

# 超前地质预报在隧道施工安全预警中的作用机制

崔毅 景晓春 黄运锋

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710000

**摘要：**随着我国基础设施建设向复杂艰险地区纵深推进，长大深埋、高风险隧道工程日益增多。隧道施工过程中遭遇突水突泥、岩爆、大变形、瓦斯突出等地质灾害的风险显著增高，严重威胁人员生命安全与工程进度。超前地质预报（Advanced Geological Prediction, AGP）作为隧道信息化施工的核心技术之一，通过在掌子面前方一定范围内探明不良地质体的性质、规模、位置及水文特征，为施工安全预警提供了关键的决策依据。本文系统阐述了超前地质预报的技术体系，深入剖析了其在隧道施工安全预警中的核心作用机制，包括信息感知、风险识别、动态评估、分级预警与闭环反馈等环节，并结合典型应用探讨了其有效性。最后，文章探讨了当前技术面临的挑战与未来发展趋势，旨在为提升我国隧道工程本质安全水平提供理论支撑与实践参考。

**关键词：**超前地质预报；隧道施工；安全预警；作用机制；地质灾害

## 引言

隧道工程是关键基础设施，但施工环境隐蔽、不确定，地质条件复杂多变，易引发突发性地质灾害。全球超70%的隧道重大安全事故与不良地质相关，不仅造成经济损失，更威胁人员生命安全。因此，灾害前有效识别风险、精准预警是保障施工安全的首要任务。传统施工方法依赖地质勘察资料和经验，但前期勘察点稀疏，难以全面反映精细地质结构，开挖揭露不良地质体时应急处置被动。在此背景下，超前地质预报技术应运而生，成为隧道信息化、智能化施工的“眼睛”和“哨兵”。它利用物理场变化规律，对掌子面前方地质“透视”“诊断”，目标是构建完整安全预警链条。不过，目前对其如何融入并驱动安全预警体系的研究不足，作用机制阐释零散。本文旨在填补空白，构建逻辑框架，深入解析其核心作用机制，为工程实践提供操作性指导。

## 1 超前地质预报的技术体系概述

超前地质预报技术种类繁多，根据探测原理、适用范围和精度的不同，可大致分为两大类：地质分析法和物理探测法。

### 1.1 地质分析法

地质分析法是超前预报的基础，它不依赖复杂的仪器设备，而是通过对已有地质信息的综合研判来推断前方地质情况。（1）地质素描与编录：对已开挖洞段的岩性、结构面（节理、断层）、地下水出露点等进行详细记录和分析，建立地质剖面图，是后续预报的重要依据。（2）TSP（Tunnel Seismic Prediction）法：利用人工激发的地震波在不同岩体界面反射的特性，通过接收和分析反射波信号，可探测前方100-200米范围内的断层、破碎

带、岩性分界面等构造。其优势在于探测距离远、效率高，但对含水构造的敏感性相对较弱。（3）TRT（True Reflection Tomography）法：是TSP法的改进版，采用三维空间布置震源和接收器，通过层析成像技术，能提供更为直观、精确的三维地质异常体图像，尤其擅长识别小尺度的溶洞和破碎带。

### 1.2 物理探测法

物理探测法利用地球物理原理，通过测量岩体物理参数的异常来间接推断地质情况。（1）地质雷达（GPR, Ground Penetrating Radar）：向岩体发射高频电磁脉冲，通过接收反射信号的时间和强度来判断前方介质的介电常数差异。它对含水裂隙、空洞、软弱夹层等非常敏感，分辨率高，但探测深度有限（通常小于30米），且在高导电性（如富水黏土）环境中效果不佳。（2）瞬变电磁法（TEM, Transient Electromagnetic Method）：通过向地下发射一次脉冲磁场，在脉冲间歇期观测由地下良导体（如富水区、金属矿体）感应产生的二次涡流磁场。TEM法对水体异常极为敏感，探测深度可达50-100米，是探测前方隐伏水体的有效手段<sup>[1]</sup>。（3）高密度电法：通过在隧道掌子面或侧壁布设电极阵列，测量视电阻率的分布，从而圈定低阻异常区（通常对应富水区或破碎带）。该方法成本较低，但受隧道内金属设备干扰较大。（4）红外探水法：基于水的热容大于岩石的原理，含水区域能量辐射场会发生变化。通过红外探测仪扫描掌子面，可定性判断前方是否存在渗漏水通道，是一种快速、简便的辅助手段。

在实际工程中，单一方法往往存在局限性。因此，“长短结合、多源融合、综合判释”已成为行业共识。即

利用TSP/TRT等长距离方法进行宏观控制,再用GPR、TEM等短距离、高精度方法进行精细验证,辅以地质分析和钻探验证,形成一套多层次、互补性强的综合超前预报体系。

## 2 超前地质预报在安全预警中的核心作用机制

超前地质预报的价值在于其能够将潜在的、未知的地质风险转化为可知、可控的信息流,并以此驱动整个安全预警体系高效运转。其作用机制可分解为以下五个相互关联、层层递进的环节。

### 2.1 信息感知:构建“透明掌子面”

这是作用机制的起点。超前地质预报系统如同一个高灵敏度的“感知器官”,持续不断地从掌子面前方的未知区域采集地质信息。无论是地震波的反射时差、电磁波的衰减程度,还是电阻率的异常变化,这些原始物理信号都是地质体存在的客观反映。通过专业的数据采集、处理和反演软件,这些信号被转化为可视化的地质解释成果,如预报剖面图、三维异常体模型、含水性概率图等。这一过程实质上是在虚拟空间中构建了一个“透明掌子面”,使原本不可见的前方地质风险变得可视化、可量化。这种从“未知”到“已知”的信息转化,是所有后续预警行动的前提和基础。

### 2.2 风险识别:从“地质异常”到“灾害隐患”

仅仅知道前方有异常体是不够的,关键在于判断这个异常体是否构成真正的安全威胁。这需要将超前预报的地质信息与具体的灾害模式进行关联。例如:一个低阻、强反射的异常体,若位于可溶岩地层中,可能预示着一个充填型溶洞,存在突泥风险。一个高波速、高电阻率的硬脆性岩体,若处于高地应力区,可能具备发生岩爆的条件。一个连续的、大规模的低阻异常区,则极有可能是一个富水带或暗河,突水风险极高<sup>[2]</sup>。这个环节要求预报人员不仅精通物探技术,更要具备扎实的工程地质和灾害机理知识。他们需要综合考虑区域地质背景、地应力状态、地下水动力条件、围岩力学参数等多种因素,对预报出的地质异常体进行“定性”和“定害”,即明确其可能诱发的具体灾害类型(突水、突泥、塌方、岩爆等),从而完成从单纯的“地质异常”识别到具体的“灾害隐患”判定的跃升。

### 2.3 动态评估:量化风险等级

在识别出具体的灾害隐患后,下一步是对其进行量化评估,以确定风险的严重程度。这通常涉及两个维度:(1)可能性:基于预报成果的置信度、异常体的规模、与掌子面的距离等因素,评估灾害发生的概率。例如,一个距离掌子面仅5米、规模巨大的富水溶洞,其突水可

能性远高于一个距离50米、规模较小的异常体。(2)后果严重性:评估一旦灾害发生,可能造成的人员伤亡、设备损毁、工期延误等损失的严重程度。通过建立风险矩阵(Risk Matrix),可以将可能性与后果严重性进行交叉分析,从而得出一个综合的风险等级(如低风险、中风险、高风险、极高风险)。这个量化评估结果是后续分级预警和决策响应的直接依据。值得注意的是,风险评估是一个动态过程<sup>[3]</sup>。随着掌子面的不断掘进,新的超前预报数据会不断更新,原有的风险等级也需要随之调整,确保预警的时效性和准确性。

### 2.4 分级预警:触发差异化响应

分级预警是将风险评估结果转化为具体行动指令的关键环节。根据不同的风险等级,应设定相应的预警阈值和响应预案:蓝色预警(低风险)提示注意,加强常规监测,按正常工序施工。黄色预警(中风险)要求提高警惕,加密超前钻探验证,优化支护参数,做好应急物资准备。橙色预警(高风险)必须采取预防性措施,如实施超前注浆加固、局部管棚支护,限制掌子面暴露时间,并组织应急演练。红色预警(极高风险)立即停止掘进,撤出危险区域人员和设备,启动最高级别应急预案,采取如帷幕注浆、冻结法等强力处治措施,待风险完全解除后方可复工。这种分级响应机制避免了“一刀切”式的停工或盲目施工,实现了安全与效率的平衡。超前地质预报提供的精准信息,确保了预警级别的科学性和响应措施的针对性,极大地提升了安全管理的精细化水平。

### 2.5 闭环反馈:驱动施工方案优化

安全预警的最终目的不是制造恐慌,而是为了指导安全施工。超前地质预报的作用机制在此形成了一个完整的PDCA(Plan-Do-Check-Act)闭环。预警信息被传递给设计、施工和监理各方后,将直接驱动施工方案的动态调整(Act)。例如,根据预报揭示的软弱夹层位置,可以提前变更开挖工法(如从全断面法改为台阶法);根据富水区的范围,可以优化注浆孔的布置和浆液配比<sup>[4]</sup>。更重要的是,施工揭露后的实际地质情况(Check)会被反馈回超前预报系统,用于校正和优化后续的预报模型与解释方法。这种“预报-施工-验证-修正”的迭代过程,不仅提高了后续预报的精度,也使得整个安全预警体系在实践中不断学习和进化,形成了一种自适应、自优化的智能管理模式。

## 3 超前地质预报的工程应用现状

随着我国基础设施建设的快速发展,超前地质预报技术已从最初的探索应用阶段走向成熟,并在各类隧道工程中得到广泛推广和实践。该技术作为保障施工安全

的核心手段，其应用范围已覆盖城市轨道交通、水利水电、交通公路、生态环境等多个领域。

在城市地铁隧道建设中，由于线路多穿越人口密集区和既有建筑群，对地表沉降和施工安全控制要求极高。超前地质预报能够有效识别前方隐伏的空洞、富水砂层及软弱夹层，为盾构或矿山法施工提供关键预警信息，最大限度地降低施工风险，保障城市运行安全。

在大型输水隧洞工程中，尤其是穿越复杂山岭地区的引调水工程，超前地质预报对于探明喀斯特溶洞、断层破碎带及高压富水构造至关重要。通过构建综合预报体系，可提前制定针对性的处治方案，确保长距离隧洞的安全贯通和后期运营的可靠性。

在公路与铁路隧道建设中，面对日益增多的长大深埋、高风险隧道，超前地质预报已成为标准化工序。它不仅服务于常规的不良地质体探测，更在高地应力岩爆、大变形软岩、瓦斯突出等特殊地质灾害的防控中发挥着不可替代的作用。

此外，在一些新兴领域，如生态鱼道、地下管廊、战略储油洞库等特种地下工程中，超前地质预报技术也正逐步推广应用。这些工程虽规模各异，但对地质条件的精准把握和施工过程的安全控制均有较高要求。

## 4 挑战与展望

### 4.1 挑战

尽管超前地质预报在安全预警中发挥了巨大作用，但仍面临诸多挑战：（1）多解性与精度瓶颈：地球物理反演本身具有多解性，尤其是在地质条件极其复杂的区域，预报结果可能存在误差。（2）实时性与自动化不足：目前多数预报工作仍依赖人工判释，耗时较长，难以满足TBM（全断面隧道掘进机）等高速掘进工法对实时预警的需求。（3）数据孤岛问题：超前预报数据、监控量测数据、施工日志等多源信息尚未实现深度融合与智能分析。

### 4.2 展望

面向未来，超前地质预报的发展将呈现以下趋势：

（1）智能化与AI赋能：利用机器学习、深度学习等人工智能技术，训练地质-物探大数据模型，实现预报成果的自动解释与风险智能评估，大幅提升效率和精度。（2）多源信息深度融合：构建统一的隧道数字孪生平台，将超前预报、BIM（建筑信息模型）、物联网（IoT）传感器等多维数据进行时空对齐与融合分析，实现对隧道全生命周期的全景式、动态化安全管控。（3）装备微型化与在线化：研发可搭载于TBM刀盘或台车上的微型化、在线式超前探测装备，实现掘进与预报的同步进行，真正达到“边掘边探、即时预警”的目标。

## 5 结语

超前地质预报绝非一项孤立的技术，而是隧道施工安全预警体系的核心驱动力。其作用机制是一个集信息感知、风险识别、动态评估、分级预警与闭环反馈于一体的有机整体。通过这一机制，超前地质预报成功地将不可预知的地质风险转化为可管理的安全信息流，为科学决策、精准防控和动态优化施工方案提供了坚实支撑。面对日益复杂的隧道工程挑战，唯有深刻理解并不断完善这一作用机制，推动其向智能化、融合化方向发展，才能真正筑牢隧道施工的安全防线，实现工程建设的本质安全。

## 参考文献

- [1]朱贵方.综合超前地质预报在隧道施工中的应用研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(12):89-92.
- [2]许锦权,杨国恒,康元茂,等.超前地质预报技术在隧道施工安全风险识别与防范中的应用[J].交通节能与环保,2024,20(S2):211-214.
- [3]黄龙,王智.隧道施工超前地质预报技术及应用探讨[J].交通科技与管理,2024,5(11):138-140.
- [4]王维,朱子琪.超前地质预报技术在隧道施工中的组合及应用[J].交通节能与环保,2024,20(02):217-220+248.