

引调水工程中输水线路的选择与地质灾害防控研究

袁 斌

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 石河子 832000

摘 要:随着我国经济社会的快速发展和水资源时空分布不均问题的日益突出,跨流域、跨区域的引调水工程已成为优化水资源配置、保障国家水安全的重要战略举措。然而,引调水工程往往穿越复杂的地质构造带和生态敏感区,面临滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降、岩溶塌陷等多种地质灾害风险,严重威胁工程的安全运行与长期效益。本文系统探讨了引调水工程输水线路选择的基本原则与关键技术方法,并深入分析了沿线常见地质灾害的类型、成因及分布特征。在此基础上,构建了“识别—评估—防控—监测”一体化的地质灾害综合防控体系,提出了基于多源数据融合的风险识别技术、基于多指标耦合的风险评估模型、分级分类的工程防控措施以及智能化的动态监测预警机制。研究成果可为未来大型引调水工程的科学选线与地质灾害风险管控提供理论支撑与实践指导。

关键词:引调水工程;输水线路;地质灾害;风险评估;防控体系;智能监测

引言

水资源是基础性自然资源和战略性经济资源,其时空分布不均是我国的基本国情。根据《中国水资源公报》,我国北方地区水资源总量仅占全国的19%,却承载着40%以上的人口和60%以上的耕地,水资源供需矛盾尤为尖锐。为缓解区域水资源短缺、支撑国家重大战略实施,我国已建成或正在规划建设一批规模宏大的引调水工程,如南水北调东、中线一期工程、滇中引水工程、引汉济渭工程等。引调水工程通常具有线路长、规模大、投资高、环境影响复杂等特点,其输水线路往往需穿越高山峡谷、断裂带、黄土高原、岩溶区等复杂地质地貌单元。这些区域地质环境脆弱,历史上曾多次发生重大地质灾害事件。例如,在引汉济渭工程建设过程中,秦岭隧洞穿越F5断层时遭遇突涌水与围岩大变形;滇中引水工程在红层软岩段面临严重的边坡失稳风险。因此,如何在工程前期科学合理地选择输水线路,并在全生命周期内有效防控地质灾害,已成为保障引调水工程安全、高效、可持续运行的核心课题。本文旨在构建一个贯穿引调水工程全周期的地质灾害综合防控框架,以为同类工程提供参考。

1 输水线路选择的基本原则与技术方法

1.1 选线基本原则

输水线路的选择是引调水工程成败的关键,必须在多重约束条件下寻求最优解。首要原则是安全性优先,即线路应尽可能避开活动断裂带、强震区、大型滑坡体、泥石流沟、采空区等高风险地质灾害区域,确保工程结构在设计使用年限内的长期稳定性。在此基础上,还需兼顾经济合理性,通过优化线路走向、减少高成本构筑

物(如特长隧洞、高架渡槽)的比例,控制总投资与后期运维费用。同时,生态环保原则要求线路避让自然保护区、水源涵养区、生物多样性热点等生态敏感区域,最大限度降低对自然生态系统的干扰^[1]。此外,社会协调性也不容忽视,选线需充分考虑沿线城镇发展规划、交通网络布局及既有农田水利设施,避免大规模拆迁和社会矛盾。最后,技术可行性是实现工程落地的基础,线路方案必须与当前施工技术水平相匹配,避免进入超深埋高地应力区、强腐蚀性岩层等极端复杂地质条件区域,从而保障施工安全与工期可控。

1.2 选线关键技术方法

现代引调水工程的选线已从依赖经验判断的传统模式,逐步转向多学科交叉、多技术融合的系统化决策过程。遥感与地理信息系统(GIS)空间分析技术构成了选线工作的基础支撑,通过整合高分辨率卫星影像、数字高程模型(DEM)、区域地质图、土地利用现状图等多源空间数据,在GIS平台中进行叠加分析,可快速圈定潜在可行的走廊带,并借助地形坡度、起伏度、曲率等地形因子识别出可能存在斜坡失稳风险的区域。在此基础上,需辅以精细化的地质勘察与地球物理勘探手段,如无人机航测、激光雷达(LiDAR)、高密度电法、地震折射/反射波法以及地质雷达(GPR)等,对初选线路进行实地验证与地质参数获取,查明地层岩性组合、构造发育特征、地下水赋存状态等关键信息。为进一步提升决策科学性,常引入多目标优化模型,将安全、经济、生态、社会等多维目标量化为数学函数,运用层次分析法(AHP)、逼近理想解排序法(TOPSIS)或遗传算法(GA)等方法对多个备选方案进行综合比选。近年来,BIM(建

筑信息模型)与GIS的集成应用进一步推动了选线工作的三维可视化与协同设计,使工程模型与地质环境深度融合,显著提高了方案比选效率与冲突检测精度。

2 引调水工程沿线主要地质灾害类型与成因分析

2.1 斜坡类灾害

引调水工程穿越山地丘陵地带时,斜坡类地质灾害构成主要威胁。滑坡在黄土高原、西南山区等地尤为常见,其形成通常由降雨入渗软化土体、人工开挖扰动坡脚或地震震动触发,一旦发生,不仅可能直接掩埋明渠或破坏管道,还可能导致隧洞进出口边坡失稳,影响通水安全。崩塌则多发生于陡峻山体或人工开挖形成的高边坡区域,尤其在节理裂隙发育、风化严重的岩体中,块体在重力作用下易突然坠落,对暴露在外面的渡槽、检修道路等设施构成直接冲击。泥石流则集中于暴雨频发的沟谷地带,当流域内存在大量松散堆积物且遭遇短时强降雨时,极易形成高速流动的泥石流体,其冲击力极强,可冲毁输水建筑物甚至造成局部线路中断。这三类灾害虽表现形式不同,但均与区域地质构造、岩土体性质、水文气象条件及人类活动密切相关,具有突发性强、破坏力大的特点。

2.2 地面变形类灾害

在平原或盆地地区,引调水工程常面临地面变形类灾害的挑战。华北平原等地下水长期超采区域普遍存在区域性地面沉降现象,导致地表缓慢但持续下沉,若输水管道敷设于此,极易因不均匀沉降而产生接口错位、管体开裂等问题,进而引发渗漏甚至爆管事故。与之相关的地裂缝则多由构造活动或差异沉降引起,其延伸方向明确、切割深度大,可直接横穿输水线路,对刚性管道结构造成结构性破坏^[2]。此类灾害发展过程相对缓慢,但累积效应显著,且难以通过常规工程措施完全消除,需在选线阶段予以高度重视。

2.3 岩溶与采空区灾害

在碳酸盐岩广泛分布的云贵高原、广西等地,岩溶塌陷是引调水工程不可忽视的风险源。地下溶洞在天然状态下可能处于稳定平衡,但当输水工程改变区域水动力条件(如排水疏干或渗漏补给)或施加额外荷载时,溶洞顶板可能因强度不足而突然塌陷,危及上方明渠或浅埋隧洞的安全。同样,若线路不可避免地穿越历史矿区,则地下采空区构成潜在隐患。这些采空区在长期风化、雨水软化或外部震动作用下,可能发生冒顶或地表塌陷,造成输水设施损毁。此类灾害具有隐蔽性强、突发性高的特点,常规地表调查难以发现,必须依赖高精度物探与钻探手段进行探测。

2.4 隧洞工程特有灾害

对于以隧洞为主要输水方式的引调水工程,还存在一些特有的地质灾害类型。突涌水是深埋长隧洞施工中的重大风险,当地质勘探未能准确查明富水断层、岩溶管道或高压含水层时,掘进过程中可能遭遇高压地下水突然涌入,轻则影响施工进度,重则导致淹井事故。而在高地应力环境下,硬岩隧洞可能发生岩爆,表现为围岩突然弹射碎块,威胁人员与设备安全;相反,在软弱岩层(如页岩、泥岩、千枚岩)中,则易出现围岩流变与大变形,导致初期支护开裂、侵限,甚至需要返工处理。这些灾害的发生不仅取决于地质条件本身,也与施工方法、支护时机及监测预警水平密切相关。

3 地质灾害综合防控体系构建

3.1 风险识别:多源数据融合与隐患排查

地质灾害防控的第一步是全面、精准地识别潜在风险源。这一过程始于对区域基础资料的系统梳理,包括区域地质图、水文地质报告、历史气象数据、地震活动记录以及既往地质灾害调查成果等。在此基础上,现代技术手段极大提升了识别效率与精度。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术能够大范围、高精度地获取地表形变信息,适用于区域尺度的沉降、滑坡蠕变等缓慢变形体的筛查;而无人机倾斜摄影则可重点对隐患点进行厘米级三维建模,直观反映边坡形态、裂缝发育及植被覆盖状况。两者结合,实现了“宏观筛查”与“微观详查”的有机统一^[3]。然而,技术手段无法完全替代人的判断,组织地质、水文、岩土等多领域专家开展现场踏勘,对高风险区段进行实地核查与成因分析,仍是建立完整地质灾害隐患清单不可或缺的环节。

3.2 风险评估:多指标耦合定量评价

在完成风险识别后,需对各类灾害的可能性与后果进行科学评估,以确定防控优先级。本文主张构建一个包含致灾因子、孕灾环境和承灾体脆弱性三个维度的综合风险评估模型。致灾因子反映灾害发生的动力条件,如历史灾害频率、极端降雨强度、地震动峰值加速度等;孕灾环境描述区域地质背景的敏感程度,涵盖岩性软硬、地形坡度、植被覆盖度、断裂密度等指标;承灾体脆弱性则聚焦于输水工程本身的抗灾能力,包括建筑物类型(明渠、隧洞或压力管道)、结构重要性等级、修复难度及对供水系统的影响程度。通过模糊综合评价法或机器学习算法(如随机森林、支持向量机),可将上述多源异构指标进行耦合计算,最终将全线划分为低、中、高、极高四个风险等级,为后续差异化防控策略的制定提供量化依据。

3.3 工程防控：分级分类精准施策

基于风险评估结果，应采取分级分类的工程防控策略，实现资源的最优配置。对于极高风险区域，如已知的大型活动滑坡体或全新世活动断裂带，最有效的措施是在规划阶段就予以绕避，从根本上消除风险源。对于中高风险区域，则需采取主动工程治理措施。例如，针对滑坡隐患，可采用“地表截排水+深部抗滑桩+内部排水盲沟”的综合治理体系，从源头控制水的作用并增强抗滑力；对于崩塌风险区，可设置主动柔性防护网拦截落石，或在下方布设被动拦石网，并辅以削坡减载降低势能；在岩溶发育区，通过注浆充填溶洞、帷幕灌浆阻隔水流路径，可显著提升地基整体稳定性；而对于软岩隧洞，则需采用高强度复合支护结构（如钢拱架+喷射混凝土+系统锚杆），并在设计中预留足够的变形量以适应围岩流变^[4]。相比之下，低风险区域则以定期巡查和简易监测为主，避免过度投入。

3.4 动态监测与智能预警

地质灾害具有动态演化特性，静态防控难以应对突发变化，因此必须建立全生命周期的动态监测与智能预警机制。该机制依托“空—天—地”一体化监测网络：空基层面，利用卫星InSAR定期获取区域形变场；天基层面，通过无人机按需巡检重点边坡与建筑物；地基层面，则在关键部位布设GNSS位移站、裂缝计、雨量计、孔隙水压计及微震监测仪等传感器，实时捕捉变形、渗流与震动信号。所有监测数据统一接入工程智慧管理平台，平台内置阈值报警规则与人工智能预测模型（如LSTM神经网络），可对异常数据进行自动识别、趋势预测与风险等级判定，并通过短信、APP推送等方式分级发布预警信息，联动应急预案启动，实现从“被动响应”向“主动防御”的转变。

4 结语

本文围绕引调水工程输水线路选择与地质灾害防控这一核心问题，系统阐述了选线应遵循的安全性优先、经济合理、生态环保、社会协调与技术可行等基本原则，并介绍了遥感GIS、物探勘察、多目标优化与BIM+GIS集成等现代选线技术方法。在此基础上，深入剖析了斜坡类、地面变形类、岩溶与采空区类以及隧洞特有地质灾害的成因机制与分布规律。进而，创新性地构建了“风险识别—风险评估—工程防控—动态监测”四位一体的地质灾害综合防控体系。未来研究可从以下方向深化：一是加强气候变化背景下极端降雨事件频发对地质灾害链式响应机制的研究，提升对复合型灾害的预判能力；二是发展基于数字孪生技术的引调水工程全生命周期地质灾害智能管控平台，实现虚拟仿真与实体工程的实时映射与交互；三是探索绿色生态型灾害防控技术，如植被根系固坡、生态袋柔性护岸等，在保障工程安全的同时促进生态修复，实现工程效益与生态效益的协同共赢。引调水工程作为国家水网的骨干工程，其安全运行关乎国计民生。唯有坚持“地质先行、风险预控、科技赋能”的理念，方能筑牢国家水安全的地质屏障。

参考文献

- [1]李保虎.跨流域引调水工程输水线路施工规划方案优选分析[J].水利科学与寒区工程,2023,6(09):87-90.
- [2]张丽艳,赵林,刘芙蓉,等.输水线路工程建设中的地质灾害评估——以毛湾水库工程建设为例[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):122-124.
- [3]安宇翔,邵春芬,纪强.引调水工程通水安全鉴定关键问题研究[J].水利技术监督,2025,(12):77-80.
- [4]黄靖.引调水工程运行管理的要点思考分析[J].黑龙江水利科技,2025,53(06):34-36+48.