

长距离引水隧洞施工超前地质预报工作的探讨

李弦

云南省滇中引水工程有限公司，云南昆明，653100；

摘要：长距离引水隧洞作为跨区域调水、水资源配置工程的重要组成部分，其施工面临地质条件复杂、多类型不良地质发育、地下水系统结构多样等多重挑战。超前地质预报作为保障隧洞施工安全与质量的关键技术手段，是处理深埋高风险地段、识别不良地质体、优化施工工序的重要基础。结合滇中引水工程玉溪段多个典型隧洞工程案例，从地质条件特征、施工风险类型、预报方法体系、技术选择原则、综合预报流程以及相关成果应用等方面展开论述，系统梳理隧洞超前地质预报的主要技术手段及其适用性。通过对长距离地震波法、雷达法、瞬变电磁法、地质调绘和超前钻探等关键技术分析，探讨了综合预报模式在识别岩溶、破碎带、断层富水段、不稳定围岩段等典型不良地质中的应用价值。同时总结了当前隧洞施工阶段地质预报存在的问题，如地质复杂性导致的解释模糊性、预报结果空间分辨能力不足、富水段突泥突水预测难度大等。最后，提出从完善综合预报体系、强化现场地质反馈机制、提高信息化与智能化探测水平等方面优化超前地质预报工作的路径建议，以为类似工程建设提供参考。

关键词：引水隧洞；超前地质预报；地震波法；地质雷达；瞬变电磁；岩溶；不良地质；施工安全

DOI：10.69979/3060-8767.26.01.053

前言

在我国大型水利工程建设中，长大隧洞占比不断提升，工程区域多跨越构造发育强烈、岩性变化复杂、地下水系统发育的高山峡谷地区。不良地质对施工安全影响显著，而施工阶段一旦遇到突水、塌方、涌泥等灾害，不仅可能造成工程停工、设备损坏，甚至危及人员安全。因此，开展系统性的施工超前地质预报，成为引水隧洞高风险施工条件下的必备措施^[1]。

随着综合地球物理探测技术和施工地质信息化的发展，超前地质预报手段不断丰富，由地质分析法向“地质+物探+钻探”综合模式演进。以滇中引水工程玉溪段为例，多条隧洞穿越岩溶发育区、断裂密集区、富水段和弱围岩段，施工风险高，超前预报贯穿施工全过程，成为保障工程质量与效率的重要技术体系。本文以该工程建设经验为基础，对超前地质预报的目标、方法、流程与应用效果进行系统探讨，旨在为我国类似引水工程及其他长大隧洞建设提供技术参考。

1 隧洞超前地质预报的重要性与任务概述

1.1 重要性分析

1.1.1 探测地质风险保障施工安全的关键手段

隧洞开挖具有“不可逆、不可回头、不可停止”的特性，一旦前方存在突水、溶洞、破碎带等不良地质而未提前识别，极易造成灾害性事故。

1.1.2 指导施工设计与支护优化

预报结果可直接用于调整支护参数、开挖方法、进尺控制，有利于实现“先预测、后设计、再施工”。

1.1.3 提高施工效率与资源利用率

提前掌握前方地质情况，可减少盲目施工导致的反复处理、返工等问题，提高工期可控性。

1.2 主要任务

结合典型工程实践，超前地质预报工作主要包括：
识别掌子面前方100~300m范围内的不良地质体；
判定岩性变化、围岩级别、破碎带规模；
识别地下水富水性与潜在涌突水风险；
查明岩溶发育形态及空间尺寸；
为施工组织 and 支护设计提供依据。

2 典型引水隧洞地质特征与主要风险类型综述

2.1 地层岩性复杂多变

引水隧洞往往穿越多种地层，包括花岗岩、砂岩、泥岩、灰岩、白云岩以及玄武岩等，岩性变化频繁，导

致围岩结构差异大、力学性质差别明显。

2.2 岩溶发育强烈

如玉溪段部分隧洞穿越多个岩溶水系统，可见：溶蚀洼地、落水洞、岩溶槽谷分布密集；暗河系统沿构造线延展；充水溶洞、溶隙发育，易形成大规模突水。

2.3 构造破碎带多、断层地带富水性强

区域性活动断裂如小江断裂、普渡河断裂等均对地层破碎、水文特征产生强烈控制，隧洞沿线破碎带宽度大、结构松散，易形成坍塌和渗水。

2.4 地下水系统发育多样、埋深差异大

部分隧洞段顶部水头超过 200m，特别是岩溶区裂隙连通性强、补径排迅速，渗涌水量大、变化快，不利于施工控制。

2.5 弱风化及强风化岩体比例高

隧洞围岩以IV、V类为主，整体稳定性差，易塌方、掉块。

这些条件决定了超前地质预报必须采用综合化、多尺度、分级预报体系。

3 隧洞施工超前地质预报方法体系及适用性分析

3.1 地质分析法（工程地质调绘）

该方法是所有预报手段的基础，包括掌子面素描、围岩节理裂隙分析、渗水状况观测等。

主要优势：直观可靠；可及时反馈现场情况；为物探解释提供必要约束。

但主要局限在于只能反映“已揭露”地质，无法预测前方远距离情况^[2]。

3.2 长距离地震波法（TSP、HSP、TRT 等）

适用于：预测 100–300m 范围内的断层破碎带；判断围岩强度变化；粗略识别大规模溶洞。

其优势在于探测距离长、覆盖范围广，适用于长大隧洞连续预测；但受地质条件影响明显，如吸收较强的地层会降低分辨率。

3.3 短距离地质雷达（GPR）

适用范围一般为 0~30m，可识别：使用空洞、溶

隙、裂隙发育带；掌子面附近不良地质体。

其特点为分辨率高、响应灵敏，但在含水体或强吸收介质中效果减弱。

3.4 瞬变电磁法（TEM）

适用于识别：富水断层；大规模含水空腔；岩溶含水带。

灵敏度高，尤其适合溶洞、裂隙含水层探测。但在强导电覆盖层中存在干扰。

3.5 超前钻探法（TDC）

作为验证手段执行，通常布置：先导孔；侧向验证孔；钻孔测水试验。

其优势在于直接获取岩样、含水性数据，是最终判定依据；但施工成本高、周期长。

3.6 综合预报模式

综上所述，工程实践普遍采用：

地质分析+长距离地震法+短距离物探+钻探验证

这种组合模式能够兼顾：探测深度（地震波法）；精细分辨（GPR、TEM）；真实性验证（钻探）^[3]。

4 引水隧洞超前地质预报实施流程与管理优化

4.1 分级预报体系

结合典型工程，可分为：

4.1.1 常规预报

适用于地质相对清晰段，主要以：地质调绘、物探常规扫描为主，周期性开展。

4.1.2 加强预报

当预计前方存在岩溶、断层、破碎带等中等风险因素时，需增加长距离地震波法；适量布置短距离雷达；必要时增加钻探验证。

4.1.3 重点（强化）预报

针对突水风险高或已识别岩溶暗河区域，需要：多方法联合探测；多孔位钻探；动态调整支护方案；及时开展监测和数据回溯；

此分类有助于合理安排探测频次与投入，提升效率。

4.2. 信息管理流程

应明确：工作审批与计划；数据采集标准；综合解

释机制；及时成果反馈制度。

特别是在岩溶发育、富水段施工中，应建立掌子面地质实时数据与物探解释的联动机制，确保预报成果及时指导施工^[4]。

5 超前地质预报在典型不良地质区段的应用分析

5.1 岩溶区段应用效果

在岩溶洞、暗河发育区域，长距离地震波法能识别低速异常带，而短距离电磁法则可以进一步判断是否含水。钻探验证通常用于查明溶洞空间规模和水量，为制定“超前注浆+短进尺+强支护”方案提供依据。

5.2 断层及破碎带预测

地震波法在此类地带识别能力最强，可准确显示低速带宽度和位置；雷达法能够识别裂隙的发育密度，为支护优化提供依据。

5.3 富水段识别与突水预测

瞬变电磁法能够捕捉异常导体，具有较高灵敏度，是防突水的核心工具；结合钻孔放水试验，可提前降低水压、改善施工条件。

5.4 软弱围岩段预测与支护优化

综合预测可识别围岩质量等级变化，使施工单位提前准备对应支护体系，避免因围岩骤变导致塌方事故^[5]。

6 隧洞超前地质预报存在的问题与挑战

尽管超前地质预报技术体系不断完善，但在复杂地质条件下仍面临诸多挑战。首先，地质体空间结构高度非均质化导致物探异常响应多解性强，例如岩溶、破碎带、含水体均可能呈现相似信号，加之围岩吸收、地表噪声影响，使预报解释存在不确定性。其次，富水区段预测难度依然较大，水体形态受裂隙连通性、溶蚀强度及构造控制等多因素叠加作用，且地下水动态变化快，往往呈现“突变式”特征，传统方法难以精准刻画其规模与水压分布，导致部分突水突泥仍具不可预见性。

再次，多方法联合作业的融合度不足，目前综合解释更多依赖经验性判断，缺乏标准化评价体系和数字化量化指标，不同方法之间的约束关系尚未形成系统框架，影响整体预测精度。此外，隧洞施工扰动本身对探测数

据有干扰，如爆破震动、电磁噪声、掌子面空间有限等，使部分装备难以发挥最佳效果。最后，在一些深埋高应力区域，围岩应力状态难以超前获取，现有方法更侧重结构与含水性识别，对力学状态相关的灾害预判仍相对薄弱。上述问题共同构成了当前隧洞超前地质预报进一步发展的限制因素。

7 超前地质预报工作的优化路径建议

7.1 强化综合预报体系构建

应在现有“地质调查—物探分析—钻探验证”模式基础上，进一步构建多源数据融合的综合预报体系。通过建立统一的数据管理平台，将地质素描、围岩分类、物探异常信息、钻孔编录、地下水动态等多维信息按照时序和空间进行关联，实现预报资料的可追溯、可对比、可量化。同时推动三维地质模型在施工现场的常态化应用，将已揭露地质与预报成果适时叠加，实现前方地质的动态可视化，提高对复杂构造及岩溶系统的整体认知。此外，应强化地震波法、雷达法、电磁法间的数据协同，提高异常体识别的空间精度，避免单一方法造成误判。

7.2 深化现场地质反馈机制

建议建立“预报—揭露—反演—再预报”闭环机制，将掌子面揭露信息实时回传至技术团队，使预报结论得到快速验证与校正，提高解释模型的适应性。现场地质人员应加强对裂隙产状、破碎程度、围岩力学指标、渗水点分布等信息的记录，形成标准化采集制度。对于岩溶、涌水等高风险段，应同步开展注浆试验、压水试验、水位监测等验证措施，使预报从“结果判断”扩展到“过程控制”，从而提高风险管理的及时性和精准性。

7.3 推进信息化、智能化技术应用

随着数字技术发展，隧洞超前预报可向智能化方向升级。可引入自动化地震采集系统、实时成像雷达、多参数电磁探测设备，实现掌子面连续扫描；同时利用人工智能算法进行信号去噪、异常识别和数据反演，提高物探解释的客观性与一致性。构建三维数字孪生隧洞平台，将预报数据、施工进度、监测信息动态关联，为施工指挥提供直观、实时的决策支持。此外，应推动北斗定位、自动化沉降监测、地下水动态监测等与超前预报融合，构建“静态预测+动态监控”的新型预警体系。

7.4 提高关键技术装备能力

针对深部、富水、强岩溶段的预报难题，应提升仪器装备灵敏度及抗干扰能力。例如，使用更高功率、更高频带宽的地震震源，提高长距离地震波信号能量；采用低频段组合电磁法增强溶洞与含水体的识别能力；发展隧洞专用抗噪地质雷达提升在湿度高、围岩吸收强条件下的探测有效性。同时建议在关键高风险地段配置小型可控钻机，实现短进尺快速钻探和即时验证，提高预报的准确性。

7.5 推动人员专业化与协同化培训

隧洞超前预报涉及地质、地球物理、岩土工程、数据分析等多学科技术，需构建复合型专业团队。建议定期开展技术比对、案例复盘、技能培训，使不同专业人员共同提升异常识别能力和数据解释一致性。同时建立“现场—实验室—设计院”协同机制，使现场施工团队、预报单位、设计审查单位形成协作体系，提升复杂问题的综合判断能力。

8 结论

隧洞施工超前地质预报是引水工程建设中不可或缺的关键技术体系。面对复杂的地质构造、强烈的岩溶发育以及富水段涌水风险，必须采用以地质分析为基础、

物探为核心、钻探为验证的综合预报模式。通过科学的技术选择、完善的实施流程以及及时有效的数据反馈，可以实现对突水、塌方、溶洞等灾害的提前识别和处置，为施工安全与工程质量提供坚实保障。未来，随着数字化、智能化技术的发展，隧洞地质预报将更加精细化、精准化，为我国大型引水工程建设提供更强支撑。

参考文献

- [1] 欧阳林, 宋贵林, 彭金明, 等. 深埋长隧洞超前地质预报技术应用及预警机制探究[J]. 水利规划与设计, 2024, (12): 91-97+119.
- [2] 李建超, 王进城, 王志豪. 瞬变电磁法和地震反射波法在不良地质洞段超前地质预报中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(05): 793-801.
- [3] 周杜, 杨遵俭, 刘运雄, 等. 引水隧洞不良地质段超前地质预报技术及应用[J]. 山东交通科技, 2024, (04): 108-112.
- [4] 王庆勇. TBM 施工隧洞综合超前地质预报及现场应用研究[J]. 东北水利水电, 2024, 42(08): 60-63+70+72.
- [5] 胡开富, 邵正楠, 程丰波. TSP 和地质雷达在岩溶隧洞工程超前地质预报中的应用[J]. 绿色科技, 2024, 26(12): 215-219.