

面向山区公路弃渣场滑坡风险管控的 “天—空—地”一体化智慧监测研究

吴美¹, 汪斌², 刘惠妹³, 徐伟恒^{3,4}, 王秋华⁵, 刘运¹

(1.西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224; 2.云南今禹生态工程咨询有限公司, 云南 昆明 650233; 3.西南林业大学 大数据与智能工程学院, 云南 昆明 650224; 4.西南林业大学 森林生态大数据国家林业和草原局重点实验室, 云南 昆明 650224; 5.西南林业大学 土木工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 从“天—空—地”3个层面对山区公路弃渣场易滑坡风险区域进行实时监测与科学预警, 以期精准地监测弃渣场的安全状况提供关键数据和技术支撑, 进而为弃渣场滑坡风险评估和管控策略的制定提供理论参考。[方法] 选取宣曲(宣威—曲靖)高速公路(38[#], 41[#]和45[#])弃渣场作为研究对象, 构建基于现代监测技术与网络通信技术的实时动态弃渣场滑坡安全预警监测平台。利用卫星遥感技术、无人机摄影测量技术和地面传感器协同监测方法, 对2015—2024年进行多源、多时相弃渣场边坡地物变化特征分析与地表形变演化监测, 并结合累计变形和形变速率判据开展滑坡风险的预警判定。[结果] ①对比不同时期的卫星影像得出扰动范围内的弃渣场植被已逐渐恢复生长, 38[#], 41[#]和45[#]弃渣场整体植被覆盖面积相比2018年平均增长了50%。②经计算得出38[#]和41[#]弃渣场的实际扰动面积仅超出设计扰动面积的0.04和0.50 hm², 而45[#]弃渣场扰动范围保持不变。同时确定弃渣量、扰动面积、最大堆高、坡度和坡比均符合滑坡体稳定要求, 表明各弃渣场边坡整体保持稳定状态, 发生滑坡风险的可能性较低。③GNSS监测结果显示各监测点总平均变形速率 $V_t < 7$ mm/d, 其中41[#]JCD3-高程方向累计变形达到最大值1 815.4 mm, 处于累计变形判据注意级预警的临界区间内, 滑坡体形变呈下降趋势, 发生滑坡风险的可能性降低。[结论] 利用预警判定方法监测出各弃渣场综合为I级滑坡预警级别, 当位移累计量达到预设阈值时即触发预警系统, 验证了“天空地”一体化智慧监测结果的有效性。

关键词: 山区公路; 弃渣场; 天空地一体化; 滑坡风险; 智慧监测

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)02-0136-15

中图分类号: U417.5, U642.22

文献参数: 吴美, 汪斌, 刘惠妹, 等. 面向山区公路弃渣场滑坡风险管控的“天—空—地”一体化智慧监测研究[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 136-150. Wu Mei, Wang Bin, Liu Huimei, et al. Integrated space-air-ground intelligent monitoring for landslide risk management at highway waste disposal sites in mountainous area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 136-150. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.015; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.015.

Integrated space-air-ground intelligent monitoring for landslide risk management at highway waste disposal sites in mountainous area

Wu Mei¹, Wang Bin², Liu Huimei³, Xu Weiheng^{3,4}, Wang Qiuhua⁵, Liu Yun¹

(1.College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;

2.Yunnan Jinyu Ecological Engineering Consulting Co., Ltd, Kunming, Yunnan 650233, China;

3.College of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China;

4.State Forestry and Grassland Bureau Key Laboratory of Forest Ecological Big Data, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 5.College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: [Objective] Real-time monitoring and scientific early warning of landslide risk at waste disposal

收稿日期: 2024-08-16

修回日期: 2024-12-03

采用日期: 2024-12-03

资助项目: 国家自然科学基金地区资助项目“遥感三维绿量支持下的城市生态质量定量评价”(32060320); 云南省基础研究计划面上项目(202101AT070039); 云南省“万人计划”青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2020047); 云南省重大科技专项(202202AD080010)

第一作者: 吴美(1997—), 女(苗族), 贵州省剑河县人, 硕士研究生, 研究方向为数字林业与森林资源管理。Email: azkomorebi0309@163.com.

通信作者: 徐伟恒(1980—), 男(汉族), 云南省宣威市人, 博士, 教授, 主要从事林业装备与信化、遥感大数据智能处理与应用、区域生态遥感的研究。Email: xwh@swfu.edu.cn.

areas along mountainous highway from three perspectives-space, air, and ground were conducted to provide key data and technical support for accurately monitoring the safety status of slag abandonment sites. The results provide a theoretical reference for the formulation of landslide risk assessment and control strategies for waste disposal areas. [Methods] Xuanwe-Qujing Expressway waste disposal areas (38[#], 41[#], and 45[#]) were selected as the research objects, and a real-time dynamic waste disposal area landslide safety early warning and monitoring platform was constructed using modern monitoring and network communication technologies. By integrating satellite remote sensing technology and unmanned aerial photogrammetry with ground sensors, the pattern of slope feature variation and surface deformation in the waste disposal areas from 2015 to 2024 at multi-spatial and multi-temporal scales was analyzed. In addition, the early warning of landslide risk was determined by utilizing evidence of cumulative deformation and deformation rate. [Results] ① Vegetation was gradually reestablished within the disturbed areas, and the overall vegetation coverage of the waste disposal areas in 38[#], 41[#], and 45[#] increased by an average of 50% from 2018 to 2024. ② The actual disturbed areas of 38[#] and 41[#] were only 0.04 beyond the designed disturbed area, whereas the disturbed range of 45[#] remained unchanged. Furthermore, the amount of slag and disturbed area, maximum pile height, slope, and slope ratio were in line with the stability requirements for landslides, indicating that the overall slopes of the waste disposal areas maintained a stable state, and the possibility of landslide risk was low. ③ The total average deformation rate of each monitoring point showed that cumulative deformation in the direction of 41[#] JCD3-elevation reached a maximum value of 1 815.4 mm, which is within the critical interval of cumulative deformation with respect to warning level, and the landslide deformation exhibited a decreasing trend. Thus, the likelihood of landslide risk is reduced. [Conclusion] Based on the early warning judgment method, the landslide warning level of different waste disposal areas was level I (the lowest risk level), and when the cumulative amount of displacement reached the preset threshold that triggered the early warning system, the intelligent space-air-ground monitoring performance was effectively verified.

Keywords: mountainous highway; waste disposal sites; space-air-ground integration; landslide risk; intelligent monitoring

近年来,随着山区高速公路建设项目的逐步推进,附属的弃渣场工程数量急剧增加^[1]。弃渣场工程是典型的人工松散堆积体,主要用于堆放山丘区工程建设过程中产生的废弃土石方。这些场所岩土体为非饱和状态,结构松散,其稳定性较差^[2]。在地质条件、气候环境与弃渣本身物理力学性质等因素作用下,堆积体极易出现坍塌、溜坍等滑坡现象,进而对下游公路工程构筑物、生态环境以及生命财产安全造成威胁^[3-4]。因此,进行弃渣场滑坡遥感动态监测,分析弃渣场滑坡的变化情况及监测预警对于有效开展风险管控工作是十分重要的^[5]。

目前,许多研究主要集中在针对山区公路弃渣场某一特定的工程项目上,通常采用单一技术或方法进行监测,尚未形成一个全面的体系。通常采用人工巡检和现场调查的方式,并且结合使用大地测量、倾斜计和位移传感器等监测手段进行各类型滑坡灾害的研究^[6-7]。然而,这些手段受限于人力资源、现场条件以及调查频次,难以全面、实时地捕捉弃渣场内地物变化。在面临极端气候条件和异常地质活动背景下弃渣场滑坡风险的监测仍然面临诸多挑战,预测的准

确性仍待提升,尤其在监测地形较为复杂的弃渣场上,监测效率和精度上往往是不足的。同时,这些传统监测手段监测范围有限、工作量大、效率低及监测点易被破坏,且得到的离散点的变形规律不能完整呈现弃渣场地表特征。

利用卫星遥感技术具有的大范围、长时序且呈周期性对地观测能力,对易发生滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害区域进行地物变化的监测是具有可行性的^[8],可利用光学遥感技术对滑坡进行间接监测,植被作为降低浅层滑坡风险的重要生态屏障,可通过水文调控和机械加固促进边坡的稳定性^[9]。王华等^[10]利用二分像元模型从光学遥感(GF-1)影像中获取金沙江边特米滑坡的植被覆盖情况,成功解译了植被状况与滑坡风险性的时空相关性,植被状况变差时滑坡体蠕变现象加剧,发生滑坡的概率就增大。相关学者等^[11]也证实了这一观点。利用卫星遥感解译植被变化信息进行滑坡监测的方法相对单一。无人机摄影测量方法灵活性强、精度高,具有不受云层遮挡的优势,能快速获取小范围内的高清晰度图像,实现多角

度的地物捕捉^[12]。其监测手段适用于面积小、易滑动和人员难以到达区域的变形监测。廉旭刚等^[13]运用无人机影像分析了露天采矿区地面沉陷情况,认为无人机影像对大梯度沉降具有较好的监测能力。同时,无人机遥感对红河镇区域黄土滑坡的空间分布、滑坡方向、滑坡体微地貌特征等方面具有较大的应用潜力^[14]。梁石等^[15]利用消费级无人机构建生产建设项目中工程堆土地形模型,对堆土区域的面积和土方变化进行了快速、精确的三维的定量测量。由于卫星和无人机重访周期长的原因,无法快速实现对滑坡变形过程及其诱发因素相关物理量的高频时间序列实时自动监测。因此,结合地面传感器实时在线监测,可有效弥补这一不足,有利于对滑坡灾害的不同风险对象进行早期预防和长期变化监测^[16]。全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)具有时效性高、应用广泛、连续三维定位以及监测方式丰富等优势,可高效用于滑坡灾害发生前的实时预警。同时,实时运动全球卫星系统测量能够以精度高的优势快速监测滑坡体基础土壤或岩石的不稳定情况^[17]。如:黄观文等^[18]利用实时GNSS和加速度数据评估了积石山同震灾害链中远场易发区滑坡的潜在危害性,为隐患排除和灾情预警提供及时、准确、稳定的保障;白正伟等^[19]采用物联网思维,以“轻终端+行业云”的设计理念研发了千元级小型化实时GNSS监测技术,完成了滑坡地表高精度、全天实时的监测;而针对滑坡发育特征的影响,韩军强等^[20]结合多种手段识别滑坡体的变形状态并进行安全预警,同时在滑坡加速度阶段增设RTK-GNSS先进监测手段,实现了更为灵活和高效地滑坡体垮塌快速捕捉。总而言之,基于天空地监测技术的不同特点以满足滑坡监测的不同需求,三者结合可实现对弃渣场边坡的精确监测,弥补传统监测手段带来的缺陷,从而提高监测效率和范围,同时也可以大大减少人员进入弃渣场的安全风险,具有很强的实用价值。

因此,本研究结合云南省在建多条高速公路的安全稳定评估工作实践,采用成熟监测技术对各类型弃渣场进行实时监控,构建基于天(卫星遥感技术)、空(无人机摄影测量技术)和地(地面传感器实时在线监测)一体化方法。利用高清影像和Sentinel-2影像数据对弃渣场区域进行地物观测与植被反演;通过无人机摄影测量获取高精度影像,并以高分辨率点云数据构建实景三维模型,获取到弃渣场地表扰动情况与破坏痕迹;利用地面传感器实时在线监控滑坡灾害的动向,从时间上分析滑坡的变形演化特征。同时基于弃渣场位移监测结果,协同累计变形和形变速率主要指

标构建有效的滑坡预警判据。本文对山区高速公路弃渣场滑坡进行“天空地”一体化智慧监测,从三大层面上对弃渣场易滑坡风险区域进行实时地监测与科学地预警,以期为精准地监测弃渣场的安全状况提供关键数据和技术支撑,进而为弃渣场滑坡风险评估和管控策略的制定提供理论参考。

1 研究区概况

1.1 自然地理条件与监测点位分布

本研究选取的三处弃渣场位于宣曲(宣威—曲靖)高速公路的G56杭瑞高速公路段,路线全长108.07 km(包括G60连接线13.523 km)。该公路位于滇中高原东北部,地形陡峻、海拔高差较大,地震烈度大,沟谷延伸较远。具有复杂的岩溶结构,其围岩稳定性差,易发生岩体崩塌、滑坡和地面塌陷等地质灾害。该区域为亚热带高原季风气候,年降水量变幅在558.5~1 895.5 mm,汛期主要集中于5—10月。

三处弃渣场沿山区高速公路主线分布,各自所处的地形与地质条件各异。根据各弃渣场边坡的特点,分别对各级边坡平台进行监测点位布设,并实施24 h不间断监测(见图1)。在工程稳定区域内布设GNSS基准点,以确保基准点的长期使用。同时,在适宜位置安装雨量计和视频监控站,实时记录降水量变化并捕捉现场的发展动态。

1.2 弃渣场基本特性

弃渣场内堆积物主要为碎石废弃物,用于堆放隧道进出口和道路两旁开挖的洞渣料及零星渣场区开挖的土石料,其最大堆渣高度约60 m,总占地面积约17.72 hm²,38[#]和41[#]弃渣场进行平坡处理,坡度约为15°,已设置挡渣墙进行防护,挡渣墙地面墙高2 m,坡面覆土,已于2019年完成人工植被恢复作业。各弃渣场特性见表1。

2 数据来源与方法

2.1 监测云平台架构

为实现全天候、实时地对地观测弃渣场滑坡风险监测,采用“天空地”一体化方法建立高速公路智慧感知与分析平台,集成各种监测技术和融合多源监测信息数据。将平台架构划分为感知层、网络层、数据层、应用功能层和终端设备。监测云平台架构见图2。

(1) 感知层。该层包括多个地基感知站点。主要对弃渣场变形数据进行采集。整个感知层必须具备体积小、低功耗和高可靠性的优势,以实现对环境的全方位、实时感知。

(2) 网络层。该层主要负责数据传输和通信,采

用 4G 物联网网络为主、北斗卫星网络为备的双重通信方式，确保在 4G 网络故障或信号不佳的情况下，系

统能够自动切换至北斗卫星网络，保障监测数据的实时传输和系统的稳定性。

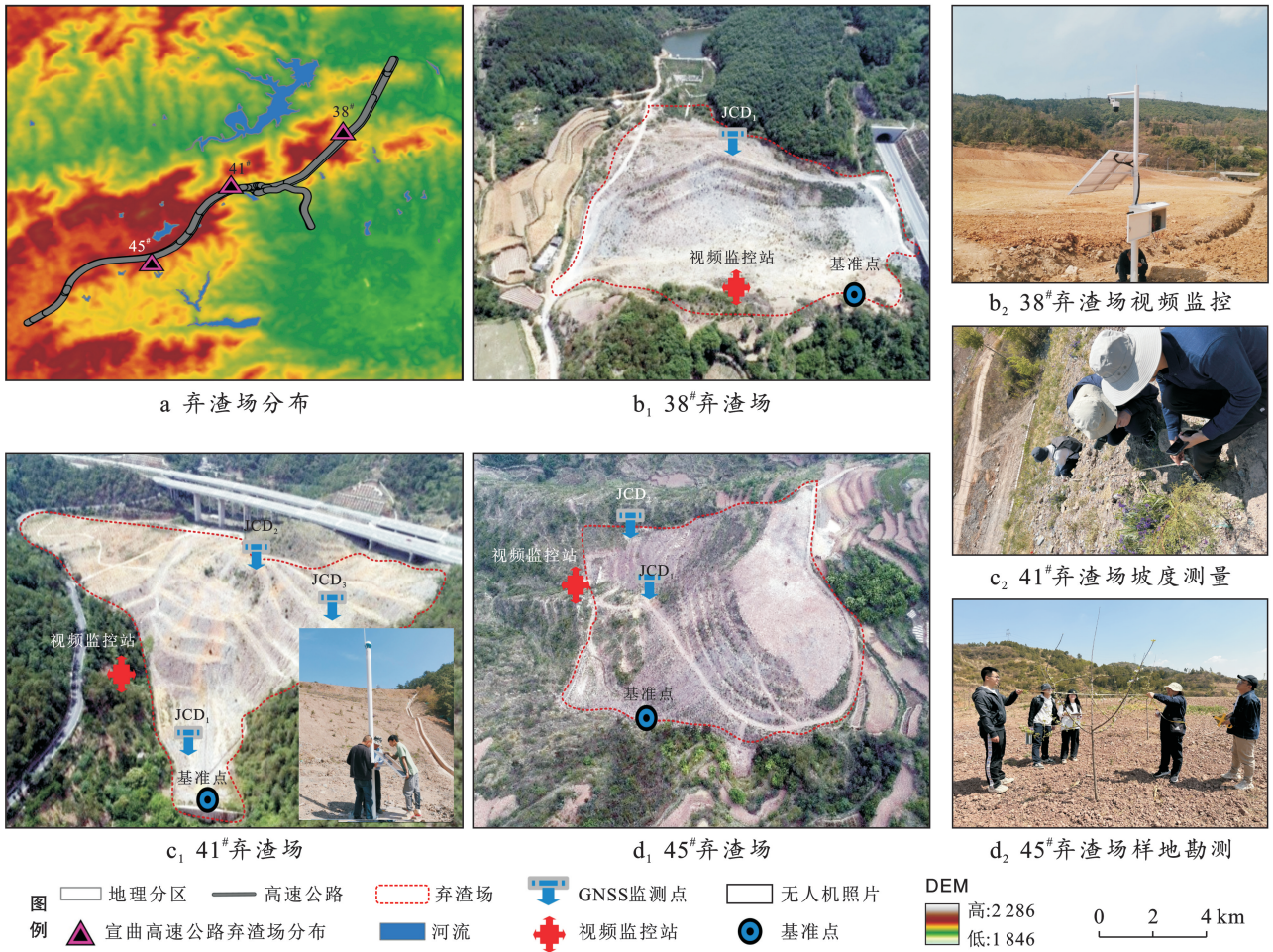


图 1 弃渣场分布、场景和监测点位布置

Fig.1 Distribution, scene conditions and monitoring points arrangement of waste disposal areas

表 1 弃渣场工程特性

Table 1 Engineering characteristics of waste disposal areas

弃渣场编号	占地面积/hm ²	渣场类型	渣场级别	分台数量	堆渣高度/m	弃渣场下游及周边情况	地质情况
38#	3.34	沟道型	3	4	1 980~2 023	位于月亮石(小二型)水库下游 100 m 左右,渣体占用了排洪通道,弃渣场下游 40 m 为 G56 主线桥梁	弃土地表为第四系残积(Q ₄ el)粉质黏土广泛覆盖,下伏基岩为泥盆系下统桂家垌组(D ₁ g)砂质泥岩及其风化层
41#	6.38	沟道型	3	7	1 966~2 028	位于高速公路主线下侧,弃渣场下游 250 m 为窄沟岩水库(小二型灌溉水库)	
45#	4.64	坡地型	3	12	2 031~2 110	位于分水岭旁沟道,弃渣场上游汇水面积小,下游 200 m 为胡家冲水库。水库坝下 50 m 为沪昆高铁铁路桥	

(3) 数据层。该层作为信息数据中心，负责接收、处理、汇聚和存储监测数据，为指令下发和实时交互提供支持。同时，数据信息层面向用户，提供数据展示、分析计算等功能，支持用户的实时操作和指令输入，实现高效的信息流管理与响应。

(4) 应用功能层。该层主要承担数据管理、监测控

制和信息展示的核心功能。通过系统化实现不同的应用效果，以全面支持监测过程的高效管理与决策辅助。

(5) 终端设备。该层通过计算机终端、移动设备和大屏展示系统，支持数据输入、远程监控和实时信息展示，确保监测系统在数据管理、风险预警和信息展示上的高效运行与安全性。

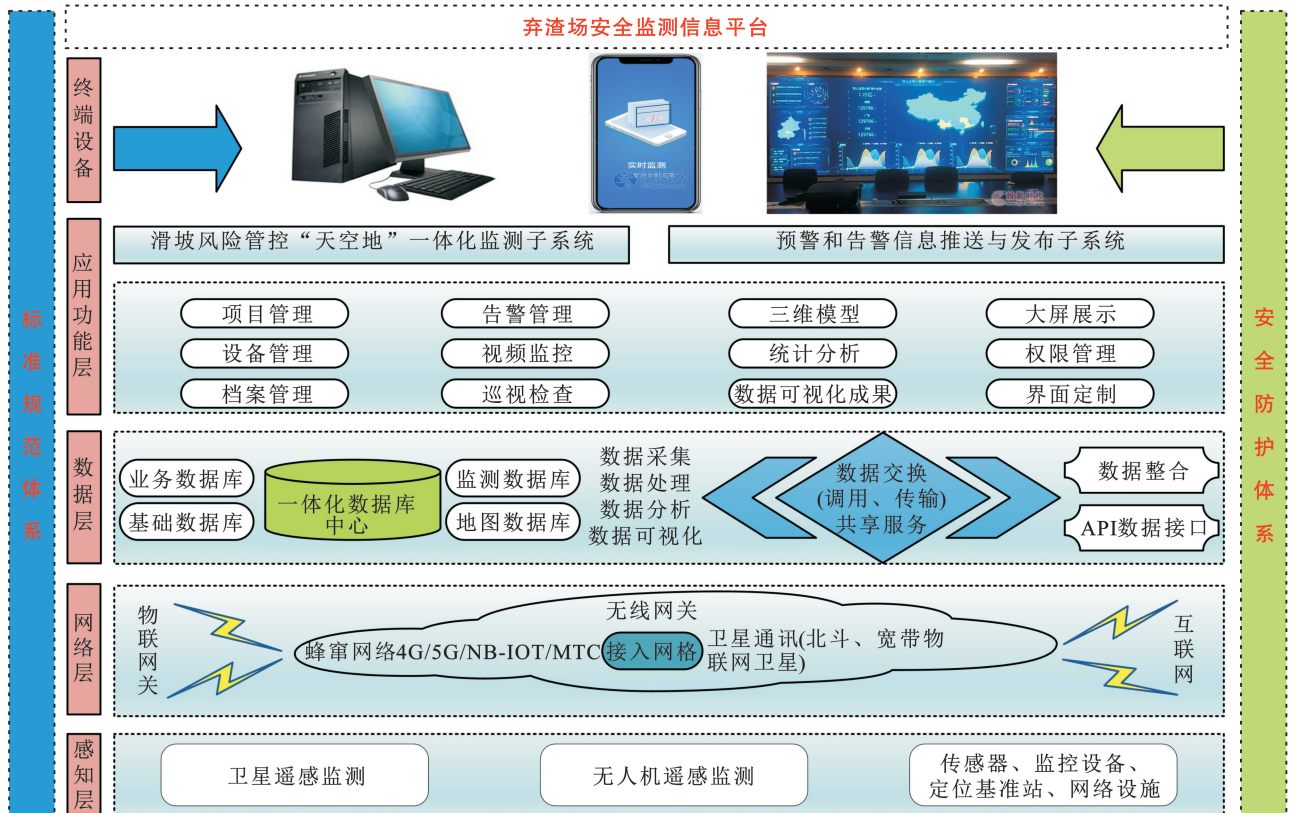


图 2 弃渣场在线监测系统平台架构图

Fig.2 Architecture diagram of online monitoring platform for waste disposal area

本研究构建了“天空地”一体化的智慧监测体系,以实现弃渣场滑坡灾害的早期监测与后期管控,其研究的技术流程见图 3。首先,“天”通过 Google Earth pro 软件提供的高清影像检索其弃渣场生产建设施工前(2015 年)、施工中(2017 年)和竣工后(2022 年)的 3 个时期进行地表观测,并结合 Sentinel-2 光学数据获取地表动态变化情况。其次,“空”是利用无人机摄影测量技术,获取整个区域的地物特征,并快速生成数字正射影像图(digital orthophoto map, DOM)和数字高程模型(digital elevation model, DEM),再利用高分辨率点云数据构建弃渣场的实景三维模型,实现重点隐患区域及地物变化的短期高精度动态监测。“地”则是通过 GNSS、视频监控站和雨量计等地面观测手段获取地表形变信息和动态数据,分析渣体的变形演化特征与破坏机制,并结合变形监测结果,协同累计变形和变形速率主要指标构建滑坡风险预警的判据。最后考虑到孕育滑坡灾害的发生受坡度、降雨量、坡面植被特征、弃渣量、实际扰动面积、汇水面积、弃渣的堆高、滑坡位移等地质和环境条件的影响^[4, 21-23],本文结合弃渣场小范围地形特征,利用遥感影像处理, ArcGIS 空间分析以及地表形变分析等技术手段,实现弃渣场影响滑坡要素的提取,结合监测云在线平台和预警判据,实现弃渣场边坡风险的早

期预警和有效管控。

2.2 植被覆盖度的计算

植被覆盖度(FVC)反映了地表植被覆盖密度,是描述区域生态系统和环境变化的重要指标,能够反映滑坡体内部的活动情况以及各种因素的影响。因此,本次使用 Sentinel-2 影像来源 GEE 平台自带的数据集,空间分辨率为 10 m,该数据已经完成正射校正和亚像元级几何精校正,为 Level 1 C 质量等级的大气表观反射率产品。同时,结合的 Google Earth pro 软件提供的高清影像在全区范围内没有云层覆盖,空间分辨率为 20 m,且满足解译的要求,以便观察弃渣场内的地物信息。

利用 GEE 平台对 2018—2024 年 Sentinel-2 光学数据进行处理,提取归一化植被指数(NDVI)数据进行影像筛选并计算每个像元值,利用像元二分模型^[24]建立基于 NDVI 数据的 FVC 估算模型:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

$$FVC_i = \begin{cases} 0 & (FVC < 0) \\ FVC & (0 \leq FVC \leq 1) \\ 1 & (FVC > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中:NDVI 为像元归一化植被指数;NDVI_{veg} 和 NDVI_{soil} 分别为弃渣场纯植被像元和纯无植被像元的

NDVI 值,通常是一个像元值的 NDVI 光谱信息表达为由植被部分所贡献的信息 $NDVI_{veg}$ 与无植被部分所贡献的信息 $NDVI_{soil}$ 两个部分构成。本文选取累积频

率为 5% 对应的 NDVI 值作为 $NDVI_{soil}$,取累积频率为 95% 对应的 NDVI 值作为 $NDVI_{veg}$ 。然后将其带入式 (1) 中,计算弃渣场竣工结束后 7 a 的植被覆盖度。

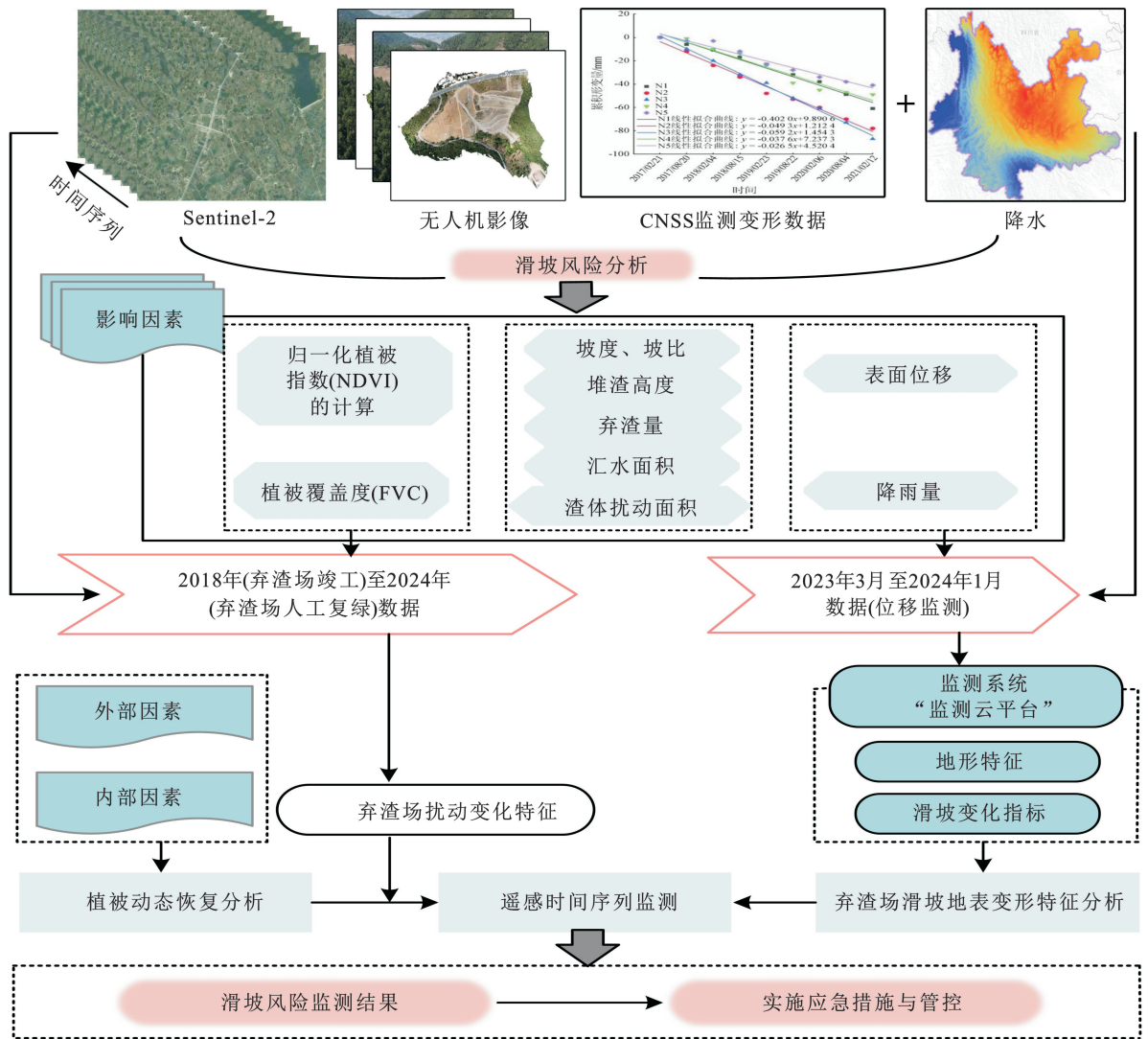


图 3 研究技术流程图

Fig.3 Research technology flowchart

2.3 无人机摄影测量

本次野外飞行试验于 2023 年 3 月进行,使用大疆精灵 4 P 固定翼无人机,搭载 2.54 cm 2.00×10^7 像素 CMOS 传感器,采用卫星定位模块 GPS/GLO-NASS 双模,拍摄参数中光圈为 $f/10$,曝光时间为 $1/3205$ 。其中飞行高度在 80~120 m,照片最大分辨率达到 5472×3078 ,航向重叠率 75%~85%、旁向重叠率 75%;针对每个弃渣场地形特征,每次航行任务以 8~10 m/s 的速度实现对弃渣场整个区域的全覆盖航拍。将 38[#] 和 41[#] 弃渣场分别获取的 139,265 张相片导入 PhotoScape 软件中,处理后生成地面最新一期的 RGB 影像。

基于摄影测量获取的高分辨影像、DOM 和 DEM

等数据资料对边坡稳定标准特征进行计算和分析:

- ①DOM 提供地表的正射影像,而 DEM 则用于表示地形起伏特征的高程信息,可以在不同时间点表达地形高程信息以及进行坡度等分析,从而监测扰动范围下的地物特征。
- ②弃渣量:在 3 D 模型中拟合弃渣场边坡面的多边形,多边形投影至水平基准面,在投影面上划分小格网。然后利用小格网垂直向上反投影到 3 D 模型的表面,并与模型的网格进行求交,计算出每个格网对应的高差,求出每个立方体柱的体积,累加每个立方体柱的体积即为弃渣量;
- ③坡度:将弃渣场逐像元计算坡度,并将其分为 6 个坡度等级;
- ④扰动面积:利用 DEM 导入 ArcGIS 作为底图计算弃渣场内的实际扰动面积;
- ⑤汇水面积:使用 DEM

数据,利用 ArcGIS 进行上游集水区的水文分析计算,同时整合 CAD 测量数据,运用 Civil 3D 曲面分析方法计算得出汇水面积。

2.4 地面传感器监测

首期地面监测系统已在工程竣工后安装并开始投入运行,安装的监测设备包含 6 组 GNSS 监测点位、3 个降雨接收站点和 3 个球形监控,按照每隔一小时回传一次空间坐标数据传输至监测云平台,记录整个采集期间弃渣场各边坡的动态数据。为了全面了解当前弃渣场的动态变化,基于泰测云在线监测云平台选取监测时段(2023 年 3 月 20 日至 2024 年 1 月 17 日)内的地表位移数据、降雨量数据和视频监控的实时画面进行分析。其中,监测的位移数据是使用 GNSS 接收器采集弃渣场边坡和坡台内的地面数据,采用空间后方交会的方式对监测点进行位置确定,并对位置信息进行处理,最后将回传的原始数据进行异常值剔除和缺失值填补等预处理^[25-26]。而收集的降雨量数据则是采用翻斗式雨量计记录的 3 个无人自动监测站小时降雨数据。

2.5 协同滑坡风险预警判据

基于大量的滑坡变形监测结果研究与本文使用的不同卫星成果数据,对滑坡风险监测中进行应急处置阶段采用滑坡地表累计变形^[27-28]、变形速率^[29]作为主要预警指标。其中滑坡变形通常表现出渐进性破坏的特征,即累计变形超过某一临界值时,边坡

就会发生失稳现象,以此判定滑坡发生的极限位移是构建累计变形准则重要基础,当现有累计变形值(S_t)与极限位移(S_c)间差值越大,累计变形值(F_h)大于某一临界值(F_0),说明滑坡剩余形变空间就越大,其稳定性相对较高。考虑到滑坡累计变形和变形速率均能实现滑坡预警的判别,因此,两者实时安全储备参数(F_c)也应相同。滑坡变形速率作为边坡动能最直观的反应,具有较强的波动性。可利用极限变形速率(V_t)确定的方法实现滑坡变形的整体波动性情况^[30]。

地表植被动态变化是滑坡蠕变变化的主要影响因素之一^[10]。随着地表形变的加剧,滑坡区域的植被覆盖状况变差,滑坡风险性随之增强,形成蠕变甚至发生滑坡概率显著提高。反之,当地表变形趋于稳定,植被覆盖状况改善,滑坡风险性相应降低,边坡发生滑动的可能性降低。

弃渣场施工后的堆渣高度、坡度、实际扰动面积、汇水面积及选址条件等,应严格符合《水利水电工程水土保持技术规范》的设计要求,满足水土流失防治的基本原则,确保弃渣场边坡的稳定安全^[31]。

基于以上基础,将累计变形、变形速率、植被恢复情况和弃渣的工程状况作为预警判据指标,综合各指标的预警阈值和预警级别,并按照滑坡风险的严重程度划分预警等级。本文将各级预警等级划分标准和建议措施统计见表 2。

表 2 山区高速公路弃渣场综合预警等级判据

Table 2 Comprehensive warning level criteria of waste disposal areas along mountainous highway

预警等级	累计变形判据		形变速率判据		植被恢复程度 临界区间	弃渣场工程状况 安全条件	危险 等级	建议措施
	临界区间	发展趋势	临界区间	发展趋势				
I 级—蓝色预警	$F_h \leq 0.55$	下降趋势	$V_t \leq 0.55V_c$	下降趋势	$>70\%$	符合	注意级	定期巡视与监测
II 级—黄色预警	$0.55 < F_h \leq 0.65$	趋于稳定	$0.55V_c < V_t \leq 0.65V_c$	趋于稳定	$70\% \geq FVC > 50\%$	较符合	警示级	定时测定,告知撤离注意事项
III 级—橙色预警	$0.65 < F_h \leq 80$	上升趋势	$0.65V_c < V_t < 80V_c$	上升趋势	$50\% \geq FVC > 30\%$	一般	警戒级	实时高频监测,提前做好规避准备
IV 级—红色预警	$F_h > 80$	上升趋势	$V_t > 80V_c$	上升趋势	$<10\%$	不符合	警报级	高频率监测与管控,及时撤离滑坡区

3 结果与分析

3.1 植被动态恢复分析

为观测三处弃渣场施工区域的植被恢复进展,本研究对 2015—2022 年的高清影像(见图 4)进行目视解译得出以下结论:施工前(2015 年),三处弃渣场尚未进行大规模开发,原生植被保持良好,规划堆渣区域的林草覆盖率超过 85%,地表无明显扰动的迹象;施工中(2017 年),公路修建已经完成大部分堆渣工作,38# 和 41# 弃渣场西北侧是高速公路建设的核心

区域,土方开挖作业导致弃渣场扰动区域呈现大面积裸地特征,周边地块已被工程施工和住宅建设所占据;竣工后(2022 年),高速公路已顺利投入使用,施工区域通过人工修复措施和自然生态过程的共同作用下,弃渣区植被覆盖度显著提升,完成了初步的植被恢复工作。

2018—2024 年三处弃渣场植被覆盖度空间分布格局中图 5 显示,在人工干预措施作用下的三处弃渣场植被覆盖变化总体为上升趋势,各年度覆盖较差区域的面积均未超过总面积的 20%,高植被覆盖面积主

要分布在弃渣场的坡顶、坡脚及周边区域,而低植被覆盖度则集中于弃渣场的中心内部区域。41[#]弃渣场植被覆盖度呈持续增长趋势,而 38[#]和 45[#]弃渣场在

2023 年弃渣场局部植被覆盖度略低于 2022 年,这是由于两处弃渣场在 2023 年开展复垦作业所致,这与视频监控和现场观测一致。

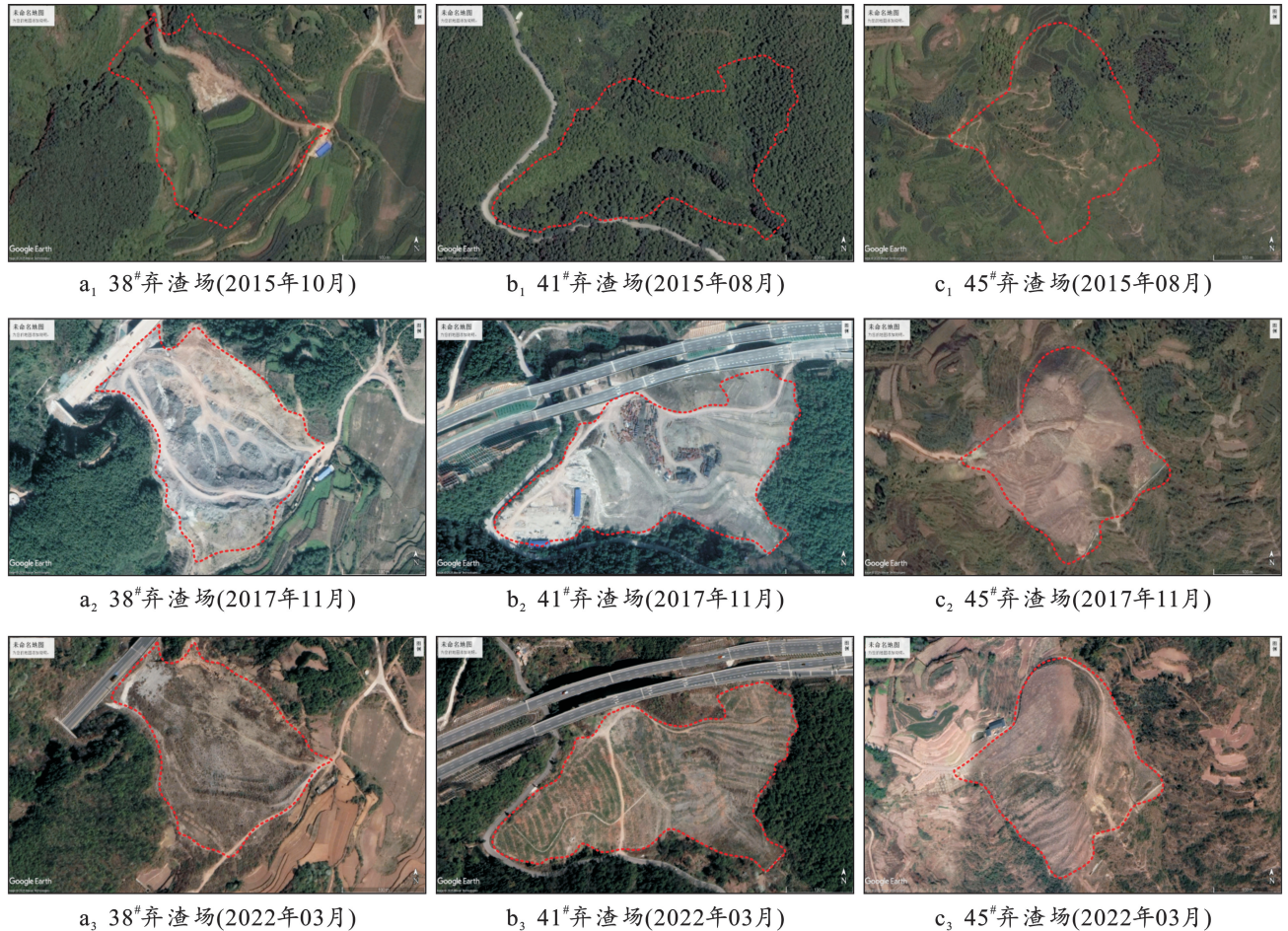


图 4 施工前(2015 年)、施工中(2017 年)和竣工后(2022 年)谷歌卫星影像

Fig.4 Pre-construction (2015), construction (2017) and post-completion (2024) Google satellite imagery

综合以上分析得知,从 2015—2024 年扰动范围内的弃渣场植被覆盖度逐步增长,38[#],41[#]和 45[#]弃渣场整体植被覆盖面积相比 2018 年平均增长了 50%,坡面植被的恢复增强了边坡的根系网络与地表植被结构,从而有效减少雨水侵蚀,提升土壤稳定性^[32-33],表明植被覆盖度在维持弃渣场边坡稳定性方面发挥了一定作用。

3.2 弃渣场扰动范围分析

无人机精细测量结果显示见图 6,38[#]和 41[#]弃渣场边坡存在易变形区域,其平均坡度不超过 50°,其他区域平均坡度在 16.5°,主体坡度较缓,属于典型的缓倾斜复合坡型。边坡表面覆盖层主要由粉质土和砂质土构成,表层包括堆积土、人工覆盖层和植被层等不同类型的覆盖物,且未见明显地表裂缝。

经过无人机的实际测量计算与设计方案进行对比分析得出的结果见表 3。部分弃渣场实际的堆渣

范围已超出了设计要求的范围,38[#]弃渣场设计弃渣场弃渣范围为 3.34 hm²,实际扰动范围为 3.38 hm²;41[#]弃渣场设计弃渣场弃渣范围 6.38 hm²,实际扰动范围 6.88 hm²。上述两个弃渣场扰动面积分别增加了 0.04 hm²,0.50 hm²,增加比例分别为 1.2%和 7.8%,但是未达到水土保持方案重大变更的条件,仅属于一般的变更情况。而弃渣场最大弃渣量为 5.03×10⁵ m³,最大堆高为 79 m,弃渣场各级堆渣边坡坡度均<35°,坡比小于 1:1.5,各项指标可纳入水土保持专项验收中。根据结果显示的实际扰动范围有所扩大,已在弃渣场下游实施了浆砌石挡墙工程、堆渣平台及马道实施了截排水措施,并对坡面覆盖层进行了植被恢复。结合无人机测量数据和人工实地勘察,截至 2023 年 3 月 30 日,堆渣体边坡不存在冲刷及溜渣、滑坡等现象,这充分说明各弃渣场的边坡均保持着整体稳定的状态。

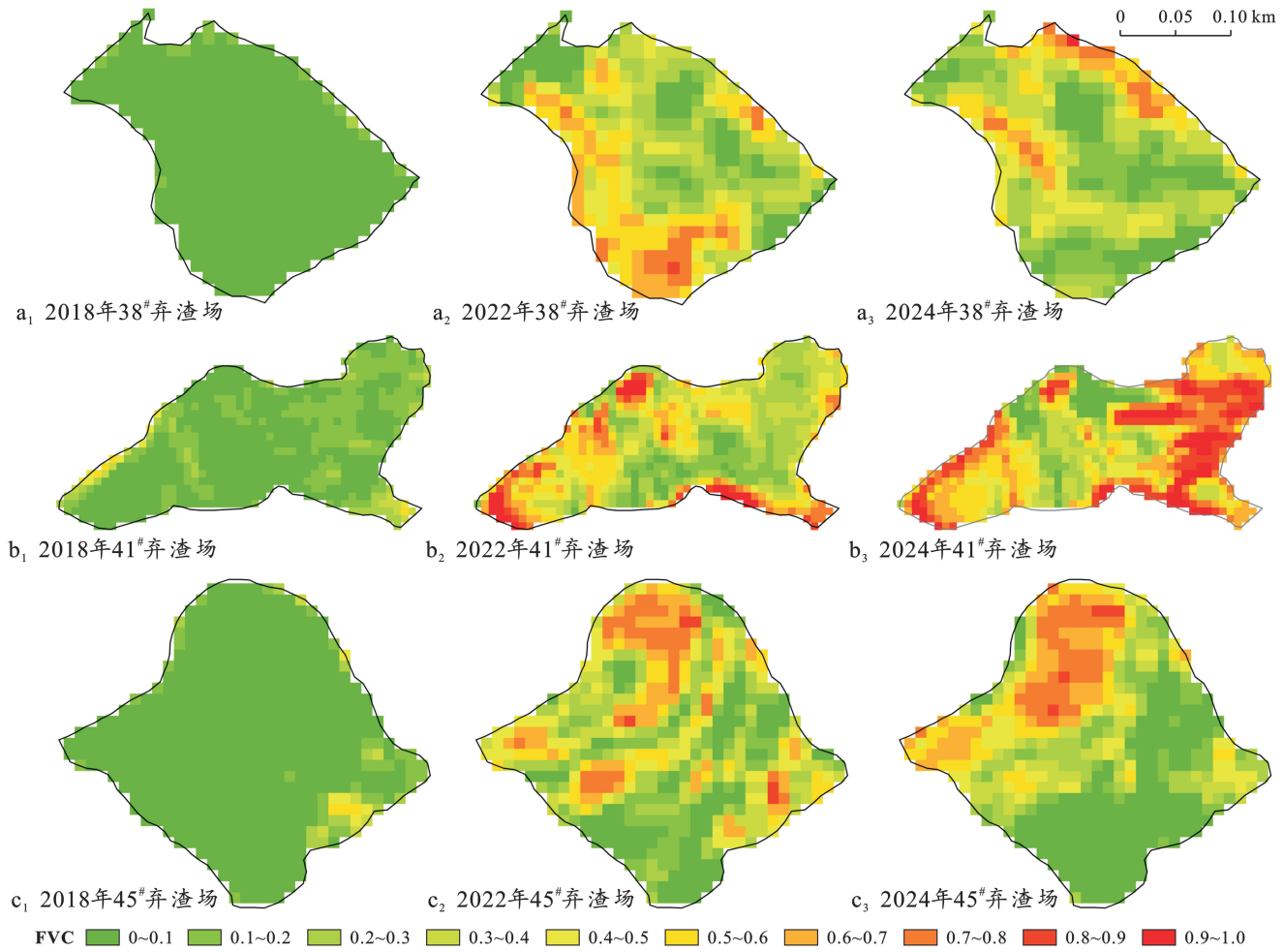


图 5 2018—2024 年弃渣场 FVC 空间分布
 Fig.5 FVC patial distribution of waste disposal areas from 2018 to 2024

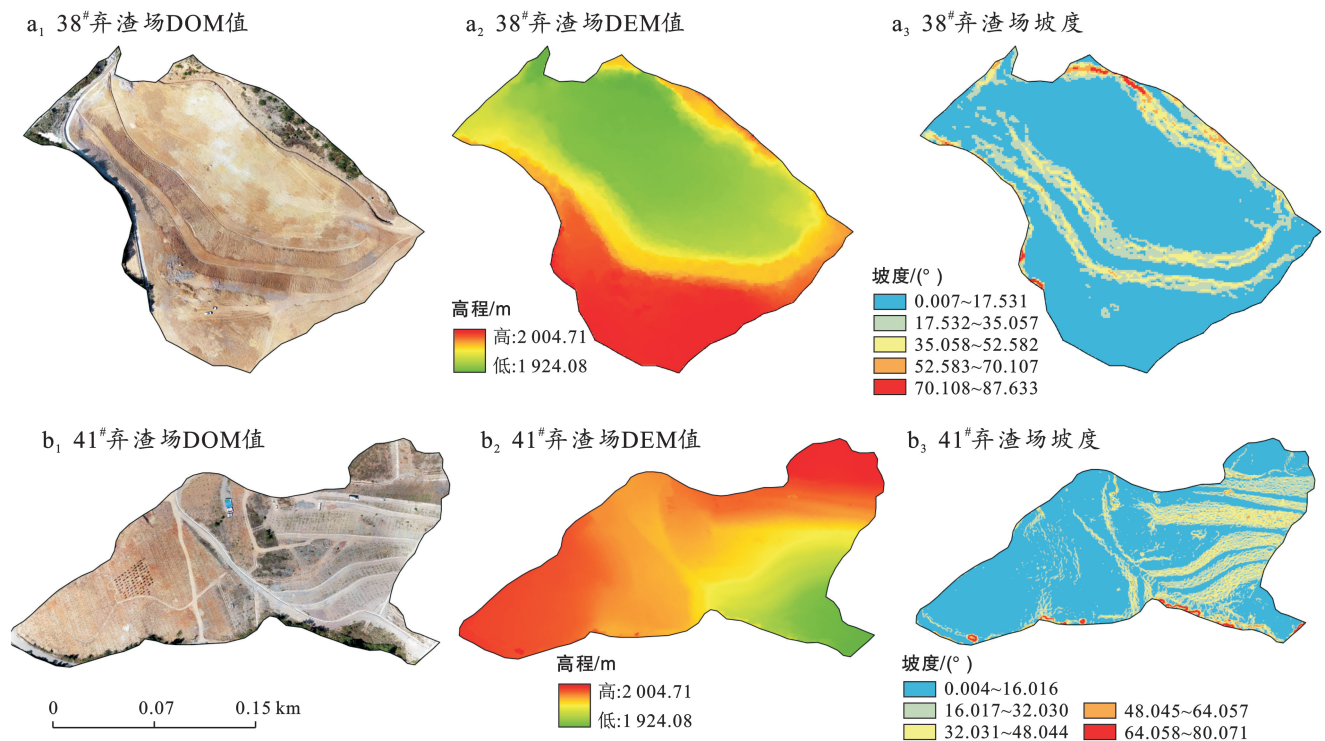


图 6 41# 和 38# 弃渣场无人机地形测量结果:DOM,DEM 和坡度分析
 Fig.6 UAV topographic survey results of 41# and 38# waste disposal areas: DOM, DEM and slope analysis

表 3 宣曲高速公路弃渣场监测信息结果

Table 3 Results of monitoring information of Xuanqu expressway waste disposal areas

监测对象	设计扰动面积/hm ²	实际扰动面积/hm ²	弃渣量/ 10 ⁴ m ³	最大堆高/ m	汇水面积/ km ²	滑坡风险监测结果
38# 弃渣场	3.34	3.38	24	23	0.92	植被恢复程度差、 挡渣墙和排水系统已完善。
41# 弃渣场	6.38	6.88	50.3	62	0.22	
45# 弃渣场	4.64	4.64	33	79	0.13	

3.3 滑坡体时序形变分析

结合弃渣场地形特征,绘制了滑坡体各方向累计

变形量、变形速率及累计降雨量的历时曲线趋势图 (如图 7 所示)。

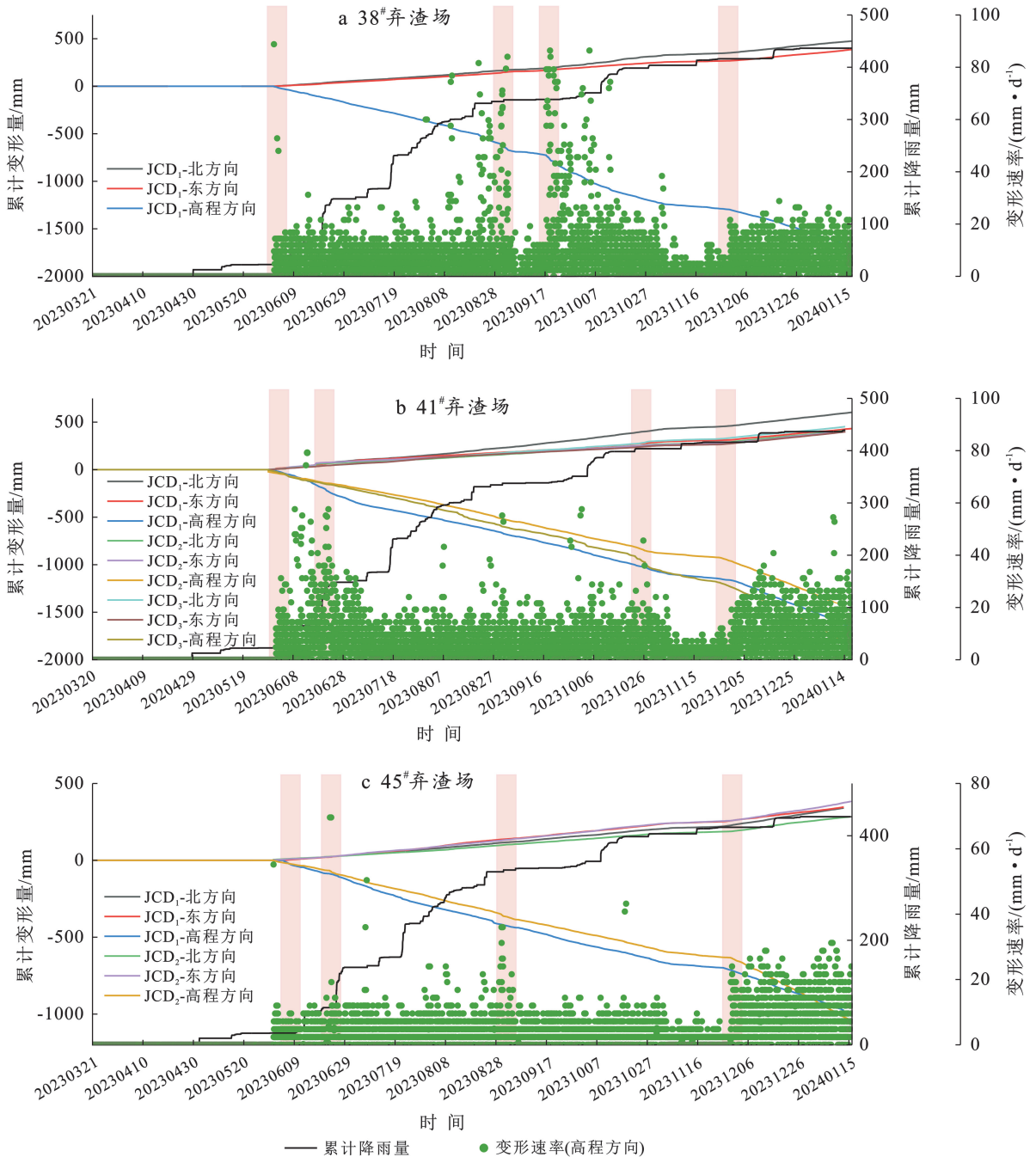


图 7 各监测点累计变形、累计降雨量、变形速率的变化

Fig.7 Change of cumulative deformation, cumulative rainfall and deformation rate for each monitoring point

(1) 弃渣场监测初期(2023年3月20日至5月30日),边坡长期处于稳定滑移状态,未出现某一方方向形变量急剧加速导致局部地面失稳的现象,弃渣体累计变形量为0,降雨量均未超过2 mm,边坡中主要易变形区(38[#]-JCD₁,41[#]-JCD₂,456[#]-JCD₂)变形速率 $V_t=0$,现场新生裂缝未开始产生。

(2) 弃渣场监测中后期(2023年6月1日至2024年1月14日),边坡长期处于蠕变状态,3处弃渣场都具有4个累计变形突变区段,而各监测点的高程位移方向与滑坡主滑方向基本一致,整体变形曲线与每年汛期降雨变化相对应。在该时间段内,38[#]和41[#]弃渣场后期变形速率逐渐减缓,45[#]弃渣场变形速率则稳定在同一区间内,3处弃渣场平均形变速率 $V_t < 7$ mm/d,但41[#]弃渣场平均变形速率大于38[#]和45[#]弃渣场,41[#]-JCD₃边坡达到其他区域最大累计沉降1815.4 mm,该区域正处于弃渣场右中部陡坡,这与边坡结构形态的演化特征基本吻合。从累计变形曲线上看出,各方向累计形变量在持续增加,但监测曲线整体上没有出现明显的持续加速变形特征。同时,结合通过现场实时视频监控进行确认41[#]和45[#]现存坡面裂缝无较大变化,说明各监测区域的边坡处于基本稳定的状态。

(3) 根据监测期间的降雨量数据显示,3处弃渣场形变速率与降雨量均有较好的响应关系,在2023年6月20日达到最大日降雨量21.6 mm,总累计降雨量达到439.2 mm,8—10月期间为高降雨量的集中时段,在该时段内因强暴雨冲刷侵蚀降低岩土体的抗滑能力,水的下渗会增加边坡土壤自重,改变潜在滑动面稳定状态,从而增大边坡失稳风险^[34]。此外,受6月累计降雨的激增,各方向滑坡累计变形量持续地增加,雨季的到来使情况更加严峻,41[#]弃渣场正北侧是较宽排水渠,进入6月雨季后,滑坡体形变速率增大,其驱动因素可能涉及该地区的地质(第四系残积 Q_4el 粉质黏土)和降雨浸润条件的影响。因此,在山区公路建设过程中,稳定的第四系堆积体上填筑低路堤虽然满足路基设计规范对一般路基的要求,不需要进行单独验算,但在长期降雨作用下其稳定性会持续降低,极可能出现失稳破坏^[35],建议加强监测与管控。

3.4 协同监测预警分析

由表4可知,基于指数回归模型构建的累计变形判据准则拟合效果均达到0.98以上,所得的拟合效果较优,表明该预警判据方法适用于弃渣场滑坡风险等级的划分,预警效果良好。同时,根据安全储备参

数 F_c 分析,各监测点的安全储备范围是[0.54,0.70]区间,其中41[#]弃渣场监测点3在高程方向上的安全储备相对最高,该方向在1月17日达到累计变形量最大峰值为1815.4 mm,形变速率为21.6 mm/d累计降雨量达到439.2 mm。当弃渣场变形累计滑移到一定程度时,超出安全储备参数就会触发预警报警,此时边坡已形成运动型破坏,计算得到的累计变形量和变形速率结果超出Ⅰ级预警判据的临界区间值。因此,根据表2的综合预警等级判据以及结合现场巡查情况,判定41[#]弃渣场各监测点预警等级为Ⅰ级,并针对各弃渣场也发布Ⅰ级—蓝色注意级预警(见表5)。

基于弃渣场滑坡累计变形和已发生滑坡形变速率的主要指标确立了不同滑坡阶段的判据阈值,并协同地表植被变化和弃渣场工程状况判定滑坡预警等级为Ⅰ级,其4类预警判据的预警分级结果大致相同,各指标相互验证了判据之间的准确性。所得的综合预警判据分级结果见表6。

为了融合不同监测技术,提高滑坡风险监测的成效,结合FVC空间分布图(图5)显示,从2015—2024年扰动范围内的38[#],41[#]和45[#]弃渣场整体植被覆盖面积相比2018年平均增长了50%。同时,据表3计算结果已知各项工程指标均满足水土保持规范设计,进而综合确定各弃渣场的预警等级为Ⅰ级—蓝色注意级预警,滑坡变形呈下降的趋势,滑坡体整体处于稳定的状态,此时发生滑坡风险的可能性较小。考虑到滑坡剩余变形空间还存在,其稳定性较差,且后续趋于不利方向发展。因此,监管部门还需进一步加强风险管理和管控措施。

4 结论

本研究以山区公路弃渣场为例,结合卫星遥感技术、无人机摄影测量技术、地面传感器实时在线监测技术进行“天空地”一体化全面监测研究。以满足实时监测需求并实现科学预警目标,从而为山区公路弃渣场的滑坡风险监测以及地质灾害管控提供有效的技术支持。

(1) 通过对高清影像对地观测和植被覆盖度的反演,得出扰动范围内的38[#],41[#]和45[#]弃渣场在工程竣工后植被覆盖度逐步恢复生长,整体植被覆盖面积相比2018年平均增长了50%,边坡稳定性和地表抗侵蚀能力得到了提高,表明植被覆盖度对弃渣场边坡稳定性具有一定的影响。

(2) 利用高分辨率影像监测工程建设后38[#]和41[#]弃渣场的实际扰动面积仅超出设计扰动面积的

0.04 hm² 和 0.50 hm², 各弃渣场的弃渣量、扰动面积、最大堆高、坡度和坡比均符合设计标准规范, 表

明弃渣场边坡保持整体稳定状态, 滑坡风险的可能性相对较低。

表 4 各监测点极限位移求解的拟合结果

Table 4 Fitting results of limit displacement solution of each monitoring point

弃渣场编号	监测点	拟合方程	拟合度	临界系数 F_h	安全储备参数 F_c
38 [#]	JCD ₁ -北方向	$y = 1\ 522.62 \exp\left(-\frac{360.51}{t}\right)$	0.99	0.32	0.69
	JCD ₁ -东方向	$y = 1\ 079.15 \exp\left(-\frac{330.09}{t}\right)$	0.99	0.36	0.64
	JCD ₁ -高程方向	$y = 5\ 133.95 \exp\left(-\frac{338.59}{t}\right)$	0.99	0.33	0.67
41 [#]	JCD ₁ -北方向	$y = 1\ 692.77 \exp\left(-\frac{287.78}{t}\right)$	0.99	0.36	0.64
	JCD ₁ -东方向	$y = 967.76 \exp\left(-\frac{270.72}{t}\right)$	0.99	0.45	0.55
	JCD ₁ -高程方向	$y = 3\ 807.67 \exp\left(-\frac{283.05}{t}\right)$	0.99	0.44	0.56
	JCD ₂ -北方向	$y = 1\ 007.64 \exp\left(-\frac{303.93}{t}\right)$	0.99	0.41	0.60
	JCD ₂ -东方向	$y = 872.05 \exp\left(-\frac{272.12}{t}\right)$	0.98	0.46	0.54
	JCD ₂ -高程方向	$y = 4\ 007.65 \exp\left(-\frac{346.78}{t}\right)$	0.99	0.36	0.64
45 [#]	JCD ₃ -北方向	$y = 1\ 275.48 \exp\left(-\frac{332.92}{t}\right)$	0.99	0.35	0.64
	JCD ₃ -东方向	$y = 957.13 \exp\left(-\frac{300.32}{t}\right)$	0.99	0.42	0.58
	JCD ₃ -高程方向	$y = 6\ 031.27 \exp\left(-\frac{395.12}{t}\right)$	0.99	0.30	0.70
	JCD ₁ -北方向	$y = 993.133 \exp\left(-\frac{355.99}{t}\right)$	0.99	0.37	0.63
	JCD ₁ -东方向	$y = 910.99 \exp\left(-\frac{307.34}{t}\right)$	0.99	0.38	0.62
	JCD ₁ -高程方向	$y = 2\ 181.78 \exp\left(-\frac{267.02}{t}\right)$	0.99	0.45	0.55
45 [#]	JCD ₂ -北方向	$y = 844.92 \exp\left(-\frac{353.13}{t}\right)$	0.99	0.34	0.66
	JCD ₂ -东方向	$y = 1\ 148.82 \exp\left(-\frac{356.55}{t}\right)$	0.99	0.34	0.66
	JCD ₂ -高程方向	$y = 2\ 913.09 \exp\left(-\frac{351.75}{t}\right)$	0.98	0.36	0.64

(3) 地面传感器实时在线监测结果显示弃渣场监测初期的边坡处于稳定滑移阶段, 现场新生裂缝未开始产生。监测中后期, 38[#]、41[#]和 45[#]弃渣场的平均变形速率 $V_t < 7$ mm/d, 其中的 41[#]弃渣场 JCD₃ 累计沉降达到 1 815.4 mm, 累计变形曲线持续增长, 但未出现显著加速变形迹象, 结合实景三维模型与视频监控分析, 表明各边坡处于基本稳定的状态。

(4) 降雨是山区高速公路弃渣场滑坡变形失稳的主要诱因, 滑坡位移量受 6 月降雨量的激增后持续增

加, 最大日降雨量达 21.6 mm, 累计降雨量达 439.2 mm, 各方向滑坡累计变形量持续地增大, 滑坡体形变速率增大, 在该时段内因强暴雨冲刷侵蚀降低岩土体的抗滑能力, 水的下渗会增加边坡土壤自重, 改变潜在滑动面稳定状态, 会增大边坡失稳的风险, 建议加强监测与管控。

(5) 基于累计变形和形变速率判据, 综合判定弃渣场的预警等级为 I 级, 地表变形呈下降的趋势, 边坡整体处于稳定的状态, 此时发生滑坡风险的可能性较小。

表 5 各监测点极限位移和形变速率预警分析

Table 5 Early warning analyses of ultimate displacement and rate of deformation at each monitoring point

弃渣场 编号	监测点	累计变形判据/mm			形变速率判据/(mm·d ⁻¹)			综合发展 趋势
		极限变形值 (S _c)	所属临界 区间	现有变形值 (S _t)	极限变形速率 (V _c)	所属临界 区间	现有变形速率 (V _t)	
38 [#]	JCD ₁ -北方向	1 522.62	[837.44,989.70]	476.10	0.064	[0.035,0.042]	0.020	下降趋势
	JCD ₁ -东方向	1 079.15	[593.53,701.45]	387.80	0.025	[0.013,0.016]	0.009	
	JCD ₁ -高程方向	5 133.95	[2 823.67,3 337.07]	1 684.50	0.050	[0.027,0.032]	0.017	
41 [#]	JCD ₁ -北方向	1 692.77	[931.02,11 717.23]	605.40	0.174	[0.095,0.113]	0.062	下降趋势
	JCD ₁ -东方向	967.76	[532.26,638.72]	433.80	0.205	[0.112,0.133]	0.092	
	JCD ₁ -高程方向	3 807.67	[2 094.22,2 513.06]	1 666.10	0.313	[0.172,0.203]	0.137	
45 [#]	JCD ₂ -北方向	1 007.64	[554.20,665.04]	407.80	0.621	[0.342,0.403]	0.251	下降趋势
	JCD ₂ -东方向	872.05	[479.63,575.55]	401.30	0.373	[0.205,0.243]	0.172	
	JCD ₂ -高程方向	4 007.65	[2 204.21,2 645.05]	1 428.60	0.575	[0.316,0.373]	0.205	
45 [#]	JCD ₃ -北方向	1 275.48	[701.52,841.82]	452.80	0.017	[0.046,0.011]	0.006	下降趋势
	JCD ₃ -东方向	957.13	[526.42,631.70]	398.50	0.006	[0.003,0.004]	0.002	
	JCD ₃ -高程方向	6 031.27	[3 317.20,3 980.64]	1 815.40	0.085	[0.046,0.055]	0.025	
	JCD ₁ -北方向	933.13	[513.23,606.54]	340.70	0.018	[0.010,0.012]	0.007	
	JCD ₁ -东方向	910.99	[501.05,592.15]	346.50	0.036	[0.020,0.023]	0.014	
	JCD ₁ -高程方向	2 181.79	[1 199.98,1 418.16]	976.40	0.108	[0.059,0.070]	0.048	
45 [#]	JCD ₂ -北方向	844.91	[464.71,549.19]	286.30	0.166	[0.091,0.108]	0.056	下降趋势
	JCD ₂ -东方向	1 148.82	[631.85,746.74]	387.40	0.280	[0.154,0.182]	0.094	
	JCD ₂ -高程方向	2 913.10	[1 602.21,1 893.52]	1 056.80	0.042	[0.023,0.028]	0.015	

表 6 不同判据条件下预警等级的分级结果

Table 6 Grading results of warning level under different criteria

弃渣场 编号	不同判据的预警等级结果				综合预警 结果	应急处置
	累计变形量/ mm	形变速率判据/ (mm·d ⁻¹)	植被恢复 情况	弃渣场 施工情况		
38 [#]	I	I			I	以短信、微信形式给相关工作人员发布蓝色预警信息,每天检查数据,每周发布监控公告
41 [#]	I	I	50%	符合		
45 [#]	I	I				

5 讨论

本研究通过协同多种监测手段,充分发挥其各优势进行互补,实现了多层次、多角度对地面观测和特征分析的系统性研究,从而有效地实现滑坡风险的监测与管控。具体来说,卫星遥感技术能够提供滑坡多时相历史影像进行地物信息监测,有助于解译地表动态变化。无人机影像具有高分辨率和布置灵活的优势,能够精细测量施工区域的局部特征信息,适用于短期监测。GNSS 监测系统能够以高精度定位和实时监测长时序位移数据,获取地表的变形演化特征,从而准确判定滑坡风险的存在,有效开展滑坡预警预报。因此,在面对山区高速公路沿线的三处弃渣场地形地貌的差异,各监测点依据判据成功判定综合预警等级为 I 级,表明各弃渣场边坡整体保持稳定的状态,验证了该判据在长时间序列的山区公路弃渣场滑坡灾害预警是可行且有效的,能够为监管部门有效地

掌握弃渣场动态变化、管理以及运营情况,从而高效及时实施预警管控措施。

目前得出边坡表现整体稳固,但滑坡体时序变形曲线(见图 7)显示滑坡位移持续累加,预示滑坡可能性还存在其他方面的影响因素。38[#]和 41[#]弃渣场正处于活动断裂带和地质活动频繁区,地质构造复杂,粉质黏土遇水易软化,导致边坡和坡体强度进一步降低。例如 41[#]弃渣场的二级坡台左侧是凹型水沟,受地形影响,强降雨对整个水沟周边的山体进行冲刷,削弱支撑物并使承载力失衡,从而将会增加滑坡风险的可能。因此,本研究未考虑地表下层的分析,而滑坡风险的成因尚包括深层地质动力过程、地下水位起伏以及土壤层温度等关键因子。因此,在未来的研究中,重点关注以上未考虑因素对滑坡稳定的影响,可利用多时相高分辨率卫星(例如 SBAS-InSAR 技术)实现山区高速公路弃渣场区域的变形动态演化过程和特征追踪,利用无人机摄影测量航拍多期地表

进行数字地表模型差分获取该区域的变形效果,并结合地基雷达系统、智能裂缝计对深部位移进行精准探测,同时融合变形相关的物理量(如牛顿力、声发射、微震等)的监测进行多元化研究。并通过引入先进的机器学习和数据融合技术,提升预警算法的智能化水平,确保能够实时整合多源数据,增强预测的准确性与可靠性。

参考文献 (References)

- [1] 叶咸,陈华斌,吴铸,等.山区高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估技术探讨[J].公路,2018,63(3):42-47.
Ye Xian, Chen Huabin, Wu Zhu, et al. Study of the overall risk assessment method for the construction safety of high cut slope of highway in mountainous area [J]. Highway, 2018,63(3):42-47.
- [2] 焦莹,严俊,甘永波,等.灌区弃渣场设计及稳定性分析研究:以潞江灌区工程为例[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S2):397-403.
Jiao Ying, Yan Jun, Gan Yongbo, et al. Design and stability analysis of slag dump in irrigation district: Taking Lujiang irrigation district project as an example [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023,54(S2):397-403.
- [3] 唐彦东,张佳丽,于汐,等.灾害间接经济损失评估研究综述[J].自然灾害学报,2023,32(6):1-11.
Tang Yandong, Zhang Jiali, Yu Xi, et al. Review on disaster indirect economic loss assessment [J]. Journal of Natural Disasters, 2023,32(6):1-11.
- [4] 叶咸,陈文,张新民,等.山区高速公路弃渣场工程安全稳定监测方法[J].中外公路,2021,41(6):20-26.
Ye Xian, Chen Wen, Zhang Xinmin, et al. Preliminary study on safety and stability monitoring method for waste slag site project of mountainous expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(6):20-26.
- [5] Jiang Wenliang, Jiao Qisong, Luo Yi, et al. Risk investigation of landslide hazard and disaster emergency based on multi-platforms remote sensing techniques [C] // IGARSS 2020—2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. September 26-October 2, 2020, Waikoloa, HI, USA. IEEE, 2020:5211-5214.
- [6] 卢鸿飞,高迪驹,张松勇,等.一种基于磁传感器定位技术的滑坡监测方法[J].传感技术学报,2022,35(11):1579-1584.
Lu Hongfei, Gao Diju, Zhang Songyong, et al. A landslide monitoring method based on magnetic sensor positioning technology [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022,35(11):1579-1584.
- [7] 王豪,何朝阳,巨能攀,等.多设备多参数联动的滑坡预警方法[J].成都理工大学学报:自然科学版,1-16.
Wang Hao, He Chaoyang, Ju Nengpan, et al. A multi-device and multi-parameter linked landslide early warning methodology [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology(Natural Science Edition):1-16.
- [8] 许强,朱星,李为乐,等.“天—空—地”协同滑坡监测技术进展[J].测绘学报,2022,51(7):1416-1436.
Xu Qiang, Zhu Xing, Li Weile, et al. Technical progress of space-air-ground collaborative monitoring of landslide [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022,51(7):1416-1436.
- [9] Li Shanshan, Wang Ziteng, Stutz H H. State-of-the-art review on plant-based solutions for soil improvement [J]. Biogeotechnics, 2023,1(3):100035.
- [10] Wang Hua, Guo Qing, Ge Xiaoqing, et al. A spatio-temporal monitoring method based on multi-source remote sensing data applied to the case of the temi landslide [J]. Land, 2022,11(8):1367.
- [11] Guo Xinyi, Guo Qing, Feng Zhongkui. Relationship between landslide creep and vegetation anomalies in remote sensing images [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2020,24(6):776-786.
- [12] 朱淳,龚逸非,宋盛渊,等.滑坡多源监测技术及预警模型研究进展与展望[J].西南交通大学学报:1-19.
Zhu Chun, Gong Yifei, Song Shengyuan, et al. Progress and prospects of landslide multi-source monitoring technology and early warning modelling research [J]. Journal of Southwest Jiaotong University: 1-19.
- [13] 廉旭刚,韩雨,刘晓宇,等.无人机低空遥感矿山地质灾害监测研究进展及发展趋势[J].金属矿山,2023(1):17-29.
Lian Xugang, Han Yu, Liu Xiaoyu, et al. Study progress and development trend of mine geological disaster monitoring by UAV low-altitude remote sensing [J]. Metal Mine, 2023(1):17-29.
- [14] 毛正君,石硕杰,王贵荣,等.基于无人机遥感的区域黄土滑坡识别及发育特征分析[J].灾害学,2023,38(1):63-71.
Mao Zhengjun, Shi Shuojie, Wang Guirong, et al. Identification and development characteristics analysis of loess landslide based on UAV remote sensing [J]. Journal of Catastrophology, 2023,38(1):63-71.
- [15] 梁石,刘万青,王宁.消费型无人机构建工程堆土地形模型的方法及精度评价[J].水土保持通报,2019,39(5):128-134.
Liang Shi, Liu Wanqing, Wang Ning. Method and accuracy evaluation of constructing an engineering pile land model using a consumer unmanned aerial vehicle [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39

- (5):128-134.
- [16] 王志超,赵健赅,温兰冲,等.基于“天—空—地”协同观测的西安市南川东路滑坡变形特征与稳定性分析[J].水土保持通报,2024,44(2):223-235.
Wang Zhichao, Zhao Jianyun, Wen Lanchong, et al. Deformation characteristics and stability analysis of Nanchuan east road landslide in Xining City based on space-air-ground observation technology [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):223-235.
- [17] Adamcová D, Bartoň S, Osinski P, et al. Analytical modelling of MSW landfill surface displacement based on GNSS monitoring [J]. Sensors, 2020,20(21):5998.
- [18] 黄观文,景策,李东旭,等.甘肃积石山 Ms 6.2 级地震对滑坡易发区的变形影响分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):233-235.
Huang Guanwen, Jing Ce, Li Dongxu, et al. Deformation analysis of Jishishan Ms 6.2 Earthquake on the landslide hazard areas [J]. Journal of Wuhan University (Information Science), 2025,50(2):233-235.
- [19] 白正伟,张勤,黄观文,等.“轻终端+行业云”的实时北斗滑坡监测技术[J].测绘学报,2019,48(11):1424-1429.
Bai Zhengwei, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Real-time Beidou landslide monitoring technology of “light terminal plus industry cloud” [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019,48(11):1424-1429.
- [20] 韩军强,黄观武,黄观文,等.多种监测手段在滑坡变形中的组合应用[J].测绘科学,2019,44(11):116-122.
Han Junqiang, Huang Guanwu, Huang Guanwen, et al. Multi-monitoring methods joint application in landslide deformation monitoring [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019,44(11):116-122.
- [21] 陈晓安,谢颂华,张磊,等.生产建设项目水土保持综合评价[J].水土保持通报,2012,32(5):286-290.
Chen Xiaohan, Xie Songhua, Zhang Lei, et al. Comprehensive evaluation of soil and water conservation in development and construction projects [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(5):286-290.
- [22] 刘浩,张家铭,付金丹,等.弃渣场滑坡影响因素敏感性计算分析[J].安全与环境工程,2012,19(6):55-58.
Liu Hao, Zhang Jiaming, Fu Jindan, et al. Sensitivity analysis of influencing factors of discarded soil field landslide [J]. Safety and Environmental Engineering, 2012,19(6):55-58.
- [23] 汪海滨,李小春,米子军,等.排土场空间效应及其稳定性评价方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2103-2111.
Wang Haibin, Li Xiaochun, Mi Zijun, et al. Researches on space effect of waste dumps and its stability evaluation method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(10):2103-2111.
- [24] 杨正荣,喜文飞,史正涛,等.复杂植被山区滑坡蠕变与植被覆盖度关系研究[J].测绘科学,2023,48(1):157-165.
Yang Zhengrong, Xi Wenfei, Shi Zhengtao, et al. Study on the relationship between landslide creep and vegetation cover in mountainous areas with complex vegetation [J]. Science of Surveying and Mapping, 2023,48(1):157-165.
- [25] 沈楠.基于 GNSS 与加速度计融合的建筑物体变监测关键技术研究[J].测绘学报,2023,52(8):1414.
Shen Nan. Research on key technologies of building deformation monitoring based on the fusion of GNSS and accelerometer [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023,52(8):1414.
- [26] 黄观文,陈孜,徐永福.膨胀土边坡 GNSS 实时监测技术[J].测绘学报,2023,52(11):1873-1882.
Huang Guanwen, Chen Zi, Xu Yongfu. GNSS real-time monitoring technology of expansive soil slope [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(11):1873-1882.
- [27] 杨芳,杨晓龙,仇新迪,等.基于双判据联合判别的滑坡监测预警研究[J].人民长江,2021,52(5):95-100.
Yang Fang, Yang Xiaolong, Qiu Xindi, et al. Study on landslide monitoring and early warning based on joint discrimination of dual criteria [J]. Yangtze River, 2021,52(5):95-100.
- [28] 李晓斌.基于极限位移准则和变形预测的滑坡变形潜势分析[J].大地测量与地球动力学,2022,42(6):588-593.
Li Xiaobin. Analysis of landslide deformation potential based on limit displacement criterion and deformation prediction [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022,42(6):588-593.
- [29] 苑谊,马霄汉,李庆岳,等.由树坪滑坡自动监测曲线分析滑坡诱因与预警判据[J].水文地质工程地质,2015,42(5):115-122.
Yuan Yi, Ma Xiaohan, Li Qingyue, et al. A study of landslide inducing factors and early warning criterion by analyzing the automatic monitoring curves of the Shuping landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015,42(5):115-122.
- [30] 陈全明,黄炜敏,李姣.基于改进切线角和变形速率的滑坡预警:以湖南省石门县雷家山滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(5):133-140.
Chen Quanming, Huang Weimin, Li Jiao. Landslide early warning based on improved tangent angle and deformation rate: A case study of Leijianshan landslide in Shimen County, Hunan Province [J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention,2024,35(5): 133-140.

- Wang Qingkui, Wang Silong, Feng Zongwei, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):513-519.
- [22] 周大渊, 罗扬, 葛华, 等. 山区管道工程坡面径流防控设计及截排水体系 [J]. *中国水土保持科学 (中英文)*, 2023, 21(6):71-79.
- Zhou Dapeng, Luo Yang, Ge Hua, et al. Fortification design of slope runoff as well as interception and drainage system for pipeline engineering in mountain area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(6):71-79.
- [23] 伍冰晨, 陈晓安, 汤崇军, 等. 红壤坡地果园产流产沙及氮磷流失对坡面水土保持措施响应 [J]. *水利学报*, 2024, 55(7):802-814.
- Wu Bingchen, Chen Xiaolan, Tang Chongjun, et al. Response of runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss to soil and water conservation measures in orchards of red soil slope [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(7):802-814.
- [24] 李虹辰, 赵西宁, 高晓东, 等. 鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8):2297-2303.
- Li Hongchen, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. Effects of scale-like pit and mulching measures on soil moisture of dryland jujube orchard in North Shaanxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8):2297-2303.
- [25] Dou Yanxing, Yang Yang, An Shaoshan, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020, 185:104294.
- [26] 杨娟, 王昌全, 李冰, 等. 攀西红壤农耕区小型地下蓄水池的建造条件与效益分析 [J]. *水资源保护*, 2007, 23(2):91-94.
- Yang Juan, Wang Changquan, Li Bing, et al. Building condition and benefit analysis of mini-type underground conservation pool in red soil farming area of Panxi [J]. *Water Resources Protection*, 2007, 23(2):91-94.
- [27] 李萌, 李彦, 杨那, 等. 旱地长期覆盖下土壤团聚体有机碳及无机碳的变化规律 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(3):357-365.
- Li Meng, Li Yan, Yang Na, et al. Effects of different mulching measures on distribution of organic carbon and inorganic carbon in soil aggregates under spring maize cultivation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3):357-365.
- [28] 李一, 解璐萌, 莫雪, 等. 江西省湿地生态系统生产总值 (GEP) 核算及时空动态分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(6):738-748.
- Li Yi, Xie Lumeng, Mo Xue, et al. Accounting and spatio-temporal dynamic analysis of the gross ecosystem product (GEP) of wetlands in Jiangxi Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(6):738-748.
- [29] Alliaume F, Rossing W A H, Titttonell P, et al. Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 82:268-281.
- ~~~~~
- (上接第 150 页)
- [31] 刘建伟, 史东梅, 马晓刚, 等. 弃渣场边坡稳定性特征分析 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5):192-195.
- Liu Jianwei, Shi Dongmei, Ma Xiaogang, et al. Stability characteristics analysis on sideslopes of excavation waste dump [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5):192-195.
- [32] Zhuge Xia, Motagh M, Li Tao, et al. The June 2020 Aniangzhai landslide in Sichuan Province, Southwest China: Slope instability analysis from radar and optical satellite remote sensing data [J]. *Landslides*, 2022, 19(2):313-329.
- [33] Guo Qing, Tong Lianzi, Wang Hua. A monitoring method based on vegetation abnormal information applied to the case of Jizong shed-tunnel landslide [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(22):5640.
- [34] 张永强, 毛彦龙, 白子龙. 降雨对低速滑坡形成机制的研究 [J]. *甘肃科学学报*, 2019, 31(3):85-91.
- Zhang Yongqiang, Mao Yanlong, Bai Zilong. Research on formation mechanism of low-speed landslide caused by rainfall [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2019, 31(3):85-91.
- [35] 廖军, 邓涛, 周越良, 等. 降雨作用下第四系堆积体路堤稳定性 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(23):10090-10097.
- Liao Jun, Deng Tao, Zhou Yueliang, et al. Stability of quaternary accumulation embankment under rainfall [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(23):10090-10097.