

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.001

三峡库区数字孪生滑坡监测预警系统开发 ——以大坪滑坡为例

吴润泽^{1,2}, 朱敏毅^{1,2*}, 高锡林³, 王红群², 涂秋月², 于亚冉³, 周晓星³, 陈雄鹰³

WU Run-Ze^{1,2}, ZHU Min-Yi^{1,2*}, GAO Xi-Lin³, WANG Hong-Qun², TU Qiu-Yue²,
YU Ya-Ran³, ZHOU Xiao-Xing³, CHEN Xiong-Ying³

1. 高坝大库运行安全湖北省重点实验室(中国长江三峡集团有限公司), 湖北 宜昌 443133; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 3. 武汉地大信息工程股份有限公司, 湖北 武汉 430074
1. Hubei Key Laboratory of Operation Safety of High Dam and Large Reservoir (China Three Gorges Corporation), Yichang 443133, Hubei, China; 2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Wuhan Infoearth Information Co., Ltd, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要: 数字孪生技术作为一种前沿的数字化技术, 通过构建与物理实体相对应的数字模型, 实现对物理实体的实时监测、分析和预测, 已广泛应用于安全、应急、水利、防灾减灾等多个领域。三峡库区地质灾害频发, 为数字孪生技术在地质灾害的监测和预警方面的运用提供了理想的试验对象。本文选择湖北省巴东县东瀼口镇绿竹筏村的大坪滑坡作为示范点, 通过完善物联感知网络, 搭建地上地下一体化三维地质模型, 构建了数字孪生滑坡监测预警系统。应用物联网技术、三维建模技术和物理仿真引擎技术, 实现了对滑坡区域的全方位监测、建模和仿真模拟, 为滑坡灾害的预测和防治提供科学依据。本研究成果表明, 数字孪生技术可为三峡地区滑坡灾害监测与预警提供精准化、可视化的技术支撑, 将极大地提高该区域滑坡灾害监测和预警水平。

关键词: 数字孪生; 滑坡监测预警; 物联网; 三维建模; 物理引擎; 大坪滑坡; 三峡库区

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0249-14

Wu R Z, Zhu M Y, Gao X L, Wang H Q, Tu Q Y, Yu Y R, Zhou X X and Chen X Y. 2025. Development of Digital Twin Landslide Monitoring and Early Warning System in the Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of the Daping Landslide. *South China Geology*, 41(2): 249–262.

Abstract: As a cutting-edge digital technology, digital twin technology builds digital models corresponding to physical entities, enabling real-time monitoring, analysis, and prediction of these entities. It has been widely applied in various fields, including safety, emergency response, water conservancy, and disaster prevention and mitigation. The frequent occurrence of geological disasters in the Three Gorges Reservoir area provides an ideal experimental object for the application of digital twin technology in monitoring and early warning of geological disasters. Taking the Daping landslide in Lüzhuofa village, Dongrangkou town, Badong county, Hubei province as the demonstration site, this paper establishes a digital twin landslide monitoring and early

收稿日期: 2024-12-19; 修回日期: 2025-02-20

基金项目: 水利部三峡后续工作专项资金(No.0001212012AC50001)

第一作者: 吴润泽(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治信息化研究工作, E-mail: jcywurunze@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 朱敏毅(1982—), 男, 工程师, 主要从事地质灾害防治信息化建设, E-mail: zminyi@mail.cgs.gov.cn

warning system by improving the Internet of Things (IoT) sensing network and constructing the integrated 3D geological model that merges both above-ground and underground features. The use of IoT technology, 3D modeling technology, and physical simulation engines enables comprehensive monitoring, modeling, and simulation of the landslide area, providing scientific support for the prediction and prevention of landslide disasters. The outcome of this paper shows that digital twin technology can provide precise and visual technical support for landslide disaster monitoring and early warning in the Three Gorges region, greatly improving the level of landslide disaster monitoring and early warning in the area.

Key words: digital twin; landslide monitoring and early warning; Internet of Things; 3D modeling; physical engine; Daping landslide; the Three Gorges Reservoir area

自 2003 年蓄水以来,三峡水库区域已发现 4000 余处滑坡或潜在滑坡,是滑坡灾害高发地区之一,严重威胁到库区居民的生命财产安全和三峡工程的运行。尽管当前地质灾害监测技术取得了显著发展(王世梅等, 2021),涵盖了多种监测手段和技术,但仍存在响应不够迅速、预警精度不足的问题。针对这些问题,数字孪生技术为地质灾害的监测和预警提供了一种全新的解决方案(赵婧文, 2022)。

数字孪生通过时空大数据底座构建物理对象的数字化映射,结合物联网、模型构建和仿真分析等技术,实现物理实体的全生命周期管理,形成智能决策的优化闭环,从而有效提高地质灾害监测和预警的精度与效率(张绿原等, 2021; 李瑞昌和唐云, 2022; 倪廉钦等, 2024)。经过近二十年的地质灾害防治信息化建设,三峡库区已具备数字孪生的“时空大数据底座”,包括地质灾害防治数据库、物联网感知系统、地质模型和库区滑坡预警模型等,为数字孪生滑坡监测预警系统的建设奠定了坚实基础(叶润青等, 2023)。本文提出基于数字孪生技术的滑坡监测预警系统建设思路,选择大坪滑坡作为示范点,针对该滑坡的地质特征和变形规律,通过物联网感知系统优化完善、地上地下三维一体化建模和仿真模拟,构建数字孪生滑坡监测预警系统,期望为其他类似高风险区域提供一种有效的地质灾害监测和防治手段。

1 数字孪生系统设计思路

三峡库区数字孪生地质灾害监测预警系统建

设的核心目标是通过多源数据融合和数字孪生技术,实现对地质灾害体的全生命周期管理。系统通过对地理信息系统(GIS)数据、物联网(IoT)数据、地质灾害体模型数据等多维异构时空数据进行整合,利用时空大数据技术进行数据汇聚、融合、挖掘,构建支撑地上地下一体化的数字空间,并结合物联网感知设备,形成实时高效的时空数据库,为地质灾害监测提供三维数字基础。

系统设计总体上分为以下四个层次:物联感知层、数据底座层、平台层和应用层,每一层次各司其职,协同工作,实现数字孪生的高效监测与智能预警。三峡库区数字孪生滑坡监测预警系统架构图如图 1 所示。

(1)物联感知层:感知层由物联网感知网络组成,包含 GNSS 地表位移传感器、雨量计、裂缝计、水位计、应力计、含水率计、视频监控等多种设备,用于实时采集滑坡区域的多维物理参数。通过监测数据接入标准,包括数据上传标准、设备通信协议等,基于 4G/3G/2G/NB-IoT/LORA 和北斗卫星等无线通信技术,将智能监测数据实时回传至物联网云平台中,云平台通过接收/解算服务实现数据的处理及可视化。

(2)数据底座层:数据底座层作为整个系统的数据基础,汇聚了来自感知层的物联网监测数据、多源基础数据、地质灾害预警模型、气象水文数据和灾害体三维模型数据等。该层对数据进行清洗、整合和质量管理,形成孪生对象的时空数据底座,为上层各类应用提供全面可靠的数据支持。

(3)平台层:平台层包括物联网平台、公共服务平台、监测预警模型和地上地下一体化建模平台。



图 1 三峡库区数字孪生滑坡监测预警系统架构图

Fig. 1 Digital twin landslide monitoring and early warning system architecture in the Three Gorges Reservoir area

1) 物联网平台: 负责设备注册、认证、管理、数据上传和远程控制, 实现物联网设备的统一接入和管理。

2) 公共服务平台: 提供地图服务、数字孪生引擎服务、消息队列、任务调度等基础服务, 支撑系统的正常运转。

3) 监测预警: 存放单体地质灾害预警判据和预警模型管理, 提供预警计算分析服务。

4) 地上地下一体化建模: 存放单体地质灾害和区域地质灾害孪生体模型, 提供孪生体的计算分析服务, 如模型的空间分析、渲染计算、三维计算引擎等, 可视化表达手段包括各类环境特效和场景增强。

(4) 应用层: 孪生系统的具体应用, 包括结合传感数据实时呈现孪生对象的三维实景、孪生体的三维空间分析、各类预测预报结果的实景模拟、灾害发生情况和影响范围的仿真等模拟。系统以闭环的形式工作, 以数据驱动模型, 再以模型

支持决策, 决策结果也影响物理世界并为物联网网络所感知, 形成地灾监测预警工作闭环。具体应用包括物联网管理、数据管理、模型管理与模型分析、实景展示与灾害仿真。

1) 物联网管理: 管理物联网设备、传感器及其数据采集, 支持设备的运行监控和状态反馈。

2) 数据管理: 负责监测数据的存储、查询、分析和展示, 确保数据的完整性和易用性。

3) 模型管理与模型分析: 支持滑坡预警模型的建立、更新与分析, 结合传感数据进行滑坡体的动态仿真。

4) 实景展示与灾害仿真: 结合数字孪生模型, 实现滑坡灾害的三维实景展示和灾害模拟, 包括历史演变和未来趋势的模拟。

2 数字孪生关键技术

2.1 全要素物联感知网络构建

通过物联网技术实现地质灾害监测要素的物

物相连、无线互联互通功能(李波等,2019)。滑坡监测的基本原则或最低要求是形成一个沿滑动方向具有典型性和代表性的监测剖面,一个监测剖面上关键预警指标的监测点一般3~5个。本文通过完善孪生对象监测感知设备(如GNSS、雨量计、裂缝仪、深部位移监测仪等)的部署及数据的接入分析,构建孪生体地质灾害全要素物联感知网络,实时显示各个监测点位的数据变化,实现对风险区域全空间、全时段的有效监控,实现对地灾演化的全面动态感知。

2.2 地上地下一体化三维建模设计

通过采集地质灾害体数字孪生对象的高精度数字表面高程模型、正射影像图及钻孔数据,结合地质灾害风险防范区及周边地形地貌、地质灾害体等建立地上地下叠加三维空间模型。这种模型不仅展示地质灾害的地表形态,还能通过可视化手段反映地质灾害详细的地质结构信息,为重大地质灾害险情处置工作提供便捷、快速、精确的三维场景数据支撑。

(1) 基于无人机倾斜摄影的地表建模

倾斜航空摄影是在同一飞行平台上搭载多台具有固定相对关系的传感器,从垂直和倾斜角度同时采集影像,从而更为完整准确地获取地面物体信息(庞鑫等,2023)。首先,制定无人机飞行路线和拍摄计划,确保覆盖整个滑坡区域,并根据地形特点和面积确定最佳飞行高度、航线重叠度和拍摄角度,确保数据的完整性和高精度。然后,无人机按预定路线飞行进行倾斜摄影,采集多角度、多重叠的影像数据,提高模型的细节和精度。接着,通过专业的影像匹配与三维建模软件将所有的影像纳入到统一的坐标系统中,生成高精度的数字表面高程模型和正射影像图,处理过程包括影像对齐、稠密点云生成、三角网构建和纹理映射等步骤。最终,经过在线分发,用户可在线从多个角度对数据进行浏览和量测。通过倾斜摄影技术生成高精度三维模型,真实反映滑坡区域的地表形态,包括地形起伏和地表细节特征,如植被和建筑物(马娟,2019)。

(2) 基于钻孔数据的三维地质建模

钻孔资料对于建立三维地质模型至关重要,

利用三维地质建模软件,根据地质勘查钻孔数据,构建地质灾害区域的三维地质模型(明镜,2012)。首先,通过钻孔勘查资料获取滑坡区域的地下地质剖面数据,包括地层结构、岩性分布和滑带位置等。由于钻孔数据的精度和完整性直接影响模型的准确性,接着整理和分析钻孔数据,校准和整合数据以确保一致性和准确性,确定关键地质层面和滑动面的形态和位置。钻孔数据处理包括:①数据格式转换:将原始钻孔数据转换为统一的格式,便于后续数据处理和三维地质模型构建;②数据清洗:删除无效数据和异常值,同时通过人工检查对关键数据点进行复核,确保数据的准确性和完整性;③数据归一化:将钻孔数据归一化到同一尺度,便于数据的比较和分析。最后,将钻孔数据导入三维地质建模软件,设置地层厚度、岩性特征和滑带位置等参数,建立地质层面和滑动面的三维模型,并结合大坪滑坡横剖面图和纵剖面图进行对比分析。在此基础上,对钻孔数据进行优化调整,以确保模型的真实性和精确性。

2.3 滑坡预警模型设计

通过对不同工况条件下的应力、位移、塑性区、孔压的计算结果分析,得出其相应工况条件下的预报模型和综合预报判据。以工况一和工况二条件下的应力、位移计算结果为例。

工况一:从159 m库水位以0.6 m/d、0.8 m/d、1.0 m/d、1.2 m/d、2.0 m/d、3.0 m/d的速率下降至145 m。工况一条件下应力场分布图和位移分布图如图2所示。

(1) 应力计算结果及分析

水位由159 m下降至145 m时,滑坡前缘拉、压应力的分布均有较大改变。滑体中下部拉、压主应力场的分布发生较明显变化,滑体中最大主应力范围为-0.332~0.149 Mpa,最大值出现在滑体中后部,最小主应力范围为-1.269~-0.001 Mpa,最小值出现在滑体中后部;滑带中最大主应力范围为-0.636~7.348 Mpa,最大值出现在滑带后缘,最小主应力范围为-2.598~0.833 Mpa,最小值出现在滑带后部。水位由159 m降至145 m使渗流场发生改变,通过渗流场与应力场的耦合作用,导致应力场的改变。

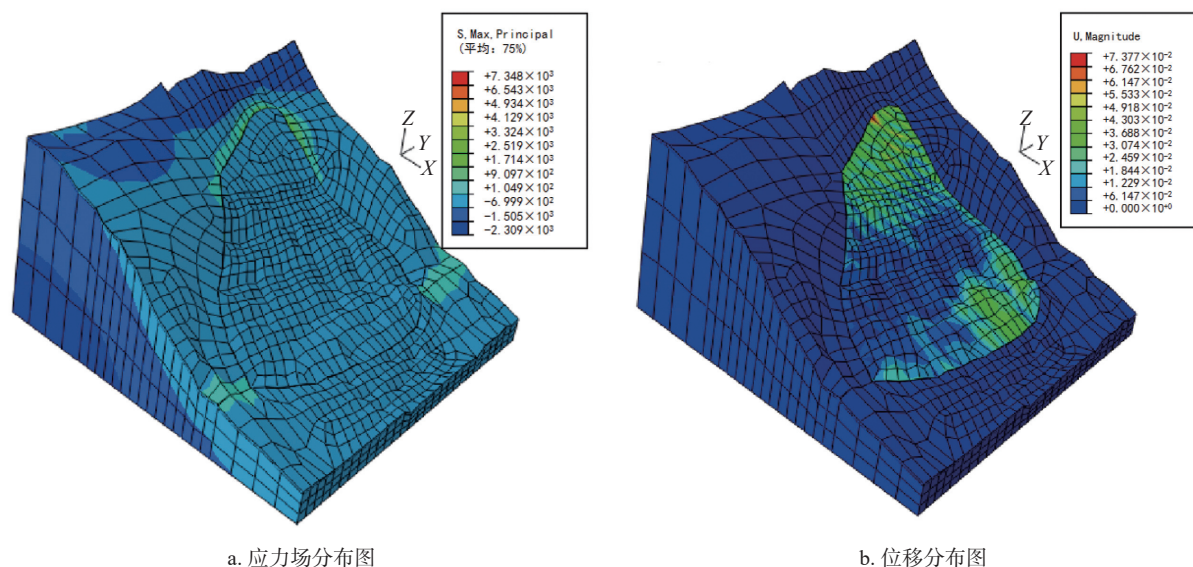


图 2 工况一条件下应力场分布图和位移分布图

Fig. 2 Stress field distribution and displacement distribution under working condition 1

S.Max 全称“Maximum Stress”, 表示该点处计算得到的最大应力值; Principal 指主应力方向, 表示该应力是物体内部某点三个相互垂直的主应力方向中的最大值; U.Magnitude 是位移的矢量合成值, 表示物体在受力或形变过程中各点的总位移量

(2) 位移计算结果及分析

在滑体中后部发生较大水平位移, 最大水平位移为 71.47 mm; 滑体后部水平位移主要在 5.96 ~ 71.47 mm 范围内; 滑体中部水平位移在 2.23 ~ 26.70 mm 范围内; 滑体前缘水平位移在 1.82 ~ 21.81 mm 范围内。

工况二: 在 145 m 稳定库水位条件下叠加 3 日暴雨、5 日暴雨。工况二条件下应力场分布图

和位移分布图如图 3 所示。

(1) 应力计算结果及分析

在 145 m 稳定库水位条件下叠加 3 日暴雨、5 日暴雨时, 滑体拉、压应力分布变化较大, 滑坡整体应力都发生变化, 应力变化受降雨影响比较明显。滑体前缘应力主要受库水变动的影响较大, 滑体中后部在降雨作用下拉、压应力发生明显变化。降雨结束时, 滑体中最大主应力范围为

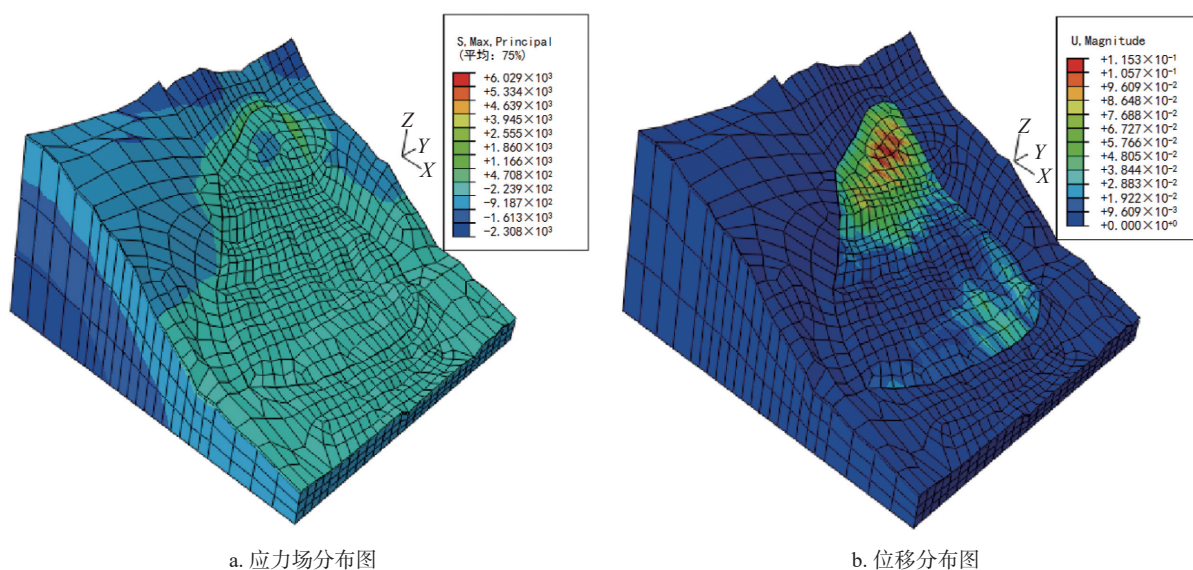


图 3 工况二条件下应力场分布图和位移分布图

Fig. 3 Stress field distribution and displacement distribution under working condition 2

S.Max、Principal、U.Magnitude 的说明见图 2。

-0.004 ~ 9.956 Mpa, 最大值出现在滑体侧缘, 最小主应力范围为-0.377 ~ 2.851 Mpa, 最小值出现在滑体侧缘; 滑带中最大主应力范围为-0.004 ~ 9.970 Mpa, 最大值出现在滑带侧缘, 最小主应力范围为-10.890 ~ 4.724 Mpa, 最小值出现在滑带侧缘。渗流场与应力场具有相互耦合作用, 库水下降和降雨的共同作用引起渗流场的改变。

(2) 位移计算结果及分析

滑坡在降雨作用下位移变形较大。滑体中后部水平位移很大, 最大水平位移为 97.14 mm; 降雨结束时, 滑体后部水平位移主要在 8.10 ~ 97.14 mm 之间; 滑体中部位移在 7.65 ~ 97.14 mm 之间; 滑体前缘水平位移在 1.68 ~ 20.16 mm 之间。

综合考虑地形、地质、植被、气象水文、人类工程活动等方面的因子(吴润泽, 2023), 建立孪生对象的预警模型, 该模型根据传感数据的变化实时计算出预警指数并触发报警, 根据气象预报和库水变动计划提前预警。本文中孪生对象预警模型的建立参考《三峡库区滑坡灾害预警预报手册》(许强和黄学斌, 2014)。

2.4 滑坡仿真模拟

PhysX 物理引擎广泛应用于游戏、电影和科学计算领域, 可模拟包括刚体动力学、软体动力学、流体力学和布料等各种物理现象。其核心原理是通过数值方法求解物理方程, 模拟物体在力的作用下的运动和变形。在滑坡模拟中, 利用 PhysX 物理引擎中的粒子系统, 通过粒子代表滑坡中的碎石土、碎裂岩和滑面(带)土等成分, 模拟这些粒子在灾害环境中的运动, 从而反映滑坡体在真实环境中的分布和运动情况(杜志强和李静, 2017)。

3 数字孪生系统功能建设及系统运行效果

三峡库区数字孪生地质灾害监测预警系统研究选择湖北省巴东县东瀼口镇绿竹筏村 8-9 组大坪滑坡作为孪生示范点, 应用基于数字孪生滑坡监测预警系统进行示范应用, 以展示系统的应用效果。

3.1 示范点地质灾害点概况

大坪滑坡为岩质滑坡, 滑体物质主要为滑坡堆积碎块石夹土, 为多期次滑动堆积物, 平均厚度 70 m, 土石比 3 : 7, 碎块石成分主要为灰岩、泥灰岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和石英砂岩, 多呈棱角状。所处斜坡结构类型为逆向坡。滑坡后缘高程 365 m, 前缘部分滑体已淹没于长江水下。滑坡纵长 380 m, 横宽 1200 m, 平均厚度 70 m, 总面积 $45.6 \times 104 \text{ m}^2$, 总体积 $3192 \times 104 \text{ m}^3$ 。滑坡平面形态呈横长形, 西侧总体坡向为 175° , 东侧总体坡向为 170° 。剖面形态总体呈凸形, 其中后缘地带的地形相对较陡。滑体内发育数条自北向南径流的季节性冲沟, 左右边界均主要以冲沟为界。

现今大坪滑坡整体处于基本稳定状态, 滑坡前缘西侧(宋家屋场滑坡)仍处于蠕滑状态。但若遇强降雨、三峡水库水位大幅变化, 该滑坡局部可能产生蠕滑变形, 严重威胁滑坡区域内居民的生命财产安全和长江航运安全。

3.2 系统综合展示效果

系统整体运行效果通过三维可视化界面进行展示, 结合滑坡区域的三维地质模型、无人机倾斜摄影模型, 以及孪生点的实时物联感知数据, 用户可以直观地查看滑坡的动态演变情况。整个系统具备高度集成化的展示功能, 实现了从灾害监测到预警分析到灾害仿真的全流程可视化。三峡库区数字孪生地质灾害监测预警系统综合展示如图 4 所示。

3.3 物联感知网络体系建设

巨大规模或非常重要的滑坡, 可根据实际情况形成“三横三纵”的监测剖面(许强, 2020)。根据研究目标及地质灾害特征, 为了能够全方位监测大坪滑坡的地质灾害, 滑坡监测主要包括采用地表变形监测、深部变形监测、影响因素监测等内容。地表变形监测包括地表绝对位移、相对位移监测等, 从地表变形监测、深部变形监测和影响因素等多个维度进行综合监测。大坪滑坡由 5 条纵向监测剖面 and 3 条横向监测剖面构成了“三横五纵”立体监测物联感知网络。设备安装位置如图 5 所示。

(1) 深部位移变形监测: 深部位移变形监测采

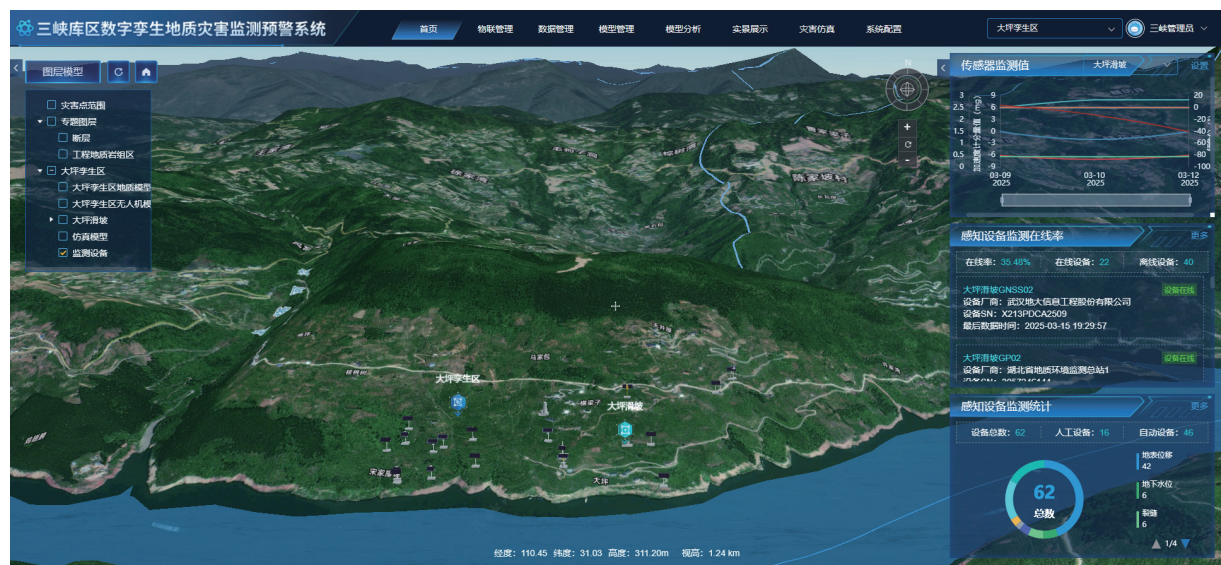


图 4 三峡库区数字孪生地质灾害监测预警系统综合展示

Fig. 4 Comprehensive display of the digital twin geological disaster monitoring and early warning system in the Three Gorges Reservoir Area

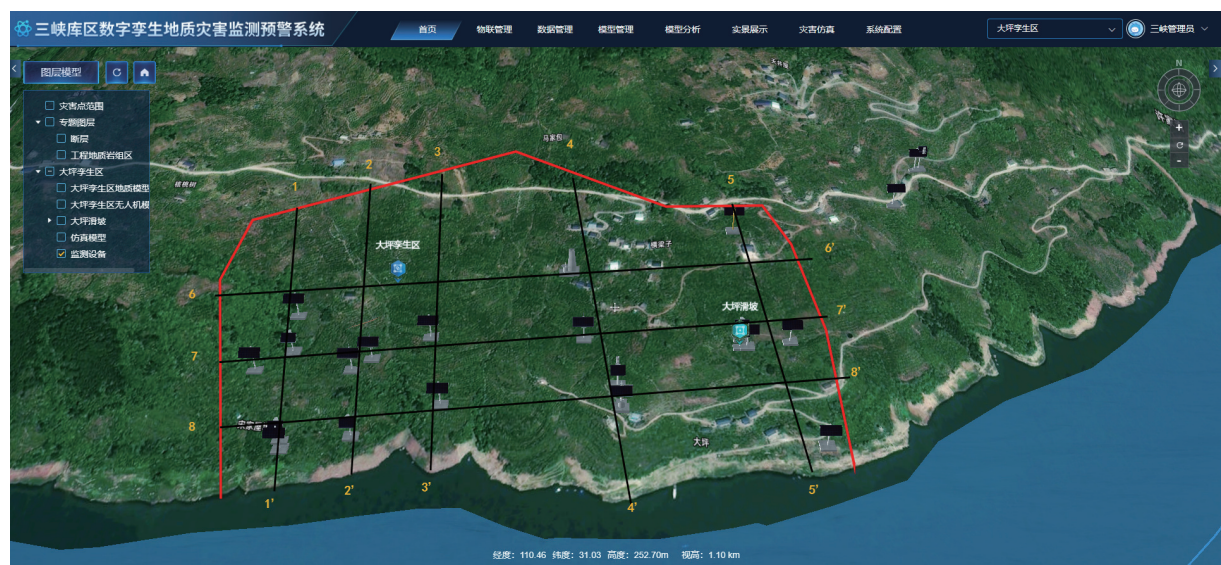


图 5 大坪滑坡物联感知监测设备平面布置图

Fig. 5 Layout of IoT sensing and monitoring equipment for Daping landslide

用钻孔倾斜仪自动化监测,在 2 条主剖面线上共布设有 6 个测斜孔。2017 年 5 月开始自动监测。滑坡布设 6 个自动深部位移监测点,位于滑坡体中部。

(2)表面位移变形监测: 滑坡布设 9 个 GNSS 自动化监测点,位于滑坡体中部。此外,还布设了 6 个地表裂缝自动化监测点,位于滑坡中部和滑坡前缘。

(3)雨量影响因素监测: 滑坡布设了 1 个雨量自动化监测点,用于监测降雨量对滑坡的影响。

(4)库水位影响因素监测: 滑坡区的地下水位监测孔基本与测斜孔平行布置,共布设 2 个地下水位自动化监测点,其中一个水位孔位于滑坡中部后缘,地下水位监测孔孔底高程高于三峡库区正常蓄水位,与三峡水库库水位变化无关,主要受大气降雨影响;另一套水位孔位于滑坡中部前缘,孔底高程低于三峡水库水位,其地下水位主要受大气降雨和三峡水库水位共同控制,关系密切。

通过上述多种监测手段的综合应用,构建了全方位、多层次的物联感知网络体系,并与数字孪生

系统相结合,实现了实时监测数据的获取和感知。

3.4 地上地下一体化数字孪生场景

大坪滑坡地上地下一体化三维模型建设情况如下:

(1)基于无人机倾斜摄影的地表建模

基于无人机倾斜摄影的地表建模采用大疆 M300 无人机,搭载赛尔五镜头倾斜摄影相机 102SV3,按照并行航线模式进行飞行,共设置 16 条航带,覆盖面积达 1.43 km²,确保影像的覆盖范围和重叠度,航向重叠率为 85%,旁向重叠率为 70%。采用仿地飞行模式,飞行高度为 150 m,共拍摄约 6000 张照片。数据处理使用 iFlyCloud 地质灾害无人机调查数据管理云平台,生成了数字表面模型(DSM)、正射影像图(DOM)和三维倾斜摄影模型。这些高精度的成果直观地展示了滑坡区域的地形和地貌,为地质灾害数字孪生提供了详尽的地表视觉数据支持。

(2)基于 GeoModeller 的三维地质建模

据勘察资料,将滑坡地质模型粗略地概化为滑体、滑面(带)和滑床三部分。其中滑体为碎裂土、碎裂岩,滑面(带)分为三层,上两层为次级滑面(带),最下为主滑面(带),均为粉质粘土,滑床为基岩。利用大坪滑坡的 18 个钻孔数据和详细的分层信息(如砂卵砾石、含块碎石粉质粘土、块碎石土等),构建了大坪滑坡区域的三维地质模型。钻孔数据来源于历史地质勘查成果,通过 GeoModeller(吴晓贵等, 2020)软件处理,生成了包含约 100,000 个 Mesh 网格的高精度地质模型,并以 gltf 格式输出,通过三维引擎加载数据,为地质灾害数字孪生提供了直观的地下结构展示和详细分析。大坪滑坡三维地质模型生成过程如图 6 所示。大坪滑坡的无人机模型和地质模型叠加,成为地上地下一体化模型。其中,中间深色区域内容为无人机模型,下面整体为地质模型。

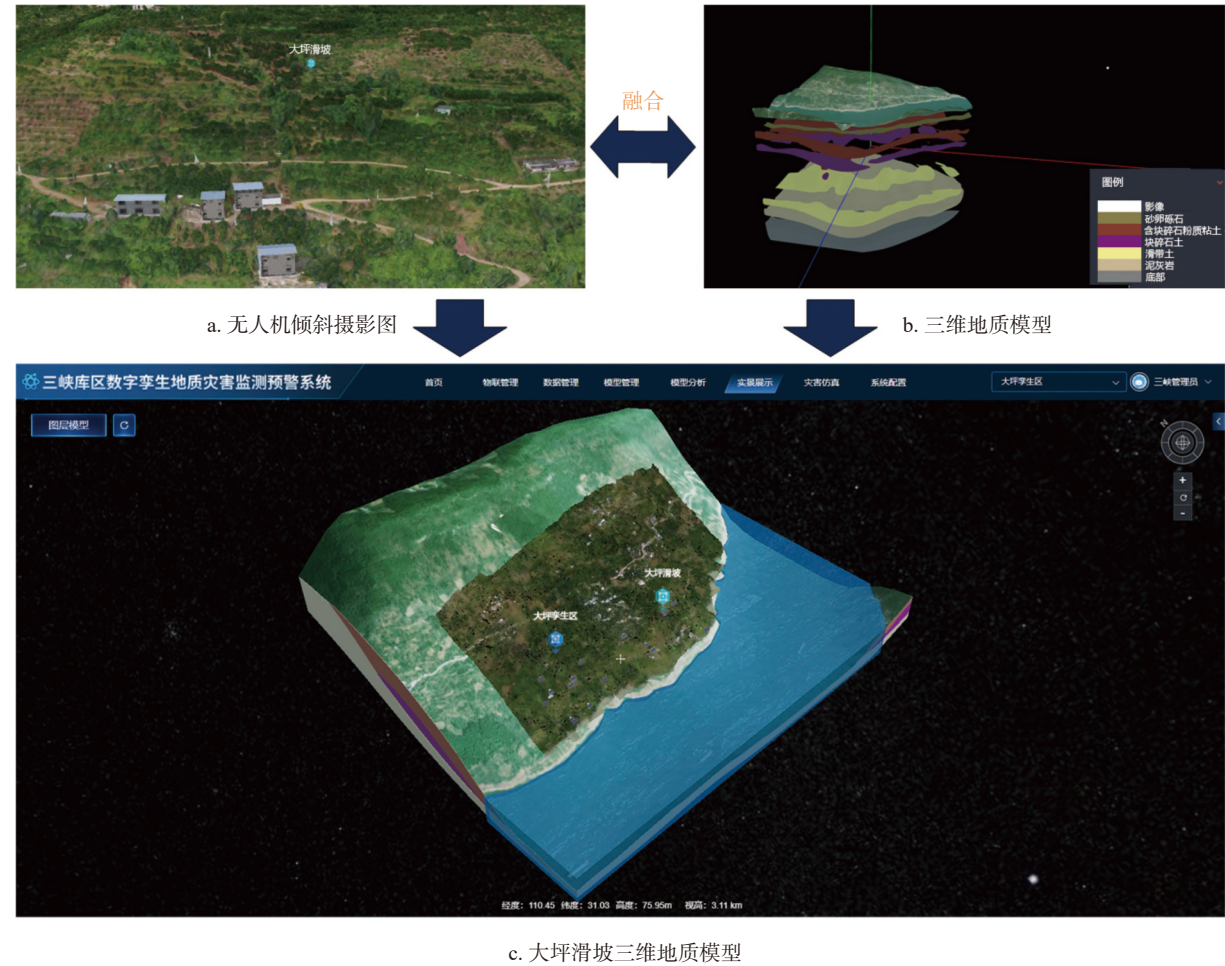


图 6 大坪滑坡三维地质模型生成过程

Fig. 6 Generation process of 3D geological model of Daping landslide

3.5 模型分析

大坪滑坡物联感知系统包含表面变形监测、深部变形监测、地下水位监测和雨量监测等内容,通过这些监测手段,可以全面了解滑坡体的动态变化情况,并为滑坡预警提供科学依据。大坪滑坡通过预警判据与综合预警模型来构建模型分析。

(1) 预警判据

在对大坪滑坡时空演化规律分析的基础上,

选取了八个关键参数作为预警判据: 位移速率 $v(N11)$ 、切线角 $\alpha(N12)$ 、位移矢量 $(N13)$ 、后缘裂缝 $(N21)$ 、侧缘裂缝 $(N22)$ 、前缘剪出口 $(N23)$ 、降雨 $(N31)$ 和库水位升降速率 $(N32)$ 。其中,降雨是诱发滑坡的主要因素之一,基于滑坡不同发生概率的临界降雨量(杨诗诗等, 2023),确定关键判据的预警等级及评分标准。判据的预警等级及评分标准如表 1 所示:

表 1 大坪滑坡预警判据
Table 1 Early warning criteria for Daping landslide

判据		蓝色预警	黄色预警	橙色预警	红色预警	评分
变形监测	位移速率	$6 < v \leq 10 \text{ mm/d}$	$10 < v \leq 15 \text{ mm/d}$	$15 < v \leq 22.8 \text{ mm/d}$	$v > 22.8 \text{ mm/d}$	S_{N11}
	切线角	$30^\circ < \alpha \leq 45^\circ$	$45^\circ < \alpha \leq 80^\circ$	$80^\circ < \alpha \leq 85^\circ$	$\alpha > 85^\circ$	S_{N12}
	位移矢量	位移矢量角等值增大	位移矢量角由等值增大开始非等值增大	位移矢量角非等值增大幅度和速度渐增	位移矢量角突然增大或减小	S_{N13}
裂缝分期 配套	后缘裂缝	断续延伸、初具雏形	基本连通、开始加大加深	已经连通、出现下错台坎	迅速拉张甚或闭合	S_{N21}
	侧缘裂缝	侧翼剪张裂缝开始产生并逐渐从后缘向前缘扩展、延伸。裂缝主要分布于坡体中后部。	侧翼张扭性裂缝逐渐向坡体中前部扩展延伸。	前缘隆起鼓胀明显,出现纵向放射状张裂缝和横向鼓张裂缝。临空面见剪切错动面。	前缘快速隆起、小崩小塌不断。临空面开始剪出。	S_{N22}
	前缘剪出口	肉眼察觉不到明显变形	前缘开始出现隆起,产生鼓胀裂缝	$0.95 \leq K < 1.0$	$K < 0.95$	S_{N23}
关键影响 因子	降雨	$110 \text{ mm} < 3 \text{ 日降雨量} \leq 200 \text{ mm}$ 或 $40 \text{ mm} < \text{一日降雨过程累积降雨量} \leq 70 \text{ mm}$	$200 \text{ mm} < 3 \text{ 日降雨量} \leq 300 \text{ mm}$ 或 $70 \text{ mm} < \text{一日降雨过程累积降雨量} \leq 110 \text{ mm}$	$300 \text{ mm} < 3 \text{ 日降雨量} \leq 420 \text{ mm}$ 或 $110 < \text{一日降雨过程累积降雨量} \leq 160 \text{ mm}$	$3 \text{ 日降雨量} > 420 \text{ mm/d}$ 或 $\text{一日降雨过程累积降雨量} > 160 \text{ mm}$	S_{N31}
	库水位升降速率	$0.5 \text{ m/d} < \text{库水升降速率} \leq 1.2 \text{ m/d}$	$1.2 \text{ m/d} < \text{库水升降速率} \leq 2 \text{ m/d}$	$2 \text{ m/d} < \text{库水升降速率} \leq 4 \text{ m/d}$	$\text{库水升降速率} > 4 \text{ m/d}$	S_{N32}

(2) 综合预警模型

预警判据为单一指标,应相互配合使用。基于预警判据针对上述 8 个指标进行了量化,建立综合分级的临滑预警模型。

采用相互关系矩阵确定各指标权重: $K(N11, N12, N13, N21, N22, N23, N31, N32) = (0.14, 0.14, 0.14, 0.12, 0.13, 0.14, 0.10, 0.09)$ 。

为了方便预警评判,总分归 100 分。根据权重采用半定量专家取值法,对不同级别下的评价指标给出贡献值,并给出分值区间,根据调查进行单一指标贡献评分,然后总评分。

综合分级预警计算方法: $S = S_{N11} + S_{N12} + S_{N13} + S_{N21} + S_{N22} + S_{N23} + S_{N31} + S_{N32}$

综合分级预警计算结果,依据综合分级预警阈值(见表 2)进行快速判别。

(3) 系统实现效果

大坪滑坡预警判据如图 7 所示,综合预警模型如图 8 所示。

为了验证系统在不同降雨强度和库水位变化条件下的实际应用有效性,通过查阅大坪滑坡的历史资料,发现 2007 年 5 月至 7 月变形较为严重,自同年 9 月开始,该滑坡西侧被确定为蓝色预警(注意级)状态。基于此,将当时的地表位移监测、库水位和降雨量数据导入系统,系统成功触发了蓝色预警,与实际情况相符,实验结果充分验证了系统在实际应用中的有效性。

3.6 实景展示

实景展示采用三维地图叠加不同的环境特效,如雨、雪、雾、光照等,以模拟滑坡区域在不同气象条件下的状态。用户可以通过场景特效控制

表 2 综合分级预警阈值表
Table 2 Comprehensive grading early warning thresholds

评判值S	≤ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 90	>90
级别	无	注意级	警示级	警戒级	警报级
预警信号	无	蓝色	黄色	橙色	红色

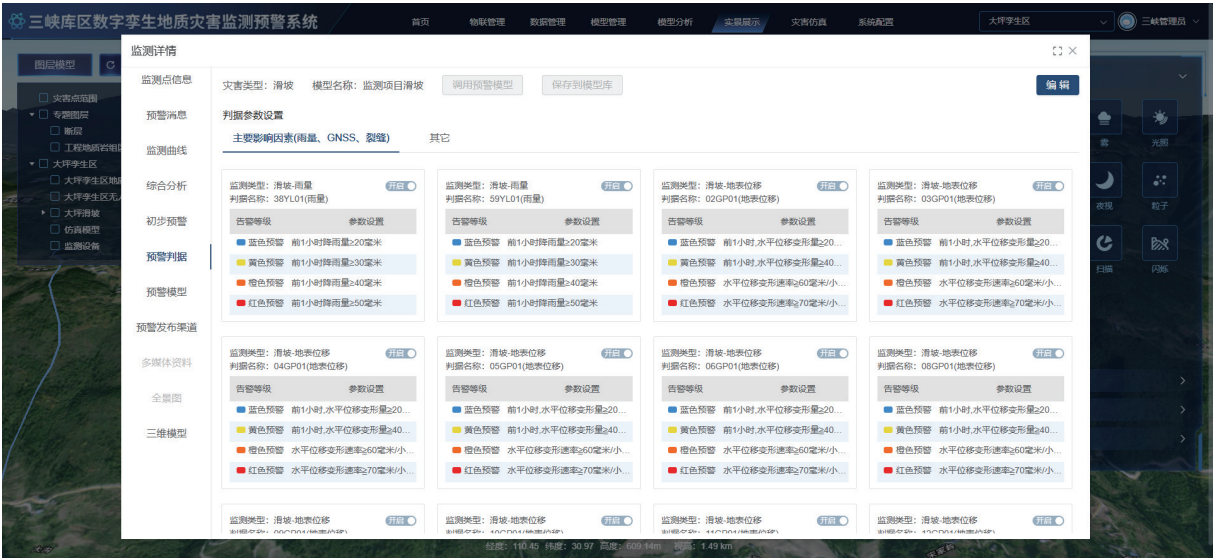


图 7 大坪滑坡预警判据
Fig. 7 Early warning criteria for the Daping landslide

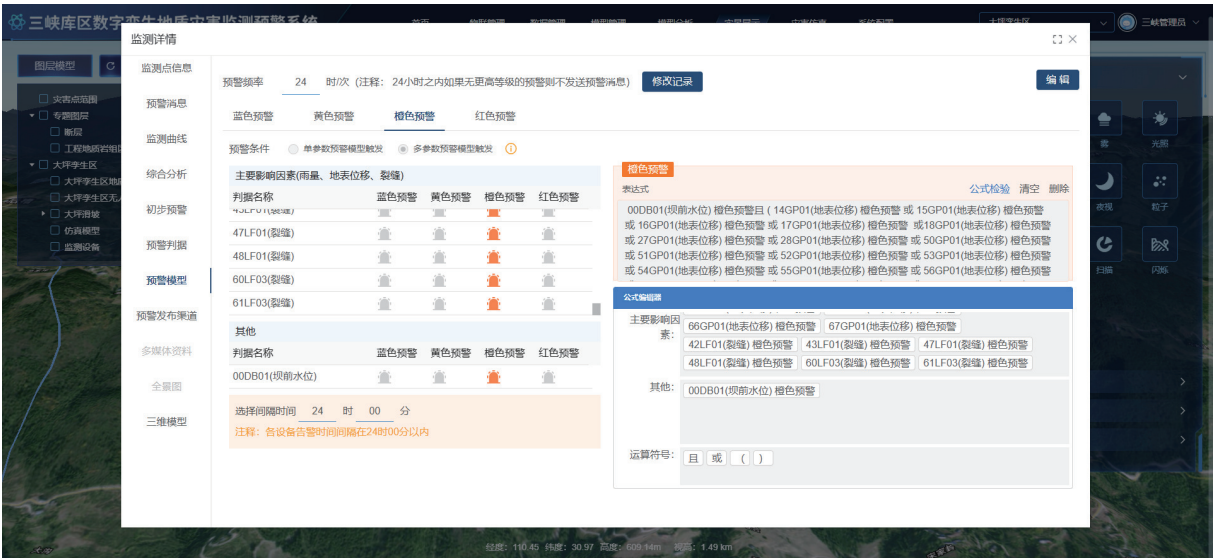


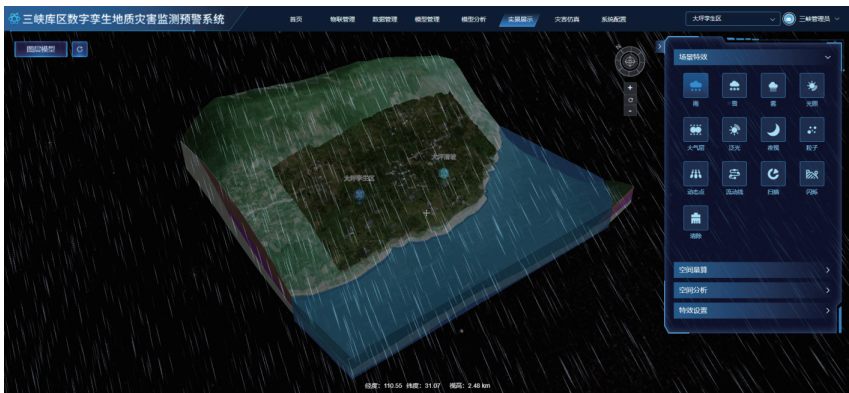
图 8 大坪滑坡综合预警模型
Fig. 8 Comprehensive early warning model for the Daping landslide

面板选择相应的特效,并动态调整环境光照和气象变化,从而获得滑坡区域的多样化场景展示效果。此外,系统还提供了空间量算及空间分析功能。通过实景展示模块,三峡库区数字孪生滑坡监测预警系统实现了滑坡区域的立体化、可视化和多维度的展示功能,提升了用户对滑坡灾害的

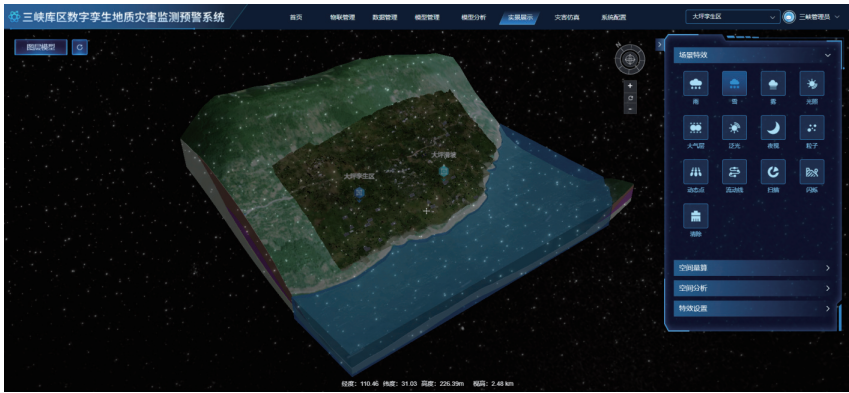
感知和理解能力,为灾害防控决策提供了更加精准和直观的依据。大坪滑坡实景展示效果如图 9 所示。

3.7 地灾仿真模拟

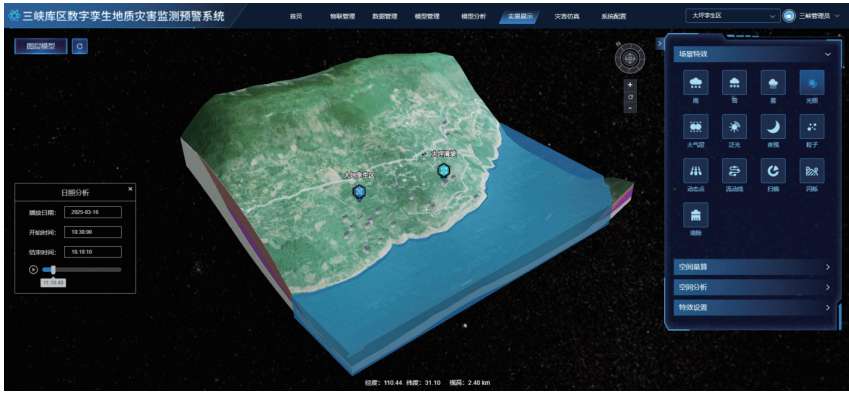
仿真模拟主要包含仿真模拟工况分析及选择和仿真模拟两个主要部分。



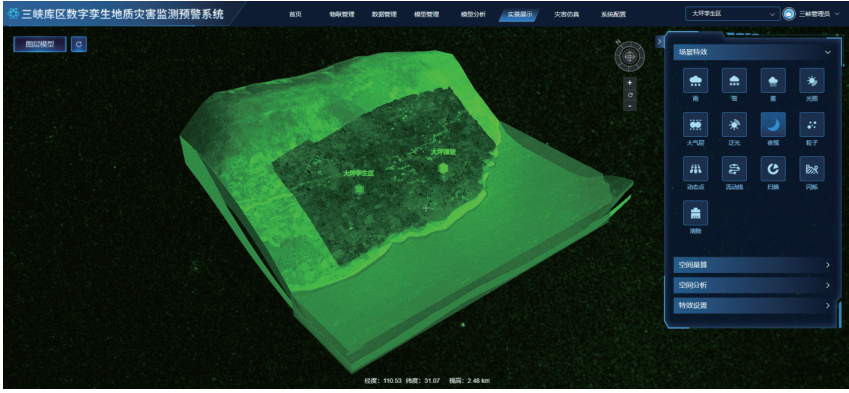
a. 场景特效-雨



b. 场景特效-雪



c. 场景特效-光照



d. 场景特效-夜视

图 9 大坪滑坡实景展示效果图

Fig. 9 Real-scene visualization of the Daping landslide

3.7.1 大坪滑坡仿真模拟工况的选择

大坪地质灾害仿真是在地质灾害稳定性分析的基础上进行研究的,本文重点分析《在水库消落期增大库水位下降速率条件下三峡库区巴东县大坪滑坡(未纳入工程治理)稳定性地质调查评价研究报告》(向文松,2015)(以下简称为“研究报告”)中的相关内容。依据滑坡稳定性分级标准,对大坪滑坡在不同工况下的稳定性进行分析。

(1)滑坡稳定性分级

大坪滑坡的稳定性分级依照稳定性系数判定滑坡稳定性等级,取保守标准。研究报告对大坪

滑坡的定量分析及评价如表 3 所示:

(2)大坪滑坡在不同工况下的稳定性分析

研究报告采用 Morgenstern-Price 法和不平衡推力法,对不同工况下的滑坡稳定性进行分析,结果表明滑坡整体和各层大规模块体均处于稳定和基本稳定状态。然而,大坪滑坡前缘库水位消落带范围内,滑体碎石土中已有塌岸发生,表明大坪滑坡存在局部小规模失稳现象。采用 Bishop 法计算滑坡稳定性系数,根据不同工况下大坪滑坡滑体局部稳定性的评价,结果如下:

表 3 滑坡稳定性分级

Table 3 Landslide Stability Classification

稳定性系数	稳定	基本稳定	欠稳定(稳定性差)	不稳定
Fs	≥1.10	≥1.05且<1.10	≥1.0且<1.05	<1.0

工况一 从 159 m 库水位以 0.6 m/d、0.8 m/d、1.0 m/d、1.2 m/d、2.0 m/d、3.0 m/d 的速率下降至 145m; 在 159 m 库水位以不同速率下降至 145 m

时,在滑坡前缘搜索出最危险滑面。降速越大,危险面越大,稳定性越低,稳定性系数在 0.96~0.99 范围内波动,具体内容见表 4。

表 4 不同速率下降工况下最危险滑面稳定性系数

Table 4 Stability coefficients of the most dangerous slip surface under different decline rates

降速	0.6 m/d	0.8 m/d	1.0 m/d	1.2 m/d	2.0 m/d	3.0 m/d
稳定性系数	0.994	0.991	0.988	0.985	0.976	0.967

工况二 在 145 m 稳定库水位条件下叠加 3 日暴雨、5 日暴雨后,在滑坡的中部表层搜索出条状危险面。暴雨导致表层滑体重度增加,在自重作用下产生蠕滑变形。3 日暴雨条件下的稳定性系数为 0.997,5 日暴雨条件下的稳定性系数为 0.996,略低于 3 日暴雨条件下的稳定性系数。

根据稳定性分析,大坪滑坡在以上两种工况下的稳定性系数均小于 1,表明滑坡在这两种情况下处于不稳定状态。本文主要对以上两种工况进行大坪滑坡的仿真模拟。

3.7.2 大坪滑坡地质灾害仿真模拟

(1)仿真建模

采用高精度 Mesh 的三维地质模型数据,包含碎石土、碎裂岩、滑面(带)土、基岩等地层信息,格式为 gltf。基于三维地质模型,将每个地层

的三角网模型使用算法剖分成若干个四面体,并以凸包(Convex Hull)形式加入物理引擎。模型包括滑体、滑带和滑床,整个模型剖分了近万个四面体单元,共计数 9437 个节点。

(2)计算参数

根据研究报告,获取大坪滑坡物理力学参数,见表 5。由于滑体由碎石土、碎裂岩组成,滑面(带)为老滑坡滑面(带)。所以,滑体和滑面(带)内聚力量值很低,本次计算取零值。

在使用 PhysX 进行仿真时,为不同部分的四面体赋予不同的物理属性,四面体的物理属性由所在的地层决定。材质的物理属性选取静摩擦系数、动摩擦系数、恢复系数和密度等主要属性。为了计算不同材质的物理属性,一方面参考大坪滑坡物理力学参数,另外一方面也借助经验值或

表 5 大坪滑坡物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of Daping landslide

材料类型	天然密度 ρ (kg/m ³)	饱和密度 ρ (kg/m ³)	粘聚力C (MPa)	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	体积模量K (MPa)	切变模量G (MPa)	抗拉强度 (MPa)
碎石土	2200	2300	0	30	417	192	0
碎裂岩	2200	2300	0	30	417	192	0
滑面(带)土	2098	2150	0	24.43	127	37	0
基岩	2550	2600	0.5	35	20000	12000	1.2

实验值进行不断测试、试验。材质参数见表 6。

(3) 仿真模拟

大坪滑坡目前地表变形迹象明显, 推测在库水位降落速率增大或极端大暴雨条件下, 滑坡变

形将进一步发展, 当滑坡的推移式发展到前部、深层后, 滑坡还可能整体失稳。本研究通过采用 PhysX 物理引擎技术, 对工况一条件下大坪滑坡失稳时的状态进行仿真模拟(图 10)。

表 6 大坪滑坡材质物理属性

Table 6 Material physical properties of Daping landslide

材料类型	工况一				工况二			
	静摩擦系数	动摩擦系数	恢复系数	密度 ρ (kg/m ³)	静摩擦系数	动摩擦系数	恢复系数	密度 ρ (kg/m ³)
碎石土	0.3	0.2	1	2200	0.5	0.2	1	2300
碎裂岩	0.1	0.1	1	2200	0.3	0.08	1	2300
滑面(带)土	0.08	0.07	1	2098	0.42	0.07	1	2150

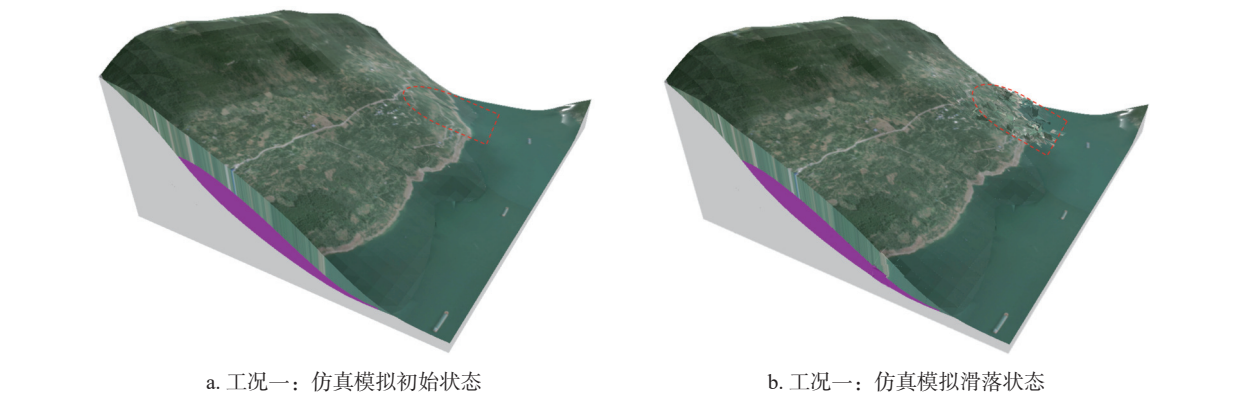


图 10 工况一仿真模拟效果图

Fig. 10 Simulation results of working condition one

- (1)初始化 PhysX: 创建 PhysX 基础对象和物理模拟对象, 创建模拟场景, 设置重力和其他环境参数。
- (2)建立滑坡模型: 根据地质数据生成三维地形模型, 为滑体、浅层滑带和滑床分别设置材料属性。
- (3)设置工况条件: 施加自重、降雨和库水位变化的荷载条件。
- (4)进行滑坡变形仿真模拟:
- 后台: 调用物理引擎的仿真方法进行模拟, 取合适的步进间隔(例如 0.3 秒), 循环进行一定次数(如 100 次)的步进, 得到每次步进后所有四面体的姿态信息(位移和旋转)并输出成动画文件。
- 前端: 前端下载四面体网格信息文件和动画文件, 并渲染四面体; 开始播放后, 每帧在对应的两次步进结果间插值位移和旋转信息, 并更新到对应的四面体对象上以实现播放动画。

4 结论与展望

本研究构建了基于数字孪生技术的三峡库区滑坡监测预警系统,并在大坪滑坡示范点进行了应用和验证。通过结合地表和地下的三维模型,构建了全要素物联感知网络,实时监测滑坡的动态变化。基于高精度无人机倾斜摄影和 GeoModeller 三维建模技术,实现了地上地下一体化的三维可视化展示。结合物联网监测数据,建立了多因子的地质灾害预警判据和综合预警模型,科学地评估滑坡的稳定性,并进行预警。采用 PhysX 物理引擎技术对滑坡在两种不稳定工况下进行了地质灾害仿真模拟。极端气候条件下,数字孪生系统支持及时调整预警判据及预警模型,确保预警的准确性。该系统基于实时采集的监测数据,提供了脚本编辑和公式编辑两种方式调整包括雨量、坝前水位、地表位移、倾角、裂缝等在内的各项预警判据;通过组合多个监测传感器的预警判据构建多参数预警模型,当多个传感器都达到预警触发条件时,发出对应的等级预警。

数字孪生技术在滑坡监测预警中具有显著优势,能够整合现有技术,提升数据分析的维度和可视化效果,提供科学的决策支持。通过数字孪生系统,综合分析各类监测数据,进行动态模拟和预警,为地质灾害的防治提供了重要技术支持。未来,进一步完善和推广数字孪生技术在地质灾害防治中的应用,将有助于提升滑坡监测预警的整体水平,保障人民生命财产安全。

本研究通过数字孪生技术的应用,不仅提高了对大坪滑坡的监测和预警能力,还为三峡库区地质灾害防治提供了一种新的思路和方法。这种技术的推广和应用将极大地增强滑坡监测预警的精确性和响应速度,有效减少灾害对人类生命财产威胁。

参考文献:

杜志强,李 静.2017.基于粒子系统的滑坡灾害过程模拟仿真方法[J].地理信息世界,24(2):46-50.
李 波,杨江涛,李伯宣,罗 兰,景 泽.2019.基于物联网的地质

灾害自动化实时监测体系设计与实践[J].矿产勘查,10(9):2429-2435.

李瑞昌,唐 雲.2022.数字孪生体牵引应急管理过程整合:行进中的探索[J].中国行政管理,(10):30-38.

马 娟,张鸣之,韩 冰,黄 喆,石爱军,薛跃明.2019.地质灾害无人机调查数据管理云平台建设[J].中国地质灾害与防治学报,30(1):100-105.

明 镜.2012.基于钻孔的三维地质模型快速构建及更新[J].地理与地理信息科学,28(5):55-59.

倪廉钦,李树芳,高 杰,袁安营.2024.数字孪生技术在安全工程实践教学中的应用[J].华北科技学院学报,21(2):118-124.

庞 鑫,袁 明,卢 渊,杜文杰,万道春,李 得,丁海锋,付晓东.2023.基于无人机 LiDAR 仿地飞行技术的高陡边坡危岩体快速识别方法[J].地质科技通报,42(6):21-30.

王世梅,潘宇晨,王 力,崔宪东,刘 婷,陈珂珊.2021.三峡库区大坪滑坡变形对前缘塌岸的响应分析[J].工程地质学报,29(3):647-656.

吴润泽,朱敏毅,付小林,梅红波,李振华,张 亮,王红群,涂秋月.2023.三峡库区地质灾害趋势预测模型构建与预警系统开发[J].华南地质,39(3):455-469.

吴晓贵,秦纪华,胡林朝,何 斌.2020.基于 GeoModeller 的新疆阿舍勒铜锌矿三维地质模型及地质空间信息解译[J].矿产与地质,34(4):826-831.

向文松.2015.在水库消落期增大库水位下降速率条件下三峡库区巴东县大坪滑坡(未纳入工程治理)稳定性地质调查评价研究报告[R].

许 强,黄学斌.2014.三峡库区滑坡灾害预警预报手册[M].北京:地质出版社.

许 强.2020.对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J].工程地质学报,28(2):360-374.

杨诗诗,叶润青,付小林,吴润泽,熊 能,文天龙.2023.三峡库区降雨型滑坡预警雨量阈值研究[J].华南地质,39(3):445-454.

叶润青,付小林,郭 飞,易庆林,汤明高,宋英旭,吴润泽.2023.三峡库区地质灾害监测分析与发展探讨[J].工程地质学报,31(5):1628-1636.

张绿原,胡露骞,沈启航,谈 震,牛霄飞.2021.水利工程数字孪生技术研究与探索[J].中国农村水利水电,(11):58-62.

赵婧文.2022.数字孪生技术在防灾减灾救灾中的应用探索[J].中国减灾,(21):53-55.