https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.276

基于伪随机对照与倾向得分匹配的切坡建房滑坡致灾效应定量研究

肖正辉,李 沁,肖巍峰,罗路广*,曹运江,唐 豪

湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院,湖南湘潭 411201

摘 要: 切坡建房是南方山区滑坡发生的重要驱动因素,但很难在大范围尺度上单独衡量它的影响有多大.以湖南省资兴市735处滑坡和5 683处切坡点为研究对象,借鉴随机对照试验理念,构建"伪随机对照－多尺度缓冲－统计推断"分析框架,旨在定量评估切坡建房活动与滑坡发生之间的关联强度及空间效应.通过限定条件随机化方法筛选出地形地质相似的对照样本,在50 m、100 m、200 m三级缓冲区提取切坡暴露指标,结合独立样本检验、剂量－反应建模和倾向得分匹配技术控制混杂因素.结果表明:控制协变量后,滑坡点50 m范围内切坡密度较对照点高出307%(Cohen's d=1.52),倾向得分匹配估值的净关联效应量为9.52处/km^2(95%CI: 8.73～10.31);且效果随缓冲距离的增加逐步减弱(50 m→200 m: d=1.52→0.87);剂量－反应关系表现出双阈值特征,切坡密度12处/km^{2}时滑坡概率约为40%,超20处/km^{2}时概率迅速升至75%;陡坡段(25°～35°)和砂页岩区的条件处理效应分别为11.7处/km^{2}和12.3处/km^2,砂页岩×陡坡组合效应最强(15.8处/km^2).研究定量揭示了切坡建房与滑坡发育的空间伴生关系及风险放大效应,为山区建设管控提供了数据支撑.

关键词: 滑坡;切坡建房;因果推断;倾向得分匹配;剂量－反应关系;工程地质.

中图分类号: P694 **文章编号:** 1000－2383(2026)10－3655－13 **收稿日期:** 2026-06-11

Quantitative Study on Landslide-Inducing Effect of Cut-Slope Housing Based on Pseudo-Randomized Control and Propensity Score Matching

Xiao Zhenghui, Li Qin, Xiao Weifeng, Luo Luguang*, Cao Yunjiang, Tang Hao

School of Earth Sciences and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, *China*

Abstract: Cut-slope building construction is a significant driving factor for landslides in mountainous areas of southern China, but it is challenging to isolate its impact at large spatial scales. This study investigates 735 landslides and 5 683 cut-slope sites in Zixing City, Hunan Province. Drawing on the concept of randomized controlled trials, it constructed a causal analysis framework of "pseudo-randomized control, multi-scale buffering, and statistical inference" to quantitatively assess the strength of the association between slope-cutting activities for residential construction and landslide occurrence, as well as their spatial effects. A conditional randomization method was applied to select control samples with similar topographic and geological conditions. Cut-slope exposure indicators were extracted at three buffer zones (50 m, 100 m, and 200 m). Confounding factors were controlled using independent

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 42530710).

作者简介: 肖正辉(1973－),男,博士,教授,主要从事环境地质、地质灾害等方面的教学与研究工作.E-mail:xiaozhenghui2003@163.com

* **通讯作者:** 罗路广(1992－),男,博士,讲师,主要从事地质灾害、工程边坡稳定性评价的研究工作. E-mail: luolgcdut@163.com

引用格式: 肖正辉,李沁,肖巍峰,罗路广,曹运江,唐豪,2026.基于伪随机对照与倾向得分匹配的切坡建房滑坡致灾效应定量研究.地球科学,51(10):3655－3667.

Citation: Xiao Zhenghui, Li Qin, Xiao Weifeng, Luo Luguang, Cao Yunjiang, Tang Hao, 2026. Quantitative Study on Landslide-Inducing Effect of Cut-Slope Housing Based on Pseudo-Randomized Control and Propensity Score Matching. *Earth Science*, 51(10): 3655－3667.

sample t-tests, dose-response modeling, and propensity score matching. Results show that after controlling for covariates, the cut-slope density within 50 m of landslide sites was 307% higher than that of control sites (Cohen's d=1.52), and the net association effect estimated using propensity score matching was 9.52 sites/km^2 (95% CI: 8.73−10.31). This effect gradually weakened as buffer distance increased (50 m→200 m: d=1.52→0.87). The dose-response relationship exhibited a dual-threshold characteristic: when cut-slope density reached 12 sites/km^2, the landslide probability was approximately 40%, and when density exceeded 20 sites/km^2, the probability rapidly rose to 75%. In steep slope areas (25°−35°) and sandstone-shale zones, the conditional treatment effects were 11.7 sites/km^2 and 12.3 sites/km^2, respectively, with the strongest effect observed in the combination of sandstone-shale and steep slopes (15.8 sites/km^2). The study quantitatively reveals the spatial association between slope-cutting activities for residential construction and landslide development, as well as their risk-amplification effect, providing data support for construction management in mountainous areas.

Key words: landslide; slope-cutting housing; causal inference; propensity score matching; dose-response relationship; engineering geology.

0 引言

滑坡是山区常见的地质灾害类型,其发生受地形地貌、地质构造和降雨等自然因素控制(Reichenbach *et al.*, 2018; 黄发明等, 2024; Xiao *et al.*, 2026a),但人类工程活动的影响正日益凸显(Schlögel *et al.*, 2015; 仉文岗等, 2023; Ma *et al.*, 2024).在我国南方山区,切坡建房现象普遍存在,即居民通过开挖坡脚或削减坡体修建房屋,改变了原有边坡的受力平衡,可能显著提升滑坡风险(冯文凯等,2025).切坡建房通过开挖、削坡等方式改造自然坡面以获得建设用地,这一过程直接破坏原有坡体结构,改变地表径流和地下水渗流路径,在坡脚增加荷载,并产生振动扰动,从多个方面降低边坡稳定性(曹春山等,2016;韦文智等,2022).在中国快速城镇化背景下,山区农村存在大量无序的切坡建房活动,由于缺乏必要的工程设计和防护措施,这一问题日益凸显.

尽管切坡建房的致灾机理已有较多讨论,但定量评估其致灾效应仍面临诸多挑战.现有研究主要采用两类方法:一是案例分析或数值模拟(赵飞等,2025),这类方法难以从区域尺度揭示统计规律;二是将切坡建房作为因子纳入滑坡易发性评价模型(Reichenbach *et al.*, 2018;曹攀等,2025),但无法有效隔离其独立效应.后者的关键问题在于混淆偏差:切坡建房往往发生在地形陡峭、地质条件较差的区域,观察到的滑坡高发率既可能源于切坡建房本身,也可能源于这些区域固有的自然易发性(Imbens and Rubin,2015).如何在区域尺度上隔离切坡建房的净效应,成为当前研究的关键难题.

因果推断方法为解决上述问题提供了新思路.随机对照试验(randomized controlled trial, RCT)通过随机分组确保处理组与对照组的可比性,被视为因果推断的金标准(李秋彤等,2024;孙澄宇等,2024).然而在自然灾害研究中,真实的随机试验通常不可行,需要借鉴RCT思想构建准实验设计.考虑到切坡建房对滑坡的影响具有显著的空间局域性,其影响范围可能到数十至数百米(黄发明等,2025),传统的全局统计方法难以精准捕捉这种邻近效应.缓冲区分析通过构建滑坡点周边的多尺度缓冲区,直接统计局部范围内的切坡建房密度,可以更准确地刻画两者的空间关联(孙澄宇等,2024;吴爽爽等,2026).同时,通过随机生成对照点并筛选其自然条件,可以模拟RCT的随机分组过程,使滑坡点与对照点在宏观地形条件上具有可比性,从而识别切坡建房的空间聚集效应(桂先刚等,2020).

本研究选取湖南省资兴市作为研究区.该区域位于罗霄山脉西麓,属山地丘陵过渡带,根据当地自然资源部门记录,2016—2025年间共发生滑坡735起.基于高分辨率遥感影像解译和实地调查,本研究获得5 683处切坡建房点位数据.研究采用"缓冲区−随机对照"分析框架,具体包括:(1)为每个滑坡点建立50 m、100 m、200 m三级缓冲区,分别对应切坡开挖的直接扰动范围、建筑荷载和渗流影响范围、地表径流汇集范围(徐卫亚等,2020;李旭东等,2021;何晓锐等,2022),统计各缓冲区内的切坡建房数量、平均切坡高度等指标;(2)采用分层随机抽样生成735个对照点,限定条件为坡度>5°、距已知滑坡点>100 m、排除水体和城镇建成区,确保对照点位于潜在滑坡区但实际未发生滑坡;(3)采用独立样本t检验和Mann-Whitney U检验对比滑坡点与对照点的切坡建房密度差异,计算效应量(Co-

hen's *d*)并通过置换检验验证稳健性;(4)按坡度、岩性、缓冲区半径分层分析,识别高风险组合情景.

本研究将随机对照试验思想引入滑坡致灾因子研究,通过缓冲区对照设计构建空间因果推断框架,旨在从区域尺度上量化切坡建房活动与滑坡发生的空间关联强度.研究聚焦两个核心问题:在排除自然地形条件影响后,滑坡点周边的切坡建房密度是否显著高于非滑坡区域?这种差异在不同地质环境条件下有何变化规律?基于严格的统计检验,研究将定量刻画切坡建房的空间聚集效应,为山区建设活动管控提供量化依据,同时为区域尺度的地质灾害准因果推断分析提供新方法.

1　研究区及数据

1.1　研究区概况

资兴市位于湖南省东南部(25°34′~26°18′N,113°07′~113°44′E),总面积2 747 km²,地处罗霄山脉西麓与湘南丘陵过渡带(图1).研究区以低山丘陵为主,海拔92~1 711 m,东部低山区相对高差300~800 m,坡度25°~45°;中西部丘陵区坡度15°~30°.属中亚热带季风湿润气候,年均降雨量1 450 mm,4~6月暴雨频发.地质构造上,研究区位于扬子板块与华夏板块交接带,断裂发育.出露地层以泥盆系—石炭系碎屑岩和侏罗系红层为主,风化强烈,残坡积层厚2~8 m.近20 a快速城镇化导致削坡建房现象普遍,切坡高度多为3~10 m,缺乏工程防护.

1.2　数据来源与类型

(1)滑坡清单:来源于湖南省自然资源事务中心地质灾害数据库(2016—2025年),包含735处滑坡记录.滑坡以浅层土质滑坡为主(86.8%),小型滑坡占88.6%.

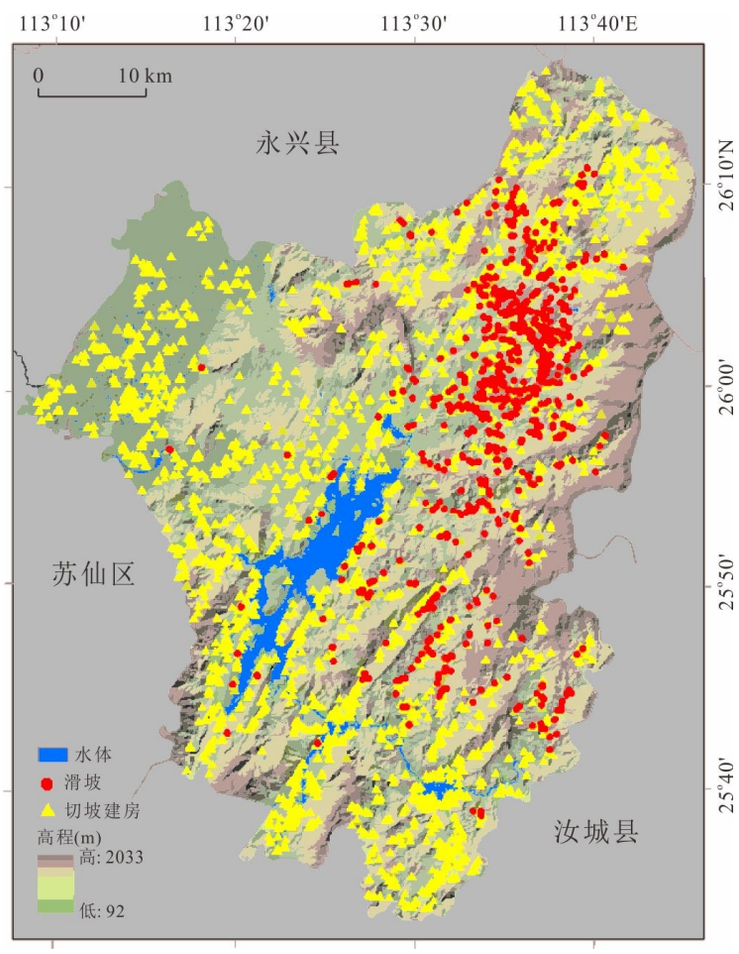

图1　研究区切坡建房与滑坡的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of landslides and slope-cutting housing in the study area

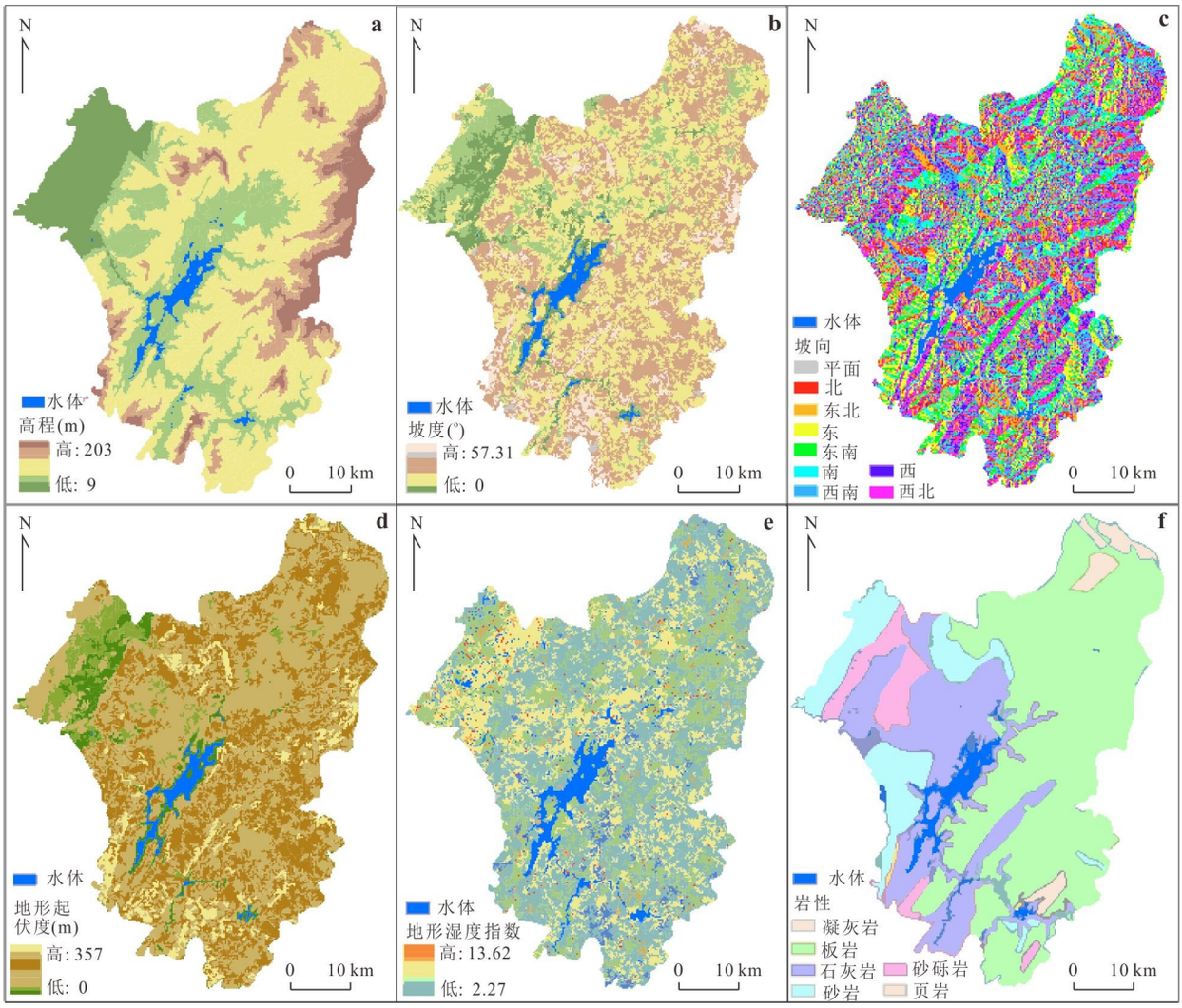

图 2 地形地质影响因子

Fig. 2 Topographical and geological influencing factors

(2) 地形地质数据：采用 ALOS PALSAR 12.5 m DEM 提取高程、坡度、坡向、地形起伏度和地形湿度指数，岩性数据源于 1∶200 000 区域地质图(图 2).

(3) 切坡建房数据：来源于湖南省地质院(省矿调所) 2021 年在资兴市开展的 1∶1 万地质灾害调查与风险评价野外工作. 该项目调查斜坡单元 6 123 个，记录切坡建房 5 683 户(含部分调查后新增补录点位)，形成了完整的市域精细化风险成果. 本研究从中提取切坡建房点 5 683 处. 切坡高度通过野外实测获得，其中坡高 5 m 以下的占比 59.4%. 为尽量消除时间错配带来的影响，本研究充分利用了 1∶1 万地质灾害调查数据中所记录的滑坡发生时间和切坡建房时间等信息. 具体而言：对于 2016—2019 年期间发生的滑坡，结合早期 Google Earth 影像，排除滑坡发生后因灾后重建而新开挖的切坡建房；对于 2020 年及以后发生的滑坡，则对比滑坡前后影像，仅保留在滑坡前已存在的切坡建房.

2 研究方法

为量化切坡建房对滑坡发生的独立效应，本研究构建了“伪随机对照－多尺度缓冲－统计推断－空间验证”四位一体的分析框架. 该框架旨在模拟随机对照试验的逻辑，通过系统控制地形、地质等固有混淆因素，以评估历史滑坡点周边切坡建房活动的聚集程度. 具体流程见图 3.

2.1 伪随机对照设计

借鉴病例－对照研究思想，将历史滑坡点设为“病例组”，并基于严格约束条件随机生成未发生滑坡的斜坡单元点作为“对照组”. 以“切坡建房密度”

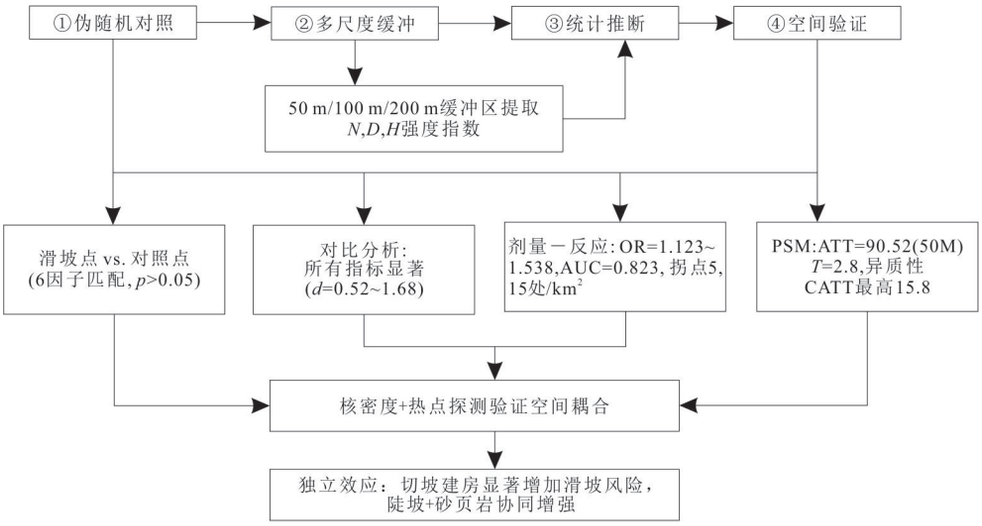

图 3　技术路线图

Fig. 3　Technical workflow

为主要暴露指标,通过比较两组周边暴露水平差异,评估其空间关联.为控制地形、地质差异引入的选择偏倚,对照点仅在坡度大于15°、距最近滑坡点大于100 m、且排除水体与建成区的区域内,按岩性进行分层抽样(n=735).

这一设计确保了滑坡点与对照点在关键的地形地质背景上具有可比性.匹配验证显示,两组点在6个地形地质因子上均无显著差异:地形因子方面,高程(385±142 m, 392±138 m, p=0.52)、坡度(27.9°±9.5°, 28.4°±9.2°, p=0.38)、坡向(采用圆形统计, p=0.61)、地形起伏度(138±71 m, 142±68 m, p=0.44)和TWI(5.6±2.3, 5.8±2.1, p=0.29)均表现出良好的平衡性;岩性分布经χ^2检验亦无显著差异(χ^2=4.17, df=5, p=0.53),两组样本在沉积岩(砂岩32%,34%;页岩18%,17%;石灰岩15%,14%)、变质岩(板岩12%,13%)和岩浆岩(花岗岩16%,15%;流纹岩7%,7%)等主要岩性类别上比例相近.

为进一步量化暴露效应并控制剩余混杂,在上述设计基础上引入了倾向得分匹配.采用1∶1最近邻匹配,卡尺值设为0.05,无放回.最终成功配对698对样本,37个倾向得分较高的滑坡点(多位于极陡坡或全风化岩体区)被剔除.匹配后,所有协变量的标准化偏差绝对值均降至5%以下,显著优于匹配前,极大改善了平衡性.这表明PSM有效修正了伪随机设计中可能残留的偏差,为估算切坡密度的"净效应"奠定了更稳健的分析基础.

空间自相关可能轻微低估传统检验标准误,仍补充了基于空间随机置换的敏感性检验.结果表明,即使考虑空间依赖性,关键变量(如50 m缓冲区切坡密度差异)的显著性仍远低于0.01阈值,证实了核心结论的稳健性.从工程地质角度看,此匹配设计剥离了高程、坡度、岩性等静态背景因素影响,得以单独考察"切坡建房"这一人为扰动对斜坡稳定性的作用.这提供了"准实验"条件,有助于识别切坡活动与滑坡事件间的统计关联,并为理解其内在物理机制(如破坏坡脚应力平衡、加速风化)奠定统计基础.

2.2　多尺度缓冲区表征切坡暴露强度

基于切坡扰动的距离衰减效应,设定50 m(直接扰动)、100 m(荷载与渗流)、200 m(区域累积效应)三级缓冲区,以定量表征在不同空间尺度上的切坡暴露强度.对每个缓冲区提取切坡点数量(N)、切坡密度(D=N/A)、平均切坡高度(H_avg)和切坡强度指数:

$$I_{\mathrm{cut}}=\sum_{i=1}^{N}\frac{H_i}{d_i+1}\ , \tag{1}$$

式中:H_i为第i个切坡点高度,d_i为该点距滑坡中心点距离.为避免距离为零时产生计算异常,分母统一加1.该指数通过距离加权融合了切坡的数量与高度信息,其物理意义近似于"切坡扰动对坡体的累积影响势",比单一密度或高度指标更能反映近源强扰动的力学特征.

2.3　统计推断:逐层剥离混淆因素的效应识别

本研究的统计推断分3步进行,旨在层层递进地识别切坡建房的独立效应.

第1步：对比分析.采用独立样本t检验和Mann-Whitney U检验比较滑坡点与对照点缓冲区内切坡建房指标差异，显著性水平$\alpha=0.05$.效应量采用Cohen′s d衡量：

$$d=\frac{X_{\text{landslide}}-X_{\text{control}}}{S_{\text{pooled}}}, \tag{2}$$

式中：$X_{\text{landslide}}$为滑坡点组在某指标上的样本均值，X_{control}为对照点组在同一指标上的样本均值，S_{pooled}为合并标准差.

第2步：剂量－反应关系.构建二元逻辑回归模型，因变量为滑坡发生与否(1/0)，自变量包括切坡密度、切坡高度、切坡强度指数及地形地质因子.模型形式：

$$\log\left(\frac{P}{1-P}\right)=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i X_i. \tag{3}$$

采用逐步回归(准入$p<0.05$)和AIC准则筛选变量.模型诊断包括VIF检验(多重共线性)、Hosmer-Lemeshow检验(拟合优度)和ROC曲线(预测能力).

第3步：倾向得分匹配.为进一步控制混淆，采用倾向得分匹配(propensity score matching, PSM)重新配对样本.通过Logistic回归估计倾向得分$e(X)=P($滑坡$=1|X)$，采用高程、坡度、坡向、地形起伏度、TWI和岩性6个重要性最高的静态地形地质因子作为协变量(Xiao *et al.*, 2026b).采用最近邻匹配(1∶1，卡尺值0.05)，评估匹配后协变量标准化偏差(<10%为良好).计算平均处理效应(ATT)：

$$ATT=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i^{\text{landslide}}-Y_i^{\text{control}}\right), \tag{4}$$

式中，$Y_i^{\text{landslide}}$为第i对中滑坡点的结局变量值，Y_i^{control}为第i对中匹配对照点的结局变量值.采用自助法(1 000次重抽样)估计95%置信区间.为避免“切坡－滑坡”时序倒置这一关键混淆，通过多期遥感影像初步验证，确认大多数切坡点形成于滑坡发生之前.此外，为量化不同环境背景下的效应差异，还计算了条件平均处理效应(CATT)，以评估在特定岩性(如砂页岩)或坡度(如陡坡)条件下的交互效应与协同放大作用.

3 研究结果

基于前文的分析框架，在控制地形、岩性等固有地质背景的干扰后，本章从多尺度空间差异、非线性风险规律、净效应量化及条件异质性特征4个角度，逐步阐明切坡建房与滑坡发育之间的致灾规律.

3.1 滑坡点与对照点的对比分析

3.1.1 缓冲区尺度下的切坡暴露差异 三级缓冲区分析显示，滑坡点周边的切坡建房密度均显著高于对照点(表1).在50 m缓冲区内，滑坡点平均切坡密度为12.80±8.30处/km²，对照点为3.10±2.90处/km²，差异极显著($t=17.3$, $p<0.001$)；效应量Cohen's $d=1.52$，属于大效应.这一差异在100 m缓冲区依然极显著($t=14.2$, $p<0.001$, $d=1.29$)，但在200 m缓冲区效应有所减弱($t=8.9$, $p=0.012$, $d=0.87$)，效应量总体呈距离衰减趋势，但100 m处存在小幅波动.这一现象可能源于研究区切坡建房的空间集聚特征：居民点周边的切坡往往沿等高线或道路呈带状延伸，导致在50～150 m范围内切坡点出现相对聚集.因此，100 m缓冲区恰好覆盖了这些聚集区，捕获了更多的“同源切坡簇”，从而使得该尺度的效应量未能严格单调递减.对全部切坡点进行空间聚集度计算，研究区切坡建房点全局Moran's $I=0.41$ ($p<0.001$)，表现为显著空间聚集；其中72.4%的切坡点位落在距离其他切坡点100 m范围以内，印证切坡簇多集中在50～150 m邻域，解释100 m缓冲区效应量的局部抬升.

Mann-Whitney U检验结果与参数检验基本一致(50 m：$Z=-16.84$, $p<0.001$；100 m：$Z=-13.57$, $p<0.001$；200 m：$Z=-8.32$, $p=0.015$)，证实差异不受数据分布影响.稳健性检验采用置换检验(10 000次重抽样)，观察统计量均位于置换分布的极端尾部(50 m和100 m：$p<0.001$；200 m：$p=0.013$)，排除了随机因素的影响.

3.1.2 切坡强度指数的差异放大效应 切坡强度指数同时考虑切坡数量、高度和距离衰减，能更精准刻画局部扰动强度.结果显示，该指数在50 m缓冲区的效应量($d=1.68$)显著高于单一指标(切坡密度$d=1.52$，切坡高度$d=0.98$)，表明复合指标能更有效识别高风险区域.滑坡点中有73.2%的样本切坡强度指数>2.0，而对照点中仅有8.6% ($\chi^2=542.3$, $p<0.001$).

3.1.3 分层分析结果 (1)按坡度分层.将样本分为中等坡度(15°～25°)、陡坡(25°～35°)和急坡(>35°)3组(表2).在陡坡组，滑坡点与对照点的切坡密度差异最大($\Delta=11.5$处/km², $d=1.78$)，而在中

表 1　不同缓冲区内切坡建房指标对比

Table 1　Indicator comparison of slope-cutting construction in different buffer zones

缓冲区半径(m)	指标	滑坡点(n=735)	对照点(n=735)	t值	p值	Cohen's d
50	切坡密度(处/km²)	12.80±8.30	3.10±2.90	17.3	<0.001	1.52
	平均切坡高度(m)	7.60±4.20	4.20±2.80	11.8	<0.001	0.98
	切坡强度指数	3.42±2.15	0.87±0.63	19.4	<0.001	1.68
100	切坡密度(处/km²)	9.70±7.10	3.50±3.40	14.2	<0.001	1.29
	平均切坡高度(m)	6.90±3.90	4.50±3.10	8.7	0.003	0.71
	切坡强度指数	2.18±1.82	0.92±0.76	12.1	<0.001	1.08
200	切坡密度(处/km²)	7.40±6.80	4.10±3.80	8.9	0.012	0.87
	平均切坡高度(m)	6.20±4.10	4.80±3.30	5.3	0.028	0.52
	切坡强度指数	1.53±1.47	0.98±0.85	6.4	0.041	0.61

表 2　不同坡度组切坡密度对比

Table 2　Comparison of slope-cutting density among different slope gradient groups

坡度组	滑坡点	对照点	差值	Cohen's d	p值
15°～25°(n=218)	8.9±5.2	1.7±1.3	7.2	1.21	<0.001
25°～35°(n=392)	13.8±6.9	2.3±1.8	11.5	1.78	0.004
>35°(n=125)	16.7±9.3	2.4±2.1	14.3	1.73	0.007

等坡度组差异相对较小(Δ=7.2处/km², d=1.21).急坡组虽然绝对密度差异大(Δ=14.3处/km²),但标准差较大导致效应量与陡坡组相当(d=1.73).这表明25°～35°坡段是切坡建房致灾风险最集中的区域.

(2)按岩性分层.砂页岩区的切坡密度差异最为显著(滑坡点15.2±7.8,对照点3.9±2.6, d=1.89),其次为板岩区(d=1.62)和花岗岩区(d=1.45).灰岩区虽然切坡密度整体较低,但滑坡点与对照点的相对差异依然明显(d=1.28, p<0.001).交互效应分析显示,砂页岩×陡坡组合的切坡密度差异最大(Δ=18.7处/km², d=2.13),证实了岩性与坡度对切坡致灾效应的协同增强作用.

3.2　剂量－反应关系

3.2.1　Logistic回归模型结果　逐步回归筛选出6个显著变量(表3).在控制地形地质因子后,切坡密度每增加1处/km²,滑坡发生风险增加12.3%(OR=1.123, 95%CI: 1.098～1.149);切坡强度指数每增加1单位,风险增加53.8%(OR=1.538, 95%CI: 1.412～1.676).地形因子中,坡度(OR=1.067)和地形起伏度(OR=1.003)显著正向影响滑坡发生,而TWI呈负向作用(OR=0.892),符合滑坡发生的地形水文条件.

模型诊断:AIC=1 247.3;Hosmer-Lemeshow χ^2=8.6(p=0.38,拟合良好);ROC曲线AUC=0.823(95%CI: 0.802～0.844),预测准确率78.6%.VIF均<3,不存在严重多重共线性.

3.2.2　剂量－反应曲线　以切坡密度为横轴、预测滑坡概率为纵轴,绘制剂量－反应曲线(图4).在0～5处/km²的低密度区间,滑坡概率增长缓慢(斜率0.015);5～15处/km²的中密度区间增速加快(斜率0.045);>15处/km²的高密度区呈指数增长(增长率0.08).敏感性分析显示,当切坡密度达到12处/km²时,滑坡概率约为40%;当密度超过20处/km²时,概率达到75%以上.曲线呈现明显的分段特征,在5处/km²和15处/km²附近存在两个拐点,分别标志着风险从缓慢累积转为加速增长、以及从线性增长转为指数增长的临界点.95%置信区间显示模型预测具有较高的统计可靠性.

值得强调的是,这两个关键阈值(12处/km²和20处/km²)并非单纯的统计拟合结果,而是具有明确的物理力学基础.12处/km²的"启动阈值",坡体原始强度储备(c、φ值)已显著耗竭,地下水渗流路径沿切坡后缘得以贯通,局部应力集中现象开始显现,标志着边坡从"亚稳定"状态向"加速失稳"阶段过渡;20处/km²的"破坏阈值",坡体内部的锁固段已基本失效,多处切坡相互连通形成贯穿性的潜在滑动面.一旦遭遇极端暴雨,极易诱发区域性群发性滑坡.

3.3　倾向得分匹配分析

3.3.1　匹配质量评估　倾向得分匹配后,滑坡点与对照点在6个协变量上的标准化偏差均降至5%以下(表4),远低于10%的良好匹配阈值.匹配前,坡度和地形起伏度的标准化偏差分别为15.3%和12.7%,匹配后降至3.2%和4.1%.倾向得分分布的

表 3 Logistic 回归模型系数

Table 3 Coefficients of logistic regression model

变量	系数β	标准差	Wald χ^2	p值	OR (95% CI)	VIF
切坡密度(处/km²)	0.116	0.011	112.4	<0.001	1.123 (1.098～1.149)	1.87
切坡强度指数	0.431	0.044	95.8	<0.001	1.538 (1.412～1.676)	2.14
坡度(°)	0.065	0.009	52.1	0.012	1.067 (1.048～1.086)	1.53
地形起伏度(m)	0.003	0.001	9.2	0.004	1.003 (1.001～1.005)	1.29
TWI	−0.114	0.032	12.6	0.003	0.892 (0.838～0.950)	1.18
岩性(砂页岩=1)	0.527	0.142	13.8	0.021	1.694 (1.282～2.239)	1.42

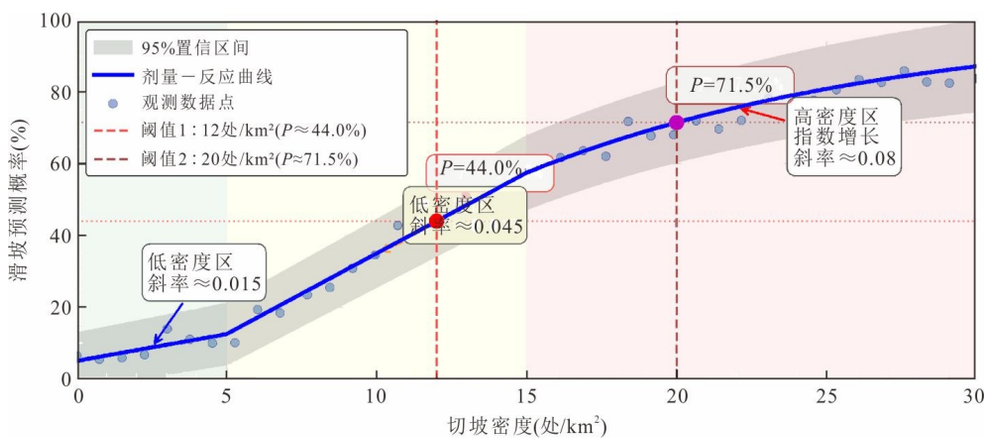

图 4 切坡密度与滑坡概率剂量反应关系

Fig. 4 Relationship between slope-cutting density and landslide probability

表 4 倾向得分匹配前后协变量平衡性检验

Table 4 Covariate balance test before and after propensity score matching

协变量	匹配前标准化偏差(%)	匹配后标准化偏差(%)	方差比(匹配后)	p值(匹配后)
高程(m)	8.6	2.1	1.03	0.68
坡度(°)	15.3	3.2	0.98	0.54
坡向	6.2	1.8	1.01	0.71
地形起伏度(m)	12.7	4.1	1.05	0.47
TWI	9.4	2.9	0.97	0.62
岩性(分类)	11.8	3.7	—	0.83

重叠度从匹配前的0.73提升至0.95,表明共同支撑域显著扩大.卡方检验显示,匹配后岩性分布无显著差异(χ^2=2.14, df=5, p=0.83).

3.3.2 平均处理效应评估 采用1∶1最近邻匹配(卡尺值0.05,无放回)后,735个滑坡点中698个(94.97%)成功配对.未配对的37个样本位于倾向得分>0.85的极端条件区(极陡坡+全风化岩体),已被剔除.匹配质量经标准化偏差、共同支撑域及协变量平衡检验确认.基于698对匹配样本,切坡建房对滑坡发生的平均处理效应(ATT)在三级缓冲区均显著为正(表5).以50 m缓冲区为例,切坡密度的ATT为9.52处/km²(95%CI: 8.73～10.31);切坡强度指数的ATT为2.48(95%CI: 2.21～2.75),相对增幅达285%.这表明在控制协变量后,滑坡点周边50 m范围内的切坡活动强度显著高于对照点.

敏感性分析采用Rosenbaum边界检验,结果显示,在50 m缓冲区,切坡密度ATT的临界Γ值为2.8(p=0.05),意味着需要存在2.8倍的隐藏偏差才能推翻当前结论,表明结果对未观测混淆因素具有较强的抵抗力.100 m和200 m缓冲区的临界Γ值分别为2.3和1.7,稳健性依次递减,与效应量的距离衰减规律一致.

3.3.3 异质性处理效应 为识别切坡致灾效应在不同地质地形条件下的差异,按坡度和岩性分层计

表 5　切坡建房指标的平均处理效应(ATT)

Table 5　Average treatment effect on the treated (ATT) of slope-cutting indicators

缓冲区半径(m)	指标	ATT	95%置信区间	相对增幅(%)	p值
50	切坡密度(处/km²)	9.52	8.73～10.31	307	<0.001
	平均切坡高度(m)	3.28	2.94～3.62	78	<0.001
	切坡强度指数	2.48	2.21～2.75	285	<0.001
100	切坡密度(处/km²)	6.08	5.41～6.75	174	0.014
	平均切坡高度(m)	2.31	2.02～2.60	51	0.006
	切坡强度指数	1.21	1.03～1.39	132	<0.001
200	切坡密度(处/km²)	3.17	2.63～3.71	77	0.024
	平均切坡高度(m)	1.34	1.08～1.60	28	0.032
	切坡强度指数	0.52	0.38～0.66	53	0.037

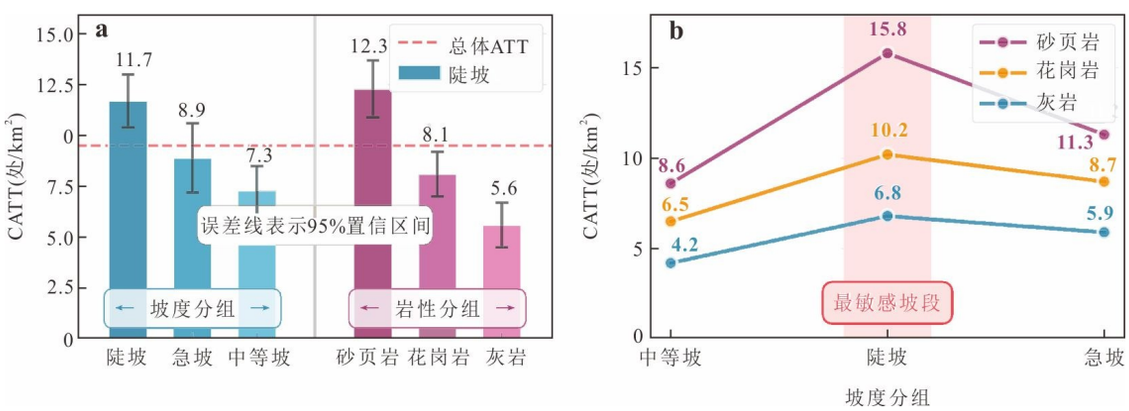

图 5　切坡建房的异质性处理效应分析

Fig. 5　Heterogeneous treatment effect analysis of slope-cutting for housing

a. 分层 CATT 对比; b. 交叉效应

算条件平均处理效应(CATT),结果如图 5 所示.

坡度分组差异:如图 5a 左侧所示,在陡坡组(25°～35°)中,切坡密度的 CATT 达到 11.7 处/km²(95%CI: 10.4～13.0),显著高于中等坡度组(<25°)的 7.3 处/km²(95%CI: 6.1～8.5)和急坡组(>35°)的 8.9 处/km²(95%CI: 7.2～10.6). 陡坡组的 CATT 比总体 ATT(9.5 处/km²)高出 23.2%,表明该坡段最易因切坡触发灾害. 急坡组虽坡度更大,但因自然稳定性较差,未切坡时基线灾害密度已较高,导致切坡的边际效应弱于陡坡组.

岩性分组差异:图 5a 右侧显示,砂页岩区的 CATT 为 12.3 处/km²(95%CI: 10.9～13.7),分别是花岗岩区(8.1 处/km²,95%CI: 7.0～9.2)和灰岩区(5.6 处/km²,95%CI: 4.5～6.7)的 1.5 倍和 2.2 倍. 这一差异源于砂页岩的软硬互层结构和易风化特性,使其对人为扰动更为敏感. 所有亚组的 CATT 均显著异于零(95%置信区间不包含零),证实切坡效应在各地质条件下均稳健存在.

交互效应分析:图 5b 的交互效应矩阵揭示了坡度与岩性的协同作用. 砂页岩×陡坡组合的 CATT 最高(15.8 处/km²),较砂页岩×中等坡组合(8.6 处/km²)高出 83.7%,表明陡坡段对砂页岩的致灾放大效应最强. 相比之下,灰岩×中等坡组合的 CATT 最低(4.2 处/km²),两者相差近 4 倍(275.7%). 值得注意的是,在陡坡段,3 种岩性的 CATT 排序(砂页岩>花岗岩>灰岩)最为显著,差值达 9.0 处/km²;而在中等坡段,岩性间差异缩小至 4.4 处/km².

4　讨论

4.1　切坡建房致灾效应的因果证据链

本研究通过伪随机对照设计和多层次统计推断,为切坡建房与滑坡风险的空间关系提供了多维证据. 首先,缓冲区对比分析表明,滑坡点 50 m 范围内的切坡强度指数比对照点高出 307%(表 1),该差异在控制地形、岩性等混淆因子后依然稳健(Cohen's d=1.52),初步证实了两者的空间关联. 其

次，剂量－反应曲线呈现明显的双阈值特征（图4）：切坡强度指数超过12处/km²时滑坡概率升至约40%，超过20处/km²时跃升至75%.这种非线性关系与周峙等（2020）和罗紫琪等（2025）提到的边坡失稳的力学机制一致，即初期小规模切坡的扰动可被坡体自身强度储备吸收，但当累积扰动超过临界阈值后，将触发连锁破坏.最后，倾向得分匹配在严格均衡6个协变量（标准化偏差＜5%）后，仍测得9.52处/km²的净效应（表5），Rosenbaum检验显示需2.8倍隐藏偏差才能推翻结论，证实该准因果统计推断结果具有良好的稳健性.

三级缓冲区的效应衰减规律（50 m：d=1.52 → 100 m：d=1.29 → 200 m：d=0.87）与切坡扰动的物理过程一致（祁生文等，2024；沙鹏等，2025）.50 m范围覆盖开挖卸荷和坡脚应力集中的直接影响区，该尺度的效应量最大；100 m延伸至建筑荷载传递和地下水渗流路径改变的次生影响区；200 m则反映地表径流汇集等区域累积效应，但因距离增大、其他因素介入，效应明显减弱.值得注意的是，100 m处效应量的小幅波动（d=1.29）可能与研究区地形破碎、切坡点空间聚集有关，需结合数值模拟进一步验证.与传统研究多采用单一缓冲区或全局栅格统计不同（邓明东等，2024；瞿伟等，2026），本研究的多尺度设计不仅证实了效应的距离衰减性，也为作用半径的选取提供了直接的实证依据.

异质性处理效应分析（图5）揭示了地质地形条件对致灾效应的调控机制（吴昊等，2021）.陡坡组（25°～35°）的CATT（11.7处/km²）显著高于中等坡度组，这与坡度接近岩土体内摩擦角的临界状态有关——此时坡体处于“亚稳定”平衡，切坡扰动更易打破力学平衡（李鹏等，2017）.砂页岩区的CATT是灰岩区的2.2倍，源于软硬互层结构的差异风化和层间剪切强度低.交互效应矩阵显示砂页岩×陡坡组合的CATT达15.8处/km²，较灰岩×中等坡组合高出275.7%.这一结果不仅证实了坡度与岩性的协同放大作用（何茂林等，2023；Regmi *et al.*，2024），也量化了二者交互效应的贡献，为精准识别高风险区域提供了较传统单因子叠加评价更为可靠的量化依据.

4.2 方法创新

本研究在滑坡致灾因子效应评估方面提出了一个差异化的分析视角，其方法创新主要体现在以下3个层面：

（1）伪随机对照策略应对选择偏倚.传统模型将切坡建房视为普通输入变量，但切坡的非随机分布（倾向选址于地形平缓的坡脚）与高风险地形在空间上高度共生，导致统计混淆.本研究在坡度、岩性等6个自然因子匹配的条件下生成对照点，模拟随机对照试验，从而从复杂自然背景中剥离出切坡的“净效应”，实现了从相关性分析向准因果推断的跨越.

（2）构建了基于物理过程的多尺度空间响应框架.不同于全局统计，本研究针对切坡扰动的距离衰减特性设置了50 m、100 m、200 m三级缓冲区，其尺度分别对应直接卸荷、次生渗流与区域汇集3个力学过程.该设计不仅使统计结果与物理机制相互印证，还通过效应量的衰减规律反向验证了切坡作为“近源扰动”的属性.

（3）复合指标与分层匹配提升精度.研究提出的“切坡强度指数”（SII）综合了切坡数量、高度与空间权重，其效应量（d=1.68）高于单一密度指标（d=1.52），证实了多维信息融合的优势.结合PSM与条件平均处理效应（CATT）分析，研究精准识别出“砂页岩×陡坡”这一高风险组合，实现了从全局平均向异质识别的精细化提升.

4.3 局限性与展望

尽管本研究在方法论上有所突破，仍存在以下局限性：（1）时序因果推断受限.本研究基于截面数据，难以精确还原切坡与滑坡的时序先后，虽常识判断多为先切坡后滑坡，但无法完全排除滑坡后重建或救灾活动产生的次生切坡干扰，导致因果滞后效应未被有效剥离；（2）样本独立性假设存疑.滑坡与切坡点均存在空间聚集特征，违背了模型关于样本独立的假设，可能导致标准误估计偏低，影响统计推断的稳健性；（3）未观测混淆变量.PSM虽控制了6个主要地形因子且通过Rosenbaum检验（Γ=2.8），但微降雨差异、植被固土强度、工程支护措施等微观变量未被纳入，残余偏差难以完全消除；（4）区域外推需审慎.研究得出的双阈值规律基于湘南丘陵区特定地质气候背景，在黄土区或高山峡谷区可能不适用，跨区域推广时需结合地质条件进行校准.

此外需说明的是，本研究采用的病例－对照设计，在本质上证明了切坡建房高密度区与历史滑坡点存在显著的空间共现关系，受限于数据精度，尚

无法如同前瞻性队列研究那样严格论证“切坡致滑坡”的因果时序,结论应审慎解释为统计学上的显著相关性.

针对上述局限,未来研究拟从4方面推进:(1)结合逐年遥感解译与野外台账构建时序面板数据,区分切坡修建与滑坡发生时间,采用双重差分模型剥离时序混杂;(2)引入空间滞后模型或地理加权回归校正空间自相关,优化标准误估计;(3)开展多案例区对比,校准不同地质—气候背景下的切坡密度风险阈值,推进阈值参数的区域化;(4)融合高分辨率降雨、植被及微观调查数据,完善风险评估模型的协变量体系.

5　结论

本研究以湖南省资兴市为例,构建了融合伪随机对照、多尺度缓冲、统计推断空间因果分析框架,系统量化了切坡建房的空间聚集效应及其与滑坡发生的定量关联.需要说明,本研究基于准实验统计框架得到的是净关联效应,尚不能等同于严格意义上的因果证明.主要结论如下:

(1) 在严格控制地形、地质等固有混淆因素后,滑坡点周边50 m范围内的切坡建房密度较未滑坡区对照点高出307%.倾向得分匹配估计的平均处理效应(ATT)为9.52处/km^2,且Rosenbaum边界检验表明该结论对未观测的隐藏偏差具有较强的抵抗力.

(2) 研究揭示了切坡建房致灾效应的空间分异性及非线性的剂量—反应关系.致灾效应随空间距离增加而衰减,符合其物理扰动机制.同时,切坡密度与滑坡发生概率呈双阈值非线性关系:当密度超过12处/km^{2}时,滑坡概率可达40%;当密度超过20处/km^{2}时,概率则跃升至75%.

(3) 基于上述双阈值特征,本研究提出了精细化的三级风险管控建议:将切坡密度小于12处/km^{2}的区域划定为可控区,建议加强日常监测;密度介于12～20处/km^{2}的区域划定为预警区,应限制新建切坡并采取必要的加固措施;密度大于20处/km^{2}的区域则划定为高危区,需立即开展工程治理和居民避险搬迁.这为山区建设活动的精细化管理提供了量化依据.

(4) 研究识别出影响切坡建房致灾效应强度的关键地质地形条件及其协同作用.在陡坡(25°～35°)和软硬互层砂页岩出露区,切坡建房的致灾效应最为显著.当这两种条件结合时,平均处理效应高达15.8处/km^2,是低风险组合(如灰岩区、中等坡度)的3.8倍,表明坡度和岩性对切坡建房引发滑坡的致灾效应存在显著的协同放大作用.

References

Cao, C. S., Wu, S. R., Pan, M., et al., 2016. Mechanism Research on Artificial Slope Cutting-Induced Loess Landslide. *Rock and Soil Mechanics*, 37(4): 1049－1060 (in Chinese with English abstract).

Cao, P., Chen, J., Qi, X. S., et al., 2025. Assessment of Landslide and Collapse Susceptibility in Granite Areas Using Multiple Machine Learning Models. *Journal of Safety and Environment*, 25(12): 4751－4763 (in Chinese with English abstract).

Deng, M. D., Ju, N. P., Wu, T. W., et al., 2024. Evaluation of Susceptibility under Different Landslide Sample Points and Polygonal Expression Modes. *Earth Science*, 49(5): 1565－1583 (in Chinese with English abstract).

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).

Gui, X. G., Liang, S. Y., Zhao, H. L., et al., 2020. Spatial Distribution Pattern of Landslides and Its Influencing Factors in the Baxie River Basin Based on Fractal Theory. *China Earthquake Engineering Journal*, 42(1): 250－258 (in Chinese with English abstract).

He, M. L., Zhang, Y. S., Gao, J. Y., et al., 2023. Synergistic Evolution and Interaction of Soil Erosion and Rocky Desertification in Karst Area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 37(1): 140－150 (in Chinese with English abstract).

He, X. R., Liao, X. H., Zhang, L. Q., et al., 2022. Clustering of Landslide Causal Factors and Road Engineering Disturbance Effect Analysis in Bailong River Basin. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 672－687 (in Chinese with English abstract).

Huang, F. M., Ouyang, W. P., Jiang, S. H., et al., 2024. Landslide Susceptibility Prediction Considering Spatio-Temporal Division Principle of Training/Testing Datasets in Machine Learning Models. *Earth Science*, 49(5): 1607－1618 (in Chinese with English abstract).

Huang, F. M., Yang, Y., Jiang, S. H., et al., 2025. A Comprehensive Review of Key Issues in Landslide Susceptibility Prediction and Their Solutions Using Semi-

Supervised Imbalanced Theory. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 44(12): 3139－3169 (in Chinese with English abstract).

Imbens, G. W., Rubin, D. B., 2015. Causal Inference for Statistics, Social, and Biomedical Sciences: An Introduction. Cambridge University Press, New York.

Li, P., Su, S. R., Ma, C., et al., 2017. Formation Mechanism of Landslides with Accumulation Layer-Bedrock Contact Surface: Taking Zushimiao Landslide as an Example. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 47(5): 1471－1479 (in Chinese with English abstract).

Li, Q. T., Zhang, Y., Fang, J. L., et al., 2024. Effect of Air Purification on Blood Pressure and Heart Rate among School Children: A Cluster, Randomized, Double-Blind Crossover Trial. *Chinese Science Bulletin*, 69(17): 2454－2462 (in Chinese).

Li, X. D., Wang, P., Wang, L. L., et al., 2021. Influence of Top Building Load on the Slope Stability under Strong Earthquakes. *China Earthquake Engineering Journal*, 43(5): 1220－1227 (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).

Ma, L. N., Qi, S. W., Guo, S. F., et al., 2024. Investigation on the Deformation and Failure Patterns of Loess Cut Slope Based on the Unsaturated Triaxial Test in Yan'an, China. *Journal of Earth Science*, 35(1): 235－247. https://doi.org/10.1007/s12583-021-1554-4

Qi, S. W., Li, Y. C., Liu, C. L., et al., 2024. Risk of Disturbance Disasters of Hydropower Project in Hengduan Mountains. *Journal of Engineering Geology*, 32(3): 729－759 (in Chinese with English abstract).

Qu, W., Bian, Z. C., Li, J. Y., et al., 2026. Landslide Susceptibility Assessment Model Based on Positive Sample Buffering with Transformer-CNN Integration: A Case Study of Baoji City. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 51(4): 726－740 (in Chinese with English abstract).

Regmi, N. R., Walter, J. I., Jiang, J. L., et al., 2024. Spatial Patterns of Landslides in a Modest Topography of the Ozark and Ouachita Mountains, USA. *CATENA*, 245: 108344. https://doi. org/10.1016/j. catena.2024.108344

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., et al., 2018. A Review of Statistically-Based Landslide Susceptibility Models. *Earth-Science Reviews*, 180: 60－91. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001

Schlögel, R., Malet, J. P., Reichenbach, P., et al., 2015. Analysis of a Landslide Multi-Date Inventory in a Complex Mountain Landscape: The Ubaye Valley Case Study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(10): 2369－2389. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2369-2015

Sha, P., Liu, M. Y., Wu, F. Q., 2025. Spatial and Temporal Distribution and Susceptibility of Reservoir-Induced Landslides in Lianghekou Hydropower Station of Yalong River. *Journal of Engineering Geology*, 33(4): 1376－1387 (in Chinese with English abstract).

Sun, C. Y., Zou, M. Y., Li, S. Y., 2024. Influence of Avatar Locomotion Model on Virtual Wayfinding Outcomes in Airport Terminal Experiments. *Journal of Tongji University* (*Natural Science*), 52(12): 1874－1882 (in Chinese with English abstract).

Wei, W. Z., Zhao, R. H., Liao, L. P., et al., 2022. Granite Residual Soil Landslide Induced by Artificial Cutting Slope in Rong County, Guangxi Province, China. *Mountain Research*, 40(3): 396－410 (in Chinese with English abstract).

Wu, H., Pei, X. J., Cui, S. H., et al., 2021. Study of Topographic and Geological Controls on Landslide Development and Distribution within Mountainous Regions Influenced by Strong Earthquakes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(5): 972－986 (in Chinese with English abstract).

Wu, S. S., Lü, G. P., Hu, X. L., et al., 2026. Intelligent Vulnerability Analysis of Slope-Cutting Construction in Granite Slope Areas. *Earth Science*(in Chinese with English abstract)(Online First).

Xiao, W. F., Yao, G. C., Liu, G., et al., 2026a. CNN-BiLSTM with Attention Mechanism and Soil-Aware Dynamic EI-D Thresholds for Extreme Rainfall-Induced Landslide Early Warning in Subtropical Mountains. *Environmental Modelling & Software*, 203: 107034. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2026.107034

Xiao, W. F., Yao, G. C., Xiao, Z. H., et al., 2026b. From Typhoon Rainfall to Slope Failure: Optimizing Susceptibility Models and Dynamic Thresholds for Landslide Warnings in Zixing City, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 26: 611－629. https://doi. org/10.5194/nhess-26-611-2026

Xu, W. Y., Zhou, W. J., Yan, L., 2020. Research Progress on Seepage Stability of Rainfall-Induced Accumulation Landslide. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 40(4): 87－94 (in Chinese with English abstract).

Zhang, W. G., He, Y. W., Wang, L. Q., et al., 2023. Machine Learning Solution for Landslide Susceptibility Based on Hydrographic Division: Case Study of Fengjie County in Chongqing. *Earth Science*, 48(5): 2024－2038 (in Chinese with English abstract).

Zhao, F., Shi, Z. M., Yu, S. B., et al., 2025. Research Progress on Dynamic Failure and Reinforcement of Stratified Rock Slopes. *Rock and Soil Mechanics*, 46(11): 3585－3614 (in Chinese with English abstract).

Zhou, Z., Zhang, J. M., Ning, F. L., et al., 2020. Temporal and Spatial Characteristics of Moisture Migration and Instability Mechanism of Cracked Soil Slope under Rainfall Infiltration. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 20(4): 107－119 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

曹春山, 吴树仁, 潘懋, 等, 2016. 工程切坡诱发黄土滑坡成因机制研究. 岩土力学, 37(4): 1049－1060.

曹攀, 陈婕, 齐小帅, 等, 2025. 多种机器学习模型的花岗岩区崩塌滑坡易发性评价. 安全与环境学报, 25(12): 4751－4763.

邓明东, 巨能攀, 吴天伟, 等, 2024. 不同滑坡样本点和多边形表达模式下的易发性评价. 地球科学, 49(5): 1565－1583.

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.

桂先刚, 梁收运, 赵红亮, 等, 2020. 基于分形的巴谢河流域滑坡空间分布格局及其影响因素分析. 地震工程学报, 42(1): 250－258.

何茂林, 张玉珊, 高家勇, 等, 2023. 喀斯特区土壤侵蚀与石漠化协同演变及交互关系. 水土保持学报, 37(1): 140－150.

何晓锐, 廖小辉, 张路青, 等, 2022. 白龙江流域崩滑灾害孕灾因子聚类分区与道路工程扰动效应分析. 工程地质学报, 30(3): 672－687.

黄发明, 欧阳慰平, 蒋水华, 等, 2024. 考虑机器学习建模中训练/测试集时空划分原则的滑坡易发性预测建模. 地球科学, 49(5): 1607－1618.

黄发明, 杨阳, 蒋水华, 等, 2025. 滑坡易发性关键问题综述及其基于半监督非对称理论的解决方案. 岩石力学与工程学报, 44(12): 3139－3169.

李鹏, 苏生瑞, 马驰, 等, 2017. 堆积层－基岩接触面滑坡的形成机理: 以祖师庙滑坡为例. 吉林大学学报(地球科学版), 47(5): 1471－1479.

李秋彤, 张翼, 方建龙, 等, 2024. 空气净化干预对学龄儿童血压和心率的影响: 一项整群的随机双盲交叉干预试验. 科学通报, 69(17): 2454－2462.

李旭东, 王平, 王丽丽, 等, 2021. 强震作用下坡顶建筑荷载对边坡稳定性影响研究. 地震工程学报, 43(5): 1220－1227.

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.

祁生文, 李永超, 刘春玲, 等, 2024. 横断山区水电工程扰动灾害及风险分析. 工程地质学报, 32(3): 729－759.

瞿伟, 边子策, 李久元, 等, 2026. 融合Transformer与CNN的正样本缓冲滑坡易发性评价模型: 以宝鸡市为例. 武汉大学学报(信息科学版), 51(4): 726－740.

沙鹏, 刘梦扬, 伍法权, 2025. 雅砻江两河口库区工程扰动灾害时空分布规律与易发性研究. 工程地质学报, 33(4): 1376－1387.

孙澄宇, 邹明妍, 李舒阳, 2024. 人偶驱动机制对虚拟候机楼寻路实验结果的影响. 同济大学学报(自然科学版), 52(12): 1874－1882.

韦文智, 赵瑞华, 廖丽萍, 等, 2022. 广西容县花岗岩残积土人工切坡诱发滑坡过程分析. 山地学报, 40(3): 396－410.

吴昊, 裴向军, 崔圣华, 等, 2021. 强震山区滑坡发育分布的地形地质控制作用研究. 岩石力学与工程学报, 40(5): 972－986.

吴爽爽, 吕国鹏, 胡新丽, 等, 2026. 花岗岩斜坡区切坡建房易损性智能分析. 地球科学(网络首发).

徐卫亚, 周伟杰, 闫龙, 2020. 降雨型堆积体滑坡渗流稳定性研究进展. 水利水电科技进展, 40(4): 87－94.

仉文岗, 何昱苇, 王鲁琦, 等, 2023. 基于水系分区的滑坡易发性机器学习分析方法: 以重庆市奉节县为例. 地球科学, 48(5): 2024－2038.

赵飞, 石振明, 俞松波, 等, 2025. 层状岩质边坡动力失稳及加固研究进展. 岩土力学, 46(11): 3585－3614.

周峙, 张家铭, 宁伏龙, 等, 2020. 降雨入渗下裂土边坡水分运移时空特征与失稳机理. 交通运输工程学报, 20(4): 107－119.