



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：云南头寨高位远程崩滑-碎屑流多相态过程数值模拟

作者：胡雨昂，高杨，张晗，刘松涛

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026071

投稿时间：2026-06-04

录用时间：2026-09-18

预出版时间：2026-10-13

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

云南头寨高位远程崩滑-碎屑流多相态过程数值模拟

胡雨昂¹, 高杨², 张晗³, 刘松涛²

HU Yuang¹, GAO Yang², ZHANG Han³, LIU Songtao²

1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450000;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054

1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou, 450000, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081, China;

3. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, 710054, China

Numerical Simulation of the Multiphase Process of High-Elevation Long-Runout Landslide Debris Flow in Touzhai, Yunnan

Abstract: [Objective] High-elevation long-runout rock avalanches may undergo progressive damage, fragmentation, particle dilation, and a transition from block-dominated motion to debris-flow-like movement. Conventional equivalent-fluid models efficiently reproduce runout but do not explicitly resolve damage-induced disintegration, whereas fully discrete approaches are computationally expensive at field scale. This study aims to clarify how damage evolution and particle-state transition affect the post-failure dynamics of the 1991 Touzhai landslide in Yunnan, China. **[Methods]** Three numerical schemes were established under the same three-dimensional terrain and initial source geometry: a Dynamic Analysis of Landslides in Three Dimensions (DAN3D) equivalent-fluid model, a Landslide Post-Failure 3D (LPF3D) multiphase-state model without damage evolution and structural disintegration, and an LPF3D full-state model coupling the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) damage model, explicit structural discontinuities, and particle-state transition. Their motion duration, velocity evolution, runout distance, run-up pattern, deposition characteristics, damage variable, and particle volume fraction were compared to evaluate the roles of structural degradation and state-dependent particle interactions. **[Results]** Four principal results were obtained. First, the LPF3D full-state model reproduced the main observed kinematic characteristics of the Touzhai event. The simulated motion lasted approximately 120 s and evolved from initial failure and rapid acceleration through impact-induced disintegration and channelized transport to deceleration and deposition. The maximum horizontal runout was approximately 3650 m, the vertical drop was nearly 960 m, and the peak velocity exceeded 23 m/s. The simulated mass also reproduced the observed run-up pattern on the opposite valley slope, where field investigations reported a maximum run-up of approximately 55 m. The final deposit

基金项目: 云南省科技计划项目 (202403AA080001-4); 国家自然科学基金 (42507277)

This research was financially supported by the Yunnan Provincial Key Research and Development Program (Grant No. 202403AA080001-4) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42507277).

第一作者: 胡雨昂 (2001—), 女, 在读硕士, 从事地质灾害数值模拟与风险评估研究。Email: huyuang24@mailsucas.ac.cn

通信作者: 高杨 (1989—), 男, 博士, 研究员, 从事高位远程滑坡动力成灾机理与风险防控研究。Email: 737263992@qq.com

was thicker in the central part and thinner toward both sides, broadly consistent with the mapped distribution of the source, transit, and deposition zones. Second, the damage field and particle volume-fraction field revealed a continuous mechanical-state transition rather than a thermodynamic phase change. The damage variable increased progressively from a relatively low initial level and approached 1.0 in highly damaged zones during repeated impact and shearing, indicating substantial degradation of the original load-bearing rock structure. Concurrently, the front of the moving mass experienced stronger stretching and impact, developed a lower particle volume fraction, and entered a dilute, collision- and inertia-influenced state, whereas the rear retained a higher volume fraction and a denser block- or granular-state structure. This produced a distinct longitudinal pattern characterized by a dilute front and a dense rear. As the mass entered the gentler deposition area, velocity and shear rate decreased, particle contacts were re-established, and the main body underwent re-compaction. Third, the comparison between the two LPF3D schemes isolated the influence of damage and structural disintegration under the adopted material and boundary settings. When HJC damage evolution and structural disintegration were disabled while the basic LPF3D material and contact parameters were kept unchanged, the mass stopped after a runout of approximately 1500 m. In contrast, the full-state scheme reached approximately 3650 m. The comparison indicates that damage accumulation, block separation, particle rearrangement, and dilation reduced persistent interlocking and frictional contacts and increased the relative contribution of collision and inertia, thereby modifying resistance and energy redistribution during motion. Fourth, the DAN3D equivalent-fluid scheme reproduced the macroscopic runout through a calibrated frictional rheology, demonstrating its efficiency for estimating velocity, runout, and deposition at the slope scale. However, its state variables did not directly represent rock damage, block disintegration, or particle-state transition. The three-scheme comparison therefore shows that similar macroscopic runout can be reproduced through different model representations, but only the full-state LPF3D framework explicitly links the simulated runout to progressive structural degradation and the subsequent transition among solid-like, dense granular, dilute granular, and deposition states. **[Conclusions]** Under the parameter and boundary conditions adopted for the Touzhai case, damage accumulation and structural disintegration are important factors promoting particle rearrangement, dilation, mechanical-state transition, and long-runout movement. The simulated transition is spatially non-uniform: the strongly disturbed front becomes dilute and increasingly collision- and inertia-influenced, whereas the rear remains comparatively dense and contact-dominated. DAN3D is suitable for efficient macroscopic runout analysis, while the LPF3D full-state model provides a more physically interpretable description of the coupled evolution from jointed rock mass to blocks and granular debris. These findings are case-specific and should not be interpreted as a universal threshold or a single mechanism applicable to all high-elevation landslides. **[Significance]** By integrating damage evolution, structural discontinuities, and particle-state-dependent dynamics within one computational framework, this study provides a physically constrained approach for reconstructing high-elevation rock avalanche-to-debris-flow processes. The framework can support case-specific runout assessment and hazard analysis while clarifying the model assumptions and mechanisms underlying the predicted movement range.

Keywords: Touzhai landslide; High-elevation rock avalanche; Debris flow; Dynamic transformation; Numerical simulation; LPF3D

摘要: 高位远程崩滑-碎屑流具有高位启动、落差大、运移距离远和冲击能量高等特征,其运动介质可经历由完整或节理化岩体向块体、浓密颗粒体和稀疏碎屑流的连续转化。传统等效流体模型难以直接描述岩体损伤解体及不同颗粒状态之间的转化,离散介质方法虽能够刻画岩块破碎及颗粒间接触碰撞过程,但其计算量较大,在大尺度、高位远程滑坡全过程模拟中的计算效率受到限制。此次研究以 1991 年云南头寨滑坡为例,采用可描述损伤演化和颗粒状态转换的 LPF3D (Landslide Post-Failure 3D) 数值方法,构建 DAN3D (Dynamic Analysis of

Landslides 3D) 等效流体、LPF3D 多相态和 LPF3D 全相态耦合三种数值模拟方案,对滑坡失稳后的动力过程进行对比模拟。结果表明:(1)模型复现了滑体历时约 120 s 的极高流动性演化过程,从岩体崩滑失稳至流态化堆积的最大运动距离达 3650 m,峰值速度超过 23 m/s;(2)模拟结果表明,滑体损伤变量由较低水平持续增大并在高损伤区趋近 1.0,损伤累积与结构解体是促进滑体状态转化的重要因素,并使滑体在纵向上形成了“前缘稀疏流态、后缘浓密固态”的差异化运动结构;(3)揭示了结构解体与颗粒扩容减少颗粒间持续接触和块体间相互制约作用,进而降低等效抗剪强度与运动阻力的物理机制。上述结果表明,将损伤演化与颗粒状态转换纳入同一计算框架,可为高位远程崩滑-碎屑流动力演化机制分析及潜在灾害影响范围预测提供物理依据。

关键词: 头寨滑坡;高位崩滑;碎屑流;动力转化;数值模拟;LPF3D

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026071

0 引言

高位远程崩滑-碎屑流是高陡山区破坏性显著的一类地质灾害,具有高位启动、坠落高差大、运移距离远、影响范围广和冲击能量高等特征(殷跃平等, 2025; 高杨等, 2020, 2022; Gao et al., 2024a; 李滨等, 2025)。在全球气候变化背景下,极端气候事件及其对山区地质灾害活动的影响受到持续关注(Gao et al., 2017a)。典型事件包括 1991 年云南头寨滑坡、2017 年四川茂县新磨村滑坡和 2019 年贵州水城滑坡等,其中头寨滑坡造成 216 人死亡,滑体水平运移约 3650 m(Xing et al., 2016; Hu et al., 2020; 郑光等, 2020)。这类灾害在失稳后并非始终保持单一介质状态,而是可经历由节理化岩体向块体、浓密颗粒体和稀疏碎屑体的连续转化;伴随损伤、解体和剪切扩容,颗粒体积分数及颗粒间相互作用方式不断改变。因此,其运动范围和堆积特征不仅受地形与基底阻力控制,还与岩体结构破坏及颗粒状态转化密切相关,这使全过程动力学重建和潜在灾害运动范围预测具有较大难度(Pudasaini 和 Krautblatter, 2021)。数值模拟由此成为研究高位远程崩滑-碎屑流失稳后运动机制的重要手段(Aaron et al., 2022; Huang et al., 2023; 刘松涛等, 2025; 王黎明等, 2025)。

现有滑坡动力学数值方法主要包括连续介质方法和离散介质方法。连续介质方法基于连续介质力学,将滑体等效为服从特定流变关系的连续体,具有计算效率高、适于大尺度全过程模拟等优点,但通常难以直接刻画完整岩体损伤、块体解体及“岩体—块体—碎屑体”的状态转化(Liu et al., 2025; 高杨等, 2026)。基于深度积分方法的滑坡动态分析模型(Dynamic Analysis of Landslides in Three Dimensions, DAN3D)和快速块体运动模拟系统(Rapid Mass Movement Simulation, RAMMS)是该类方法的代表性计算工具,可用于分析滑坡速度、运移范围和堆积厚度,已广泛应用于高位远程流态化滑坡的运动模拟中(McDougall 和 Hungr, 2004; Gao et al., 2017b)。离散介质方法则以独立块体或颗粒为基本计算单元,通过接触关系求解碰撞、摩擦和分离过程,能够表征不连续变形及块体运动(Cundall 和 Strack, 1979),其局限在于依赖宏观参数向细观参数转化中的参数标定,且随着计算尺度、颗粒数量和运移距离增加,计算成本显著上升。针对连续介质方法与离散介质方法在计算效率和颗粒作用表征方面的互补性,作者团队建立了 LPF3D 数值方法。该方法在统一的无网格粒子计算框架下实现光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)、光滑离散粒子流体动力学(Smoothed Discrete Particle Hydrodynamics, SDPH)与 DEM 的转换和耦合,并以颗粒体积分数为判据,采用与浓密态、稀疏态和超稀疏态相匹配的动力学模型,描述滑体颗粒状态的动态转化(高杨等, 2023; Gao et al., 2024a, 2024b)。

本研究以 1991 年云南头寨滑坡为例,在野外调查资料和三维地形重建的基础上,设置 DAN3D 等效流体模型、LPF3D 多相态模型和 LPF3D 全相态耦合模型三种对比。通过分析运动速度、体积分数、损伤变量、堆积厚度及总体运动范围,比较不同方法对“岩体—块体—碎屑体”转化过程的表征能力,并讨论损伤解体和颗粒状

态变化对头寨滑坡远程运动的影响。高位远程崩滑-碎屑流运动过程通常具有明显的阶段性演化特征，包括滑体初始失稳、快速解体、碎屑化运动及堆积调整等阶段。本研究划分的四个阶段能够较好地重现头寨滑坡运动过程中的关键动力响应，同时反映了高位远程崩滑-碎屑流在一定条件下的典型特征，为高位远程崩滑-碎屑流失稳后动力过程的物理解释及潜在灾害运动范围预测提供可检验的数值分析思路。

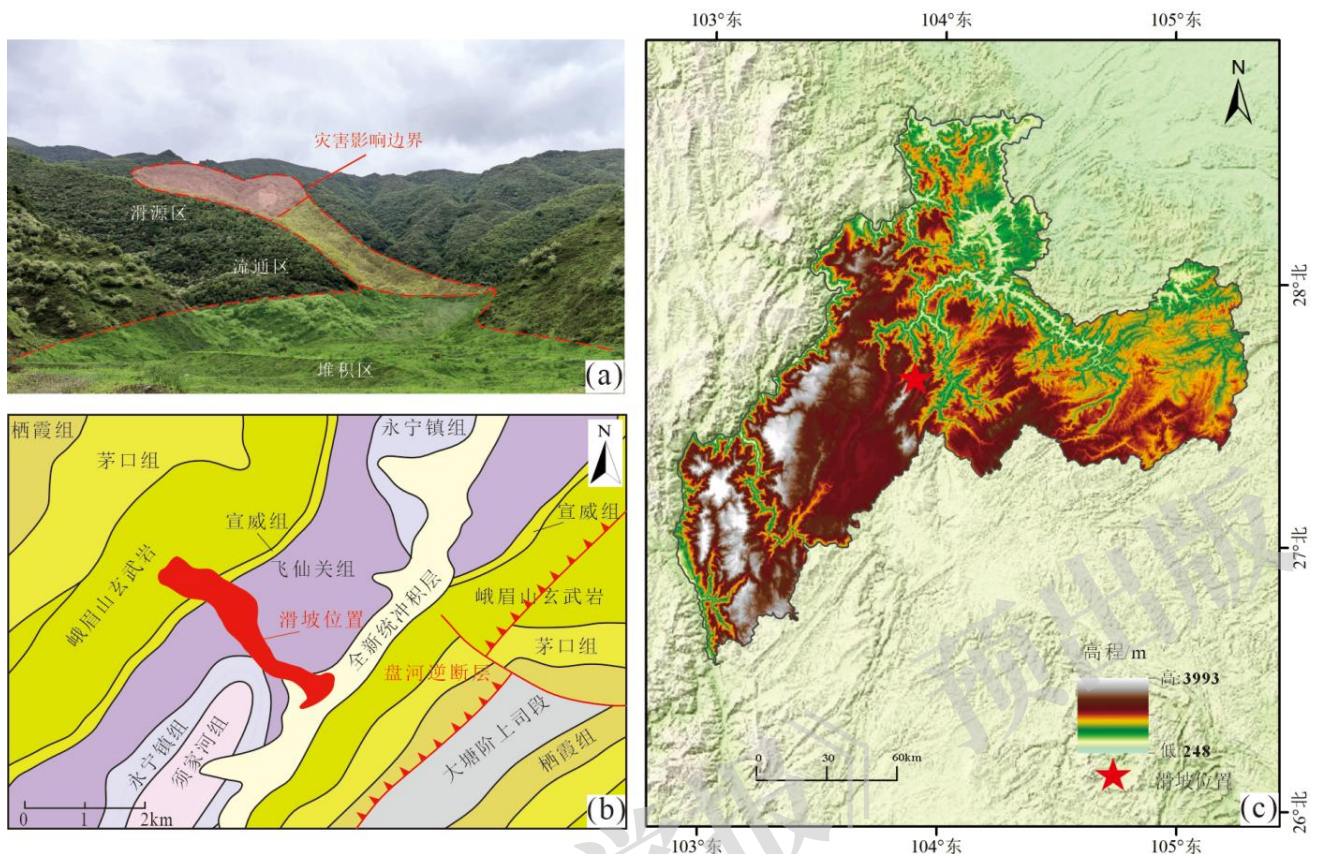
1 云南头寨崩滑-碎屑流动力成灾特征

1.1 地质环境背景

头寨滑坡位于云南省昭通市头寨沟流域，区域构造位置处于扬子地台西南缘。研究区山高谷深、地形切割强烈，主沟总体由高位滑源区向盘河河谷展布。区内最高点羊角脑山海拔约 2850 m，盘河河谷最低处海拔约 1820 m，相对高差超过 1000 m；陡崖、陡坡与狭窄沟谷相接，为滑体失稳后的坠落、碰撞和沟道化运移提供了地形条件（徐则民等，2007；Xing et al., 2016；徐则民等，2017；Wang et al., 2019）。

研究区主要构造包括盘河逆断层和头寨—辛店子向斜，滑源区位于头寨—辛店子向斜西北翼。褶皱和断裂活动形成的构造裂隙与卸荷裂隙共同切割高位斜坡岩体，使滑源区呈现较强的不连续性。现场调查识别出两组优势节理：J1 组走向 118°~136°、倾角 45°~70°，J2 组走向约 45°、倾角约 50°；这些结构面对滑体初始块度、潜在破裂边界和启动方式具有控制作用（徐则民等，2007；Gong et al., 2023）。结构面性质及其力学弱化过程对岩体稳定性和失稳演化具有重要影响（王志兵等，2016）。

滑源区主要由二叠系峨眉山玄武岩构成，岩体节理裂隙发育，局部风化较强；沟道及两侧还分布二叠系宣威组碎屑岩，盘河谷地发育第四系松散堆积物。既有调查将本次失稳主体描述为节理化玄武岩体，表明坚硬岩块与结构面组合是形成大体积块体崩滑和后续动力解体的主要物质基础（邓嘉农和赵健，1993；徐则民等，2007；Xing et al., 2016；Yang et al., 2017）。



(a) 灾害影响范围及滑源区、流通区和堆积区；(b) 头寨滑坡区域地质背景；(c) 研究区位置及区域地形背景（数据来源：NASA SRTM DEM，空间分辨率 250 m）

图 1 头寨高位远程崩滑-碎屑流研究区位置及地质背景

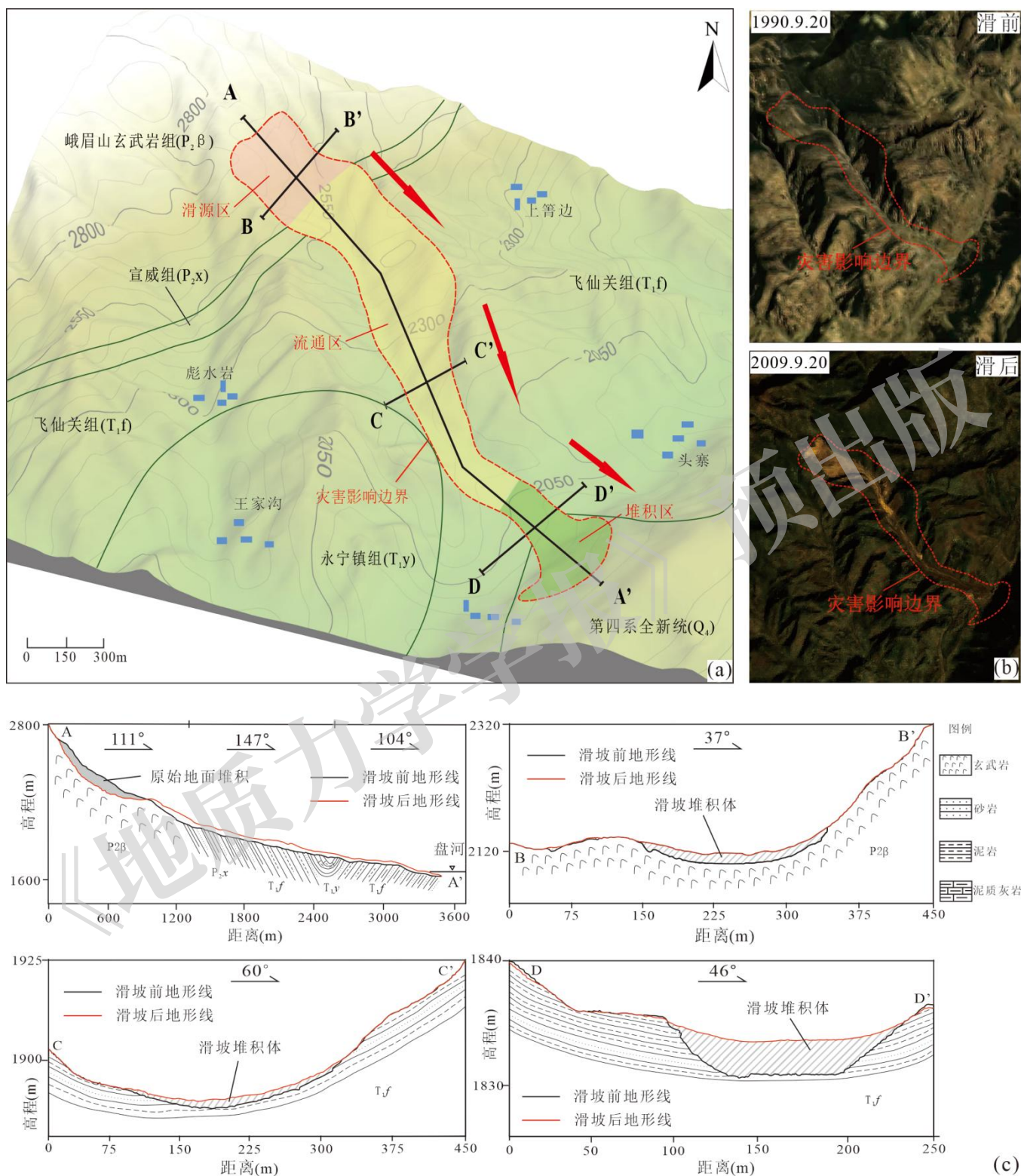
Fig. 1 Location and geological background of the Touzhai high-elevation long-runout rock avalanche-debris flow

(a) Disaster-affected area and the source, transit, and deposition zones of the Touzhai landslide; (b) Regional geological setting of the Touzhai landslide; (c) Geographic location of the study area and regional topographic setting (data source: NASA SRTM DEM, spatial resolution: 250 m)

1.2 滑坡运动与堆积特征

1991 年 9 月 23 日 18 时 10 分，头寨沟高位岩体发生失稳，灾害造成 216 人死亡。现场调查表明，源区约 $12.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的节理化玄武岩体发生破坏，并在运移过程中卷入约 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 物质，灾害涉及总体积约 $15.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ；另有研究根据不同边界将滑体规模估算为约 $18.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Xing et al., 2006, 2016)。滑体自约 2780 m 高程启动，垂直落差约 960 m，水平运移约 3650 m，运动历时约 2~3 min，并在沟道转折和对岸坡体约束下发生转向与爬升，最大爬高约 55 m (唐川, 1991; 胡厚田和杨明, 2000; 邢爱国和殷跃平, 2009; Xing et al., 2016)。既有遥感资料和现场调查表明，滑坡失稳后沿头寨沟向下游长距离运移，形成由高位滑源区、狭长运移通道至盘河谷地扇状堆积区的连续灾害影响带。

结合地形地貌、地层岩性及堆积物分布特征，头寨滑坡运动路径可划分为滑源区、流通区和堆积区。图 2 给出了滑坡工程地质平面特征及典型剖面，可见滑源区位于高陡斜坡上部，滑体沿狭窄沟谷向下游运移，进入盘河谷地后展宽并形成扇状堆积。滑前、滑后遥感影像进一步显示，滑坡发生后源区形成明显的裸露区，沿沟谷形成连续的条带状灾害影响范围。不同分区在地形条件、堆积厚度和物质结构上具有明显差异，为分析滑体由高位岩体崩滑向远程碎屑流转化的动力过程提供了现场地质依据。



(a) 滑坡范围、地质背景及剖面线位置; (b) 1990 年和 2009 年遥感影像对比; (c) 滑坡典型剖面

图 2 头寨滑坡空间分布特征及不同时期遥感影像

Fig. 2 Spatial distribution characteristics and multi-temporal remote-sensing images of the Touzhai landslide

(a) Landslide distribution, geological background, and locations of cross-section lines; (b) comparison of remote-sensing images acquired in 1990 and 2009; (c) representative cross-sections of the Touzhai landslide

综合图 2 所示的工程地质平面特征、不同时期遥感影像及典型剖面，并结合既有调查对滑坡运动路径和堆积特征的认识，可进一步认识头寨滑坡从高位岩体失稳到远程碎屑流堆积的演化过程。根据不同阶段的地形条件、物质状态及运动特征，其崩滑—碎屑流转化过程可概括为以下四个阶段：

(1) 初始崩滑与锁固段剪断。滑源区位于头寨—辛店子向斜的西北翼，在重力、构造残余应力及降雨入渗等外部因素的长期作用下，锁固段承受着持续增加的剪切应力，当其超过岩体峰值抗剪强度时，高位陡峭的玄武岩体沿节理面失稳，下部锁固段发生突发性剪切破坏，岩体启动。

(2) 垂直坠落与碰撞解体。崩塌体从陡崖坠落，撞击下部坡面，强大的冲击动能急剧耗散并在岩体内部激发出高频应力波，导致初始损伤快速累积并触发岩体的动力破裂与多尺度解体（Wang et al., 2022）。原本由节理切割形成的岩块进一步破碎成尺寸不等的碎块，极大地增加了岩体的比表面积，产生了大量细颗粒。

(3) 颗粒流化与沟道内高速流动。破碎后的岩块在陡峻的流通沟内相互碰撞、摩擦，进一步细化，呈现流体特性并在沟道内高速运动，部分极细的岩粉可能与空气混合，形成气固两相流。在流态化造成的低摩擦条件下，碎屑流保持高速运动，其巨大的动能导致滑体在运移途中遭遇山脊阻挡时发生转向与爬高。

(4) 减速堆积。进入盘河河漫滩附近的缓坡区域后，碎屑流受地形坡度降低、沟道展宽及摩擦作用影响逐渐减速，最终形成扇状展布的堆积体。根据堆积体高程、纵向坡度、物质组成及结构特征，可将搬运堆积区划分为近源堆积区、过渡堆积区和远程堆积区三个亚区（图 2）。近源堆积区位于 2120~1990 m 高程范围内，平均厚度约 25 m，堆积物主要由玄武岩碎石组成，颗粒分选较差，保留部分崩滑岩体特征；过渡堆积区位于 1990~1840 m 范围内，厚度约 10~15 m，发育多级阶地陡坎和刀口坎，堆积结构呈波状起伏，粗细颗粒沿运动方向呈带状分布，反映了碎屑流运动过程中的剪切、拉张及挤压作用；远程堆积区位于 1840~1820 m 范围内，平均厚度约 5 m，堆积物主要由玄武岩碎石和碎石土组成，含少量砂岩、页岩碎屑及孤石，微地貌表现为丘状和沟脊状起伏，呈现高速碎屑流末端扩散减速后的沉积特征。

上述分带堆积特征反映了滑体由高位岩体崩滑向高流动性碎屑流转化的动力演化，并为下文数值重建提供了现场观测约束。

2 数值模拟方法

为分析头寨高位远程崩滑-碎屑流失稳后的动力演化过程，本研究采用 LPF3D 数值平台开展三维模拟。类似无网格粒子方法已用于土水作用、流滑和碎屑流堆积模拟（Cheng et al., 2022; Sha et al., 2023; Zeng et al., 2024）。LPF3D 在统一计算框架中组合 SPH、SDPH 与 DEM 算法，并按颗粒体积分数和接触状态切换相应本构关系，可兼顾大尺度连续运移计算与局部颗粒接触描述（Gingold 和 Monaghan, 1977; Benz, 1990; Gao et al., 2024a, 2024b）。已有研究开展了复合滑坡固-液耦合模拟（张晗等, 2022），本研究则不涉及固-液两相耦合，重点讨论节理化岩体损伤解体后由固态、浓密态向稀疏颗粒态转化的力学过程。

2.1 控制方程

滑体在不同力学状态下均满足质量守恒和动量守恒方程，分别见式（1）和式（2）；当颗粒进入稀疏碰撞状态时，另由式（3）的颗粒拟温度方程描述随机脉动动能的输运与耗散。

连续方程：

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\alpha} \quad (1)$$

运动方程：

$$\frac{dv^\alpha}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} + f^\alpha \quad (2)$$

能量方程：

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2}{3} \left[\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(k_p \frac{\partial \theta}{\partial x^\beta} \right) - N_c \theta_p \right] \quad (3)$$

其中， α 和 β 为笛卡尔坐标分量指标； x^α 为空间坐标分量； ρ 为密度； v^α 为速度分量； $\sigma^{\alpha\beta}$ 为应力张量分量； f^α 为其他外力分量； θ 为颗粒拟温度； d/dt 表示全导数。 $k_p \nabla \theta_p$ 为能量耗散项， k_p 为能量耗散系数， $N_c \theta_p$ 为颗粒间碰撞产生的能量耗散项。这些控制方程的基本框架与多相流动力学机制广泛参考了广义碎屑流动力学控制方程与两相流理论模型（Pudasaini, 2020）。

2.2 动力学本构与相态转化

三种对比工况采用不同的动力学闭合关系。DAN3D 等效流体工况将滑体整体等效为深度平均连续介质；LPF3D 多相态颗粒流工况以颗粒体积分数和接触状态识别密集态、过渡态、稀疏态与超稀疏态，并匹配相应的摩擦、碰撞和惯性动力学模型；LPF3D 全相态工况在多相态框架前端进一步引入节理化岩体的强度退化、损伤累积和块体解体。本研究所称“多相态”是崩滑-碎屑流运动过程中“岩体—块体—碎屑体”中发生的物理力学状态的转换。

2.2.1 等效流体模型

DAN3D 采用深度平均质量守恒与动量守恒方程求解滑体的宏观运动，并以 Frictional 流变关系表征基底抗剪作用（Bucher et al., 2024）。该模型能够高效计算速度、运移范围和堆积厚度，但滑体在计算中始终作为等效连续介质处理，无法求解岩体内部损伤、块体分离及颗粒体积分数变化。因此，本研究将其作为宏观运移结果的对照工况。

2.2.2 多相态模型

LPF3D 多相态模型以颗粒体积分数和颗粒接触状态作为状态识别量，在式（1）—式（3）的统一守恒框架内，分别调用与密集态、稀疏态和超稀疏态相匹配的本构关系；相邻状态依据预设临界体积分数与接触判据完成识别和切换。“相态”表示颗粒集合主导作用机制由持续接触摩擦向瞬态碰撞、再向惯性运动的转变，并非热力学意义上的相变（Gao et al., 2024b）。

（1）密集态。各向同性压力 P 由粘塑性本构方程直接计算（Wang et al., 2022; Cui 和 Zhang, 2023; Sha et al., 2023; Li et al., 2023; Li et al., 2023），并结合颗粒流动中剪切速率对摩擦特性的影响进行描述（Zhou et al., 2014; Breard et al., 2024），采用平均应力定义，表示为：

$$P = -\frac{\sigma^{\gamma\gamma}}{3} = -\frac{1}{3}(\sigma^{xx} + \sigma^{yy} + \sigma^{zz}) \quad (4)$$

其中 σ^{xx} ， σ^{yy} 和 σ^{zz} 是应力张量在 x 、 y 和 z 方向上的分量。当颗粒处于准静态状态时，颗粒整体几乎不产生大变形，主要以弹性变形为主，在此阶段，根据线弹性模型计算颗粒的应力-应变关系。

$$\dot{\sigma}^{\alpha\beta} = 2G\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} + K\dot{\epsilon}^{\gamma\gamma}\delta^{\alpha\beta} \quad (5)$$

其中 $\dot{\sigma}^{\alpha\beta}$ 为增量形式的应力分量， G 为剪切模量， $G = \frac{E}{[2(1+\nu)]}$ ， K 为弹性体积模量， $K = \frac{E}{[3(1-2\nu)]}$ ， E 为弹性模量， ν 为泊松比， $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta}$ 为偏剪切应变率张量， $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} = \dot{\epsilon}^{\alpha\beta} - \frac{\dot{\epsilon}^{kk}\delta^{\alpha\beta}}{3}$ 。应变率张量 $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} = 0.5(\frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha})$ 。

$$\tau^{\alpha\beta} = \frac{\mu(I)P}{|\dot{\epsilon}|} \dot{\epsilon}^{\alpha\beta} \quad (6)$$

$\tau^{\alpha\beta}$ 为偏应力分量； $|\dot{\epsilon}|$ 是第二应变不变量； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率张量，对应于摩擦系数 $\mu(I)$ ，体现体积分数对惯性常数的关系。

$$\mu(I) = \mu_p + \frac{(\mu_2 - \mu_p)}{\left(\frac{I_0 + I}{I}\right)} \quad (7)$$

试验和数值模拟表明，在函数 $\mu(I)$ 公式中，当 I 为一个非常低的惯性常数时，有最小值 μ_p ，随着 I 增大， μ_p 逐渐增大到 μ_2 ， I_0 为常数，公式中的参数与材料的性质有关。例如，典型的取值为 $\mu_p = \tan(21^\circ)$ 、 $\mu_2 = \tan(33^\circ)$ 、 $I_0 = 0.28$ （MiDi, 2004）。

$$I = \frac{|\dot{\epsilon}|d}{\left(\frac{P}{\rho_p}\right)^{0.5}} \quad (8)$$

惯性常数表示惯性时间尺度 $(d^2\rho_p/P)^{0.5}$ 与宏观变形时间尺度 $(I/\dot{\epsilon})$ 的比值。

（2）稀疏态。在颗粒动力学理论中，滑体是指颗粒组成的宏观连续介质，对于正应力，包括碰撞和动能压力两部分（Xia et al., 2021; Wang et al., 2022; Berzi, 2024），公式为：

$$P = \rho[1 + 2(1 + e_{pp})\xi_p g_0]\theta \quad (9)$$

其中, ξ_p 为颗粒所占据的体积分数, 颗粒所占据的体积分数有限, 有效密度等于真实密度与所占据的体积分数的乘积。 g_0 为颗粒的径向恢复系数, 同颗粒体积分数相关。

$$\xi_p = \frac{\rho}{\rho_p} \quad (10)$$

其中, ρ 为颗粒相有效密度, 即 SPH 粒子密度, 遵循质量守恒方程; ρ_p 为颗粒的实际密度。

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\xi_p}{\xi_{p,\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (11)$$

式中, $\xi_{p,\max}$ 为颗粒材料在可压缩条件下所能达到的最大体积分数。

对于剪切应力 $\tau^{\alpha\beta}$ 为以下公式

$$\tau^{\alpha\beta} = \frac{4\xi_p^2 \rho_p d_p g_0 (1+e_{pp})}{3} \sqrt{\frac{\theta_p}{\pi}} \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\alpha} + 2 \left[\frac{\frac{4\xi_p^2 \rho_p d_p g_0 (1+e_{pp})}{5} \sqrt{\frac{\theta_p}{\pi}}}{+ \frac{2^{5\sqrt{\pi}} \rho_p d_p \sqrt{\theta_p}}{g_0 (1+e_{pp})} \left(1 + \frac{4}{5} \xi_p g_0 (1+e_{pp}) \right)^2} \right] \quad (12)$$

式中, d_p 为颗粒的直径, e_{pp} 为颗粒之间的碰撞恢复系数, 表示颗粒之间碰撞前后绝对速度跳跃关系 (Gomez Gonzalez and Garzo, 2022)。

(3) 超稀疏态。离散元法可通过牛顿第二定律分别描述 (Cundall and Strack, 1979), 方程为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (F_{c,ij} + F_{d,ij}) + m_i g \quad (13)$$

式中, m_i 与 v_i 分别为颗粒 i 的质量和速度。 t 为时间, $m_i g$ 为颗粒的重力, $F_{c,ij}$ 与 $F_{d,ij}$ 分别为颗粒 i 与 j 的接触力与粘性接触阻尼力, k_i 为所有与颗粒接触的颗粒总数。颗粒 i 与 j 的接触力可分解为法向与切向接触力。如果颗粒之间有接触作用, 则采用 *Hertz-Mindlin* 模型 (Mindlin 和 Deresiewicz, 1953)。上述三类闭合关系及其连续切换构成图 3 所示的浓密—过渡—稀疏—超稀疏状态转化框架。

2.2.3 全相态模型

全相态模型在上述多相态框架的前端进一步耦合节理化岩体的强度退化、损伤累积和结构解体, 使初始完整或块状岩体能够在高落差剪切与地形撞击作用下逐步转化为离散块体和颗粒体。为此, 引入 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 模型。HJC 模型是一种适用于岩石和混凝土材料的弹塑性损伤本构模型, 综合考虑了高应变率效应、静水压力影响和损伤累积。其核心组成部分包括强度模型、损伤模型和分段状态方程, 适用于高速冲击、爆炸荷载等动力学场景的数值模拟。结合该模型, 进一步模拟滑体在结构面作用下的动力学演化过程, 从而更真实地展现崩塌解体的破坏效果, 为滑坡灾害的防控提供理论依据。

本研究采用 HJC 弹塑性损伤模型描述玄武岩块体的动态强度与孔隙压密, 并通过显式结构面控制初始块度和块体分离 (Holmquist et al., 1993; Gao et al., 2024b)。

(1) 强度模型

$$\sigma^* = \min\{S_{\max}, [A(I - D) + B(P^*)^N][I + C \ln \dot{\epsilon}^*]\} \quad (14)$$

式中, $\sigma^* = \sigma/f'_c$ 和 $P^* = P/f'_c$ 分别为归一化等效应力和归一化压力, f'_c 为准静态单轴抗压强度; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为归一化应变率; A 、 B 、 N 、 C 和 $S_{\max}$ 为材料常数; $D \in [0, 1]$ 为损伤变量。损伤按等效塑性应变增量与塑性体积应变增量累积: 参考应变率 $\dot{\epsilon}_0$ 取 1.0 s^{-1} 。

$$D = \min \left[1, \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} \right] \quad (15)$$

$$\epsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \geq \text{EFMIN} \quad (16)$$

式中, D_1 和 D_2 为损伤常数, $T^* = T/f'_c$ 为归一化最大静水拉应力, EFMIN 为最小断裂塑性应变。

(2) 状态方程

用于描述静水压力 P 和体积应变 μ 之间的关系, 并包括永久破碎的影响, 分为三个响应区域。

在线弹性区 $-T(I-D) \leq P \leq P_{\text{crush}}$ 内, $P = K_{\text{elastic}}\mu$, 其中 $K_{\text{elastic}} = E/[3(I-2\nu)]$ 。在 $P_{\text{crush}} \leq P \leq P_{\text{lock}}$ 的过渡压密区, 加载及卸载/再加载关系为:

$$P = P_{\text{crush}} + K_{\text{lock}}(\mu - \mu_{\text{crush}}) \quad (17a)$$

$$P = P_0 + K_u(\mu - \mu_0) \quad (17b)$$

$$K_{\text{lock}} = \frac{P_{\text{lock}} - P_{\text{crush}}}{\mu_{\text{plock}} - \mu_{\text{crush}}}, \quad K_u = (I - F)K_{\text{elastic}} + FK_I \quad (17c)$$

$$F = \frac{\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{crush}}}{\mu_{\text{plock}} - \mu_{\text{crush}}} \quad (17d)$$

式中, P_{crush} 和 P_{lock} 分别为孔隙开始压碎和全部压密时的压力, μ_{crush} 和 μ_{plock} 为相应体积应变; P_0 、 μ_0 和 μ_{max} 分别为卸载起点压力、卸载起点体积应变和历史最大体积应变。当 P 达到 P_{lock} 、材料中的空隙被完全去除后, 采用三次多项式状态方程:

$$P = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3 \quad (18a)$$

$$P = P_0 + K_I(\bar{\mu} - \bar{\mu}_0) \quad (18b)$$

$$\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{\text{lock}}}{I + \mu_{\text{lock}}}, \quad \mu_{\text{lock}} = \frac{\rho_{\text{grain}}}{\rho_0} - I \quad (18c)$$

式中, K_1 、 K_2 和 K_3 为完全致密材料的状态方程系数, ρ_{grain} 为晶粒密度。该分段关系能够表征高位崩滑体在强冲击下由多孔介质压密至锁定状态的耗能过程, 避免将孔隙压密简单等效为恒定体积模量。式(18b)中的 $\bar{\mu}_0$ 为卸载起点的修正体积应变。

(3) 结构面表征

结构面间距 d 与线密度 λ_d 满足:

$$\lambda_d = \frac{l}{d} \quad (19)$$

为了描述三维空间中结构面的取向分布, 采用方向余弦(方程18)进行计算。

以正东方(E)为 x 轴正方向, 以正西方(W)为 x 轴负方向, 以正北方(N)为 y 轴正方向, 以正南方(S)为 y 轴负方向, 以正上方为 z 轴的正方向, 建立三维空间直角坐标系。设有一组结构面, 倾向为 α , 倾角为 β , 则结构面法线 n 的方向余弦 $\{l, m, n\}$ 为:

$$\begin{cases} l = \cos(180 - \alpha)\sin\beta = -\cos\alpha\sin\beta \\ m = \sin(180 - \alpha)\sin\beta = \sin\alpha\sin\beta \\ n = \cos\beta \end{cases} \quad (20)$$

在模拟中, 可根据现场调查输入结构面的间距、密度和产状等参数, 并结合HJC本构模型描述的动态强度、损伤演化及状态方程, 模拟结构面控制下的岩体破坏与块体解体过程。结构面密度不仅控制岩体的完整性和块度, 还显著影响滑体的力学性能及其演化路径(Bernardini et al., 2022)。通过引入上述结构面参数, 可增强模型对崩塌解体现象的拟合能力, 并为动力学灾害分析提供科学依据。

计算过程中, 结构面控制初始分块和优先分离路径, 块体内部损伤则控制二次破碎; 二者共同决定滑体由“岩体—块体—碎屑体”向浓密、稀疏和超稀疏状态演化的时空过程。全相态模型使滑体能够表征由固态岩体经损伤破裂和块体解体进入浓密颗粒态, 并进一步向过渡态、稀疏颗粒态和超稀疏颗粒态演化的全过程。图3主要示意岩体解体后的颗粒状态转化阶段。

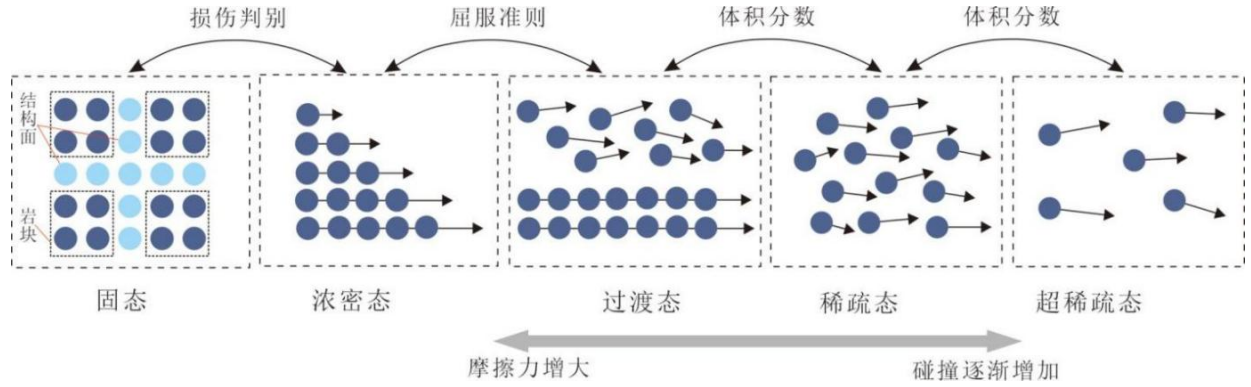


图 3 多相态模型转化示意图（据 Gao et al., 2024b 修改）

Fig. 3 Schematic diagram of the multiphase transition model (modified after Gao et al., 2024b)

2.3 边界条件

三种工况采用相同的三维地形和滑源区几何，但 DAN3D 与 LPF3D 采用不同的基底边界处理方式。

2.3.1 DAN3D 边界条件

DAN3D 以三维地形表面作为固定、不可穿透基底，并在局部地形切平面内求解深度平均运动方程。基底法向应力表示为（McDougall 和 Hungr, 2004）：

$$\sigma_n = \rho h \left(g \cos \alpha + \frac{\bar{v}_x^2}{R} \right) \quad (21)$$

式中， ρ 为滑体密度， h 为沿基底法向的流深， α 为局部坡角， $\bar{v}_x$ 为运动方向的深度平均速度， R 为运动方向上的地形法向曲率半径。本研究 DAN3D 工况采用 Frictional 流变，基底剪切阻力为：

$$T_D = \sigma_n \tan \varphi_b \quad (22)$$

式中， T_D 为 DAN3D 基底剪切阻力， σ_n 为基底法向应力， φ_b 为等效基底摩擦角；阻力方向与滑体运动方向相反。

2.3.2 LPF3D 边界条件

LPF3D 多相态与全相态工况采用相同的地形边界和接触参数。SPH/SDPH 粒子与地形之间的法向作用采用罚函数法求解，以限制粒子穿透边界；切向基底阻力可采用库仑模型或 Voellmy 模型（高杨等，2023）。

库仑模型为：

$$T_C = \sigma_n (1 - r_u) \tan \varphi \quad (23)$$

Voellmy 模型为：

$$T_V = \sigma_n \tan \varphi + \frac{\gamma v_t^2}{\xi} \quad (24)$$

式中， T_C 和 T_V 分别为库仑模型与 Voellmy 模型的切向阻力， r_u 为孔隙水压力系数， φ 为摩擦角， γ 为滑体重度， v_t 为沿基底的切向速度， ξ 为湍流阻力系数。两种阻力关系按所选模型使用，不作重复叠加。

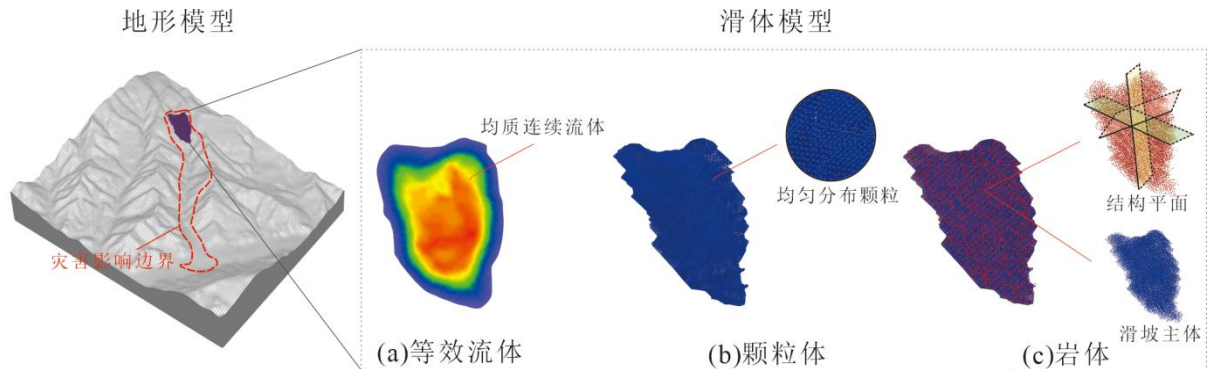
3 数值模拟分析

此次研究依据头寨滑坡区数字高程数据、现场调查边界和既有工程地质资料，建立从滑源区至盘河河谷远端堆积区的三维计算域。滑源区岩体按节理化峨眉山玄武岩处理，LPF3D 模型离散为 31163 个计算粒子，材料密度取 2670 kg/m^3 ，代表性颗粒粒径取 1 m ；数值模型初始滑体体积取 $15.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

3.1 模型建立

为重现头寨滑坡的三维动力演化过程，文章基于数字高程模型和现场调查资料，构建了头寨滑坡三维数值模型（图 4）。模型保留了滑坡区的地形条件及滑源区初始几何形态，为不同数值方法的对比计算提供统一的

几何基础。在此基础上，分别采用 DAN3D 等效流体模型、LPF3D 多相态模型和 LPF3D 全相态模型进行模拟。三种模型采用相同的地形条件和初始滑源区范围，以比较其对滑坡运动过程及堆积特征的模拟差异。



(a) 等效流体；(b) 颗粒体；(c) 岩体

图 4 头寨滑坡三维 SPH 计算模型

Fig. 4 3D SPH computational model of the Touzhai landslide

(a) equivalent fluid; (b) granular body; (c) rock mass

3.2 参数选取

数值模拟的准确性高度依赖于输入参数的合理性。本研究模型所需的宏观物理力学参数，主要依据头寨滑坡的现场地质调查报告、室内岩土力学试验结果，并参考了以往类似高位岩质滑坡灾害的数值反演经验进行综合确定。此外，在离散化过程中，兼顾计算精度与计算效率，对 SPH 粒子的特征粒径及其总数量进行了合理设定。本次模拟所采用的具体计算参数如表 1 所示。

表 1 头寨滑坡三种数值模拟方案的主要参数

Table 1 Main parameters of the three numerical simulation schemes

模拟方法	密度 $\rho /(\text{kg}/\text{m}^3)$	黏聚力 c/Pa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	接触摩擦系数 μ_c	颗粒粒径 d/m	粒子数量/个
DAN3D 等效流体	2000	0	20	—	—	4000
LPF3D 多相态	2670	10000	25	0.8	1	31163
LPF3D 全相态耦合	2670	10000	25	0.8	1	31163

3.3 实际滑坡运动过程分析

滑坡运动速度演化过程如图 5 所示。

0—30 s 为加速阶段。0 s 时滑坡处于启滑状态，整体速度较小。随后滑体颗粒沿陡倾地形加速运动，前缘颗粒速度迅速增加。30 s 后，滑体颗粒完全进入沟道。30—90 s 为减速与堆积阶段。由于沟道内地形较缓，滑体在运动过程中部分颗粒开始减速堆积。60 s 后，大部分后段滑体颗粒运动已经停止。90 s 后，前缘滑体颗粒运动至对面山体坡角处，由于坡体的阻挡作用向左右两边扩散堆积。120 s 后，颗粒运动趋于稳定，所有颗粒速度降为 0。

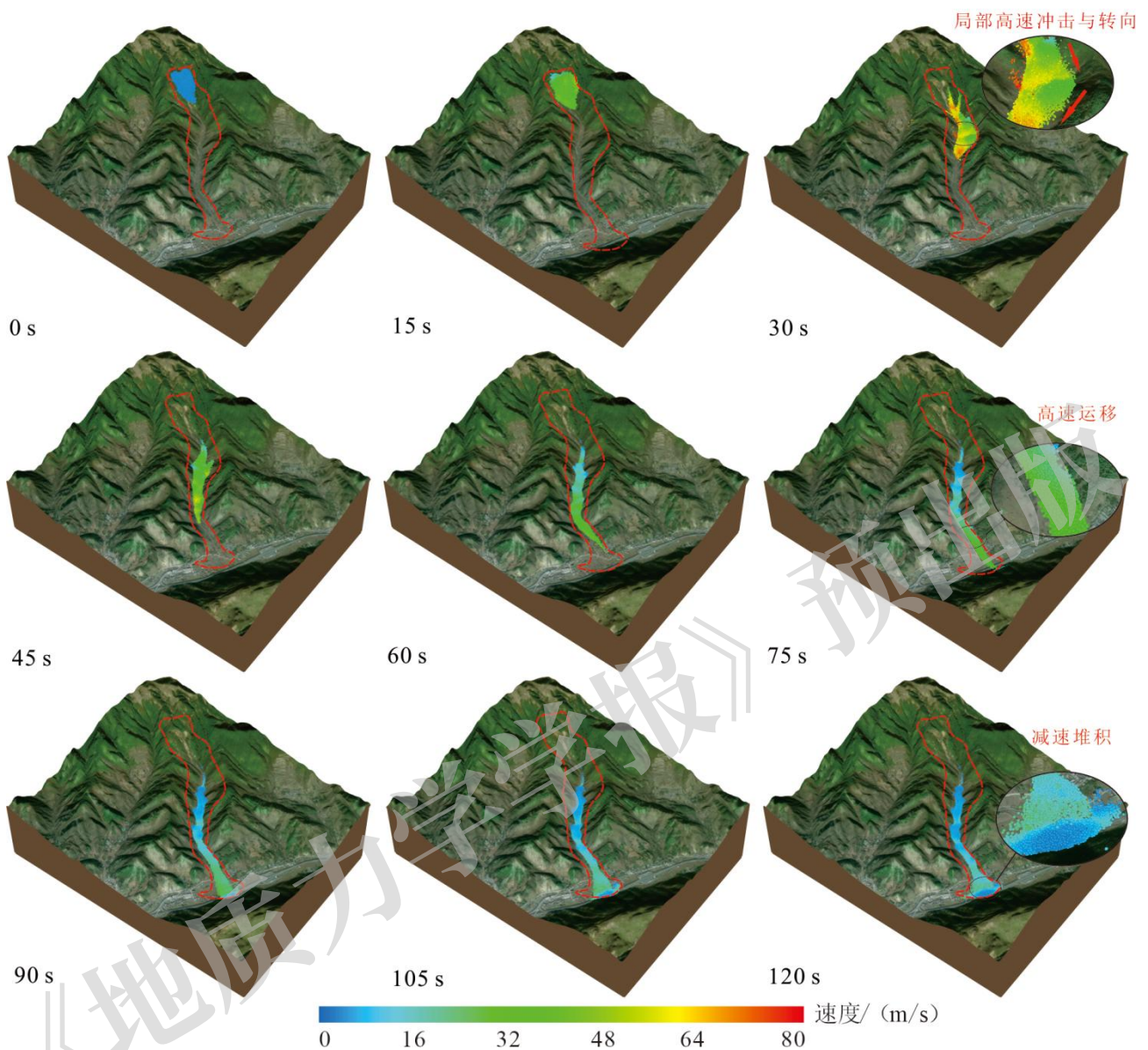


图 5 头寨滑坡运动速度过程图

Fig. 5 Velocity evolution process of the Touzhai landslide

头寨滑坡运动过程中 SDPH 粒子体积分数的时空演化特征如图 6 所示。体积分数反映了滑体的浓密与稀疏状态。初始阶段，滑坡主体颗粒大部分颗粒处于浓密态。随着滑坡加速，颗粒逐渐从浓密态过渡到稀疏态。在剪出口滑出时，速度增加导致体积分数再次降低。最终堆积阶段，大部分颗粒处于过渡态与浓密态，少部分前缘颗粒处于稀疏态。模拟结果呈现出前段稀疏、后段浓密的典型特征，这归因于滑坡路径具有强烈的地形起伏，导致主滑体发生剧烈运动和解体。

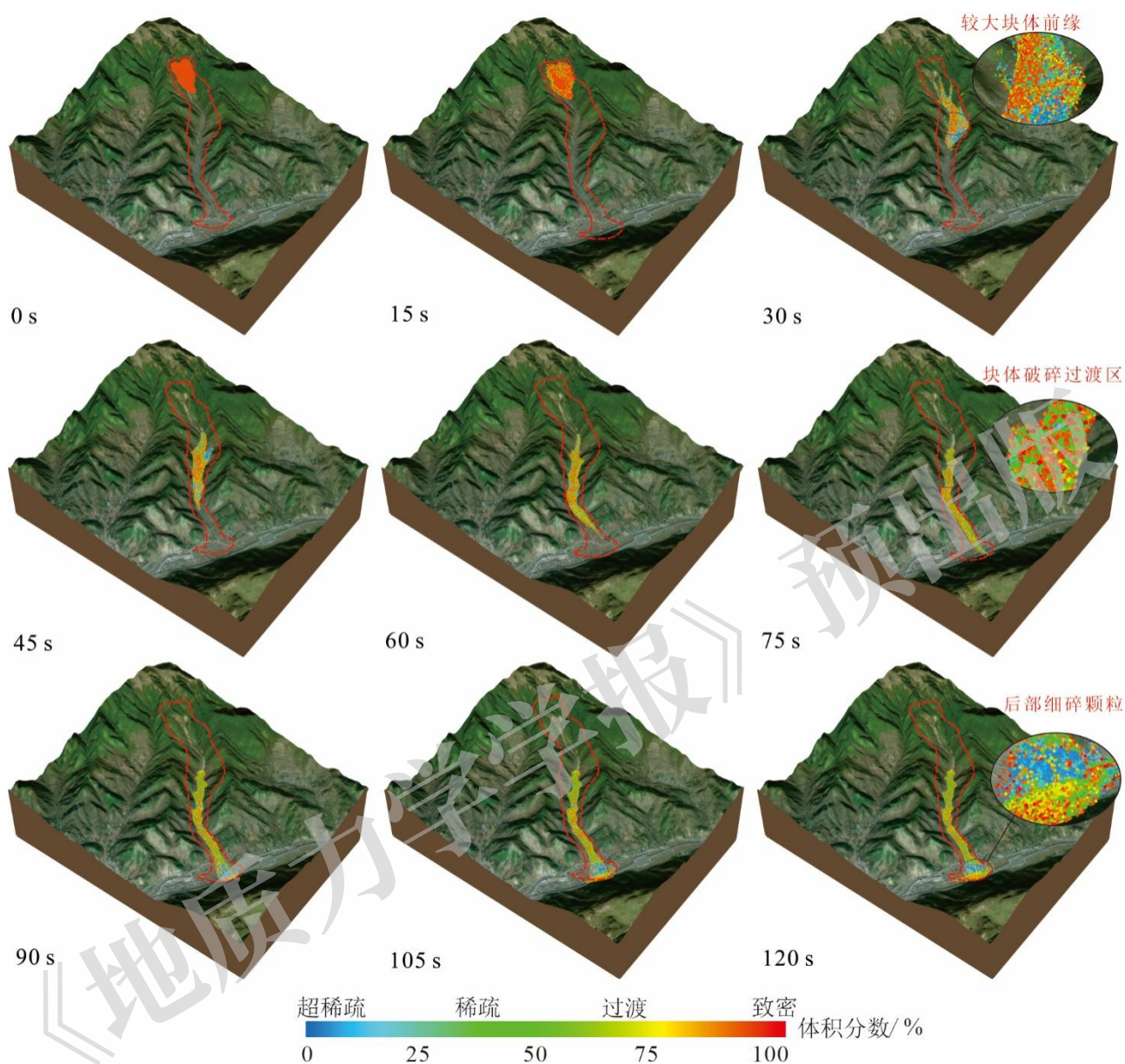


图 6 头寨滑坡体积分数演化图

Fig. 6 Volume fraction evolution of the Touzhai landslide

滑坡堆积厚度演化如图 7 所示。

初始阶段，滑体集中于滑源区，厚度较大，最大厚度为 52.75 m。随着时间推移，滑体沿斜坡向下扩展，堆积范围逐渐扩大。最终形成一个堆积区中部厚、两边变薄的堆积体，这与现场勘查的 I、II、III 区堆积特征相吻合。

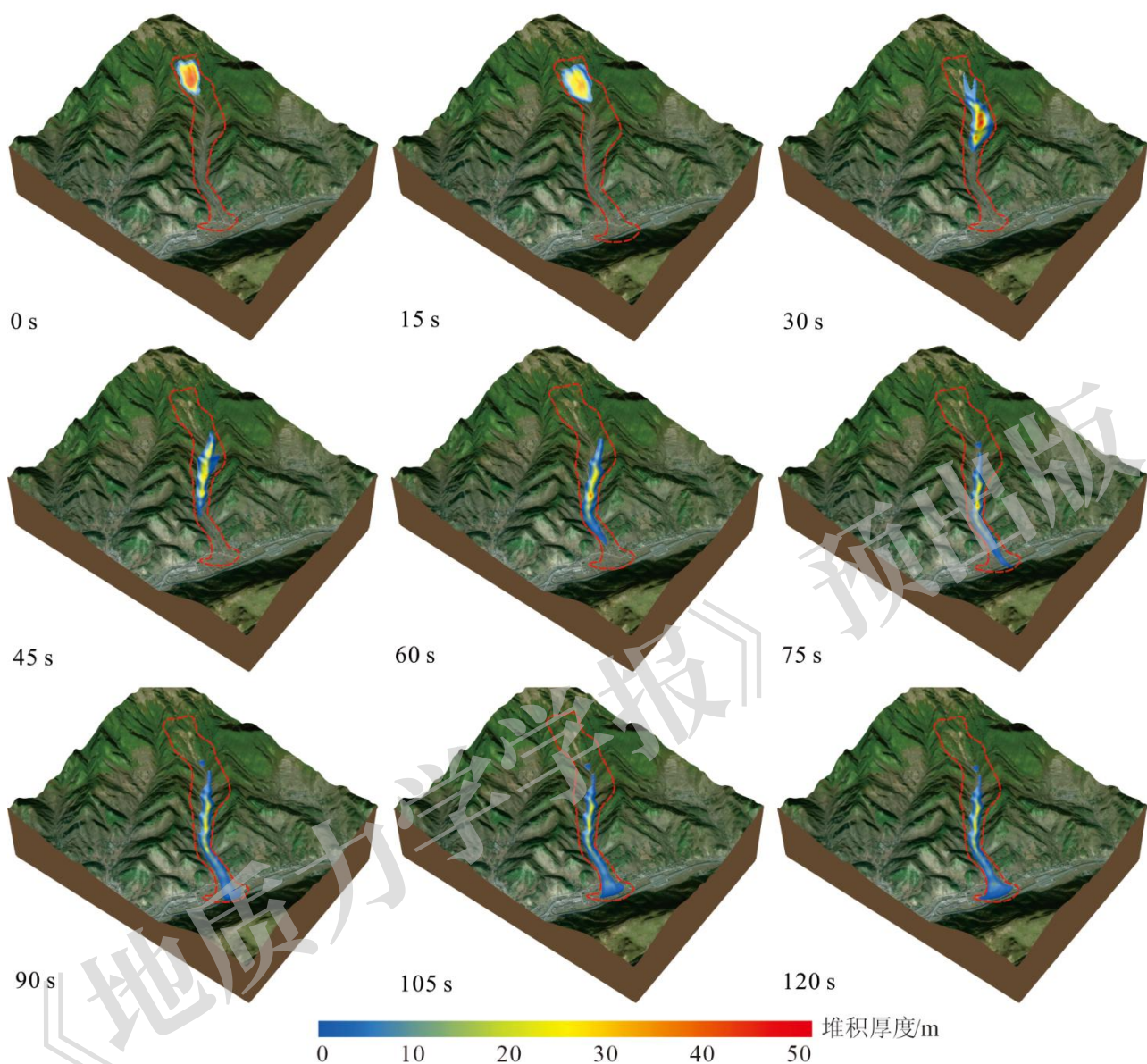


图 7 头寨滑坡堆积厚度过程图

Fig. 7 Deposition thickness evolution of the Touzhai landslide

如图 8 所示，损伤变量反映了滑体内部结构的破坏程度。

在滑坡失稳初期，滑体内部存在结构面，滑体尚未完全破坏。0—30 s 为解体扩展阶段，滑体开始解体，损伤区域逐渐由局部破裂区向运动路径扩展，部分区域达到高损伤状态并形成岩屑。到 30 s 时，碰撞、剪切及摩擦作用促进岩块结构破坏和二次破碎，产生大量岩屑颗粒。60—120 s 滑体发生高度解体，局部区域形成明显碎屑化，颗粒分布广泛，岩块数量减少，运动前缘区域逐渐形成以碎屑颗粒为主的运动状态。

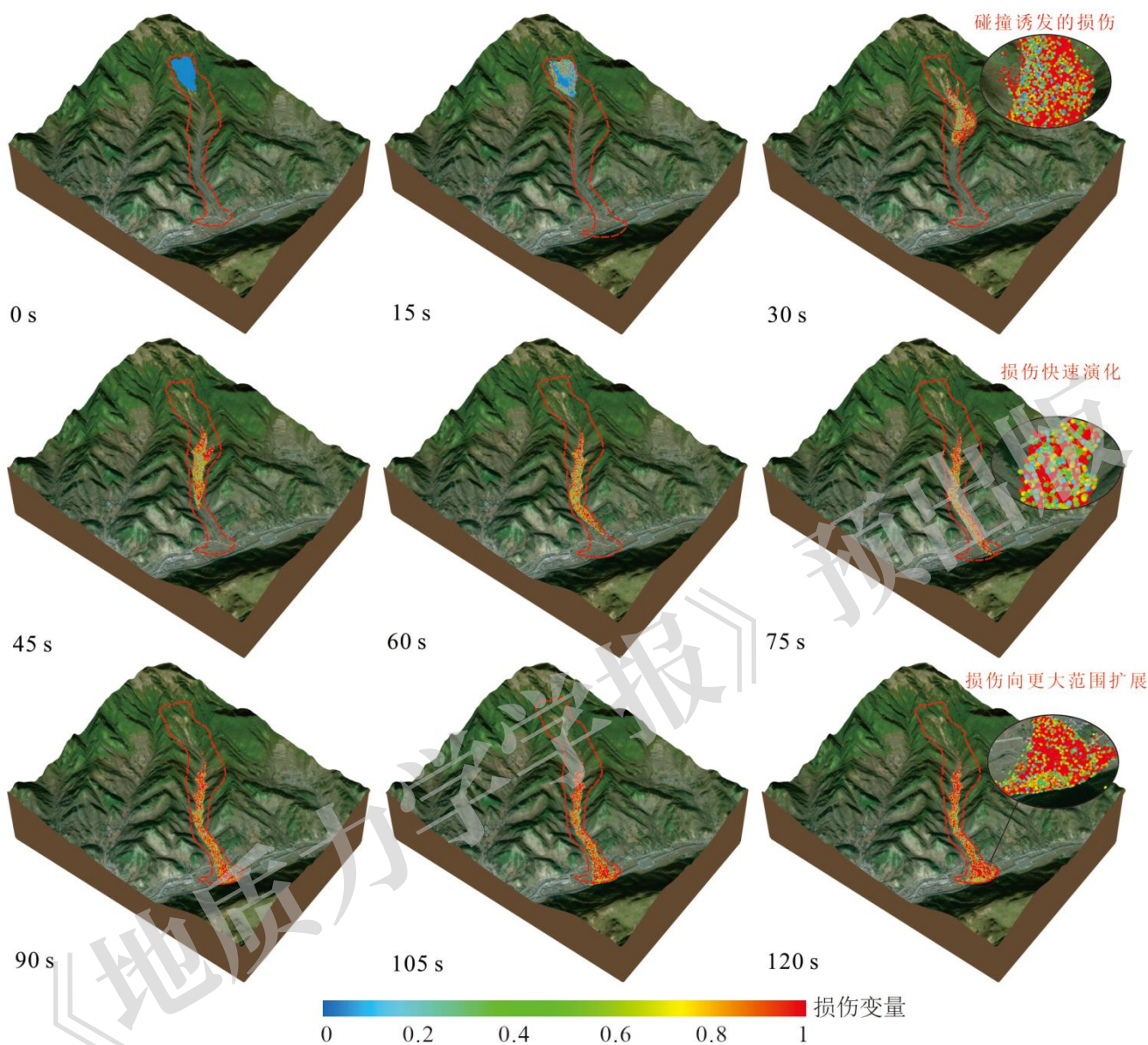


图 8 头寨滑坡滑体损伤变量分布图

Fig. 8 Damage variable distribution of the Touzhai landslide

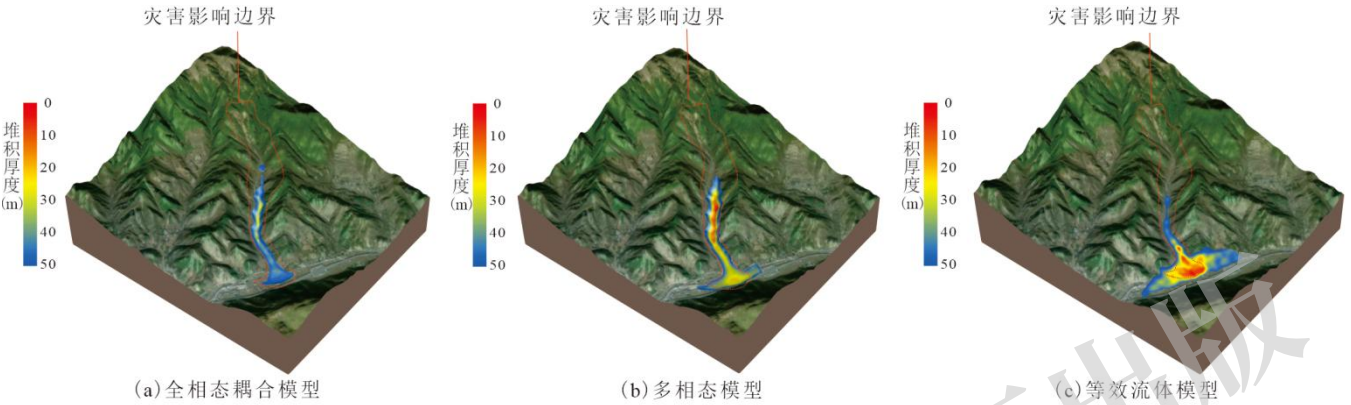
4 不同动力学模型的多相态表征与对比分析

头寨滑坡的远程运动和高速特性无法单纯用刚体运动或简单摩擦模型解释。其核心机制在于崩塌岩体在剧烈运动中发生的碰撞、破碎和解体，导致滑体颗粒化、流态化，从而摩擦阻力大幅降低，流动性剧增。因此，能否在数值模拟中合理再现“解体过程”，是评价数值方法有效性的关键。

本研究所称“多相态”并非热力学意义上的固-液相变，而是滑坡物质在运动过程中由具有较完整结构的岩体或块体状态，经损伤破碎逐步转化为浓密颗粒态、稀疏颗粒态及类流体运动状态的力学行为变化。固态或块体态主要受结构强度、块体间相互咬合及摩擦作用控制；浓密颗粒态仍以颗粒间持续接触和摩擦剪切为主；稀疏颗粒态中颗粒间距增大，碰撞与惯性作用增强，宏观上表现出明显的类流体运动特征。

为了深入揭示头寨滑坡远程高速运动的内在机理，本研究对比了三种不同数值模拟方法的计算结果：等效流体模型基于传统深度平均理论，通过调整摩擦系数等流变参数模拟滑坡运动。多相态模型仅考虑滑体颗粒的浓密-稀疏相态转化，但忽略颗粒内部的损伤解体过程。全相态耦合模型为本研究提出的完整模型，同时考虑了滑体的损伤解体、颗粒破碎以及随之产生的相态转化。

对比结果如图 9 及表 2 所示。



(a) 考虑损伤解体的全相态耦合模型；(b) 不考虑损伤解体的多相态模型；(c) 等效流体模型

图 9 不同模拟方法的运动过程对比

Fig. 9 Comparison of movement processes among different simulation methods

(a) Fully coupled model considering damage-induced disintegration; (b) Multiphase-state model without damage-induced disintegration; (c) Equivalent-fluid model

4.1 等效流体模型

传统的 DAN3D 模拟通常不直接考虑岩体的破碎和解体过程，而是通过流变参数的“经验折减”来间接反映远程运动。图 9 (c) 展示了采用 DAN3D 软件，基于摩擦流变模型的模拟结果。模拟结果显示，滑体在 30 s 时已加速通过沟道中段，60 s 时前缘已接近沟口，最终在 120 s 时形成了延伸至 3650 m 处的堆积体。模拟结果表明，虽然通过将基底摩擦系数人为降低至极低值，可以拟合出 3650 m 的运动距离，但该参数取值与玄武岩的实际摩擦特性明显不符。该模型仅能复现宏观堆积范围，本质上属于经验拟合 (Bucher et al., 2024; Pfiffner et al., 2023)。

4.2 损伤解体机制的关键作用

若使用 LPF3D 但关闭损伤模块，如图 9 (b) 所示，滑体被视为不可破碎的刚性颗粒群。在采用真实物理参数的情况下，滑体无法克服巨大的剪切阻力，仅运动约 1500 m 即在沟道缓坡处停滞。这与部分刚性离散元模拟的结果一致 (Liu et al., 2025)，表明在本次模型参数条件下，不考虑损伤解体难以复现头寨滑坡的远程运动。图 9 (a) 所示的全耦合模型通过引入损伤变量，模拟了岩体在运动过程中因结构破坏和颗粒扩容导致等效抗剪强度降低、流动性增强的过程。结合图 6 和图 8 可知，滑体损伤变量由初始局部损伤状态逐渐演化，高损伤区域在运动后期趋近 1.0，说明岩体内部裂隙不断扩展、原有承载结构逐步破坏；与此同时，运动前缘体积分数明显降低并进入稀疏状态，表明破碎颗粒重新排列、颗粒间距增大，滑体发生扩容。结构破坏削弱了块体之间的相互咬合作用，扩容使颗粒间持续接触和摩擦剪切减少，颗粒碰撞与惯性作用增强，宏观上表现为等效抗剪强度和运动阻力降低。模拟结果显示，正是解体过程破坏了岩体的结构完整性，推动滑体由固态崩滑向碎屑流态转化，使其在无需人为调整参数的情况下形成更长的运移距离 (Li et al., 2026)。这与 Iverson 提出的流体动力学机制相符 (Iverson, 1997)。模拟结果表明，损伤解体是滑坡动力转化的关键触发机制。解体过程不仅消耗了部分势能，更重要的是改变了滑体的物质状态，使其由固态块体运动逐渐转化为类流体的碎屑流运动，从而降低运动阻力，实现从崩滑到碎屑流的转变。

4.3 综合对比总结

表 2 总结了三种模拟方法的特征与结果对比。

表 2 三种数值模拟方法的对比分析

Table 2 Comparative analysis of three numerical simulation methods

模拟方法	物理假设	参数设置	60 s 运动状态	运动距离	动力学机理
DAN3D (等效流体)	将滑体视为均质连续流体，不直接模拟损伤解体 和颗粒状态转化	极低摩擦系数 ($\mu_f \approx 0.15$)	高速运动	可拟合至 3650 m	宏观流变等效
LPF3D (无损伤解体)	将滑体视为不可继续破碎的颗粒群，可描述浓密-稀疏状态变化	真实岩石参数 ($\mu_f = 0.8$)	基本停止	仅约 1500 m	摩擦-碰撞主导
LPF3D (全相态耦合)	考虑损伤解体、颗粒扩容及浓密-稀疏状态变化	采用与无损伤工况一致的基础参数，并引入损伤变量	高速流态化运动	3650 m	损伤解体-状态转化

三种模拟方法的主要差异在于对损伤解体及颗粒状态转化过程的描述方式。对比结果表明，LPF3D全相态耦合模型能够在不采用极低摩擦系数进行经验拟合的条件下，较好地表征头寨滑坡的损伤演化、颗粒状态变化及远程运动过程。通过对比可以确认，损伤解体是控制头寨滑坡动力转化的关键因素。不考虑解体时，滑体表现为摩擦和块体相互制约作用较强的固态，能量主要消耗于克服摩擦，导致运动受限。考虑解体后，岩体破碎导致颗粒间的相互咬合作用减弱，滑体转化为碎屑流，从而在无需人为调整摩擦系数的情况下，较好地复现了远程高速特征。

5 讨论

此次研究的主要科学问题是头寨高位崩塌体如何在 2—3 分钟内转化为高速远程碎屑流。现场调查表明，滑体最大爬高约为 55 m（邢爱国和殷跃平，2009），水平运动距离达 3650 m（唐川，1991）。模拟结果再现了滑体受对岸坡体阻挡后的爬升现象，LPF3D 模拟结果和对比分析为这一动力转化机制提供了重要的数值证据。

5.1 崩滑-碎屑流转化机制的模拟分析

头寨滑坡崩滑-碎屑流转化的核心机制在于滑体物质状态的剧烈转变。LPF3D 模拟通过引入损伤变量和体积分数两个关键变量，形成了相互印证的数值支撑。首先，滑坡源区 960 m 的巨大高差提供了势能，在 0—30 s 阶段迅速转化为动能，驱动滑体前缘高速运动。随后，巨大的动能导致滑体内部发生剧烈的碰撞、剪切和破碎（Wang et al., 2022; Pudasaini 和 Mergili, 2024）。损伤模拟直观地再现了这一过程：滑体部分区域，尤其是运动前缘和强冲击区发生显著破碎并形成大量岩屑，这是理解动力转化的物理前提。伴随着岩体的解体破碎，滑体发生了流态化。体积分数模拟显示，滑体从初始的浓密态迅速向稀疏态转化，尤其是在运动前缘，形成了“前稀后密”的典型碎屑流结构。最终，岩体的解体破碎和流态化导致滑体内部的摩擦阻力大幅降低。这使得滑体获得了极高的流动性，从而能够像流体一样实现长距离运动及对岸爬升。需要说明的是，本研究所称“相态转变”并非热力学意义上的固-液相变，而是滑坡物质在动力破碎过程中，由具有较完整内部结构且块体间相互咬合的固态岩体，逐步转化为浓密颗粒态、稀疏颗粒态及类流体运动状态的力学行为转变。该过程并非由单一参数达到某一固定阈值所控制，而是损伤累积、结构解体、颗粒扩容及运动控制机制改变共同作用的结果。

从该次模拟结果来看，滑体在启动初期仍保留较完整的岩体结构，块体之间相互咬合，其运动主要受底部

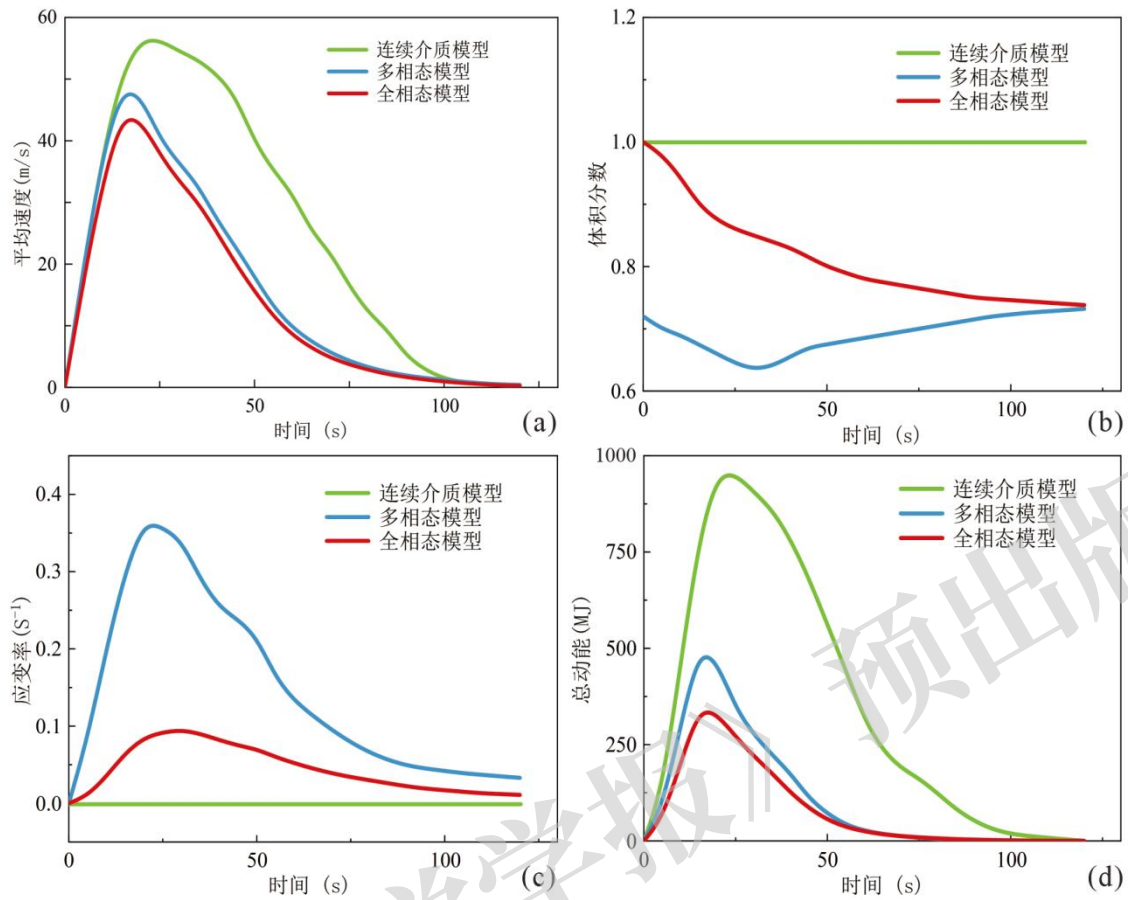
摩擦和块体间剪切作用控制。随着滑体高速下落并与坡面和沟道底部发生强烈碰撞，岩体内部裂隙不断扩展，损伤变量由初始局部损伤状态逐渐演化，高损伤区域在运动后期趋近 1.0，表明原有承载结构逐步破坏，块体之间的相互咬合作用不断减弱。与此同时，破碎颗粒在持续剪切和碰撞作用下发生扩容，运动前缘体积分数由初始较高值显著降低，滑体前缘逐渐进入稀疏状态，颗粒间持续摩擦接触减少，碰撞作用和惯性输运逐渐占据主导。因此，当滑体损伤接近饱和、内部承载结构基本破坏、前缘体积分数显著降低且仍保持较强剪切运动时，可认为滑体已由以摩擦和块体相互制约作用为主的固态崩滑转变为碰撞-惯性控制的碎屑流态。该综合条件是根据头寨滑坡模拟结果提出的相态转变判别特征，并非适用于所有滑坡的统一临界阈值。

相态转变还表现出明显的空间非均一性。滑体前缘受地形冲击和拉张作用更强，损伤程度高、体积分数低，较早进入稀疏类流体态；后缘仍保留部分块体结构和较高体积分数，表现为浓密颗粒态或准固态。随着滑体进入平缓堆积区，速度和剪切速率逐渐降低，颗粒重新接触并压密，体积分数回升，滑体又由稀疏流动态向浓密堆积态转化。由此可见，头寨滑坡的多相态演化实质上是“结构损伤-骨架解体-颗粒扩容-碰撞流化-压密堆积”的连续动力过程。

相较于 DAN3D，传统等效流体模型虽能通过人为折减流变参数拟合宏观远程运动的结果，但无法从物理本质上揭示基底摩擦阻力发生异常降低的内在力学机制。LPF3D 通过模拟损伤解体，从物理机制上回答了该问题：远程运动并非源于材料具有先天较低的摩擦系数，而是与岩体在运动过程中的破碎解体密切相关。在不考虑损伤解体的 LPF3D 多相态模型中，滑体将被视为一个不可继续破碎的颗粒集合体，其能量主要通过颗粒间摩擦耗散，滑体将迅速减速停止，无法实现远程运动，也无法形成流通区和堆积区的碎屑流堆积特征。

5.2 不同数值模型动力学演化特征对比

为进一步从时序演化角度检验高位岩质滑坡崩滑-碎屑流的动力学转化机制，并比较不同模型对头寨滑坡关键动力学过程的表征差异，本研究提取了连续介质模型、多相态模型以及全相态模型在模拟头寨滑坡过程中的关键动力学参量时间序列，进行了定量对比分析，如图 10 所示。



(a) 平均速度；(b) 体积分数；(c) 应变率；(d) 总动能

图 10 不同模型下滑坡动力学演化过程对比

Fig. 10 Comparison of landslide dynamic evolution processes under different models

(a) average velocity; (b) volume fraction; (c) strain rate; (d) total kinetic energy

速度、能量、体积分数等宏观动力学参数是反映滑坡动力过程最直观指标。如图 10 (a) 的平均速度演化曲线所示，三种模型对头寨滑坡运动过程的表征结果存在显著差异。在失稳加速阶段，连续介质模型出现了极高的速度峰值，且在运动中后期的衰减极其缓慢，呈现出与实际动力特征偏离的现象；多相态模型的速度峰值同样偏高；相比之下，全相态模型的速度演化曲线无论是在峰值控制还是在整体演化周期的衰减趋势上，都表现得最为适中，与头寨滑坡约 120 s 的真实运动特征高度吻合。

导致上述速度演化差异的根源在于各模型对滑坡颗粒状态转化与能量耗散机制的处理不同。图 10 (b) 的滑体平均体积分数演化曲线中，连续介质模型的体积分数始终恒定为 1.0。这反映了其不可压缩等效流体的简化假设，由于连续介质假设忽略了岩体结构破裂与解体所必需的能量耗散过程，致使其无法在宏观尺度上真实表征摩擦阻力的动态衰减效应。多相态模型的体积分数初始值偏低，在运动过程中呈现小幅增长并最终稳定在 0.8 左右。这表明该模型在初始阶段即将滑体假定为松散的碎屑混合物，并在剪切运动中发生了颗粒重组与压密。全相态模型捕捉到了滑体从完整岩体向碎屑流的转化过程：其体积分数初始为 1.0，随着运动的推进，由于岩体发生持续的损伤破裂与剪切膨胀，体积分数呈现出小幅下降，最终稳定在 0.8 左右。岩体破碎解体并发生体积膨胀的过程需要克服坚固的基质剪切强度并消耗大量的系统势能，这种合理的能量耗散机制有效避免了滑体速度异常升高，使其速度曲线回归到更接近实际的合理区间。

如图 10 (c) 的应变率演化曲线所示，三种模型对滑体内部剪切变形的刻画差异显著。连续介质模型的内部应变率始终保持为 0，这说明该模型假定滑体内部未发生相对位移与剪切变形，滑体犹如单一刚体整体滑落，无法反映碎屑流内部剧烈的颗粒摩擦与能量耗散过程。多相态模型虽然考虑了流体特征，但在 25 s 左右出现了

一个尖峰,表明在其松散结构假设下,滑体失稳初期发生了过于剧烈且不合理的集中剪切变形,这与真实滑坡中岩体向碎屑流渐进式转化的物理事实不符。相比之下,全相态模型的应变率曲线始终稳定在合理低值区间,表现出平稳且持续的剪切流动特征。结合前文体积分数平缓下降的过程可知,滑坡内部发生的是由损伤驱动的渐进式破裂与均匀流态化,全相态模型的应变率曲线展现出较为平稳、连续的演化特征。

如图 10(d) 所示,三种模型的总动能呈现出连续介质大于多相态,多相态大于全相态的递减规律。连续介质模型因缺乏内部碎裂、损伤解体和相态转化过程中的能量耗散,势能几乎无损转化为动能,导致其峰值异常偏高;多相态模型由于内部解体不充分,耗散能量有限,动能水平居中;全相态模型较好地表征了岩体剧烈的损伤破裂与流态化稀释过程,大量能量在损伤破碎、颗粒摩擦和压密过程中耗散为结构破碎能与颗粒摩擦能,因而宏观总动能最低。这种“低动能、高耗散”的平稳演化特征,与高位远程滑坡运动过程中显著能量耗散的力学特征较为一致。

6 结论

文章基于详细的地质勘察资料,采用 LPF3D 数值方法对云南头寨高位崩滑-碎屑流的动力转化过程进行了模拟,主要结论如下:

(1) 头寨滑坡是一次典型的高位崩滑向碎屑流转化的远程高速地质灾害。其高位启动、高速远程、显著爬升的运动学特征和分带堆积、拉张构造、扇状展布的堆积特征均表明滑体在运动中发生了剧烈的动力转化。

(2) LPF3D 数值模拟再现了头寨滑坡在一定时间内经历的启滑、加速、解体、高速运动和减速堆积的全过程。模拟得到的中部厚、两侧薄的堆积形态、前稀后密的运动特征,以及运动时间、堆积范围等关键指标,整体上与现场调查结果较为一致。

(3) 头寨滑坡由固态崩滑向碎屑流态的转化,是损伤累积、内部承载结构破坏、颗粒扩容和运动控制机制改变共同作用的结果。模拟中,滑体损伤变量由初始局部损伤状态逐渐演化,高损伤区域在运动后期趋近 1.0,表明岩体内部承载结构逐步破坏,块体之间的相互咬合作用不断减弱;与此同时,运动前缘体积分数显著降低,颗粒间持续摩擦接触减少,滑体运动由摩擦和块体相互制约作用控制逐渐转变为碰撞-惯性控制。当损伤接近饱和、内部承载结构基本破坏、前缘进入稀疏颗粒状态且仍保持较强剪切运动时,滑体表现出明显的碎屑流态,并形成“前缘稀疏流态、后缘浓密固态”的差异化结构。该相态转变是头寨滑坡获得高流动性和远程运动能力的关键物理机制。

(4) 多模型对比表明,LPF3D 全相态耦合模型在经验参数的条件下,较好地再现了 3650 m 的远程运动范围及滑体受对岸坡体阻挡后的爬升现象,并表征了损伤累积、颗粒扩容和浓密-稀疏状态变化。该模型为分析高位崩滑-碎屑流动力转化机制提供了具有物理解释性的数值方法。

作者贡献声明: 胡雨昂负责论文构思、数值模拟、数据分析、研究方法实施及论文初稿撰写;高杨负责研究方案设计、研究方法指导、论文修改与完善;张晗参与数据处理、模型分析、技术方法应用及图件制作;刘松涛参与数据分析、研究方法优化及论文修改。所有作者均已阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions:

Hu Yuang conceived the study, performed numerical simulations, conducted data analysis, implemented the research methodology, and drafted the manuscript; Gao Yang designed the research framework, supervised the research methodology, and revised and refined the manuscript; Zhang Han participated in data processing, model analysis, technical application, and figure preparation; Liu Songtao contributed to data analysis, refinement of the research

methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests : All authors declare no conflict of interests.

References

- AARON J, MCDUGALL S, KOWALSKI J, et al., 2022. Probabilistic prediction of rock avalanche runout using a numerical model[J]. *Landslides*, 19(12): 2853-2869.
- BERNARDINI M, PAREDES C, SANCHIDRIAN J A, et al., 2022. On the influence of sampling scale on the in situ block size distribution[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(9): 5723-5738.
- BERZI D, 2024. On granular flows: From kinetic theory to inertial rheology and nonlocal constitutive models[J]. *Physical Review Fluids*, 9(3): 034304.
- BREARD E C P, FULLARD L, DUFEK J, 2024. Rheology of granular mixtures with varying size, density, particle friction, and flow geometry[J]. *Physical Review Fluids*, 9(5): 054303.
- BUCHER G, DIELEMAN C, IVY-OCHS S, et al., 2024. Deciphering the dynamics of a Younger Dryas rock avalanche in the Bernese Alps[J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 117: 23.
- CHENG H L, HUANG Y, ZHANG W J, et al., 2022. Physical process-based runout modeling and hazard assessment of catastrophic debris flow using SPH incorporated with ArcGIS: A case study of the Hongchun gully[J]. *Catena*, 212:106052.
- CUI B H, ZHANG L J, 2023. Application of Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) for the Simulation of Flow-Like Landslides on 3D Terrains[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 135(1):357-376.
- CUNDALL P A, STRACK O D L, 1979. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 29(1): 47-65.
- DENG J N, ZHAO J, 1993. Analysis of formation conditions and characteristics of the high-speed landslide in Touzhaigou[J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, (3): 80-83. (in Chinese)
- GAO Y, LI B, FENG Z, et al., 2017a. Analysis of the response of geological hazards to global climate change[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(1): 65-77. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2017b. Characteristics and numerical runout modeling of the heavy rainfall-induced catastrophic landslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, China[J]. *Landslides*, 14(4): 1361-1374.
- GAO Y, HE K, LI Z, et al., 2020. Disaster types and dynamic analysis of catastrophic landslides in karst mountainous areas of Southwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(4): 14-23. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, YIN Y P, LI Z, et al., 2022. Study on dynamic disintegration effect of high-position long-runout rock landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(10): 1958-1970. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2023. Numerical simulation method for high-position long-runout landslides considering particle state transition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(7): 1623-1637. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, LI B, ZHANG H, et al., 2024a. Numerical modeling of mixed two-phase in long runout flow-like landslide using LPF3D[J]. *Landslides*, 21(3): 641-660.
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2024b. Multistate transition and coupled solid-liquid modeling of motion process of long-runout landslide[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(7): 2694-2714.
- GAO Y, YIN H D, CHEN F Z, et al., 2026. Review on multi-phase dynamic numerical simulation of high-position long-runout geological hazards[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 37(1): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- GINGOLD R A, MONAGHAN J J, 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181: 375-389.
- GOMEZ GONZALEZ R, GARZO V, 2022. Kinetic theory of granular particles immersed in a molecular gas[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 943: A9.
- GONG Y F, XING X S, LI Y N, et al., 2023. Insights into the movement and diffusion accumulation characteristics of a catastrophic rock avalanche debris: A case

study[J]. Remote Sensing, 15(21): 5154.

HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H, 1993. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]//Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. Quebec City, Canada: 591-600.

HUANG C, HU C, AN Y, et al., 2023. Numerical simulation of the large-scale Huangtian landslide-generated impulse waves by a GPU-accelerated three-dimensional soil-water coupled SPH model[J]. Water Resources Research, 59:e2022WR034157.

HU H T, YANG M, 2000. Analysis and study on fluid dynamic mechanism of Touzhai large-scale high-speed long-runout landslide[C]//Proceedings of the 6th National Conference on Engineering Geology: 92-96. (in Chinese)

HU W, ZHANG W, WANG D, et al., 2020. The kinematics and dynamics of the Xinmo rock avalanche, Mao County, China[J]. Landslides, 17(4): 839-854.

IVERSON R M, 1997. The physics of debris flows[J]. Reviews of Geophysics, 35(3): 245-296.

LI B, GAO Y, ZHUANG Y, et al., 2025. Catastrophic characteristics and cascading amplification effect of Blatten high-position long-runout avalanche-debris flow in Valais, Switzerland[J]. Earth Science, 50(12): 4950-4969. (in Chinese with English abstract)

LI S, TANG H, PENG C, et al., 2023. Sensitivity and Calibration of Three-Dimensional SPH Formulations in Large-Scale Landslide Modeling[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128:e2022JB024583.

LI Y, HU W, GE Y, et al., 2026. Hypermobility induced by extensive grain fragmentation: Insights from the 1991 Touzhai rock avalanche[J]. Earth and Planetary Science Letters, 690: 120182.

LIU S T, GAO Y, LI B, et al., 2025. Simulation on the dynamic process of Longjiayan high-position collapse in Nayong, Guizhou[J/OL]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1-15[2026-05-25]. (in Chinese with English abstract)

LIU Y P, SONG C, LI Z H, et al., 2025. Numerical investigation of large-slope planar failure considering entrainment effects: New insights into the 2009 Jiweishan event[J]. Engineering Geology, 346: 107901.

MCDUGALL S, HUNGR O, 2004. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain[J]. Canadian Geotechnical Journal, 41(6): 1084-1097.

MINDLIN R D, DERESIEWICZ H, 1953. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. Journal of Applied Mechanics, 20(3): 327-344.

PIFFNER O A, IVY-OCCH S, MUSSINA Z, et al., 2023. The Tamins rock avalanche (eastern Switzerland): timing and emplacement processes[J]. Landslides, 20(5): 877-899.

PUDASAINI S P, 2020. A full description of a generalized debris flow[J]. International Journal of Multiphase Flow, 132: 103429.

PUDASAINI S P, KRAUTBLATTER M, 2021. The mechanics of landslide mobility with erosion[J]. Nature Communications, 12(1): 6727.

PUDASAINI S P, MERGILI M, 2024. Dynamic Simulation of Rock-Avalanche Fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 129(2): e2024JF007689.

SHA S, DYSON A P, KEFAYATI G, et al., 2023. Simulation of debris flow-barrier interaction using the smoothed particle hydrodynamics and coupled Eulerian Lagrangian methods[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 214:103864.

TANG C, 1991. Study on the extraordinary catastrophic landslide in Touzhaigou, Zhaotong[J]. Yunnan Geographic Environment Research, (2): 64-71. (in Chinese)

WANG H B, YAN F, ZHANG L W, et al., 2022. Mechanism and flow process of debris avalanche in mining waste dump based on improved SPH simulation[J]. Engineering Failure Analysis, 138:106345.

WANG K, REN Z, MEI X F, et al., 2019. Rainfall difference between the deposition fan and source area of Touzhai Landslide in Yunnan, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(3): 1937-1954.

WANG L M, LI J, GAO Y, et al., 2025. Numerical simulation analysis of Yitougou high-position rock avalanche-debris flow in Wanzhou, Chongqing[J/OL]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1-15[2026-05-25]. (in Chinese with English abstract)

WANG Y F, DONG J J, CHENG Q G, et al., 2022. Multiscale effects caused by the fracturing and fragmentation of rock blocks during rock mass movement: implications for rock avalanche propagation[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 22(2): 639-654.

WANG Z B, SHEN L F, XU Z M, 2016. Hydrogeochemical characteristics of groundwater in the Touzhai landslide and its reflection of water-rock (soil) interaction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 43(1): 111-116. (in Chinese with English abstract)

XIA T C, XIA G Q, 2021. Dynamic Analysis of the High-Speed and Long-Runout Landslide Movement Process Based on the Discrete Element Method: A Case Study

- of the Shuicheng Landslide in Guizhou, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2021:8854194.
- XING A G, GAO G Y, YUE Z Q, 2006. A study on hydrokinetic mechanism of high-speed landslides[C]//Advances in Earth Structures: Research to Practice. Geotechnical Special Publication No. 151. Reston: American Society of Civil Engineers: 173-179.
- XING A G, WANG G, YIN Y P, et al., 2016. Investigation and dynamic analysis of a catastrophic rock avalanche on September 23, 1991, Zhaotong, China[J]. Landslides, 13(5): 1035-1047.
- XING A G, YIN Y P, 2009. Analysis of fluid dynamic mechanism during whole process of Touzhai landslide in Yunnan[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 37(4): 481-485. (in Chinese with English abstract)
- XU Z M, HUANG R Q, TANG Z G, 2007. Engineering geological characteristics of the Touzhai landslide and its occurrence mechanisms[J]. Geological Review, 53(5): 691-698. (in Chinese)
- XU Z M, MEI X F, WANG L R, et al., 2017. Spatiotemporal variability of precipitation in landslide warning: A case study of Touzhaigou, Yunnan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 47(1): 154-162. (in Chinese with English abstract)
- YANG J Q, XU Z M, ZHANG R, et al., 2017. Formation and evolution of Emeishan basalt saprolite in vadose zones of Touzhai landslide source rockmass[J]. Journal of Mountain Science, 14(6): 1174-1184.
- YIN Y P, LI B, GAO Y, et al., 2025. Challenges and countermeasures of high-position and long-runout geological hazards in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 39(6): 986-992. (in Chinese)
- ZENG Q Y, PAN J P, SUN H Z, 2024. Smoothed particle hydrodynamics simulation of debris flow on deposition area[J]. Natural Hazards, 120(13): 12107-12136.
- ZHANG H, GAO Y, LI B, et al., 2022. Numerical simulation analysis of solid-liquid coupling process in composite landslides: A case study of Wushanping landslide[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 1104-1114. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG G, XU Q, LIU X W, et al., 2020. Characteristics and failure mechanism of the July 23, 2019 landslide-debris flow in Jichang Town, Shuicheng County, Guizhou[J]. Journal of Engineering Geology, 28(3): 541-556. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU G G D, NG C W W, SUN Q C, 2014. A new theoretical method for analyzing confined dry granular flows[J]. Landslides, 11(3): 369-384.

附中文参考文献

- 邓嘉农, 赵健, 1993. 头寨沟高速滑坡形成条件及特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, (3): 80-83.
- 高杨, 李滨, 冯振, 等, 2017a. 全球气候变化与地质灾害响应分析[J]. 地质力学学报, 23(1): 65-77.
- 高杨, 贺凯, 李壮, 等, 2020. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析[J]. 水文地质工程地质, 47(4): 14-23.
- 高杨, 殷跃平, 李壮, 等, 2022. 高位远程岩质滑坡动力解体效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 41(10): 1958-1970.
- 高杨, 殷跃平, 李滨, 等, 2023. 考虑颗粒状态转化的高位远程滑坡数值模拟方法[J]. 岩石力学与工程学报, 42(7): 1623-1637.
- 高杨, 尹浩栋, 陈福振, 等, 2026. 高位远程地质灾害多相态动力学数值模拟研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 37(1): 1-17.
- 胡厚田, 杨明, 2000. 头寨大型高速远程滑坡流体动力学机制的分析研究[C]//第六届全国工程地质大会论文集: 92-96.
- 李滨, 高杨, 庄宇, 等, 2025. 瑞士瓦莱州 Blatten 高位远程崩滑碎屑流成灾特征与级联放大效应[J]. 地球科学, 50(12): 4950-4969.
- 刘松涛, 高杨, 李滨, 等, 2025. 贵州纳雍龙家岩脚高位崩塌动力过程模拟研究[J/OL]. 水文地质工程地质, 1-15[2026-05-25].
- 唐川, 1991. 昭通头寨沟特大型灾害性滑坡研究[J]. 云南地理环境研究, (2): 64-71.
- 王黎明, 李军, 高杨, 等, 2025. 重庆万州椅头沟高位岩质崩滑碎屑流数值模拟分析[J/OL]. 中国地质灾害与防治学报, 1-15[2026-05-25].
- 王志兵, 申林方, 徐则民, 2016. 头寨滑坡地下水化学特征及其反映的水-岩(土)相互作用[J]. 水文地质工程地质, 43(1): 111-116.
- 邢爱国, 殷跃平, 2009. 云南头寨滑坡全程流体动力学机理分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 37(4): 481-485.
- 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 2007. 头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制[J]. 地质论评, 53(5): 691-698.
- 徐则民, 梅雪峰, 王礼荣, 等, 2017. 滑坡预警中的降水时空变异性——以云南头寨沟为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(1): 154-162.
- 殷跃平, 李滨, 高杨, 等, 2025. 青藏高原高位远程地质灾害面临的挑战与应对[J]. 中国科学基金, 39(6): 986-992.
- 张晗, 高杨, 李滨, 等, 2022. 复合型滑坡固液耦合过程数值模拟分析——以无山坪滑坡为例[J]. 地质力学学报, 28(6): 1104-1114.
- 郑光, 许强, 刘秀伟, 等, 2020. 2019年7月23日贵州水城县鸡场镇滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 28(3): 541-556.