

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11005

铁永波,葛华,高延超,白永健,徐伟,龚凌枫,王家柱,田凯,熊小辉,范文录,张宪政,2022. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望. 沉积与特提斯地质,42(4):653-665. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11005

TIE Y B, GE H, GAO Y C, BAI Y J, XU W, GONG L F, WANG J Z, T K, XIONG X H, FAN W L, ZHANG X Z, 2022. The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th Century. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4):653-665. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.11005

二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望

铁永波^{1,2,3}, 葛华^{1,2,3}, 高延超^{1,2,3}, 白永健^{1,2,3}, 徐伟^{1,2,3}, 龚凌枫^{1,2,3},
王家柱^{1,2,3}, 田凯^{1,2,3}, 熊小辉^{1,2,3}, 范文录^{1,2,3}, 张宪政^{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 611734; 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)

摘要:西南地区发育有我国近30%的地质灾害隐患点,是我国地质灾害成因最复杂、数量最多、灾情最严重的地区之一,为更好地了解西南地区地质灾害研究历史和防灾减灾工作,本文在系统梳理西南地区地质灾害发育分布规律及危害特征现状基础上,简要回顾了二十世纪以来西南地区地质灾害研究的主要历程,并分三个主要阶段对所取得的进展和成效进行了总结。在此基础上,对未来西南地区地质灾害的主要研究趋势进行了展望,提出了西南地区地质灾害研究应重点关注高山极高山区高位远程地质灾害识别技术、特大地质灾害链形成机理与风险防控、基于地质灾害孕灾背景大数据智能挖掘的风险动态评价等,可供西南地区地质灾害研究与防治参考。

关键词:西南地区;地质灾害研究历程;链式地质灾害;趋势与展望

中图分类号:P596;P632

文献标识码:A

The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th Century

TIE Yongbo^{1,2,3}, GE Hua^{1,2,3}, GAO Yanchao^{1,2,3}, BAI Yongjian^{1,2,3},
XU Wei^{1,2,3}, GONG Lingfeng^{1,2,3}, WANG Jiazhu^{1,2,3}, TIAN Kai^{1,2,3},
XIONG Xiaohui^{1,2,3}, FAN Wenlu^{1,2,3}, ZHANG Xianzheng^{1,2,3}

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611734, China; 3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, China)

Abstract: Nearly 30% of geological hazards in China are distributed in Southwest China, which is one of the areas with the most complex causes, the largest number and the most serious disasters in China. In order to better understand the research history and hazard mitigation work of geological hazards in Southwest China, this paper

收稿日期: 2022-02-21; 改回日期: 2022-05-09 责任编辑: 郭秀梅 科学编辑: 白永健

作者简介: 铁永波(1979—),男,博士,教授级高级工程师,博士生导师,中国地质调查局杰出地质人才,研究方向为地质灾害评价与防治。E-mail: tyongbo@mail.cgs.gov.cn

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20221746和DD20190640)、国家自然科学基金(U20A20110-01)联合资助

briefly reviews the main process of geological hazard research in Southwest China since the 20th century on the basis of systematically combing the development and distribution law and hazard characteristics of geological hazards in Southwest China. The progress and results are summarized in three main stages. On this basis, the main research trends of geological hazards in Southwest China in the future are prospected, and it is proposed that the research of geological hazards in Southwest China should focus on the high-location and long-distance geological hazard identification technology in high and extremely high mountain areas, the formation mechanism and risk prevention and control of super large geological hazard chain, and the risk dynamic evaluation of big data intelligent mining based on the pregnant background of geological hazards, which can be used as a reference for the research and prevention of geological hazards in Southwest China.

Key words: Southwest China; research process of geological hazard; geological hazard chain; trends and prospects

0 引言

西南地区是我国七大自然地理分区之一,在行政区划上包括重庆、四川、贵州、云南及西藏共五个省、市、自治区,主要包括青藏高原南部、云贵高原、四川盆地及丘陵等地形单元及雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、金沙江等流域。已有研究认为,青藏高原至上新世末以来累计上升约 3500 ~ 4000m,且是一个多阶段的、不等速的非均变过程(李吉均等,1979;钟大赉等,1996;尹福光等,2021)。受其影响,西南地区的构造隆升和河流下切作用极为强烈,活动断裂发育、地震频发、岩体破碎、地形陡峻,为地质灾害的形成提供了有利场所。西南地区季风环流复杂,是我国降水区域差异最大、变化最复杂的地区之一,局部大雨及暴雨多发,为地质灾害的发生提供了有力的水动力条件。在内外动力耦合作用下,西南地区地质灾害多发、频发,成为阻碍区域和社会发展的一个突出问题(徐勇等,2021)。在过去的一百余年间,经过几代地质灾害研究学者的大量探索与研究,基本查明了西南地区地质灾害的发育分布规律、提升了对成灾模式的认识水平、破解了诸多地质灾害防灾减灾难题、培养了大批地质灾害调查研究人员,为西南地区系列国家重大战略实施、城镇建设及山区百姓生产生活安全起到了重要的保驾护航作用。在新时期生态文明思想的科学自然观指导下,西南地区地质灾害调查评价、监测预警、工程治理、避让搬迁及综合研究力度得到加大,地质灾害防灾减灾取得了显著成效(刘传正,2019;张永双,2021)。

地质灾害的发生、发展是一个复杂的系统过程,对地质灾害的认识也同样要经历一个漫长且曲折的过程。随着科学发展和对地质灾害的深入认

识,人们逐渐意识到了地质灾害发生的复杂性和不确定性,随着成渝双城经济圈、川藏铁路、雅鲁藏布江下游水电站等国家重大战略的规划实施,如何从系统科学视角深化对西南地区地质灾害规律认识,创新科学理论与技术,为国家重大战略实施提供科学的地质安全风险评价与防控建议,是新时期地质灾害调查研究的重点。因此,系统了解西南地区地质灾害研究历程,以史为鉴,从中总结规律与经验,为未来西南地区地质灾害研究提供科学的决策建议,助力乡村振兴战略与区域地质安全风险防控,是本文撰写的初衷。

1 西南地区地质灾害特征

西南地区地处印度洋板块和欧亚板块碰撞结合的核心部位,区域构造活动强烈,地表隆升和河流下切使得西南地区高山峡谷发育,特别是高山、极高山区发育的高位远程地质灾害及其链式灾害效应在全球都独具特色。同时,青藏高原及其东缘、东南缘地区活动断裂众多,如喜马拉雅推覆带、高原南北向地堑系、龙门山断裂带、鲜水河-安宁河-小江断裂带等,是大震—巨震的孕震场所,区内历史上发生过震级超过 $M_s 8.0$ 级及以上地震就多达 8 次,强震导致同震地质灾害和震后地质灾害发育并持续数十年,也造就了西南地区地质灾害孕灾背景特殊性。根据最新地质灾害调查结果,截至 2021 年 12 月底,西南地区在库地质灾害隐患点共 94666 处,约占全国地质灾害点总数的 30%(铁永波等,2022)。从地质灾害数量上看,四川省地质灾害点数量最多,其次是云南省。从地质灾害类型上看,滑坡 55630 处、崩塌 16712 处、泥石流 17769 处、风险斜坡 2490 处、地面塌陷 814 处,其它 1251 处(表 1)。

表1 西南各省地质灾害隐患点数量及其潜在威胁特征统计表

Table 1 Statistical of number and threat characteristics of geological hazards in each provinces of Southwest China

省份	灾害类型及数量(处)						
	灾害点总数	滑坡	崩塌	泥石流	地面塌陷	风险斜坡	其他
重庆	14463	11993	2123	82	156		109
四川	30239	18550	5708	5845	135		1
云南	25234	18501	2471	3410			852
贵州	10025	4842	3091	114	523	1377	78
西藏	14705	1744	3319	8318		1113	211
合计	94666	55630	16712	17769	814	2490	1251

注:数据来源于西南五省、市、自治区地质灾害风险普查统计数据,数据截止时间为2021年底。

为更好地认识西南地区地质灾害发育分布规律,将中型及以上地质灾害进行了统计分析。从宏观上看,西南地区地质灾害的空间分布规律受区域地质构造、水系及人类活动等控制明显,如川西地区地质灾害主要受活动断裂控制,沿龙门山、鲜水河、安宁河断裂带集中发育,西藏境内地质灾害主要沿金沙江和雅鲁藏布江水系集中发育,重庆境内地质灾害主要集中发育在三峡库区,云南省地质灾害主要集中分布在滇西三江流域(图1)。从主要灾种类型上看,滑坡主要集中分布在川东、川南、渝东北及滇西地区,这主要受区域性特殊易滑地层控制,如川东红层地区因砂泥岩互层特殊结构而成为滑坡易发的一个重要原因,渝东北的巴东组地层、川南的西格达组地层等都因其特殊结构而成为滑坡易发的一个关键要素。崩塌主要集中分布在川东、渝东北及黔西等地,前两者主要受红层岩体结构控制,后者主要受碳酸盐岩溶作用影响。泥石流主要集中分布在川西北及川南(岷江、大渡河、安宁河流域)、藏东南雅鲁藏布江流域、滇西(怒江流域、澜沧江流域),这几个区域泥石流发育除了受强震、冰川侵蚀和岩体强变质作用提供充足物源外,还受太平洋和印度洋暖湿气流影响提供充足的水动力条件。

总体上看,西南地区地质灾害具有几个显著且独特的特点:一是西南地区地质灾害类型多样,除常见的崩塌、滑坡、泥石流三类常见地质灾害外,几乎所有类型的地质灾害在区内皆有发育。二是高位远程地质灾害及其灾害链效应突出,这些地质灾害主要分布在高山、极高山区或深切河谷区的坡体上部,如在雅鲁藏布江流域的冰岩崩或冰湖溃决引发的滑坡、泥石流堵江灾害链,如2000年我国西藏自治区波密县境内的易贡滑坡堵塞雅鲁藏布江后

形成堰塞湖,坝体溃决后形成的洪水对下游印度及孟加拉国等造成灾害,形成跨国界链式灾害,影响范围及程度都极大;2019年西藏境内金沙江白格滑坡发生二次滑动后,堵塞金沙江并形成堰塞湖,堰塞坝溃决后,洪水在下游四川省及云南省境内造成灾害,形成跨省界链式灾害。三是区域性、群发性地质灾害极为典型,主要是因强震引发的地质灾害数量多且持续活跃时间长,西南地区历史强震活跃,导致震区岩体破碎,一次强震引起的地质灾害活跃时间可长达数十年,如四川省汶川 $M_s8.0$ 级强震使得该区域内泥石流至今依然很活跃,此外,还有2013年四川芦山县 $M_s7.0$ 级地震、2014年云南省鲁甸县 $M_s6.5$ 级地震等,诱发了大量区域性群发地质灾害,给地质灾害防治带来了极大的难度,这也是西南地区地质灾害成灾机理复杂、防治难度大的主要原因之一。四是诱发西南地区地质灾害的内外动力条件耦合过程复杂,除了来自区域构造隆升、强震等内动力作用外,西南地区复杂气候环境形成的局部暴雨和持续性降雨、人类工程活动等外动力条件极为活跃,为不同成因地质灾害的形成提供了重要基础,如内外动力叠加作用后的高原冰湖溃决型泥石流、高山以及高山区冰岩崩、深切河谷区斜坡卸荷变形造成的滑坡及链式灾害、库区水位涨落引起的滑坡等,为区内地质灾害成因机制的认识带来了极大的挑战。

2 西南地区地质灾害主要研究历程

二十世纪以来,随着科学技术进步和社会经济发展,特别是遥感技术的应用丰富了西南地区地质灾害早期识别与调查研究手段,地质灾害调查精度也从最初的1:10万区划向如今的1:1万风险调查评价转变,人们对西南地区地质灾害的认识经历了

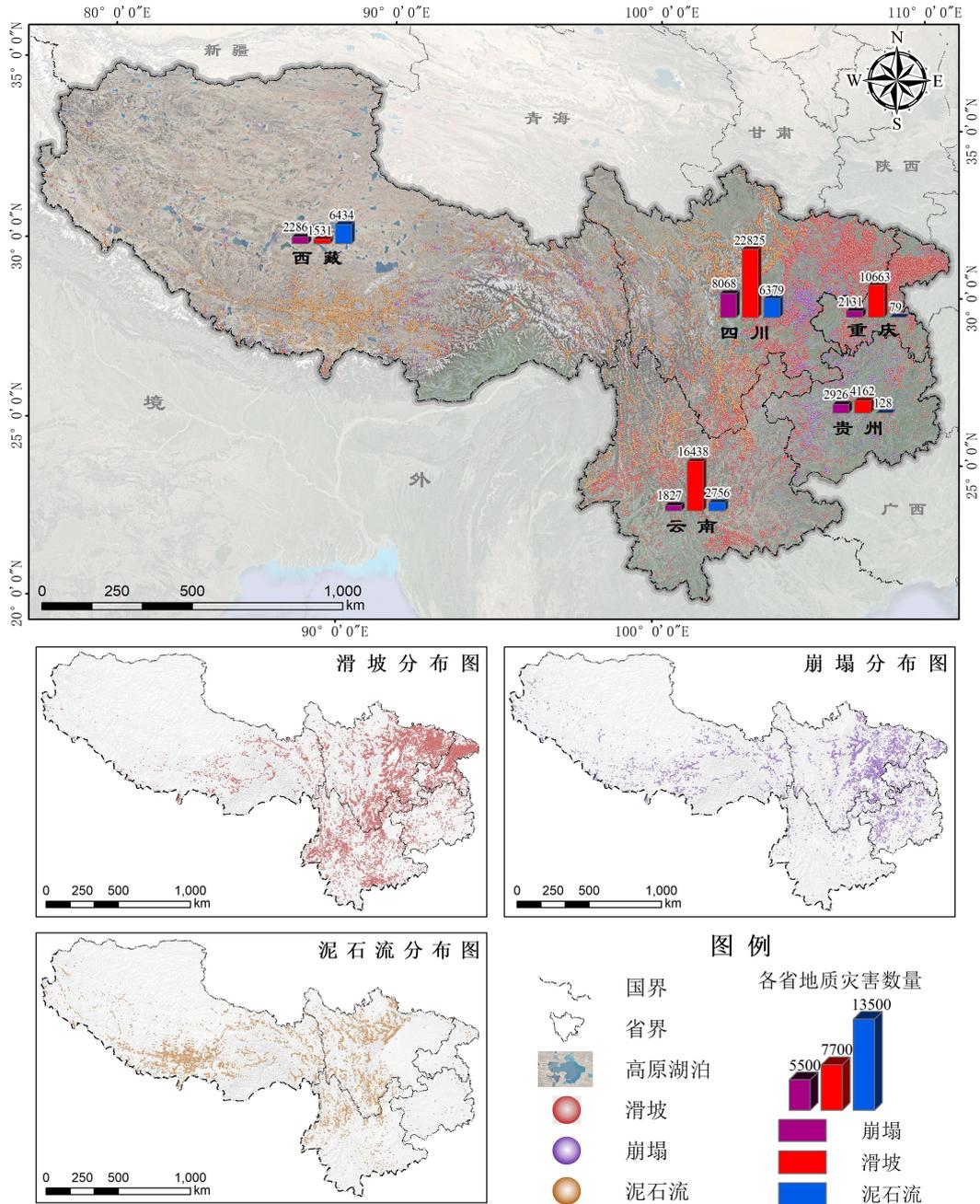


图1 西南地区中型及以上规模主要地质灾害隐患点分布图

Fig. 1 Major types of geological hazards of medium and above scale in Southwest China

从不了解到系统把握的过程。从时间进程上看,西南地区地质灾害调查研究大致可分为初步探索、逐渐提升、系统认识三个主要阶段。

2.1 地质灾害初步探索阶段(1950—1969年)

新中国成立前,西南地区对地质灾害的关注较少,仅通过一些地方志或相关史料对重大地质灾害事件进行记载,如甘孜州志中就记载了1786年泸定县摩岗岭滑坡灾害引发次生洪水灾害的事件(甘孜藏族自治州地方志编纂委员会,2009)。国内对地

质灾害的专门研究最早始于二十世纪50年代,新中国成立后,我国进入了经济全面建设阶段,特别是1950年始建的川藏公路、1958年始建的成昆铁路是西南地区标志性的重大工程,在工程前期选线和建设过程中,山区地质灾害问题引起了铁路和公路部门的关注,如1786年(清乾隆五十一年)四川省康定市境内发生 $M_s7.5$ 级地震,诱发大渡河右岸摩岗岭滑坡堵断大渡河10天后形成堰塞湖,随后溃决洪水席卷下游沿途城镇,并造成重大人员伤亡(表1)。

针对西南地区的地质灾害,相关学者开展了探索研究,1954年,马君寿(1954)在《水力发电》上发表了第一篇关于西南地区水电工程建设中的滑坡研究论文《坝址区滑坡问题的处理方法》,1959年,吕儒仁等(1959)在《科学》杂志上发表了第一篇关于西南地区泥石流研究论文《四川大型泥石流》,这些文章的发表从科学的视角揭开了地质灾害的神秘面纱。为有效防范地质灾害对工程建设带来的危害,原铁道部在成都组建铁科院西南研究所并成立泥石流防治研究组(王恭先等,1991),针对泥石流防治技术进行专门攻关。随后,地质、冶金、水利等部门及部分高等院校都相继开展了与地质灾害有关的研究,关于西南地区地质灾害的研究论文先后开始发表,标志着西南地区地质灾害研究进入科学的轨道(马君寿,1954;唐邦兴,1980;王恭先等,1991)。

对西南地区滑坡的系统研究始于60年代,通过

对铁路沿线一千余个中、大型规模滑坡的研究,完成了对滑坡的成因、结构、时代等类型划分,并逐渐拓展到区域性滑坡的分类评价,在此基础上基于土工实验等手段对西南最为常见也最有代表性的降雨、地震诱发型滑坡开展了重点研究,为贵昆铁路、成昆铁路沿线大型滑坡的成因机制分析与防治提供了重要基础,探索了沉井抗滑挡墙、抗滑桩、垂直钻孔群排水等滑坡治理技术方法,为后来滑坡的防治体系构建积累了宝贵经验(王恭先等,1991)。1961年,中国科学院在云南省东川市建立了西南地区第一个泥石流观测站,开始对泥石流的形成机理及运动过程等开展系统研究,并获得了许多泥石流发生时的一手观测数据,形成了东川蒋家沟泥石流动力学计算经验公式等,为后来的云南蒋家沟泥石流防治工程设计提供了重要参考,也标志着对西南地区地质灾害研究从特征向机理研究迈出了一大步(李械等,1979)。

表2 二十世纪七十年代以前西南地区发生的部分典型重大地质灾害统计表

Table 2 Statistics of some typical geological hazards in Southwest China before 1970s

灾害点名称	发生时间	省份	市	县	诱因	灾情	资料来源
磨岗岭滑坡	1786年6月1日	四川	甘孜州	泸定县	地震	遇难人数)10000	张御阳,2013
东河泥石流	1891年7月5日	四川	凉山州	喜德县	暴雨	1000余人遇难	李秀珍等,2005
南门湾滑坡	1905年6月9日	重庆	重庆	巫溪	暴雨	90余人遇难	https://wenku.baidu.com/view/ade6a7ae7dd184254b35eefdc8d376eeafaa17c3.html
叠溪滑坡	1933年8月25日	四川	阿坝州	茂县	地震	2500人遇难	柴贺军等,1995
沙坝沟滑坡	1935年12月22日	云南	昭通市	巧家县	暴雨	200余人遇难	https://wenku.baidu.com/view/ade6a7ae7dd184254b35eefdc8d376eeafaa17c3.html
中沟泥石流	1957年6月29日	四川	凉山州	喜德县	暴雨	84人遇难	李秀珍等,2005
烂泥沟滑坡	1965年11月20日	云南	昭通市	巧家县	暴雨	280人遇难	文宝萍等,2021
普福滑坡	1965年11月23日	云南	昆明市	禄劝县	暴雨	444人遇难	程先锋等,2015

受当时经济和科技发展水平的限制,对地质灾害还缺乏足够的调查研究经验,故这一时期对地质灾害的研究多针对某一种地质灾害类型或单个地质灾害的形态、性质等基本特征,多以定性评价或一些简单的常规土工实验手段为主,对地质灾害的防治手段也仅开展了一些探索,但这些成果切实解决了工程建设中地质灾害防治中的许多实际问题,形成的许多防治技术、经验公式等仍沿用至今,在今天的地质灾害动力学参数计算与防治工程设计中仍是难以超越的经典(唐邦兴,1980;王恭先等,1991)。

2.2 地质灾害逐渐提升阶段(1970—1999)

新中国成立后,西南地区地质灾害防治越发受到重视,1989年1月4日至8日,由原国家科委、地质矿产部共同发起和组织的“全国地质灾害防治工作会议”召开,标志着地质灾害防治进入了新阶段。为配合国际减灾十年行动,1990年,原地矿部、国家计委、国家科委联合向各省(区、市)和有关部门印发了地矿部组织编制的《全国地质灾害防治工作规划纲要(1990—2000年)》,为全国地质灾害调查研究提供了重要指导。在此基础上,1999年国土资源部第4号部长令颁布实施《地质灾害防治管理办

法》,并开始实行建设用地地质灾害危险性评估制度,随后,西南五省市也出台相应的地质灾害防治管理办法,地质灾害的调查评估、监测预警、工程治理等体系建设开始大力推进。

二十世纪70年代至末期,西南地区铁路、公路及水电站等建设过程中遭遇的地质灾害危害问题凸显,其中以成昆铁路泥石流灾害最为典型。1981年7月8日,四川省甘洛县利子依达沟发生泥石流,冲毁成昆铁路大桥并造成300余人遇难,146人受伤,直接经济损失2000余万元(图2),这些重大地质灾害的发生给铁路和公路的安全运营敲响了警钟(李械等,1990;杜榕桓,1986)。1982年,原铁道部联合多家单位开展了铁路沿线泥石流调查评价、形成机理、监测预警及工程治理等专题研究,并对西南地区铁路泥石流系统摸底建档,这一时期极具特色的铁路泥石流研究取得了系统性的成果,成效显著,《铁路泥石流沟判别、警报、防治、机理的研究》也因其其在铁路地质灾害防灾减灾中的很好应用成效获得1991年“国家科技进步二等奖”(谭炳炎,2005)。

铁路泥石流的研究带动了地质灾害学科研究理论与方法的进步,为半量化地质灾害危险性评价奠定了重要基础(杜榕桓等,1981;谭炳炎等,1981,2005;陈俊虎等,1982;沈寿长等,1984;易顺民等,1996;殷跃平,1997,1998)。据统计,1984年以前,川藏公路全线平均每年断通164天以上,其中1036条泥石流沟、419处滑坡及1525处崩塌共威胁近3200千米公路运行安全,成为川藏公路安全运行的最突出问题(谢荣尧,1987;沈寿长等,1996;唐邦

兴等,1996;游勇等,1997)。此外,宝成铁路、陇海铁路等也在不同程度遭受地质灾害破坏。针对川藏公路和成昆铁路沿线的地质灾害问题(表3),相关部门针对性地成立了专门的地质灾害调查研究机构并开展针对性的地质灾害观测和模拟实验研究(姚一江,1985;陈循谦,1985;吕儒仁,1986;崔鹏,1991;唐川等,1991;谢洪,1992)。

在这一时期形成了系列地质灾害基础理论方法和针对性的勘察、设计及防治技术标准,区域地质灾害规律研究也得到加强,并基于观测研究成果开展了地质灾害监测预警研究,培养了一批专业地质灾害研究技术力量(杜榕桓等,1987;李鸿琏等,1989;章书成,1990;刘希林等,1993;崔鹏等,1991;殷跃平等,1994;蒋忠信等,1994;唐晓春,1995;杜榕桓等,1995;徐永良,1995;殷跃平等,1996;唐川等,1999)。地质灾害频发的问题也引起了国土资源系统的重视,1999年,原国土资源部第4号部长令颁布实施的《地质灾害防治管理办法》首次以法规的形式明确了地质灾害防治责任,提出了“以防为主,防治结合”的方针,同时开展地质灾害高易发县1:10万比例尺地质灾害调查与区划及汛期地质灾害排查等工作,如1999年开展试点县地质灾害调查区划等,为地质灾害群测群防体系的建立奠定了重要基础,这也标志着西南地区地质灾害防治工作进入了一个新的时期。同时,对区域地质灾害的发育分布规律研究也得到了政府部门重视,在前地矿部“六五”攻关项目中,专门成立“西南西北山地崩滑灾害研究”项目开展专项调查研究,为西南地区地质灾害研究奠定了重要基础(王恭先等,1991)。

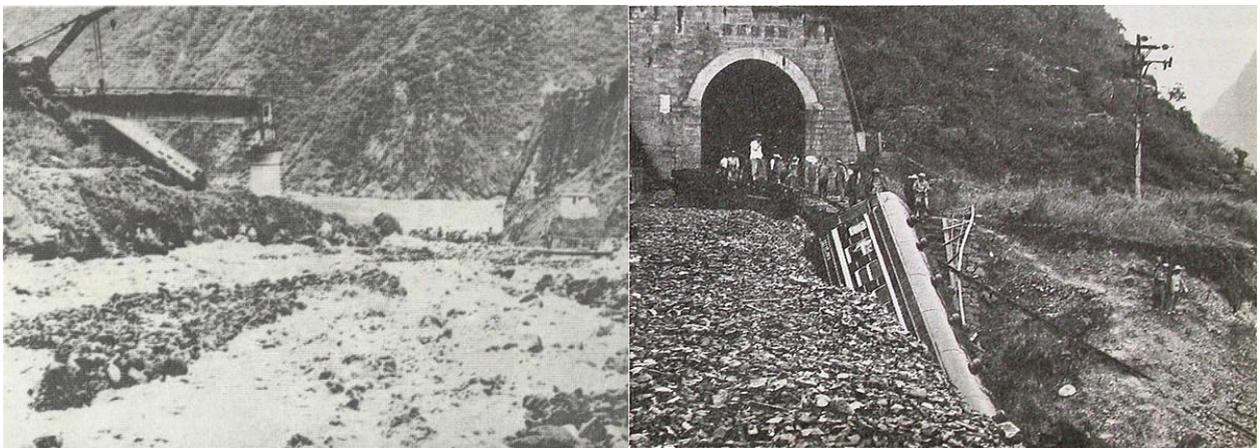


图2 1981年四川省甘洛县利子依达沟泥石流冲毁成昆铁路(引自中国山洪灾害防治网,1981)

Fig. 2 The debris flow of Lizi Yida gully in Ganluo County, Sichuan Province destroyed the Chengdu-Kunming railway in 1981

随着认识的深入,科学家们意识到了地质灾害影响因素的复杂性特点,并开始尝试从与地质灾害有关的影响因素入手对其进行系统分析,开展了基于多学科理论与方法的融合研究探索,尤其是把区域性规律视为一定自然条件组合下的产物,并与西南地区地质构造、地震、降雨、气候及人类经济活动等内外动力有机地联系在一起,对西南地区地质灾害的发生、发展、分类、分区等,提出了有益的见解(李德基,1996)。同时,在从定性研究向定量研究方面有了较大的转变,基于力学模型构建和数值模拟的定量研究有了较大进展,基础研究和防治技术的研究也有了飞跃式发展,基于遥感技术的新方法也开始得到应用,开拓了地质灾害预测及评价的方向。系统性和宏观性是这一时期地质灾害研究的最主要特点,形成了对地质灾害区域发育规律、成因机制、致灾模式、预测预报及工程防治等研究的系统性成果,为深入认识西南地质灾害发育规律及定量评价起到了重要作用。

2.3 地质灾害系统认识阶段(2000至今)

本世纪以来推动西南地区地质灾害系统认识进程的有三个重大标志性事件:一是以自然资源部门为主的多尺度地质灾害调查评价,系统掌握了区域地质灾害家底,极大地提升了对区域地质灾害规律的认识水平;二是三峡库区地质灾害防治,是地质灾害理论与防治技术相得益彰的重要助力,培养了一大批国内知名的地质灾害专家;三是汶川震区地质灾害防治,更新了人们对已有地质灾害的认识水平,极大地推动了特大型地质灾害机理研究与防治技术的进步。

进入21世纪后,以自然资源部门为主导的西南地区地质灾害系统性调查大范围铺开,对区域性和重点地区的地质灾害规律、机理及防治研究得到极大加强(唐邦兴,2000;崔鹏等,2003,2004;黄润秋,2003,2005;程谦恭等,2004;陈晓清等,2006;陈红旗,2007)。随着西南地区地质灾害高易发县市1:10万地质灾害调查与区划工作的推进(国土资源部地质环境司等,2003;乔建平等,2000;唐川等,2001),遥感与GIS技术在地质灾害调查评价中也得到广泛应用(唐川等,2001;欧敏等,2005;刘洪江等,2005;张东明等,2011)。到2002年底,重庆市完成了三峡库区15个区县地质灾害综合调查与监测预警系统建设,四川省完成了古蔺县等22个县市地质灾害调查与区划,贵州省完成了大方县等27个县

市地质灾害调查与区划,云南省完成了宁蒗县等22个县市地质灾害调查与区划(国土资源部地质环境司等,2003)。2003年国务院公布的《地质灾害防治条例》为地方主管职能部门推进相关工作奠定了重要的法律依据,标志着地质灾害综合防治体系逐步走向规范化。1:10万地质灾害调查与区划基本摸清了威胁到人民生命财产安全的地质灾害分布及特征,为区域地质灾害规律认识及针对性的地质灾害成因机制研究奠定了重要基础(黄润秋,2007;崔鹏,2007;陶云等,2009)。同时,地质灾害群测群防体系也得到了系统构建。在这样的背景下,由地方国土资源部门牵头推进地质灾害调查评价、危险性评估、群测群防体系构建、工程防治及避让搬迁等工作进展顺利,地质灾害防治成效凸显(殷跃平,2004;季伟峰等,2007)。2005年,基于县市的1:5万地质灾害较详细调查在全国开展三个试点县工作,其中包括了四川省丹巴县和云南省新平县。随后,该项工作在西南地区地质灾害高易发县陆续铺开,仅“十三五”期间就完成了西南地区405个县市地质灾害较详细调查工作。随着2020年西藏自治区74个县市地质灾害较详细调查工作的完成,标志着西南地区地质灾害家底清查工作告一个段落。

三峡库区地质灾害防治是西南地区地质灾害系统防治拉开帷幕的重要标志,自三峡水电站工程开工建设以来,库区地质灾害问题愈发突出,2001年,国务院启动三峡库区地质灾害防治,库区地质灾害工程治理、搬迁避让、监测预警等综合防治措施全面推进,到2019年底,通过第二期和第三期地质灾害防治,累计工程治理崩塌滑坡465处,基于3049处监测预警点的系统监测预警网络基本建成(汪华斌等,1998;张加桂,2001;殷跃平,2002)。通过三峡库区地质灾害防治,创新了以链子崖危岩等为代表的系列地质灾害防治技术方法和监测预警体系,研发了多种装备,培养了一大批专业人才,对西南地区地质灾害综合防治技术水平的提升具有重要意义(何太蓉等,2004;殷跃平等,2004;陈剑等,2005)。

2008年5月12日发生在四川省的里氏8.0级汶川大地震是推动西南地区地质灾害系统研究的另一个重要转折点,汶川地震诱发的大量同震滑坡、崩塌等次生地质灾害不仅造成大量人员伤亡与财产损失,还导致震区在未来十余年间地质灾害依旧频发,特别是汶川震区泥石流的高频、大规模等特



图3 金沙江白格滑坡形成链式地质灾害(徐伟摄)

Fig. 3 The Baige landslide in Jinsha River forms a chain geological hazard (Photo taken by Xuwei)

点颠覆了对传统地质灾害的认识,难以用传统泥石流流动力学经验公式进行计算的(殷跃平,2008;黄润秋等,2008;Tang等,2012;Fan等,2019、2021;花利忠等,2008;铁永波,2009;谢洪等,2009;许强等,2010;陶舒等,2015;乔建平等,2016)。在这样的背景下,对震区地质灾害的重新认识和防治被提到了前所未有的高度,针对震后地质灾害研究的一些新理论和新思路在这一时期得到很好的创新和实践,特别是在震区泥石流防治设计标准更新、设计理念创新等方面取得了新的突破,形成了一系列针对震区泥石流的新型防治技术,对震区地质灾害形成机制、成灾模式、物质输移规律及长期灾害效应认识等方面有了系统的认识,在全国乃至全球都产生了极大的影响力,极大地推动了西南地区地质灾害理论研究及防治方法进步(Huang et al., 2013;黄润秋等,2010、2011;殷跃平等,2014、2017;许强等,2010;许冲等,2008、2010;唐川,2010;崔鹏,2011;孙萍等,2011;乔建平等,2016)。

地质灾害在多致灾因素耦合下的致灾过程往往超出人们的预料,特别是一些极具西南特色的高位远程地质灾害及其引发的链式效应充分体现了西南地区地质灾害成因机理的复杂性。如2018年发生在金沙江西藏境内的白格滑坡形成链式地质

灾害,对下游四川省、云南省境内造成巨大影响,波及范围达数百公里(图3)。21世纪以来,对已发现的地质灾害隐患已基本实现风险可控,学者们的目光开始转向隐蔽性强、常规调查手段难实现、成灾范围广的重大地质灾害及其链式效应,近年来取得了较多的进展,特别是遥感技术在高位远程地质灾害的识别与调查方面得到了较好的应用,在地质灾害链分类、成灾模式及动力过程模拟等方面也有了深入的认识(崔鹏等,2021;殷跃平,2000;王成华等,2002;靳德武等,2004;康志成等,2004;陈晓清等,2004;陈宁生等,2006,2010;许强等,2008;刘春玲等,2010)。相关研究对西南地区重大工程区与重点流域地质灾害风险防范、重大地质灾害早期识别及防治技术研究奠定了重要基础,有力推动西南地区地质灾害从“摸家底”向“控风险”转变,向“类白格滑坡”的跨省界流域链式地质灾害形成机理与风险防范研究转变,极大地推动了学科理论的发展(许强等,2012,2020;游勇等,2012;张永双等,2013,2019,2020,2021,2022;何雨晴等,2016;黄润秋等,2017;殷跃平等,2020;李滨等,2020;崔鹏等,2021;尹云鹤等,2021;刘文等,2021;朱赛楠等,2021)。这一时期对西南地区不同类型灾害的区域分布规律、成因机制及主要成灾模式的认识水平明显提升,大量的地质灾害原位实验、室内物理模型实验和数值模拟手段的针对性和科学性更强,地质灾害研究从定性向定量转变取得了长足进步,形成了从调查评价-监测预警-风险评估-防控技术融合的地质灾害防控技术体系。特别是在航空技术飞速发展的背景下,基于多源数据的“空-天-地”一体化技术在地质灾害领域得到广泛应用,InSAR、光学遥感、机载LiDAR等新技术极大提升了对西南高山峡谷地区地质灾害的识别与调查精度,为西南地区地质灾害调查从高精度向精细化调查迈进奠定了重要基础(许强等,2010;赵聪等,2021;王家柱等,2021)。

表3 汶川地震诱发的部分典型灾难性同震滑坡统计表

Table 3 Some typical catastrophic coseismic landslides induced by Wenchuan earthquake

灾害点名称	省份	市	县	遇难人数	资料来源
王家岩滑坡	四川	绵阳	北川县	1600	王根龙等,2009
北川中学滑坡	四川	绵阳	北川县	700	董金玉等,2011
石板沟滑坡	四川	广元市	青川县	200	殷跃平,2008
唐家山滑坡	四川	绵阳	北川县	100	殷跃平,2008
东河口滑坡	四川	广元市	青川县	780	孙萍等,2010

3 西南地区地质灾害研究展望

经过几代地质人的努力,对西南地区地质灾害的研究已取得了长足进步,在地质灾害理论方法体系构建、应用实践等方面均取得了明显成效,对西南地区城镇、重大工程及百姓的生命财产安全保护起到了极为重要的作用。随着全国新一轮西南地区地质灾害风险普查工作的全面完成,西南地区已开展400个县市1:5万地质灾害风险普查(其中重庆市41个、四川省122个、贵州省88个、云南省75个、西藏自治区74个)将对区域地质灾害隐患风险底数有更为系统地掌握,“从注重灾后救助向注重灾前预防转变、从减少灾害损失向减轻灾害风险转变”的防灾减灾理念将为西南地区的高效地质灾害防灾减灾起到重要作用(自然资源部,2021)。但是,西南地区地质灾害形成及成灾过程的复杂性也是摆在科学家们面前的客观难题,特别是对揭示地质灾害的控灾条件、成因机制及成灾模式,解决“地质灾害隐患在哪里”、“灾害何时发生”等防灾减灾中关注的关键问题,还有很长的路要走,需要从地球系统科学的视角提升内外动力耦合作用下西南地区地质灾害的成因机理认识水平,破解对高位地质灾害调查与识别技术、重大链式地质灾害风险防控技术、地质灾害监测预警模型等方面存在的薄弱环节。

3.1 区域地质灾害的内外动力耦合孕灾机制研究

西南地区地震、降雨、冰川活动、冻融风化及人类工程活动等控灾的内外动力极为复杂,这些控灾因子在时间和空间上还存在多种耦合作用,故对区域地质灾害规律的系统总结与成因机制认识仍存在一定难度,尚未形成系统的区域性总结成果。一方面要加强西南地区地质灾害规律总结研究并深入分析内外动力耦合作用下的控灾机制,形成不同类型地质灾害成灾模式,为成因机制认识提供基础。另一方面要加强构建西南地区地质灾害孕灾背景数据库并形成系列图集,在“地质大数据”基础上开展地质灾害分布规律与相关孕灾背景数据的智能挖掘与分析,实现西南地区地质灾害趋势快速研判。

3.2 地质灾害风险动态区划研究

随着西南地区国家多项重大战略的密集部署和实施,如何在地质灾害高易发的西南地区通过科学的地质灾害风险评价为规划选址提供依据意义

重大。目前已初步实现1:5万县域尺度地质灾害风险普查,也探索了1:1万更高精度的重点区地质灾害风险评价,并初步形成了相应的方法体系,风险评价已向风险管控迈进。对更大的区域尺度而言,如何根据不同的孕灾背景条件而选取不同的合理指标和模型开展地质灾害风险评价与区划,需要在地质背景分析的基础上探索新的思路。下一步要加强西南地区多地貌单元、多孕灾背景及多尺度地质灾害风险区划模型构建,形成考虑不同孕灾背景、不同地貌单元的不同精度地质灾害风险评价与区划方法,实现基于地质灾害点数量变化的风险区划结果动态更新,为区域重大战略规划过程中的相对“安全岛”确定提供科学依据。

3.3 高山、极高山区高位地质灾害早期识别技术

随着近年来遥感技术的飞速发展,基于光学影像识别、InSAR监测、无人机航拍等多源遥感技术已在地质灾害识别与调查中得到广泛应用,很大程度上提高了对西南复杂山区地质灾害的早期识别能力。但由于西南山区地形地貌极为复杂,许多高位远程地质灾害多发育在高山、极高山地区及高陡河谷坡肩部位,在冰川、冰雪及高寒冻融作用下形成高位远程地质灾害,不但灾害规模大、危害范围广,而且隐蔽性极强,难以通过常规的调查技术对其进行识别与调查,急需在多源遥感技术上实现新的突破。西南地区未来地质灾害识别的重点对象应聚焦高山和极高山地区的冰岩崩、冰湖、高位滑坡及泥石流物源识别与调查技术创新,除了识别这类灾害的变形特征、确定其分布位置、评价其潜在规模外,还要预测其活动趋势,评估其潜在的链式效应及影响范围,还要在高山和极高山地区地质灾害遥感调查技术和方法上进行思路、技术创新和装备研发,并形成一系列技术规范,为这类地质灾害风险防控决策提供科学参考。

3.4 西南特大地质灾害链风险防控研究

经过自然资源主管部门的多轮调查评价、监测预警、避让搬迁及工程治理等综合防治手段,那些有直接威胁对象的地质灾害风险已基本可控,目前造成重大灾害的往往是链式地质灾害,但由于地质灾害链隐蔽性极强、成因机制复杂,目前尚未形成成熟的调查研究方法,故对这类高位远程地质灾害的机理研究仍是一个难点,在很大程度上限制了对这类灾害的有效防范。特别是类似雅鲁藏布江这类跨国界流域、金沙江这类跨省界流域的地质灾害

链风险防范急需开展深入研究。从技术层面看,需要加强对特大型高位远程地质灾害的形成机理研究,揭示地质灾害在不同阶段的运动机制规律,提出链式灾害成灾模式,构建链式地质灾害监测预警技术体系,并形成完善的理论方法。从管理层面看,跨界流域链式地质灾害风险防范需要相关影响的地区之间建立联动防控机制,在地质灾害风险形成前做好相应的防范预案,在灾害风险形成后能实现空间和时间上的灾情信息及时发布与共享。不管是技术层面还是管理层面的视角,如何实现对地质灾害的多学科交叉研究与风险的多地区联动配合将是下一步攻关的重点方向。

3.5 地质灾害监测预警技术方法创新与预警模型智能优化研究

“十三五”期间西南地区累计建成普适性地质灾害监测预警点5万余处,“十四五”期间对区域性地质灾害的实时监测“天网”会基本建成,对地质灾害监测预警的准确率提升将会起到重要作用。但由于西南地区地质灾害孕灾背景极为复杂,不同地区的地质和降雨条件差异性极大,加之不同类型灾害的成灾机理差异,对不同类型地质灾害监测预警技术与设备研发仍存在一些卡脖子问题。随着地质灾害海量监测数据的获取,如何针对不同地质灾害差异特征建立针对性的预警模型,充分融入人工智能分析技术,实现对地质灾害变形特征的快速分析与预警模型智能优化是下一步要重点攻关方向。同时,要继续加强对崩塌的监测技术研究与设备研发,解决目前崩塌发生时临灾预警时间短而缺乏有效设备的难题。进一步创新泥石流智能监测预警技术,从传统数理统计分析向智能图像识别方向转变,提高泥石流监测预警的精准度。

4 结语

(1)西南地区地质灾害数量约占全国总数量的1/3,地质灾害类型多样,主要以滑坡、崩塌、泥石流三类地质灾害为主,是我国地质灾害高易发区,也是我国区域性地质灾害和重大地质灾害频发区,地质灾害孕灾背景复杂、成灾机制多样,为区域地质灾害防治带来极大困难。二十世纪以来,相关研究形成的西南地区地质灾害防治技术标准及经验公式等在全国其它地方得到广泛推广和应用,引领了地质灾害学科发展与技术进步,在我国地质灾害防灾减灾史上具有举足轻重的作用。

(2)围绕工程建设的地质灾害防灾减灾是推动西南地区地质灾害理论和方法进步的重要动力,从早期的“川藏公路”、“成昆铁路”、“三峡水电工程”,再到如今的“川藏铁路”、“雅下水电工程”等一系列国家重大工程的规划实施,地质灾害研究都聚焦重大工程防灾减灾而开展,地质灾害研究也经历了从解决实际问题到理论与应用并重,从早期对地质灾害的初步认识到如今的系统掌握,并形成了在不同时期对不同工程建设防灾减灾的系列思路与技术,也为如今地质灾害综合防治体系的更成熟和完善奠定了重要基础。

(3)西南地区地质灾害防灾减灾已开始从地质灾害救助向地质灾害风险控制转变,在地质灾害防治技术方面也形成了基于光学遥感解译、InSAR 监测、机载 LiDAR 测绘、地面调查、地下探测等手段的“空-天-地”一体化综合调查体系,推动西南地区地质灾害防灾减灾进入新阶段。据不完全统计,“十三五”期间累计建成5万余处地质灾害监测预警点,群测群防员数量多达10万余人,庞大的地质灾害防治体系建设取得了显著成效。但随着乡村振兴等国家重大战略的实施,山区城镇与工程建设对地质环境的扰动不可避免,西南地区仍是未来全国地质灾害防治的重点地区,加大区域性地质灾害系统防治和重点工程区地质灾害综合治理是今后防灾减灾的重点。

致谢:论文撰写过程中得到了重庆市地质环境监测总站、四川省国土空间生态修复与地质灾害防治研究院、贵州省地质环境监测院、云南省地质环境监测院及西藏自治区地质环境监测总站的大力支持,博士研究生卢佳燕、鲁拓、宁志杰,硕士研究生李光辉、向炳霖、杨昶、李果等参与了论文中的文献收集与整理及图、表编制与统计工作,在此一并感谢。

参考文献(References):

- Fan X, Scaringi G, Korup O, et al., 2019. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts [J]. *Reviews of Geophysics*, 57:421-503.
- Huang R Q, Fan X M, 2013. The landslide story [J]. *Nature Geoscience*, 6:325-326.
- Tang C, van Asch T W J, Chang M, et al., 2012. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: the combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms[J]. *Geomorphology*. 139/140:559-576.

- 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]. 地质灾害与环境保护,6(1):7-17.
- 常鸣,唐川,李为乐,等,2012. 汶川地震区绵远河流域泥石流形成区的崩塌滑坡特征[J]. 山地学报,30(5):561-569.
- 陈红旗,2007. 哀牢山中段滑坡灾害类型及其变形失稳模式[J]. 地学前缘,14(6):112-118.
- 陈剑,杨志法,李晓,2005. 三峡库区滑坡发生概率与降水条件的关系[J]. 岩石力学与工程学报,24(17):3052-3056.
- 陈俊虎,丁玉寿,1982. 成昆线利子达达泥石流[J]. 铁道建筑(12):14-18.
- 陈宁生,邓明枫,胡桂胜,等,2010. 下西南干旱山区泥石流危险性特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版),42(S1):1-6.
- 陈宁生,张飞,2006. 2003年中国西南山区典型灾害性暴雨泥石流运动堆积特征[J]. 地理科学,26(6):701-705.
- 陈晓清,崔鹏,冯自立,2006. 滑坡转化泥石流起动的的人工降雨试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,25(1):106-116.
- 陈晓清,李泳,崔鹏,2004. 滑坡转化泥石流起动的研究现状[J]. 山地学报,22(5):562-567.
- 陈循谦,1985. 小江流域的严重地质灾害——泥石流[J]. 水土保持通报,5(2):40-43.
- 程谦恭,张倬元,崔鹏,等,2004. 中部“砥柱”锁固平面旋转切向层状岩质滑坡启动力学机理与稳定性判据[J]. 岩石力学与工程学报,23(16):2718-2725.
- 程先锋,祝传兵,齐武福,等,2015. 云南省禄劝县普福滑坡形成条件、发展趋势与防治对策[J]. 矿产与地质,29(3):395-401.
- 崔鹏,1991. 泥石流起动的条件及机理的实验研究[J]. 科学通报,36(21):69-74.
- 崔鹏,2009. 我国泥石流防治进展[J]. 中国水土保持科学,7(5):7-13+31.
- 崔鹏,2011. 汶川地震山地灾害形成机理与风险控制[M]. 北京:科学出版社:60-78.
- 崔鹏,2014. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展,33(2):145-152.
- 崔鹏,陈晓清,柳素清,等,2007. 风景区泥石流防治特点与技术[J]. 地学前缘,14(6):172-180.
- 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.
- 崔鹏,马东涛,陈宁生,等,2003. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. 第四纪研究,23(6):621-628.
- 崔鹏,韦方强,谢洪,等,2003. 中国西部泥石流及其减灾对策[J]. 第四纪研究,23(2):142-151.
- 崔鹏,杨坤,朱颖彦,等,2004. 西部山区交通线路的泥石流灾害及减灾对策[J]. 山地学报,22(3):326-331.
- 董金玉,杨国香,杨继红,等,2011. 汶川地震灾区滑坡的成因及典型实例分析[J]. 华北水利水电学院学报,32(5):10-13.
- 杜榕桓,1986. 我国泥石流研究进展[J]. 山地研究,4(4):249-254.
- 杜榕桓,康志成,陈循谦,等,1987. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆:科学文献出版社重庆分社.
- 杜榕桓,李鸿琰,唐邦兴,等,1995. 三十年来的中国泥石流研究[J]. 自然灾害学报,4(1):64-73.
- 杜榕桓,章书成,1981. 西藏高原东南部冰川泥石流的特征[J]. 冰川冻土,2(3):10-16+81-82.
- 甘孜藏族自治州地方志编纂委员会,2009. 甘孜州志:1991—2005[M]. 成都:四川人民出版社.
- 国土资源部地质环境司、宣教中心,2003. 中国地质灾害与防治[M]. 北京:地质出版社.
- 何太蓉,杨达源,2004. 三峡库区武隆县滑坡灾害特点及成因机制[J]. 长江流域资源与环境,13(4):399-402.
- 花利忠,崔胜辉,李新虎,等,2008. 汶川大地震滑坡体遥感识别及生态服务价值损失评估[J]. 生态学报,28(12):5909-5916.
- 黄润秋,2010. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京:科学出版社.
- 黄润秋,2003. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 第四纪研究,23(6):640-647.
- 黄润秋,2005. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J]. 地球科学进展,20(3):292-297.
- 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.
- 黄润秋,2011. 汶川地震地质灾害后效应分析[J]. 工程地质学报,19(2):145-151.
- 黄润秋,李为乐,2008. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,27(12):2585-2592.
- 黄润秋,祁生文,2017. 工程地质:十年回顾与展望[J]. 工程地质学报,25(2):257-276.
- 季伟峰,胡时友,宋军,2007. 中国西南地区主要地质灾害及常用监测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,18(S1):38-41.
- 蒋忠信,1994. 西南山区暴雨泥石流沟简易判别方案[J]. 自然灾害学报,3(1):75-83.
- 靳德武,牛富俊,陈志新,等,2004. 青藏高原融冻泥流型滑坡灾害及其稳定性评价方法[J]. 煤田地质与勘探,32(3):49-52.
- 康志成,李焯芬,马藹乃,等,2004. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社.
- 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.
- 李德基,1996. 我国西南泥石流灾害防治现状与最新进展[J]. 中国地质灾害与防治学报,7(1):10-20.
- 李鸿琰,蔡祥兴,1989. 中国冰川泥石流的一些特征[J]. 水土保持通报,9(6):1-9.
- 李吉均,文世宣,张青松,等,1979. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J]. 中国科学(6):608-616.
- 李斌,陈琴德,康志成,1979. 云南东川蒋家沟泥石流发生、发展过程的初步分析[J]. 地理学报,34(2):156-168+185-186.
- 李斌,钟敦伦,1990. 四川境内成昆铁路泥石流研究进展[J]. 山地研究,8(2):69-74.
- 李秀珍,刘希林,苏鹏程,2005. 四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价[J]. 防灾减灾工程学报,25(4):18-23.
- 李长安,1997. 三峡地区滑坡与构造运动、气候变化的关系[J]. 地质科技情报,16(3):88-91.
- 刘传正,2019. 我国地质灾害防治取得卓越成就[J]. 中国减灾(19):20-23.
- 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[J]. 工程地质学报,18(5):669-676.

- 刘洪江,唐川,崔鹏,2005. GIS支持下的东川区泥石流危险度区划[J]. 干旱区地理,28(4):445-448.
- 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[J]. 中国地质灾害与防治学报,32(5):29-39.
- 刘希林,张松林,唐川,1993. 中国西南山区沟谷暴雨泥石流危险度判定的基本原理和方法[J]. 云南地理环境研究,5(2):62-70.
- 吕儒仁,李德基,1959. 四川大型泥石流[J]. 科学,37(1):39-45.
- 吕儒仁,李德基,1986. 横断山区泥石流活动特点形成条件及防治问题[J]. 山地研究,4(1):33-40+112.
- 马君寿,1954. 坝址区滑坡问题的处理方法[J]. 水力发电(3):26-30+41.
- 欧敏,张永兴,胡居义,等,2005. 基于GeoCA和GIS的滑坡滑动面演化规律研究[J]. 水文地质与工程地质,32(1):22-25.
- 乔建平,王萌,吴彩燕,2016. 汶川地震震动区小流域滑坡泥石流风险区划[J]. 灾害学,31(2):1-5.
- 乔建平,赵宇,杨文,2000. 四川省及重庆市滑坡危险度区划研究[J]. 自然灾害学报,9(1):68-71.
- 沈寿长,谭炳炎,1984. 铁路泥石流灾害概况及研究方向[J]. 铁道工程学报(1):74-79.
- 沈寿长;王伟,1996. 铁路沿线泥石流灾害防治技术的进展与方向[J]. 铁道工程学报(2):176-181.
- 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.
- 孙萍,殷跃平,吴树仁,等,2010. 东河口滑坡岩石微观结构及力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,29(S1):2872-2878.
- 谭炳炎,2005. 二十世纪中国铁路沿线泥石流防治理论与实践[J]. 铁道工程学报,12(Z1):369-372.
- 谭炳炎,邱沛基,谢慎良,1981. 铁路泥石流及其防治[J]. 铁道建筑(1):16-22.
- 唐邦兴,1980. 我国泥石流研究[J]. 地理学报,35(3):259-264.
- 唐邦兴,2000. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆.
- 唐邦兴,柳素清,刘世建,1996. 我国山地灾害及其防治[J]. 山地研究,14(2):103-109.
- 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.
- 唐川,朱静,1999. 澜沧江中下游滑坡泥石流分布规律与危险区划[J]. 地理学报,54(S1):84-92.
- 唐川,朱静,段金凡,等,1991. 云南小江流域泥石流堆积扇研究[J]. 山地研究,9(3):179-184.
- 唐川,朱静,张翔瑞,2001. GIS支持下的地震诱发滑坡危险区预测研究[J]. 地震研究,24(1):73-81.
- 唐晓春,唐邦兴,1994. 我国灾害地貌及其防治研究中的几个问题[J]. 自然灾害学报,3(1):70-74.
- 唐晓春,1995. 中国西南山区的泥石流防治及展望[J]. 海洋地质与第四纪地质,15(3):105-112.
- 陶舒,薛东剑,程滔,等,2015. 汶川地震前后滑坡分布变化规律——以川北山区为例[J]. 自然灾害学报,24(1):177-184.
- 陶云,唐川,段旭,2009. 云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系[J]. 自然灾害学报,18(1):180-186.
- 田恒召,李俊杰,2011. 北川鼓儿山滑坡群稳定性评价与治理[J]. 矿产勘查,2(2):201-205.
- 铁永波,2009. 强震区城镇泥石流灾害风险评价方法与体系研究[D]. 成都:成都理工大学:10-28.
- 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(03):106-113.
- 汪华斌,吴树仁,汪稔,1998. 长江三峡库区滑坡灾害危险性评价[J]. 长江流域资源与环境,7(2):186-192.
- 王成华,陈永波,2002. 武隆滑坡形成机理与成灾分析[J]. 自然灾害学报,11(1):108-112.
- 王根龙,张军慧,刘红帅,2009. 汶川地震北川县城地质灾害调查与初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,20(3):47-51.
- 王恭先,李天池,1991. 中国的滑坡研究[J]. 科学,43(3):180-183.
- 王家柱,高延超,铁永波,等,2021. 基于斜坡单元的山区城镇滑坡灾害易发性评价:以康定为例[J]. 沉积与特提斯地质, DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.03001.
- 文宝萍,王凡,2021. 1965年烂泥沟滑坡前兆,高速远程运动及后期演化特征[J]. 水文地质工程地质,48(6):9-14.
- 谢洪,1992. 成昆铁路北段泥石流及其综合防治原理[J]. 地球科学进展,7(5):83-84.
- 谢洪,钟敦伦,矫震,等,2009. 2008年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报,27(4):501-509.
- 谢荣尧,1987. 西藏公路沿线的泥石流及防治措施[J]. 水土保持通报,7(5):13-14.
- 徐永良,1995. 遥感技术在成昆线泥石流灾害防治研究中的应用[J]. 中国铁路,(4):29-31.
- 徐勇,黄雯婷,窦世卿,等,2021. 2000-2020年西南地区植被NDVI对气候变化和人类活动响应特征[J/OL]. 环境科学, DOI:10.13227/j.hjck.202108107.
- 徐雨晴,何吉成,2016. 50a来中国铁路泥石流灾害的时空特征分析[J]. 水土保持通报,26(1):337-342.
- 许冲,2014. 2008年汶川地震前的中国大陆地震滑坡研究[J]. 科技导报,32(16):63-77.
- 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.
- 许强,2012. 工程地质学科发展的新趋势——第九届全国工程地质大会学术总结[J]. 工程地质学报,20(6):1087-1095.
- 许强,2020. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),45(11):1651-1659.
- 许强,陈伟,张倬元,2008. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识[J]. 地球科学进展,23(5):448-456.
- 许强,李为乐,2010. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报,18(6):818-826.
- 晏鄂川,刘汉超,张倬元,1998. 茂汶—汶川段岷江两岸滑坡分布规律[J]. 山地研究,16(2):109-113.
- 姚一江,1985. 滑坡和泥石流——人类活动诱发的山地灾害[J]. 水土保持通报,5(1):1-5.
- 易顺民,唐辉明,1996. 西藏樟木滑坡群的分形特征及其意义[J]. 长春地质学院学报,26(4):392-397.
- 殷跃平,1997. 地质工程在链子崖危岩治理中的应用[J]. 水文地质工程地质,24(2):23-25.
- 殷跃平,1998. 中国滑坡防治工程理论与实践[J]. 水文地质工程地

- 质,25(1):5-9.
- 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,2002.三峡工程库区移民迁建区地质灾害与防治[J].地质通报,21(12):876-880.
- 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,2004.中国地质灾害减灾战略初步研究[J].中国地质灾害与防治学报,15(2):1-8.
- 殷跃平,2013.汶川地震工程地质与地质灾害[M].北京:科学出版社:22-36.
- 殷跃平,李媛,1996.区域地质灾害趋势预测理论与方法[J].工程地质学报,4(4):75-79.
- 殷跃平,彭建兵,2011.吸取巨灾教训重塑工程地质——2011年全国工程地质学术年会总结[J].工程地质学报,19(5):792-794.
- 殷跃平,王文沛,2014.论滑坡地震力[J].工程地质学报,22(4):586-600.
- 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,王文沛,张楠,等,2017.强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例[J].中国地质,44(5):827-841.
- 殷跃平,闫国强,黄波林,等,2020.三峡水库消落带斜坡岩体劣化过程地质强度指标研究[J].水利学报,51(8):883-896.
- 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.
- 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.
- 游勇,程尊兰,胡平华,等,1997.西藏古乡沟泥石流模型试验研究[J].自然灾害学报,6(1):54-60.
- 游勇,柳金峰,陈兴长,2012.金沙江白鹤滩水电站库区橄榄坝沙沟泥石流灾害及其排导槽的优化设计[J].水利学报,43(S2):168-173.
- 张东明,李剑锋,田贵维,等,2011.基于GIS和RS的重庆市滑坡遥感解译[J].自然灾害学报,20(2):56-61.
- 张加桂,2001.三峡库区巫山县新城址巴东组三段形成的大型复杂滑坡特征及成因机制[J].地球学报,22(2):145-148.
- 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.
- 张永双,成余粮,姚鑫,等,2013.四川汶川地震-滑坡-泥石流灾害链形成演化过程[J].地质通报,32(12):1900-1910.
- 张永双,郭长宝,李向全,2021.川藏铁路廊道关键水工环地质问题:现状与发展方向[J].水文地质工程地质,48(5):1-12.
- 张永双,郭长宝,周能娟,2013.金沙江支流冲江河巨型滑坡及其局部复活机理研究[J].岩土工程学报,35(3):445-453.
- 张永双,刘筱怡,吴瑞安,2021.青藏高原东缘深切河谷区古滑坡:判识、特征、时代与演化[J].地质学报,28(2):94-105.
- 张永双,任三绍,郭长宝,2019.活动断裂带工程地质研究[J].地质学报,93(4):763-775.
- 张永双,任三绍,郭长宝,等,2022.青藏高原东缘高位崩滑灾害多动力多期次演化特征[J].沉积与特提斯地质,42(2):310-318.
- 张御阳,2013.强震诱发摩岗岭滑坡成因机制及运动特性研究[D].成都:成都理工大学.
- 章书成,1990.泥石流预警报警系统的研究[J].中国地质灾害与防治学报,1(1):90-96.
- 赵聪,铁永波,梁京涛,2021.基于机载LiDAR技术的泥石流物源侵蚀量定量评价研究[J].沉积与特提斯地质,DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.09004.
- 中国山洪灾害防治网,1981-07-09.1981年7月9日成昆铁路利子依达沟暴发泥石流冲毁利子依达沟大桥422次列车颠覆[EB/OL].<http://www.qgshzh.com/show/25886c4f-e1be-43aa-8109-2df0872bafb1>.
- 钟大赉,丁林,1996.青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J].中国科学(地球科学),26(4):289-295.
- 朱赛楠,殷跃平,王猛,等,2021.金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究——以金沙江色拉滑坡为例[J].岩土工程学报,43(4):688-697.
- 自然资源部,2021-5-18.全国部署开展的地质灾害风险普查试点县的工作已基本完成[EB/OL].光明网,<https://m.gmw.cn/baijia/2021-05/18/1302302078.html>.