

高位远程地质灾害研究：回顾与展望

殷跃平, 高少华

Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects

YIN Yueping and GAO Shaohua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征遥感动态分析

Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide

黄细超, 余天彬, 王猛, 朱赛楠, 宋班, 刘文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 40-51

基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析

An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: A case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River

刘文, 王猛, 朱赛楠, 余天彬, 黄细超, 宋班, 江煜, 孙渝江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 29-39

渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi

谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70-78

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123

香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 周文皎, 魏家旭 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 121-129

安徽黄山市徽州区地质灾害危险性评价研究

Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province

刘乐, 杨智, 孙健, 刘钦, 彭鹏, 段俊斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 110-116



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202310006

殷跃平, 高少华. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 1-18.

YIN Yueping, GAO Shaohua. Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 1-18.

高位远程地质灾害研究: 回顾与展望

殷跃平, 高少华

(中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害防治技术指导中心), 北京 100081)

摘要: 在全球范围内, 高位远程地质灾害造成了多起群死群伤事件和特大经济损失, 是特大型地质灾害防灾减灾科技攻关的难点。文章系统回顾了高位远程地质灾害的研究历程, 认为常规的“高速远程滑坡”研究难以适应高山、极高山区复合型地质灾害防灾减灾的要求, 提出了从高位失稳、远程成灾和风险防控全链条的高位远程地质灾害研究思路, 探讨了高位崩滑启动源区的易灾地质结构特征和早期识别技术、高速碎屑流远程链动机理和边界层效应以及风险评估和防灾减灾问题。通过对青藏高原高山、极高山区的高位远程地质灾害研究, 揭示了高位滑坡碎屑流势流体链动传递机理, 以及紊流体和犁切体的边界层效应, 提出可以通过改造高势能碎屑流体的边界层底坡、增大湍流边界层内湍动能的生成与组合障碍前死区范围的消能降险方法。最后, 针对铁路、公路、水电工程、边疆城镇和国防建设的发展, 讨论了复合型高位远程滑坡灾害的防灾减灾将面临的新挑战, 提出了易灾地质结构孕灾机理、高位远程链灾动力过程和风险防控理论与技术等 3 方面亟待加强的研究方向。

关键词: 高位远程地质灾害; 高速远程滑坡; 易灾结构; 链动机理; 风险防控

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)01-0001-18

Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects

YIN Yueping, GAO Shaohua

(China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazards, MNR),
Beijing 100081, China)

Abstract: Long-runout rockslides at high altitude have caused lots of severe casualties and huge economic losses in the world, becoming a focus issue in researches on mitigation for large-scale geological disasters. This paper systematically reviews the research process of high-altitude and long-runout rockslides and believes that conventional research on “high velocity and long runout” is difficult to adapt to the requirements of complex geohazards prevention and mitigation in high and extra-high mountains. The methodology on high-altitude and long-runout rockslides has been proposed that includes in the initiation at the high-position, the dynamics of chain-style disasters with a long-runout traveling and the risk assessment and mitigation. Then, the disaster-prone geostructure characteristics and early identification techniques of the high-altitude initiation zone, the long-runout transferring mechanism and boundary layer effect of high-velocity debris avalanche, and risk assessment and mitigation issues have been explored. Through the study in the high mountain and extra-high mountains of the Qinghai-Tibet Plateau indicates that the potential flow transferring mechanism of debris avalanche in high-altitude rockslides, the boundary layer

收稿日期: 2023-09-24; 修订日期: 2023-10-06

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2244227)

第一作者: 殷跃平(1960—), 男, 研究员, 中国工程院院士, 从事地质灾害防治与研究工作。E-mail: yinyueping0712@qq.com

effect of turbulent fluid and the plowing bodies. It is proposed that energy dissipation and risk mitigation methods can be used by modifying the boundary layer bottom slope of high potential debris avalanche, to increase the generation of turbulent kinetic energy in the boundary layer, and the dead zone range in front of barrier piles. Three research directions have been discussed, including the initiating mechanism of disaster-prone geostructure, the dynamic process of high-altitude and long-runout disaster chains, and the theory and technology of risk prevention and mitigation.

Keywords: high-altitude and long-runout rockslides; rock avalanche; disaster-prone geostructure; transferring mechanism; risk prevention and mitigation

0 引言

作者长期从事高速远程滑坡的研究,并取得了系列成果。随着中国青藏高原地区铁路、公路、水电等重大工程兴建与“治边稳藏”战略的实施,愈发感到仅从理论上研究滑坡的运动速度已经很难保障青藏高原重大工程和国土空间地质安全。因此,从防灾减灾实践中逐渐凝炼形成了“高位远程地质灾害”的研究命题,指启动于陡坡上部且成灾范围可达数百米,甚至数千米的视线外的远程复合型链式地质灾害,突破了原先偏重于滑坡单一灾种的研究范畴,强调了多灾种复合转化的成灾模式和高势能的链灾动力学过程研究^[1]。

高位远程地质灾害通常规模巨大,体积可达数亿立方米以上,降落高差达数千米。势动能转化会产生巨大的能量,驱使碎屑物质运动距离超过 10 km,可能形成流域性灾害链,影响范围可达周边数百公里,尤其是青藏高原及其周边地区,给人类工程活动带来巨大挑战^[2-5]。2006 年 2 月 17 日,菲律宾南莱特岛发生高位滑坡-碎屑流-泥石流灾害,掩埋了 Barangay 村庄,造成 1 221 人死亡,约 1.9×10^4 人流离失所^[6];2018 年 10 月 10 日和 11 月 3 日,西藏东部连续发生了两起高位远程地质灾害,两次阻断金沙江干流,形成流域性灾害链,造成数十亿人民币的经济损失^[7-11];2021 年 2 月 7 日,位于喜马拉雅山南麓的印度查莫利发生冰岩山崩,引发的洪水灾害摧毁了下游几十千米远的 2 个在建水电站,死亡人数超过 200 人^[12-15]。因此,高位远程地质灾害具有强致灾能力,严重威胁重大工程建设运营及人民生命财产安全,迫切需要开展失稳机理、成灾模式和防治技术等研究。高位远程地质灾害的失稳机理、成灾模式和防治技术不仅是中国防灾减灾研究的热点和难点,也是当前世界上防灾减灾研究难题之一^[12, 16-22]。

1 国内外研究历程回顾

高位远程地质灾害的概念可追溯到 19 世纪 80 年代。1881 年 9 月 10 日,瑞士 Elm 小镇板岩采石场发

生滑坡灾难,导致三分之二的房屋被毁,死亡 115 人。灾害发生第二天,政府委派瑞士联邦理工学院 Albert Heim 教授开展应急调查和指导处置。现场景象让 Heim 大吃一惊,该滑坡高差达 600 m,运动距离达 2.3 km,堆积体积达 $10 \times 10^6 \text{ m}^3$,没有滑动迹象,到处都呈现出流动的特征。随后,他与当地官员合写了《Elm 村滑坡》一书^[23]。半个世纪后,在他的最后一部杰作《滑坡与人类生活》^[24], Heim 把 Elm 村滑坡划分高山崩落 (bergfall)、空中跳跃 (luftsprung)、水平流动和气浪 (flachstrom and brandung) 三个过程,并用“Sturzsturm”术语描述了高位岩崩发生后在水平方向上运动很远但垂直落差相对较小的动力过程。Heim 的工作奠定了高位远程地质灾害的研究基础。

进入 20 世纪后,随着对所发生的几起复合型特大滑坡的系统研究,西方国家逐步提出了高位远程地质灾害成因理论与研究方法。1903 年 4 月 29 日,位于加拿大落基山脉的阿尔伯塔 Frank 小镇发生山体滑坡,滑坡体体积达 $36 \times 10^6 \text{ m}^3$,运动过程持续约 100 s,平均速度 30 m/s。滑动距离大于 3 000 m,等效摩擦角 12.3° ,摧毁了下方的煤矿和小镇南端,导致 83 人死亡、23 人受伤^[25-26]。Cruden 等^[27]将 Frank 滑坡分类为“复合、极其快速,干岩崩-碎屑流”。对 Frank 滑坡的研究历程长达 100 多年,至今仍不断有专门研究 Frank 滑坡的新文献发表^[28],在背斜轴易灾地质结构、初始破坏地质力学过程、下伏煤层采空松动触发机理、高位远程流动机理、碎屑流堆积结构和沉积、滑坡残体现今稳定性及风险等方面形成了系列研究成果^[18, 29-32]。1963 年 10 月 9 日,意大利瓦伊昂水库左岸约 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的顺层滑坡以约 25 m/s 的速度整体下滑,激起 250 m 高的涌浪,翻越坝顶,冲毁了坝下游的兰加隆镇和附近 5 个村庄,死亡 1 925 人,成为人类历史上最严重的水库滑坡涌浪灾难。瓦伊昂滑坡灾难发生后,众多学者开展了滑带地质力学特征、孔隙水压力促滑机理、高速运动机理、涌浪灾害、高速滑坡风险管理、物理力学试验和数值模拟等内容,取得的丰硕成果推动了高位远程地质灾害机理和

防灾减灾的发展^[16, 21, 33-39]。1974 年 4 月 25 日, 秘鲁安第斯山脉 Mayunmarca 发生了一场巨大的灾难性滑坡-碎屑流-泥石流, 这是西半球有史以来最大的一次高位远程地质灾害, 其最大运动距离为 8.25 km, 最大高差为 1 870 m, 堆积体积约为 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。滑坡形成堰塞坝淤堵了曼塔罗河, 堰塞湖库容估计为 $6.7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 回水 38 km。滑坡发生 44 d 后, 堰塞湖决口, 洪峰流量约为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 造成 451 人死亡和巨大经济损失。这次灾难引起了大家高度关注, 从地质学、地貌学和流体力学等开展了研究^[40-41]。2006 年 2 月 17 日, 菲律宾南莱特岛发生复合型高位滑坡-碎屑流-泥石流灾害^[6], 是 21 世纪以来造成人员死亡最多的高位远程地质灾害之一, 受到了高度关注, 学者们在滑坡的断层控制机理、高速远程液化滑动机理等方面取得了重要进展^[17, 42-44]。

20 世纪 80 年代, 中国发生了多起高位远程地质灾害, 造成了特大人员伤亡和财产损失, 由此, 在吸收西方研究成果的基础上, 逐渐深化了中国高位远程地质灾害成灾理论与减灾技术。1980 年 6 月 3 日, 湖北远安盐池河磷矿发生灾难性大规模山体崩塌-碎屑流, 总体积 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$, 高差约 200 m, 形成面积约 $500 \text{ m} \times 478 \text{ m}$ 的堆积区并阻塞下方河道, 形成堰塞塘, 最大堆积厚度近 40 m。崩塌碎屑流摧毁了磷矿工矿区, 导致 284 人死亡^[45-46]。1983 年 3 月 7 日, 甘肃东乡洒勒山发生黄土高速远程滑坡, 在不到 1 min 的时间内急剧向南滑动 1 000 m 左右, 滑体东西宽 700 ~ 1 100 m, 南北长 1 100 ~ 1 400 m, 总体积约 $31 \times 10^6 \text{ m}^3$, 摧毁了 4 个自然村, 死亡 220 人, 重伤 22 人^[47-51]。1985 年 6 月 12 日, 湖北秭归新滩滑坡再次复活, 体积 $30 \times 10^6 \text{ m}^3$, 其中约 $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 进入长江。高速下滑的土体, 将 400 余年的新滩古镇全部推入长江。涌浪至对岸爬坡高 49 m, 江中涌浪高达 39 m, 摧毁小型船只 96 艘, 死亡 12 人, 造成长江断航 12 d, 由于预报及时, 新滩镇上 1 000 余人全部及时转移^[52-55]。1989 年 7 月 10 日, 四川溪口县城发生滑坡-

泥石流高位远程地质灾害, 高速冲向溪口镇北角。整个滑坡事件从启动到停积历时约 60 s, 摧毁溪口水泥厂、川煤 12 处、红岩煤矿、溪口粮库和沿途的数个村庄, 导致 221 人死亡^[56-57]。中国工程地质学界对这些灾难性滑坡灾害进行了深入剖析, 提升了复合型高位远程灾害启动失稳、动力学、监测预警和防灾减灾的研究水平, 并奠定了专门从事这方面研究的科研梯队。20 世纪 80 年代以来, 中国学者对高位远程地质灾害的启程、高速运动、链动转换过程等进行了系统研究^[58-60], 随着对西南岩溶山区、西北黄土地区、汶川强震山区和青藏高原高位远程地质灾害的研究, 逐渐形成了具有中国特色的科研体系, 并出版了多部专著^[3, 61-72]。

2 防灾减灾面临的问题

2.1 高位远程地质灾害的典型特征

高位远程地质灾害是指包含两种或两种以上基本地质灾害种类, 具有崩滑复合失稳机理、势动能复合状态转化和链动远程复合成灾特征, 并可引发堰塞坝和涌浪等次生效应的链式地质灾害^[18, 73-74]。这种灾害是造成全球群死群伤特大地质灾害的主要类型, 成为国内外防灾减灾科技攻关的难点及热点问题(图 1)。总体上看, 高位远程地质灾害可以划分为崩滑启动区、远程运动区和堆积成灾区 3 大部分(图 2), 并具有 4 个典型特征。

——**高位剪出**。灾害源区启动位置高于承灾对象, 并且剪出口位置高度通常大于 100 m, 甚至数千米。如 2018 年发生于金沙江右岸的西藏江达白格滑坡, 剪出口与河床高差约 200 m, 但前后缘高差达 850 m, 滑体入江距离 1 200 m, 形成了体积超过 $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的堰塞体阻塞金沙江。2008 年汶川地震诱发的四川绵竹小岗剑高位远程滑坡碎屑流灾害, 最高点高程 1 980 m, 最低点高程为 960 m, 相对高差为 1 020 m, 滑坡启动区剪出口高程约 1 350 m, 距地面堆积区高差约 390 m, 主沟长度

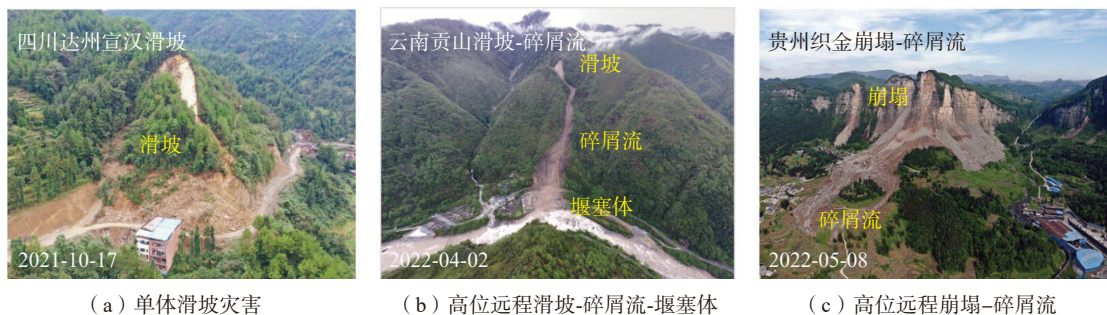


图 1 单体滑坡与高位远程地质灾害对比

Fig. 1 Comparison between single landslide and high-altitude and long-runout rockslides

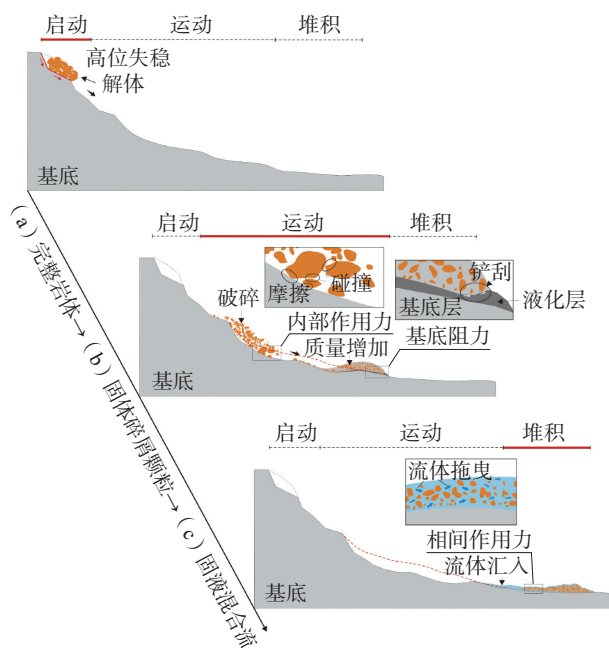


图 2 高位远程地质灾害链动特征

Fig. 2 Chain characteristics of high-altitude and long-runout rockslides

2.59 km, 总物源体积 $3.34 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

——**远程成灾**。灾害源区启动位置具有超视距特征。关于“远程”的含义相对较为含糊,不少学者建议按照滑坡滑覆区与滑源区长度之比进行划分,当比值为 1.5~2.0 时,可划分为远程滑坡。以比值作为远程滑坡划分的标准,从科学含义上表面上更为合理,但难以指导实际工作。例如,对于小型滑坡,当滑源区长度为 50 m,只要滑覆区长度大于 100 m,就可定为是远程滑坡,但其防灾减灾意义并不大。远程滑坡的基本特征表现在从滑源区剪出并滑动一定距离后,其原有结构基本解体。从地质灾害防灾减灾的角度上看,采用绝对距离(例如滑程大于 500 m)更为适用,便于指导中国地质灾害调查从“房前屋后”近程范围扩展到“坡要到顶,沟要到头”的远程范围。

——**高速运动**。高位远程地质灾害在运动过程中具有惯性加速过程,速度通常大于 20 m/s。传统把滑坡运动大致分为:蠕动变形、慢速滑坡、中速滑坡和高速滑坡,青藏高原滑坡运动速度还可以将高速滑坡的速度进一步细分。但国内外迄今未形成统一的高速滑坡运动速度的划分标准。作者等采用摩擦-流动模型对四川都江堰三溪村滑坡和西藏波密易贡滑坡进行了计算和分析,发现三溪村滑坡最大速度可达到 42 m/s,易贡滑坡最大速度达到 100 m/s^[75],可以看出高速滑坡的速度变化区间仍很大。

——**动力剪切**。高位远程地质灾害动力剪切作用导致成灾过程具有放大效应。这种放大效应包括:①底蚀作用导致成灾体体积明显增大。如汶川地震触发的青川东河口滑坡形成了高位远程滑坡-碎屑流地质灾害,滑源区体积约 $6 \times 10^6 \text{ m}^3$,自高程 1 050 m 抛掷剪出,并铲动下伏基岩,形成滑坡碎屑流,体积增加了 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$,致使 7 个村庄被埋,约 400 人死亡。②侧蚀作用导致两侧斜坡稳定性明显降低,诱发次生滑坡,甚至滑动堵塞沟道,形成堵溃放大效应^[76]。如 2000 年发生的西藏易贡滑坡堰塞坝溃决后,沿途铲刮易贡藏布和雅鲁藏布江两岸数百处滑坡,导致固体物源明显增加^[2]。

2.2 高位远程地质灾害研究面临的问题

(1) 高位启动源区早期识别

高位远程地质灾害的启动源区往往位于数百米高的植被茂密的山坡,或者位于数千米高的雪山。由于人迹难至,导致启动源区的早期识别难度极大。2017 年 6 月 23 日,四川茂县新磨村发生高位远程滑坡-碎屑流灾害,导致 83 人遇难。新磨滑坡发生前,运用常规的滑坡分析方法判断,滑源区的岩体发生失稳滑动,主要以倒石锥的形式堆积于剪出口下部斜坡带上,视摩擦角一般在 $35^\circ \sim 40^\circ$,对约 2 000 m 之外的村庄不会带来毁灭性的灾难(视摩擦角约为 25°),很难判断出会发生高速远程的滑动^[20]。新磨滑坡发生后,意大利佛罗伦萨大学 Emanuele Intriari 教授迅速利用滑坡发生前的 2014 年 10 月 9 日至 2017 年 6 月 19 日时段的欧空局哨兵一号卫星 45 幅 C 波段 SAR 图像进行了形变分析,识别出了茂县新磨滑坡清晰的前兆形变信号。InSAR 数据揭示了失稳前滑坡源区最大位移速率达 27 mm/a,且滑坡多处测点显示从 2017 年 4 月开始加速变形。结果显示卫星雷达数据具有大范围探测和间隔时间短的优势,可以作为不稳定斜坡区的调查手段,也可用于滑坡动态监测^[77]。新磨滑坡灾害的惨痛教训推动了中国地质灾害“空-天-地”一体化早期识别技术的快速发展和规模化应用,特别是 2018 年西藏金沙江白格特大滑坡发生后,中国逐步建立了融合“空-天-地”多源遥感观测,以“形态、形变、形势”为内容的重大隐蔽性地质灾害隐患识别技术方法。但是,高位地质灾害源的早期识别方法和技术仍处于早期探索研究阶段^[78]。2019 年 7 月,贵州省水城县鸡场镇发生滑坡-碎屑流复合型灾害,滑坡长约 1 800 m,共摧毁当地居民 21 间房屋,77 人被掩埋,最终导致 51 人死亡。在滑坡发生前,曾开展过多期光学遥感和 InSAR 雷达遥感调查,由于滑源区玄武岩体植被茂密,未能进行准确的识别^[79]。近年来,随着青藏

高原重大工程、国防工程和边疆城镇建设发展对防灾减灾的需求, 复合灾害源的识别方法研究取得了显著进展, 包括: 失相干影响、大气波动影响、地形影响等。这样, 初步形成了不同地区的 InSAR 识别方法(表 1)^[80-81]。

表 1 不同海拔山区高位远程地质灾害识别 InSAR 集成方法
Table 1 Integrated method of InSAR for identification of high-altitude and long-runout rockslides in mountain areas with different altitudes

海拔	典型灾害	技术方法	主要技术
低山(500 ~ 1 000 m)	滑坡、崩塌、塌陷	① SBAS-InSAR技术(一般情况推荐); ② PS-InSAR技术(相干性较好时推荐)	①基于数值气象模型的大气延迟改正; ②解缠误差探测及改正技术; ③坡向形变投影技术
中山(1 000 ~ 3 500 m)	大型滑坡、崩塌等	① SBAS-InSAR技术(一般情况推荐); ② PS-InSAR技术(相干性较好时推荐); ③ POT时序技术(大量级形变监测推荐)	①基于数值气象模型的大气延迟改正; ②解缠误差探测及改正技术; ③坡向形变投影技术; ④升降轨数据联合监测; ⑤叠掩、阴影掩膜技术
高山(3 500 ~ 5 000 m)	高位滑坡、崩塌、冰川	① SBAS-InSAR技术(时间序列形变监测推荐); ② Stacking-InSAR技术(大范围调查推荐); ③ POT时序技术(大量级形变监测推荐)	①基于数值气象模型的大气延迟改正; ②解缠误差探测及改正技术; ③坡向形变投影技术; ④升降轨数据联合监测; ⑤叠掩、阴影掩膜技术; ⑥顾及DEM的配准技术
极高山(>5 000 m)	超高位滑坡、崩塌、冰川	① SBAS-InSAR技术(时间序列形变监测推荐); ② Stacking-InSAR技术(大范围调查推荐); ③ POT时序技术(大量级形变监测推荐)	①基于数值气象模型的大气延迟改正; ②解缠误差探测及改正技术; ③坡向形变投影技术; ④升降轨数据联合监测; ⑤叠掩、阴影掩膜技术; ⑥顾及DEM的配准技术; ⑦可变窗口偏移量跟踪技术; ⑧跨平台偏移量跟踪技术

(2)高位灾害源易灾地质结构

对 1902 年加拿大 Frank 滑坡失稳机理不断深化认识的过程堪称特大滑坡研究的经典案例。在灾害发生初期应急调查认为: 滑坡沿着一组陡倾外倾节理向下移动, 其类型被划分为落石(rockfall)或块流(block flow), 并沿用 50 多年。1972 年以来, 经过详细地质调查, 查明滑坡母岩主要由古生代石灰岩组成, 地质构造位于龟山背斜东翼, 可以识别出 3 组不连续面: 层面节理和垂直于层面的两个正交节理组。背斜下部受龟山逆冲断裂带控制, 而下部为中生代煤系地层(存在采煤活动), 这种地质构造控制下的斜坡失稳是典型的山体崩滑(rockslide avalanche)^[26, 31]。为了吸取瓦伊昂滑坡惨剧的教训, 很多学者对滑坡的地质构造、滑动面的地质结构、滑坡的蠕变过程和库水变动的影响及其地质力学特征进行了长期的研究和反思。瓦伊昂水库位于阿尔卑斯造山带南部托克山的北侧, 滑坡体岩层形态上陡下缓, 前缘具有良好的临空条件。两个先存褶皱系统(约东西向和南北向)使滑动面变形, 而且配套的次级构造(小断层和裂缝)很可能控制了滑动过程。尤其是呈凹形的滑动面的位置与主向斜(Massalezza 向斜)核部重

合^[33-35, 38, 82]。岩石斜坡破坏通常与离散褶皱、断层和剪切带以及相关的构造破坏有关, 将褶皱、断层、不连续性等地质构造地质填图和理论融入复合型滑坡地质结构和失稳机理的研究至关重要^[83-88]。

中国学者在复合型滑坡的地质结构研究方面, 取得了新认识^[5, 89-94]。黄润秋^[57]对大型岩质滑坡的结构类型和失稳机理进行了系统研究, 提出了中国内陆大型滑坡发育最根本的原因是具有有利的地形地貌条件, 并建立了 5 种典型的地质-力学模式, 认为“锁固段”在岩质边坡的变形控制和稳定性机制中具有重要地位。秦四清团队^[95-97]围绕锁固段型滑坡失稳预测难题, 构建了锁固段型滑坡失稳预测理论, 提出了锁固段型滑坡分类, 构建了锁固段型滑坡演化灾变模式, 建立了锁固段型滑坡快解锁突发型和慢解锁渐变型两种灾变模式的临界位移准则。

作者等长期开展高位远程地质灾害易灾地质结构防控理论研究, 特别是在褶皱地层区和断裂构造带二类易灾地质结构失稳机理方面取得了多项成果, 提出了斜倾山体视向滑动关键块体、褶皱轴部厚层山体塔柱状溃曲失稳、复理石斜坡断裂锁固型失稳、构造混杂软弱

带复合失稳和岩溶山体底部采矿失稳等模式^[2, 13, 20, 98-104]。

(3) 高位远程链动机理

Heim^[24]最先注意了 Elm 滑坡-碎屑流的链动传递过程, 认为后部的碎裂流体通过碰撞过程将大部分动能传递到前面, 从而推动了前部碎屑流体并协助其向前, 即类似接力赛, 接力棒作为动能的象征, 从一棒传递到下一棒^[105]。许多学者也对这种链动传递机理进行了研

究^[106]。

高位远程地质灾害由滑坡、崩塌向碎屑流、泥石流等链动转化过程涉及到滑坡等固体与流体多体动力学问题。可以将高位远程地质灾害链的动力分区分为: 高位启动(rockslide 和 rock avalanche)、势动转化(energy transformation)、动力剪切(rock debris and entrainment)和液滑/流滑(mudflow)(表 2)^[3]。

表 2 高位远程地质灾害链动机理与成灾模式简表
Table 2 Summary of chain mechanism and disaster mode of high-altitude and long-runout rockslides

分区	地质特征	动力特征	基本方程
高位启动	在重力长期蠕变下的不稳定山体、冰雪和冰湖等危险体形成高位滑坡或崩塌, 特别是暴雨、地震和融雪等特殊工况会加剧高位成灾体的启动	物源初始启动具有较高的重力势能; 在锁固效应和特殊工况作用下, 具初始动能	极限平衡
势动转化	高位剪出后, 在陡坡地段具有加速特征; 大型崩滑体在气垫圈闭效应作用下, 运动距离会增加; 逐渐解体成为链状散体结构	重力势能逐渐转化为动能, 流滑加速效应明显, 形成链条冲击加载; 转化过程中可产生空气层压缩效应	能量守恒、 动量守恒、 撞击理论等
动力剪切	崩滑块体通过高势能转化为高速流滑体, 撞击、剪切、铲刮沟道斜坡, 形成底蚀铲刮体积增大效应; 侧向冲刷岸坡坡脚, 牵引触发滑坡, 形成流体堵溃放大效应	因铲刮冲刷效应流滑体运动速度降低; 受堵溃效应影响流速和流量会出现明显的放大特征; 由摩擦块体向流动散体转化	摩擦模型、 犁切模型等
液滑/流滑	沟道含水量增加, 形成剪切液化效应; 流滑体碰撞粉碎化, 形成碎屑流体; 沟道宽缓, 纵坡降较低, 形成掩埋堆积成灾区	流滑体滑带形成剪切液化层, 剪切阻力减小, 导致运动距离增加; 或干碎屑流体在剩余驱动力作用下保持远程运动	滑带液化效应、 颗粒流模型、 Voellmy模型等

近年来, 国内、外许多研究者对高位、高速远程滑坡后破坏的多相态转化的动力学机理开展了大量研究, 滑坡运动过程模型、动力学模型和数值模拟算法研究成为远程滑坡风险评估和防灾减灾研究的重要方向。

高位远程地质灾害的链动机理具有明显的体积效应, 因此, 对于高位远程滑坡动力学研究一般都放在体积达百万立方米的大型滑坡上^[24, 107-110]。Heim^[24]分析了 20 种发生滚石和崩落流动的滑坡, 既不能完全用滑坡也不能用崩塌来刻画体积很大的下落体的运动。由于地质学家们更早采用了英文单词“Debris flow”来描述运动比较缓慢的泥石流。这一单词也使得在研究碎屑流和泥石流的组成材料、运动学和动力学时, 带来了许多混淆。因而, Heim 只能采用了“trummersstorm, sturzstorm, schusstorm, fallstorm, wursstorm, steinstorm, blockstorm”等术语来描述这种复合型的滑坡山崩-碎屑流高位运动, 强调了其后缀都带上了“storm”, 显示了碎屑流体流动性和颗粒无粘接性。著名科学家许靖华教授从“岩崩引发的灾难性碎屑流动”(catastrophic debris streams (sturzstorm) generated by rockfall) 系统性地评述了 Heim 提出的流体特征^[111]。Howard 建议用“Avalanche”这术语来定义灾难性碎屑流(catastrophic debris)^[112]。

在岩质崩滑-碎屑流动力学研究过程中, 出现了

2 种路径: 一种是采用与雪崩(avalanche)相似的理论, 另一种是采用了与泥石流(mudflow)相似的理论^[113]。Voellmy 在 1955 年出版了《On the Destructive Force on Avalanche》, 这不仅是雪崩动力学方面首部成果, 而且运用流体力学的连续性方程、运动方程和能量方程建立了冰崩碎屑流运动距离和冲击力等的分析方法, 也为高位远程滑坡-碎屑流的研究奠定了基础。Voellmy 模型考虑了颗粒摩擦和湍流运动的组合形式, 已经广泛应用于雪崩、岩质崩滑、流动性滑坡、滑坡碎屑流、泥石流等颗粒流体分析研究中。Hung^[114-122]在 Voellmy 研究基础上, 进行了岩石崩滑导致的高速运动碎屑流超流动性特征研究, 提出“等效流体”的概念, 将复杂的滑体构成简化为某一种组成的“等效流体”, 同时, 假设滑坡碎屑流为浅流运动, 通过拉格朗日方法基于曲线坐标和移动网格, 求解连续性方程和动量方程。Hung 还研发了 DAN3D 软件并赠予作者研究团队使用, 在中国昭通盘河、都江堰三溪村和镇雄赵家沟等多起滑坡碎屑流模拟分析中, 取得了很好的结果^[123-125]。Iverson^[126]在 2012 年出版的《泥石流和岩崩的机理》(Mechanics of Debris Flows and Rock Avalanches)专著中, 将岩崩、碎屑流与泥石流结合起来考虑, 并重点研究了泥石流的二相流特征。许多学者开展了这类颗粒固体和孔隙液体二相流行为的物理基础和数学结构的研究, 其中, 干岩

崩代表了可以忽略孔隙流体压力的一种极限流动(即单相流), 在运动过程中可以在足够的水环境下转化为泥石流, 孔隙流体压力在单相到二相流转变中起关键作用^[127-133]。实际上, 这两种路径的研究理论都建立在流体力学连续性方程、运动方程和能量方程基础上, 并无本质上的区别, 但是, 在流体材料、动力类型和边界层的研究方面均有明显差异。用于构建岩崩到泥石流流动力学的二相流模型的物理原理涉及连续介质混合理论、土壤力学和流体力学的概念, 但对于单相和二相流都可用连续性方程和运动方程加以刻画, 并在实际中将流体力学方程组求解大为简化^[126]。

最近 20 a 来, 随着计算机算力提高, 能够揭示崩滑块体大位移、旋转和滑动的离散单元法取得了显著进展, 特别是与流体力学模拟方法结合, 可以模拟和揭示块体-颗粒和泥石流体的运动学和动力学过程, 以及涌浪灾害等次生效应的动力学过程^[134-137]。

(4) 高速运动边界层效应

通常将运动速度在 20 m/s 以上的滑坡称为高速滑坡^[20]。自 1882 年 Heim 对 Elm 滑坡的这种高速运动的滑坡碎屑流特征研究以来, 关于高速滑坡-碎屑流与底坡面的作用机理一直是研究重点, 形成了多种观点^[122]。

1) 空气层润滑效应。在高速远程滑坡边界层研究中, 最受到关注也最受争议的观点之一是“气垫效应”。Shreve 对美国阿拉斯加谢尔曼滑坡、美国加利福尼亚黑鹰滑坡和瑞士 Elm 滑坡进行了相关的研究后, 提出了气垫效应导致高速远程滑动的观点^[109, 138]。当阿波罗登月计划实施, 在月球上发现了类似“Sturzstrom”的沉积物时, 有学者指出即使没有空气, 也会形成远程流动, 因此, Shreve 关于空气润滑的假设受到了严重打击^[112]。但是, 气垫效应现象一直受到中国学者的高度关注, 特别是青藏高原的高山峡谷区发生了多起高位远程滑坡碎屑流灾害, 深化了气垫效应的研究^[75]。邢爱国等^[139]结合飞机飞行气动特征分析方法, 通过风洞试验研究了高速滑坡在近程活动阶段的滑行特点, 认为高速滑坡在滑动中将产生机翼效应, 不仅使滑坡飞行得更远, 而且使位能更多地转变成滑坡飞行的动能, 使滑体获得更大的速度。一般地, 这种产生凌空飞行的空气动力升力将使滑体增加约 1/3 的滑行历程。殷跃平等^[74]指出汶川映秀牛圈沟滑坡-碎屑流、北川城西滑坡、青川东河口滑坡-碎屑流具有明显的气垫润滑特征。

2) 滑动带的热因素。滑坡中的燃烧现象一直受到高度关注, 并提出了燃烧促滑作用的假说^[140-141]。Habib^[142]提出了孔隙气压力促使大型滑坡滑动的观点, 即摩擦蠕

变引起的加热可能导致孔隙流体蒸发, 而这种流体压力的增加, 反过来又可能导致沿滑动带的有效应力迅速降低, 从而减少摩擦阻力, 并可能导致灾难性破坏。摩擦热汽化机理与滑坡的规模有关, 可能导致了Grazier^[143]、Flim^[144]和 Vaiont^[145]的三次灾难性滑坡事件。随后, Tamburi^[146]在实验室间接地证实了这种热致蠕变的效应。不少学者关注到了很多例滑坡体中页岩的烧灼现象, 提出了滑动过程中滑体中页岩的破裂, 从而允许空气和水分进入并促进自燃的相反观点。近年来, 中国的年轻学者在滑坡热效应研究方面取得了新的进展。王玉峰等^[147]基于青藏高原易贡滑坡的研究, 提出了热孔压减阻效应与热润滑减阻效应, 并对滑坡基底层试样产生明显弱化现象的原因进行分析。胡伟等^[148-149]对重庆武隆鸡尾山和四川绵竹大光包高速远程滑坡进行了深入研究, 提出了因摩擦产生大量热能, 导致部分地层中的碳酸盐岩分解, 产生 CO₂, 亦可能对滑坡的运动起到减阻作用。何思明等^[150]采用数值模拟分析认为, 摩擦生热会引起基底层温度的升高; 伴随着温度的升高, 基底层中的水发生体积膨胀, 产生超孔隙水压力, 对滑体的运动产生促滑作用。

3) 滑带土液化促滑。Heim 在 1882 年对瑞士 Elm 滑坡研究后, 首次提出了沿崩滑-碎屑流底坡面裹挟的液化饱和土层对远程滑动的润滑机理。这种机理在随后的 Frank 滑坡远程运动堆积层中得到证实^[25]。在很多高位滑坡碎屑流堆积物中及其周围, 也可以发现饱和基底发生变形和液化的证据^[151]。Seed^[152]是早期系统研究地震作用下土体液化诱发滑坡问题的学者。Sassa 等在滑动面液化研究方面做出了杰出贡献, 采用不排水环剪试验方法, 对日本兵库县南部地震滑坡等进行研究, 得出滑动带产生的粒子破碎, 导致不排水条件下孔隙水压力增加, 即使在中密-密实初始土体结构条件下, 也会产生高速滑坡的结论, 提出了“滑动面液化”高速滑坡机制。另外, 还提出了滑带土颗粒剪切破碎导致超孔隙水压力增加, 进而促使剪切阻力降低的理论, 并研制了系列高速环剪设备^[17, 153-156]。汪发武等^[157]、王功辉等^[158]对滑带液化促滑机理进行了大量研究, 并取得了新进展。中国学者运用 Sassa 建立的滑带土液化促滑理论很好地分析了贵州关岭、云南镇雄和深圳渣土场等多起滑坡远程液化滑动机理^[159-160]。

4) 底层动力剪切效应。高位远程滑坡通常具有典型的动力剪切特征, 导致滑坡体积明显放大和运动距离明显增加, 致使因成灾范围的扩大造成严重的损失。许多学者对滑坡-碎屑流底层的动力剪切效应进行了研

究^[129, 161-164]。Hungre 等^[121]注意到了这种裹挟效应, 并建议了“滑坡-碎屑流”术语用于考虑岩质滑坡沿途裹挟液化层而形成大量的碎屑流时的情形。Iverson^[126, 129-130]提出滑坡-碎屑流等效流体在基床面上高速运动时, 底部剪切裹挟铲刮松散可铲刮层, 并建立了力学模型分析碎屑流厚度和运动速度对铲刮深度的影响, 将流体材料自上而下分为滑体层、裹挟层、基底层, 从动量和质量交换的角度求解裹挟变量(滑体速度、铲刮体积及铲刮深度等变量), 描述动力剪切作用对滑体体积增加的影响。殷跃平^[20, 165]对四川茂县新磨滑坡-碎屑流的动力剪切机理进行了探讨, 指出滑坡高位剪出滑动, 连续加载并堆积于斜坡体上部, 体积达 $3.90 \times 10^6 \text{ m}^3$, 导致残坡积岩土层失稳并转化为管道型碎屑流。碎屑流高速流滑至斜坡下部老滑坡堆积体后, 因前方地形开阔、坡度变缓, 转化为扩散型碎屑流散落堆积, 具有“高速远程”成灾模式, 基于可变形滑块-弹簧模型和土力学地基破坏模式, 提出了滑坡-碎屑流动力剪切过程计算的犁切模型。高杨等^[166-167]对滑坡-碎屑流的动力剪切模式进行了总结分类, 主要有嵌入铲起模式、裹挟刮带模式、冲击滑移模式和冲击飞溅模式, 并采用接触力学、弹塑性力学和岩土力学耦合方法, 提出了地表可铲刮层在附加冲击荷载作用下铲刮变量的理论计算方法, 认为竖向冲击和切向剪切是滑体冲击铲刮过程的两种主要作用方式。王文沛等^[168]对新疆伊犁流状滑坡的形成机制和动力学过程进行了研究。陆鹏源等^[169]通过室内滑槽模型试验研究了滑坡-碎屑流冲击铲刮, 认为冲击型动力剪切主要是由于滑体前的冲切破坏和滑体中后源的剪切破坏。

5) 等效流体剪切模型。对于滑坡-碎屑流体与底坡面的剪切模型, 主要建立在摩擦系数和滑体法向应力相关的库仑摩擦定律之上^[113, 127]。Hungre^[116]对底坡面产生的流动阻力进行了研究, 认为流动阻力取决于滑坡-碎屑流材料的流变性, 而且是几种已知流体的不同参数的函数。Hungre 等^[118]在流体模型基础上, 针对滑坡-碎屑流进行分析, 经过经验改进提出了等效流体分析方法。碎屑流与基床之间的主要流动剪切本构模型有: Laminar 模型、Turbulent 模型、Plastic 模型、Bingham 模型、Frictional 模型、Voellmy 模型。Voellmy 模型考虑到了颗粒摩擦和湍流运动的组合形式, 更适用于雪崩、岩质崩滑、流动性滑坡、滑坡碎屑流、泥石流等分析中^[170]。Voellmy 边界层摩擦阻力包括了由碎屑流块体法向正应力产生的库伦型摩擦项和与运动速度平方成正比的湍流摩擦项。为了进一步分析碎屑流体的非线性

特征, Ramms 等^[171]对 Voellmy 模型进行了修正, 增加了屈服应力项。

(5) 风险评估与防灾减灾

由于对高位远程地质灾害失稳机理、流动性和运动距离的认识仍处于探索阶段, 因此, 高位远程地质灾害的风险评估方法尚未成熟可靠。雪橇模型是一种经验和机理相结合的模型, 在滑坡-碎屑流体积较大、地形简单的地区具有良好的实用性, 特别是采用滑前滑坡体和滑后堆积体质心的连接线(能量线)进行滑动距离的快速推断, 更适用于野外的快速分析^[110]。许多学者^[23, 25, 29-30, 109, 172-173]对复合型滑坡的运动机理和成灾风险进行了研究。殷跃平等^[75, 160]运用滑带液化和颗粒流理论对滑坡远程运动及成灾风险进行了研究, 提出了基于机理的风险评价方法。崔鹏等^[4, 69, 71, 174]在地表产流量激增、土体破坏物质供给激增、沟道堵塞体级联溃决流量放大和动床侵蚀规模增大等 4 个山洪泥石流的形成机理研究基础上, 构建了基于灾害动力过程的风险评估与风险制图方法, 提出可用于具体灾害点减灾的风险管理内容和风险调控技术、灾害防治的工程与非工程措施与技术方案, 初步形成了一套基于山洪泥石流动力过程的风险评估与风险管理理论与方法体系。高位远程地质灾害形成的次生灾害风险也是重点研究方向之一。黄波林等^[101-102]以三峡库区为基地, 系统开展了滑坡涌浪次生灾害风险评估理论与技术的研究, 构建风险评估范围界定、涌浪危险性分析、易损性分析、涌浪风险估计和涌浪风险划分 5 个分析步骤的水库滑坡涌浪风险评估技术框架, 为山区水库城镇防灾减灾提供技术支撑和借鉴。范宣梅等^[175]对全球 410 座体积大于 $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑坡坝进行编录分析, 并提出了统一术语和分类的方法。

3 亟待加强的研究方向

高位远程地质灾害成为了中国防灾减灾科技攻关的一项重点内容。自然资源部和科技部等制定的国家相关地质灾害防灾减灾科技创新计划, 提出了开展以灾害链为重点的特大型高速远程滑坡-碎屑流(泥石流)-涌浪-堰塞湖等复合型成灾模式研究, 建立快速预测评估方法和技术指标体系等研究。*Science* 期刊发表了加拿大 Calgary 大学 Shugar 等^[12]53 位学者联合撰写的《印度喜马拉雅山查莫利特大岩冰山崩 2021 灾难》文章, 代表了国际上关于复合型冰岩滑坡及流域性次生灾害研究的重要方向之一。复合型的高位远程滑坡灾害失稳机理、成灾模式和防治技术是世界性的难题, 已引起国

内、外科学界和工程界的高度关注,特别是强震、极端暴雨和人类活动耦合作用下的滑坡灾害防治技术长期安全性成为研究的热点和难点[5, 22, 64, 104, 125, 94, 176-189]。

随着铁路、公路、水电工程、边疆城镇和国防建设的发展,复合型高位远程滑坡灾害的防灾减灾将面临前所未有的新挑战。青藏高原和西南高山极高山区普遍存在启动于数百米,甚至数千米高度的特大型高位远程滑坡灾害,其规模巨大,具有超远视距的隐蔽性,启动后高速运动,运移距离远,且成灾模式复杂,多形成滑坡、碎屑流、堰塞坝和涌浪等链生地质灾害,防治难度大,其失稳机理、成灾模式和防治技术仍是中国滑坡防灾减灾研究的热点和难点,也是当前世界上防灾减灾研究难题之一,主要体现在如下几方面:

1) 易灾结构地质力学研究。青藏高原及周边的高位远程地质灾害受到推覆断裂构造带、断裂构造结合带和剪切构造带控制,西南山区的高位远程地质灾害受到扬子地台褶皱带的控制。在地震、暴雨、冰雪和采矿等因素诱导下,形成了不同类型的高位远程地质灾害。例如,龙门山推覆断裂构造带、鲜水河走滑断裂带、金沙江断裂构造结合带和喜马拉雅东构造结等不同的断裂构造地段的高位远程地质灾害在失稳机理和启动型式上具有各自的特征。扬子地台区背斜和向斜轴、顺向、斜向、逆向地层组合,形成了不同的山体崩滑失稳机理和启动特征。如何识别高位风险源成为高位远程地质灾害防灾减灾的前提。因此,应该开展青藏高原构造结合带断裂山体和扬子地台褶皱系褶皱山体的地质构造、地层岩组构成的易灾地质结构型式,高位失稳破坏和冲击启动机理,以及地震、暴雨、采空和雪线变化

等动力触发因素的地质力学问题研究。

2) 高位远程链动力学研究。青藏高原高山极高山区形成的复合型高位远程地质灾害具有冰/岩崩-碎屑流-泥石流-堰塞坝-堰塞湖溃决山洪-侧蚀次生滑坡链动过程。因此,提出了高位远程地质灾害的块体、颗粒体和固液二相流体等地质材料多尺度多体多相转化过程;高速滑坡-碎屑流-泥石流等非理想流体的质量、动量和能量传递机理;高位远程动力学的微地貌特征和边界层效应等研究方向。殷跃平等^[1]通过对青藏高原高山极高山区的高位远程地质灾害研究,认为高位滑体在经历破碎解体、动力剪切等一系列边界层效应之后形成高势能碎屑颗粒流,具有明显的流态化特征,并通过大型物理模型试验平台揭示了高位滑坡碎屑流势流体链动特征,以及紊流体和犁切体的边界层效应(图3)。进而提出了通过在基底层加设组合障桩群的方式人为改造高势能碎屑流体的边界层底坡,增大湍流边界层内湍动能的生成与组合障桩前“死区(dead zone)”范围的消能降险方法。

3) 风险防控理论技术研究。21世纪以来,青藏高原和西南山区流域梯级水电工程、铁路和公路交通网络规划建设,边疆城镇和国防工程建设飞速发展,因此,急需研究风险规避措施和防治工程技术。第一,应该开展基于复合型灾害动力学过程的风险评价理论研究,提出不同工况下高位远程地质灾害的运动距离和影响区的研究方法;第二,根据高位远程地质灾害的链动机理,开展防灾、抗灾、救灾和备灾综合减灾措施研究,并针对特大型灾害,研发系列刚韧性消能技术,开展基于全链条链动机理的防治工程设计理论研究和技术研发。

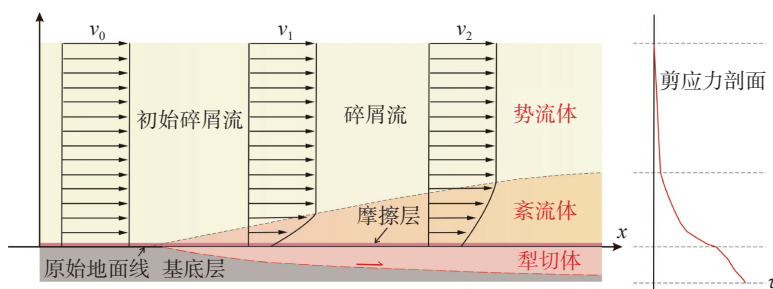


图3 滑坡碎屑流高速势流与边界层效应示意图

Fig. 3 A sketch of high-speed potential flow and boundary layer effect of landslide debris flow

4 结语

复合型的高位远程滑坡灾害失稳机理、成灾模式和防治技术是世界性的难题,已引起国内外科学界和工程界的高度关注,特别是强震、极端暴雨和人类活动耦

合作用下的滑坡灾害防治技术长期安全性成为研究的热点和难点。本文系统回顾了高位远程地质灾害的研究历程,探讨了高位远程地质灾害研究面临的挑战,揭示了高位滑坡碎屑流链动传递机理及边界层效应,提出可以通过改造高势能碎屑流体的边界层底坡,增大湍流

边界层内湍动能的生成与组合障桩前死区范围的消能降险方法。

最后,针对青藏高原高位远程滑坡灾害防灾减灾将面临的新挑战,提出了亟待加强的研究方向:(1)青藏高原构造结合带断裂山体和扬子地台褶皱系褶皱山体的地质构造、地层岩组构成的易灾地质结构型式,高位失稳破坏和冲击启动机理,以及地震、暴雨、采空和雪线变化等动力触发因素的地质力学问题研究;(2)高位远程地质灾害的块体、颗粒体和固液二相流体等地质材料多尺度多体多相转化过程,以及高速滑坡-碎屑流-泥石流等非理想流体的质量、动量和能量传递机理;(3)基于高位远程灾害动力学过程的风险评价理论研究和防灾、抗灾、救灾和备灾综合减灾措施研究,以及研发系列刚韧性消能技术,开展基于全链条链动机理的防治工程设计理论研究和技术研发。

致谢: 本文得到了李滨、高杨、王文沛、朱赛楠、张楠、张仕林、张田田等的支持与帮助!

参考文献(References):

- [1] YIN Yueping, LI Bin, GAO Yang, et al. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 66–101.
- [2] 殷跃平. 西藏波密贡嘎高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8–11. [YIN Yueping. Study on characteristics and disaster reduction of high-speed giant landslide in Bhumi Yigong, Xizang Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology* 2000, 27(4): 8–11. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 殷跃平, 朱赛楠, 李滨, 等. 青藏高原高位远程地质灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2021. [YIN Yueping, ZHU Sainan, LI Bin, et al. High-level remote geological disasters in Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [4] 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)]
- [5] 彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377–2389. [PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan—Tibet railway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(12): 2377–2389. (in Chinese with English abstract)]
- [6] ORENSE R, SAPUAY S. Preliminary report on the 17 February 2006 Leyte, Philippines landslide [J]. *Soils and Foundations*, 2006, 46(5): 685–693.
- [7] 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 October 11 and November 3, 2018 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1534–1551. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 9–16. [DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the formation mechanism and process of Baige landslides damming the upper reach of Jinsha River, China [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(1): 9–16. (in Chinese with English abstract)]
- [9] WANG Wenpei, YIN Yueping, ZHU Sainan, et al. Investigation and numerical modeling of the overloading-induced catastrophic rockslide avalanche in Baige, Tibet, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79(4): 1765–1779.
- [10] ZHANG Shilin, YIN Yueping, HU Xiewen, et al. Dynamics and emplacement mechanisms of the successive Baige landslides on the Upper Reaches of the Jinsha River, China [J]. *Engineering Geology*, 2020, 278: 105819.
- [11] ZHANG Shilin, YIN Yueping, HU Xiewen, et al. Initiation mechanism of the Baige landslide on the upper reaches of the Jinsha River, China [J]. *Landslides*, 2020, 17(12): 2865–2877.
- [12] SHUGAR D H, JACQUEMART M, SHEAN D, et al. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya [J]. *Science*, 2021, 373(6552): 300–306.
- [13] 殷跃平, 李滨, 张田田, 等. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 1–8. [YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [14] ZHANG Tiantian, YIN Yueping, LI Bin, et al. Characteristics and dynamic analysis of the February 2021 long-runout disaster chain triggered by massive rock and ice avalanche at Chamoli, Indian Himalaya [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(2): 296–308.
- [15] FAN Xuanmei, YUNUS A P, YANG Yinghui, et al. Imminent

- threat of rock-ice avalanches in High Mountain Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155380.
- [16] PINYOL N, ALONSO E. Criteria for rapid sliding II: Thermo-hydro-mechanical and scale effects in Vaiont case [J]. *Engineering Geology*, 2010, 114: 211 – 227.
- [17] SASSA K, NAGAI O, SOLIDUM R, et al. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide [J]. *Landslides*, 2010, 7(3): 219 – 236.
- [18] HUNGR O, LEROUÉIL S, PICARELLI L. The Varnes classification of landslide types, an update [J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 167 – 194.
- [19] CROSTA G B, AGLIARDI F, RIVOLTA C, et al. Long-term evolution and early warning strategies for complex rockslides by real-time monitoring [J]. *Landslides*, 2017, 14(5): 1615 – 1632.
- [20] 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 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*, 2017, 44(5): 827 – 841. [YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. 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*, 2017, 44(5): 827 – 841. (in Chinese with English abstract)]
- [21] XU Wenjie, ZHOU Qian, DONG Xueyang. 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*, 2022, 17(6): 2121 – 2137.
- [22] GAO Yang, YIN Yueping, LI Bin, et al. The role of fluid drag force in the dynamic process of two-phase flow-like landslides [J]. *Landslides*, 2022, 19(7): 1791 – 1805.
- [23] BUSS E, HEIM A. Der bergsturz von elm [J]. Zurich, Wurster & Cie, 1881: 163.
- [24] HEIM A. Bergsturz und Menschenleben (Landslides and human lives) [J]. Fretz und Wasmuth, Zurich, 1932: 218.
- [25] MCCONNELL R G, BROCK R W. Report on the great landslide at Frank, Alberta [R]. Ottawa: Department of the Interior, Government of Canada, 1904.
- [26] CRUDEN D. Major rock slides in the Canadian Rockies [C] //Proceedings of the 27th Canadian Geotechnical Conference. Edmonton, Alta: [s.n.], 1974: 59 – 66.
- [27] CRUDEN D M, VARNES D J. Landslide types and processes [M] //Turner A K, Schuster R L. Landslides. Washington D C: National Academy Press, 1996: 36 – 75.
- [28] CHARRIÈRE M, HUMAIR F, FROESE C, et al. From the source area to the deposit: collapse, fragmentation, and propagation of the Frank Slide [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015: B31243.1.
- [29] CRUDEN D M, HUNGR O. The debris of the Frank Slide and theories of rockslide-avalanche mobility [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1986, 23(3): 425 – 432.
- [30] MELOSH H J. The mechanics of large rock avalanches [C] //Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Boulder: Geological Society of America, 1987: 41 – 50.
- [31] BENKO B, STEAD D. The Frank slide: a reexamination of the failure mechanism [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(2): 299 – 311.
- [32] LOCAT P, COUTURE R, LEROUÉIL S, et al. Fragmentation energy in rock avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2006, 43(8): 830 – 851.
- [33] MÜLLER L. The rock slide in the Vajont Valley [J]. *Rock Mechanics & Engineering Geology*, 1964, 2: 148 – 212.
- [34] MÜLLER-SALZBURG L. The Vajont catastrophe: A personal review [J]. *Engineering Geology*, 1987, 24(1/2/3/4): 423 – 444.
- [35] MÜLLER L. The Vajont slide [J]. *Engineering Geology*, 1987, 24(1/2/3/4): 527 – 532.
- [36] BROILI L. New knowledge on the geomorphology of the Vaiont slide slip surface [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 1967, 5: 38 – 88.
- [37] KILBURN C R J, PETLEY D N. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: Lessons from Vajont, Northern Italy [J]. *Geomorphology*, 2003, 54(1/2): 21 – 32.
- [38] BISTACCHI A, MASSIRONI M, SUPERCHI L, et al. A 3D geological model of the 1963 Vajont landslide [J]. *Italian Journal of Engineering Geology & Environment*, 2013(TOPIC 6): 531-539.
- [39] BOON C W, HOULSBY G T, UTILI S. New insights into the 1963 Vajont slide using 2D and 3D distinct-element method analyses [J]. *Géotechnique*, 2014, 64(10): 800 – 816.
- [40] HUTCHINSON J N, KOJEAN E. On the rock slide-debris flow of 25 April 1974 in the Quebrada Ccochacay on the Rio Mantaro [R]. UNESCO Mission to the Mantaro Valley, Peru, 1975: 49.
- [41] KOJAN E, HUTCHINSON J N. Mayunmarca rockslide and debris flow, Peru [M] //Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1978: 315-353.
- [42] EVANS S G, GUTHRIE R H, ROBERTS N J, et al. 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*, 2007, 7(1): 89 – 101.
- [43] GUTHRIE R H, EVANS S G, CATANE S G, et al. The 17 February 2006 rock slide-debris avalanche at Guinsaugon Philippines: a synthesis [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(2): 201 – 213.

- [44] LUZON P K, MONTALBO K, GALANG J, et al. Hazard mapping related to structurally controlled landslides in Southern Leyte, Philippines [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(3): 875–883.
- [45] 孙玉科, 姚宝魁. 盐池河磷矿山体崩塌破坏机制的研究 [J]. *水文地质工程地质*, 1983, 10(1): 1–7. [SUN Yuke, YAO Baokui. Study on the mechanism of mountain collapse in Yanchihe phosphate mine [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1983, 10(1): 1–7. (in Chinese)]
- [46] 孙玉科. 宜昌盐池河磷矿山崩及其崩塌破坏机制 [C] // 中国典型滑坡. 宜昌, 1986: 99–108. [SUN Yuke. Collapse and failure mechanism of Yanchihe phosphate mine, Yichang, China [C] // *Typical landslides in China*. Yichang, 1986: 99–108. (in Chinese)]
- [47] 艾南山, 王民新. 洒勒山滑坡速度的估算 [J]. *水土保持通报*, 1983, 3(3): 72–74. [AI Nanshan, WANG Minxin. An estimate of velocity of the landslide at sale mountain [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1983, 3(3): 72–74. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 冯学才, 田植甲. 洒勒山滑坡的特征及其预报 [J]. *水土保持通报*, 1983, 3(3): 75–81. [FENG Xuecai, TIAN Zhijia. Characteristics and prediction of Saleshan landslide [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1983, 3(3): 75–81. (in Chinese)]
- [49] 苏伯苓. 高速超大型洒勒山滑坡及其研究 [C] // 中国典型滑坡. 宜昌, 1986: 43–48. [SUBoling. Study on high speed super-large scale Saleshan landslide [C] // *Typical landslides in China*. Yichang, 1986: 43–48. (in Chinese)]
- [50] 王士天, 詹铮, 刘汉超. 洒勒山高速滑坡的基本特征及动力学机制 [J]. *地质灾害与环境保护*, 1990, 1(2): 66–74. [WANG Shitian, ZHAN Zheng, LIU Hanchao. Basic characteristics and dynamic mechanism of Saleshan high-speed landslide [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 1990, 1(2): 66–74. (in Chinese)]
- [51] 杨志双, 洪勇. 中国洒勒山大型滑坡高速运动成因机制和灾害预测 [C] // 第五届全国工程地质大会文集. 辉县, 1996: 126–131. [YANG Zhishuang, HONG Yong. Genetic mechanism and disaster prediction of high speed large-scale landslide in Salleshan Mountain, China [C] // *Proceedings of the 5th National Engineering Geology Congress*. Hui County, 1996: 126–131. (in Chinese)]
- [52] 李绍武. 新滩滑坡滑动机制的探讨 [J]. *水土保持通报*, 1985, 5(5): 15–19. [LI Shaowu. Discussion on sliding mechanism of Xintan landslide [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1985, 5(5): 15–19. (in Chinese)]
- [53] 陆业海. 新滩滑坡征兆及其成功的监测预报 [J]. *水土保持通报*, 1985, 5(5): 1–9. [LU Yehai. Symptoms of Xintan landslide and its successful monitoring and prediction [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1985, 5(5): 1–9. (in Chinese)]
- [54] 刘雄. 新滩大滑坡机制探讨 [J]. *岩土力学*, 1986, 7(2): 53–60. [LIU Xiong. Discussion of the mechanism for Xintan beach landslide [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1986, 7(2): 53–60. (in Chinese with English abstract)]
- [55] 吕贵芳, 任江. 新滩滑坡研究 [C] // 中国典型滑坡. 宜昌, 1986: 210–220. [LYUGuifang, REN Jiang. Research on Xintan landslide [C] // *Typical landslides in China*. Yichang, 1986: 210–220. (in Chinese)]
- [56] 黄润秋. 灾害性崩滑地质过程的全过程模拟 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1994, 5(增刊1): 11–17. [HUANG Runqiu. Full-course simulation of hazardous rockfalls and avalanches [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1994, 5(Sup 1): 11–17. (in Chinese with English abstract)]
- [57] 黄润秋. 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*, 2007, 26(3): 433–454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433–454. (in Chinese with English abstract)]
- [58] 胡广韬. 论斜坡环境中滑坡之剧动与高速的机理 [J]. *陕西水力发电*, 1986, 2(3): 7–18. [HU Guangtao. On the mechanism of landslide violent movement and high speed in slope environment [J]. *Power System and Clean Energy*, 1986, 2(3): 7–18. (in Chinese)]
- [59] 胡广韬. 灾害性滑坡启程剧动与行程高速的机理 [J]. *灾害学*, 1987, 2(1): 17–28. [HU Guangtao. On the mechanisms of initial intense moving and high speed travelling of disastrous landslides [J]. *Journal of Catastrophology*, 1987, 2(1): 17–28. (in Chinese with English abstract)]
- [60] 胡广韬, 毛延龙, 赵法锁. 论基岩高速滑坡的弹冲动力学机理 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1992, 3(4): 21–33. [HU Guangtao, MAO Yanlong, ZHAO Fasuo. The elastic impulsive motion dynamics mechanism of high-speed landslide on bed rock [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1992, 3(4): 21–33. (in Chinese with English abstract)]
- [61] 王士天, 张倬元, 詹铮, 等. 龙羊峡水电站: 重大工程地质问题研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989. [WANG Shitian, ZHANG Zhuoyuan, ZHAN Zheng, et al. Longyangxia Hydropower Station: Research on major engineering geological problems [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1989. (in Chinese)]
- [62] 胡广韬. 滑坡动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1995. [HU Guangtao. Landslide dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)]

- [63] 程谦恭, 彭建兵, 胡广韬. 高速岩质滑坡动力学 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999. [CHENG Qiangong, PENG Jianbing, HU Guangtao. Dynamics of high-speed rock landslide [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1999. (in Chinese)]
- [64] 王家鼎, 张伟元. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999. [WANG Jiading, ZHANG Zhuoyuan. Systematic engineering geological study on typical high-speed loess landslide group [M]. Chengdu: Sichuan Scientific & Technical Publishers, 1999. (in Chinese)]
- [65] 晏同珍, 杨顺安, 方云. 滑坡学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000. [YAN Tongzhen, YANG Shun'an, FANG Yun. Landslides [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000. (in Chinese)]
- [66] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. [WANG Gongxian, XU Junling, LIU Guangdai, et al. Landslide science and landslide prevention technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese)]
- [67] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. [HUANG Runqiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [68] 许强, 裴向军, 黄润秋, 等. 汶川地震大型滑坡研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. [XU Qiang, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [69] 崔鹏, 何思明, 姚令侃. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2011. [CUI Peng, HE Siming, YAO Lingkan. Formation mechanism and risk control of mountain disasters in Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)]
- [70] 殷跃平, 张永双. 汶川地震工程地质与地质灾害 [M]. 北京: 科学出版社, 2013. [YIN Yueping, ZHANG Yongshuang. Engineering geology and geological disasters of Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)]
- [71] 崔鹏, 邹强. 川藏交通廊道山地灾害演化规律与工程风险 [M]. 北京: 科学出版社, 2021. [CUI Peng, ZOU Qiang. Evolution law and engineering risk of mountain disasters in Sichuan-Tibet traffic corridor [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [72] 邓建辉, 陈菲, 赵思远. 白格滑坡致灾调查 [M]. 北京: 科学出版社, 2021. [DENG Jianhui, CHEN Fei, ZHAO Siyuan. Investigation on the disaster caused by Baige landslide [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [73] VARNES D J. Slope movement types and processes [C] //Schuster R L, Krizek R J. Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board. Washington, D C: National Academy of Sciences, 1978: 11 – 33.
- [74] YIN Yueping, WANG Fawu, SUN Ping. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. *Landslides*, 2009, 6(2): 139 – 152.
- [75] YIN Yueping, XING Aiguo. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock slide-debris avalanche, Tibet, China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71(1): 149 – 160.
- [76] WANG Fawu, SUN Ping, HIGHLAND L, et al. Key factors influencing the mechanism of rapid and long runout landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2014, 1(1): 1 – 16.
- [77] INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: Detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 123 – 133.
- [78] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(7): 949 – 956. [GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949 – 956. (in Chinese with English abstract)]
- [79] GAO Yang, LI Bin, GAO Haoyuan, et al. 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*, 2020, 17(7): 1663 – 1677.
- [80] 李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, 44(7): 967 – 979. [LI Zhenhong, SONG Chuang, YU Chen, et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring: Challenges and solutions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967 – 979. (in Chinese with English abstract)]
- [81] YIN Yueping, LIU Xiaojie, ZHAO Chaoying, et al. Multi-dimensional and long-term time series monitoring and early warning of landslide hazard with improved cross-platform SAR offset tracking method [J]. *Science China Technological Sciences*, 2022, 65(8): 1891 – 1912.
- [82] MASSIRONI M, ZAMPIERI D, SUPERCHI L, et al. Geological structures of the Vajont landslide [J]. *Italian Journal of Engineering Geology & Environment*, 2013(TOPIC

- 6): 573–582.
- [83] GLASTONBURY J, FELL R. Report on the analysis of “rapid” natural rock slope failures [R]. Sydney: University of New South Wales, 2000.
- [84] BADGER T C. Fracturing within anticlines and its kinematic control on slope stability [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2002, 8(1): 19–33.
- [85] BRIDEAU M A, YAN Ming, STEAD D. The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures [J]. *Geomorphology*, 2009, 103(1): 30–49.
- [86] AMBROSI C, CROSTA G B. Valley shape influence on deformation mechanisms of rock slopes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2011, 351(1): 215–233.
- [87] HUMAIR F, PEDRAZZINI A, EPARD J L, et al. Structural characterization of Turtle Mountain anticline (Alberta, Canada) and impact on rock slope failure [J]. *Tectonophysics*, 2013, 605: 133–148.
- [88] STEAD D, WOLTER A. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology [J]. *Journal of Structural Geology*, 2015, 74: 1–23.
- [89] 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(3): 457–466. [PENG Jianbing, MA Runyong, LU Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 457–466. (in Chinese with English abstract)]
- [90] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(6): 818–826. [XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(6): 818–826. (in Chinese with English abstract)]
- [91] 胡新丽, 唐辉明, 朱丽霞. 汶川震中岩浆岩高边坡破坏模式与崩塌机理 [J]. *地球科学*, 2011, 36(6): 1149–1154. [HU Xinli, TANG Huiming, ZHU Lixia. Collapse mode and mechanism of high magmatite rock slope in Wenchuan epicentral area [J]. *Earth Science*, 2011, 36(6): 1149–1154. (in Chinese with English abstract)]
- [92] 李滨, 王国章, 冯振, 等. 地下采空诱发陡倾层状岩质斜坡失稳机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1148–1161. [LI Bin, WANG Guozhang, FENG Zhen, et al. Failure mechanism of steeply inclined rock slopes induced by underground mining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1148–1161. (in Chinese with English abstract)]
- [93] 唐辉明, 鲁莎. 三峡库区黄土坡滑坡滑带空间分布特征研究 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 129–136. [TANG Huiming, LU Sha. Research on the spatial distribution of slip zone of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 129–136. (in Chinese with English abstract)]
- [94] 兰恒星, 仇义星, 伍宇明. 岩体结构效应与长远程滑坡动力学 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1): 108–122. [LAN Hengxing, ZHANG Yixing, WU Yuming. Effect of rock mass structure on the dynamics of longrunout landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(1): 108–122. (in Chinese with English abstract)]
- [95] XUE Lei, QIN Siqing, PAN Xiaohua, et al. A possible explanation of the stair-step brittle deformation evolutionary pattern of a rockslide [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2017, 8(2): 1456–1476.
- [96] CHEN Hongran, QIN Siqing, XUE Lei, et al. A physical model predicting instability of rock slopes with locked segments along a potential slip surface [J]. *Engineering Geology*, 2018, 242: 34–43.
- [97] 杨百存, 秦四清, 薛雷, 等. 锁固段损伤过程中的能量转化与分配原理 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(7): 975–981. [YANG Baicun, QIN Siqing, XUE Lei, et al. Energy conversion and allocation principle during the damage process of locked segment [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(7): 975–981. (in Chinese with English abstract)]
- [98] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡-碎屑流研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(4): 445–454. [YIN Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. Investigation of a high speed and long Run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 445–454. (in Chinese with English abstract)]
- [99] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 217–226. [YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide: A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 217–226. (in Chinese with English abstract)]
- [100] 殷跃平, 王猛, 李滨, 等. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10): 1969–1982. [YIN Yueping, WANG Meng, LI Bin, et al. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(10): 1969–1982. (in Chinese with English abstract)]
- [101] 黄波林, 殷跃平, 李滨, 等. 库区城镇滑坡涌浪风险评价与减灾研究 [J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1949–1961. [HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, et al. Study of risk assessment and mitigation for landslide-induced impulse

- wave near towns in reservoir areas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1949–1961. (in Chinese with English abstract)]
- [102] 黄波林, 殷跃平. 水库区滑坡涌浪风险评估技术研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 621–629. [HUANG Bolin, YIN Yueping. Risk assessment research on impulse wave generated by landslide in reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 621–629. (in Chinese with English abstract)]
- [103] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 5–13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 5–13. (in Chinese with English abstract)]
- [104] 朱赛楠, 殷跃平, 王猛, 等. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究——以金沙江色拉滑坡为例 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 688–697. [ZHU Sainan, YIN Yueping, WANG Meng, et al. Instability mechanism and disaster mitigation measures of long-distance landslide at high location in Jinsha River junction zone: Case study of Sela landslide in Jinsha River, Tibet [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 688–697. (in Chinese with English abstract)]
- [105] HSÜ K J. Albert heim: Observations on landslides and relevance to modern interpretations [M]. // *Developments in Geotechnical Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 1978: 71–93.
- [106] DAVIES T R, MCSAVENEY M J, HODGSON K A. A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(6): 1096–1110.
- [107] RUBEY W W, KING HUBBERT M. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1959, 70(2): 167.
- [108] KENT P E. The transport mechanism in catastrophic rock falls [J]. *The Journal of Geology*, 1966, 74(1): 79–83.
- [109] SHREVE R L. The blackhawk landslide [M]. // *Geological Society of America Special Papers*. Boulder: Geological Society of America, 1968: 1–48.
- [110] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1974, 11(3): 65.
- [111] HSÜ K J. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls [J]. *Boulder: Geological Society of America Bulletin*, 1975, 86(1): 129.
- [112] HOWARD K A. Avalanche mode of motion: Implications from Lunar examples [J]. *Science*, 1973, 180: 1052–1055.
- [113] IVERSON R M. Mechanics of debris flows and rock avalanches [M]. Boca Raton: CRC Press, 2012b.
- [114] HUNGR O. Dynamics of rock avalanches and other types of mass movements [D]. Edmonton: University of Alberta, 1981.
- [115] HUNGR O. Mobility of rock avalanches [R]. Tsukuba: National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 1990: 11–20.
- [116] 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.
- [117] HUNGR O, MORGENSTERN N R. Experiments in high velocity open channel flow of granular materials [J]. *Geotechnique*, 1984, 34(3): 405–413.
- [118] HUNGR O, EVANS S G. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model [C]. // *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides*. Trondheim, Norway: [s.n.], 1996: 21.
- [119] HUNGR O, EVANS S G. A dynamic model for landslides with changing mass [C]. // *Proceedings of IAEG on Engineering Geology and the Environment*. Athens, Greece: [s.n.], 1997: 719, 724.
- [120] HUNGR O, EVANS S G, HAZZARD J. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(2): 224–238.
- [121] HUNGR O, EVANS S G, BOVIS M J, et al. A review of the classification of landslides of the flow type [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2001, 7(3): 221–238.
- [122] HUNGR O. Rock avalanche occurrence, process and modelling [C]. // *Landslides from Massive Rock Slope Failure*. Dordrecht: Springer, 2006: 243–266.
- [123] XING Aiguo, WANG Gonghui, YIN Yueping, et al. Investigation and dynamic analysis of a catastrophic rock avalanche on September 23, 1991, Zhaotong, China [J]. *Landslides*, 2016, 13(5): 1035–1047.
- [124] GAO Yang, YIN Yueping, LI Bin, et al. Characteristics and numerical runout modeling of the heavy rainfall-induced catastrophic landslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, China, following the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Landslides*, 2017, 14(4): 1361–1374.
- [125] YIN Yueping, XING Aiguo, WANG Gonghui, et al. Experimental and numerical investigations of a catastrophic long-runout landslide in Zhenxiong, Yunnan, southwestern China [J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 649–659.
- [126] IVERSON R M. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches [J]. *Journal of*

- Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117(F3): F03006.
- [127] IVERSON R M. The physics of debris flows [J]. *Reviews of Geophysics*, 1997, 35(3): 245–296.
- [128] IVERSON R M, OUYANG Chaojun. Entrainment of bed material by earth-surface mass flows: Review and reformulation of depth-integrated theory [J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(1): 27–58.
- [129] IVERSON R M, REID M E, LOGAN M, et al. Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(2): 116–121.
- [130] IVERSON R M. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments [J]. *Geomorphology*, 2015, 244: 9–20.
- [131] SAVAGE S B, IVERSON R M. Surge dynamics coupled to pore-pressure evolution in debris flows [C] // RICKENMANN D, CHEN C. International conference on debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction, and assessment, proceedings. Rotterdam: Millpress, 2003: 503–514.
- [132] PITMAN E B, LE Long. A two-fluid model for avalanche and debris flows [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363(1832): 1573–1601.
- [133] TAKAHASHI T. Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures [M]. London: Taylor & Francis, 2007.
- [134] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D} [J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(5): 507–508. [TANG Chun'an, ZHAO Wen. Software system RFPA^{2D} for analyzing the whole process of rock fracture [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(5): 507–508. (in Chinese)]
- [135] 李世海, 高波, 燕琳. 三峡永久船闸高边坡开挖三维离散元数值模拟 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(3): 272–277. [LI Shihai, GAO Bo, YAN Lin. 3-D simulation of the excavation of high steep slope of Three-Gorges permanent lock by distinct element method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(3): 272–277. (in Chinese with English abstract)]
- [136] 刘春, 张晓宇, 许强, 等. 三维离散元模型的滑坡能量守恒模拟研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(增刊 2): 698–704. [LIU Chun, ZHANG Xiaoyu, XU Qiang, et al. Research on energy conservation simulation of three dimensional discrete element model [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(Sup 2): 698–704. (in Chinese with English abstract)]
- [137] 徐文杰, 王忠静. 一个共享的软件服务系统——水利云计算平台 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(9): 141–148. [XU Wenjie, WANG Zhongjing. A shared software service system: Hydraulic cloud computing platform [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(9): 141–148. (in Chinese with English abstract)]
- [138] SHREVE R L. Sherman landslide, Alaska [J]. *Science*, 1966, 154(3757): 1639–1643.
- [139] 邢爱国, 殷跃平, 齐超, 等. 高速远程滑坡气垫效应的风洞模拟试验研究 [J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(10): 1642–1646. [XING Aiguo, YIN Yueping, QI Chao, et al. Study on the wind tunnel testing of air cushion effect of high-speed and long-runout landslide [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(10): 1642–1646. (in Chinese with English abstract)]
- [140] GOGUEL J. Scale-dependent rockslide mechanisms, with emphasis on the role of pore fluid vaporization [M] // *Developments in Geotechnical Engineering*. Amsterdam: Elsevier, 1978: 693–705.
- [141] ERISMANN T H. Mechanisms of large landslides [J]. *Rock Mechanics*, 1979, 12(1): 15–46.
- [142] HABIB P. Production of gaseous pore pressure during rock slides [J]. *Rock Mechanics*, 1975, 7(4): 193–197.
- [143] GOGUEL J, PACHOUD A. Geology and dynamics of the rockfall of the granier range which occurred in November 1248. *Bulletin, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Hydrogéologie*, Lyon, 1972(1): 29–38.
- [144] PINYOL N M, ALVARADO M, ALONSO E E, et al. Thermal effects in landslide mobility [J]. *Géotechnique*, 2018, 68(6): 528–545.
- [145] ALONSO E E. Triggering and motion of landslides [J]. *Géotechnique*, 2021, 71(1): 3–59.
- [146] TAMBURI A J. Creep of single rocks on bedrock [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1974, 85(3): 351.
- [147] WANG Yufeng, DONG Jiajuan, CHENG Qianggong. Velocity-dependent frictional weakening of large rock avalanche basal facies: implications for rock avalanche hypermobility? [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(3): 1648–1676.
- [148] HU Wei, HUANG Runqiu, MCSAVENEY M, et al. Mineral changes quantify frictional heating during a large low-friction landslide [J]. *Geology*, 2018, 46(3): 223–226.
- [149] HU Wei, HUANG Runqiu, MCSAVENEY M, et al. Superheated steam, hot CO₂ and dynamic recrystallization from frictional heat jointly lubricated a giant landslide: field and experimental evidence [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 510: 85–93.
- [150] HE Siming, LIU Wei, WANG Juan. Dynamic simulation of landslide based on thermo-poro-elastic approach [J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 75: 24–32.
- [151] HUTCHINSON J N, BHANDARI R K. Untrained loading, a fundamental-mechanism of mud slide and other mass movements [J]. *Geotechnique*, 1971, 21(4): 353–358.
- [152] SEED H B. The fourth Terzaghi lecture: landslides during earthquakes due to liquefaction [J]. *Journal of the Soil*

- Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94(5): 1053–1122.
- [153] SASSA K, FUKUOKA H, WANG Gonghui, et al. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics [J]. *Landslides*, 2004, 1(1): 7–19.
- [154] SASSA K. Development of a new cyclic loading ring-shear apparatus to study earthquake-induced landslides [R]. Tokyo: Ministry of Education, Science and Culture, Japan, 1994: 106.
- [155] SASSA K. Special lecture: Geotechnical model for the motion of landslides: Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10–15 July 1988V1, P37–55. Publ Rotterdam: a Balkema, 1988 [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1989, 26: 88.
- [156] SASSA K. The mechanism starting liquefied landslides and debris flows [C] //Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides. Toronto: [s.n.], 1984: 349–354.
- [157] WANG Fawu, WAFID A N M, ZHANG Fanyu, et al. Tandikek and Malalak rapid and long runout landslides triggered by West Sumatra earthquake 2009 (M7.6) in Indonesia [J]. *Journal of the Japan Landslide Society*, 2011, 48(4): 215–220.
- [158] WANG Gonghui, JIANG Yao, CHANG Chengrui, et al. Volcaniclastic debris avalanche on Motomachi area of Izu-Oshima, Japan, triggered by severe storm: Phenomenon and mechanisms [J]. *Engineering Geology*, 2019, 251: 24–36.
- [159] XING Aiguo, WANG Gonghui, LI Bin, 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.
- [160] YIN Yueping, LI Bin, WANG Wenpei, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. *Engineering*, 2016, 2(2): 230–249.
- [161] TAKAHASHI T. Mechanical characteristics of debris flow [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1978, 104(8): 1153–1169.
- [162] EGASHIRA S, HONDA N, ITOH T. Experimental study on the entrainment of bed material into debris flow [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 2001, 26(9): 645–650.
- [163] BOUCHUT F, FERNÁNDEZ-NIETO E D, MANGENEY A, et al. On new erosion models of Savage-Hutter type for avalanches [J]. *Acta Mechanica*, 2008, 199(1): 181–208.
- [164] MANGENEY A. Landslide boost from entrainment [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(2): 77–78.
- [165] 殷跃平, 王文沛. 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*, 2020, 39(8): 1513–1521.
- [166] 高杨, 高浩源, 李滨, 等. 滑坡冲击铲刮变量的计算方法研究 [J]. *计算力学学报*, 2022, 39(1): 105–112.
- [167] 高杨, 李滨, 高浩源, 等. 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*, 2020, 26(4): 510–519.
- [168] WANG Wenpei, YIN Yueping, ZHU Sainan, et al. Dynamic analysis of a long-runout, flow-like landslide at Areletuobie, Yili River valley, northwestern China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(5): 3143–3157.
- [169] 陆鹏源, 侯天兴, 杨兴国, 等. 滑坡冲击铲刮效应物理模型试验及机制探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1225–1232.
- [170] VOELLMY A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen (On the destructive power of avalanche) [J]. *Schweizerische Bauzeitung*, 1955, 73: 212–285.
- [171] MAHBOOB M A, IQBAL J, ATIF I. Modeling and simulation of glacier avalanche: A case study of gayari sector glaciers hazards assessment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(11): 5824–5834.
- [172] HUNGR O, MORGENSTERN N R. Discussion: Experiments on the flow behavior of granular materials at high velocity in an open channel [J]. *Géotechnique*, 1985, 35(3): 383–385.
- [173] DAVIES T R, MCSAVENEY M J. Runout of dry granular avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(2): 313–320.
- [174] 崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 137–147.
- [175] CUI Peng, ZOU Qiang. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 137–147. (in Chinese with English abstract)

- [175] FAN Xuanmei, DUFRESNE A, SIVA SUBRAMANIAN S, et al. The formation and impact of landslide dams: State of the art [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103116.
- [176] 孙萍, 汪发武, 殷跃平, 等. 汶川地震高速远程滑坡机制实验研究 [J]. *地震地质*, 2010, 32(1): 98–106. [SUN Ping, WANG Fawu, YIN Yueping, et al. An experimental study on the mechanism of rapid and long Run-out landslide triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 2010, 32(1): 98–106. (in Chinese with English abstract)]
- [177] DAI Fuchu, TU Xinbin, XU Chong, et al. Rock avalanches triggered by oblique-thrusting during the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J]. *Geomorphology*, 2011, 132(3/4): 300–318.
- [178] 王玉峰, 程谦恭, 朱圻. 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*, 2012, 31(6): 1089–1106. [WANG Yufeng, CHENG Qiangong, ZHU Qi. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(6): 1089–1106. (in Chinese with English abstract)]
- [179] 胡卸文, 顾成壮, 牛彦博, 等. 芦山地震触发大岩崩滑坡-碎屑流特征与运动过程 [J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(4): 590–598. [HU Xiewen, GU Chengzhuang, NIU Yanbo, et al. Debris flow characteristics and movement process of dayanbeng landslide in Tianquan County triggered by “4·20” Lushan earthquake [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(4): 590–598. (in Chinese with English abstract)]
- [180] 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(4): 1–15. [MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong river basin: Progress and prospect [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(4): 1–15. (in Chinese with English abstract)]
- [181] 刘传正. 论崩塌滑坡-碎屑流高速远程问题 [J]. *地质论评*, 2017, 63(6): 1563–1575. [LIU Chuazheng. Research on high speed and long-distance of the avalanches or landslide-debris streams [J]. *Geological Review*, 2017, 63(6): 1563–1575. (in Chinese with English abstract)]
- [182] XING Aiguo, YUAN Xiaoyi, XU Qiang, 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.
- [183] ZHANG Ming, MCSAVENEY M J. Rock avalanche deposits store quantitative evidence on internal shear during runout [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(17): 8814–8821.
- [184] CHEN Xiaoqing, HU Kai, CHEN Jiangang, et al. Laboratory investigation of the effect of initial dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of wide-grading gravelly soil [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 36(2): 885–896.
- [185] 裴向军, 崔圣华, 黄润秋. 大光包滑坡启动机制: 强震过程滑带动力扩容与水击效应 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 430–448. [PEI Xiangjun, CUI Shenghua, HUANG Runqiu. A model of initiation of Daguanbao landslide: Dynamic dilation and water hammer in sliding zone during strong seismic shaking [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 430–448. (in Chinese with English abstract)]
- [186] 许冲, 徐锡伟, 周本刚, 等. 同震滑坡发生概率研究——新一代地震滑坡危险性模型 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(5): 1122–1130. [XU Chong, XU Xiwei, ZHOU Bengang, et al. Probability of coseismic landslides: A new generation of earthquake-triggered landslide hazard model [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(5): 1122–1130. (in Chinese with English abstract)]
- [187] GUO Changbao, MONTGOMERY D R, ZHANG Yongshuang, et al. Evidence for repeated failure of the giant Yigong landslide on the edge of the Tibetan Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 14371.
- [188] 文宝萍, 曾启强, 闫天玺, 等. 青藏高原东南部大型岩质高速远程崩滑启动地质力学模式初探 [J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 38–49. [WEN Baoping, ZENG Qiqiang, YAN Tianxi, et al. Preliminary study on geomechanical model of large-scale rock mass in southeast Qinghai-Tibet Plateau starting from high-speed long-distance collapse and slip [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 38–49. (in Chinese with English abstract)]
- [189] 罗刚, 程谦恭, 沈位刚, 等. 高位高能岩崩研究现状与发展趋势 [J]. *地球科学*, 2022, 47(3): 913–934. [LUO Gang, CHENG Qiangong, SHEN Weigang, et al. Research status and development trend of the high-altitude extremely-energetic rockfalls [J]. *Earth Science*, 2022, 47(3): 913–934. (in Chinese with English abstract)]