

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.151>



白龙江流域特大滑坡灾害链发育分布特征及形成机制

王高峰^{1,2}, 毕远宏³, 李浩^{1,2*}, 高幼龙^{1,2}, 田运涛^{1,2}, 陈宗良^{1,2}, 李瑞冬⁴, 丛凯³,
樊小鹏⁴, 董翰川^{1,2}

1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309

2. 自然资源部三峡库区地质灾害监测预警野外科学观测研究站, 重庆 404100

3. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃兰州 730050

4. 甘肃工程地质研究院, 甘肃兰州 730000

摘要: 白龙江流域夹持于东昆仑断裂和西秦岭断裂两条巨大的左旋走滑断裂之间, 特殊的地质环境条件使得该区一直是我国地质灾害链最发育、成灾最严重的地区之一, 防灾减灾形势极为严峻。通过资料收集、遥感解译及野外调查, 构建了 132 处特大滑坡灾害链数据库, 系统探究其发育分布特征与形成机制。研究表明: (1) 滑坡体均为大型及以上, 规模效应显著, $1\,000\times 10^4\sim 5\,000\times 10^4\text{ m}^3$ 范围内滑坡数量占比 40.2%、总体积占比 44.8%; 以高位堆积层滑坡为主, 24.2% 具有“三段式”阻滑地形特征, 发育于泥盆系、志留系软硬组合易滑结构地层滑坡总面积占比 65%; (2) 变形以多期次逐级后退式牵引且局部伴有拉裂—推移、渐进推移式断裂带滑坡及复合型大型堆积体滑坡为主; 超 60% 具备远程运动机制, 表现为长历时蠕滑主导的强碎屑流特征; (3) 空间上表现为沿大型活动断裂带呈带状集中、沿河流水系呈线状分布的特点, 54.6% 发育于断裂带 2 km 范围内, 集中在断裂错断、转折、末端及交汇部位; 滑动方向多平行断裂走向, NWW-NW 向、NE 向断裂与水系共同控制区域分布; (4) 其形成发展主要受活动断裂、含千枚岩等易滑岩层、差异性中高山峡谷地貌控制; 区域性 5~15 d 中长历时强降雨为主要诱发因素且具滞后性, 震后 1.5~5 a 灾害频次与规模显著加剧。研究成果对丰富和认识青藏高原东北缘重特大滑坡灾害链形成机理, 提升防灾减灾能力具有重要指导意义。

关键词: 地质灾害链; 滑坡灾害; 发育分布特征; 形成机制; 白龙江流域; 工程地质学。

中图分类号: P694; P642

文章编号: 1000-2383(2025)10-3885-20

收稿日期: 2025-06-14

Developmental and Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Large-Scale Landslide Disaster Chains in Bailong River Basin

Wang Gaofeng^{1,2}, Bi Yuanhong³, Li Hao^{1,2*}, Gao Youlong^{1,2}, Tian Yuntao^{1,2}, Chen Zongliang^{1,2}, Li Ruidong⁴,
Cong Kai³, Fan Xiaopeng⁴, Dong Hanchuan^{1,2}

1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, TianJin 300309, China

2. Observation and Research Station of Geological Disaster Monitoring and Early Warning in the Three Gorges Reservoir Area,

基金项目: 中国地质调查局项目 (Nos. DD20221747, DD20251329); 2024 年度甘肃省科技计划项目 (联合科研基金重大项目) (No. 24JRRA800); 国家重点研发计划课题 (No. 2022YFC3003403); 自然资源部兰州城市地质灾害野外科学观测研究站开放基金课题 (No. 202406)。

作者简介: 王高峰 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查与 GIS 研究。ORCID: 0009-0003-6494-8626。E-mail: wgf_cgcs303@163.com

通讯作者: 李浩 (1990—), 男, 在读博士, 工程师, 从事地质灾害调查评价工作。E-mail: leehao1990@126.com

引用格式: 王高峰, 毕远宏, 李浩, 高幼龙, 田运涛, 陈宗良, 李瑞冬, 丛凯, 樊小鹏, 董翰川, 2025. 白龙江流域特大滑坡灾害链发育分布特征及形成机制. 地球科学, 50(10): 3885—3904.

Citation: Wang Gaofeng, Bi Yuanhong, Li Hao, Gao Youlong, Tian Yuntao, Chen Zongliang, Li Ruidong, Cong Kai, Fan Xiaopeng, Dong Hanchuan, 2025. Developmental and Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Large-Scale Landslide Disaster Chains in Bailong River Basin. *Earth Science*, 50(10): 3885—3904.

Ministry of Natural Resources, Chongqing 404100, China

3. Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, China

4. Gansu Institute of Engineering Geology, Lanzhou 730000, China

Abstract: The Bailong River Basin is situated between two major left-lateral strike-slip faults: the East Kunlun Fault and the West Qinling Fault. Its unique geological setting makes it one of China's regions most prone to and severely affected by geological disaster chains, presenting an extremely critical situation for disaster prevention and mitigation. Based on data collection, remote sensing interpretation, and field surveys, this study established a database of 132 large-scale landslide disaster chains and systematically investigated their developmental characteristics, distribution patterns, and formation mechanisms. The research findings indicate: (1) All landslide bodies are large-scale or larger, exhibiting significant scale effects. Landslides within the $1\,000 \times 10^4 - 5\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ range account for 40.2% in number and 44.8% in total volume. High-position accumulation landslides predominate, with 24.2% displaying a "three-segment" anti-sliding topography. Landslides developed in the Devonian and Silurian soft-hard interbedded strata prone to sliding constitute 65% of the total landslide area; (2) Deformation is primarily characterized by multistage retrogressive deformation (often with local tension cracking-push deformation), progressive thrust-type landslides along fracture zones, and composite large-scale accumulation landslides. Over 60% possess long-runout mechanisms, exhibiting features of high-intensity granular flows dominated by long-duration creep; (3) Spatially, the landslides exhibit a banded concentration along major active faults and linear distribution along river systems. 54.6% occur within 2 km of fracture zones, concentrated at fault offsets, bends, terminations, and intersections. Sliding directions are mostly parallel to fault strikes, with regional distribution controlled by NWW-NW trending and NE trending faults, coupled with the river network. (4) Their formation and development are primarily controlled by active faults, landslide-prone strata (including phyllite), and the differential mid-high mountain gorge topography. Regional long-duration (5–15 days) heavy rainfall is the main triggering factor, exhibiting a lag effect. The frequency and scale of disasters increased significantly 1.5 to 5 years after earthquakes. The research results provide important guidance for enhancing the understanding of the formation mechanisms of catastrophic landslide disaster chains in the northeastern margin of the Tibetan Plateau and improving disaster prevention and mitigation capabilities.

Key words: geological disaster chain; landslide disaster; development and distribution characteristics; formation mechanism; Bailong River Basin; engineering geology.

0 引言

地质灾害链是指由自然因素或人类活动或二者共同叠加作用引发的崩塌滑坡冰岩崩或泥石流灾害从上游启动源区到下游堆积过程中直接产生地质灾害的完整链条,并向下游延伸形成碎屑流、涌浪、堰塞湖淹没及溃决洪水冲击等不同组合的次生灾害,具有时间相接、空间相连、动力转换、灾情放大的特点(殷跃平等,2021;崔鹏等,2021).通常在更大的时空范围上造成跨流域灾害,影响范围极广、破坏性极强,给灾害链的风险防范带来了巨大挑战,如1933年四川叠溪地震—崩滑—堰塞湖—堰塞湖溃决—泥石流—洪水灾害链、2018年白格滑坡—堵江溃决洪水灾害链、2018年色东普崩滑—碎屑流堵江灾害链等(韩金良等,2007;许强等,2018;刘传正等,2019).这些地质灾害链表现为:一是地质灾害链造成的灾情及影响,即灾情险情大、社会影响大;二是灾害链的规模,即引起地质灾害链的原发地质灾害规模属于大型及以上的地质灾害,或引

发的次生灾害规模属于特大型,从危害严重性方面为特大地质灾害链类型.

我国分布范围广、危害严重的3类特大滑坡灾害链为动水驱动型、静态液化型、锁固解锁型滑坡,其演化过程受不同地质过程和主控因素的控制(唐辉明等,2022),尤其在我国西部山区复杂的地质活动、气候变化及地形地貌是研究其超高起滑势能、超强运动特性及超大致灾能力的关键科学问题(汪发武等,2022).高山峡谷区大型崩滑地质灾害集中于地质构造复杂、新构造运动强烈区域,其分布发育受断裂控制显著,形成演化与多次地震密切相关,对于大型及以上滑坡的形成与稳定性具有重要影响(郭长宝等,2015).高陡原始地貌构成成链关键孕灾环境,斜坡越陡,坡脚“拉应力效应”越显著,变形破坏风险越高(孟兴民等,2013).地层岩性与滑坡关系复杂,软弱地层或坚硬岩性叠加高陡地形区易发生重大滑坡(刘春玲等,2010),不同区域孕灾地层存在差异,而发育“三明治”软硬组合结构易形成高位高势能启动源区,为远程链式灾害提供空间

(殷跃平等, 2021). 强震、极端降雨及全球气候变化是大型滑坡的主要触发因素, 其中强降雨对地质灾害链式演化起关键控制作用(黄润秋, 2007). 总之, 地震或极端降雨诱发的地质灾害链受活动断裂、易滑地层及深切河谷地貌控制显著, 水动力与地震动力为重要诱因. 其链动转化过程涉及滑坡等固体与流体多体动力学问题, 在控灾因素相互作用下引发高位或者一般性崩滑灾害, 随着持续极端降雨逐渐增强, 最终形成多米诺效应的特大滑坡灾害链, 显著扩大影响范围(陈宁生等, 2021; 王高峰等, 2023).

白龙江流域位于青藏高原东北部边缘地带, 地形岩性差异显著, 新构造运动及地震活动强烈, 气候与人类活动区域分异明显, 大型及以上滑坡极为发育, 常发生特大型高位滑坡及堵江—溃坝灾害链, 危害严重, 如舟曲县泄流坡滑坡多次滑动并堵塞白龙江, 2018年和2019年接连发生的江顶崖滑坡和牙豁口滑坡堵江灾害链等. 近年来, 国内学者对该区开展了断裂构造与大型滑坡发育分布规律、多源遥感滑坡识别、成灾动力机制及危险性预测等研究(孟兴民等, 2013; 苏琦等, 2016; 陈明等, 2018; 郭长宝等, 2019; 吴玮江等, 2021; Qi *et al.*, 2021; 种艳等, 2022; 王高峰等, 2023), 对特大滑坡灾害链的分布发育规律研究、链动机制认识及风险管控起到了积极作用. 但现有研究多聚焦单体灾害事件或典型断裂与滑坡的关系, 缺少从整个流域尺度对特大滑坡灾害链的分布发育特征和形成机制进行分析. 本文以白龙江流域(甘肃段)及其支流白水江、岷江流域干流两岸的特大滑坡灾害链隐患为研究对象, 系统梳理其发育分布特征及其形成机制, 研究成果对丰富和发展特大地质灾害链成灾机理、提升复杂灾害链防灾减灾能力具有重要现实意义, 亦是甘肃省防灾减灾工作的重要举措和客观需求.

1 研究区地质环境条件

研究区为白龙江流域甘肃段, 属长江水系嘉陵江一级支流, 以白水江、岷江等为主的支流呈树枝状密集分布, 涉及甘肃省迭部县、舟曲县、宕昌县、武都区、文县等5个县区, 总面积约 $2.09 \times 10^4 \text{ km}^2$. 地处青藏高原东北缘, 中北部属迭山、岷山山系, 中东部为秦岭山系, 西南部归摩天岭山系, 是该区域特大滑坡灾害链最为发育的地带.

位于我国大陆一级阶梯向二级阶梯过渡的陡变地带, 属构造山地—河流地貌系统, 陡峻多样的

地貌为地质灾害奠定动力基础. 海拔高程大于1 000 m、切割深度300~1 000 m的构造侵蚀剥蚀山地, 多为三叠系硬质岩与泥盆系、志留系浅变质软弱岩过渡带, 是重力型大型及以上滑坡集中发育区. 岩性软弱区与低山丘陵区形成一系列宽窄相间的串珠状平坦谷地, 是主要集镇、人口聚居区及重大工程、水利水电建设区, 属灾害链主要承灾体.

地处西秦岭造山带与南北地震构造带中段北端交汇区, 夹持于东昆仑断裂和西秦岭断裂两条巨大的左旋走滑断裂之间, 由多条规模较大的断裂共同构成了该区复杂的“V”字型断裂系(俞晶星等, 2012), 包括临潭—宕昌断裂、光盖山—迭山断裂及哈南—青山湾—稻畦子断裂等(图1). 此外, 研究区还发育一系列展布为NW、NE的晚第四系逆冲兼走滑活动断裂带(张逸鹏等, 2021), 这些活动断裂带共同承担了由东昆仑断裂带向西秦岭北缘断裂带挤压和运动过渡能量的吸收和转换, 也组成了青藏高原东缘中段复杂的共轭走滑断层系统及其相关的地壳缩短格局, 成为南北地震带中部破坏性地震频繁发生区域. 史料记载的Ms7.0级以上地震达15次之多, 为大型滑坡的形成提供了良好的结构和物质条件(王高峰等, 2023). 发育于华北、华南及巴颜喀拉三大构造地层区结合部, 属西秦岭地层岩性区, 第四系至震旦系地层均有出露. 发育岩石主要为软弱岩石和坚硬岩石两类, 呈夹层或互层叠置, 如含较多黏性和粉粒的千枚岩、页岩、板岩、泥质岩和黄土等属软弱岩石, 岩浆岩和灰岩属坚硬岩石. 沿白龙江干流主要发育泥盆系和志留系地层, 部分覆盖碎石土堆积物、厚层黄土或坡积次生黄土.

气候属北亚热带向温带过渡区, 多年平均降雨量436~634 mm, 上游年最大降雨量762 mm、日最大降雨量96.3 mm、小时最大降雨量77.3 mm; 中游分别为646.6 mm、90.5 mm、40.0 mm; 下游为452.7 mm、166.1 mm、73.0 mm. 5~9月汛期为地质灾害多发期, 7~8月主汛期为高发期, 但地质灾害的多发区并不是年降水量最多的区域, 这不仅与研究区地质构造、地层岩性等孕灾条件及植被覆盖差异密切相关, 还可能与区域突发性极端强降雨有关(袁斌等, 2012).

考虑到地质灾害链的成灾关键在于原生灾害发生后能否转化或诱发次生灾害, 因此, 在不考虑地质灾害链诱发条件(降雨、地震、断裂蠕滑等)的基础上(铁永波等, 2022), 结合白龙江流域(干流)

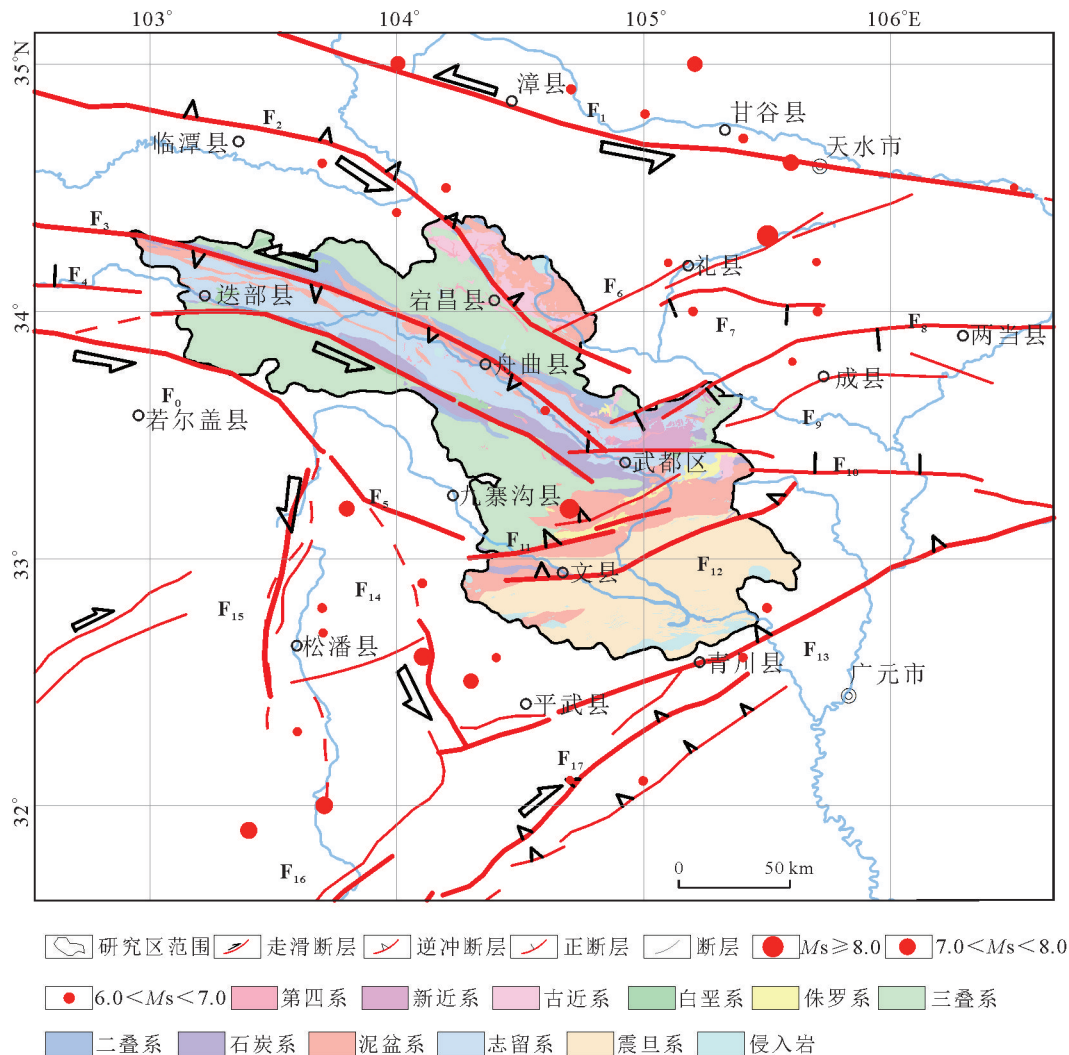


图1 研究区地质构造图

Fig.1 Geological structure map of the study area

F₀. 东昆仑断裂; F₁. 西秦岭北缘断裂; F₂. 临潭—宕昌断裂; F₃. 光盖山—迭山断裂; F₄. 迭部—白龙江断裂; F₅. 塔藏断裂; F₆. 礼县—罗家堡断裂; F₇. 风—太断裂; F₈. 两当—江洛断裂; F₉. 成县盆地南支断裂; F₁₀. 武都—略阳断裂; F₁₁. 哈南—青山湾—稻畦子断裂; F₁₂. 文县—康县断裂; F₁₃. 青川断裂; F₁₄. 虎牙断裂; F₁₅. 岷江断裂; F₁₆. 茂汶断裂; F₁₇. 映秀断裂

特大滑坡灾害链形成演化特征,从灾害链的本质出发,基于不同灾种的演进过程按照原生地质灾害类型进行分类,可分为滑坡—碎屑流灾害链(88处)、滑坡—堰塞湖—洪水灾害链(40处)、滑坡—堰塞湖—洪水—古滑坡复活灾害链(4处)(表1)。

2 特大滑坡灾害链发育特征

2.1 滑坡体规模及平面形态特征

结合前人研究成果及文献、综合遥感解译与野外地质调查,研究区共发育单体滑坡面积>0.06 km²的特大滑坡灾害链隐患点132处,最大滑坡面积约为4.41 km²。其中,大型滑坡(体积≥1×

10⁶ m³)67处,占总数的50.76%;特大型滑坡(体积≥1×10⁷ m³)63处,占总数的47.73%;巨型滑坡(体积≥1×10⁸ m³)2处,占总数的1.52%。

图2表明,滑坡体积与滑坡分布个数呈双峰曲线规律,整体上滑坡体积越大,分布个数越少,但在1 000×10⁴~5 000×10⁴ m³范围内滑坡总数和滑坡总体积的比例分别为40.2%和44.8%,主要是因为这些滑坡的形成和演化受断裂活动控制比较明显,后期在强震影响和降雨诱发下发生多次、多级反复破坏所致。

特大滑坡灾害链其滑体平面形态多呈哑铃状、扇形,共发育69处,约占总数的52.3%。其中滑坡体哑铃状的影像特征整体主要表现为上段宽阔、中段

表 1 研究区典型特大地质灾害链类型及其典型特征

Table 1 Types and characteristics of typical large-scale geohazard chains in the study area

灾害链类型	典型特征	典型案例
滑坡/崩塌—碎屑流灾害链	滑坡剪出口较高,启动后迅速解体并做远程运动,常发生较陡斜坡的中上部,流域上游	武都泻流坡滑坡、立节北山滑坡等
滑坡—堰塞湖—洪水灾害链	发生于白龙江及其支流的干流河谷两岸,一般为断裂控制型滑坡,滑坡体积通常较大,滑坡发生后堵塞主河形成堰塞湖,造成上游淹没成灾,堰塞湖溃决后洪水导致下游沿途成灾,影响范围可达数千米至数十千米	咀疙瘩滑坡、泄流坡滑坡、牙豁口滑坡等
滑坡—堰塞湖—溃决洪水—古滑坡复活灾害链	滑坡发生后挤压主河,导致河水集中冲刷对岸,诱发对岸岸坡崩滑体发生成灾,或灾害集中分布呈串珠状分布,溃决洪水洪峰流量大,诱发下游古滑坡复活,级联发生风险高,危害极大	江顶崖滑坡等

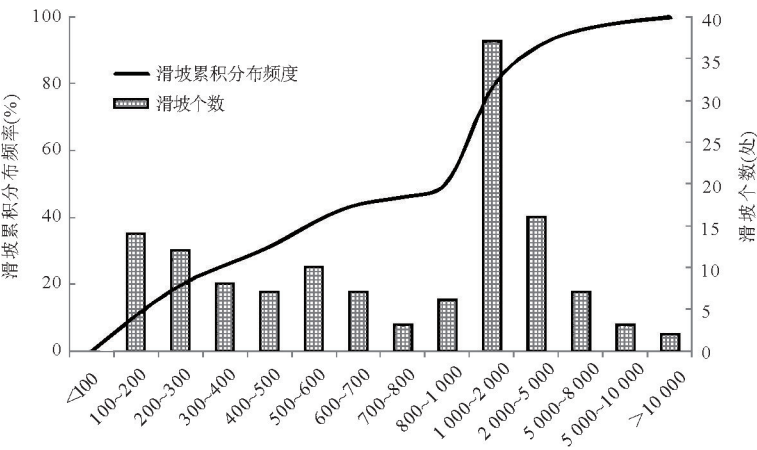


图 2 滑坡发育规模分布曲线

Fig.2 Scale distribution curve of landslide development

狭窄、下段裙状的三段式特征,滑坡体侧壁明显,坡体细沟、冲沟发育,这类滑坡滑动后挤压河道或堵塞河道.如武都区泻流坡滑坡,滑坡整体可分为上段(潜在滑源区)、中段(狭窄流通区)、下段(停淤堆积区)(图 3).该类滑坡多为大型及以上堆积体老滑坡,存在明显的多级、多期次变形和运动特征,具有典型整体逐级牵引、局部拉裂—推移滑动特征,存在滑坡—碎屑流—堵江灾害链风险.当滑坡体上部滑源区坡度较大,平均一般大于 25° 时,这种具有“支撑式”阻滑地形最有利于高位特大滑坡灾害链发生.

而滑坡体扇形的影像特征主要表现为坡体平面形态从顶部至坡脚逐渐变宽,即下部宽阔、上部狭窄,坡表裂缝发育,两侧多以冲沟为界,滑坡体及多期次滑源区后部圈椅状地貌明显且边界清晰.该类滑坡多以堆积层滑坡为主,通常表现为上部崩滑高位启动,碎屑流沿斜坡或冲沟滑动后呈扇形堆积于斜坡前部,滑坡堆积体挤压河道,迫使河流改道,

或老滑坡堆积体复活变形破坏,不断堵塞河道造成河段泥沙淤积,形成堰塞湖,同时增加主河洪峰流量,易溃决成链.如武都区红土坡滑坡,其滑坡区出露新近系紫红—棕红色砂岩、泥岩及第四系残坡积层,位于武都“山”字型弧形构造地带,滑坡体中后部受 3 条垂直滑向断层控制.根据现场调查,红土坡滑坡可分为潜在高位崩滑区、势动转换区、铲刮流动区、堆积堵塞区(图 4).

滑坡体相对高差均大于 200 m,主要分布在 300~700 m 范围内,共 84 处,占总数的 63.64%.尤其是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 50 m,甚至大于数百米.滑坡的分布与白龙江干流及其支流从宽谷进入峡谷的部位相吻合,由于这一地段地形坡度陡峻、岩体强烈卸荷,加之滑坡体相对高差较大,为特大滑坡灾害链的发生提供有利的临空条件和关键的成灾地貌条件.滑坡厚度多以中深层滑坡为主,其中浅层滑坡

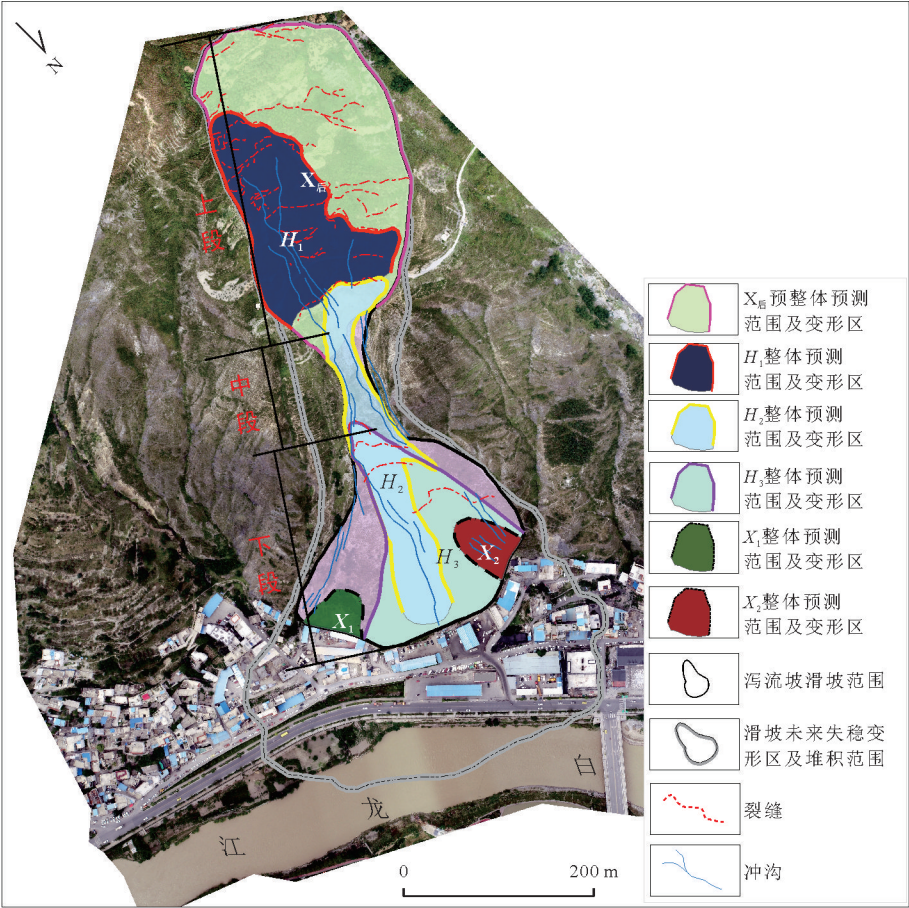


图3 典型哑铃状滑坡平面图(武都区泻流坡滑坡)
Fig.3 Planar graph of a typical dumbbell-shaped landslide (Xieliupo Landslide in Wudu)

($<10\text{ m}$)19处、中层滑坡($10\sim25\text{ m}$)76处、深层滑坡($25\sim50\text{ m}$)37处,分别占总数的14.39%、57.58%、28.03%。滑坡体在剖面上多为双层或三层结构,特别是断裂带滑坡一般由多个次级滑坡体组成,即没有统一的滑动面,在滑坡破坏时也非一次性整体下滑,而是表现为多期多次滑动(杨为民等,2014)。

2.2 滑坡体物质组成及结构特征

研究区特大滑坡灾害链隐患其滑坡体主要以堆积层滑坡为主,共发育125处,占总数的94.7%,少数为基岩滑坡,零星分布于研究区。堆积层滑坡是由松散碎石堆积体(物质组成为灰岩漂砾及板岩、炭质板岩和碎屑)、坡积类黄土等混合组成,部分滑坡体中上部覆盖黄土,多数滑带土为含砾黑色黏土。而受断裂控制的滑坡其滑坡体结构由断裂破碎带强—中风化岩土体及其上覆的次生黄土组成的双层结构,一些滑坡体由次生黄土、断裂破碎带强—中风化带、未风化破碎带组成的三层结构(杨为民等,2014;张永双等,2016)。此外,研究区132处

特大滑坡灾害链隐患滑坡体面积约 97.86 km^2 ,其中发育泥盆系和志留系地层的滑坡体面积约为 63.73 km^2 ,约占总滑坡体面积的65%。而泥盆系和志留系地层中的板岩、千枚岩及其页岩等大多为浅变质软弱岩体,极易受外动力风化侵蚀和内动力构造破坏,且该地层中夹灰岩等坚硬岩体,常组成软硬组合的孕灾地层结构。同时研究区共计40处滑坡体滑源区为二叠系、三叠系、石炭系地层,岩体多为坚硬的灰岩岩体,而中下部多为松散碎石土或软弱岩体,往往组成上硬下软的孕灾地层结构。

如南峪古滑坡位于舟曲县南峪乡白龙江左岸炭窑山斜坡,滑坡体后壁顶点海拔高程为 $2\,157\text{ m}$,前缘临江海拔高程 $1\,222\text{ m}$,相对高差达 935 m 。滑坡体上部出露地层主要为石炭系灰岩,中部出露地层为泥盆系千枚岩、炭质板岩夹灰岩、砂岩,下部为志留系含炭板岩和千枚岩,受坪定—化马等多条分支断裂活动影响,导致滑坡体岩体十分破碎。滑坡体平面形态呈不规则哑铃状,主滑方向 221° ,滑坡体所在斜坡地形高陡,斜坡体顶部为陡峭的岩壁,在

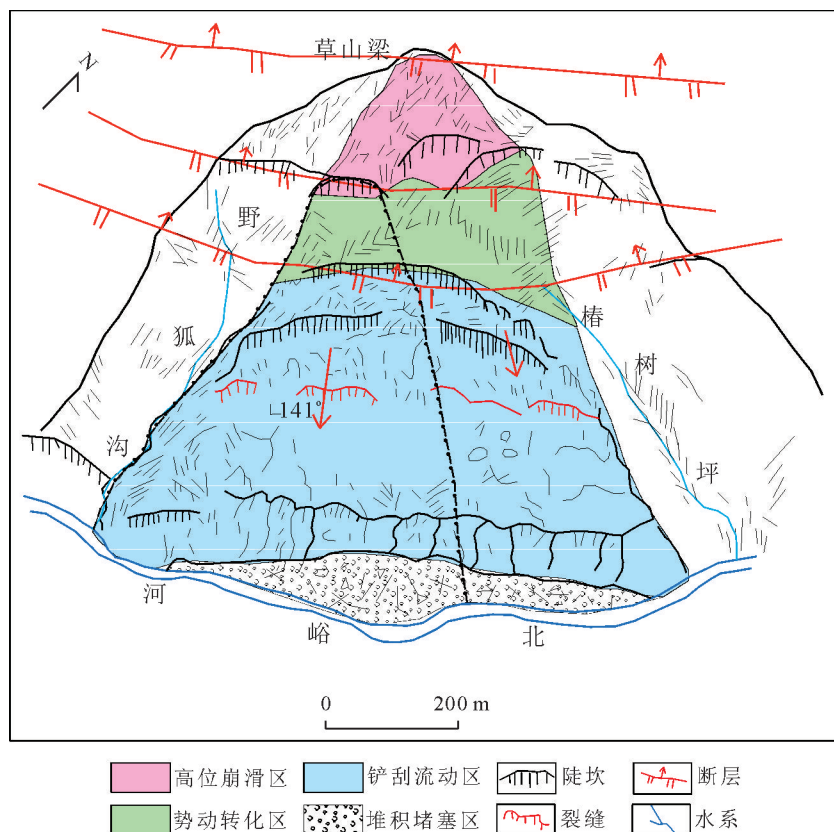


图4 典型扇形状滑坡平面图(武都区红土坡滑坡)

Fig.4 Planar graph of typical fan-shaped landslide (Hongtupo Landslide in Wudu)

强震影响下易产生高位崩滑,其下部为松散的堆积层,在降雨作用下易沿由含灰黑色炭质板岩碎屑滑带复活滑动,多呈现崩滑—碎屑流—堵江或滑坡—堵江灾害链特点。根据前人研究资料(郭长宝等, 2019)和现场调查分析,该滑坡可分为上部古滑坡崩塌区即古滑坡滑源区(Ⅰ)、中部滑坡岩体变形区即古滑坡运动区(Ⅱ)及下部古滑坡堆积区(Ⅲ)等3个大区,以及02(门头坪滑坡)、03(门头坪1号滑坡)、04(门头坪2号滑坡)、05(江顶崖1号滑坡)、06(江顶崖滑坡)、07(江顶崖2号滑坡)、08(坪安子滑坡)等7个古滑坡复活区(图5)。

其中,江顶崖古滑坡源区发育于古生界石炭系下统灰岩地层中,岩层产状 $2^{\circ}\angle 75^{\circ}$,表面风化强烈且节理裂隙极为发育,滑坡后壁为宽阔圈椅状地貌,坡度多在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内,局部大于 60° ,高差达530余米。根据古滑坡两侧地形复原,推测历史失稳岩体的体积约为 $31.0\times 10^6\sim 45.72\times 10^6\text{ m}^3$ 。运动区目前坡体表面出露风化基岩,在坪定—化马南支断裂活动作用下,目前该区斜坡表面断错陡坎、拉裂缝等变形现象极为显著,形成较为典型的构造破坏带和滑坡深部变形区,这不仅为降雨提供入渗途

径,还使坡体结构进一步被破坏,在极端工况下,该区可能会发生大规模整体性变形失稳。堆积区长约1 170 m、宽约930 m,面积约 2.14 km^2 。根据钻孔资料堆积物厚度平均为35~40 m,该古滑坡堆积体体积约为 $80.23\times 10^6\sim 91.7\times 10^6\text{ m}^3$,属特大型古滑坡。

2.3 特大滑坡灾害链变形特征

研究区特大滑坡灾害链滑体变形特征主要分为3类。(1)多期次逐级后退式牵引且局部伴有拉裂—推移,如武都区泻流坡滑坡等,该滑坡在地貌上属中高山峡谷区,所在山体斜坡地形呈前后缘较宽、中部狭窄的“哑铃”状,体积约为 $188.35\times 10^4\text{ m}^3$,属大型高位滑坡,在强降雨诱发下,滑坡主要经历3次较大的变形破坏,整体表现为多期次、多层级、逐级后退式牵引且局部伴有拉裂—推移演化的滑动变形特点(王高峰等, 2023)。(2)逐级牵引、逐级变形破坏的大型复合型堆积体滑坡,如舟曲县立节北山滑坡等,该滑坡于2020年发生的滑坡—泥石流—局部堵江灾害链(图6),其成灾模式为下部 $H_2\sim H_7$ 滑体前缘坡面冲沟溯源侵蚀引起的高位中浅层古滑坡堆积体产生逐级牵引、逐级变形破坏的过程(种艳等, 2022)。(3)逐渐推移式断裂带滑坡,如

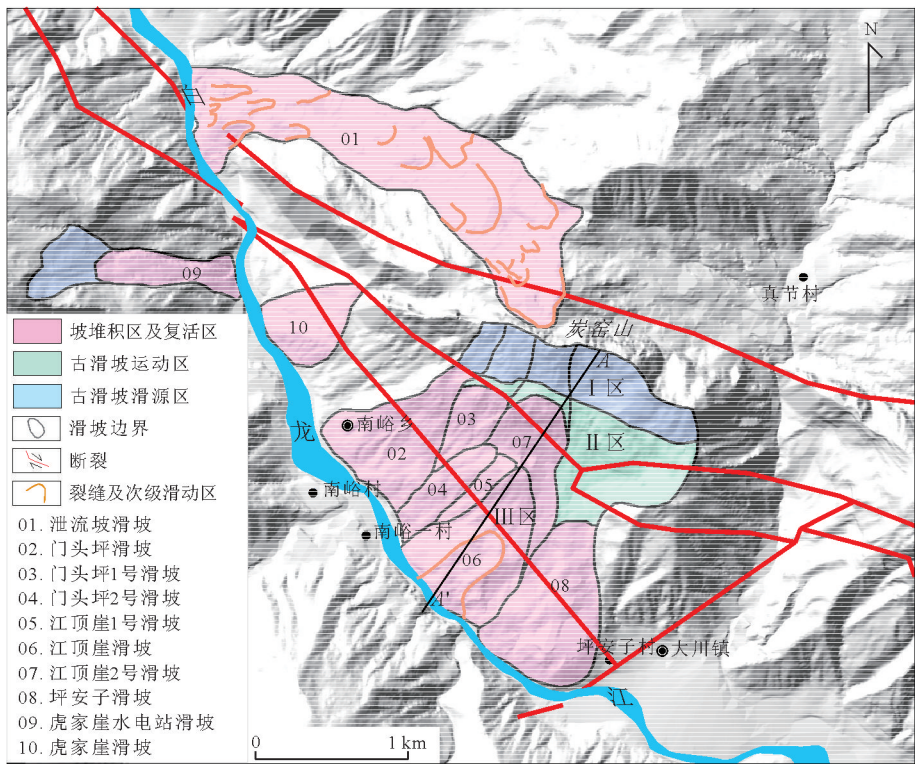


图5 南峪滑坡群平面简图

Fig.5 Simplified planar graph of the Nanyu Landslide cluster

舟曲县牙豁口滑坡等,依据现场调查和GNSS监测数据分析结果可发现,2019年“7·19”舟曲县牙豁口滑坡变形主要特征为:(1)滑坡体地处断裂带发育的凹槽内,地形上极具汇水条件,滑坡体内地下水赋存,近年来一直处于蠕滑状态,在2019年汛期遭受降雨入渗饱和后,滑坡岩土体向坡下发生塑性流动,其变形破坏方式表现为蠕滑—拉裂—土石流;(2)滑坡体变形模式为逐级加载、逐级传递应力、逐级启动的缓变推移式变形(吴玮江等,2021).

2.4 特大滑坡灾害链运动特征

虽然研究区地处青藏高原东北缘中高山峡谷区,易灾地质结构复杂,流域性大型—巨型高位堆积层滑坡多发频发,但这些滑坡多为古滑坡复活,一般由多个次级滑坡体组成,并未形成完整的深层滑动带或滑动面,其运动通常表现出以长历时蠕滑为主的强碎屑流特征.如2018年“7·12”江顶崖滑坡滑动时间共持续了25 h,平均滑移速度为2.63 m/h,以推移式缓慢变形为主.根据GNSS监测结果发现牙豁口滑坡自2019年7月19日开始发生滑动,并于8月14日前后,滑坡体基本处于停滞状态.舟曲县泄流坡滑坡整体以蠕滑为主,但各个滑体的运动特征具有差异性,具体表现为中上部滑体以蠕滑拉裂推

移式,下部滑体以蠕滑拉裂牵引式为主,上部及中下部滑体则表现为蠕滑拉裂推移—牵引的复合式运动特征.值得注意的是,当研究区某一特大滑坡灾害链其滑源区岩性以灰岩等硬质岩体为主,并且剪出口位置属于高位,或者滑坡体为哑铃状地貌类型,而潜在滑源区恰恰处于顶部位置,或滑源区上覆黄土、下伏强风化基岩,并且具有完整的滑动面时,往往形成高位远程滑坡灾害链.如冯振等(2024)基于光滑质点流体动力学与等效流体模型,开展了舟曲县立节北山滑坡运动过程模拟,当上部H₁滑体发生失稳剧滑时,将形成高位高速远程滑坡—碎屑流—堵江灾害链,其最大运动速度可达46 m/s,滑动距离达1 600 m.王高峰等(2023)利用River-Flow2D软件对武都区泻流坡滑坡上部潜在滑源区在极端降雨条件下启动和运动过程模拟结果显示,其模拟最大滑动距离810 m,最大速度可达33.5 m/s,最大堆积厚度为26.7 m,总堆积方量约121×10⁴ m³,可形成局部堵江灾害链.

基于野外实际调查数据,调查统计研究区内132处特大滑坡灾害链隐患的运动学特征,可得研究区滑坡体的运动性摩擦角 f' ,即仅和动能和摩擦系数相关的视摩擦角 f 为滑坡的最大相对高差和最

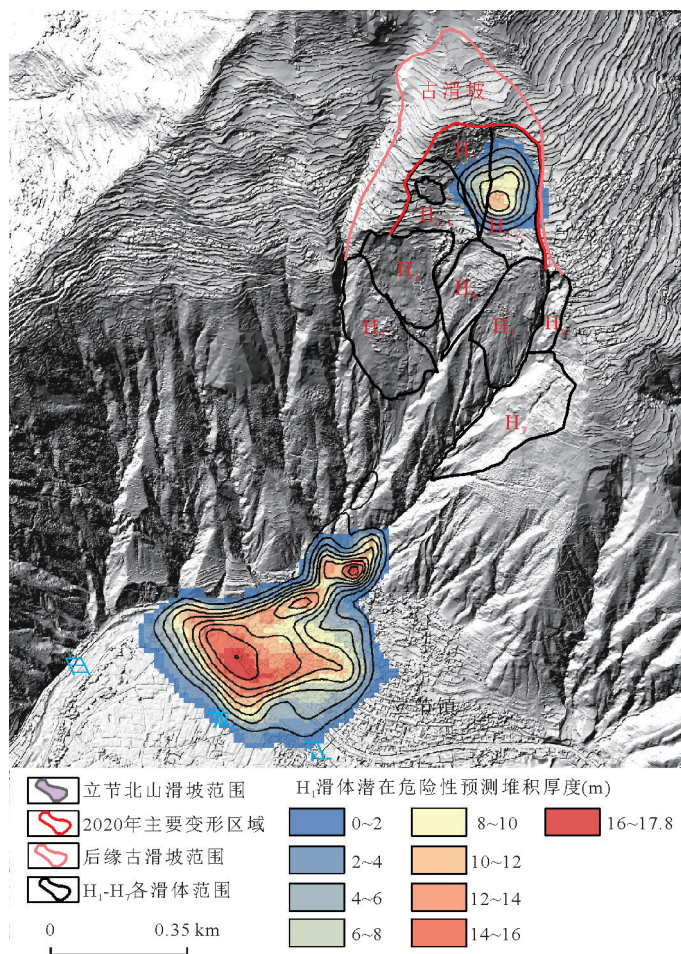


图6 舟曲县立节北山滑坡变形分区特征

Fig.6 Deformation zonation characteristics of the Lijiebeishan Landslide, Zhouqu County

大长度距离之比)(Hsü, 1975; 陈明等, 2018)与滑坡体积之间关系, 如图 7.

$$f' = 1.2784e^{-0.14V} \quad (1)$$

图 7 及公式(1)表明, 研究区内特大滑坡灾害链滑体在运动学特征上具有显著的规模效应, 即研究区内特大滑坡灾害链滑体的滑动距离与滑坡体积密切相关, 随着滑坡规模的增大, 其运动性摩擦系数呈指数降低, 通常表现为特大滑坡灾害链的运动性越强, 出现远程滑移的概率就越大.

另外, 根据图 7 可知, 白龙江流域特大滑坡灾害链的平均 H/L 为 0.51, 这说明研究区特大滑坡灾害链滑体的运动距离一般为滑坡相对高差的 2 倍以上. 其中 $H/L \leq 0.5$ 的有 61 处, 占总数的 46.21%, 其平均 H/L 为 0.39, 表明近半数的特大滑坡灾害链具有高速—远程的运动机制. 有 94 处特大滑坡灾害链的 $H/L \leq 0.6$, 占总数的 62.12%, 表明超过 60% 的特大滑坡灾害链具有远程的运动机制. 但白龙江流

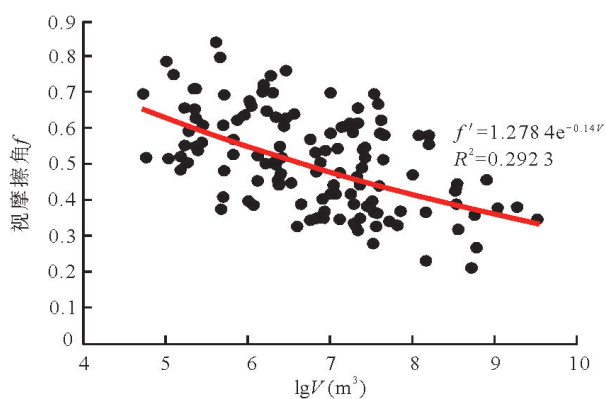


图7 研究区特大滑坡灾害链滑体体积与视摩擦角关系

Fig.7 Relationship between landslide volume and apparent friction angle for large-scale geohazard chains in the study area

域历史特大滑坡运动特征以蠕滑的碎屑流为主, 主要是因为研究区近 66% 特大滑坡灾害链隐患发育于志留系、泥盆系地层, 坡堆积物中含有较多具有明显片理状构造的千枚岩、板岩等变质岩碎屑物

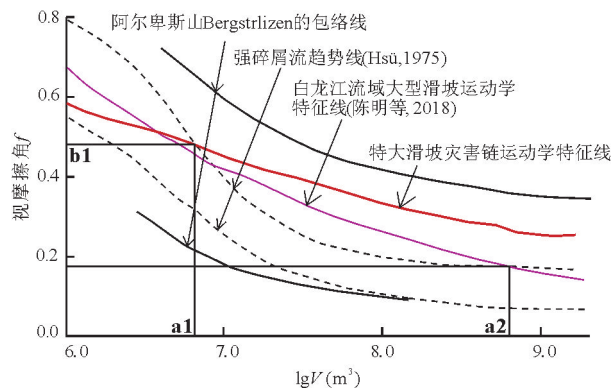


图 8 研究区特大滑坡灾害链运动特征

Fig.8 Kinematic characteristics of large-scale geohazard chains in the study area

质,往往不利于滑坡体长远距离运动.此外,铲刮和裹挟放大效应增大了碎屑流的规模而导致滑体总体流动性降低.

依据公式(1)将研究区特大滑坡灾害链运动特征线与Hsü和Aeble的碎屑流包络线进行对比(图8中黑色虚线为Hsü强碎屑流包络线,黑色实线为阿尔卑斯山Bergstrizen的包络线),整个研究区内有近96%的共计127处特大滑坡灾害链表现出碎屑流特征(阿尔卑斯山Bergstrizen的包络线内).当 $\lg V \leq a_1$ 且视摩擦角 $f \geq b_1$ 时,有47处特大滑坡灾害链表现出较强的碎屑流特征(Hsü包络线范围内),占总数的35.6%,根据野外调查发现这类滑坡主要以高位大型滑坡体为主,其剪出口位置较高,滑体下滑过程中具有良好的滑移空间,且在运动过程中易发生碰撞.上述结果表明研究区大部分特大滑坡灾害链在运动过程均表现出碎屑流的特征,超过1/3的特大滑坡灾害链具有较强碎屑流运动特征.

3 特大滑坡灾害链空间分布特征

受区域地形地貌、构造活动、地层岩性及人类活动的影响,研究区特大滑坡灾害链在空间展布上具有显著的沿大型活动断裂带呈带状集中发育和沿河流水系呈线状分布的特征.通常表现为集中分布在大型断裂局部错断或转折或末端部位以及多条断裂的交汇位置,该部位多为断裂的“锁固段”,往往成为压应力的高度集中区.而沿江发育多级河谷阶地地貌,为特大滑坡灾害链的发生创造了临空和高陡等地形条件.

3.1 明显与断裂构造、地震活动带展布相一致

受内外动力耦合作用,白龙江特大滑坡灾害链

隐患在空间上沿构造带呈条带性分布,并主要集中在垂直断层走向2 km范围内,共发育72处特大滑坡灾害链,占总数的54.6%.其滑坡体多发育河谷凹槽状斜坡,中深层大型—特大型断裂带滑坡约占总数的86%,大部分特大滑坡隐患的主滑方向与断裂方向近于一致,少数垂直或斜交断裂.特别是在断裂控制的高陡三角面斜坡地带表现为群发性,多为古滑坡或老滑坡复活发生大规模变形破坏,常发生以蠕滑变形强碎屑流为主的大型—特大型高位滑坡及堵江—溃坝灾害链.

根据研究区特大滑坡灾害链隐患的分布密度、规模和危害程度,可分为四大密集区域(图9),共发育122处特大滑坡灾害链.其空间展布在白龙江上游左岸即两河口以上沿光盖山—迭山断裂带集中分布(A区);在该区右岸主要沿白龙江断裂北端和南端集中分布(B区).白龙江中游即两河口段至桔柑镇段的展布主要沿武都“山”字型弧形构造弧顶影响区展布(C区).白龙江下游及白水江支流主要沿哈南—青山湾—稻畦子断裂带分布(D区).沿以上活动断裂,历史上曾发生多次中强地震甚至破坏性大地震,距离发震断裂越近,地震波对斜坡岩土体的作用越强烈,地震诱发的滑坡规模和危害性越大.

表2结果显示,在特大滑坡灾害链隐患发育数量上,A区和D区最多,分别为41处、45处,共占总数量的65.15%;其次为B区和C区,共计36处,约占总数的27.3%.综合滑坡体发育面积和规模分析,A区和D区为研究区特大滑坡灾害链隐患最为集中分布区,该区不仅特大型滑坡分布数量较多,而且分布密度大,共分布有48处体积大于 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 滑坡.据研究表明,研究区特大型滑坡灾害链隐患集中分布在大型断裂局部错断或转折或末端部位以及多条断裂的交汇位置.该部位多为断裂的“锁固段”,往往成为压应力的高度集中区.

3.2 呈线状沿河谷集中分布

一是由于河流的下切,地应力的释放,在河流两岸的斜坡上形成较多的卸荷裂隙,其与岩体所具有构造裂隙往往形成了不利组合,使岩体的稳定性降低,从而有利于地质灾害的形成.调查发现,研究区呈SSE/NNW向展布的河流与NEE向的区域地应力方向近于垂直.如沿白龙江中上游段、岷江邓邓桥至两河口段、白水江石鸡坝—石坊乡段、羊汤河桥头乡段及拱坝河下游段等水系特大滑坡灾害

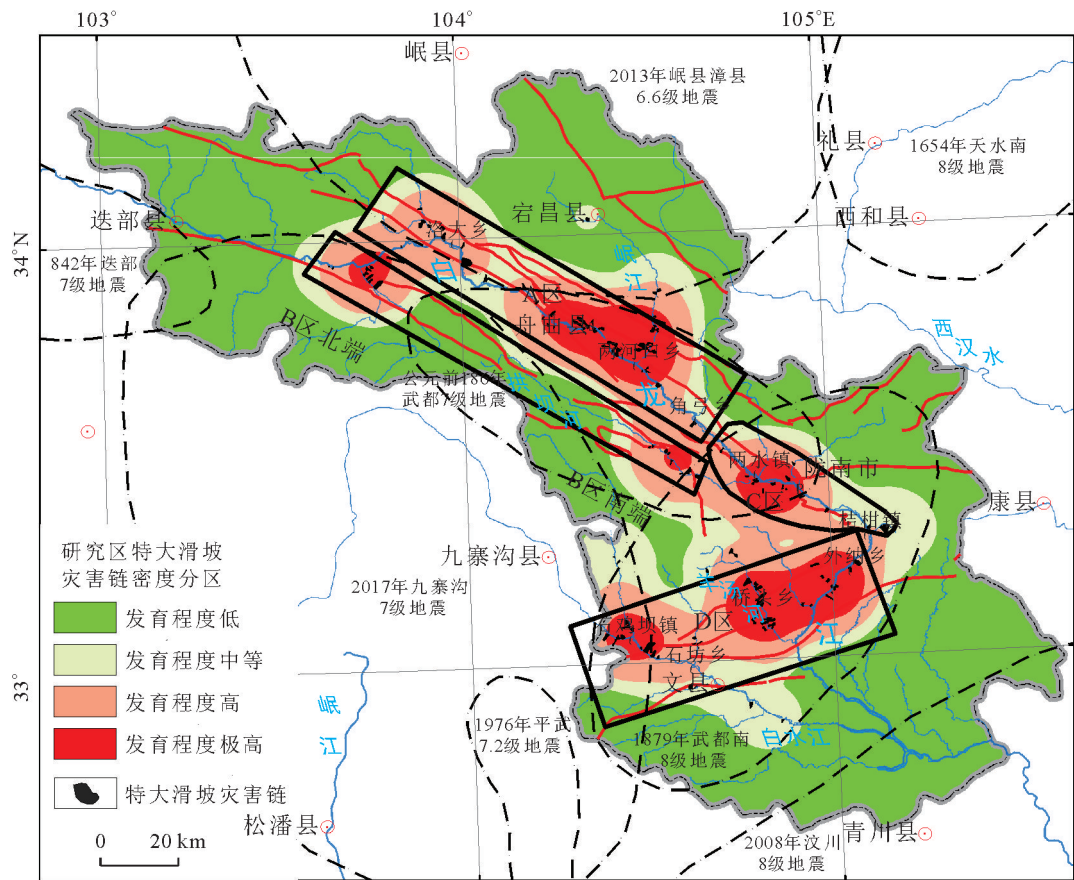


图9 研究区特大滑坡灾害链密度分布

Fig.9 Density distribution of large-scale geohazard chains in the study area

表2 不同断裂影响区内特大滑坡灾害链隐患分布统计

Table 2 Statistics of potential large-scale geohazard chains in different fault-affected zones

断裂带代码	A	B	C	D
滑坡体数目(个)	41	19	17	45
滑坡体数目百分比(%)	31.06	14.39	12.88	34.09
滑坡体集中区面积(km ²)	2 098.60	1 278.32	696.68	2 182.37
滑坡体面积(km ²)	35.70	10.78	9.97	35.74
滑坡体面积百分比(%)	1.70	0.84	1.43	1.64
滑坡体体积(10 ⁴ m ³)	92 808.61	21 401.17	30 052.60	68 722.96
单位面积滑坡体体积(10 ⁴ m ³ /km ²)	44.22	16.74	43.14	31.49

链隐患尤为发育,表明研究区水系与沿 NWW-NW 向及 NE 向展布断裂共同控制了区内特大滑坡灾害链隐患区域性分布。

同时,河流的下切形成的陡长斜坡,增加了岩土体的势能,河流的侧向侵蚀作用使原本已处于平衡状态的斜坡坡脚遭受破坏,加剧了特大滑坡灾害链的发生。尤其处于白龙江及其支流河谷峡谷段,在河流的侵蚀作用下,滑坡前缘首先发生牵引式滑动,进而造成滑坡堆积体发生整体推移式破坏。如舟曲县咀疙瘩滑坡、泄流坡滑坡及江顶崖滑坡、牙

豁口滑坡等,文县郭家坡滑坡、樱桃园滑坡等,宕昌县野狐岭滑坡等,及武都区红土坡滑坡等。

二是特大滑坡灾害链的演化过程往往与区域地貌演化紧密相关。某一地区地貌的发生发展,通常是在内动力地质作用与外动力地质作用的共同影响下,内动力地质作用使研究区持续抬升,外动力地质作用则趋向于使斜坡岩土体向低缓处滑移,而河谷地段正是外动力地质作用的主要堆积场所。研究区属强烈构造变形和抬升区,地貌演化表现为差异性隆起且具有梯级的特征。由于构造活动影响

而形成的中高山峡谷复杂地貌,沿白龙江发育多达六级的河谷阶地,在武都区一带的 T_3 阶地顶面拔河约 130 余 m,为滑坡的发生创造了临空和高陡等地形条件(王高峰等,2023)。总之,研究区这种山高谷深的宏观地貌形态对特大地质灾害的爆发具有较强的控制作用,导致谷坡和斜坡都具有较大的临空面,山坡坡脚易失稳破坏,为特大滑坡灾害提供了物质积累条件和必要的势能条件。随着陇南山地的进一步隆升,研究区特大地质灾害的发育动力条件将更加充分(郭富赟等,2016)。

综上所述,研究区特大滑坡灾害链隐患在空间展布上具有显著的沿大型活动断裂带呈带状集中发育和沿河流水系呈线状分布的特征。具体区域特征表现如下:

(1)白龙江中上游舟曲洛大镇—角弓镇段(即光盖山—迭山断裂带影响区)。特大滑坡灾害链隐患集中分布于迭部洛大镇—宕昌两河口段,长约 70 km,发育大型以上滑坡 41 处,密度为 0.59 处/km。尤其在舟曲城关镇至两河口段,特大滑坡灾害链密度甚至达到 0.7 处/km,其中具有堵江风险的特大滑坡有 10 处,如泻流坡滑坡、江顶崖滑坡等。多发育河谷左岸凹槽状斜坡,均属深层大型—特大型断裂带滑坡,其主滑方向与断裂走向近于一致。区内主要构造带为坪定—化马断裂带,属逆冲—左旋走滑活动断裂,破碎带宽 500~1 500 m,断裂上盘为中泥盆系古道岭组板岩、千枚岩夹灰岩;下盘为下石炭系和中上石炭系中厚层灰岩,夹炭质板岩、千枚岩等。滑坡体在平面上多表现为哑铃状、狭长的舌形、不规则葫芦形等,约 75% 的滑坡体积超过 $1\,000\times 10^4\text{ m}^3$ 。一般后缘至次级山脊或垭口且圈椅状地貌不明显,前缘至河流或次级冲沟,而以断层面或以次级冲沟为界的侧边界较为清楚。滑坡前后缘相对高差均大于 150 m,坡度多在 15° 左右,少数为 30° 左右。

(2)拱坝河流域(即迭部—白龙江断裂影响区)。迭部—白龙江断裂总体走向 $290^\circ\sim 310^\circ$,倾向 NNE,倾角在 $40^\circ\sim 90^\circ$ 之间,全长约 250 km,由白龙江北支断裂、白龙江南支断裂、洋布—大年断裂等相互错接的多条断裂组成,断裂性质总体表现为逆冲兼左旋走滑。特大滑坡灾害链隐患主要分布于该断裂上段多儿沟流域下游及附近,共发育特大滑坡灾害链隐患点 10 处,均发育河流右岸。滑坡体积均大于 $200\times 10^4\text{ m}^3$,最大滑坡体积约 $7\,542.56\times 10^4\text{ m}^3$,滑

体平均厚度为 21.4 m,最小滑坡前后缘相对高差为 240 m,最大为 1 325 m。这些特大滑坡灾害链均发育于志留系地层,滑坡形态主要为梨形、哑铃状及舌形,坡体平均坡度在 28° 左右。而拱坝河流域在长约 16 km 坎坎坝村至大年乡段共发育特大滑坡灾害链隐患点 8 处,密度为 0.5 处/km,河流两岸对称发育。滑坡体积在 $180.9\times 10^4\sim 874.98\times 10^4\text{ m}^3$ 之间,平均厚度 10 m,多属中浅层大型堆积层滑坡,滑坡形态主要为哑铃状、舌形及矩形,坡体坡度在 $30^\circ\sim 35^\circ$ 之间,滑坡前后缘相对高差在 600 m 左右。坡体基底岩性多为石炭系、三叠系地层,坡表为强风化崩坡积碎石土,局部上覆薄层黄土,滑源区通常发生高位基岩崩滑,铲刮坡体中下部碎石土,形成碎屑流,甚至发生高位远程崩滑—碎屑流—堵江洪水灾害链。

(3)白龙江中游角弓镇—桔柑镇段(即武都“山”字型弧形构造弧顶影响区)。特大滑坡灾害链隐患在长约 20.3 km 的武都区两水镇—汉王镇段集中分布,发育大型以上滑坡 13 处,密度为 0.64 处/km,其中具有堵江风险的特大滑坡有 5 处。大部分发育河谷右岸高陡斜坡,多为中—深层大型堆积层滑坡,其主滑方向与断裂走向近于垂直或斜交。该段处在武都“山”字型弧形构造弧顶部位,滑坡上部为石炭系灰岩,中下部为志留系板岩、千枚岩夹灰岩等。滑坡体在平面上多呈哑铃状、舌形、不规则形等,滑坡体积均在 $150\times 10^4\text{ m}^3$ 以上,后缘圈椅状地貌和侧边界较为清楚。滑坡前后缘相对高差均大于 350 m,多数平均坡度在 30° 左右。

(4)白龙江中下游及白水江上游即桔柑镇—外纳乡段、羊汤河桥头乡、白水江石鸡坝—石坊乡段(即哈南—青山湾—稻畦子断裂带影响区)。断裂带影响区内共发育特大滑坡灾害链隐患 45 处,占总数的 34.1%,其中具有堵江风险的特大滑坡有 9 处。在白龙江中下游区域大部分发育河谷右岸高陡斜坡,在羊汤河和白水江流域沿河谷呈对称分布,在断裂局部错列、转折、末端部位以及两断裂的交汇部位集中发育。该区 90% 以上特大滑坡灾害链发育于泥盆系地层,滑坡体在平面上多呈舌形、扇形状。该区近 55% 的特大滑坡灾害链隐患属特大型滑坡,滑体总方量约 $6.87\times 10^8\text{ m}^3$,滑坡前后缘相对高差大多在 400~600 m 之间,平均坡度在 25° 左右。其影像特征为受断层控制影响,地貌上多形成凹槽,且岩土体破碎,断层凹槽和未扰动岩体多呈大角度接触,滑坡垂直于断层方向多形成滑坡壁,平行于断层方

向则多为“流体状”舌型滑坡.变形区域在光学影像上多成亮色调,较周边纹理细腻,台坎、裂缝发育,前缘多呈舌状.

4 特大滑坡灾害链形成机制分析

特大地质灾害链的形成发展主要受活动性断裂(主要控灾因素)、复杂易滑岩层(必要孕灾因素)和差异性深切河谷地貌(关键成灾因素)的控制,水动力条件和地震动效应是不可或缺的诱发因素.因此,特定的控灾断裂构造、孕灾易滑地层及成灾临空地貌等地质模式的存在,是特大滑坡灾害链产生的基础,并有形成堵塞白龙江、溃坝、洪水等特大灾害链的风险,应引起高度重视(王高峰等,2023).

4.1 主要控灾构造特征

大型活动断裂带对特大地质灾害链的发育分布呈现区域性的控制作用,这种作用主要为大型构造带及其现今活动性决定了山体结构、内外触动力和成灾地貌特征(殷跃平等,2021;郭长宝等,2024).活动断裂控制斜坡形成演化并间接地影响着风化卸荷作用,地震断裂的活动方式控制斜坡岩体的启动运移和致灾特点,而岩土体结构控制着斜坡的变形破坏形式、地形地貌对地震有明显的放大效应.总之,地质灾害链的形成是内外动力耦合作用的全面体现(张永双等,2009、2023).白龙江流域位于青藏高原东北隅活动构造区南部,区内发育不同规模断层 140 余条,其中大型活动性断裂 10 余条,

如光盖山—迭山断裂、白龙江断裂等.这些区域性深大逆冲兼走滑性质的断裂带尤其是活动断层不仅是塑造地形地貌、触发地震活动的主要动力,亦是地质灾害发生发展的关键因素.加之密集发育的次级断层,更是影响和制约了研究区特大滑坡灾害链的分布格局.调查统计分析发现沿坪定—化马断裂和哈南—青山湾—稻畦子断裂等活动断裂带 3 km 范围内发育 104 余处大型、特大型滑坡,占总数的 73.8%,历史特大灾害链 26 处,占总数的 78.8%.而研究区近 31.1% 的特大滑坡灾害链隐患点分布在沿光盖山—迭山断裂带集中分布中,沿该断裂从立节乡—两河口镇段共发育特大滑坡灾害链 25 余处,体积约 $68\,088.46 \times 10^4 \text{ m}^3$,面积约 27.24 km^2 (图 10).

地质构造对滑坡的位置、运动方向和地貌特征有较大的影响(郭长宝等,2015).研究区特大滑坡隐患点多由断层穿越,在空间上沿构造带呈条带性分布,近 65% 的特大滑坡灾害链的主滑方向与区域地应力方向近乎一致,地貌上多呈凹槽状或哑铃状“支撑式”锁固型地形.受断裂构造过程的长期影响,断层下盘千枚岩和板岩等浅变质岩层受逆冲推覆和走滑作用的强烈挤压,转化为灰黑色软弱断层泥,成为后期多期滑坡滑动面(带),这些物质有效内摩擦角一般小于 15° ,在地震、降雨和临江滑坡坡脚的河流侵蚀是诱发特大滑坡灾害链失稳的主要原因(Qi *et al.*, 2021).有别于其他地区受断层或节

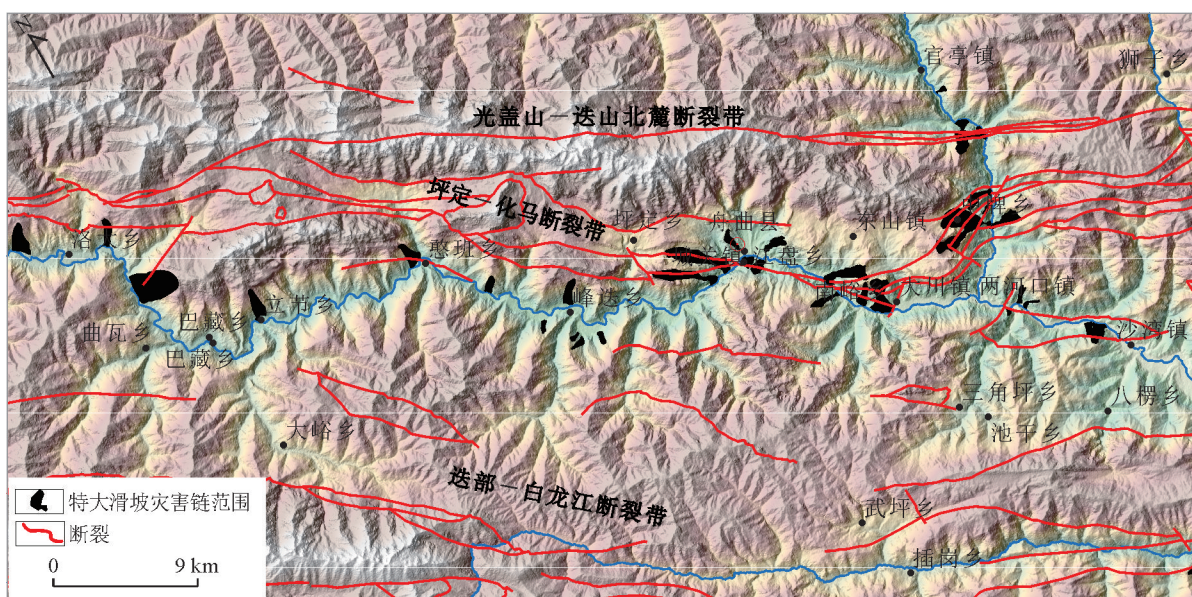


图 10 光盖山—迭山断裂带特大地质灾害链与断裂的空间关系情况

Fig.10 Spatial relationship between large-scale geohazard chains and the Guanggaishan-Dieshan fault zone

理控制的岩质滑坡,研究区断裂带大型滑坡在地貌上具有复杂性、在活动程度上通常表现为多期次滑动且主要以碎屑流形式出现.受断裂的几何形状、物质组成和活动特征的影响,在断裂带南坡(阴坡)和北坡(阳坡)产生的次生滑坡类型也有差别(图 11).其中北坡主要为堆积层蠕滑型滑坡,滑坡体主要为次生黄土、断裂破碎带风化岩体及灰黑色断层泥组成,而南坡陡峻斜坡稳定较好,一般以高位崩塌为主,主要是因为晚第四系断裂的快速隆升所致.值得注意的是,在南坡由于灰黑色断层泥位于断裂带基岩下,随着断裂带物质的不断侵蚀和上盘的逆冲作用,最终导致断裂带内滑坡沿侧壁发生失稳破坏,产生逐级加载式特大滑坡堵江灾害链,如舟曲县泄流坡滑坡.再者,在南坡的阳坡面,受垂直于滑动方向的多条分支断裂活动影响,可能发生高位崩塌一滑坡一堵江灾害链风险,如舟曲县江顶崖滑坡.

唐永仪(1992)认为武都区 80% 以上滑坡与地震有关,尤其是重特大滑坡的形成发展均受地震活动的诱发、影响和控制.研究区 3 级以上和 5 级以上地震 b 值均在 0.6 左右(邵延秀等, 2014),说明该区具有强烈中强地震活动背景和区域应力集中状态,在强震影响下极易形成高位滑坡灾害链或为高位滑坡提供条件.如 1879 年武都南 8.0 级地震导致研究区大部分区域斜坡山体松动,在滑坡源区后缘及两侧边界形成较为明显的拉张裂缝.在后续多次地震影响,特别是最近两次强震中(2008 年汶川 8 级地震、2017 年九寨沟 7 级地震)裂缝进一步发展表现为

后缘下挫拉张变形明显,两侧边界形成羽状剪切裂缝,坡面发育顺坡向剪切裂缝,为推移式滑动提供了结构基础.裂缝的存在为雨水的入渗、物理化学风化提供了重要的通道,致使其物理力学强度不断降低,同时在滑坡体自身重力与地震力共同作用下,增大坡体下滑力、降低坡体抗滑力,甚至地震动使坡体松散堆积物变得极为松动,进而降低了斜坡整体稳定性,加剧了滑坡的变形,导致滑坡多次复活(王高峰等, 2023).如舟曲江顶崖滑坡、牙豁口滑坡、立节北山滑坡,武都区泻流坡滑坡、文县郭家坡滑坡及草坪樱桃园滑坡等.

4.2 必要孕灾地层特征

研究区地层分布主要为三叠系、二叠系、石炭系、泥盆系、志留系及震旦系等,占研究区总面积的 89.62%.其中志留系和泥盆系的千枚岩、板岩、页岩等岩体大多岩性较软弱、抗剪强度较低,同时又是较好的隔水层,往往以软弱夹层的形式存在于斜坡体中,可为特大滑坡灾害链滑面的形成提供良好的地质结构条件.软弱岩体易受构造破坏和风化侵蚀的特性及其特殊岩层组合,由其形成的松散地表堆积、倒石堆等也为特大泥石流灾害链的形成准备了足够的物质条件(孟兴民等, 2013).对于较硬或硬质岩斜坡(如三叠系、二叠系、石炭系等灰岩、砂岩地层),岩石层面结合构造裂隙和卸荷裂隙构成潜在楔形块体的高位崩滑失稳边界,而通常情况下这些斜坡均处于稳定状态,往往在地震作用下,导致岩体裂隙进一步发育,并且在某一次强震诱发下失稳.

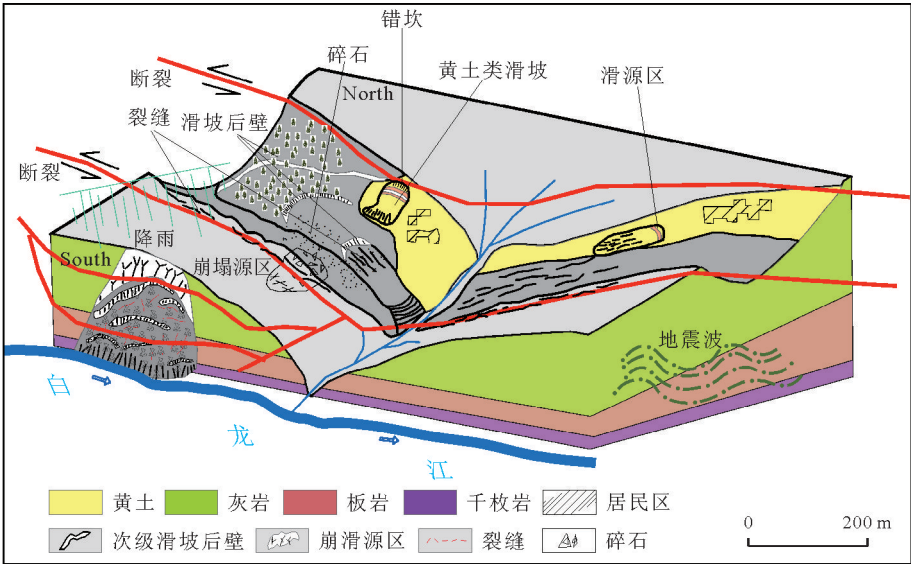


图 11 研究区典型断裂与滑坡灾害三维示意图

Fig.11 Schematic 3D diagram of typical fault distribution and landslide hazards in the study area

根据以往研究资料(杨为民等,2014),结合作者研究团队野外获取的709组岩土体试验测试分析数据可知,研究区易崩易滑岩体主要为志留系千枚岩、三叠系板岩、灰岩等软硬相间岩体.实验测试分析表明板岩、砂岩、灰岩、片岩干燥状态下的单轴抗压强度是饱状态下的2.2~2.6倍,千枚岩为4.6倍;干燥状态下的弹性模量约为饱和状态下的1.5倍,其中千枚岩达3.3倍;干燥状态下的变形模量约为饱和状态下的1.4倍.千枚岩、片岩、板岩在岩体饱和时的强度损失最为显著,在天然状态下其粘聚力约为饱和状态下的2.2倍左右,内摩擦角为饱和状态的1.48~1.67倍.从岩体力学性质及其在天然、饱和状态下的测试结果可以得出,千枚岩、片岩、板岩强度相对较低,在饱和状态下,粘聚力、内摩擦角以及抗压强度等均下降明显,因而成为区内易崩易滑地层.

一般发育的特大滑坡灾害链孕灾地层由次生黄土、断裂破碎带强—中风化带、未风化破碎带组成的双层或3层的组合结构,通常由多个小滑坡体组成,具有多次、多级滑动特性,表现为蠕滑→拉裂(溯源拉裂)→次级滑坡启动→堵江灾害链特征.这种岩性组合形成了斜坡体为构造剥蚀凹槽状负地形,斜坡前缘为较为深切的狭窄河谷地貌,为特大滑坡灾害链的形成提供了高位剪出远程运动的地层地貌条件.

基于野外调查数据分析,白龙江流域65%的大型滑坡发育在软硬相间层状岩岩组内,35%以上的大型滑坡发育在层状软硬相间浅变质岩+灰岩岩组内.这种软硬相间的岩体在长期风化作用下,局部已变为粉质黏土,遇水则膨胀变形或塑化,导致上覆岩体失稳,从而使得滑坡的稳定性差.尤其是千枚岩、炭质板岩风化物形成的滑带土具有显著流变性质的软弱物质,据岩土实验分析统计天然干燥状态下全风化炭质千枚岩剪切强度是完全饱和状态下的1.67~2.32倍,其抗拉强度可达7倍.如江顶崖古滑坡体上部出露地层主要为石炭系灰岩,中部出露地层为泥盆系千枚岩、炭质板岩夹灰岩、砂岩,下部为志留系含炭板岩和千枚岩,属“上硬下软”或“软硬组合结构”孕灾地层.受坪定—化马等多条分支断裂活动影响,滑坡所处的斜坡体坡向与区域构造线近于垂直,导致滑坡体岩体十分破碎.滑坡体所在斜坡地形高陡,斜坡体顶部为陡峭的岩壁,在强震影响下易产生高位崩滑,其下部为松散的堆积层,在降雨作用下易沿由含灰黑色炭质板岩碎屑滑带复活滑动,多呈现崩滑—碎屑流—堵江或滑坡—堵江灾害链特点(图12).

总之,构造断裂破碎带及其含千枚岩、板岩和灰岩等浅变质岩性组合构成了白龙江流域典型的孕灾地层组合,控制了高位特大地质灾害链的分布和演化.

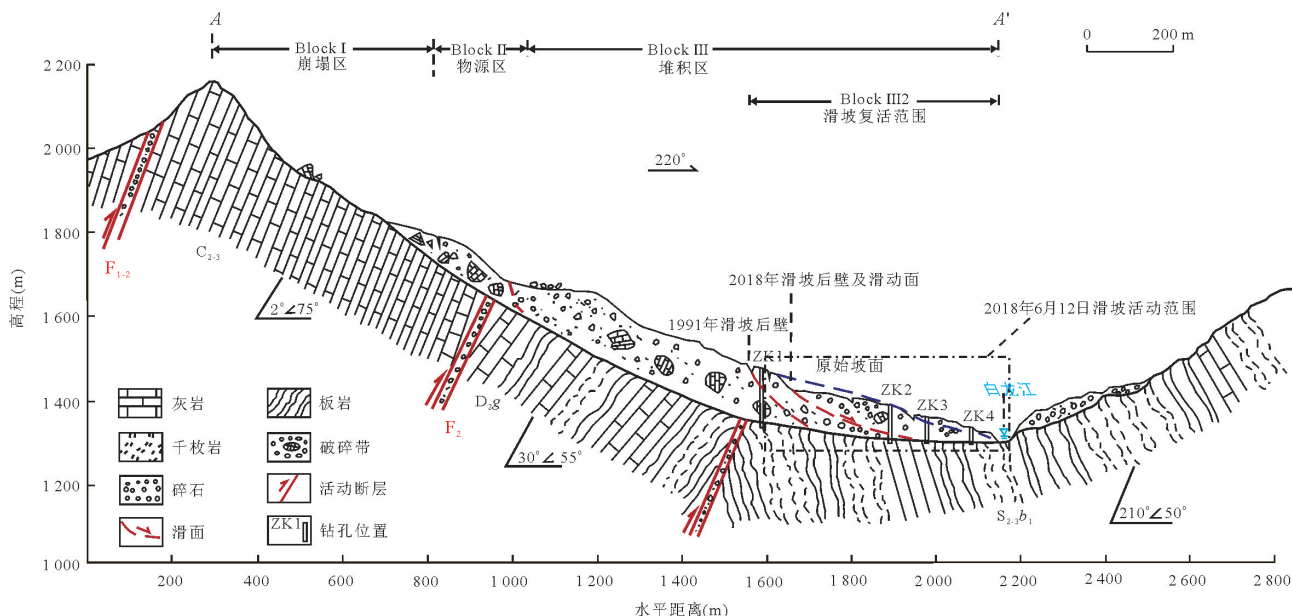


图 12 江顶崖滑坡剖面图(据郭长宝等,2019)

Fig.12 Geological profile of the Jiangdingya Landslide (modified from Guo *et al.*, 2019)

4.3 关键成灾地貌特征

当河流走向与区域最大主应力方向垂直或大角度相交的河段或谷地,往往是受高地应力影响导致河流下切、岩体卸荷非常强烈的区域(黄润秋, 2004).调查发现,研究区呈 SSE/NNW 向展布的河流与 NEE 向的区域地应力方向近于垂直.因此,在研究区白龙江流域及其支流在河流快速下切后,高地应力区深切峡谷区斜坡上部由于卸荷而发生拉裂,形成交错切割崩滑源区岩体的卸荷裂隙,并于构造结构面和原生结构面共同切割而形成特大滑坡灾害链隐患体.在地貌形成演化和降水、地震的时空耦合作用下,这些结构面快速贯通—失稳,形成了目前研究区典型的地震→崩滑→泥石流或降雨→滑坡等链式灾害模式.

白龙江流域属强烈构造变形和抬升区,地貌演化表现为差异性隆起且具有梯级的特征,加之地震和气候环境的特殊性,成为特大地质灾害链事件多发、高发和频发区域.张波等(2020)认为光盖山—迭山断裂(走滑速率约 1 mm/a)、白龙江断裂(走滑速率 1.3~2.6 mm/a)和塔藏断裂(走滑速率 1.0~3.2 mm/a)的走滑分配(东北向挤压)和走向旋转(左旋走滑)共同控制了白龙江流域的构造抬升和地形异常隆起.资料显示白龙江下游地区的构造活

动要弱于中上游区域,其中迭部—白龙江断裂的构造活动是造成研究区地形起伏大、坡度陡的主要原因(常直杨等,2014).地形的急剧变化及显著的起伏特征为特大高位滑坡堵江灾害链提供了极高的势能条件.

特大滑坡灾害链与流域内地形坡度、地形起伏度密切相关.其中区内优势坡度为 25°~45°,约占研究区总面积的 60%,地形起伏度大于 300 m 的坡地占总面积的 82.5%,中高山地貌约占总面积的 73.9%,海拔高程大于 2 500 m 的山地地貌约占总面积的 51%.这种山高谷深的宏观地貌形态对特大地质灾害的暴发具有较强的控制作用,导致谷坡和斜坡都具有较大的临空面,山坡脚易失稳破坏,为特大滑坡灾害链提供了物质积累条件和必要的势能条件.随着陇南山地的进一步隆升,白龙江流域特大地质灾害的发育动力条件将更加充分,并在一定时期内仍处于高发态势(苏琦等,2016;郭富赞等,2016).根据野外调查分析,研究区特大地质灾害链主要发育于断裂破碎带凹槽内、沟谷与断裂夹携的三角斜坡区域、断裂穿越斜坡或流域中上部区域(图 13).尤其地貌特征整体呈上段宽阔、中段狭窄、下段裙状的三段式特征,具有“支撑式”阻滑地形,最有利于高位特大滑坡灾害链发生.

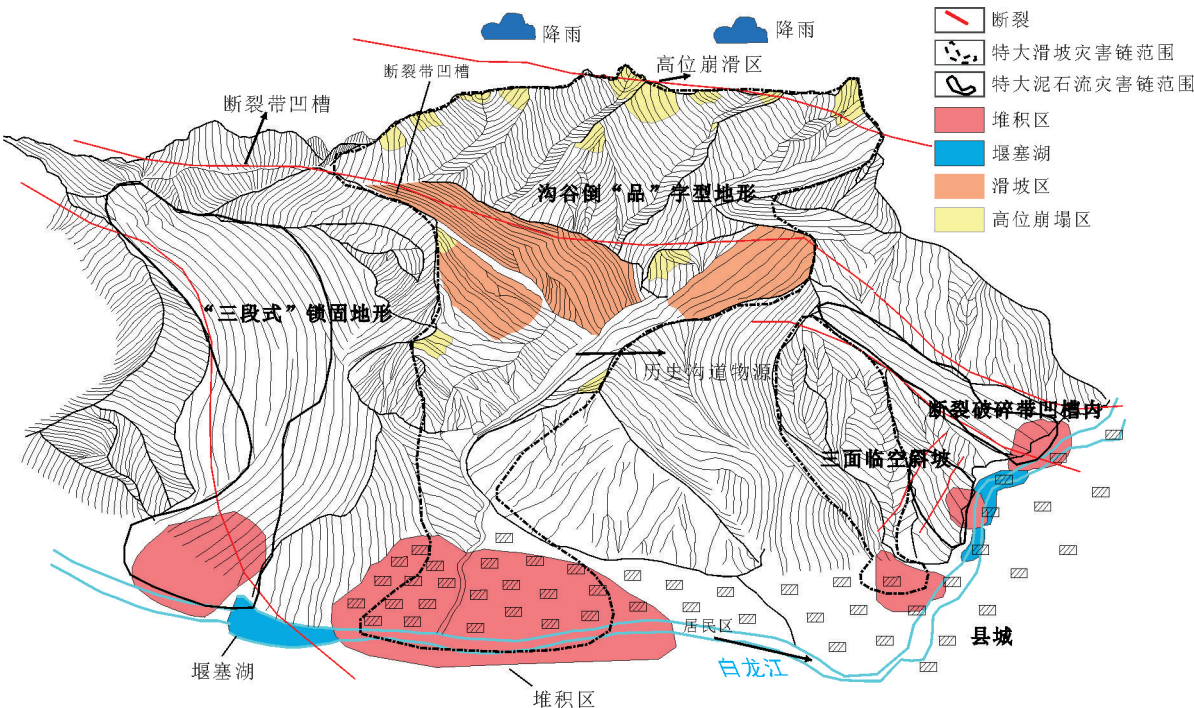


图 13 研究区易发生特大地质灾害链的成灾地貌类型

Fig.13 Disaster-pregnant landform types prone to large-scale geological disaster chains in the study area

4.4 重要激发条件特征

区内地质灾害的爆发与降雨的分布特征密切相关,一般在降雨量大的区域和时段地质灾害更为发育.就重要激发条件而言,研究区特大滑坡灾害表现为区域性中长历时(5~15 d)连续性强降雨.当日降雨量达到 16 mm 时,滑坡发生概率为 50%,如研究区上游降雨量达到 30 mm 时,诱发大型滑坡的概率较大,在前期雨量大于 60 mm 且 1 h 雨强大于 40 mm 或暴雨持续 24 h 时降水量大于 100 mm,将诱发规模不等的群发性滑坡灾害(郭富赟等,2015).冯军等(2006)认为在地震烈度大于 6 度区时,不同降雨情况对应的地质灾害临界雨量降幅可达 20%~50%.主要是因为地震导致区域地质环境发生很大变化,特别是大型地震整体上降低诱发滑坡的降雨条件,长历时中低强度降雨是诱发区域滑坡的主要雨型,但震后短历时强降雨的影响会增强(吴杰等,2022).尤其 2008 年“5·12”汶川地震后,研究区暴雨次数及强度明显强于地震前,且地质灾害发生频次、成灾规模均较震前严重(冯军等,2011),引发和加剧的特大地质灾害数量也明显增多,且具有 1.5~5 a 左右的短周期.如 2017 年九寨沟地震后 2.5 a 内,研究区相继在 2018 年发生江顶崖和 2019 年牙豁口堵江型滑坡.而在 2020 年“8·17”陇南暴洪和地震后效应叠加,仅陇南地区就新增地质灾害点达 1 551 处,其中大—特大型地质灾害隐患点 93 处,险情为特大型的 46 处.

郭长宝等(2022)认为对于大型深层蠕滑型滑坡,其发生剧滑的时间往往晚于诱发因素作用的时间,这种滞后性规律在降雨型滑坡中最为明显.一般情况下滑坡体越松散、裂隙越发育、降雨量越大,则表现的非线性滞后时间就越短,其滞后性与工程地质岩组密切相关.如研究区舟曲县江顶崖古滑坡在 1991 年发生变形前连续 1 个月时间内遭受 4 次极端大到暴雨,尤其是滑坡剧滑前 2 d 经历 40 min 降雨量达 65 mm 的极端暴雨对该滑坡大规模滑动堵江起到直接的触发作用.在 2018 年 6 月即再次发生滑动前一月累积降雨量达到 269 mm,甚至超过舟曲县年平均降雨量的 60%,本次降雨过程为滑坡变形前 1 个月的持续降雨以及剧滑前 1~2 d 内强降雨最终诱发江顶崖古滑坡前缘滑动,并堵塞白龙江.

5 结论

(1)研究区共识别 132 处特大滑坡灾害链隐患,

以大型(占比 50.76%)和特大型(占比 47.73%)为主,滑坡体积与分布个数呈双峰曲线规律,其中 $1\ 000\times 10^4\sim 5\ 000\times 10^4\text{ m}^3$ 规模段为优势区间.灾害链形式以滑坡—碎屑流灾害链、滑坡—堰塞湖—洪水灾害链、滑坡—堰塞湖—洪水—古滑坡复活灾害链为主.

(2)形态上 52.3% 的滑坡体呈哑铃状(三段式结构)或扇形,85% 为中深层堆积层滑坡,剖面多具双层或三层结构,65% 发育于泥盆系、志留系千枚岩、板岩与灰岩组成的“软硬组合”地层.其变形特征以多期次逐级后退式牵引且局部伴有拉裂—推移、渐进推移式断裂带滑坡及复合型大型堆积体滑坡为主,具有显著的高位远程蠕滑碎屑流运动机制.

(3)空间上构造活动与河谷地貌演化的耦合控灾作用明显且分异显著,表现为沿大型活动断裂带(54.6% 分布于断裂带 2 km 内)呈带状集中(尤其断裂锁固段)、沿河流水系呈线状分布的“双主导”空间分布规律,其中沿光盖山—迭山断裂带和哈南—青山湾—稻畦子断裂带占比 65.15%,为特大滑坡灾害链最集中区域,且距发震断裂越近,滑坡规模与危害越大,为特大地质灾害链精准防控提供关键靶区依据.

(4)研究区特大滑坡灾害链的形成演化和链动成灾过程受地貌、构造和地层组成的易灾地质结构控制,构造断裂破碎带及其含千枚岩、板岩和灰岩等浅变质岩性组合构成了典型易滑地层组合,区域性中长历时(5~15 d)连续性强降雨是诱发特大滑坡灾害的主要原因,且具有明显的滞后性,而震后 1.5~5 a 灾害频次与规模显著加剧.

References

- Chang, Z. Y., Wang, J., Bai, S. B., et al., 2014. Appraisal of Active Tectonic in Bailongjiang Basin Based on DEM Data. *Quaternary Sciences*, 34(2): 292—301(in Chinese with English abstract).
- Chen, M., Wang, Y. S., Liang, R. F., et al., 2018. Research on Development and Distribution Rules of Large-scale Landslides in Bailongjiang River Basin. *Journal of Engineering Geology*, 26(2): 325—333 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N. S., Tian, S. F., Zhang, Y., et al., 2021. Soil Mass Domination in Debris-Flow Disasters and Strategy for Hazard Mitigation. *Earth Science Frontiers*, 28(4): 337—348 (in Chinese with English abstract).
- Chong, Y., Chen, G., Meng, X. M., et al., 2022. Analysis

- of the Transformation Mechanism and Prediction of a Landslide Debris Flow Multi-Hazards Chain in an Alpine Canyon Area: A Case Study in Zhouqu. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 58(3): 372–384 (in Chinese with English abstract).
- Cui, P., Guo, J., 2021. Evolution Models, Risk Prevention and Control Countermeasures of the Valley Disaster Chain. *Advanced Engineering Sciences*, 53(3): 5–18 (in Chinese with English abstract).
- Feng, J., Shang, X. J., Fan, M., et al., 2006. Geological Calamity Distribution and Critical Rainfall in Longnan Region of Gansu Province. *Arid Meteorology*, 24(4): 20–24 (in Chinese with English abstract).
- Feng, J., Zhang, R., Feng, R. J., 2011. Causes of the Post-Earthquake Geo-Calamities in Southern Gansu. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 22(1): 5–9 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z., You, Y., Chen, L., et al., 2024. Numerical Simulation Study on Kinematic Post-Failure Process of Large-Scale Landslide in the Bailong River Basin. *Journal of Catastrophology*, 39(1): 45–50 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Du, Y. B., Zhang, Y. S., et al., 2015. Geohazard Effects of the Xianshuihe Fault and Characteristics of Typical Landslides in Western Sichuan. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 121–134 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Ren, S. S., Li, X., et al., 2019. Development Characteristics and Reactivation Mechanism of the Jiangdingya Ancient Landslide in the Nanyu Town, Zhouqu County, Gansu Province. *Geoscience*, 33(1): 206–217 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Wu, R. A., Zhong, N., et al., 2024. Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12): 4635–4658 (in Chinese with English abstract).
- Guo, C. B., Yan, Y. Q., Zhang, Y. S., et al., 2022. Research Progress and Prospect of Failure Mechanism of Large Deep-Seated Creeping Landslides in Tibetan Plateau, China. *Earth Science*, 47(10): 3677–3700 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F. Y., Meng, X. M., Chen, G., et al., 2016. Geomorphology Evolution of Bailong River Basin and Its Impact on Geo-Hazard. *Yangtze River*, 47(7): 37–43, 49 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F. Y., Song, X. L., Xie, Y., et al., 2015. A Discussion on the Geological Hazards Meteorological Warning System in Gansu Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 26(1): 127–133 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. L., Wu, S. R., Wang, H. B., 2007. Preliminary Study on Geological Hazard Chains. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 11–23 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K. J., 1975. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86(1): 129–140. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86129:cdssgb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86129:cdssgb>2.0.co;2)
- Huang, R. Q., 2004. Mechanism of Large Scale Landslides in Western China. *Advance in Earth Sciences*, 19(3): 443–450 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., 2007. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China since the 20th Century. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433–454 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Qi, S. W., Tong, L. Q., et al., 2010. Great Landslides in Himalaya Mountain Area and Their Occurrence with Lithology. *Journal of Engineering Geology*, 18(5): 669–676 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Z., Lyu, J. T., Tong, L. Q., et al., 2019. Research on Glacial/Rock Fall-Landslide-Debris Flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet. *Geology in China*, 46(2): 219–234 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. M., Chen, G., Guo, P., et al., 2013. Research of Landslides and Debris Flows in Bailong River Basin: Progress and Prospect. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(4): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Qi, T. J., Meng, X. M., Qing, F., et al., 2021. Distribution and Characteristics of Large Landslides in a Fault Zone: A Case Study of the NE Qinghai-Tibet Plateau. *Geomorphology*, 379: 107592. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107592>
- Shao, Y. X., Yuan, D. Y., He, W. G., et al., 2014. Seismic Hazard Assessment for Active Faults of Longnan City. *China Earthquake Engineering Journal*, 36(3): 645–655 (in Chinese with English abstract).
- Su, Q., Liang, M. J., Yuan, D. Y., et al., 2016. Geomorphic Features of the Bailongjiang River Drainage Basin and Its Relationship with Geological Disaster. *Earth Science*, 41(10): 1758–1770 (in Chinese with English abstract).
- Tang, H. M., Li, C. D., Hu, W., et al., 2022. What is the Physical Mechanism of Major Landslides? *Earth Science*, 47(10): 3902–3903 (in Chinese).

- Tang, Y. Y., 1992. The Effect of Neotectonic Movement on Formations of Landslide and Debris Flow in Southern Gansu. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 28(4): 152—160(in Chinese).
- Tie, Y. B., Zhang, X. Z., Gong, L. F., et al., 2022. Research on the Pattern of Typical Geohazard Chains in the Southwest Mountainous Region, China. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 1071—1080(in Chinese with English abstract).
- Wang, F. W., Chen, Y., Liu, W. C., et al., 2022. Dynamic Characteristics and Research Difficulties of High-Level Remote Landslide in Southeastern Tibet. *Journal of Engineering Geology*, 30(6): 1831—1841(in Chinese with English abstract).
- Wang, G. F., Li, H., Tian, Y. T., et al., 2023. Study on the Formation Mechanism and Risk Prediction of High-Level Accumulation Landslides in Bailongjiang River Basin, Gansu Province. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(4): 1003—1018(in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Chen, G., Meng, X. M., et al., 2022. Rainfall Threshold of Landslides in the Bailong River Basin, China. *Mountain Research*, 40(6): 875—886(in Chinese with English abstract).
- Wu, W. J., Wang, G. Y., Liu, X. R., et al., 2021. The Development Characteristics and Causes of the Yahuokou Landslide in Zhouqu County, Gansu Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(2): 544—554(in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Zheng, G., Li, W. L., et al., 2018. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1534—1551(in Chinese with English abstract).
- Yang, W. M., Huang, X., Zhang, C. S., et al., 2014. Deformation Behavior of Landslides and Their Formation Mechanism along Pingding-Huama Active Fault in Bailongjiang River Region. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(2): 574—583(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).
- Yu, J. X., Zheng, W. J., Yuan, D. Y., et al., 2012. Late Quaternary Active Characteristics and Slip-Rate of Pingding-Huama Fault, the Eastern Segment of Guanggaishan-Dieshan Fault Zone(West Qinling Mountain). *Quaternary Sciences*, 32(5): 957—967(in Chinese with English abstract).
- Yuan, B., He, F. G., Li, J. P., et al., 2012. Relationship between Debris Flow Activity and Precipitation Characteristics in Wudu Area, Gansu Province. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 48(6): 15—20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., 2020. Fault Geometry and Deformation Partition of WNW-Trending Faults in the West Qinling Mountain (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. P., Zheng, W. J., Yuan, D. Y., et al., 2021. Geometrical Imagery and Kinematic Dissipation of the Late Cenozoic Active Faults in the West Qinling Belt: Implications for the Growth of the Tibetan Plateau. *Journal of Geomechanics*, 27(2): 159—177(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Guo, C. B., Yao, X., et al., 2016. Study on Geological Disaster Effect of Active Faults in the Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(3): 277—286(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Ren, S. S., Li, J. Q., et al., 2023. Easy-to-Slip Geological Structure and High-Level Sliding Mechanism of Dorasi Landslide in Nujiang Structural Melange Belt. *Earth Science*, 48(12): 4668—4679(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. S., Shi, J. S., Sun, P., et al., 2009. Coupling between Endogenic and Exogenic Geological Processes in the Wenchuan Earthquake and Example Analysis of Geo-Hazards. *Journal of Geomechanics*, 15(2): 131—141(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 常直杨, 王建, 白世彪, 等, 2014. 基于DEM的白龙江流域构造活动定量分析. *第四纪研究*, 34(2): 292—301.
- 陈明, 王运生, 梁瑞锋, 等, 2018. 白龙江流域大型滑坡发育分布规律研究. *工程地质学报*, 26(2): 325—333.
- 陈宁生, 田树峰, 张勇, 等, 2021. 泥石流灾害的物源控制与高性能减灾. *地学前缘*, 28(4): 337—348.
- 种艳, 陈冠, 孟兴民, 等, 2022. 高山峡谷区滑坡—泥石流灾害链成灾模式与危险性评价: 以舟曲立节为例. *兰州大学学报(自然科学版)*, 58(3): 372—384.
- 崔鹏, 郭剑, 2021. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策. *工程科学与技术*, 53(3): 5—18.
- 冯军, 尚学军, 樊明, 等, 2006. 陇南地质灾害降雨区划及临界雨量研究. *干旱气象*, 24(4): 20—24.
- 冯军, 张蓉, 冯瑞娟, 2011. 地震后陇南特大地质灾害成因

- 分析. 地质灾害与环境保护, 22(1): 5—9.
- 冯振, 游杨, 陈亮, 等, 2024. 白龙江流域大型高位滑坡成灾动力过程模拟研究. 灾害学, 39(1): 45—50.
- 郭长宝, 杜宇本, 张永双, 等, 2015. 川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理. 地质通报, 34(1): 121—134.
- 郭长宝, 任三绍, 李雪, 等, 2019. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理. 现代地质, 33(1): 206—217.
- 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 等, 2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. 地球科学, 49(12): 4635—4658.
- 郭长宝, 闫怡秋, 张永双, 等, 2022. 青藏高原大型深层蠕滑型滑坡变形机制研究进展与展望. 地球科学, 47(10): 3677—3700.
- 郭富赞, 孟兴民, 陈冠, 等, 2016. 白龙江流域地貌演化及其对地质灾害的影响. 人民长江, 47(7): 37—43, 49.
- 郭富赞, 宋晓玲, 谢煜, 等, 2015. 甘肃地质灾害气象预警技术方法探讨. 中国地质灾害与防治学报, 26(1): 127—133.
- 韩金良, 吴树仁, 汪华斌, 2007. 地质灾害链. 地学前缘, 14(6): 11—23.
- 黄润秋, 2004. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究. 地球科学进展, 19(3): 443—450.
- 黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433—454.
- 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等, 2019. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑—碎屑流堵江灾害初步研究. 中国地质, 46(2): 219—234.
- 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等, 2010. 喜马拉雅山地区重大滑坡灾害及其与地层岩性的关系研究. 工程地质学报, 18(5): 669—676.
- 孟兴民, 陈冠, 郭鹏, 等, 2013. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望. 海洋地质与第四纪地质, 33(4): 1—15.
- 邵延秀, 袁道阳, 何文贵, 等, 2014. 陇南市活断层地震危险性评估. 地震工程学报, 36(3): 645—655.
- 苏琦, 梁明剑, 袁道阳, 等, 2016. 白龙江流域构造地貌特征及其对滑坡泥石流灾害的控制作用. 地球科学, 41(10): 1758—1770.
- 唐辉明, 李长冬, 胡伟, 等, 2022. 重大滑坡启滑的物理机制是什么?. 地球科学, 47(10): 3902—3903.
- 唐永仪, 1992. 新构造运动在陇南滑坡泥石流形成中的作用. 兰州大学学报(自然科学版), 28(4): 152—160.
- 铁永波, 张宪政, 龚凌枫, 等, 2022. 西南山区典型地质灾害链成灾模式研究. 地质力学学报, 28(6): 1071—1080.
- 汪发武, 陈也, 刘伟超, 等, 2022. 藏东南高位远程滑坡动力学特征及研究难点. 工程地质学报, 30(6): 1831—1841.
- 王高峰, 李浩, 田运涛, 等, 2023. 甘肃省白龙江流域典型高位堆积层滑坡成因机制研究及其危险性预测. 岩石力学与工程学报, 42(4): 1003—1018.
- 吴杰, 陈冠, 孟兴民, 等, 2022. 白龙江流域滑坡降雨临界值. 山地学报, 40(6): 875—886.
- 吴玮江, 王国亚, 刘兴荣, 等, 2021. 甘肃舟曲县牙豁口滑坡发育特征与成因分析. 冰川冻土, 43(2): 544—554.
- 许强, 郑光, 李为乐, 等, 2018. 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. 工程地质学报, 26(6): 1534—1551.
- 杨为民, 黄晓, 张春山, 等, 2014. 白龙江流域坪定—化马断裂带滑坡特征及其形成演化. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 574—583.
- 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.
- 俞晶星, 郑文俊, 袁道阳, 等, 2012. 西秦岭西段光盖山—迭山断裂带坪定—化马断裂的新活动性与滑动速率. 第四纪研究, 32(5): 957—967.
- 袁斌, 和法国, 李军鹏, 等, 2012. 甘肃武都区泥石流活动与降雨特征关系. 兰州大学学报(自然科学版), 48(6): 15—20.
- 张波, 2020. 西秦岭 NWW 向断裂系的几何图像与变形分配(博士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所.
- 张逸鹏, 郑文俊, 袁道阳, 等, 2021. 西秦岭晚新生代构造变形的几何图像、运动学特征及其动力机制. 地质力学学报, 27(2): 159—177.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等, 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究. 地球学报, 37(3): 277—286.
- 张永双, 任三绍, 李金秋, 等, 2023. 怒江构造混杂岩带多拉寺滑坡的易滑地质结构及高位启滑运动机制. 地球科学, 48(12): 4668—4679.
- 张永双, 石菊松, 孙萍, 等, 2009. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例. 地质力学学报, 15(2): 131—141.