

基于多证据融合的隧道TGP超前地质预报闭环解释方法

李 芳

中电建路桥集团有限公司, 北京

收稿日期: 2026年7月13日; 录用日期: 2026年8月10日; 发布日期: 2026年8月18日

摘 要

针对TGP超前地质预报中单一异常解释多解、成果难以转化为施工措施的问题, 本文提出一种多证据融合的闭环解释方法。该方法依次完成原始记录质控、纵横波相对异常识别、反射与绕射成像互证、里程化地质单元划分、施工响应与开挖反馈, 并定义异常一致性指数(ACI), 以低纵波速度、低横波速度、负反射、绕射聚集及地质-水文背景5类同位证据进行半定量分级。以五老峰隧道灰岩段和咪的村隧道花岗岩段两个150 m实例进行方法演示。结果表明: 五老峰B单元(Z3K26 + 806~Z3K26 + 870) ACI为1.00, 表现为高一一致性连续异常; 咪的村核心段(Z3K36 + 760~Z3K36 + 780) ACI为0.80, 表现为高一一致性局部异常。两案例基准Vp、Vsh分别为5990、3860 m/s和4770、2540 m/s, 但基准波速与前方不利单元长度并非单调对应, 说明沿里程相对变化及多证据空间一致性比单点参数更具判别价值。该方法可将地震异常转化为围岩分级、超前钻、防排水和支护调整等里程化措施。

关键词

TGP地震波法, 多证据融合, 异常一致性指数, 超前地质预报, 施工决策

A Multi-Evidence Closed-Loop Interpretation Method for TGP-Based Tunnel Advance Geological Prediction

Fang Li

PowerChina Road Bridge Group Co., Ltd., Beijing

Received: July 13, 2026; accepted: August 10, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

This study proposes a multi-evidence, closed-loop interpretation method to address the non-uniqueness of individual TGP anomalies and the weak linkage between geophysical results and construction actions. The workflow integrates record quality control, relative P- and S-wave anomalies, reflection and diffraction imaging, chainage-based geological-unit delineation, construction response, and excavation feedback. A semi-quantitative anomaly consistency index (ACI) is defined from five co-located indicators: low P-wave velocity, low S-wave velocity, negative reflections, concentrated diffractions, and geological-hydrogeological evidence. Two 150 m cases, the limestone section of the Wulaofeng Tunnel and the granite section of the Midicun Tunnel, are used to demonstrate the method. The Wulaofeng B unit (Z3K26 + 806 to Z3K26 + 870) has an ACI of 1.00 and represents a continuous high-consistency anomaly, whereas the Midicun core interval (Z3K36 + 760 to Z3K36 + 780) has an ACI of 0.80 and represents a localized high-consistency anomaly. Baseline V_p and V_{sh} values are 5990 and 3860 m/s for Wulaofeng and 4770 and 2540 m/s for Midicun, respectively; however, these baseline velocities do not vary monotonically with the length of unfavorable units. Relative variations along the tunnel axis and the spatial agreement of multiple evidence types are therefore more diagnostic than any single parameter. The method converts seismic anomalies into chainage-specific actions, including rock-mass classification, advance drilling, drainage, and support adjustment.

Keywords

TGP Seismic Method, Multi-Evidence Fusion, Anomaly Consistency Index, Advance Geological Prediction, Construction Decision-Making

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

隧道掌子面前方地质体具有隐蔽性、空间非均质性和施工揭露滞后性。断层破碎带、岩溶、软弱夹层及富水裂隙若未被及时识别，可能引发掉块、塌方、突涌水和支护失稳。现行技术规程因此强调地质分析、物探与超前钻探的综合应用[1]。

主动源隧道地震法通过接收掌子面前方声阻抗界面的反射与绕射能量，实现中长距离探测。近年来，三维观测、分层速度成像、逆时偏移、衰减补偿、全流程处理及施工扰动信号利用等研究持续提高了异常体定位和成像能力[2]-[15]。

当前工程应用的主要瓶颈已不只是“能否成像”，而是“如何解释并闭环应用”：单一低速或负反射异常可能对应裂隙、软弱夹层、岩性界面或含水界面；关键处理参数和证据权重常缺少说明；异常图件也往往未转化为明确里程、风险类型和施工措施。上述问题使解释结果具有多解性，并限制其可复核性和可操作性。

为此，本文提出“多证据异常识别 - 地质单元划分 - 围岩分级 - 施工响应 - 开挖反馈”的闭环解释方法，并构建半定量异常一致性指数(ACI)。五老峰和咪的村两个 150 m 案例仅用于展示该方法在不同地质背景下的应用流程，不作为岩性控制试验。由于缺少独立开挖揭露和超前钻孔资料，本文不评价预测准确率，所有结果均应理解为未经独立验证的解释成果。

2. TGP 原理与闭环解释方法

2.1. 研究框架与方法

闭环解释框架包括五个环节：① 原始记录质量控制；② 沿里程识别纵横波、反射与绕射异常；③ 依据多证据同位关系划分地质单元并计算 ACI；④ 将异常转换为围岩分级、风险类型和施工措施；⑤ 利用开挖揭露、超前钻孔和监控量测反馈修正解释。该流程强调证据透明、里程明确和动态更新(图 1)。

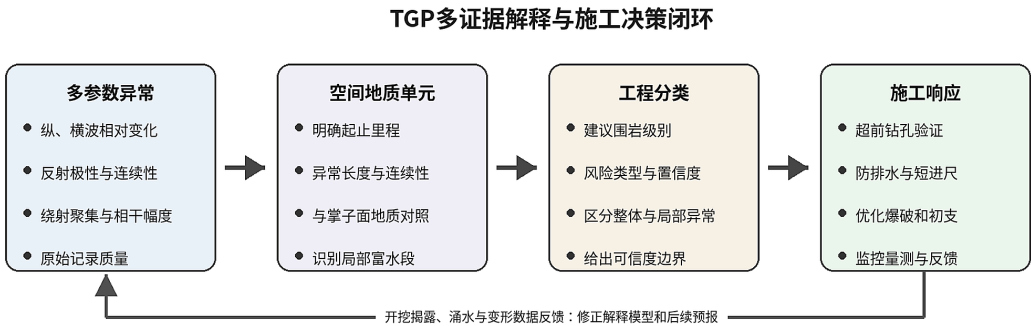


Figure 1. Multi-evidence closed-loop interpretation framework for TGP
图 1. TGP 多证据融合闭环解释框架

研究资料来自两次现场 TGP 超前预报成果。五老峰隧道预报范围为 Z3K26 + 786~Z3K26 + 936，咪的村隧道为 Z3K36 + 741~Z3K36 + 891，长度均为 150 m。资料包括掌子面地质描述、三分量记录、纵横波偏移、绕射成像、相干幅度或横断面切片及综合解释成果。所有波速、泊松比、里程和围岩级别沿用工程资料，本文仅进行统一化解释与半定量一致性评价。

2.2. 地震反射与三分量响应原理

地震波在介质中传播时，密度 ρ 或波速 V 变化会造成声阻抗 $Z=\rho V$ 差异(图 2)。近似正入射条件下，界面反射系数 R 可表示为：

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \tag{1}$$

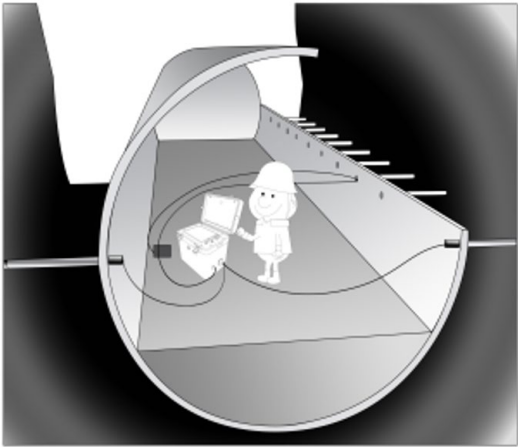


Figure 2. Schematic layout of TGP seismic advance prediction (after project data)
图 2. TGP 地震波法超前预报现场布置示意图(据工程资料)

岩性突变、断层破碎带、裂隙密集带和含水状态变化均可能形成反射或绕射异常。正、负反射极性仅表示阻抗变化方向，不能唯一对应某一地质成因；其属性必须结合空间位置、波组连续性、纵横波关系、绕射聚集和现场地质共同约束。三维或非共线观测及逆时偏移可改善照明范围并抑制镜像伪影[4] [5] [9] [10] [12] [15]。

三分量检波记录可分离纵波和横波响应。对于各向同性线弹性介质，泊松比可由 V_p 与 V_s 近似计算：

$$\nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / [2(V_p^2 - V_s^2)] \quad (2)$$

本文沿用现场数据中的 V_{sh} 作为横波指标，并计算速度比 $k = V_p/V_{sh}$ 。公式(2)隐含均匀、各向同性和线弹性假设；层状灰岩、节理化花岗岩和含水裂隙均可能偏离这些条件，因此泊松比仅用于参数自治性检查和背景比较，不作为独立富水判据。

2.3. 现场采集与关键处理参数

现场采集包括记录掌子面、检波孔和激发孔里程，定向耦合安装孔中三分量检波器并逐炮激发。工程资料记载单炮药量为 60~120 g，记录长度不小于 300~400 ms；测量期间暂停明显振动工序，以降低机械噪声和爆破余振。

已有成果采用原始记录质检、初至识别、纵横波分离、速度分析、偏移成像、绕射峰位三维成像、横断面切片或相干幅度分析及比速度解释。处理图件显示偏移网格间隔为 0.50 m，迁移速度分别取各案例实测 V_p 和 V_{sh} 。原始滤波频带、增益、反褶积和切除参数未被完整保存，本文因此不重新反演原始波形，而仅对归档处理成果开展一致化解释；该不可复现性构成方法限制[11] [12]。

2.4. 异常一致性指数

为提高“高一致性异常”判别的客观性，将每个里程单元的证据划分为 5 类：低纵波速度(IVp)、低横波速度(IVsh)、负反射或强反射条带(IR)、绕射聚集或横断面异常(ID)以及地质 - 水文背景支持(IG)。某类证据在同一里程清晰出现时取 1，否则取 0；各证据等权。

$$ACI = 0.2(IV_p + IV_{sh} + IR + ID + IG) \quad (3)$$

ACI 取值为 0~1。ACI ≥ 0.60 定义为高一致性，ACI = 0.40 定义为中一致性，ACI ≤ 0.20 定义为低一致性或待验证异常。该指数衡量不同解释证据的同位程度，而非异常真实性、灾害概率或预测准确率；在缺少原始振幅和统一归一化参数时采用等权二值计分，以保证规则透明和可复核。

2.5. 证据边界与验证状态

现有资料仅包含预报时的掌子面地质调查和 TGP 处理成果，未获得预测区段开挖后的连续掌子面素描、超前钻孔记录、实际涌水量、变形监测或支护调整数据。因此，初始掌子面地质只能作为解释先验，不能作为前方异常的独立验证。

本文在结果表中显式标注独立验证状态，并避免使用“准确识别”“验证有效”等措辞。后续闭环应以 5~10 m 为评价单元，将预报、钻探、开挖揭露和监控量测逐段对应，才能计算位置误差、检出率、漏报率和分级一致性。

3. 案例地质背景

3.1. 五老峰隧道灰岩段

五老峰隧道掌子面 Z3K26 + 786 揭露岩性主要为灰岩，微风化，锤击声清脆并有轻微回弹，判定为

较坚硬岩。结构面较发育，呈层状结构，岩体整体较完整，掌子面湿润。勘察资料将测量段描述为灰岩夹砂质板岩，设计围岩级别为Ⅲ级。层状构造和岩性夹层使声阻抗界面较多，也增加了反射极性变化的解释复杂度。

3.2. 咪的村隧道花岗岩段

咪的村隧道掌子面 Z3K36+741 揭露燕山期白垩纪花岗岩，以中~微风化为主，岩石较坚硬。节理裂隙较发育，但结构面结合程度较好，岩体较完整，呈块状结构，掌子面整体稳定且干燥，设计围岩级别为Ⅲ级。与五老峰相比，该掌子面缺少明显层状界面，初始水文迹象也较弱(图 3 和表 1)。



Figure 3. Comparison of tunnel-face geology in the two cases
图 3. 两案例掌子面地质特征对比

Table 1. Basic conditions and elastic parameters of the two cases
表 1. 两案例基础条件与测量段弹性参数

指标	五老峰隧道	咪的村隧道
掌子面里程	Z3K26+786	Z3K36+741
预报范围	Z3K26+786~+936	Z3K36+741~+891
主要岩性	灰岩(局部夹砂质板岩)	花岗岩
结构与状态	层状; 湿润	块状; 干燥
$V_p/(m \cdot s^{-1})$	5990	4770
$V_{sh}/(m \cdot s^{-1})$	3860	2540
V_p/V_{sh}	1.552	1.878
泊松比 ν	0.145	0.302

4. 闭环解释方法的实际应用

4.1. 记录质量与基准参数

两组资料的纵波初至清晰，横波同相轴在速度、频率和幅度上可与纵波分离，现场评价均为优良记录。由 V_p 和 V_{sh} 复算的泊松比与原资料一致。五老峰 V_p 和 V_{sh} 分别比咪的村高 25.6%和 52.0%，但泊松比低 0.157；该差异仅反映炮孔附近测量体积的综合介质性质。

基准波速不能替代前方沿里程异常识别。五老峰虽具有较高基准速度，但前方连续异常范围更长；

咪的村基准速度较低，Z3K36 + 800 以后却整体趋于稳定。因此，后续分区以相对速度变化、反射/绕射成像和地质背景的同位关系为主。

4.2. 五老峰隧道异常特征与地质单元

五老峰偏移成果在 Z3K26 + 820~Z3K26 + 870 附近出现宽而连续的正负相间条带，并伴随较多负反射界面。纵波比速度在 Z3K26 + 806~Z3K26 + 822 形成凹形下降，在 Z3K26 + 834~Z3K26 + 864 呈阶梯式陡降；横波在 Z3K26 + 800~Z3K26 + 810、Z3K26 + 824~Z3K26 + 834 及 Z3K26 + 840~Z3K26 + 850 出现凹形异常。速度与成像异常在 Z3K26 + 806~Z3K26 + 870 具有较强空间一致性，指示岩体完整性降低、节理裂隙增多及局部含水可能性上升(图 4)。

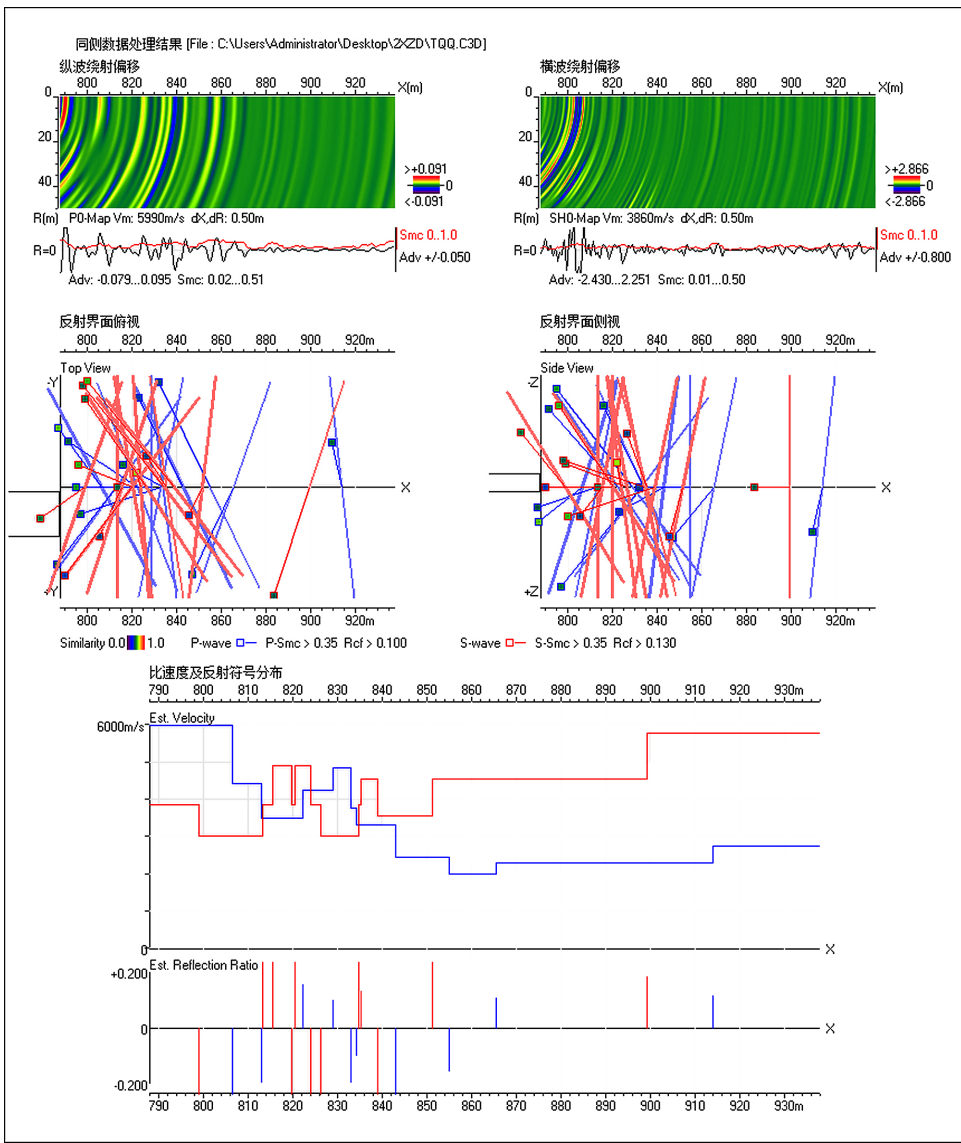


Figure 4. Integrated TGP prediction result of the Wulaofeng Tunnel

图 4. 五老峰隧道 TGP 综合预报成果图

前方 150 m 被划分为三个地质单元。A 单元 Z3K26 + 786~Z3K26 + 806，长 20 m，以微风化灰岩为

主, 节理裂隙较发育, 建议 IV1; B 单元 Z3K26+806~Z3K26+870, 长 64 m, 负反射界面和低速异常集中, 推测围岩较破碎、局部地下水发育, 建议 IV2; C 单元 Z3K26+870~Z3K26+936, 长 66 m, 岩体较完整, 建议 III2。A、B 单元合计 84 m, 占预报长度 56.0%, 其中 B 单元为高一致性重点异常。

水文地质方面, 横波异常对应三个分散的约 10 m 区间, 累计约 30 m。Z3K26+834 附近被解释为地下水距开挖轮廓线较近, 可能沿结构面呈淋雨状至股状出露。建议在该区段实施超前钻孔验证和预排水, 缩短循环进尺, 控制爆破扰动, 并加强拱顶、边墙初期支护及监控量测。

4.3. 咪的村隧道异常特征与地质单元

咪的村综合成果中, 纵波在 Z3K36+760~Z3K36+780 出现台阶式大幅下降, 横波同期呈凹形比速度, 构成最主要的同位异常。与五老峰相比, 该异常长度较短、空间更集中; Z3K36+800 以后反射和速度特征趋于稳定, 表明花岗岩段前方整体完整性较好, 仅局部节理裂隙和地下水较发育(图 5)。

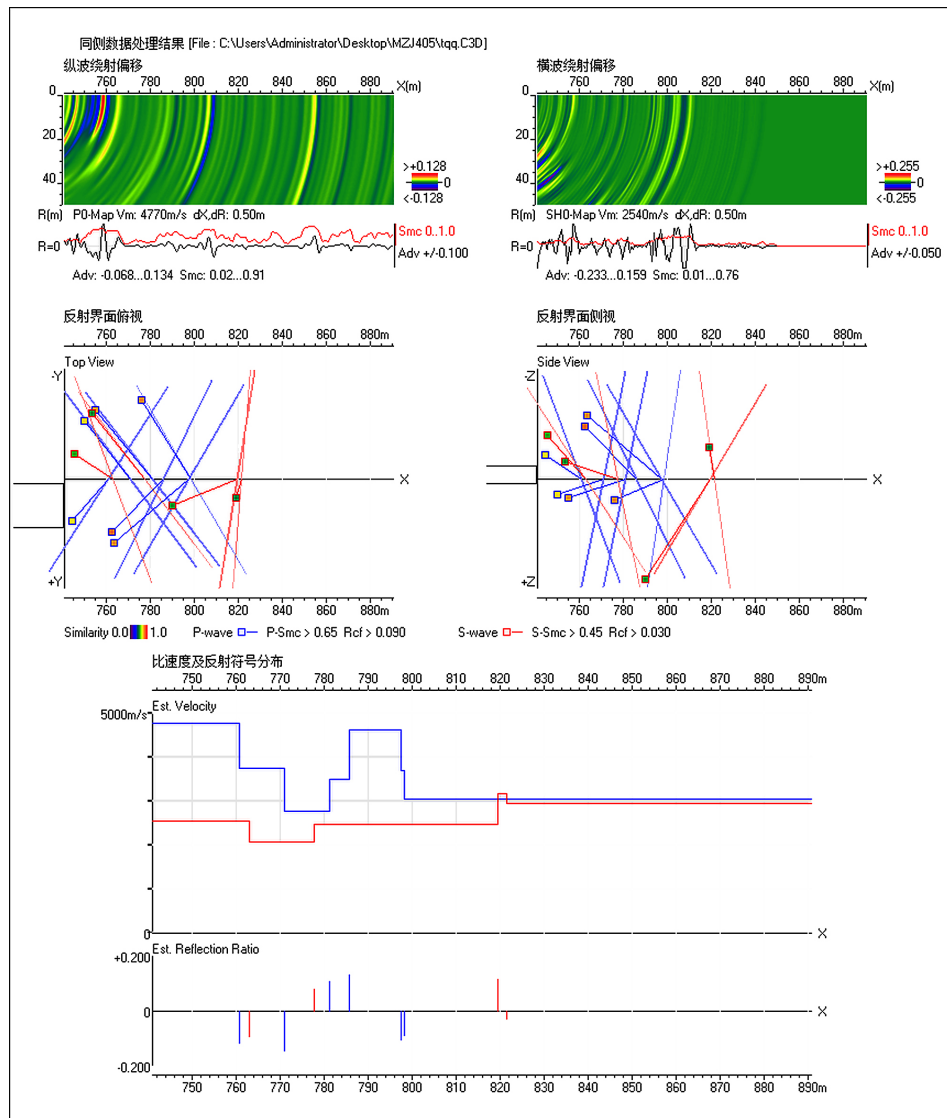


Figure 5. Integrated TGP prediction result of the Midicun Tunnel

图 5. 咪的村隧道 TGP 综合预报成果图

A 单元 Z3K36 + 741~Z3K36 + 760, 长 19 m, 微风化花岗岩较完整, 建议 III1; B 单元 Z3K36 + 760~Z3K36 + 800, 长 40 m, 节理裂隙较发育、完整性一般, 其中 Z3K36 + 760~Z3K36 + 780 地下水稍发育, 建议 III2; C 单元 Z3K36 + 800~Z3K36 + 891, 长 91 m, 节理裂隙不发育, 岩体完整性改善, 建议 III1。相对不利 B 单元占 26.7%, 其余 110 m 占 73.3%。

该案例的施工风险主要集中在 Z3K36 + 760~Z3K36 + 780, 应重点防范顺结构面的局部塌落、拱顶掉块和点滴至淋雨状出水。由于异常区边界与地质单元边界并不完全重合, 施工组织宜在 B 单元全段保持加强观察, 在核心 20 m 区间布置更密集的超前钻和排水检查。

4.4. 异常一致性分级与工程输出

按式(3)评价, 五老峰 A、B、C 单元 ACI 分别为 0.40、1.00 和 0; 咪的村 A、B、C 单元分别为 0、0.60 和 0, 其中 B 单元核心段 Z3K36 + 760~Z3K36 + 780 的 ACI 为 0.80。由此, 五老峰 B 单元表现为长距离高一致性异常, 咪的村 B 单元表现为局部集中的高一致性异常。ACI 用于排序验证优先级: 高一致性区优先布置超前钻和防排水, 低一致性区维持常规观察(图 6、表 2 和表 3)。

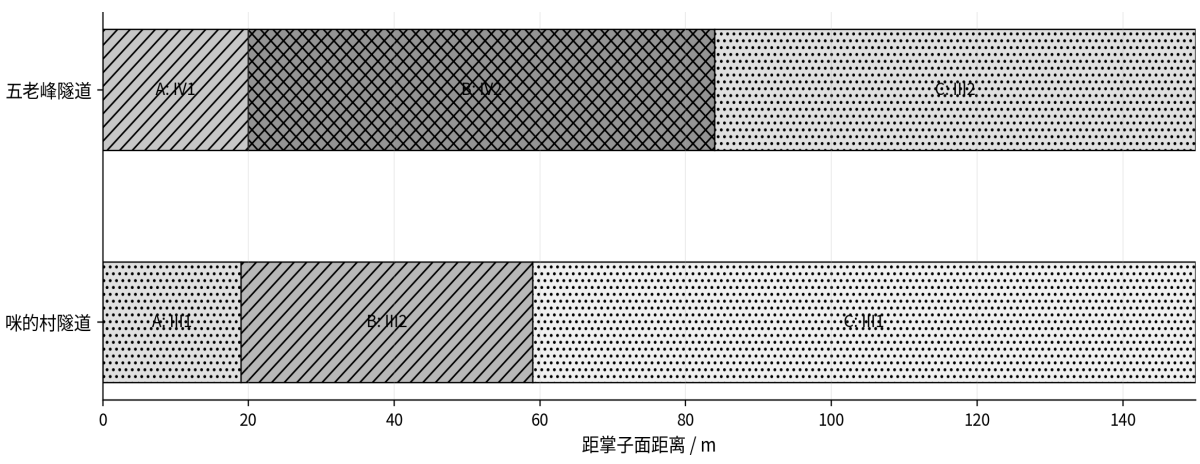


Figure 6. Comparison of geological-unit lengths within the 150 m prediction ranges

图 6. 两案例 150 m 预报范围地质单元长度对比

Table 2. Anomaly consistency index and independent validation status

表 2. 两案例异常一致性指数与独立验证状态

区段	主要同位证据	ACI 与等级	独立验证状态
五老峰 A: +786~+806	横波异常; 裂隙与湿润背景	0.40, 中	未获得开挖/钻孔验证
五老峰 B: +806~+870	Vp、Vsh、反射、绕射、地质 - 水文	1.00, 高	未获得开挖/钻孔验证
五老峰 C: +870~+936	无显著同位异常	0, 低	未获得开挖/钻孔验证
咪的村 A: +741~+760	无显著同位异常	0, 低	未获得开挖/钻孔验证
咪的村 B: +760~+800	Vp、Vsh、成像及局部水文	0.60, 高; 核心段 0.80	未获得开挖/钻孔验证
咪的村 C: +800~+891	无显著同位异常	0, 低	未获得开挖/钻孔验证

Table 3. Interpretive geological units and construction responses
表 3. 解释性地质单元与施工响应

隧道	单元/里程	长度/m	解释性判断	建议围岩级别	施工响应
五老峰	A: +786~+806	20	裂隙较发育；局部稍富水	IV1	防排水；控制扰动
五老峰	B: +806~+870	64	破碎；负反射增多；局部富水	IV2	超前钻；短进尺； 加强初支
五老峰	C: +870~+936	66	较完整；厚层状	III2	常规监测；控制支护 质量
咪的村	A: +741~+760	19	较完整；地下水不发育	III1	常规施工与监测
咪的村	B: +760~+800	40	裂隙发育；局部稍富水	III2	防排水；防掉块； 局部钻验
咪的村	C: +800~+891	91	完整性改善；自稳性较好	III1	常规施工与监测

5. 讨论

5.1. 多证据闭环的标准化价值

闭环方法的核心贡献不是比较两种岩性本身，而是将分散的地震属性组织为可复核的证据链。原始记录、速度、反射、绕射和地质调查先在同一里程对齐，再转换为地质单元、围岩分级和施工响应；后续开挖反馈则用于修正阈值和解释规则。该流程可减少仅凭单幅图件或单点参数直接判级的主观性。

两个案例表明，同一框架可容纳长距离连续异常和短距离集中异常，而无需预设“灰岩”或“花岗岩”的固定阈值。岩性仅作为背景变量，真正参与判别的是岩体结构、界面分布、水文条件和多属性空间一致性。

5.2. 解释不确定性与多解性

首先，泊松比计算建立在均匀、各向同性介质假设上。五老峰层状灰岩夹砂质板岩可能具有明显弹性各向异性， V_{sh} 又只代表特定极化方向的横波响应，因此 $v=0.145$ 可能同时受层理方向、检波器方位、裂隙和耦合条件影响，不能直接解释为低含水或高完整性。TTI 介质建模和黏声成像研究也表明，各向异性与衰减会改变走时、振幅和聚焦位置。

其次，单一负反射界面具有地质多解性，可能对应由高阻抗向低阻抗的岩性界面、裂隙破碎带、软弱夹层、风化带或含水界面；低速和绕射异常也可能受几何散射、处理参数和有限照明影响。因此，本文只在至少三类证据同位时定义高一一致性，并把富水判断表述为风险提示，而非出水量预测。

5.3. 异常一致性指数的适用边界

ACI 将“多证据一致”转化为 0~1 的透明分值，便于现场排序验证优先级。五老峰 B 单元获得 5 类证据支持，咪的村 B 单元则以纵横波同步下降和成像、水文背景为主；该差异说明指数既能识别连续异常，也能识别局部核心异常。

ACI 并非统计置信度。等权二值计分避免了在缺少原始振幅和统一归一化条件下虚构精度，但也忽略了异常强度、证据相关性和不同数据质量。后续可在多工程验证数据库中利用位置误差、精确率、召回率和施工损失对权重与阈值进行校准。

5.4. 工程决策价值

闭环解释的关键是把“异常图像”转换为“里程化行动”。五老峰 Z3K26 + 834 附近可列为富水与

破碎风险优先验证点, 建议超前钻、预排水、短进尺和加强初支; 咪的村 Z3K36 + 760~Z3K36 + 780 则重点防范局部节理发育、拱顶掉块和点滴至淋雨状出水。分区处置可避免对整段 150 m 统一加固, 也可减少图件与施工脱节。

TGP 适合作为中长距离分区和风险排序工具; 富水破碎带仍需结合地质雷达、瞬变电磁或超前钻探进行近距离复核。最终支护参数应由开挖揭露、监控量测和设计体系共同确定。

6. 结论

(1) 提出了由记录质控、多参数异常识别、地质单元划分、围岩分级、施工响应和开挖反馈组成的 TGP 闭环解释方法, 并以 5 类同位证据构建 ACI, 实现异常一致性的半定量分级。

(2) 五老峰 B 单元 Z3K26 + 806~Z3K26 + 870 的 ACI 为 1.00, 表现为连续高一致性异常; 咪的村 B 单元 ACI 为 0.60, 其核心段 Z3K36 + 760~Z3K36 + 780 为 0.80, 表现为局部高一致性异常。

(3) 两案例基准 V_p 和 V_{sh} 与前方不利单元长度并非单调对应。沿里程相对变化、纵横波同步性及反射、绕射和地质背景的空间一致性, 比单点波速或泊松比更具解释价值。

(4) 该方法可将高一致性异常对应到超前钻、防排水、短进尺和支护加强等里程化措施; 但由于缺少独立开挖与钻孔验证, 本文仅完成方法演示, ACI 阈值和预测性能仍需多工程后验数据校准。

致 谢

感谢中电建路桥集团有限公司科技项目(LQKY2018-03)对本文研究内容的大力支持, 同时感谢项目现场测试、施工地质调查和资料整理人员提供基础数据与图件。

参考文献

- [1] 中国铁路总公司. Q/CR 9217-2015 铁路隧道超前地质预报技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [2] Zhao, Y.G., Jiang, H. and Zhao, X.P. (2006) Tunnel Seismic Tomography Method for Geological Prediction and Its Application. *Applied Geophysics*, **3**, 69-74. <https://doi.org/10.1007/s11770-006-0010-7>
- [3] Alimoradi, A., Moradzadeh, A., Naderi, R., Salehi, M.Z. and Etemadi, A. (2008) Prediction of Geological Hazardous Zones in Front of a Tunnel Face Using TSP-203 and Artificial Neural Networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**, 711-717. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.01.001>
- [4] Liu, B., Chen, L., Li, S.C., Xu, X.J., Liu, L.B., Song, J., et al. (2017) A New 3D Observation System Designed for a Seismic Ahead Prospecting Method in Tunneling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **77**, 1547-1565. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1131-3>
- [5] Lu, X.L., Liao, X., Wang, Y., Wang, G.M., Fu, Z.H. and Tai, H.M. (2020) The Tunnel Seismic Advance Prediction Method with Wide Illumination and a High Signal-to-Noise Ratio. *Geophysical Prospecting*, **68**, 2444-2458. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.13014>
- [6] Shi, S.S., Li, S.C., Li, L.P., Zhou, Z.Q. and Wang, J. (2014) Advance Optimized Classification and Application of Surrounding Rock Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Tunnel Seismic Prediction. *Automation in Construction*, **37**, 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.019>
- [7] Liu, B., Wang, J.S., Yang, S.L., Xu, X.J. and Ren, Y.X. (2023) Forward Prediction for Tunnel Geology and Classification of Surrounding Rock Based on Seismic Wave Velocity Layered Tomography. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **15**, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.10.004>
- [8] Liu, M.Q. and Gan, Q.Y. (2023) Applied Research of Comprehensive Advance Geological Prediction in Daluoshan Water Diversion Tunnel. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 9162. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36090-8>
- [9] Guan, P., Shao, C.F., Jiao, Y.Y., Zhang, G.H., Zou, J.P. and Tan, F. (2024) 3-D Tunnel Seismic Advance Prediction Method with Wide Illumination and High-Precision. *Journal of Earth Science*, **35**, 970-979. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1503-2>
- [10] Ren, Y., Ding, X., Guo, M., Wang, J. and Xu, X. (2023) Reverse Time Migration Imaging Method for Tunnel Seismic Forward-Prospecting in Viscoacoustic Media. *Near Surface Geophysics*, **21**, 358-375. <https://doi.org/10.1002/nsg.12263>
- [11] Shao, C., Wang, Y., Jia, Y., Liang, F., Pei, C., Guan, P., et al. (2025) A Whole-Process Data Processing Method for

-
- Tunnel Seismic Geological Prediction Ahead of Tunnel Faces. *Journal of Earth Science*, **36**, 333-338. <https://doi.org/10.1007/s12583-024-0136-7>
- [12] Pei, C., Fan, Y., He, R., Li, J., Li, Z. and Chen, Z. (2025) 3-D Reverse Time Migration for Tunnel Seismic Data with an Optimized Observation System. *Near Surface Geophysics*, **23**, 267-284. <https://doi.org/10.1002/nsg.70014>
- [13] Chen, D., Wang, X., Bai, J., Chu, Y., Wang, X., Zhao, J., *et al.* (2025) An Overview of Ahead Geological Detection Technologies in Tunnels. *European Journal of Remote Sensing*, **58**, Article ID: 2503240. <https://doi.org/10.1080/22797254.2025.2503240>
- [14] Zhang, X., Cheng, S., Zi, J., Li, L., Sun, Q., Jia, C., *et al.* (2025) Real-Time Geological Hazard Detection Ahead of Tunnel Face Using Blast-Induced Seismic Signals: A Case Study in Tashan Tunnel, China. *Engineering Geology*, **357**, Article ID: 108364. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108364>
- [15] Cai, S. (2025) 3D Advanced Geological Prediction Based on Reflected Seismic Waves and Its Application Effects. *Coal Geology & Exploration*, **53**, 193-202. <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.25.01.0059>