施工隧洞超前地质预报工作的关注重点。对于TBM隧洞中典型的不良地质体，分别采用三维激发极化和地震超前地质预报方法作为TBM隧洞综合超前地质预报的主要方法。

在TBM隧洞施工特点方面，TBM施工的突出特点是掘进速度快，同时施工流程紧密，可用于超前地质预报作业的时间有限，要求地质预报体系不仅能快速而准确地预报典型不良地质构造，还需要满足TBM快速掘进的施工需求。因此，基于工程地质勘查资料，利用地质分析作为地质预报方案设计的基础，以三维激发极化和地震超前地质预报方法为核心，提出了适用于TBM施工隧洞的综合地质预报技术体系，如图1所示。

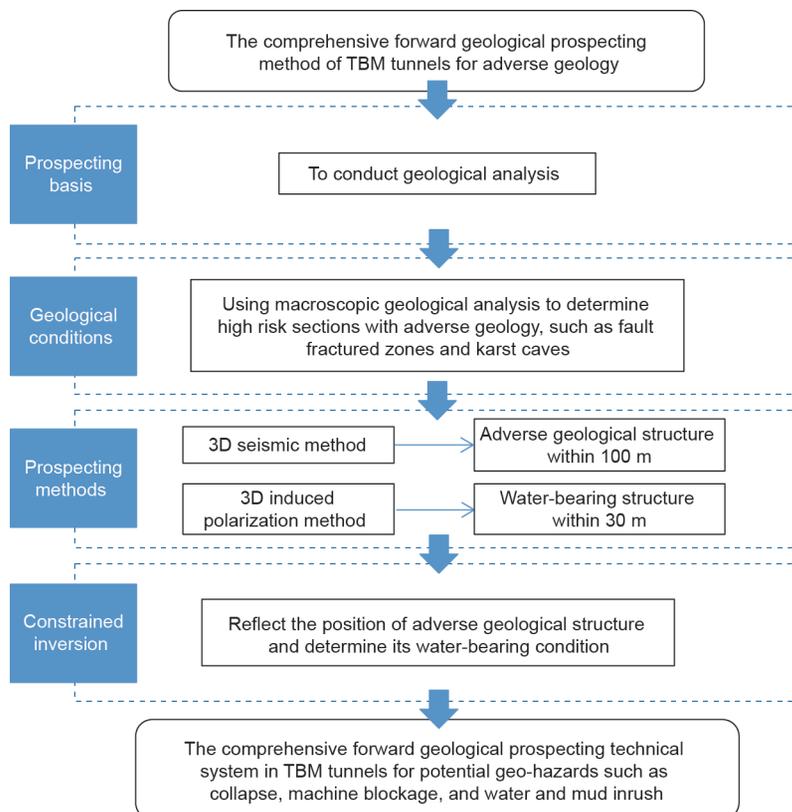


图1. TBM施工隧洞综合超前地质预报技术体系。

TBM隧洞综合地质超前探测技术体系包括以下几个方面。

**探测基础：**在已有地勘资料的基础上进行地质分析，对探测区域的地质构造、围岩岩性，以及可能发育的断层破碎带、富水区域等不良地质构造进行宏观预报。

**地质情况：**通过宏观地质分析确定可能出现岩性界面、断层破碎带、岩溶构造、地下暗河等不良地质构造的高风险段落。

**探测方法：**采用地震探测方法识别掌子面前方100 m范围内的断层破碎带和岩性界面。对于地震探测结果确定的异常体发育段落，采用三维激发极化法探测30 m范围内异常体的含水情况。

**约束反演：**将地震结果中的异常体位置和形态信息作为约束条件引入三维激发极化反演方程。约束反演方法既能反映断层、溶洞等不良地质体的形态和位置，也能确定其含水情况。

因此，TBM隧洞综合超前地质预报技术有助于避免隧洞施工期塌方、卡机、突水突泥等地质灾害的发生。

激发极化法探测是一种以不同介质间的激电效应差异为物性基础的探测方法，对于含水构造响应敏感，适用于TBM隧洞环境下含水构造超前探测。采用适用于TBM施工隧洞的聚焦测深型观测模式，在TBM隧洞中供电电极与测量电极的布置如图2所示。供电电极布置在TBM护盾和隧洞边墙上。测量电极布置在TBM刀盘上，在刀盘上同时布置一个供电电极，所有电极都采用柔性耦合电极。每环供电电极由多个同性源电极同时供电，无穷远电极B极与无穷远电极N极布置在隧洞后方边墙上。

来自TBM机械本身的电场干扰是TBM隧洞环境激发极化超前探测面临的关键问题。探测时，TBM暂停掘进，刀盘后退10~20 cm脱离掌子面，撑靴收回。多

个同性电极供电产生电场聚焦效应，使供电电流产生向前的聚束效果。然后对观测数据采用比例法进行TBM干扰去除。数据采集过程如下：首先，掌子面首圈屏蔽电极和刀盘中心电极供电，测量电极采集数据；而后，第二圈供电电极环供电，测量电极采集数据，直到第10~15圈供电电极环供电（向后移动60 m）。通过数值模拟和现场试验可以得到TBM干扰去除比例系数，利用比例系数乘以观测数据，可以很大程度上降低TBM干扰。

地震法探测是一种以地震波在介质中传播和反射物性差异为基础的探测方法。对断层破碎带、岩性界面等有明显的反应，适用于TBM隧洞不良地质构造的超前探测。图3所示为地震波法在TBM隧洞中的震源点(S)和检波器(A)的装置形式[15]。该方法施作时分别对激振点(S1~S10)进行锤击激震，检波器(A1~A20)记录地震数据。

### 3. TBM 施工隧洞综合超前地质预报工程实践

#### 3.1. 工程概况

吉林省中部城市引松供水工程供水范围为长春市、四平市、辽源市及所属的11个市、县、区的城区，以及输水线路附近可直接供水的26个镇。该工程属长距离跨流域城镇供水工程，最大年引水量为 $1.04 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，输水线路总长635.09 km，分为输水干线和输水支线，其中，输水干线长263.58 km，输水支线长371.51 km。本项目依托工程为输水总干线TBM施工隧洞，如图4所示。总干线线路地貌为低山丘陵，沿线地形起伏，植被较发育，高程范围为264.0~484.0 m，洞室最大埋深为260 m，沟谷累计长度约3229 m。地质条件复杂，为保障TBM的安全高效施工，需开展TBM施工期超前地质预报。

#### 3.2. K66+824—K66+794 三维激发极化法超前地质预报案例

总干线TBM施工洞段K71+046—K63+975段落为长距离灰岩段落，该段落地貌为丘陵和河谷地带。地质分析显示，段落内石炭系、泥盆系灰岩较纯，整个灰岩段落地表山谷相间，地表水与地下水丰富，在顺沟谷或构造方向岩溶发育的可能性高。同时，根据岩溶组合条件分析，连续层的厚度为100~200 m，岩层中有岩脉、非溶岩层夹层，对岩溶发育的规模有一定的制约作用。

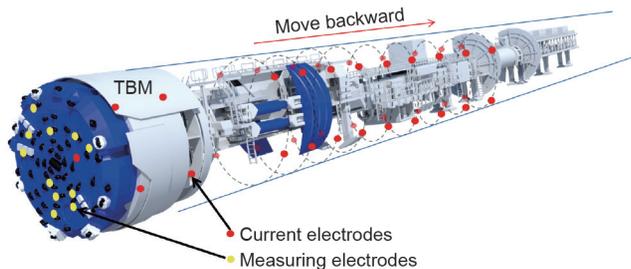


图2. TBM施工隧洞三维激发极化超前地质预报观测示意图。

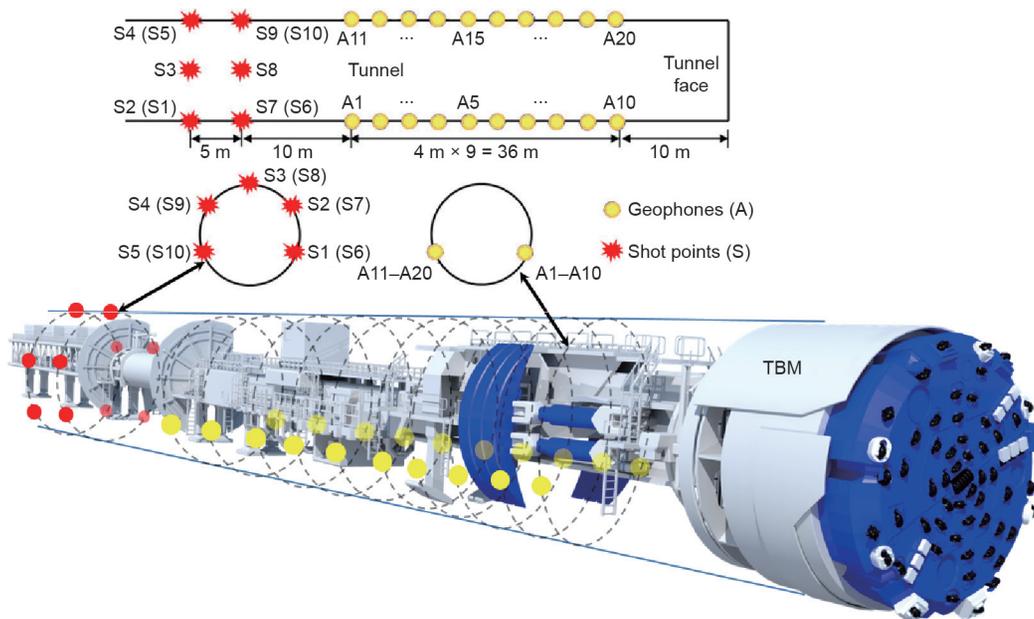


图3. TBM施工隧洞地震超前地质预报观测示意图[15]。



图4. 吉林引松供水工程总干线位置图。

通过地质分析可以发现，这一段岩溶发育以小规模地质构造为主，且地下水补给条件良好。根据TBM超前地质预报技术体系，该段落探测以岩溶等含水构造探查为重点，主要应用三维激发极化法超前地质预报手段。TBM掘进至K66+824位置，应用三维激发极化法超前地质预报进行超前探测，反演成像结果如图5所示。

图5(a)反映探测区域内围岩背景电阻率值大致为 $2800 \sim 3000 \Omega \cdot m$ ，在隧洞掌子面左侧部位存在低激发极化区域。为了更直观地体现三维激发极化成像中低阻体的位置和形态，提取了三维反演图像中电阻率小于 $500 \Omega \cdot m$ 的图像，从图5(b)中可以发现，反演区域内存在两处明显的低阻区域 $R_1$ 、 $R_2$ 。低阻区域 $R_1$ 在掌子面

附近的 $Y=-3 \sim 7 m$ 、 $Z=0 \sim 3 m$ 范围。低阻区域 $R_2$ 规模较大，在掌子面附近的 $Y=-10 \sim 0 m$ 、 $Z=8 \sim 28 m$ 范围。根据三维激发极化法探测可以给出地质推断：在K66+824—K66+816范围内，掌子面右侧存在一个球状低阻区域，推断为含水溶腔；在K66+816—K66+796范围内，掌子面前方有一较大规模的椭球状低阻区域，推断为含水溶洞或导水通道，有发生较大规模涌水的风险。

TBM掘进至K66+810处时，掌子面左侧揭露导水通道，经中部到右部边墙，涌水量约 $200 m^3 \cdot h^{-1}$ ，如图5(c)、(d)所示。开挖揭露结果与三维激发极化探测结果基本吻合。

### 3.3. K39+501—K39+401 段落地震法超前地质预报案例

总干线K38+963—K44+329段落，地貌为中低山丘陵，表层被第四系坡洪积物和冲洪积物所覆盖，其下为基岩，岩性较均一，以二叠系下统范家屯组花岗岩为主。根据初勘资料，区间发育有断层构造20余条。根据超前地质预报体系设计思路，该段落内含水地质构造不发育但断层构造较发育，因此，该段落以地震法超前地质预报方法为主。TBM掘进至K39+501位置，应用地震法超前地质预报进行超前探测，偏移成像方法得到的地震反射图像如图6所示。

通过图6所示地震法偏移成像结果进行地质推断，推断正负反射密集的区域为围岩破碎区域。由图可以

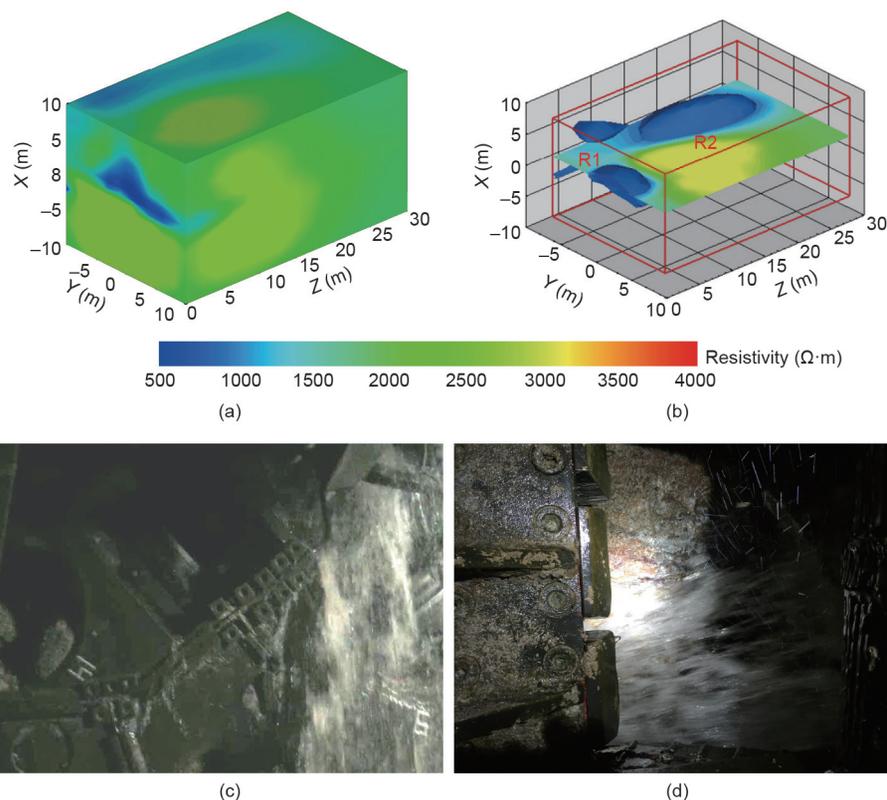


图5. 三维激发极化探测结果与开挖揭露。(a) 三维反演成像图；(b) 低阻体提取结果图；(c) 刀盘内开挖揭露涌水照片；(d) 溜渣口涌水照片。

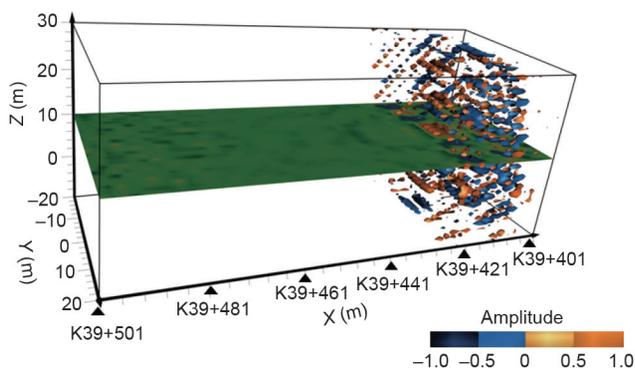


图6. 地震法探测三维成像图。

看出, K39+431—K39+401段落集中出现正负反射区域。推断围岩情况如下: K39+501—K39+431段落未出现明显的正负反射, 推断该段落围岩完整性差, 裂隙发育; K39+431—K39+401段落有两条较明显正负反射, 推断该段落围岩完整性差, 裂隙发育, 局部较破碎, 其中, K39+421—K39+401段落存在软弱层面, 易发生掉块和塌腔。

TBM掘进至K39+428处, 隧洞左侧边墙揭露软硬岩交接带, 如图7(a)所示。掘进至K39+418—K39+407段落, 揭露围岩破碎区域, 节理裂隙发育, 围岩软弱, 局部有掉块发生, 如图7(b)、(c)所示, 与预报结果较为一致。

### 3.4. K39+788—K39+688 综合超前地质预报案例

根据地表勘查和地质分析, K39+788—K39+688段落TBM掘进穿越花岗岩断层影响带, 同时该段落埋深较浅, 地表为沟谷汇水区域, 汇水面积较大, 地下水补给充沛。根据TBM超前地质预报技术体系, 对于该地质复杂段落, 综合应用地震法和三维激发极化法进行超前地质预报。首先, 应用地震方法探测破碎区域, 根据地震探测结果, 开展三维激发极化方法探测破碎区域含水情况。

TBM掘进至K39+788位置, 应用地震法进行超前探测, 得到的地震反射图像如图8所示。由图8可以看出, K39+788—K39+770段落, 集中出现正负反射区域。但是, K39+746—K39+688段落, 出现零星的正负反射。因此, 根据地震成像结果做出地质推断: K39+788—K39+770段落为围岩破碎区域, 裂隙发育, 易发生掉块和塌腔。

为进一步探明破碎围岩充填情况, 进行了三维激发极化法超前地质预报, 得到的反演成像结果如图9所示。图9(a)反映探测区域内围岩背景值大致为 $3000 \sim 3200 \Omega \cdot m$ , 在隧洞掌子面与右侧部位存在低阻区域。由反演结果图9(b)可以看出, 掌子面右侧区域 $Y=0 \sim 10 \text{ m}$ 、 $Z=0 \sim 20 \text{ m}$ 范围内存在低阻区域。低

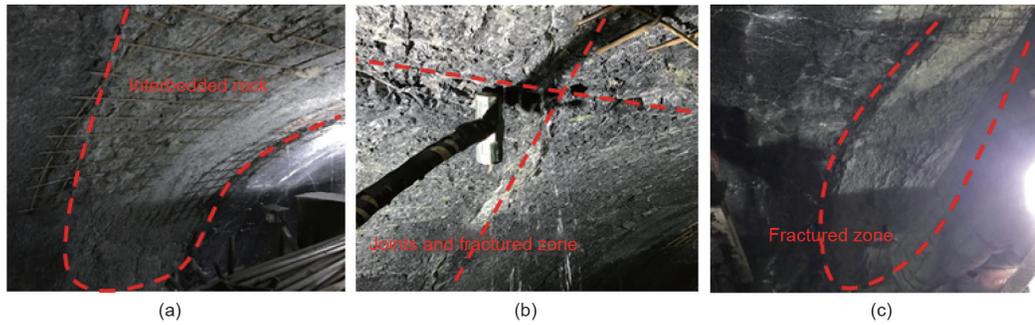


图7. TBM开挖揭露图。(a) 岩性交界面；(b) 揭露裂隙；(c) 软弱围岩。

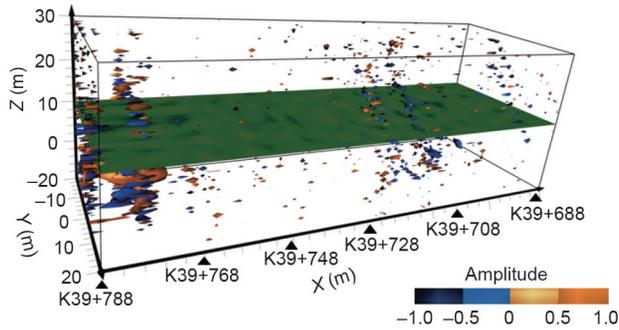


图8. K39+788—K39+688段落地震法探测三维成像图。

阻区域面积较大，但电阻率值较高，在 $1200 \Omega \cdot \text{m}$ 左右。根据三维激发极化法探测结果给出地质推断：推断

K39+788—K39+768段落破碎围岩含水，在右侧拱顶围岩易出现大面积滴水或线状流水。

TBM在K39+788—K39+768段落内掘进过程中，TBM揭露围岩破碎区域，节理裂隙发育，多处出现塌腔掉块，如图10(a)所示，拱顶大面积淋水，以裂隙水线状流水为主，如图10(b)所示，开挖结果与综合地质预报结果较为吻合。

#### 4. 结论

以吉林引松供水工程TBM施工隧洞为依托，本文介绍了以地质分析、地震法与三维激发极化法相结合的

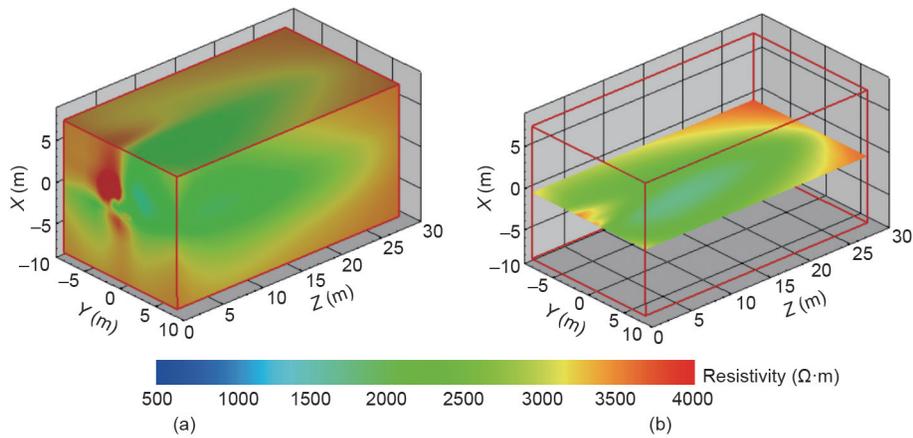


图9. 三维激发极化探测结果图。(a) 三维反演成像图；(b)  $X=0$ 切面结果图。



图10. TBM开挖揭露图。(a) 破碎围岩照片；(b) 破碎围岩大面积线状流水照片。

TBM隧洞综合超前预报技术体系与现场实践，主要结论如下：

(1) 综合地质分析、三维激发极化法与地震法超前地质预报三种手段，提出了以地质分析为基础，三维激发极化法和地震法为核心的适用于TBM复杂环境的超前预报的思路，建立了TBM隧洞施工期综合超前地质预报技术体系。

(2) 综合超前地质预报体系在吉林引松供水工程TBM施工隧洞进行了成功的应用，在地质分析的基础上，利用地震法探测断层破碎带等，利用三维激发极化法探测含水构造。隧洞开挖地质编录中对预报成果进行了对比，验证了TBM隧洞综合超前预报的探测效果，对TBM施工隧洞超前地质预报工作具有一定的借鉴与指导意义。

(3) 随着TBM施工技术的发展，必然对TBM施工超前地质预报的方法、技术与设备提出更高的要求，集成化、自动化、实时化的TBM搭载式探测系统和动态成像方法是未来发展的方向。

## Acknowledgements

The authors thank the China Railway Tunnel Group and the China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd. for their contributions and assistance in the publication of this paper. Moreover, this paper is supported by the National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (2014CB046901 and 2015CB058101), the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (51327802), the National Natural Science Foundation of China (51739007, 51479104, and 41502279), the National Key Research and Development Plan (2016YFC0401805, 2016YFC0801604, and

2016YFC0401801), the Key Research and Development Plan of Shandong Province (2016ZDJS02A01 and 2016GSF120001), and the Science and Technology Major Project of Henan Province (161100211100).

## Compliance with ethics guidelines

Shuca Li, Lichao Nie, and Bin Liu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Reference

- [1] Petronio L, Poletto F. Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise. *Geophysics* 2002;67(6):1798–809.
- [2] Farrokh E, Rostami J. Effect of adverse geological condition on TBM operation in Ghomroud tunnel conveyance project. *Tunn Undergr Space Technol* 2009;24(4):436–46.
- [3] Qian Q, Li C, Fu D. The present and prospect of application of tunneler in China's underground engineering. *Undergr Space* 2002;22(1):1–11. Chinese.
- [4] Zhang J. The application and some problems of TBM and its prospects. *Chin J Rock Mech Eng* 1999;18(3):363–7. Chinese.
- [5] Zhang J, Fu B. Advances in tunnel boring machine application in China. *Chin J Rock Mech Eng* 2007;26(2):226–38. Chinese.
- [6] Parise M, De Waele J, Gutierrez F. Engineering and environmental problems in karst—An introduction. *Eng Geol* 2008;99(3–4):91–4.
- [7] Yin J, Shang Y, Fu B, Qu Y. Development of TBM-excavation technology and analyses and countermeasures of related engineering geological problems. *J Eng Geol* 2005;13(3):389–97. Chinese.
- [8] Barton N. Reducing risk in long deep tunnels by using TBM and drill-and-blast methods in the same project—The hybrid solution. *J Rock Mech Geotech Eng* 2012;4(2):115–26.
- [9] Vibert C, Gupta SC, Felix Y, Binquet J, Robert F. Dul Hasti hydroelectric project (India): Experience gained from back-analysis of the excavation of the head-race tunnel. In: *Proceedings of Geoline 2005 International Symposium*; 2005 May 23–25; Lyon, France; 2005. p. 154.
- [10] Shang Y, Yang Z, Zeng Q, Sun Y, Shi Y, Yuan G. Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions. *Chin J Rock Mech Eng* 2007;26(12):2404–11. Chinese.
- [11] Lu X. Three dimensional parallel simulation of transient electromagnetic response of tunnel boring machine and the elimination of its response [dissertation]. Xi'an: Chang'an University; 2012. Chinese.
- [12] Li S, Liu B, Xu X, Nie LC, Liu Z, Song J, et al. An overview of ahead geological prospecting in tunneling. *Tunn Undergr Space Technol* 2017;63:69–94.
- [13] Kaus A, Boening W. BEAM—Goelectrical ahead monitoring for TBM-drives. *Geomech Tunn* 2008;1(5):442–9.
- [14] Lüth S, Giese R, Rechlin A. A seismic exploration system around and ahead of tunnel excavation—OnSITE. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress and the 34th Ita-Aites General Assembly*; 2008 Sep 19–25; Agra, India; 2008. p. 34.
- [15] Liu B, Chen L, Li S, Song J, Xu X, Li M, et al. Three-dimensional seismic ahead-prospecting method and application in TBM tunneling. *J Geotech Geoenviron* 2017;143(12):04017090.