

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003041

西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析

高 杨¹, 贺 凯¹, 李 壮², 高浩源², 卫童瑶², 邢爱国³, 李 滨^{1,2}

(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. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 我国西南岩溶山区位于上扬子地台, 经过多期构造运动, 形成了特有的强烈褶皱地貌形态, 特大型滑坡灾害频发。通过资料收集、现场调查以及统计分析, 讨论了岩溶山区典型滑坡后破坏的成灾模式和形成条件, 并得出以下结论: (1) 我国西南岩溶山区普遍呈现上陡下缓的地形地貌特征和上硬下软的地层结构特征, 岩溶地貌和溶蚀岩体结构加剧了滑坡后破坏的成灾规模; (2) 研究区的滑坡成灾模式主要分为岩质崩塌、高位远程滑坡-碎屑流和高位远程滑坡-泥石流三种类型; (3) 岩质崩塌灾害类型剪出口高差通常小于 50 m, 等效摩擦系数通常大于 0.6, 堆积体破碎比在 5~20 之间; 高位远程滑坡-碎屑流灾害类型剪出口高差通常在 50~200 m 之间, 等效摩擦系数通常在 0.33~0.60 之间, 堆积体破碎比在 20~100 之间; 高位远程滑坡-泥石流灾害类型剪出口高差通常大于 200 m, 等效摩擦系数通常小于 0.33, 堆积体破碎比区间大于 100; (4) 西南岩溶山区的“高位滑坡”剪出口高差通常大于 50 m, 具有高速远程运动特征, 运动过程中具有冲击铲刮、破碎解体、气垫和流化四种动力学效应。滑坡后破坏成灾模式的提出, 可以为滑坡运动动力学机理和成灾反演预测研究提供重要分析模型。

关键词: 高位滑坡; 成灾模式; 等效摩擦系数; 动力学效应; 西南岩溶山区

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0014-10

An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas

GAO Yang¹, HE Kai¹, LI Zhuang², GAO Haoyuan², WEI Tongyao², XING Aiguo³, LI Bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard/Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The karst mountain area in southwest China is located on the Upper Yangtze Platform. After multi-period tectonic movements, the unique strong fold landform has formed in this area and the large-scale landslide disasters occurred frequently. Based on the data collection, field investigation and statistical analysis, this paper discusses the disaster mode and formation conditions of typical landslides in karst mountainous areas. The research results show that (1) the karst mountain area in southwest China are generally characterized by topography and landform with steep top and gentle bottom, and strata structure with hard top and soft bottom, and the karst landform and the structure of the eroded rock mass aggravate the disaster scale of the landslide. (2) The landslide disaster modes in the study area are mainly divided into three types: rock avalanche, high-position landslide-debris avalanche and high position and long-runout

收稿日期: 2020-03-17; 修订日期: 2020-04-08

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); 中国地质科学院地质力学研究所所长基金(DZLXJK201901); 重庆市地质灾害自动化监测工程技术研究中心开放课题(KF2019-8)

第一作者: 高杨(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 从事高速远程滑坡机理研究。E-mail: 737263992@qq.com

landslide-debris flow. (3) According to statistical analyses, the elevation difference of the toe of surface of rupture of rock avalanche disaster type is usually less than 50 m, the equivalent friction coefficient is usually greater than 0.6, and the disintegration ratio of accumulation body ranges between 5 and 20; the elevation difference of toe of surface of rupture of high-position landslide-debris avalanche type is usually between 100 and 200 m, the equivalent friction coefficient is usually between 0.33 and 0.6, and the disintegration ratio of accumulation body is between 20 and 100; the elevation difference of high position and long-runout landslide-debris flow type is usually greater than 200 m, the equivalent friction coefficient is usually less than 0.33, and the range of the disintegration ratio of accumulation body is greater than 100. (4) The elevation difference of the “high-position landslide” toe of surface of rupture in the southwest karst mountain area is usually greater than 50 m, which is of the characteristics of rapid and long-runout. There are four dynamic effects in the process of movement, namely entrainment, disintegration, air cushion and fluidization. The post failure disaster mode can provide an important analysis model for the study of landslide dynamic mechanism and disaster-forming inversion prediction

Keywords: high-position landslide; disaster mode; equivalent friction coefficient; dynamic effects; karst mountain areas in southwest China

我国西南岩溶山区广泛分布于云贵高原及周边区域,是世界上最大的连片裸露岩溶地区,面积达 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占国土面积的 1/15, 是我国高储量高品位矿产资源和丰富水能资源的基地, 西电东送的重要输出地。然而, 由于该地区地质环境脆弱, 人类工程活动强烈, 群死群伤的灾难性滑坡频发, 据不完全统计, 近十年岩溶山区滑坡灾害已造成 2 800 余人死亡。该区域的滑坡灾害一般高位启动, 呈现出运动速度快、致灾范围广、破坏力巨大和预测难度大等特点^[1-2]。这些滑坡灾害严重限制了岩溶山区城镇化建设的发展, 威胁着岩溶地区人居安全和社会稳定, 危及大型矿产能源基地、大型水利设施以及高速铁路、高速公路等重大工程的安全运营, 滑坡失稳后的动力成灾过程成为了山区城镇地质灾害防灾减灾研究工作中的难点和热点。

我国西南岩溶山区位于上扬子地台, 经过多期构造运动, 形成了特有的强烈褶皱地貌形态。二叠系、三叠系厚层碳酸盐岩地层覆盖于地表, 形成了上硬下软的地层结构、上陡下缓的地形特征以及强烈的溶蚀地貌等复杂的区域地质环境。同时日益加剧的人类工程活动, 使研究区成为大型沉积岩滑坡灾害的高易发区。1994 年重庆武隆鸡冠岭滑坡^[3]、2004 年重庆南川甄子岩滑坡^[4]、2009 年重庆武隆鸡尾山滑坡^[5]、2010 年贵州关岭大寨滑坡^[6]、2013 年云南镇雄赵家沟滑坡^[7]、2014 年重庆云阳咸池水库滑坡、2017 年贵州纳雍张家湾滑坡^[8]、2019 年贵州水城“7.23”滑坡^[9-10]等。这些滑坡均为高位启动, 有较大的势动能转换空间, 存在着复杂的动力过程。许多专家学者对该研究区的典型

案例开展了详细的研究。但是, 针对我国西南岩溶山区特大滑坡的成灾规律及定量化特征需要进一步总结归纳, 提出了隐患点的早期识别和危险区划方法, 对指导我国西南岩溶山区滑坡灾害的风险防范, 提升防灾、避灾和救灾能力具有重要的现实意义。

1 滑坡碎屑流典型实例

1.1 重庆武隆鸡尾山滑坡

2009 年 6 月 5 日, 重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山滑坡, 约有 $5.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的滑体从滑源区沿视倾角方向剪出, 运动过程中不断解体, 最终形成平均厚度超过 30 m, 纵向长度约 2 150 m, 总体积约为 $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的堆积体, 导致 74 人死亡 8 人受伤^[11-13] (图 1)。滑体启动后, 从约 70 m 高的陡坎剪出, 撞击前方小型山体, 铲刮山体和表面堆积层体积近 $8.0 \times 10^5 \text{ m}^3$, 经过深约 50 m、宽约 200 m 沟谷后撞击对岸, 受对岸陡坡的阻挡, 高速运动的滑体物质解体破碎, 随后沿沟谷向铁匠沟下游以碎屑流的方式运动堆积。滑体沿途发生高速撞击铲刮逐渐解体, 从块体解体为散体再到碎屑体, 最终形成滑坡碎屑流灾害^[14-16]。

1.2 贵州关岭大寨滑坡

2010 年 6 月 28 日, 贵州关岭岗乌镇大寨村发生滑坡, 约 $1.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ 崩滑体失稳下滑, 滑程超过 1.5 km, 沿途铲刮表层堆积体和摧毁建筑物, 堆积体体积达 $1.75 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。滑坡致使两个村组被毁, 共 99 人遇难 (图 2)。降雨是触发此特大自然灾害的主要原因, 24 h 降雨量达 310 mm, 降雨产生的沟谷径流量是

平时强降雨沟谷径流的 2 倍之上,裂隙岩体中的渗透压力和静水压力触发滑体失稳下滑。从地形上看,斜坡上陡下缓,形似“靴状地形”,上部陡峭地形

导致山体易于失稳,中下部开阔伸展良好的沟谷提供了远程的运动条件,较大的势能向动能转化,形成高速远程滑坡碎屑流^[6,17-18]。

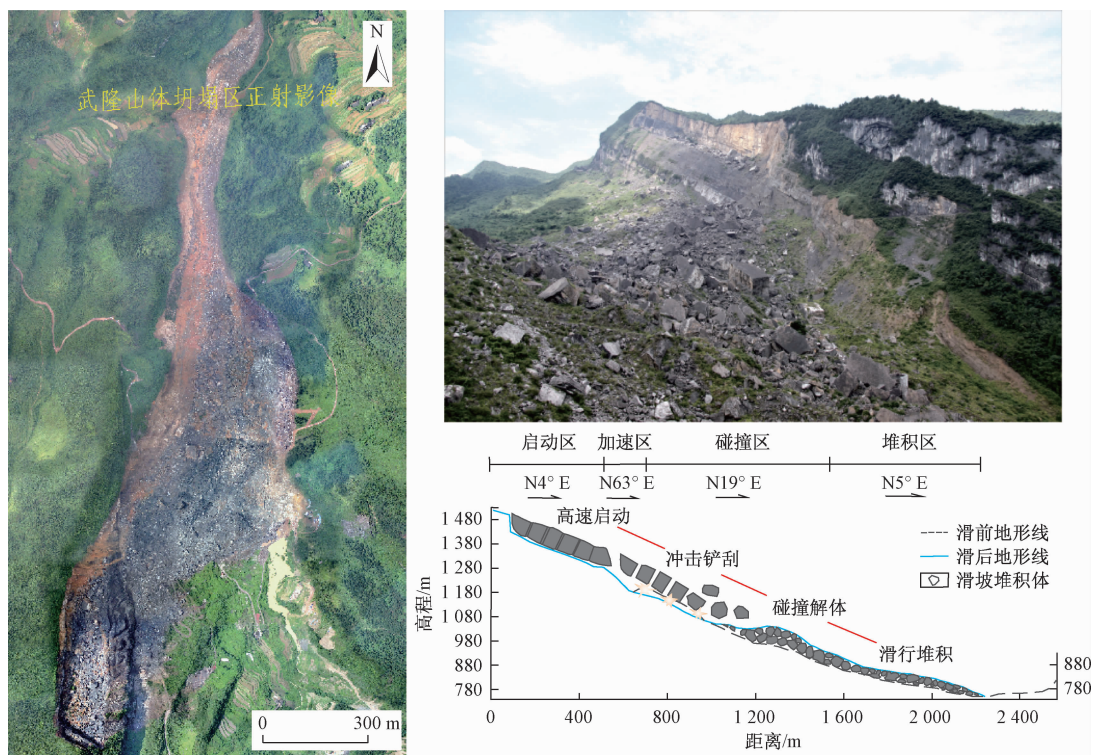


图 1 重庆武隆鸡尾山高位滑坡^[14]

Fig.1 Jiweishan high-position landslide in Wulong of Chongqing^[14]

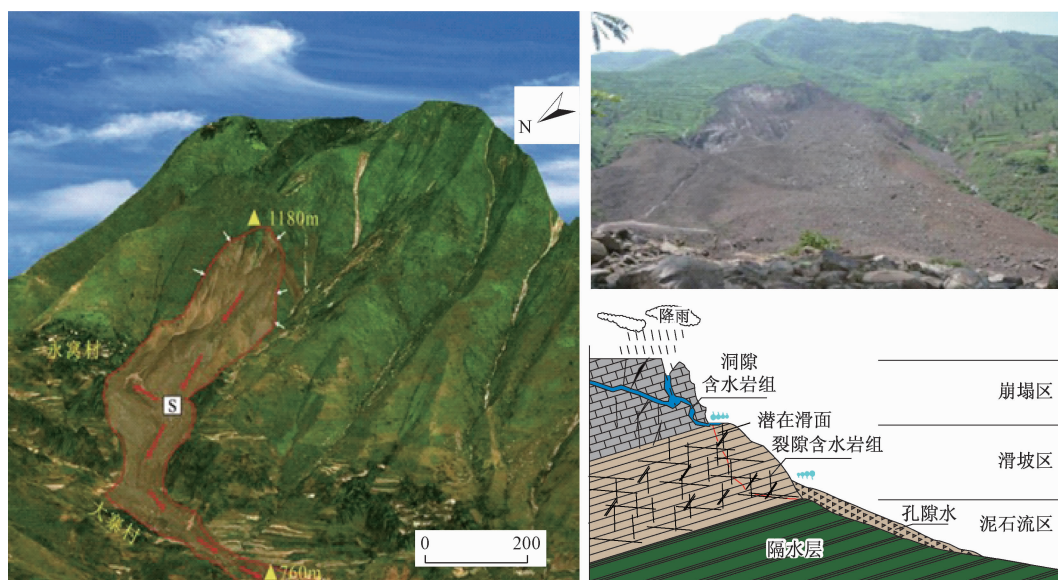


图 2 贵州关岭大寨高位滑坡^[6]

Fig.2 High-position landslide in Dazhai near Guanling in Guizhou^[6]

1.3 贵州水城“7.23”滑坡

2019 年 7 月 23 日 20 时 40 分,贵州省水城县鸡场

镇发生一起特大型滑坡灾害事件。该滑坡发生于四川、贵州、云南三省交界位置的峨眉山玄武岩地区,山

体地貌形态较为高陡,在短时强降雨条件下滑体高位启动,并转化为高速远程碎屑流,沿两条冲沟分流,冲毁并掩埋沟谷两侧的居民房屋,共摧毁当地居民 21 间房屋,77 人被掩埋,最终导致 51 人死亡^[9]。滑体物质高位剪出后,铲刮表面堆积层和强风化岩层,并逐渐解

体形成碎屑流,由于下部微地貌山脊的阻挡,分别沿 N5°E 和 N34°E 方向沟谷分流运动。形成了最大水平距离为 1 340 m,总覆盖面积为 $3.3 \times 10^5 \text{ m}^2$,总体积约为 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的堆积体(图 3),属于高位远程滑坡泥石流^[10]。

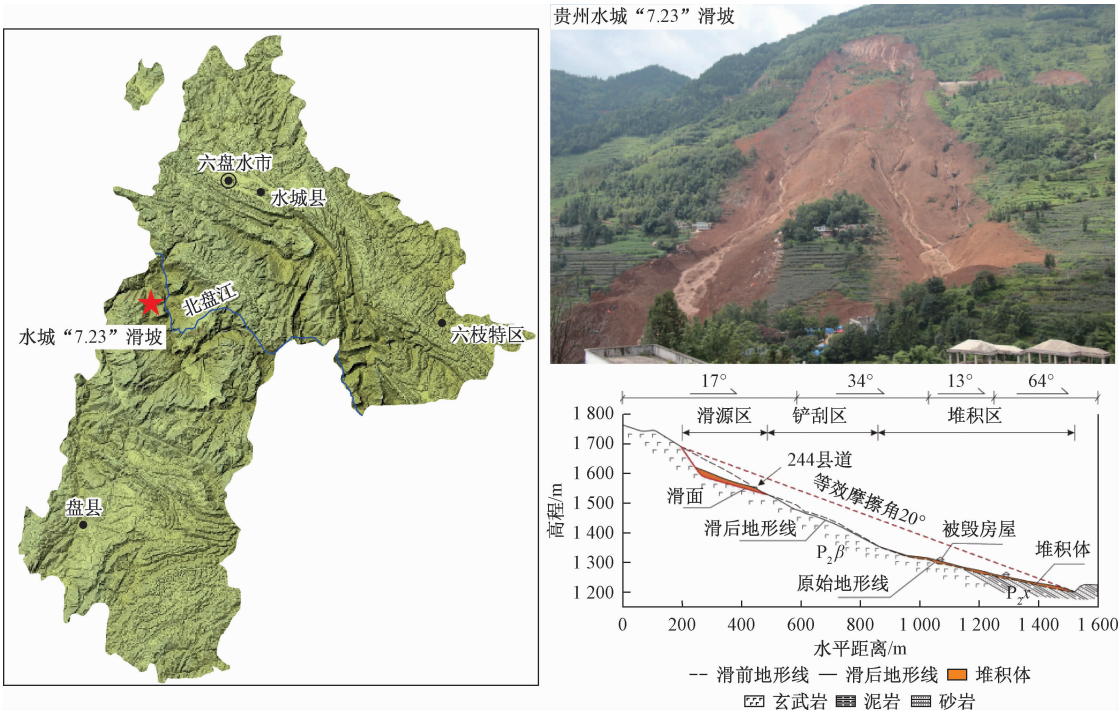


图 3 贵州水城“7.23”滑坡^[10]
Fig.3 “7.23” landslide in Shuicheng of Guizhou^[10]

2 滑坡成灾类型

根据野外现场调查和数据统计分析,将西南岩溶山区滑坡的成灾类型分成了三类:岩质崩塌、高位远程滑坡碎屑流和高位远程滑坡泥石流(图 4~5)。滑坡区域地形特征、滑体岩性和堆积体破碎比具有一定规律性。在该研究中采用破碎比分析滑体的破碎解体程度。堆积体破碎比是指岩质滑坡的滑体粒径(D)(可根据滑体体积计算等效粒径)与堆积体颗粒的平均粒径(d)之比,下面分别对三种成灾规律进行总结。

(1) 岩质崩塌

该类滑坡剪出口高差通常小于 50 m,运动距离相对较近,堆积体一般呈现坡脚处堆积,等效摩擦系数通常在 0.6 以上,堆积体破碎比为 5~20。由于势能相对较低,灾害的成灾范围相对较小,应多注重坡脚处的防护避让。该灾害类型通常发生在碳酸盐岩山区,典型实例为贵州威宁猴场镇岩质崩塌(图 4a 和图 5a)。

(2) 高位远程滑坡碎屑流

该类型滑坡剪出口高差通常为 50~200 m,运动距离相对较远,等效摩擦系数为 0.33~0.60。由于存在高位势能向动能的转换,在运动过程中通常存在冲击铲刮和解体破碎的动力学特性。堆积体破碎比为 20~100。成灾范围相对较广,多以块状岩质碎屑体堆积为主。该灾害类型通常发生在碳酸盐岩和碎屑岩区,典型实例为贵州纳雍张家湾滑坡(图 4b 和图 5b)。

(3) 高位远程滑坡泥石流

该类型滑坡剪出口高差大于 200 m,通常发生在极端降水工况下,运动距离最远,危害性极大,等效摩擦系数通常小于 0.33。由于较大势能向动能的转换,在运动过程中,通常存在冲击铲刮、解体破碎和流化拖曳的动力学特性。堆积体破碎比区间大于 100。由于滑体高位启动,势能相对较大,滑体以颗粒状岩质碎屑体为主,在沟谷地表径流的作用下充分混合形成固液两相流,成灾范围最广。该灾害类型通常发生在碳酸盐岩和碎屑岩区,典型实例为贵州水城“7.23”滑坡(图 4c 和图 5c)。

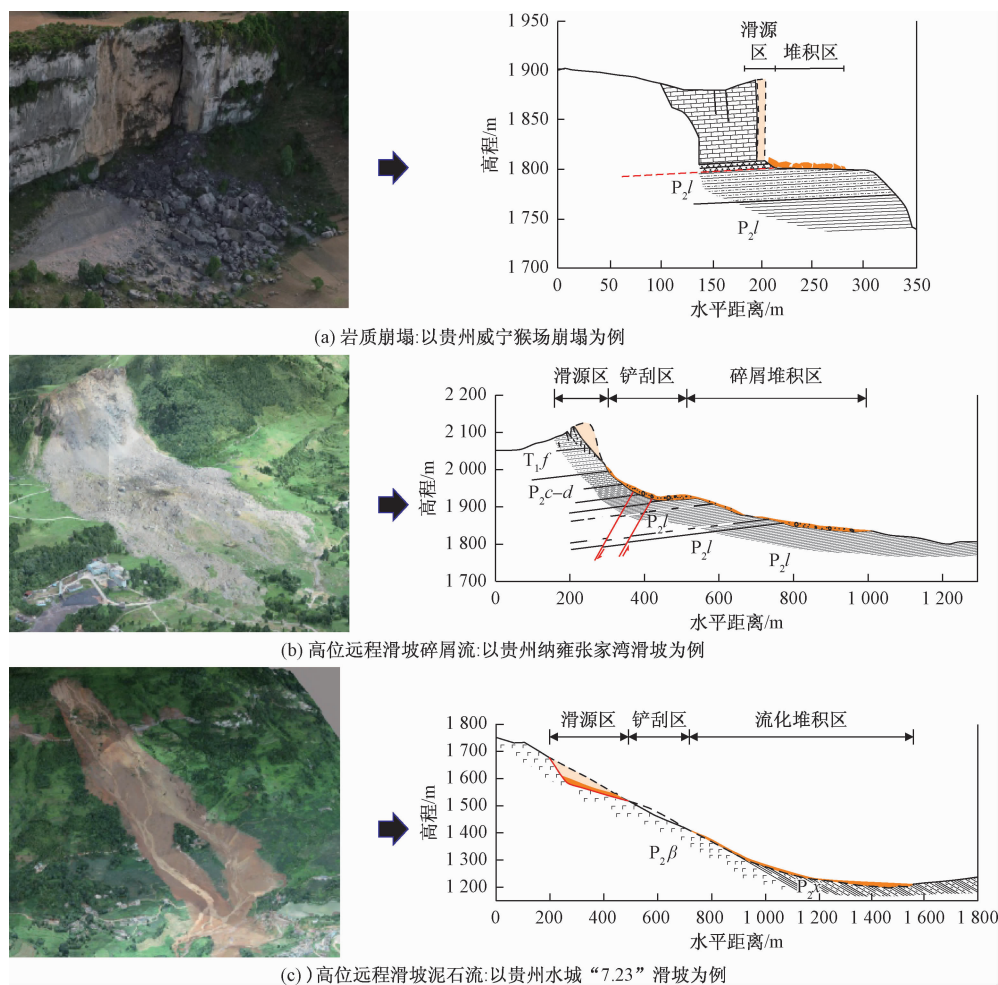


图 4 岩溶山区三种成灾类型典型案例

Fig. 4 Typical examples of three disaster types in karst mountain areas

3 高位滑坡形成特征

高位远程滑坡在中国西南岩溶山区频发,具有极端破坏力,对人类的生命和财产安全产生极大的威胁。该研究区的“高位远程滑坡”是指从高陡斜坡位置剪出并形成凌空加速坠落的滑坡,通常前缘和剪出口高差大于 50 m,最大运动速度达到 20 m/s 以上,在运动过程中存在较大的势动能转换空间,一般具有四种动力学效应:铲刮效应、解体效应、气垫效应和流化效应。主要特征为:

(1) 地质特征

受燕山构造运动影响,我国西南岩溶山区多形成 NNE-NE 向的碳酸盐岩褶皱山体,区域地质环境复杂,人类工程活动强烈,是大型岩质崩滑灾害的高易发区。西南岩溶山区滑坡灾害的地形地貌普遍呈现上陡下缓特征,滑体易从高陡斜坡上部位置剪出,形成高位岩质

崩滑灾害;地层结构呈现上硬下软特征,软岩地层通常为山区城镇居民的居住地,更容易导致群死群伤事件发生。

(2) 岩溶特征

西南岩溶山区滑坡灾害的滑体岩性以碳酸盐岩和碎屑岩沉积岩为主,但是几乎都有碳酸盐岩的参与。碳酸盐岩具有溶蚀特性,滑坡影响区内的岩溶汇水地貌和滑体内部存在溶蚀通道对滑坡的失稳破坏产生着重要影响,同时滑坡在运动过程中发生流化效应和解体效应,进而影响滑坡的成灾范围。

(3) 致灾特征

滑体岩性以硬岩为主,滑体易从高陡斜坡上部剪出,形成凌空加速坠落的滑体,撞击周围岩土体,进而转化为高速远程滑动的碎屑流,运动过程中具有冲击铲刮放大效应和碰撞解体效应,容易对周围建筑物造成毁灭性的损害。

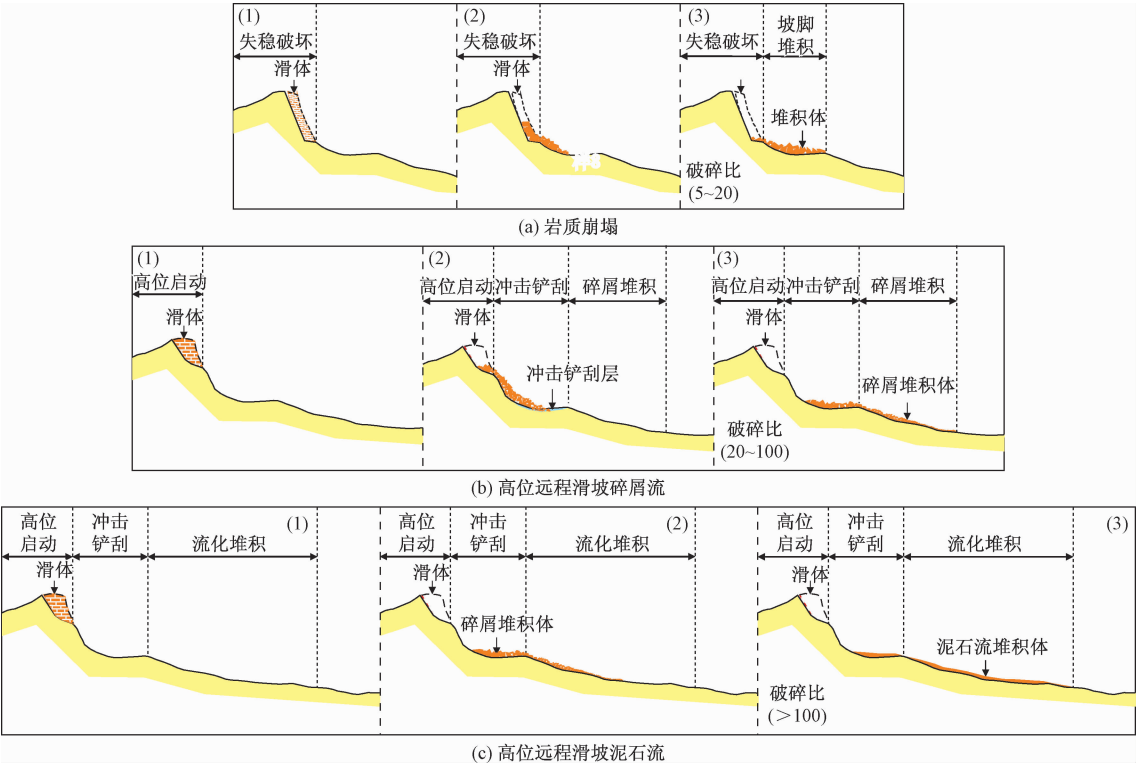


图 5 岩溶山区特大型滑坡成灾类型及过程概化模式
Fig. 5 Disaster patterns and processes of large landslide in karst mountain areas

4 滑坡运动堆积特征分析

根据野外现场调查结果和前期资料解析,本文分析了岩溶山区典型滑坡的后破坏运动堆积特征,分别对滑坡的滑体体积、运动距离、前后缘高差、剪出口高差、等效摩擦系数、铲刮体积和堆积体面积之间的关系进行统计分析。具体定义为(图 6):

- (1) 滑体体积(V_0)为变形破坏过程中启动的失稳岩土体体积;
- (2) 运动距离(L)为滑体运动路程的水平距离;
- (3) 前后缘高差(H)为滑坡后缘同堆积体前缘的高程差;
- (4) 剪出口高差(h)为滑坡剪出口同堆积体前缘的高程差。该参数可作为高位滑坡评估的重要指标;
- (5) 等效摩擦系数($\tan\alpha$)为滑坡前后缘高差与运动距离的比值。 α 为等效摩擦角,目前国内外通常采用该参数定义远程滑坡;
- (6) 铲刮体积(V_c)为滑体运动过程铲动周围不动岩土体后增加的体积;
- (7) 堆积体面积(A)为滑坡运动停止后堆积体的面积。

本文针对我国西南岩溶山区具有代表性的 18 处

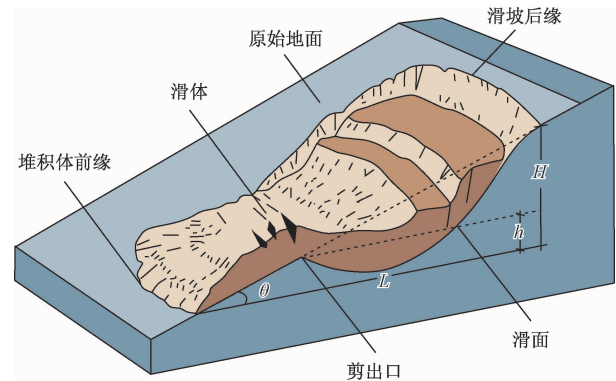


图 6 滑坡统计分析概念图(摘自《The Landslide Handbook》, 源自 Varnes, 1978)^[19-20]

Fig. 6 Conceptual map of landslide statistical analyses (from “The Landslide Handbook”, derived from Varnes, 1978)^[19-20]

典型滑坡事件(表 1)的运动堆积特征进行了数据统计分析,得出以下结果:

4.1 滑体体积、等效摩擦系数与滑坡数量关系

我国西南岩溶山区滑坡的滑体体积大多集中在 $1.0 \times 10^6 \text{ km}^3$ 以内,也有超过 $1.0 \times 10^7 \text{ km}^3$ 的特大型滑坡,例如头寨滑坡体积达 $1.2 \times 10^7 \text{ km}^3$ 。滑体体积和等效摩擦系数具有一定负相关关系,但也存在体积

小滑程远的滑坡案例(图 7a),规律性不明显。研究区内滑坡的等效摩擦系数为 0.2~0.6,基本呈现了远程运动特征(图 7b)。

4.2 前后缘高差、剪出口高差与滑坡数量关系

我国西南岩溶地区地形地貌呈现上陡下缓的“靴状”地形特征,滑体易从高陡斜坡上部位置剪出,形成高位岩质崩滑灾害,通常认为剪出口高差大于 50 m 的滑坡具有高位启动的特征。根据剪出口高差分布(图 7c)和前后缘高差的分布(图 7d)对比结果,剪出口高差主要集中在 50~200 m 内,前后缘高差主要集中在 100~500 m 内。剪出口高差同滑坡运动的等效摩擦系数具有一定相关性,当剪出口高差大于 100 m

时,等效摩擦系数小于 0.5,大多集中在 0.3 左右。

4.3 运动距离、堆积体面积与滑坡数量关系

在统计的 18 个典型滑坡中,6 处滑坡运动距离小于 500 m;7 处滑坡大于 500 m,小于 1 000 m;5 处滑坡大于 1 000 m,基本体现了该区域内滑坡具有失稳后远距离运动的特征(图 7e)。滑坡堆积体的面积全部在 $5.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ 以内,多集中在 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^2$ 以内(图 7f),体现了该区域内滑坡具有成灾范围广的特征。在我国西南岩溶山区,山体岩性大多属于硬岩岩性,节理和溶蚀裂隙发育,滑坡运动过程中的碰撞解体效应是导致滑坡影响范围增加的关键因素。

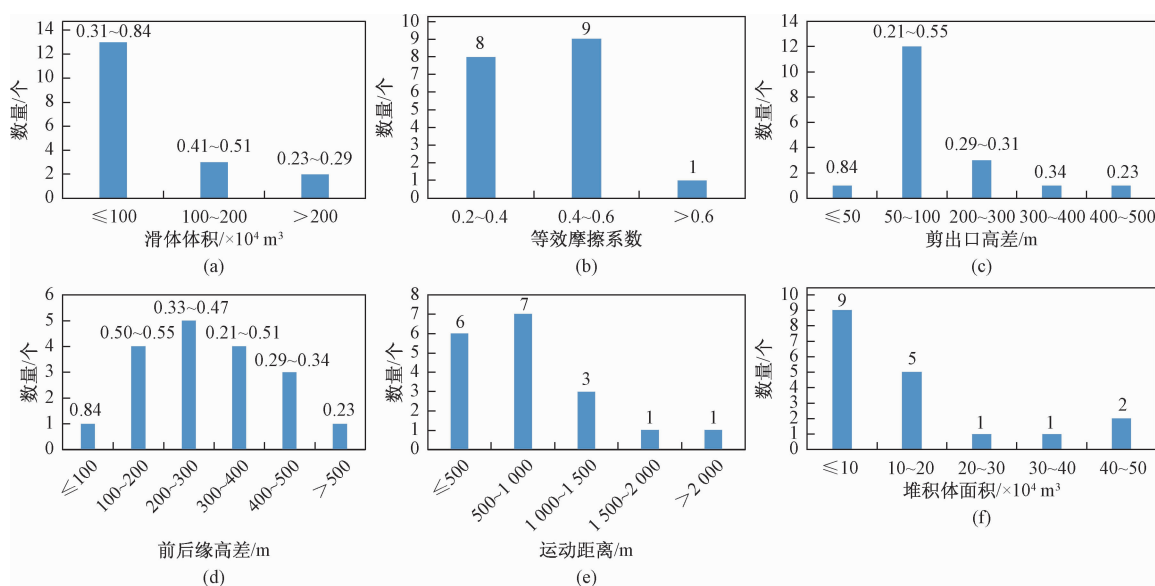


图 7 西南岩溶山区典型滑坡数量统计柱状图

Fig. 7 Statistical histogram of typical landslides in the karst mountain area in southwest China

4.4 等效摩擦系数、运动距离与滑坡体积关系

等效摩擦系数是定义滑坡高速远程运动的关键定量指标,通常该值小于 0.60 时为远程滑坡,小于 0.33 时为高速远程滑坡^[21]。结合滑体体积与等效摩擦系数之间线性趋势线拟合的相关系数 (R^2) 可知(图 8a),滑体体积同等效摩擦系数的线性关系较差,西南岩溶山区滑坡的尺寸效应并不明显。以此说明,在岩溶山区地形地貌、地层岩性等地质背景因素影响下,动力学作用才是滑坡高速远程运动的主控因素(图 8b)。

4.5 剪出口高差、前后缘高差与运动距离关系

从图 8(c)、(d)可以看出,滑坡剪出口高差和前后缘高差与滑坡运动距离具有较好的相关性,高差越

大运动距离越远,说明地形地貌条件是导致滑坡高位启动后远程运动堆积的主控因素之一。滑坡高位启动后,滑体存在较大的势能转换空间,具有运动距离远、运动速度快、冲击能量大的运动特征。

4.6 前后缘高差、运动距离与铲刮体积关系

在统计的 18 个典型滑坡案例中,选取 8 个具有明显冲击铲刮作用的滑坡进行统计分析,得到前后缘高差与铲刮体积关系散点图(图 8e),从图中可以看出,整体趋势为前后缘高差越大,高位势能越大,经过能量传递后导致铲刮体积增加。通常剪出口高差大于 50 m 时,均伴随有一定冲击铲刮作用,且铲刮体积越大,运动距离越远(图 8f)。

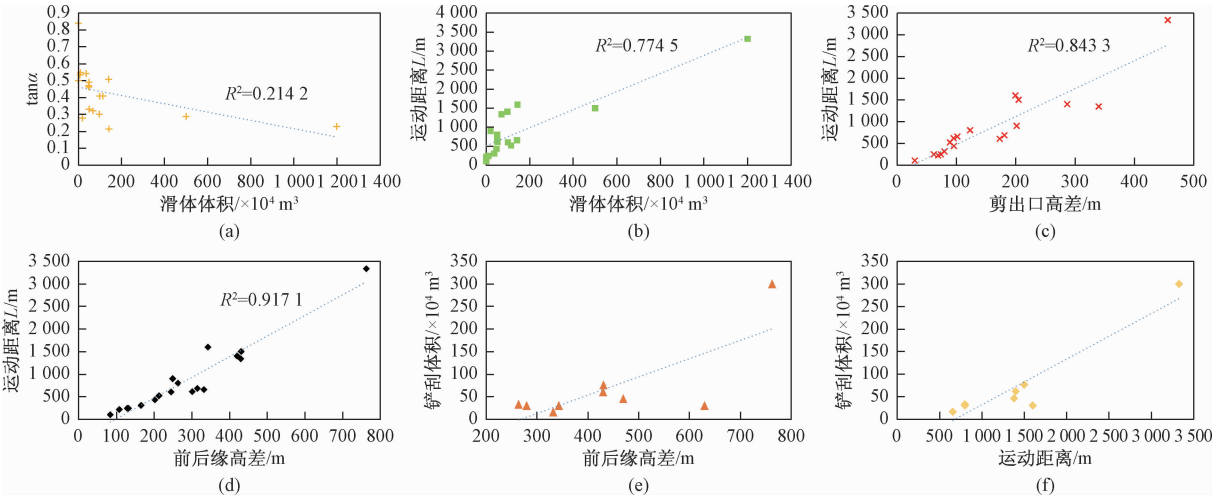


图 8 西南岩溶山区典型滑坡运动特征散点分布图

Fig. 8 Distribution of typical landslide movement characteristics in the southwest karst mountain area

表 1 滑坡运动堆积体特征基本要素

Table 1 Statistics of basic elements characteristics of landslide accumulation

滑坡名称	前后缘 高差 H/m	运动距离 L/m	滑体体积 $V_0/\times 10^4\text{ m}^3$	等效摩擦 系数 $\tan\alpha$	堆积体面积 $A/\times 10^4\text{ m}^2$	剪出口高差 h/m	灾害类型
贵州发耳菩尾滑坡	108	216	0.44	0.50	0.47	69	高位远程滑坡碎屑流
贵州威宁猴场么岩脚滑坡	84	100	0.50	0.84	0.55	30	岩质崩塌
贵州发耳尖山营 1 号滑坡	129	242	7.85	0.53	1.25	62	高位远程滑坡碎屑流
贵州发耳尖山营 2 号滑坡	133	244	10.35	0.55	1.72	74	高位远程滑坡碎屑流
云南镇雄赵家沟滑坡	250	900	20.00	0.28	8.42	202	高位远程滑坡泥石流
贵州水城腾庆 1 号滑坡	166	307	36.27	0.54	4.02	80	高位远程滑坡碎屑流
贵州水城腾庆 2 号滑坡	203	433	48.00	0.47	4.52	96	高位远程滑坡碎屑流
贵州纳雍张家湾滑坡	264	800	49.30	0.33	18.69	123	高位远程滑坡碎屑流
重庆南川甑子岩滑坡	315	683	50.00	0.46	10.11	181	高位远程滑坡碎屑流
贵州鬃岭左家营滑坡	301	614	50.77	0.49	8.72	95	高位远程滑坡碎屑流
贵州水城“7.23”滑坡	430	1 340	70.00	0.32	33.00	340	高位远程滑坡泥石流
贵州关岭大寨滑坡	420	1 400	98.50	0.31	14.30	287	高位远程滑坡泥石流
湖北宜昌盐池河滑坡	246	604	100.00	0.41	23.90	173	高位远程滑坡碎屑流
贵州鬃岭中岭滑坡	213	522	114.21	0.41	12.93	89	高位远程滑坡碎屑流
贵州福泉小坝滑坡	332	656	141.00	0.51	11.70	102	高位远程滑坡碎屑流
重庆云阳咸池水库滑坡	343	1 600	144.00	0.21	7.90	200	高位远程滑坡泥石流
重庆武隆鸡尾山滑坡	431	1 500	500.00	0.29	48.30	205	高位远程滑坡碎屑流
云南昭通头寨滑坡	763	3 330	1 200.00	0.23	41.82	457	高位远程滑坡泥石流

5 结论

(1)我国西南岩溶山区多形成 NNE—NE 向的碳酸盐岩褶皱山体,普遍呈现上陡下缓的地形地貌特征和上硬下软的地层结构特征,碳酸盐岩的溶蚀特性导致的岩溶汇水地貌和溶蚀通道发育,进而加剧了滑坡后破坏的运动堆积特性。

(2)我国西南岩溶山区滑坡分成了岩质崩塌、高位远程滑坡碎屑流和高位远程滑坡泥石流三种成灾类型,以高位远程滑坡碎屑流灾害发育最多。滑坡区域

地形特征、滑体岩性和堆积体破碎比呈现一定规律性。岩质崩塌灾害类型剪出口高差通常小于 50 m,等效摩擦系数通常在 0.6 以上,堆积体破碎比为 5~20;高位远程滑坡碎屑流灾害类型剪出口高差为 50~200 m,等效摩擦系数 0.33~0.60,堆积体破碎比 20~100,多以岩块为主;高位远程滑坡泥石流灾害类型剪出口高差大于 200 m,发生在极端降水工况下,等效摩擦系数小于 0.33,堆积体破碎比区间大于 100,滑体以碎屑颗粒为主。

(3)西南岩溶山区“高位滑坡”的剪出口高差大于

50 m,最大运动速度达到 20 m/s 以上,运动过程中存在较大的势动能转换空间,一般具有四种动力学效应:铲刮效应、解体效应、气垫效应和流化效应。

参考文献 (References):

- [1] XU Q, ZHANG S, LI W L. Spatial distribution of large-scale landslides induced by the 5.12 Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(2): 246 – 260.
- [2] CHEN Z Y, MENG X M, YIN Y P, et al. Landslide research in China [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2016, 49(4): 279 – 285.
- [3] 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)]
- [4] 贺凯,殷跃平,李滨,等. 塔柱状岩体崩塌运动特征分析[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(1): 86 – 92. [HE K, YIN Y P, LI B, et al. Video imaged based analysis of motion characteristic for tower rock collapse [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(1): 86 – 92. (in Chinese)]
- [5] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 217 – 226. [YIN Y P. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide——a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 217 – 226. (in Chinese)]
- [6] 殷跃平,朱继良,杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡—碎屑流研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(4): 445 – 454. [YIN Y P, ZHU J L, YANG S Y. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 445 – 454. (in Chinese)]
- [7] 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)]
- [8] 郑光,许强,巨袁臻,等. 2017 年 8 月 28 日贵州纳雍县张家湾镇普酒村崩塌特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(1): 223 – 240. [ZHENG G, XU Q, JU Y Z, et al. The Pusacun rock avalanche on August 28, 2017 in Zhangjiawan Nayongxian, Guizhou: characteristics and failure mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 223 – 240. (in Chinese)]
- [9] 王立朝. 贵州水城“7·23”特大山体滑坡[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(4): 8. [WANG L C. “7.23” landslide in Shuicheng, Guizhou[J]. *The Chinese Journal of Geological*, 2019, 30(4): 8. (in Chinese)]
- [10] GAO Y, LI B, GAO H Y, et al. Dynamic characteristics of high-elevation and long-runout landslides in the Emeishan basalt area: a case study of the Shuicheng “7.23” landslide in Guizhou, China [J]. *Landslides*, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01406-6>.
- [11] 冯振,殷跃平,李滨,等. 重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(9): 2704 – 2712. [FENG Z, YIN Y P, LI B, et al. Mechanism analysis of apparent dip landslide of Jiweishan in Wulong, Chongqing [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(9): 2704 – 2712. (in Chinese)]
- [12] 朱赛楠,殷跃平,李滨. 大型层状基岩滑坡软弱夹层演化特征研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1638 – 1647. [ZHU S N, YIN Y P, LI B. Evolution characteristics of weak intercalation in massive layered rockslides—A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1638 – 1647. (in Chinese)]
- [13] 李晓,张年学,盛祝平,等. 武隆鸡尾山滑坡发生机制与裂缝成因分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1): 1 – 12. [LI X, ZHANG N X, SHENG Z P, et al. Sliding mechanisms and fracture genesis of Jiweishan landslide in Wulong[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1): 1 – 12. (in Chinese)]
- [14] 高杨,李滨,王国章. 鸡尾山高速远程滑坡运动特征及数值模拟分析[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(3): 425 – 434. [GAO Y, LI B, WANG G Z. Motion feature and numerical simulation analysis of Jiweishan landslide with rapid and long run-out[J].

- Journal of Engineering Geology, 2016, 24(3): 425 – 434. (in Chinese)]
- [15] 高杨,殷跃平,邢爱国,等. 鸡尾山高速远程滑坡—碎屑流动力学特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 46 – 51. [GAO Y, YIN Y P, XING A G, et al. Jiweishan rapid and long run-out landslide-debris flow dynamic characteristics analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 46 – 51. (in Chinese)]
- [16] 邹宗兴,唐辉明,熊承仁,等. 高速岩质滑坡启动弹冲加速机制及弹冲速度计算——以武隆县鸡尾山滑坡为例[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2004 – 2012. [ZOU Z X, TANG H M, XIONG C R, et al. Starting-elastic-impulsive acceleration mechanism of high-speed rockslide and elastic-impulsive velocity calculation: Taking Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing for example [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 2004 – 2012. (in Chinese)]
- [17] XING A G, WANG G H, LI B, et al. Long-runout mechanism and landsliding behaviour of large catastrophic landslide triggered by heavy rainfall in Guanling, Guizhou, China [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(7): 971 – 981.
- [18] KANG Y, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Application of InSAR techniques to an analysis of the Guanling landslide[J]. Remote Sensing, 2017, 9(10): 1046.
- [19] VARNES D J. Slope movement types and processes [C]//Landslides: Analysis and Control; Transportation Research Board. Washington, DC, 1978: 11 – 33.
- [20] HIGHAND L, BOBROWSKY P T, SURVEY G. The landslide handbook: a guide to understanding landslides [M]. Reston: US Geological Survey, 2008: 5.
- [21] 张明,殷跃平,吴树仁,等. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 805 – 817. [ZHANG M, YIN Y P, WU S R, et al. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 805 – 817. (in Chinese)]

编辑:张若琳