

浙江泰顺 2016 年莫兰蒂台风极端暴雨诱发群发性滑坡¹

冯杭建^{1*}, 张 俞², 张 重¹, 朱铭卿¹, 徐兴华¹, 刘冬³, 林丹¹

1 浙江省地质院, 杭州, 浙江, 310007;

2. 浙江省地物检验检测集团有限公司, 杭州, 浙江, 310007;

3. 浙江省第十一地质大队(浙江省温州地质院), 温州, 浙江, 325006

Feng Hangjian^{1*}, Zhang Yu², Zhang Zhong¹, Zhu Mingqing¹, Xu Xinhua¹, Liu Dong³, Lin Dan¹

1. Zhejiang Institute of Geosciences, Hangzhou, Zhejiang, 310007, China

2. Zhejiang Diwu Inspection & Detection Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310007, China

3. The 11th Geological Brigade of Zhejiang Province(Zhejiang Wenzhou Institute of Geosciences), Wenzhou, Zhejiang, 325006, China

Clustered landslides triggered by an extreme rainstorm of Typhoon Meranti in Taishun, Zhejiang(2016)

Abstract: Extreme rainfall-induced clustered landslide and debris flow hazards have become one of the primary natural disasters in China and globally. In this study, the clustered landslide disaster in Taishun triggered by extreme rainfall of Typhoon Meranti in 2016 was selected as a typical case. Fine interpretation and remote sensing identification of geo-hazards were carried out using high-resolution optical remote sensing images and LiDAR data. Combined with field investigation and verification, a geo-hazard inventory database was established, including 3628 shallow landslides and 1584 slope debris flows. The results reveal that rainfall-induced geo-hazards in the study area are characterized by large quantity, small individual scale, high spatial density and strong sudden clustered occurrence, which belong to typical compound chain-type landslide-debris flow disasters. The spatial distribution is dominated by the coupling of extreme rainfall threshold, lithology, topography and geomorphology. South-facing slopes, concave slopes, terrain gradients of $25^{\circ} - 45^{\circ}$, and weathered granite areas present poor stability of rock and soil masses, serving as high-susceptibility zones for landslides and debris flows. Moderate-to-high concentration areas of landslides and debris flows are generally consistent with rainfall concentration zones where the maximum 1-hour rainfall exceeds 70 mm and the maximum 3-hour rainfall exceeds 120 mm. However, the disaster density is relatively low at local rainfall extreme centers, confirming that intrinsic factors such as lithology, slope gradient and elevation exert critical controlling and filtering effects. Refined geomorphological identification of shallow landslides in the initiation zones of slope debris flow gullies indicates that gully head areas, gradient transition zones and historical disaster scar zones are critical gestation zones dominating debris flow initiation. Accordingly, an evolutionary model of the slope debris flow disaster chain under extreme rainfall was constructed. The research findings can provide a scientific reference for the accurate identification and prevention of clustered landslide and debris flow hazards triggered by extreme rainfall in the future.

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(No.LTGG23D020001); 国家自然科学基金重点项目(No.42230702); 国家自然科学基金面上项目(No.42277132); 中央自然灾害防治体系建设补助资金项目-浙江省(No.2020-04)

第一/通讯作者: 冯杭建(1979-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事地质灾害、地质文化和地质遗产方面研究。E-mail: pcerma@foxmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3732-5066>

Key words: typhoon Meranti; extreme rainfall; clustered landslides; rainfall-induced landslide; hillslope debris flow; distribution patterns; LiDAR

摘要: 极端降雨事件诱发的群发性滑坡泥石流灾害已成为我国乃至全球面临的主要自然灾害之一。本文选择 2016 年“莫兰蒂”台风极端降雨触发的泰顺群发性滑坡灾害作为典型研究案例, 基于高分辨率光学遥感影像、LiDAR 测量数据等开展灾害精细解译和遥感识别, 结合野外核查验证, 构建了包含 3628 处浅层滑坡和 1584 处坡面泥石流的灾害编目数据库。研究结果表明, 研究区降雨型地质灾害整体表现为点多、规模小、密度高、群发突发性强的发育特征, 属于典型的滑坡-泥石流复合链生灾害。空间分布格局受控于极端降雨阈值、岩性条件以及地形地貌等多因素耦合作用, 南向坡、凹形坡、坡度 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的斜坡及花岗岩风化区岩土体稳定性差, 为滑坡泥石流高敏感区段; 滑坡泥石流中高密集发育区与降雨集中区基本吻合, 但局部降雨极值中心灾害发育密度偏低, 证实岩性、坡度、高程等内在因素起到关键筛选和控制作用。坡面泥石流沟启动区浅层滑坡地貌特征精细化识别表明, 细沟源头、坡度陡缓转换带以及历史变形痕迹等特殊区域, 是控制泥石流启动的关键孕生带, 据此建立了极端降雨条件下坡面泥石流的灾害链演化模式。本文相关成果可为未来极端降雨触发的群发滑坡泥石流精准识别与防范提供科学参考。

关键词: 台风“莫兰蒂”; 极端降雨; 群发性滑坡; 降雨型滑坡; 坡面泥石流; 分布规律; LiDAR
中图分类号: P237 **收稿日期:** 2026-2-28

0 引言

随着全球气候变化加剧, 我国东南沿海台风、梅雨锋等天气系统带来的极端降雨事件在强度、频次和影响范围上均呈现加剧趋势, 导致大规模、高密度的群发性滑坡灾害频发(黄雨等, 2025; 彭建兵等, 2025)。与单体滑坡不同, 群发性滑坡在短时间内于同一降雨区域集中爆发, 具有点多面广、突发性强、链生效应显著等特点, 易造成灾难性后果。例如, 2024 年 7 月台风“格美”在湖南资兴市诱发约 1.9 万处滑坡, 致 65 人伤亡(Fu *et al.*, 2025; Ma *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2025); 2024 年 6 月发生在粤闽赣三省交界地带的极端降雨事件诱发近 3.5 万处滑坡(Yi *et al.*, 2025), 其中广东省梅州市达 1.5 万处(Ma *et al.*, 2025); 2024 年 4 月广东韶关极端暴雨事件引发了 6310 处浅层滑坡(黄远东等, 2025), 仅江湾镇就解译出 1192 处滑坡(许强等, 2024); 2020 年 6 月中国广东省清远市南部极端降雨诱发的群发性滑坡, 共识别 6660 处滑坡(Xie *et al.*, 2025)。近年来随着降雨带北移, 我国北方地区亦出现极端降雨诱发群发性滑坡泥石流灾害, 如 2023 年 7 月受台风“杜苏芮”影响, 北京、河北和山西部分区域遭遇极端暴雨, 诱发超 10 万处滑坡(Xie *et al.*, 2026), 其中京西山区“23·7”极端降雨事件诱发 1.5 万余处滑坡(Ma *et al.*, 2025), 造成严重损失(Gao *et al.*, 2024)。

2000 年以来, 浙江省多次发生群发性滑坡泥石流灾害, 如 2023 年杭州富阳区(Lü *et al.*, 2024)、2021 年诸暨市五泄镇和马剑镇等地(Zhang *et al.*, 2025; 杜静怡等, 2026)、2019 年台风“利奇马”期间永嘉地区(Cui *et al.*, 2024)、2019 年江山市万青山村、2016 年泰顺县泗溪镇等地、2013 年上虞嵩尖山、2006 年庆元荷地镇、2005 年临安“9·3”洪水期间昌化镇、2004 年“云娜台风”期间乐清市(Li *et al.*, 2012)等地, 均因台风、梅雨和局地暴雨等极端降雨事件引发大量滑坡泥石流, 造成严重人员伤亡和财产损失。本文以 2016 年由台风“莫兰蒂”极端降雨诱发的浙江泰顺群发性滑坡泥石流为典型案例, 系统分析极端降雨触发的地质灾害发育特征、主控因素、触发机制及链生效应, 揭示滑坡-泥石流复合链生灾害演化规律, 为降雨型滑坡识别、预测和风险防控能力提升提供科学支撑。

1 研究区背景

泰顺县位于浙江省温州市南部(图 1a), 属于亚热带海洋季风气候区, 四季分明, 气候温和, 雨量充

沛。温州市瑞安气象站点 20 年观测数据显示，区域多年平均气温 19.6℃，年平均降水量约 1664 mm（图 1b）。区内降雨集中于 5~6 月梅雨期和 7~9 月台风季，受台风影响常形成短历时极端降雨过程。2016 年 9 月 14~15 日，超强台风“莫兰蒂”给泰顺县带来百年一遇极端强降雨，诱发大范围群发性山洪、滑坡和泥石流灾害（图 2），共造成 4 人死亡、失踪 3 人，倒塌房屋 86 间，损毁 3344 间，三座国家级文保单位廊桥被冲毁，直接经济损失 12.873 亿元（温婉，2016）。本次群发地质灾害集中分布在泰顺南部泗溪镇、凤垟乡、东溪乡、柳峰乡、雅阳镇、三魁镇、筱村镇、大安乡等八个乡镇（图 1c），受灾人口达 16.3 万人，其中泗溪镇、凤垟乡等地受灾最为严重。因此本研究选择此区域作为群发性降雨型滑坡研究区，面积约 284 km²。

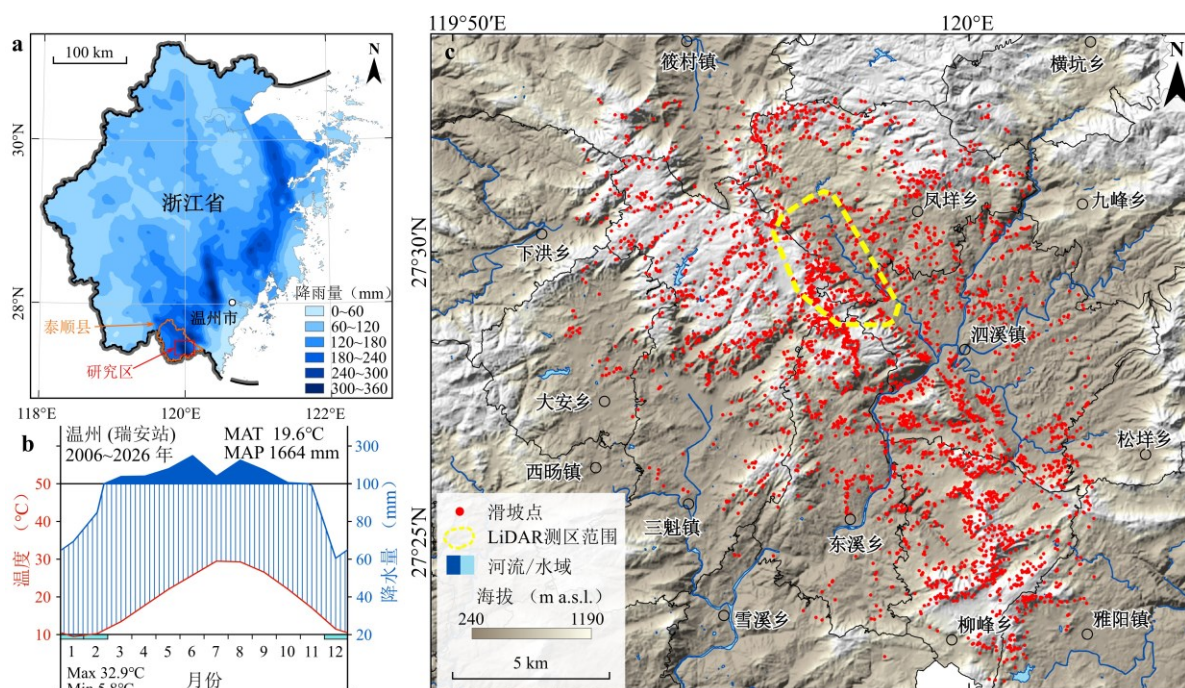


图 1 研究区地理位置及滑坡灾害分布情况

Fig.1 The geographical location of the study area and the distribution of landslide disasters

a. 研究区地理位置（红色矩形框）及 2016 年“莫兰蒂”台风期间浙江省过程降雨量分布图；b. 研究区 20 年降水、温度 Walter-Lieth 气候模式图（数据来源：NOAA 气候数据中心，<https://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/>；图中浅蓝色指示的月份为可能霜冻期；Max：多年平均夏季最高温；Min：多年平均冬季最低温；MAT：多年平均气温；MAP：多年平均降水量）；c. 研究区 2016 年“莫兰蒂”台风期间发生的滑坡分布图，黄色虚线为 LiDAR 测区范围



图 2 典型群发滑坡面泥石流无人机航拍影像

Fig.2 Aerial images of typical clustered landslides and slope debris flows captured by unmanned aerial vehicles

a. 西溪村下湾自然村群发性滑坡；b. 西溪村印山堂自然村群发性滑坡

台风“莫兰蒂”具有强度大、历时短、局地性强等特征，泰顺全县多地 1 小时雨强、3 小时雨强突破历史极值：雅阳镇 3 小时降雨量达 257.6 mm，泗溪镇 1 小时降雨量达 102.8 mm（15 日 12 点），夏炉站 3 小时

降雨量 228.5 mm，均超历史极值（新华网，2016）。泰顺桂山站雨量数据显示（图 3），滑坡触发降雨集中于 9 月 14~15 日 2 天，符合东南沿海台风强降雨触发滑坡的典型降雨特征（Li *et al.*, 2011）；群发滑坡集中发生于 9 月 15 日，当日累计降雨量 311.6 mm（图 3a），降雨核心时段为 11~13 时的三个小时内（图 3b），最大 3h 降雨量达 219.0 mm，占当日总降雨量 70%；最大 1h 降雨量发生在 12 时，达 102.8 mm，占当日总降雨量 33%；灾害发生前一日即 9 月 14 日降雨量 54.2 mm，也达暴雨级别，为群发滑坡提供前期降雨条件。

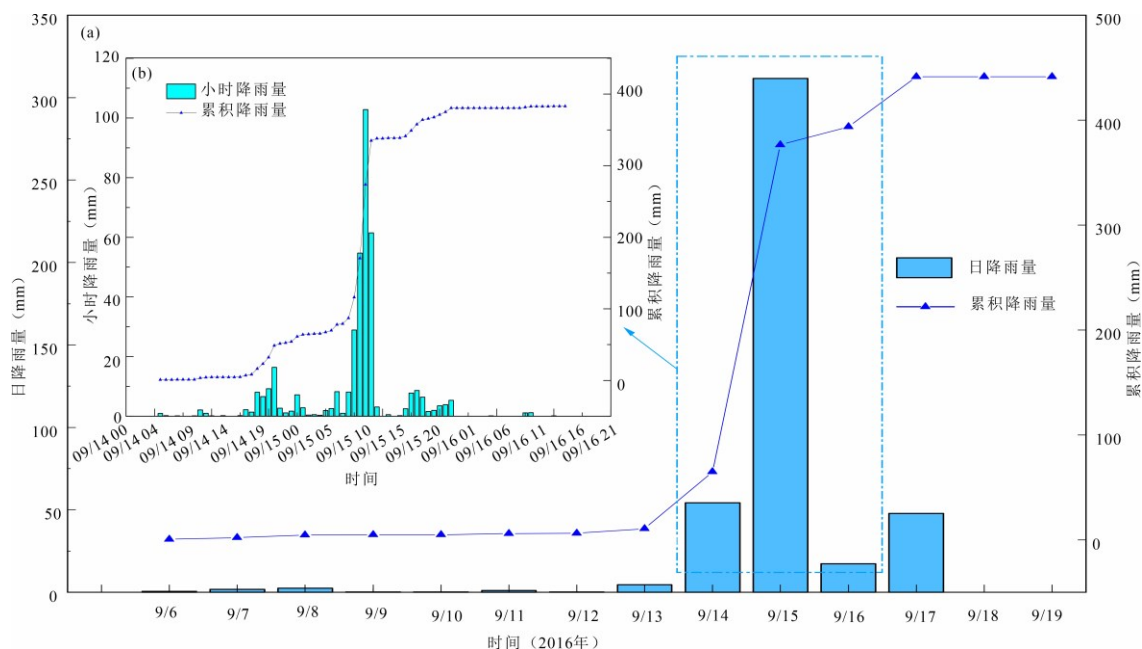


图 3 研究区 2016 年 9 月 6 日至 9 月 19 日降雨量分布图

Fig.3 Rainfall distribution map of the study area from September 6th to September 19th, 2016

a. 日降雨量分布图；b. 2016 年 9 月 14 日 00 时至 9 月 16 日 21 时小时降雨量分布图

2 滑坡编目

2.1 数据与方法

本次滑坡编目采用人机交互的目视解译方法进行滑坡泥石流遥感解译，以降低识别误差和漏判率，确保解译数据精度和准确性。以 ArcGIS 为解译平台，基于灾前和灾后高分辨率光学航空遥感影像（0.5 m、0.2 m）、5 m 分辨率数字高程模型（DEM）及衍生山体阴影图（Hillshade）、坡度图和 1:25 万地质图等数据，通过人工目视解译识别和圈定滑坡和泥石流边界，构建矢量多边形图层并赋予属性信息，最终建成本次群发地质灾害空间数据库。由于研究区植被覆盖率高，滑坡单体规模普遍较小，需高精度数据支撑灾害特征分析。因此本次工作特别选取受灾最严重、灾害点密度最高、灾害发育最典型的泗溪镇西溪村及周边约 6 km² 区域开展机载 LiDAR 测绘（图 4），获取了 0.2 m 分辨率高精度 DEM 数据，为浅层滑坡精细化微地貌识别、高植被覆盖区滑坡解译及灾害链演化分析提供数据保障。

本次群发性灾害类型主要为浅层滑坡和坡面泥石流（图 5），其中坡面泥石流为主要致灾灾种。国外学者通常将降雨诱发浅层滑坡与泥石流统一归为滑坡范畴开展研究（Guzzetti *et al.*, 2007; Brunetti *et al.*, 2010; Gariano *et al.*, 2015; Mondini *et al.*, 2023），在开展降雨型滑坡研究时，也通常包括了泥石流（李长江等，2008）。这会导致滑坡编录数据大多只包含滑坡的位置和轮廓，而缺少关于破坏类型（滑动或流动）、源区范围等关键信息，这将限制对不同类型滑坡触发机制的深入理解（Xi and Xu, 2025）。

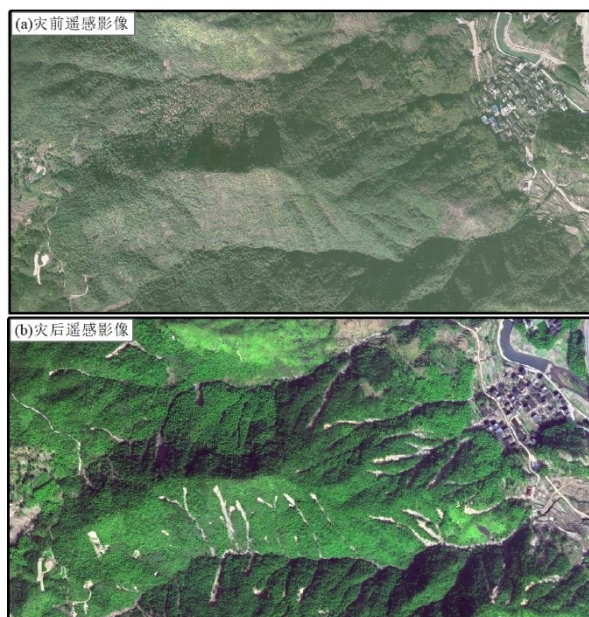


图 4 典型地区灾前和灾后遥感影像对比图

Fig.4 A comparison map of remote sensing images before and after the disaster in a typical area

我国地质灾害调查规范则严格区分滑坡、崩塌和泥石流三类灾害（中华人民共和国国土资源部, 2014）。为突出不同灾种发育特征，深化坡面泥石流触发机制研究，本次解译工作依据形态特征、运动类型、运动距离、地形约束界定灾种，具体判别依据为：具有明显流动过程、呈细长条状、运移距离超过斜坡最高点至河网或平地距离 $2/3$ 以上的划定为坡面泥石流，无明显流动过程的则划为浅层滑坡。解译过程中同步圈定坡面泥石流启动区、流通区浅层滑坡范围，建立关联属性，确保数据完整性。图 5 示意性展示了群发性浅层滑坡和坡面泥石流的形态特征和链式灾害效应，通过解译图 5 整个区域最终将形成 4 条坡面泥石流和 9 个浅层滑坡的矢量数据，在后续的统计中将以此数据为基准，分别采用不同灾种指标体系进行分析。（注：为简化表述，在后续文中将舍去“泥石流”文字，如群发性滑坡，即指群发性滑坡泥石流。）

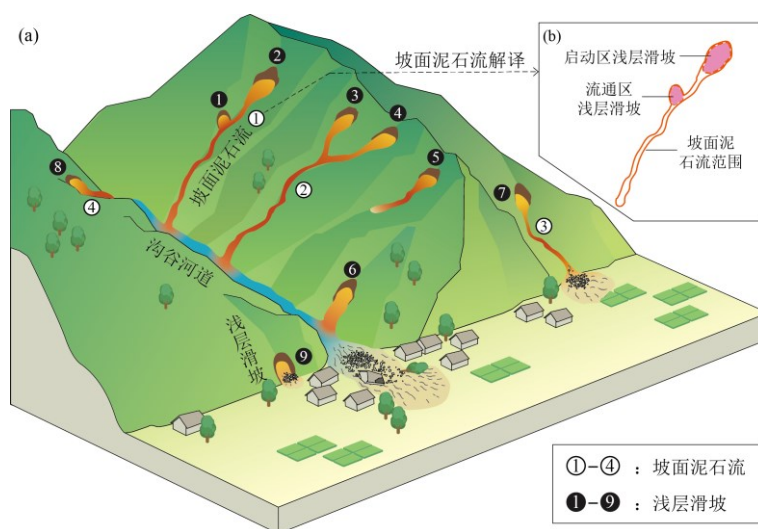


图 5 极端降雨引发群发性滑坡泥石流示意图

Fig.5 Schematic diagram of clustered landslides and debris flows triggered by extreme rainfall

a. 群发性浅层滑坡和坡面泥石流概念图；b. 坡面泥石流解译图，在圈定坡面泥石流边界范围的同时，也圈定启动区和流通区的浅层滑坡的范围

2.2 解译结果

根据上述数据和方法完成遥感解译, 并开展野外实地抽查验证, 结合无人机航拍辅助核验。本次共解译识别单独浅层滑坡 1862 处、坡面泥石流 1584 处, 同时圈定坡面) 泥石流启动区与流通区浅层滑坡 1766 处, 区内浅层滑坡总计 3628 处(后续滑坡统计均以此为基准)。对 LiDAR 测区滑坡点实现 100% 验证, 对成灾滑坡点开展详细勘察, 共验证滑坡泥石流点 368 处, 解译准确率达 95%。高分辨率遥感与地形数据可精准识别面积约 10 m^2 的小型滑坡。解译结果表明, 本次群发滑坡呈现点多、面广、规模小、相对集中等特征, 为典型台风暴雨诱发群发性地质灾害(图 6)。研究区内滑坡分布密度平均达 13 处/km^2 , 为浙江省有记录以来最高。群发性滑坡点集中于凤垟乡—泗溪镇—东溪乡—柳峰乡条带内, 凤垟乡、泗溪镇、东溪乡和三魁镇 4 乡镇交界地带密度最高(图 7), 最大点密度达 72 处/km^2 。

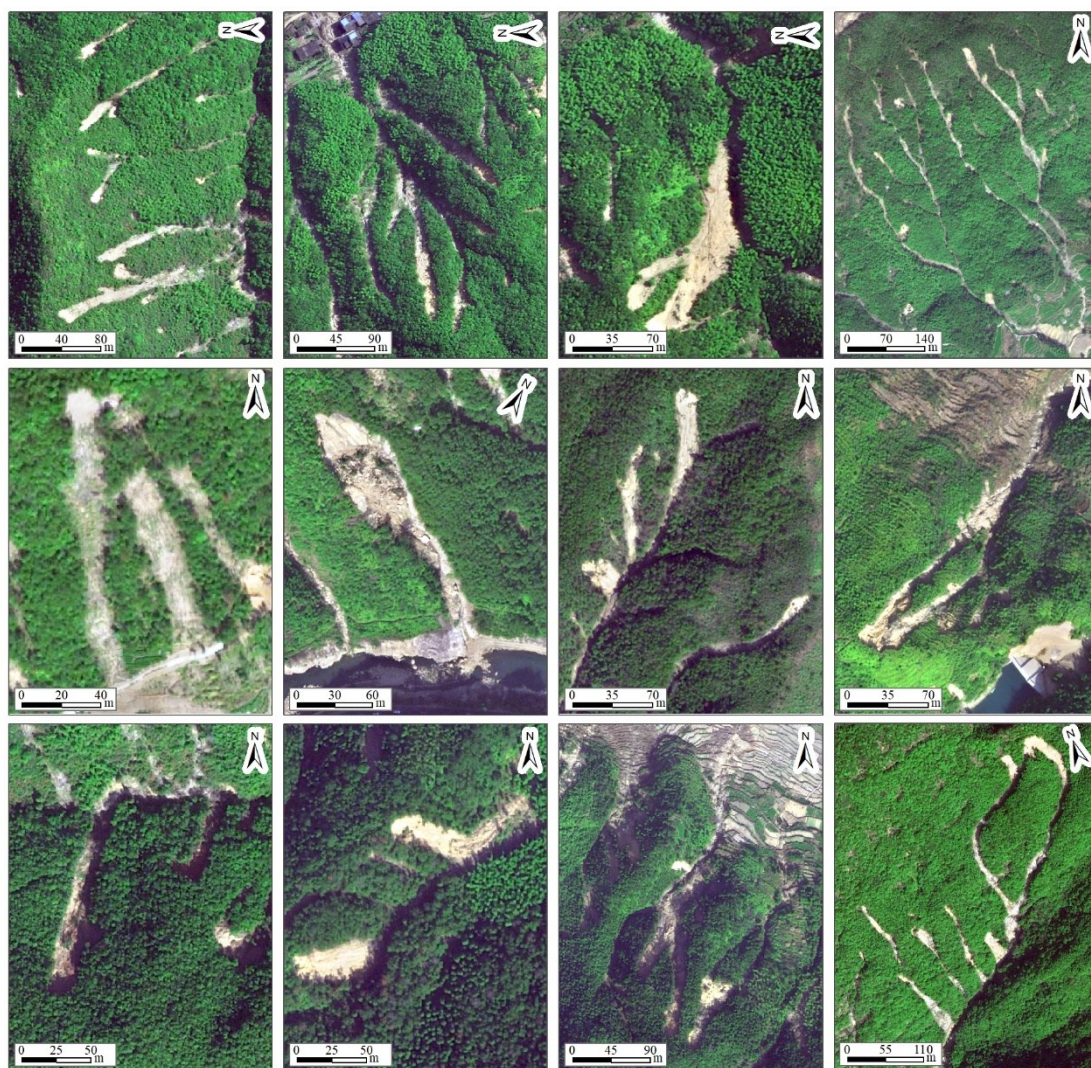


图 6 典型浅层滑坡和坡面泥石流遥感影像

Fig.6 Remote sensing images of typical shallow landslides and slope debris flows

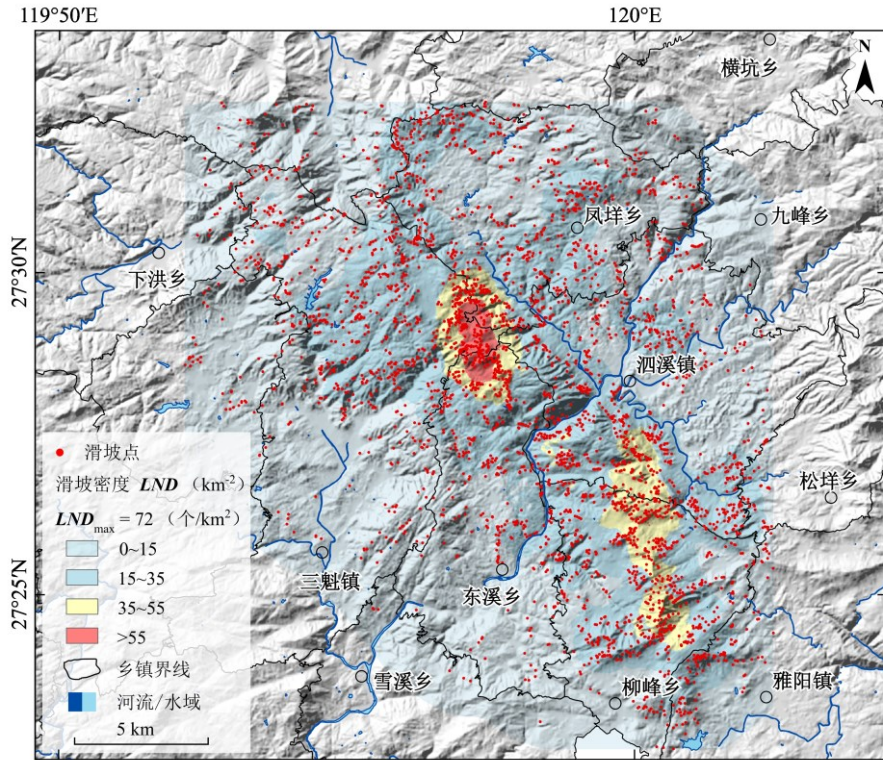


图 7 研究区群发性滑坡密度分布图

Fig.6 Density distribution map of clustered landslide and debris flow disaster points in the study area

2.3 浅层滑坡和坡面泥石流规模

以面积为规模参数统计滑坡规模—频率分布关系：研究区 3628 处浅层滑坡遗迹总面积约 1.1 km²，约占研究区面积的 0.38%；滑坡以 50m²~200m² 为主，约占 47.27%；最小面积 8m²，最大面积 7092m²；面积 <1000m² 的滑坡约占 96.1%，其平均面积 242m²，中位数 180m²，四分位距 107~320m²（图 8a、b）。区内 1584 处坡面泥石流总面积约 2.24km²，占研究区面积 0.79%；坡面泥石流以 200~1000m² 为主，占比 51.8%；最小面积 56m²，最大面积 31297m²；面积 <4000m² 的泥石流占 94.3%，其平均面积 1088m²，中位数 825m²，四分位距 479~1504m²（图 8c、d）。研究区群发性滑坡泥石流规模特征与东南沿海粤、闽等地区一致，以小型灾害为主（冯杭建等，2014）。

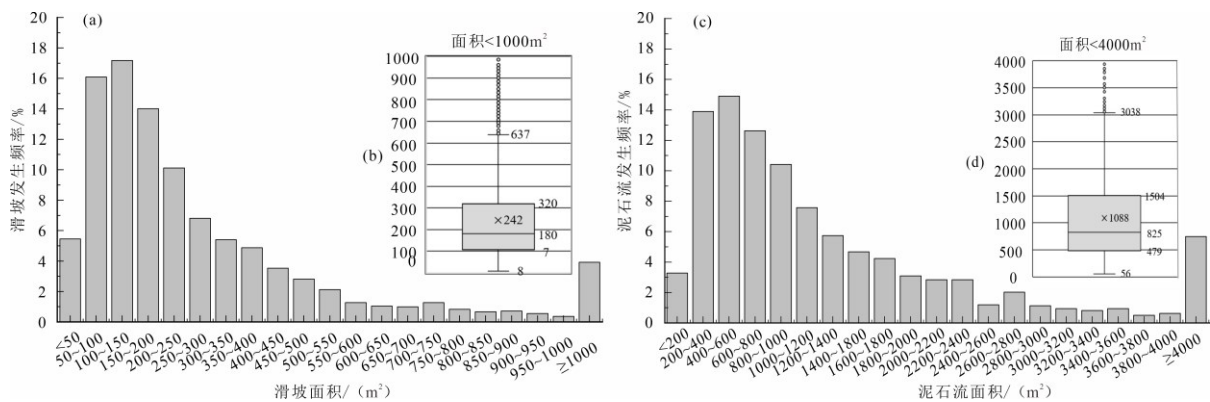


图 8 规模—频率分布及规模特征图

Fig.8 Scale-frequency distribution and scale characteristic map

（浅层滑坡和坡面泥石流规模普遍较小，面积 <1000 m² 的浅层滑坡约占 96.1%，中位数 180 m²；面积 <4000 m² 坡面泥石

流约占 94.3%，中位数 825 m²)

区内滑坡泥石流规模—频率分布曲线包含偏转段与幂律段两个部分（图 9）：浅层滑坡曲线在 200 m² 附近偏转，坡面泥石流曲线在 510 m² 附近偏转，偏转后均符合幂律分布，随规模增大发生频率急剧衰减，与全球降雨型滑坡泥石流规模—频率分布规律一致（Stark and Hovius, 2001; Malamud et al., 2004）。

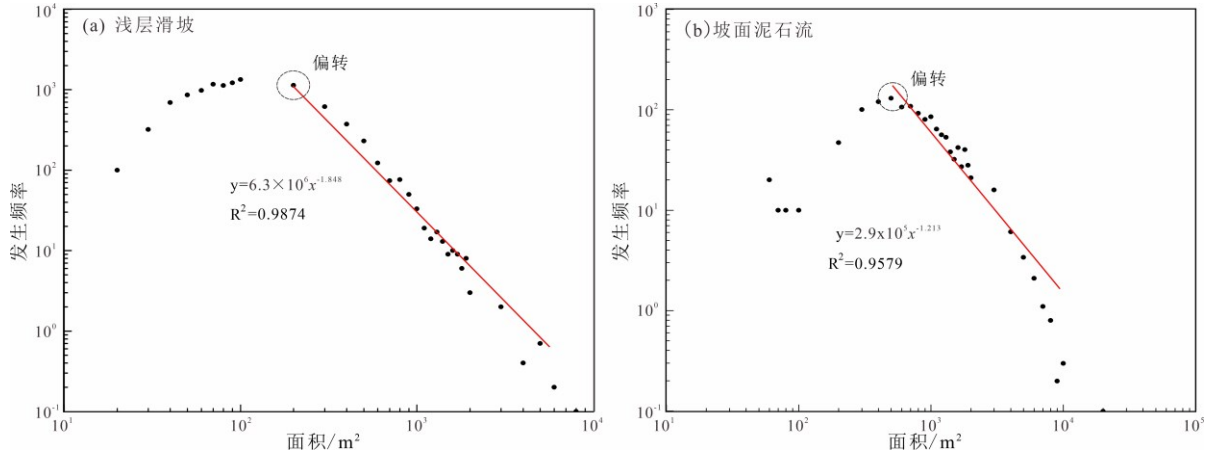


图 9 规模—频率的幂率关系曲线

Fig.9 Power-law curve of magnitude-frequency

a. 浅层滑坡在 200 m² 附近“偏转”；b. 坡面泥石流在 510 m² 附近“偏转”

3 浅层滑坡孕灾条件分析

多因素耦合机制是理解群发滑坡孕灾规律的关键（刘智琪，2025）。以 3628 处浅层滑坡为样本，选取高程、坡度、坡向、曲率、地层、断层、道路、水系和过程雨量 9 个影响因子，综合分析不同分区区间内的滑坡发育分布规律。选取滑坡点密度（LND）与滑坡面积百分比（LAP）双指标开展评价（Guzzetti *et al.*, 2009; Xu and Xu, 2014; Xie *et al.*, 2025），其中 LND 通过计算每平方千米内的滑坡数量来量化空间集中程度（公式 1）；LAP 则衡量特定因子分级区内的面积影响程度，定义为滑坡影响面积占各分级区总面积的百分比（公式 2）。

滑坡点密度（LND）：因子分级内滑坡点数量 / 因子分级面积 (1)

滑坡面密度（LAP）：因子分级内滑坡总面积 / 因子分级面积 (2)

采用 ArcGIS 软件对上述 9 个滑坡影响因子的栅格图层进行重新分类和叠加分析，通过滑坡重心点与影响因子栅格图层叠加分析，确定每个影响因子等级中的滑坡数量和面积，计算各影响因子分级区间 LND 和 LAP 值，通过比较各影响因素分类下的滑坡数量和滑坡总面积，分析滑坡的分布格局和特征，揭示滑坡分布与影响因子的关联规律，结果如图 10 所示。

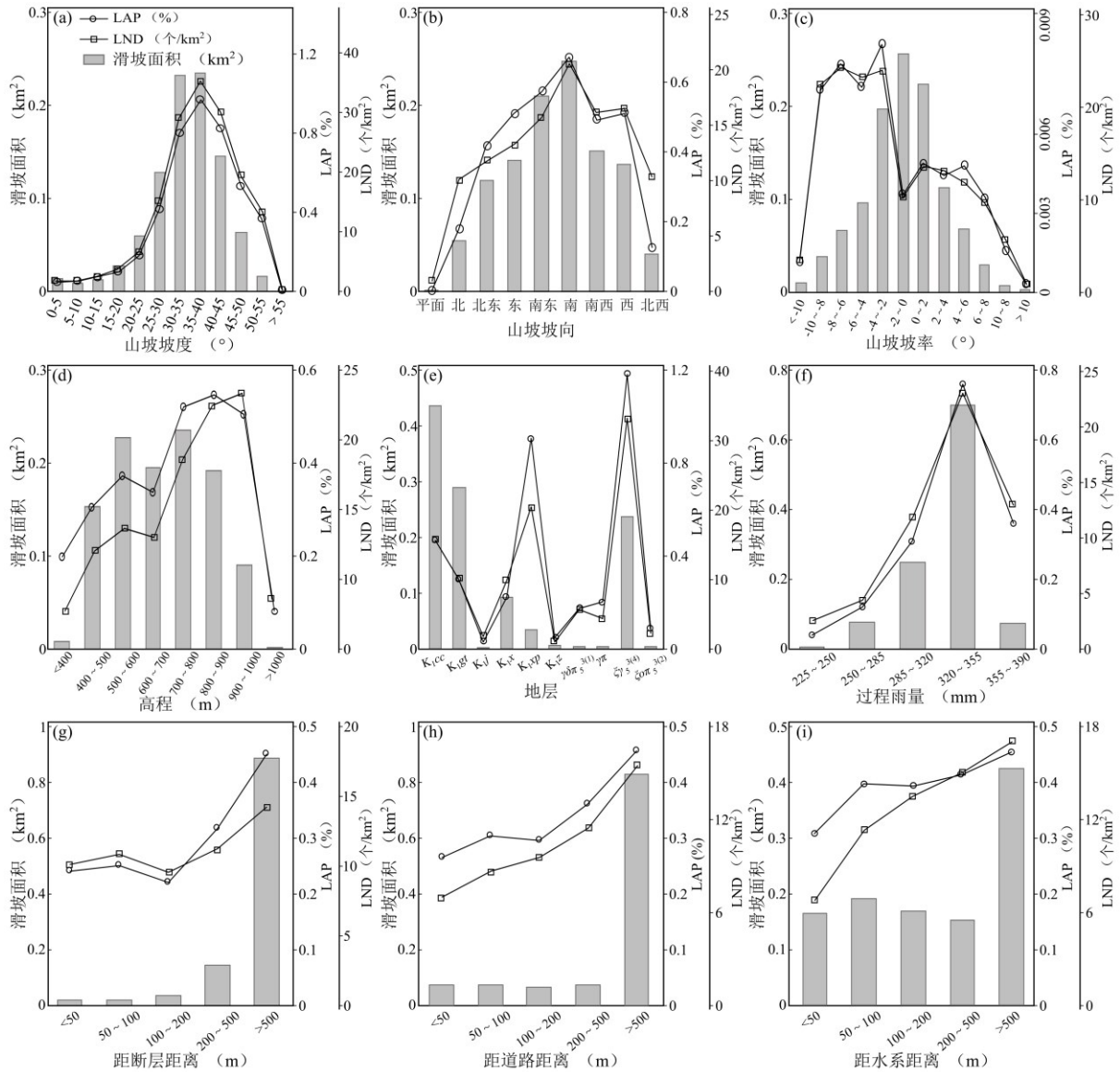


图 10 不同影响因子下滑坡分布规律

Fig.10 Distribution patterns of shallow landslides under different influencing factors

(侵入岩岩性: $\gamma\delta\pi_5^{3(1)}$ 花岗岩斑岩; $\gamma\pi$ 花岗斑岩; $\zeta\gamma_5^{3(4)}$ 钾长花岗岩; $\zeta o\pi_5^{3(2)}$ 石英正长斑岩)

(1) **坡度:** 是控制滑坡发生和运动距离的关键因子。滑坡 LAP 和 LND 呈显著单峰分布(图 10a), 集中于 $25^\circ \sim 45^\circ$ 坡度范围, 最大密度区间为 $35^\circ \sim 40^\circ$ 。虽然大于 40° 以上区间滑坡面积开始迅速减少, 但 $40^\circ \sim 50^\circ$ 区间 LND 仍高达 30 处 / km^2 ; 坡度 $> 50^\circ$ 滑坡很少, 主要原因可能是该分级区间面积占比小, 且历史易滑区段可能已发生变形。

(2) **坡向:** 滑坡分布呈显著坡向分异(图 10b)。南向坡(南东、南西、东)为高敏感坡向, 北坡、北西坡敏感性最低。据相关研究, 南向坡风化强烈, 且受台风迎风坡效应影响, 降雨强度更高, 更易诱发滑坡(李长江等, 2008)。

(3) **曲率:** 凹坡与凸坡滑坡面积占比相近(图 10c), 但凹坡滑坡密度显著高于凸坡, LND 最大值出现在 $-8 \sim -6$ 区间(24.2 处 / km^2), LAP 最大值出现在 $-4 \sim -2$ 区间(0.79%)。凹形汇水地形易汇集径流, 加剧土体饱和度与孔隙水压力, 使斜坡更容易失稳破坏。

(4) **高程:** 滑坡集中于 400~1000 m 低山丘陵区(图 10d), 700~800 m 区间滑坡总面积最大($23.5 \times 10^4 \text{ m}^2$); LND 与 LAP 随高程升高呈增大趋势, LND 最大值出现在 900~1000 m 区间(22.8 处 / km^2), LAP 最大值出现在 800~900 m 区间(0.55%)。坡面泥石流沟源启动区浅层滑坡往往分布于更大高程区域,

如高程>900 m 的滑坡中，坡面泥石流沟源启动区滑坡占比达 60.5%。

(5) **地层岩性**：滑坡分布与岩性显著相关（图 10e）。朝川组（ K_{1cc} ）和馆头组（ K_{1gt} ）地层是滑坡面积最大的两个地层，但是 LND 与 LAP 却不高。滑坡密度较大的是小平田组（ K_{1xp} ）火山岩和侵入岩分布区，其中钾长花岗岩分布区 LND 与 LAP 均为最高，泗溪镇西溪村等重灾区均位于钾长花岗岩分布区，滑坡数量多且规模较大。对比国内其它群发滑坡，花岗岩覆盖区通常也是滑坡高发区域，如湖南省资兴市、粤北花岗岩残积土覆盖地区等都是滑坡重灾区（Ma *et al.*, 2025; Tan *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2025），如湖南省资兴市群发滑坡事件在花岗岩区域分布的滑坡甚至高达 63.5%（刘瑞阳等，2025）。花岗岩区斜坡存在明显的残积土层与下伏风化花岗岩层二元结构，残积土通常可分为红土层和砂土层两层，红土层胶结紧密、渗透性差，砂土层结构松散、渗透性好；下伏风化花岗岩层结构受损，强度低，遇水易软化崩解。上述岩土界面由于其上下土层力学性质突变，在降雨条件下不仅是水分的优势运移通道，且成为水文和力学性质的薄弱带，极易发展成滑坡的主滑动面（Tan *et al.*, 2024）。

(6) **过程降雨量**：滑坡数量与过程雨量呈显著正相关（图 10f），过程雨量 320~355 mm 区间滑坡分布最集中，LND 与 LAP 达峰值；过程雨量>355 mm 区间滑坡面积减少，但 LND 与 LAP 仍处高位，说明极端降雨为滑坡主控触发因素。

由此可见，滑坡分布总体上与坡度、坡向、曲率、高程、地层岩性和过程降雨量关系密切，表明这五个因子是控制该区域滑坡空间分布的关键因子。但是，统计结果显示，道路、水系、断层与滑坡发生相关性低，如距断层 500 m 以内各区间 LND 为 9.5~11.2 处/km²，LAP 为 0.22%~0.32%；距断层>500 m 区间 LND、LAP 升至 14.2 处/km²、0.45%（图 10g）。道路、水系距离分析结果也同样如此，这与传统认知中“距断层 / 水系 / 道路越近滑坡越发育”的结论不符，反映出在极端降雨条件下断层、道路和水系这些影响因子的致灾作用并不突出，这体现了东南沿海地区极端降雨触发的群发滑坡的特殊性。

4 坡面泥石流孕灾条件分析

4.1 典型坡面泥石流

坡面泥石流是浙江省地质灾害主要致灾灾害类型（冯杭建等，2016），近年发生的诸暨五泄、杭州临安区和富阳区、江山市万青山村等坡面泥石流均造成严重损失。本次极端降雨在泗溪镇西溪村的印山潭、下湾和半村等地诱发多处坡面泥石流（图 11），通常由沟源浅层滑坡启动，形态多呈细长型、条带状，一般发育于无明显沟道或存在一定负地形的斜坡上，具有强流动性，运动距离较长。沟源启动区滑坡具有高位远程、隐蔽性强、突发性强、势能大等特征，造成了沟口或坡脚大量房屋倒塌和道路损毁。



图 11 泗溪镇西溪村典型坡面泥石流野外调查照片

Fig.11 Field investigation photos of a typical slope debris flow in Xixi Village, Sixi Town

a-c 为半溪自然村坡面泥石流照片：a. 坡面泥石流全貌，b. 沿途及沟口堆积物，c. 沟口冲毁的房屋；d-f 为下湾自然村坡面泥石流照片：d. 沟源启动区滑坡壁，e. 沟口堆积物及毁坏房屋，f. 周边斜坡坡面泥石流沟全貌；g-i 为印山堂自然村坡面泥石流照片：g. 流通区狭窄沟道及冲毁竹林，e. 沟口冲毁房屋，f. 流通区狭窄沟道及沿途刮铲

4.2 坡面泥石流影响因子分析

以研究区 1584 处坡面泥石流为统计样本，选择高差、纵坡降、主沟长度等 3 个影响因子，分析坡面泥石流发育分布规律，统计分析结果如下（图 12）：

（1）**相对高差**：坡面泥石流沟相对高差较小，以 100 m 以内为主，占比 77.9%，高差 > 300 m 的泥石流很少。

（2）**纵坡降**：泥石流纵坡降大，集中于 200~800‰，占比 92.6%，其中 400~600‰ 区间占比高达 46.1%。大纵坡降为坡面泥石流启动与沿途运动提供充足势能。

（3）**主沟长度**：泥石流主沟长度都比较短，以 500 m 以内为主，200 m 以内占比 67.5%，50~100 m 区间占比最高（29.3%），短流程、窄沟道导致泥石流流域面积普遍偏小，<1000 m² 的占一半以上。

研究区坡面泥石流具有高差小、纵坡降大、流程短等特征，发育机制受控于地形势能—物源距离耦合：大纵坡降提供势能基础，沟源区浅层滑坡（图 11d）与细沟刮铲作用（图 11g、i）提供物源补给，极端降雨触发下形成“启动快、成灾快、隐蔽性强”的坡面泥石流。

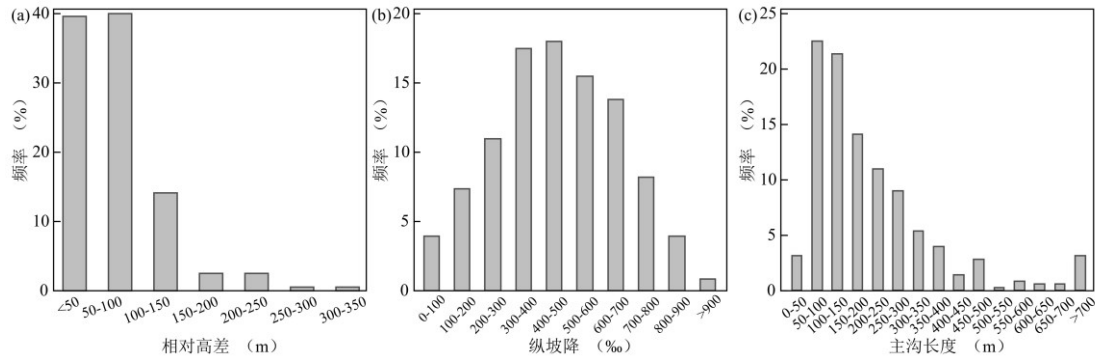


图 12 不同影响因子下坡面泥石流分布规律

Fig.12 Distribution patterns of slope debris flows under different influencing factors

4.3 坡面泥石流地貌特征

基于 LiDAR 高精度 DEM 和遥感影像，揭示坡面泥石流地貌发育核心特征，主要有三点：

(1) **典型滑坡转化型灾害链**：流域内爆发大量浅层滑坡会导致泥石流的发生（陈文鸿等，2025）。区内坡面泥石流均由沟源浅层滑坡转化形成，呈“滑坡启动—沟道流通—微弱堆积”形态，多条坡面泥石流汇聚于主沟，最终在主沟沟口冲出堆积，形成“多点群发—多源汇聚—加积放大”的流滑复合链生灾害（图 13）。

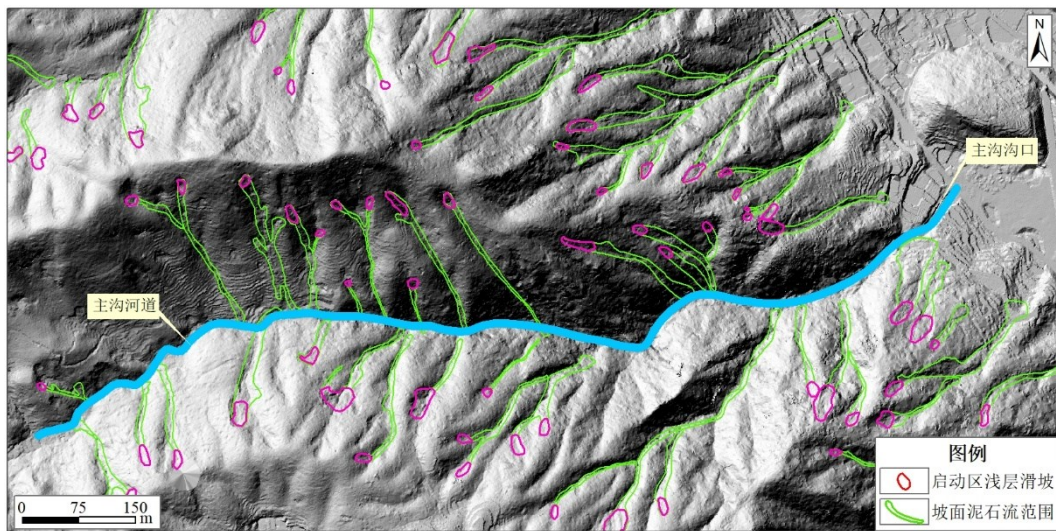


图 13 坡面泥石流及其沟源浅层滑坡

Fig.13 Slope debris flow and it's fully-head shallow landslide

(2) **沟源滑坡位于地形转换带**：沟源浅层滑坡多发育于斜坡细沟溯源侵蚀源头、坡度陡缓转换带，该部位土层厚、风化强烈，斜坡稳定性差，是斜坡地貌演化过程中最容易发生破坏的位置，如果发育有断裂和不良结构面等，则很容易发生滑坡。如图 14a 左边的两条细沟沟源坡度为 50°，而下部泥石流流通区平均坡度是 34°，坡度值相差 16°，易形成临空面，极大增加斜坡的不稳定性。

(3) **隐蔽型历史灾害孕灾带**。在植被覆盖茂密的斜坡沟源位置隐藏着历史滑坡遗迹（“历史创伤”），这些松散的“创伤”或细沟是“灾害孕生带”，光学遥感影像难以识别，决定了其极强的潜伏性和突发性。如图 14 黄色虚线圈起来的区域，就是历史上曾经发生滑坡后留下的“创伤”遗迹，在植被没剥离前这些“创伤”很难识被别出来，图 14a'、b' 和 c' 的遥感影像图中“创伤”部位被植被覆盖，与其他植被覆盖区并无明显差别。而采用 LiDAR 剥离植被后，这些“创伤”区域在 hillshade 图上可清晰识别纹理粗糙、颜色偏暗、有凹陷滑动等痕迹。“创伤”区由于历史上发生过滑坡，说明该斜坡稳定性较差，斜坡或沟道内堆积较多松散物，在

降雨达到阈值后再次滑动的可能性很大，应划定为滑坡高易发区。

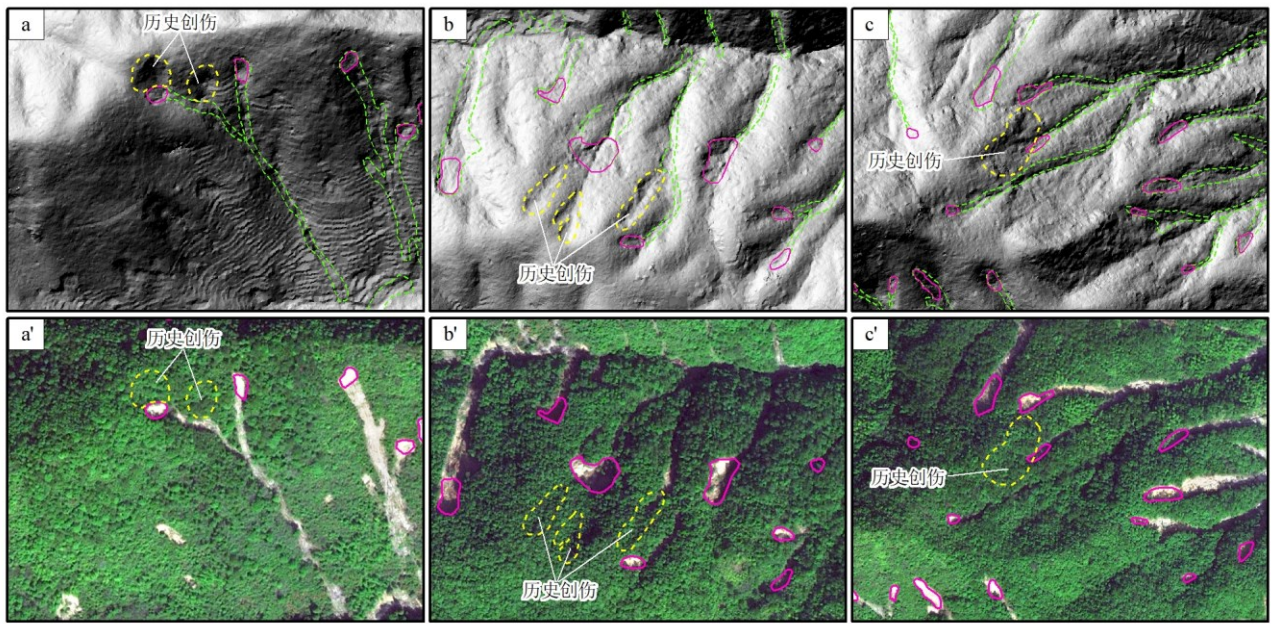


图 14 坡面泥石流启动区“历史创伤”地貌特征识别

Fig. 14 Identification of geomorphological characteristics of "Historical Trauma" in initiation area of slope debris flow

a-c: 由 LiDAR 数据生成的 hillshade 影像，黄色虚线为“历史创伤”，纹理粗糙、颜色偏暗，有凹陷、滑动的痕迹；a'-c': 对应图 a-c 的遥感影像，可见“历史创伤”区与其他植被覆盖区并无明显区别

4.4 坡面泥石流形成演化模式

结合典型坡面泥石流野外调查，建立极端降雨坡面泥石流四阶段演化模式（图 15）：

- （1）**表土渐进饱和**：随着极端降雨的持续，雨水不断入渗坡体，表层土体含水量逐渐增高并迅速饱和，容重不断增大，强度降低。其中，降水入渗速度和土体达到饱和所需时间与表层土体性质相关，土层越松、越薄，入渗越快，越容易达到饱和。
- （2）**地下径流发育**：由于岩土层或不同土层渗透性的差异，当表土层达到饱和后，更多的入渗水流无法消纳，便在基覆界面或相对隔水土层界面形成地下径流，其中径流方向总体与坡向一致，径流强弱与后期降雨强度、界面上下岩土层渗透性差异程度以及地形坡度等因素有关。
- （3）**浅层滑坡启动**：随着地下径流的持续发展，如果斜坡存在“历史创伤”或断裂等不利因素，在细沟沟源处或坡度转换带局部发生滑坡或崩塌，造成树木倾倒、泥石下泄，坡面泥石流启动。其中滑坡发生的难易程度还与斜坡土层厚度及性质、植被根系深浅等因素有关。
- （4）**坡面泥石流形成**：滑坡发生后，其强大的势能伴着水流的动能，滑体迅速变为掏挖、冲蚀下方坡体，沿坡土石、树木快速融入补给，直线下泻，形成坡面泥石流。多条坡面泥石流堆积体在主沟汇聚，规模效应加积放大，形成灾害链（Yu et al., 2024）。

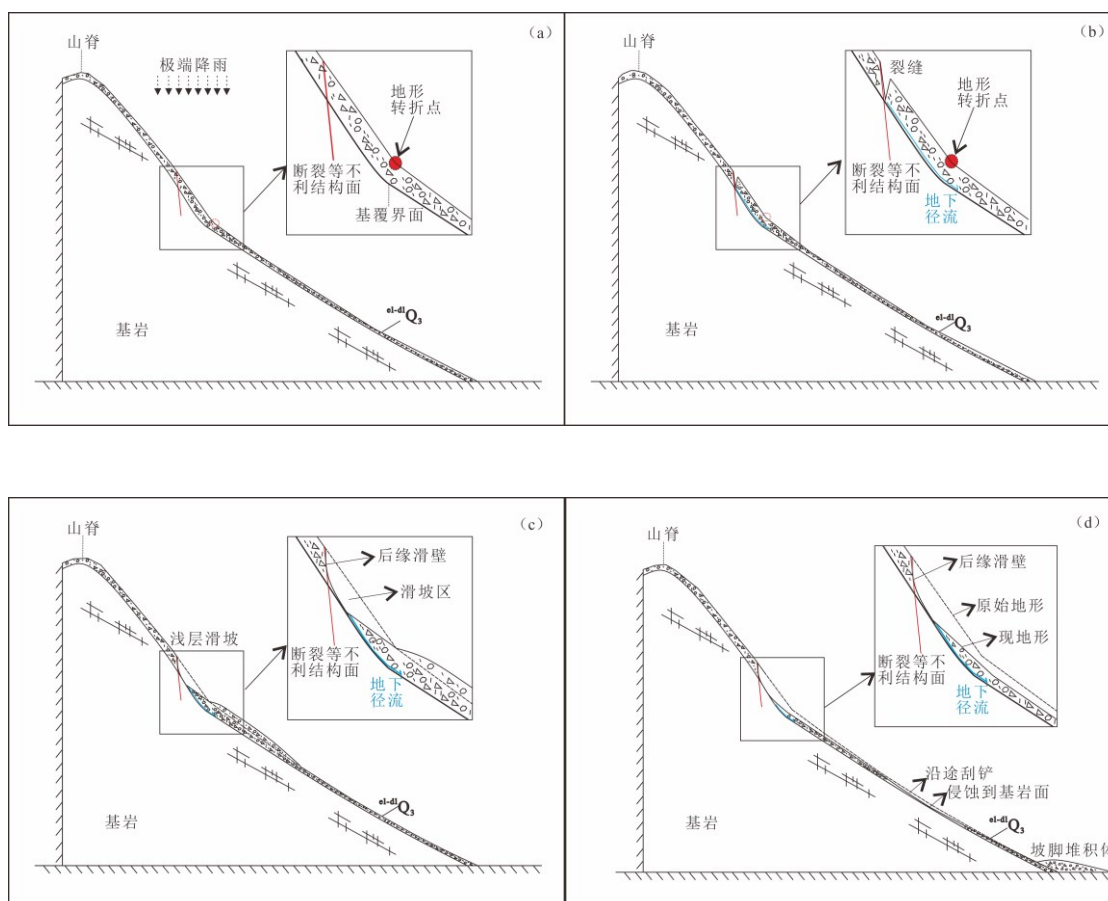


图 15 典型坡面泥石流形成演化示意图

Fig.15 Schematic diagram of the formation and evolution of a typical slope debris flow

- a. 极端降雨入渗；b. 遇隔水层形成地下径流，在细沟源头地形转折点发生局部变形；c. 沟源斜坡失稳发生浅层滑坡，坡面泥石流启动；d. 滑坡体沿细沟或斜坡下泄，沿途刮铲沟道，裹挟植被，最终堆积至沟口，形成坡面泥石流

5 滑坡与极端降雨关系

5.1 滑坡与极端降雨空间分布关系

基于泰顺县雨量站数据，采用克里金插值法生成台风期间最大 1 h、3 h 降雨量栅格与等值线图，叠加滑坡点与密度图（图 16、17）。结果显示：最大 1 h 降雨量 >70 mm 区域集中了 98.4% 的滑坡， >80 mm 区域占 81.4%；最大 3 h 降雨量 >120 mm 区域集中了 98.6% 的滑坡， >140 mm 区域占 89.4%；滑坡中高密度区与降雨中心分布（最大 1 h 降雨量 >80 mm、最大 3 h 降雨量 >140 mm）基本吻合，短时极端降雨起决定性触发作用。

国内极端降雨引发群发性滑坡的降雨极值因地而异，2024 年湖南资兴市台风“格美”诱发群发滑坡最大 24 小时降雨量是打破当地记录的 642.5mm (Zhao *et al.*, 2025)，最大小时雨强 132.2mm (Ma *et al.*, 2025)；2022 年福建武平县“5·27”群发滑坡事件，2 小时降雨量达 120.1 毫米，24 小时累计降雨量 228.9mm (Lin *et al.*, 2024)；2024 年广东韶关江湾镇群发滑坡在 4 月累积降雨量 962 毫米，远超历史同期，最大日降雨量 190 毫米，由此引发了大量群发性滑坡（许强等，2024）。由此可见，引发群发性滑坡的降雨量阈值在不同地区由于空间异质性而差异很大。研究区最大 1h 降雨量 70mm 和最大 3h 降雨量 120mm 范围内包含的灾害点接近 100%，几乎全部覆盖本次群发滑坡点，据此可将其组合作为研究区滑坡群发临界降雨阈值。

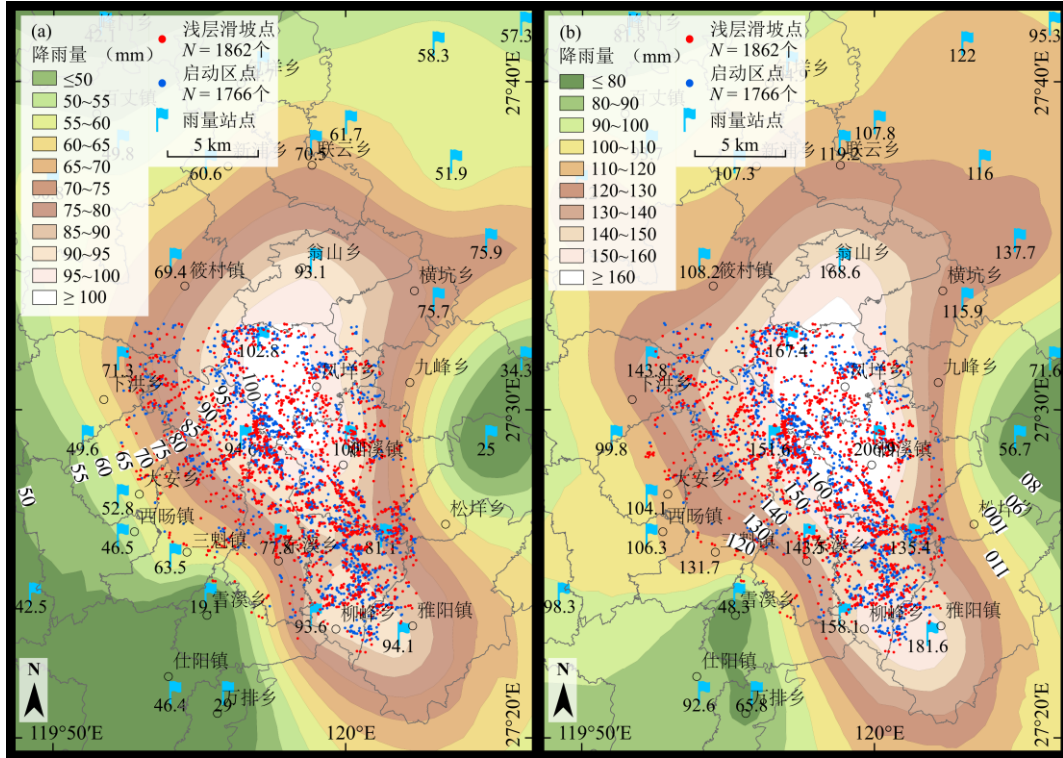


图 16 最大 1 h (a) 和最大 3 h (b) 降雨量拟合栅格和滑坡点叠加图

Fig.16 Fitted grids of maximum 1-hour (a) and maximum 3-hour (b) rainfall and their overlay with landslide points

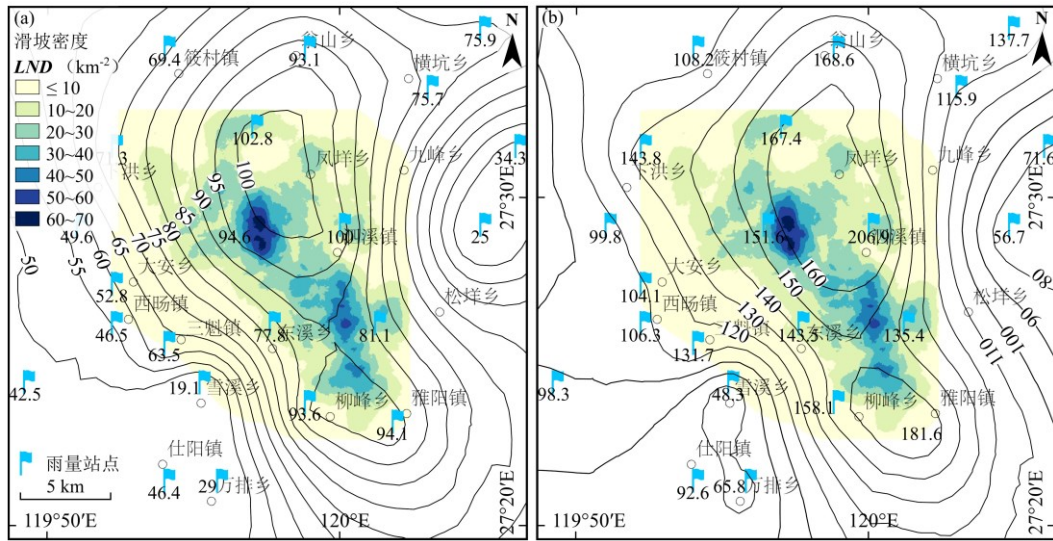


图 17 最大 1 h (a) 和 3 h (b) 降雨量拟合等值线和滑坡密度叠加图

Fig.17 Fitted contour lines of maximum 1-hour (a) and 3-hour (b) rainfall and their overlay with landslide density

虽然研究区滑坡中高密度区与降雨集中区总体趋于一致,但也并非所有降雨中心滑坡密度都高,如凤垌乡西北侧降雨极值中心(最大 1 h 降雨量 102.8 mm、最大 3 h 降雨量 167.4 mm)滑坡密度偏低(图 16、17)。有研究发现,短时强降雨诱发滑坡具有空间异质性(Xie *et al.*, 2025),滑坡的分布与坡度、岩性、构造有时比降雨关系更大。为分析该区降雨与地层岩性、高程、坡度等影响因素耦合关系,在地层、高程和坡度图上叠加滑坡中密度区(LND20~30)和高密度区(LND>30),结果如图 18 所示。凤垌乡西侧一带为西山头组熔结凝灰岩分布区,该地层并非滑坡敏感岩组,区内高程 620~690 m,坡度 10°~20°,平均坡度为 16°。该区岩性稳定、山体高差小、地形平缓,因此即便降雨强度很高,但滑坡发育仍受限;研究区内

滑坡中高密度区多位于花岗岩等高易发岩组区，高程 550~1200 m、坡度>30°，虽然降雨强度可能不是极值区，但是这些区域岩性敏感、地形高差大、地形陡峭，突破降雨阈值后触发了群发滑坡。上述分析表明，虽然本次群发性滑坡的主控因素是极端降雨，但滑坡空间分布受到地层岩性、坡度、高程等多个内在因素共同控制，是多因素耦合作用的结果。

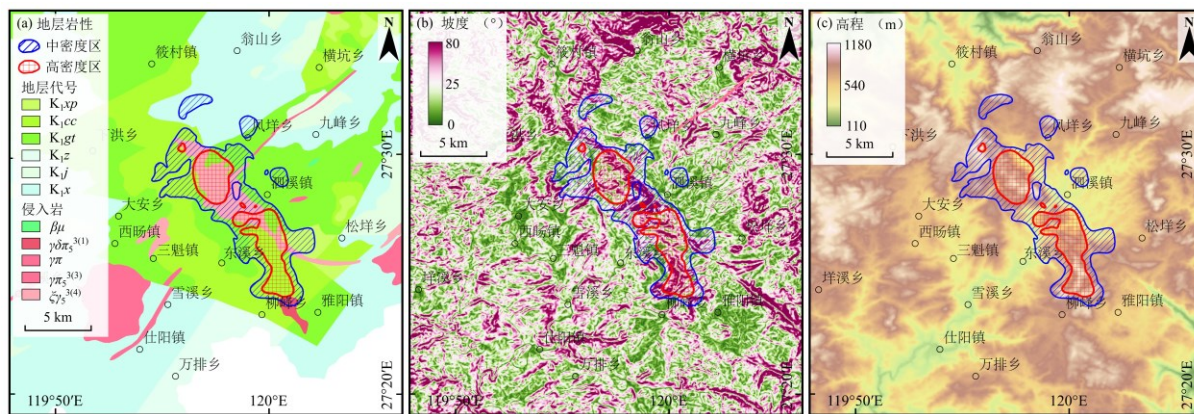


图18 不同滑坡密度区与若干控制因素的关系

Fig.18 Relationship between different landslide density zones and several controlling factors

5.2 不同灾害类型降雨强度对比

本次群发灾害中坡面泥石流大量发生，约占总数的45.8%。为分析坡面泥石流与浅层滑坡激发雨强的差异，以1862处单独浅层滑坡、坡面泥石流相关浅层滑坡点1766处为样本，统计最大1h、3h降雨量的数量分布（图19）。随降雨强度增大，两类灾害数量与密度均上升，但坡面泥石流激发雨强显著高于浅层滑坡。最大1h降雨量>90 mm时，坡面泥石流数量与密度超过浅层滑坡，90~95 mm区间达峰值；最大3h降雨量>140 mm时，坡面泥石流占优，140~150 mm区间达峰值。上述分析表明坡面泥石流需更高雨强触发，预报中宜采用小时甚至分钟级雨强指标（余斌等，2015）。

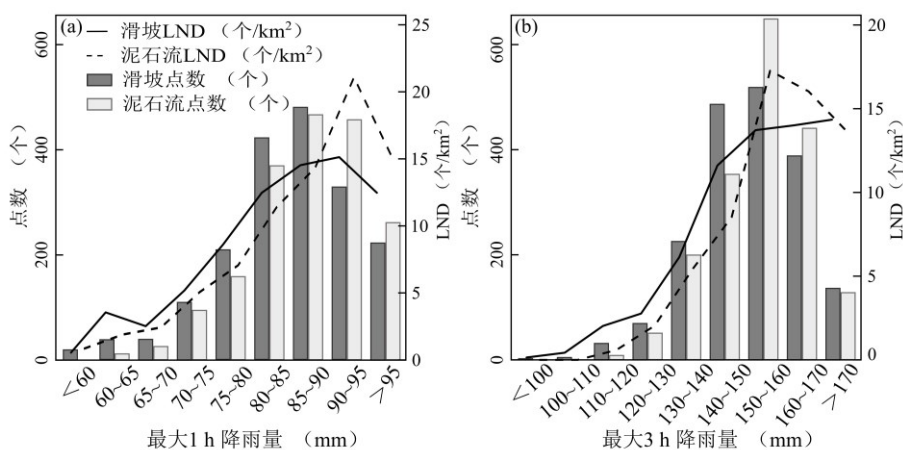


图19 不同雨强下浅层滑坡和坡面泥石流分布对比

Fig.19 Distribution comparison of shallow landslides and slope debris flows under different rainfall intensities

6 结论

本文以2016年台风“莫兰蒂”极端强降雨诱发的群发性滑坡为研究对象，综合运用高分辨率光学遥感影像与LiDAR地形数据，开展滑坡解译编目、空间分布特征、主控因素、触发机理及灾害链效应系统研究，

主要结论如下:

(1) 基于多源高精度光学遥感与 LiDAR 数据共解译 3628 处浅层滑坡、1584 处坡面泥石流。浅层滑坡平均面积约 242 m², <1000 m² 占 96.1%; 坡面泥石流平均面积为 1088 m², <4000m² 占 94.3%。灾害呈点多、规模小、密度高、群发突发性强等特征, 最大点密度 72 处/km², 空间分布显著集聚, 是典型的极端降雨触发的群发性滑坡泥石流案例。

(2) 群发性滑坡是极端降雨与地质地貌条件耦合作用的结果。南向坡、凹形坡、坡度 25° ~40° 斜坡及花岗岩风化区为滑坡高易发区段。滑坡分布具有空间异质性, 整体受极端降雨因素主控, 滑坡中高密度发育区与降雨中心基本吻合, 但并非所有降雨极值中心都是中高密度区, 其空间分布受到岩性、高程、坡度等多种因素控制。

(3) 坡面泥石流为浅层滑坡转化形成的典型链生灾害。从地貌形态上分析, 沟源启动区滑坡多分布于细沟源头与坡度陡缓转换带, 是滑坡发生的高敏感区域, 特别是“历史创伤”变形痕迹区, 共同构成控制坡面泥石流启动的关键孕生带, 这对潜在坡面泥石流识别具有指示意义。据此揭示了极端降雨下坡面泥石流的灾害链演化模式: 表土渐进饱和→地下径流发育→浅层滑坡启动→坡面泥石流形成。

(4) 降雨型群发性滑坡具有规模小、隐蔽性高、突发性强、运动速度快等特点, 常规地面调查难以精准识别。本文中 LiDAR 技术通过提供超高精度、植被穿透的地形数据, 在细沟等微地貌信息精细提取、滑坡泥石流形态与边界精准划定、植被覆盖区隐蔽“创伤”识别、孕灾环境反演与灾害链演化分析等方面具有显著优势, 大幅提升高植被覆盖区群发滑坡调查效率与精度。

本次研究明确了极端暴雨群发滑坡基本规律, 探索了高植被覆盖区滑坡精准识别方法, 但存在 LiDAR 测区范围受限、部分分析偏定性、多因素定量非线性耦合不足等问题, 后续将围绕灾害链数值模拟、精细化风险预警、人工智能隐患识别等方向深入研究, 以提升东南沿海降雨型群发滑坡防控水平。

致谢: 感谢审稿专家提出宝贵修改意见, 感谢浙江省第十一地质大队(浙江省温州地质院)、浙江省地矿科技有限公司在野外调查和资料搜集上提供帮助, 感谢顾雨欣绘制科学插图(图 5)。

References:

- Chen, W.H., Yu, B., Ye, P., et al., 2025. Research on Material Source Factors of Gully-Type Debris Flow Caused by Shallow Landslides. *Earth Science*, 50(6):2356-2371 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y.L., Yang, L., Xu, L., et al., 2024. Spatial distribution of shallow landslides caused by Typhoon Lekima in 2019 in Zhejiang Province, China. *Journal of Mountain Science*, 21(5):1564-1580. doi:10.1007/S11629-023-8377-Y.
- Du, J.Y., He, H.H., Ma, J., et al., 2026. Spatial Distribution Pattern and Prediction Model of Soil Thickness in Mountainous Area in Southeastern China. *Earth Science*, 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Feng, H.J., Zhou, A.G., Tang, X.M., et al., 2014. Study on Remote Sensing Interpretation for Implicit Landslide in Southeast China. *Geological Review*, 60(6):1370-1380 (in Chinese with English abstract).
- Feng, H.J., Zhou, A.G., Tang, X.M., et al., 2016. Development and Distribution Characteristics of Debris Flow in Zhejiang Province and Its Regional Forecast. *Earth Science*, 41(12):2088-2099 (in Chinese with English abstract).
- Fu, Z., Wang, F., Ma, H., et al., 2025. Records of Shallow Landslides Triggered by Extreme Rainfall in July 2024 in Zixing, China. *Scientific Data*, 12(1):1364-1364. doi:10.1038/S41597-025-05670-W.
- Gao, H., Xu, C., Xie, C., et al., 2024. Landslides Triggered by the July 2023 Extreme Rainstorm in the Haihe River Basin, China. *Landslides*, (prepublish):1-6. doi:10.1007/S10346-024-02322-9.

- Gariano S.L., Brunetti M.T., Iovine G., et al., 2015. Calibration and Validation of Rainfall Thresholds for Shallow Landslide Forecasting in Sicily, Southern Italy. *Geomorphology*, 228:653-665. doi:10.1016/j.geomorph.2014.10.019.
- Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., et al., 2009. Landslide Volumes and Landslide Mobilization Rates in Umbria, Central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3-4):222-229. doi:10.1016/j.epsl.2009.01.005.
- Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., et al., 2007. Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central and Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3-4):239-267. doi:10.1007/s00703-007-0262-7.
- Huang, Y., Mao, W.W., Guo, Z., et al., 2025. Challenges and Strategies for Cascading Hazards of Rainfall-Induced Landslides in Southeastern Coastal China under Climate Change. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39 (6): 1006-1015(in Chinese with English abstract).
- Huang, Y.D., Xu, C., Liu, Y., et al., 2025. Inventory and Distribution Feature of Shallow Landslides Triggered by Heavy Rain Event in Shaoguan, Guangdong Province in April 2024. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 36(2):28-42 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Q., Wu, J., Liu, Z., et al., 2024. The Fuyang Shallow Landslides Triggered by an Extreme Rainstorm on 22 July 2023 in Zhejiang, China. *Landslides*, 21(11):2725-2740. doi:10.1007/S10346-024-02314-9.
- Li, C.J., Ma, T.H., et al., 2008. Forecasting of Landslides Triggered by Rainfall: Theory, Methods & Application. Beijing, *Geological Publishing House*.
- Li, C., Ma, T., Sun, L., et al., 2012. Application and Verification of a Fractal Approach to Landslide Susceptibility Mapping. *Natural Hazards*, 61(1):169-185. doi:10.1007/s11069-011-9804-x.
- Li, C., Ma, T., Zhu, X., et al., 2011. The Power-Law Relationship between Landslide Occurrence and Rainfall Level. *Geomorphology*, 130(3-4):221-229. doi:10.1016/j.geomorph.2011.03.018.
- Lin, Y., Jian, W., Wu, Y., et al., 2024. Effect of Tree Roots on Heavy Rainfall-induced Shallow Landslides. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1), 2360002. doi:10.1080/19475705.2024.2360002
- Liu, R.Y., Xu, Q., Pu, C.H., et al., 2025. Characteristics of Landslides Induced by Typhoon 'Gaemi' in Zixing, Hunan, July 2024, and Their Geological Control Factors. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-22 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.Q., Wu, Q., Wang, L.Q., et al., 2026. Review on Multi-scale Formation Mechanisms of Rainfall-induced Cluster Landslides in Southeastern China under Multi-factor Coupling Effects. *Earth Science*, 1-24[2026-04-21](in Chinese with English abstract).
- Ma, X., Cui, Y., Xu, C., et al., 2025. Database Development and Geometric Characterization of the Shallow Landslides Triggered by the 16 June 2024 Extreme Rainfall Event in Meizhou, Guangdong (China). *Landslides*, 23(4):1-15. doi:10.1007/S10346-025-02672-Y.
- Ma, H., Wang, F., 2025. Factors Controlling the Formation and Movement of Clustered Shallow Landslides Triggered by the Extreme Rainstorm in July 2023 in Beijing, China. *Geomorphology*, 478:109728. doi:10.1016/J.GEOMORPH.2025.109728.
- Ma, H., Wang, F., Fu, Z., et al., 2025. Characterizing the Clustered Landslides Triggered by Extreme Rainfall during the 2024 Typhoon Gaemi in Zixing City, Hunan Province, China. *Landslides*, 22(7):1-19. doi:10.1007/S10346-025-02510-1.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F., et al., 2004. Landslide Inventories and Their Statistical Properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6):687-711. doi:10.1002/esp.1064.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China., 2014. Investigation Specifications for Landslide, Collapse, and Debris Flow Disasters (1: 50,000). DZ/T 0261—2014. *Beijing, China Standards Press* (in Chinese with English abstract).
- Mondini, A.C., Guzzetti, F. and Melillo, M., 2023. Deep Learning Forecast of Rainfall-Induced Shallow Landslides.

Nature Communications, 14(1):2466-2466. doi:10.1038/S41467-023-38135-Y.

- Peng, J.B., Cui, P., Wang, H.J., et al., 2025. Conceptual Framework for the Construction of a Natural Disaster Prevention and Mitigation System. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6):864-871(in Chinese with English abstract).
- Stark, C.P. and N. Hovius., 2001. The Characterization of Landslide Size Distributions. *Geophysical Research Letters* 28(6): 1091–1094. doi:10.1029/2000GL008527.
- Tan, D.L., Xu, X.L., Wang, L.H., et al., 2024. Deformation Evolution and Failure Mechanism of Rainfall-Induced Granite Residual Soil Landsliding Event in Northern Guangdong, China. *Landslides*, 22(3):1-17. doi:10.1007/S10346-024-02403-9.
- Wen Wan. Taishun County Releases Typhoon Disaster Report: 4 Dead, 3 Missing[EB/OL]. (2016-09-16)[2026-04-24]. <https://news.66wz.com/system/2016/09/16/104912997.shtml>(in Chinese).
- Xi, C.J., Xu, J.W., 2025. From Automated Inventory Enrichment to Interpretable Multiclass Modeling of Extreme Rainfall-Induced Mass Wasting. *Communications Earth & Environment*, 6(1):885. doi:10.1038/S43247-025-02816-X.
- Xie, C., Huang, Y., Xu, C., et al., 2026. Over 100,000 Landslides Triggered by Typhoon-induced Rainfall in North China in July 2023. *Landslides*, (prepublish):1-20. doi:10.1007/S10346-026-02698-W.
- Xie, C., Xu, C., Xu, X., et al., 2025. Analysis of a Comprehensive Inventory of Rainfall-Induced Landslides and Multi-Factor Coupling Mechanisms in Eastern Guangdong, China, in August 2018. *Environmental Earth Sciences*, 84(24):707. doi:10.1007/S12665-025-12726-Y.
- Xie, X., Liu, S., Macciotta R., et al., 2025. Spatial Heterogeneity in Landslide Response to a Short-Duration Intense Rainfall Event on 12 July 2024 in Pengshui County, Chongqing, China. *Landslides*, 22(12):1-18. doi:10.1007/S10346-025-02624-6.
- Xinhua Net. Typhoon Meranti Affects Over 1.5 Million People in Zhejiang, Leaving 10 Dead and 4 Missing[EB/OL]. (2016-09-17)[2026-04-24]. http://m.cnr.cn/news/20160917/t20160917_523140316.html(in Chinese).
- Xu, C., Xu, X., 2014. Statistical Analysis of Landslides Caused by the Mw 6.9 Yushu, China, Earthquake of April 14, 2010. *Natural Hazards*, 72(2):871-893. doi:10.1007/s11069-014-1038-2.
- Xu, Q., Xu, F.S., Pu, C.H., et al., 2024. Preliminary Analysis of Extreme Rainfall-Induced Cluster Landslides in Jiangwan Township, Shaoguan, Guangdong, April 2024. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(8):1264-1274(in Chinese with English abstract).
- Yi, X., Zhao, J., Feng, W., et al., 2025. Data-Driven Insights into the Characteristics and Drivers of the June 16, 2024 Clustered Shallow Landslides in Southeastern China. *Landslides*, 22(9):1-16. doi:10.1007/S10346-025-02586-9.
- Yu, B., Zhu, Y., Wang, T., et al., 2015. Research on the 10-Minute Rainfall Prediction Model for Debris Flows. *Advances In Water Science*, 26(3):347-355(in Chinese with English abstract).
- Yu, Z., Zhan, J.W., Yao, Z.W., et al., 2024. Characteristics and mechanism of a catastrophic landslide-debris flow disaster chain triggered by extreme rainfall in Shaanxi, China. *Natural Hazards*, 120:7579-7626. doi:10.1007/s11069-024-06518-z.
- Zhao, J., Feng, W., Yi, X., et al., 2025. Clustered Shallow Landslides Caused by Extreme Typhoon Rainstorms in Zixing County, Hunan Province, China, from July 26 to 28, 2024. *Landslides*, 22(6):1-7. doi:10.1007/S10346-025-02508-9.
- Zhang, M.L., Lü, Q., Deng, H.Z., et al., 2025. Probabilistic Approach to Determine Rainfall Thresholds for Rainstorm-Induced Shallow Landslides Using Long-Term Local Precipitation Records. *Engineering Geology*, 353: 108139. doi:10.1016/J.ENGGEOL.2025.108139.

附中文参考文献

- 陈文鸿, 余斌, 叶鹏, 等, 2025. 浅层滑坡诱发沟谷型泥石流的物源条件. 地球科学, 50(6):2356-2371.
- 杜静怡, 贺海洪, 马骏, 等, 2026. 东南丘陵斜坡土层厚度空间分布规律与预测模型. 地球科学, 1-12[2026-04-21]
- 冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等, 2014. 中国东南地区隐性滑坡遥感识别研究. 地质论评, 60(6):1370-1380.
- 冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等, 2016. 浙江省泥石流灾害发育分布规律及区域预报. 地球科学, 41(12):2088-2099.
- 黄雨, 毛无卫, 郭桢, 等, 2025. 气候变化背景下东南沿海降雨型复合链生滑坡灾害防控挑战及应对. 中国科学基金, 39(6):1006-1015.
- 黄远东, 许冲, 刘毅, 等, 2025. 2024 年 4 月广东韶关暴雨诱发的浅层滑坡编目与滑坡分布特征分析. 中国地质灾害与防治学报, 36(2):28-42.
- 刘瑞阳, 许强, 蒲川豪, 等, 2025. 湖南资兴市 2024 年 7 月台风“格美”诱发滑坡特征及其地质控制作用. 武汉大学学报(信息科学版), 1-22.
- 刘智琪, 吴琼, 王亮清, 等, 2026. 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, 1-24[2026-04-21].
- 李长江, 麻士华, 等, 2008. 降雨型滑坡预报的理论、方法及应用. 北京, 地质出版社.
- 彭建兵, 崔鹏, 王会军, 等, 2025. 自然灾害防治体系建设构想. 中国科学基金, 39(6):864-871.
- 新华网. 台风莫兰蒂致浙江 150 万余人受灾 10 人遇难 4 人失踪 [EB/OL]. (2016-09-17)[2026-04-24]. http://m.cnr.cn/news/20160917/t20160917_523140316.html
- 许强, 徐繁树, 蒲川豪, 等, 2024. 2024 年 4 月广东韶关江湾镇极端降雨诱发群发性滑坡初步分析. 武汉大学学报(信息科学版), 49(8):1264-1274.
- 温婉. 泰顺县发布台风灾情通报死亡 4 人失踪 3 人 [EB/OL]. (2016-09-16)[2026-04-24]. <https://news.66wz.com/system/2016/09/16/104912997.shtml>
- 余斌, 朱渊, 王涛, 等, 2015. 沟床起动型泥石流的 10min 降雨预报模型. 水科学进展, 26(3):347-355.
- 中华人民共和国国土资源部 (2014). 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范 (1: 5 万). DZ/T 0261-2014. 北京, 中国标准出版社.