https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.316

中亚天山造山带高速远程滑坡动力学机理研究面临的重要科学问题

林棋文[1,2],程谦恭[1*],黄 镜[1],陈 梅[1],冯止依[1],李天话[1],张龙飞[1],杨虎锋[1],王玉峰[1]

1. 西南交通大学地质工程系,四川成都 611756
2. 西南交通大学宜宾研究院,四川宜宾 644000

摘 要: 天山山脉是重大滑坡灾害的高发区域,高速远程滑坡已经成为严重制约我国“一带一路”倡议实施的重大地质灾害.以中亚天山造山带高速远程滑坡为研究对象,重点阐述天山地区构造演化与灾害孕育的内外动力地质背景,分析总结天山地区高速远程滑坡研究历程.在此基础上,阐述了天山地区高速远程滑坡研究的最新进展,论述了当前高速远程滑坡动力学机理研究的核心科学问题,指明高速远程滑坡主体层弥漫性剪切破碎作用与基底层高速剪切矿物相变过程对滑坡流态化远程运动的重要影响;从而提出中亚天山造山带高速远程滑坡动力学机理研究应重点关注的两个关键科学难题,即高速远程滑坡剪切破碎相态转化机理和高速远程滑坡矿物相变摩阻弱化机理.中亚天山造山带高速远程滑坡动力学机理研究进展的系统梳理和研究展望,对于突破滑坡动力学理论瓶颈、提升国家自然灾害防治能力和服务国家重大需求具有重要意义.

关键词: 高速远程滑坡;动力学机理;剪切破碎相态转化;矿物相变摩阻弱化;中亚天山造山带;工程地质.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-4057-22 **收稿日期:** 2026-04-08

Key Scientific Issues in Study of Rock Avalanche Dynamics in Tianshan Orogenic Belt

Lin Qiwen[1,2], Cheng Qiangong[1*], Huang Jing[1], Chen Mei [1], Feng Zhiyi[1], Li Tianhua[1], Zhang Longfei[1], Yang Hufeng[1], Wang Yufeng[1]

1. *Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 611756, *China*
2. *Yibin Research Institute, Southwest Jiaotong University, Yibin* 644000, *China*

Abstract: The Tianshan Mountains represent a region highly susceptible to catastrophic landslide hazards, where rock avalanches have emerged as significant geological disasters that severely constrain the implementation of Chinese Belt and Road Initative. This study focuses on rock avalanches in the Tianshan orogenic belt, with particular emphasis on elucidating the endogenic and exogenic geological settings arising from the tectonic evolutionary history and disaster-prone environments in the Tianshan region, while

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Nos. 42577233, U2244229, 42207203);新疆维吾尔自治区重大科技专项课题(No. 2025A03003-4);中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2682026CX088).

作者简介: 林棋文(1992-),男,副研究员,主要从事高速远程滑坡动力学机理研究. ORCID:0000-0002-4610-3684. E-mail:linqiwen@my.swjtu.edu.cn

* **通讯作者:** 程谦恭(1962-),男,教授,主要从事高速远程滑坡动力学机理研究. ORCID:0000-0003-1143-0690. E-mail:chengqiangong@swjtu.edu.cn

引用格式: 林棋文,程谦恭,黄镜,陈梅,冯止依,李天话,张龙飞,杨虎锋,王玉峰,2026.中亚天山造山带高速远程滑坡动力学机理研究面临的重要科学问题.地球科学,51(10):4057-4078.

Citation: Lin Qiwen, Cheng Qiangong, Huang Jing, Chen Mei , Feng Zhiyi, Li Tianhua, Zhang Longfei, Yang Hufeng, Wang Yufeng, 2026. Key Scientific Issues in Study of Rock Avalanche Dynamics in Tianshan Orogenic Belt. *Earth Science*, 51(10): 4057-4078.

analyzing and summarizing the relative studies concerning rock avalanches in this area. Consequently, it clarified recent progress and evolution of research on rock avalanches in the Tianshan region and the core scientific issues underlying current investigations into rock avalanche dynamics, highlighting the critical influences of pervasive shear fragmentation within the main body of rock avalanches and high-velocity shear-induced mineral phase transition in the basal layer on the fluidized long-runout motion of rock avalanches. Finally, it proposes two key scientific challenges that warrant prioritized attention in future research on the dynamic mechanisms of rock avalanches in the Tianshan orogenic belt: (1) the shear fragmentation-induced fluidization mechanisms in rock avalanches, and (2) the mineral phase transition-induced frictional weakening mechanisms. The systematic review and research prospects presented herein regarding the dynamic mechanisms of rock avalanches in the Tianshan orogenic belt hold substantial significance for overcoming theoretical bottlenecks in landslide dynamics, enhancing national capabilities for natural disaster prevention and mitigation, and serving the nation's strategic requirements.

Key words: rock avalanche; dynamic mechanisms; shear fragmentation-induced fluidization; mineral phase transition-induced frictional weakening; Tianshan orogenic belt; engineering geology.

0 引言

高速远程滑坡(Rock Avalanches, Sturzstorms),是高山峡谷地区高陡斜坡上大规模基岩岩体失稳后以快速或者极快速的速度,以破碎岩屑流的形式,似流体状态长距离运动且具有极端破坏力的地质灾害现象(程谦恭等,2024;殷跃平等,2025).从地球系统科学的视角来看,高速远程滑坡是岩石圈造山带突发性、大规模、多相变、跨尺度的地表固体物质快速运移过程,是岩石圈－水圈－大气圈等多圈层互馈和构造活动－气候变化－人类活动等多动力耦合作用引发的巨型灾变过程(彭建兵等,2023;崔鹏等,2025;刘丛强,2025;刘静等,2025;中国科学院,2025).高速远程滑坡具有体积巨大、运动速度高,运动距离远的特点,并且极易通过链生、并发、叠加等作用形成破坏力远超单一灾害的灾害链或级联灾害(殷跃平等,2021;Stoffel *et al.*, 2024;彭建兵,2025;Yanites *et al.*, 2025).例如:在天山造山带与帕米尔高原交界处的Komansu滑坡,体积约1.5～2.0 km^3,水平运动距离34 km,面积达100 km^2,是中亚地区运动距离最远的滑坡(Reznichenko *et al.*, 2017).位于西天山吉尔吉斯斯坦纳伦盆地的Beshkiol巨型滑坡,历史时期先后历经两次失稳过程,最大体积达8～12 km^3,水平运动距离约8～10 km,滑坡体两次堵塞纳伦河,在坝体上游分别形成了面积达1 100 km^{2}和455 km^{2}的超级堰塞湖(Losen *et al.*, 2024).临近帕米尔天山的依买克滑坡,体积1.37 km^3,水平运动距离16.3 km,是我国陆地上迄今为止发现的体积最大、运动距离最远的滑坡(图1)(Shi *et al.*, 2023,2024a).

近年来,国内外高山地区发生了多起高速远程滑坡灾害事件,造成重大人员伤亡和严重经济损失.例如:2024年1月22日发生于我国云南省昭通市的镇雄滑坡,导致44人遇难,52户共381间房屋被掩埋或摧毁(陈宁生等,2024;杨金宁等,2025);2025年2月8日发生于我国四川省宜宾市的筠连滑坡,造成10人遇难、19人失联(陈博等,2025;Zhao *et al.*, 2025;蒲枫等,2026;张世殊等,2026);2025年8月31日,发生于非洲东北部苏丹达尔富尔地区的Tarasin高速远程滑坡－泥石流灾害链,造成超过1 500人死亡,是近年来全球范围内死亡人数最多的一次滑坡灾害事件(https://eos.org/thelandslide-blog/31-august-2025-landslide-in-sudan-1).这一系列触目惊心的灾害事件,一次次以惨痛的方式警示人们,高速远程滑坡具有巨大的破坏力和难以预料的致灾风险,在当前及今后很长的一段时期内,仍然对人类社会构成空前严峻的威胁.

中亚天山造山带是全球现今构造变形最为强烈的陆内造山带之一,地震活动极为强烈;作为亚洲高山地区,是全球气候变化"放大器"的重要区域和响应全球气候变化最敏感的地区之一(Mani *et al.*, 2023;崔鹏等,2025;王英珊等,2025;Sattar *et al.*, 2025;Zekollari *et al.*, 2025).随着国家"一带一路"倡议的实施和"中吉乌铁路"等重大交通工程的建设,中亚天山造山带正在经受前所未有的人类活动影响(图2).在这些内外动力与人类活动作用下,中亚天山造山带过去、现今和未来以高速远程滑坡事件为代表的重大地质灾害,其几何学、运动学、动力学过程和特征,在全球范围内具有典型代表性,深刻反映了现今全球陆内构造最活跃地带的孕灾动力学机制、全球气候变化敏感地区的成灾动力学机制,具有重要的灾害动力学研究意义(彭建

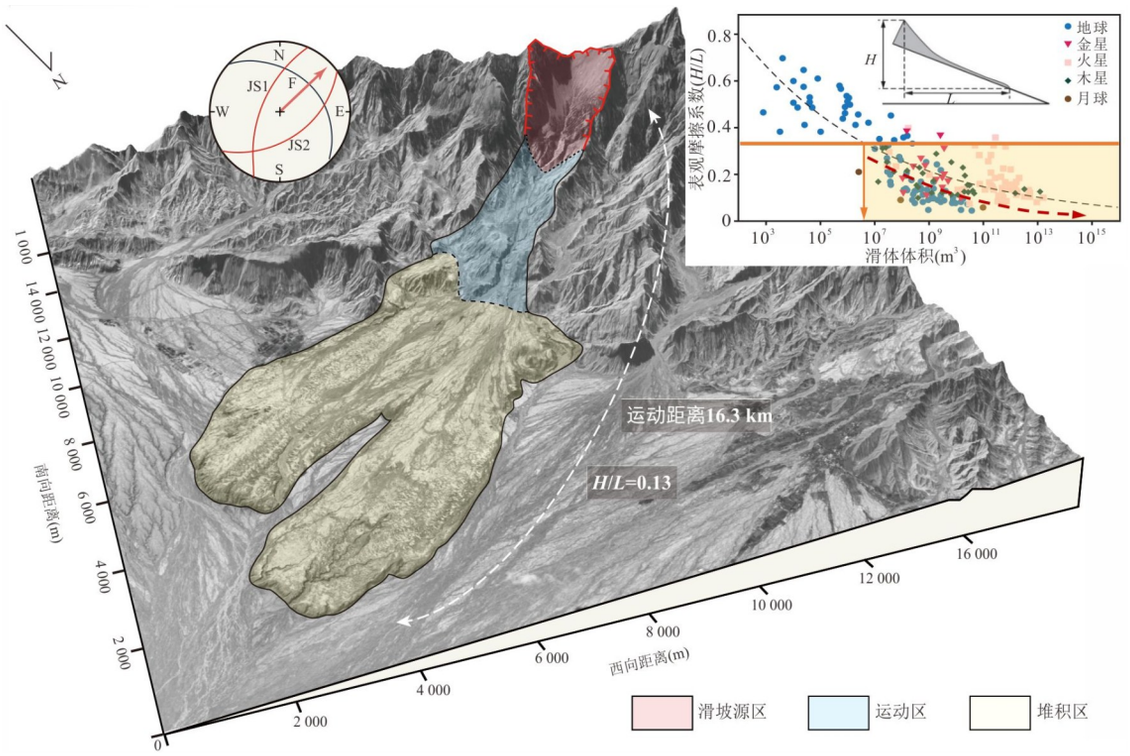

图 1　依买克高速远程滑坡(参考 Shi *et al.*, 2024a)

Fig.1　Iymek rock avalanche (modified from Shi *et al.*, 2024a)

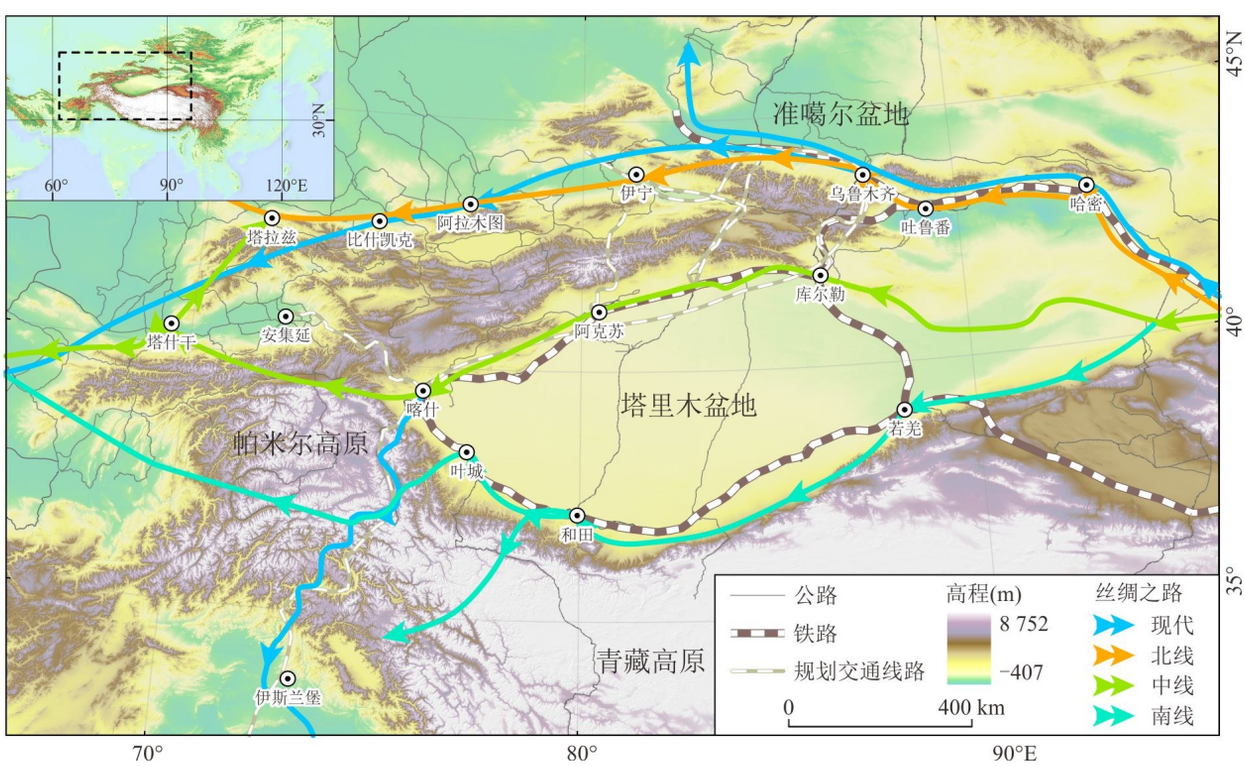

图 2　天山地区丝绸之路与重大交通工程分布示意图

Fig.2　Schematic map showing the distribution of the Silk Road and major transportation projects in the Tianshan Mountains region

兵等,2023).因此,中亚天山造山带,是研究在岩石圈－水圈－大气圈等多圈层互馈和构造活动－气候变化－人类活动等多动力耦合作用下,复杂地质灾害系统(高速远程滑坡)跨尺度灾害演化过程和动力学机理的理想天然实验室.

1 天山造山带区域工程地质概况

中亚天山山脉位于欧亚大陆腹地,是世界七大山系之一,东起我国新疆哈密星星峡,向西横跨中国、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦,直抵乌兹别克斯坦的克孜勒库姆沙漠,东西向延伸约2 500 km,南北宽度约250～350 km,几乎横贯整个中亚大陆(图3a).天山山脉是世界上最大的独立纬向山系,亦是世界上规模最大、最活跃的陆内造山带(Molnar and Tapponnier,1975;李金等,2021;张秉峰和鲍学伟,2023;Fan *et al.*, 2024).天山山脉平面形态略呈向北凸出的弧形,南北侧分别与塔里木盆地和哈萨克地台、准噶尔盆地接壤,地貌上表现为壮观的盆山相间的格局,主体由3列平行山脉组成,山脉内部发育一系列受活动断裂控制的菱形或条带状山间盆地与谷地(图3b)(李锦轶等,2006;陈书平等,2008;Yang *et al.*, 2013;Wu *et al.*, 2023);区域内平均海拔高度约4 000 m,最高处的托木尔峰海拔7 443.8 m,最低处为吐鲁番盆地艾丁湖,海拔为－155 m,是中国陆地最低点;整体山高谷深,地形起伏巨大(秦艳等,2018).

在地球科学领域,天山最引人注目的特征在于它是全球规模最大的陆内再生(复活型)造山带(Yin *et al.*, 1998;邓起东等,2000;田勤俭等,2006;李昱等,2007;杨海军等,2010;张秉峰和鲍学伟,2023;郑文俊等,2025).总体而言,天山造山带经历了两期强烈的造山演化过程:古生代,通过塔里木板块与哈萨克斯坦－准噶尔板块的碰撞拼贴形成古老造山带,并在中生代经历长期的剥蚀夷平,一度成为准平原(Jiang *et al.*, 2015;Abuduxun *et al.*, 2021).新生代至今,受印度板块向欧亚板块碰撞的远场效应(Far-Field Effect)影响,在南侧塔里木地块和北侧准噶尔地块及哈萨克地块的俯冲与夹持之下,古生代形成的天山构造带再次隆升,形成了现今盆山相间的雄伟地貌格局(图3c)(Thompson *et al.*, 2002;张培震,2003;Charreau *et al.*, 2006;吕红华和李有利,2020;李金等,2021;Li *et al.*, 2026).

在印度板块与欧亚板块碰撞的持续影响下,天山山脉至今仍然表现出强烈的地壳缩短、隆升及复杂的应变分配行为(Wu *et al.*, 2023).GPS观测研究表明,天山的构造变形速率呈现出由西向东递减的梯度特征,西段地壳缩短最强烈,横跨天山的缩短速率高达20～24 mm/a,几乎吸收了印度－欧亚碰撞总缩短量的一半(Huang *et al.*, 2015;Thompson *et al.*, 2015;刘代芹等,2016).强烈持续的构造运动不仅形成了现如今南、北天山前陆的逆冲断裂带和中天山的走滑断裂系统,同时使得这些断裂带成为特大地震的高发区.20世纪以来整个天山地区发生了数十次7.0级以上的大地震,例如:1902年新疆阿图什8.3级地震,1906年新疆玛纳斯8.0级地震,2024年新疆乌什7.1级地震.

天山山脉深居欧亚大陆腹地,其气候格局属于西风主导型,来自大西洋的西风环流携带的残余水汽是其最重要的降水来源,从根本上塑造了西北多、东南少的空间降水特征(Yao *et al.*, 2012;Fan *et al.*, 2024).西风环流带来的降水配合高海拔低温环境,使得天山得以储存约756 km^3的冰川冰体(分布于7 934条冰川),并发育大面积多年冻土,从而构成了中亚地区至关重要的“固态水塔”(Zhang *et al.*, 2022;张太刚等,2025).在全球变暖的驱动下,天山山脉正朝着一个气候更湿润但更不稳定、冰川持续退缩、河流流量时空剧变的未来趋势演变(陈亚宁等,2017;Immerzeel *et al.*, 2020;刘方圆和石正国,2023;Rounce *et al.*, 2023;丁永建,2025;张太刚等,2025).

在上述地质构造作用、地震活动和气候变化的影响下,中亚天山造山带为巨型高速远程滑坡的孕育、失稳、运动等全链条演化过程提供了有利的多圈层作用下的多动力耦合孕灾环境,使得该地区成为全球高速远程滑坡灾害的高发区域之一(Havenith *et al.*, 2006;张紫昭等,2023;Korup *et al.*, 2025).历史记录以来,天山地区的高速远程滑坡灾害事件频发,造成的人员伤亡十分严重.

2 天山地区高速远程滑坡动力学机理研究进展

天山山脉作为中亚重要的构造活动带,其复杂的地质构造、活跃的地震活动、敏感的气候变化,共同塑造了区域内滑坡灾害高发、类型多样、危害极大的特点(Strom and Korup,2006;Danneels *et al.*, 2008; Strom and Abdrakhmatov, 2018). 据 Strom

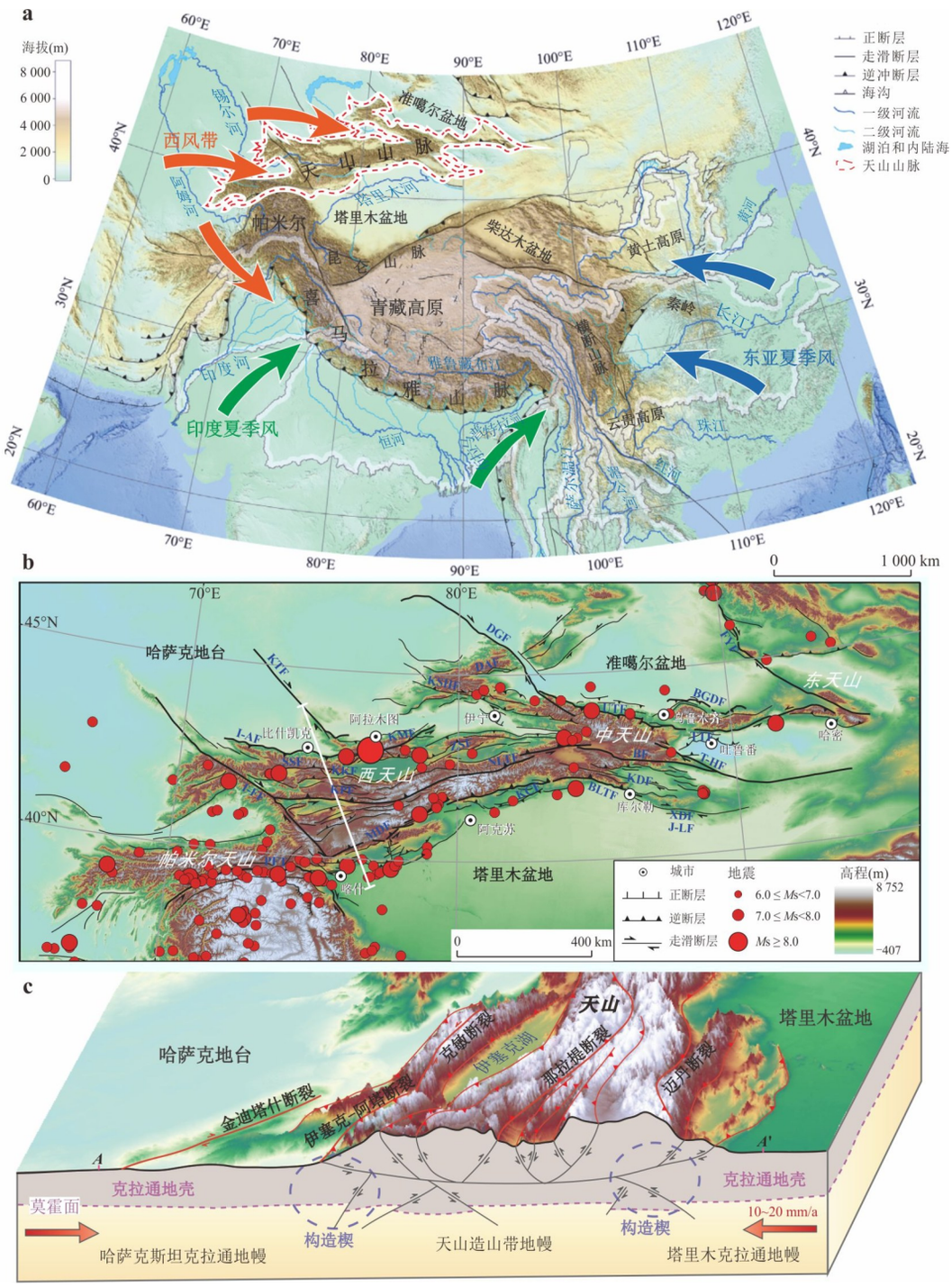

图 3　中亚天山造山带区域地理位置、构造格局与现今构造活动特征

Fig.3　Regional geographical location, tectonic framework, and present-day tectonic activity characteristics of the Central Asian Orogenic Belt

a. 中亚天山造山带地理位置与季风气候(参考 Yan *et al.*, 2023, 有改动); b. 天山造山带活动断裂与历史强震分布(参考 Wu *et al.*, 2023). PFT. 帕米尔前缘逆冲推覆系; T-FF. 塔拉斯－费尔干纳断裂; KPF. 柯坪逆冲推覆构造带; MDF. 迈丹断裂; NLTF. 那拉提断裂; KKF. 科奇科尔断裂; SSF. 苏萨梅尔断裂; KMF. 克敏断裂; I-AF. 伊塞克－阿塔断裂; KTF. 金迪塔什断裂; ZSF. 昭苏断裂; KSHF. 喀什河断裂; DAF. 准噶尔阿拉套断裂; DGF. 准噶尔断裂; FYF. 富蕴断裂; UTF. 乌鲁木齐逆冲推覆系; BGDF. 博格达逆冲带; J-LF. 碱泉子－洛包泉断裂; TTF. 吐鲁番逆冲推覆系; T-HF. 吐鲁番－哈密断裂; YQF. 焉耆断裂; KCF. 库车逆冲推覆系; BLTF. 北轮台断裂; KDF. 开都河断裂; XDF. 兴地断裂; c. 天山造山带构造隆升格局(剖面参考 Xu *et al.*, 2025)

and Abdrakhmatov(2018)的不完全统计资料,整个天山地区体积大于百万立方米的巨型高速远程滑坡灾害约有1 000个;研究团队在这一数据基础上,进一步开展遥感解译和实地地质调查工作,共计识别出体积大于百万立方米的滑坡数量接近2 000个.天山地区历史上发生了大量灾难性滑坡事件,特别是强震作用下发生的高速远程滑坡事件,造成了重大人员伤亡与基础设施损毁.例如,1911年天山北部吉尔吉斯斯坦境内*M*s 8.2的Kemin地震,触发大量滑坡灾害,造成452人死亡,740人受伤(Delvaux *et al.*, 2001);1949年塔吉克斯坦Khait地震,在震中区域触发的滑坡导致了约7 200人死亡,其中最具代表性的是Khait岩滑,约54×10^6 m^{3}的岩体失稳,裹挟大量饱和黄土并使之液化,掩埋途中两个村庄,导致约800人死亡(图4a);地震在Yasman山谷诱发数百个黄土滑坡,并汇集成245×10^6 m^{3}的超大规模黄土流滑群,在坡度仅2°的山谷中流动20 km,导致20个村庄被掩埋,约4 000人死亡(Evans *et al.*, 2009).2002年发生在帕米尔—兴都库什地区的*M*s 7.4地震,在天山吉尔吉斯斯坦的费尔干纳河谷诱发了300处滑坡(Torgoev *et al.*, 2013);2003年吉尔吉斯斯坦Uzgen地区Kara-Taryk滑坡和Tosoy村滑坡分别造成38人死亡与50人死亡;2004年吉尔吉斯斯坦阿莱地区Kainama滑坡造成33人死亡(Havenith *et al.*, 2015a; Teshebaeva *et al.*, 2019);2017年发生在吉尔吉斯斯坦的阿尤村滑坡,造成了24人死亡(https://blogs.agu.org/landslideblog/2017/05/02/ayu-1/);2024年乌什*M*s 7.1地震触发了至少4 009处同震崩塌滑坡,导致3人死亡、5人受伤(Huang *et al.*, 2025).由此可见,中亚天山造山带不仅是全球构造活动带,地震活动极为强烈;而且是响应全球气候变化最为复杂、最为敏感的地区之一,更是全球高速远程滑坡地质灾害最为严重的地区之一.

对天山地区高速远程滑坡的研究,更多地聚焦于吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦等西天山和帕米尔天山区域高速远程滑坡的案例调查(Evans *et al.*, 2009).根据遥感解译和实地调查等统计分析,整个天山山脉地质历史上发生的高速远程滑坡达1 000多处,这其中不乏体积巨大、运动距离极远的巨型高速远程滑坡(Havenith *et al.*, 2006, 2015b; Strom and Abdrakhmatov, 2018).例如前文所述的位于吉尔吉斯斯坦阿莱河谷的Komansu滑坡(Robinson *et al.*, 2015; Reznichenko and Davies, 2015; Reznichenko *et al.*, 2017).其滑坡源区主要为白云质灰岩,失稳体积约1.5~2.0 km^3,从海拔6 000多米的Dzerzhinskiy山峰上失稳启动,停积于宽阔平坦的阿莱河谷底部,水平运动了34 km,形成了蔚为壮观的流态化堆积丘地貌,覆盖面积可达100~150 km^2.研究认为,Komansu滑坡超远运动距离应与滑体巨大的能量、以及运动过程中裹挟了大量饱水的冰碛物及冲洪积层有关(Reznichenko *et al.*, 2017).再如,吉尔吉斯斯坦境内的Beshkiol巨型滑坡事件,发生于距今约5.2万年前和1.7万年前,体积达8~12 km^3,水平运动距离约8~10 km,滑坡体两次堵塞纳伦河,在坝体上游分别形成了面积达1 100 km^{2}和455 km^{2}的超级堰塞湖,目前认为这是中亚地区最大的古滑坡事件.Losen *et al.*(2024)对Beshkiol滑坡及其相关古堰塞湖进行详细的地貌学、沉积学和年代学分析,首次为Beshkiol巨型滑坡提供了精确的年代学框架,揭示了跨越数万年的、包含两次大规模滑坡堵河、两个长期存在的堰塞湖及湖水溃决事件的地质演化史,表明巨型滑坡堰塞湖可以维持极长时间(数万年),对区域水文和地貌演化具有长期控制作用;作者还强调了在活跃造山带和气候变化背景下,评估古滑坡事件及其长期影响对于现代灾害风险管控的重要性.我国著名的新疆天山旅游景区天山天池,亦是晚更新世末期先后发生的两期滑坡事件所形成的堰塞湖(陈晓玉, 2014;尚彦军等, 2022).Lin *et al.*(2024)详细分析了天山地区轮台县阿拉苏高速远程滑坡的孕灾背景、源区岩体结构特征、堆积地貌形态、表面块石粒径组成、块石破碎现象与堆积体内部破裂结构,重建了复杂地形条件下高速远程滑坡运动学过程,揭示了阿拉苏高速远程滑坡硬壳层碎屑化运动机制(图4b).

值得指出的是,俄罗斯科学家Alexander Strom教授及其团队是研究中亚高山区高速远程滑坡的主要力量,其在该区域高速远程滑坡识别、滑坡地貌形态表征与动力学机制分析等方面贡献十分显著.例如,Strom and Korup(2006)对吉尔吉斯斯坦中部天山地区9个巨型滑坡(体积大于1 km^3),进行了详细地野外地质调查和滑坡运动机制分析;进一步地,Strom and Abdrakhmatov(2018)识别了包含天山在内的整个中亚山区的高速远程滑坡灾害事件;基于滑坡的形态特征和动力学过程,提出了新

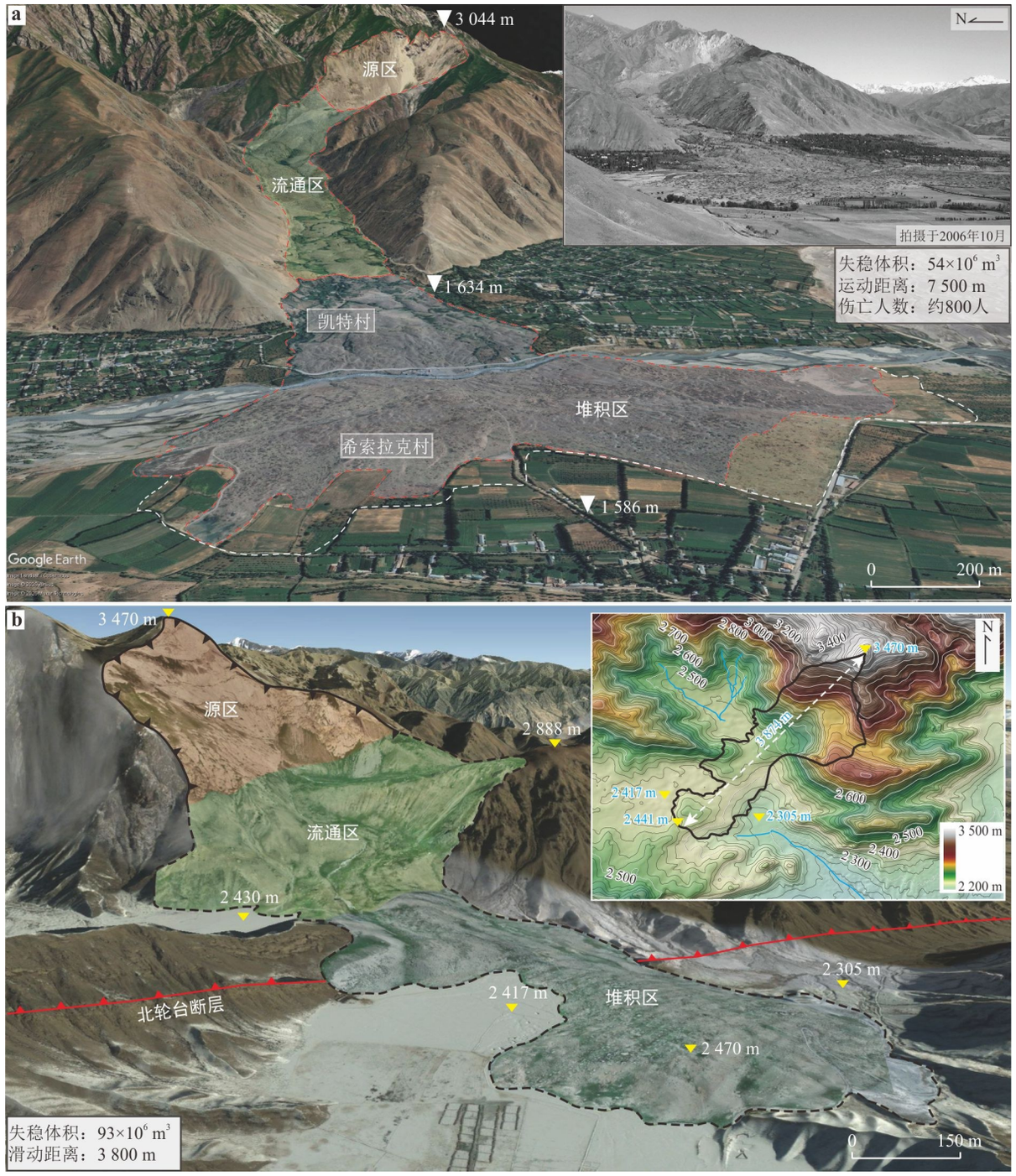

图 4　天山地区典型高速远程滑坡灾害

Fig.4　Typical rock avalanches in the Tianshan region

a. 吉尔吉斯斯坦 Khait 滑坡，照片引自 Evans *et al.*, 2009；b. 新疆天山阿拉苏高速远程滑坡，由作者团队调查绘制；遥感影像来自 Google Earth

的高速远程滑坡分类方案. 基于中亚地区约 600 例高速远程滑坡案例的统计分析，Strom(2024)定量研究了滑坡运动性(如运动距离、影响面积)与控制参数(体积、落差及其乘积)之间的关系；研究结果定量指示了地形约束条件(无约束、侧向约束、前向约束)对滑坡运动性具有显著影响. 此外，Havenith *et al.*(2015a)进一步对天山区域(除中国天山)大型岩质滑坡、黄土滑坡、流滑等不同类型的共计 3 400 个崩滑灾害进行了编录. Teshebaeva *et al.*(2019)综合利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)时间序列分析、构造地质学和地貌学方法，对位于中亚天山山脉南部的阿拉伊山脉北坡一系列山体重力变形开

展了深入研究,认为岩性和构造共同控制了山体重力变形的分布与灾害孕育.张紫昭等(2023)分析研究了整个新疆地区的崩滑流地质灾害分布规律,其中天山北麓区滑坡最为发育,在空间分布上滑坡明显受控于活动构造.

总体而言,当前天山造山带地质灾害的研究更多地聚焦于灾害案例调查、地震崩滑灾害分析等方面,在高速远程滑坡详细工程地质调查、孕灾机制探讨与动力学机理解析等方面的研究,还十分缺乏.当前研究深度,还难以有效突破天山地区高速远程滑坡远程运动的科学难题,无法满足重大工程建设的防灾减灾需求.

3 天山地区高速远程滑坡动力学机理研究瓶颈与科学展望

天山山脉位于欧亚大陆腹地,由于特殊的地质构造、活跃的地震活动及气候变化,成为全球高速远程滑坡灾害高发区之一.作者所在研究团队对天山地区高速远程滑坡进行大量遥感解译、野外地质调查以及地貌学沉积学特征分析,识别出众多体积巨大、运动距离极远的滑坡.详细的野外工程地质调查显示,这些高速远程滑坡呈现出十分典型的多尺度剪切破碎特征,并存在可能的剪切带矿物相变迹象,反映了高速远程滑坡复杂的多相态、多尺度、多界面物理力学过程.基于高速远程滑坡灾害研究历程与最新进展,结合中亚天山造山带高速远程滑坡发育特征,本文进一步提出天山地区高速远程滑坡动力学机理研究面临的重要科学问题.

3.1 高速远程滑坡研究面临的关键科学问题

高速远程滑坡动力学机理是近百年来国际地质灾害领域长期关注的热点与前沿性科学问题.自从1881年瑞士Elm滑坡发生以后,地质学家Heim(1932)首次提出“高速远程滑坡超强流动性”的科学命题,时至今日,地球科学领域工程地质和地质灾害的科学家们始终有一个一直“迷惑不解”的难题:对单一的高速远程滑坡事件,其运动的最高速度有多大?运动的最大距离有多远?其背后存在的物理力学机制是什么?在传统库仑摩擦定律中,普通滑坡的运动受限于摩擦系数(通常岩石的摩擦系数约为0.6),其行程不远;然而,高速远程滑坡在运动过程中呈现出的“表观摩擦系数(Apparent Friction Coefficient)”常低于0.33,甚至当体积大于数亿方时,表观摩擦系数小于0.1,形成低摩阻远程运动现象(Scheidegger, 1973; Hsü, 1975; Gong *et al.*, 2025).这种令人惊异的远程运动特征“奥秘”,至今仍未被科学家们完全破解(程谦恭等,2024).作者所在研究团队在2021年发表的综述论文中全面梳理了目前国际上六大高速远程滑坡动力学机理假说:“摩擦生热减阻”“滑带液化减阻”“动力破碎减阻”“底部裹挟减阻”“剪切振动减阻”“动量传递远程”;然而,目前这些减阻机制尚未得到学者的普遍认可,仍然存在着巨大争议(王玉峰等,2021;程谦恭等,2024).

根据近几年来对天山地区高速远程滑坡堆积体的详细工程地质调查,以及国际上相关研究进展的梳理,笔者认为,高速远程滑坡最显著的特征在于:大规模高势能岩体失稳后,在运动过程中表现出弥漫性的剪切作用.从滑坡底部的基底层到滑体中上部,出现多层次、多级序、多样式剪切带(图5),它们反映了岩体失稳后沿着滑坡运动路径发生渐进性破碎的过程,表征了岩石碎屑物质的多尺度非线性剪切力学行为(Pollet and Schneider, 2004; Yang *et al.*, 2026).“基底层剪切带”是高速远程滑坡体与下伏地层之间,一个厚度极薄但物理力学性质发生剧烈变动的界面,是极高应变率作用下形成的能量高度聚集带.高速远程滑坡失稳后,在巨大的重力势能释放瞬间,原本相对完整的岩体在数秒内获得极高加速度,形成高速剪切破碎流;当剪切速率突破某个临界阈值时,滑体内部出现多级剪切过程,此时,多级剪切带内岩石碎屑的行为将不再遵循经典的库仑摩擦定律(Zhang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2025).全球数百个大型高速远程滑坡野外的沉积学特征和微观结构的分析表明,基底剪切带的高速剪切行为是控制滑坡低摩阻远程运动的关键因素(Dufresne *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2024a, 2024b; Hu *et al.*, 2025a).

基底层的高速剪切,表现出两个显著的地质特征:①剪切破碎组构的渐进演化.在高应变率的剪切作用下,基底层岩体经历了高强度的动力破碎,最终产生纳米级碎屑颗粒,形成极薄的“超细粒基质”(Ultrafine Matrix).其颗粒物质组构在电子显微镜下呈现出显著的空间定向排列(Preferred Orientation)、流动构造以及颗粒本身的高频撞击破裂刻槽(Wang *et al.*, 2015; Zhang and McSaveney, 2017; Hu *et al.*, 2022a).岩屑在极高应变率下的剪切粉碎作用(Shear Pulverization),不仅是能量耗散的表现

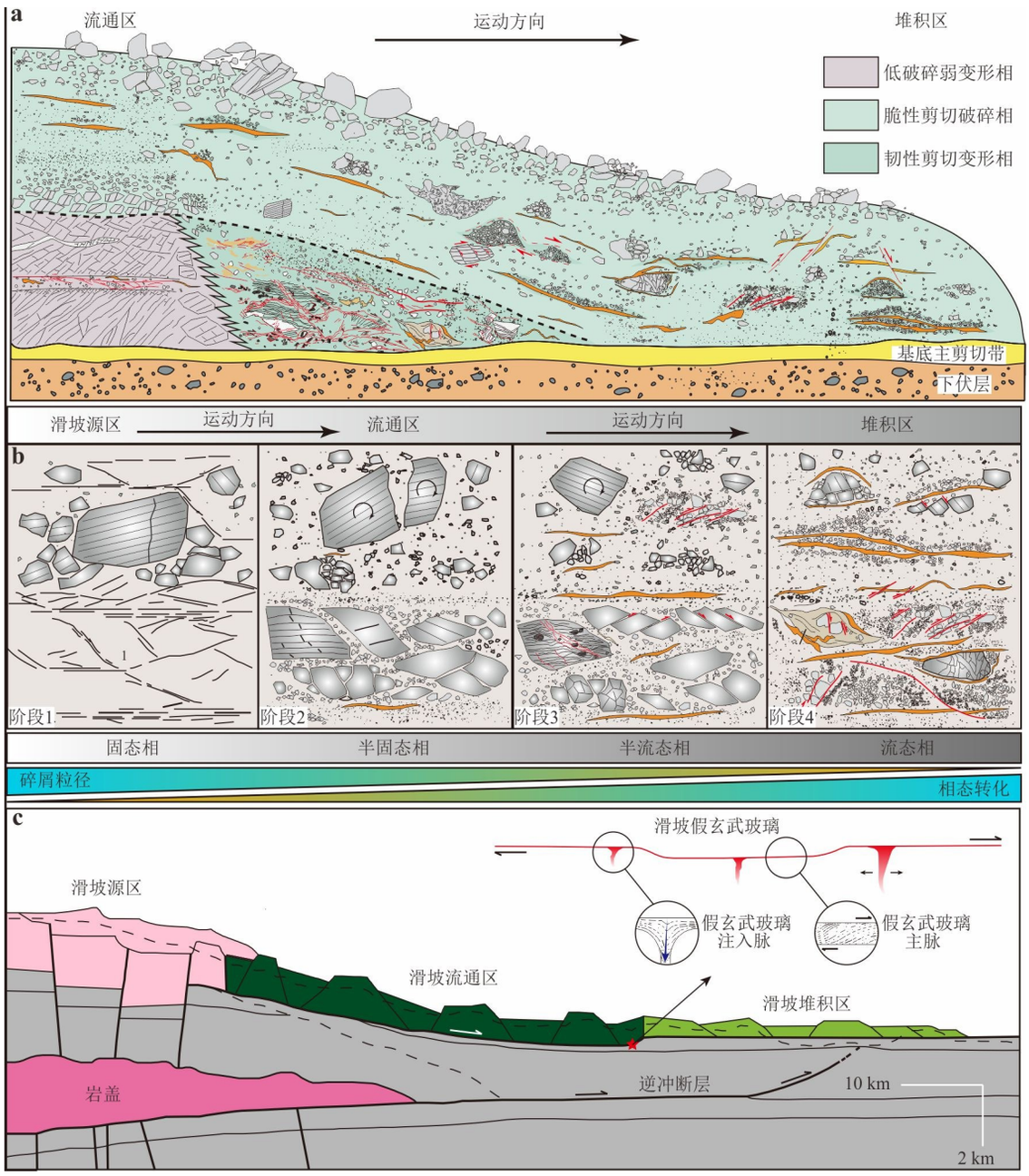

图 5　典型高远程滑坡剪切破碎相态转化与剪切带矿物相变概念图

Fig.5　Conceptual model of shear fragmentation-induced fluidization and mineral phase transition in typical rock avalanches

a.滑坡剪切运动与堆积过程示意图(修改自 Shi *et al.*, 2024a);b.剪切破碎相态转化示意图(修改自 Shi *et al.*, 2024a); c.巨型滑坡高速剪切矿物相变示意图(参考自 Zamanialavijeh *et al.*, 2021)

形式,也是导致滑体物质从固态相转变成流态相的重要物理过程;这些高应变率超强剪切破碎组构特征,是“动力破碎减阻机理”“剪切振动减阻机理”等机理假说的地质证据(Lin *et al.*, 2020;Hu *et al.*, 2022a, 2022b; Breard *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023;贺旭荣等,2024;王玉峰等,2025).②底部剪切带(滑带)内出现的矿物相变.在一定上覆荷载的压力作用下,高速剪切产生的瞬时高温,突破了滑体底部物质原有矿物相的稳定阈值,使得矿物的化学键产生断裂与重组.矿物热分解和热熔融等矿物相变过程是高速剪切过程中温度、压力条件变化的指示器,它表征了剪切带内部曾经历过足以改变矿物物理化学特性的动力过程(冯止依等,2023;Zamani *et al.*, 2023).在一些巨型高速远程滑坡基底剪切带中,发现了呈脉状或薄膜状分布的假玄武玻璃(Pseudotachylyte)(图 5c),其中的玻璃质物质、超细

粒基质、流动构造、气孔构造等特征，表明滑坡剪切带内部在一定的时间段曾呈现出达到某些矿物熔点的高温；其后，熔融物质迅速冷凝形成粒径极其细小的低摩阻玻璃质薄层/脉体.其主要原因在于，巨型岩质滑坡由于体积巨大、覆盖面积广阔等特殊边界条件而形成的相对封闭环境，使得高速剪切产生的剧烈摩擦热难以瞬时逸散，从而导致剪切带温度达到矿物熔点，产生矿物相变摩阻弱化(Pozzi *et al.*, 2021; Deng *et al.*, 2023).因此，滑带中假玄武玻璃的发现有力地证实了巨型岩质高速远程滑坡在运动过程中存在着“熔融相变－摩阻弱化”机制(Weidinger *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2019; Zamaniala-vijeh *et al.*, 2021).

从剪切破碎组构的渐进演化，到矿物相变与摩阻弱化，这些重要的动力学现象，共同描绘出了高速远程滑坡远程运动的关键过程.然而目前，在高速远程滑坡的研究领域，对高速剪切下颗粒破碎与矿物相变的物理过程以及摩阻弱化机制，还缺乏精准的物理力学模型刻画.如何突破现有滑坡动力学模型的研究框架，从灾害系统科学与统计物理的视角入手，基于非平衡态相变动力学思维，从微观矿物颗粒到底部剪切带，从底部剪切带再到宏观弥漫性剪切带等遍历性过程，研究高速远程滑坡的多相态、多尺度、多界面的物理力学等相变动力学机制，精确表征滑坡体在动力破碎作用下复杂剪切网络结构的标度律、幂律性与自组织性，以及矿物相变的脆－韧性转化、脆－粘性转化、临界点阈值与组构相依摩擦律，是当前国际地质灾害动力学领域面临的最前沿且最具挑战性的重大科学难题之一.对于天山地区高速远程滑坡远程运动机理的深刻理解，必须依赖于地球系统科学、统计物理学、相变动力学等多学科理论的深度交叉与融合，必须创新从地球系统科学到动力学机理、再从动力学机理到统计物理学的研究思维，从而解决高速远程滑坡“剪切破碎相态转化”和“矿物相变摩阻弱化”的两个关键科学问题.需要说明的是，高速远程滑坡的动力学过程还存在“滑带液化减阻”“底部裹挟减阻”“剪切振动减阻”“动量传递远程”等其他不同的机理假说，本文仅围绕当前天山地区高速远程滑坡动力学机理研究所面临的最主要的两个科学问题进行论述，其余机理假说的讨论已有相关文献开展了深入的总结(王玉峰等，2021；程谦恭等，2024).

3.2 高速远程滑坡剪切破碎相态转化机制的提出和研究

高速远程滑坡运动全过程是伴随着弥漫性剪切破碎作用，滑体从高摩阻固态向低摩阻流态转化，最终远程停积的过程(图5a～5b，图6).在此过程中，高速剪切破碎过程中的能量分配与转化，表征了剪切组构演化与滑体流态化运动之间的关联机制.因此，如何定量表征滑体颗粒多尺度碎裂耗能?如何建立剪切破碎能量分配与固－流相态转化之间的关联模型?滑坡的固－流相变与其远程运动之间有何内在联系?这3个层层递进的科学问题是揭示高速远程滑坡剪切破碎相态转化机制的关键环节.

值得指出的是，动力破碎机制不仅仅是一个滑坡运动学和动力学的重大科学问题，而且也是当前国际断裂力学领域研究所面临的前沿科学问题之一.2026年1月19日，由杨卫院士、冯西桥院士、高华健院士联袂发表的重要综述论文“断裂力学中的未决问题与新兴前沿(Outstanding issues and emerging frontiers in fracture mechanics)”，明确指出：“能否有效计算多尺度碎裂问题?”和“断裂力学能否计算不同岩性条件、孔隙率和含水率的滑坡现象?”是断裂力学在工程领域研究的重要科学问题(Yang *et al.*, 2026).由此可见，高速远程滑坡剪切破碎相态转化机理，不仅在地球科学领域，而且在数理科学领域，不论是基础研究还是应用基础研究，都属于当前亟待解决的重大前沿科学问题.

滑体内部剪切网络组构指示了剪切破碎在高速远程滑坡运动中的关键作用，然而，弥漫性剪切破碎过程引起的滑体相态转化行为机制与可能的远程效应，目前的研究还十分欠缺.不同地层岩性、不同岩体结构与不同运动路径等条件下，高速远程滑坡的剪切组构与演化过程呈现显著的差异性，是不同类型的高速远程滑坡运动特征与流动性的直接表征(Davies and McSaveney, 2009; Imre *et al.*, 2010; 王玉峰等，2025).大量颗粒流相关实验表明：颗粒流剪切行为对颗粒破碎引起的粒径变化特征异常敏感；伴随着剪切破碎的持续作用，颗粒流速度剖面由线性向非线性转变，剪切网络结构的演化特征表现出力链网络(Force Chain Network)由稀疏的、以强力链为主要支撑骨架的定向排列结构，逐渐转向由短小的弱力链密集分布的弥散性结构，滑体内部不断经历破碎过程的渐进性相变(Shi *et al.*,

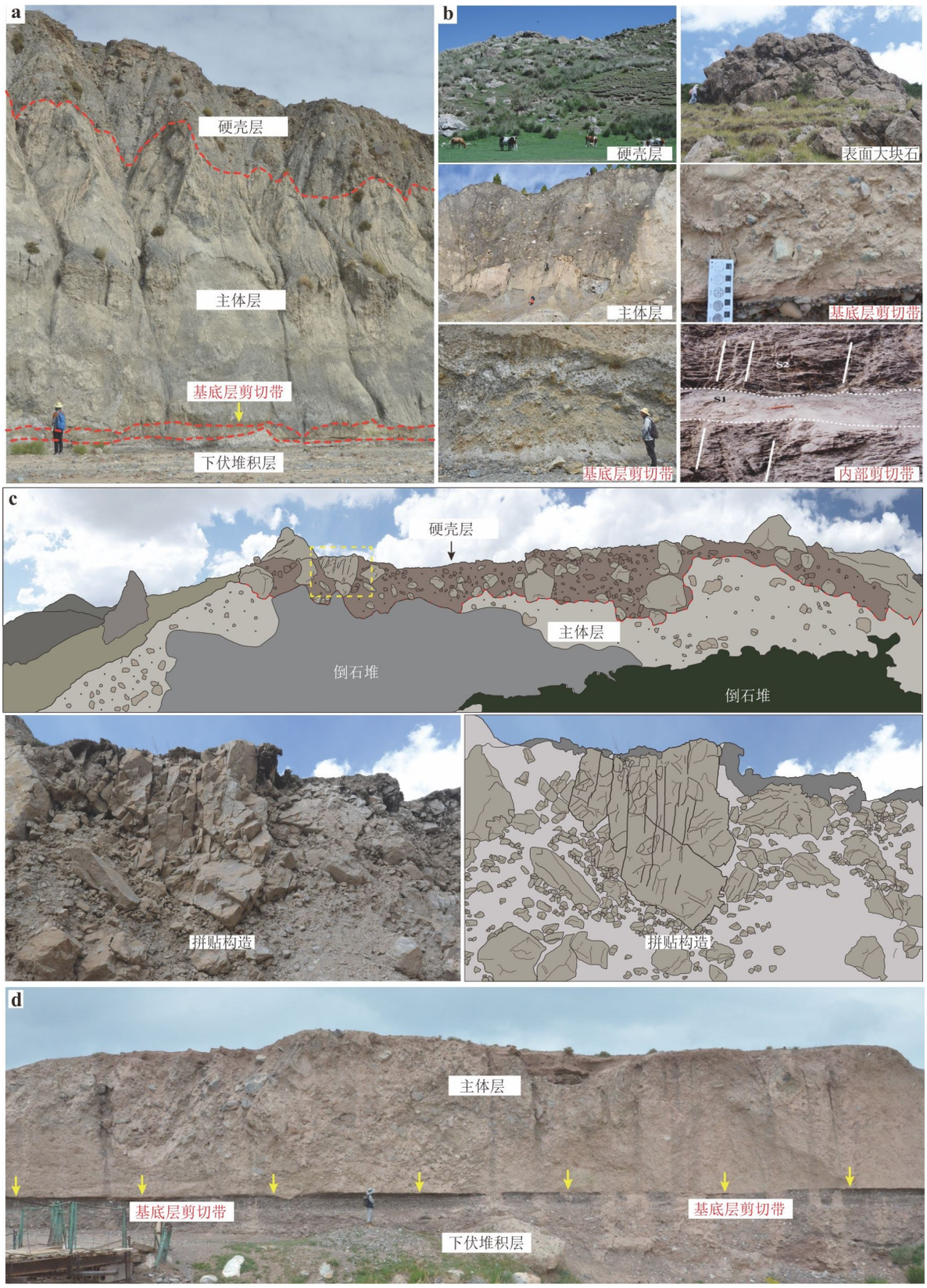

图 6　典型高远程滑坡的破碎多相结构

Fig.6　Multiphase fragmented structure of typical rock avalanches

a.依买克滑坡竖向分带典型剖面;b.典型滑坡破碎组构(内部剪切带子图引自 Poschinger *et al.*, 2006);c.天山阿拉苏滑坡硬壳层破碎结构(修改自 Lin *et al.*, 2024);d.天山 Komansu 滑坡堆积前缘基底剪切带

2024;Ding *et al.*, 2024);这种破碎引起的颗粒组构变化,使得细颗粒集合体的剪切强度显著降低,从而表现出更强的变形与流动能力(Lai *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2021;Ding *et al.*, 2024;Liu *et al.*, 2024).并且,强烈的剪切作用可导致颗粒微观破坏,形成非晶态超细颗粒层(Amorphous Ultrafine Particles),这些超细颗粒表现出类似"滚珠轴承"的润滑行为,同样促进了颗粒流的低摩阻运动(Hu *et al.*, 2022a,2022b).因此,伴随着剪切破碎组构的动态演化,高速远程滑坡剪切带内部孕生了一系列重要的物理力学过程,包括破碎颗粒细粒化、颗粒稀疏化与密集阻塞、力链网络结构坍塌与重构等(Goren *et al.*, 2010; Iverson *et al.*, 2015; Mitchell *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2022a, 2025b; Braunagel *et al.*, 2023).笔者认为,动力破碎作用与滑坡流态化远程运动二者之间关联机制的本质在于:"剪切作用－动力破碎－结构扩容－弥散效应(Shearing-Fragmentation-Dilation-Dispersion)"四位一体的颗粒破碎级联效应,这些过程共同导致了滑体的固－流相态转化,并最终引发滑体流态化远程运动.

然而,高速远程滑坡的剪切破碎相态转化行为受控于复杂的破碎相依能量分配与耗散过程,本节前述的3个科学问题还远远未被解答.因此,高速远程滑坡剪切破碎相态转化机理研究应进一步聚焦:剧烈剪切破碎过程中,滑体内部结构演化(特别是剪切网络与颗粒系统的组态)达到何种临界状态时,会触发宏观相态与主导流变机制的跃迁?如何定量表征这一临界状态并建立其与能量转化效应的普适性物理力学模型?如何构建耦合"剪切作用－动力破碎－结构扩容－弥散效应"过程的相变动力学模型(SFDD模型)?

3.3 高速远程滑坡矿物相变摩阻弱化机理的提出和研究

如前所述,巨型高速远程滑坡运动过程中,其基底层是剪切变形最剧烈、摩擦做功最显著、热效应最集中的区域,由于滑体其巨大的体积(上覆压力≥1 MPa)和广阔的覆盖面积形成了相对封闭的环境条件,使得高速摩擦作用在基底层剪切带中产生的热量难以瞬时逃逸,从而形成局部高温(温度可达到≥600 ℃).在上述温度和压力条件下,剪切带中一些矿物可出现突变相变,这种相变过程与产物是滑坡产生低摩阻远程运动的主要原因之一.例如:美国犹他州的Marysvale地区发育3处滑体厚度达2～3 km的巨型岩质古滑坡,自西向东依次为Black Mountains滑坡、Markagunt滑坡与Sevier滑坡.其中Markagunt滑坡,面积达3 400 km^2,体积高达1 700～2 000 km^3,水平运动距离约32～40 km;Sevier滑坡,面积>2 500 km^2,体积>1 300 km^3,水平运动距离>35 km(Hacker *et al.*, 2014; Biek *et al.*, 2019;Zamanialavijeh *et al.*, 2021).在这几个滑坡的基底层中可见显著的矿物相变产物(图7).而中亚天山造山带同样存在规模十分可观的巨型高速远程滑坡(Havenith *et al.*, 2006; Reznichenko *et al.*, 2017; Strom and Abdrakhmatov, 2018; Shi *et al.*, 2023;Losen *et al.*, 2024).然而,如何定量刻画滑坡剪切带中非平衡态矿物相变过程?不同类型矿物的相变动力学模型及其相变临界阈值如何?怎样表征剪切带矿物相变过程与滑坡摩阻弱化远程运动之间的关联模型?这3个环环相扣的科学问题亦是诠释高速远程滑坡矿物相变摩阻弱化机制的关键环节.

值得指出的是,矿物相变机制不仅仅是巨型高速远程滑坡动力学研究的重大科学问题,而且也是地球科学领域研究板块俯冲与深部构造活动、断层机制与地震活动所关注的前沿科学问题之一.例如:2025年6月,*Nature Geoscience*发表论文指出:矿物相变长久以来被认为是导致俯冲带、地壳碰撞、地幔对流等多种地球动力学过程流变弱化(Rheological Weakening)的重要因素(Cross *et al.*, 2025).同时,众多研究基于调查滑坡假玄武玻璃实例,或开展大滑坡尺度下的高速摩擦实验,提出矿物相变显著影响高速远程滑坡摩阻弱化(Weidinger *et al.*, 2014; Mitchell *et al.*, 2015; Zamani *et al.*, 2023).虽然在地球动力学中和滑坡动力学中矿物相变的表现形式与作用效应有所区别,但是矿物相变的研究,无论是在地质灾害动力学领域,还是在地球多圈层动力过程与板块构造领域,都具有重要的科学研究价值,是当前地球科学领域亟待解决的重大前沿科学问题.

前已述及,滑坡假玄武玻璃、含水矿物脱水或碳酸盐矿物脱碳酸化等滑坡剪切带内发现的重要地质证据,揭示了巨型滑坡在高速剪切过程中出现了显著的矿物相变(Weidinger *et al.*, 2014).室内高温高压剪切实验再现了剪切带内部局部稀疏化、新生流体逸出、剪切带局部高温、瞬时低渗透性、瞬时

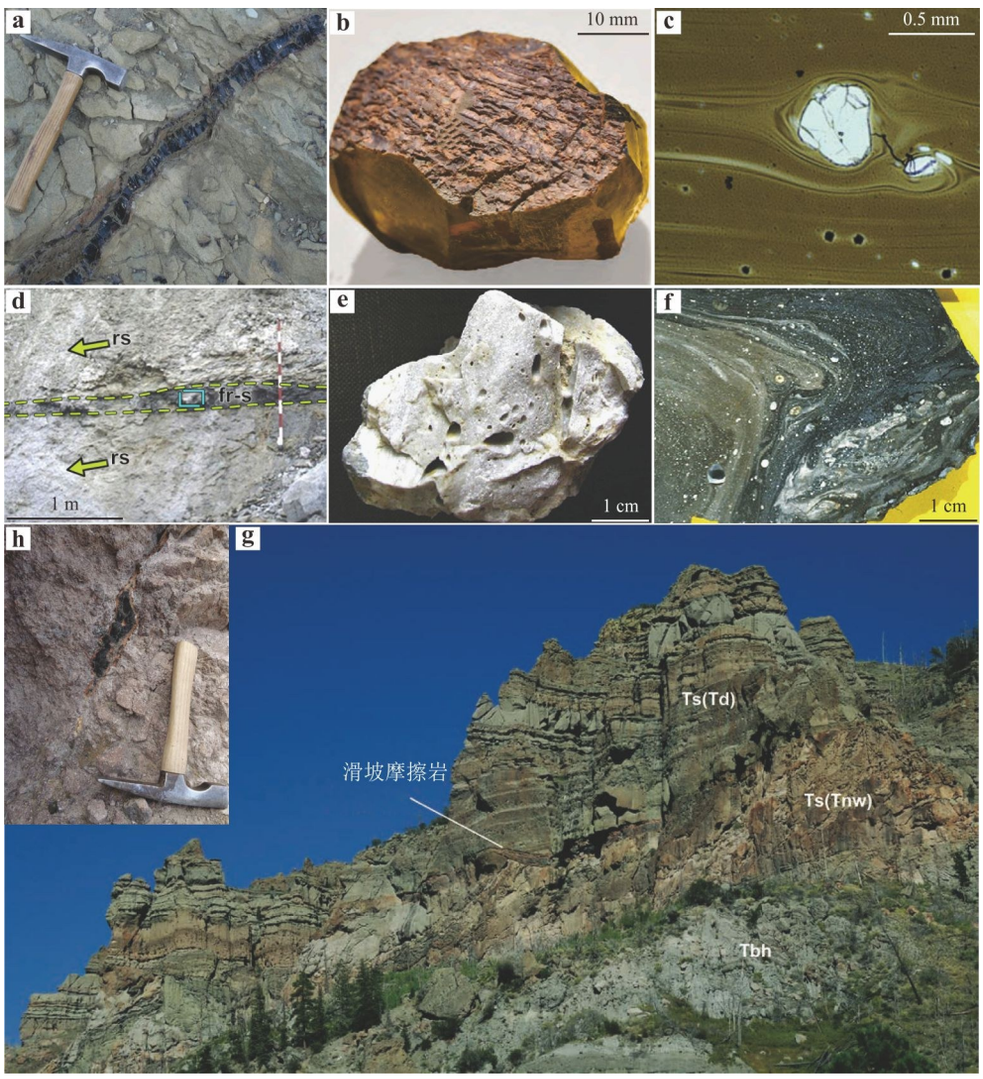

图 7　高速远程滑坡剪切带矿物相变地质特征

Fig.7　Field mineral phase transition in rockslide and rock avalanche shear zones

a～c. 美国犹他州 Markagunt 滑坡假玄武玻璃,a、b、c 分别展示了野外露头尺度、手标本尺度与光学显微镜尺度下的滑坡假玄武玻璃,a 中可见深色、致密、连续的假玄武玻璃层,b 中见假玄武玻璃表面发育擦痕与阶步,基质部分呈玻璃质,c 中见假玄武玻璃的玻璃质基质、流动构造与气孔(a、c 据 Biek *et al.*, 2019,b 据 Zamanialavijeh *et al.*, 2021);d～f. 尼泊尔 Langtang 地区 TsergoRi 滑坡摩擦岩,d 展示了含摩擦岩的滑坡剪切带,黄色箭头指示滑坡运动方向,图中 fr-s 代表 frictionite and breccias,rs 代表 rockslide,e 为保留大量气孔的摩擦岩手标本,f 展示了摩擦岩的深色玻璃质基质、气孔与流动构造(据 Weidinger *et al.*, 2014);g～h. 美国犹他州 Sevier 滑坡假玄武玻璃,g 展示了野外宏观尺度下呈深色、厚度有限的滑坡摩擦岩层,图中地层岩性缩写 Ts 表示 Sevier 滑坡物质,Td 表示 Mount Dutton 岩组,Tnw 表示 Wah Wah Springs 岩组,Tbh 表示 Brian Head 岩组,h 展示了深色致密的脉状滑坡假玄武玻璃(据 Biek *et al.*, 2019)

巨大超孔压等剪切带中伴随矿物相变出现的诸多物理－化学－力学现象(Yao *et al.*, 2023),这些矿物相变的过程和作用导致滑坡呈现显著的摩阻弱化效应(Mitchell *et al.*, 2015;Zamani *et al.*, 2023).

当前,既有矿物相变机理的研究主要聚焦于断层破碎带、板块俯冲带以及地幔剪切带等深部大型剪切带.这些剪切带所在位置距地表大多超过 1 km,最深可达 600 km,因此,剪切带所承受的压力至少在 20 MPa 以上,最高可达数十吉帕(GPa);另一方面,这些矿物相变研究更多地关注剪切带的蠕滑变形,因此相应的实验工况下采用的剪切速率往往小于 1 m/s.而对于高速远程滑坡,其滑坡体厚度仅在数十米到数百米之间,即使体积巨大如前文述及的美国 Markagunt 滑坡和 Sevier 滑坡,其滑体厚度也未超过 3 km,因此滑坡底部剪切带的常见正应力范围在 1～10 MPa 之间;而剪切带的剪切速度则达到每秒数十米.显著的正应力与剪切速度差异,表明滑坡剪切带的矿物相变类型、过程与机理与地

壳深部大型剪切带的矿物相变类型、过程与机理，存在着根本性的差异，而当前基于滑坡真实剪切带正应力和剪切速率条件下开展的矿物相变实验研究还十分匮乏.

因此，高速远程滑坡的矿物相变摩阻弱化涉及到的前述问题还未被解答.未来的研究应揭示以下问题的奥秘：不同成分的矿物类型在高速剪切作用下，发生相变的剪切带内部温压条件究竟有何差异？如何建立考虑滑坡剪切带温度－应力－应变－时间等因素的矿物相变动力学相图？如何定量表征不同矿物相变过程与滑坡摩阻弱化效应之间的关联机制？

显然，回答和解决高速远程滑坡“剪切破碎流态转化机理”与“矿物相变摩阻弱化机理”这2个关键科学问题中的任何一个都绝非易事，但它们既是国际高速远程滑坡动力学学科理论研究前沿和热点，又是当前我国高原山区重大地质灾害致灾机理、预测评价以及灾害风险防控体系中亟待解决的关键技术问题，因而具有重要的科学理论意义和重大的工程应用价值.

4 天山地区高速远程滑坡防灾减灾展望

天山地区高速远程滑坡的研究，因其独特的地质构造背景、动力成因与成灾模式，展现出与其他区域（如阿尔卑斯山、喜马拉雅山、安第斯山）显著不同的科学内涵，与此同时，密集的重大工程建设活动也对本地区的灾害防治提出了更高的要求.因此，发展具有区域针对性的防灾减灾理论和技术体系至关重要.

相比而言，我国青藏高原的喜马拉雅造山带为典型的板块碰撞边界，构造活动以强烈的挤压和快速隆升为主，其高速远程滑坡多与巨型地震、冰川消融和冰湖溃决洪水紧密相关（崔鹏等，2025；殷跃平等，2025）.而天山造山带是典型的陆内再生造山带，其强烈且持续的变形是印度板块碰撞的远场效应，表现为盆山相间的楔状构造与走滑断裂系统，这导致了滑坡发育空间分布上的非均匀性和分段性（Havenith *et al.*, 2015a, 2015b; Wu *et al.*, 2023）.喜马拉雅地区受印度季风强烈影响，降水充沛且极端事件频发，冰川湖溃决洪水是滑坡－灾害链的主要触发因素.而天山地区主要受西风带控制，降水呈“西多东少”的空间格局，冰川退缩与多年冻土退化是主要趋势（Fan *et al.*, 2024；张太刚等，2025）.因此，天山滑坡的触发模式更多与季节性冻融循环、冰川融水侵蚀以及特定地层的饱水软化相关，而与季风性强降水直接触发的关联性相对较弱.这种“固态水塔”的缓慢变化与强烈构造活动的叠加，形成了独特的孕灾模型（张紫昭等，2023）.在成灾动力学方面，天山地区高速远程滑坡显示出了极强的远程效应和堵江成坝风险，形成链生巨灾风险（Reznichenko *et al.*, 2017; Strom and Abdrakhmatov, 2018; Losen *et al.*, 2024）.相比于欧洲阿尔卑斯山区和藏东南川藏交通廊道沿线，天山地区的高速远程滑坡灾害研究仍处于初级阶段，难以有效应对日益增强的人类活动.因此，为提升天山地区高速远程滑坡防灾减灾能力，亟需开展以下几个方面的研究工作：①建立完备的历史滑坡灾害数据库，结合人工智能与大数据分析等方法，分类开展滑坡灾害孕灾机制研究，明确重大滑坡灾害发育分布规律，实现潜在风险源的有效识别；②以高速远程滑坡剪切破碎相态转化机理和矿物相变摩阻弱化机理为主要突破口，采用高速旋剪实验、超重力大尺度离心机物理模型实验、大规模颗粒离散元等先进技术手段开展研究，揭示滑坡远程运动的内在机制，建立基于统计物理学的高速远程滑坡致灾动力学模型；③融合天山地区特殊地质环境背景与工程建设特性，构建高速远程滑坡孕灾、演化、成灾全链条风险评估模型，实现高速远程滑坡灾害的风险分级，实现具有区域针对性的防灾减灾.

5 总结

2020年5月，美国国家研究理事会（NRC）发布的《时域地球——美国国家科学基金会地球科学十年愿景（2020—2030）》（A Vision for NSF Earth Sciences 2020—2030: Earth in Time），将“地球科学研究如何降低地质灾害风险与损失？”作为12个引人瞩目的优先科学问题之一.2024年，中国科学院和国家自然科学基金委员会发布的《中国地球系统科学2035发展战略》，将“地表过程致灾机理与链式灾害演化机制”“地质与工程灾害的致灾机理、识别预警与防控”等人类活动与环境问题，列为我国地球科学未来研究的重大交叉领域（中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）项目组，2024）.2025

年7月,中国科学院发布的《中国学科发展战略·工程地质学》中,将“滑坡成因与预报理论”和“多圈层互馈与地质安全”作为未来10年工程地质领域的重要发展方向(中国科学院,2025).2026年1月,《中国科学基金》刊登了关于自然灾害防治体系建设的19篇重要论文(例如,彭建兵,2025;殷跃平等,2025;唐辉明等,2025;许强等,2025),汇聚了自然灾害领域与工程地质领域学者们在地质灾害早期识别、监测预警、风险防控等研究领域,未来研究需重点关注的重要科学问题.在诸多地质灾害事件中,在地球多圈层互馈作用以及全球气候变化加剧与人类活动强烈扰动交织的多动力耦合作用等复杂背景下,高速远程滑坡的突发性、链生性与复合性特征日益凸显,使其成为最受关注的重大地质灾害(Gao *et al.*,2025).而高速远程滑坡是一个极其复杂的灾害系统,其多圈层互馈与多动力耦合作用下的关键动力学机理难题尚未破解(彭建兵等,2026).由此可见,高速远程滑坡的研究,无论是在过去、现今,还是在将来,都是国际地球科学暨工程地质领域研究的热点和前沿科学问题,亦是国家防灾减灾救灾的重大需求,需要持之以恒地进行深入科学研究.

中亚天山造山带是全球重大滑坡灾害的高发区域,高速远程滑坡已经成为严重制约我国“一带一路”倡议实施的重大地质灾害.因此,以中亚天山造山带高速远程滑坡为研究对象,以重大交通干线为依托工程,从发现现象、认识规律、揭示机理和工程应用四个方面出发,重点研究“中亚天山造山带高速远程滑坡剪切破碎相态转化、矿物相变摩阻弱化动力学机理”,破解“复杂灾害系统的动力学机制与过程”,揭示“多圈层孕灾机制、多动力成灾机理”,从而服务“一带一路”建设,具有重要的科学意义与应用价值.未来的研究成果将突破滑坡动力学理论瓶颈,实现国际领先的理论创新,并为提升国家自然灾害防治能力、保障人民生命财产安全与经济社会可持续发展的国家重大需求提供关键科技支撑.

致谢:中国地质调查局成都地质调查中心史安文博士后,中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司助理工程师陈蝶,西南交通大学地质工程系周俊妤、施嘉艺、李欣等研究生,协助进行了部分图件绘制,在此一并致谢.

References

Abuduxun, N., Xiao, W. J., Windley, B. F., et al., 2021. Terminal Suturing between the Tarim Craton and the Yili-Central Tianshan Arc: Insights from Mélange-Ocean Plate Stratigraphy, Detrital Zircon Ages, and Provenance of the South Tianshan Accretionary Complex. *Tectonics*, 40(7): e2021TC006705. https://doi.org/10.1029/2021tc006705

Biek, R. F., Rowley, P. D., Hacker, D. B., 2019. The Gigantic Markagunt and Sevier Gravity Slides Resulting from Mid-Cenozoic Catastrophic Mega-Scale Failure of the Marysvale Volcanic Field, Utah, USA. Geological Society of America, Utah. https://doi. org/10.1130/fld056

Braunagel, M. J., Griffith, W. A., Biek, R. F., et al., 2023. Structural Relationships across the Sevier Gravity Slide of Southwest Utah and Implications for Catastrophic Translation and Emplacement Processes of Long Run-out Landslides. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24(5): e2022GC010783. https://doi. org/10.1029/2022gc010783

Breard, E. C. P., Dufek, J., Charbonnier, S., et al., 2023. The Fragmentation-Induced Fluidisation of Pyroclastic Density Currents. *Nature Communications*, 14: 2079. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37867-1

Charreau, J., Gilder, S., Chen, Y., et al., 2006. Magnetostratigraphy of the Yaha Section, Tarim Basin (China): 11 Ma Acceleration in Erosion and Uplift of the Tian Shan Mountains. *Geology*, 34(3): 181－184. https://doi.org/10.1130/g22106.1

Chen, B., Song, C., Li, Z. H., et al., 2025. Pre-Failure Deformation Mechanism and Geomorphological Change of the Jinpingcun Landslide, Junlian, Sichuan. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(11): 2154－2162(in Chinese with English abstract).

Chen, N. S., Wu, M. Y., Li, A. H., et al., 2024. Field Survey of the Zhenxiong Landslide on January 22, 2024 in Yunnan Province, China. *Mountain Research*, 42(3): 422－430, 333(in Chinese with English abstract).

Chen, S. P., Tang, L. J., Yu, Y. X., 2008. Cenozoic Deformation of the Foreland Basins along the Northern and Southern Tianshan and Their Fluctuation Coupling with the Tianshan Orogenic Belt. *Science in China* (*Series D*), 38(S1): 55－62(in Chinese).

Chen, X. Y., 2014. Study on Geological Hazard Evaluation and Prevention Countermeasures in Tianchi Scenic Area of Tianshan Mountain in Fukang City (Dissertation). Xinjiang Agricultural University, Urumqi (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. N., Li, Z., Fang, G. H., et al., 2017. Impact of

Climate Change on Water Resources in the Tianshan Mountians, Central Asia. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 18－26(in Chinese with English abstract).

Cheng, Q. G., Wang, Y. F., Lin, Q. W., et al., 2024. Consideration on Dynamics of Rock Avalanches in the Himalayan Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 98(11): 3238－3254(in Chinese with English abstract).

Chinese Academy of Sciences, 2025. China's Discipline Development Strategy—Cyberspace Security. Science Press, Beijing (in Chinese).

Cross, A. J., Goddard, R. M., Kumamoto, K. M., et al., 2025. Direct Observations of Transient Weakening during Phase Transformations in Quartz and Olivine. *Nature Geoscience*, 18(6): 548－554. https://doi. org/10.1038/s41561-025-01703-6

Cui, P., Wang, Y., Zhang, G. T., et al., 2025. Disaster Risk Prevention under Climate Change: Current Status, Challenges, and Scientific Issues. *Climate Change Research*, 21(4): 449－460(in Chinese with English abstract).

Danneels, G., Bourdeau, C., Torgoev, I., et al., 2008. Geophysical Investigation and Dynamic Modelling of Unstable Slopes: Case-Study of Kainama (Kyrgyzstan). *Geophysical Journal International*, 175(1): 17－34. https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2008.03873.x

Davies, T. R., McSaveney, M. J., 2009. The Role of Rock Fragmentation in the Motion of Large Landslides. *Engineering Geology*, 109(1－2): 67－79. https://doi. org/10.1016/j.enggeo.2008.11.004

Delvaux, D., Abdrakhmatov, K., Lemzin, I., et al., 2001. Landslides and Surface Breaks of the 1911 *M*s8.2 Kemin Earthquake (Kyrgyzstan). *Russian Geology and Geophysics*, 42(10): 1583－1592. http://doi. org/10.1130/0016-7606(2001)113<0144:TEOTSQ>2.0.CO;2

Deng, Y., Zhu, H., Rengers, F. K., et al., 2023. Permeability Evolution of Granular Gouges: Experimental Perspectives and Implications for Fault Lubrication during Large Slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128: e2023JB026488.

Deng, Q. D., Feng, X.Y., Zhang, P.Z., 2000. Tianshan Active Structure. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

Ding, Y. J., Zhang, S. Q., Chen, R. S., et al., 2025. A Review of the Impacts of Climate Change on Cryospheric Hydrological Processes. *Climate Change Research*, 21(1): 1－21(in Chinese with English abstract).

Ding, Z. W., Hu, W., Chang, C.S., et al., 2024. Shear Behaviors of Confined Flow: Insights for Understanding the Influences of Fractal Particle Size Distribution on High Mobility of Granular Flows. *Geophysical Research Letters*, 51(14): e2024GL108956. https://doi. org/10.1029/2024gl108956

Dufresne, A., Bösmeier, A., Prager, C., 2016. Sedimentology of Rock Avalanche Deposits—Case Study and Review. *Earth-Science Reviews*, 163: 234－259. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.002

Evans, S. G., Bishop, N. F., Fidel Smoll, L., et al., 2009. A Re-Examination of the Mechanism and Human Impact of Catastrophic Mass Flows Originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108(1－2): 96－118. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.020

Fan, M. T., Xu, J. H., Chen, Y. N., et al., 2024. Development of High-Resolution Monthly Precipitation Datasets for Geomorphological Applications in the Tianshan Mountains from 2000 to 2050. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(7): 2096－2109. https://doi. org/10.1002/esp.5818

Feng, Z. Y., Cheng, Q. G., Wang, Y. F., et al., 2023. The State-of-Art and Future Developmnet of Friction Heating Inducded Weakening Mechanisms of Rock Avalanches. *Journal of Engineering Geology*, 31(3): 999－1017 (in Chinese with English abstract).

Gao, S. H., Gao, Y., Yin, Y. P., et al., 2025. Characteristics of Massive Glacier-Related Watershed Geohazard Chains in the Eastern Himalayan Syntaxis, China. *Journal of Earth Science*, 36(3): 1181－1197. https://doi.org/10.1007/s12583-024-0116-y

Gong, W. B., Wang, G. S., Li, L., et al., 2025. A Dataset and Review of Empirical Estimation Relationships for Landslide Runout Distances. *Earth-Science Reviews*, 270: 105225. https://doi. org/10.1016/j. earscirev.2025.105225

Goren, L., Aharonov, E., Anders, M.H., 2010. The Long Runout of the Heart Mountain Landslide: Heating, Pressurization, and Carbonate Decomposition. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115: B10210. http://doi.org/10.1029/2009JB007113

Hacker, D. B., Biek, R. F., Rowley, P. D., 2014. Catastrophic Emplacement of the Gigantic Markagunt Gravity Slide, Southwest Utah (USA): Implications for Hazards Associated with Sector Collapse of Volcanic Fields. *Geology*, 42(11): 943－946. https://doi. org/10.1130/g35896.1

Havenith, H. B., Strom, A., Caceres, F., et al., 2006. Analysis of Landslide Susceptibility in the Suusamyr Region, Tien Shan: Statistical and Geotechnical Approach. *Landslides*, 3(1): 39－50. https://doi. org/10.1007/s10346-005-0005-0

Havenith, H. B., Strom, A., Torgoev, I., et al., 2015a. Tien Shan Geohazards Database: Earthquakes and Land-

slides. *Geomorphology*, 249: 16－31. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.037

Havenith, H. B., Torgoev, A., Schlögel, R., et al., 2015b. Tien Shan Geohazards Database: Landslide Susceptibility Analysis. *Geomorphology*, 249: 32－43. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.019

He, X. R., Yin, Y. P., Zhao, L. M., et al., 2024. Disintegration and Fragmentation Effect of Debris Flow in High-Level Rock Landslide Based on Large-Scale Physical Model Test. *Earth Science*, 49(7): 2650－2661 (in Chinese with English abstract).

Heim, A., 1932. Landslides and Human Lives. Bitech Publishers, Vancouver.

Hsü, K. J., 1975. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86(1): 225－256. https://doi. org/10.1130/0016-7606(1975)86129:cdssgb＞2.0.co;2

Hu, W., Huang, R. Q., McSaveney, M., et al., 2019. Superheated Steam, Hot CO_2 and Dynamic Recrystallization from Frictional Heat Jointly Lubricated a Giant Landslide: Field and Experimental Evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, 510: 85－93. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.01.005

Hu, W., Li, Y., Gou, H. X., et al., 2025a. Influence of Normal Stress, Shear Velocity and Materials on Steady-State Shear Resistance and Viscosity of Rapid Dry Granular Flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(6): e2025JB031305. https://doi. org/10.1029/2025jb031305

Hu, W., Zheng, Y. S., Ge, Y., et al., 2025b. Entropy-Controlled Velocity-Dependent Behavior of Landslide Clayey Soil across a Wide Velocity Range. *Earth and Planetary Science Letters*, 671: 119671. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119671

Hu, W., Xu, Q., McSaveney, M., et al., 2022a. The Intrinsic Mobility of Very Dense Grain Flows. *Earth and Planetary Science Letters*, 580: 117389. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117389

Hu, W., Xu, Q., McSaveney, M., et al., 2022b. Fluid-Like Behavior of Crushed Rock Flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(10): e2021JF006523. https://doi.org/10.1029/2021jf006523

Huang, J. P., Zhang, Z. Z., Ling, S. X., 2025. Effect of Morphological Terraces on Earthquake-Induced Landslides: Insights from the January 23, 2024, *M*s 7.1 Wushi Earthquake in the South Tianshan Mountains, China. *Engineering Geology*, 354: 108210. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108210

Huang, W. L., Yang, X. P., Li, A., et al., 2015. Late Pleistocene Shortening Rate on the Northern Margin of the Yanqi Basin, Southeastern Tian Shan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 112: 11－24. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.08.024

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., et al., 2020. Importance and Vulnerability of the World's Water Towers. *Nature*, 577(7790): 364－369. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y

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. *Granular Matter*, 12(3): 267－285. https://doi.org/10.1007/s10035-009-0163-1

Iverson R. M., George D. L., Allstadt K., et al. 2015. Landslide Mobility and Hazards: Implications of the 2014 Oso Disaster. *Earth and Planetary Science Letters*, 412: 197－208.

Jiang, H. H., Lee, C. A., Morgan, J. K., et al., 2015. Geochemistry and Thermodynamics of an Earthquake: A Case Study of Pseudotachylites within Mylonitic Granitoid. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 235－248. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.027

Korup, O., Pánek, T., Březný, M., 2025. Size Estimates of Earth's Largest Terrestrial Landslides Informed by Topographic Setting. *Communications Earth & Environment*, 6: 629. https://doi. org/10.1038/s43247-025-02614-5

Lai, Z. Q., Vallejo, L. E., Zhou, W., et al., 2017. Collapse of Granular Columns with Fractal Particle Size Distribution: Implications for Understanding the Role of Small Particles in Granular Flows. *Geophysical Research Letters*, 44(24): 12181－12189. https://doi. org/10.1002/2017gl075689

Lee, J., Tsai, V. C., Trugman, D. T., et al., 2025. Fault Network Geometry Modulates Earthquake Source Spectra across Scales. *Geophysical Research Letters*, 52(12): e2025GL115592. https://doi. org/10.1029/2025gl115592

Li, F., Shi, X. H., Charreau, J., et al., 2026. Differential Mountain-Building in the South Tian Shan Revealed by Multi-Spatiotemporal Foreland Deformation. *Tectonics*, 45(2): e2025TC009078. https://doi. org/10.1029/2025tc009078

Li, J., Gao, Y., Wang, Q., 2021. Characteristics of Crustal Medium Anisotropy Zoning in Tianshan Tectonic Belt. *Science in China* (*Series D*), 51(4): 582－597(in Chinese).

Li, J. Y., Wang, K. Z., Li, Y. P., et al., 2006. Geomorphological Features, Crustal Composition and Geological Evolution of the Tianshan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 895－909(in Chinese with English

abstract).

Li, K., Wang, Y. F., Lin, Q. W., et al., 2021. Experiments on Granular Flow Behavior and Deposit Characteristics: Implications for Rock Avalanche Kinematics. *Landslides*, 18(5): 1779－1799. https://doi. org/10.1007/s10346-020-01607-z

Li, Y., Hu, W., Xu, Q., et al., 2024. Evolution of Power-Law Particle-Size Distributions in Dense Grain-Flow Experiments. *Journal of Geophysical Research*: *Earth Surface*, 129(10): e2024JF007844. https://doi. org/10.1029/2024jf007844

Li, Y., Liu, Q. Y., Chen, J. H., et al., 2007. Shear Wave Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle underneath the Tianshan Orogenic Belt. *Science in China* (*Series D*), 37(3): 344－352(in Chinese).

Lin, Q. W., Cheng, Q. G., Li, K., et al., 2020. Contributions of Rock Mass Structure to the Emplacement of Fragmenting Rockfalls and Rockslides: Insights from Laboratory Experiments. *Journal of Geophysical Research*: *Solid Earth*, 125(4): e2019JB019296. https://doi.org/10.1029/2019jb019296

Lin, Q. W., Wang, Y. F., Cheng, Q. G., et al., 2024. The Alasu Rock Avalanche in the Tianshan Mountains, China: Fragmentation, Landforms, and Kinematics. *Landslides*, 21(3): 439－459. https://doi. org/10.1007/s10346-023-02167-8

Liu, C. Q., 2025. Global Change, Inter-Sphere Interaction and Earth System Science. *Earth Science Frontiers*, 32(3): 1－6(in Chinese with English abstract).

Liu, D. Q., Liu, M., Wang, H. T., et al., 2016. Slip Rates and Seismic Moment Deficits on Major Faults in the Tianshan Region. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(5): 1647－1660(in Chinese with English abstract).

Liu, F. Y., Shi, Z. G., 2023. Research Advances in Climate Change over Hindu Kush, Karakoram and Tianshan Mountains in Central Asia under Global Warming. *Journal of Earth Environment*, 14(1): 27－37, 48(in Chinese with English abstract).

Liu, J., Sun, Z. T., Wang, W. X., et al., 2025. Surface-Earth Response to Deep-Earth Processes and Consequential Natural Disasters. *Earth Science Frontiers*, 32(3): 7－22(in Chinese with English abstract).

Liu, Z. Y., Su, L. J., Wang, B., et al., 2024. Dynamic Fragmentation of Intact Rock Blocks and Its Influence on Mobility: Insights from Discrete Element Analysis. *Landslides*, 21(12): 3103－3118. https://doi. org/10.1007/s10346-024-02349-y

Losen, J., Rizza, M., Nutz, A., et al., 2024. Repeated Failures of the Giant Beshkiol Landslide and Their Impact on the Long-Term Naryn Basin Floodings, Kyrgyz Tien Shan. *Geomorphology*, 453: 109121. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109121

Lü, H. H., Li, Y. L., 2020. Development of Tectonic Geomorphology Study Promoted by New Methods in China: A Viewpoint from Reviewing the Tian Shan Researches. *Advances in Earth Science*, 35(6): 594－606(in Chinese with English abstract).

Mani, P., Allen, S., Evans, S. G., et al., 2023. Geomorphic Process Chains in High-Mountain Regions—A Review and Classification Approach for Natural Hazards Assessment. *Reviews of Geophysics*, 61(4): e2022RG000791. https://doi.org/10.1029/2022rg000791

Molnar, P., Tapponnier, P., 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of Recent Continental Tectonics in Asia Can be Interpreted as Results of the India-Eurasia Collision. *Science*, 189(4201): 419－426. https://doi. org/10.1126/science.189.4201.419

Mitchell, T. M., Smith, S. A. F., Anders, M. H., et al. 2015. Catastrophic Emplacement of Giant Landslides Aided by Thermal Decomposition: Heart Mountain, Wyoming. *Earth and Planetary Science Letters*, 411: 199－207.

Peng, J. B., 2025. Modernization of the Natural Disaster Prevention and Control System: A Paradigm Shift from Passive Response to Proactive Prevention. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6): 863 (in Chinese).

Peng, J. B., Cheng, Q. G., Zhang, Y. S., et al., 2026. Genetic Mechanism of Natural Disasters: Systematic Analysis Based on Circle Mutual Feedback, Interface Control, Dynamic Coupling, Critical Burst and Disaster Chain Amplification. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 56(7): 2573－2602 (in Chinese with English abstract).

Peng, J. B., Zhang, Y. S., Huang, D., et al., 2023. Interaiction Disaster Effects of the Tectonic Deformation Sphere, Rock Mass Loosening Sphere, Surface Freeze-Thaw Sphere and Engineering Disturbance Sphere on the Tibetan Plateau. *Earth Science*, 48(8): 3099－3114 (in Chinese with English abstract).

Pollet, N., Schneider, J. L. M., 2004. Dynamic Disintegration Processes Accompanying Transport of the Holocene Flims Sturzstrom (Swiss Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1－4): 433－448. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00071-8

Poschinger, A. V., Wassmer, P., Maisch, M., 2006. The Flims Rockslide: History of Interpretation and New Insights. In: Evans, S. G., Mugnozza, G. S., Storm, A., eds., Landslides from Massive Rock Slope Failure. Springer Netherlands, Dordrecht, 329－356. https://

doi.org/10.1007/978-1-4020-4037-5_18

Pozzi, G., De Paola, N., Nielsen, S.B., et al., 2021. Earthquake Rupture in Carbonates Facilitated by Frictional Weakening and Flash Heating. *Earth and Planetary Science Letters*, 569: 117052.

Project Team of China's Research on the Development Strategy of Disciplines and Frontier Fields (2021—2035), 2024. China's Earth System Science 2035 Development Strategy. Science Press, Beijing (in Chinese).

Pu, F., Xu, Q., Pu, C. H., et al., 2026. Analysis of Landslide Movement in Junlian County, Yibin City, Sichuan Province on February 8, 2025, Based on Seismic Records. *Journal of Chengdu University of Technology* (*Science & Technology Edition*), 53(1): 64—77 (in Chinese with English abstract).

Qin, Y., Ding, J.L., Zhao, Q.D., et al., 2018. Spatial-Temporal Variation of Snow Cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015, and Its Relation to Temperature and Precipitation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(2): 249—260(in Chinese with English abstract).

Reznichenko, N., Davies, T., 2015. The Gigantic Komansu Rock Avalanche Deposit in the Glaciated Alai Valley, Northern Pamir of Central Asia. In: Lollino, G., Giordan, D., Crosta, G., et al., eds., Engineering Geology for Society and Territory—Volume 2: Landslide Processes. Springer International Publishing, Cham: 895—898. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_154

Reznichenko, N. V., Andrews, G. R., Geater, R. E., et al., 2017. Multiple Origins of Large Hummock Deposits in Alai Valley, Northern Pamir: Implications for Palaeoclimate Reconstructions. *Geomorphology*, 285: 347—362. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.019

Robinson, T. R., Davies, T. R. H., Reznichenko, N. V., et al., 2015. The Extremely Long-Runout Komansu Rock Avalanche in the Trans Alai Range, Pamir Mountains, Southern Kyrgyzstan. *Landslides*, 12(3): 523—535. https://doi.org/10.1007/s10346-014-0492-y

Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., et al., 2023. Global Glacier Change in the 21st Century: Every Increase in Temperature Matters. *Science*, 379(6627): 78—83. https://doi.org/10.1126/science.abo1324

Sattar, A., Cook, K. L., Rai, S. K., et al., 2025. The Sikkim Flood of October 2023: Drivers, Causes, and Impacts of a Multihazard Cascade. *Science*, 387(6740): eads2659. https://doi.org/10.1126/science.ads2659

Scheidegger, A. E., 1973. On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. *Rock Mechanics*, 5(4): 231—236. https://doi. org/10.1007/BF01301796

Shang, Y. J., Yi, X. T., Hasan, M., et al., 2022. Study on the Structure of Tianchi Accumulation Dam and the Development Stage of Old Collapse and Old Landslide. *Xinjiang Geology*, 40(4): 495—501(in Chinese with English abstract).

Shi, A. W., Wang, Y. F., Cheng, Q. G., et al., 2023. The Largest Rock Avalanche in China at Iymek, Eastern Pamir, and Its Spectacular Emplacement Landscape. *Geomorphology*, 421: 108521. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108521

Shi, A. W., Wang, Y. F., Cheng, Q. G., et al., 2024a. Distinctive Shear Zones Demonstrate Pervasive Laminar Cataclastic Flow throughout the Gigantic Iymek Rock Avalanche. *Geomorphology*, 452: 109109. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109109

Shi, A. W., Wang, Y. F., Cheng, Q. G., et al., 2024b. Observations of Avalanche-Substrate Interactions in the Iymek Rock Avalanche Deposit: A Possible Causative Mechanism. *Engineering Geology*, 341: 107710. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107710

Shi, A. N., Yang, G. C., Kwok, C. Y., et al., 2024c. Enhanced Mobility of Granular Avalanches with Fractal Particle Size Distributions: Insights from Discrete Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 642: 118835. https://doi. org/10.1016/j.epsl.2024.118835

Stoffel, M., Trappmann, D. G., Coullie, M. I., et al., 2024. Rockfall from an Increasingly Unstable Mountain Slope Driven by Climate Warming. *Nature Geoscience*, 17(3): 249—254. https://doi.org/10.1038/s41561-024-01390-9

Strom, A., 2024. Prediction of the Dimensions of Rock Avalanches' Affected Areas Based on the Empirical Relationships Derived from the Central Asian Database. *Landslides*, 21(8): 1961—1970. https://doi. org/10.1007/s10346-024-02264-2

Strom, A., Abdrakhmatov, K., 2018. Rockslides and Rock Avalanches of Central Asia: Distribution, Morphology, and Internal Structure. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Strom, A. L., Korup, O., 2006. Extremely Large Rockslides and Rock Avalanches in the Tien Shan Mountains, Kyrgyzstan. *Landslides*, 3(2): 125—136. https://doi.org/10.1007/s10346-005-0027-7

Tang, H. M., Ge, Y. F., Zhang, S., et al., 2025. Advances and Challenges in Landslide Prediction and Forecasting. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6): 993—1005(in Chinese with English abstract).

Teshebaeva, K., Echtler, H., Bookhagen, B., et al., 2019. Deep-Seated Gravitational Slope Deformation

(DSGSD) and Slow-Moving Landslides in the Southern Tien Shan Mountains: New Insights from InSAR, Tectonic and Geomorphic Analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(12): 2333－2348. https://doi.org/10.1002/esp.4648

Thompson, J. A., Burbank, D. W., Li, T., et al., 2015. Late Miocene Northward Propagation of the Northeast Pamir Thrust System, Northwest China. *Tectonics*, 34(3): 510－534. https://doi.org/10.1002/2014tc003690

Thompson, S. C., Weldon, R. J., Rubin, C. M., et al., 2002. Late Quaternary Slip Rates across the Central Tien Shan, Kyrgyzstan, Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9): ETG 7-1－ETG 7-32. https://doi.org/10.1029/2001jb000596

Tian, Q. J., Ding, G. Y., Hao, P., 2006. Seismotectonic Study on West Part of the Interaction Zone between Southern Tianshan and Northern Tarim. *Seismology and Geology*, 28(2): 213－223(in Chinese with English abstract).

Torgoev, I., Niyazov, R., Havenith, H. B., 2013. Tien-Shan Landslides Triggered by Earthquakes in Pamir-Hindukush Zone. Landslide Science and Practice: Volume 5: Complex Environment. Springer, Berlin, Heidelberg, 191－197. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31427-8_25

Wang, Y. F., Cheng, Q. G., Lin, Q. W., et al., 2025. Research on Rock Avalanches in Tibetan Plateau: From Field Observations to Dynamic Mechanisms. *Earth Science*, 50(10): 4071－4095(in Chinese with English abstract).

Wang, Y. F., Cheng, Q. G., Zhu, Q., 2015. Surface Microscopic Examination of Quartz Grains from Rock Avalanche Basal Facies. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(2): 167－181. https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0284

Wang, Y. F., Dong, J. J., Cheng, Q. G., 2017. Velocity-Dependent Frictional Weakening of Large Rock Avalanche Basal Facies: Implications for Rock Avalanche Hypermobility? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(3): 1648－1676. https://doi.org/10.1002/2016jb013624

Wang Y. F., Lin Q. W., Li K., et al., 2021. Review on Rock Avalanche Dynamics. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 208－220(in Chinese with English abstract).

Wang, Y. S., Sun, W. J., Ding, M. H., et al., 2025. Characteristics of Glacier Mass Balance Changes and Response to Climate Change in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Climate Change Research*, 21(2): 208－220(in Chinese with English abstract).

Weidinger, J. T., Korup, O., Munack, H., et al., 2014. Giant Rockslides from the Inside. *Earth and Planetary Science Letters*, 389: 62－73. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.12.017

Wu, C. Y., Zhang, P. Z., Zhang, Z. Q., et al., 2023. Slip Partitioning and Crustal Deformation Patterns in the Tianshan Orogenic Belt Derived from GPS Measurements and Their Tectonic Implications. *Earth-Science Reviews*, 238: 104362. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104362

Xu, Q., Zhu, H. H., Zhu, X., et al., 2025. The Monitoring Technology System of Natural Disaster. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6): 893－904(in Chinese with English abstract).

Xu, X., Zuza, A. V., Gerya, T., et al., 2025. Mode of Intracontinental Mountain Building Controlled by Lower Crustal Composition and Mantle Lithosphere Depletion. *Nature Communications*, 16: 9404. https://doi.org/10.1038/s41467-025-63468-1

Yan, B., Jia, D., Wang, M. M., 2023. Drainage Development on the Northern Tibetan Plateau Controlled by the Altyn Tagh Fault: Insights from Analogue Modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(10): 2005－2022. https://doi.org/10.1002/esp.5600

Yang, H. J., Li, Y. J., Shi, J., et al., 2010. Tectonic Characteristics of the Late Cenozoic South Tianshan Fold-Thrust Belt. *Quaternary Sciences*, 30(5): 1030－1043(in Chinese with English abstract).

Yang, J. N., Zheng, G., Li, X. W., et al., 2025. Characteristics and Failure Mechanism of Rock Avalanche in Liangshui Village, Zhenxiong County, Yunnan Province, on January 22, 2024. *Journal of Engineering Geology*, 33(2): 556－571(in Chinese with English abstract).

Yang, W., Feng, X. Q., Gao, H. J., 2026. Outstanding Issues and Emerging Frontiers in Fracture Mechanics. *International Journal of Fracture*, 250(1): 10. https://doi.org/10.1007/s10704-025-00907-6

Yang, X. P., Li, A., Hunag, W., 2013. Uplift Differential of Active Fold Zones during the Late Quaternary, Northern Piedmonts of the Tianshan Mountains, China. *Science China Earth Sciences*, 56(5): 794－805. https://doi.org/10.1007/s11430-012-4531-z

Yanites, B. J., Clark, M. K., Roering, J. J., et al., 2025. Cascading Land Surface Hazards as a Nexus in the Earth System. *Science*, 388(6754): eadp9559. https://doi.org/10.1126/science.adp9559

Yao, L., Ma, S. L., Di Toro, G., 2023. Coseismic Fault Sealing and Fluid Pressurization during Earthquakes. *Nature Communications*, 14: 1136. https://doi.org/10.1038/s41467-023-36839-9

Yao, T. D., Thompson, L., Yang, W., et al., 2012. Different Glacier Status with Atmospheric Circulations in Tibetan Plateau and Surroundings. *Nature Climate Change*, 2(9): 663－667. https://doi.org/10.1038/nclimate1580

Yin, A., Nie, S., Craig, P., et al., 1998. Late Cenozoic Tectonic Evolution of the Southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 17(1): 1－27. https://doi. org/10.1029/97tc03140

Yin, Y. P., Li, B., Gao, Y., et al., 2025. Challenges and Countermeasures for High-Altitude and Long-Runout Geological Hazards in the Qinghai-Xizang Plateau. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6): 986－992(in Chinese with English abstract).

Yin, Y. P., Zhu, S. N., Li, B., 2021. High-Level Remote Geological Disasters in Qinghai-Tibet Plateau. Science Press, Beijing (in Chinese).

Zamani, N., Heij, G. W., Ferré, E. C., et al., 2023. High-Velocity Slip and Thermal Decomposition of Carbonates: Example from the Heart Mountain Slide Ultracataclasites, Wyoming. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(5): e2022JB026185. https://doi.org/10.1029/2022jb026185

Zamanialavijeh, N., Hosseinzadehsabeti, E., Ferré, E. C., et al., 2021. Kinematics of Frictional Melts at the Base of the World's Largest Terrestrial Landslide: Markagunt Gravity Slide, Southwest Utah, United States. *Journal of Structural Geology*, 153: 104448. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104448

Zekollari, H., Schuster, L., Maussion, F., et al., 2025. Glacier Preservation Doubled by Limiting Warming to 1.5 ℃ versus 2.7 ℃.*Science*, 388(6750): 979－983. https://doi.org/10.1126/science.adu4675

Zhang, B. F., Bao, X. W., 2023. Research Progress on Seismic Structures of Crust and Mantle beneath Tien Shan and Their Geodynamic Implications. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 54(1): 27－43(in Chinese with English abstract).

Zhang, J. X., Wang, S. S., He, Y. L., et al., 2022. Contribution of the Precipitation-Recycling Process to the Wetting Trend in Xinjiang, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(11): e2021JD036407. https://doi.org/10.1029/2021jd036407

Zhang, M., McSaveney, M. J., 2017. Rock Avalanche Deposits Store Quantitative Evidence on Internal Shear during Runout. *Geophysical Research Letters*, 44(17): 8814－8821. https://doi.org/10.1002/2017gl073774

Zhang, P. Z., Deng, Q. D., Zhang, G. M., et al., 2003. Strong Earthquake Activities and Active Blocks in Chinese Mainland. *Science in China* (*Series D*), 33(S1): 12－20(in Chinese).

Zhang, S. L., Yin, Y. P., Hu, X. W., et al., 2023. Block-Grain Phase Transition in Rock Avalanches: Insights from Large-Scale Experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(11): e2023JF007204. https://doi.org/10.1029/2023jf007204

Zhang, S. S., Hu, J. Z., An, J., et al., 2026. A Study on the Cascading Formation Mechanism of the High-Position Landslide to Debris Flow Disaster and Its Emergency Monitoring and Early Warning in Junlian, Sichuan. *Journal of Engineering Geology*, 34(1): 155－167(in Chinese with English abstract).

Zhang, T. G., Wang, W. C., Wang, X., et al., 2025. Research Progress on Glacial Lake Changes and Hazards in Asian Water Tower. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 47(4): 900－913(in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. Z., Zhang, T. D., Yu, X. K., et al., 2023. Zonation of Disaster Environments of Collapse, Landslide and Debris Flow Geologic Hazards and Their Formation Mechanisms in Xinjiang. *Journal of Engineering Geology*, 31(4): 1129－1144(in Chinese with English abstract).

Zhao, B., Zhang, Q., Wang, L. J., et al., 2025. Preliminary Analysis of Failure Characteristics of the 2025 Junlian Rock Avalanche, China. *Landslides*, 22(8): 2593－2605. https://doi.org/10.1007/s10346-025-02556-1

Zheng, W. J., Sun, X., Yuan, D. Y., et al., 2025. Active Faults, Seismic Activity, and Seismotectonic Environments in the Tibetan Plateau and Its Adjacent Regions. *Journal of Geomechanics*, 31(5): 1006－1029(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈博,宋闯,李振洪,等, 2025. 四川筠连县金坪村滑坡灾前地貌变化和形变特征研究. 武汉大学学报(信息科学版), 50(11): 2154－2162.

陈宁生,吴铭洋,李安辉,等, 2024. 云南镇雄“1•22”山体滑坡灾害调查. 山地学报, 42(3): 422－430, 333.

陈书平,汤良杰,余一欣, 2008. 天山南北前陆盆地新生代变形与天山造山带的波动耦合. 中国科学(D辑),38(增刊1): 55－62.

陈晓玉, 2014. 阜康市天山天池景区地质灾害评价与防治对策研究(博士学位论文). 乌鲁木齐:新疆农业大学.

陈亚宁,李稚,方功焕,等, 2017. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究. 地理学报, 72(1): 18－26.

程谦恭,王玉峰,林棋文,等, 2024. 喜马拉雅造山带高速远程滑坡动力学机理研究的思考. 地质学报, 98(11): 3238－3254.

崔鹏,王岩,张国涛,等, 2025. 气候变化灾害风险防范:现状、挑战与科学问题. 气候变化研究进展, 21(4): 449－460.

邓起东,冯先岳,张培震,等, 2000. 天山活动构造.北京:地震出版社.

丁永建,张世强,陈仁升,等, 2025. 气候变化对冰冻圈水文影响研究综述.气候变化研究进展, 21(1): 1－21.

冯止依,程谦恭,王玉峰,等, 2023. 高速远程滑坡摩擦生热减阻机理研究现状及展望.工程地质学报, 31(3): 999－1017.

贺旭荣, 殷跃平, 赵立明, 等, 2024. 基于大型物理模型试验的高位岩质滑坡碎屑流解体破碎效应. 地球科学, 49(7): 2650－2661.

李金,高原,王琼, 2021. 天山构造带上地壳介质各向异性分区特征.中国科学(地球科学), 51(4): 582－597.

李锦轶,王克卓,李亚萍,等, 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化.地质通报,25(8): 895－909.

李昱,刘启元,陈九辉,等, 2007. 天山地壳上地幔的S波速度结构.中国科学(D辑), 37(3): 344－352.

刘丛强, 2025. 全球变化、层圈相互作用研究与地球系统科学.地学前缘, 32(3): 1－6.

刘代芹, Liu Mian, 王海涛,等, 2016. 天山地震带境内外主要断层滑动速率和地震矩亏损分布特征研究.地球物理学报, 59(5): 1647－1660.

刘方圆,石正国, 2023. 全球变暖背景下中亚兴都库什、喀喇昆仑及天山气候变化研究进展.地球环境学报, 14(1): 27－37, 48.

刘静,孙照通,王文鑫,等, 2025. 表层地球系统的深部过程响应与地表自然灾害.地学前缘, 32(3): 7－22.

吕红华,李有利, 2020. 不断融入新元素的我国构造地貌学研究:以天山为例.地球科学进展, 35(6): 594－606.

彭建兵, 2025. 自然灾害防治体系现代化:从被动应对到主动防控的范式转型.中国科学基金, 39(6): 863.

彭建兵, 程谦恭, 张永双, 等, 2026. 自然灾害成因机理: 基于圈层互馈、界面控制、动力耦合、临界突发与灾链放大的系统解析. 中国科学(地球科学), 56(7): 2573－2602.

彭建兵,张永双,黄达,等, 2023. 青藏高原构造变形圈－岩体松动圈－地表冻融圈－工程扰动圈互馈灾害效应. 地球科学, 48(8): 3099－3114.

蒲枫,许强,蒲川豪,等, 2026. 基于地震记录的2025年2月8日四川省宜宾市筠连县山体滑坡运动过程分析.成都理工大学学报(自然科学版), 53(1): 64－77.

秦艳,丁建丽,赵求东,等, 2018.2001—2015年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系.冰川冻土, 40(2): 249－260.

尚彦军,伊学涛, Muhammad Hasan, 等, 2022. 天山天池堆积坝体结构及大小锅底坑老崩塌－老滑坡发育阶段探讨.新疆地质, 40(4): 495－501.

唐辉明,葛云峰,张抒,等, 2025. 滑坡预测预报研究进展与挑战.中国科学基金,39(6): 993－1005.

田勤俭,丁国瑜,郝平, 2006. 南天山及塔里木北缘构造带西段地震构造研究.地震地质, 28(2): 213－223.

王英珊,孙维君,丁明虎,等, 2025. 青藏高原冰川物质平衡变化特征及其对气候变化响应的研究进展.气候变化研究进展, 21(2): 208－220.

王玉峰,程谦恭,林棋文,等, 2025. 青藏高原高速远程滑坡研究:从地质现象到动力学机理.地球科学, 50(10): 4071－4095.

王玉峰,林棋文,李坤,等, 2021. 高速远程滑坡动力学研究进展.地球科学与环境学报, 43(1): 208－220.

许强,朱鸿鹄,朱星,等, 2025. 自然灾害监测技术体系.中国科学基金, 39(6): 893－904.

杨海军,李曰俊,师骏,等, 2010. 南天山晚新生代褶皱冲断带构造特征.第四纪研究, 30(5): 1030－1043.

杨金宁,郑光,李鑫武,等, 2025.2024年1月22日云南镇雄县凉水村滑坡特征与成因机理研究.工程地质学报, 33(2): 556－571.

殷跃平,李滨,高杨,等, 2025. 青藏高原高位远程地质灾害面临的挑战与应对.中国科学基金, 39(6): 986－992.

殷跃平,朱赛楠,李滨,等, 2021. 青藏高原高位远程地质灾害.北京:科学出版社.

张秉峰,鲍学伟, 2023. 天山造山带壳幔结构与陆内变形机制研究进展.地球与行星物理论评(中英文), 54(1): 27－43.

张培震,邓起东,张国民,等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块.中国科学D辑,33(增刊1): 12－20.

张世殊,胡建忠,安炯,等, 2026. 四川筠连高位滑坡－碎屑流灾害链式成因机制及应急监测预警研究.工程地质学报, 34(1): 155－167.

张太刚,王伟财,汪鑫,等, 2025. “亚洲水塔”冰湖变化与灾害研究进展.冰川冻土, 47(4): 900－913.

张紫昭,张天栋,于喜坤,等, 2023. 新疆崩滑流地质灾害孕灾环境分区及其形成机制.工程地质学报, 31(4): 1129－1144.

郑文俊,孙鑫,袁道阳,等, 2025. 青藏高原及邻区活动断裂、地震活动及地震构造环境.地质力学学报, 31(5): 1006－1029.

中国科学院, 2025. 中国学科发展战略:网络空间安全.北京:科学出版社.

中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)项目组, 2024. 中国地球系统科学2035发展战略.北京:科学出版社.