

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003060

西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题

李 滨¹,殷跃平²,高 杨¹,邢爱国³,黄波林⁴,贺 凯¹,赵超英⁵,万佳威¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所/新构造运动与地质灾害重点实验室,北京 100081;2. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心),北京 100081;3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240;4. 防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学),湖北 宜昌 443002;
5. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘要:我国西南岩溶山区地质环境脆弱,人类工程活动强烈,群死群伤的灾难性滑坡频发,造成严重的人员与财产损失。文章概述了西南岩溶山区大型崩滑灾害基本特征和防灾减灾的难点,提出了目前研究中亟待解决的关键科学技术问题,包括岩溶地质结构与管道流的相互孕灾机理、地下采动下大型崩滑灾害形成机制、灾害高位远程动力成灾模式、灾害早期识别与空间预测。针对这些问题,文章提出如下研究思路:通过多学科联合,重点研究岩溶山区大型崩滑灾害链的孕育发生规律与成灾模式,揭示岩溶管道-裂隙-孔隙地下水动力作用及孕灾过程和地下采动、库水波动等工程扰动环境下山体劣化损伤效应,构建岩溶崩滑灾害高速远程动力致灾机制与风险预测方法,形成早期识别、监测预警与综合防控技术及示范,为我国岩溶山区城镇化建设、重大工程安全运营提供科技支撑。

关键词:西南岩溶山区;大型滑坡;崩塌;成灾模式;早期识别;风险防控

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0005-09

Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China

LI Bin¹, YIN Yueping², GAO Yang¹, XING Aiguo³, HUANG Bolin⁴, HE Kai¹, ZHAO Chaoying⁵, WAN Jiawei¹

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement Geohazard/Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Consultative Centre of Geo-Hazard Mitigation, MNR), Beijing 100081, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 4. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 5. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Due to the fragile geological environment and strong human engineering activities, catastrophic rock avalanches in the karst mountain areas in southwest China have frequently occurred, causing serious personnel and property losses. This article summarizes the characteristics of rock avalanches and the difficult problems of landslides prevention and mitigation, and proposes the key scientific problems that need to be solved urgently in the current research, including the interaction mechanism between geological structures and karst pipeline flows, the formation mechanism of rock avalanches related to the underground mining, the geomechanical conditions and dynamic processes of rapid and long run-out rock avalanches, and early identification and spatial prediction technology. In response to these problems, this article expounds the following research

收稿日期: 2020-03-20; 修订日期: 2020-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504800); 国家自然科学基金青年基金(41907257)

第一作者: 李滨(1980-),男,博士,研究员,主要从事地质灾害防灾减灾研究。E-mail: libin1102@163.com

通讯作者: 高杨(1989-),男,博士,助理研究员,主要从事高速远程滑坡机理研究。E-mail: 737263992@qq.com

ideas. Through multidisciplinary integration, we will focus on the research of the development and failure modes of rock avalanches in karst mountain areas, reveal the role of groundwater in karst pipelines-fissures-pores and the effect of rock damage due to underground mining and reservoir water fluctuations. The focus of this study is on the mechanism of rapid and long run-out rock avalanches and risk prediction methods. Early identification, monitoring, early warning, and comprehensive prevention and control technologies for rock avalanches are established. This study may provide support to the urbanization construction and the safe operation of major projects in karst mountainous areas in China.

Keywords: karst mountain areas in southwest China; large-scale landslide; rock avalanche; formation modes; early identification; risk prevention and control

我国西南云贵高原及周边区域是世界上面积最大的岩溶山区,面积达 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$, 也是我国高储量高品位矿产资源和丰富水能资源的基地,以及西电东送的重要输出地。然而这些地区由于地质环境脆弱、人类工程活动强烈,大型崩滑灾害持续频发,近几十年来破坏甚至摧毁了数十座村镇,并造成了上千人死亡^[1-7]。如 1980 年湖北盐池河崩塌^[1-7]、1985 年湖北新滩滑坡^[2]、1987 年巫溪南门湾崩塌^[4]、1988 年重庆巫溪中阳村滑坡^[4]、1989 年四川华蓥溪口滑坡^[5]、1994 年重庆武隆鸡冠岭崩塌^[4,7]、1996 年贵州印江岩口滑坡^[5]、2004 年贵州省纳雍县岩脚寨崩塌^[7]、2013 年云南镇雄赵家沟滑坡^[8] 等大型崩滑灾害,均造成严重的人员伤亡。这些灾害的发生严重限制了西南岩溶山区城镇化建设的发展,危及了矿产能源基地、水利设施及重大工程的安全运营,威胁着人居安全和社会稳定。

目前而言,西南岩溶山区大型崩滑灾害具有复杂的地质成因,这给明确孕灾机理、实现早期识别和灾害预测造成了许多困难。一方面,受地质构造、气候条件以及碳酸盐岩岩体结构和岩体强度的影响,西南岩溶山区溶蚀作用很强,形成发育了一系列岩溶管道、岩溶洞穴和高低起伏的地貌组合,这导致地下水时空分布极不均匀、水动力条件频繁大幅度变动^[4,7]。另一方面,受构造抬升和河流切割影响,西南岩溶山区多形成“上硬下软、上陡下缓”的“靴状”地貌,其表现为中上部的厚层-巨厚层碳酸盐岩地层陡倾、下部的碎屑岩、玄武岩地层缓倾,这十分不利于岩体结构的稳定^[8-10]。再加之大规模的人类工程活动,如地貌改造、水库蓄水和下部矿产的开采,西南岩溶山区成为了我国大型岩质崩滑灾害的高发区。

本文在前人研究与大量实地调查的基础上,概述了西南岩溶山区重大崩滑灾害的发育特点,分析了目前研究中存在的关键问题,提出了创新研究的思路,对

岩溶山区大型崩滑灾害防灾减灾具有一定指导作用。

1 西南岩溶山区大型崩滑灾害的主要特征

如表 1、图 1、图 2 所示,我国西南岩溶山区一直是大型崩滑灾害的高发区。调查分析发现,这些大型崩滑灾害多发于“上硬下软、上陡下缓”的二元结构山体,即:上部为厚度大于 100 m 的碳酸盐岩地层,夹 4 ~ 6 层薄层状炭质、泥质页岩;下部为碎屑岩、玄武岩等缓倾地层,赋存有多套含煤、铁、铝等矿层。这类地貌形态临空条件好,山体失稳后较大的势能向动能的转化,极易形成高速远程碎屑流,从而造成严重的破坏^[4,6,9]。如:

(1)2009 年 6 月 5 日重庆武隆鸡尾山二叠系灰岩山体,受底部软岩蠕变、侧向溶蚀带剪断等因素影响发生高速远程滑坡-碎屑流,运动距离 1.5 km,堆积体体积 $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$,造成 74 人死亡(图 2a)^[4,6,9]。

(2)2010 年 6 月 28 日暴雨诱发贵州关岭大寨三叠系地层斜坡发生高速滑坡-碎屑流,运动距离 1.5 km,堆积体体积 $1.75 \times 10^6 \text{ m}^3$,造成 99 人死亡^[4,10-11]。

(3)2017 年 8 月 28 日,贵州纳雍张家湾镇普洒村三叠系地层斜坡发生高速远程滑坡-碎屑流,运动距离 0.8 km,堆积体体积 $6.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,造成 35 人死亡(图 2c)^[12-13]。

(4)2019 年 7 月 23 日,降雨诱发贵州水城县鸡场镇二叠系玄武岩地层发生高速远程滑坡-碎屑流,运动距离 1.3 km,堆积体体积 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$,造成 51 人死亡(图 2d)。

与其他山区的地质灾害相比^[14],西南岩溶山区的崩滑灾害主要具有以下四个特点:

(1)特殊的岩体结构。西南岩溶山区位于上扬子板块,中生代以来经历了陆相沉积、海相沉积和海陆交互沉积,广泛形成了碳酸盐岩和碎屑岩两套沉积建造,为上硬下软的二元岩体结构提供了物质基础。而

晚三叠世以来的一系列构造运动,则使该区域形成了大量的隔挡式、隔槽式褶皱山体,并发育了许多不同规模的岩体结构面。二元岩体结构中的软弱夹层和大型岩体结构面控制着西南岩溶山区的岩体强度,也控制着大型崩滑灾害的发生。

表 1 1980 年以来我国西南岩溶山区典型特大崩滑灾害基本特征
Table 1 Features of typical rock avalanches in the karst mountain areas in southwest China since 1980

编号	滑坡名称	发生日期	地层岩性	影响因素	灾害特征	伤亡情况
1	湖北宜昌盐池河崩塌 ^[2]	1980-06-03	震旦系陡山沱组白云岩、粉砂质页岩	岩体结构面、软硬相间岩层、强降雨、采矿	体积 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$	死亡 284 人
2	湖北宜昌新滩滑坡 ^[2]	1985-06-12	泥盆系-二叠系灰岩	溶蚀结构面、软硬相间岩体、降雨	体积约 $3.0 \times 10^7 \text{ m}^3$, 滑动距离 2.0 km	新滩镇全部摧毁,长江最大涌浪高度 54 m
3	重庆巫溪南门湾崩塌 ^[4]	1987-09-01	三叠系嘉陵江组白云质角砾状灰岩	溶蚀结构、切坡	体积约 $0.7 \times 10^4 \text{ m}^3$	死亡 98 人
4	重庆巫溪中阳村滑坡 ^[4]	1988-01-10	三叠系泥灰岩、灰岩	溶蚀结构面、软硬相间岩体、采矿	体积约 $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑动距离 1.2 km	死亡 26 人
5	四川华蓥山溪口滑坡 ^[5]	1989-07-10	寒武系灰岩	特大暴雨、采矿	体积 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑动距离 1.6 km	死亡 221 人
6	云南昭通头寨滑坡 ^[5]	1991-09-23	二叠系峨眉山玄武岩	持续降雨	总体积 $1.8 \times 10^7 \text{ m}^3$, 滑动距离 3.6 km	死亡 216 人
7	重庆武隆鸡冠岭滑坡 ^[15-16]	1994-04-30	二叠系长兴组中厚层灰岩	溶蚀结构面、软硬相间地层、采矿	体积约 $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑距约 980 m	伤亡 36 人
8	贵州印江岩口滑坡 ^[5]	1996-09-18	三叠系夜郎组灰岩	暴雨、采矿、切坡	体积 $1.68 \times 10^6 \text{ m}^3$	死亡 3 人
9	云南元阳老金山滑坡 ^[5]	1996-05-31/ 1996-06-03	泥盆系白云岩、灰岩	强降雨、采矿	体积约 $5.6 \times 10^5 \text{ m}^3$	死亡 111 人
10	贵州纳雍岩脚寨崩塌 ^[7]	2004-12-03	三叠系飞仙关组灰岩、泥质粉砂岩、页岩	溶蚀结构面、软硬相间岩层、采矿	体积 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3$	死亡 44 人
11	重庆武隆鸡尾山滑坡 ^[6]	2009-06-05	二叠系栖霞-茅口组灰岩	溶蚀结构面、软硬相间岩体、采矿	体积 $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑动距离 1.5 km	死亡 74 人
12	重庆巫峡龚家坊崩塌 ^[17]	2008-11-02	三叠系嘉陵江组泥质灰岩	溶蚀结构面、侵蚀裂隙,水库蓄水	体积 $3.8 \times 10^5 \text{ m}^3$	最大涌浪高度 38 m
13	贵州关岭大寨滑坡 ^[10-11]	2010-06-28	三叠系永宁镇组灰岩、白云岩	强降雨	体积约 $1.75 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑动距离 1.5 km	死亡 99 人
14	贵州凯里渔洞村崩塌 ^[18]	2013-02-18	二叠系茅口组灰岩	溶蚀结构面、采矿	体积 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$	死亡 6 人
15	云南镇雄赵家沟滑坡 ^[8]	2013-01-11	三叠系永宁镇组灰岩、泥质灰岩	长历时降雨、采矿	体体积 $4.0 \times 10^5 \text{ m}^3$, 滑动距离 800 m	死亡 46 人
16	贵州福泉小坝滑坡 ^[4]	2014-08-27	震旦系灯影组、陡山沱组白云岩	降雨、坡脚采矿切坡	体积约 $1.41 \times 10^6 \text{ m}^3$	死亡 23 人
17	贵州纳雍普洒崩塌 ^[12-13]	2017-08-28	三叠系夜郎组灰岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩	岩体结构面、采矿	体积 $6.0 \times 10^5 \text{ m}^3$, 滑动距离 800 m	死亡 35 人
18	重庆巫溪大河乡滑坡	2017-10-21	二叠系栖霞组灰岩	溶蚀结构面、软硬相间岩体、降雨、采矿	体积 $2.48 \times 10^7 \text{ m}^3$, 滑动距离 1.5 km	死亡 9 人
19	贵州水城鸡场镇滑坡	2019-07-23	二叠系峨眉山玄武岩	优势结构面、降雨	体积约 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑动距离 1.3 km	死亡 51 人

(2)特有的岩溶水文地质结构。西南岩溶山区湿润多雨,地下水位经常大起大落,不仅侵蚀和冲蚀着岩溶山体,还造成岩溶管道气压力大幅度变化,最终导致山体的结构破坏。此外,在坡顶为碳酸盐岩、坡腰为碎屑岩、玄武岩的山区,上部碳酸盐岩结构面受长期溶蚀形成岩溶管道系统,促使大量地下水向下入渗汇集,并在岩性接触带发生集中渗流,强烈影响着坡体结构的稳定性。

(3)含煤建造。西南岩溶山区赋存有丰富的煤系地层,是我国重要的煤矿资源基地。长期大规模的地

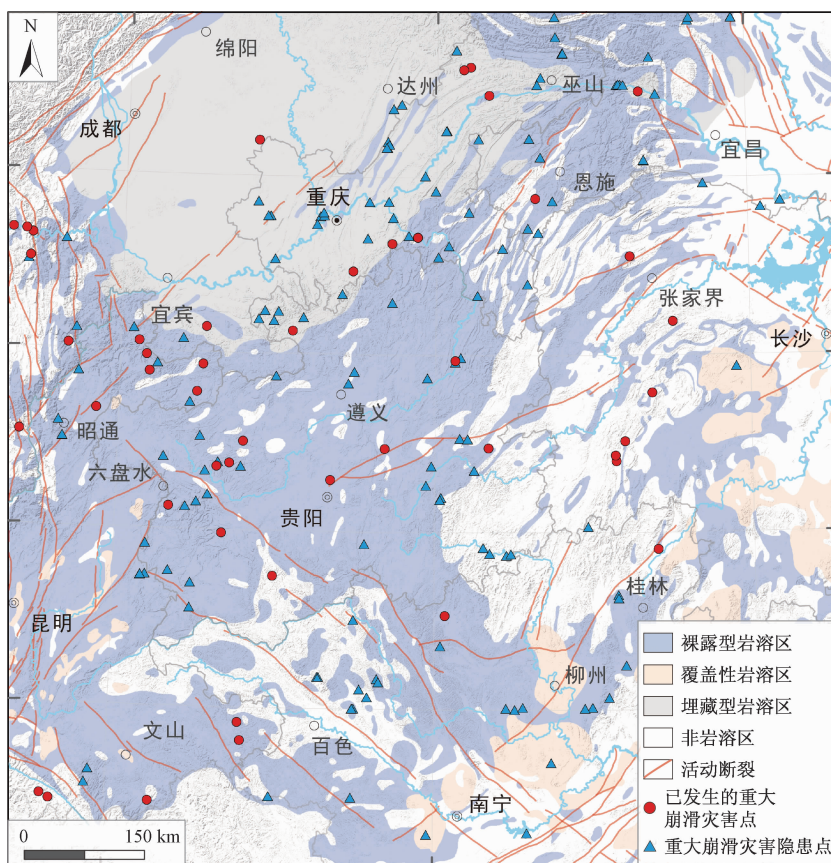


图 1 2000 年以来我国西南岩溶山区大型崩滑灾害分布情况

Fig.1 Distribution of rock avalanches in the karst mountain areas in southwest China since 2000

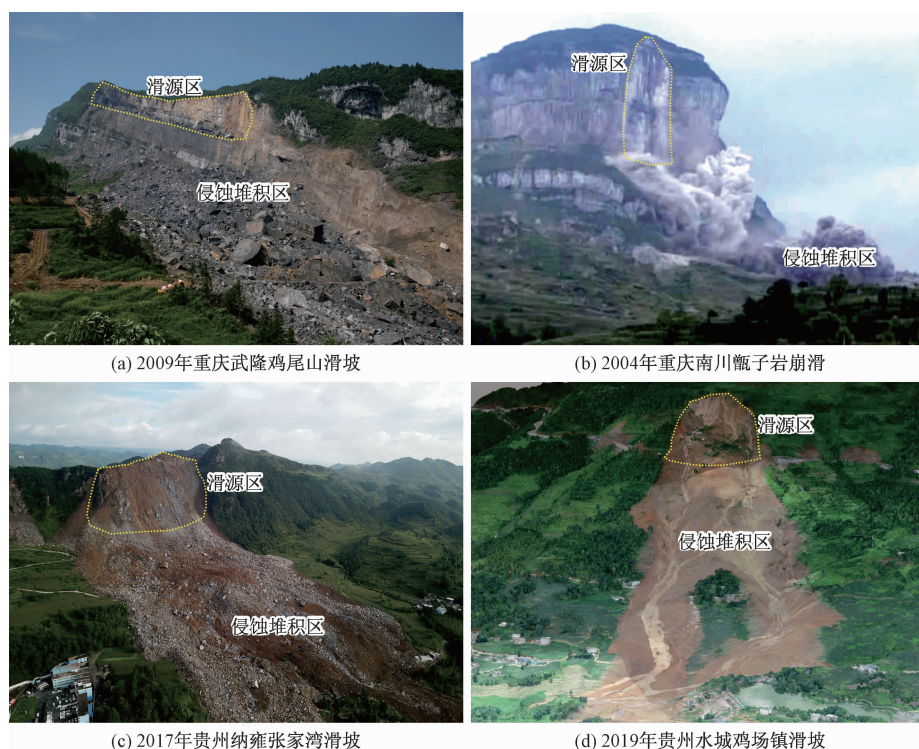


图 2 近年来我国西南岩溶山区发生的大型崩滑灾害

Fig.2 Typical rock avalanches in the karst mountain areas in southwest China

下采矿工程活动加速了山体的变形和应力调整,导致了上覆控制性岩层硬质结构面拉剪断裂、压剪滑移和山体变形失稳。

(4)特殊的成灾模式。西南岩溶山区上陡下缓的地貌形态,导致滑坡发生后往往形成滑动距离超过800 m的高速远程滑坡-碎屑流,这类链式灾害的破坏威力大,常导致重大人员伤亡。

2 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究中的关键问题

陈梦熊、袁道先、崔光中、朱学稳、张人权、韩行瑞等老一辈科学家对岩溶水文地质学的理论与方法进行了系统深入的研究,奠定了岩溶山区水文地质学的科学理论,也将我国岩溶水文地质学领域的研究推到世界先进水平^[19-20]。然而面对我国西南岩溶山区群死群伤的灾难性崩滑灾害频发,如何科学阐明岩溶山区崩滑灾害发育特征、查明溶蚀地质结构孕灾力学行为、揭示人类工程扰动与岩溶山体灾变互馈机理、建立灾难性崩滑链式灾害防控理论成为防灾减灾研究中亟待突破的重大前沿科学和巨大挑战。为实现这一目标,在这一系列科学研究中尚还有几个关键问题有待解决。

2.1 地质结构与岩溶管道流作用过程的孕灾机理不清

西南岩溶山区大型崩滑灾害多发于层状碳酸盐岩、碎屑岩或玄武岩的褶皱山体缓倾-陡倾的翼部或平缓核部地带,灾害的形成发育与地层岩性、地质构造、地形地貌、水文地质及人类工程活动等因素密切相关。在诸多影响因素中,碳酸盐岩的块状岩体结构、溶蚀后的架空结构和岩溶管道流水文系统成为主要控灾因素。其中岩溶地下水作用系统对岩体结构改造及山体破坏作用方面的研究还很欠缺,存在诸多问题。如图3所示,岩溶山体地下水以岩溶管道流为主,岩溶管道流对斜坡的水力学作用方式主要表现为雨季岩溶管道内水位暴涨和流速增加形成静水压力和气体压力大幅度变动,并造成气爆、气蚀、水击等作用,这些强烈的水动力效应对岩体结构的破坏大大增强,然而目前缺少这方面的系统研究,导致灾害孕灾机理不清楚。岩溶山区大型崩滑的地质结构、岩溶岩性分区与地下水文系统如何孕育了大型灾害,具有什么样的关联机制?暴雨环境下岩溶管道-裂隙-孔隙多重介质水-岩如何相互作用?岩溶山体变形渐进累积规律是什么?山体失稳具有哪些灾害类型?诸多此类问题需要得到明确回

答。因此,需要研究提出岩溶崩滑灾害的特殊孕灾环境、关键控制因素和易灾地质条件的组合类型,揭示易灾地质环境与重大灾害之间的关系及规律,构建岩溶山区重大灾害的主要成灾模式。

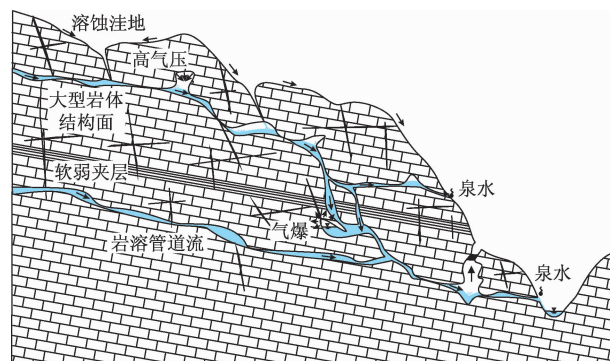


图3 西南岩溶山区地下岩溶管道系统作用示意图

Fig. 3 Schematic diagram of underground karst pipeline system in the karst mountain areas

2.2 地下采动下大型崩滑灾害的触发形成机制不明

西南岩溶山区矿产资源较丰富,已发现的含矿地层有十余层,以二叠系、寒武系为主,矿种包括煤、铝、耐火黏土、黄铁矿等,多为大至中型规模矿床,是区内主要的采矿层,简称“煤系地层”。由于上百年来大规模开发,许多岩溶山体内部已形成了大面积的采空区,对覆岩及上部山体稳定性产生显著影响,以致诱发了多起与地下采矿有关的特大崩滑链式灾害,其破坏模式如图4。因此,亟待查明地下采动作用下上覆控制性坚硬岩层结构面如何扩展、错动、贯通,深大硬性结构面的松动效应如何控制山体变形,以及软弱地层及软弱结构面弱化规律及剪切蠕变如何控滑岩溶山体的失稳。为此,不同地层结构组合与矿层赋存开采环境下岩溶山体采空层顶板岩层应力场重构演化,采矿区上覆岩层内部及层间自下而上的应力传递与山体变形破坏,采空分布与不同强度采掘振动作用下岩溶山体累积损伤和动态崩滑过程,都是目前岩溶山体采动作用下诱发特大崩滑灾害的形成演化机制研究中亟待阐明的。

2.3 高位远程动力过程的地质力学条件与成灾模式尚未揭示

西南岩溶山区普遍具有上硬下软、上陡下缓的“靴状”地貌特征,崩滑灾害失稳后常形成高速远程碎屑流,灾害具有滑动距离远、滑动速度大、冲击破坏力强等特点,给山区居民生命财产与国家重大工程安全造成巨大损失。与其他地区高速远程滑坡碎屑流不同的是,岩溶山区的崩滑体高速启动失稳下滑后,由于地

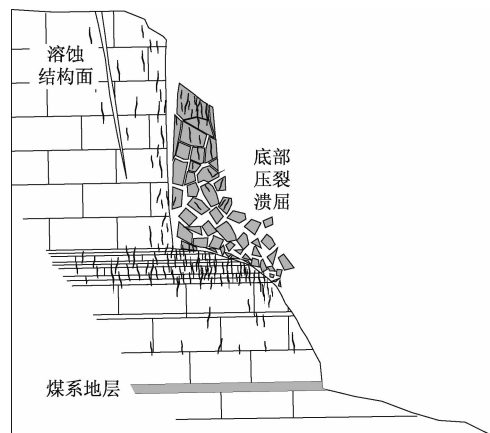


图4 西南岩溶山区地下采动环境下山体失稳示意图

Fig.4 Schematic diagram of rock failure induced by the underground mining in the karst mountain areas

形因素的影响会产生势能与动能的能量转换,碳酸盐岩组成的硬岩滑体速度增加,并以较高的速度撞击地面或周围山体,铲刮侵蚀一定体积的岩土体;滑体在碰撞作用下逐渐解体为碎屑体,并随着侵蚀岩土体融入,形成了以等效流体方式运动的碎屑流;碎屑流以较高速继续向前运动,对底部的松散软弱层造成裹挟作用,并侵蚀地表松散体;铲刮作用结束后进入碎屑堆积阶段,最终运动停止。灾害链成灾模式及高速远程滑坡-碎屑流运动过程如图5所示。因此,亟须研究岩溶山区大型崩滑灾害的成灾模式和滑体高位剪出-凌空飞行-冲击铲刮-流动堆积全过程动力学特征,分析溶蚀岩体动力破碎的低摩降阻机制,研究高速远程滑坡碎屑流冲击铲刮效应和超前空气冲击效应。这些问题是岩溶山区高位滑坡远程动力致灾的核心问题,也是风险空间预测与防控的理论基础。

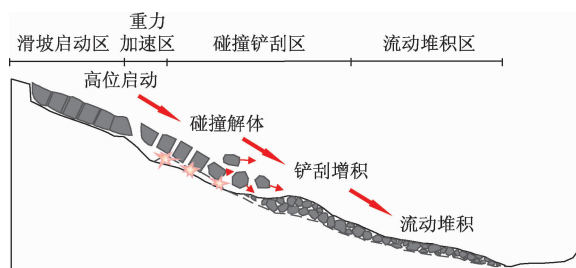


图5 西南岩溶山区高位远程崩滑灾害链式成灾示意图

Fig.5 Schematic diagram of long-runout rock avalanches in the karst mountain areas

2.4 灾害早期识别与风险防范理论方法亟待形成

西南岩溶山区由于褶皱构造型式、块状岩体结构、溶蚀水文系统、上硬下软地层组合、上陡下缓地貌形态等地质因素影响,崩滑灾害往往具有隐蔽性、突发性、

灾难性,加之强烈的人类工程活动,导致这类链式灾害呈现出高速远程、视线外成灾特点,致使灾害早期识别与风险防控难度极大。因此,如何开展空天对地观测技术在大范围复杂岩溶山区潜在崩滑灾害的形变辨识、提出大型崩滑灾害地质识别指标、实现基于易滑地质结构理论和多源空间技术融合的岩溶山区崩滑灾害早期识别与动态编目,是目前超前判识与先兆监测工作的重要环节。同时,还要加快适用于岩溶山体崩滑灾害地质特征的高精度智能化监测技术及设备研发,实现高精度智能崩滑灾害临滑阶段的一体化监测、数据传输与预警分析,从而逐渐构建岩溶山区大型崩滑灾害体的临灾预警预报。此外,岩溶山区大型崩滑灾害的特殊破坏成灾模式、外在激发机制和灾变动力学过程、大型崩滑链式灾害的三维可视化分析也是研究的重点,以便实现高速远程崩滑灾害链致灾全过程的空间预测和风险评估,提出对应的风险控制方法,形成切实可行的岩溶山区大型崩滑灾害防灾减灾理论与技术方法体系。

3 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究思路

受气候变化和大规模人类工程活动等的持续影响,西南岩溶山区大型崩滑灾害导致的灾难性事故仍处于高发态势。而岩溶山区的特殊性,决定了岩溶崩滑灾害的孕灾机制、成灾模式、演化过程、链生效应区别于其他地质灾害,现有的理论与技术方法不能满足其防灾减灾需求。由于西南山区是大型岩质滑坡高发区,国内诸多学者开展了岩体形成与演变、灾害变形破坏机制、启程机理与失稳模式等多方面的研究,取得了丰富的成果,极大推动了我国地质灾害的防灾减灾工作^[11-20]。然而随着岩溶山区的城镇快速发展与重大工程建设,目前的成果仍难以满足防灾减灾的需要。因此,结合西南岩溶山区灾害的特殊性,迫切需要开展岩溶山区特大滑坡失稳机理和新型成灾模式理论研究,构建基于灾害链的风险评估方法,研发早期识别、监测预警和风险防范技术。

针对西南岩溶山区大型崩滑灾害的成灾模式与风险防范关键科学问题,本文指出利用原位观测与试验研究、仿真模拟、技术方法研制、应用示范等多种手段有机结合,开展崩滑灾害“孕灾机理→成灾模式→监测预警→风险防范”全链条研究工作,聚焦岩溶地质结构发育特征及岩溶作用孕灾过程,地下采空、水位波动等工程扰动环境下特大滑坡形成机制与成灾模式,特大滑坡早期识别、监测预警与风险防范等关键科学

问题,研究岩溶山区岩溶管道-裂隙-孔隙地下水动力作用及孕灾环境,揭示地下开采、库水波动等工程扰动下岩溶山体劣化效应,提出岩溶山体特大滑坡破坏模式,构建高位滑坡远程动力致灾与风险评估技术方法,形成特大滑坡早期识别监测预警与风险防范技术标准。具体研究工作思路如下。

3.1 岩溶作用过程与孕灾机理

集成总结西南岩溶山区的特大滑坡体岩溶地下水特点并分类,选定贵州、重庆等典型岩溶山区典型滑坡地下水系统为研究对象,开展岩溶水文地质调查、地球物理探测、现场原位监测、水文自动监测、地下水示踪等技术方法,分析地下岩溶空间结构特征和典型结构类型,研究地下岩溶空间展布和地下水赋存规律;基于大比例尺模型试验系统平台,开展岩溶管道-裂隙-孔隙多重条件下的地下水渗流场变化物理模型试验,揭示不同岩溶空间结构对地下水动态流场的影响规律;研究崩滑体岩溶地下水补给、径流、排泄特征,地下水动态特征及其管道、裂隙多重含水介质地下水暴雨作用下效应关系,分析建立多重介质相互作用的水岩作用数学力学模型,以及连续-非连续变形分析数值计算方法,揭示溶蚀山体与地下水作用过程的孕灾机理。

3.2 工程扰动下的斜坡破坏机制

主要开展地下采动和水库蓄水两种工况下的岩溶山区山体失稳的触发机制与致灾力学行为研究。

(1)在地下采动触发大型崩滑灾害方面,利用现场调查与观测、大型物理模型试验、数学计算等技术方法,查明岩溶山区矿层赋存及上覆岩体地质结构特征,揭示地下采动作用下上覆控制性坚硬岩层结构面扩展、错动、贯通模式及特征,深大硬性结构面松动时空效应,提出地下采动作用下软弱地层及软弱结构面特性弱化规律及剪切蠕变对岩溶山体的控滑机理;研究地下采动作用下矿层上覆岩层(顶板)裂隙扩展规律和岩溶管道变形破坏规律,揭示采动作用下岩溶山体岩层裂隙扩展机制,提出采动作用后岩溶管道和岩层裂隙内渗透力变化及渗透破坏机制;研究不同地层结构特征与矿层赋存条件的岩溶山体在地下开采作用下顶板岩层应力场重构演化特征,揭示采矿区上覆岩层内部及层间自下而上的应力传递机制和山体变形破坏进程,提出采动作用下岩溶山体变形响应机制。研究地下采动、爆破等因素作用下岩溶山体累积损伤和动态崩滑全过程,构建其损伤与崩滑触发因素体系并优选主控触发因素,揭示岩溶山体在地下采动等综合作用下的损伤与崩滑动力触发机制。

(2)在水库蓄水诱发岩溶岸坡岩体劣化与失稳方面,采用高精度测量技术和探测技术,开展三峡库区岩溶岸坡库水位波动环境下库岸岩体劣化多尺度观测,揭示水位变动带岩体损伤机制和细宏观岩体结构弱化效应;利用大型物理试验和数值仿真,分析水位波动条件下岩体结构变化效应对岸坡稳定性的控制作用,查明渗透压力和水岩作用下岩体结构变化过程,提出岩体结构劣化与库区岸坡失稳模式,形成水动力变化下库区岩溶岸坡稳定性分析方法;开展基于PIV精细技术的崩滑灾害涌浪大型物理试验,研究库岸崩滑灾害失稳与水体涌浪的相互作用,构建灾害涌浪全耦合数值模型。

3.3 高速远程动力致灾机理

针对大型崩滑灾害高速远程的动力学特征,分析岩溶山区大型崩滑灾害成灾模式与高位远程全过程动力学特征,进行典型崩滑灾害运动类型划分、平面分区和竖向分带研究,概化基于几何学、运动学和动力学的灾害链地质模型;开展岩溶山区高位崩滑灾害凌空碰撞、冲击铲刮和碎裂解体后裹挟铲刮研究,分析溶蚀岩体碎裂解体的多尺度断裂机理和考虑动能效应的岩体多尺度裂纹扩展规律,揭示碎屑流高速运移过程溶蚀岩体动力破碎的低摩擦阻机制,分析岩溶山区崩滑灾害冲击铲刮动力成灾机理,定量评价高位滑坡的铲刮深度和铲刮范围,揭示崩滑碎屑流高速远程运动增积过程。研究高速崩滑碎屑流超前空气冲击波的成因机制,建立崩滑碎屑流气固耦合的地质力学模型,研究高速远程崩滑碎屑流运移过程中裹挟空气形成的气垫效应和挤压前方空气引起的空气冲击效应,形成考虑气固耦合机制的高速崩滑碎屑流超前空气冲击效应评估模型,揭示高速远程崩滑碎屑流超前空气冲击波传播与强度衰减规律。

3.4 灾害早期识别与监测预警

开展岩溶山区基于空天对地观测技术的大范围潜在大型崩滑灾害识别技术与试验分析,综合多时相地表形变信息、地形信息以及光学遥感分割与分类信息,实现对潜在崩滑灾害的自动化分析与辨识;梳理岩溶山区易滑地质环境条件,查明对崩滑体稳定性具有控制性作用的地质体要素,提出基于成灾模式与地质特征的岩溶山区大型滑坡早期识别指标。研制适用于岩溶山区大型崩滑灾害的智能监测传感器,研发基于机器视觉的灾害形变识别与监测技术,实现灾害临滑阶段立体智能联动监测,有效提高监测技术的可靠性和稳定性。研究北斗/GNSS多系统多频率多手段

(PPP/差分/基线)融合定位算法,实现基于北斗云平台的实时在线高精度形变监测技术,对与灾害形变相关的多源异构监测数据进行同化处理,实现高陡崩滑灾害立体化监测分析,为灾害体形变预报与预警提供数据支持。结合灾害形成演化机理,研究灾害体形变智能预报理论方法,实现对岩溶地区大型崩滑灾害的实时监测预警。

3.5 灾害风险防控与示范

系统总结研究不同区域岩溶特大滑坡及灾害链发育的类型、特征、主控因素、成灾特征及分布规律;根据岩溶山区大型崩滑灾害成因理论研究,概化基本成灾模式,构建岩溶地质结构分区模型与大型崩滑灾害区域空间分布模型,揭示岩溶地质结构对大型崩滑灾害孕育的控制作用与关联机制;量化地下采动、库水波动等人类工程活动与灾害过程之间的影响和互馈关系,建立链接人类工程活动与大型崩滑灾害的多重和累积响应的激灾与致灾机制模型,形成灾害失稳破坏的关键块体控制理论与评价方法,加强地质环境、人类活动与崩滑灾害的动态耦合的理解和预测能力;构建基于地质结构控制的大型崩滑灾害风险控制模型和基于采动施工扰动的灾害风险动态分析方法,形成岩溶山区高位崩滑碎屑流灾害链致灾全过程的空间预测方法和库岸滑坡涌浪远端减灾方法,确定重大典型灾害源的影响范围,进行风险控制,有效降低岩溶大型崩滑灾害风险;逐渐形成岩溶山区大型崩滑灾害的减灾示范和技术指南,并推广应用。

4 结论

本文在总结前人研究和重大地质灾害地质调查的基础上,概述了近年来岩溶山区大型崩滑灾害的主要特征,提出了当前研究中存在的核心关键科学问题:一是岩溶山区特大滑坡灾害孕育、成灾及演化过程的动力学机制不清;二是岩溶山区特大滑坡灾害早期识别与风险防控理论尚未建立。围绕这些问题,本文提出了目前岩溶山区防灾减灾工作中需要加强的研究工作内容,包括:

(1)加强岩溶地质结构发育特征和地下水赋存变化规律研究,揭示岩溶管道-裂隙-孔隙水动力作用过程和滑坡孕灾机理。

(2)研究地下开采、水位波动等工程扰动环境下岩溶山区特大滑坡演化过程,揭示开采扰动下上覆岩溶山体劣化效应与岩溶岸坡溶蚀岩体强度损伤特征,发展岩溶山区大型崩滑灾害工程扰动灾变理论与分析

方法。

(3)加快岩溶山区大型崩滑灾害高速远程链式动力学特征研究,提出灾害体高位剪出-碎屑流破碎-快速动力成灾空间预测模型与风险评估技术。

(4)研发适合于岩溶山区灾害特点的早期识别与高精度实时监测预警技术,形成岩溶山区特大滑坡风险防控技术方法和技术体系,有效提高岩溶山区城镇化和重大工程建设运行过程中综合防灾减灾科技支撑能力。

致谢:本文得到彭建兵教授、吴树仁教授的指导和帮助,在西南岩溶山区大型崩滑灾害防灾减灾工作中提供了很多研究思路。同时感谢王晨辉、刘晓丽、刘新荣、易连兴、崔芳鹏、王利、杨忠平等同志的帮助。特此致谢!

参考文献 (References):

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994. [ZHANG Z Y, WANG S T, WANG L S. Principals of engineering geology analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese)]
- [2] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京:科学出版社, 1988. [SUN G Z. China's typical landslides [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)]
- [3] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京:地质出版社, 1995. [HU G T. Landslide dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)]
- [4] 李滨,冯振,张勤,等. 岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别研究[M]. 北京:科学出版社, 2016. [LI B, FENG Z, ZHANG Q, et al. Researches on formation modes and early identification of mega-landslides in the mountainous karst areas [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)]
- [5] 黄润秋,许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京:科学出版社,2008. [HUANG R Q, XU Q. Catatrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press, 1988. (in Chinese)]
- [6] 殷跃平,吴树仁. 滑坡监测预警与应急防治技术研究[M]. 北京:科学出版社, 2012. [YIN Y P, WU S R. Research on landslide monitoring, early warning and technologies of emergency treatment and prevention [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)]
- [7] 刘传正. 重大地质灾害防治理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2009. [LIU C Z. Theory and its application on mega-geo-hazards mitigation [M].

- Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [8] 殷跃平, 刘传正, 陈红旗, 等. 2013 年 1 月 11 日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 6 - 15. [YIN Y P, LIU C Z, CHEN H Q, et al. Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhaojiagou, Zhenxiong county, Yunnan province[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 6 - 15. (in Chinese)]
- [9] YIN Y P, SUN P, ZHANG M, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China [J]. Landslides, 2011, 8(11): 49 - 95.
- [10] YIN Y P, SUN P, ZHU J L, et al. Research on catastrophic rock avalanche at Guanling, Guizhou, China[J]. Landslides, 2011, 8(4): 517 - 525.
- [11] XING A G, XU Q, ZHU Y Q, et al. The August 27, 2014, rock avalanche and related impulse water waves in Fuquan, Guizhou, China[J]. Landslides, 2016, 13: 411 - 422.
- [12] FAN X M, XU Q, SCARINGI G, et al. The “long” runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: a preliminary report [J]. Landslides, 2018, 16: 139 - 154.
- [13] 彭双麒, 许强, 郑光, 等. 碎屑流堆积物粒度分布与运动特性的关系——以贵州纳雍普洒村崩塌为例 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 129 - 136. [PENG S Q, XU Q, ZHENG G, et al. Relationship between particle size distribution and movement characteristics of rock avalanche deposits: a case study of the Pusa village rock avalanche in Nayong of Guizhou[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 129 - 136. (in Chinese)]
- [14] HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L. The Varnes classification of landslide types, an update [J]. Landslides, 2014, 11: 167 - 194.
- [15] 王国章, 李滨, 冯振, 等. 重庆武隆鸡冠岭岩质崩滑-碎屑流过程模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 101 - 106. [WANG G Z, LI B, FENG Z, et al. Simulation of the process of the Jiguanling rock avalanche in Wulong of Chongqing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 101 - 106. (in Chinese)]
- [16] LI B, FENG Z, WANG G Z, et al. Processes and behaviors of block topple avalanches resulting from carbonate slope failures due to underground mining [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(8): 1435 - 1441.
- [17] YIN Y P, HUANG B L, WANG W P, et al. Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5): 577 - 595.
- [18] FENG Z, LI B, YIN Y P, et al. Rockslides on limestone cliffs with subhorizontal bedding in the southwestern calcareous area of China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 14, 2627 - 2635.
- [19] 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 等. 现代岩溶学 [M]. 北京: 科学出版社, 2016. [YUAN D X, JIANG Y J, SHEN L C, et al. Modern karstology [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)]
- [20] 韩行瑞. 岩溶水文地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2015. [HAN X R. Karst hydrogeology [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)]

编辑: 汪美华