

TSP-3D超前地质预报在隧道掘进中的应用

李 川¹, 谢彬彬², 谭 涛¹

¹重庆交通大学土木工程学院, 重庆

²重庆交大建设工程质量检测中心有限公司, 重庆

收稿日期: 2025年12月9日; 录用日期: 2025年12月30日; 发布日期: 2026年1月14日

摘 要

TSP-3D超前地质预报技术作为隧道工程地质探测的重要手段, 通过三维地震波反射原理, 实现了对掘进工作面前方围岩条件较精准的预测。该技术结合高密度数据采集与三维成像分析, 能够有效识别断层破碎带、岩溶发育区、富水带等不良地质体, 为复杂地质条件下的隧道施工提供科学依据。文章围绕TSP-3D超前地质预报在隧道掘进中的应用展开研究, 并以在建垫丰武高速火炉隧道为实践案例, 解析岩体破碎、富水的雷达图像特征等, 系统分析预报数据并进行结果校验, 结果表明, 探测系统能较精准预报不良地质体, 为施工方案优化提供可靠依据, 降低了地质灾害风险, 提升了施工效率, 对实现隧道工程安全性与经济性的协同优化具有关键作用。

关键词

TSP-3D, 超前地质预报, 隧道掘进, 地震波

Application of TSP-3D Advanced Geological Prediction in Tunnelling

Chuan Li¹, Binbin Xie², Tao Tan¹

¹School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

²Chongqing Jiaotong University Construction Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd., Chongqing

Received: December 9, 2025; accepted: December 29, 2025; published: January 14, 2026

Abstract

As an important means of tunnel engineering geological exploration, TSP-3D advanced geological prediction technology realizes the accurate prediction of the surrounding rock conditions in front of the tunneling work through the principle of three-dimensional seismic wave reflection. This technology combines high-density data acquisition and 3D imaging analysis to effectively identify bad

geological bodies such as fault fracture zones, karst development zones, and water-rich zones, and provides a scientific basis for tunnel construction under complex geological conditions. This paper focuses on the application of TSP-3D advanced geological forecasting in tunnel boring, and takes the Dian-Feng-Wu high-speed furnace tunnel under construction as a practical case, analyzes the radar image characteristics of rock mass fragmentation and water richness, and systematically analyzes the forecast data and verifies the results. The findings show that the system can forecast adverse geology with high accuracy, furnish reliable information for optimizing the construction scheme, reduce geologic hazards, and improve excavation efficiency, thereby playing a pivotal role in achieving the combined goals of safety and cost-effectiveness in tunnel projects.

Keywords

TSP-3D, Advanced Geological Forecasting, Tunneling, Seismic Wave

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国基础设施建设的快速发展,隧道工程逐渐向深埋、长距离及复杂地质条件区域延伸。隧道项目施工是一项复杂的系统性工程[1],施工中揭露隐伏岩溶(溶洞、岩溶裂隙、落水洞、岩溶漏斗、岩溶管道等)的可能性极大,施工风险极高[2],进而危及施工人员的生命财产安全[3]。据统计,近年来因地质条件不明导致的隧道施工事故占比高达 30%,凸显了超前地质预报技术的重要性。TSP (Tunnel Seismic Prediction)作为一种基于地震波反射原理的非破坏性探测技术,因其预报距离长、精度高、成本低等优势,已成为隧道工程中不可或缺的预报方法。

由于施工区域复杂多变的地质条件以及现有地质勘探手段的局限性[4],传统的地质勘探方法难以满足复杂地质环境下隧道施工的实时预报需求。TSP 技术通过人工激发地震波,分析反射波信号,可有效探测掌子面前方 100~200 米范围内的岩性变化、破碎带位置及富水情况。近年来,TSP 技术从二维发展到三维(TSP-3D),进一步提高了空间分辨率和预报准确性。例如,在宜万铁路云雾山隧道(最大埋深 800 米)施工中,TSP-3D 结合地质雷达和超前钻孔技术,成功预报了多次岩溶突水灾害[5],为动态调整支护参数和施工方案提供了科学依据。类似地,齐岳山隧道通过 TSP-3D 与超前钻探的综合应用,精准识别了岩溶裂隙发育区,指导帷幕注浆施工,显著降低了突泥突水风险[6]。

TSP-3D 技术作为隧道掘进中的核心,系统分析其技术原理、数据采集流程及解译方法,并探讨其在复杂地质条件下的优化路径,提取了不同地质现象的响应特征,对提高 TSP 地质预报的准确性和可靠性有指导意义[7]。为隧道工程的安全高效施工提供理论支撑和实践指导,同时推动超前地质预报技术向智能化、集成化方向发展。总体而言,TSP-3D 系统作为当前在三维超前地质预报领域中性能优异的代表性技术方案,已逐渐成为行业内的主流应用工具[8]。未来,随着人工智能和物联网技术的融合,TSP-3D 有望实现实时数据处理与风险自动预警,进一步降低隧道施工的地质灾害风险。

2. TSP 超前地质预报系统

2.1. 预报原理

在隧道工程的特定施工段落,通过锤击或小药量爆破在隧道掌子面后方或侧壁制造震源,产生地震

波信号, 这些地震波以球面波形式沿隧道轴向传播[9]。为了采集反射波数据, 采用矩阵式布置的无线三分量传感器(通常不小于 8 个), 同步接收 X、Y、Z 三轴方向的反射波信号, 捕捉空间多角度反射信息, 形成三维数据。地震波在不同岩层中传播速度不同, 当遇到波阻抗差异界面(如断层、溶洞、破碎带)时会发生反射, 反射信号被高精度传感器接收, 通过无线传输至主机。最后计算机软件分析反射波的走时、振幅、频率等特征, 结合三维空间定位技术: 生成纵向、横向二维切片和立体 3D 地质模型; 计算围岩弹性模量、泊松比、密度等力学参数; 标注不良地质体的空间位置、规模及与隧道轴线的交线, 从而预判隧道掘进掌子面前方及周边区域的地质状况[10]。

2.2. 系统的技术性能

TSP 超前地质预报系统自带三维超前预报处理软件, 数据采集、处理和评估为一体, 在常见的 MS Window 窗口进行交互作用。通过三维超前预报处理软件, 可以获得探测范围内的全部岩石力学参数, 如弹性模量和泊松比等, 利用探测到的物理力学参数, 可预测进行深度方向及其周围岩层的构造变化。探测范围可达到 150 m, 硬岩层甚至可达 200 m, 在现场进行数据采集时, 能伴随施工连续采集, 不影响掘进作业。

2.3. 探测系统布置

TSP 超前地质预报通过 8 个传感器完成信号采集, 对于不同的隧道, 传感器可以采取相应的布设方式。一般情况, 传感器布置可以分为掌子面和边墙两种方式: 掌子面布设要求钻孔位置位于同一平面内, 钻孔位置距离地面 0.5 m~1 m 之间, 纵向范围内, 钻孔之间的距离保持在 1 m~1.5 m 之间, 横向范围内, 钻孔之间的距离保持在 1 m~2 m 之间, 如图 1 所示。边墙布设要求钻孔位置位于同一平面内, 钻孔位置距离地面 0.5 m~1 m 之间, 钻孔左右之间的距离保持在 1 m~2 m 之间, 如图 2 所示。

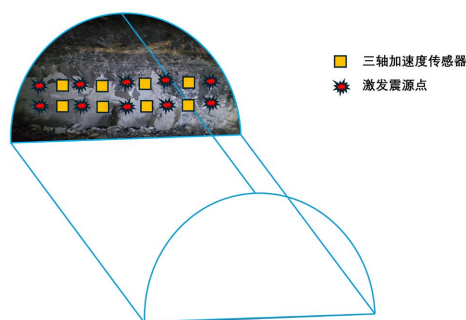


Figure 1. Schematic diagram of how to lay out the tunnel surface

图 1. 掌子面布设方式示意图

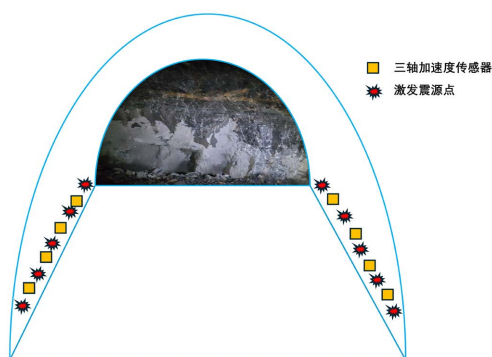


Figure 2. Schematic diagram of the layout of the side wall

图 2. 边墙布设方式示意图

3. 工程实例

3.1. 工程概况

火炉隧道属于重庆垫江至丰都至武隆高速 TJ09 合同段,进口位于火炉镇东侧的风背岩,出口位于火炉镇宝丰村谭家沟,右线长 6968 m,属特长隧道。隧址区属构造剥蚀溶蚀中低山地貌单元,进洞口为斜坡,坡上多为基岩出露,植被稀疏,地形坡度约 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$,出洞口位于斜坡中下部,斜坡地形坡度 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$,坡上多为植被,局部缓坡平台多为旱地。洞身段山体总体南北向展布,北高南低,区内地形受构造和岩性控制明显,在三叠系飞仙关组、嘉陵江组、须家河组地层,多呈陡坡山脊;雷口坡组页岩及侏罗系砂泥岩地层,多呈剥蚀沟槽地形。隧道工程所处区域气候属于中亚热带湿润季风气候类型,雨量丰沛,隧道洞身段木水槽内有常年性地表水。隧址区分布地层岩性为第四系(Q4)及侏罗系中统新田沟组(J2x)、中下统自流井组(J1--2z)、下统珍珠冲组(J1z)及三叠系上统须家河组(T3xj)、中统口坡组(T21)下统嘉陵江组(T1i)、下统飞仙关组(T1f)。

目前掌子面桩号为 ZK152+208,根据设计资料,ZK152+208~ZK152+358 段设计围岩为三叠系下统嘉陵江组一段灰岩构成,属较硬岩,薄-中厚层状构造,中风化,地表为岩溶槽谷,物探异常区域,溶蚀裂隙较发育,岩体较破碎,隧道出水呈淋雨状、雨季呈小股状或涌流状。隧道开挖,顶拱易掉块或小范围坍塌,开挖后支护应及时。灰岩 $R_c = 43.38 \text{ Mpa}$, $K_v = 0.5$, $K_1 = 0.4$, $K_2 = 0.4$, $K_3 = 0$, $[BQ] = 275$,围岩综合划为 IV 级。掌子面如图 3 所示。

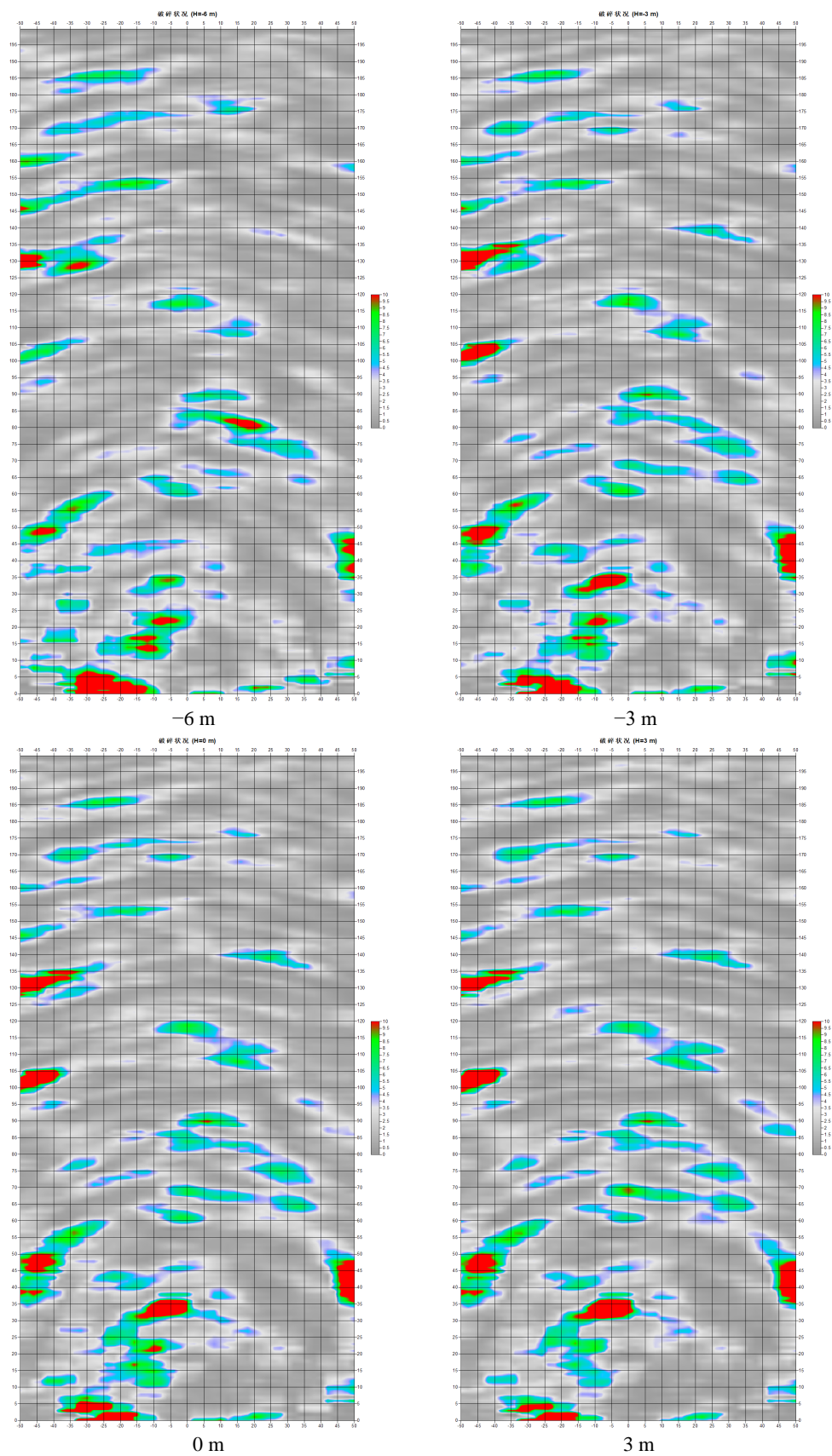


Figure 3. The rock mass at tunnel face ZK152+208

图 3. ZK152+208 围岩掌子面

3.2. TSP 探测结果

根据 TSP 地质探测数据图像分析,结合掌子面围岩地质揭示情况,对前方 150 m 范围内的地质条件及异常进行预测,相应探测解译成果图如图 4~9 所示。



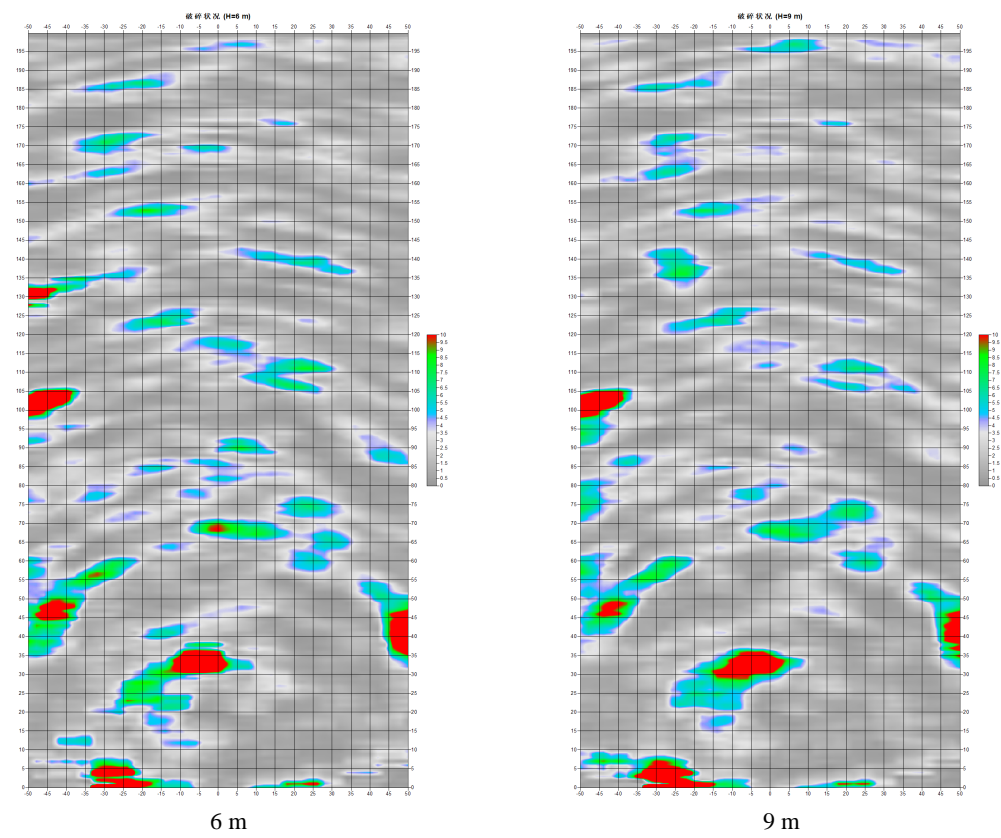


Figure 4. Distribution map of rock mass crushing status (height -6 m, -3 m, 0 m, 3 m, 6 m, 9 m)
图 4. 岩体破碎状况分布图(高度-6 m、-3 m、0 m、3 m、6 m、9 m)

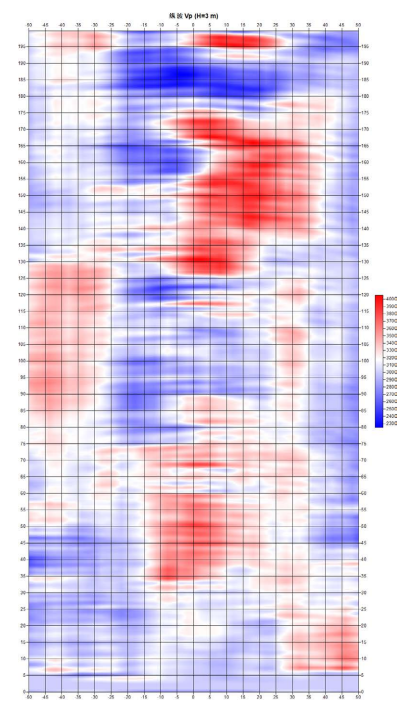


Figure 5. Longitudinal wave speed diagram
图 5. 纵波波速图

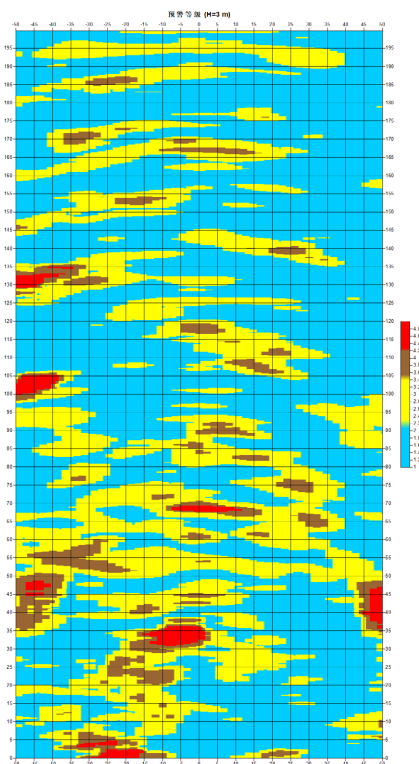


Figure 6. Excavation warning level

图 6. 开挖预警等级

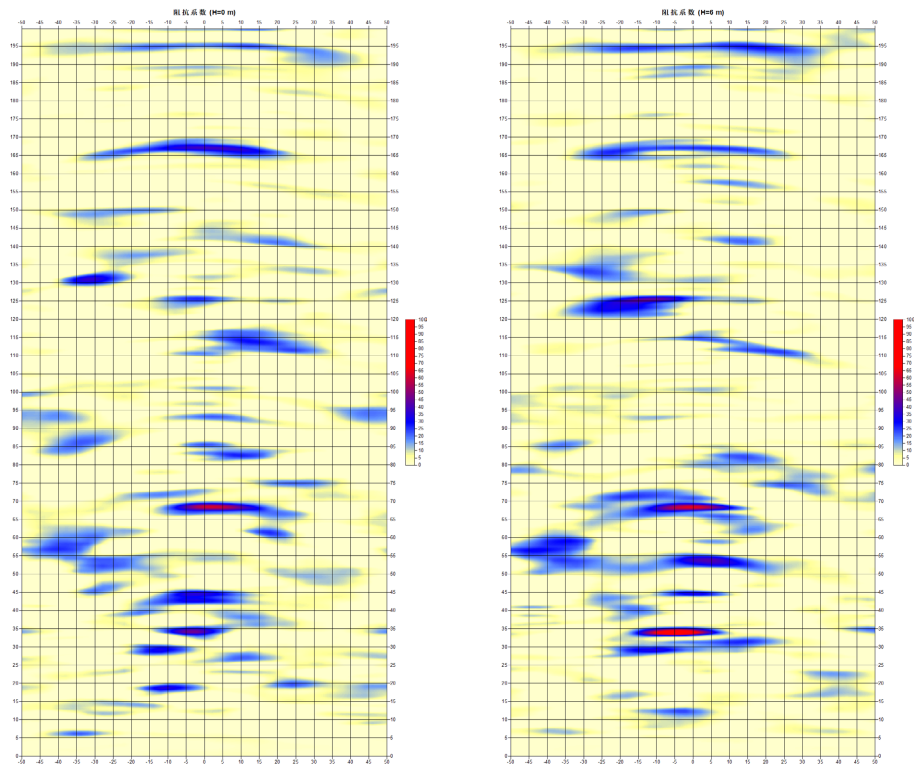


Figure 7. Water content probability inference map (height 0 m, 6 m)

图 7. 含水概率推断图(高度 0 m、6 m)

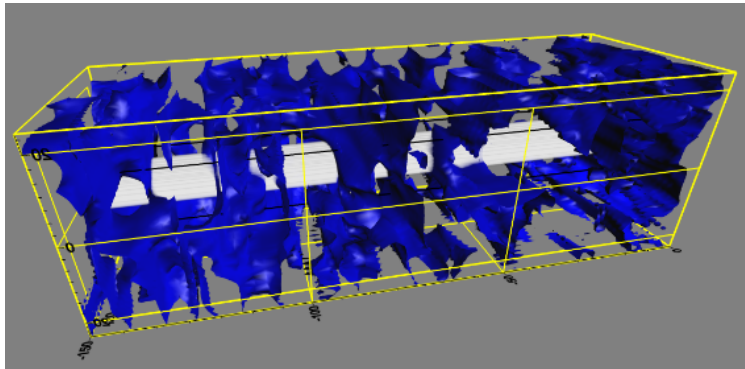


Figure 8. Three-dimensional distribution map of rock mass fracture
图 8. 岩体破碎状况三维分布图

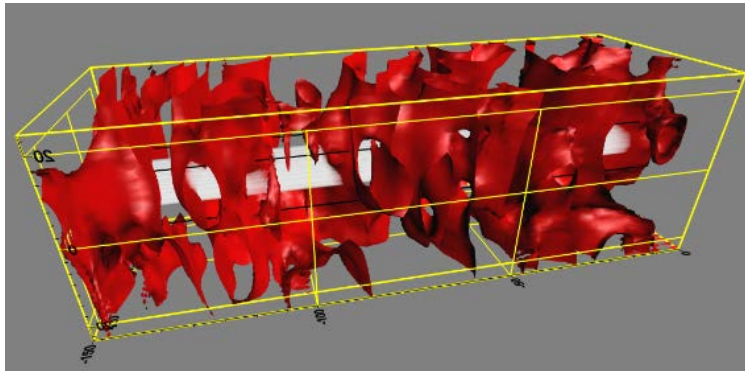


Figure 9. Three-dimensional distribution map of water content of rock mass
图 9. 岩体含水状况三维分布图

相应颜色对应围岩情况见表 1~4。

Table 1. Water content grade color identification table
表 1. 含水等级颜色标识表

项目	等级一	等级二	等级三	等级四	等级五
含水	白色	淡蓝色	蓝色	浅红色	红色
	较干燥	潮湿	滴状渗水	现状出水	股状出水

Table 2. Longitudinal wave velocity grade color identification table
表 2. 纵波波速等级颜色标识表

项目	等级一	等级二	等级三	等级四	等级五
纵波波速	深蓝色	淡蓝色	白色	淡红色	深红色
	软弱	较软弱	与测试面一致	较坚硬	坚硬

Table 3. Color identification table of surrounding rock crushing grade
表 3. 围岩破碎等级颜色标识表

项目	等级一	等级二	等级三	等级四	等级五
围岩破碎	灰色	白色	蓝色	绿色	红色
	无明显变化	发生较弱变化	发生变化	发生较大变化	发生剧烈变化

Table 4. Excavation risk level color identification table
表 4. 开挖风险等级颜色标识表

项目	等级一	等级二	等级三	等级四	等级五
开挖风险等级	蓝色	黄色	棕色	红色	—
	基本无风险	风险较小	具备一定风险	风险较大	—

根据破碎状况分布图、纵波波速分布图和含水推断图、开挖风险等级图分析，ZK152+208~ZK152+258、ZK152+258~ZK152+308、ZK152+308~ZK152+358 围岩岩体反射信号较强，整体预警等级一般，局部预警等级较高。推测围岩总体地质情况较差，地层岩性主要以三叠系下统嘉陵江组三段灰岩为主，围岩破碎，夹层发育，存在泥质夹层，岩层层间结合差，岩层裂隙张开可能较大，可能存在溶蚀空腔，围岩完整性差，自稳能力差，拱顶与拱腰易掉块，裂隙水较发育，呈线流状 - 股状分布，推断围岩为IV级。

3.3. TSP 探测结果验证

在隧道掘进施工过程中，依据 TSP 超前地质预报获取的岩体结构、破碎带分布及地下水赋存状态等预测信息，于开挖暴露围岩后立即开展现场地质复核。通过对比设计围岩的岩性特征与预报数据的空间匹配性，证实两者具有较高的吻合度，如表 5 所示。

Table 5. Advance geological forecast interpretation results table
表 5. 超前地质预报解译成果表

序号	里程段落	长度(m)	地质解译内容	建议围岩等级	设计围岩等级
1	ZK152+208 ~ ZK152+258	50	推测 ZK152+208~ZK152+258 段围岩地质情况较掌子面 ZK152+208 里程处稍变差，围岩破碎，夹层发育裂隙水发育，呈线流状 - 股状分布。	IV	IV
2	ZK152+258 ~ ZK152+308	50	推测 ZK152+258~ZK152+308 段围岩地质情况较前段 ZK152+208~ZK152+258 里程稍变好，围岩节理裂隙较发育，围岩完整性差，裂隙水发育。	IV	IV
3	ZK152+308 ~ ZK152+358	50	推测 ZK152+308~ZK152+358 段围岩地质情况较前段 ZK152+258~ZK152+308 里程段相当，围岩松散，裂隙水发育，呈线流状 - 股状分布。	IV	IV

3.4. TSP-3D 技术在隧道应用中的成效与不足分析

TSP-3D 超前地质预报技术在火炉隧道的成功应用，证实了其在复杂岩溶地质条件下进行三维空间探测的有效性。预报结果与开挖揭露情况的高度吻合，体现了该技术对岩体破碎区、含水带等不良地质体的较强识别能力。其三维可视化成果为施工人员提供了直观的超前地质认知，有助于提前制定针对性措施，体现了现代地质预报技术集成化、可视化的优势。

然而，在充分肯定其预报效果的同时，也应认识到，任何探测技术均存在其适用条件与解释不确定性。在本案例中，尽管整体预报准确，但在局部细微地质特征的判识上，仍存在预报结果与实际情况的些微差异。例如，对于规模小于 2 米的孤立溶蚀空腔或极度发育的网状微裂隙带，预报图像中虽能显示异常，但在精确界定其空间形态与边界方面存在一定模糊性。此外，对于裂隙水“线流状”与“股状”出水的量化区分，预报主要基于含水概率推断，其精度受岩体非均质性与地下水瞬时动态变化的影响。

这些差异的可能原因主要包括：第一，地质条件的极端复杂性。隧址区岩溶发育具有强烈的非均质性与随机性，微小的岩性变化、充填物性质差异及裂隙网络的复杂连通性，均可能引起地震波反射信号

的微妙变化,增加数据解译的难度。第二,技术原理的固有局限性。TSP 技术基于弹性波反射,其对波阻抗差异界面敏感,但对于物性渐变带或含水饱和度细微变化的响应不够显著,且探测分辨率随距离增加而降低。第三,数据采集与处理的人为因素。传感器布设的耦合质量、背景噪声的干扰以及解译人员对区域地质规律的认识深度,均会影响最终成果的准确性。

基于以上分析与实践经验,为提升未来在类似岩溶地区隧道工程中超前地质预报的针对性与可靠性,提出以下建议:

1) 推行多源信息融合的综合预报体系:不宜单独依赖 TSP-3D 技术。应将其与地质雷达、超前水平钻探、瞬变电磁法等技术相结合,形成长短结合、点面结合、物探与钻探验证互补的综合预报方案,以克服单一方法的局限性。

2) 强化地质与物探的互动解译:预报解译人员必须深入掌握工区区域地质背景、构造演化史和岩溶发育规律。将物探异常置于具体地质模型中进行分析,结合掌子面地质素描进行实时对比与校准,动态更新解译规则,减少解译的主观随意性。

3) 实施动态化与精细化的预报管理:在重点复杂段落,应缩短预报循环距离,增加探测剖面密度。预报成果应不仅提供静态的地质模型,还需结合施工进度,进行动态风险评估,及时更新开挖预警等级,并与施工方案、支护参数动态调整实现联动。

4. 总结

本文围绕 TSP-3D 超前地质预报技术在隧道掘进中的应用展开系统研究,得出以下结论:该技术通过三维地震波反射与高密度数据采集,能够有效构建掘进工作面前方围岩的地质结构三维成像。在垫丰武高速火炉隧道的工程实践中,该技术成功识别了岩体破碎、含水率等不良地质体,预报结果与实际开挖揭露情况高度吻合,验证了其探测的准确性与可靠性。

基于 TSP-3D 的超前地质预报为隧道施工提供了科学依据,使项目能够及时优化施工方案,提前采取有效的支护与处治措施。这不仅显著降低了突泥、涌水等地质灾害风险,保障了施工安全,还有效避免了因地质条件不明导致的工期延误和成本增加,实现了安全性与经济性的统一。

实践证明,TSP-3D 技术是现代隧道工程建设中一项不可或缺的关键技术,其三维可视化预报能力为复杂地质条件下的隧道安全掘进提供了有力保障。未来,可进一步探索该技术与人工智能的结合,提升数据解译的智能化水平,推动隧道地质预报技术向更精准、高效的方向发展。

参考文献

- [1] 钱云川. 论某公路隧道项目施工中超前地质预报技术的应用[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(17): 130-132.
- [2] 孙旭东, 李振团. 某复杂地质条件特长隧道勘察技术及主要工程地质问题[J]. 中国水运, 2022(9): 146-148.
- [3] 卜林. 隧道超前地质预报中地质雷达与地震波法联合应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(17): 101-104.
- [4] 高熙贺. 隧道超前地质预报技术应用现状及其发展趋势[J]. 科技风, 2019(4): 101+107.
- [5] 杨志刚. TSP 技术在云雾山隧道施工期超前地质预报应用浅析[J]. 福建建筑, 2012(5): 94-96.
- [6] 林传年. 齐岳山隧道岩溶裂隙水超前预报与治理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008(4): 789-792.
- [7] 邓唯渐. 不同地质现象的 TSP 响应特征研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [8] 周围, 李涛, 周雄, 等. TSP-3D 三维超前地质预报系统在隧道施工前的应用[J]. 中国公路, 2025(17): 106-109.
- [9] 朱夏乐. 隧道地震超前地质预报的三维有限差分正演模拟[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [10] 刘振雄, 赵红利. TSP 超前地质预报在盾构隧道掘进中的应用研究[J]. 价值工程, 2025, 44(28): 124-126.