https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.085

花岗岩斜坡区切坡建房易损性智能分析

吴爽爽[1,2],吕国鹏[3],胡新丽[3],周渤彧[1],苏昊阳[1],郝 帅[1]

1. 河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100
2. 湖南省地质调查所,湖南长沙 410014
3. 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074

摘 要: 为了评价山区切坡建房诱发滑坡地质灾害风险,以湖南省炎陵县花岗岩全风化层斜坡区的切坡建房例为数据样本,耦合非监督学习算法和光滑粒子流-有限元的数值模拟对切坡建房易损性开展智能分析.基于PCA降维和KMeans聚类进行切坡建房易损性分级,确定了关键易损性因子,进一步通过SPH-FEM数值模型揭示了在关键因子不同水平下滑坡致灾体和房屋承灾体的运动堆积关系与能量传递规律.切坡高度和挡土墙高度/坡脚距离是易损性关键因子.若将聚类获得的中易损样本按pca1绘制累计百分比曲线,可将中易损切坡建房例再划分以分级风控.当坡脚距离$Ds \leqslant 0.5$ m时,滑体动能大量传递至墙体,导致严重破坏,随Ds增大,墙体能量吸收递减,灾害强度显著降低,$Ds \geqslant 6$ m时,墙体几乎不变形,可视为所提及情景下的安全坡脚距离.

关键词: 切坡建房;易损性分析;聚类;SPH-FEM数值模拟;花岗岩全风化层;工程地质.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-3863-16 **收稿日期:** 2025-12-05

Intelligent Vulnerability Analysis of Slope-Cutting House Construction in Granite Slope Areas

Wu Shuangshuang[1,2], Lü Guopeng[3], Hu Xinli[3], Zhou Boyu[1], Su Haoyang[1], Hao Shuai[1]

1. *School of Geosciences and Engineering, Hohai University, Nanjing* 211100, *China*
2. *Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha* 410014, *China*
3. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: To assess the risk of landslide geological hazards induced by slope-cutting house construction, this study takes case in the completely weathered granite slope area of Yanling County, Hunan Province as data samples. Intelligent analysis of the vulnerability of slope-cutting construction was conducted by integrating unsupervised learning algorithms with numerical simulation based on the smoothed particle hydrodynamics-finite element method (SPH-FEM). Vulnerability classification of slope-cutting construction was implemented via PCA dimensionality reduction and KMeans clustering, leading to the identification of key vulnerability factors. Furthermore, the SPH-FEM numerical model was employed to reveal the motion-accumulation relationships and energy transfer laws between landslide hazards and residential structures under varying levels of these key factors. The results indicate that slope-cutting height and the ratio of retaining wall height to slope toe distance (H/Ds) are the critical vulnerability

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.42307193);湖南省自然科学基金资助项目(No.2024JJ8346);中国地质学会中南地区地质安全风险监测预警与防控技术创新基地资助项目(No.GRFP-2025-06).

作者简介: 吴爽爽(1993-),男,讲师,博士,地质工程专业,主要从事滑坡地质灾害机理、评价与防治等方面研究工作. ORICD:0000-0002-2659-2767. E-mail: wushuangshuang@hhu.edu.cn

引用格式: 吴爽爽,吕国鹏,胡新丽,周渤彧,苏昊阳,郝帅,2026.花岗岩斜坡区切坡建房易损性智能分析.地球科学,51(10):3863-3878.

Citation: Wu Shuangshuang, Lü Guopeng, Hu Xinli, Zhou Boyu, Su Haoyang, Hao Shuai, 2026. Intelligent Vulnerability Analysis of Slope-Cutting House Construction in Granite Slope Areas. *Earth Science*, 51(10): 3863-3878.

factors. Plotting the cumulative percentage curve of pca1 for clustering-derived moderately vulnerable samples enables further subdivision of moderately vulnerable slope-cutting construction cases to support hierarchical risk control. When the slope toe distance (*Ds*) is ≤0.5 m, a substantial amount of kinetic energy from the sliding mass is transferred to the retaining wall, resulting in severe damage. As *Ds* increases, the energy absorption capacity of the wall decreases, and the hazard intensity is significantly mitigated. When *Ds*≥6 m, the wall only undergoes minor deformation, which can be regarded as the safe slope toe distance under the studied scenarios.

Key words: slope-cutting house construction; vulnerability analysis; clustering, SPH-FEM coupled numerical simulation; completely weathered granite layer; engineering geology.

0 引言

近年来,在山地丘陵地区建房过程中,通过开挖坡体以增大建筑面积的现象日益普遍,俗称“切坡建房”.切坡建房后形成的高陡人工边坡,破坏了原坡体结构,为滑坡、崩塌等地质灾害埋下隐患,在极端气候条件下极易诱发灾害(殷跃平,2013;杜显祥等,2020).据全国地质灾害防治“十四五”规划(http://101.200.227.21/plan/22306),湘东南、赣西及浙闽粤赣皖地区被划定为地质灾害高发区,其中,由切坡建房引发的地质灾害更是被列为防治重点.如湖南省分析近十年来造成人员伤亡的地质灾害,80.2%都与农村切坡建房密切相关,全省共核查出78.79万户切坡建房(https://www.peopleapp.com/column/30038811302-500003810926).针对切坡建房引发的斜坡地质灾害,学者多从其引发灾害的成因机理、防治措施等角度开展研究(韦朝华等,2017;冯文凯等,2025;吴爽爽等,2025),但要全面实现灾害风险管控,需系统评估灾害可能造成的损失,即开展地质灾害易损性分析或评价.

地质灾害易损性评价是风险评价的重要步骤之一(Agliata *et al.*,2021;李博等,2025),其与危险性评价是决定地质灾害风险的关键(张梁和张建军,2000;Xu *et al.*,2023;彭铭等,2025).易损性是指暴露于危险之中的某一特定对象的潜在损失程度,其大小不仅取决于灾害体本身的作用力,还与承灾体抵抗能力有关(Papathoma-Köhle *et al.*,2007;Fell *et al.*,2008;徐勇等,2018;崔广永等,2025),是承灾体在面对特定强度地质灾害时抗灾能力的度量(连志鹏等, 2022).相对于滑坡致灾体自身的深入研究(Kang *et al.*,2022;Kang *et al.*,2025;Wang *et al.*,2025),承灾体往往受到的关注度更小,其在滑坡灾害中的易损性分析也是风险评价中的难点(Hollenstein,2005;Peng *et al.*,2015).而近年来将地质灾害风险评价的重点转向易损性分析亦取得了一定进展,如Li *et al.*(2010)基于滑坡强度与承灾体抗灾能力的定量函数模型,提出了一套针对建筑物与人员的滑坡易损性评价方法.许强等(2010)探索了适用于西南山区城镇的地质灾害易损性分析方法,通过建立大比例尺评价指标体系与模型,并利用地理空间分析软件实现.杨良权等(2014)通过构建以人口、资产、资源为核心的评价指标体系,建立了一套针对西南山区尾矿库的地质灾害易损性定量评价方法.王芳等(2018)以三峡库区塘角滑坡为例,构建“致灾强度-抗灾能力”耦合模型,评估了多类型承灾体在不同灾害情景下的易损性.Zhang *et al.*(2018)以2010年舟曲特大泥石流灾害为案例,针对砖混结构与钢混框架结构建立了一套基于多种强度指标的泥石流建筑物物理易损性经验曲线.Agliata *et al.*(2021)以意大利南部山区为例,选取建筑物相关多项指标,构建了一套适用于数据稀缺地区的易损性评价体系.曾韬睿等(2023)通过反演滑坡致灾强度经验曲线与数值模拟,构建并验证了一套适用于滑坡影响区的建筑物动态易损性定量评价方法.

当前的地质灾害易损性研究多集中于建筑物等一般性承灾体本身,而专门针对切坡建房的易损性评价方法或模型则相对较少.切坡建房的出现反映了人居需求向自然环境发起的挑战,简称“向山要地”.目前,切坡建房易损性现有评价手段及体系较为单一,评价方法多依赖统计模型、经验曲线或指标体系,虽在风险量化与空间表达方面取得进展,但普遍存在两方面局限:一是动态物理机制分析不足,较少引入数值模拟等动态分析方法来揭示灾害发生发展过程中能量传递与结构响应规律,研究重点多集中于滑坡运动学特征的单体模拟,针对滑坡高速运动与建筑物冲击效应的耦合机制研究相对薄弱(罗紫琪等,2025).二是针对切坡建房这一特殊对象,现有研究对智能分析方法应用欠缺.与常规建筑物易损性相比,切坡建房易损性研究不仅

需评估建房自身的抗灾能力,还需考虑切坡对斜坡稳定的负作用.因此,融合人工智能算法与数值模拟技术,构建耦合物理过程与数据驱动的分析框架,能够较好地增强切坡建房易损性分析的智能性与可靠性.

基于此,本文以湘东南炎陵县花岗岩斜坡区为典型研究区,聚焦该区域切坡建房问题,提出了一套综合切坡建房易损性分析智能方法.该方法针对大量切坡建房案例,引入无监督学习算法,通过降维与聚类实现易损性的客观分级,并识别关键承灾因子.在此基础上,为量化滑坡体对房屋的冲击效应,拟构建 SPH-FEM 耦合数值模型,模拟不同乃至极端因子水平下滑坡体冲击房屋的动态过程,界定切坡建房关键易损性因子的安全值.耦合数据驱动—物理过程实现对切坡建房易损性的智能分析,揭示关键承灾因子对易损性的影响机制,从而为丘陵山地切坡建房风险防控提供参考借鉴.

1　研究区概况

炎陵县地处湘东南山丘区,罗霄山脉中段西麓,区内地貌类型有山地、丘陵、冈地和溪谷平原等 4 种,整体地势东南高亢,西北低缓,最高点位于策源与江西交界的神农峰,海拔 2 122.35 m;最低点为三河镇与茶陵县交界的矮基岭,海拔 166 m;最大垂直高差 1 956.35 m,平均每千米坡降 44 m(图 1a).县域气候湿润,年均降雨量约 1 590 mm,年平均气温 12.1～17.2 ℃.区内构造活动显著,北东—北西向断裂体系发育,形成了复杂的地质背景.全区广泛分布加里东期和燕山期花岗岩风化层,总面积达 1 124 km^2,约占县域面积的 55%,其结构松散、抗剪强度低,为区内滑坡、崩塌等地质灾害的主要物质基础.根据最新开展的 1∶10 000 地质灾害详细调查结果,全区已查明切坡建房 12 420 户,8 338 户位于花岗岩分布区,滑坡及崩塌占全区地质灾害总数的

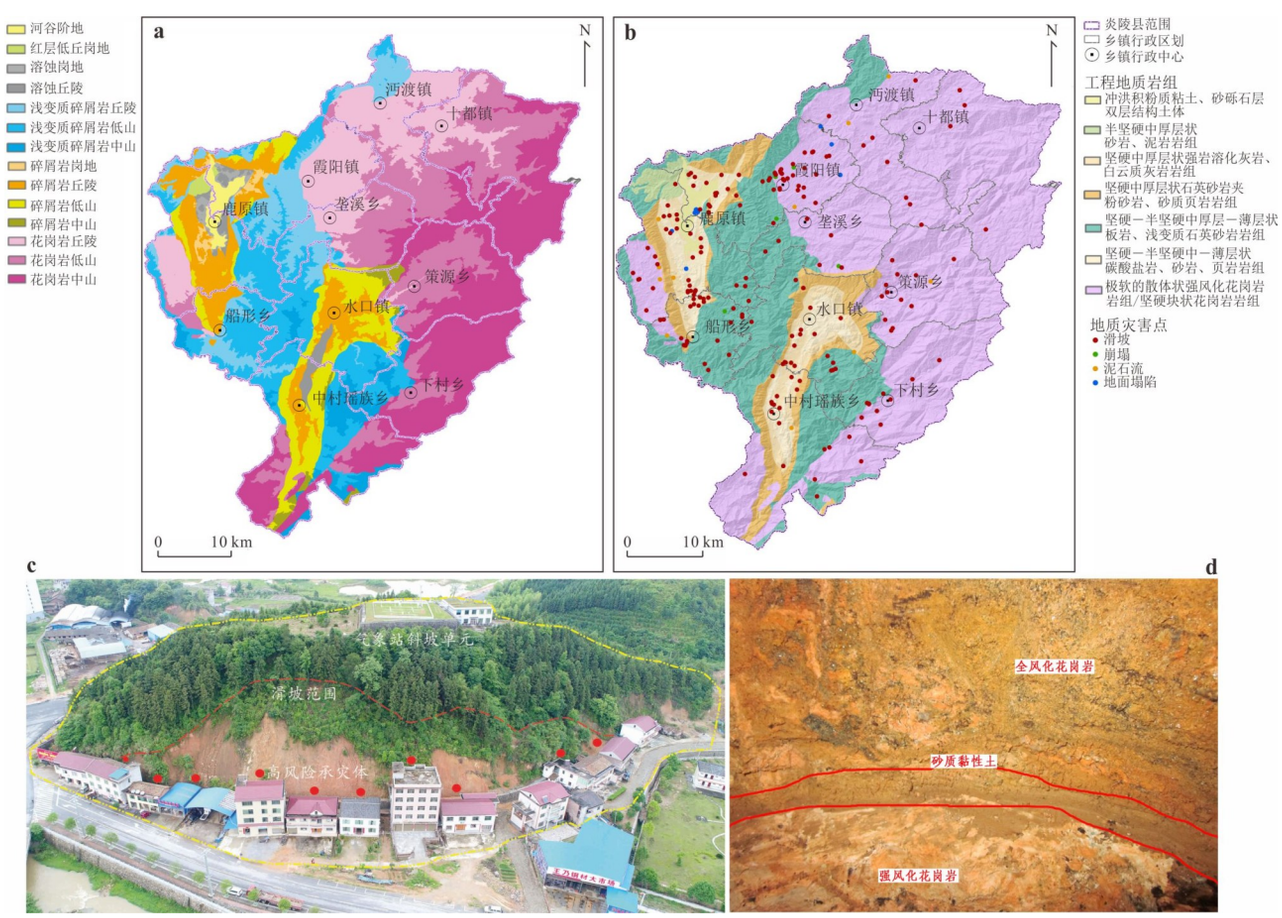

图 1　湖南省炎陵县地形地貌、地层岩性分布特征图及其滑坡典型案例示意图

Fig. 1　Schematic maps of topography, geomorphology, stratigraphic-lithologic distribution characteristics, and typical landslide cases in Yanling County, Hunan Province

a. 地形地貌图;b. 岩性及地灾点分布图;c. 县气象站滑坡与典型切坡建房例;d. 大院农场滑坡揭露的滑带层砂质黏性土

90%以上(图1b),图中两处滑坡案例——县气象站滑坡和大院农场滑坡即是研究区内典型的切坡建房型－花岗岩全风化层滑坡案例,县气象站滑坡体为由切坡建房扰动诱发的典型案例,大院农场滑坡的滑带处揭露了典型的花岗岩全风化层演化而成的滑带土(图1c, 1d).

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文研究区中的炎陵县花岗岩区切坡建房相关数据来源于2020—2024年作者参与的1∶10 000炎陵县地质灾害调查和风险评价项目,数据涵盖地质灾害点、切坡建房例以及斜坡单元,涉及了地质、气象、几何、建筑物等详细信息,及少部分岩土体常规试验数据.切坡建房例指以单户切坡建房为单位开展地质调查的案例,如果同一切坡前有n户建房,则切坡建房例为n.针对县域花岗岩区切坡建房例共获得8 338个样本,其中全风化层切坡建房例样本数2 572个.因子变量主要可分为易发型:切坡高度、切坡坡度、坡面形态、变形迹象、岩体风化程度;易损型:坡脚距离、挡土墙类型、挡土墙高度、房屋结构类型、房屋层数,以及所属乡镇等十余项.由于所有数据来源均为花岗岩斜坡区,且该研究区内发生的切坡具备数量多、切坡高度高和切坡角度大的特征,考虑到结果求证,下文中的研究方法均仅针对该研究区.

2.2 PCA-KMeans算法

通过对研究区的现场调查认识到,切坡建房的易损性等级来源于上述多因子状态或数值进行的综合判断,且该判断标准是人为设定阈值,具一定主观性.针对该问题,考虑非监督学习训练多因子重新获得易损性等级结果,相对于原来基于调查获得的易损性等级是独立的,二者具备可比性.而对比结果可以用来判断调查所获得易损性等级的客观程度,因此本文的智能分析决定使用非监督学习方法.选用PCA-KMeans算法,通过降维和聚类两类非监督学习综合获得可视化的簇结果,对基于地质调查获得的易损性评价结果进一步分析评价,从数据驱动的层面增强切坡建房易损性评估的可靠性.

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是一种常用的线性降维算法,核心是通过线性变换将高维数据映射到低维空间,在保留数据主要信息(即方差)的同时,简化数据结构.PCA通过寻找一组正交的“主成分”(新特征),使数据在这些主成分上的投影方差最大——即每个主成分尽可能多地保留原始数据的变异信息.第1个主成分:数据方差最大的方向(包含信息最多);第2个主成分:与第1个主成分正交(不相关),且方差次大;以此类推,至前k个主成分.但为了后续聚类结果的可视化,处理时考虑前2个主成分.在数据预处理上,高维的数值型变量可以直接输入,分类型变量需处理为哑变量进行输入.哑变量是将分类变量的各水平转化为0/1编码的虚拟变量,以哑变量矩阵生成新的多列数据,列数即为水平数量,这样便可满足数值输入的要求.

KMeans聚类的核心是将数据自动分成K个簇,使簇内数据相似度高、簇间差异大.算法主要步骤为预设簇数K;随机选K个点作为初始簇中心;计算所有样本到各中心的距离(常用欧氏距离),将样本分到最近的簇;重新计算每个簇的均值(更新簇中心);重复步骤3~4,直到簇中心稳定(收敛).通过对PCA降维后生成的pca1和pca2进行KMeans聚类,结果便可在直角坐标系中可视化,PCA-KMeans的优势是从数据点空间分布角度理解特征的内部关系.最后为了提高模型的泛化能力与鲁棒性,引入孤立森林算法对聚类结果的每个簇独立做检测.孤立森林(Isolation Forest, IF)是一种非监督式异常检测算法,即不依赖统计假设,通过随机划分样本特征空间来“孤立”异常点,其核心思路是异常样本更容易被孤立,所需划分次数更少,从而具有更高的检测效率与准确性.最终形成“特征降维－聚类成簇－异常检测”的非监督学习数据处理思路,以适用于当目标变量因主观性确定而存在数据缺陷的应用场景.

2.3 SPH-FEM数值方法

2.3.1 LS-DYNA软件与SPH方法 LS-DYNA是一款显式非线性有限元分析程序,具有强大的动态响应、大变形和材料时效分析能力,广泛应用于汽车、航空航天、国防和土木工程等领域.LS-DYNA众多算法中,光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)是一种无网格的拉格朗日方法,它使用一组离散的、带有物理属性的“粒子”来表征材料,粒子之间通过插值函数(核函数)相互作用.SPH方法在处理大变形、碎裂、自由表面流动以及材料界面演变等问题上具有天然优势,因

此适合用于模拟滑坡这类涉及岩土体大范围运动、破碎、以及流固耦合的复杂地质灾害过程(莫诗玓等,2024).

2.3.2　建模方法与流程　LS-DYNA的数值模型由几何模型与关键字组成.几何模型使用AUTOCAD导入或使用ANSYS等前处理软件建立,使用LS-DYNA配套的后处理软件LS-PREPOST生成拉格朗日网格(或称固体网格).针对在滑坡过程中将发生大变形或破坏的滑体与砖砌墙体,使用SPH建模.SPH粒子由LS-PREPOST中的SPH粒子生成器生成,该生成器可将拉格朗日网格的节点转换为SPH粒子或在拉格朗日网格中心生成SPH粒子.本研究中,将拉格朗日网格节点转换为SPH粒子.建立简化的切坡建房滑坡数值模型如图2所示.以滑床和滑体代表滑坡体,用砖砌墙和混凝土柱组成的墙体代表农村自建房,房屋结构类型主要考虑砖混结构.这是由于2015—2020年的全国农村住房普查数据显示,农村自建房中砖混结构占比约65%～80%,远高于框架结构(钢筋混凝土)或木结构.这得益于砖混结构的低成本和易于农民自建的特点,在中西部农村,这一比例占90%以上(住房和城乡建设部防灾研究中心,2018).关键字定义数值模型的材料性质,主要包括:材料本构模型、接触相互作用模型、边界条件控制参数.

(1)材料本构模型.床、滑体、墙体、混凝土柱等均采用MAT_PLASTIC_KINEMATIC(塑性硬化模型),该模型相较于MAT_MOHR_COULOMB(经典岩土本构模型),不仅更直接地服务于滑坡致灾体和房屋承灾体"流动－冲击"的物理过程模拟,还与所采用的SPH方法在模拟极端变形和流动问题时具有更高的兼容性.该模型可用于描述各向同性硬化和随动硬化塑性模型,计算效率较高,主要参数见表1.其中,将各材料单元的硬化系数均设为1(即采用各向同性硬化),主要考虑有:(1)滑坡冲击属于单调、单向、一次性的动力加载过程,各向同性硬化(屈服面均匀膨胀)足以描述材料在此类载荷下屈服后抗力变化的宏观趋势;(2)可显著降低岩土体与砌体材料本构的复杂性,有利于保证大变形数值计算的稳定性与效率;(3)所有材料硬化行为一致,可确保在不同工况对比时,系统响应的差异主要归因于几何因素的变化,而非材料单元本身.另外需要说明,表1中"混凝土柱"的参数(如弹性模量20 GPa,屈服应力16.7 MPa)并非素混凝土参数,而是参照了中等强度等级(如C25-C30)钢筋混凝土构件的宏观整体力学性能而给定的等效值(相关等效简化方法在LS-DYNA数值模拟中较为常见,如Zhang *et al.*,2021),等效值是综合考虑了混凝土的抗压强度和配筋对截面承载力的贡献,并以均质

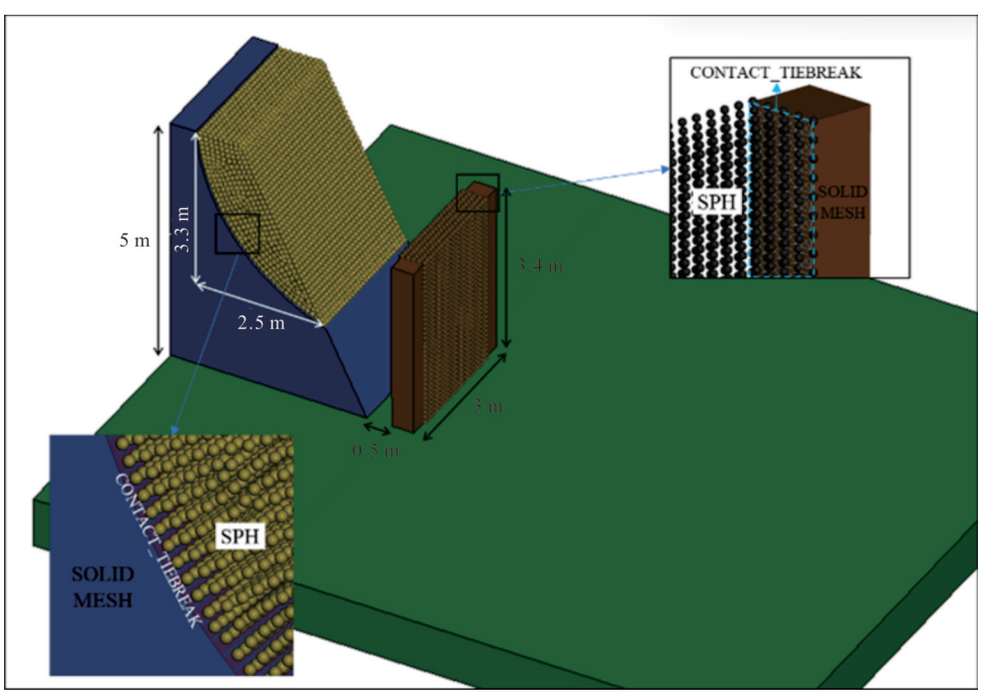

图2　切坡建房简化后的滑坡体与墙体数值模型

Fig. 2　Simplified numerical model of the landslide mass and wall in slope-cutting house construction

表1 材料单元物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the material element

类型	密度 (kg/m³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	屈服应力 (MPa)	切线模量 (GPa)	硬化系数
滑床	2 200	15	0.25	15.0	8	1
滑体	2 100	8	0.30	5.0	4	1
墙体	1 500	5	0.35	2.0	2	1
混凝土柱	2 500	20	0.25	16.7	12	1

材料赋参的方式进行了简化.地面采用*MAT_RIGID刚体模型,仅提供接触边界,不参与变形.

(2)接触相互作用模型.滑体(SPH)与滑床的接触、砖砌墙体(SPH)与混凝土柱的接触采用*CONTACT_TIEBREAK_NODES_TO_SURFACE关键字设置.该关键字中的关键参数是法向失效力(Normal failure force)和剪切失效力(Shear failure force),即当SPH粒子与拉格朗日网格间的接触力大于上述两个失效力之一时,接触失效,粒子与拉格朗日单元"脱离".破坏后的滑体(SPH)、砖砌墙体(SPH)与滑床、混凝土柱以及地面等拉格朗日单元的动态接触采用CONTACT_AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE关键字设置.该关键字中的关键参数是SPH粒子与拉格朗日单元之间的动态摩擦系数和静态摩擦系数,摩擦系数的大小影响滑坡的堆积与运动状态,进而影响致灾强度,因此该参数的确定需根据研究区实际情况来校准.本文考虑使用"物理参数校准"与"现象对比验证"相结合的方式来核查数值模拟的有效性.

(3)边界条件控制参数.采用*LOAD_BODY关键字对模型施加竖直方向的重力加速度(9.8 m/s²).采用BOUNDARY_SPC关键字约束模型的底部和侧向边界.

3 结果分析

3.1 切坡建房易损性调查

如前所述,无法采集足够的切坡建房破坏案例作为正样本,于是以易损性等级来区分正负样本.实际调查过程中,易损性等级按低、中和高区别,一般采取关键易损因子构成的并列条件筛选易损性,具备一定主观性.列举一种花岗岩区调查标准如下"当切坡高5~8 m,①坡脚距4~5 m时,如无有效防护,有较严重变形迹象,初步定级为中易损;②坡脚距2~3 m时,如无有效防护,有变形迹象,初步定级为中易损;③坡脚距1~2 m时,如无有效防护,初步定级为中易损;④坡脚距≤1 m时,初步定级为中易损,如无有效防护,切坡坡度>45°,有特别严重变形迹象,初步定级为高易损.当上述各情况不满足相应限制条件时,初步定级则降低一级至中、低易损".调查信息采集表中关于有效防护并无直接数据信息,主要是挡土墙类型和挡土墙高度两类相关数据,需调查人员据此标准并根据现场情况研判是否存在有效防护.总结来看,各易损性因子及水平是客观实测,但易损性分级存在主观性.为简化目标变量,将个别高易损划分至中易损类,花岗岩斜坡区全风化层2 572个切坡建房样本中,中易损性1 276个,低易损性1 296个.易损性因子列举以下3个分类型因子如图3a所示,可以发现,房屋结构类型以砖混结构和土坯结构为主;85%切坡建房例无挡墙,必然为无有效防护;房屋主要层数为2层.统计炎陵县各乡镇切坡建房易损性情况如图3b所示,策源乡和下村乡为分布数量最大的乡镇,且策源乡中易损数量占比大,对照地形地貌图,这两个乡镇为中山地貌花岗岩斜坡区,人居可用面积相对有限,切坡建房等"向山要地"需求大.因此,策源乡及下村乡应划分为炎陵县易损性评估及风险评价重点乡镇.

3.2 基于PCA-KMeans易损性聚类结果

3.2.1 重要性排序 如前所述,目标变量为中/低易损性的二分类变量,分类型变量已转化为数值型哑变量.此外,由于调查中关于"有无有效防护"的判断无直接数据来源,构造"挡土墙高度除以坡脚距离"这一变量,进行补充.挡土墙高度,和房屋到坡脚距离是分别从"挡"和"避"的角度决定防护是否有效的关键因子.针对此预处理后的数据,可先采用随机森林算法,将全部数据作为训练集获得易损性因子重要性排序,为后续研究提供参考,如图4所示,重要性排前5的依次是切坡高度、挡土墙高度/坡脚距离、挡土墙高度、挡土墙类型_无挡墙和

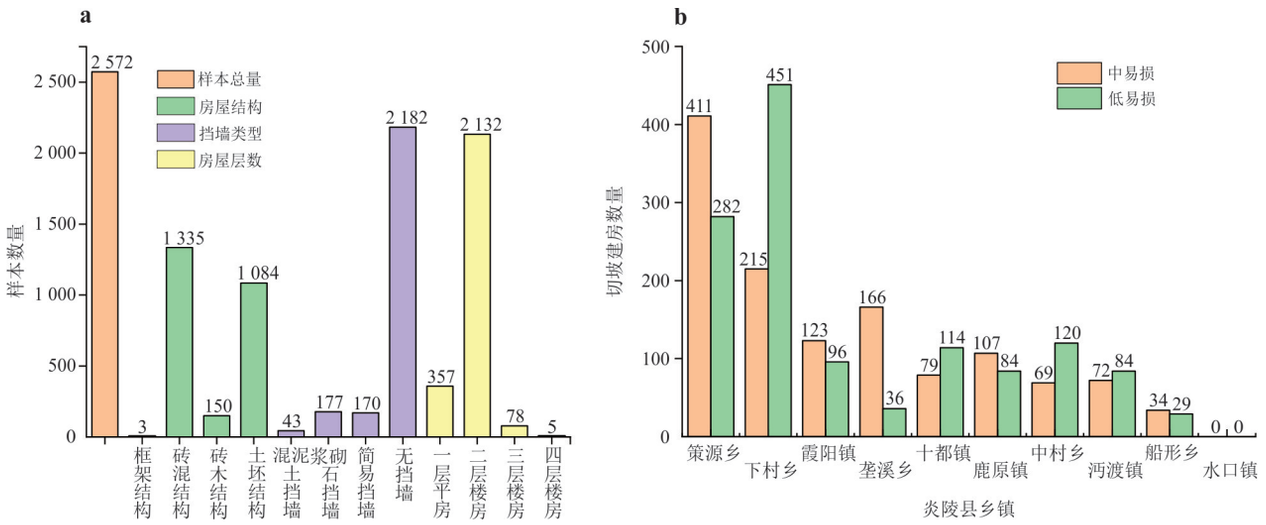

图 3　炎陵县花岗岩斜坡区全风化层承灾体因子分组条形图(a)和不同乡镇花岗岩斜坡区全风化层切坡建房易损性分布(b)

Fig.3　Grouped bar chart of hazard-bearing body factors (a) and slope-cutting house construction vulnerability distribution (b) in the completely weathered layer of granite slope, Yanling County

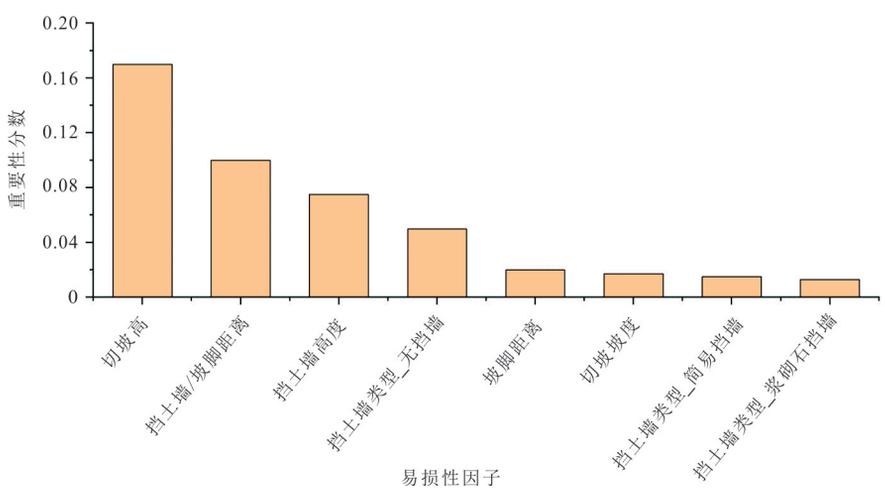

图 4　易损性因子重要性排序

Fig. 4　Importance ranking of vulnerability factors

坡脚距离.因此,基于现场调查的实测和通过专家判断获得的数据,借助简单的机器学习技术确定了上述因子应为关键易损性因子.切坡高度是斜坡几何属性,虽是滑坡易发性的关键因子,其重要性分数最高,这和易损性分级标准重视这一指标相关.挡土墙类型、坡脚距离是算法识别到的关键易损因子,但房屋类型或房屋层数并未出现在前列.现场工作本质属地质调查,更多地站在地质角度,并不重视按房屋类型区别易损性分级,而切坡建房破坏模式多为损坏房屋一层后墙,柱体和梁板不破坏,因此,层数因子一般也不考虑为关键因子.

3.2.2　聚类结果　对此,从非监督学习的角度进一步判断现有易损性分级的合理性.据算法流程,按照PCA降维获得了pca1轴和pca2轴,即第1主成分方向,和与其正交的第2主成分方向.基于此,所有切坡建房例被赋予新增的pca1值和pca2值.随后,基于KMeans对所有切坡建房例的pca1值和pca2值进行聚类,并基于孤立森林算法对每个簇进行异常检测,获得了如图5所示的用3种颜色区分的簇,以及用黑色表示的异常点,异常点孤立于任意簇.可以发现,红色组1和绿色组3为数据列最多的簇,组1受控于pca1轴,尤其是pca1>0,而组3相反,集中于pca1<0;蓝色组2主要是受控于pca2>0,是数据量最少的簇.不难发现,pca1的值会主导大多数切坡建房例的聚类结果.

3.2.3　混淆矩阵检验　以下对比由非监督学习

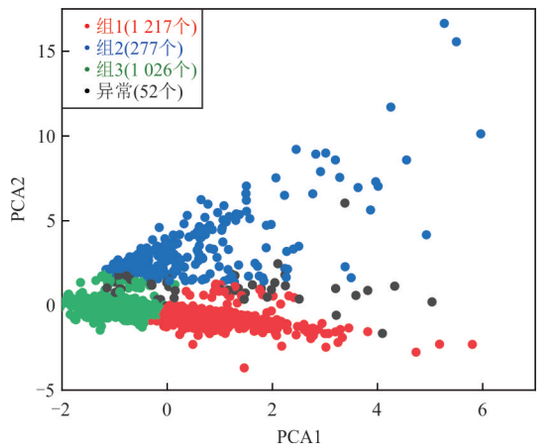

图 5 PCA-KMeans 聚类结果

Fig.5 Clustering result based on PCA-KMeans

KMeans 聚类算法的易损性分级结果和由地质调查易损性分级结果，选用主要的两个簇，即红色簇和绿色簇，与原本的中易损和低易损分别形成混淆矩阵如表 2 和表 3 所示，并计算命中率(TPR)和特异度(TNR). 命中率聚焦“正类是否被精准捕捉”，反映模型“不漏判正类”的能力；特异度聚焦“负类是否被精准排除”，反映模型“不错判负类”的能力；以及误诊率(FPR)，它们的计算公式如公式(1)和公式(2). 据此，分别得到混淆矩阵 A 和 B 的关键指标，矩阵 A：$TPR_A=0.930$，$TNR_A=0.976$，$FPR_A=0.024$；矩阵 B：$TPR_B=0.762$，$TNR_B=0.970$，$FPR_B=0.030$. 可以发现，若以聚类结果代替地质调查的易损性分级，中易损的预测命中率高、误诊率低，说明矩阵 A 所对应的红色簇聚类效果好. 矩阵 B 的主要误差出现在预测命中率，不足 0.8，但其特异度 0.97，高；误诊率 0.03，低，说明矩阵 B 反映了低易损漏判现象存在，而非低易损类错判率低. 整体来看，红色簇和中易损组的吻合度高，绿色簇相对于低易损组存在漏判，显然这两点都是符合风险偏好需求的，这也反映了聚类这一非监督式算法，在缺乏客观目标变量时具备评估切坡建房易损性的可行性.

$$\text{命中率：}\mathrm{TPR}=\frac{TP}{TP+FN}, \tag{1}$$

$$\text{特异度：}\mathrm{TNR}=\frac{TN}{FP+TN};$$

$$\text{误诊率：}\mathrm{FPR}=1-TNR. \tag{2}$$

3.2.4 关键易损性因子 在上述分析中，已知切坡高为最重要的易损性因子，挡土墙/坡脚距离次之，但无挡土墙情况占所有切坡建房例 85%，不利于分析. 因此，挑选切坡高和坡脚距因子作数据分布特征分析. 按聚类得到的 3 个簇分别统计切坡高和坡脚距因子的数值，绘制小提琴图如图 6 所示，小提琴图的曲线宽度表示数据在对应数值范围内的密度，宽区域代表数据量集中，密度高；而窄区域表示数据量稀疏，密度低. 组 1 红色簇切坡高均值 6.8 显著高于其他组，且数据量密度高，组 3 绿色簇切坡高均值 3.1，不足组 1 的 50%，同样数据量密度高，但两个组的坡脚距均值一致，小提琴形态相似. 而组 2 蓝色簇的小提琴形态呈现窄高型，数据稀疏，不作详细分析. 可见，切坡高对易损性分级的影响在数据层面是显性的，而坡脚距不同，在算法层面影响显性，而直观统计相对隐性，这体现了坡脚距因子数据分布过于集中，暴露出其在所有切坡建房例中均普遍过小的真实隐患. 因此，在下文的数值模拟中将重点探究坡脚距因子对切坡建房的影响，将增设不同坡脚距以补充其对易损性影响的智能分析.

表 2 红色簇–中易损组混淆矩阵 A

Table 2 Red cluster-medium vulnerability group confusion matrix A

	组 1(红色)PP	非组 1(非红色)PN	合计
中易损组 P	1 186 TP	90 FN	1 276
低易损组 N	31 FP	1 265 TN	1 296
合计	1 217	1 355	2 572

表 3 绿色簇–低易损组混淆矩阵 B

Table 3 Green cluster-low vulnerability group confusion matrix B

	组 3(绿色)PP	非组 3(非绿色)PN	合计
低易损组 P	988 TP	308 FN	1 296
中易损组 N	38 FP	1 238 TN	1 276
合计	1 026	1 546	2 572

3.2.5 簇的分割 PCA 降维后的切坡建房例数据可视化高，而降维结合聚类后的切坡建房例数据更易作分级，以给予不同重视程度便于易损性评估和风险管理. 1 276 个中易损组切坡建房例由于数据维度高无法精细风控，如上所述，红色簇与地质调查中易损性组吻合度较高. 将红色簇的 pca1 值作累计百分比曲线便可对中易损级别的切坡建房例进一步作精细划分，如图 7 所示，随易损性上升梯度，按 pca1≤0.5、pca1≤1、pca1≤2 三个边界，可依次划分 38.5%、72.0%、95.6% 的红色簇切坡建房例.

3.3 滑体－墙体作用数值模拟

3.3.1 不同摩擦系数下滑坡堆积形态 按上文数

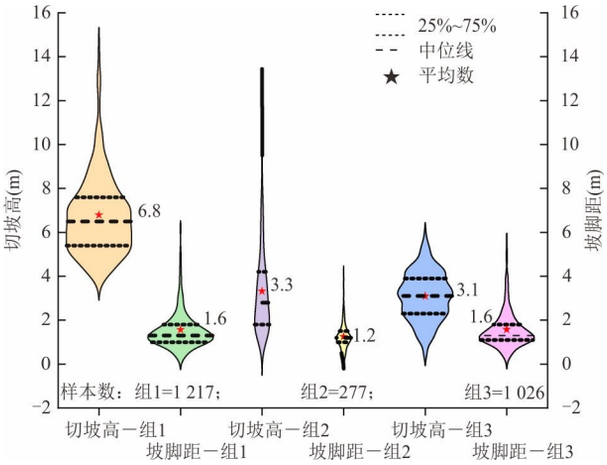

图 6　切坡高和坡脚距因子小提琴图

Fig. 6　Violin plot of factors of the slope-cutting height and the distance from slope toe

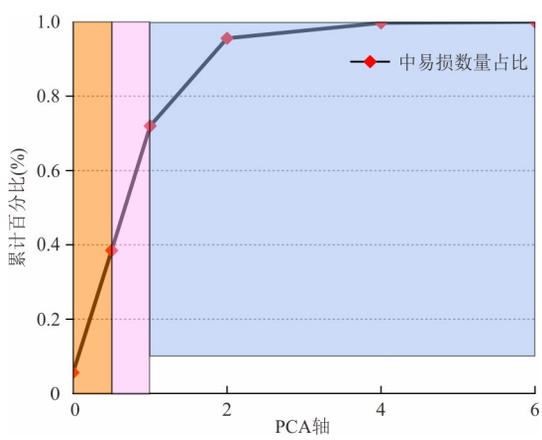

图 7　红色簇(中易损)切坡建房例数量累积百分比曲线

Fig.7　Cumulative percentage curve of the number of slope-cutting house construction cases in the red cluster (medium vulnerability)

值方法,仅考虑自建房为砖混结构建立切坡滑坡数值模型,以实际调查总结的“一层房屋后墙墙体破坏而梁柱不破坏”关键规律为基准,通过调整滑体与滑床间的动摩擦系数(Fs),观察滑坡堆积距离的变化.考虑不同摩擦系数下,模拟计算切坡滑坡破坏后的运动堆积特征,对比各摩擦系数下主要运动堆积参数,以校准进一步数值计算的摩擦系数.分别取摩擦系数Fs为0.2、0.23、0.25三类,计算结果如表4所示,滑坡体颗粒最大位移量分别为7.75 m、5.94 m、4.85 m,随摩擦系数增大而减小.考虑国内正常房间尺寸,进深深度多在3~6 m,如卧室大致3~5 m,客厅一般4~6 m,厨房卫生间不足3~4 m.而实际调查获得的房屋破坏案例,假设以墙体破坏

表 4　不同摩擦系数下滑坡运动和堆积参数

Table 4　Landslide movement and accumulation parameters under different friction coefficients

参数	不同摩擦系数		
	Fs=0.20	Fs=0.23	Fs=0.25
颗粒最大位移量(m)	7.75	5.94	4.85
平均位移量峰值(m)	5.20	4.80	4.50
平均速率峰值(m·s^{-1})	3.43	3.27	3.17

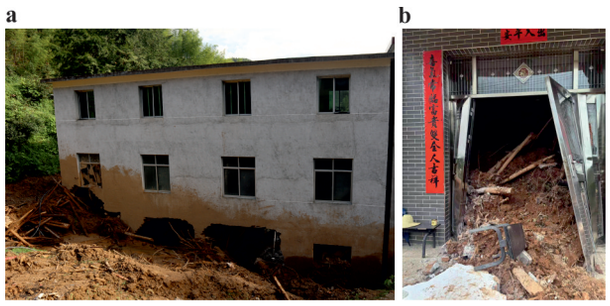

图 8　花岗岩区切坡建房典型破坏实例

Fig. 8　Typical failure cases of slope-cutting for house construction in granite area

a.湖南资兴市州门司镇;b.湖南资兴市八面山乡

而梁柱不破坏为前提,极端情况滑坡冲毁第1层全部墙体后堆积于房间或屋外,房间进深方向被大部分堆积(图8).显然,当没有墙体时,滑坡堆积距离应超出有墙体时,但此距离受坡脚距离显著影响,这将在下文讨论.据此,选择取堆积体最远位移至房间外一定距离来校准摩擦系数,即Fs为0.2时,最大堆积距离7.75 m进行后续研究,相对合理,该参数下的堆积形态及运动曲线如图9所示.需注意的是,平均位移曲线和平均速率曲线属于滑坡堆积体所有颗粒的位移、速率平均值,不同于个别能达到最大位移的颗粒,如Fs为0.2时,最大位移量7.75 m与平均位移量峰值5.2 m的区别.

3.3.2　不同坡脚距下墙体破坏情况　校准接触参数后,重点探究不同坡脚距离Ds下,滑坡体冲击破坏墙体的运动特征及能量特征.根据实际坡脚距离,模拟极端工况.令Ds=0.5 m模拟坡脚与墙体间极致小距离,Ds≤0.5 m的实际情况,在2 572个全风化花岗岩组别中占比6%;令Ds依次取值3 m、4 m、5 m、6 m和7 m模拟墙体逐渐远离坡脚情况,以分析安全坡脚距离,Ds≥3 m的实际情况,在2 572个全风化花岗岩组别中占比7%.模拟结果如表5所示,据此分析如下.

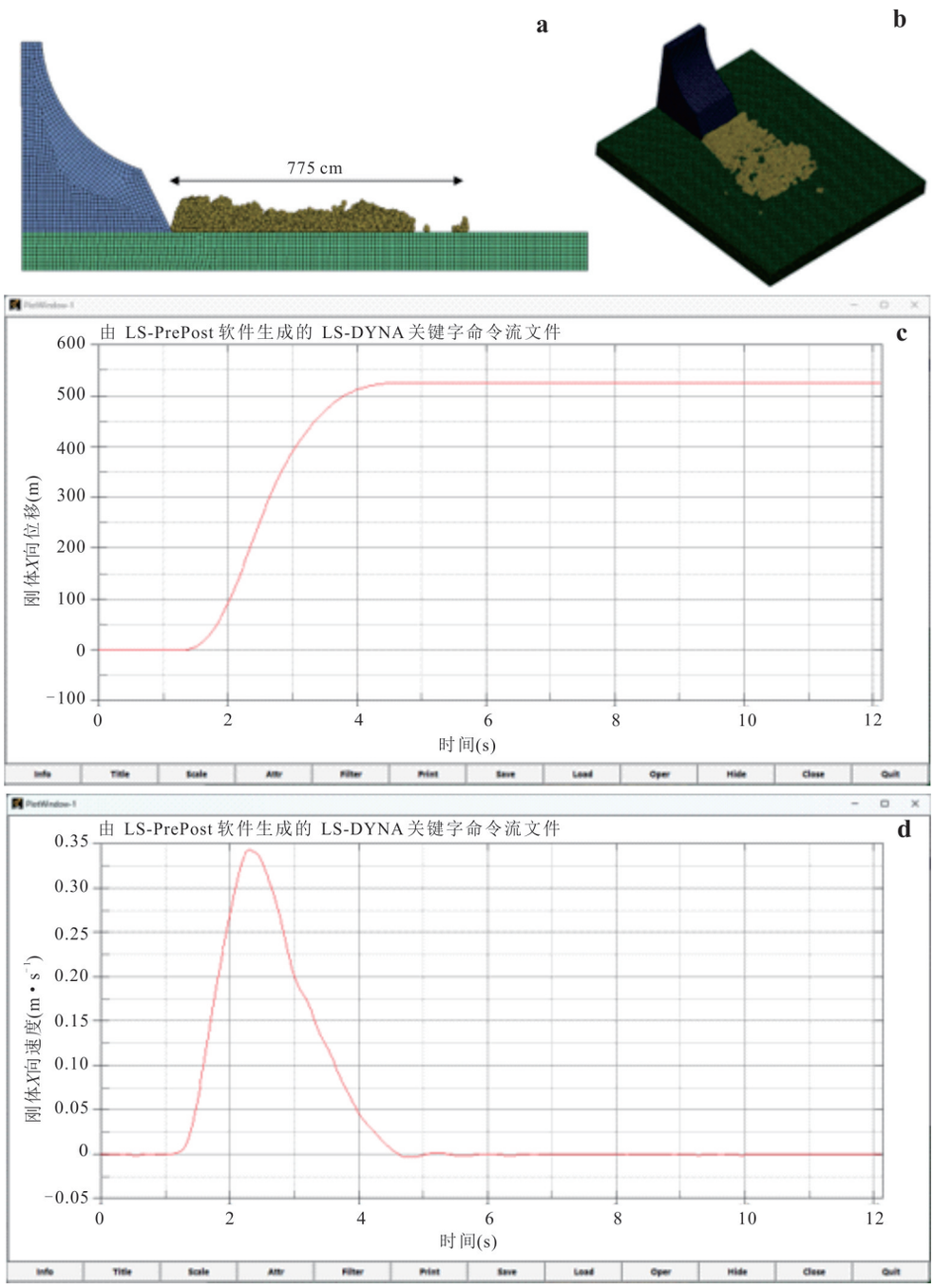

图 9 摩擦系数 Fs=0.2 时,切坡体滑坡运动堆积形态及位移、速率曲线

Fig. 9 The movement and accumulation morphology of the slope-cutting mass landslide as well as displacement and velocity curves when the friction coefficient Fs=0.2

a. 正视图; b. 俯视图; c. 平均位移曲线; d. 平均速率曲线

表 5 不同坡脚距离下滑坡运动及动能参数(Fs=0.2)

Table 5 Landslide movement and kinetic energy parameters under different distances from the slope toe (Fs=0.2)

	坡脚距离 Ds					
	Ds=0.5	Ds=3	Ds=4	Ds=5	Ds=6	Ds=7
平均位移量峰值(m)	3.15	4.21	4.65	4.94	5.12	5.23
平均速率峰值(m·s^{-1})	3.06	3.43	3.42	3.43	3.43	3.43
总动能峰值 (10^7 J)	2.30	2.74	2.73	2.71	2.74	2.73

平均位移量峰值显然随坡脚距离增大而增大,墙体充当滑坡体运动的障碍物,制约了大部分颗粒的位移量,而当Ds=6 m或7 m时,平均位移量峰值已接近或相等,上一小节模拟给出的无墙体时平均位移量峰值5.2 m(图9),这说明只要当坡脚距离足够大,切坡滑坡的影响可逐渐消除,强调了“安全坡脚距离”的重要性.平均速率峰值与总动能峰值的规律相近,Ds=0.5 m,墙体作为障碍物距离坡体近,一定程度上限制了颗粒平均速率峰值或总动能峰值的增大,分析认为,这主要是Ds小,堆积(或运动趋于停止)的颗粒数相较Ds大时的颗粒数多,且更多的能量从滑体颗粒转移给墙体颗粒,造成了更严重的墙体破坏.将各工况下的平均位移时间序列与Ds作差,绘制曲线以刻画滑体与墙体的接触过程,如图10所示.差值曲线基本在1~5 s内“增长”,此过程为滑坡颗粒的主要运动过程,依次完成破坏、运动、接触墙体、堆积,Ds基本不影响滑坡对墙体的作用时间;此后差值为不变状态,对应滑坡运动结束.当Ds=5 m时,差值的峰值刚好达到零,处于接触墙体状态;Ds<5 m时,接触墙体状态逐渐过渡为破坏墙体状态;当Ds>5 m时,远离墙体不接触.

以下分别绘制Ds=0.5 m、3 m和6 m时,滑体颗粒堆积形态及位移、速率曲线,墙体颗粒的堆积形态等图作进一步对比分析(图11).如图11a,Ds=0.5 m时,滑体颗粒堆积于滑坡脚、两侧和墙内,滑坡对墙内致灾严重,破坏实例可参照图8;墙体颗粒除梁柱附近大部分掉落,离散化,部分堆积于滑体颗粒上,相对运动更远.如图11b,Ds=3 m时,滑体颗粒大部分堆积于滑坡脚、两侧,极少量进入墙内;墙体颗粒自下而上脱落,上部墙体形态保留,滑坡对墙内局部范围产生一定致灾,切坡建房实例可参照下图12.如图11c,Ds=6 m时,少量滑体颗粒接触到墙体,墙体产生一定挤压变形,整体结构完好,滑坡对墙内基本不致灾.在图11c所示的情形下,可以看作切坡建房的坡脚距离达到了安全距离,即使滑坡发生,墙体只产生轻微挤压变形,结构不受损,对墙内人员及财产威胁小,但考虑实际,这个距离建房一般不需要切坡,实际Ds≥6 m的情形,仅22例,占比0.86%.

基于数值模拟结果,从能量的角度,分析滑体颗粒与墙体颗粒间的能量变化.如图13所示,滑体颗粒能量变化主要集中在1~5 s内,总能量先快速增加后减少至稳定状态,总动能快速增加又减小至

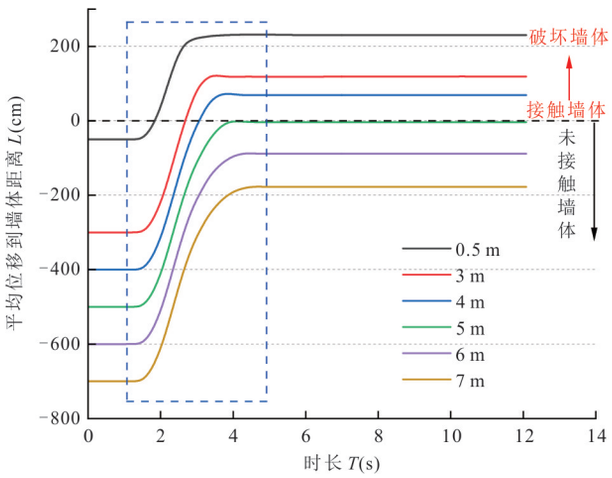

图10　不同坡脚距离下滑体颗粒平均位移与墙体距离的作差值曲线

Fig. 10　Difference curves between the average displacement of landslide particles and the distance to the wall under different distances from the slope toe

零,总内能滞后于动能的增加并维持于高位不变.当Ds=0.5 m时,滑体颗粒各能量曲线与其他Ds组有所不同,表现在总能量和总动能明显小于其他Ds组,而总内能略大于其他Ds组.如图14所示,墙体颗粒能量变化集中于2~5 s内,总能量与总动能均快速增加,从纵坐标轴可以发现,总动能仅占总能量的约1/10,内能曲线类似于总能曲线,故未作展示.同样,当Ds=0.5 m时,墙体颗粒各能量曲线与其他Ds组显著不同,总能量和总动能显著高于其他组别,这与Ds=0.5 m时的滑体颗粒能量曲线规律相呼应,表明了在Ds=0.5 m时,滑体颗粒能量通过碰撞更多的转移至墙体颗粒,与墙体的严重破坏相吻合.其次,随Ds增大,可以发现,墙体颗粒能量曲线峰值逐渐减小,表明滑体和墙体作用逐渐减轻,能量主要体现在滑体颗粒上.

4　讨论

本文提出了融合非监督学习与SPH-FEM数值模拟的切坡建房易损性智能分析方法.在研究视角上,是对于切坡建房场景下易损性分级的“客观化”突破,在研究方法上,以分析数值模拟所设计工况来弥补水平坡脚距离数据分布过于集中的短板.与现有研究成果相比,本研究的优势在于其综合性与互补性.如吴越等(2011)以滑坡体冲击冲量为致灾强度指标、建筑物整体抗剪力为抗灾性能指标,推导出承灾体易损性评估模型,但其在应用中参数

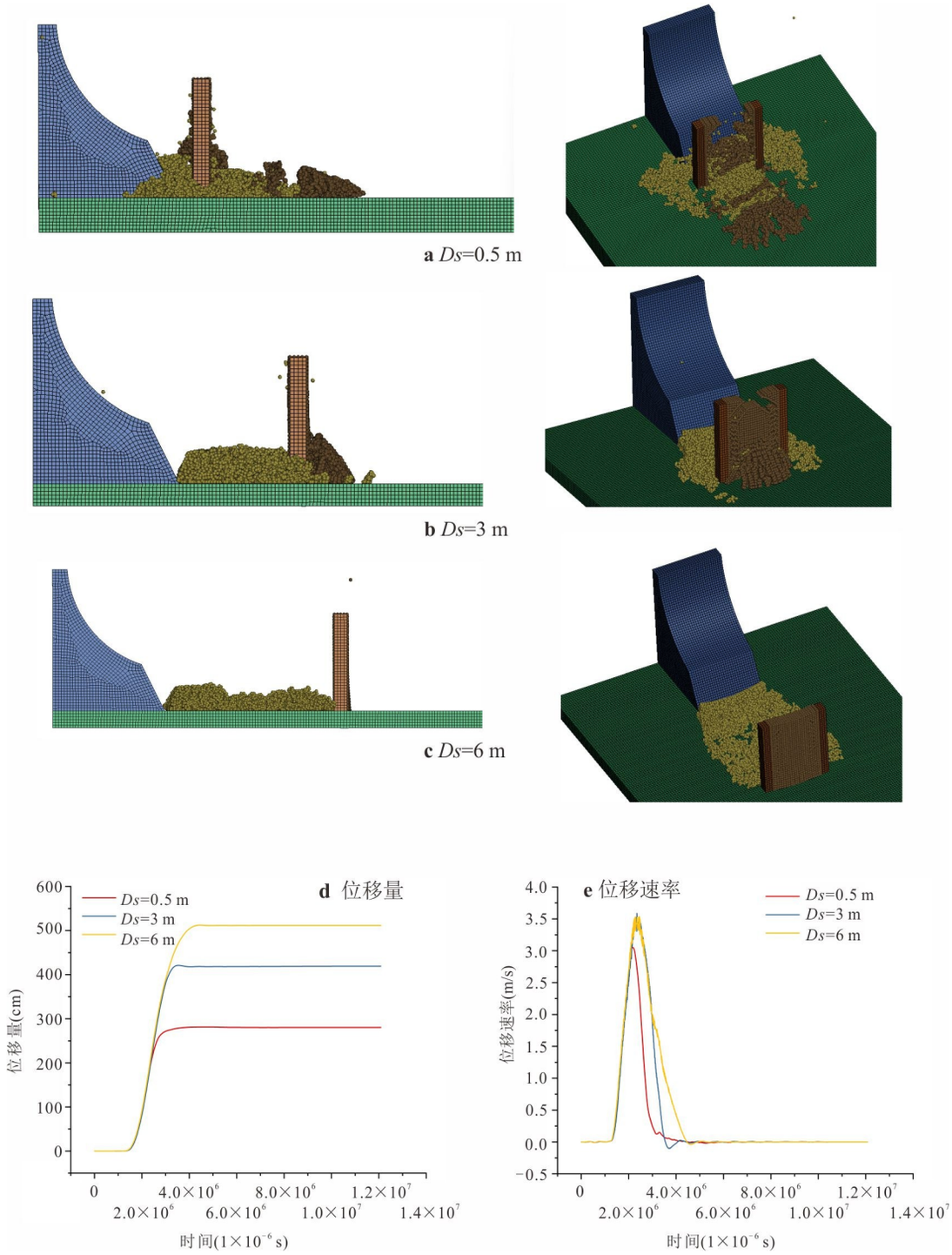

图 11 坡脚与墙体不同距离下滑(墙)体堆积形态及位移、速率曲线

Fig. 11 Accumulation morphology, displacement and velocity curves of the landslide mass under different distances between the slope toe and the wall

难以精确获取.本研究改进了这一方法,利用PCA-KMeans算法从数据中识别关键因子,切坡高度、挡土墙高度/坡脚距离实质上是上述文献中物理概念的可测量变量.另外,通过小提琴图(图7)显示,红色簇与绿色簇的坡脚距离分布和均值相近,但其易损性差异大.于是利用数值模/触或不接触,这表明*Ds*是具有临界效应的变量,但其数据分布特征难以在统计中直观发现.而PCA-KMeans算法却可以识别到这种非线性关系,并且这种数据挖掘与数值模拟的创新融合,是本文方法相较于单一类型方法的

显著优势.今后可构建更精细的岩土体与建筑结构数值仿真模型,进一步提升数值模拟的真实性.当然,上述方法也存在一定局限性,如采用的PCA-KMeans方法较依赖输入数据的准确性.李冠宇等(2021)指出聚类分析法虽然能规避人为主观赋权的影响,但其效果高度依赖于原始数据的准确性与因子选取的全面性.例如,由于有无有效防护这一关键因子无直接数据,文中采用挡土墙高度/坡脚距离这一构造变量进行替代.当85%的样本无挡土墙时,此构造变量在大量样本中同样会和挡土墙高度一样变为零,仅仅适合处理有挡墙的情况.于是当PCA寻找最大方差方向时,pca1依然会将有挡墙和无挡墙的样本尽可能地分开,使pca1主要承载了切坡高度与无挡墙等信息,而非均衡的易损性因子信息,这就导致PCA-KMeans方法的准确性会受制于原生的样本信息.关于SPH-FEM数值模拟的有效性,本文也从基于典型破坏模式的物理参数校准和模拟结果与实际案例的对比验证两个方面进行了验证.前者体现在动摩擦系数的校准上,后者在结果分析中,将不同水平坡脚距离(Ds)下的模拟破坏形态(如墙体颗粒的离散、脱落)与引证的多个真实切坡建房滑坡照片(如图8,图12)进行比对.模型能成功捕捉从"Ds=0.5 m时墙体严重破坏"到"Ds=3 m时墙体局部致灾"的梯度破坏特征,证明了其再现宏观灾害现象的能力.

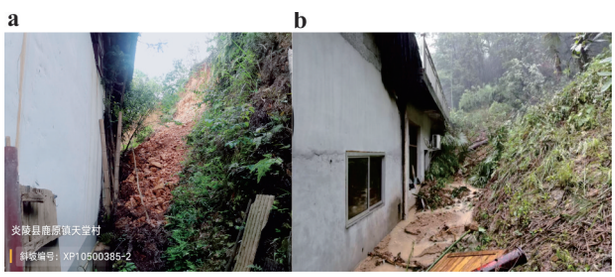

图12　湖南炎陵县切坡建房滑坡实例

Fig. 12　Cases of landslide induced by cutting slope construction in Yanling County, Hunan Province

a.案例一;b.案例二

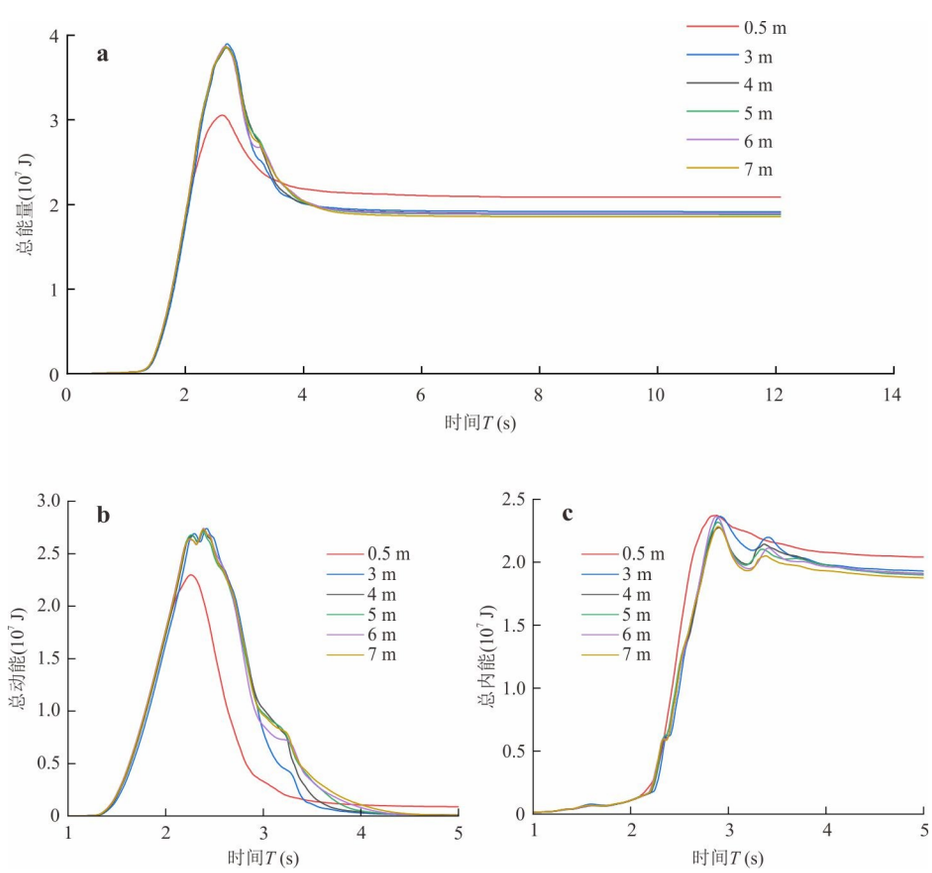

图13　滑体颗粒总能量、总动能及总内能曲线

Fig. 13　Curves of total energy, total kinetic energy, and total internal energy of all landslide particles

a.滑体总能量曲线;b.滑体总动能曲线;c.滑体总内能曲线

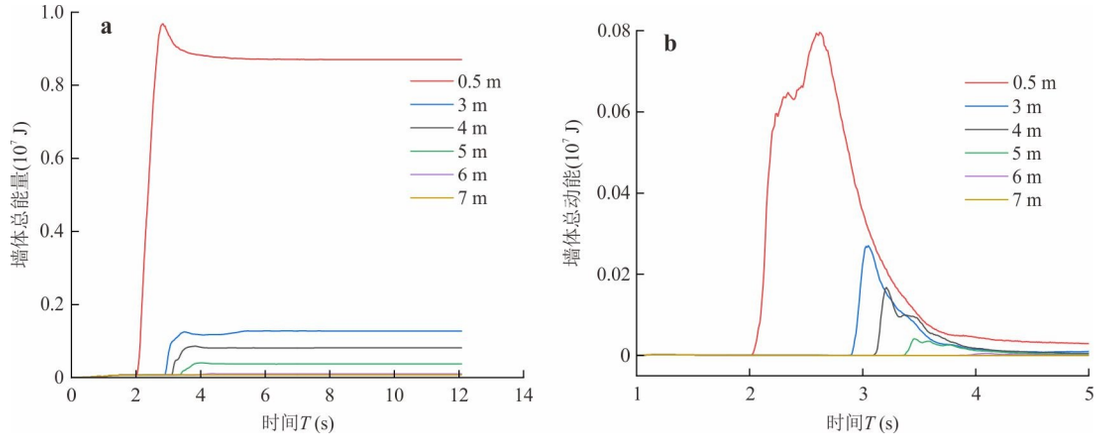

图 14 墙体颗粒总能量与总动能曲线

Fig. 14 Curves of total energy and total kinetic energy of all wall particles

a. 墙体总能量曲线；b. 墙体总动能曲线

5 结论

(1)切坡建房例的房屋结构以砖混结构为主，房屋层数多为 2 层，且 85% 的样本无挡墙防护；策源乡与下村乡的中易损切坡建房例显著高于其他乡镇，需重点关注.

(2)切坡高度和挡土墙高度/坡脚距离是易损性分级重要性排序前两位因子，切坡高是易损性分级的显性主导因子，而坡脚距离在直观统计中相对隐性.混淆矩阵表明红色簇和中易损组的吻合度高，绿色簇相对于低易损组存在漏判.基于红色簇的 pca1 累计百分比曲线，可分别按 pca1≤0.5、pca1≤1、pca1≤2 三种阈值条件将中易损切坡建房例进一步划分以分级风控.

(3)考虑自建房类型为砖混结构，切坡滑坡 SPH-FEM 数值模型摩擦系数 Fs 取 0.2，滑坡体平均位移量接近实际房屋进深尺寸，可反映切坡建房例一层墙体破坏而梁柱不破坏的实际情况.坡脚距离 Ds≤0.5 m 时，滑体动能大量传递至墙体，导致严重破坏，此时滑体总动能峰值最低，而墙体总动能峰值最高，随 Ds 增大，墙体能量吸收递减，灾害强度显著降低；Ds≥5 m 时，所有滑体颗粒平均位移峰值仅刚接触墙体；进一步 Ds≥6 m 时，产生最大位移的滑体颗粒几乎不使墙体产生变形，可视为安全坡脚距离.

References

Agliata, R., Bortone, A., Mollo, L., 2021. Indicator-Based Approach for the Assessment of Intrinsic Physical Vulnerability of the Built Environment to Hydro-Meteorological Hazards: Review of Indicators and Example of Parameters Selection for a Sample Area. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58: 102199. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102199

Cui, G. Y., Yang, Y., Ma, C. C., et al., 2025. Analysis of Scour Vulnerability for Bridge Lifetime Based on Hydrological Uncertainty. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 56(6): 184－198(in Chinese with English abstract).

Du, X. X., Fang, H., Cao, J. W., 2020. Analysis of Slope Stability under the Condition of Cutting for House-Building. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 31(5): 40－47(in Chinese with English abstract).

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., et al., 2008. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Engineering Geology*, 102(3－4): 85－98. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2008.03.022

Feng, W. K., Zhao, J. C., Yi, X. Y., et al., 2025. Characteristics and Drivers of Clustered Landslides Induced by Extreme Rainstorm on June 16 in Fujian-Guangdong-Jiangxi Junction Area. *Earth Science*, 50(10): 4111－4124(in Chinese with English abstract).

Hollenstein, K., 2005. Reconsidering the Risk Assessment Concept: Standardizing the Impact Description as a Building Block for Vulnerability Assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3): 301－307. https://doi.org/10.5194/nhess-5-301-2005

Kang, X., Wang, S., Wu, W., et al., 2022. Residual State Rate Effects of Shear-Zone Soil Regulating Slow-to-Fast Transition of Catastrophic Landslides. *Engineering*

Geology, 304: 106692. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106692

Kang, X., Wang, S., Wu, W., et al., 2025. Residual-State Mechanical Behavior of Soil-Rock Interface within Landslide Shear Zones. *Acta Geotechnica*, 20(5): 2221—2236. https://doi.org/10.1007/s11440-025-02563-5

Li, B., Bai, Z. W., Sun, R., et al., 2025. Economic Loss Assessment of Upstream Inundation under Time-Varying Water Levels in Landslide-Dammed Lakes: A Case Study of Tangjiashan Dammed Lake. *Earth Science*, 50(10): 3873—3884 (in Chinese with English abstract).

Li, G. Y., Li, P., Guo, M., et al., 2021. Application of Cluster Analysis Method in Geological Hazard Risk Assessment: A Case Study of Hancheng City. *Science Technology and Engineering*, 21(25): 10629—10638(in Chinese with English abstract).

Li, Z. H., Nadim, F., Huang, H. W., et al., 2010. Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards. *Landslides*, 7(2): 125—134. https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3

Lian, Z. P., Li, Y. N., Liu, L., et al., 2022. Quantitative Evaluation of Geohazard Risk Based on ArcGIS in Yuan'an County, Hubei Province. *South China Geology*, 38(4): 680—688(in Chinese with English abstract).

Luo, Z. Q., Liu, L. L., Zeng, Z. X., et al., 2025. Quantitative Risk Assessment of Solid Waste Landfill Slope Instability-Induced Disasters Based on Depth-Integrated Method and Uncertainty Analysis: A Case Study of Shenzhen's "12•20" Guangming Landslide. *Earth Science*, 50(12): 4984—4999(in Chinese with English abstract).

Ministry of Housing and Urban-Rural Development Disaster Prevention Research Centre, 2018. Building Disaster Prevention Yearbook. China Architecture & Building Press, Beijing (in Chinese).

Mo, S. Y., Tian, L. R., Gu, S. L., 2024. Study on SPH Method-Based Numerical Simulation of Overland Flow. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 55(10): 124—136(in Chinese with English abstract).

Papathoma-Köhle, M., Neuhäuser, B., Ratzinger, K., et al., 2007. Elements at Risk as a Framework for Assessing the Vulnerability of Communities to Landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(6): 765—779. https://doi.org/10.5194/nhess-7-765-2007

Peng, L., Xu, S. N., Hou, J. W., et al., 2015. Quantitative Risk Analysis for Landslides: The Case of the Three Gorges Area, China. *Landslides*, 12(5): 943—960. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0518-5

Peng, M., Wang, Y., Ma, C. Y., et al., 2025. Review of Risk Assessment and Prevention for Valley Landslide Disaster Ch. *Earth Science*, 50(10): 3723—3760 (in Chinese with English abstract).

Wang, F., Yin, K. L., Gui, L., et al., 2018. Risk Analysis on Individual Reservoir Bank Landslide and Its Generated Wave. *Earth Science*, 43(3): 899—909(in Chinese with English abstract).

Wang, R. J., Wang, S., Li, D. Q., et al., 2025. Elevated Pore-Water Pressure Regulating Dynamic Liquefaction of a Flow-Like Landslide in Loess. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 130(8): e2025JF008318. https://doi.org/10.1029/2025jf008318

Wei, C. H., Wen, H. T., Liao, L. P., et al., 2017. Failure Characteristics and Prevention Measures of Granite Residual Soil Slope in the Southeast of Guangxi Province, China. *Earth and Environment*, 45(5): 576—586(in Chinese with English abstract).

Wu, S. S., Zou, G. J., Xiao, C. Y., et al., 2025. Landslide Features and Prevention under the Effect of Housing *via* Slope-Cutting in the Granite Area, Yanling County, Hunan Province. *South China Geology*, 41(3): 633—643 (in Chinese with English abstract).

Wu, Y., Liu, D. S., Lu, X., et al., 2011. Vulnerability Evaluation Model of Disaster-Bearing Body and Risk Index of Landslide Disaster. *Rock and Soil Mechanics*, 32(8): 2487—2492, 2499(in Chinese with English abstract).

Xu, F. G., Ou, Y. H., Wang, F., et al., 2023. Risk Assessment of Geological Disasters in Beichuan County after the Wenchuan Earthquake Based on ArcGIS. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(11): 416. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03421-y

Xu, Q., Zhang, Y. F., Chen, W., 2010. Vulnerability Assessment of Geo-Hazards in Southwest Mountainous Area—Danba County, Sichuan, China as an Example. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 729—738(in Chinese with English abstract).

Xu, Y., Lian, Z. P., Guo, C. Y., 2018. Risk Study on Quantitative Risk Analysis of Rainfall Landslide: A Case Study of Ganba Landslide in Xuanen County. *Geology and Mineral Resources of South China*, 34(4): 294—301 (in Chinese with English abstract).

Yang, L. Q., Chen, A. B., Gao, H. Z., et al., 2014. Study on Vulnerability Assessment of Engineering Geological Disasters in Tailings Pond—Taking Yunnan Nickel Tailings Pond in Southeast Yunnan as an Example. *Bulletin*

of Soil and Water Conservation, 34(1): 290－295(in Chinese with English abstract).

Yin, Y. P., 2013. Thoughts on Strengthening the Prevention and Control of Geological Disasters in the Process of Urbanization. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 24(4): 5－8(in Chinese with English abstract).

Zeng, T. R., Yin, K. L., Gui, L., et al., 2023. Quantitative Vulnerability Analysis of Buildings Based on Landslide Intensity Prediction. *Earth Science*, 48(5): 1807－1824 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L., Zhang, J. J., 2000. The Theory and Method of Risk Zonation of Geo-Hazard. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 11(4): 323－328(in Chinese with English abstract).

Zhang, S., Zhang, L. M., Li, X. Y., et al., 2018. Physical Vulnerability Models for Assessing Building Damage by Debris Flows. *Engineering Geology*, 247: 145－158. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.017

Zhang, Z., Zhou, C. B., Remennikov, A., et al., 2021. Dynamic Response and Safety Control of Civil Air Defense Tunnel under Excavation Blasting of Subway Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 112: 103879. https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103879

中文参考文献

崔广永, 杨勇, 马成城, 等, 2025. 基于水文不确定性的桥梁全寿命周期冲刷易损性分析. 水利水电技术(中英文), 56(6): 184－198.

杜显祥, 房浩, 曹佳文, 2020. 建房切坡条件下边坡稳定性分析. 中国地质灾害与防治学报, 31(5): 40－47.

冯文凯, 赵家琛, 易小宇, 等, 2025. 闽粤赣边区“6•16”强降雨诱发群发滑坡特征与驱动因素. 地球科学, 50(10): 4111－4124.

李博, 白泽文, 孙蕊, 等, 2025. 考虑时变水位的堰塞坝上游淹没经济损失分析: 以唐家山堰塞坝为例. 地球科学, 50(10): 3873－3884.

李冠宇, 李鹏, 郭敏, 等, 2021. 基于聚类分析法的地质灾害风险评价: 以韩城市为例. 科学技术与工程, 21(25): 10629－10638.

连志鹏, 厉一宁, 刘磊, 等, 2022. 基于ArcGIS的湖北省远安县地质灾害风险定量评价. 华南地质, 38(4): 680－688.

罗紫琪, 刘磊磊, 曾志雄, 等, 2025. 基于深度积分法和不确定性分析的固废堆填土边坡失稳致灾风险定量评价: 以深圳“12•20”光明滑坡为例. 地球科学, 50(12): 4984－4999.

莫诗玧, 田丽蓉, 顾声龙, 2024. 基于光滑粒子数值方法的坡面水动力过程模拟研究. 水利水电技术(中英文), 55(10): 124－136.

彭铭, 王悦, 马晨议, 等, 2025. 河谷滑坡灾害链风险评估及防控研究进展. 地球科学, 50(10): 3723－3760.

王芳, 殷坤龙, 桂蕾, 等, 2018. 单体库岸滑坡及其次生涌浪灾害风险分析. 地球科学, 43(3): 899－909.

韦朝华, 文海涛, 廖丽萍, 等, 2017. 桂东南花岗岩残坡积土边坡破坏特征与防治对策. 地球与环境, 45(5): 576－586.

吴爽爽, 邹光均, 肖朝阳, 等, 2025. 切坡建房作用下湖南炎陵县花岗岩分布区滑坡致灾特征及防治. 华南地质, 41(3): 633－643.

吴越, 刘东升, 陆新, 等, 2011. 承灾体易损性评估模型与滑坡灾害风险度指标. 岩土力学, 32(8): 2487－2492, 2499.

许强, 张一凡, 陈伟, 2010. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法: 以四川省丹巴县城为例. 地质通报, 29(5): 729－738.

徐勇, 连志鹏, 郭春迎, 2018. 降雨型滑坡定量风险评价研究: 以宣恩县干坝滑坡为例. 华南地质与矿产, 34(4): 294－301.

杨良权, 陈爱兵, 高焕芝, 等, 2014. 尾矿库工程地质灾害易损性评价研究: 以滇东南云锡尾矿库为例. 水土保持通报, 34(1): 290－295.

殷跃平, 2013. 加强城镇化进程中地质灾害防治工作的思考. 中国地质灾害与防治学报, 24(4): 5－8.

曾韬睿, 殷坤龙, 桂蕾, 等, 2023. 基于滑坡致灾强度预测的建筑物易损性定量评价. 地球科学, 48(5): 1807－1824.

张梁, 张建军, 2000. 地质灾害风险区划理论与方法. 地质灾害与环境保护, 11(4): 323－328.

住房和城乡建设部防灾研究中心, 2018. 建筑防灾年鉴—2017. 北京: 中国建筑工业出版社.