DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.03

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

李昆仲[1], 张明哲[2], 邢爱国[2]
（1. 西藏自治区地质环境监测总站，西藏 拉萨 850001；
2. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室，上海 200240）

摘要：2018 年 10 月 17 日，西藏自治区雅鲁藏布江西岸色东普沟发生冰崩岩崩，冲刷侵蚀下部冰积堆积体和沟床松散堆积物，形成碎屑流冲入雅鲁藏布江，堆积后形成堰塞坝堵塞河道，严重影响当地居民安全和社会经济发展。本文基于真实遥感影像建立三维数值模型，利用 DAN^{3D} 分析其动力学特征，选取 Frictional-Voellmy 复合模型反演得到碎屑流堆积特征、滑体运动速度和铲刮深度等动力特征参数，与实际勘察结果基本一致，具有较好的可靠性。在野外勘察基础上，结合高密度电阻率法揭示了色东普沟崩滑-碎屑流堆积特征，结果表明 DAN^{3D} 能够较好地模拟滑体的堆积形态和最大厚度，验证了 DAN^{3D} 模拟的有效性，研究结论及方法对于此类灾害的机理研究及未来防治工程提供了新的研究思路。

关键词：色东普流域；冰崩；碎屑流；DAN^{3D}；高密度电阻率法
中图分类号：P642.21　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1003-8035(2021)01-0018-10

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

LI Kunzhong[1], ZHANG Mingzhe[2], XING Aiguo[2]
(1. *Geological Environmental Monitoring Station of Tibet Autonomous Region*, *Lhasa*, *Tibet* 850001, *China*;
2. *State Key Laboratory of Ocean Engineering*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: On October 17, 2018, a massive ice avalanche-debris flow occurred in the Sedongpu Basin on the left bank of the Yarlung Zangbo River in Tibet. The sliding mass scoured the glacial deposits and loose deposits in the gully bed and then transformed into a debris flow. Eventually, a barrier dam was formed and blocked the Yarlung Zangbo River, which seriously affected the safety of residents and social and economic development. In this paper, a three-dimensional numerical simulation of this event was performed based on remote sensing. A dynamic analysis (DAN^{3D}) model was utilized to analyze the dynamic characteristics of sliding mass, and the Frictional-Voellmy composite model was selected to reproduce debris flow accumulation characteristics, movement speed, and scraping depth. The simulation results are consistent with the actual survey results and have good reliability. Based on field investigation, the electrical resistivity tomography method was used to reveal the post-event accumulation characteristics of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu gully. The results showed that DAN^{3D} could well simulate the accumulation shape and maximum thickness of sliding mass, which verified the effectiveness of DAN^{3D} simulation. The results of the study can help forecast similar events and provide new research ideas for the mechanism research of such disasters for future prevention and control projects.

Keywords: Sedongpu Basin; iceavalanche; debris flow; DAN^{3D}; electrical resistivity tomography method

收稿日期：2020-09-18；**修订日期**：2020-09-25
基金项目：国家重点研发计划课题 (2018YFC1504804)；国家自然科学基金 (41530639)
第一作者：李昆仲 (1978-)，男，江苏东海县人，硕士，高级工程师，主要从事地质灾害研究。E-mail: 910949179@qq.com
通讯作者：张明哲 (1997-)，男，山东泰安人，博士研究生，主要从事高速远程滑坡灾害研究。E-mail: mingzhezhang@sjtu.edu.cn

0　引言

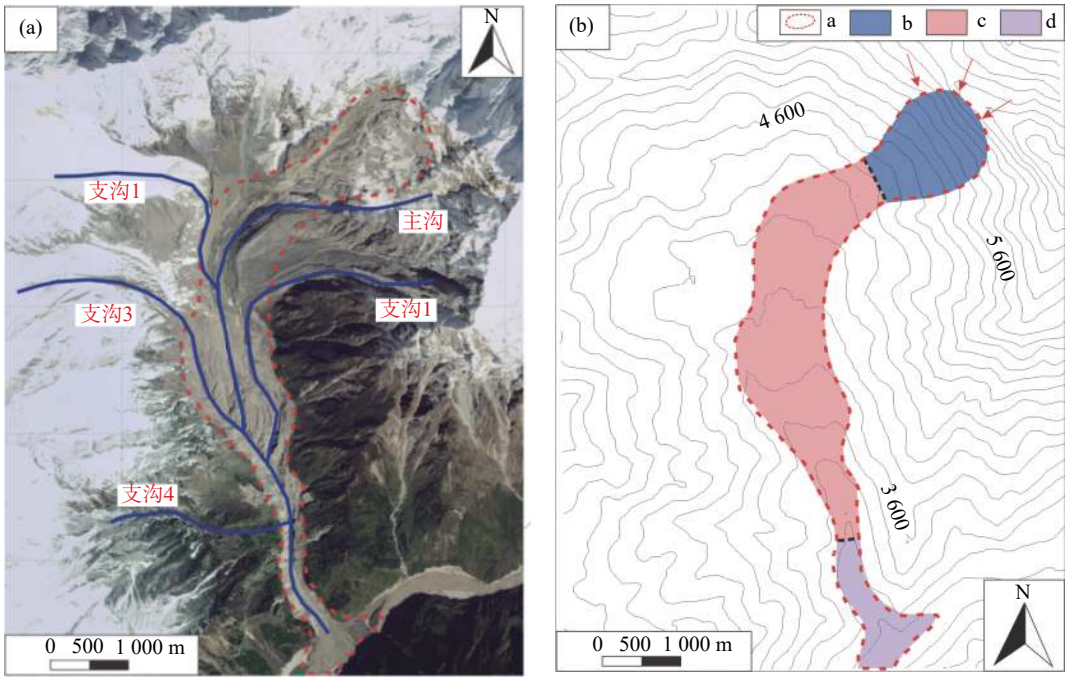
西藏自治区地质环境脆弱、地质结构复杂。区内超过 85% 的面积在海拔 4 000 m 以上，高山峡谷纵横、高陡斜坡发育。受地震活动、降雨和气候变暖等因素影响，近年来特大高位远程地质灾害频发，造成了重大的人员伤亡和财产损失[1－3]。西藏自治区是我国冰川面积最大的省区，冰川总面积 28 664 km^2，占全国冰川总面积的 48%[4]。气候变化导致冰川消融加速，冰崩灾害频发。冰崩启动时携带或在运动时铲刮裹入冰屑而形成特殊的含冰碎屑流，动力过程极其复杂，破坏能力较大，易引发碎屑物堵塞河道、冰湖溃决等次生灾害[5－8]。2018 年 10 月 17 日西藏自治区雅鲁藏布江西岸色东普沟 (N29°45′1.47″，E94°56′14.37″) 发生冰崩岩崩，冲刷侵蚀下部冰积堆积体和沟床松散堆积物，形成碎屑流冲入雅鲁藏布江，堆积后形成堰塞坝堵塞河道。上游回水严重威胁加拉村、直白村和赤白村公路水利设施、电力通讯设施和耕地等。堰塞坝溃决严重破坏了下游墨脱县、墨脱亚让水电站，16 600 人受灾，0.34 km^2 耕地受灾，7 km 公路受损，初步估算经济损失 3×10^8 元以上。

目前国内外对于色东普沟崩滑-碎屑流的研究主要集中在现场调查和滑坡机理研究等[9－11]，也有学者用色东普沟崩滑灾害引发的地震波信号分析灾害诱发历史及强度特征[12]。上述相关研究成果为本文提供了理论基础，但是针对色东普沟崩滑-碎屑流运动全过程的动力学研究较少。因此，本文在现场勘查基础上，利用 DAN^{3D} 软件反演了色东普沟崩滑-碎屑流运动全过程，分析其动力学特性，确定合理的数值分析流变模型和参数；通过物探解译结果验证数值模拟的可靠性，为数值分析流变模型及参数的校验提供了新途径。

1　色东普崩滑-碎屑流基本概况

1.1　研究区环境条件

色东普沟崩滑-碎屑流位于米林县派镇加拉村，雅鲁藏布江左岸色东普沟。该沟流域面积约 66.8 km^2，坡度大于 30°的流域面积占总面积的 61.6%；地形上呈陡-缓的地势，区域整体为南低北高，最高点位于流域北东侧，海拔 7 283 m，最低点位于沟道沟口处，海拔 2 750 m，沟域相对高差 4 533 m；冰川极为发育，终年冰川面积 23.6 km^2，约占流域面积的 35%。根据地形和沟域情况，共可划分 15 座冰川山峰，雪线海拔在 4 200 m 左右；沟域形态呈“树叶”状，由主沟和多条支沟组成，支沟中有 4 条较大的支沟，整个流域卫星图见图 1。米林县气候属高原温带半湿润季风气候区，崩滑-碎屑流暴发期间，日最高温度在 15 ℃ 左右，最低温度在−5 ~ 0 ℃(图 2a)，

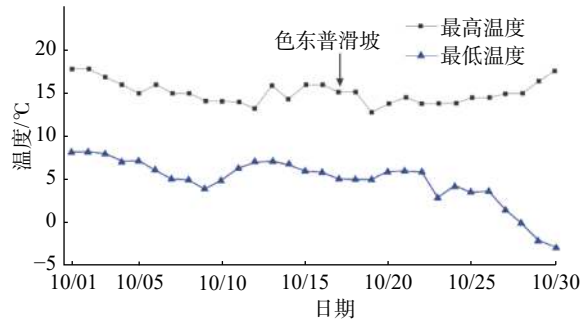


(a) 2018年10月31日研究区遥感影像图　　(b) 研究区地形图

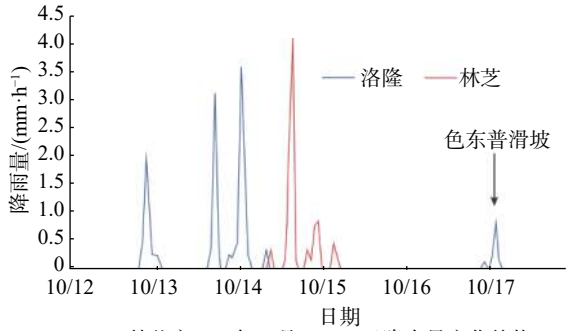
图 1　色东普沟崩滑-碎屑流地理位置

Fig. 1　Location of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin

a-滑体运动路径边界；b-崩滑区；c-流通区；d-堆积区红色箭头表示滑体的滑动方向



(a) 米林县2018年10月气候变化



(b) 林芝市2018年10月12—17日降水量变化趋势

图 2 色东普流域气温、降水变化曲线

Fig. 2 Temperature and precipitation variation in Sedongpu Basion

该温度范围有利于泥石流的暴发。区域内降雨多集中在 6—9 月份，色东普流域气象站显示，在 2018 年 10 月 17 日崩滑-碎屑流发生前 2—4 天出现过集中降水 (图 2b)。

2018 年 10 月 17 日该沟发生大规模崩滑-碎屑流灾害，堵断雅鲁藏布江干流并形成堰塞湖，泥石流冲出堆积量约 2.05×10^7 m^3。10 月 19 日 13 时 30 分左右堰塞体局地出现过流，20 日 9 时 50 分堰塞湖坝前水位基本恢复至灾前水位。

1.2 崩滑-碎屑流分区

根据色东普沟崩滑-碎屑流运动和堆积特征，将其分为崩滑区、流通区和堆积区(图 3)。

(1) 崩滑区：崩滑区面积约 52.42 km^2，海拔多在 4 000 m 以上，分布于冰川顶至下部冰斗、冰舌沟段，距离主沟约 1 ~ 3 km。上部冰川纵坡较陡，坡度多在 40° ~ 50°，坡顶可达 60°，该区长年冰雪覆盖，基岩出露，风化冻融冻胀作用强烈，易产生岩质崩塌，堆积在坡脚处；下部冰斗、冰舌处坡度在 15° ~ 25°，局部可达 8° ~ 10°，长期的冰水堆积作用形成厚度超过 10 m 的冰积和冰碛物源。在上部产生大规模的冰崩、雪崩或岩崩时，这类堆积物质被大量刨铲带走。该区主要为崩滑-碎屑流的形成汇集水源和提供水动力条件、物源条件。

(2) 流通区：该区位于沟道形成区以下至沟口堆积区以上，面积约 14.18 km^2，沟道长度 6.79 km，平均坡降 182‰。根据地形和沟道可分为上、下两段。

上段：为冰舌末端至冰蚀凹地前缘，长度 3.48 km，平均坡降 144‰，以冰水堆积为主。早期冰川退缩后，在冰蚀凹地处堆积大量的冰碛物，厚度超过 30 m，并形成小规模的冰湖。1 ~ 3 支沟及主沟上部的冰积物源，被冰雪及降雨携带，堆积在流通区上段冰蚀凹地内，形成上部宽度约 2.0 km，下部宽度约 1.0 km 的沟道堆积物源。近期，随着全球变暖冰川融化和降雨冲刷作用，原来堆积的固体物质大量被冲刷带走，亦形成泥石流的沟道固体物源。

下段：该段长度 3.31 km，地形较陡，平均坡降 222‰，为深切 V 型沟谷，沟道已可见基岩出露。在暴雨和泥石流的冲刷、侧蚀作用下，两岸坡脚堆积体不断被掏空，斜坡稳定性降低，最终发生垮塌，参与碎屑流活

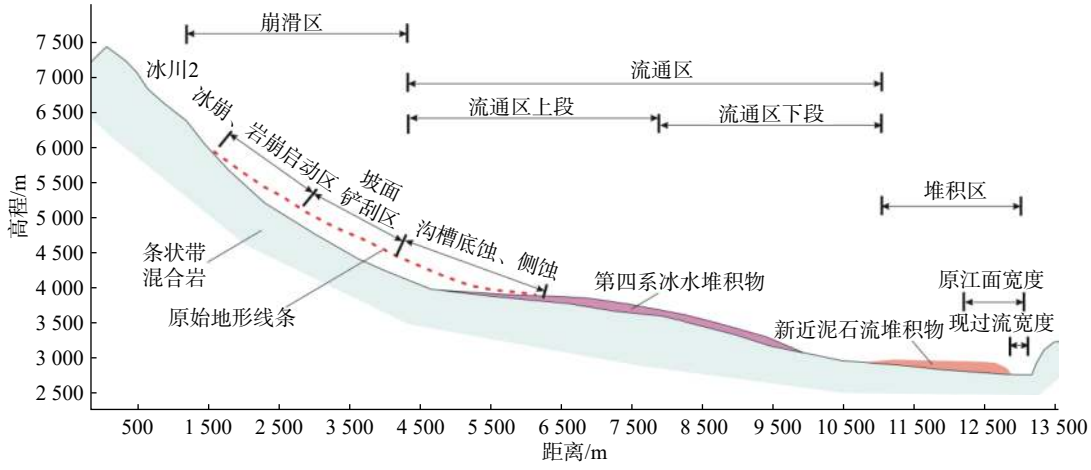


图 3 色东普沟主沟剖面图

Fig. 3 Longitudinal profile of the main gully in Sedongpu Basin

动。在经历过 2017 年和 2018 年两次特大规模的泥石流后，沟道两侧 150 ~ 250 m 范围内的绝大多数的固体物质，已被冲刷带走，两侧坡体已可见明显的基岩出露，沟床后期以冲刷底蚀作用为主。

(3) 堆积区：堆积体主要分布沟口附近，长度 2.0 km，宽度 0.6 km，堆积厚度 20 ~ 40 m，堆积体总体积 2.40×10^7m^3。目前，大部分仍堆积在沟口，未被水流冲刷带走。

2　崩滑-碎屑流动力学分析

2.1　DAN^{3D} 简介

DAN(Dynamic Analysis) 是加拿大学者 HUNGR[13] 开发的等效流体动力分析软件，是滑坡动力分析的重要工具之一，在高速远程滑坡模拟中已有较多的应用[14－16]，其基本思想是将滑体等效为连续介质流体模型，通过不同流变关系，设定滑坡的运动路径，模拟运动速度、时间、路程以及堆积体等特征。多项研究表明，Frictional 模型结合 Voellmy 模型能较好的模拟滑坡动力特征[17－19]，因此本文选用 Frictional-Voellmy 复合模型反演色东普沟崩滑-碎屑流的运动过程。

Frictional 方程假设抗剪强度 (τ) 与正应力 (σ) 有如下关系：

$$\tau = \sigma(1 - r_u)\tan\varphi \tag{1}$$

式中：r_u——孔隙水压力系数 (即孔隙水压力与基底正应力之比)；

φ——动摩擦角/(°)。

其中，孔隙水压力系数和动摩擦角之间有如下关系：

孔隙水压力系数 (r_u) 和动摩擦角 (φ) 可用综合摩擦角 (φ_b) 表示，即：

$$\varphi_b = \arctan(1 - r_u)\tan\varphi \tag{2}$$

Voellmy 模型假设滑体受到的阻力来源于摩擦力和湍流造成的阻力之和，表达式为：

$$\tau = \sigma f + \rho g v^2/\xi \tag{3}$$

式中：f——摩擦系数，等同于$\tan\varphi_b$；

ρ——滑体密度；

g——重力加速度；

v——滑体平均速度；

ξ——紊流系数，与碎屑流的运动速度和密度有关。

2.2　模型及参数选取

根据 1∶10 000 的比例尺生成的色东普沟崩滑-碎屑流数字高程模型如图 4 所示。通过试错反演，在崩滑区采用 Frictional 模型，流通区和堆积区采用 Voellmy 模型，反演得到一组最优计算参数如表 1 所示。

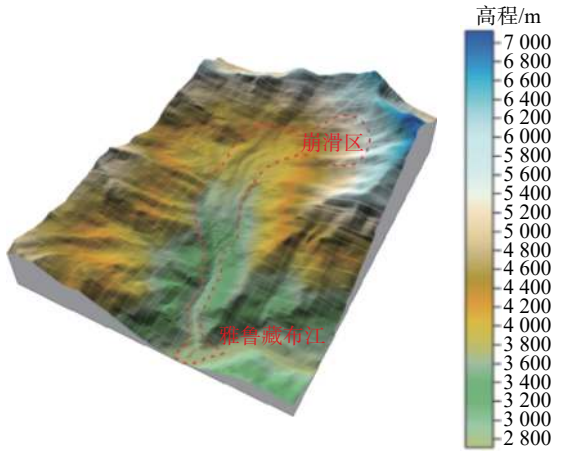


图 4　色东普沟崩滑-碎屑流数字高程模型

Fig. 4　Digital elevation model of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin

表 1　流变模型和计算参数

Table 1　Rheological model and simulation parameters

	模型	容重/(kN·m^{-3})	摩擦角/(°)	摩擦系数	湍流系数/m	内摩擦角/(°)	最大铲刮深度/m
崩滑区	Frictional	25	28	–	–	36	0
流通区	Voellmy	21	–	0.04	1 200	24	35
堆积区	Voellmy	21	–	0.05	1 000	24	17

2.3　DAN^{3D} 运动过程模拟结果

利用 DAN^{3D} 计算的色东普沟崩滑-碎屑流运动全过程如图 5。

模拟结果表明：色东普沟崩滑-碎屑流运动时长约 480 s，最远运动距离 10 000 m，平均运动速度 20.83 m/s。

0 ~ 30 s 阶段，上部冰川发生大规模的冰崩，并混杂岩崩。崩塌体启动后，沿 NE-SW 方向运动，铲蚀下部陡坡，坡面可见明显的冰川擦痕和沟槽。30 s 时滑体离开崩滑区，进入流通区。60 ~ 150 s 阶段，滑体运动于流通区上段，此段堆积有大量的冰碛物质，伴有小型冰水湖泊，滑体运动到该处时，将其全部冲刷带走。150 ~ 250 s 阶段，滑体运动于流通区下段，冲刷冰碛沟道物质和流通区两侧的固体物质，于 300 s 时运动至雅鲁藏布江河道。350 s 时，滑体前缘运动至河道对岸。至 480 s，滑体后缘停止运动，堆积形态不再变化，滑体停止运动。最终堆积形态如图 5(i)所示，堆积体大致呈扇形分布，最大堆积厚度 30 m，平均厚度 20 m，右岸堆积体最宽 1 200 m。DAN^{3D} 模拟得到的滑坡堆积范围与实际较为吻合。

崩滑-碎屑流模拟铲刮分布如图 6 所示，高程 3 200 ~ 4 200 m 位置处，铲刮深度较大，平均铲刮深度 20 m，最

大铲刮深度 35 m。现场调查发现，色东普沟高程 4 000 ~ 4 200 m 处，灾后坡面呈沟域形态，有明显切割，可见冰蚀擦痕，测量得实际铲刮深度为 20 ~ 40 m。在高程 3 100 ~ 4 000 m 之间，沟内无植被发育，堆积有大量泥、泥沙夹碎块石的沟道堆积物，灾后实际铲刮深度为 30 ~ 40 m。与图 6DAN^{3D} 模拟结果对比发现，模拟得到的铲刮分布与实际较为符合。

最大速度分布模拟结果如图 7 所示。崩滑区高程较大，崩滑-碎屑流启动后，巨大的势能转化为动能，滑体获得较快的速度，在地形转折处最大速度增加至 24 m/s (运动距离 2 000 m)。滑体进入流通区上段，地形坡度变缓，同时冲刷切割大量冰碛物质，运动速度降低，

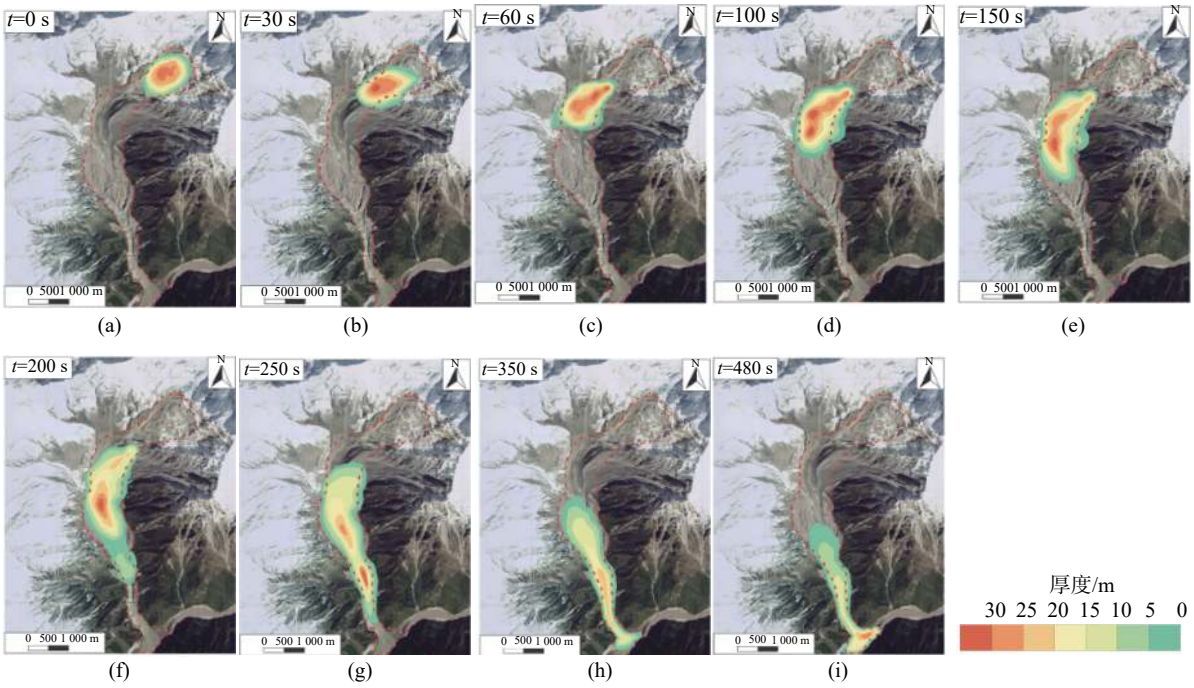


图 5　崩滑-碎屑流过程不同时刻滑坡堆积形态

Fig. 5　Time-lapse image of deposit distribution during the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin

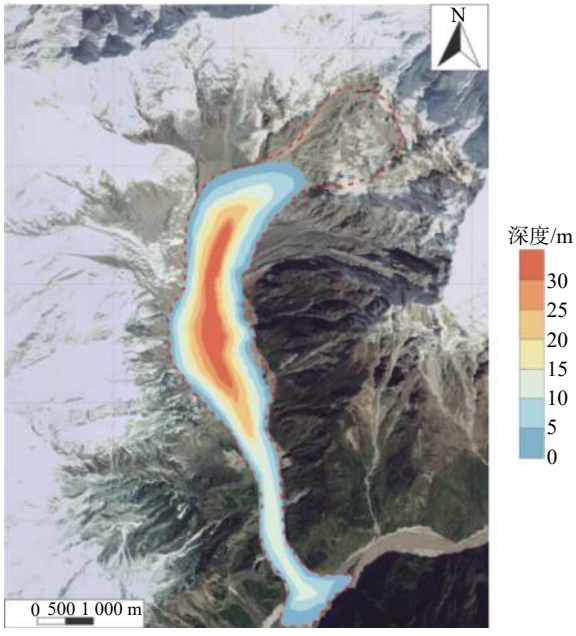


图 6　崩滑-碎屑流铲刮分布

Fig. 6　Scraping distribution of the ice avalanche-debris flow

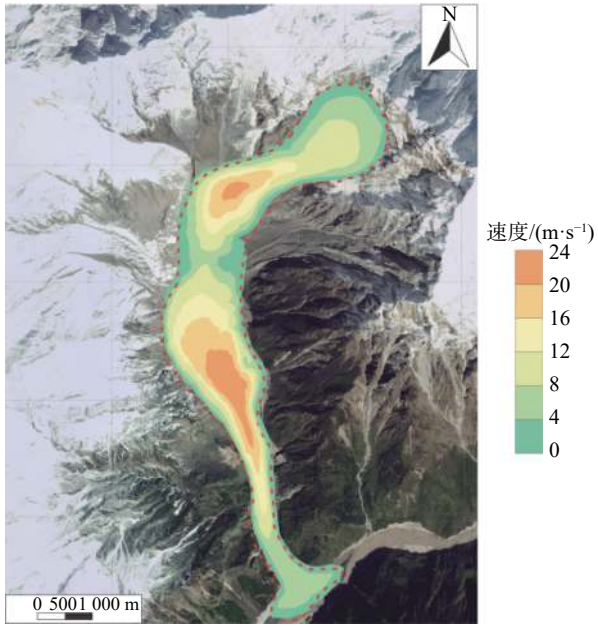


图 7　崩滑-碎屑流最大速度分布图

Fig. 7　Maximum velocity contour of theice avalanche-debris flow

最大速度降至 8 m/s(运动距离 4 500 m)。滑体进入流通区下段，坡度增加，运动速度再次增大，运动距离 6 500 m 处，最大速度达 24 m/s。进入堆积区后，沟道变宽，坡降变缓，泥石流流速逐步降低，直至冲入雅鲁藏布江停积。将 DAN^{3D} 模拟得到的速度分布与利用色东普沟崩滑-碎屑流地震波信号反演得到的运动速度[12]对比，发现二者较为吻合，证明了本次模拟的可靠性。

3　崩滑-碎屑流堆积物特征和内部构造的高密度电阻率法探测

物探是滑坡勘察的重要手段之一，为详细了解滑坡堆积物深度和内部结构，本文利用高密度电法 (Electrical Resistivity Tomography) 测量了 3 组纵向测线 (ERT1-ERT3) 和 4 组横向测线 (ERT4-ERT7)，根据电阻率的大小、形态、变化趋势，较为准确地确定了堆积物与基岩的边界。

3.1　测线布置

如图 8 所示，物探测线位于色东普沟崩滑-碎屑流的流通区与堆积区，共 3 条纵向剖面，4 条横剖面。物探测线采用 Wenner 电极阵列进行电阻率测量，利用 RES2Dinv 软件对电阻率数据进行反演分析[20]。

3.2　物探解译结果

横向测线 (ERT4-ERT7) 物探成果见图 9。结果显示：不同剖面的滑坡沉积物厚度不同，同一剖面不同位置处也不相同。ERT7 剖面表层电阻率较低，在 150 Ω·m 以内，推测为地表覆盖层、堆积层。地表低阻层以下岩体电阻率逐渐升高，整体在 2 000 Ω·m 以上，推测为较完整基岩。整条剖面堆积物深度变化不大，为 5 ~ 18 m，最大堆积物厚度位于距测线起点 400 m 处 (图 9a)；ERT6 剖面测量结果表明，该剖面表层电阻率在 300 Ω·m 以内，地表低阻层以下电阻率大于 2 000 Ω·m，堆积物的深度范围为 10 ~ 20 m，最大堆积物厚度位于距测线起点 180 m 处 (图 9b)；ERT5 剖面表层电阻率在 200 Ω·m 以内，地表低阻层下岩体电阻率整体在 2 000 Ω·m 以上，堆积物的深度范围为 5 ~ 15 m，最大堆积物厚度位于距测线起点 60 m 处 (图 9c)；ERT4 表层电阻率在 300 Ω·m 以内，地表低阻层下岩体电阻率整体在1 500 Ω·m 以上，堆积物的深度范围为 10 ~ 12 m，最大堆积物厚度位于距测线起点 50 m 处 (图 9d)。

图 10 为纵向测线 (ERT1-ERT3) 的物探成果，ERT1 剖面位于河道堆积区内，堆积物深度较大，深度范围为 10 ~ 29 m，最大堆积物厚度位于距测线起点 200 m 处 (图 10a)；ERT2 剖面位于流通区下段和堆积区，高程范围 2 750 ~ 3 000 m，堆积物深度范围为 5 ~ 40 m，最大堆积物厚度位于距测线起点 1 420 m 处 (图 10b)；ERT3 剖面堆积物深度范围为 10 ~ 19 m，最大堆积物厚度位于距测线起点 420 m 处 (图 10c)。

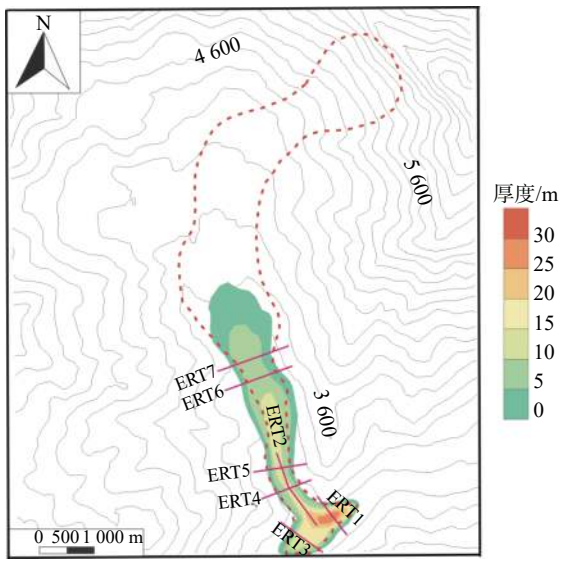


图 8　崩滑-碎屑流物探测线分布

Fig. 8　ERT survey lines distribution of the ice avalanche-debris flow

3.3　物探解译与 DAN^{3D} 模拟结果对比

DAN^{3D} 模拟得到的堆积物最终分布如图 8 所示，堆积物的平均深度 20 m，最大深度 30 m。物探解译与 DAN^{3D} 模拟结果对比见表 2 和图 11。如表 2 所示，DAN^{3D} 模拟与物探解译得到的最大碎屑流堆积厚度基本一致，在 ERT2 测线处有一定差异，相差 15 m，但在其他测线处较为吻合。如图 11 所示，DAN^{3D} 可以较好地模拟此次崩滑-碎屑流堆积形态分布，尽管由于 DAN^{3D} 模型将滑坡体视为了等效流体[21]，导致 ERT4 测线处，DAN^{3D} 模拟值偏大 2 ~ 4 m(图 11b)，堆积物深度被高估，但模拟的准确性仍然较高。

4　结论

本文针对 2018 年 10 月 17 日色东普崩滑-碎屑流，基于真实遥感影像建立三维数值模型，利用 DAN^{3D} 分析其动力学特征，在野外探测基础上，结合高密度电阻率法分析了滑体的堆积特征，得到如下结论：

(1) 利用动力学模型 DAN^{3D} 反演得到碎屑流堆积特征与滑体运动速度、铲刮深度等动力特征参数，发现 Frictional-Voellmy 复合模型具有很好的模拟效果，并通过反演试算给出最佳流变参数。结果表明，色东普沟崩滑-碎屑流运动时长约 480 s，最远运动距离 10 000 m，平均运动速度 20.83 m/s。通过对比，发现 DAN^{3D} 模拟得到的运动持续时间和速度变化与地震波反演结果基本

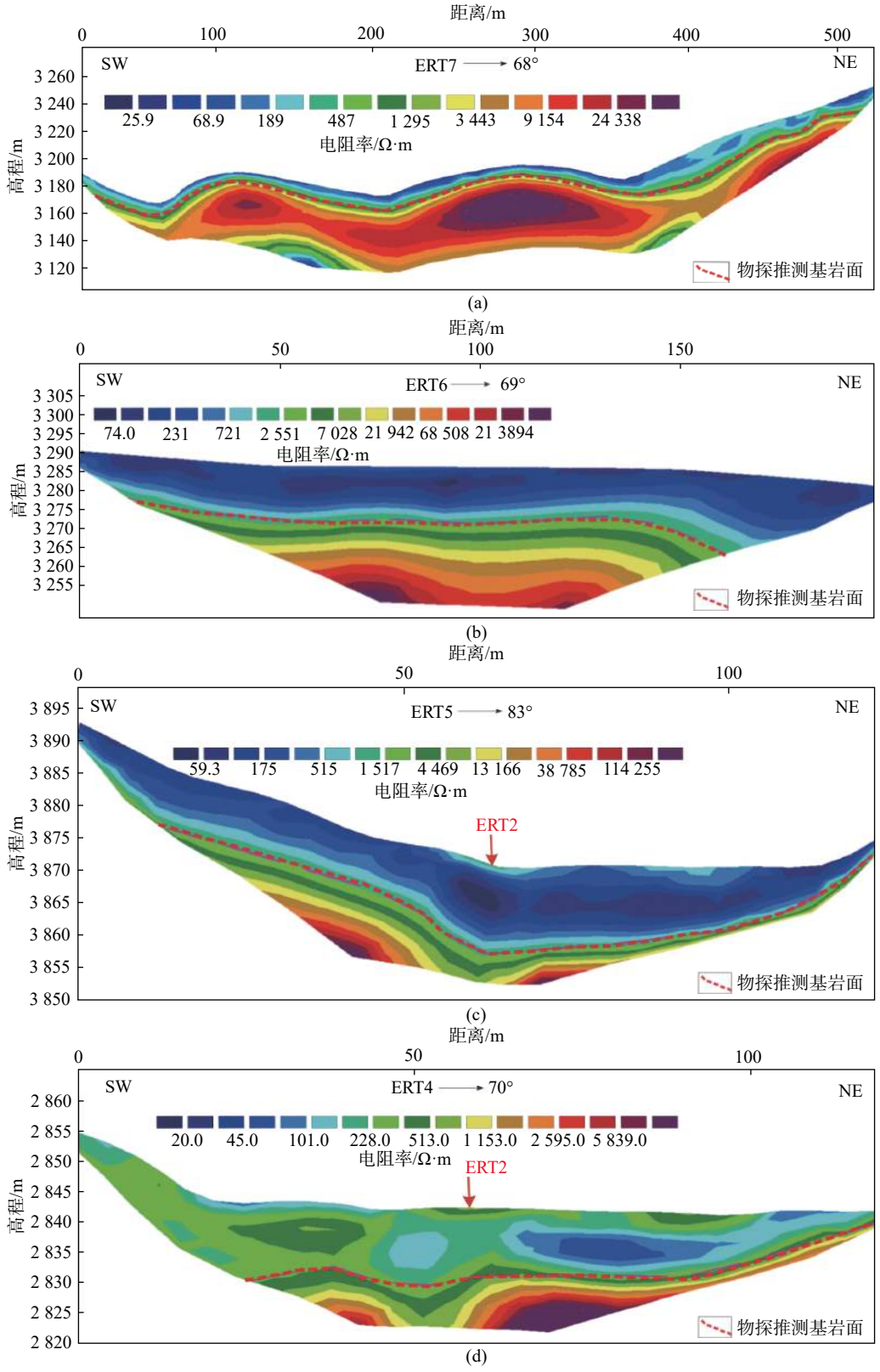


图 9 横向测线 (ERT4-ERT7) 物探成果图

Fig. 9 Transverse ERT profiles along the lines ERT4 to ERT7

一致，最终堆积分布与现场勘察结果基本一致，证明模拟结果具有较好的准确度。

(2) 在野外调查的基础上，结合高密度电阻率成像 (ERT) 技术，分析了滑体的堆积特征，对比 DAN^{3D} 模拟

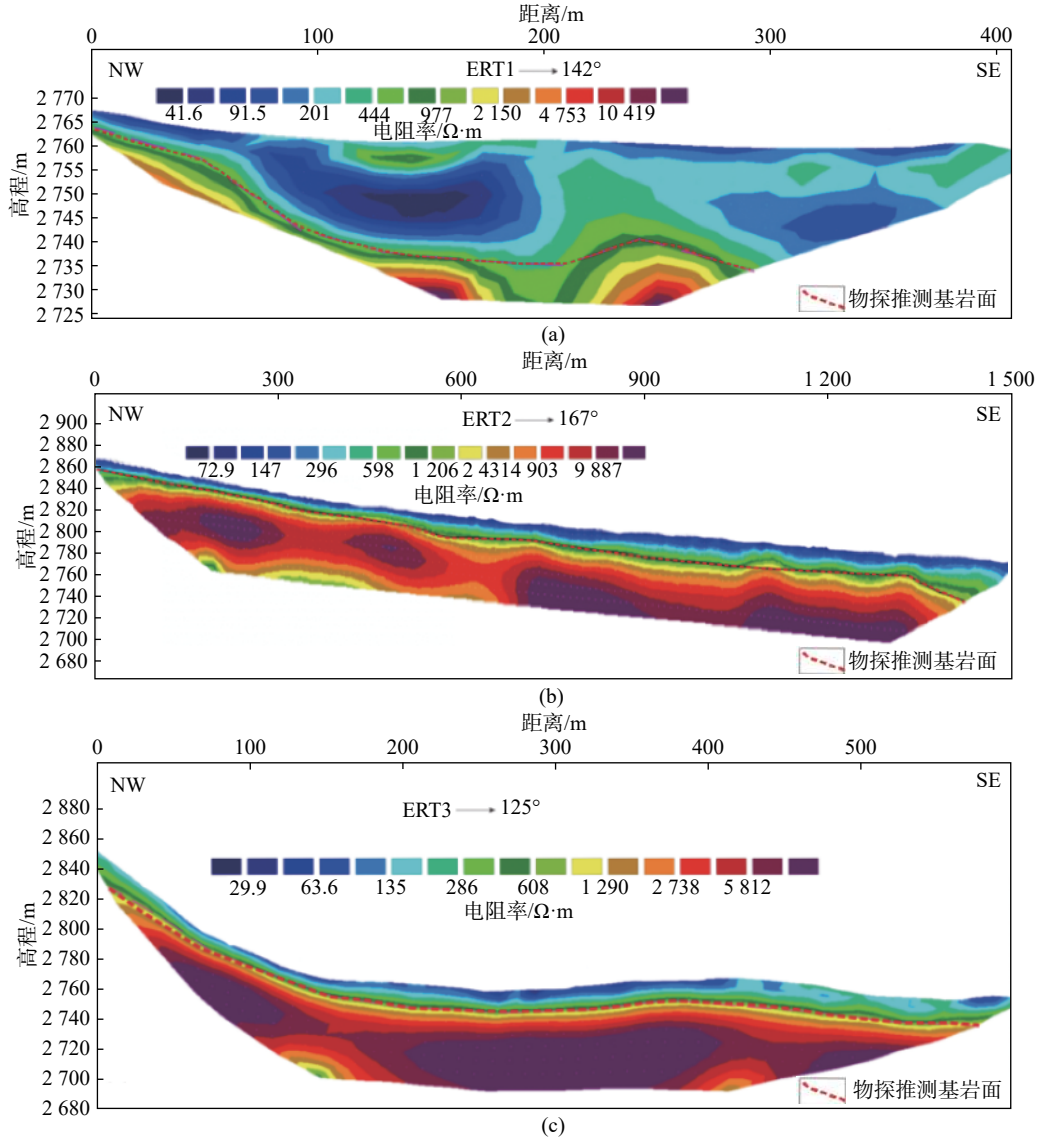


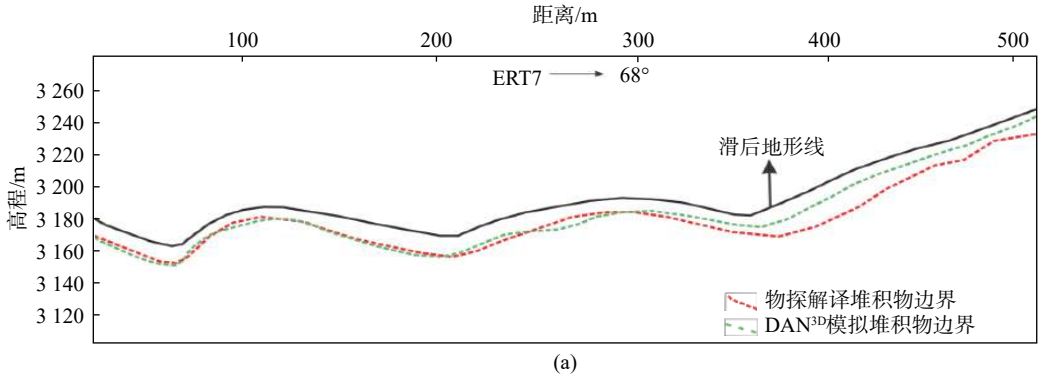
图 10　纵向测线 (ERT1-ERT3) 物探成果图

Fig. 10　Longitudinal ERT profiles along the lines ERT1 to ERT3

表 2　物探解译与 DAN^{3D} 模拟堆积物最大深度对比（单位: m）

Table 2　Comparison of the maximum deposition depth between the ERT method and DAN^{3D} simulation (Unit: m)

	ERT1	ERT2	ERT3	ERT4	ERT5	ERT6	ERT7
物探解译	29	40	19	12	15	20	18
DAN^{3D}模拟	30	25	20	15	15	10	10



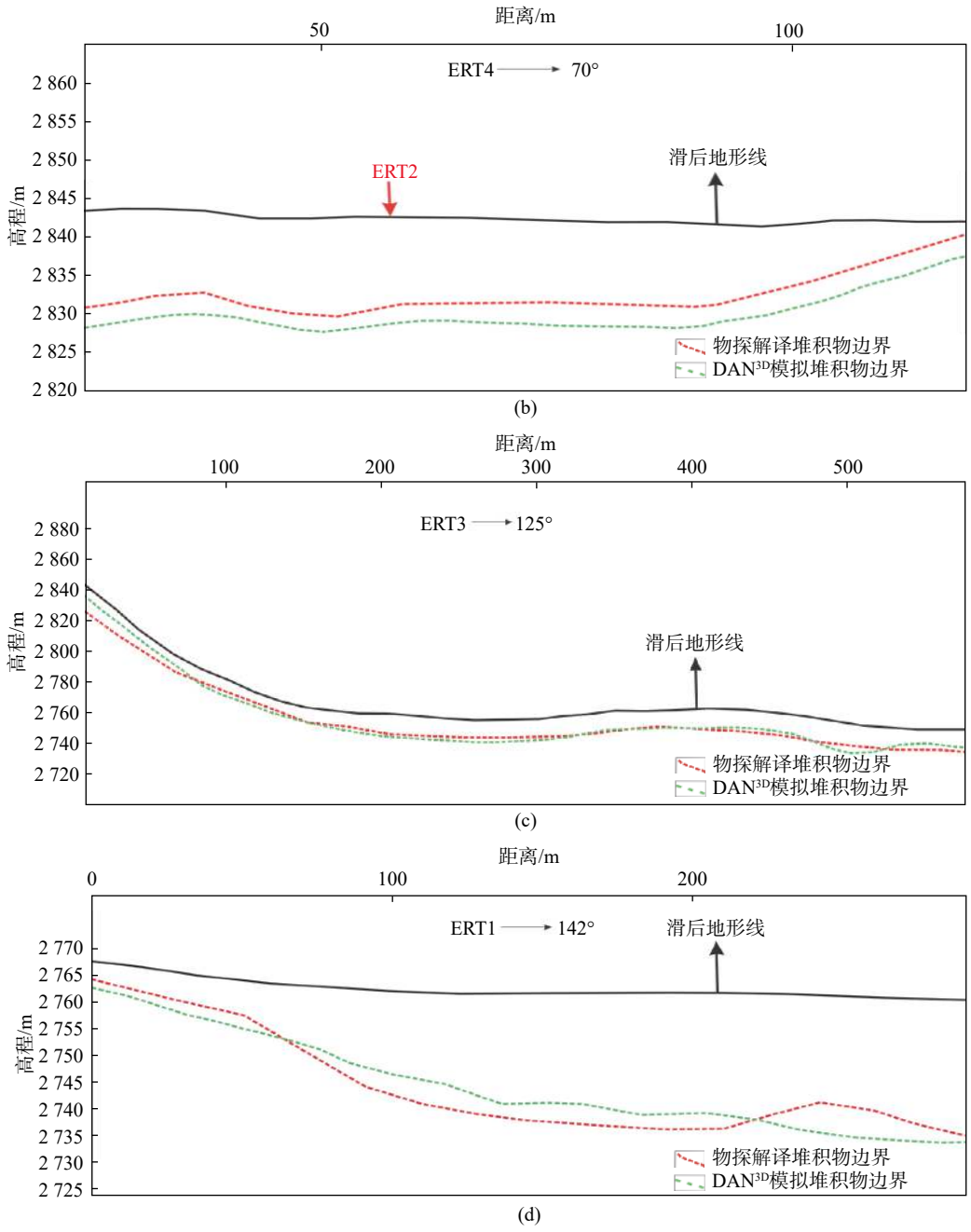


图 11 物探解译和 DAN^{3D} 模拟堆积物厚度对比

Fig. 11 Comparison of the landslide deposits depth from the ERT interpretation and DAN^{3D}

和物探解译得到的碎屑流堆积厚度，发现两种方法得到的滑坡碎屑流堆积厚度基本一致，模拟的准确性较好，研究结论及方法对于此类灾害的机理研究及未来防治工程提供了新的研究思路。

参考文献（References）：

[1] SHANG YJ, YANG ZF, LI LH, et al. A super-large landslide in Tibet in 2000: background, occurrence, disaster, and origin [J]. Geomorphology, 2003, 53: 225 − 243.

[2] YIN YP, XING AG. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock slide-debris avalanche, Tibet, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71: 149 − 160.

[3] CUI P, JIA Y. Mountain hazards in the Tibetan Plateau: research status and prospects [J]. National Science Review, 2015, 2(4): 397 − 402.

[4] 王宗太, 刘潮海. 中国冰川分布的地理特征 [J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 231 − 237. [WANG Zongtai, LIU Chaohai. Geographical characteristics of the distribution of

glaciers in China［J］. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 231－237.(in Chinese with English abstract)］

［5］ 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题［J］. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 985－992.［CUI Peng, JIA Yang, SU Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research［J］. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 985－992.(in Chinese with English abstract)］

［6］ 曾庆利, 杨志法, 尚彦军, 等. 川藏公路102滑坡群地段基覆界面问题研究［J］. 水文地质工程地质, 2008, 3: 1－6.［ZENG Qingli, YANG Zhifa, SHANG Yanjun, et al. Study on discontinuity between bedrock and quaternary covers in No.102 landslide group section of Sichuan-Tibet highway［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 3: 1－6.（in Chinese with English abstract)］

［7］ 胡文涛, 姚檀栋, 余武生, 等. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展［J］. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1141－1152.［HU Wentao, YAO Tandong, YU Wusheng, et al. Advances in the study of glacier avalanches in High Asia［J］. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1141－1152.（in Chinese with English abstract)］

［8］ 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究［J］. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534－1551.［XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on Octorber 11 and November［J］. Joumal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534－1551.(in Chinese with English abstract)］

［9］ 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究［J］. 中国地质, 2019, 46(2): 219－234.［LIU Chuanzheng, LYU Jietang, TONG Liqiang, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet［J］. Geology in China, 2019, 46(2): 219－234.（in Chinese with English abstract)］

［10］ 童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨［J］. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1552－1561.［TONG Liqiang, TU Jienan, PEI Lixin, et al. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi peak, Yarlung Zangho River［J］. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1552－1561.(in Chinese with English abstract)］

［11］ HU KH, ZHANG XP, YOU Y, et al. Landslides and dammed lakes triggered by the 2017 Ms6.9 Milin earthquake in the Tsangpo gorge［J］. Landslides, 2019, 16(2/3): 1－9.

［12］ WANG WP, YANG JS, WANG YB. Dynamic processes of 2018 Sedongpu landslide in Namcha Barwa –Gyala Peri massif revealed by broadband seismic records［J］. Landslides, 2020, 17: 409－418.

［13］ HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches［J］. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 610－623.

［14］ KEITH B. The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: Review, remote sensing analysis, and process modelling［J］. Geomorphology, 2015, 246(1): 377－393.

［15］ 戴兴建, 殷跃平, 邢爱国. 易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析［J］. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 1－8.［DAI Xingjian, YIN Yueping, XING Aiguo. Simulation and dynamic analysis of Yigong rockslide-debris avalanche-dam breaking disaster chain［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 1－8.（in Chinese with English abstract)］

［16］ 王国章, 李滨, 冯振, 等. 重庆武隆鸡冠岭岩质崩滑-碎屑流过程模拟［J］. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 101－106.［WANG Guozhang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Simulation of the process of the Jiguanling rock avalanche in Wulong of Chongqing［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 101－106.(in Chinese with English abstract)］

［17］ XING AG, YUAN XY, XU Q, et al. Characteristics and numerical runout modelling of a catastrophic rock avalanche triggered by the Wenchuan earthquake in the Wenjia valley, Mianzhu, Sichuan, China［J］. Landslides, 2017, 14(1): 83－98.

［18］ XING AG, WANG GH, LI B, et al. Long-runout mechanism and landsliding behaviour of large catastrophic landslide triggered by heavy rainfall in Guanling, Guizhou, China［J］. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(7): 971－981.

［19］ 张远娇, 邢爱国. 汶川地震触发牛圈沟高速远程滑坡-碎屑流动力学特性分析［J］. 上海交通大学学报, 2012, 46(10): 1665－1670.［ZHANG Yuanjiao, XING Aiguo. Dynamics analysis of Niujuanhou rockslide-debris flow triggered by Wenchuan earthquake［J］. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(10): 1665－1670.（in Chinese with English abstract)］

［20］ LOKE MH, BARKER RD. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method［J］. Geophysical prospecting, 1996, 44: 131－152.

［21］ XINGAG, WANG GH, YIN YP, et al. Dynamic analysis and field investigation of a fluidized landslide in Guanling, Guizhou, China［J］. Engineering Geology, 2014, 181: 1－14.