• 自然灾害防治面临的挑战与应对 •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0150

青藏高原高位远程地质灾害面临的挑战与应对*

殷跃平[1**] 李 滨[2] 高 杨[2] 王文沛[1] 张仕林[3] 朱赛楠[1]

1. 中国地质环境监测院,北京 100081
2. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081
3. 西南交通大学 地球科学与工程学院,成都 611756

[摘 要] 青藏高原是全球高位远程地质灾害非常发育的地区,严重威胁着山区城镇与重大工程的安全。本文分析了青藏高原三大造山系高位远程地质灾害分布与断裂山系孕灾规律,探讨了高位远程地质灾害链的高位剪出、远程成灾、高速运动和堵溃放大四个动力学特征,并将其划分为高位启动区、势动转化区、动力侵蚀区和液化/流滑区。结合青藏高原高位远程地质灾害的复合链式动力学特征,提出了从三个方面应对的防灾减灾思路:开展极高山区地质灾害早期识别和监测预警合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)等技术方法研究,基于高位远程运动学和动力学成灾机理的地质灾害风险评估方法研究,开展综合性防灾、减灾、救灾和备灾应对措施与技术体系研究。

[关键词] 青藏高原;高位远程地质灾害;动力学机制;识别与监测;防治技术

青藏高原是世界海拔最高的高原,素有地球“第三极”之称。青藏高原在我国境内包括西藏自治区、青海省、四川省西部、云南省部分地区、新疆维吾尔自治区南部以及甘肃省部分地区,在境外包括不丹、尼泊尔、印度、巴基斯坦、阿富汗、塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦的部分地区,总面积约258万平方千米,平均海拔4 000 ~ 5 000 m。距今8 000万年以来的喜马拉雅期地壳运动,重塑了青藏高原构造活动和地貌格局。在印度板块向欧亚板块强烈挤压和增生的背景下,形成了冈底斯—喜马拉雅、羌塘—三江、秦(岭)—祁(连山)—昆(仑)三大造山系和一系列巨型构造带[1]。这种“世界屋脊”独特的地质、地貌、气候、水系和人类活动耦合作用的地球动力系统,导致了青藏高原非常典型的高位远程地质灾害,成为全球规模最大、范围最广和灾难最重的地区之一[2,3]。2000年西藏易贡扎木弄沟海拔5 000 m山体发生大规模滑坡,约3亿立方米滑体堆积于沟口,堵塞易贡藏布,堰塞湖溃决后诱发洪水灾害,下游通麦最大洪峰流量达12.6万立方米,对下游公路、桥梁造成严重破坏,是我国近百年来最大的一次滑坡堵江事件[4,5]。2021年2月7日印度北阿坎德邦查莫利地区发生高位冰岩崩灾害,继而转换成碎屑流、堵江、洪水灾害链,摧毁下游两座水电站,造成200多人伤亡[6]。这类灾害的启动海拔高、识别难度大、具有突发性、隐蔽性和巨灾性等特征,是青藏高原山区城镇和重大工程地质安全的难点,成为国内外地质灾害领域研究的热点和前沿科学问题[7,8]。本文通过对青藏高原高位远程地质灾害发育特征的分析,揭示高位灾害链动的易滑地质结构特征和孕灾动力因素,研究了高位远程地质灾害高海拔物源区的早期识别与动态监测技术方法适用性,探讨了高位远程地质灾害链综合防治模式,以期为我国青藏高原重大工程建设和山区城镇防灾减灾提供科学支撑。

1 青藏高原高位远程地质灾害基本特征

青藏高原地质构造复杂,地震多发频发,水系普遍发育,地形切割强烈,地形高差悬殊,地层岩性复杂,气

收稿日期:2025-11-03; 修回日期:2025-12-09
* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。
** 通信作者,Email:yinypcgs@hotmail.com
本文受到国家自然科学基金项目(U2244227)的资助。

引用格式: 殷跃平,李滨,高杨,等. 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,2025,39(6):986–992.
Yin YP,Li B,Gao Y,et al. Challenges and countermeasures for high-altitude and long-runout geological hazards in the Qinghai-Xizang Plateau. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2025,39(6):986–992.(in Chinese)

候复杂多变,降水时空分布不均,直接影响着高位远程地质灾害的分布发育。从分布位置来看,高位远程地质灾害主要分布在青藏高原的巨型造山带,其中在东部、南部的构造结合带最为发育。如青藏高原东部金沙江、龙门山等区域,高位远程地质灾害沿深切河谷及断裂带呈线性分布,该地区是第一阶梯与第二阶梯过渡带,地质构造复杂,活动断裂发育,强震活动频繁,具备孕育特大地质灾害的构造地质背景。此外藏南的喜马拉雅造山带、雅鲁藏布江流域也是特大地质灾害高发区,这些地区地势高差悬殊,板块运动强烈,岩体破碎,为特大高位远程地质灾害的发育提供了良好的地貌、动力和物质条件[9]。

2　青藏高原高位远程地质灾害链动机理

国际上,通常将高位远程地质灾害称为“高速远程滑坡”[10-13]。这种高速远程滑坡严重威胁青藏高原山区城镇和重大工程安全。作者认为,仅从速度上对这类灾害进行研究难以满足防灾减灾要求,必须对高位启动的灾害源进行研究,同时,这种高位远程灾害还具有明显的远程势动复合传递特征。基于此,作者提出了“高位远程地质灾害”这一概念[14](图1)。

2.1　高位远程地质灾害链动特征

青藏高原高位远程地质灾害通常具有如下特征:

(1)高位剪出。灾害源区启动位置高于承灾对象,并且剪出口位置通常大于100 m,甚至大于数千米。2018年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800 m,滑动入江1 200 m,形成了

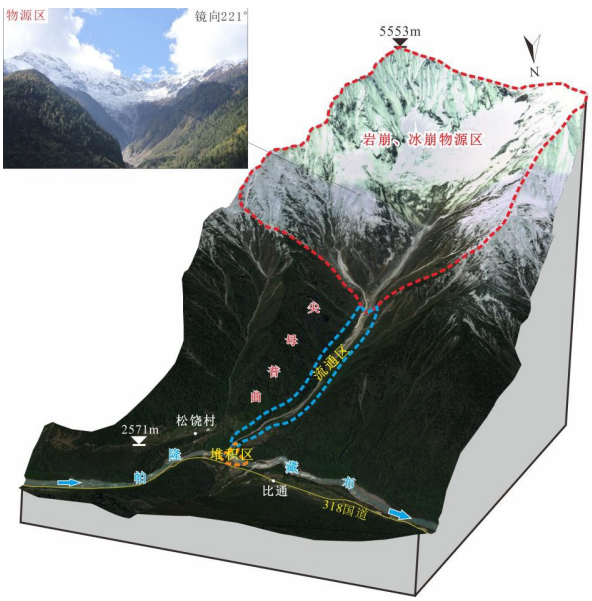


图1　西藏帕隆藏布高位远程地质灾害3D图

Fig.1　Typical High-altitude and Long-runout Geological Hazard in the Palongzangbu,Xizang

体积达3 000万立方米的堰塞体阻塞金沙江。2008年汶川地震诱发的四川绵竹小岗箭高位远程滑坡碎屑流灾害,总物源体积320万立方米,主沟长度2.59 km,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。

(2)远程成灾。灾害源区启动位置具有超视距特征。“远程”的含义较为含糊,不少学者建议按照滑坡滑覆区与滑移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,从科学涵义的角度更为合理,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时,即使滑覆区长度大于100 m,也可定为远程滑坡,但其防灾减灾意义并不大。作者认为,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(如滑程大于500 m)更为适用,便于指导我国地质灾害调查从“房前屋后”近程范围扩展到“坡要到顶,沟要到头”的远程范围。

(3)放大效应。高位远程滑坡动力裹挟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,如四川青川东河口滑坡是汶川地震触发的高位远程滑坡—碎屑流地质灾害,滑源区体积约600万立方米,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400万立方米,致使七个村庄被埋,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。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。

(4)高速运动。通常滑坡运动可大致分为蠕动变形、慢速滑动、中速滑坡和高速滑坡。高位远程地质灾害在运动过程中具有惯性加速过程,速度大于20 m/s,为高速滑坡。国内外迄今未形成统一的高速滑坡运动速度的划分标准。Yin等[15]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,可以看出高速滑坡的速度变化区间仍很大。作者等提出了高位远程地质灾害的运动参数建议(表1)。其中,按剪出高度可分为超高位(≥1 000 m)、高位(100~1 000 m)、中位(50~100 m)和低位(<50 m)四类;按运动距离可分为超远程(≥5 000 m)、远程(1 000~5 000 m)、中程(100~1 000 m)和近程(<100 m)四类;按运动速度(推测)可分为超高速(≥70 m/s)、高速(20~

表1 高位远程地质灾害运动分类建议表

Table 1 Suggestions for Classification of Motion of High-altitude and Long-runout Geological Hazards

剪出高度		运动距离		推测速度	
高差(m)	分类	距离(m)	分类	速度(m/s)	分类
≥1 000	超高位	≥5 000	超远程	≥70	超高速
100 ~ 1 000	高 位	1 000 ~ 5 000	远程	20 ~ 70	高速
50 ~ 100	中 位	100 ~ 1 000	中程	1 ~ 20	中速
<50	低 位	<100	近程	<1	低速

70 m/s)、中速(1 ~ 20 m/s)和低速(<1 m/s)四类。

2.2 高位远程地质灾害链动机理

青藏高原高山、极高山地区崩塌、滑坡体在遭遇地震、强暴雨后迅速转化成滑坡或泥石流的灾害,常常会诱发一连串的次生灾害,形成高位远程地质灾害链,具有分布广、灾发性和破坏性强、高速、远程等特征[16]。高位远程地质灾害不同阶段的链动机理如下:

(1)高位启动区。不稳定山体、冰雪和冰湖等灾害体在重力作用下长期蠕变失稳形成高位滑坡或崩塌。特别是在暴雨、地震和融雪等特殊工况下,加剧了高位危险源区的启动。通常可依据极限平衡理论对高位启动区危险源的失稳进行分析,然而,极端工况下,强震对高位山体失稳的评价大多缺乏较为准确的测试参数,诸如地震动放大系数和震动过程等的取值仍以经验推测为主;对于暴雨触发作用的分析仍缺乏实测地下水动态数据;对于融雪等温度升高导致冰雪失稳和冰湖溃决,尚缺乏充分的实测地温变化数据。

(2)势动转化区。高位剪出后,重力势能逐渐转化为动能,在陡坡地段具有惯性加速特征,流滑加速效应明显。大型崩滑体在沟谷圈闭作用下,转化过程中可产生空气层压缩,形成气垫效应,导致大型崩滑体受到升力作用,运动距离会增加。沿斜坡运动后,冲击动能加大,对坡体形成冲击加载和碰撞,逐渐解体成为链状散体结构。高位滑坡从势能向动能的转化可以按动量守恒和能量守恒定律进行分析。动力撞击作用会导致崩滑块体粉碎化,进而转化为碎屑流体,这一过程可以用赫兹碰撞理论开展研究。

(3)动力侵蚀区。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,形成底蚀体积铲刮增大效应;侧向冲刷岸坡坡脚,牵引触发滑坡,形成流体堵溃放大效应。因铲刮冲蚀效应导致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。动力侵蚀区可以用动力冲击加载模型、摩擦剪切模型、犁切模型等进行分析。当在动力侵蚀区,崩滑体由摩擦块体向流动散体转化时,可采用摩擦—流动模型进行分析。

(4)液化/流滑区。在下游地势变缓地段,沟道坡体含水量增加,形成剪切液化效应,随着成灾体与下伏地面边界层超孔隙水压力增加,剪切阻力降低,增加了下滑距离;或者块状滑体碰撞形成颗粒化干碎屑流体,在剩余驱动力作用下保持远程运动。沟道宽缓,纵坡降较低,形成掩埋堆积成灾区。这一过程可以用液化剪切模型、颗粒流模型、Voellmy模型等进行分析。

2.3 青藏高原典型高位远程地质灾害链

青藏高原典型的高位远程地质灾害链可概化为狭义地质灾害链和广义地质灾害链两类:

(1)狭义高位远程地质灾害链。指从上游灾害启动源区一直到运动和下游堆积过程中直接形成地质灾害的地质体运动转化的完整链条,包括滑坡(崩塌)—碎屑流—泥石流等。

(2)广义高位远程地质灾害链。指在狭义灾害链基础上向下游延伸形成的次生灾害,包括滑坡(崩塌)—碎屑流—泥石流—堰塞坝—堰塞湖溃决山洪—侧蚀次生滑坡等,同时,因上游灾害源区冰川跃动、雪崩、冰湖溃决形成的山洪泥石流等也归属于地质灾害链的一种,即冰雪型地质灾害链,向下延伸又可形成堰塞坝—堰塞湖溃决山洪—侧蚀次生滑坡等。

3 青藏高原高位远程地质灾害应对措施

青藏高原高位远程地质灾害应对难度非常大。作者认为,应该从发现风险源、评估成灾范围和综合防灾三方面加以应对。

3.1 早期识别与监测预警关键技术研究

青藏高原高山峡谷区地形条件复杂。对于启动于5 000 m,甚至7 000 m之上的高山极高山崩滑源区,难以采用常规的地面地质调查方法进行早期识别。近年来,以合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar,InSAR)和高分光学遥感等手段相结合的综合识别成为发展趋势。与光学遥感易受天气影响不同,InSAR技术具有全天候捕捉微小形变的能力,使其成为高位崩滑源区灾害早期识别和初始启动动态监测的一种非常有效的手段。

3.1.1 高位远程地质灾害早期识别

星载SAR采用侧视成像的方式,使得雷达成像出现距离向透视收缩、阴影或顶底倒置等几何畸变,影响了InSAR技术对高位远程地质灾害形变监测的敏感程度。尤其在高山峡谷区域,几何畸变尤为严重,单一轨道SAR影像监测将会造成监测盲区。SAR系统沿近极地轨道飞行,造成InSAR难以实现与卫星轨道方向接近的位移监测。因此,应用InSAR进行高山峡谷地区滑坡识别前,有必要开展基于局部地形坡度坡向、SAR成像的入射角和航向角等信息的InSAR监测适用性研究,明确哪些区域可以监测、哪些卫星可以用于监测。基于具有不同入射角的多平台、升降轨SAR影像监测组合,则可以实现不同成像几何条件下的坡体位移监测,一定程度上改善SAR影像中叠掩与阴影的影响,减小不稳定坡体的漏判率。

总体上看,高分光学遥感和InSAR技术在特大型、巨型崩滑源的识别上效果显著。随着高原无人机技术的快速发展,机载LiDAR和热红外技术在高山极高山区大型、中型高位崩滑源的早期识别方面也取得了很好的进展。

3.1.2 高位远程地质灾害动态监测

在青藏高原高位远程地质灾害监测中,InSAR技术在高山峡谷区除了受到与SAR影像成像有关的几何畸变影响,还受到失相干、大气波动及地形误差等因素的影响,因此其对数据处理过程要求更高[17-19]。

青藏高原地表覆盖变化、大梯度地表位移是限制InSAR在高位远程地质灾害监测应用的主要因素。由于地表覆盖变化引起的失相干主要与雷达波长、SAR影像分辨率及干涉对的时空基线有关,因此对高位远程地质灾害监测宜采用长波段(如L)、高分辨率SAR影像和短时空基线InSAR干涉对。同时,地质灾害活动在不同阶段,表现出了不同的滑动速度和滑动强度,基于相位信息的InSAR技术适用于监测形变速率为毫米/年至分米/年的缓慢滑坡变形,快速变形的滑坡常常会引起干涉条纹混叠,进而引起相位失相干。

同时,大气波动影响和地形效应也是制约高位远程地质灾害动态监测的重要因素。近年来,作者等在喜马拉雅山地区,特别是雅鲁藏布江下游地区,基于高位启动、远程运动和级联灾链的成灾模式,探索了“秒—时—日”的高位远程地质灾害综合监测预警模式,也就是:(1)“秒”级预警——在重点区域增设微震台站,当高位崩滑源区失稳启动时,即可通过传播速度达5 000~7 000 m/s的地震波信号远程秒级捕捉灾害的启动;(2)“时”级预警——在高位远程灾害流通区域,建设“雷视一体化”监测预警设备,可以小时级把握灾害的运动和动力学过程,并进行灾害模式与程度的评估;(3)“日”级预警——由于青藏高原高位远程地质灾害大都堰塞堵江,数天后溃决形成流域性洪水地质灾害,可以在数天内通过堰塞体溃决性和江水动态观测预测洪水演进过程,并采取措施。

3.2 高位远程运动学与动力学科学研究

青藏高原高位远程地质灾害运动学与动力学机理极为复杂,涉及多体、多相、多期、多区链动转化问题[14,20-22]。传统的气垫、液化、颗粒流等理论难以完整刻画高位远程灾害动力演进过程。作者认为,结合喜马拉雅山和横断山区重大工程防灾减灾,应加强如下方面的研究:

高山极高山区高位滑坡崩塌易灾地质结构及冲击加载研究。包括断裂山体和褶皱山体易灾地质结构精细建模,强震对陡峭山体振动放大效应和雪线后退高位冰岩山体冻融失稳过程,以及崩滑体块体—颗粒转化机理和动力冲击加载效应。

远程链动传递机理及边界层效应。包括复合型灾害链动传递机理、高速碎屑流边界层效应和复合型地质灾害链动力学过程。特别是要开展弯曲沟道微地貌碎屑流运动学与动力学特征的研究。

基于链动成灾理论的地质灾害风险评价方法。包括基于链动机理的复合型地质灾害风险评价建模以及雅下地区流域性复合型灾害风险评价示范。

组合障桩和改流体韧性消能减灾技术研究。包括边界层底部组合障桩群抗剪技术模拟试验以及高速滑坡碎屑流改流体消能技术模拟试验。

3.3 综合性防灾减灾救灾备灾措施研究

根据青藏高原,特别是汶川地震区多年的实践,高位远程地质灾害链应依据其动力学特征采用分区防灾减灾的模式进行(图2)。其中高位崩滑区遵循固源与降险防治理念,势动转换区采用刚/韧性消能措施,动力侵蚀区以抗蚀与护底为主,流动堆积区则以排导与冗余等技术为宜[16]。

3.3.1 高位崩滑区固源与降险技术

在特定条件下,可以采用轻型工程对该区进行加固,以通过控制上游风险源的启动达到消除链式灾害的目的。总体上,对灾害链源头的控制包括固源与降险两类。作者等采用预应力锚索和小口径组合桩群轻型固源工程对四川茂县高位远程滑坡—碎屑流灾害链进行了固源加固,取得了很好的效果。

3.3.2 势动转换区刚性与韧性消能技术

常规的防治工程主要从“储量”出发,根据流体物源量,结合动力冲击压力,采用了多级谷坊坝等仓储拦挡结构的模式。在青藏高原高位远程地质灾害治理中,这种防治模式常导致高势能物源防治工程失效,形成类似“多米诺骨牌”的堵溃放大效应,加剧了灾害严重程度。

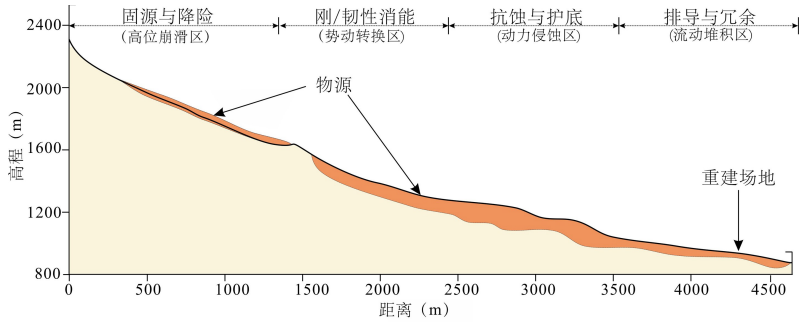


图2 高位远程地质灾害防灾减灾模式概化图

Fig.2 Schematic Diagram for Disaster Prevention and Reduction Mode of High-altitude and Long-runout Geological Hazard

高势能物源区的防控难度极大,其防治措施尚处于探索试验阶段。作者等提出了由“储量”向“动量”消能转变的思路。一方面,通过采用自适应的韧性技术延长高势能流体(巨石群)的冲击时间,以消减冲击压力为工程防治重点;另一方面,通过采用障桩等加糙技术减缓高势能流体运动速度并通过改流体技术转变运动状态,发挥高势能流体多尺度巨石自承稳定特性以形成拱圈消能效应。这种消能结构在舟曲特大高位泥石流防治工程中取得了明显效果,并在青藏高原山区得到应用。

3.3.3 动力侵蚀区抗侧蚀与护底技术

高势能滑坡转化为碎屑流的冲击过程中,在下伏基岩表层形成动力剪切层,当岩体抗冲击剪切低于滑坡冲击力时,将发生铲刮效应。因此,在治理工程中,可以通过降低剪切层饱和带的孔隙水压力或者通过改进剪切层固体结构等措施来提高抗蚀能力。四川绵竹文家沟特大高位泥石流中游段的治理采用了固底护坡排导措施。首先,对右侧冲沟进行修整回填以稳固右侧冲沟床,减小水流掏底、侧蚀作用,增加沟道宽度;其次,为防止上游流体对回填后沟底、岸坡的掏底、侧蚀,同时排放上游水体或泥石流,在回填后的沟道上用钢筋石笼砌筑护坡护底结构形成排导槽,起到固底护坡及排导的作用。从后期运行效果检验来看,格宾技术可以有效地将水石二相流流体再次进行分离,即地表水体通过钢筋石笼快速渗入地下,所裹挟土石运动速度明显下降,从而达到了抗蚀的效果。在四川宝兴冷木沟特大高位滑坡型泥石流的治理中,采用了多级钢筋砼肋坎等技术进行消能抗蚀,亦达到了预期设计目的。

3.3.4 流动堆积区排导与冗余技术

汶川地震灾后重建以来,大都在高位远程地质灾害下游流动堆积区进行城镇和道路等基础设施的重建。在重建初期,大多采用导流堤、急流槽和束流堤等治理技术,因物源评价和动力学分析,这些地区成为了震后暴雨触发高位远程地质灾害的严重区,特别是2010年8月8日,甘肃舟曲县城后山发生了特大泥石流灾害,导致1 800多人遇难,同年8月13日,四川绵竹文家沟也爆发特大高位泥石流,因成功预警,下游清平乡3 000多名群众及时撤离,幸免于难。2010年8月以来,逐渐形成了较为安全可靠的特大高位远程滑坡—碎屑流—泥石流治理经验。首先,在下游堆积区,根据高位远程地质灾害的物源和流量的侵蚀/堵溃放大效应,设置了比常规一次冲出量大十倍,甚至数十倍以上的“高坝大库”骨干工程,例如,文家沟特大高位泥石流治理中,在下游设置了2座拦挡坝及停淤场作为清平乡场镇的最后一道防线,起到拦挡、停积中上游松散堆积体发生泥石流时的固体物质的作用,自2011年以来,发挥了重要作用,避免了极端工况下高位远程地质灾害对下游城镇乡村和生命线工程的灭顶之灾。甘肃舟曲县城特大高位泥石流治理工程针对下游人口密集、需原地重建的要求,在流动堆积区上游设置了骨干拦挡工程,在下游采用了复式排导系统。在设计暴雨工况下,泥石流行洪区位于下部断面,而上部断面可以作为市政道路等公共设施,在极端暴雨工况下,采用上下断面同时进行泥石流行洪,有效降低了重建城市的灾害风险,并增加了规划建设用地。

3.3.5 特大高位远程地质灾害降险与备灾措施

青藏高原高位远程地质灾害规模巨大、结构复杂、道路崎岖,难以使用常规方法技术进行防治。对于已经查明的高位远程地质灾害风险区,针对城镇、水电、铁路、公路等不同承灾体的地质安全要求,提前预置降险与备灾措施成为一种非常重要的综合减灾救灾途径。

2000年4月9日,西藏易贡发生体积达3亿立方米的高位远程地质灾害。由于交通偏僻,4月27日开始,318国道拉萨至波密通麦,一场西藏历史上力度、强度、速度都前所未有的施工力量迅速赶赴现场。5月10日,到位挖、装、运主要设备70多台(套),其中,推土机38台。到6月4日700多名抢险施工人员和设备安全撤离时,开挖堰塞体方量达135.5万立方米,有效降低了堰塞坝高度24.1 m,减少拦存湖水约20亿立方米,使溃坝流量由24×10^4 m^3/s降至12.4 m^3/s,极大减轻了下游地区的灾害

损失。考虑到25年前的工程施工能力,这确实是创造了奇迹。根据回溯分析,在现在道路条件许可的前提下,大型施工设备完全可以提前10天以上到达现场,在5月20日结束人工干预,此时库容约16亿立方米,决口最大流量约4 000 m^3/s,仅为6月4日溃决洪水的1/3,将极大减轻下游的灾害。因此应加快建立空—天—地一体化的动态监测和快速评估系统,开展高位远程地质灾害风险源动态识别和评估;对已经确认并存在高位远程地质灾害链威胁的地段,及早开展应急抢险备灾道路建设和导流减灾工程建设等备灾工程建设;及早实施高位远程地质灾害链非工程措施规划与管理[9]。

4 结 论

青藏高原是全球高位远程地质灾害非常严重的地区。这种特殊的复合型地质灾害体积可达数亿立方米,规模巨大;启动高差可达数千米,形成高势能高速运动;成灾范围可达数百千米,引发流域性灾害链。从本质上深刻地反映了现今全球构造最活跃地带的孕灾动力学机制、全球地表隆升最快地区的成灾动力学机制、全球气候变化最敏感地区的链灾动力学机制和全球地形地貌差异最大地区的工程灾变动力学机制,具有极为重要的地球动力学与灾害动力学研究意义。

本文在传统的滑坡—碎屑流—泥石流狭义地质灾害链研究基础上,探讨了因冰川跃动、雪崩、冰湖溃决形成的山洪泥石流,以及冰岩山崩—碎屑流—泥石流—堰塞坝—堰塞湖溃决山洪—侧蚀次生滑坡等广义地质灾害链模式;创新发展了高位远程地质灾害形成演化和链动成灾过程的易滑地质结构控制理论和分析方法,将高位远程地质灾害链动力过程概化为高位启动区、势动转化区、动力侵蚀区和液化/流滑区等四个区段;探讨了基于易滑地质结构控制理论和空间遥感技术相结合的高山和极高山区地质灾害早期识别和监测预警技术方法;发展了基于全灾害链的固源降险技术、刚韧消能技术、抗蚀护底技术和排导冗余技术的综合防治工程设计技术体系;探讨了特大高位远程地质灾害的降险与备灾措施。

致谢 本文得到了周福霖院士、任辉启院士、彭建兵院士、苏鹏程教授、杨成生教授、成余粮教授的指导,特此感谢。

参 考 文 献

[1] 潘桂棠,丁俊,王立全,等. 青藏高原区域地质调查重要新进展. 地质通报,2002(11):787—793.
Pan GT,Ding J,Wang LQ,et al. Important new progress in regional geological survey of Tibetan Plateau. Geological Bulletin,2002(11):787—793. (in Chinese)

[2] 彭建兵,张永双,黄达,等. 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,2023(8):3099—3114.
Peng JB,Zhang YS,Huang D,et al. Interaction disaster effects of the tectonic deformation sphere,rock mass loosening sphere,surface freeze-thaw sphere and engineering disturbance sphere on the Qinghai-Tibet Plateau. Earth Science,2023(8):3099—3114. (in Chinese)

[3] 张永双,郭长宝,姚鑫,等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究. 地球学报,2016,37(3):277—286.
Zhang YS,Guo CB,Yao X,et al. Study on geological hazard effect of active faults in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau. Acta Geosciences,2016,37(3):277—286. (in Chinese)

[4] 殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑波特征及减灾研究. 水文地质工程地质,2000(4):8—11.
Yin YP. Study on characteristics of giant slip wave and disaster reduction of bomigong Expressway in Tibet. Hydrogeology and Engineering Geology,2000(4):8—11. (in Chinese)

[5] Delaney KB,Evans SG. The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau),rockslide-dammed lake and outburst flood:Review,remote sensing analysis,and process modelling. Geomorphology,2015,246:377—393.

[6] 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. 中国地质灾害与防治学报,2021(3):1—8.
Yin YP,Li B,Zhang TT,et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli,India. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2021(3):1—8. (in Chinese)

[7] 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. 中国科学院院刊,2017(9):985—992.
Cui P,Jia Y,Su FH,et al. Development status and future scientific issues of natural disasters in the Tibetan Plateau. Journal of the Chinese Academy of Sciences,2017(9):985—992. (in Chinese)

[8] Shugar DH,Jacquemart M,Shean D,et al. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli,Indian Himalaya. Science,2021,373(6552):300—306.

[9] 殷跃平,朱赛楠,李滨,等. 青藏高原高位远程地质灾害. 北京:科学出版社,2021.
Yin YP,Zhu SN,Li B,et al. High-altitude and long-runout geological hazards in the Qinghai-Tibet Plateau. Beijing:Science Press,2021. (in Chinese)

[10] Heim A. Bergsturz und Menschenleben. Zurich,Fretz & Wasmuth Verlag,1932,218.

[11] Hsü KJ. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. Geological Society of America Bulletin,1975,86(1):129.

[12] Sassa K. Geotechnical model for the motion of landslides (special lecture)// Landslides:Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides. Switzerland:A.A. Balkema,1988,3755.

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

[14] 殷跃平,高少华. 高位远程地质灾害研究:回顾与展望. 中国地质灾害与防治学报,2024,35(1):1—18.
Yin YP,Gao SH. Research on high-altitude and long-runout rock-slides:Review and prospects. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2024,35(1):1—18. (in Chinese)

[15] Yin YP,Xing AG. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock

slide-debris avalanche, Tibet, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71(1): 149—160.

[16] Yin YP, Li B, Gao Y, et al. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 66—101.

[17] Yu C, Li ZH, Penna NT, et al. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(10): 9202—9222.

[18] 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. 武汉大学学报(信息科学版), 2019(7): 967—979.
Li ZH, Song C, Yu C, et al. Application of satellite radar remote sensing in landslide disaster detection and monitoring: Challenges and countermeasures. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2019(7): 967—979. (in Chinese)

[19] Liu XJ, Zhao CY, Zhang Q, et al. Deformation of the baige landslide, Tibet, China, revealed through the integration of cross-platform ALOS/PALSAR-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR observations. Geophysical Research Letters, 2020, 47(3): e2019GL086142.

[20] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势. 山地学报, 2007, 25(1): 72—84.
Cheng QG, Zhang ZY, Huang RQ. Research status and development trend of high-speed and long-distance landslide dynamics. Journal of Mountain, 2007, 25(1): 72—84. (in Chinese)

[21] 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. 工程科学与技术, 2020(5): 38—49.
Wen BP, Zeng QQ, Yan TX, et al. Preliminary study on geomechanical model of large-scale rock high-speed remote collapse and sliding in the southeast of Qinghai-Tibet Plateau. Engineering Science and Technology, 2020(5): 38—49. (in Chinese)

[22] Fan XM, Yunus AP, Yang YH, et al. Imminent threat of rock-ice avalanches in high Mountain Asia. Science of The Total Environment, 2022, 836: 155380.

Challenges and Countermeasures for High-altitude and Long-runout Geological Hazards in the Qinghai-Xizang Plateau

Yueping Yin[1*] Bin Li[2] Yang Gao[2] Wenpei Wang[1] Shilin Zhang[3] Sainan Zhu[1]

1. *China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China*
2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*
3. *Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*

Abstract The Qinghai-Xizang Plateau is a global region where high-altitude and long-runout geological hazards are highly developed, posing severe threats to the safety of mountainous towns and major engineering projects. This paper analyzes the occurrence and patterns of these hazards within the three major orogenic systems of the Qinghai-Xizang Plateau and their relationship with fault-controlled mountain systems predisposed to disaster. It explores four dynamic characteristics of the high-altitude and long-runout geological hazard chains: High-position exiting, long-runout disaster-forming, high-speed movement, and volume amplification due to blockage and subsequent breaching. The hazard process is divided into zones: The high-position initiation zone, the potential-kinetic energy transformation zone, the dynamic entrainment zone, and the liquefied-sliding/flow-sliding zone. Based on the hazard chain characteristics of these geological hazards in the Qinghai-Xizang Plateau, this paper proposes a disaster prevention and mitigation countermeasures focusing on three aspects: Firstly, research on Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology and other for the early identification and monitoring & early warning of geological hazards in extremely high-altitude mountainous areas. Secondly, research on risk assessment methodologies for high-position and long-runout geological hazards based on their kinematic and dynamic disaster-forming mechanisms. Thirdly, research on a comprehensive technical system for disaster prevention, mitigation, response, and preparedness.

Keywords Qinghai-Xizang Plateau; high-altitude and long-runout geological hazards; dynamic mechanism; identification and monitoring; prevention and control technologies

殷跃平 正高级工程师, 中国工程院院士。主要从事地质灾害防治研究工作。现任自然资源部地质灾害技术指导中心首席科学家, 中国岩石力学与工程学会副理事长、中国地质学会地质灾害研究分会主任、中国地质灾害防治工程行业协会专家委员会主任。

(责任编辑 贾祖冰 张 强)

* Corresponding Author, Email: yinypcgs@hotmail.com