https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.060

东南丘陵不同岩性区的滑坡降雨阈值差异研究

王 成[1],安 妮[1*],于 洋[2],赵彬如[3],吕 庆[1],孙红月[2]

1. 浙江大学建筑工程学院,浙江杭州 310058
2. 浙江大学海洋学院,浙江舟山 316021
3. 南京师范大学地理科学学院,江苏南京 210023

摘 要: 为探究东南丘陵岩性差异对滑坡降雨阈值的影响,基于2021年6月28日南平市群发性滑坡事件,定量对比石英片岩与花岗岩区的降雨阈值曲线及其参数差异.基于TRIGRS模型模拟了460种降雨工况下的坡体稳定性,构建了两类岩性区的降雨阈值曲线,并采用$\%LR_{class}$指标验证模型精度.结果显示:石英片岩区临界降雨强度普遍低于花岗岩区;阈值曲线参数α与β呈显著负相关.随坡度增大,石英片岩区α单调递减、β递增;而花岗岩区表现为α先增后减,β先减后增.压力水头模拟结果显示上覆土层的饱和渗透系数差异是导致两类区域的降雨阈值随坡度变化呈现不同响应规律的关键因素.研究揭示了不同岩性影响下的降雨阈值差异,为后续区域降雨型滑坡预警的精细化研究工作提供了重要参考.

关键词: 东南丘陵地区;滑坡降雨阈值;岩性差异;TRIGRS模型;参数分析;工程地质.

中图分类号: P694 **文章编号:** 1000－2383(2026)10－4013－17 **收稿日期:** 2025-11-16

Study on Differences in Rainfall Thresholds for Landslides across Different Lithologic Zones in Hilly Regions of Southeast China

Wang Cheng[1], An Ni[1*], Yu Yang[2], Zhao Binru[3], Lü Qing[1], Sun Hongyue[2]

1. *College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*
2. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan* 316021, *China*
3. *School ofGeography, Nanjing Normal University, Nanjing* 210023, *China*

Abstract: To investigate the impact of lithologic differences in the hilly regions of Southeast China on the rainfall thresholds for landslides, this study quantitatively compares the rainfall-threshold curves and parameter differences between quartz schist and granite zones based on the clustered landslide event in Nanping City on 28 June 2021.The TRIGRS model was used to investigate slope stability under 460 rainfall scenarios. Rainfall-threshold curves were constructed for the two lithologic zones, and model performance was validated using the $\%LR_{class}$ metric. The results show that the critical rainfall intensity in the quartz schist zone is generally lower than that in the granite zone. The threshold-curve parameters α and β exhibit a significant negative correlation. With increasing slope gradient, α decreases monotonically and β increases in the quartz schist area, whereas in the granite area α increases first and then decreases, and β decreases first and then increases. Numerical results of pressure head indicate that differences in the saturated hydraulic conductivity of the overlying soil layer are the key factor driving the distinct slope-gradient-dependent responses of rainfall thresholds in the two zones. This study reveals lithology-controlled differences in rainfall thresholds

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42207171);国家重点研发计划(No. 2024YFC3012605).

作者简介: 王成(2002－),男,硕士研究生,从事斜坡地质灾害预警. ORCID: 0009-0002-6601-9313. E-mail: 13257006215@163.com

* **通讯作者:** 安妮(1990－),女,研究员,博士,主要从事环境工程地质. E-mail: anni2021@zju.edu.cn

引用格式: 王成,安妮,于洋,赵彬如,吕庆,孙红月,2026.东南丘陵不同岩性区的滑坡降雨阈值差异研究.地球科学,51(10):4013－4029.

Citation: Wang Cheng, An Ni, Yu Yang, Zhao Binru, Lü Qing, Sun Hongyue, 2026. Study on Differences in Rainfall Thresholds for Landslides across Different Lithologic Zones in Hilly Regions of Southeast China. *Earth Science*, 51(10):4013－4029.

and provides a methodological and technical reference for further investigation on regional rainfall-induced landslide early warning.
Key words: southeastern hilly region; rainfall threshold; lithologic difference; TRIGRS model; parameter analysis; engineering geology.

0 引言

滑坡是我国频发的地质灾害,每年都会造成大量人员伤亡和巨额财产损失.根据我国2024年统计年鉴,2005—2022年,我国共发生地质灾害324 819起,其中滑坡232 276起,平均每年造成直接经济损失40亿元起(国家统计局,2023).滑坡的触发因素主要包括降雨、地震、洪水、融雪及人类工程活动等,约70%以上的滑坡均由降雨直接触发(Guzzetti *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2025).近年来,气候变化加剧,极端降雨事件日益频繁,而我国东南地区岩体风化强烈、残坡积层覆盖广,降雨型滑坡灾害发生的潜在风险逐渐上升(刘智琪等, 2025; An *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2025).因此,针对此类滑坡建立有效的早期预警体系对于保障人民群众生命和财产安全起着至关重要的作用.

降雨阈值是指诱发滑坡发生的临界降雨条件,而获取准确的降雨阈值是实现滑坡高效预警的关键(Guzzetti *et al.*, 2008; 许强, 2020).降雨阈值主要分为两类:经验型降雨阈值和基于物理过程的阈值.经验型阈值通常依赖大量历史降雨数据,通过分析降雨特征与滑坡事件之间的统计关系来确定触发滑坡的临界降雨条件(刘谢攀等,2024).降雨特征包括降雨持续时间、降雨强度、累计降雨量、前期有效降雨量等(Guzzetti *et al.*, 2008).其中,降雨强度—持续时间(*I*-*D*)是最常用的降雨阈值指标(Segoni *et al.*, 2018).经验阈值因构建成本低、部署快捷,且能直观反映降雨与滑坡事件的触发关系,被广泛使用.但由于其未充分考虑滑坡物理机制,仍存在较高的误报与漏报风险(Gariano *et al.*, 2020).此外,经验型阈值在不同气候、地形和地质条件的区域适用性存在局限,亦不适用于历史数据缺少的地区(Marra *et al.*, 2017; Guzzetti *et al.*, 2020).因此,有不少学者们通过构建物理模型获取降雨阈值,如SINMAP、Iverson模型、SHALSTAB、SLIP、tRIBS、TRIGRS等(Chae *et al.*, 2017).由于综合考虑了土体类型、地形特征、降雨入渗、瞬态压力水头变化及斜坡稳定性,这类方法能够更好地考虑区域地质背景和滑坡的触发机理.实现精准预警的核心在于准确捕捉降雨过程中斜坡稳定性的瞬态响应(Iverson, 2000; Baum *et al.*, 2010).在上述模型中,SINMAP、SHALSTAB等模型多采用稳态或准稳态含水近似以实现区域尺度的快速识别;SLIP模型以土体饱和状态变量表征降雨影响,不直接输出降雨事件过程中压力水头的连续瞬态响应;tRIBS更偏向流域尺度分布式水文过程模拟,强调产汇流与土壤水分时空演化.TRIGRS模型的核心优势是能够模拟降雨入渗引起的瞬态压力水头动态响应,从而显著提升对滑坡触发时间预测的准确性(Iverson, 2000; Baum *et al.*, 2002, 2008; Alvioli and Baum, 2016).Alvioli *et al.*(2014)将TRIGRS应用于意大利中部Tiber流域,分析了滑坡发生与降雨强度和持续时间的关系;Marin等利用TRIGRS确定了不同地区的降雨强度—持续时间阈值(Marin, 2020; Marin and Velásquez, 2020; Marin *et al.*, 2020, 2021),并定量分析了水文及强度参数对模拟结果的影响.do Pinho and Augusto Filho(2022)在相同输入条件下,对比了无限斜坡模型、SHALSTAB、SINMAP与TRIGRS等模型的预测表现,指出在考虑降雨强度与非饱和入渗条件时,TRIGRS能够提供可靠性更高的不稳定区预测结果.这些研究均说明了TRIGRS在降雨型滑坡预警的有效性.

降雨是滑坡的主要触发因素,但岩性条件会显著影响斜坡对降雨的响应特征(Li *et al.*, 2024).Roda-Boluda *et al.*(2018)研究发现滑坡的频率、规模以及土颗粒大小分布都受岩性显著影响;Kim *et al.*(2015)通过对韩国3个不同岩性区域(片麻岩、花岗岩、沉积岩)的滑坡进行详细调查与实验分析,发现岩性是控制滑坡发生机制、几何特征和触发条件的关键因素之一;此外,也有研究表明不同岩性通过影响土体渗透性、抗剪强度以及与降雨的相互作用,共同决定了滑坡对降雨的敏感性、规模和破坏特征(Watakabe and Matsushi, 2019).因此,考虑不同岩性对降雨阈值的影响对于提高降雨阈值的准确性具有重要意义.在过往的研究中,不少学者针对岩性对降雨阈值的影响展开了许多探索.Marin(2020)提出了一种基于TRIGRS的降雨阈值确定方法,在哥

伦比亚安第斯山脉的不同盆地建立了浅层滑坡的降雨阈值,并指出土体的水力特性会影响阈值曲线特征.Ma *et al.*(2023)在中国甘肃天水黄土区的研究也表明,坡度和岩性是影响阈值的关键因素.然而,现有研究在对于不同岩性导致降雨阈值差异的内在物理机制缺乏定量探讨,尤其是针对中国东南丘陵区域的相关研究十分缺乏.

本文旨在定量分析不同岩性对降雨阈值空间分布的影响及降雨阈值曲线(*I*-*D*)形状参数和尺度参数的变化规律,揭示岩性对降雨阈值的控制作用.为此,本研究选取福建省南平市某滑坡易发区为研究对象,基于TRIGRS模型和Python工具构建了预测降雨阈值的方法,并结合2021年6月28日研究区发生的群发性滑坡事件验证了该方法的准确性.在此基础上,系统揭示了该区域不同岩性区的临界降雨强度和降雨持续时间的空间分布规律、降雨阈值(*I*-*D*)曲线及其参数特征变化规律,探讨了不同岩性区坡度对于降雨阈值参数的影响及压力水头的响应规律.本研究成果可以为进一步开展东南丘陵地区降雨阈值的精细化研究及提高滑坡早期预警的准确率提供理论基础和技术参考.

1　研究方法

为了评估不同岩性区降雨阈值的差异,本研究建立了一套完整的降雨阈值计算方法.该方法主要包含3个技术步骤:(1)收集研究区内环境因子数据:基于地理信息系统(GIS)、野外现场调查实验、室内实验,收集了研究区内不同岩性区的高程、坡度、流向、土层厚度、土体水力学特性等环境数据,为后续分析提供数据基础.(2)使用TRIGRS模型计算稳定性并验证:利用研究区2021年6月28日发生的群发性滑坡的降雨事件作为边界条件,采用TRIGRS模型计算研究区内的斜坡失稳情况,通过Landslide ratio for each predicted FS class($\%LR_{class}$)指标对模型预测结果进行了定量评估并验证(Park *et al.*, 2013).(3)基于研究区历史降雨数据构建不同降雨工况组合,计算研究区各栅格单元在不同降雨工况下的稳定性,基于各栅格单元的临界降雨强度和持续时间汇总得到不同岩性区的降雨阈值曲线.本研究方法的详细流程如图1所示.

1.1　TRIGRS模型

瞬态降雨入渗与基于网格的区域斜坡稳定性(TRIGRS)模型由美国地质调查局(USGS)于2002年开发(Baum *et al.*, 2002).该模型基于Iverson(2000)提出的对Richard方程的线性解,计算降雨引起的土体压力水头的瞬时变化,从而计算网格的斜坡稳定性.TRIGRS模型先后在2008年以及2016年被更新升级(Baum *et al.*, 2008; Alvioli and Baum, 2016).TRIGRS模型由水文模型和斜坡稳定性模型组成,适用于有降水过程的复杂地形环境中的斜坡稳定性评估.本次研究假定最大滑动深度为基岩深度,并使用不透水边界水文模型,压力水头通过以下公式计算:

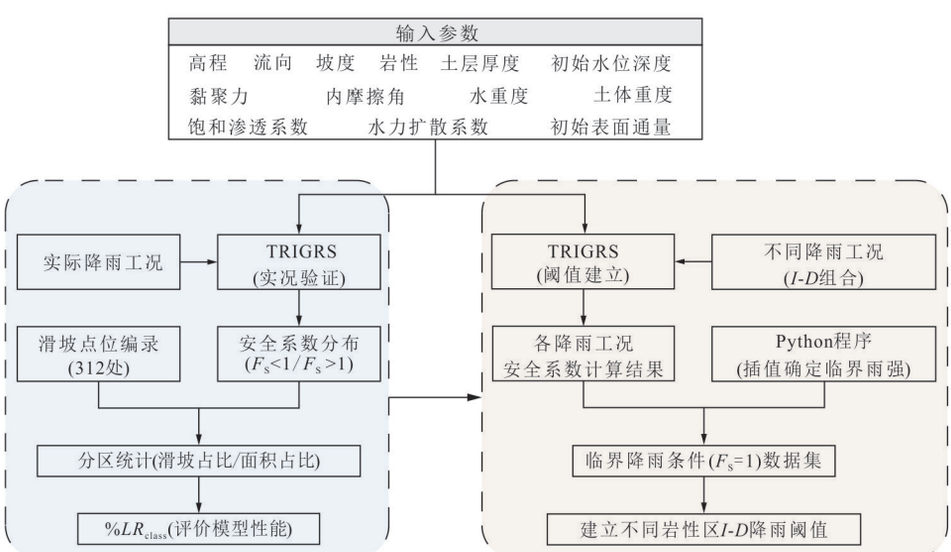

图1　研究方法流程示意图

Fig. 1　Schematic flowchart of the research methodology

$$\psi(z,t)=(Z-d)\beta+2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_s}H(t-t_n)\left[D_1(t-t_n)\right]^{\frac{1}{2}}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\mathrm{ierfc}\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}-(d_{LZ}-Z)}{2\left[D_1(t-t_n)\right]^{\frac{1}{2}}}\right]+\mathrm{ierfc}\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}+(d_{LZ}-Z)}{2\left[D_1(t-t_n)\right]^{\frac{1}{2}}}\right]\right\}-2\sum_{n=1}^{N}\frac{I_{nZ}}{K_s}H(t-t_n)\left[D_1(t-t_n)\right]^{\frac{1}{2}}\sum_{m=1}^{\infty}\left\{\mathrm{ierfc}\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}-(d_{LZ}-Z)}{2\left[D_1(t-t_{n+1})\right]^{\frac{1}{2}}}\right]+\mathrm{ierfc}\left[\frac{(2m-1)d_{LZ}+(d_{LZ}-Z)}{2\left[D_1(t-t_{n+1})\right]^{\frac{1}{2}}}\right]\right\},\quad(1)$$

式中：ψ(m)表示地下压力水头，Z(m)和t(s)分别表示垂直坐标方向(向下为正)的土层厚度及时间，$Z=z/\cos\delta$，z(m)为坡面法向坐标方向(向下为正)土层厚度，δ(°)为坡角，d(m)地下水位的稳态深度，$\beta=\cos^2\delta-(I_{ZLT}/K_S)$，$I_{ZLT}$(m/s)为稳定(初始)表面通量，$K_s$(m/s)为饱和渗透系数，$\beta$描述了压力水头在稳态条件下的初始分布状态，$N$是时间间隔的总数，$I_{nZ}$表示第$n$个时间间隔内的地表通量，$H(t-t_n)$是Heaviside阶跃函数，$t_n$表示降雨入渗序列中第$n$个时间区间的时间.$D_1=D_0/\cos^2\delta$，其中$D_0$为饱和水力扩散系数($D_0=K_S/S_S$，$S_S$为比储量，表征土体储水能力)，$d_{LZ}$为不透水基岩边界深度.ierfc为高斯误差函数的一次积分，其表达式如下：

$$\mathrm{ierfc}(\eta)=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\exp\left(-\eta^2\right)-\eta\mathrm{erfc}(\eta),\quad(2)$$

式中：erfc高斯误差函数.

TRIGRS模型基于无限斜坡稳定性模型，结合不同土体深度处的压力水头确定研究区每个网格单元体的稳定性.其中安全系数(F_S)被定义为以基底库仑摩擦力(抗滑力)与重力产生的顺坡向基底驱动应力之比.其表达式如下：

$$F_S(Z,t)=\frac{\tan\phi'}{\tan\delta}+\frac{c'-\psi(Z,t)\gamma_W\tan\phi'}{\gamma_S Z\sin\delta\cos\delta},\quad(3)$$

式中：c'(Pa)为有效应力下的土体粘聚力，ϕ'(°)为有效应力下的土体内摩擦角，γ_W(N/m^3)为地下水的重度，γ_S(N/m^3)为土体重度.

1.2 降雨阈值计算方法

TRIGRS模型能够对研究区内每个网格单元在特定降雨条件下进行稳定性分析，从而为临界降雨强度和持续时间的量化评估提供方法支持.本研究进一步结合Python程序，对研究区内每个网格单元的临界降雨强度和临界降雨持续时间进行全面评估.通过固定降雨持续时间，逐步增加降雨强度，对每个网格单元进行稳定性分析，记录其安全系数随降雨强度的变化.通过线性插值方法，可以求出在安全系数等于1的临界状态下，每个网格单元对应的临界降雨强度.同理，在固定降雨强度的条件下，也可计算出各网格单元对应的临界降雨持续时间.通过上述方法获得每个网格单元的临界降雨强度与持续时间数据集，并利用降雨强度－持续时间(I-D)阈值公式对其进行拟合，从而得到各网格单元的降雨阈值曲线.I-D阈值公式为：

$$I_c=\alpha D^{\beta},\quad(4)$$

式中：I_c为临界降雨强度(mm/h)，D为降雨持续时间(h)，α为尺度参数(截距)，代表短时降雨的临界强度，决定了触发滑坡所需的降雨强度水平；β为形状参数(斜率)，刻画降雨强度随持续时间增加的衰减速率.

为全面评估研究区域内斜坡在不同降雨条件下的稳定性响应，本研究对降雨工况进行了系统性设置.结合研究区历史降雨数据及过往相关研究的经典设置(Ma *et al.*, 2023)，对本次研究中的降雨持续时间和强度的范围与步长进行设置，旨在最大限度覆盖研究区域可能发生的降雨时程和强度范围.具体工况设置如表1所示，其中，降雨强度采用了分段式步长设计.在低强度范围(1～20 mm/h)内，采用1 mm/h的精细步长，以准确捕捉常规降雨对坡体稳定性的影响；而在高强度范围(20～100 mm/h)内，则适当采用5 mm/h的步长，在极端强度范围(100～200 mm/h)内，采用10 mm/h的步长，以兼顾计算效率与极端降雨情景的全面覆盖，从而实现了模拟精度与效率的平衡.

1.3 滑坡预测性能评价指标

评价指标的选择是滑坡预测模型验证的关键，它直接决定了模型结果的科学性和适用性.$\%LR_{\mathrm{class}}$指标通过比较不同安全系数(F_S)类别预测到的滑坡数占总滑坡数的比例以及各F_S类别的预测面积比例，对滑坡模型预测性能进行综合评估.其优势

表 1　降雨持续时间和降雨强度工况设置

Table 1　Rainfall duration and intensity settings

降雨持续时间范围(h)	降雨持续时间增量(h)	不同降雨持续时间工况(h)
1～20	2	2, 4, 6,……, 16, 18, 20
降雨强度范围(mm/h)	降雨强度增量(mm/h)	不同降雨强度工况(mm/h)
1～20	1	1, 2, 3,……, 19, 20
20～100	5	25, 30,……, 90, 95, 100
100～200	10	110, 120,……, 190, 200

在于它不仅关注了成功预测的滑坡比例和不稳定区域的面积比,同时也兼顾了稳定区域的预测情况,从而有效地解决了模型对研究区滑坡发生可能性过度预测的问题(Viet *et al.*, 2017; He *et al.*, 2021).此外,鉴于研究区的滑坡清单为点位数据,$\%LR_{\text{class}}$这一基于"点－区"对应关系的评价方法尤为适用.本文选用$\%LR_{\text{class}}$指标对 TRIGRS 在研究区域的预测性能进行定量评估.以安全系数(F_S)为判据,将 TRIGRS 模型的模拟结果划分为稳定区域($F_S \geqslant 1$)与失稳区域($F_S < 1$);其次,分别统计落入两类区域的实际滑坡数量占滑坡总数的比例与对应区域的面积占研究区总面积比例,进而计算各区域的LR_{class}值;最终,以各区域LR_{class}值占所有区域LR_{class}总和的百分比,得出$\%LR_{\text{class}}$指标,用以定量评估模型预测性能.LR_{class}和$\%LR_{\text{class}}$指标的具体计算方式如公式(5)和公式(6)所示:

$$LR^{i}_{\text{class}} = \frac{S_i}{A_i}, \tag{5}$$

$$\%LR^{i}_{\text{class}} = \frac{LR^{i}_{\text{class}}}{\sum_{i=1}^{n} LR^{i}_{\text{class}}}, \tag{6}$$

式中:S_i为区域i中滑坡数量占滑坡总数的比例,A_i为模型预测的区域i的面积占研究区总面积的比例,n为研究区域划分的总类别数(i=1和2分别对应失稳和稳定区域).当i=1时,$\%LR_{\text{class}}$指标值越大,表明预测的不稳定面积中包含的实际滑坡比例越高(即预测成功率越高),模型的预测效果越好,过度预测程度越低.

2　研究区概况及数据

2.1　研究区概况

研究区位于中国福建省南平市,如图2所示,地理坐标范围大约为 27°17′N～27°20′N, 117°40′E～119°42′E之间.南平市大地构造上位于欧亚大陆板块东南缘,与太平洋板块接壤,是环太平洋新生代构造岩浆活动最活跃的地区,构造地貌特征明显.区域内山脉集中分布于西北、东北和西南部,由武夷山、杉岭、仙霞岭、鹫峰山四大山脉构成地形走势,断裂和褶皱分布较广.该区域地形起伏大,山、盆地、河谷沿河流交替分布,丘陵和低山约占该地区的80%.其岩性主要由花岗岩、变质岩和中生代火山岩组成,软弱面发育,地质环境脆弱,易引发滑坡等地质灾害.

南平市位于北回归线附近,属典型的亚热带湿润季风气候.年平均气温为8.7～28.7 ℃之间,根据气象统计,全年降雨量峰值主要集中于5～6月,多年平均降雨量约为623 mm,占全年降雨量的34.17%.降雨主要集中在5～9月的台风季和短时强降雨期间.本研究针对2021年6月28日南平市因短时强降雨引发的大规模群发性浅层滑坡事件展开调查,该时段的降雨特征图如图3所示.通过对比降雨前后的卫星云图,并结合遥感人工解译和现场勘查验证,研究区内共识别到312处浅层滑坡.

2.2　地形特征参数

地形特征参数是 TRIGRS 模型计算的关键输入参数.本研究区采用分辨率为10 m的数字高程模型(DEM)数据(来源:水经注 GIS)作为基础.基于 ArcGIS 软件,从 DEM 提取了研究区的坡度和流向数据(图4a, 4b),并将其输入 TRIGRS 模型.此外,研究区的岩性主要包括石英片岩和花岗岩(https://geocloud.cgs.gov.cn/),如图4c所示.鉴于研究区地质构造复杂,土层厚度具有显著的空间变异性.因此,采用单一的恒定值来代表整个研究区的土层厚度是不合理的,也无法准确反映斜坡的真实稳定性(He *et al.*, 2021).因此,本研究借鉴了斜坡稳定性分析中的经典经验关系(Marin *et al.*, 2020b),即土层厚度与坡度存在负相关性.公式(7)表征了研究区土层厚度的空间分布模型:

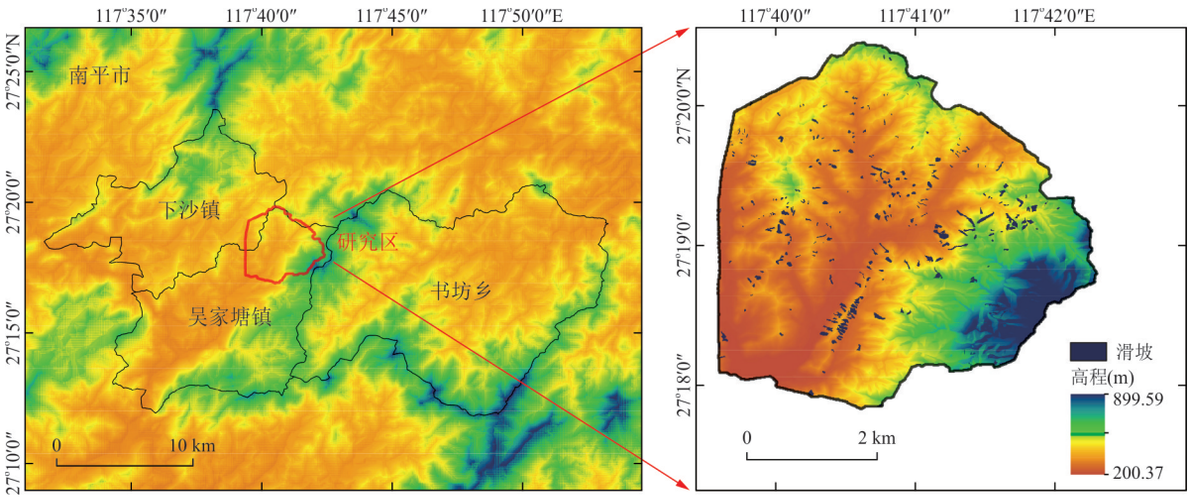

图 2　研究区概况图

Fig. 2　Study area overview

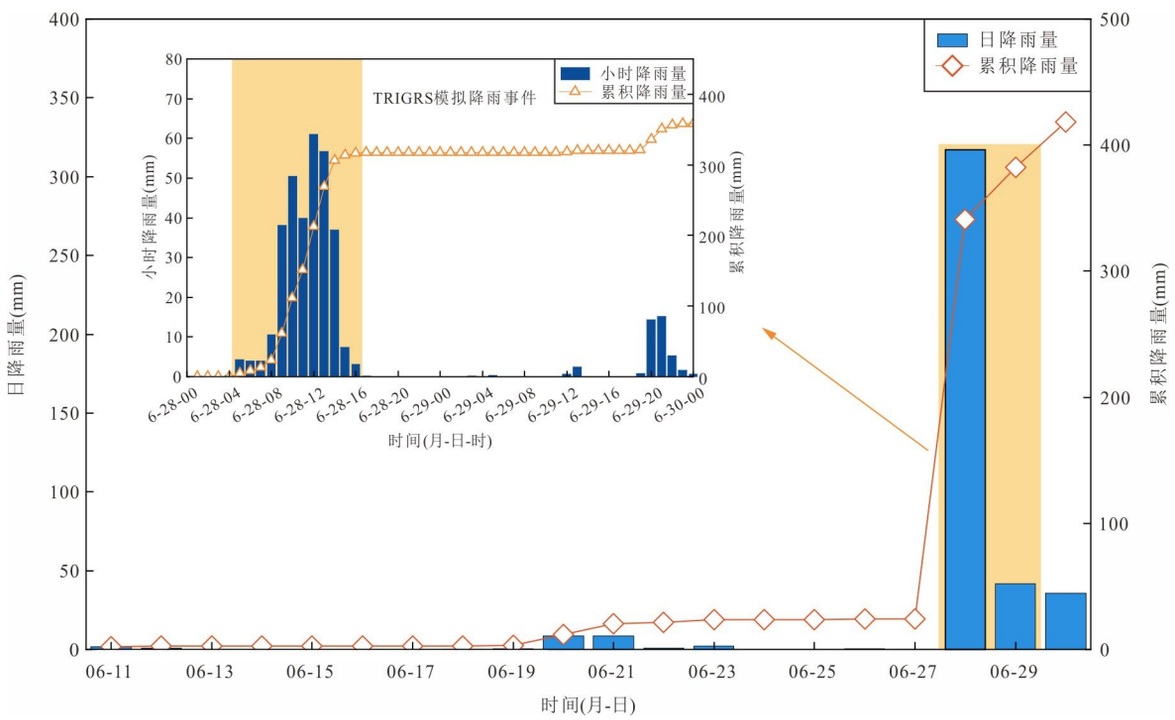

图 3　2021 年 6 月 10～28 日的日降雨量及累计降雨量及 2021 年 6 月 28～30 日的小时降雨量及累计降雨量

Fig. 3　Daily and cumulative rainfall from 10 to 28 June 2021, and hourly and cumulative rainfall from 28 to 30 June 2021

该数据来源于福建省汛情发布系统:http://27.156.118.74:18800/web/html/index.html? module=sqxx

$$h_i = h_{\max}\left[1-\frac{\tan\theta_i-\tan\theta_{\min}}{\tan\theta_{\max}-\tan\theta_{\min}}\left(1-\frac{h_{\min}}{h_{\max}}\right)\right], \quad (7)$$

式中:$h_{\max}$ 和 $h_{\min}$ 为土层厚度的最大值和最小值,$\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 为最大和最小坡度角值.土层厚度的空间分布情况如图 4d 所示.基于图 3 所示降雨数据信息,6 月 28 日降雨之前未发生明显降雨,因此,笔者在计算中假设土层初始状态相对干燥,即初始水位线位于基岩面处.

2.3　土体参数

TRIGRS 模型除上述地形参数外,还需土体参数作为输入条件,包括土体容重、饱和渗透系数、黏聚力及内摩擦角.为进行研究区坡体稳定性分析并计算降雨阈值,笔者对这两个岩性区平行于滑坡启动区的附近坡体开展原位双环入渗试验以获取两

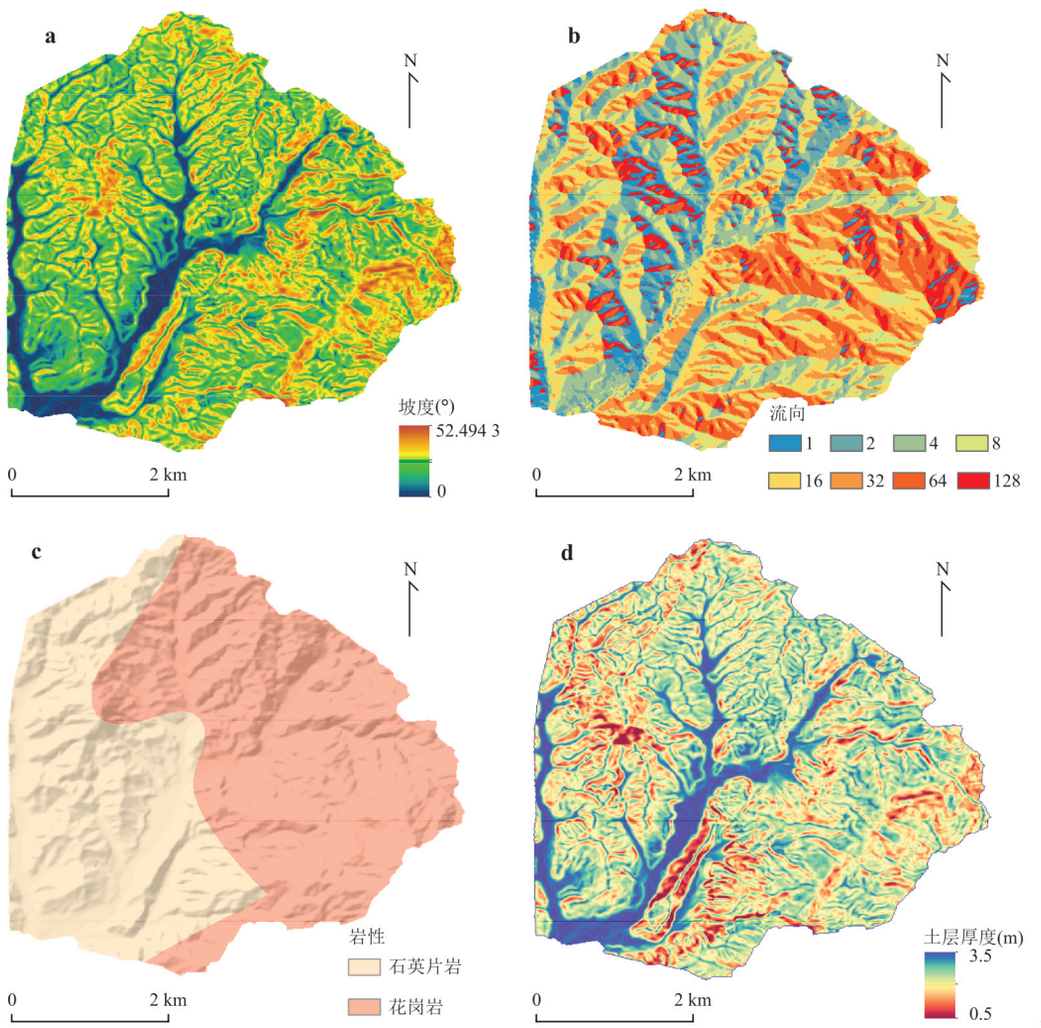

图 4　研究区地形特征图

Fig. 4　Characteristics of the study area

a. 坡度;b. 流向;c. 岩性;d. 土层厚度 .1. 东;2. 东南;4. 南;8. 西南;16. 西;32. 西北;64. 北;128. 东北

个岩性区的饱和渗透系数 K_S. 具体试验过程如下,在每个岩性区内选择面积大约为 1.0 m×1.5 m 且较为水平的试验地块,清除土体表面的凋零物及表层扰动土,然后将双环轻轻压入土中 5 cm 并调平(图 5a). 在外环与内环之间均匀地铺上大约 2 cm 厚的砂土混合物 . 入渗开始后,前 20 min 内,每 5 min 记录内环中的入渗量,随后每 10 min 记录入渗量,水头始终保持在 10 cm 左右,当连续两次记录的入渗量之差不大于最后一次入渗量的 10%,即认为入渗量基本稳定,入渗结果如图 5d 所示 . 结果显示,两种土体的渗透速率均随入渗时间增加而逐渐降低,并最终趋于稳定,达到饱和状态 . 其中,石英片岩土体的渗透速率在大约 20 min 后即趋于稳定,而花岗岩土体则在约 40 min 后才趋于稳定,表明花岗岩土体的饱和过程相对更慢 . 笔者取入渗时间为 60 min 时对应的稳定渗透速率作为土体的饱和渗透系数 K_S. 根据图示数据:石英片岩土体的饱和渗透系数 K_S 为 18.54 cm/h(5.15×10^{-5} m/s),花岗岩土体的饱和渗透系数 K_S 为 9.55 cm/h(2.65×10^{-5} m/s). TRIGRS 模型中的扩散系数 D_0 通常考虑设置为饱和渗透系数 K_S 的 100 倍,初始表面通量 I_{ZLT} 设定为饱和渗透系数 K_S 的 0.01 倍(Tan *et al.*, 2024).

此外,在两个岩性区的代表性滑坡后缘位置 50 cm 处取环刀样,在实验室中采用四联直剪仪进行土体粘聚力 c' 和内摩擦角 ϕ' 的测定,如图 5b 所示 . 分别采用环刀法和 WP4C(图 5c)测试土体干重度 γ 和土水特征曲线(图 5e). TRIGRS 模型中使用的各岩

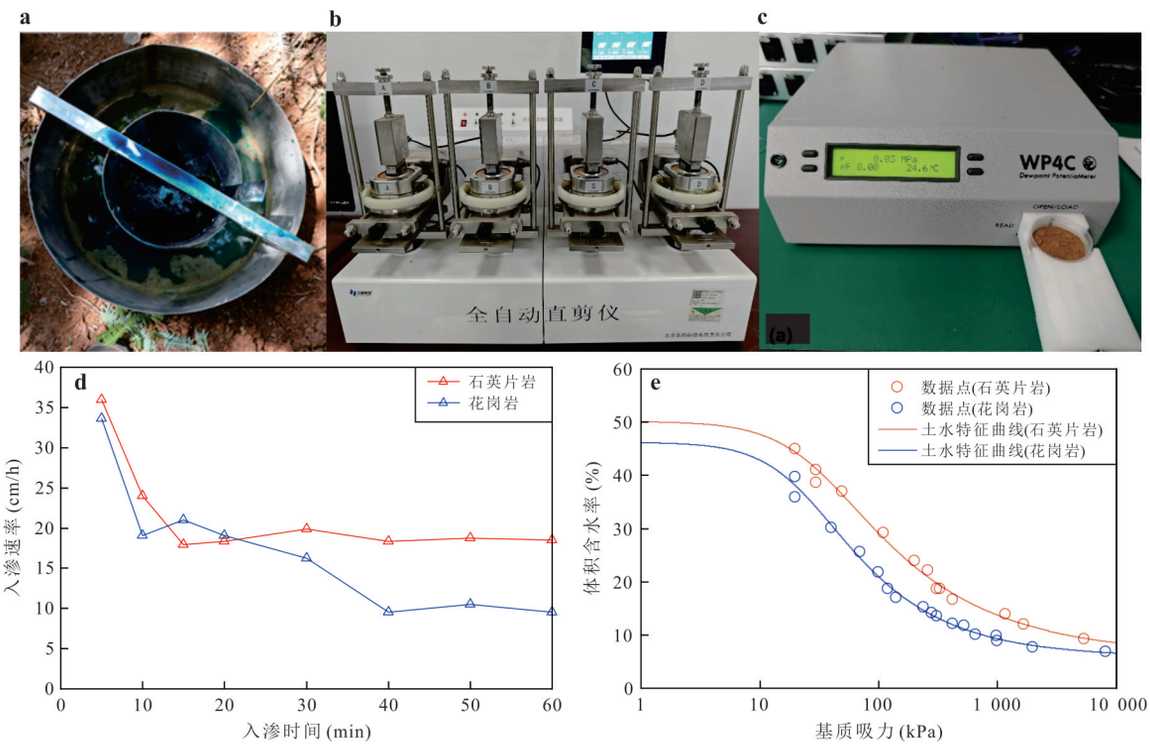

图 5 室内外实验及结果

Fig. 5 Experiments and results

a. 原位双环入渗试验；b. 四联直剪仪；c. WP4C 露点水势仪；d. 原位双环入渗试验数据结果；e. 土水特征曲线

表 2 研究区两个岩性区土体参数

Table 2 Soil parameters for the two lithological units in the study area

上覆土体参数	岩性区	
	石英片岩	花岗岩
黏聚力 c'(kPa)	10.34	11.51
内摩擦角 ϕ'(°)	13.47	15.6
饱和渗透系数 K_s(m/s)	5.15×10^{-5}	2.65×10^{-5}
干重度 γ(kN/m^3)	12.87	12.78
饱和容重 γ_S(kN/m^3)	16.33	16.21
水力扩散系数 D_0(m/s)	5.15×10^{-3}	2.65×10^{-3}
初始表面通量 I_{ZLT}(m/s)	5.15×10^{-7}	2.65×10^{-7}

性区土体参数统计于表 2.

3 结果与讨论

3.1 模型方法验证

基于图 3 所示的降雨数据，本研究利用 TRIGRS 模型模拟了 2021 年 6 月 28 日持续降雨事件下研究区的坡体稳定性空间分布(图 6). 本研究以安全系数(FS)小于 1.0 作为失稳判据，结果显示，预测失稳区域占研究区总面积的 46.47%. 为定量评估模型性能，笔者将模拟结果与研究区的 312 处滑坡点位进行了对比验证. 结果表明，在 312 处实际滑坡中，有 259 处落在了模型预测的失稳区($FS<1.0$)内，预测命中率达 83.01%. 对其余 53 处未命中的滑坡进行分析发现，其安全系数多集中于临界失稳状态附近：26 处(8.33%)FS 介于 1.0～1.2，12 处(3.85%)介于 1.2～1.5，12 处(3.85%)介于 1.5～2.0，仅 3 处(0.96%)FS 大于 2.0. 综合预测命中率(S)与失稳面积比(A)，根据公式(5)和公式(6)计算得出的不稳定区域的 $\%LR_{class}$ 指标为 84.93%(表 3). 该结果证明，TRIGRS 模型能较好地计算出研究区降雨诱发的浅层滑坡分布情况，表明该模型在本地区滑坡预测中具有较好的适用性，为后续分析可靠的降雨阈值奠定了坚实基础.

3.2 研究结果

3.2.1 研究区临界降雨指标变化规律 本研究计算了 460 种不同降雨工况下研究区的坡体稳定性分布，并计算了每个栅格单元的“临界降雨强度－持续时间”数据集. 图 7 展示了不同降雨强度下研究区失稳面积比例与降雨持续时间的关系. 结果表明，随着降雨持续时间的增加，不稳定区域面积也逐渐增加，直至所有栅格单元完全饱和，继续降雨将不

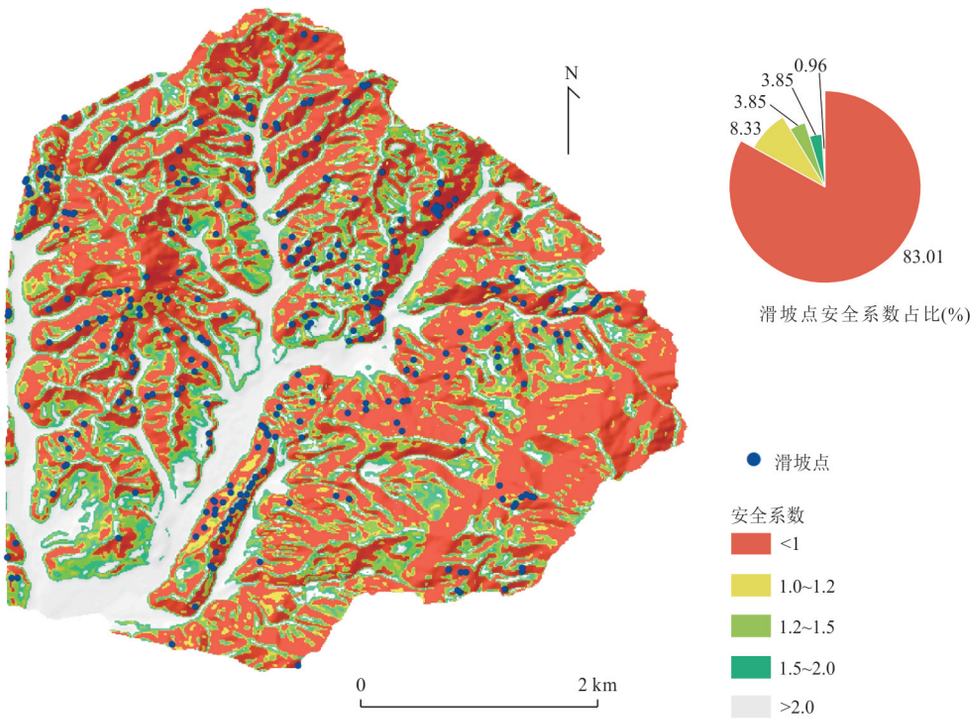

图 6　研究区坡体稳定性空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of slope stability in the study area

表 3　TRIGRS 模型 $\%LR_{class}$ 评估结果

Table 3　$\%LR_{class}$ evaluation results of the TRIGRS model

安全系数	滑坡点预测比例	预测区域面积比例	LR_{class}	$\%LR_{class}$
不稳定(F_S<1)	83.01%	46.47%	1.786	84.93%
稳定(F_S≥1)	16.99%	53.53%	0.317	15.07%

再引发新的失稳区域.如在恒定降雨强度为 60 mm/h时,降雨持续时间为 2 h、6 h 与 10 h对应的不稳定面积比例分别为 3.6%、35.66% 和 49.70%,并在达到 10 h 后整个研究区失稳面积不再显著扩大.

值得注意的是,当降雨强度≥40 mm/h 时,最大失稳面积比例均稳定在约 49.70%.这一现象与模型机理以及研究区的地质条件密切相关.一方面,TRIGRS 模型所采用的一维垂直入渗理论及无限斜坡稳定性计算公式,未考虑到坡体内部侧向渗流、优势流等非均质快速入渗过程,导致模型在高雨强条件下对失稳范围的预测趋于理论收敛,从而在结果中表现出稳定的面积比例上限.另一方面,受坡度条件、土体强度储备等因素影响,仍有相当一部分栅格单元即使在长时间强降雨作用下较难失稳(FS<1),从而导致计算获得的不同高雨强情景下最终失稳面积比例趋于一致.

从不同降雨持续时间下的临界降雨强度分布(图 8)可以看出,随着降雨持续时间由 6 h 增加至 10 h 和 20 h,研究区整体的临界降雨强度呈现明显降低的趋势,且高临界降雨强度区域的空间范围逐渐收缩,低阈值区域范围不断扩大.具体表现为,最大临界强度由 76.91 mm/h 递减至 25 mm/h,最小临界强度亦同步下降,同时不同网格单元间的临界降雨强度差异随持续时间增长而逐渐缩小,这主要是由于土体在不同降雨持续时间下存在水文响应机制差异.在短时降雨条件下,土体初期多为非饱和状态,渗透系数随饱和度升高而增加.当瞬时降雨强度超过土体当前入渗能力时,多余降雨将转化为地表径流,限制压力水头的持续积累.由于不同栅格单元的渗透性和排水条件存在差异,短历时下达到失稳所需的临界降雨强度变异性较大,如图 8a.随着降雨持续时间的延长,土体趋于完全饱和,入渗和径流对压力水头积累的限制作用减弱,各栅格单元之间的临界降雨强度差异缩小,区域阈值趋于一致,如图 8c.此外,更长的降雨持续时间使土体经历了更充分的压力水头累积过程,导致临界降雨强度显著降低.图 8 表明石英片岩岩性区的临界降雨强度普遍低于花岗岩区.这主要是因为石英片岩岩

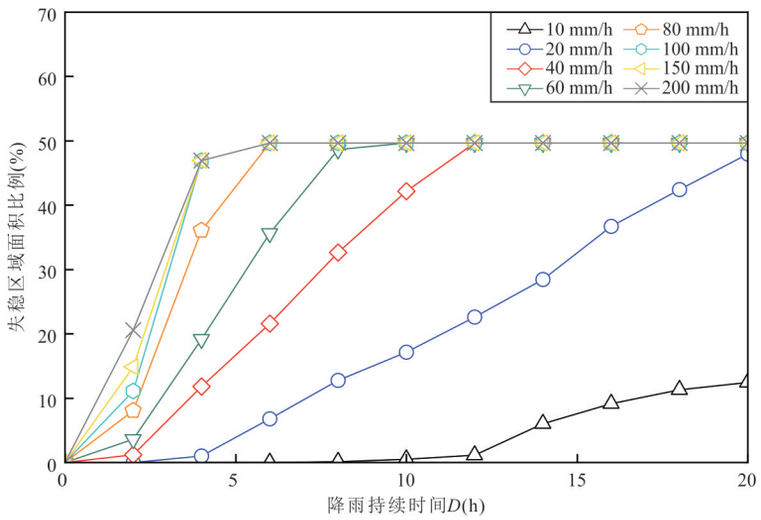

图 7　不同降雨强度下研究区失稳面积比例随降雨持续时间变化

Fig. 7　Proportion of unstable area versus rainfall duration under different rainfall intensities

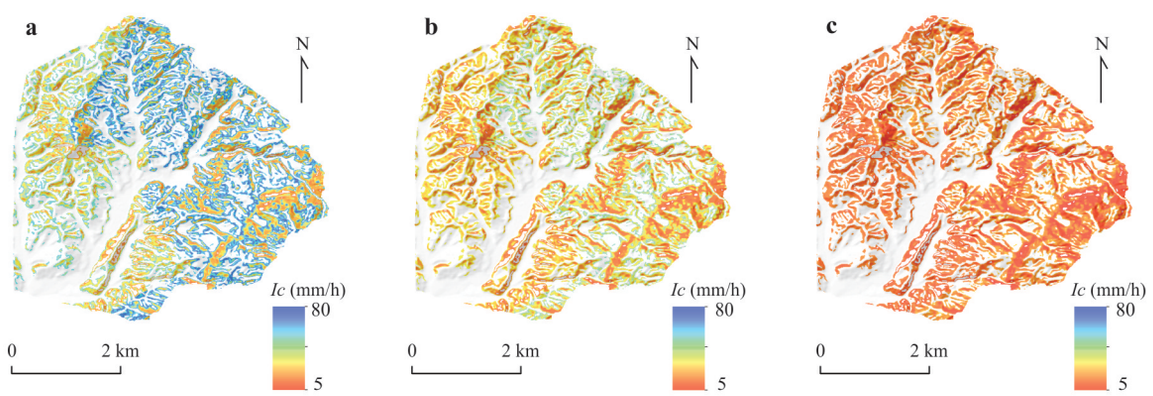

图 8　不同降雨持续时间研究区网格单元的临界降雨强度

Fig. 8　Critical rainfall intensity of grid cells in the study area for different rainfall durations

a. 6 h；b. 10 h；c. 20 h

体风化破碎、节理裂隙发育，导致土体抗剪强度较低、透水性较高，更易在降雨条件下发生滑动失稳；而花岗岩区土体整体抗剪强度较高、饱和渗透系数相对较低，降雨下失稳过程较为迟缓.

3.2.2　不同岩性区的降雨阈值曲线及参数特征

考虑到 TRIGRS 模型对于坡体稳定性的评估受坡度及其影响下的土层厚度影响显著，笔者提取了研究区域范围内石英片岩和花岗岩所对应的有效坡度，分别是 22°～35° 和 23°～45°. 为进一步分析不同岩性区的滑坡降雨阈值特征，笔者对于研究区域有效坡度范围内的降雨阈值曲线进行了拟合，其中，在 30° 及以下的坡度范围，石英片岩区选取了 22°、25°、27° 和 30°，花岗岩区选取了 23°、25°、27° 和 30°；30° 以上坡度范围，石英片岩区选取了 35°，花岗岩区则选取了 35°、40° 和 45°，结果如图 9 所示. 本次拟合的有效范围主要集中于持续降雨时间 20 h 以内，涵盖了研究区域大多数滑坡事件的降雨历时数据.

在石英片岩区，固定的降雨时间所对应的降雨阈值强度随坡度增加呈现持续下降趋势. 较缓坡度(22°)的降雨阈值曲线构成整个曲线簇的上边界，代表在相对平缓地形下失稳所需的最高降雨强度－持续时间条件；而较陡坡度(35°)的降雨阈值曲线则构成下边界，表明坡体在较低的降雨强度－持续时间组合条件下即可达到失稳. 各降雨阈值曲线形态近似平行，表明坡度增大对该区域斜坡稳定性的削弱作用具有一致性. 但在花岗岩区，降雨阈值曲线的分布随着坡度变化具有较高的变异性. 在中等坡度(23°～27°)范围，降雨阈值曲线的斜率逐渐增大，后随坡度继续增加降雨阈值曲线的斜率逐渐减小. 这一非单调分布模式表明，坡度对花岗岩斜坡稳定

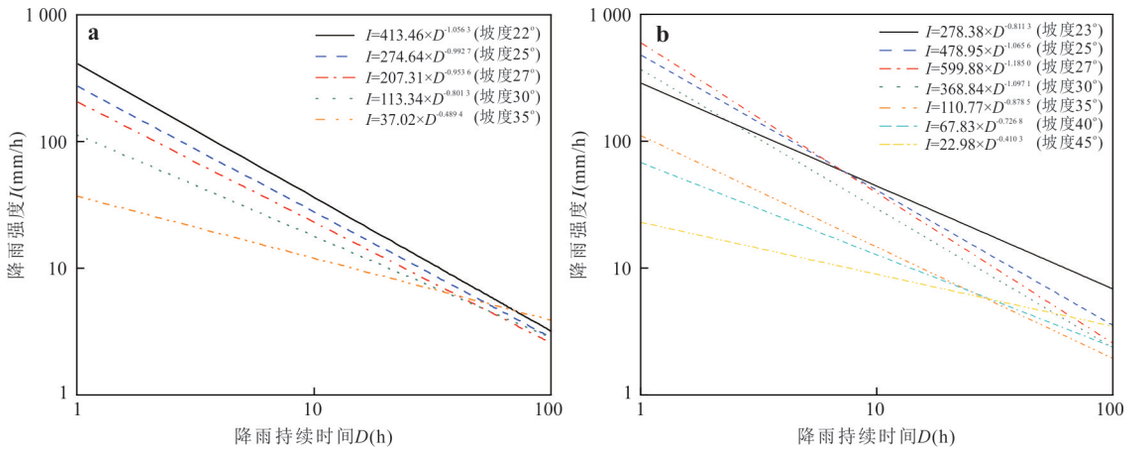

图 9　不同坡度的降雨阈值曲线

Fig. 9　Rainfall threshold curves for different slope gradients

a.石英片岩;b.花岗岩

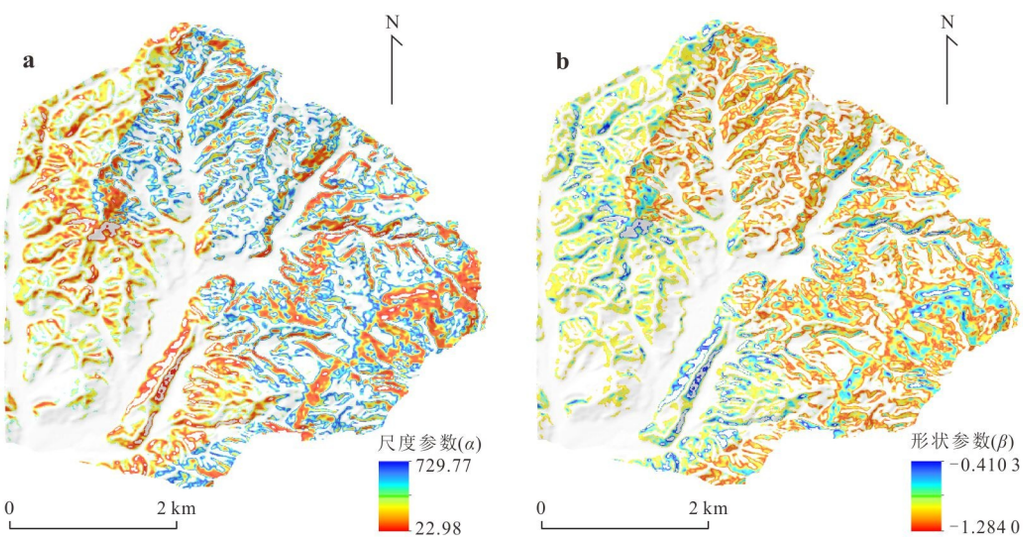

图 10　降雨阈值曲线的特征参数空间分布

Fig. 10　Spatial distribution of characteristic parameters for the rainfall threshold curves

a.尺度参数 α;b.形状参数 β

性的影响机制较石英片岩区更为复杂.

滑坡的强度－历时(I-D)降雨阈值曲线中 α 作为尺度参数决定了阈值曲线的初始位置,物理上可视为短时强降雨条件下,引发失稳所需的临界降雨强度(Palau *et al.*, 2023).其值越大,表明斜坡抵抗短时暴雨的能力越强,触发滑坡所需的雨强"门槛"越高.β 为形状参数,该参数通常为负值,决定了阈值曲线的形态或斜率,反映了临界雨强随降雨历时(D)的增加而衰减的速率(Bogaard *et al.*, 2018).其绝对值越大,说明衰减速率越快,土体对长历时降雨的水文响应越敏感,在长期降雨下更容易被较低的雨强触发.尺度参数 α 与形状参数 β 共同定义了阈值曲线的整体形态:尺度参数 α 控制着短历时降雨的触发阈值,形状参数 β 而则主导了长历时降雨下该阈值的降低速率.经统计,研究区尺度参数 α 与形状参数 β 在研究区域范围内呈现明显的空间分布差异(图 10).尺度参数 α 数值范围是 22.98～729.77,山脊两侧及陡坡区域较低,沟谷低洼地带及缓坡区域较高;而形状参数 β 数值范围是 −1.284 0 至 −0.410 3,整体变化幅度相对较小.

在此基础上,笔者进一步分析了不同岩性区降雨强度－历时(I-D)阈值曲线的尺度参数 α 与形状参数 β 之间的统计关系(图 11).结果显示在石英片岩区,α 随着 β 增加呈现单一下降趋势,但花岗岩区

的数据呈现出两条独立的趋势线.整体而言,尺度参数α与形状参数β之间均呈现出显著的负相关关系,即尺度参数α增加时,形状参数β相应减小.不同坡体间短历时降雨下临界降雨强度的显著差异与长历时降雨下的临界降雨强度的较小差异,共同塑造了高尺度参数α对应较低形状参数β的特征.

3.3 讨论

3.3.1 坡度对于降雨阈值的影响 为深入探究石英片岩和花岗岩区域对应的降雨阈值曲线特征参数变化规律的差异,本节进一步探讨了坡度与降雨阈值曲线特征参数的关系,并结合不同降雨历时下临界降雨强度对坡度的响应规律进行阐释.在石英片岩区,阈值参数随坡度变化呈现清晰的单调趋势(图 12a):尺度参数α随着坡度的增大呈减小趋势.这意味着坡度越大,在短历时降雨条件下引发失稳所需的临界降雨强度越低(图 13a).形状参数β则随坡度的增大而逐渐增大(绝对值减小).这表明随着坡度增加,临界降雨强度衰减速率趋于平缓.具体而言,当坡度约为 22°时,石英片岩的尺度参数α约为 413,形状参数β约为−1.06;当坡度增大至 35°左右时,尺度参数α降低至约 37.02,形状参数β增大至约−0.49.相比之下,花岗岩区的尺度参数α与形状参数β随坡度的变化并非单调,而是在约 27°时出现转折(尺度参数α达到最大值,形状参数达到最小值)(图 12b).如图 13b 所示,在降雨持续时间为 6 h 时,花岗岩区的临界降雨强度随坡度增大呈先增后降趋势,坡度 27°左右时,引发失稳所需的临界降雨强度最大.这也解释了图 11 中花岗岩阈值参数呈双趋势线的成因:坡度 27°作为一个自然分界点,使得低于和高于此值的样本点各自形成了独立的变化趋势.总体来看,坡度对I-D降雨阈值曲线的特征参数影响显著,且不同岩性区的变化规律存在差异.

在本研究区,石英片岩区饱和渗透系数较高,降雨入渗速率较快,坡面径流影响较弱.因此,随着坡度升高,下滑力增强可能主导了失稳过程,使得短历时临界强度对应的尺度参数α随坡度单调降低,同时形状参数β的绝对值减小,长历时条件下临界降雨强度的衰减速率趋于平缓.相比之下,花岗岩分布区得饱和渗透系数相对较小的,可能导致坡度增加在加剧下滑力的同时,也使得坡面径流增强,从而抑制了入渗效率.如图 b 所示,在 6 h 降雨条件下,当坡度低于约 27°时,随坡度增加,坡面入渗减少和径流增强等水文作用可能占据主导,导致临界降雨强度逐渐上升;而当坡度超过约 27°后,入渗随坡度增加逐渐受限,逐步增大的下滑力可能主导失稳过程,使得临界降雨强度下降.因此,花岗岩区阈值参数区别于石英片岩区的分布特征(图 11 和图 12),这可能是入渗受限与力学失稳两种机制随坡度发生动态转换导致的结果.此外,计算结果显示这一非单调变化及其对应的转折坡度具有历时依赖性(图 13b).随着降雨持续时间的延长,累积入渗量增加,坡面径流对入渗的限制作用逐渐减弱,临界降雨强度随坡度的增大逐渐降低.因此,该现象在短历时降雨条件下较为显著,并随降雨历时延长而趋于减弱或消失.

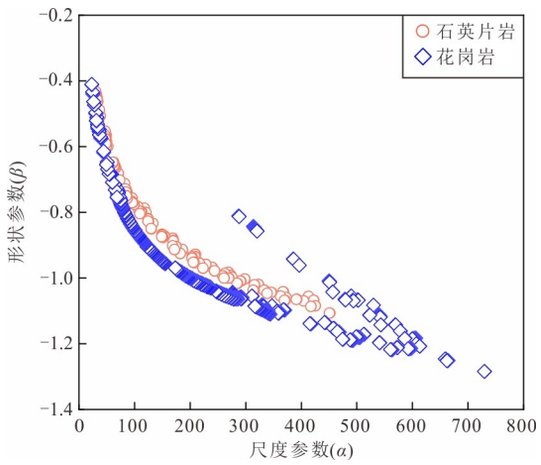

图 11 不同岩性区降雨阈值曲线的尺度参数α与形状参数β的统计关系

Fig. 11 Statistical relationship between scale parameter α and shape parameter β of rainfall threshold curves in different lithological units

3.3.2 不同岩性压力水头的响应规律 为深入揭示不同岩性区降雨阈值参数对坡度变化的响应机制,本文基于 TRIGRS 模型,模拟了 6 h 降雨历时下,两类岩性坡体在不同坡度条件下坡底最大压力水头随降雨强度的演化规律,结果如图 14 所示.模拟结果显示,随降雨强度增大,所有坡度单元的坡底压力水头均持续上升,并在临界降雨强度附近发生突变,坡体失稳.

石英片岩区表现出单调响应:随坡度由 23°增至 35°,坡体失稳所需临界降雨强度逐渐降低,表明陡坡条件下土体更易饱和并快速形成压力水头.该模拟结果与尺度参数α随坡度单调递减的统计规律(图 12a)以及临界降雨强度随坡度降低的趋势(图 13a)一致,三者相互印证,共同说明了在石英片岩区,坡度增大将显著降低斜坡稳定性.

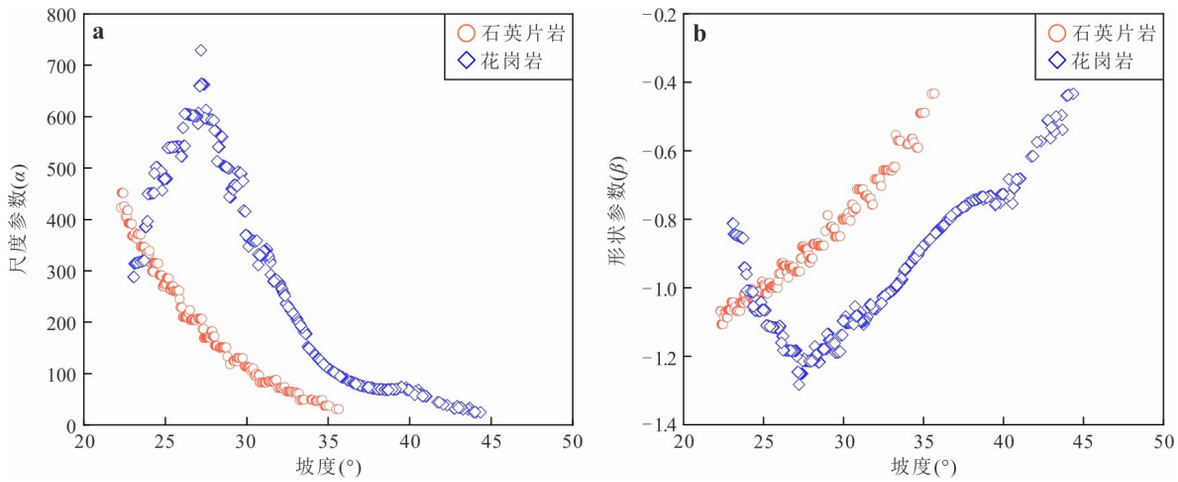

图 12　降雨阈值曲线参数随坡度变化

Fig. 12　Variation of rainfall threshold curve parameters with slope gradient

a.尺度参数 α;b.形状参数 β

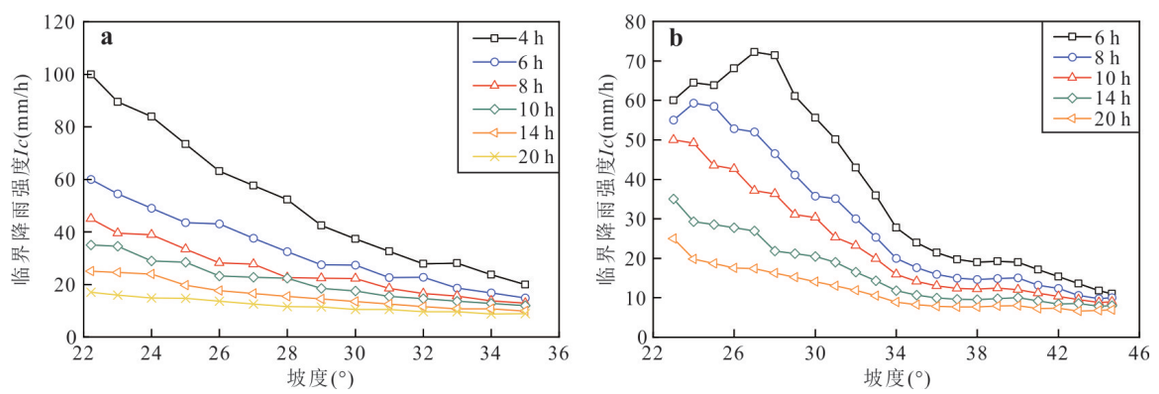

图 13　不同降雨持续时间临界降雨强度随坡度变化

Fig. 13　Variation of critical rainfall intensity with slope gradient for different rainfall durations

a.石英片岩;b.花岗岩

花岗岩区表现出显著的非单调响应特征:在23°～27°的坡度范围内,临界降雨强度随坡度增加而升高.当坡度为27°时,其临界降雨强度达最大值,为72.23 mm/h,表明此坡度下饱和与压力水头积累过程最为缓慢;而当坡度超过27°后,临界降雨强度则显著下降.这一压力水头的非线性演化规律,与尺度参数 α 随坡度先增后减的变化特征(图12b)以及临界降雨强度随坡度的非单调变化(图13b)对应,三者共同揭示了在短历时降雨条件下花岗岩斜坡稳定性随坡度增大呈现先增强后减弱的规律.

上述模拟结果从压力水头累积过程的角度,为理解阈值参数对坡度的响应提供了相关解释.如图14所示,失稳对应的临界压力水头随坡度增加而下降,这可能是由于下滑力增大导致;而在花岗岩区,导致坡体达到临界水头所需的降雨强度呈现先升后降的非单调趋势,说明入渗过程受到坡度的显著影响.在渗透性较高的石英片岩区,水分入渗较为迅速,坡度增大引起下滑力增强,从而促使临界压力水头与临界降雨强度同步下降.而在渗透性较低的花岗岩区,6 h降雨条件下,中低坡度段(约23°～27°)对应的临界压力水头随坡度增加逐渐下降.这可能是由于随着坡度增加引起坡面径流增强,进而抑制有效入渗,使得降雨入渗转化为压力水头的效率降低,因此导致达到临界水头所需的降雨强度逐渐增大;当坡度超过27°后,随坡度持续增加入渗过程受到抑制,但此时下滑力增大对应的力学失稳效应可能占据主导,导致坡体失稳所需的临界压力水头和对应的降雨强度持续降低.因此,岩性控制的渗透性差异可能导致了这两类区域坡体失稳的坡

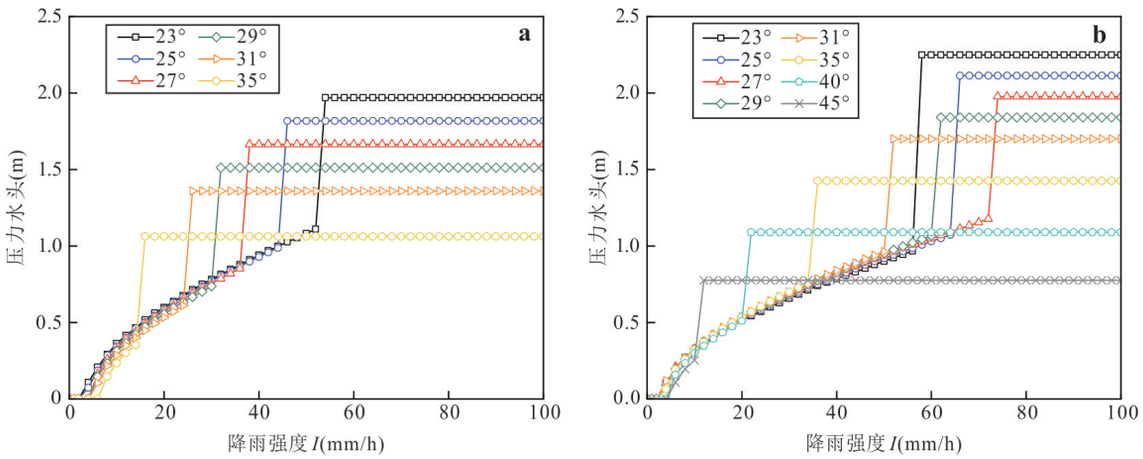

图 14 6 h降雨持续时间下不同坡度压力水头随降雨强度的变化

Fig. 14 Variation of pressure head with rainfall intensity for different slopes under 6-h rainfall duration

a.石英片岩;b.花岗岩

度响应机制差异.

3.3.3 模型局限与研究展望 本研究初步揭示了滑坡触发的主要控制因素,但由于所采用的TRIGRS模型基于一维垂向入渗假设和无限斜坡稳定性计算框架,对实际斜坡三维水文响应与渐进式破坏过程的模拟能力存在一定局限性.在水文过程方面,模型基于均匀介质假设,难以捕捉非均质土体中的复杂渗流行为,导致在地形汇水区可能因低估水分聚集效应而忽略潜在失稳区,在排水区则可能因忽视孔隙水压力消散过程而高估失稳风险(Greco *et al.*,2023; Wu *et al.*,2026).在力学机制方面,模型采用静态极限平衡分析,无法模拟条块间的力学传递、强度渐进退化及滑动面贯通过程,因此尚不能准确反映滑坡的破坏模式与规模演化特征(DiBiagio *et al.*,2024).上述对复杂物理过程的简化,在一定程度会影响在动态变化情景下的降雨阈值预测精度.

因此,后续工作建议从以下方面进一步深入完善:一是发展能够耦合坡面与地下侧向流、并考虑实际滑坡几何形态的稳定性模型,以便更真实地模拟侧向汇流与排水作用下的孔隙水压力响应及边坡破坏过程;二是针对本研究在花岗岩区域发现的临界降雨强度随坡度呈现"先升后降"的非单调性规律,后续结合现场实测数据开展更全面的机理探讨.在此基础上,未来可进一步结合更精细的岩土参数开展三维空间的高分辨率水文数值模拟和坡体稳定性分析,并结合物理模型试验或原位试验进行验证,将有助于提升区域精细化降雨型滑坡预警的准确率.

4 结论

本文基于TRIGRS模型,针对2021年6月28日福建省南平市吴家塘流域的群发性滑坡,构建了不同岩性区的降雨阈值,并对其不同坡度下降雨阈值参数变化规律展开分析,得到如下结论:

(1)TRIGRS模型在研究区的预测结果显示,其对实际滑坡点的命中率达83.01%.不稳定区域的$\%LR_{class}$指标为84.93%,表明TRIGRS模型在本地区滑坡预测中具有较好的适用性能,能较为准确地再现研究区由降雨诱发的浅层滑坡分布.

(2)460种降雨工况的模拟结果表明:在空间上,临界降雨强度受地形坡度与岩性协同控制,表现为山脊陡坡区值低、沟谷缓坡区值高,且石英片岩区因渗透性高、抗剪强度低,在相同降雨历时条件下其临界强度值普遍低于花岗岩区;在时间上,临界降雨强度随降雨历时增长呈显著衰减趋势,不同栅格单元间的临界降雨强度差异不断缩小,呈现出明确的"空间变异性收敛"特征.

(3)石英片岩的尺度参数α随着坡度的增大呈减小趋势,形状参数β则随坡度的增大而逐渐增大.但花岗岩区的临界降雨阈值曲线特征参数在坡度约27°附近发生转折,尺度参数α先增后减,形状参数β先减后增.基于TRIGRS模型的压力水头模拟结果表明受岩性影响的上覆土层饱和渗透系数不同,引起的降雨入渗与径流分配及压力水头的积累

速率差异,可能导致了不同岩性区降雨阈值参数随坡度变化产生的差异化响应.

(4)本研究验证了在缺乏详实历史降雨—滑坡数据地区,利用TRIGRS模型开展滑坡降雨阈值研究的适用性,并揭示了岩性、坡度等多因素对降雨阈值的控制作用.针对现有研究的局限性,未来可以从模型细化和现场监测方面进一步深入,在此基础上结合更精细的岩土参数开展三维空间的高分辨率水文数值模拟和坡体稳定性分析,推动区域降雨型滑坡实现精细化预警.

References

Alvioli, M., Baum, R. L., 2016. Parallelization of the TRIGRS Model for Rainfall-Induced Landslides Using the Message Passing Interface. *Environmental Modelling & Software*, 81: 122—135. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.002

Alvioli, M., Guzzetti, F., Rossi, M., 2014. Scaling Properties of Rainfall Induced Landslides Predicted by a Physically Based Model. *Geomorphology*, 213: 38—47. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.12.039

An, N., Dai, Z. S., Hu, X., et al., 2025. Comparing Landslide Patterns and Failure Mechanisms in Restored and Native Forest Ecosystems: Insights from Geomorphology, Lithology and Vegetation. *CATENA*, 260: 109452. https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109452

Baum, R. L., Godt, J. W., Savage, W. Z., 2010. Estimating the Timing and Location of Shallow Rainfall-Induced Landslides Using a Model for Transient, Unsaturated Infiltration. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3): 2009JF001321. https://doi.org/10.1029/2009jf001321

Baum, R.L., Savage, W.Z., Godt, J.W., 2002. TRIGRS—A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. Open-file Report 02—424. US Geological Survey: Reston, VA, USA, 35.

Baum, R.L., Savage, W.Z., Godt, J.W., 2008. TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. US Geological Survey,Reston, VA, USA.

Bogaard, T., Greco, R., 2018. Invited Perspectives: Hydrological Perspectives on Precipitation Intensity-Duration Thresholds for Landslide Initiation: Proposing Hydro-Meteorological Thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1): 31—39. https://doi. org/10.5194/nhess-18-31-2018

Chae, B. G., Park, H. J., Catani, F., et al., 2017. Landslide Prediction, Monitoring and Early Warning: A Concise Review of State-of-the-Art. *Geosciences Journal*, 21(6): 1033—1070. https://doi. org/10.1007/s12303-017-0034-4

DiBiagio, A., Capobianco, V., Oen, A., et al., 2024. State-of-the-Art: Parametrization of Hydrological and Mechanical Reinforcement Effects of Vegetation in Slope Stability Models for Shallow Landslides. *Landslides*, 21(10): 2417—2446. https://doi. org/10.1007/s10346-024-02300-1

do Pinho, T. M., Augusto Filho, O., 2022. Landslide Susceptibility Mapping Using the Infinite Slope, SHALSTAB, SINMAP, and TRIGRS Models in Serra Do Mar, Brazil. *Journal of Mountain Science*, 19(4): 1018—1036. https://doi.org/10.1007/s11629-021-7057-z

Gariano, S. L., Melillo, M., Peruccacci, S., et al., 2020. How Much does the Rainfall Temporal Resolution Affect Rainfall Thresholds for Landslide Triggering? *Natural Hazards*, 100(2): 655—670. https://doi. org/10.1007/s11069-019-03830-x

Greco, R., Marino, P., Bogaard, T. A., 2023. Recent Advancements of Landslide Hydrology. *WIREs Water*, 10(6): e1675. https://doi.org/10.1002/wat2.1675

Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., et al., 2020. Geographical Landslide Early Warning Systems. *Earth-Science Reviews*, 200: 102973. https://doi. org/10.1016/j.earscirev.2019.102973

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., et al., 2008. The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows: An Update. *Landslides*, 5(1): 3—17. https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1

He, J. Y., Qiu, H. J., Qu, F. H., et al., 2021. Prediction of Spatiotemporal Stability and Rainfall Threshold of Shallow Landslides Using the TRIGRS and Scoops3D Models. *CATENA*, 197: 104999. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104999

Iverson, R. M., 2000. Landslide Triggering by Rain Infiltration. *Water Resources Research*, 36(7): 1897—1910. https://doi.org/10.1029/2000wr900090

Kim, K. S., Song, Y. S., 2015. Geometrical and Geotechnical Characteristics of Landslides in Korea under Various Geological Conditions. *Journal of Mountain Science*,

12(5): 1267－1280. https://doi. org/10.1007/s11629-014-3108-z

Li, C., Zhang, R. T., Zhu, J. B., et al., 2024. Model Test Study on Response of Weathered Rock Slope to Rainfall Infiltration under Different Conditions. *Journal of Earth Science*, 35(4): 1316－1333. https://doi. org/10.1007/s12583-022-1704-3

Li, W. Y., Liu, C., Hong, Y., et al., 2016. A Public Cloud-Based China's Landslide Inventory Database (CsLID): Development, Zone, and Spatiotemporal Analysis for Significant Historical Events, 1949－2011. *Journal of Mountain Science*, 13(7): 1275－1285. https://doi.org/10.1007/s11629-015-3659-7

Liu, X. P., Yin, K. L., Xiao, C. G., et al., 2024. Meteorological Early Warning of Landslide Based on I-D-R Threshold Model. *Earth Science*, 49(3): 1039－1051(in Chinese with English abstract).

Liu, Z. Q., Wu, Q., Wang L. Q., et al., 2025. Review on Multi-scale Formation Mechanisms of Rainfall-Induced Cluster Landslides in Southeastern China under Multi-factor Coupling Effects. *Earth Science* (in Chinese with English abstract)(Online First).

Ma, S. Y., Shao, X. Y., Xu, C., 2023. Physically-Based Rainfall-Induced Landslide Thresholds for the Tianshui Area of Loess Plateau, China by TRIGRS Model. *CATENA*, 233: 107499. https://doi. org/10.1016/j. catena.2023.107499

Marin, R. J., 2020. Physically Based and Distributed Rainfall Intensity and Duration Thresholds for Shallow Landslides. *Landslides*, 17(12): 2907－2917. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01481-9

Marin, R. J., García, E. F., Aristizábal, E., 2020. Effect of Basin Morphometric Parameters on Physically-Based Rainfall Thresholds for Shallow Landslides. *Engineering Geology*, 278: 105855. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2020.105855

Marin, R. J., Velásquez, M. F., 2020. Influence of Hydraulic Properties on Physically Modelling Slope Stability and the Definition of Rainfall Thresholds for Shallow Landslides. *Geomorphology*, 351: 106976. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106976

Marin, R. J., Velásquez, M. F., García, E. F., et al., 2021. Assessing Two Methods of Defining Rainfall Intensity and Duration Thresholds for Shallow Landslides in Data-Scarce Catchments of the Colombian Andean Mountains. *CATENA*, 206: 105563. https://doi. org/10.1016/j.catena.2021.105563

Marra, F., Destro, E., Nikolopoulos, E. I., et al., 2017. Impact of Rainfall Spatial Aggregation on the Identification of Debris Flow Occurrence Thresholds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9): 4525－4532. https://doi.org/10.5194/hess-21-4525-2017

National Bureau of Statistics of China, 2023. 2023 China Statistical Yearbook. China Statistics Press, Beijing (in Chinese).

Palau, R. M., Berenguer, M., Hürlimann, M., et al., 2023. Implementation of Hydrometeorological Thresholds for Regional Landslide Warning in Catalonia (NE Spain). *Landslides*, 20(10): 2039－2054. https://doi. org/10.1007/s10346-023-02094-8

Park, D. W., Nikhil, N. V., Lee, S. R., 2013. Landslide and Debris Flow Susceptibility Zonation Using TRIGRS for the 2011 Seoul Landslide Event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11): 2833－2849. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2833-2013

Roda-Boluda, D. C., D'Arcy, M., McDonald, J., et al., 2018. Lithological Controls on Hillslope Sediment Supply: Insights from Landslide Activity and Grain Size Distributions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(5): 956－977. https://doi.org/10.1002/esp.4281

Segoni, S., Piciullo, L., Gariano, S. L., 2018. A Review of the Recent Literature on Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence. *Landslides*, 15(8): 1483－1501. https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4

Tan, Z. Y., Yin, C., Zhang, X. X., et al., 2024. Stability Assessment of Shallow Soil Landslide and Activating Rainfall Threshold. *Natural Hazards Review*, 25(2): 04024004. https://doi.org/10.1061/nhrefo.nheng-1961

Viet, T. T., Lee, G., Thu, T. M., et al., 2017. Effect of Digital Elevation Model Resolution on Shallow Landslide Modeling Using TRIGRS. *Natural Hazards Review*, 18(2): 04016011. https://doi. org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000233

Watakabe, T., Matsushi, Y., 2019. Lithological Controls on Hydrological Processes That Trigger Shallow Landslides: Observations from Granite and Hornfels Hillslopes in Hiroshima, Japan. *CATENA*, 180: 55－68. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.010

Wu, J. Y., Lü, Q., Liao, Z. X., et al., 2026. Rainfall Infiltration in an Extremely High Rock Fragment Content

Geodisaster-Prone Landscape: Insights from Intensive Field Monitoring. *Journal of Hydrology*, 664: 134481. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134481

Xu, Q., 2020. Understanding the Landslide Monitoring and Early Warning: Consideration to Practical Issues. *Journal of Engineering Geology*, 28(2): 360－374(in Chinese with English abstract).

Yang, Y. Y., An, N., Lü, Q., et al., 2025. Optimizing Data Grouping Strategies for Landslide Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio-Machine Learning Coupled Models. *Geocarto International*, 40(1): 2578804. https://doi.org/10.1080/10106049.2025.2578804

Yu, Y., Xu, Z. H., Yang, Y. Y., et al., 2025. Numerical Investigation into the Formation of Pipe Flow and the Influencing Factors in Soil-Rock Mixtures. *Computers and Geotechnics*, 185: 107342. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107342

中文参考文献

国家统计局, 2023. 2023 中国统计年鉴. 北京:中国统计出版社.

刘谢攀,殷坤龙,肖常贵,等, 2024. 基于 I-D-R 阈值模型的滑坡气象预警. 地球科学,49(3): 1039－1051.

刘智琪,吴琼,王亮清,等, 2025. 多因素耦合作用下东南降雨型群发滑坡多尺度孕育机制研究综述. 地球科学(网络首发).

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