

引用格式: 高浩源, 高杨, 殷跃平, 等, 2022. 青藏高原高位远程滑坡动力学研究的新问题 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 1090–1103. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222831

Citation: GAO H Y, GAO Y, YIN Y P, et al., 2022. New scientific issues in the study of high-elevation and long-runout landslide dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1090–1103. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222831

青藏高原高位远程滑坡动力学研究的新问题

高浩源^{1,3}, 高杨^{1,3}, 殷跃平^{2,3}, 张田田^{1,3}, 万佳威^{1,3}

GAO Haoyuan^{1,3}, GAO Yang^{1,3}, YIN Yueping^{2,3}, ZHANG Tiantian^{1,3}, WAN Jiawei^{1,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081;

3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081

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

2. *China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*

New scientific issues in the study of high-elevation and long-runout landslide dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau

Abstract: The dynamic mechanism of high-elevation and long-runout landslides is always a tricky problem in geological disaster research. Due to the complex geological conditions in the Qinghai-Tibet Plateau, high-elevation and long-runout landslides show more complex and robust dynamic action, resulting in disaster chains of ultra-high elevation and ultra-long distance. The article presents a systematic review of the geological characteristics, physical model tests, and numerical analysis of three prominent dynamic effects of high-elevation and long-runout landslides in the Qinghai-Tibet Plateau, namely, dynamic fragmentation, dynamic erosion, and fluidization. Given the current research status of high-elevation and long-runout landslides in the Qinghai-Tibet Plateau, three significant aspects are proposed to be studied in the future: the mechanism of high-elevation and long-runout landslides in extreme geological environments, new methods for model tests based considering size effect, and basin-wide hazard chains induced by high-elevation and long-runout landslides.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; high elevation and long-runout landslide; dynamic effect; key scientific issues

摘 要: 高位远程滑坡动力学机理的研究一直是国际地质灾害领域的难点问题。在青藏高原, 由于地质条件复杂, 高位远程滑坡表现出更为复杂且强烈的动力作用, 出现超高位超远程的链式成灾模式。文章针对青藏高原高位远程滑坡所表现出的三种突出动力学效应——动力破碎效应、动力侵蚀效应以及流态化效应, 从地质特征调查、物理模型试验、数值分析三个层面进行了系统性的综述。针对青藏高原高位远程滑坡目前的研究现状提出了下一步要解决的三个关键科学问题: 极端地质环境下高位远程滑坡机理研究、基于尺寸效应的模型试验新方法研究和高位远程滑坡流域性灾害链研究。这些问题将为高位远程滑坡动力学机理的研究和服务工程建设中高位远程滑坡灾害的防灾减灾提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 高位远程滑坡; 动力学效应; 关键科学问题

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目 (42177172); 国家自然科学基金青年基金项目 (41907257); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221816)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.42177172), the Project of the National Natural Science Foundation of China for Young Scholars (Grant No.41907257), and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221816)

第一作者简介: 高浩源 (1995—), 男, 在读博士, 主要从事高位地质灾害动力成灾机理研究。E-mail: 952513795@qq.com

通讯作者: 高杨 (1989—), 男, 副研究员, 主要从事高位地质灾害动力成灾机理研究。E-mail: 737263992@qq.com

收稿日期: 2022-06-14; **修回日期:** 2022-09-22; **责任编辑:** 范二平

中图分类号: P642.22 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2022) 06-1090-14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222831

0 引言

高速远程滑坡具有运动速度快、冲击能量大、成灾范围广的灾害特征,一直是国际研究的前沿与热点问题,其中动力学理论是研究高位远程滑坡的难点与关键问题之一(胡广韬,1995;程谦恭等,2007;Hung,2007;殷跃平,2008;Iverson,2013;Xing et al.,2015;刘传正,2017;王玉峰等,2021)。自1881年Heim教授对Elm高速远程滑坡研究以来,学者们通过现场地质调查、物理模型理论与试验及物理力学分析、数值模拟等技术方法手段对高速远程滑坡进行了深入分析和探讨,运用了沉积学、地貌学、数学、传统力学、流体力学、地球物理学等多学科交叉融合,取得了丰硕的成果,使高速远程滑坡的研究取得了重大的突破和进展(Heim,1932;Müller,1964;Müller-Salzburg,1987;Kilburn and Petley,2003;Pinyol and Alonso,2010;Bistacchi et al.,2013;Boon et al.,2014;林棋文等,2021;Gao et al.,2022a;李坤等,2022;Xu et al.,2022)。其中包括对高速远程滑坡在运动过程表现出的超高速($>20\text{ m/s}$)、超远距离($>1\text{ km}$)的超常动力学特征研究,许多学者提出了各种机理和假说,有高速剪切液化、侵蚀裹挟、摩擦生热、圈闭空气润滑、无黏性颗粒流、能量传递等理论(Heim,1932;Kent,1966;Shreve,1968;Bagnold,1968;Takahashi,1978;Eisbacher,1979;Erismann,1979;Davies,1982);另有针对于高速远程滑坡计算动力学模型的研究,包括仍被广泛应用的库伦摩擦模型、Voellmy模型、雪橇模型等非数值模型(Voellmy,1955;Kozik,1962;Scheidegger,1973),Savage-Hutter(SH)模型、Denlinger和Iverson的基于深度平均的计算模型以及他们的改进模型等数值模型(Savage and Hutter,1989;Denlinger and Iverson,2004;Iverson,2012)。

但是在中国青藏高原,与普通高速远程滑坡不同的是,滑坡具有“高位”的特点,物源启动多在海拔5000 m以上,高差往往超过2500 m,具有极端的地势及地貌条件。这种“高位”的特点

使滑坡具有极大的势动转化空间,造成滑坡的运动速度极快,往往在 50 m/s 以上,远远超过了1995年国际地科联公布的 5 m/s 的速度(International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides,1995)。同时,巨大势能使滑坡的运动距离极大,往往超过几千米甚至十几千米,在如此长的运动过程中表现出超常且更为复杂的动力学特性,并且具有链式的成灾特点,极大地增强了滑坡的危险性,称为高位远程灾害链。殷跃平等(2017)首次提出“高位滑坡”(High-position landslide),指从高陡斜坡位置剪出并形成凌空加速坠落,坠落高差往往超过350 m,并容易转化为高速远程滑动的碎屑流或泥石流。中国青藏高原复杂的地质环境使高位远程滑坡极为发育,高位和远程的特点更为突出,动力学作用更为复杂,往往造成重大伤亡事件(殷跃平,2000;黄润秋,2007;程谦恭等,2007;崔鹏等,2017;殷跃平等,2017;Gao et al.,2020;Zhang et al.,2022)。

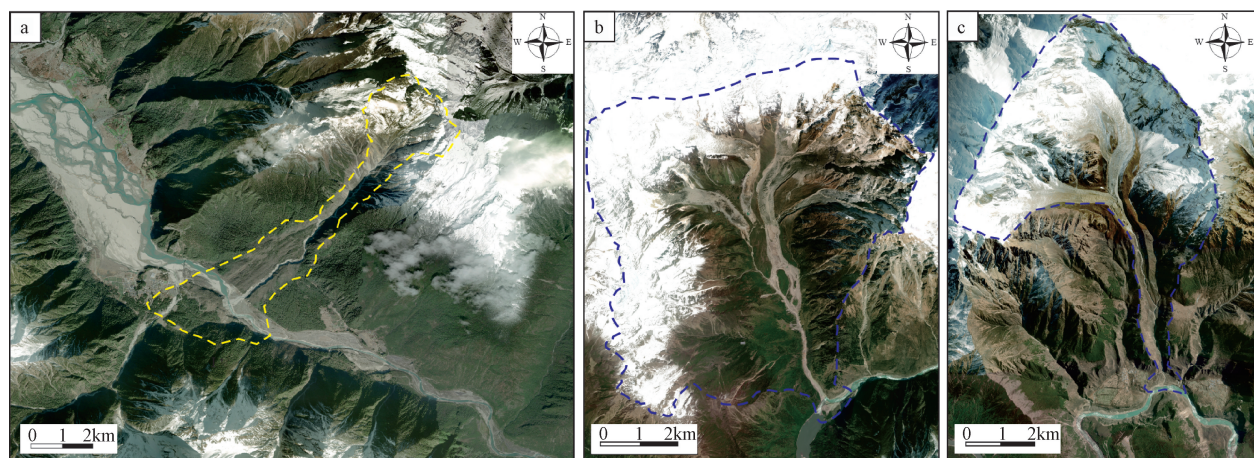
目前针对青藏高原的高位远程滑坡研究较少,所提出的理论与观点具有一定的片面性和非普适性,无法涵盖高位远程滑坡表现出的所有特性,这也与高位远程滑坡的特征复杂性、突发性、时空特殊性有关,亟待进一步深入研究。文章基于国内外对高位远程滑坡动力学已有的研究成果,针对青藏高原高位远程滑坡所表现出的三种主要动力学的特殊效应——动力破碎效应、动力侵蚀效应以及流态化效应进行了综述,并在此基础上讨论了目前存在的问题,提出了下一步要重点研究的关键科学问题。

1 青藏高原高位远程滑坡地质特征

青藏高原是全球大陆板块活动最强烈、构造隆升与剥蚀速度最快、强震发生频繁、气候变化影响显著的地区,也是全球巨型超高位超远程地质灾害最发育的地区之一(殷跃平,2000;张建平等,2001;张永双等,2016;崔鹏等,2017;彭建兵等,2020)。喜马拉雅造山带是青藏高原极其复杂的构造急变带,发生过多起灾难性超高位超远程崩滑碎屑流(丁林等,1995;钟大赉和丁林,

1996; 许志琴等, 2007; 高杨等, 2017; 李滨等, 2020; 彭双麒等, 2020)。2000 年 4 月 9 日, 雅鲁藏布江支流易贡藏布扎木弄沟发生超高位超远程巨型地质灾害, 滑坡体积 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 形成库容近 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的堰塞湖, 溃决洪水流量达 $12.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 灾害链摧毁了下游 318 国道和通麦大桥, 导致墨脱县城成为孤岛, 交通中断数月, 下游地区千人死亡, 50000 多人无家可归, 灾难举世罕见, 如图 1a 所示 (殷跃平, 2000; 刘铮等, 2020)。2018 年 10 月 17 日和 29 日, 雅鲁藏布江大峡谷色

东普沟两次发生高位崩滑碎屑流灾害链 (图 1b), 造成雅鲁藏布江两次堵江断流形成堰塞湖, 上游回水后严重威胁村镇的公路交通、电力通讯设施和耕地等, 堰塞坝溃决后导致下游形成洪水灾害, 最终导致上下游 33 个村庄被淹, 5000 余人受灾 (刘传正等, 2019)。1950 年和 1969 年, 西藏米林则隆弄沟曾两次发生超大规模的超高位山崩碎屑流 (图 1c), 运动距离达 9000 m, 坠落高差约 3000 m, 形成超远程运动成灾, 导致近百人死亡 (张文敬, 1985)。



a—易贡高位远程滑坡; b—色东普高位远程滑坡; c—则隆弄高位远程滑坡

图 1 青藏高原高位远程滑坡

Fig. 1 High-elevation and long-runout landslides in the Qinghai-Tibet Plateau

(a) The Yigong high-elevation and long-runout landslide; (b) The Sedongpu high-elevation and long-runout landslide; (c) The Zelongsong high-elevation and long-runout landslide

青藏高原的高位远程滑坡除具有高速远程滑坡体积巨大、运动速度极快、破坏范围极广的特点外, 还具有如下的重要特征。①地质条件极其复杂: 崩滑物源启动区多在海拔 5000 m 以上, 坠落高差多在 2500 m 以上, 具有极端的超高位启动的地形地貌前提; 构造运动强烈, 地震多发, 高陡斜坡多为震裂山体, 结构面发育, 整体强度低, 为高位远程滑坡的启动创造了有利条件; 崩滑体组成岩性复杂多变, 岩体为板岩、片麻岩、片岩等变质岩材料, 同时, 因崩滑源区发育海拔高, 多发于多年冻融的冰川之上, 崩滑体多为冰岩的混合物, 地质演化过程中不断被风化、剥蚀、挤压和冻融, 冰岩体强度低。②具有链式成灾特征, 成灾规模巨大: 超高位启动和超远距离运动会造成次生灾害效应, 使地质灾害出现链式的成灾特征。链式成灾是指从上游灾害启动源区一直到运动和下游堆积过程中形成地质灾害的运动转化的

完整链条, 包括滑坡 (崩塌、冰崩、雪崩) - 碎屑流 - 泥石流等, 也指灾害链基础上向下游延伸形成的次生灾害, 包括滑坡 (崩塌、冰崩、雪崩) - 碎屑流 - 泥石流 - 堰塞坝 - 堰塞湖溃决山洪 - 侧蚀次生滑坡等。地质灾害链的形成使高位远程滑坡具有极端的成灾规模, 滑体体积超过千万立方米, 甚至上亿立方米, 运动距离超过几千米, 甚至十几千米, 最终堆积在青藏高原的深切峡谷中, 形成堵江洪水灾害链, 导致灾害规模成倍放大, 并且具有周期性反复发生特征。③动力作用复杂且强烈: 高位远程滑坡高位启动后, 具有岩、冰、碎屑混合材料的“固-粒-流”逐级流化特征。巨大的高差使冰岩完整块体在运动过程中碰撞破碎, 使滑体碎屑化为类颗粒状态, 出现强烈的动力破碎效应, 同时侵蚀运动路径上的岩土体, 体积不断增加, 出现动力侵蚀效应。岩体破碎为颗粒后, 在超高速运动过程中表现出类流体的运动特征,

出现流态化效应。此外,在运动过程中有动力逐级加载、弯道超高、冲击气浪等动力学效应,多种动力学效应同时存在,使高位远程滑坡表现出复杂且强烈的动力学特征,最终发生超远程运动堆积,形成堵江、堰塞湖、洪水灾害链。

2 动力学效应及研究进展

青藏高原复杂的地质特征使高位远程滑坡运动过程中具有复杂的动力学效应,其中动力破碎效应、动力侵蚀效应、以及流态化效应尤为突出,

是各研究学者亟待解决的科学问题之一(图2)。动力破碎效应使滑坡碎屑化,出现超远距离运动特征(Davies and Mcsaveney, 1999; De Blasio and Crosta, 2015);冲击侵蚀效应使滑坡的体积放大,甚至几倍于滑坡体积(Takahashi, 1981; Yin et al., 2009, 2017; Yin and Xing, 2012; 高杨等, 2020, 2022a);流态化效应使滑坡类似于流体运动,底部摩擦阻力降低,出现超高速的运动特征(Hutchinson and Bhandari, 1971; Iverson, 1997; Sassa et al., 2004; Gao et al., 2017; 高杨等, 2019)。下文将从三种动力学效应进展进行综述。

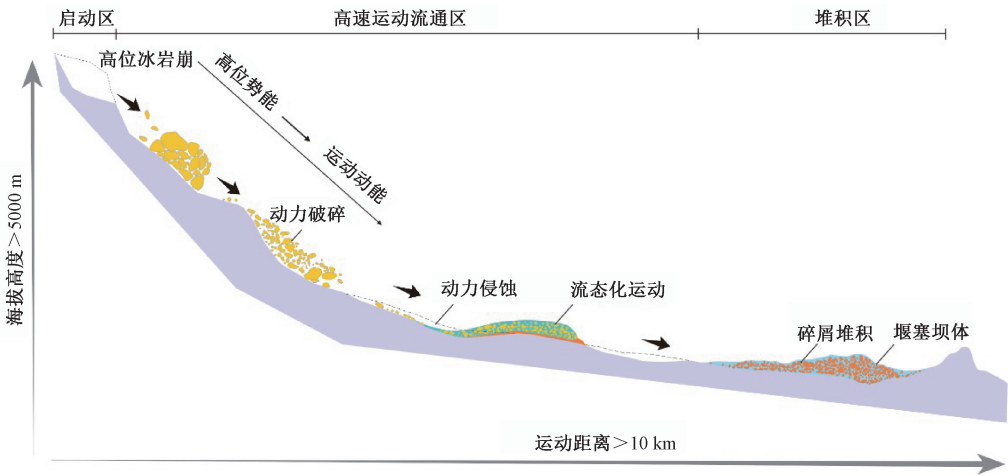


图2 高位远程滑坡动力作用概化图

Fig. 2 Generalized diagram showing the dynamic action of a high-elevation and long-runout landslide

2.1 动力破碎效应

动力破碎效应是高位远程滑坡的重要动力效应之一,是指滑坡在失稳后在自重作用或外部作用力下自身结构发生改变,由完整块体逐渐碎屑化的动力过程。国际上已有大量对于动力破碎效应的研究(Davies and Mcsaveney, 1999; Dufresne and Dunning, 2017; 林棋文等, 2021; Gao et al., 2022b)。“破碎”一词描述了此效应的核心动力行为,国际上描述的词汇有“disintegration”“crushing”“fragmentation”等,都体现了滑体完整性逐渐降低的特性(Erismann and Abele, 2001; Pollet and Schneider, 2004; Bowman, 2014)。许多研究表明,动力破碎普遍存在于高位远程滑坡的运动中,使完整岩体破碎跨越几个数量级,且随着尺寸的不断减小,滑坡体积不断膨胀,被认为是呈现超远距离运动的原因之一(Davies and Mcsaveney, 1999; Locat et al., 2006; Crosta et al., 2007; Dufresne and Dunning, 2017; 高杨等,

2022b)。

对于动力破碎效应的研究主要采用地质特征调查、模型试验及数值模拟三种方法。由于高位远程滑坡运动中的破碎现象很难被捕捉,主要采用沉积学特征的地质调查。通过现场调查,发现了“反粒序”“拼贴构造”以及“层序保留”三种揭示动力破碎的地质现象。在调查中发现,高位远程滑坡堆积物表面常以大块石为主,而在堆积物下部主要以碎石、角砾等细颗粒为主,被称为“反粒序”特征(Cruden and Hungr, 1986; Zhang et al., 2016)。这种“反粒序”特征受到很多学者的关注,被认为是由于高位远程滑坡在运动过程中动力破碎效应导致内部结构出现差异性分选的结果(Cruden and Hungr, 1986; Strom, 1994, 2006; McSaveney et al., 2006)。通过更多的调查研究,许多学者还运用沉积学理论,根据滑坡堆积体竖向的粒径分选和内部结构差异对其进行了分层分带,具体分为堆积体上部的壳层

(carapace facies)、中部的主体层 (body facies) 以及下部的基底层 (basal facies), 以此来揭示动力破碎效应的内在机理 (Pollet et al., 2004; Wassmer et al., 2004; Dunning, 2006; 王玉峰等, 2012; Weidinger et al., 2014; Dufresne et al., 2016; Wang et al., 2019)。此外, 在地质调查中还发现了拼贴构造和层序保留特征, 也为动力破碎的研究提供了地质证据 (Heim, 1932; Takarada et al., 1999; Dunning, 2004; Hewitt, 2009; Dufresne, 2009; Perinotto, 2015; Dufresne et al., 2016)。

模型试验由于其试验条件可控性、操作易行性、试验可重复性, 而成为研究动力破碎效应的有效方法之一。Imre et al. (2010) 通过离心试验装置, 对破碎现象进行了试验研究, 结果表明动力破碎效应能够解释干碎屑流的远程运动现象。刘涌江 (2002) 通过岩体的高速碰撞模型试验研究了破碎后的加速运动效应。Bowman et al. (2012) 以煤颗粒为试验材料, 运用土工离心机试验装置模拟真实滑坡的动力破碎过程, 对雪崩模型的破碎程度进行了量化, 并对峰值冲击速度、运动距离等进行了详细分析, 结果显示运动距离、冲击速度与颗粒破碎程度相关, 认为动力破碎是高位远程滑坡高机动性的重要过程。Zhang and Mcsaveney (2017) 通过环剪试验对不同加载条件下的剪切破碎特征进行了分析, 认为破碎程度受到正应力及剪切应变、剪切速率的影响。

20 世纪 90 年代以来, 数值模拟技术在研究动力破碎细观结构、内在机制、动力过程方面涌现出大量的研究成果, 为动力破碎的研究提供了技术支持。Davies and Mcsaveney (1999) 建立了快速分析块体的动力学连续模型, 对岩崩的破碎化运动过程进行了动力学模拟。Langlois et al. (2015) 利用离散元方法来模拟二维岩石块体的垮塌破碎现象, 模拟结果呈现明显的反粒序堆积结构, 并且随破碎程度的改变, 运动距离逐渐增加, 并指出破碎流粒径减小促进了流动性。Rait et al. (2012) 模拟岩石块体在不同应变率下的压缩破碎过程, 发现动力破碎受加载速率影响, 更大的速率导致有效应力降低, 滑体减阻运动。Estep and Dufek (2013) 同样运用离散元方法模拟了密集态颗粒流运动过程中的力链变化。Kafui and Thornton (2000) 模拟了冲击作用下的破碎过程, 表明冲击

速度及结构强度对于破碎过程有显著影响。Lin et al. (2021) 用 PFC^{3D} 软件对不同结构形式的块体在撞击和滑动下进行了模拟, 表明了 DEM 模型在裂缝扩展、速度分布、层序保留方面与模型试验结果一致。Zhao et al. (2017, 2018) 同样通过离散元方法, 对简单块体及节理岩块进行了动态破碎过程及特征研究, 并进行了细观分析, 指出破碎强度与初始能量及运动坡角相关, Weibull 分布函数可以很好地拟合碎屑的尺寸分布。

2.2 动力侵蚀效应

高位远程滑坡在复杂地形的地面上以极高的速度运动过程中, 与运动路径上的岩土体发生强烈的相互作用, 导致基底物质被滑坡侵蚀、裹挟, 引起滑坡的规模增大、破坏能力增强, 同时, 被裹挟的基底物质进入滑体, 改变了原有物质组成, 影响滑坡的流动性, 改变滑坡的运动速度和堆积范围, 这种作用为动力侵蚀效应 (Iverson et al., 2011; Dufresne, 2012)。碰撞、推动、裹挟、冲刷等作用方式, 都属于动力侵蚀的范畴 (Stiny, 1910; Takahashi, 1978; Hungr and Evans, 2004; Crosta et al., 2009)。在青藏高原发生的高位远程滑坡由于体积巨大, 动力侵蚀效应尤为强烈, 可以使滑坡体积成倍增大。

国内外动力侵蚀作用机理研究是目前热点之一, 作为使滑坡体积放大的动力效应, 可以使灾害的危害性呈指数增长, 对于高位远程滑坡的风险评估有着重要意义。野外地质特征调查是发现、认识侵蚀特征以及提出新问题的基础。Stiny (1910) 首次描述了碎屑流滑坡运动中的侵蚀作用。Takahashi (1981) 对比研究了源区与堆积体积, 发现动力侵蚀作用可以使滑坡体积增加几个量级。Abele (1997) 对动力侵蚀基底层材料性质进行了研究, 发现无论基底材料处于何种状态 (干燥或饱和), 侵蚀总会存在, 且会增大滑坡体积。Breien (2008) 记录了挪威一次冰川湖溃决, 提出了一种滑体与基底的正反馈效应, 动力侵蚀会导致滑坡体积增大, 同时滑坡体积增大会使动力侵蚀更加强烈。Dufresne et al. (2010) 基于对新西兰滑坡的地质调查, 同样讨论认为基底物质侵蚀对高位远程滑坡运动有着重要影响。Berger (2011) 用传感器测量了三起滑坡的侵蚀作用时间和侵蚀深度, 发现侵蚀最先发生于前缘, 并且颗粒间的碰撞可以加剧前缘的侵蚀作用, 然后在底

部发生,同时侵蚀深度逐渐增加。Doyle et al. (2011)对东爪哇塞梅鲁火山滑坡进行了实地勘测,并对体积进行了估算,发现侵蚀只集中发生在某一个区域。

很多研究人员同样运用模型试验研究动力侵蚀效应,取得了大量的成果认识,进而推动了动力侵蚀效应的研究。Rickenmann (2003)在哈萨克斯坦进行了泥石流现场试验,发现侵蚀量随体积方量的增大而增大。Papa et al. (2004)通过水槽试验,研究了基底层含沙量对侵蚀速率的影响,发现侵蚀速率随泥石流含沙量的变化而变化,但侵蚀速率随泥沙粒径的增大而减小。ManGeney et al. (2010)进行了斜面颗粒流动试验,研究了厚度及滑面倾斜角度对侵蚀的影响,结果表明即使在极薄的基底层中,侵蚀也能增大流动性,且流动距离基底层与侵蚀厚度呈正相关。Iverson et al. (2011)进行了28组大型物理模型试验,研究了坡度、饱和度、材料性质、运动路径形状、流量等因素对侵蚀的影响,指出孔隙压力等增加可以增强侵蚀,减少基底摩擦力,导致流速、质量和动量增加。Dufresne (2012)采用1:104比例尺的煤球进行了小尺寸模型试验,对比了厚度、有无侵蚀的运动堆积形态,发现厚度会增加堆积距离,侵蚀会改变流动形态。

动力侵蚀会增大滑坡体积,如何去计算侵蚀体积是研究动力侵蚀的关键问题,目前数值模拟成为主流的研究技术方法。最初在1978年,Takahashi引入了巴格诺德膨胀流体概念,利用剪应力与基底阻力,建立了计算局部静止的侵蚀层深度、速度和浓度的模型。随后数值模拟的研究方法一直在改进和更新中。Hung (1995)对DAN软件进行了改进,基于拉格朗日方法实现了高位远程滑坡运动过程中的质量变化,模拟了加拿大两个实际案例,讨论了侵蚀机理,提出了侵蚀率的定义。随后,出现了大量数学和力学模型的研究。Iverson and Denlinger (2001)基于深度平均建立了假三维数学模型,考虑固液相力,对无量纲标度参数进行了评估。Pitman et al. (2003)将材料运动性质影响纳入建模中,建立了描述可侵蚀面上干质量流的偏微分方程数学系统。Denlinger and Iverson (2004)基于库仑摩擦的连续介质质量和动量守恒方程以及颗粒间应力的产生,研究了颗粒碎屑流在不规则三维地形中的运动。随着计算机

科学的发展,许多研究学者开发了数值软件对侵蚀进行模拟求解。McDougall and Hungr (2005)利用开发了基于连续介质的DAN^{3D}数值模拟软件,反演模拟了一系列滑坡,结果表明侵蚀可以使滑体体积、流动运动性增加。Chen et al. (2006)提出了新的屈服速率概念,并建立了滑体与侵蚀层之间的侵蚀关系的数学模型。Crosta et al. (2007)采用2D有限元方法模拟了瑞士Villeneuve滑坡,针对于侵蚀层的材料性质提出了三种不同模式:饱和、坚硬、平推。Armanini et al. (2009)开发了二维有限元软件TRENT-2D,研究了无黏性流侵蚀与沉积问题。Bouchut et al. (2008)提出了建立在能量传递和质量交换基础上的一维数学模型。何思明 (2008)运用了Hertz理论分析了滚石冲击碰撞压力对撞击土体屈服特性。Iverson et al. (2011)建立了基于库仑摩擦的三维侵蚀模型,将滑坡分为滑体、侵蚀层、基底层,以流体力学角度求解侵蚀效应。李祥龙 (2012)利用PFC^{2D}软件模拟了基底侵蚀效应对碎屑流堆积过程的影响。Chen and Zhang (2015)基于深度平均的方法开发了可以模拟侵蚀与堆积的数值软件EDDA。陆鹏源等 (2016)采用离散元颗粒流方法(PFC^{3D})对滑坡-碎屑流运动过程中对松散基底物质的冲切铲刮效应进行数值模拟。殷跃平和王文沛 (2020)基于滑块-弹簧模型和犁耕阻力模型,提出一种适用于滑坡动力侵蚀过程计算的犁切模型,可定量计算动力侵蚀过程中滑坡体积增量。高杨等 (2022a)运用弹塑性力学方法推导了冲击铲刮变量的计算公式。

2.3 流态化效应

在不同的国际滑坡分类标准中,高位远程滑坡统一被归类为流态化滑坡(flow-like landslide)(Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Hung et al., 2014)。高位远程滑坡在失稳后的高速运动阶段,其运动特征呈现出“流动”而非“滑动”,超高流动性代表滑坡运动速度极,往往超过20 m/s,甚至达到每秒数百米。这种类似于流体的流态化效应是高位远程滑坡动力学研究的重要问题之一,国内外学者针对流态化效应开展了大量的研究工作,提出了多种不同类型的机理假说以解释其超常的流动特性,包括颗粒流理论、机械流态化理论、声波流态化理论、振动流态化理论等等,但仍存在大量的问题与争论(Hsü, 1975; Melosh,

1979; Davies, 1982; Campbell, 1989; Preuth et al., 2010)。在青藏高原, 由于高差巨大, 运动速度极快, 甚至达到每秒数百米, 流态化效应更加明显。

其中现场地质现象作为流态化的重要依据, 广大学者对于高位远程滑坡的地质特征开展了大量研究。最早 Heim (1932) 首次提出了滑坡运动中的流态化的特点, 对高速远程滑坡流态化运动进行了描述, 指出滑坡在运动过程中以流动形式运动, 并非滑动。大量学者发现堆积体的形态可以反映出流态化特征, 如堆积体形态呈舌形或扇形, 堆积体边缘凸起的裙边、边缘堤、侧向脊、终端脊等 (Evans et al., 2007; Wang et al., 2018)。另外一些学者则从运动路径、运动特征入手, 寻找滑坡的流态化效应的地质证据。Plafker (1978) 研究了1970年秘鲁Yugay城滑坡, 高差超过4000 m, 滑坡的流态化效应使整个滑坡覆盖了超过8 km²。中国云南1991年头寨滑坡, 调查发现滑带存在明显擦痕, 由于强烈的高速摩擦, 滑面附近产生高温并使滑带水汽化, 滑坡出现流态化运动 (胡厚田和杨明, 2000)。Evans et al. (2009) 对2002年俄罗斯科卡滑坡展开了研究, 该滑坡以流动状态运动了19 km, 最大速度达到65~80 m/s, 导致冰川从其河床上分离。2010年中国贵州关岭大寨高速远程滑坡, 沟谷中产生地表径流, 形成饱水下垫面, 导致了滑坡呈流动状态, 流动距离和速度显著增加 (殷跃平等, 2010)。许多学者在现场发现了运动路径上的淤泥层或饱水冲积层, 认为在快速剪切的作用下会产生超孔隙水压力, 出现液化效应, 使滑坡出现流态化运动特征 (Seed, 1968; Sassa, 1989)。这些地质特征是流态化运动的关键地质证据。

基于模型试验方法的流态化效应研究同样有大量的研究成果。Hsü (1975) 对Elm滑坡进行了斜槽试验, 对其高流动性进行模拟, 得出高流动性与运动速度呈正相关关系。Okura et al. (2002) 等通过滑槽试验监测滑体压实度和孔隙水压力的变化来研究滑体的流化过程。Moriwaki et al. (2004) 建立了23 m长、8 m高的滑槽, 试验选用粒径较大的砂砾, 发现并没有产生流态化现象。一些研究者认为高位远程滑坡具有明显的“规模尺寸效应”, 即只有当滑坡体积大于10⁶ m³时, 滑坡的运动才具有明显的流态化特征。为了克服尺

寸效应, Iverson et al. (2010) 在长95 m、宽2 m的滑槽中做了28组大型模拟试, 该试验已经能够模拟堆积物的形状或运动速度变化情况等基本特征, 但是却无法模拟它的流态化效应机制。Pudasaini et al. (2005) 在滑槽试验中引入并使用“PIV”测量技术来测量不透明颗粒的速度变化, 研究流态化与速度的关系。Cagnoli and Romano (2010) 用弯曲的滑槽试验来研究滑坡的流动机理, 表明碎屑颗粒粒径越小, 流态化效应越明显。王玉峰等 (2016) 利用自行设计旋转式剪切流变装置, 对滑坡运动过程中底部气流的裹入减阻特性开展了试验研究。Gao et al. (2022b) 利用滑槽试验对流态化效应中拖曳力进行了研究, 发现液体体积分数对流态化有重要影响。

数值模拟技术也是研究流态化的有效手段。Voellmy (1955) 将流态化的滑坡等效为流体运动, 在库仑摩擦的基础上考虑了湍流的影响, 提出了Voellmy流体模型。基于Voellmy模型, 很多学者在此基础上做出了改进与修正 (Salm, 1966; Grigoryan and Ostroumov, 1972; Hungr, 1995)。Johnson and Rodine (1984) 考虑到流态化效应中的塑性和黏性属性, 采用Bingham模型来描述流态化滑坡的运动。Savage and Hutter (1989) 同样滑坡视为具有库仑摩擦且不可压缩的连续流体, 用深度平均方法来描述均质流体的运动, 被称为SH模型, 并被学者广泛地应用。Takahashi (1981) 引入了Bagnold (1954) 的扩散流体模型, 建立了流态化的颗粒惯性流模型。对于流态化效应的研究, 许多专家学者注意到流态化的过程中固体和液体的相互作用对于流态化过程数值模拟有着重要影响。Iverson and Denlinger (2001) 基于流体力学的三维混合模型, 考虑了固相和流相的体积分数和速度, 用来分析固液两相流态化滑坡的运动过程。Pitman and Le (2005) 建立了考虑固液两相的双流体模型, 后来学者在此基础上考虑了流体力学中的拖曳力 (Drag force) 和升力 (Lift force) 的作用, 对模型进行了改进。George and Iverson (2011) 为研究流态化过程中的固液体积分数、孔隙流体压力、流动深度和速度的变化, 建立了一个两相流数值模型。Zhao (2014) 利用DEM-CFD耦合模拟研究了水下滑坡的运动过程, 发现颗粒数量的增多也会使滑坡流态化增强。由于流态化效应内在的物理过程十分复杂, 固体与流体间的

性质差异作用,至今没有一种方法得到广泛认可。

3 青藏高原高位远程滑坡动力学面临的新问题

高位远程滑坡一直是工程地质研究领域的前沿性科学,而动力学则是高位远程滑坡研究的关键与难点。在青藏高原,高位远程滑坡的动力作用由于复杂的地质条件变得尤为强烈,多种动力作用耦合发生,使高位远程滑坡的动力效应更为复杂多变。随着国内外学者研究逐渐深入、细致、全面,高位远程滑坡的许多未解之谜也逐渐得到解答,但对青藏高原的高位远程滑坡的研究仍处于起步阶段,对超高位超远程滑坡动力学行为、动力学特征以及动力学机理,现阶段的研究远远不足,还需要进一步完善。青藏高原高位远程滑坡的研究难点在于,此地区高位远程滑坡具有复杂极端的地质条件,构造强烈,岩性复杂,气候极端,人类无法涉足,高位远程滑坡体积巨大,时空上具有突发性和不可重复性,为动态监测、地质调查及物理模型试验带来了巨大困难;复杂的地质条件使高位远程滑坡具有复杂且多样的动力学效应,动力破碎效应、动力侵蚀效应、流态化效应、摩擦生热减阻效应、振动液化效应等等的耦合作用下,表现出复杂的动力学特征,同时,高位远程滑坡具有链式灾害特征,不仅滑坡本身带来的危险性极大,其次生的链式灾害,如溃坝、洪水灾害同样对地质安全造成重大危险。基于以上,提出以下亟待解决的关键科学问题。

(1) 极端地质环境下高位远程滑坡机理研究

在青藏高原,极端的地质环境条件给研究带来了巨大困难。岩性复杂,存在岩体、冰川、冰碛物等多种混合材料,并且在运动过程中存在相态的转变,属于多相多态的物质。因此,青藏高原高位远程滑坡的动力学属性的定义需要明确,是开展高位远程滑坡动力机理的研究前提。

(2) 基于尺寸效应的模型试验新方法研究

高位远程滑坡的体积巨大,能达到千万或上亿立方米,为研究带来了极大困难。尽管学者针对高位远程滑坡做了多组大型物理模型试验,但研究发现尺寸效应仍对高位远程滑坡的研究有着重要影响(Iverson et al., 2010)。尺寸效应可能导致某些关键物理过程的缺失,甚至试验结果与真实的滑坡可能存在明显偏差,对试验结果可信性

有重要影响。如何对体积方量巨大、运动距离超远的滑坡开展足尺模型试验,或研究新的试验方法,减小甚至消除尺寸效应的影响,还原高位远程滑坡的运动过程,是开展模型试验研究的关键科学问题。

(3) 高位远程滑坡流域性灾害链研究

青藏高原地区高位远程滑坡具有明显的链式反应,不仅是高位远程滑本身,其次生的堵溃、洪水灾害同样对重大工程建设有极大危害。因此,研究青藏高原高位远程滑坡的链式灾害效应,建立青藏高原超高位超远程滑坡极其灾害链的精细化定量计算模型,计算包括高位远程滑坡速度、能量、体积、运动距离、运动路径、堆积范围,以及灾害链的堰塞湖体积、溃决流量、洪水影响范围等等关键指标,评估高位远程滑坡潜在危险性,是研究高位远程滑坡的另一关键科学问题。

4 结论

高位远程滑坡动力学一直是国内外研究的热点问题,专家学者对高位远程滑坡存在的“未解之谜”进行了详尽的调查与深入的研究,通过多样的技术手段,多角度的深入剖析,多学科交叉融合,取得了丰硕的研究成果,超常动力学效应的“神秘面纱”也逐渐被揭开。但是,在青藏高原,地质条件极端,构造强烈,岩性复杂,气候极端,链式成灾,动力作用尤为复杂,对超高位超远程灾害链的研究仍处于起步阶段,需要进一步研究。文章对青藏高原高位远程滑坡三种突出的动力学效应,动力破碎效应、动力侵蚀效应、流态化效应,分别从地质特征调查、模型试验、及数值模拟三个方面进行了总结,对国内外专家学者从初始至今的主要研究成果进行了论述,在此基础上提出了下一步需要解决的关键科学问题:极端地质环境下高位远程滑坡机理研究;基于尺寸效应的模型试验新方法研究;高位远程滑坡流域性灾害链研究。希望为高位远程滑坡动力学机理的研究和青藏高原重大工程建设提供科学依据。

References

- ABELE G, 1997. Rockslide movement supported by the mobilization of groundwater-saturated valley floor sediments [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 41 (1): 1-20.

- ARMANINI A, FRACCAROLLO L, ROSATTI G, 2009. Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels [J]. *Computers & Geosciences*, 35 (5): 993-1006.
- BAGNOLD R A, 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 225 (1160): 49-63.
- BAGNOLD R A, 1968. Deposition in the process of hydraulic transport [J]. *Sedimentology*, 10 (1): 45-56.
- BERGER C, MCARDELL B W, SCHLUNEGGER F, 2011. Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116 (F1): F01002.
- BISTACCHI A, MASSIRONI M, SUPERCHI L, et al., 2013. A 3D geological model of the 1963 Vajont landslide [J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 6: 531-539.
- BOON C W, HOULSBY G T, UTILI S, 2014. New insights into the 1963 Vajont slide using 2D and 3D distinct-element method analyses [J]. *Géotechnique*, 64 (10): 800-816.
- BOUCHUT F, FERNÁNDEZ-NIETO E D, MANGENEY A, et al., 2008. On new erosion models of Savage-Hutter type for avalanches [J]. *Acta Mechanica*, 199 (1-4): 181-208.
- BOWMAN E T, TAKE W A, RAIT K L, et al., 2012. Physical models of rock avalanche spreading behaviour with dynamic fragmentation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 49 (4): 460-476.
- BOWMAN E T, 2014. Dynamic rock fragmentation: thresholds for long runout rock avalanches [J]. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 8 (30): 7-13.
- BREIEN H, DE BLASIO F V, ELVERHØI A, et al., 2008. Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, western norway [J]. *Landslides*, 5 (3): 271-280.
- CAGNOLI B, ROMANO G P, 2010. Effect of grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: an experimental determination [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193 (1-2): 18-24.
- CAMPBELL C S, 1989. Self-lubrication for long runout landslides [J]. *The Journal of Geology*, 97 (6): 653-665.
- CHEN H, CROSTA G B, LEE C F, 2006. Erosional effects on runout of fast landslides, debris flows and avalanches: a numerical investigation [J]. *Géotechnique*, 56 (5): 305-322.
- CHEN H X, ZHANG L M, 2015. EDDA 1.0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes [J]. *Geoscientific Model Development*, 8 (3): 829-844.
- CHENG Q G, ZHANG Z Y, HUANG R Q, 2007. Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report [J]. *Journal of Mountain Science*, 25 (1): 72-84. (in Chinese with English abstract)
- CROSTA G B, FRANTTINI P, FUSI N, 2007. Fragmentation in the Val Pola rock avalanche, Italian Alps [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112 (F1): F01006.
- CROSTA G B, IMPOSIMATO S, RODDEMAN D, 2009. Numerical modelling of entrainment/deposition in rock and debris-avalanches [J]. *Engineering Geology*, 109 (1-2): 135-145.
- CRUDEN D M, HUNGR O, 1986. The debris of the frank slide and theories of rockslide-avalanche mobility [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23 (3): 425-432.
- CUI P, JIA Y, FENG S H, et al., 2017. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32 (9): 985-992. (in Chinese with English abstract)
- DAVIES T R H, 1982. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization [J]. *Rock Mechanics*, 15 (1): 9-24.
- DAVIES T R H, MCSAVENEY M J, 1999. Runout of dry granular avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 36 (2): 313-320.
- DE BLASIO F V, CROSTA G B, 2015. Fragmentation and boosting of rock falls and rock avalanches [J]. *Geophysical Research Letters*, 42 (20): 8463-8470.
- DENLINGER R P, IVERSON R M, 2004. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 1. Theory and computation [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 109 (F1): F01014.
- DING L, ZHONG D L, PAN Y S, et al., 1995. Fission track evidence of rapid uplift since Pliocene in the eastern Himalaya tectonic junction [J]. *Chinese Science Bulletin*, 40 (16): 1497-1500. (in Chinese)
- DOYLE E E, CRONIN S J, THOURET J C, 2011. Defining conditions for bulking and debulking in lahars [J]. *GSA Bulletin*, 123 (7-8): 1234-1246.
- DUFRESNE A, 2009. Influence of runout path material on rock and debris avalanche mobility: field evidence and analogue modelling [D]. Christchurch: University of Canterbury.
- DUFRESNE A, DAVIES T R, MCSAVENEY M J, 2010. Influence of runout-path material on emplacement of the round top rock avalanche, New Zealand [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (2): 190-201.
- DUFRESNE A, 2012. Granular flow experiments on the interaction with stationary runout path materials and comparison to rock avalanche events [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37 (14): 1527-1541.
- DUFRESNE A, BÖSMEIER A, PRAGER C, 2016. Sedimentology of rock avalanche deposits-case study and review [J]. *Earth-Science Reviews*, 163: 234-259.
- DUFRESNE A, DUNNING S A, 2017. Process dependence of grain size distributions in rock avalanche deposits [J]. *Landslides*, 14 (5): 1555-1563.
- DUNNING S A, 2004. Rock avalanches in high mountains-a sedimentological approach [D]. Luton: University of Luton.
- DUNNING S A, 2006. The grain size distribution of rock-avalanche deposits in valley-confined settings [J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1: 117-121.
- EISBACHER G H, 1979. Cliff collapse and rock avalanches (sturzstroms) in the Mackenzie Mountains, northwestern Canada [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 16 (2): 309-334.
- ERISMANN T H, 1979. Mechanisms of large landslides [J]. *Rock*

- Mechanics, 12 (1): 15-46.
- ERISMANN T H, ABELE G, 2001. Dynamics of rockslides and rockfalls [M]. Berlin; Springer.
- ESTEP J, DUFEK J, 2013. Discrete element simulations of bed force anomalies due to force chains in dense granular flows [J]. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 254: 108-117.
- EVANS S G, GUTHRIE R, ROBERTS N, et al., 2007. The disastrous 17 February 2006 rockslide-debris avalanche on Leyte Island, Philippines; a catastrophic landslide in tropical mountain terrain [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 7 (1): 89-101.
- EVANS S G, TUTUBALINA O V, DROBYSHEV V N, et al., 2009. Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002 [J]. Geomorphology, 105 (3-4): 314-321.
- GAO Y, LI B, FENG Z, et al., 2017. Global climate change and geological disaster response analysis [J]. Journal of Geomechanics, 23 (1): 65-77. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2017. Characteristics and numerical runout modeling of the heavy rainfall-induced catastrophic landslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, China, following the Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. Landslides, 14 (4): 1361-1374.
- GAO Y, WEI T Y, LI B, et al., 2019. Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20th, 2015 in Shenzhen, China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 46 (1): 129-138, 147. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, LI B, GAO H Y, et al., 2020. Dynamic characteristics of high-elevation and long-runout landslides in the Emeishan basalt area; a case study of the Shuicheng "7.23" landslide in Guizhou, China [J]. Landslides, 17 (7): 1663-1677.
- 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 [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 510-519. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, GAO H Y, LI B, et al., 2022a. Experimental preliminary analysis of the fluid drag effect in rapid and long-runout flow-like landslides [J]. Environmental Earth Sciences, 81 (3): 93.
- GAO Y, GAO H Y, LI B, et al., 2022a. Study on calculation method of landslide impact and scraping variable [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 39 (1): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, YIN Y P, LI B, et al., 2022b. The role of fluid drag force in the dynamic process of two-phase flow-like landslides [J]. Landslides, 19 (7): 1791-1805.
- GAO Y, YIN Y P, LI Z, et al., 2022b. Study on the dynamic disintegration effect of high position and long runout rock landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41 (10): 1958-1970. (in Chinese with English abstract)
- GEORGE D L, IVERSON R M, 2011. A two-phase debris-flow model that includes coupled evolution of volume fractions, granular dilatancy, and pore-fluid pressure [J]. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 43: 415-424.
- HE S M, LI X P, WU Y, 2008. Research on yield property of soil under rock-fall impact [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, (S1): 2973-2977. (in Chinese with English abstract)
- HEIM A, 1932. Bergsturz und menschenleben [M]. Vancouver; Bi-Tech Publishers.
- HEWITT K, 2009. Catastrophic rock slope failures and late Quaternary development in the Nanga Parbat-Haramosh Massive, Upper Indus basin, northern Pakistan [J]. Quaternary Science Reviews, 28 (11-12): 1055-1069.
- HSÜ K J, 1975. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls [J]. Geological Society of America Bulletin, 86 (1): 129-140.
- HU G T, 1995. Landslide dynamics [M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- HU H T, YANG M, 2000. Analysis and study on the hydrodynamic mechanism of Touzhai large-scale high-speed long-range landslide [C] //Proceedings of the 6th National Conference on Engineering Geology. Nanning: Geological Society of China: 92-96. (in Chinese)
- HUANG R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26 (3): 433-454. (in Chinese with English abstract)
- HUNGR O, 1995. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J] Canadian Geotechnical Journal, 32 (4): 610-623.
- HUNGR O, EVANS S G, 2004. Entrainment of debris in rock avalanches; an analysis of a long run-out mechanism [J]. Geological Society of America Bulletin, 116 (9-10): 1240-1252.
- HUNGR O, 2007. Dynamics of rapid landslides [M] //SASSA K, FUKUOKA H, WANG F W, et al. Progress in Landslide Science. Berlin: Springer: 47-57.
- HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L, 2014. The Varnes classification of landslide types, an update [J]. Landslides, 11 (2): 167-194.
- HUTCHINSON J N, BHANDARI R K, 1971. Undrained loading, a fundamental mechanism of mudflows and other mass movements [J]. Géotechnique, 21 (4): 353-358.
- HUTCHINSON J N, 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology [C] //International symposium on landslides. 5. 1988: 3-35.
- IMRE B, LAUE J, SPRINGMAN S M, 2010. Fractal fragmentation of rocks within sturzstroms: insight derived from physical experiments within the ETH geotechnical drum centrifuge [J]. Granular Matter, 12 (3): 267-285.
- International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides, 1995. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide [J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 52 (1): 75-78.
- IVERSON R M, 1997. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics, 35 (3): 245-296.
- IVERSON R M, DENLINGER R P, 2001. Flow of variably fluidized

- granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106 (B1): 537-552.
- IVERSON R M, LOGAN M, LAHUSEN R G, et al., 2010. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115 (F3).
- IVERSON R M, REID M E, LOGAN M, et al., 2011. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment [J]. *Nature Geoscience*, 4 (2): 116-121.
- IVERSON R M, 2012. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117 (F3): F03006.
- IVERSON R M, 2013. Mechanics of debris flows and rock avalanches [J]. *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*, 1: 573-587.
- JOHNSON A M, RODINE J R, 1984. Debris flow [M] //BRUNSDEN D, PRIOR D B. *Slope Instability*. Chichester: John Wiley and Sons Ltd.: 257-361.
- KAFUI K D, THORNTON C, 2000. Numerical simulations of impact breakage of a spherical crystalline agglomerate [J]. *Powder Technology*, 109 (1-3): 113-132.
- KENT P E, 1966. The transport mechanism in catastrophic rock falls [J]. *The Journal of Geology*, 74 (1): 79-83.
- KILBURN C R J, PETLEY D N, 2003. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, northern Italy [J]. *Geomorphology*, 54 (1-2): 21-32.
- KOZIK S M, 1962. Raschet dvizheniya snezhnykh lavin [M]. Leningrad: Gidrometeoizdat: 76.
- LANGLOIS V J, QUIQUEREZ A, ALLEMAND P, 2015. Collapse of a two-dimensional brittle granular column: Implications for understanding dynamic rock fragmentation in a landslide [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120 (9): 1866-1880.
- LI B, GAO Y, WAN J W, et al., 2020. The chain of the major geological disasters and related strategies in the Yalu-Zangbu River canyon region [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 6 (2): 11-14, 35. (in Chinese with English abstract)
- LI K, CHENG Q G, LIN Q W, et al., 2022. State of the art on rock avalanche dynamics from granular flow mechanics [J]. *Earth Science*, 47 (3): 893-912. (in Chinese with English abstract)
- LI X L, TANG H M, XIONG C R, 2012. Influence of substrate ploughing and erosion effect on process of rock avalanche [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33 (5): 1527-1534, 1541. (in Chinese with English abstract)
- LIN Q W, CHENG Q G, LI K, et al., 2021. Review on fragmentation-related dynamics of rock avalanches [J/OL]. *Journal of Engineering Geology*: 1-15 [2022-10-09]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ2021062100B>. (in Chinese with English abstract)
- LIN Q W, CHENG Q G, XIE Y, et al., 2021. Simulation of the fragmentation and propagation of jointed rock masses in rockslides: DEM modeling and physical experimental verification [J]. *Landslides*, 18 (3): 993-1009.
- LIU C Z, 2017. Research on high speed and long-distance of the avalanches or landslide-debris streams [J]. *Geological Review*, 63 (6): 1563-1575. (in Chinese with English abstract)
- LIU C Z, LÜ J T, TONG L Q, et al., 2019. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet [J]. *Geology in China*, 46 (2): 219-234. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y J, 2002. Study on fluidifying theory of large highspeed rockslide [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong landslide in Tibet under strong earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 471-480. (in Chinese with English abstract)
- LOCAT P, COUTURE R, LEROUEIL S, et al., 2006. Fragmentation energy in rock avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 43 (8): 830-851.
- LU P Y, HOU T X, YANG X G, et al., 2016. Physical modeling test for entrainment effect of landslides and the related mechanism discussion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35 (6): 1225-1232. (in Chinese with English abstract)
- MANGENEY A, ROCHE O, HUNGR O, et al., 2010. Erosion and mobility in granular collapse over sloping beds [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115 (F3): F03040.
- MCDUGALL S, HUNGR O, 2005. Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 42 (5): 1437-1448.
- MCSAVENEY M J, DAVIES T R H, 2006. Inferences from the morphology and internal structure of rockslides and rock avalanches rapid rock mass flow with dynamic fragmentation [M] //EVANS S G, MUGNOZZA G S, STROM A, et al. *Landslides from Massive Rock Slope Failure*. Dordrecht: Springer, 285-304.
- MELOSH H J, 1979. Acoustic fluidization: a new geologic process? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84 (B13): 7513-7520.
- MORIWAKI H, INOKUCHI T, HATTANJI T, et al., 2004. Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator [J]. *Landslides*, 1 (4): 277-288.
- MÜLLER L, 1964. The rock slide in the Vajont Valley [J]. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 2 (3-4): 148-212.
- MÜLLER-SALZBURG L, 1987. The Vajont slide [J]. *Engineering Geology*, 24 (1-4): 513-523.
- OKURA Y, KITAHARA H, OCHIAI H, et al., 2002. Landslide fluidization process by flume experiments [J]. *Engineering Geology*, 66 (1-2): 65-78.
- PAPA M, EGASHIRA S, ITOH T, 2004. Critical conditions of bed sediment entrainment due to debris flow [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4 (3): 469-474.
- PENG J B, CUI P, ZHUANG J Q, 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39 (12): 2377-2389. (in Chinese

- with English abstract)
- PENG S Q, XU Q, ZHENG G, et al., 2020. Recognition and analysis of deposit body grain of Baige landslide-debris flow [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 51 (2): 144-154. (in Chinese with English abstract)
- PERINOTTO H, SCHNEIDER J, BACHÈLERY P, et al., 2015. The extreme mobility of debris avalanches: a new model of transport mechanism [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120 (12): 8110-8119.
- PINYOL N M, ALONSO E E, 2010. Criteria for rapid sliding II.: thermo-hydro-mechanical and scale effects in Vaiont case [J]. *Engineering Geology*, 114 (3-4): 211-227.
- PITMAN E B, NICHITA C C, PATRA A K, et al., 2003. A model of granular flows over an erodible surface [J]. *Discrete and Continuous Dynamical Systems-B*, 3 (4): 589-599.
- PITMAN E B, LE L, 2005. A two-fluid model for avalanche and debris flows [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363 (1832): 1573-1601.
- PLAFKER G, ERICKSEN G E, 1978. Nevados Huascaran avalanches, Peru [J]. *Developments in Geotechnical Engineering*, 14: 277-314.
- POLLET N, SCHNEIDER J L M, 2004. Dynamic disintegration processes accompanying transport of the Holocene Flims Sturzstrom (Swiss Alps) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 221 (1-4): 433-448.
- PREUTH T, BARTELT P, KORUP O, et al., 2010. A random kinetic energy model for rock avalanches: eight case studies [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115 (F3): F03036.
- PUDASAINI S P, HSIAU S S, WANG Y Q, et al., 2005. Velocity measurements in dry granular avalanches using particle image velocimetry technique and comparison with theoretical predictions [J]. *Physics of Fluids*, 17 (9): 093301.
- RAIT K L, BOWMAN E T, LAMBERT C, 2012. Dynamic fragmentation of rock clasts under normal compression in sturzstrom [J]. *Géotechnique Letters*, 2 (3): 167-172.
- RICKENMANN D, WEBER D, STEPANOV B, 2003. Erosion by debris flows in field and laboratory experiments [C] // *Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Rotterdam: Millpress: 883-894.
- SALM B, 1966. Contribution to avalanche dynamics [J]. *IASH-AIHS Pub.*, 69: 199-214.
- SASSA K, 1989. Geotechnical model for the motion of landslides (Special lecture) [C] // *Proc. 5th Inter. Symp. On landslide*, 1: 37-56.
- SASSA K, FUKUOKA H, WANG G H, et al., 2004. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics [J]. *Landslides*, 1 (1): 7-19.
- SAVAGE S B, HUTTER K, 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 199: 177-215.
- SCHEIDEGGER A E, 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. *Rock Mechanics*, 5 (4): 231-236.
- SEED H B, 1968. The fourth Terzaghi lecture: landslides during earthquakes due to liquefaction [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94 (5): 1053-1122.
- SHREVE R L, 1968. Leakage and fluidization in air-layer lubricated avalanches [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 79 (5): 653-658.
- STINY J, 1910. *Die Muren* [M]. Innsbruck: Verlag der Wagner'schen Universitätsbuchhandlung.
- STROM A L, 1994. Mechanism of stratification and abnormal crushing of rockslide deposits [C] // *Proceedings of the 7th International IAEG Congress*. Rotterdam: Balkema: 1287-1295.
- STROM A L, 2006. Morphology and internal structure of rockslides and rock avalanches: grounds and constraints for their modelling [M] // *EVANS S G, MUGNOZZA G S, STROM A, et al. Landslides from Massive Rock Slope Failure*. Dordrecht: Springer: 305-326.
- TAKAHASHI T, 1978. Mechanical characteristics of debris flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 104 (8): 1153-1169.
- TAKAHASHI T, 1981. Debris flow [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13 (1): 57-77.
- TAKARADA S, UI T, YAMAMOTO Y, 1999. Depositional features and transportation mechanism of valley-filling Iwasegawa and Kaida debris avalanches, Japan [J]. *Bulletin of Volcanology*, 60 (7): 508-522.
- VARNES D J, 1978. Slope movement types and processes [M] // *SCHUSTER R L, KRIZEK R J. Landslides, Analysis and Control*, Transportation Research Board, Special Report No. 176. Washington: National Academy of Sciences: 11-33.
- VOELLMY A, 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, Jahrg., 73, 159-162.
- WANG Y F, CHENG Q G, ZHU Q, 2012. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31 (6): 1089-1106. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y F, XU Q, CHENG Q G, et al., 2016. Experimental study of dynamical shearing behaviors of rock avalanche debris under the effect of entrapped gas [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35 (2): 268-274. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y F, CHENG Q G, LIN Q W, et al., 2018. Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche (Tibetan Plateau, China) based on its complex surface landforms [J]. *Geomorphology*, 317: 170-183.
- WANG Y F, CHENG Q G, SHI A W, et al., 2019. Characteristics and transport mechanism of the Nyixoi Chongco rock avalanche on the Tibetan Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 343: 92-105.
- WANG Y F, LIN Q W, LI K, et al., 2021. Review on rock avalanche dynamics [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43 (1): 164-181. (in Chinese with English abstract)
- WASSMER P, SCHNEIDER J L, POLLET N, et al., 2004. Effects of the internal structure of a rock-avalanche dam on the drainage mechanism of its impoundment, Flims Sturzstrom and Ilanz Paleo-

- Lake, Swiss Alps [J]. *Geomorphology*, 61 (1-2): 3-17.
- WEIDINGER J T, KORUP O, MUNACK H, et al., 2014. Giant rockslides from the inside [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 389: 62-73.
- XING A G, WANG G H, LI B, et al., 2015. Long-runout mechanism and landsliding behaviour of large catastrophic landslide triggered by heavy rainfall in Guanling, Guizhou, China [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 52 (7): 971-981.
- XU W J, ZHOU Q, DONG X Y, 2022. SPH-DEM coupling method based on GPU and its application to the landslide tsunami. Part II: reproduction of the Vajont landslide tsunami [J]. *Acta Geotechnica*, 17 (6): 2121-2137.
- XU Z Q, LI H Q, HOU L W, et al., 2007. Uplift of the Longmen-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: large-scale detachment faulting and extrusion mechanism [J]. *Geological Bulletin of China*, 26 (10): 1262-1276. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2000. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 27 (4): 8-11. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2008. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. *Journal of Engineering Geology*, 16 (4): 433-444. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, WANG F W, SUN P, 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. *Landslides*, 6 (2): 139-152.
- YIN Y P, ZHU J L, YANG S Y, 2010. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 18 (4): 445-454. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, XING A G, 2012. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock slide-debris avalanche, Tibet, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71: 149-160.
- YIN Y P, WANG W P, ZHANG N, et al., 2017. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: a case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J]. *Geology in China*, 44 (5): 827-841. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, XING A G, WANG G H, et al., 2017. Experimental and numerical investigations of a catastrophic long-runout landslide in Zhenxiang, Yunnan, Southwestern China [J]. *Landslides*, 14 (2): 649-659.
- YIN Y P, WANG W P, 2020. A dynamic erosion plowing model of long run-out landslides initialized at high locations [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39 (8): 1513-1521. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J P, CHEN X H, ZOU X Y, et al., 2001. The eco-environmental problems and its countermeasures in Tibet [J]. *Journal of Mountain Science*, 19 (1): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG M, YIN Y P, MCSAVENEY M, 2016. Dynamics of the 2008 earthquake-triggered Wenjiagou creek rock avalanche, Qingping, Sichuan, China [J]. *Engineering Geology*, 200: 75-87.
- ZHANG M, MCSAVENEY M, 2017. Rock avalanche deposits store quantitative evidence on internal shear during runout [J]. *Geophysical Research Letters*, 44 (17): 8814-8821.
- ZHANG T, YIN Y, LI B, et al., 2022. Characteristics and dynamic analysis of the February 2021 long-runout disaster chain triggered by massive rock and ice avalanche at Chamoli, Indian Himalaya [J/OL]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022 (2022-05-14). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775522000956>.
- ZHANG W J, 1985. Some features of the surge glacier in the Mt. Namjagbarwa [J]. *Journal of Mountain Research* (4): 234-238. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, et al., 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 37 (3): 277-286. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO T, 2014. Investigation of landslide-induced debris flows by the DEM and CFD [D]. Oxford: University of Oxford.
- ZHAO T, CROSTA G B, UTILI S, et al., 2017. Investigation of rock fragmentation during rockfalls and rock avalanches via 3-D discrete element analyses [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122 (3): 678-695.
- ZHAO T, CROSTA G B, DATTOLA G, et al., 2018. Dynamic fragmentation of jointed rock blocks during rockslide-avalanches: insights from discrete element analyses [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123 (4): 3250-3269.
- ZHONG D L, DING L, 1996. Uplift process and mechanism of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 26 (4): 289-295. (in Chinese)
- ## 附中文参考文献
- 程谦恭, 张倬元, 黄润秋, 2007. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势 [J]. *山地学报*, 25 (1): 72-84.
- 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等, 2017. 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*, 32 (9): 985-992.
- 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等, 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据 [J]. *科学通报*, 40 (16): 1497-1500.
- 高杨, 李滨, 冯振, 等, 2017. 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, 卫童瑶, 李滨, 等, 2019. 深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析 [J]. *水文地质工程地质*, 46 (1): 129-138, 147.
- 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 [J]. *地质力学学报*, 26 (4): 510-519.
- 高杨, 高浩源, 李滨, 等, 2022a. 滑坡冲击铲刮变量的计算方法研究 [J]. *计算力学学报*, 39 (1): 105-112.
- 高杨, 殷跃平, 李壮, 等, 2022b. 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, doi: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0010.
- 何思明, 李新坡, 吴永, 2008. 滚石冲击荷载作用下土体屈服特性研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, (S1): 2973-2977.
- 胡广韬, 1995. 滑坡动力学 [M]. 北京: 地质出版社.

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. 南宁：中国地质学会：92-96.

黄润秋，2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报，26（3）：433-454.

李滨，高杨，万佳威，等，2020. 雅鲁藏布江大峡谷地区特大地质灾害链发育现状及对策 [J]. 水电与抽水蓄能，6（2）：11-14, 35.

李坤，程谦恭，林棋文，等，2022. 高速远程滑坡颗粒流研究进展 [J]. 地球科学，47（3）：893-912.

李祥龙，唐辉明，熊承仁，等，2012. 基底刮铲效应对岩石碎屑流堆积过程的影响 [J]. 岩土力学，33（5）：1527-1534, 1541.

林棋文，程谦恭，李坤，等，2021. 高速远程滑坡碎屑化运动机理研究综述 [J/OL]. 工程地质学报：1-15 [2022-10-09]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=GCDZ2021062100B>.

刘传正，2017. 论崩塌滑坡-碎屑流高速远程问题 [J]. 地质论评，63（6）：1563-1575.

刘传正，吕杰堂，童立强，等，2019. 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，46（2）：219-234.

刘涌江，2002. 大型高速岩质滑坡流体化理论研究 [D]. 成都：西南交通大学.

刘铮，李滨，贺凯，等，2020. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析 [J]. 地质力学学报，26（4）：471-480.

陆鹏源，侯天兴，杨兴国，等，2016. 滑坡冲击刮铲效应物理模型试验及机制探讨 [J]. 岩石力学与工程学报，35（6）：1225-1232.

彭建兵，崔鹏，庄建琦，2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战 [J]. 岩石力学与工程学报，39（12）：2377-2389.

彭双麒，许强，郑光，等，2020. 白格滑坡-碎屑流堆积体颗粒识别与分析 [J]. 水利水电技术，51（2）：144-154.

王玉峰，程谦恭，朱圻，2012. 汶川地震触发高速远程滑坡-碎屑流堆积反粒序特征及机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报，31（6）：1089-1106.

王玉峰，许强，程谦恭，等，2016. 高速远程滑坡裹气流态化动力学特性实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报，35（2）：268-274.

王玉峰，林棋文，李坤，等，2021. 高速远程滑坡动力学研究进展 [J]. 地球科学与环境学报，43（1）：164-181.

许志琴，李化启，侯立炜，等，2007. 青藏高原东缘龙门-锦屏造山带的崛起：大型拆离断层和挤出机制 [J]. 地质通报，26（10）：1262-1276.

殷跃平，2000. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J]. 水文地质工程地质，27（4）：8-11.

殷跃平，2008. 汶川八级地震地质灾害研究 [J]. 工程地质学报，16（4）：433-444.

殷跃平，朱继良，杨胜元，2010. 贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流研究 [J]. 工程地质学报，18（4）：445-454.

殷跃平，王文沛，张楠，等，2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究：以四川茂县新磨滑坡为例 [J]. 中国地质，44（5）：827-841.

殷跃平，王文沛，2020. 高位远程滑坡动力侵蚀犁切计算模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报，39（8）：1513-1521.

张建平，陈学华，邹学勇，等，2001. 西藏自治区生态环境问题及对策 [J]. 山地学报，19（1）：81-86.

张文敬，1985. 南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征 [J]. 山地研究（4）：234-238.

张永双，郭长宝，姚鑫，等，2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究 [J]. 地球学报，37（3）：277-286.

钟大赉，丁林，1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨 [J]. 中国科学（D 辑），26（4）：289-295.