

引用格式: 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 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 1071–1080. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222830

Citation: 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 [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1071–1080. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222830

西南山区典型地质灾害链成灾模式研究

铁永波^{1,2,3}, 张宪政^{1,2,3}, 龚凌枫^{1,2,3}, 高延超^{1,2,3}, 白永健^{1,2,3}, 徐伟^{1,2,3},
巴仁基^{1,2,3}, 李宗亮^{1,2,3}, 葛华^{1,2,3}

TIE Yongbo^{1,2,3}, ZHANG Xianzheng^{1,2,3}, GONG Lingfeng^{1,2,3}, GAO Yanchao^{1,2,3}, BAI Yongjian^{1,2,3}, XU Wei^{1,2,3},
BA Renji^{1,2,3}, LI Zongliang^{1,2,3}, GE Hua^{1,2,3}

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 610000;

3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站, 四川 成都 610000

1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, Sichuan, China;

3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, Sichuan, China

Research on the pattern of typical geohazard chains in the southwest mountainous region, China

Abstract: The southwest mountainous region in China is the worst-hit area due to the most developed geohazard chains. In order to better understand the pattern of the geohazard chains in this region, we analyzed the main control factors and characteristics of the geohazard chains based on 19 typical geohazard events in history. Three classification patterns, namely landslide-type, collapse-type, debris flow-type, and five typical hazard-inducing processes, were summarized. A typical hazard-inducing chain process in each model was selected for analysis. On this basis, we discussed the mechanism of the geohazard chain, the construction of a database and technical standard system, and the measures for preventing and controlling transboundary basin chain-type geohazards, aiming to provide a reference for the regional geohazard prevention and mitigation plan, and the major engineering projects' construction and people's safety in town.

Keywords: southwest mountainous region; geohazard chain; hazard-inducing mechanism; transboundary basin; risk control

摘要: 西南山区是中国地质灾害链最发育、成灾最严重的地区。为深入认识区域地质灾害链成灾模式, 文章在系统收集西南山区历史上 19 次典型重大灾害事件基础上, 分析了地质灾害链的主控因素及成灾特征, 总结了滑坡型、崩塌型、泥石流型 3 类灾害链分类模式及 5 种链式成灾过程, 并选择每一类中的典型地质灾害链成灾过程进行了剖析, 在此基础上对地质灾害链成灾机理研究、数据库构建、技术标准体系建设及跨界流域链式灾害风险防控机制构建等进行了展望, 提出了地质灾害链防范建议, 旨在为区域地质灾害防灾减灾规划、重大工程与城镇建设安全提供参考。

关键词: 西南山区; 地质灾害链; 成灾模式; 跨界流域; 风险管控

中图分类号: P642.22 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2022) 06-1071-10

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20222830

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221746); 国家自然科学基金 (U20A20110-01)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221746) and the National Natural Science Foundation of China (Grant U20A20110-01)

第一作者简介: 铁永波 (1979—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害形成机理与评价研究工作。

E-mail: tyongbo@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2022-09-27; 责任编辑: 范二平

0 引言

西南山区是中国构造活动最强烈、地貌演化最复杂、气候变化最敏感、高陡地形最发育的地区,区内地质内、外动力耦合作用强,是国内地质灾害最为发育的地区(彭建兵等,2020;殷跃平等,2021)。统计数据表明,截止到2021年底,西南山区统计在库的地质灾害隐患点约9.5万处,约占全国地质灾害隐患点总数的30%(铁永波等,2022)。从地质灾害隐患点分布数量上看,四川省最多,其次是云南省,地质灾害类型主要以滑坡(55630处)为主,约占西南山区地质灾害隐患点总数的58.5%(铁永波等,2022)。一些发育在高地貌部位的特大型地质灾害发生后,常形成跨国界、跨省界的次生链式灾害,影响范围广,成灾严重,给灾害风险管控带来极大难度(韩金良等,2007;殷跃平等,2021;尹福光等,2021)。西南山区一直以来都是国内系列工程规划建设的重点区,新中国成立后,从20世纪开始的滇藏公路、成昆铁路等到如今“十四五”期间规划实施的系列工程,都集中分布在西南高山峡谷区,同时,这一区域也是中国乡村振兴战略实施的重点地区(李滨等,2020;铁永波等,2021a;杨期祥,2022)。大量工程和临时设施建设及城镇发展必然会导致地质灾害承灾体数量激增,地质灾害发生后带来的潜在风险也会增大,给西南山区地质灾害潜在风险防控带来了新的挑战(黄润秋等,2007;殷跃平和王文沛,2020;亓星等,2022)。

地质灾害链是在灾害链的基础上命名而来,目前很多学者一致认为地质灾害链是因地质灾害发生后引发的一系列其他灾害现象,是地质灾害之间的相互运动形式或动力过程差异的转换结果,如地质灾害发生后堵塞江河形成堰塞湖,堰塞湖溃决后形成洪水灾害等(柴贺军等,1995;韩金良等,2007;Fan et al., 2019;殷跃平和王文沛,2020;崔鹏和郭剑,2021;尹云鹤等,2021)。考虑地质灾害链的空间尺度,有研究将其分为4个等级(韩金良等,2007):一级地质灾害链(全球级别的地质灾害链)、二级地质灾害链(区域地质灾害链)、三级地质灾害链(流域地质灾害链)、四级地质灾害链(单条冲沟地质灾害链)。研究认为,地质灾害链不同过程的转化在时间、空间和

因果关系上均存在密切联系,即后种灾害的发生是因前种灾害而直接引起(张永双等,2020;崔鹏和郭剑,2021)。受气候变化影响,西南高山峡谷区的地质灾害链呈频发趋势,对其研究及风险防范受到越来越多的关注(余瀚等,2014;殷跃平等,2021)。尤以2018年发生在西藏自治区江达县的白格滑坡为典型地质灾害链为代表,其成灾范围波及西藏、四川、云南三省(自治区),造成数十亿元的经济损失,波及范围达数百千米,影响极大(张永双等,2020);西藏米林县境内的色东普沟泥石流曾于2018年(两次)、2021年发生高位冰岩崩碎屑流,均堵断雅鲁藏布江形成堰塞湖,溃决洪水对下游基础设施造成破坏,是西南高山区高频地质灾害链的典型代表。国内许多学者在地质灾害链频发的雅鲁藏布江、金沙江等大江大河沿岸开展了地质灾害链的发育分布规律研究,探索了基于“空-天-地”一体化技术的地质灾害链早期识别,目前已初步形成相应的调查技术体系与研究方法,对地质灾害链的成因机制认识及防灾减灾起到了积极作用(李滨等,2020)。

目前对地质灾害链的主要诱发因素、成灾模式及评价方法等取得了初步的认识,提出了地质灾害链的级联效应、多米诺效应、连锁反应、诱发效应等特征,揭示了地质灾害链在演进中的灾情传递和放大过程,在考虑不同致灾因素和灾害链演进过程的基础上将地质灾害链的演进模式进行了总结分类,并提出了地质灾害链形成过程中的致灾环、激发环、损害环和断链环等基于时间段的过程模式(韩金良等,2007;刘建康等,2019;崔鹏和郭剑,2021)。虽然目前在地质灾害链的成因认识、成灾机制及调查技术方法等方面取得了一些进展(王天河等,2018;刘铮等,2020),但因西南山区地质灾害链控灾的内外动力耦合过程复杂、成灾模式多样,对其发育分布规律及形成机理的认识还有待进一步深入。

1 西南山区典型地质灾害链特征

文章通过收集近300年间西南山区发生过的19次典型重大地质灾害链事件,在其成因机制、成灾特征与模式系统分析的基础上,总结了区内地质灾害链的主控因素。

1.1 暴雨和强震是西南山区地质灾害链的主控因素

从诱发动力条件差异看, 西南山区地质灾害链诱发的动力条件可分为内动力型地质灾害链和外动力型地质灾害链 (白永健等, 2019; 秦宇龙等, 2021)。内动力型地质灾害链的发生主要受控于因地质构造活动引起的地震、断裂蠕变等导致地质灾害发生的过程, 如 2008 年汶川地震诱发的汶川县唐家山滑坡, 形成地震-滑坡-堰塞湖-洪水灾害链, 为典型内动力型地质灾害链。外动力型地质灾害链的受控因素相对较为复杂, 除了受常规的降雨和人类工程活动影响外, 还与高山峡谷区重力卸荷、高寒山区冻融等因素密切相关, 如 2018 年金沙江白格滑坡-堰塞湖-洪水灾害链、2000 年易贡滑坡-碎屑流-堰塞湖-洪水灾害链等, 为典型外动力型地质灾害链 (图 1; 殷跃平, 2000; 高杨等, 2020; 崔鹏和郭剑, 2021)。由内、外动力地质共同作用诱发的地质灾害链称为复合型地质灾害链, 如 2010 年四川省绵竹市清平乡地震-暴雨-滑坡-泥石流-堰塞湖的地质灾害链就是典型的内、外动力耦合型地质灾害链。

表 1 西南山区典型历史重大地质灾害链统计表

Table 1 Statistical table of typical geohazard chains in the southwest mountainous region

序号	地质灾害名称	发生日期	省份	市	震级 (M_s)	县	特征	成灾范围	诱因
1	磨岗岭滑坡	1786 年 6 月 1 日	四川	甘孜州	7.75	泸定县	堵江	跨县界	地震
2	叠溪滑坡	1933 年 8 月 25 日	四川	阿坝州	7.5	茂县	堵江	跨县界	地震
3	普福滑坡	1965 年 11 月 23 日	云南	昆明市		禄劝县	堵江	跨县界	暴雨
4	唐古栋滑坡	1967 年 6 月 8 日	四川	甘孜州		雅江县	堵江	跨县界成灾	天然
5	易贡滑坡	2000 年 4 月 9 日	西藏	林芝市		波密县	堵江	跨国界	冻融
6	天台乡滑坡	2004 年 9 月 5 日	四川	达州市		宣汉县	堵江	小范围	暴雨
7	唐家山滑坡	2008 年 5 月 12 日	四川	绵阳市	8.0	北川县	堵江	跨县界	地震
8	东河口滑坡	2008 年 5 月 12 日	四川	广元市	8.0	青川县	堵江	小范围	地震
9	响水沟泥石流	2009 年 7 月 23 日	四川	甘孜州		康定县	堵江	小范围	暴雨
10	文家沟泥石流	2010 年 8 月 13 日	四川	绵竹市			堵江	小范围	暴雨
11	红椿沟泥石流	2010 年 8 月 13 日	四川	阿坝州		汶川县	堵江	小范围	暴雨
12	普拉底泥石流	2010 年 8 月 18 日	云南	怒江州		贡山县	堵江	小范围	暴雨
13	采书组滑坡	2012 年 8 月 31 日	四川	凉山州		喜德县	堵江	小范围	暴雨
14	三转湾滑坡	2013 年 7 月 27 日	云南	昭通市		永善县	涌浪	小范围成灾	暴雨
15	大宁河滑坡	2015 年 6 月 24 日	重庆			巫山县	涌浪	小范围	暴雨
16	白格滑坡	2018 年 10 月 11 日	西藏	昌都市		江达县	堵江	跨省界	天然
17	色东普冰崩	2018 年 10 月 17 日	西藏	林芝市		米林县	堵江	跨国界	冻融
18	中堡滑坡	2020 年 7 月 25 日	重庆			武隆县	堵江	小范围	暴雨
19	半扇门泥石流	2020 年 6 月 17 日	四川	甘孜州		丹巴县	堵江	小范围	暴雨

1.2 地质灾害链具多样化空间成灾特征

由于西南山区地质灾害链形成过程中的链式环节复杂、类型多样, 从始发的原生地质灾害到终止的地质灾害均会形成差异明显的致灾过程, 在空间上具有成灾特点的多样性。通常情况下,

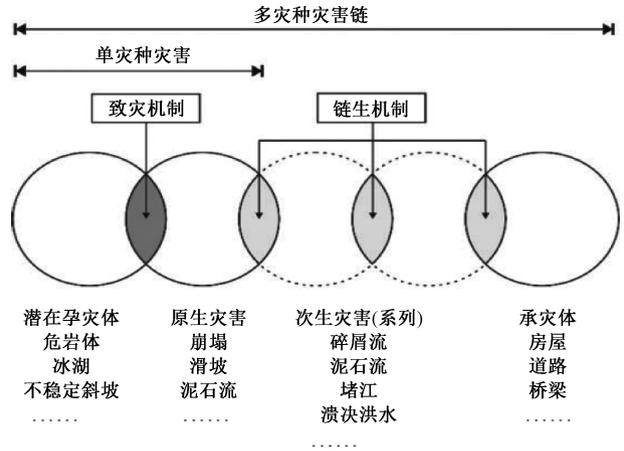


图 1 沟谷灾害链要素 (崔鹏和郭剑, 2021)

Fig. 1 Elements of the valley hazard chain (Cui and Guo, 2021)

虽然西南山区重大历史地质灾害链诱发动力条件复杂, 但根据 19 次历史灾害链事件统计表明, 暴雨和地震诱发的地质灾害链约占总数的 79%, 尤以暴雨控灾特征最为显著 (铁永波等, 2021b)。地质灾害链多集中发生在 5—9 月, 与汛期强降雨关系密切; 地震诱发的链式地质灾害与震级大于 $M_s 7.5$ 级及以上强震对应较好 (表 1)。

地质灾害链发生后, 原生灾害滑坡、崩塌、泥石流等灾害会在其直接影响区造成淤埋灾害, 具有小范围成灾特征。因原生灾害引发的次生溃决洪水除了直接对下游淹没区造成破坏外, 还会侵蚀下游河道岸坡, 导致河岸两侧基础设施遭受破坏,

引发岸坡失稳,进而诱发群发性崩塌、滑坡等地质灾害并呈现大范围成灾特征。

1.3 地质灾害链具有显著的跨界成灾特征

西南山区所处的地理位置及地形条件特殊,是许多大江大河流域的上游地区,巨大的地形高差导致灾害运动距离远,一旦形成链式灾害,其影响范围会波及下游数百甚至数千千米远,并造成灾害。如2000年易贡滑坡堵塞易贡藏布后形成堰塞湖,溃决洪水一直影响下游数千千米外的地区,具有典型的跨国界成灾特征,其影响范围极为罕见。2018年发生在西藏境内的白格滑坡堵塞金沙江后,形成的溃决洪水在下游四川省、云南省境内造成灾害,其影响范围远达数百千米,具有典型的跨省界成灾特征。

因此,西南山区地质灾害链具有影响区域跨国界、跨省界、跨县界等行政界线的显著特征。由于

不同行政界线之间的联动防灾减灾机制目前尚不成熟,在信息通报、联合防控及应急撤离等方面的机制还有待系统建立。特别是跨国界、跨省界这些行政单元之间的高效信息互通与联动机制缺乏,是目前地质灾害链风险控制中存在的难点。

2 西南山区典型地质灾害链成灾模式

因地质灾害链的诱发因素、原生灾害类型、链式转换过程及成灾模式均较复杂,给地质灾害链分类的统一性带来极大困难。考虑每次地质灾害链的形成过程都始于一个原生地质灾害,在不考虑地质灾害诱发条件的基础上,结合西南山区地质灾害链形成特征,按照原生地质灾害类型进行分类,可分为滑坡型灾害链、崩塌型灾害链及泥石流型灾害链(表2)。

表2 西南山区主要地质灾害链分类表

Table 2 Classification of main geohazard chains in the southwest mountainous region

灾害链类型	链状模式	形成过程	典型案例
滑坡型灾害链	滑坡-堰塞湖-洪水	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,影响范围可达数百千米甚至数千千米	西藏江达县沙江白格滑坡、四川泸定县大渡河摩岗岭滑坡灾害链
	滑坡-涌浪	滑坡发生后进入库区造成涌浪,冲击库岸建筑、河道船只等造成灾害,影响范围可达数千米至数十千米	重庆巫山县大宁河滑坡、云南永善县三转湾滑坡
崩塌型灾害链	崩塌-碎屑流/泥石流-堰塞湖-洪水	高位崩塌(冰岩崩)发生后形成碎屑流/泥石流,沿途铲刮松散土体冲出,堵塞下游主河形成堰塞湖,进而形成溃决洪水成灾,影响范围可达数十千米至数百千米	西藏林芝县色东普沟冰岩崩碎屑流
	冰崩-冰湖溃决-泥石流	岩崩、冰崩等发生后坠入冰湖后导致冰湖溃决,冰湖溃决洪水启动沿途松散土体形成泥石流,冲出后造成下游成灾,影响范围数十千米至数百千米	西藏聂拉木县嘉隆措冰湖溃决泥石流、波密县光谢措冰湖溃决泥石流灾害链
泥石流型灾害链	泥石流-堰塞湖-洪水	泥石流发生后堵塞主河形成堰塞湖,造成上游淹没成灾,堰塞湖溃决后洪水造成下游沿途成灾,影响范围数千米至数十千米	云南贡山县东月各河泥石流、四川丹巴县阿娘寨泥石流灾害链

2.1 滑坡-堰塞湖-溃决洪水灾害链成灾模式

西南山区历史强震频发,因地震诱发的同震大型滑坡极为发育,在西南的深切河谷区,高位斜坡受地形高差大、岩体破碎等影响,在强震作用下极易发生变形破坏,形成大规模滑坡并堵塞主河,形成堰塞湖,堰塞湖溃决后形成洪水对下游造成灾害(殷跃平,2000;许冲等,2010;孙萍等,2011)。2008年汶川8.0 M_s 强震触发数百处大型滑坡,其中造成堵江灾害链的不在少数,如唐家山滑坡发生后堵断岷江,形成长803 m、高82.65~124.40 m的堰塞坝,堰塞湖最大库容量高达3.2亿立方米,对下游沿江城市数十万人的生命财产安全造成威胁,后因处置得当成功解除威胁。1786年,四川省康定市发生7.7级强震,导致泸定县磨西镇摩岗岭发生滑坡,地震触发的摩岗岭

滑坡,约1.5亿立方米的岩石瞬间从高约800 m的山顶迅速滑下,滑坡彻底堵断大渡河并形成一道高约250 m的天然大坝,形成蓄水量多达13亿立方米的堰塞湖。大渡河被堵断近十天后发生溃决,数亿立方米的洪水冲起高达30多米高的巨浪汹涌而下,导致下游的今石棉县、峨边县及乐山市等沿河一带城镇、民房及农田被严重损毁,造成严重灾情。这类地震-滑坡-堵江堰塞湖-洪水灾害是发育在西南山区的滑坡型灾害链的典型代表(图2)。

2.2 滑坡-涌浪灾害链成灾模式

西南山区巨大地形高差带来的势能为水电站规划建设带来有利条件,高山峡谷区各类水电站建成后,因库区水位季节性消涨引发的地质灾害极具代表性,其中尤以三峡水电站库区地质灾害

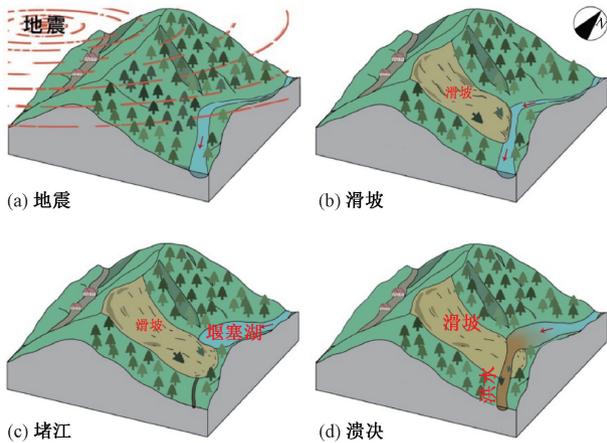


图 2 典型滑坡-堰塞湖-溃决洪水灾害链模式示意图

Fig. 2 Typical pattern graph of an earthquake - landslide - dammed lake - burst flood hazard chain

极为典型。研究表明, 三峡库区蓄水后的未来五年地质灾害呈急剧上升的趋势, 许多库区滑坡至今仍在变形, 库水位消涨对地质灾害的影响极为

显著 (殷跃平, 2004)。除受库水位影响外, 三峡库区地质灾害还受汛期强降雨的叠加作用, 特别是汛期长时间降雨导致土体含水量饱和, 坡体自重增加, 在库水位消涨过程中更容易产生变形破坏。滑坡发生后, 特别是高位滑坡因巨大的势能进入库区后, 会产生大规模涌浪, 对滑坡影响区域上下游均会造成破坏, 其影响范围可达数千米至数十千米。如 2015 年 6 月 24 日, 重庆市巫山县大宁河发生滑坡, 滑坡进入库区后形成 5~6 m 高的涌浪, 导致 13 艘无作业人员小型船只翻沉, 1 人失踪, 5 人受伤, 11 处码头钢缆不同程度受损的灾情; 2013 年 7 月 27 日, 云南昭通市永善县黄华镇黄坪村四社三转湾处发生山体滑坡, 约 12 万立方米滑坡体坠入金沙江后形成 20 多米高的巨浪, 瞬间将在四川凉山雷波县岩脚乡金沙村复建码头的十余人及正在江面行驶的一艘船只卷入江中。这类滑坡-涌浪灾害是发育在西南水库区的滑坡型灾害链的典型代表 (图 3)。

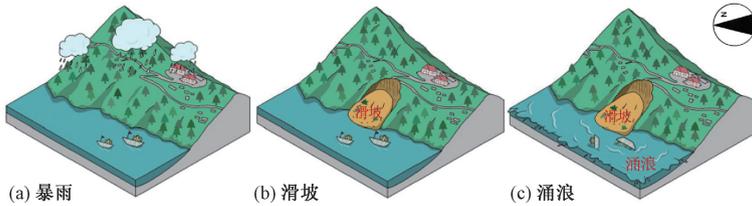


图 3 典型滑坡-涌浪灾害链模式示意图

Fig. 3 Typical pattern graph of a landslide-surge hazard chain

2.3 冰岩崩-碎屑流/泥石流-堰塞湖-溃决洪水灾害链成灾模式

在西南高山和极高山区, 因陡峻的地形、巨大的高差和较大的温差导致高位冰岩崩极为发育 (李滨等, 2020)。受温度升高、降雨、重力等因素影响, 高位冰川极易产生崩落并解体, 进而转化为高速碎屑流。夹带大量冰块、岩块的冰崩碎屑流在运动中沿途铲刮冰川前部冰碛土, 混合着冰体融水、沟道洪水等形成大规模泥石流冲出。因这类来自极高山区的链式灾害具有冲出规模大、运动速度快、运动距离远等特点, 在进入下游主河后往往会造成堵江, 并形成大规模堰塞湖, 随后堰塞湖溃决形成洪水, 可在其下游数百甚至数千千米范围内造成灾害, 破坏力极强 (殷跃平等, 2021; 申艳军等, 2022)。如 2018 年 10 月 17 日, 西藏林芝市雅鲁藏布江左岸色东普沟上游发生冰岩崩, 碎屑流铲刮流域内的冰碛土形成大规模泥

石流进入雅鲁藏布江, 造成雅鲁藏布江被堵断 50 余小时并形成堰塞湖, 随后堰塞坝前水位升高至坝后形成漫顶冲刷, 堰塞湖溃决后形成洪水, 对下游造成灾害 (李滨等, 2020; 刘铮等, 2020)。这类冰岩崩-泥石流-堵江堰塞湖-溃决洪水灾害是发育在西南极高山区的崩塌型灾害链的典型代表 (图 4)。

2.4 冰崩-冰湖溃决-泥石流灾害链成灾模式

因构造隆升作用强烈, 西南地区现代冰川极为发育, 冰川前端冰舌地形极为陡峻, 受冰裂缝、重力等因素影响, 失稳的冰块在脱离冰川后崩落至前端冰湖, 冰湖水体将冰崩冲击力传递至下游坝体, 对坝体形成强大冲击力, 极易导致冰碛湖坝体破坏而产生溃决。冰湖溃决后会在短时间内释放大量湖水冲出形成洪水, 洪水沿途铲刮冰碛土后形成泥石流, 可在下游数十千米范围内造成灾害, 因这类来自极高山区的冰崩诱发的冰湖溃

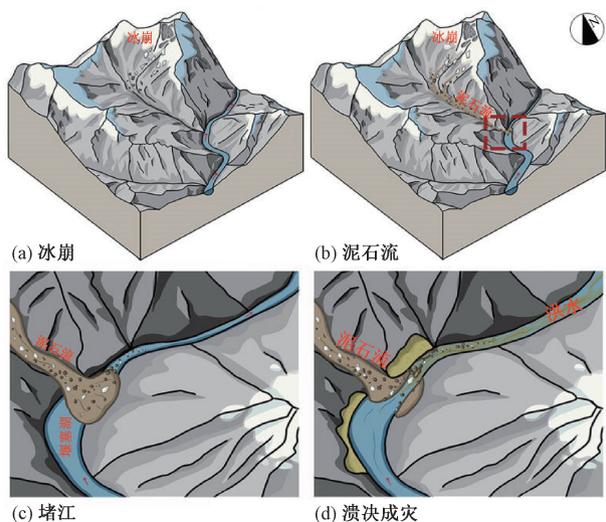


图4 典型冰岩崩-泥石流-堰塞湖-溃决洪水灾害链模式示意图

Fig. 4 Typical pattern graph of an ice rock fall-debris flow-dammed lake-outburst flood hazard chain

决泥石流链式灾害具有链式环节多、早期识别难、防范难度大等特点(陈晓清等, 2006; 秦宇龙等, 2021)。一些冰湖溃决泥石流进入下游主河后还会造成堵江, 并形成堰塞湖, 随后堰塞湖再溃决形成洪水, 对下游造成灾害(陈晓清等, 2006; 刘文等, 2021)。如西藏自治区聂拉木县境内冲堆普于2002年5月23日和6月29日先后两次溃决, 并诱发了大规模泥石流, 导致下游的水电站、中尼公路、农牧业生产、通讯设施等遭受严重破坏, 总共损失约750余万元, 给地方社会经济造成了严重的影响(陈晓清等, 2006)。这类冰崩-冰湖溃决-泥石流灾害是发育在西南极高山区的崩塌型灾害链的又一典型代表(图5)。

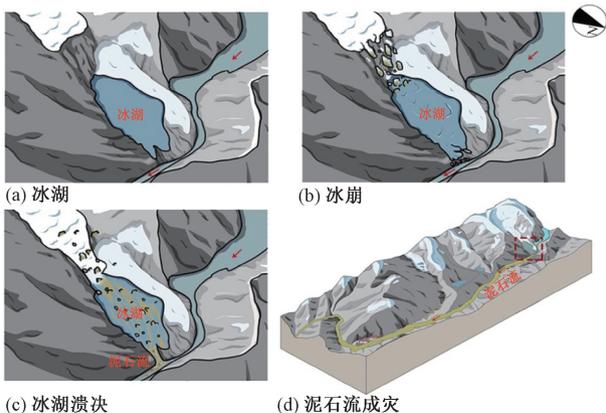


图5 典型冰崩-冰湖溃决-泥石流灾害链模式示意图

Fig. 5 Typical pattern graph of an ice fall-debris flow-dammed lake-outburst flood hazard chain

2.5 泥石流-堰塞湖-滑坡灾害链成灾模式

受特殊气候条件影响, 西南山区降雨集中, 且短时强降雨过程频繁, 因暴雨引发的地质灾害每年多达数千起(唐川, 2010)。在一些流域面积较大、汇流条件较好的流域, 强降雨会快速形成洪水, 启动流域内的松散物源并形成泥石流。通常情况下, 大规模泥石流进入主河后会堵断河道形成堰塞湖, 导致主河上游水位迅速抬升, 对上游形成回水淹没。当堰塞湖水位抬升至堰塞坝顶时, 便会形成漫坝溃决洪水, 这类洪水多会沿着泥石流堆积扇厚度相对较薄的一侧溃决, 通常情况下都是泥石流冲出的对岸一侧。当溃坝洪水集中从对岸一侧冲出时, 会对岸坡脚造成强烈侵蚀, 导致岸坡失稳并引发滑坡, 滑坡滑入主河后进一步堵塞河道, 形成更大的堰塞坝并形成堰塞湖, 堰塞湖溃决后洪水再造成更大灾害。如2020年6月17日, 四川省甘孜藏族自治州丹巴县半扇门乡梅龙沟受暴雨影响, 暴发大规模泥石流, 阻断小金川河并形成堰塞湖, 导致上游村庄和水电站被淹。随后, 堰塞湖从小金川河左岸一侧溃决, 洪水强烈冲刷左岸阿娘寨古滑坡坡脚, 导致滑坡发生整体变形和前缘滑动。这类暴雨-泥石流-堰塞湖-滑坡地质灾害链在时间和空间上呈现出典型的递进式特点, 是发育在西南高山峡谷地区泥石流型灾害链的典型代表(图6)。

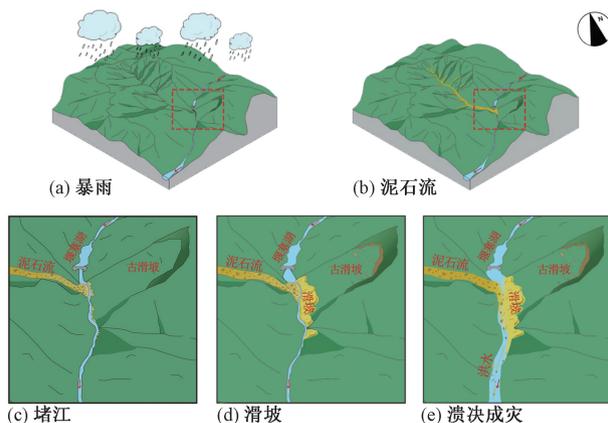


图6 典型泥石流-堰塞湖-滑坡灾害链模式示意图

Fig. 6 Typical pattern graph of a rainstorm-debris flow-dammed lake-landslide hazard chain

3 西南山区地质灾害链研究展望

受特殊地质环境条件影响, 西南山区是我国地质灾害链发育数量最多、类型最全的地区。虽

然在目前对西南山区地质灾害链的成因类型、演化模式及成灾特征等方面均有了深入的认识,但由于地质灾害链的孕灾条件复杂、控灾因素多样、成因机理复杂及早期识别难等问题,对其认识仍存在一些亟待深入调查和研究的问题,未来需要在以下一些方面加强研究(韩金良等, 2007; 崔鹏和郭剑, 2021; 殷跃平等, 2021)。

3.1 地质灾害链历史灾害数据库建设与发育分布规律研究

西南山区历史上曾发生过多起地质灾害链,但目前对历史地质灾害链发育规律把握不全面,未形成地质灾害链数据库,对地质灾害链的数量、类型及发育分布规律的系统总结与研究缺乏基础数据支撑,尤其是对地质灾害链的孕灾背景条件及主要控灾因素的认识程度有待提升(殷跃平和王文沛, 2020; 铁永波等, 2022)。因此,需要建立西南山区历史地质灾害链数据库,并结合区域地质条件对地质灾害链孕灾背景开展综合研究,在历史地质灾害链成灾规律总结的基础上分析其控灾条件,开展地质灾害链风险分区评价,揭示地质灾害链形成与活动断裂带、水系、区域性特殊成因易滑地层、地震烈度、降雨强度及人类工程活动等要素之间的关系,为西南山区城镇和重大工程规划建设提供科学依据。

3.2 基于多源遥感技术的地质灾害链识别体系构建

对地质灾害链而言,第一个地质灾害在什么地方对整个灾害链的识别极为重要,根据已有的研究成果看,链式环节中第一个地质灾害都发生在高位山体,这些地貌部位往往是无人区,交通条件极差,地面调查或勘查设备难以到达(孙萍等, 2011; 张永双等, 2020; 李滨等, 2020),如金沙江白格滑坡高差极大,交通条件差,一些常规的手段难以实现有效调查(图7)。

西南一些高山峡谷地区还因为海拔高、云雾多和冰雪覆盖厚等,光学遥感等手段也难以对其早期形变进行有效识别,而普通的无人机也难以飞抵这些区域,如四川省丹巴县半扇门镇梅隆沟泥石流物源启动区位于上游高海拔地区,植被覆盖好,云雾多,给调查带来极大难度(图8)。目前对地质灾害链进行有效识别的手段仍尚未被攻克,缺乏针对性的技术体系,急需建立基于多源综合遥感技术的不同类型特大地质灾害链早期识

别标志,实现对高山、极高山区隐蔽型地质灾害链潜在相互转化关键区段的时空预测。



图7 西藏金沙江白格滑坡灾害链现场

Fig. 7 Photo of the hazard chain caused by the Baige landslide in 2020



图8 2020年四川省丹巴县半扇门镇梅隆沟泥石流灾害链现场

Fig. 8 Hazard chain caused by the Meilong debris flow in 2020 in Danba County, Sichuan province

3.3 地质灾害链成因机制研究的理论方法体系构建

西南山区复杂的地质环境导致诱发地质灾害链的原生灾害源类型与成链模式多样,这些原生灾害的成因机制、动力学过程及成灾特征都有显著差异(许冲等, 2010; 崔鹏和郭剑, 2021)。同时,地质灾害链在形成过程中的多形态(固态-液态)、多过程(流-堵-溃)转化特征决定了其动力学过程的复杂性和综合性,目前在深入认识灾害链在每个环节的成因机理,尤其是定量的物理模型与数值模拟研究方面还相对较弱,将宏观的地质动力过程和微观的力学模型进行耦合研究还未达到量化标准,缺乏系统理论与方法的指导。因此,需要构建地质灾害链形成机理研究理论与技术体系,形成以地球系统科学理论为基础的多学科交叉理论与方法,实现地质灾害链研究的系统化与量化。

3.4 针对地质灾害链的调查、评价及监测预警等技术规范体系建设

虽然在西南山区常规地质灾害调查评价方面已有较为成熟的技术标准,但对地质灾害链这类形成部位高、隐蔽性强、成灾面广的特殊灾害类型,哪些调查技术是最有效的?哪些内容是调查的重点?哪些技术流程需要规范?等等,目前都还没有系统的规范与要求,给调查评价结果的科学性和统一性带来不便(申艳军等, 2022; 亓星等, 2022)。因此,下一步需要加强多类型灾害过程融合的系列地质灾害链技术标准体系建设,并形成规范,包括地质灾害链早期识别、调查评价、监测预警及风险区划等全过程的标准体系,从技术层面规范地质灾害链调查评价流程、内容及成果表达。

3.5 跨界流域特大地质灾害链调查评价与风险管控示范

地质灾害链发生后往往会造成跨行政区域(国界、省界、县界)成灾,如西藏自治区境内发生的金沙江白格滑坡堵江堰塞湖溃决后,对下游的四川省、云南省等造成灾害,形成跨省界的成灾过程。目前虽然各省(市、自治区)均有自己的地质灾害防控联动体系,但对于跨省界的地质灾害链防控,尚未形成有效的联动机制。如何对跨界成灾的地质灾害链进行有效风险管控,急需开展各类型地质灾害链的综合示范,一方面包括技术层面的地质灾害链早期识别、调查评价、风险区划等专业内容;另一方面还包括管理层面的跨行政边界地质灾害链风险联动,需要不同行政单元责任部门形成畅通的信息共享与应急响应机制,实现跨界流域的上下游联动、多部门协同的地质灾害链风险防控机制。

4 结论与建议

(1) 西南山区历史重大地质灾害链主要沿大江大河流域及强活动性断裂带分布,其诱发动力条件主要以暴雨和强震为主,西南山区地震频发区、暴雨中心区的大江大河流域将是地质灾害链防范的重点地区。

(2) 西南山区地质灾害链成灾模式在区域上具有显著差异,流域上游高山和极高山区需要重点防高位滑坡及冰岩崩等原生灾害诱发的链式效

应,大江大河中下游区域要重点防范溃决洪水灾害,灾害链风险防范需要有针对性的措施。

(3) 发育在西南大江大河流域无人区的地质灾害链具有极强的隐蔽型,其早期变形迹象不易被发现,需要通过提高无人区多源遥感的监测与识别,同时加大对重点流域沿岸的地质灾害调查力度,提前开展地质灾害链风险识别。

(4) 西南山区地质条件复杂,地质灾害链的形成机理研究需要加强物理模型实验和数值模拟,强化定量研究,同时要推进地质灾害链精细化风险调查区划与管控体制构建,形成跨行政单元联动的地质灾害链风险管控体系。

References

- BAI Y J, NI H Y, GE H, 2019. Advances in research on the geohazard effect of active faults on the southeastern margin of the Tibetan plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (6): 1116-1128. (in Chinese with English abstract)
- CHAI H J, LIU H C, ZHANG Z Y, 1995. Landslide dams induced by Dixi earthquake in 1933 and its environmental effect [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 6 (1): 7-17. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X, CUI P, YANG Z, et al., 2006. Debris Flows of Chongdui Gully in Nyalam County, 2002: Cause and Control [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28 (5): 776-781. (in Chinese with English abstract)
- CUI P, GUO J, 2021. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster Chain [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 53 (3): 5-18. (in Chinese with English abstract)
- FAN X M, SCARING G, KORUP O, et al., 2019. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts [J]. *Reviews of Geophysics*, 57 (2): 421-503.
- GAO Y, LI B, GAO H Y, et al., 2020. Progress and issues in the research of impact and scraping effect of high-elevation and long-runout landslide [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 510-519. (in Chinese with English abstract)
- HAN J L, WU S R, WANG H B, 2007. Preliminary study on geological hazard chains [J]. *Earth Science Frontiers*, 14 (6): 11-23. (in Chinese with English abstract)
- HUANG R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in china since the 20th century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26 (3): 433-454. (in Chinese with English abstract)
- LI B, GAO Y, WAN J W, et al., 2020. The Chain of the major geological disasters and related strategies in the Yalu-Zangbu river canyon region [J]. *Hydropower and Pumped Storage*, 6 (2): 11-14, 35. (in Chinese with English abstract)
- LIU J K, ZHANG J J, GAO B, et al., 2019. An overview of glacial lake

- outburst flood in Tibet, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41 (6): 1335-1347. (in Chinese with English abstract)
- LIU W, WANG M, ZHU S N, et al., 2021. An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: a case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32 (5): 29-39. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong landslide in Tibet under strong earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (4): 471-480. (in Chinese with English abstract)
- PENG J B, WANG Q Y, ZHUANG J Q, et al., 2020. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (5): 714-730. (in Chinese with English abstract)
- QI X, XIU D H, CHENG G W, et al., 2022. Real time filtering method and application of landslide deformation monitoring data [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 53 (7): 129-138. (in Chinese with English abstract)
- QIN Y L, WU J L, ZHAN H Y, et al., 2021. Discussion on the correlation between active fault and geological disaster distribution in the Ganzi area, western Sichuan province, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (3): 463-474. (in Chinese with English abstract)
- SHEN Y J, CHEN S W, ZHANG L, et al., 2022. High-altitude initiation, dynamic collapse and phase transformation of mountain snow-ice melt geological disaster chain [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44 (2): 643-656. (in Chinese with English abstract)
- SUN P, YIN Y P, CHEN L W, 2011. Numerical analysis of the failure mechanism of the Donghekou rockslide in the Wenchuan earthquake region with FLAC [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 38 (5): 87-91. (in Chinese with English abstract)
- TANG C, 2010. Activity tendency prediction of rainfall induced landslides and debris flows in the Wenchuan earthquake areas [J]. *Journal of Mountain Science*, 28 (3): 341-349. (in Chinese with English abstract)
- TIE Y B, XU W, LIANG J T, et al., 2021a. Characteristics of Kazila mountain landslide and its mitigation measures on the Sichuan-Tibet Railway [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 48 (5): 129-136. (in Chinese with English abstract)
- TIE Y B, RUAN C F, YANG S, et al., 2021b. Characteristics and mechanism of geological disasters induced by "5·25" rainstorm in Gongshan county of Yunnan province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 41 (2): 10-15, 24. (in Chinese with English abstract)
- TIE Y B, XU W, XIANG B L, et al., 2022. The thoughts on construction of "double-control of point and zone" system of geological hazard risk in southwest China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33 (3): 106-113. (in Chinese with English abstract)
- WANG T H, TANG M G, LI Y J, et al., 2018. Study on risk assessment of regional geohazard: a case study of Xuanhan region [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 49 (11): 157-164. (in Chinese with English abstract)
- XU C, DAI F C, XU X W, 2010. Wenchuan earthquake-induced landslides: an overview [J]. *Geological Review*, 56 (6): 860-874. (in Chinese with English abstract)
- YANG Q X, 2022. Comprehensive analysis of strength parameter on slip soil in large deep landslide [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 48 (4): 61-66. (in Chinese with English abstract)
- YIN F G, PAN G T, SUN Z M, 2021. Genesis and evolution of the structural systems during the cenozoic in the Sanjiang orogenic belt, Southwest China [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (2): 265-282. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y H, HAN X, DENG H Y, et al., 2021. Framework of risk reduction measurements for earthquake - landslide - debris flow disaster chain in southwest China [J]. *Journal of Catastrophology*, 36 (3): 77-84. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2000. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 27 (4): 8-11. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2004. Research progress of major geological disasters and their prevention in the Three Gorges reservoir area [J]. *Geotechnical Engineering World*, 7 (8): 20-26. (in Chinese)
- YIN Y P, WANG W P, 2020. A dynamic erosion plowing model of long run-out landslides initialized at high locations [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39 (8): 1513-1521. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, LI B, ZHANG T T, et al., 2021. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32 (3): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- YU H, WANG J A, CHAI M, et al., 2014. Review on research methods of disaster loss accumulation and amplification of disaster chains [J]. *Progress in Geography*, 33 (11): 1498-1511. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y S, BA R J, REN S S, et al., 2020. An analysis of geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha river, Tibet [J]. *Geology in China*, 47 (6): 1637-1645. (in Chinese with English abstract)

附中中文参考文献

- 白永健, 倪化勇, 葛华, 2019. 青藏高原东南缘活动断裂地质灾害效应研究现状 [J]. *地质力学学报*, 25 (6): 1116-1128.
- 柴贺军, 刘汉超, 张倬元, 1995. 一九三三年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应 [J]. *地质灾害与环境*, 6 (1): 7-17.
- 陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等, 2006. 聂拉木县冲堆普 2002 年泥石流成因分析及防治对策 [J]. *冰川冻土*, 28 (5): 776-781.
- 崔鹏, 郭剑, 2021. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策 [J]. *工程科学与技术*, 53 (3): 5-18.
- 高杨, 李滨, 高浩源, 等, 2020. 高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题 [J]. *地质力学学报*, 26 (4): 510-519.

- 韩金良, 吴树仁, 汪华斌, 2007. 地质灾害链 [J]. 地学前缘, 14 (6): 11-23.
- 黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 26 (3): 433-454.
- 李滨, 高杨, 万佳威, 等, 2020. 雅鲁藏布江大峡谷地区特大地质灾害链发育现状及对策 [J]. 水电与抽水蓄能, 6 (2): 11-14, 35.
- 刘建康, 张佳佳, 高波, 等, 2019. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述 [J]. 冰川冻土, 41 (6): 1335-1347.
- 刘文, 王猛, 朱赛楠, 等, 2021. 基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析: 以金沙江上游典型堵江滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 32 (5): 29-39.
- 刘铮, 李滨, 贺凯, 等, 2020. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 471-480.
- 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等, 2020. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制 [J]. 地质力学学报, 26 (5): 714-730.
- 元星, 修德皓, 程关文, 等, 2022. 滑坡变形监测数据的实时过滤方法及应用 [J]. 水利水电技术, 53 (7): 129-138.
- 秦宇龙, 吴建亮, 詹涵钰, 等, 2021. 川西甘孜地区活动断裂与地质灾害分布相关性探讨 [J]. 地质力学学报, 27 (3): 463-474.
- 申艳军, 陈思维, 张蕾, 等, 2022. 冰雪型地质灾害链高位萌生、动力溃散及物相转化过程剖析 [J]. 冰川冻土, 44 (2): 643-656.
- 孙萍, 殷跃平, 陈立伟, 2011. 汶川地震区东河口滑坡破坏机制 FLAC 模拟分析 [J]. 水文地质工程地质, 38 (5): 87-91.
- 唐川, 2010. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测 [J]. 山地学报, 28 (3): 341-349.
- 铁永波, 徐伟, 梁京涛, 等, 2021a. 川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策 [J]. 水文地质工程地质, 48 (5): 129-136.
- 铁永波, 阮崇飞, 杨顺, 等, 2021b. 云南省贡山县“5·25”暴雨诱发地质灾害的特征与形成机制 [J]. 水土保持通报, 41 (2): 10-15, 24.
- 铁永波, 徐伟, 向炳霖, 等, 2022. 西南地区地质灾害风险“点面双控”体系构建与思考 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 33 (3): 106-113.
- 王天河, 汤明高, 李云杰, 等, 2018. 区域地质灾害危险性评价研究: 以宣汉地区为例 [J]. 水利水电技术, 49 (11): 157-164.
- 许冲, 戴福初, 徐锡伟, 2010. 汶川地震滑坡灾害研究综述 [J]. 地质论评, 56 (6): 860-874.
- 杨期祥, 2022. 大型深层滑坡滑带土力学强度参数综合选取研究 [J]. 铁道勘察, 48 (4): 61-66.
- 尹福光, 潘桂棠, 孙志明, 2021. 西南三江构造体系及演化、成因 [J]. 沉积与特提斯地质, 41 (2): 265-282.
- 殷跃平, 2000. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J]. 水文地质工程地质, 27 (4): 8-11.
- 殷跃平, 2004. 三峡库区重大地质灾害及防治研究进展 [J]. 岩土工程界, 7 (8): 20-26.
- 殷跃平, 王文沛, 2020. 高位远程滑坡动力侵蚀犁切计算模型研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 39 (8): 1513-1521.
- 殷跃平, 李滨, 张田田, 等, 2021. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 32 (3): 1-8.
- 尹云鹤, 韩项, 邓浩宇, 等, 2021. 中国西南地区地震-滑坡-泥石流灾害链风险防范措施框架研究 [J]. 灾害学, 36 (3): 77-84.
- 余瀚, 王静爱, 柴玫, 等, 2014. 灾害链灾情累积放大研究方法进展 [J]. 地理科学进展, 33 (11): 1498-1511.
- 张永双, 巴仁基, 任三绍, 等, 2020. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析 [J]. 中国地质, 47 (6): 1637-1645.