

Construction and Practice of Engineering System for Risk Assessment and Graded Prevention of Mountain Road Geological Disasters

Jianhui An

Xinjiang Jiaotou Maintenance Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

As critical infrastructure for regional economic and social development, mountainous roadways are susceptible to geological hazards such as landslides, debris flows, and rockfalls due to factors including geological conditions, topographical variations, and climate changes, posing significant threats to traffic safety and ecological environments. This study employs geological surveys, remote sensing interpretation, GIS spatial analysis, and numerical simulation techniques to establish a multi-factor risk assessment model. It investigates the types, distribution patterns, and risk levels of geological hazards in mountainous roadways, and constructs a risk-based hierarchical prevention and control engineering system. The system encompasses disaster identification, monitoring, risk zoning management, information-based early warning, and emergency decision-making, effectively transitioning from "post-incident remediation" to "pre-incident prevention." This approach enhances disaster mitigation capabilities and operational safety of roadways, providing scientific basis and practical references for the sustainable development of mountainous transportation infrastructure.

Keywords

mountainous road; geological hazard; risk assessment; hierarchical prevention and control; engineering system

山区公路地质灾害风险评估与分级防治工程体系构建与实践

安建辉

新疆交投养护集团有限责任公司，中国·新疆乌鲁木齐 830000

摘要

山区公路作为区域经济与社会发展的关键基础设施，受地质条件、地形起伏和气候变化等因素影响，易发生滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害，严重威胁交通安全与生态环境。本文通过地质勘测、遥感解译、GIS空间分析及数值模拟技术，建立了多因素风险评价模型，对山区公路地质灾害的类型、分布规律及风险等级进行研究，并构建了以风险评估为核心的分级防治工程体系。该体系涵盖灾害识别、监测、风险分区治理、信息化预警和应急决策等环节，能够有效实现从“事后治理”到“事前防控”的转变，提升公路的防灾减灾能力与运行安全，为山区交通基础设施的可持续发展提供科学依据与实践参考。

关键词

山区公路；地质灾害；风险评估；分级防治；工程体系

1 引言

山区公路在国家交通运输体系中占据重要地位，其建设与运行往往面临复杂地质环境的制约。由于山区地形起伏大、地层结构复杂、降雨集中且强度高，滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害成为影响公路安全运行的主要隐患。传统防治模式多以工程治理为主，缺乏系统的风险评估与科学的分级管控，导致治理投资大、预防不足、应急响应滞后。随着地理信息系统（GIS）、遥感（RS）、人工智能（AI）等技术

的应用，地质灾害风险评估和动态防控体系的构建成为研究热点。本文旨在构建一套适应复杂地质环境的风险评估与分级防治体系，从理论模型、技术路径到工程实践进行全面分析，为山区公路的安全管理提供系统化解决方案。

2 山区公路地质灾害特征与风险形成机制

2.1 山区公路地质环境特征分析

山区公路多分布于构造活动频繁的地带及地形起伏较大的区域，地质条件复杂且稳定性差。沿线的地层主要由砂岩、页岩、灰岩及风化碎屑物组成，这些岩层的抗剪强度较低，遇水容易软化，导致岩土结构的不稳定。山区道路常经过河谷切割地带，坡度较大，边坡裸露，地表植被稀疏，这

【作者简介】安建辉（1975—），男，中国河南人，本科，高级工程师，从事公路工程、运营与养护研究。

些因素共同增加了地质灾害发生的风险。地质构造的作用也较为频繁,诸如断层、褶皱、节理裂隙等现象的发育使坡体结构破碎,进而为滑坡和崩塌提供了潜在的滑动面。山区降雨强度大且时空分布不均,暴雨过程往往成为地质灾害的直接诱发因素。所有这些地质环境特征加剧了山区公路的地质灾害风险,成为公路建设与运营中的重大隐患^[1]。

2.2 地质灾害类型及分布规律

山区公路沿线的地质灾害类型主要包括滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷等,其中滑坡灾害占比最大,通常发生在切坡路段和回填路基区域。崩塌灾害常见于高陡岩质边坡,受到重力作用与降雨渗透的共同影响。泥石流主要分布在沟谷交汇处及排水不畅的区域,其发生通常具有突发性与强烈的破坏性。通过遥感监测和实地调查,可以发现灾害的分布与地形起伏度、岩性特征以及人为活动强度密切相关。工程开挖、边坡扰动及排水不当等因素进一步加剧了地质体的不稳定性,成为诱发灾害的主要外部因素。因此,了解灾害的类型和分布规律对于山区公路地质灾害防治具有重要意义,有助于制定有针对性的防治措施^[2]。

2.3 风险形成机制及演化过程

地质灾害的形成过程呈现多因素耦合特征,主要包括内因(地质条件)与外因(气候与人类活动)两类。内因决定了灾害的孕育条件,如岩体结构、地下水运动以及断层构造等,决定了灾害的潜在发生可能性。外因则通过降雨、地震及施工扰动等作用诱发灾害发生。以滑坡为例,其演化通常经历“孕育—加速—滑动—稳定”四个阶段。在降雨作用下,孔隙水压力升高、剪切强度降低,导致滑体整体失稳。尽管不同类型的地质灾害机理有所不同,但它们普遍具有动态累积与突发失稳的规律性,这为灾害风险评估提供了理论基础。通过对风险形成机制与演化过程的深入研究,可以为地质灾害的早期识别与防治提供更加精准的理论依据^[3]。

3 山区公路地质灾害风险评估体系构建

3.1 风险评估指标体系建立

为实现地质灾害风险的科学评估,首先需要构建一个系统的指标体系,涵盖地形地貌、岩土结构、气候水文、植被覆盖和人类活动等五个方面。这些因素共同决定了山区公路地质灾害的发生概率与影响范围。主要评估指标包括坡度、坡向、岩性类别、断层密度、降雨强度、流域汇水面积、土地利用类型以及道路开挖深度等。通过专家打分与层次分析法(AHP),为各项指标赋予权重,并建立综合权重模型,确保评估结果的客观性与可比性。该指标体系遵循系统性、代表性与可操作性原则,确保能反映灾害的空间分布特征及成灾潜势。此体系不仅为地质灾害的风险评估提供了科学依据,还为后续防治措施的制定提供了理论支持和数据基础,有助于实施科学、精准的灾害防控管理^[4]。

3.2 多源数据融合与空间分析方法

风险评估的精确性依赖于多源数据的综合支持,包括

遥感影像、DEM高程数据、地质勘查资料、气象监测数据等。通过GIS平台对这些空间数据进行集成与分析,利用空间叠加模型(Overlay Model)计算综合危险度指数,得到区域的地质灾害风险分布图。同时,采用地统计学方法进行空间插值,进一步提高数据的连续性与空间精度。为了提高评估的精度与预测能力,结合机器学习算法,如随机森林(RF)与支持向量机(SVM),对潜在灾害区域进行分类识别与预测。这些技术的融合不仅增强了评估模型的准确性,还提供了强有力的技术支持,为灾害预测与风险管理提供了更加科学的依据。此外,利用多源数据融合技术,可以有效克服传统方法的数据局限性,实现全面、精准的地质灾害风险分析。

3.3 风险分级与结果验证

基于综合评估的结果,风险等级被划分为五级:极高风险、高风险、中风险、低风险和极低风险。在模型的应用过程中,结合现场调查与历史灾害数据对评估结果进行验证,结果显示模型的预测精度达到86%以上。极高与高风险区主要分布在坡度大于35°的岩质地段及排水不畅的沟谷地带,这些区域的滑坡、崩塌等灾害频发;中低风险区则多集中在地势相对平缓或已经采取治理措施的区域。风险分级结果为灾害防治工程的布设与资源优化提供了科学依据,确保了工程的针对性与合理性。通过验证与应用,评估结果使得灾害防治工作更具精准性和科学性,从而实现了“以评促防”的科学管理目标,极大地提升了防灾减灾工作的效能与应对能力,有助于降低灾害发生的风险并提高公路的安全性及运营稳定性^[5]。

4 山区公路地质灾害分级防治工程体系设计

4.1 防治原则与总体思路

山区公路地质灾害防治的核心原则是“预防为主、监测预警、分级治理、系统防控”。首先,地质灾害防治应从源头进行风险识别与评估,明确各类灾害的风险区域,并建立科学、系统的防治体系。风险评估是防治工作的基础,通过识别潜在的灾害风险区,结合地质、气候等因素,制定有效的防治措施。基于风险评估结果,按照不同风险等级实施分区治理,确保在高风险区域采取强有力的防护措施,从而实现灾害的预防与早期控制。其次,应构建全方位的监测预警系统,实时监测地质、气候、环境等多方面因素,确保在灾害发生初期及时获取相关信息并发出预警信号。通过系统化的防治思路,结合工程防护与信息管理,构建综合防控体系,为公路的安全运行提供持续保障,确保山区公路的安全、可靠与可持续发展。

4.2 防治工程分级体系构成

根据风险评估结果,山区公路地质灾害防治工程可分为三级防治体系:一级防治针对极高风险区,采取强制性工程措施,如抗滑桩、锚索框架梁、抗冲防护墙等,并辅以地表排水与截渗系统,确保最大程度的安全性;二级防治适用

于高风险区，主要通过喷锚支护、柔性防护网和排水渠整治进行主动防护，以降低灾害发生的概率；三级防治面向中低风险区，侧重生态修复与监测预警，采用植被恢复、坡面固化及信息监测相结合的综合治理方式。该分级体系在设计上实现了从“点防”向“面防”的转变，兼顾了工程效益与环境协调，确保在不同风险区域实施差异化治理，既保障了治理效果，又提高了资源的高效利用。通过这种分级防治体系，可以精准调配防治资源，有效减少地质灾害对公路运营和周边环境的影响。

4.3 信息化监测与智能预警系统

为提升灾害防控的实时性与科学性，基于物联网（IoT）的信息化监测系统显得尤为重要。该系统集成了地表位移监测、地下水位监测、降雨自动采集与边坡视频监控等多个模块，通过无线网络实现数据的实时传输，并结合大数据分析的人工智能模型对监测数据进行动态分析。通过这一系统，能够实时跟踪山区公路的地质状况，精确预测潜在的失稳趋势，做到“早识别、早预警、早处置”，在灾害发生前及时发出预警信号。系统能够对复杂的地质灾害进行综合评估，极大提高了灾害预测的精确度和反应速度，为山区公路的防灾减灾提供了坚实的技术保障。通过信息化监测与智能预警系统的应用，确保了公路的安全性和稳定性，有效提升了公路管理与运营的抗灾能力。

5 山区公路地质灾害防治体系的工程实践与应用成效

5.1 典型工程案例

以西南某山区高速公路为例，该项目全长 78 公里，沿线地质灾害隐患点多达 120 余处。项目团队通过风险评估划定了 27 处高风险区，并在其中布置了 42 个一级防治工程点与 58 个二级防治工程点，同时建设了 12 处实时监测站。针对滑坡和边坡风险，采取了抗滑桩支护、边坡格构梁加固、柔性防护网铺设等综合治理措施。经过一段时间的系统治理后，监测数据显示滑坡位移速率下降了 70%。此外，灾害隐患得到有效降低，公路的安全性得到了显著提升。该工程展示了现代地质灾害防治技术在实际项目中的有效应用，并为类似山区公路提供了可借鉴的成功经验。

5.2 体系运行的综合效益

该地质灾害治理体系的实施，取得了显著的安全性、经济性和生态性效益。在安全性方面，灾害发生率同比下降了 40% 以上，显著提高了公路运行的安全性。经济性方面，

工程的投资节约约 15%，而维护成本则降低了 20%，实现了较高的经济效益。生态性方面，项目通过实施植被修复与排水优化，边坡稳定性得到了有效提升，周围景观的协调性也得到了改善。

5.3 推广与优化方向

在推广过程中，针对不同地区的地质特征与气候条件，防治措施和评估参数需要根据实际情况进行调整。例如，山区和丘陵地带的防治方案应结合地质、气候等特点，确保有效性与适用性。未来，地质灾害管理的智能化和网络化将成为发展方向，通过引入遥感动态监测、AI 预测模型与云端数据库，可以实现实时、精准的风险监控与预测，提升灾害预警和响应能力。

6 结语

山区公路地质灾害的防治是保障交通基础设施安全运行的关键。本文通过系统研究风险评估理论与分级防治体系，建立了“评估—分级—防控—监测”一体化的防治工程体系，实现了从静态治理向动态管理、从单一防护向系统防控的转变。该体系通过综合考虑地质风险、气候变化与人类活动等多因素，采用分区治理与实时监测预警技术，提高了灾害防控的准确性与及时性。实践证明，系统的防治措施有效提升了山区公路的安全韧性和运行可靠性，显著降低了地质灾害风险与维护成本。此外，该防治体系在实际应用中表现出良好的灵活性与适应性，适应了复杂多变的山区地质环境。未来研究应加强地质灾害多源数据的融合与智能识别技术应用，进一步完善风险动态评估模型，探索生态防治与工程防护相结合的新路径。这将为山区交通工程的可持续建设提供坚实的技术支撑与科学依据，助力实现更高效、更绿色的灾害防控体系。

参考文献

- [1] 陈智.西南山区公路隧道施工地质灾害风险评估及应急处置研究[D].西华大学,2024.
- [2] 蒋瑜阳,向波,王东,等.震后山区公路地质灾害风险评估体系研究——以川九公路震后恢复重建为例[J].地震工程学报,2023,45(05):1026-1034.
- [3] 李伟华,京新高速公路山区地质灾害风险评估及保障关键技术研究.河北省,京新高速公路张家口管理处,2023-05-13.
- [4] 赵宝云,山区公路滑坡地质灾害风险评价与预警关键技术.重庆市,重庆科技大学,2023-03-04.
- [5] 朱力.决策树算法在山区公路地质灾害风险评估系统中的应用[D].重庆师范大学,2019.