

# 矿山地质灾害多技术融合预警与防治研究进展

程 妍<sup>1</sup> 周凡超<sup>2</sup>

1. 防灾科技学院 河北三河 065201

2. 天津华北地质勘查总院 天津 300170

**摘要：**矿产资源开发易引发矿山地质灾害，并随着开发强度的增加呈现出高发、频发的态势。本文系统梳理矿山地质灾害防治领域的相关研究，论述了多技术融合预警体系的构成方法与防治策略的进展。通过水工环领域地质监测技术、智能化设备以及生态修复技术的整合，尝试提出“监测—预警—防治—修复”一体化的技术体系。基于多源数据融合的智能预警体系以及工程—生态协同防治可有效提高矿山地质灾害的防治效果，旨在为矿山安全绿色开测提供新的技术路径。

**关键词：**矿山地质灾害；多技术融合；智能预警；协同防治；生态修复

## 1. 引言

矿产资源为工业化领域的重要组成部分，随着工业化进程的发展，矿产资源的开发强度日渐提升，矿山地质灾害呈现出高发、频发的新态势。我国每年因矿山地质灾害造成的直接损失巨大，且各类矿山地质灾害事件频发，对矿区生产安全及工人与居民的生命财产安全造成了巨大威胁，对生态环境的稳定造成了巨大影响。我国地质环境呈“东西分区、南北分带”的特殊性，地质构造相对复杂，且因部分矿区历史问题，存在“先开采后治理”的粗放开采模式，更是提升了矿区地质灾害的风险。

近年来，国内外学者针对矿山地质灾害防治领域的研究持续进行，在监测技术、预警模型以及防治技术层面有着显著进展。水工环领域地质监测技术已较为成熟，如地质雷达（GPR），瞬变电磁法（TEM），以及GIS、GPS、RS等遥感技术在地表塌陷、地裂缝、崩塌、滑坡及泥石流等地质灾害探测方面已广泛应用。人工智能技术的快速发展，机器学习法与多源数据融合技术的构建，大幅度提升了灾害预警模型的精度。且随着生态环保的理念深入人心，工程措施与生态修复的协同发展效果也日渐凸显。但在边坡稳定性评估方面，传统地质雷达及物探手段难以全面掌握矿区地下水位动态变化的影响，仅依靠工程支护等传统方式难以从根本上解决生态退化所引发的长期地质安全隐患。因此，建设多源数据融合的智能预警与防治体系，成为了提升矿山地质灾害综合防控能力的重要组成部分。

## 2. 矿山地质灾害类型与成灾机理

### 2.1 主要灾害类型

结合当前我国矿山地质特点及工程实践，可将矿山地质灾害分为地震灾害、地面沉陷与塌陷、地裂缝、

山体滑坡与塌陷四个类别。

地震灾害是指由地壳运动引发，对矿区产生岩层错动、震动等影响，并存在诱发井下塌方、地裂缝等次生灾害的可能性，是我国矿山地质灾害中的常见类型。不同级别地震的破坏性存在明显差异，对人民群众的生命财产安全造成较为严重的损害与威胁。

地面沉降多因开采不当或地下水超采造成结构性破坏，其岩柱、矿柱支撑性不足时则会产生土层压缩的现象，外在表现为地表缓慢下沉。地面塌陷多因岩溶地区溶洞发育、地下采空区塌陷导致，具有突发性与破坏性的特点，进而影响到施工与生产安全，对生命、财产造成严重威胁。

地裂缝现象受地质结构完整性影响，当地质结构遭受破坏或地下水水位剧烈变化，易引发地下承压层结构失稳，从而产生断层或地表线性裂隙等现象。当降雨入渗加剧时，会诱发更为严重的滑坡或塌陷等地质灾害。

山体滑坡与边坡失稳情况通常在特定条件出现，多发生于露天矿区。因其边坡角度过大，岩层风化破碎或强降雨作用，进而导致矿山地质体结构性降低，在受到外力作用时，表现为土体或岩体沿滑动面整体下滑。此类地质灾害原因的产生包括且不限于自然及人为因素，在自然因素中，水灾、地震等均会诱发山体滑坡，在人为因素中，矿山的破坏性开采及施工质量不达标也可诱发山体滑坡与边坡失稳等矿山地质灾害。

### 2.2 关键致灾因素

矿山地质灾害的发生受自然因素与人为因素的共同作用影响，其核心致灾因素主要在于地质构造、水文地质、开采活动及生态环境因素四个方面。

矿山地质体原有的褶皱、断层等地质构造对岩层

稳定性有着直接影响。断层带的岩层较为破碎，并具有透水性强的特性，极易构成地下水的水利运移通道，与矿区所在地水构成水力联系，从而加剧边坡失稳的不稳定性；褶皱区域受岩层作用力的挤压而产生裂隙，增加了矿山地面沉降的概率；矿区地下水水位波动幅度过大引发膨润土缩涨、致使地基承载力显著下降，从而诱发地面沉降灾害，且地下水渗流压力超过一定预知，对软土层结构会造成显著破坏，进而诱发边坡滑动的地质灾害风险。

在露天开采中，若存在剥离量过大、地下水超采或采空区未及时回填、回填不合格等现象，均会破坏矿区地质体的平衡性与稳定性。矿区植被破坏则会导致水土流失，致使土壤抗剪强度下降，而尾矿砂、矿渣堆积等现象，不仅对原有土地的承载力有一定风险，在面对强降雨时会因雨水冲刷实现泥石流等次生地质灾害。

### 3 多技术融合预警体系

#### 3.1 监测技术集成

多技术融合预警体系的核心在于构建“空-地-地下”一体化监测网络，主体需要整合地下探测技术、地表监测技术、水文监测技术与遥感监测技术。

地下探测技术方面需以地质雷达（GPR）与瞬变电磁（TEM）为主要构成，从而实现地下结构的高精度探测。通过高频电波及脉冲电磁场激发二次涡流对原生地质构造及地下水水文动态数据进行精准识别与测量。北斗定位系统与GPS技术的结合，可实现地表位移的实施监测。在滑坡易发区布设一定密度的监测点，可使其日位移变化达到毫米级捕捉；RS技术可沟通过高分辨率卫星影像来识别地表裂缝的长度及宽度变化，当前的InSAR技术与无人机技术的结合更是可以实现每周一次的大范围巡检。

水文监测技术领域，当前的地下水水位监测仪可达厘米级精度，与渗压计结合可实时采集地下水相关数据，在地表布设毫米级精度的雨量传感器之后，可精准分析降水-地下水联动对矿山边坡稳定性的影响。物联网技术与5G技术的结合可实现多源数据的实时传输，在井下作业过程中及危险区域部分布设无线传感网络，可实时监测井下温度、湿度、岩层应力等参数，从而提升巡查的安全性，避免人工巡查的安全风险。

#### 3.2 智能预警模型

针对多源监测数据，需搭建“数据预处理-特征值提取-风险预测”三级智能预测模型。在数据预处理过程中，可通过筛除GPS型信号干扰，雷达波衰减的误差修正等方式实现滤波、归一化的原始数据处理。

结合地质、水文、生态等多维度、高精度数据集成，形成标准化数据库。在实践过程中，可将地质雷达所得的地表裂隙数据、RS所得的地表位移数据以及地下水水位与水压的数据统一转换为空间坐标下的时序数据集。在特征提取的过程中可通过主成分分析（PCA）的方式精准筛选关键致灾因子，例如在滑坡预警过程中，可以对日位移量、地下水位日升幅、坡度等核心特征的提取来降低数据维度。在风险预测的过程中，可采用改进的长短期记忆网络（LSTM）模型，输入以月为周期的时序数据来预测短期的灾害风险等级。亦或者通过历史灾害案例的训练来提升预测准确率，该方法相较于传统逻辑回归模型的预测精准度具有显著优势，从而更好的为矿山生产提供安全保障。

#### 3.3 技术优势分析

多技术融合预警体系相较于传统单一技术，在全面性、时效性、动态性三个方面具有显著优势。整合地下、地表、地质、水文、生态等多维度数据，可避免单一指标误判。在工程实践中，针对地表位移的监测需加入地下水渗流引发的深层滑动，融合地下水水位与运移数据可提升预警的准确性，从而提升多技术融合预警体系的全面性。而5G传输与智能算法的结合可实现“监测-分析-预警”全过程的自动化，从数据采集到预警信息的发布时间大幅缩减，相较于人工分析的效率大幅提升，体现了其模型的时效性。在动态性特征方面，针对实时数据的更新来持续优化模型参数，以适应矿区地质条件的动态变化。在生产实践过程中，针对矿区开采深度增加后，模型可实现“采空区距离-地表呈现”关联参数的自动调整，从而保持预警的精准度，实现动态观测。

### 4 综合防治技术体系

#### 4.1 工程防治技术

在矿山地质灾害治理体系中，工程措施是控制地质灾害风险的核心要素，针对不同灾害类型需采用差异化方案。

针对地面沉降与塌陷治理，常规情况下需要使用水泥-粉煤灰混合浆材料进行注浆填充，对地下水超采区域，可通过井灌、渠灌的方式进行人工回灌，从而减少土层压缩。针对地裂缝治理，对于宽度小于0.5 m的地裂缝，通常采用黏土填充与人工膜覆盖措施，从而防止雨水入渗。对于宽度大于0.5 m的地裂缝，通常采用钢筋骨架与混凝土浇筑的防止，且需要设置排水孔来疏导积水。针对滑坡与边坡失稳治理，通常采用削坡整形与锚杆支护的方式，对于潜在滑动面采用抗滑桩阻挡滑动，并结合现场情况控制桩间距。针

对地震次生灾害防控，对于地震烈度较高的矿区，井下巷道需采用U型钢支架，对地表建筑需设置抗震缝，并储备例如抗震棚与急救物资等应急避难设置。

#### 4.2 生态修复技术

生态修复技术可通过改善矿区生态环境来提升地质结构的长期稳定性。主要包括植被恢复、土壤改良、覆土复垦及水文生态修复等方式。植被恢复需选择松树、紫穗槐、沙棘抗逆性强的乡土物种，采用种子预处理与客土喷播技术，在矿区所在范围内的边坡、沉陷区周围构建植被覆盖层，从而减少水土流失。土壤改良需对尾矿库堆积区以及重金属污染土壤采用“淋洗+钝化+生物修复”的综合技术来降低土壤的重金属含量，从而恢复土壤肥力。覆土复垦需对废弃采坑进行削高填低来进行土地平整，而后覆盖耕作层土壤来种植农作物及牧草，从而实现土地资源再利用。水文生态修复需构建“沉淀池-人工湿地”系统，将矿井废水处理达标后用于植被灌溉或地下水回填，并在矿区周边修建截排水沟，从而减少降雨对边坡的冲刷作用。

#### 4.3 协同防治效应

工程措施与生态修复协同技术可实现“短期控险+长期稳定”的综合治理效果，在风险控制的时效性、成本效益优化及生态-地质耦合强化方面具有显著效益。

风险时效控制性方面，诸如锚杆支护、抗滑桩等工程措施可在1-3个月内提升边坡稳定性系数，有效降低地质灾害风险，为生态修复储备时间。诸如植被恢复等生态修复可在1-2年后逐步产生作用，从而维持生态修复的长期稳定。成本效益优化方面，诸如全坡面混凝土喷护等单一工程措施具有成本高、破坏生态等弊端，面对紧急灾情难以应对。而“锚杆+局部喷护+植被”的协同修复模式可显著降低成本，其生态效益提升效果也尤为显著。生态-地质耦合强化方面，植被的蒸腾作用可降低地下水位，从而减少地下水对岩层的侵蚀作用。而排水孔、排水沟等工程措施可疏导地表径流，从而避免植被根系积水腐烂，最终达成“工程保生态、生态固工程”的良性结构循环，实现“短期控险+长期稳定”的综合治理效果。

### 5 展望及结论

#### 5.1 展望

随着科技手段的逐步发展，多技术融合预警与防治体系已取得一定成效，现存瓶颈主要体现在技术兼容性不足、极端条件适应性差以及成本与推广难度大等方面。结合当前发展现状与瓶颈，未来技术发展及

应用可在四个方面着力。其一是智能化与标准化，可研发通用数据结构，在保密性原则的前提下做到监测设备的“即插即用”。建立健全相关设计标准与技术规范，明确不同地质条件下的相关技术参数。其二是极端环境的技术突破，可开发抗干扰监测设备，提升极端条件下的设备安全性，研发适用于高陡边坡的技术体系，例如无人机精准喷播等技术，从而提高植被成活率。其三是低成本技术创新，可推广“国产化+轻量化”智能监测设备，开发简易且实用的生态修复技术，同时降低其技术操作门槛。其四是数字化与可视化，可构建矿区三维地质模型，对实时监测数据、工程施工措施、生态修复信息等内容进行整合，从而实现“监测-预警-防治”的全流程可视化管理，提升相关的决策效率。

#### 5.3 结论

针对矿山地质灾害的复杂性特点，必须要突破单一技术的局限性，需构建多技术融合的预警与防治体系。本文提出的“监测-预警-防治-修复”的一体化结构体系，通过整合水工环地质监测、智能化预警、工程防治与生态修复等多源技术，实现灾害“早发现、早预警、早治理、早修复”的全链条防治框架，为矿山安全绿色开采提供了有效技术路径。未来发展中需要突破技术兼容性、极端条件适应性等多方面瓶颈，推动技术标准化、规范化、智能化、低成本化发展，为我国矿山地质综合防治水平提供技术支撑。

### 参考文献

- [1] 赵振华, 韩琳, 徐扬, 等. 露天石灰岩矿山生态脆弱性评价及修复策略探讨 [J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(07): 242-248.
- [2] 周真财. 水工环地质监测技术在地质灾害治理中的应用研究 [J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(07): 110-112.
- [3] 张烈. 大型矿山滑坡体应急防治技术优化研究 [J]. 中国安防, 2025, (07): 93-95.
- [4] 赵丰年, 赖重阳, 孙同, 等. 地质勘查技术的矿山环境地质灾害预防研究 [J]. 冶金管理, 2025, (06): 94-96.
- [5] 徐扬. 地质勘查技术在矿山勘查与开发中的具体应用 [J]. 冶金与材料, 2025, 45(06): 118-120.

作者简介：程妍（2003-），女，汉族，江西南昌，学士，无，研究方向：水工环方面工作。