doi:10.3799/dqkx.2025.224

冰川融水及降雨协同作用下高速远程演化机制

仉文岗[1]，孔德婧楠[1]，王鲁琦[1*]，卢望[1]，王硕[1]，谭钦文[2]，王培清[3]，陈亮[3]

（1. 重庆大学 土木工程学院，重庆 400045 中国；2. 中国地质大学湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站，湖北武汉 430074 中国；3. 西藏农牧学院水利土木工程学院 西藏林芝 860000 中国）

摘要：高速远程滑坡灾变模式复杂，诱发因素多样，其启滑机制及动力学演变阶段的判定是研究的重点与难点。本文以易贡高速远程滑坡为例，融合静力学反演与动力学模拟，揭示了冰川融水与降雨共同作用下的滑坡触发机制与运动特性。基于遥感影像、环剪试验与数字高程模型，采用极限平衡法标定关键参数(孔压系数)，并在滑移路径预设松散堆积层，实现了剪切液化与铲刮效应的定量表征。结果表明，降雨与冰川融水显著增加孔隙水压力，降低抗剪强度，诱发滑坡失稳;运动过程中剪切液化与铲刮效应使滑体速度提升了 32.1%，规模扩大了 28.3%。模拟结果与实际工况吻合良好，为类似灾害风险防控提供了科学依据与方法。

关键词：冰川融水及降雨协同作用；高速远程滑坡；物理力学灾变演化全过程；剪切液化；铲刮效应

中图分类号：P642　　**收稿日期**：2025-03-26

Mechanisms of High-Speed Long-Distance Landslides under the Synergistic Effects of Glacial Meltwater and Rainfall

ZHANG Wengang[1], KONG Dejingnan[1], WANG Luqi[1*], LU Wang[1], WANG Shuo[1], TAN Qinwen[2], WANG Peiqing[3], CHEN Liang[3]

（1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Observation and Research Station for Geohazard of Badong, China University of Geosciences, Hubei 430074, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xizang Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

Abstract: High-speed long-distance landslides exhibit complex disaster patterns and diverse triggering factors, making the determination of their initiation mechanisms and dynamic evolution stages a key research focus and challenge. This study takes the Yigong high-speed long-distance landslide as an example and integrates static inversion with dynamic simulation to reveal the triggering mechanism and movement characteristics of the landslide under the combined influence of glacial meltwater and rainfall. Based on remote sensing images, ring shear tests, and digital elevation models, key parameters (pore pressure coefficient) were calibrated using the limit equilibrium method, and a loose accumulation layer was preset along the sliding path to quantitatively characterize shear liquefaction and the scraping effect. The results show that rainfall and glacial meltwater significantly increase pore water pressure and reduce shear strength, leading to landslide instability. Furthermore, shear liquefaction and the scraping effect during motion increased the sliding speed by 32.1% and expanded the landslide scale by 28.3%. The simulation

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC3007204)；国家重点实验室开放基金(SKLGP2024K021)；中国博士后科学基金(2024M753842).

第一作者简介：仉文岗（1983-），男，博士，教授，主要从事岩土工程的相关研究。E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6051-1388

通讯作者：王鲁琦（1993-），男，博士，副教授，主要从事地质灾害防治的相关研究。E-mai: wlg93@cqu.edu.cn

results agree well with actual conditions, providing a scientific basis and methodology for risk prevention and control of similar geological disasters.

引言

高速远程滑坡是一种极具破坏性的地质灾害，其灾变演化过程复杂多样，通常涉及复杂的地质、气象及水文条件。由于其运动速度快、影响范围广的特点，对人类活动和自然环境造成重大威胁（Dai et al., 2019）。因此，研究高速远程滑坡的灾变演化过程，对于滑坡灾害的预防和治理具有重要意义。

近年来，随着遥感技术和数值模拟技术的发展，国内外学者对高速远程滑坡的研究取得了一系列重要成果。Zhou 等（2020）利用多尺度摩擦定律高精度再现滑坡动力过程；Cai 等（2022）采用连续-非连续方法模拟滑坡起动与滑动；牛犇等（2023）基于连续-非连续单元法（CDEM）结合颗粒单元法，定量分析高速远程滑坡成灾范围；Guo 等（2023）和 Gao 等（2023）分别关注了易贡滑坡的起动机制、潜在危险岩体及其可能引发的灾害链，并利用遥感技术进行监测预警；钟源等（2023）通过物理模型试验和数值模拟，研究了强降雨触发厚层堆积层滑坡的机制；Wu 和 Yang（2024）发展了深度平均光滑粒子流体动力学（SPH）与有限体积 van Leer 分裂（FV-VLS）耦合方法用于滑坡危险区评价；杨畅等（2024）利用 MatDEM 软件构建易贡滑坡三维模型，研究了铲刮作用对滑坡形成的影响；李剑平等（2024）提出了随机极限平衡-物质点耦合分析方法（RLE-MPM），开发软件接口评估降雨边坡大变形破坏；Ho 等（2025）通过地震信号反演揭示了滑坡动态过程及摩擦系数变化，表明高速滑动产生的热量增强了流动性。

然而，当前主流数值模拟方法在处理多因素协同作用方面仍存在一定局限。例如，许多模型对复杂地形产生的离心力、向心力效应考虑不足，难以准确刻画曲面路径上的运动行为；在同时耦合力学-水文-地质等多场作用时，常面临理论简化性强、参数不确定性高、计算可行性低等挑战；此外，传统方法在反映滑带土体空间变异性及量化模拟不确定性方面仍有改进空间。

特别值得关注的是，在高速剪切条件下，滑坡土体常发生显著的剪切液化现象。这种现象是指土体在外部剪切力作用下，颗粒发生重排，孔隙水被挤压且因高速剪切无法及时消散，导致孔隙水压力急剧上升。当孔隙水压力足够大时，土颗粒间有效应力骤降，土体抗剪强度丧失，呈现类流体行为（即液化），从而显著加速滑坡体的流动变形和扩展，扩大灾害规模（Hu et al., 2015）。胡明鉴等（2009）针对易贡滑坡的研究尤为关键，他们通过高精度环剪仪模拟大位移剪切过程，发现在不排水高速剪切条件下，孔隙水向剪切面迁移，导致该处土体含水率和细粒含量升高，有效内摩擦角显著低于排水条件，明确揭示了高速剪切诱发液化并导致土体强度急剧弱化的机制，这一现象在易贡高速远程滑坡的形成中起到了至关重要的作用。

尽管上述研究对高速远程滑坡的触发因素和运动过程进行了广泛探讨，但对其灾变演化机制的综合评定，特别是在冰川融水与降雨等多重因素共同作用下的系统性数值模拟与实证分析，仍有待深化。冰川融水作为一种特殊的水文条件，其对滑坡的影响机制复杂，涉及冰川消融、地表径流及地下水流动等多个过程（Zou et al., 2023）；降雨则直接影响土体的孔隙水压力，降低土体的抗剪强度，进而诱发滑坡失稳。

鉴于我国约 80%的大规模高速滑坡发生于灾变机制复杂多样的青藏高原（Shang et al., 2003；郭长宝等，2024），本文以西藏易贡滑坡为例，基于文献调查、遥感影像、数字高程模型、地质分析及室内环剪试验获取数据。

为克服传统数值模拟方法的局限，本研究创新性地引入集成滑坡模拟方法 LS-RAPID。该模型在处理多场耦合、反映地形效应、考虑参数空间变异性及模拟高速剪切液化行为方面

展现出显著优越性，尤其适用于再现高速远程滑坡的动力过程与成灾范围。

本文融合极限平衡法与集成滑坡模拟模型（LS-RAPID），通过静力学反演，精确标定孔压系数 Ru，定量表征铲刮效应，揭示冰川融水与降雨耦合作用下滑坡灾变演化特征、触发机制及运动特性，考虑剪切液化及铲刮效应的影响，分区域、分阶段的阐述高位远程滑坡的联动灾变机理。

1 研究区域概况

2000 年 4 月 9 日，中国西藏自治区的易贡地区发生了一起高速远程滑坡灾害，其被称为易贡大滑坡。该滑坡位于波密县札木弄乡附近的易贡藏布左岸札木弄沟，中心经纬度约为 30°12'3"N、94°58'03"E（图 1）。

青藏高原东南缘的易贡藏布中下游，地形复杂，山高谷深，平均海拔超过 4000m，发育有 V 形深切河谷，峡谷区域斜坡坡度在 40°~60°之间，属于典型的极高山峡谷地貌。此外，该地区还分布着冰斗、角峰和冰碛垄等冰川地貌特征。滑坡区域的降雨多集中在夏季，年平均气温约为 11.4℃，冬季气温可降至零下，存在较大的昼夜温差和季节性温度变化（袁浩等，2023）。

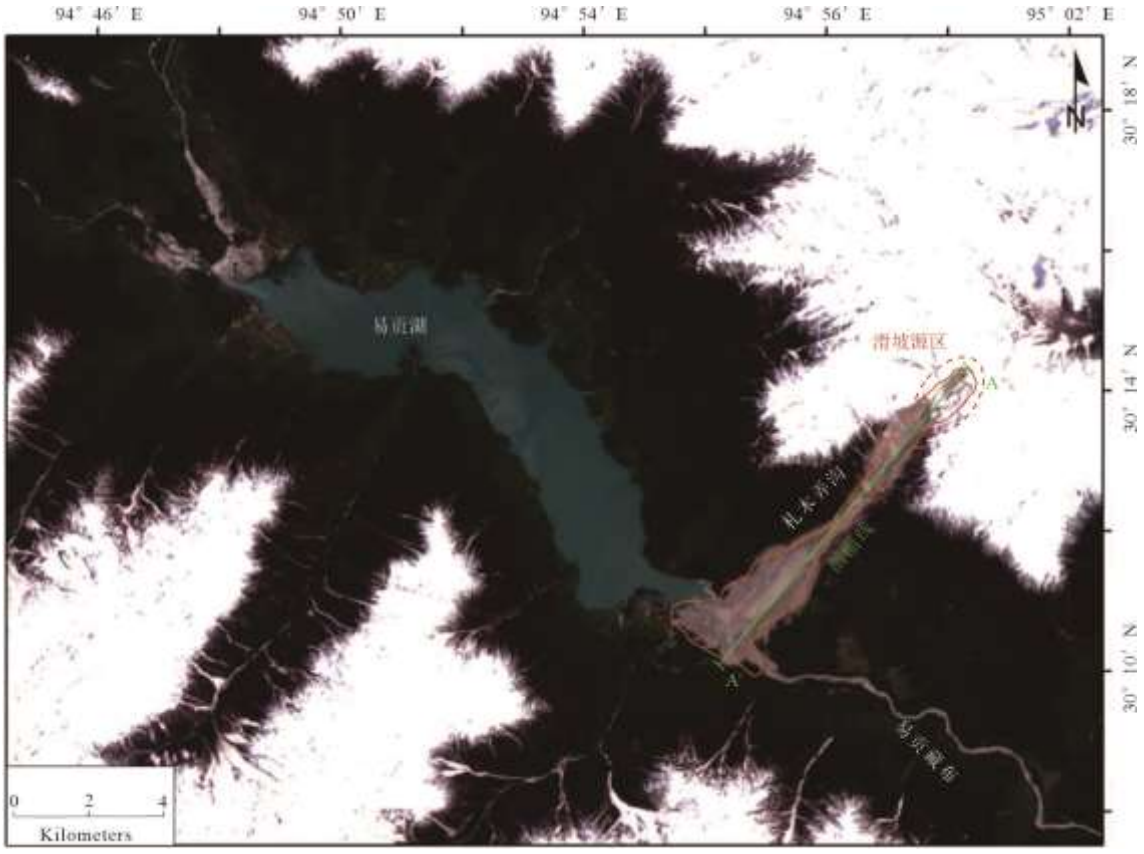

图 1 2000 年 5 月 4 日（滑坡发生 25 天后）获得的陆地卫星-7 号图像（Delaney and Evans，2015）

Fig. 1 Landsat-7 image obtained on May 4, 2000 (25 days after the landslide occurrence) (Delaney and Evans, 2015)

札木弄沟位于易贡-鲁朗断裂和察隅-嘉黎断裂的近正交位置，构造运动强烈，历史上多次发生大地震，其中 1950 年察隅地震的震级高达 Ms8.6 级。沟内滑源区主要由喜马拉雅早期花岗岩体组成，滑源区以下的地层主要为大理岩、砂岩和板岩等。此外，沟内广泛分布有第四纪松散堆积物（Zhou et al., 2016），地质条件较为脆弱。

易贡大滑坡的规模巨大，滑坡后缘高程约为 5520m，落距约 1500m，垂直落差约 3330m，

全长 8000m 左右，是中国历史上规模最大的滑坡之一（Zhou et al., 2020）。滑坡体以高速碎屑流的形式迅速滑下，流经札木弄沟后冲出沟谷，延伸至整个河谷，最终在河谷中堆积形成喇叭状天然坝体，形成了堰塞湖，完全阻断了易贡藏布河的水流，导致水位急剧上升，给沿岸地区带来了巨大的威胁和风险。

2 基于极限平衡法的静力学分析

采用极限平衡法对易贡滑坡典型剖面的崩滑区（图 9）进行了模拟计算，并对块体进行了静力学分析。本研究参考了 Hu 等（2015）与 Wang 等（2016）的文献，总结了模型中所使用的滑体参数，详见表 1。

表 1 极限平衡法滑体参数

Table 1 Parameters of the sliding mass in the limit equilibrium method

参数	取值
单位重量（U）	18.45kN/m³
粘聚力（c）	13kPa
摩擦角（φ）	36.2°

考虑到研究区地形复杂及冰川融水、降雨（涉及冰川消融、地表径流、地下水流动等多过程）对孔隙水压力的综合影响，为简化计算并服务于后续稳定性分析，本研究采用孔压系数 Ru 来表征孔隙水压力。Ru 定义为土体内各点孔隙水压力 u 与土体自重应力 γ_z 的比值，即 $Ru=u/\gamma_z$。

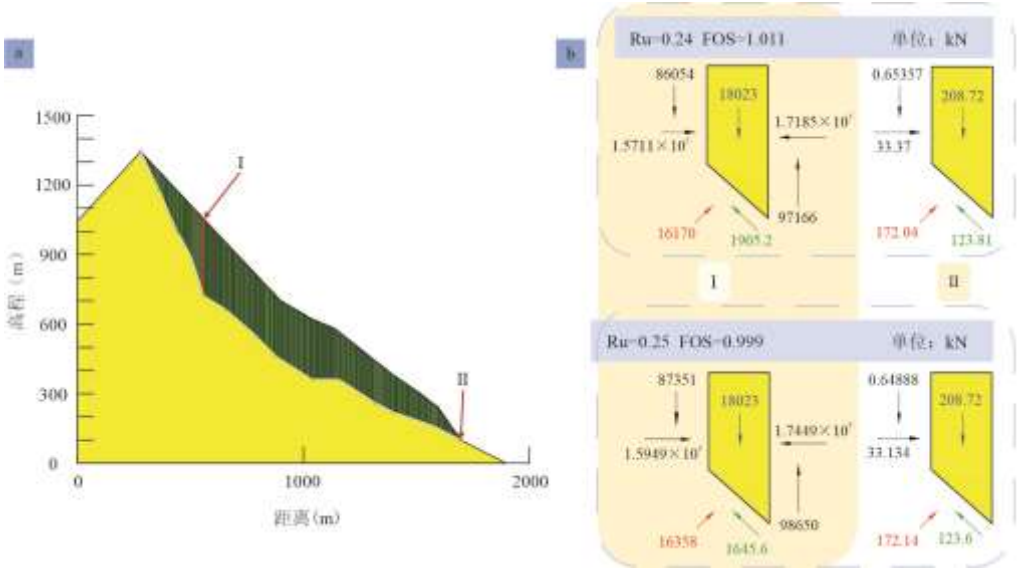

图 2 易贡滑坡典型剖面的 Geo-Slope 计算结果：（a）滑坡条分模型；（b）自重最大块体与自重最小块体的静力学分析

Fig. 2 Geo-Slope calculation results for a typical profile of the Yigong landslide: (a) Sub-model of the landslide mass; (b) Static analysis of the maximum and minimum self-weight blocks

如图 2（a）所示，这些力分别为自重、基底法向应力、基底下滑剪力、侧向法向应力及侧向剪力。根据极限平衡法将滑坡划分为 149 个块体，自重范围为 208.72~18032.00kN，基底法向力范围为 172.14~38757.00kN，基底下滑剪力范围为 123.60~26016.00kN。将自重最大（18032.00kN，标号I）和自重最小（208.72kN，标号II）的典型块体进行静力学分析，具体见图 2（b）。

反演分析结果表明：当 Ru 为 0.24 时，滑坡的安全系数 Fs=1.011；当 Ru 增加至 0.25 时，Fs 降至 0.999（Fs<1），表明此时滑坡体已趋于失稳状态，开始出现破坏。

静力学分析确定了临界孔压系数 Ru=0.25，该结果为后续的动力学分析提供了关键输入参数，具有指导意义。为确保模型一致性，本文集成模拟中孔压系数 Ru 取值为 0.25。

3 基于集成滑坡模拟模型的动力学分析

3.1 集成滑坡模拟模型原理

集成滑坡模拟模型（即 LS-RAPID）是由国际滑坡协会（International Consortium on Landslide，以下简称 ICL）自主研发的数值模拟程序，用于模拟由地震、降雨或两者共同作用引发的滑坡运动。该模型将滑坡的起始过程（稳定性分析）与运动过程（动力学分析）整合在一个框架内，通过考虑孔隙水压力增加和地震荷载，模拟滑坡从稳定状态、失稳破坏、失稳后强度降低、运动直至最终沉积的完整演化过程（Sassa et al., 2012），并包含运动过程中裹挟不稳定沉积物导致的体积增大效应。简而言之，LS-RAPID 模型可以表征触发因素作用下土体行为的动态演变。

基于垂直柱状块体单元构建滑坡的 LS-RAPID 力学概化模型如图 3 所示，作用于单个块体的力系包括：自重（W）、垂直地震力（F_v），水平 x-y 方向地震力（F_x 和 F_y），块体单元侧壁的侧向压力（P），滑体底部的剪切阻力（R），以及滑体底部的孔隙压力（U）。此外，滑体底部的法向应力（N）作为自重法向分量的反作用力，同样被纳入模型考虑。其中，R 受到 N 和 U 的影响。R 沿最大坡度线向上的方向作用以抵抗滑动；在运动阶段，则沿运动的反方向作用。所有应力和位移均被投影到水平面上进行分析和计算（Sassa, 1988）。滑坡所受总力为驱动力（自重和地震力）、侧向压力和剪力之和，为滑坡提供加速度。

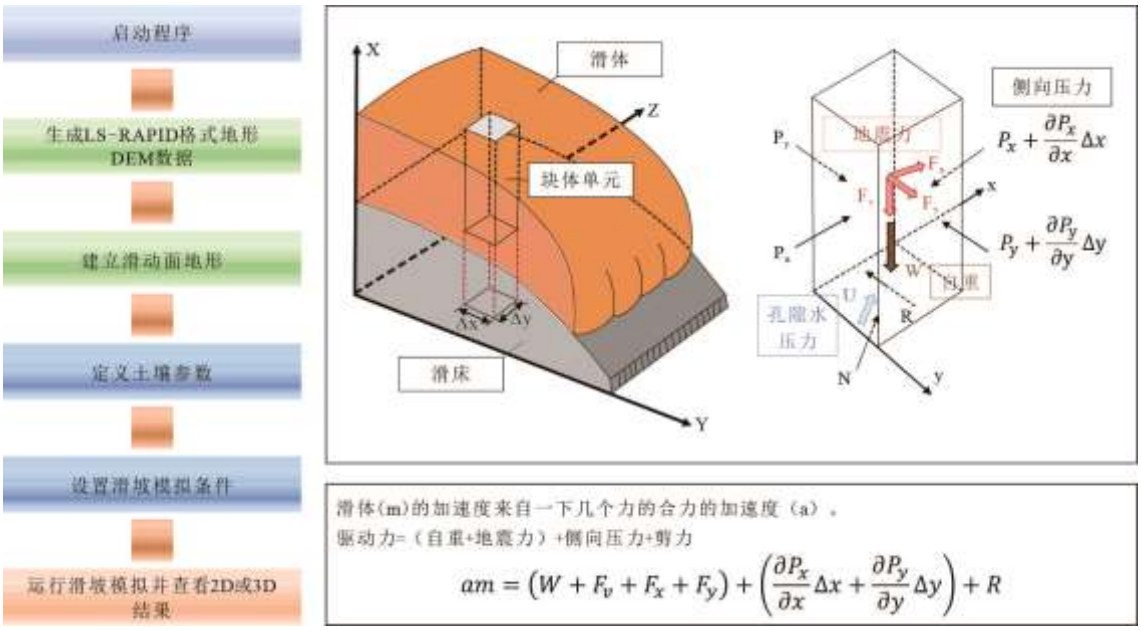

图 3 集成滑坡模拟模型的操作流程及本构模型原理（Dang et al., 2019）

Fig. 3 The operation flowchart and constitutive model principle of the integrated landslide simulation model (Dang et al., 2019)

3.2 环剪实验

集成滑坡模拟模型所需的关键土体参数通过高精度环剪仪进行试验获取，根据现场调查结果，以得到的数据为基础开展室内环剪试验。该实验装置同样由 ICL 自主研发（图 4），支持模拟排水剪切与不排水剪切两种实验条件下的剪切破坏，能够模拟与高速远程滑坡相关的剪切过程，同时还可以表征内部土体破坏过程（Sassa et al., 2004）。

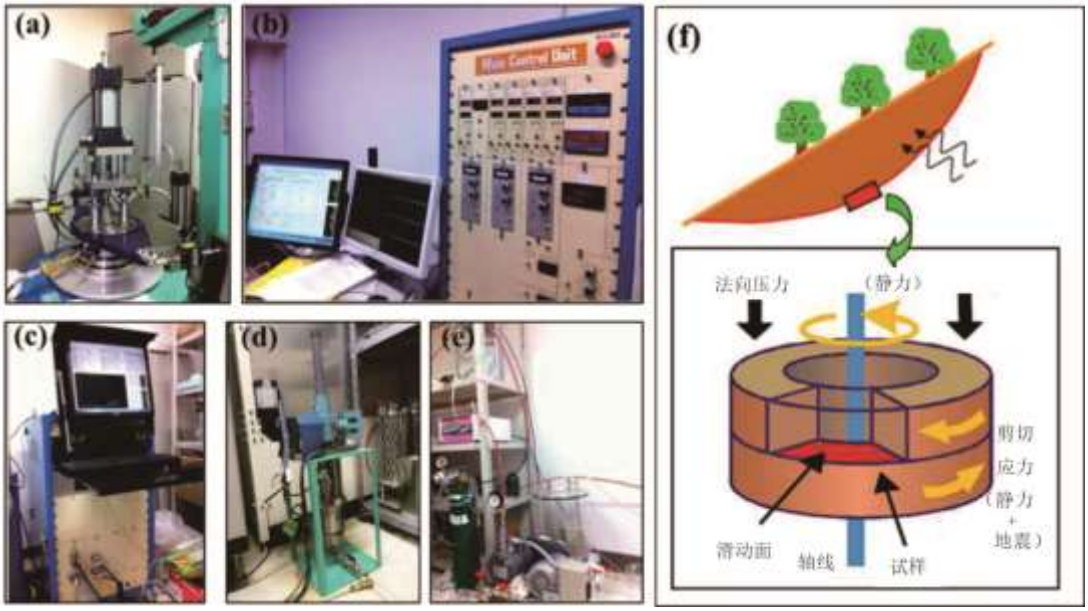

图 4 高精度环剪仪及设计原理（Setiawan et al., 2018）：（a）仪表箱；（b）主控单元作为控制、监控箱；（c）计算机系统；（d）减压系统；（e）孔隙压力供应系统；（f）设计原理

Fig. 4 High precision ring shear apparatus (Setiawan et al., 2018): (a) Instrument box; (b) Main control unit serving as the control and monitoring box; (c) Computer system; (d) De-pressurization system; (e) Pore pressure supply system; (f) Design concept

试验时，将土样放入剪切盒内，通过调整施加在上部剪切盒的法向应力，旋转下部剪切盒进行剪切，从而观察到土样的峰值变形。该设备不仅能精确测定土体的剪切强度、液化能力及剪切行为，还能自动记录剪切面上的孔隙水压力、剪切位移和剪切应力等关键参数（Tan et al., 2020）。

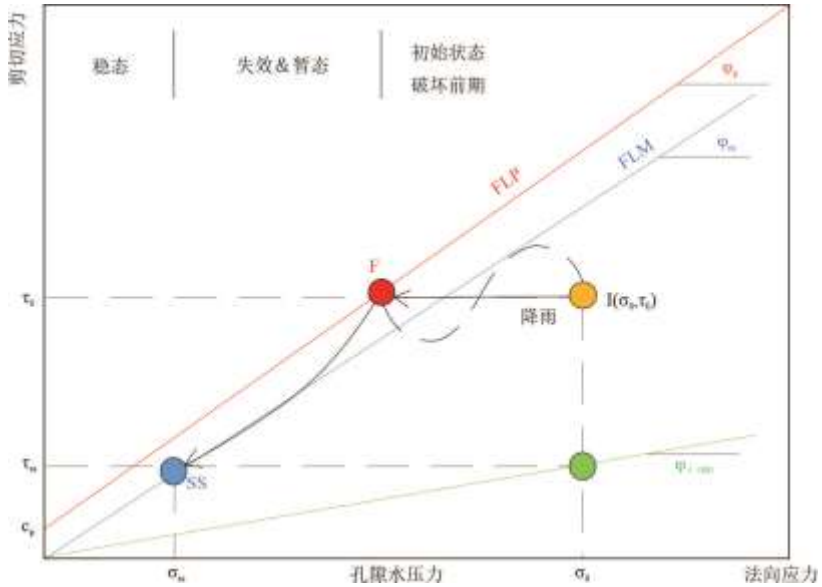

图 5 由高精度环剪仪不排水剪切产生的典型有效应力路径图（Tan et al., 2020）

Fig. 5 Typical effective stress path generated by the high precision ring shear apparatus (Tan et al., 2020)

图 5 展示了高精度环剪仪在不排水条件下获得的典型有效应力路径（各符号含义见表 2）。路径清晰地反映了土体在不排水环剪试验中不同应力状态下的力学行为及其液化过程，应力变化过程为初始状态I—破坏状态F—稳定状态SS。

初始状态点I（σ_0，τ_0）：代表土体在初始条件下的应力状态，即未受剪切作用时的法

向应力和剪切应力。

破坏状态点F：随着剪切进行，不排水条件导致孔隙水压力累积，有效应力路径上移。当路径达到破坏线FLP时，土体的剪切强度达到极限并发生破坏（F点）。此后土体继续变形但逐渐趋于稳定。

稳定状态点SS（σ_{ss}，τ_{ss}）：表示经历大位移剪切后，土体达到稳定的残余应力状态，其黏聚力为c_p。

降雨等外部因素会增加孔隙水压力，可能改变初始状态点I（σ_0，τ_0），加速土体的剪切液化过程，使其更快达到破坏状态（F点）。

表 2 有效路径图中符号及缩写的意义

Table 2 The meaning of symbols and abbreviations in the effective stress path

符号或缩写	意义
$\boldsymbol{\sigma_0}$	初始法向应力
$\boldsymbol{\tau_0}$	初始剪切应力
$\boldsymbol{\sigma_{SS}}$	稳定状态下的法向应力
$\boldsymbol{\tau_{SS}}$	稳定状态下的剪切应力
$\boldsymbol{c_p}$	稳定状态下的黏聚力
$\boldsymbol{I（\sigma_0，\tau_0）}$	初始状态点，表示土体在初始条件下的应力状态
$\boldsymbol{SS}$	稳定状态点，表示土体在长时间剪切后达到的稳定状态
$\boldsymbol{F}$	破坏点，表示土体在剪切过程中达到的破坏状态
$\boldsymbol{FLP}$	破坏线（红色），表示极限破坏点的应力路径
$\boldsymbol{FLM}$	稳定线（蓝色），表示稳定状态下的应力路径
$\boldsymbol{\varphi_{\alpha（ss）}}$	稳定摩擦角线（绿色），表示稳定状态下的摩擦角
$\boldsymbol{\varphi_p}$	破坏摩擦角（红色），表示破坏状态下的摩擦角
$\boldsymbol{\varphi_m}$	稳定摩擦角（蓝色），表示稳定状态下的摩擦角

3.3 模型建立

基于对易贡滑坡滑带土体试样高精度环剪试验结果（Hu et al., 2015，其试验样品天然含水量为 5.4%，并在固结饱和状态下进行；Yu et al., 2021；Zhang et al., 2024），结合滑坡体的遥感影像及数字高程模型（Digital Elevation Model，以下简称 DEM），建立集成滑坡模拟模型，模拟中所使用的参数汇总为表 3。孔隙水压力条件采用孔压系数 Ru 来表征，其值 Ru=0.25 由前文极限平衡法静力学反演确定。

表 3 LS-RAPID 模型中使用的参数

Table 3 Parameters used in the LS-RAPID model

参数	取值	来源
侧压比	0.4	文献
滑坡体内摩擦系数	0.35	文献
运动过程中的摩擦系数	0.732	试验
稳态剪切阻力	56kPa	试验
孔隙压力产生率	0.2	文献
峰值摩擦系数	0.65	文献
峰值粘聚力	100kPa	文献
剪切位移/强度折减开始时	10.5mm	试验
剪切位移/稳态开始时	5000mm	试验
岩土体的总单位重量	18.45kN/m^3	试验

为定量评估铲刮效应导致的滑体体积增大，在札木弄沟谷内设置了厚度为 0.1~0.5m 的

预设松散堆积层。该堆积层在滑坡发生前保持稳定，滑坡发生后将由源区推动原有堆积物共同滑移。

3.4 模拟结果及分析

图 6 为易贡大滑坡在集成滑坡模拟模型模拟中的滑移堆积结果，分析可知，滑坡由源区中部以及下部开始出现局部破坏，中部破坏更为严重，接着源区土体逐渐失稳，破碎带由初始破坏区向周围延伸，导致滑坡体分离并向下移动。滑体沿 V 型深谷高速移动，并铲刮沟谷内预设的松散堆积物，最终堆积在较为平坦的易贡藏布，形成天然坝体。

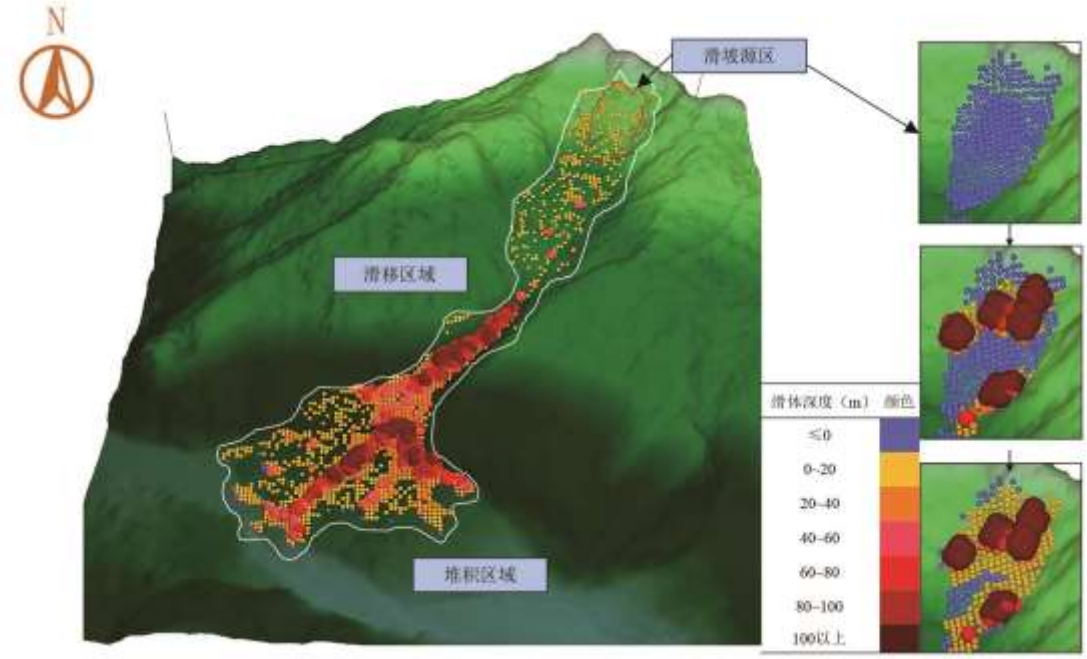

图 6 集成滑坡模拟模型模拟结果图

Fig. 6 The simulation results of the integrated landslide simulation model

在该模型中，滑坡大规模变形在 3min 内基本完成，但此时坡体并未达到稳定状态，仍有滑移持续发生，天然坝体的体积随时间逐渐增大。

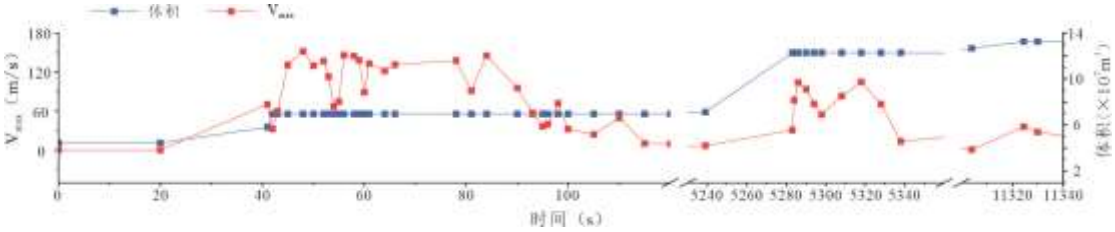

图 7 滑坡体积及最大速度随时间变化曲线图

Fig. 7 Landslide volume and maximum velocity over time

a．对速度进行分析

模拟结果显示（图 7），滑坡体最大移动速度达到 152.1m/s。这一极高的速度表明滑坡在短时间内释放了巨大的动能，足以驱动大量岩土体高速运动。

在滑坡发生后的 20~90s 内，最大速度曲线呈现出显著的波动特征。这一阶段的剧烈波动可能与滑坡体初始阶段的快速响应密切相关，同时受到重力、剪切力等外部作用力的强烈影响。90s 后，速度曲线趋于平稳，表明滑坡体逐渐进入相对稳定运动状态。在 5280s 至 5340s 的时间段内，速度曲线出现小幅度波动，推测由滑坡体与沟谷底部或障碍物相互作用所致。

图 8（a）对比了本文模拟结果（红色实线）与 Zhou 等（2020）（黄色）、Delaney 和 Evans

（2015）（绿色）研究得出的滑坡前沿速度随水平距离的变化曲线，三条曲线在总体趋势、初始速度和最终速度方面具有相似性：三条曲线均显示滑坡前沿速度随着水平距离的增加而逐渐减小，这表明在滑坡过程中，随着滑坡体向前推进，其速度会逐渐减慢。此外，所有曲线在起始点时的速度都相对较高，这可能是因为滑坡在初始阶段受到的阻力较小，能够以较高的速度移动。在水平距离接近 10km 时，三条曲线的速度都接近于 0，表明滑坡前沿最终停止。

尽管三条曲线在总体趋势上相似，但在速度变化的具体形态上存在显著差异。本文中模拟得出红色曲线的速度变化幅度最大，且在多个位置出现了速度的峰值。而 Zhou 等（2020）和 Delaney 和 Evans（2015）的速度变化相对较小，曲线较为平滑，没有明显的峰值。在速度下降速率方面，Zhou 等（2020）以及本文的模拟结果速度下降速率相对较快，而 Delaney 和 Evans（2015）的速度下降速率较慢。

从数值上看，本文得出的红色曲线（实线）峰值 152.1m/s，Delaney 和 Evans（2015）的峰值约为 139.4m/s，误差相对较大，约为 8.3%；Zhou 等（2020）的峰值约为 148.3m/s，相对于本文结果的峰值误差较小，约为 2.5%，与本文峰值接近。但 Delaney 和 Evans（2015）的峰值位置与本文结果相近，而 Zhou 等（2020）的峰值位置对应本文曲线的速度仅为 91.3m/s，存在较大位置偏差。

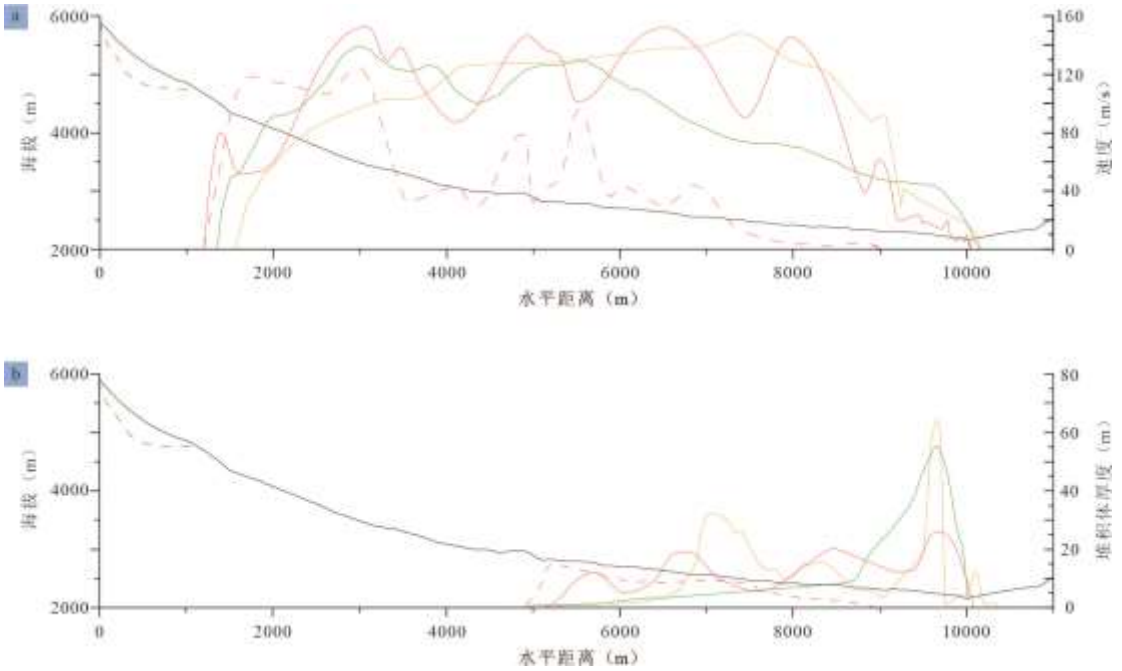

图 8 结果对比图（黄色=Zhou 等（2020），绿色=Delaney 和 Evans（2015），红色实线=本文（实线=考虑了剪切液化与铲刮效应，虚线=未考虑剪切液化与铲刮效应）；Delaney 和 Evans 展示的地形剖面图以黑色表示，估计的源区用虚线棕色标出）：（a）滑坡前沿速度剖面；（b）滑坡堆积体厚度剖面

Fig. 8 Results comparison (yellow = Zhou et al. (2020); green = Delaney and Evans (2015); red = this study (solid line = incorporating shear liquefaction and scraping effects; dashed line = not incorporating shear liquefaction and scraping effects); topographic profile from Delaney and Evans shown in black, and estimated source region indicated by dashed brown line: (a) Profile of landslide front velocity; (b) Profile of landslide deposit thickness.

b．对体积进行分析

多项研究对易贡滑坡堆积体的体积进行了估算，不同研究方法和数据源导致结果的差异较大。Wang（2008）通过遥感解译和 DEM 数据分析，得出体积约为 $9.11\times10^{7}m^{3}$；殷跃平（2000）通过野外调查，估算体积在 2.80×10^{8} 至 $3.00\times10^{8}m^{3}$ 之间；Shang 等（2003）和 Zhuang 等（2020）的研究结果为 $3.00\times10^{8}m^{3}$；任金卫等（2001）利用 GPS 实地测量和遥

感解译，得出体积约为 $3.80\times10^8m^3$；Evans 和 Delaney（2011）通过遥感解译和 DEM 数据分析，估算体积为 $1.05\times10^8m^3$；Delaney 和 Evans（2015）结合遥感解译、DEM 数据分析和 GPS 野外测绘，得出体积为 $1.15\times10^8m^3$；Ekström 和 Stark（2013）通过质量密度分析，估算体积为 $1.67\times10^8m^3$；Liu 和 He（2018）利用数字地形数据分析，得出体积为 $1.29\times10^8m^3$。

综上所述，文献中对易贡滑坡堆积体体积的估算范围为 9.11×10^7 至 $3.80\times10^8m^3$。本文使用 LS-RAPID 进行数值模拟，计算体积为 $1.3246\times10^8m^3$，在估算范围内，具有一定的合理性。

滑坡体在沟谷区域的滑动体积变化最为显著，且移动速度最快。沟谷地形为滑坡体提供了低阻力的运动路径，使得滑坡体能够在短时间内获得较大的动能，并在沟谷内快速滑动。这种地形条件不仅加速了滑坡体的运动，还可能进一步加剧了滑坡体对沟谷两侧及底部堆积物的铲刮作用，从而导致滑坡体积的快速增大。

根据图 8（b）的分析结果，三条曲线一致地揭示了滑坡堆积体厚度随水平距离增加而呈现先增后减的趋势。这一变化趋势反映了滑坡体在向前推进过程中能量逐渐耗散，进而导致堆积体厚度逐步减小的现象。值得注意的是，三条曲线均从约 5km 处开始，并在接近 10km 水平距离时值趋近于 0，这表明滑坡堆积体主要集中在 5 至 10km 的水平距离范围内。此外，三条曲线均在约 9.6km 的水平距离处达到最大峰值，指示该位置为堆积体厚度的极大值点。

尽管三条曲线在总体趋势上具有一致性，但在厚度变化的具体形态上表现出明显差异。Zhou 等（2020）的模拟结果显示大部分区域的堆积体厚度相对较高，并呈现两个峰值，特别是在接近 9.6km 水平距离时达到显著的最大峰值，其值超过了其他两条曲线。Delaney 和 Evans（2015）的曲线则相对平滑，大部分区域的厚度较低，仅在接近 9.6km 水平距离时出现一个峰值，表明碎屑流在 9 至 10km 处集中堆积，其值略小于 Zhou 等（2020）的结果。相比之下，本文的模拟结果显示出较多的波动，共出现三个峰值，但各峰值的幅度均不大，表明其在坡面上的堆积厚度较为均匀。

这些差异可能源于模型假设、计算方法和地形影响的不同。不同的模拟采用不同的滑坡模型、摩擦系数、物理性质假设以及计算算法，这些差异均可能显著影响模拟结果。此外，对地形影响的处理方式也可能在不同模型中有所区别，进而影响滑坡速度及堆积体厚度的预测。这些因素共同导致了结果曲线的差异。

c．剥离剪切液化与铲刮效应对比

对比图 8（a）和 8（b）中红色实线（考虑剪切液化与铲刮效应）与红色虚线（未考虑剪切液化与铲刮效应）的结果，清晰揭示了剪切液化和铲刮效应对高速远程滑坡动力学的显著影响。

在模拟滑坡过程中，未考虑剪切液化与铲刮效应的结果显示，滑坡峰值速度为 115.2m/s，滑坡体积为 $1.0327\times10^8m^3$。其堆积厚度峰值出现较早，随后逐渐下降，且峰值较低。相比之下，考虑了剪切液化与铲刮效应的模拟结果峰值速度提升至 152.1m/s，增速达 32.1%。同时，滑坡体积显著增大至 $1.3246\times10^8m^3$，体积增幅为 28.3%，这直接体现了铲刮效应导致的物质增量。

进一步分析表明，剪切液化和铲刮效应在滑坡过程中起到了关键的加速和增程作用。它们显著降低了滑坡体内部的摩擦阻力及与地面的接触阻力，大幅提高了滑坡体的流动性。这种增强的流动性不仅使得峰值速度显著提高，更导致滑坡体能够在更远的距离上分散沉积。未考虑这些效应的滑坡水平传播距离较短，约 9km，其堆积厚度在此处降至 0；而考虑了这些效应的滑坡传播距离延长至约 10km，传播距离增加了约 11.1%。此外，考虑效应的结果其堆积厚度峰值位置更靠后，且局部堆积厚度相对降低，也是流动性增强、物质更分散沉积的有力证明。

4 滑坡机理分析

易贡滑坡的成因复杂，涉及气象、地质等多个因素，而冰川融水与降雨的协同作用、剪切液化现象以及铲刮效应对滑坡的全物理力学演化过程至关重要（如图 9）。

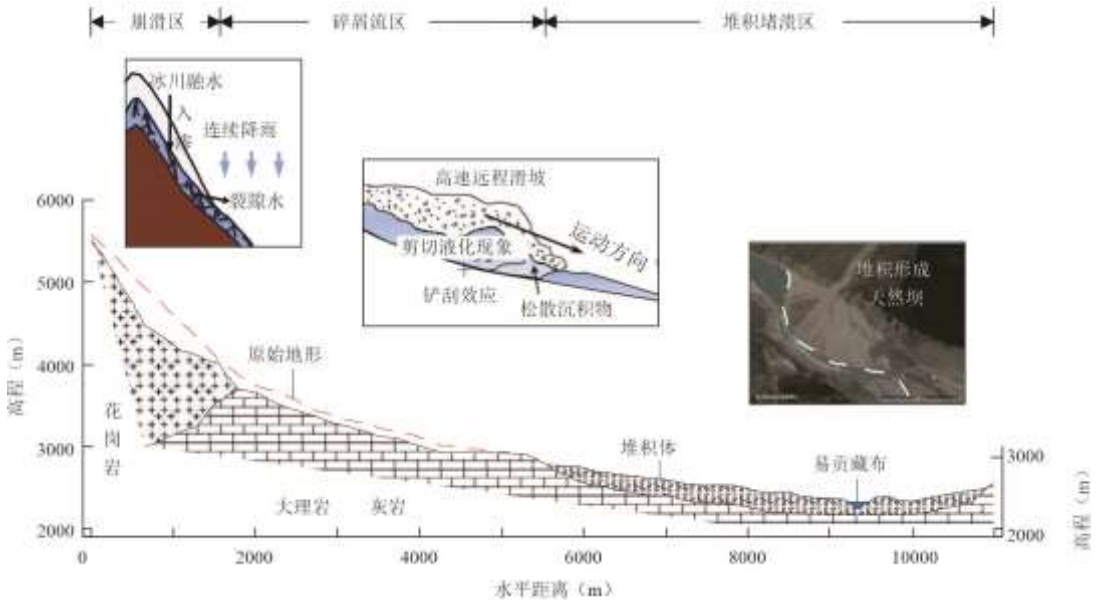

图 9 易贡滑坡 A-A'剖面机理图（Zhou et al., 2016；Dai et al., 2021；万佳威等，2021）

Fig. 9 Mechanism diagram of the A-A' profile of the Yigong landslide (Zhou et al., 2016; Dai et al., 2021；万佳威等，2021)

4.1 崩滑区

根据长时序光学遥感影像分析，易贡滑坡灾变发生之前沟头危岩发育，沟内堆积了大量碎屑物质，且滑坡源区在灾害发生前几个月便已有部分冰层与岩体崩落，处于不稳定状态（王哲等，2021）。

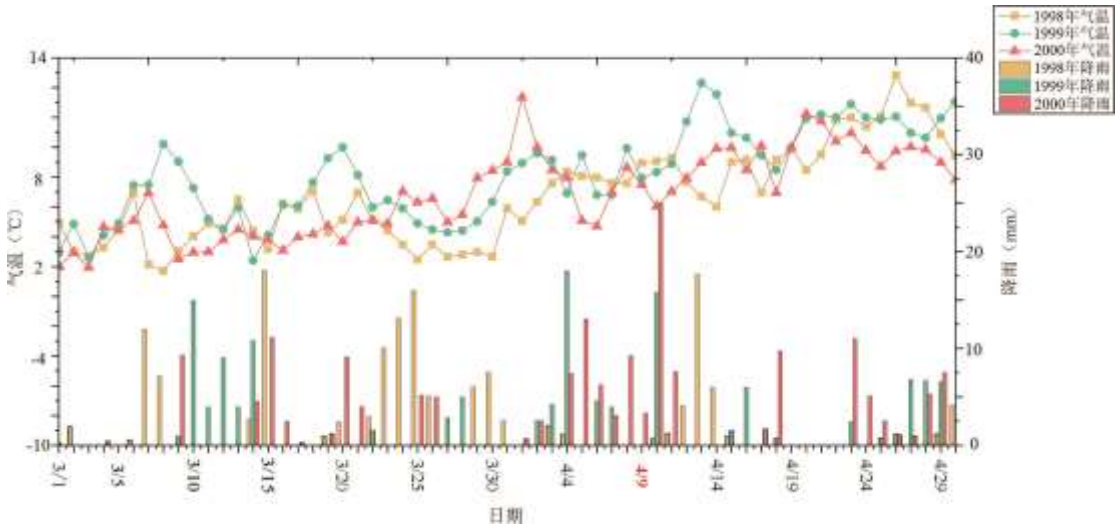

图 10 1998 年至 2000 年易贡 3、4 月份温度与降雨情况（Zhou et al., 2016；Guo et al., 2023）

Fig. 10 Temperature and rainfall conditions in Yigong during March and April from 1998 to 2000 (Zhou et al., 2016; Guo et al., 2023)

易贡气象站 1965 年至 1972 年的数据显示，该地区的年平均降雨量为 9605mm，雨季持续约 150 天。其中，5 月至 9 月的降雨量占全年总降雨量的 78%，11 月至次年 2 月为干季，

4 月和夏季为主要降雨峰值。再根据波密气象站 1967 年至 1998 年的数据，最大 24 小时降雨量为 111.7mm（1998 年 10 月 20 日）。自 1995 年开始，易贡地区连续几年降雨量均偏大。2000 年 4 月 1 日至 9 日，该地区持续降雨，累计降雨量超过 50mm，整个 4 月份的降雨量约为 100mm，较东南西藏同期平均值增加了 50~90%，因此推断堆积体的孔隙水压较往年升高（崔鹏等，2014）。

此外，易贡滑坡发生地区内多雪山冰川，且地形相对封闭，冰雪融水大多流入易贡藏布。数据显示从 2000 年 3 月 20 日起，该地区气温逐渐升高（图 10），3~4 月份的平均气温接近年平均气温，加剧了冰雪融化（吕杰堂等，2003）。

连续降雨与冰山融水的共同作用导致土体含水量上升，粘聚力和内摩擦角降低，同时使得地下水位上升，增加了土体内部的水压力，降低了土体的稳定性。

4.2 碎屑流区

在数值模拟中，滑坡经过沟谷后体积增大，铲刮效应显著，即滑体在加速过程中，巨大的冲击动能推动下部原有堆积体，并铲刮两侧山体，导致已有堆积体失稳灾变，滑体体积不断放大。

首先，从地质条件来看，易贡地区位于青藏高原东南缘，地形复杂，山高谷深，为滑坡提供了良好的地形条件，附近的岩层主要由砂岩、页岩和片麻岩组成，风化严重，土层较厚，岩体裂隙发育，为滑坡的发生及铲刮效应提供了物源基础。

其次，降雨与冰川融水使裂隙中的水压力增加，札木弄沟裂隙扩展，岩体破碎，这些破碎的岩土体沿着裂隙面失稳下滑，并推动了下部地表大量的松散物质产生滑移。同时，降雨与冰川融水导致滑体内含水率增加，滑面摩擦系数较低；札木弄沟上部较陡，将滑体巨大的重力势能转化为动能。

再者，由于剪切液化现象，使其具有较大的加速度，形成铲刮效应，最终导致了大规模滑坡的发生，最大铲刮深度可超 60m（高杨等，2020）。铲刮效应增大了滑动体积，同时促进了剪切液化现象的产生，二者相互作用，加速了滑坡的运移过程。

4.3 堆积堵溃区

滑坡体从山坡上迅速滑下，以高速滑坡碎屑流的形式在札木弄沟内加速滑移，冲出沟谷后延伸至易贡藏布流域的河谷，最终在河谷中堆积，形成了一个喇叭状的天然坝体。该坝体完全阻断了易贡藏布河的水流，导致河道水位急剧上升，形成了一个巨大的堰塞湖。天然坝体的形成主要由以下几方面的因素共同作用：

a. 滑坡体积巨大，其形成的堆积体可造成河道的堵塞；

b. 滑坡体在高速运动过程中，通过铲刮效应不断冲击两侧的堆积物，增加了滑坡体的体积和密度；

c. 滑坡体在高速运动过程中，与河水和冰川融水混合，增加了滑坡碎屑流的流动性，使其更易在河谷中堆积成坝。

5 结论

通过对易贡滑坡的地质背景、变形特征及其成因机制进行详细分析，并利用极限平衡法和集成滑坡模拟模型进行静力学和动力学模拟，本文得出以下主要结论：

（1）参照现场调查数据、已有文献及室内环剪试验数据，通过静力学极限平衡法标定了易贡滑坡的孔压系数，标定后的参数能够更准确地反映滑坡体内的水压力状况，可以实现集成滑坡模拟模型的更新和优化。

（2）2000 年易贡滑坡的发生与该地区持续的降雨和冰川融水密切相关，水动力条件的改变显著增加了滑坡体内的孔隙水压力，导致土体抗剪强度降低，从而诱发滑坡失稳。

（3）剪切液化现象推动了滑体滑动速度加快，铲刮效应诱发两侧堆积物的灾变失稳，

形成了更大规模的滑坡体，增强了滑坡的破坏力。

（4）数值模拟反演了堆积体过程及滑坡的移动速度，与前人模拟结果较为吻合，验证了剪切液化模型的有效性和可靠性，为高位远程滑坡的模拟和分析提供了重要参考。

References

Cui,P.,Chen,R.,Xiang,L.Z.,et al.,2014. Risk Analysis of Mountain Hazards in Tibetan Plateau Under Global Warming. *Climate Change Research*,10(2):103-109 (in Chinese with English abstract).

Cai, Z., Liu, E., Chen, N., et al., 2022. Numerical analysis of the initiation and sliding process of the Yigong landslide using a continuous‐discontinuous method. *Environ. Earth Sci.*, 81(5), 150. https://doi.org/10.1007/s12665-022-10279-y

Delaney,K.B.,Evans,S.G.,2015.The 2000 Yigong Landslide (Tibetan Plateau), Rockslide-Dammed Lake and Outburst Flood: Review, Remote Sensing Analysis, and Process Modelling.*Geomorphology*,246:377-393. https://doi. org/10.1016/j.geomorph.2015.06.020

Dang,K.,Sassa,K.,Konagai,K.,et al.,2019.Recent Rainfall-Induced Rapid and Long-Traveling Landslide on 17 May 2016 in Aranayaka, Kagelle District, Sri Lanka.*Landslides*,16(1):155-164. https://doi. org/10.1007/s10346-018-1089-7

Dai,Z.L.,Wang,F.W.,Cheng,Q.G.,et al.,2019.A Giant Historical Landslide on the Eastern Margin of the Tibetan Plateau.Bulletin of Engineering Geology and the Environment,78:2055-2068. https://doi. org/10.1007/s10064-017-1226-x

Dai,Z.L.,Xu,K.,Wang,F.W.,et al.,2021.Numerical Investigation on the Kinetic Characteristics of the Yigong Debris Flow in Tibet, China.*Water*,13(8):1076-1076. https://doi. org/10.3390/w13081076

Evans,S.G.,Delaney.K.B.,2011.Characterization of the 2000 Yigong Zangbo River (Tibet) Landslide Dam and Impoundment by Remote Sensing, Natural and Artificial Rockslide Dams.*Geomorphology*,133:543-559. https://doi. org/10.1007/978-3-642-04764-0_22

Ekstrom,G.,Stark,C.P.,2013.Simple Scaling of Catastrophic Landslide Dynamics. *Science*, 339(6126):1416-1419. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_22

Gao, H., Gao, Y., Li, B., et al., 2023. The dynamic simulation and potential hazards analysis of the Yigong landslide in Tibet, China. *Remote Sens.*, 15(5), 1322. https://doi.org/10.3390/rs15051322

Gao,Y.,Li,B.,Gao,H.Y.,et al.,2020.Progress and Issues in the Research of Impact and Scraping Effect of High-Elevation and Long-Runout Landslide. *Journal of Geomechanics*,26(4):510-519 (in Chinese with English abstract).

Guo,C.B.,Wu,R.A.,Zhong,N.,et al.,2024.Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12): 4635-4658 (in Chinese with English abstract).

Guo,C.B.,Yuan,H.,Wu,R.A.,et al.,2023.Research Review and Prospects of the 2000 Giant Yigong Long-Runout Landslide: Volume, Formation Mechanism and Recurrence Period, Tibetan Plateau, China. *Frontiers in Earth Science*,10: 1017611. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1017611

Hu,M.J.,Pan,H.L.,Zhu,C.Q.,et al.,2015.High-Speed Ring Shear Tests to Study the Motion and Acceleration Processes of the Yingong Landslide.*Journal of Mountain Science*,12(6):1534-1541. https://doi.org/10.1007/s11629-014-3059-4

Hu,M.J.,Wang,F.W.,Cheng,J.G.,2009.Formation of Tremendous Yigong Landslide Based on High-Speed Shear Tests.*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,31(10):1602-1606 (in Chinese with English abstract).

Ho, C. Y., Zhang, Z., Tan, Y. J., 2025. Analysing dynamics of the 2000 Yigong landslide in the Tibetan plateau using seismic observations. *Landslides*, 1-13. https://doi.org/10.1007/s10346-025-025-8

Liu,W.,He,S.M.,2018.Dynamic Simulation of a Mountain Disaster Chain: Landslides, Barrier Lakes, and Outburst Floods.*Natural Hazards*,90(5):1-19. https://doi.org/10.1007/s11069-017-3073-2

Li,J.P.,Jiang,S.H.,Huang,F.M.,et al.,2024.Investigation of Large Deformation Failure Characteristics of Slopes Under Rainfalls Considering Spatial Variability of Hydraulic Conductivity.*Journal of Basic Science and Engineering*,32(01):72-84 (in Chinese with English abstract).

Lv,J.T.,Wang,Z.H.,Zhou,C.H.,2003.Discussion on the Occurrence of Yigong Landslide in Tibet.*Earth Science*,28(1):107-110 (in Chinese with English abstract).

Niu,B.,Feng,C.,Cong,J.Y.,et al.,2023.Three-Dimensional High-Speed Remote Landslide Disaster Area Analysis Based on CDEM Particle Flow.*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,42(S2):4018-4027 (in Chinese with English abstract).

Ren,J.W.,Shan,X.J.,Shen,J.,et al.,2001.Geological Characteristics and Kinematics of the Rock Fall-landslide in Yi'ong, Southeastern Tibet.*Geological Review*,66(6):642-647+4 (in Chinese with English abstract).

Sassa,K.,1988.Special Lecture—Geotechnical Model for the Motion of Landslides.*Landslides*,1–3(1):37–55.

Sassa,K.,Fukuoka,H.,Wang,G.H.,et al.,2004. Undrained Dynamic-Loading Ring-Shear Apparatus and Its Application to Landslide Dynamics.*Landslides*,1(1):7-19. https://doi.org/10.1007/s10346-003-0004-y

Sassa,K.,He,B.,Miyagi,T.,et al.,2012.A Hypothesis of the Senoumi Submarine Megaslide in Suruga Bay in Japan-Based on the Undrained Dynamic-Loading Ring Shear Tests and Computer Simulation. *Landslides*,9(4):439-455. https://doi.org/10.1007/s10346-012-0356-2

Setiawan,H.,Sassa,K.,Dang,K.,et al.,2018.Txt-tool 3.081-1.6: Manual for the Undrained Dynamic-Loading Ring-Shear Apparatus. In: Sassa K, Tiwari B, Liu K-F, McSaveney M, Strom A and Setiawan H (eds) Landslide Dynamics: Isdr-Icl Landslide Interactive Teaching Tools: Volume 2: Testing, Risk Management and Country Practices.Springer International Publishing,Cham,321-350.

Shang,Y.J.,Yang,Z.F.,Li,L.H.,et al.,2003.A Super-Large Landslide in Tibet in 2000: Background, Occurrence, Disaster, and Origin.*Geomorphology*,54:225-243. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00358-6

Tan,Q.W.,Sassa,K.,Dang,K.,et al.,2020.Estimation of the Past and Future Landslide Hazards in the Neighboring Slopes of the 2016 Aranayake Landslide, Sri Lanka.*Landslides*,17(7):1727-1738. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01419-1

Wang,Z.H.,2008.A Thunder at the Beginning of the 21st Century—The Giant Yigong Landslide .The Tenth International Symposium on Landslides and Engineered Slopes,1068-1075.

Wang,L.,Chen,Z.Y.,Wang,N.X.,et al.,2016.Modeling Lateral Enlargement in Dam Breaches Using Slope Stability Analysis Based on Circular Slip Mode.*Engineering Geology*,209:70-81. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.027

Wu,Y.M.,Yang,Z.H.,2024.A Depth-Averaged Sph-Fv Landslide Dynamic Model for Evaluating Hazard Zones.*Computers and Geotechnics*,169. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106210

Wan,J.W.,Chu,H.L.,Li,B.,et al.,2021.Characteristics, Types, Main Causes and Development of High-Position Geohazard Chains along the Jiali Fault Zone, Tibet, China.*The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,32(3):51-60 (in Chinese with English abstract).

Wang,Z.,Zhao,,C.Y.,Liu,X.J.,et al.,2021.Evolution Analysis and Deformation Monitoring of Yigong Landslide in Tibet with Optical Remote Sensing and InSAR.*Geomatics and Information Science of Wuhan University*,46(10):1569-1578 (in Chinese with English abstract).

Yin,Y.P.,2000.Study on the Characteristics and Disaster Mitigation of the Yigong Mega Landslide in Bomi, Tibet.*Hydrogeology & Engineering Geology*,44(4):8-11 (in Chinese with English abstract).

Yu,S.,Chen,Z.Y.,Chen,S.J.,et al.,2021.A New Measurement Method of the Erodibility of Soil.*Geotechnical Testing Journal*,44(1):3-14. https://doi.org/10.1520/GTJ20180005

Yuan,H.,Guo,C.B.,Wu,R.A.,et al.,2023. Research Progress and Prospects of the Giant Yigong Long Run-out Landslide, Tibetan Plateau, China.*Geological Bulletin of China*,42(10):1757-1773 (in Chinese with English abstract).

Yang,C.,Zhao,J.J.,Wang,Shou,Y.,et al.,2024. MatDEM-Based Investigation of Shovel-Scraping Effect on Yigong Landslide.*Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*,51(03):477-488 (in Chinese with English abstract).

Zhou,J.W.,Cui,P.,Hao,M.H,2016.Comprehensive Analyses of the Initiation and Entrainment Processes of the 2000 Yigong Catastrophic Landslide in Tibet, China.*Landslides*,13(1):39-54. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0553-2

Zou,C.B.,Jansen,J.D.,Carling,P.A.,et al.,2023.Triggers for Multiple Glacier Detachments from a Low-Angle Valley Glacier in the Amney Machen Range, Eastern Tibetan Plateau.*Geomorphology*,440: 108867. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108867

Zhong,Y.,Li,Y.Y.,Yin,K.L.,et al.,2023.Failure Mechanism of Thick Colluvium Landslide Triggered by Heavy Rainfall Based on Model Test.*Earth Science*, 48(10): 3912-3924 (in Chinese with English abstract).

Zhou,G.G.D.,Roque,P.J.C.,Xie,Y.,et al.,2020.Numerical Study on the Evolution Process of a Geohazards Chain Resulting from the Yigong Landslide.*Landslides*,17,2563–2576.https://doi.org/10.1007/s10346-020-01448-w

Zhuang,Y.,Yin,Y.P.,Xing,A.G.,et al.,2020.Combined Numerical Investigation of the Yigong Rock Slide-Debris Avalanche and Subsequent Dam-Break Flood Propagation in Tibet, China.*Landslides*,17(9):2217-2229. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01449-9

中文参考文献

崔鹏，陈容，向灵芝，等，2014.气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析.气候变化研究进展，10(2):103-109.

高杨，李滨，高浩源，等，2020.高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题.地质力学学报，26(4):510-519.

郭长宝，吴瑞安，钟宁，等，2024.青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制.地球科学, 49(12): 4635-4658.

胡明鉴，汪发武，程谦恭，2009.基于高速环剪试验易贡巨型滑坡形成原因试验探索.岩土工程学报，31(10):1602-1606.

李剑平，蒋水华，黄发明，等，2024.考虑渗透系数空间变异性的降雨作用下边坡大变形破坏特征.应用基础与工程科学学报，32(01):72-84.

吕杰堂，王治华，周成虎，2003.西藏易贡大滑坡成因探讨.地球科学（中国地质大学学报），28(1):107-110.

牛犇，冯春，丛俊余，等，2023.基于CDEM颗粒流的三维高速远程滑坡成灾范围分析.岩石力学与工程学报，42(S2):4018-4027.

任金卫，单新建，沈军，等，2001.西藏易贡崩塌-滑坡-泥石流的地质地貌与运动学特征.地质论评，66(6):642-647+4.

万佳威，褚宏亮，李滨，等，2021.西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析.中国地质灾害与防治学报，32(3):51-60.

王哲，赵超英，刘晓杰，等，2021.西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与InSAR形变监测.武汉大学学报(信息科学版)，46(10):1569-1578.

殷跃平，2000.西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究.水文地质工程地质，44(4):8-11.

袁浩，郭长宝，吴瑞安，等，2023.西藏易贡高位远程滑坡研究进展与展望.地质通报，42(10):1757-1773.

杨畅，赵建军，王寿宇，等，2024.基于MatDEM的易贡滑坡铲刮效应研究.成都理工大学学报(自然科学版)，51(03):477-488.

钟源，李远耀，殷坤龙，等，2023.基于物理模型试验的厚层堆积层滑坡强降雨触发机制.地球科学, 48(10): 3912-3924.