降雨型花岗岩残积土滑坡碎屑流运动过程分析：以湖北黄梅县袁山村为例

朱颖[1]，甘建军[1*]，鹿淇瑞[1]，邓怡武[1]，邓坤[2]

1. 南昌工程学院鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室，南昌 330099；
2. 江西省水利科学院水资源与水生态环境研究所，南昌 330029

第一作者，E-mail：2023314001@nit.edu.cn

* 通信作者，E-mail：ganjianjun@nit.edu.cn

2024-09-29 收稿；2024-12-01 修回；2025-02-14 接受

基金项目：国家自然科学基金项目（42162025）；2021 年度浙江省山体地质灾害防治协同创新中心开放基金项目（2PCMGH-2021-02）；江西省科技重点研发计划项目（20203BBGL73220）

中图分类号：P642.22　　文章编号：2096-8523（2025）03-0268-12　　doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240564

摘　要：湖北黄梅县袁山村滑坡碎屑流是花岗岩残积土滑坡碎屑流，受地质条件影响，其运动过程较为复杂，突发性强。为研究中低山区花岗岩残积土滑坡碎屑流动力机制，分析降雨型花岗岩残积土滑坡碎屑流的运动过程，通过野外地质调查，利用无人机航拍（unmanned aerial vehicle，简称 UAV）、遥感影像形成的数字地表模型（digital elevation model，简称 DEM）、现场勘查及地质资料分析、数值模拟等方法对滑坡碎屑流进行运动过程分析。结果表明，滑坡碎屑流的运动过程中最大堆积厚度为 6 m，在 t=20 s 时达到运动峰值 17 m/s，而实际运动峰值应当更大，出现在滑源区开始失稳的阶段，整个运动过程分为 3 个阶段：0 ~ 30 s 为滑坡碎屑流失稳启动阶段，在一级平台加速；30 ~ 70 s 受地形影响，滑动体进行二次加速并发生部分偏转运动，冲毁袁山村的建筑物；70 ~ 130 s 为减速堆积阶段，掩埋和堆积了建筑物。本研究可为类似滑坡碎屑流的防治提供参考。

关键词：降雨型滑坡碎屑流；花岗岩残积土；运动过程；数值模拟；Massflow；湖北黄梅

花岗岩残积土滑坡碎屑流在全世界范围内广泛存在，由于花岗岩残积土一般由结构松散的石英、长石、云母及碎屑黏土组成，受热胀冷缩、降雨入渗和陡峻地形影响，坡体中的亲水物质容易膨胀和软化，导致坡体极易由高处崩滑并加速运动，最终在坡脚冲击构筑物、掩埋道路和堵塞河道，造成灾难性的损失[1-3]。例如：2014 年印度 Malin 滑坡、2017 年塞拉利昂 Freetown 滑坡以及 2009 年台湾小林村滑坡等均造成重大损失[4-7]。ZHAN 等[8] 对井霞村和定龙村村委会大楼后的滑坡进行了分析，滑坡与风化花岗岩有关，并且为暴雨期间发生滑坡。QI 等[9] 对华南地区典型的全风化花岗岩边坡研究发现，降水入渗作用会加速边坡变形，当降水强度达到 155 mm/d 时，全风化花岗岩边坡触发滑坡。刘红军等[10] 在青岛崂山风景区的返岭滑坡事件中，发现受强降雨的影响，滑坡面位于抗剪强度较低的全风化带，在 2007 年和 2020 年发生了滑坡，并造成人员伤亡和道路损毁。据报道，2020 年 7 月 9 日，湖北省黄梅县袁山村局部区域因连续降雨，导致 5 户 17 间房屋被冲毁，并导致 8 人死亡，1 人受伤，直接经济损失 1760 万元。此类滑坡灾害频发，严重影响我国城镇居民安全，因此，有效较少滑坡灾害目前十分迫切[11]。

为研究滑坡碎屑流的形成机制，国内外学者曾采用多种数值模拟对滑坡运动过程进行了分析。多

著录信息：朱颖，甘建军，鹿淇瑞，等. 降雨型花岗岩残积土滑坡碎屑流运动过程分析：以湖北黄梅县袁山村为例［J］. 地质科技通报，2025，44（3）：268-279.
ZHU Ying，GAN Jianjun，LU Qirui，et al. Analysis of rainfall induced-movement of landslide debris flows in granite residual soil：A case study of Yuanshan Village，Huangmei County，Hubei Province［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44（3）：268-279.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

位学者采用 FLAC3D 连续介质模型对降雨型滑坡进行了稳定性分析[12-14]；CHEN 等[15] 利用 MatDEM 离散元法研究了陈鹤村滑坡的破坏过程以及速度、位移和能量的变化等动态过程；田仁珺[16] 采用 PFC 离散元法对庞家湾滑坡进行了运动过程的模拟研究；GUO 等[17] 利用 DEM 重构研究了五里坡滑坡诱发泥石流的动态过程；庞海松等[18] 选用 RAMMS 软件对不同降雨频率下滑坡运动特征进行了模拟；FAN 等[19] 整合多种模型模拟了灾害链过程。相比传统流体力学的统计方法，Massflow 软件采用深度积分以及连续介质力学理论来提高计算效率，能更好地应用于地质灾害和风险评估等领域。

笔者选取袁山村滑坡碎屑流为研究对象，结合野外地质调查，利用 UAV、遥感影像形成的 DEM 模拟法、现场勘查及地质资料分析等方法，在获取滑坡碎屑流后的高精度高程模型和历史影像高程数据以及现场踏勘的基础上，构建了降雨型花岗岩残积土滑坡碎屑流的地质模型，采用 Massflow 数值模拟软件对其运动过程进行分析，以更好地模拟滑坡碎屑流运动过程，为防灾减灾提供依据。

1　研究区概况

1.1　地质背景

湖北省黄梅县袁山村地势北高南低，坡形变化明显，斜坡由 NE 向 SW 倾斜，斜坡坡角约为 35°。滑坡碎屑流区发育为 3 级阶地，呈上陡下缓的地形（图 1）。滑坡碎屑流源区最高海拔约 265 m，滑坡碎屑流趾海拔约 65 m，高差 200 m。沟谷两岸斜坡陡峭，岸坡坡度 30° ~ 45°。

根据野外调查、钻孔资料和湖北省地质调查院 2001 年黄梅县幅 1∶5 万地质图，滑坡碎屑流的岩性为上覆的第四纪花岗岩残坡积土（Q_4^{el+dl}）和下伏燕山晚期二长花岗岩（$\eta\gamma_5^3$）。第四纪花岗岩残坡积土厚度 0.3 ~ 6.0 m，呈灰黄色，松散，碎石体积分数为 12% ~ 30%。强风化燕山晚期二长花岗岩结构破坏，表层完全风化成土层，厚度 0.5 ~ 5.0 m。坡上部有许多孤石有碎石，粒径 0.3 ~ 2.5 m。

1.2　滑坡基本特征

袁山村滑坡碎屑流是典型的花岗岩残积土滑坡碎屑流，坡顶最高海拔 265 m，滑坡趾最低海拔 65 m，平面上呈沿着沟谷走向呈不规则形状，滑坡方向在 25° ~ 355°之间变化。根据袁山村滑坡碎屑流的形成与演化特征，将研究区分为已经破坏带和潜在滑坡隐患带（图 2）。其中破坏带可以分为滑源区（A 区）、冲击区（B 区）、加速区（C 区）和堆积区（D 区）。潜在滑坡隐患带包括物源区的上方不稳定区（Ⅰ区）、碎屑流转换区的西北侧的冲蚀–切割引起的右岸不稳定区（Ⅱ-1 区）和东南侧的滑坡牵引产生的左岸不稳定区（Ⅱ-2 区）。

利用三维扫描影像，对滑坡碎屑流进行高精度的扫描分析，根据滑坡碎屑流前后高程变化可知，滑坡变形破坏带的面积为 4.22×10^4 m^2，滑源区（A 区）和冲击区（B 区）的体积为 6.8×10^4 m^3，滑坡主堆积区体积为 5.4×10^4 m^3。考虑到滑坡的冲击和铲刮效应，中上部坡体及沟谷里的堆积物会被夹带进入堆积区，导致滑坡体积会增大。根据滑坡夹带方量的估算经验，约有 25% 的滑坡碎屑流物质可计入滑动质量的体积[20]，除去滑源区（A 区），滑动的体积约 7.05×10^4 m^3。此外，在 A 区和 B 区平台区域，还有残余在滑体堆积物约为 3.8×10^4 m^3 的物质停止堆积，故估计滑坡碎屑流的总体积为 10.85×10^4 m^3（表 1）。

通过野外调查、航空影像解译、地质分析，绘制了滑坡发生后的地质剖面图，如图 3 所示。该滑坡碎屑流的流体在一级平台、二级平台有部分残余的堆积，主要的堆积体位于三级平台的位置。

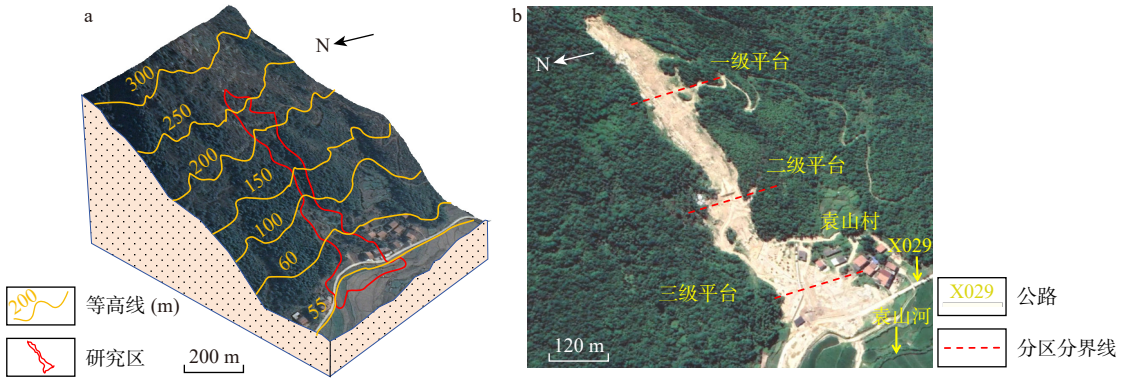
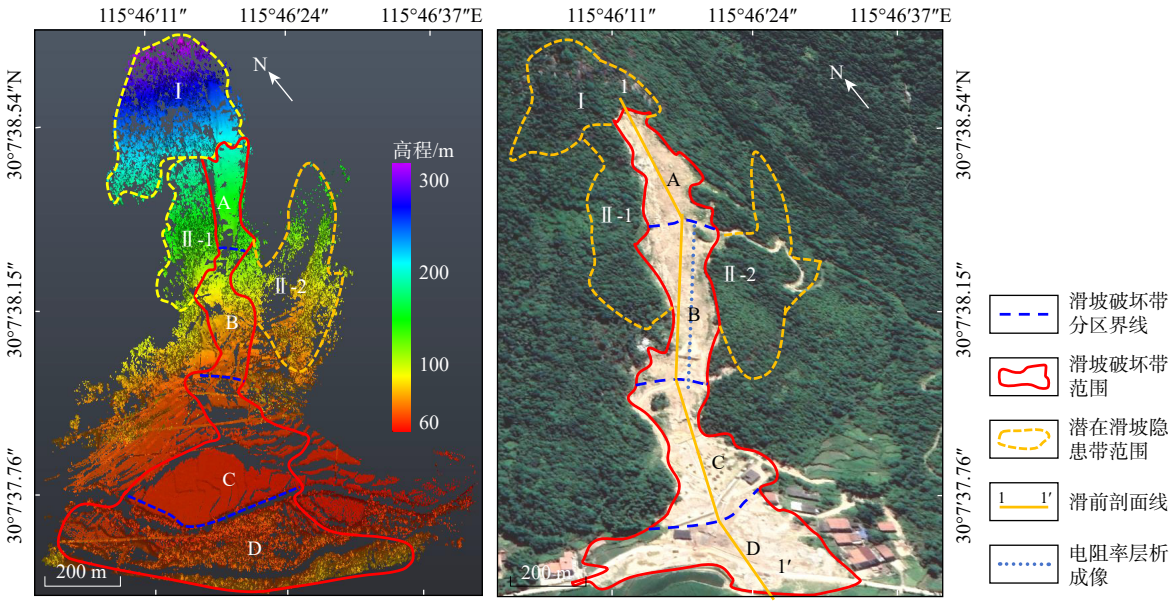


图 1　袁山村滑坡碎屑流区三维地形图 (a) 和平面示意图 (b)

Fig. 1　Three-dimensional topographic map (a) and plan (b) of the Yuanshan Village landslide debris flow area



A. 滑源区；B. 冲击区；C. 加速区；D. 堆积区；Ⅰ. 上方不稳定区；Ⅱ-1. 右岸不稳定区；Ⅱ-2. 左岸不稳定区

图 2　袁山村滑坡碎屑流变形分区

Fig. 2　Deformation zones of Yuanshan Village landslide debris flow

表 1　袁山村滑坡碎屑流 7 个分区的主要参数

Table 1　Main parameters of the seven zones in Yuanshan Village landslide debris flow

分区	长度/m	宽度/m	深度/m	厚度/m	坡度/（°）	面积/m^2	体积/m^3
A(滑源区)	130	200 ~ 265	52 ~ 62	0 ~ 4.0	32 ~ 35	0.65×10^4	2.4×10^4
B(冲击区)	160	120 ~ 200	50 ~ 62	4 ~ 6.0	42	0.88×10^4	4.4×10^4
C(加速区)	80	85 ~ 200	50 ~ 93	1 ~ 5.0	35 ~ 45	0.89×10^4	2.2×10^4
D(堆积区)	238	65 ~ 85	93 ~ 168	1 ~ 6.0	2 ~ 3	1.80×10^4	5.4×10^4
Ⅰ(上方不稳定区)	265	120 ~ 220	55 ~ 185	0 ~ 3.0	33 ~ 42	3.50×10^4	7.0×10^4
Ⅱ-1(右岸不稳定区)	170	200 ~ 265	65 ~ 136	2 ~ 6.0	22 ~ 72	1.79×10^4	5.4×10^4
Ⅱ-2(左岸不稳定区)	163	115 ~ 200	20 ~ 136	1 ~ 8.0	5 ~ 40	1.82×10^4	6.0×10^4

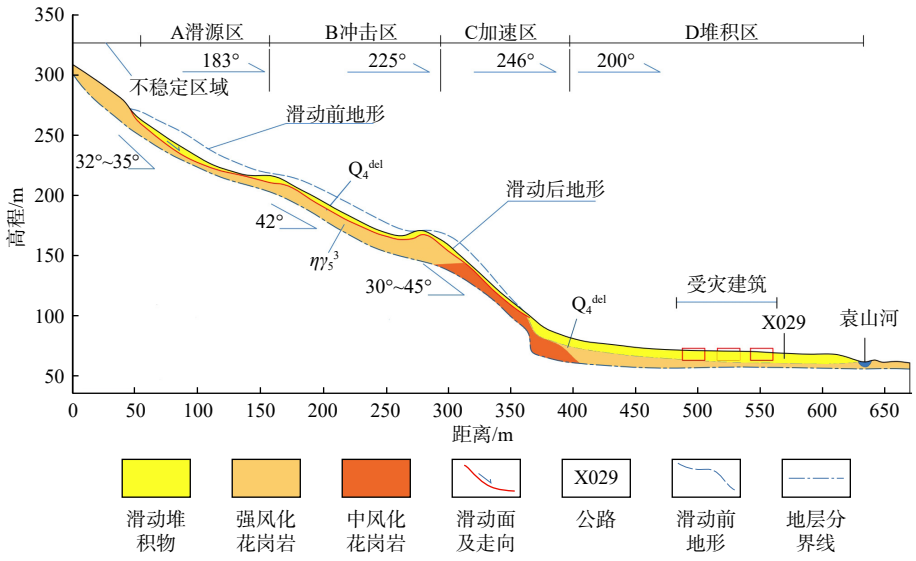


图 3　袁山村滑坡碎屑流剖面图（Q_4^{del}. 滑坡堆积层；ηr_5^3. 燕山晚期二长花岗岩；下同）

Fig. 3　Profile of landslide debris flow in Yuanshan Village

2 滑坡成因机制

2.1 滑坡形成的内因

2.1.1 地形地貌

研究区原为沟谷地貌，主沟沿线有 3 个平台，平台上方的自然坡度约 30° ~ 45°，为滑动的发生良好的地形条件。A 滑源区平面为一个“袜子”形态，降雨滑坡碎屑流发生后，主滑方向发生了明显的偏转，受地形影响，主要是左岩坡体发生滑动，右岸被冲刷形成了次滑壁，冲刷深度 0 ~ 5 m。进入 B 区后，右岸为凸岸，仍然是受到冲刷作用，而左岸为局部为凸岸，也受到冲刷，沟谷两岸最大冲刷厚度达 6 m；B 区形成“束口”效应或称为“勺形滑坡”（locked segment or spoon shape）[21]，使中上部的滑体及地下汇聚在 3−3′剖面，滑体含水量达到饱和，土体发生软化，加速从“束口”挤出。C 区加速区左岸为凸岸，冲刷作用严重，形成坡度约为 35°的陡坎。堆积区呈扇形，有利于滑体的扩散，减缓滑坡碎屑流的速度，再加上受灾建筑的阻挡，使大部分的滑坡碎屑流物质堆积在此区域（图 4）。

坡区沟谷地形是滑坡的运动速度的重要影响因素。图 5 是参考 SCHEIDEGGER[22] 提出的滑坡运动经验公式（式 1），计算出的袁山村滑坡速度曲线。

$$V=\sqrt{2g(H-fL)}, \tag{1}$$

式中：V 为滑坡体运动速度，m/s；g 为重力加速度，m/s^2；H 为滑坡处置落差高度，m；f 为摩擦系数；L 为滑坡水平运动距离，m。

由图 5 可知：滑坡运动速度呈现 3 个峰值，分别位于 3 个缓坡平台的后缘；滑坡区（A 区）第 1 次峰值速度出现在一级平台后部，约为 13.6 m/s，运动到一级平台剪出口时速度有所减小；随后受冲击区（B 区）陡峭地形的影响，滑体的速度第 1 次加速，到

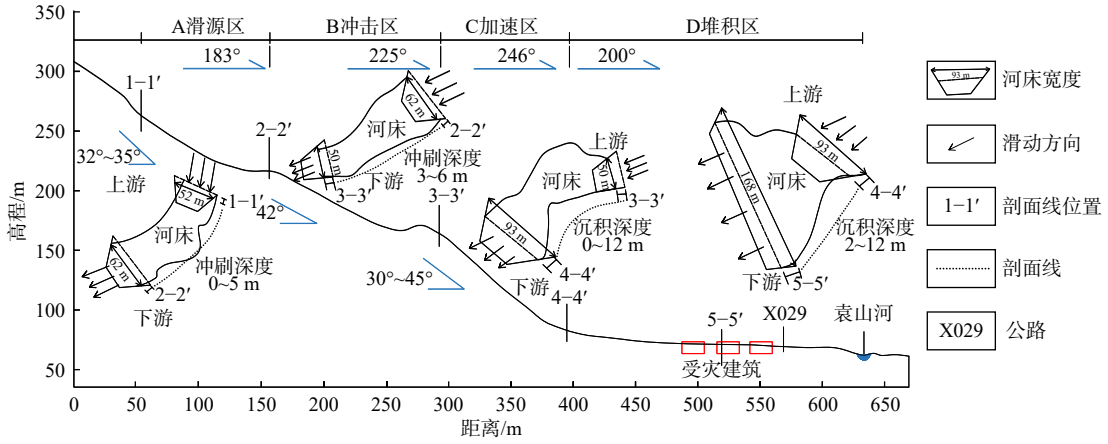


图 4 研究区滑坡的几个关键地形与微地貌

Fig. 4 Several key terrains and micro landforms of landslide in the study area

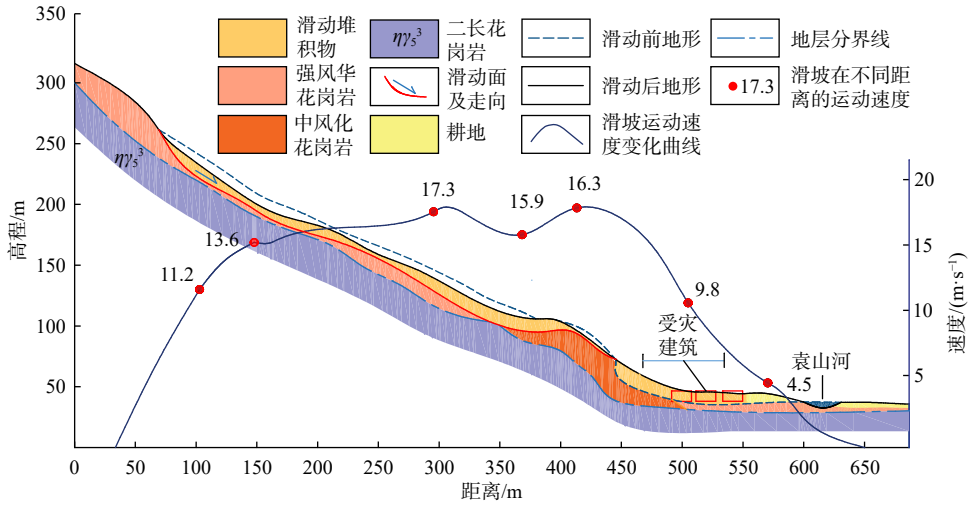


图 5 研究区滑坡过程的速度变化曲线

Fig. 5 Velocity variation curve of landslide process of the study area

达二级平台时，势速度增大第 2 个极值时 17.3 m/s；由于二级平台狭窄地形的“锁固”效应，滑坡速度降低，当从二级平台前缘挤出时，滑体速度降为 15.9 m/s；滑体流出沟口后，受顺层地层结构的影响，获得了第 2 次加速，到三级平台后缘，滑坡速度达到 16.3 m/s。随着沟口地形的坡度放缓，滑坡速度开始急剧下降，直到 X029 公路最终在流入袁山河左岸停止。受到二次加速的影响，袁山村滑坡运动过程仅持续 44.6 s，整个滑坡平均速度达 15.6 m/s。

2.1.2　岩性及物理力学性能

花岗岩残积土滑坡碎屑流的滑动面多位于抗剪强度较低的全风化带，此处坡表花岗岩已完全风化成砾质黏土，工程力学条件较差[23]。在强降雨条件下，土体软化，导致边坡失稳。地形地貌、地质构造、地震以及人类工程活动也是诱发花岗岩残积土滑坡碎屑流的重要因素，有诸多因素的组合[24-25]，活跃的地质构造使岩土体结构破碎，形成一些活动断层破碎带。以往的研究表明，地震及其余震反复作用花岗岩上，使花岗岩更容易结构破碎，形成许多裂隙和节理，同时降雨也是众多诱发花岗岩残积土滑坡碎屑流的主要因素之一[26]。

根据现场调查和钻井资料，袁山村滑坡碎屑流滑动带为完全风化的燕山晚期花岗岩，研究区附近发育多条断层和多组节理，地震活动和新构造运动较剧烈，形成了结构较松散的花岗岩残积土。这些残积土主要由高岭石和碎屑黏土组成。其中高岭石体积分数为 66%～85%。这种高岭石的存在使降雨型滑坡碎屑流更容易发生[27]。

在野外调查中，从 A、B、C 区采集了土壤样品，通过室内试验，得到了试样的物理力学性能，如表 2 所示。试验结果表明：降雨后残积土接近饱和状态，土体的饱和含水率为 20%～30%，天然含水率（32.6%～40.6%）接近其液限（29.3%～41.2%）；通过快速饱和直剪试验，得出试样的内黏聚力在 13.6～23.5 kPa 之间，内摩擦角介于 13.6°～23.5°之间。表明花岗岩残积土强度随着含水率的增加而降低。

表 2　研究区花岗岩残积土试样物理力学参数试验结果

Table 2　Experimental Results of Physical and Mechanical Parameters of Granite Residual Soil of the study area

试样序号	含水率/%	湿密度/%	液限/%	塑限/%	饱和度/%	内黏聚力/kPa	内摩擦角/（°）
S1	34.2	1.96	33.5	20.8	93.4	13.6	14.5
S2	36.8	1.84	35.3	25.8	84.8	14.3	16.2
S3	34.2	1.87	34.8	21.5	70.8	17.8	24.3
S4	32.6	2.00	32.7	20.5	94.8	22.2	25.4
S5	35.3	1.92	29.3	19.8	91.4	23.5	17.3
S6	40.6	1.93	41.2	25.5	99.5	23.3	18.2

2.2　滑坡形成的外因

2.2.1　降雨

黄梅县地属亚热带湿润季风气候，多年平均气温为 16.8℃，年均降雨量为 1270 mm。据黄梅县大河镇雨量站的观测雨量数据，绘制变化曲线如图 6 所示。从 2020 年 7 月 2 日开始，该地区经历多次强降雨。在 2020 年 7 月 7 日最大降雨量达 193 mm/d，最大小时降雨量为 29.2 mm/s；2020 年 7 月累计降雨量达 611 .1 mm，比当年 4–6 月的最高值 245.1 mm（6 月）多 366 mm，比历年同期平均值 136.6 mm 多 474.4 mm。从图 6b 可以看出，2020 年 7 月的降雨量比近 10 a 7 月的平均月工作量高一倍以上，是近 10 a 来的极端降雨量。当时的前期降雨可能在滑坡破坏中起着至关重要的作用，导致地表径流迅速增加，对土壤产生冲刷，降低其稳定性，增加了滑坡风险。

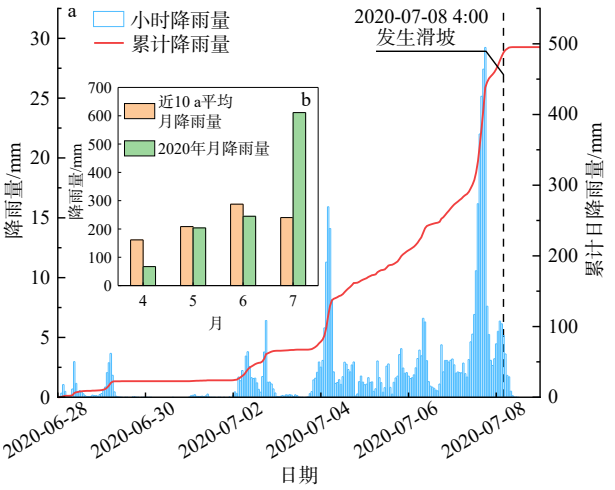


图 6　袁山村滑坡碎屑流附近雨量站记录的日降雨量和月累计降雨量

Fig. 6　Daily rainfall and monthly cumulative rainfall in the Yuanshan Village landslide debris flow

花岗岩残积土滑坡碎屑流是一种常见的地质灾害，降雨可以引发花岗残积土灾难性滑坡碎屑流的突然发生[28]。研究区位于黄梅县西北部的平原与山地交界带，受季风气候影响，降水量时空分布不均，湿气增重，气压增大，导致其降雨量显著增大。2020 年 7 月 8 日 4:05 左右，经过持续几天的暴雨，黄梅县大河镇袁山村 3 组发生滑坡碎屑流[29]。

连续强降雨增加了研究区土壤的含水量和滑坡体的自重，降低滑体的抗剪强度。降雨入渗使滑源区（A 区）岩体的节理裂隙充水，产生了浮托力，降低滑动面抗滑力，使其率先崩滑。松散残积土堆积体

顺坡冲向二级平台(B 区)，受地下水浸泡，颗粒间黏聚力降低，加速土体变形破坏[30]。加速度(C 区)地表水渗入强风化花岗岩中，加速花岗岩软化，使表层岩崩滑。地下水浸润强风化花岗岩形成软弱夹层，中风化花岗岩的层面被侵蚀掏空，上层花岗岩发生断裂。在降雨和地层结构等多种因素的作用下，滑坡碎屑流中上部中风化花岗岩内部或外围产生泥化现象，增大滑坡碎屑流发生的可能性。

2.2.2　人类工程活动的影响

植被破坏被认为是降雨型花岗岩残积土滑坡碎屑流的重要机制之一[31]。通过该滑坡近 10 a 历史遥感影像分析发现，该滑坡的顶部因工程活动影响导致其植被裸露，有利降雨的入渗。坡顶植被的破坏，能够有效增加降雨入渗的可能性，使地表水迅速转化地下水，加速地下水向下渗流[32]。树木砍伐、矿山开采是植被破坏的主要原因，对坡体的稳定性影响较大，大面积的植被破坏使花岗岩残积土长期暴露在空气中，在温差的作用下土体加速风化，雨水产生的渗透深度就越深，花岗岩残积土边坡底部土体含水量在降雨强度较大时会先达到饱和状态。

3　滑坡碎屑流运动过程模拟

3.1　Massflow 软件原理及参数选取

Massflow 软件是基于深度积分的连续介质力学理论及改进的 MacCormack-TVD 有限差分方法，兼有考虑复杂地形地貌、具有二阶精度和自适应求解域特征的山地灾害动力学高效计算模拟软件[33]。通过 Massflow 软件对已发生的滑坡碎屑流进行建模分析，研究其运动特性以及破坏机制[34-36]。

$$\frac{\partial(h)}{\partial t}+\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial x}+\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial y}=0, \tag{2}$$

$$\frac{\partial(h\bar{v}_x)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\beta_{v_xv_y}h\bar{v}_x^2\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\beta_{v_xv_y}h\bar{v}_x\bar{v}_y\right)}{\partial y}=g_xh-k_{ap}g_zh\frac{\partial(h+z_b)}{\partial x}-\frac{(\tau_{zx})_b}{\bar{\rho}}, \tag{3}$$

$$\frac{\partial(h\bar{v}_y)}{\partial t}+\frac{\partial(\beta_{v_xv_y}h\bar{v}_x\bar{v}_y)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\beta_{v_xv_y}h\bar{v}_y^2\right)}{\partial y}=g_yh-k_{ap}g_zh\frac{\partial(h+z_b)}{\partial x}-\frac{(\tau_{zy})_b}{\bar{\rho}}, \tag{4}$$

式中：$\bar{\rho}$ 为流体的平均密度，kg/m^3；h 为流体深度，m；v_x 为 x 方向上流体的速度，m/s；v_y 为 y 方向上流体的速度，m/s；τ 为流体的剪切应力张量；β 为动量分系数；g_x、g_y、g_z 分别为 x、y、z 坐标轴方向上的重力分量；k_{ap} 为土压力系数；z_b 为 z 方向的流动层下表面。

Massflow 软件中提供了 Coulomb，Mangnig，Voellmy 模型，其区别主要为输入的摩擦系数，Coulomb 模型主要适用于土体、岩体滑动启动和运动阶段的模拟，Manning 模型主要适用于洪水溃坝等模拟，Voellmy 模型主要适用于雪崩、碎屑流等以碰撞运动为主的地灾模拟。结合上述分析，本研究采用 Voellmy 模型，参数选取如表 3，计算公式如下：

$$\tau_b=\bar{\rho}gh\tan\varphi+\frac{\rho g(\mu^2+v^2)}{\xi}, \tag{5}$$

式中：τ_b 为基底剪应力，kPa；g 为重力加速度，m/s^2，取值 9.8 m/s^2；v 为流速，m/s；ξ 为阻力系数，m/s^2；φ 为内摩擦角，(°)；μ 为有效摩擦系数。

表 3　Voellmy 模型选取参数

Table 3　Parameters of the Voellmy Model

平均密度/(kg·m^{-3})	摩擦系数	黏聚力/kPa	运行总时长/s
2000	0.43	15	130

3.2　滑坡体模型建立

为研究袁山村滑坡碎屑流动力过程，采用 Massflow 软件进行反演分析，首先通过 Bigemaop 的历史影像高程数据构建滑坡前的高精度 DEM 作为基础地形数据[37]，采用无人机航拍以及三维扫描仪来获取滑坡碎屑流发生后的高精度高程模型，以及现场踏勘作为推断依据，建立碎屑流数值模型并进行分析计算。

利用上述航拍正射影像图以及通过 ArcGIS 软件获得的 DEM 文件，将 DEM 数据和模型参数导入 Massflow 软件建立用于袁山村滑坡碎屑流计算的三维地形模型，根据实际地形数据和区域范围情况，本研究采用 4.0 m×4.0 m 的正方形计算网格，节点数为 166×130。具体计算模型如图 7。

3.3　滑动范围及堆积厚度结果分析

将输出数据导入至 ArcGIS 软件中，将输出的网格节点的栅格值叠加正射影像图，实现数据可视化，转变为更直观的演化图进行分析。在表 3 的参数条件下，本次数值模拟的时间总步长为 130 s，模拟整个滑坡过程，并在软件结果中进行动态展示，选取其中关键节点进行研究。模拟结果显示，袁山村滑坡碎屑流为高速运动的滑坡碎屑流，坡顶物源区启滑失稳发生在一瞬，随之快速沿着山体向下滑动，全过程中具有前期快，中期在地形条件下影响下进行再次加速，后期速度逐渐减慢的特点。根据堆积物变化情况，选取 10，30，50，70，100，130 s 6 个时间节点

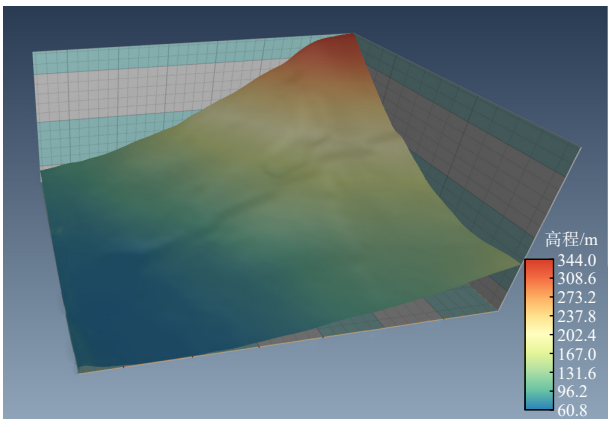


图 7　袁山村滑坡碎屑流数值模拟模型

Fig. 7　Numerical model of Yuanshan Village landslide debris flow

进行分析，如图 8 所示。其中，蓝色区域代表坡体正在发生滑动，颜色越深则滑动堆积厚度越深，反之，则代表此处停止滑动或仍未发生滑动。

由图 8 可知，袁山村滑坡碎屑流模拟中滑坡体堆积厚度最大变化范围为 0 ~ 6 m，模拟的滑坡体方量约为 10.85×10^4 m^3，属于浅层滑坡碎屑流。堆积物厚度 h 最深为滑坡滑源区部位，可以看出，袁山村滑坡碎屑流失稳在自身重力与滑床的作用下发生强烈挤压碰撞后形成滑坡碎屑流，并以流态化形式快速沿斜坡向下滑动，在 0 ~ 30 s 内滑坡体快速向下滑动的时候出现最大堆积厚度 6 m，最大堆积厚度位于滑坡碎屑流二级平台。

袁山村滑坡碎屑流被视为典型的沟谷型滑坡碎屑流，其滑动方向和路径受到沟谷地形的显著影响。根据数值模拟结果显示，在 t=10 s 时，大量物源迅速启动滑动，并快速夹带运动途径上的表层土体。这

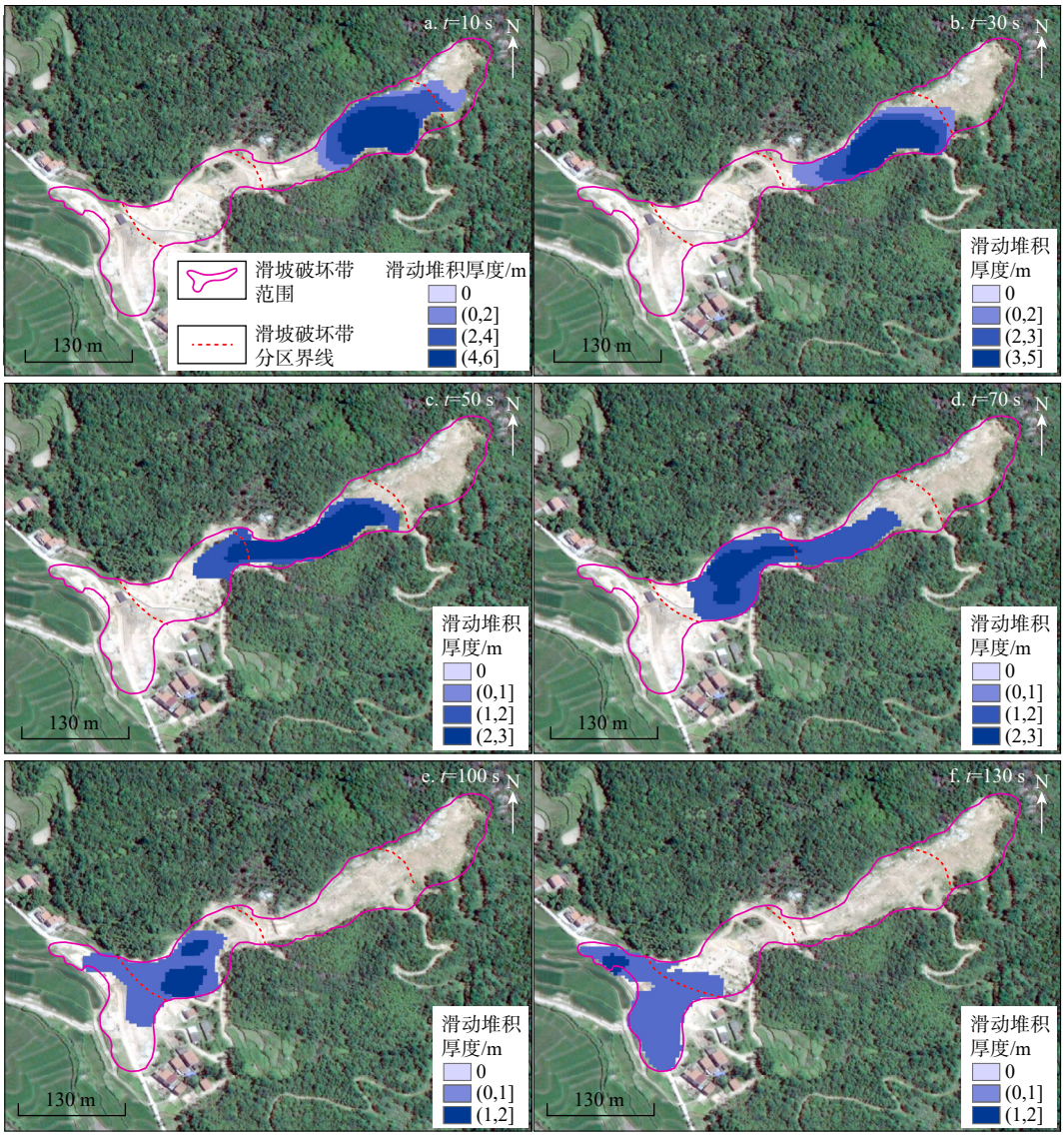


图 8　袁山村滑坡碎屑流堆积物厚度随时间演化图

Fig. 8　Thickness evolution of the flow deposits of Yuanshan Village landslide debris flow

时，最大堆积厚度出现在滑坡碎屑流二级平台处，随后土体在此时发生滑出，主滑动方向定位在 183°。当 t=30 s 时，绝大部分物源已从滑源区流出，持续向下滑动，导致在冲击区的堆积物厚度下降，最大厚度减少至 5 m。随之，最大堆积厚度区域开始缩小，表明堆积物持续向下滑动，主滑动方向转向 225°。随着时间推移至 t=50 s，堆积物厚度迅速减少，最大堆积厚度降至 3 m，二级平台堆积的物源已有大部分流出，滑坡碎屑流范围开始扩大，整个滑坡碎屑流体运动方向持续变化，此时主滑动方向为 246°。滑坡碎屑流体持续运动至 70 s 时，开始向前端堆积，最大堆积区域位于加速区前端，表明滑坡碎屑流已运移至堆积区，并出现堆积情况。此后，流体在坡体前缘较宽的地形开始堆积，在 t=100 s 时，流滑体已滑动至前缘并逐渐堆积，开始朝两侧滑动，导致前缘房屋遭受冲击破坏。最终，在 t=130 s 时，滑坡碎屑流停止运动，流滑体已冲向坡体前缘公路，进一步向左右扩大灾害范围。

3.4 滑坡碎屑流运动速度特征分析

以往学者的研究中，有多种获得滑坡碎屑流运动的方法[38-39]，Massflow 软件中，可以通过将流体在 x, y 方向上的速度进行合并计算平均速度：

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}。\tag{6}$$

通过 Python 语言，利用栅格计算器计算出每个节点在 x, y 方向上的流速，再对分量进行合成，其中，基于 Python 的开发命令为：“Square Root（Square（$v_{x0}\backslash v_{x1}\backslash v_{x2}\ldots$）+Square（$v_{y0}\backslash v_{y1}\backslash v_{y2}\ldots$））”，计算结果输出为栅格文件，通过栅格文件保存每个节点的流体速度[40]。

根据对袁山村滑坡碎屑流滑动范围以及堆积厚度的分析，继续选取 10, 30, 50, 70, 100, 130 s 等 6 个时间节点进行速度分析。若坡体表面存在颜色区域，则该区域正处于滑动状态，若不存在颜色区域则相反，为该区域未发生活动或滑动已经停止，同时颜色深度代表滑动速度大小，颜色越深则滑动速度越快。

通过图 9 的分析发现，滑坡碎屑流失稳运动时，坡体表面速度迅速增加，滑动最大速度出现在 t=10 s 时，达到 13 m/s，属于高速运动阶段。在此时刻，滑动体发生了大幅滑动。当 t=30 s 时，滑动体继续向下运动，速度开始下降，最大速度为 15 m/s，仍处于高速运动状态。此阶段为滑坡碎屑流变形破坏阶段，坡面堆积的物源吸水膨胀，抗剪强度降低，迅速启动，重力势能快速转化为动能，快速向下方运动。在 30 ~ 70 s 之间，受地形影响，滑坡碎屑流受阻较大，沿着沟谷地形下滑，运动速度逐渐减缓。当 t=70 s 时，滑动体已经冲击至坡角居民区，此时坡体最高速度仍为 9 m/s，对居民楼具有巨大冲击力，造成破坏。

同时，通过将图 8, 9 进行对比发现，滑坡碎屑流流动速度与流体堆积厚度具有正相关性，滑坡碎屑流体堆积厚度越大，滑动速度越快。

为进一步通过滑坡碎屑流运动速度变化研究滑坡碎屑流各个阶段的滑动特征，通过设置监测点来对滑动区域的运动速度进行监测分析（图 10），在滑源区、冲击区、加速区以及堆积区等位置设置了 G1, G2, G3, G4 等 4 个监测点，其中 G1 点位于滑源区的中上部，G2 点位于冲击区中部陡坡位置，G3 设置于加速区的二级平台位置，G4 设置于二级平台下游顺向斜坡上，在袁山村滑坡碎屑流堆积区的中部设置 G5 监测点，通过这些监测点的位移来推测滑坡碎屑流运动过程。

通过 ArcGIS 软件提取的监测点运动速度如图 11 所示。从图中可以看出，滑源区 G1 点始终保持在 0 m/s，由于位于滑源区后缘，在滑坡碎屑流失稳时具有较高的初始速度。在 10 s 内，此监测点物源迅速滑动，因此在滑源区 G1 点无法监测到速度。冲击区的监测点 G2 在 t=10 s 时高速滑动，随着速度下降，由于地形提供二次加速，G2 点在 t=30 s 获得加速度。加速区的监测点 G3 在 t=20 s 获得第一次速度，随后以相对稳定的速度运动。受灾点 G4 的初始速度为 0 m/s，随着物源堆积滑动，最大速度达到 8 m/s，对周围建筑物造成重大破坏。从 t=60 s 开始，监测点速度开始下降，加速运动阶段为 40 ~ 60 s。堆积区的监测点 G5 速度减缓，直至 130 s 速度降至 0 m/s，流滑体开始缓慢停止滑动，减速堆积阶段为 80 ~ 130 s。根据运行速度分析，袁山村滑坡碎屑流前期失稳运动速度极快，中期在冲击区经过堆积作用在地形条件下获得二次加速，形成后缘推动前缘牵引的复合式滑坡碎屑流。

通过 Massflow 软件模拟得到的滑坡碎屑流速度与经验公式得到的速度进行对比，发现软件模拟结果更接近现实。在滑坡碎屑流的初始变形阶段以及滑坡碎屑流的二次加速阶段，软件模拟的结果与经验预测公式相近。当时间 t=70 s 时，滑坡碎屑流进入减速堆积阶段，由于地形逐渐变得更为开阔，坡降变小，使得滑动体的运动速度明显减小，与经验公式所预测的速度相比，该阶段滑移时间显著增加，受

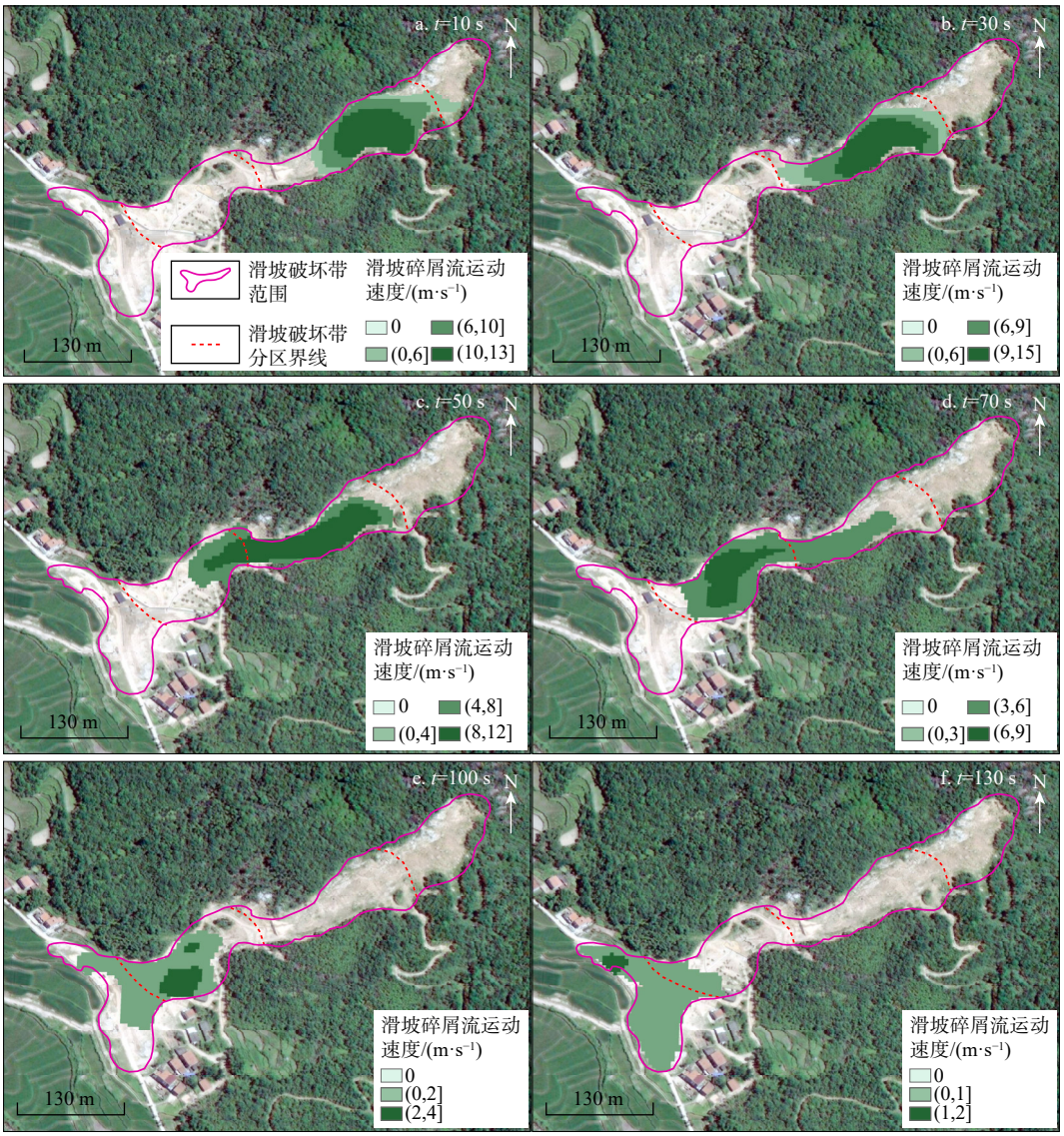


图 9　袁山村滑坡碎屑流运动速度随时间演化图

Fig. 9　Evolution of runout velocity of Yuanshan Village landslide debris flow

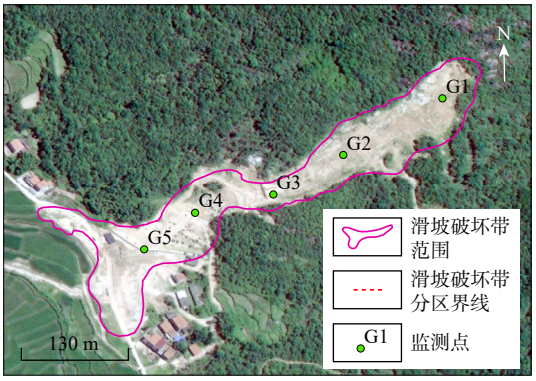


图 10　监测点布置图

Fig. 10　Layout of monitoring points

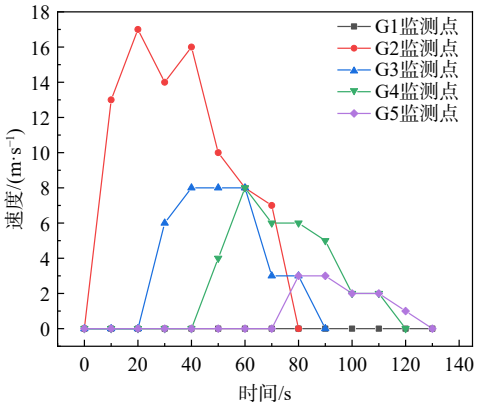


图 11　监测点处滑坡碎屑流体的运动速度变化情况

Fig. 11　Velocity variations of the landslide debris flow at monitoring points

到基底摩擦力的“阻滞”影响，流体运移时间明显延长，表明地形条件对滑坡碎屑流运动距离具有显著影响。因此，在预测滑坡碎屑流的运动距离时，需要更加重视地形条件的作用。

4 结 论

综合地质、地貌、气象等因素，分析了袁山村滑坡碎屑流的动力演变过程。松散坡面物质组成和陡峭的的地形为滑坡碎屑流的启动提供了前提条件。在连续降雨条件下，坡体中不断增加的孔隙水压力降低了滑动带的摩擦力，加速了滑坡碎屑流的发生。研究表明，降雨型花岗岩残积土滑坡碎屑流具有复杂的动力运移特点，滑源区上方的碎裂岩体存在不稳定结构，在降雨作用下率先启动，随后冲击铲刮中上部斜坡浅表的花岗岩残积土，并在二级平台得到二次加速，滑坡碎屑流随后高速运动到坡脚，对人员造成破坏。

采用 Voellmy 模型，对袁山村滑坡碎屑流进行运动全过程的数值模拟，选取摩擦系数为 0.43，模拟得到了与实际情况相符合的滑坡碎屑流运动趋势，流体的运动过程中最大堆积厚度为 6 m，与实际值相近，在 t=20 s 时达到运动峰值 17 m/s，而实际运动峰值应当更大，出现在滑源区开始失稳的阶段，整个运动过程分为 3 个阶段：0 ~ 30 s 为滑坡碎屑流失稳启动阶段，形成高速运动，30 ~ 70 s 受地形影响，滑动体在二级平台束口被地形阻滞后，再发生二次加速并发生部分偏转运动，70 ~ 130 s 为减速堆积阶段，也形成了最后的堆积形态。相对经验法而言，数值法能够在考虑地形因素的影响下更为精确的计算滑坡碎屑流运动过程，并实现可视化。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 王维早，许强，郑光，等. 强降雨诱发缓倾堆积层边坡失稳离心模型试验研究 [J]. 岩土力学，2016，37(1)：87-95.
WANG W Z, XU Q, ZHENG G, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of gentle debris slope under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 87-95. (in Chinese with English abstract)

[2] 吴李泉，张锋，凌贤长，等. 强降雨条件下浙江武义平头村山体高边坡稳定性分析 [J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(6)：1193-1199.
WU L Q, ZHANG F, LING X Z , et al. Stability analysis of high slope subjected to heavy rainfall in Pingtou Village of Wuyi County, Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1193-1199. (in Chinese with English abstract)

[3] YAN Y J, TU N, CEN L P, et al. Characteristics and dynamic mechanism of rill erosion driven by extreme rainfall on karst plateau slopes, SW China[J]. Catena, 2024, 238: 107890.

[4] ERING P, SIVAKUMAR BABU G L. Probabilistic back analysis of rainfall induced landslide: A case study of Malin landslide, India[J]. Engineering Geology, 2016, 208: 154-164.

[5] YUNUS A P, FAN X M, SUBRAMANIAN S S, et al. Unraveling the drivers of intensified landslide regimes in western Ghats, India[J]. Science of The Total Environment, 2021, 770: 145357.

[6] GELORMINI M, GRIPENBERG M, MARKE D, et al. Coverage survey and lessons learned from a pre-emptive cholera vaccination campaign in urban and rural communities affected by landslides and floods in Freetown Sierra Leone[J]. Vaccine, 2023, 41(14): 2397-2403.

[7] KUO Y S, TSAI Y J, CHEN Y S, et al. Movement of deep-seated rainfall-induced landslide at Hsiaolin Village during typhoon morakot[J]. Landslides, 2013, 10(2): 191-202.

[8] ZHAN Q H, WANG S M, WANG L, et al. Analysis of failure models and deformation evolution process of geological hazards in Ganzhou City, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 731447.

[9] QI X, LI Q H, JIAO Y Y, et al. Experimental study on response law and failure process of slopes in fully weathered granites under precipitation infiltration[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(20): 685.

[10] 刘红军，武闻禹，耿林，等. 全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨关系分析 [J]. 防灾减灾工程学报，2024，44(2)：322-332.
LIU H J, WU W Y, GENG L, et al. Analysis of the relationship between stability of fully weathered granite landslides and rainfall[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2): 322-332. (in Chinese with English abstract)

[11] 李钰，陈明亮，黄会宝，等. 新华滑坡变形演化规律与预警判据 [J]. 地质科技通报，2024，43(3)：227-239.
LI Y, CHEN M L, HUANG H B, et al. Deformation evolution law and early warning criterion of Xinhua landslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 227-239. (in Chinese with English abstract)

[12] 张学臣. 基于渗流应力耦合的降雨型堆积层滑坡稳定性评价 [J]. 工业建筑，2023，53(增刊 1)：508-512.
ZHANG X C. Stability evaluation of rainfall-type accumulation landslide based on seepage stress coupling[J]. Industrial Construction, 2023, 53(S1): 508-512. (in Chinese).

[13] 张磊，刘岁海，顾彩玉，等. 基于 FLAC3D 软件的降雨型滑坡稳定性分析 [J]. 中国水土保持，2023(5)：53-57.
ZHANG L, LIU S H, GU C Y, et al. Stability analysis of rainfall induced landslides based on FLAC3D software[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(5): 53-57. (in Chinese with English abstract)

[14] 兰腾达. 基于 FLAC 3D 数值分析的福安白莲寺降雨型滑坡稳定性评价 [J]. 福建地质，2025，44(1)：61-68.
LAN T D. Stability evaluation of Bailian temple landslide in Fu'an City based on FLAC 3D[J]. Geology of Fujian, 2025, 44(1): 61-68. (in Chinese with English abstract)

[15] CHEN Z, SONG D Q. Numerical investigation of the recent Chenhecun landslide (Gansu, China) using the discrete element method[J]. Natural Hazards, 2021, 105(1): 717-733.

[16] 田仁珺. 基于 PFC3D 的庞家湾滑坡运动过程模拟研究 [J]. 江西建材，2024(6)：205-209.
TIAN R J. Simulation of motion process of pangjiawan landslide

based on PFC3D[J]. Jiangxi Building Materials, 2024(6): 205-209. (in Chinese with English abstract)

[17] GUO J, CUI Y F, XU W J, et al. Numerical investigation of the landslide-debris flow transformation process considering topographic and entrainment effects: A case study[J]. Landslides, 2022, 19(4): 773-788.

[18] 庞海松, 谢骏锦, 张小明, 等. 基于 RAMMS 数值模拟的短时强降雨型泥石流危险性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 215-225.
PANG H S, XIE J J, ZHANG X M, et al. Hazard assessment of debris flow induced by short-time heavy rainfall based on RAMMS numerical simulation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 215-225. (in Chinese with English abstract)

[19] FAN X M, YANG F, SIVA SUBRAMANIAN S, et al. Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach: The Baige landslide, Jinsha River, China[J]. Landslides, 2020, 17(1): 147-164.

[20] JABOYEDOFF M, CARREA D, DERRON M H, et al. A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes[J]. Engineering Geology, 2020, 267: 105478.

[21] LUCAS A , MANGENEY A , MÈGE D, et al. Influence of the scar geometry on landslide dynamics and deposits: Application to Martian landslides[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2011, 116(E10).

[22] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides 2F, 1T, 14R[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1974, 11(3): 65.

[23] SANDEEP C S, HE H, SENETAKIS K. Experimental and analytical studies on the influence of weathering degree and ground-environment analog conditions on the tribological behavior of granite[J]. Engineering Geology, 2022, 304: 106644.

[24] PRADHAN A M S, KIM Y T. Relative effect method of landslide susceptibility zonation in weathered granite soil: A case study in Deokjeok-ri Creek, South Korea[J]. Natural Hazards, 2014, 72(2): 1189-1217.

[25] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 1-13.
TANG H M. Advance and prospects of major landslides prediction and forecasting[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[26] 吴善百. 广西东南部花岗岩残积土降雨型滑坡的起动机理研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2020.
WU S B. Study on the initiation mechanism of rainfall-induced landslide of granite residual soil in southeast Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese with English abstract)

[27] BOGAARDI T, GUGLIELMI Y, MARC V, et al. Hydrogeochemistry in landslide research: A review[J]. Bulletin de la Societe Geologique de France, 2007, 178(2): 113-126.

[28] LIU H H, YU P, LU H T, et al. Experimental study on disaster mechanism of completely weathered granite landslide induced by extreme rainfall[J]. Geoenvironmental Disasters, 2023, 10(1): 5.

[29] 陈慧娟, 邹浩, 阎遥, 等. 持续强降雨影响下黄梅县袁山村三组滑坡破坏特征与成因分析 [J]. 华南地质, 2023, 39(3): 482-491.
CHEN H J, ZOU H, YIN Y, et al. Analysis of characteristics and causes of landslide damage in group 3 of Yuanshan Village, Huangmei County under the influence of continuous heavy rainfall[J]. South China Geology, 2023, 39(3): 482-491. (in Chinese with English abstract)

[30] SUN Y L, LIU Q X, XU H S, et al. Influences of different modifiers on the disintegration of improved granite residual soil under wet and dry cycles[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(4): 831-845.

[31] YE P, YU B, CHEN W H, et al. Rainfall-induced landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance in Hilly area of Fujian Province, China[J]. Natural Hazards, 2022, 113(2): 965-995.

[32] ZHANG J J, QIU H J, TANG B Z, et al. Accelerating effect of vegetation on the instability of rainfall-induced shallow landslides[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): 5743.

[33] 王钟文. 基于动力过程的山区小流域泥石流灾害风险评估研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
WANG Z W. Hazard and risk assessment for debris flows in small watershed in mountainous area based on dynamic process[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)

[34] 宋德光, 吴瑞安, 马德芹, 等. 四川泸定昔格达组滑坡灾害运动过程模拟分析 [J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2185-2197.
SONG D G, WU R A, MA D Q, et al. Simulation analysis of landslide disaster movement process in Xigeda Formation, Luding County, Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(12): 2185-2197. (in Chinese with English abstract)

[35] 熊朝正, 吉锋, 石豫川. 基于 Massflow 模型的青龙沟台风暴雨型泥石流运动特征研究 [J]. 人民珠江, 2023, 44(3): 17-22.
XIONG C Z, JI F, SHI Y C. Movement characteristics of typhoon rainstorm-triggered debris flow in Qinglong Gully based on massflow model[J]. Pearl River, 2023, 44(3): 17-22. (in Chinese with English abstract)

[36] 冉林, 马鹏辉, 彭建兵, 等. 甘肃黑方台“10·5”黄土滑坡启动及运动特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 1-9.
RAN L, MA P H, PENG J B, et al. The initiation and motion characteristics of the “10·5” loess landslide in the Heifangtai platform, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 1-9. (in Chinese with English abstract)

[37] 殷邦民. 尼续村高速远程滑坡流态化堆积与运动学特征研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
YIN B M. The research on rheological properties of landform and kinematics of nyixoi chongco rock avalanche[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese with English abstract)

[38] 石子健, 陈稳, 盛逸凡, 等. 碎屑流滑坡变形及运动特征研究: 以恩施市沙子坝滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 149-158.
SHI Z J, CHEN W, SHENG Y F, et al. Deformation and movement characteristics of debris flow landslide: A case study of the Shaziba landslide in Enshi, China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 149-158. (in Chinese with English abstract)

[39] 袁锦涛, 韩培锋, 欧小红, 等. 基于 DEM 的滑坡碎屑流运动堆积特性研究 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(3): 230-238.
YUAN J T, HAN P F, OU X H, et al. Study of the accumulation characteristics of landslide debris flow movement based on

DEM[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(3): 230-238.（in Chinese with English abstract）

[40] 丁邦政. 基于 GIS 和 Massflow 仿真的尾矿库溃坝危害下的桥梁风险评估 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

DING B Z. Bridge risk assessment under tailings dam failure hazard with GIS and massflow simulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.（in Chinese with English abstract）

Summary for “降雨型花岗岩残积土滑坡碎屑流运动过程分析: 以湖北黄梅县袁山村为例”

Analysis of rainfall induced-movement of landslide debris flows in granite residual soil: A case study of Yuanshan Village, Huangmei County, Hubei Province

ZHU Ying[1]，GAN Jianjun[1*]，LU Qirui[1]，DENG Yiwu[1]，DENG Kun[2]

1. National and Local Joint Engineering Laboratory for Water Engineering Safety and Resource Efficient Utilization in Poyang Lake Basin, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China；

2. Institute of Water Resources and Water Ecology and Environment, Jiangxi Academy of Water Conservancy, Nanchang 330029, China

First author，E-mail：2023314001@nit.edu.cn

* Corresponding author， E-mail：ganjianjun@nit.edu.cn

Abstract：[**Objective**] The landslide in Yuanshan Village, Huangmei County, Hubei Province, represents a granite residual soil avalanche debris flow with complex and abrupt movement dynamics influenced by geological conditions. This study investigates the kinematic mechanisms of such landslide-debris flows in mid-low mountainous areas by analyzing the motion process of this specific event. [**Methods**] Through the field geological survey, the movement process of the landslide debris flow was analyzed based on UAV aerial photography, digital elevation model (DEM), on-site investigation, geological data analysis, and numerical simulations. [**Results**] The results show that the maximum accumulation thickness of the avalanche is 6 m during the movement process. The peak velocity reaches 17 m/s at t=10 s. The actual peak velocity should be larger and appears when the slip source area begins to be unstable. The whole movement process could be divided into three stages: during the first 30 s, the granite residual soil lost its stability, which resulted in the initiation and acceleration of the debris flow at the first-level platform; in 30-70 s, affected by the terrain, the debris flow was accelerated for the second time. A part of the debris flow changed its flow direction and destroyed the buildings in Yuanshan Village. From 70 s to 130 s, the debris flow decelerated and accumulated, during this stage the buildings were buried and accumulated by the debris flow. [**Conclusion**] This study can provide a reference for the prevention and control of similar disasters.

Key words: rainfall induced-movement of landslide debris flow； granite residual soil remnant； process of movement；numerical simulation；Massflow；Huangmei County, Hubei Province

Received：2024-09-29；Revised：2024-12-01；Accepted：2025-02-14

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240564