

云南德钦日因卡滑坡孕灾背景及形成机理

闫茂华, 魏云杰, 李亚民, 刘明学, 王文沛, 王俊豪, 曹 峰

YAN Maohua, WEI Yunjie, LI Yamin, LIU Mingxue, WANG Wenpei, WANG Junhao, CAO Feng

中国地质环境监测院, 北京 100081

China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China

摘要:云南德钦地区位于青藏高原南延部位横断山纵谷地带,多数村镇海拔在 3000 m 以上,地质构造复杂,岩体破碎,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频发、易发,属于“三区三州”内典型的高海拔贫困区。通过在该区域内开展地质灾害调查与监测,查明高海拔贫困山区的地质灾害分布特征和成灾机理。以日因卡滑坡为例,采用“空-天-地”一体化技术,结合滑坡研究区的工程地质条件,现场调查分析滑坡潜在失稳机理与滑坡运动特征,围绕地质灾害调查评价、监测预警、应急防治等体系开展工作,得到几点认识:①滑坡失稳与地表降水、冰雪融水、冻融循环作用及切坡建房等人类工程活动密切相关;②根据滑坡变形特征,概化其孕灾失稳过程,即前缘局部滑动阶段→蠕滑-拉裂阶段→整体滑动阶段→铲刮覆盖阶段;③基于分析澜沧江流域滑坡灾害的发育特征,总结了此类滑坡的成灾模式,并针对性地提出了“三区三州”高海拔贫困区内地质灾害的防治措施和建议,为贫困区科学防灾减灾提供了技术支撑和科学依据,切实保障了贫困群众的生命财产安全。

关键词:“空-天-地”一体化;滑坡;灾害分布特征;成灾机理;脱贫攻坚

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)12-1971-10

Yan M H, Wei Y J, Li Y M, Liu M X, Wang W P, Wang J H, Cao F. Development characteristics and formation mechanism of Deqin Riyinka landslide in Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1971-1980

Abstract: The Deqin area of Yunnan is located in the vertical valley of the Hengduan Mountain along the southern extension of the Tibetan Plateau. Most villages and towns are more than 3000 meters above the sea level. The geological structure there is complex, rock masses are broken, and landslides, collapses, debris flows and other geological disasters are frequent and prone to occur. Deqin is hence a typical high-altitude poverty area in the three districts and three prefectures. In accordance with the requirements of strengthening geological disaster investigation and monitoring and early warning in the Ministry of Natural Resources 2020 Plan for Poverty Alleviation Work and through the investigation and monitoring of geological disasters in this area, the distribution characteristics and mechanism of and disasters of geological disasters in high-altitude poor mountainous areas were identified. With Riyinka landslide as an example, the authors adopted "air-space-ground" integrated technology in combination with the engineering geological conditions of the landslide study area, investigated and analyzed the potential instability mechanism and landslide movement characteristics of the landslide, and focused on the investigation, evaluation and monitoring of geological disasters. Early warning, emergency prevention and other systems were carried out, and several understandings were obtained as follows: ①Landslide instability is closely related to human engineering activities such as surface precipitation, ice and snow melting, freezing and thawing cycles, and cutting slopes and building houses; ②According to landslide deformation characteristics, the authors generalized the disaster-pregnancy and instability process, i.e., local sliding stage at the leading edge → creeping-cracking stage → overall sliding stage → scraping and covering stage. ③Based on the analysis of the development characteristics of landslide disasters in the Lancang River Basin, the authors made a disaster model of such landslides, and put forward the prevention and control measures and suggestions for tackling geological disasters in high-altitude poverty

收稿日期:2020-06-03;修订日期:2020-10-27

资助项目:中国地质调查局项目《澜沧江德钦-兰坪段灾害地质调查》(编号:DD20190647)

作者简介:闫茂华(1989-),男,硕士,工程师,从事工程地质与地质灾害防治研究工作。E-mail: yanmh@cigem.cn

通讯作者:魏云杰(1973-),男,博士,教授级高级工程师,从事工程地质与地质灾害防治研究工作。E-mail: 690476502@qq.com

areas in the three districts and three prefectures. Scientific disaster prevention and mitigation provide technical support and scientific basis and can effectively protect the lives and property of the poor.

Key words: "air-space-ground" integration; landslide; disaster distribution characteristics; disaster mechanism; poverty alleviation

2019年9月5日,云南省昭通市巧家县发生山体滑坡,滑坡体积 $1.26 \times 10^4 \text{ m}^3$,造成前缘2户房屋被埋,导致9人死亡;同年9月30日,昭通市盐津县发生滑坡、泥石流灾害,造成8人死亡,2人重伤和1人轻伤;2018年8月6日,云南省文山州富宁县发生顺层岩质滑坡,堵塞河道形成堰塞湖,滑坡体积约 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,堰塞体体积约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$;同年10月10日,西藏自治区江达县白格村发生特大型高位岩质滑坡——堰塞湖灾害,造成金沙江断流2日。这一系列的地质灾害都受到青藏高原隆升影响,区域活动断裂带密度大,新构造活动强烈,深切沟谷发育,地势相对高差大。活动断裂带附近斜坡岩体结构复杂,斜坡完整性差,断裂带通常发育破碎岩体,附近斜坡松散层厚度较大,为崩塌、滑坡的形成创造了有利条件。云南德钦恰好地处澜沧江流域和金沙江流域深切切割高中山地貌区,地质环境脆弱,受滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害威胁严重。据《德钦县志》及近年来开展的地质灾害调查资料统计,德钦县城区地质灾害共造成37人死亡,1052间房屋被毁,直接经济损失达10093.4万元。因此,全面了解德钦地区地质灾害发育分布规律和成灾机理就显得极为重要和迫切。

本文以日因卡滑坡为例,利用“空-天-地”一体化技术,通过滑坡体灾害的早期识别解译和现场调查核实的方法,结合滑坡体特征、岩土体参数,深入分析滑坡成灾机理,总结此类滑坡的成灾模式,为高山峡谷区域科学防灾减灾和应急避险提供科学经验和理论依据。

1 研究区地质环境条件

云南省德钦县位于青藏高原南延部位横断山纵谷地带,属寒温-温湿气候带剥蚀中山地貌区,总体地势西北高,东南低。采用“空-天-地”一体化技术,通过国产高分遥感影像、倾斜摄影、InSAR观测、地面调查等方法相结合^[1-3],基本查明了县城周边地质灾害发育分布特征。县城周边直接威胁县城安全的地质灾害发育有59处(图1),主要为崩塌、滑坡、泥石流等。澜沧江德钦-兰

坪段流域上,共发育地质灾害192处,其中滑坡78处,崩塌67处,泥石流发育47处(图2)。受新构造强烈运动等影响,深谷地貌高差悬殊,研究区海拔最高点为卡瓦格博峰6740 m,最低点海拔1924 m,相对高差达4816 m。河谷形态多为“V”型深切峡谷,河道蜿蜒曲折,两岸坡度一般为 $30^\circ \sim 50^\circ$,沟谷纵坡陡,局部呈陡崖状。在中-新生代地层之上覆盖第四系粘性土,夹碎砾石层,岩性以砂岩、砾岩、泥岩、软硬相间层状碳酸盐岩和碎屑岩为主。

日因卡滑坡位于县城中部西侧,巨水河左岸,距迪庆州180 km,坐标:东经 98.89° 、北纬 28.47° (图1)。滑坡整体为岩土质滑坡,岩土体整体松散,力学强度较低,透水性强,遇降雨容易导致斜坡岩土体重度增加、岩土液化、滑带岩土强度降低。区域属澜沧江流域,区内发育多条二级支流,江面宽80~140 m,最窄处仅有40 m(图3),河床平均纵坡3.06%,平均含沙量 1.21 kg/m^3 ,多年平均流量 $917 \text{ m}^3/\text{s}$ 。滑坡区内水文地质条件较简单,主要由赋存于第四系粘土层中的孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水三大类组成。地下水主要受冰雪融水、大气降水渗入补给,沿第四系的大孔隙和垂直节理径流,多以泉的形式排泄。降雨主要集中在夏季7—8月份。年平均降雨量为55.2 mm,多年平均气温为 6°C 。区内气候受复杂地貌形态影响,河谷地区气温高、日照充足、降雨少,高山地区寒冷、潮湿、多霜雪。每年3月份气温回升 0° 以上,降雨量逐渐增加,一般在7—8月份降雨量达到最大,7月份平均气温达 14°C (图4)。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡形态特征

滑坡坡度较大,整体形成高陡斜坡,坡度在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 之间,前缘前坡角达到 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。滑坡后缘海拔相对较高,前后缘高差较大,以巨水河为界,巨水河以上滑坡大部分可划为滑源区,堆积区集中在巨水沟及其下部城镇聚集区。结合遥感影像图(图5)和地形地貌与地质图(图6),滑坡平面形态呈不规

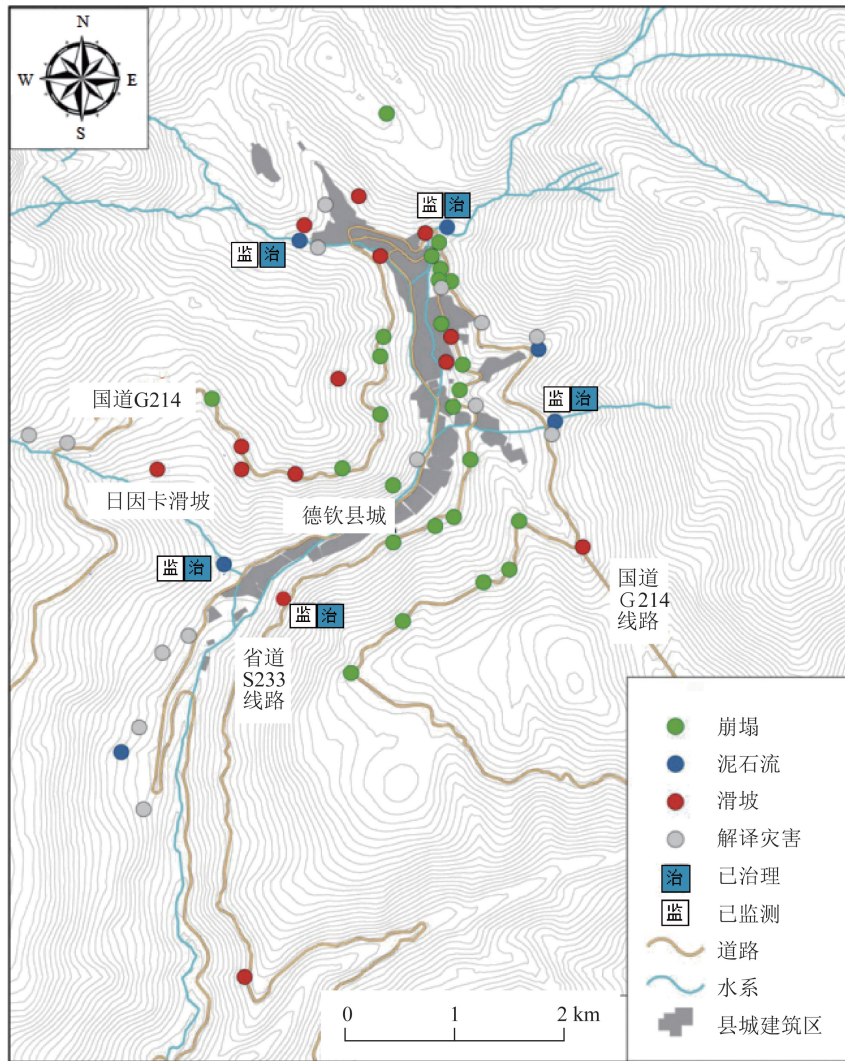


图 1 “空-天-地”一体化技术查明的地质灾害发育分布图
Fig. 1 The distribution of geological hazards ascertained by the
"air-space-ground" integrated technology

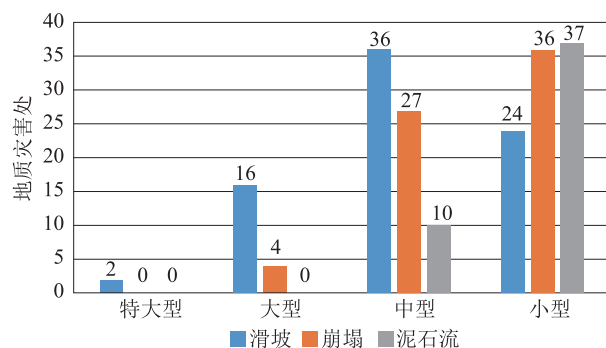


图 2 德钦-兰坪段地质灾害险情特征图

Fig. 2 Geological hazard characteristics of Deqin-Lanping section

则状,整体呈倒舌形,滑坡后缘“圈椅状”地形明显。其中变形区具有明显的滑坡形态,存在多处滑动,多为老滑坡堆积体局部蠕变。滑坡后缘存在不同深度的拉裂缝隙,形成多条高 2~3 m 的下错及陡坎。滑坡前缘右侧为巨水河,分界明显,左侧边界以滑坡体土体下错形成的沟为界^[4-7]。滑坡横向宽约 810 m,纵向斜长约 1900 m。InSAR 解译滑坡变形体表面形态为明显的三级台阶(图 7),后缘阶地平缓,中部有明显突出,前缘陡峭,前缘临近冲沟处被侵蚀切割严重。前缘呈凸形挤占巨水河主河道,前缘剪出口位于巨水河岸坡脚,高程为 3220 m,后缘高程约 3630 m,相对高差 410 m,滑坡总体积约 $860 \times 10^4 \text{ m}^3$,属大型滑坡。

2.2 滑坡变形破坏特征

结合遥感解译滑坡范围和滑坡结构特征、实际地形条件调查及主滑方向,将滑坡圈定,滑坡整体呈拇指状(图 8)。滑坡在巨水河以上为滑源、铲刮区,是滑坡启动的来源,堆积区集中在巨水沟及其下部城镇聚集区。



图 3 澜沧江峡谷照片

Fig. 3 Photo of Lancang River canyon

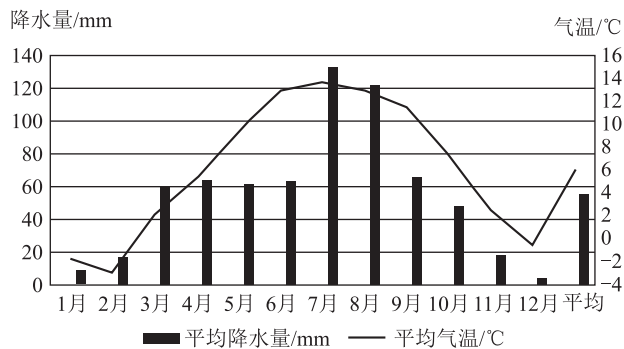


图4 德钦县 1981—2013 年降雨量

Fig. 4 Rainfall statistics of Deqin County from 1981 to 2013

因滑坡暂时未发生大规模滑动,故目前重点研究分析威胁城镇安全的滑源区边界条件、岩体力学特性、变形特征,以及潜在诱发因素和成灾机理。滑坡左侧以 1 条小型季节性冲沟为界,局部基岩断续出露,岩体相对完整,沟底为松散堆积物;滑坡右侧

以国道 G214 为分割界,国道 G214 线沿线人工堆填土由于堆积密实度不足,在长期降雨、自重等作用下出现不均匀沉降变形,多出现溜滑变形。

滑坡后缘高程约 3630 m,为圈椅状地形顶部斜坡陡缓交界部位,因洪流及泥石流冲刷切割形成高陡的临空面。滑坡前缘剪出口位于巨水河岸坡脚部位,受多期降雨洪流及泥石流冲刷切割,前缘形成高陡临空面,表层发生局部溜滑,进入沟道成为泥石流物源,溜滑有向后逐步发展的趋势^[8-11]。

2.3 滑坡变形分析

将滑坡 2017—2019 年共 44 期升轨 Sentinel-1 数据做时间序列分析,结果显示滑坡变形主要集中在滑坡后缘与滑坡体中部,变形速率多小于 3 cm/a,局部个别点变形速率较高,高变形速率点多分布在地形坡度变化较快、受侵蚀较为严重的区域。分析滑坡体中部 2 处累计变形曲线(图 9),变形基本上

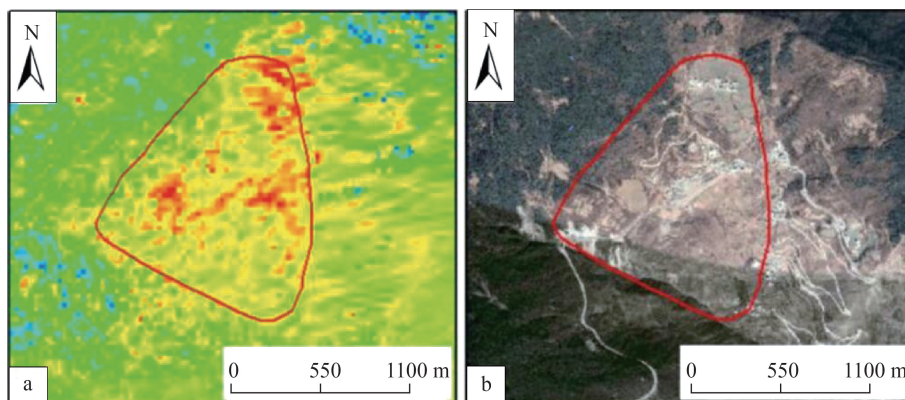


图5 日因卡滑坡 Stacking-InSAR 解译图与遥感影像

Fig. 5 Stacking-InSAR interpretation map and remote sensing image of Riyinka landslide

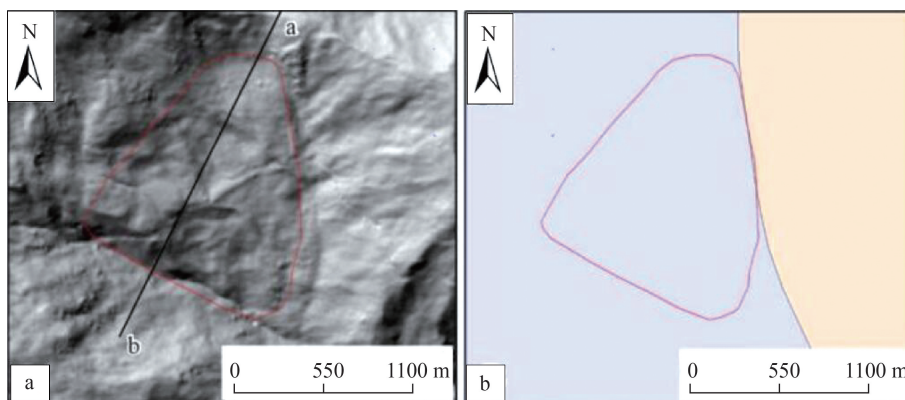


图6 日因卡滑坡地形地貌与地质图

Fig. 5 Topographic and geological map of Riyinka landslide

为线性变形, 有较好的回归趋势线, 再结合滑坡体现场变形痕迹、房屋微小开裂及滑坡体边缘处坡面遭受风化剥蚀, 形成多道纵横冲沟, 植被受到破坏变形, 滑坡后缘部分拉裂变形等特征, 目前该滑坡体仍处于蠕变活动的发展阶段, 处于相对稳定状态。

2.4 滑体土、滑带土体岩土体物理力学特征

运用地面调查、钻探、取样测试等方法, 基本查明了澜沧江德钦段以日因卡滑坡为代表的典型斜坡结构特征, 斜坡区易滑地层主要为覆盖层和强风化基岩, 覆盖层以崩坡积、坡洪积、坡积碎石土等形

成的块碎石土层、冰水堆积形成的砂卵砾石层、粘土、亚粘土层等为主(图 10), 通过在滑坡中部开展钻探可以揭露该区域的地层岩性。

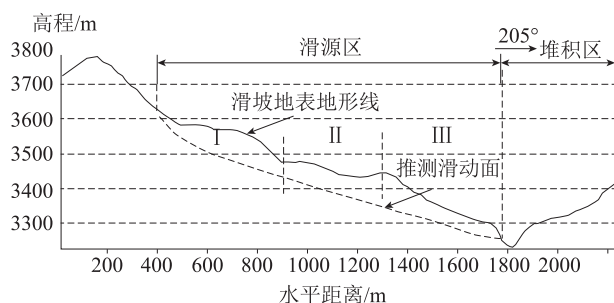


图 7 日因卡滑坡 a-b 高程剖面示意图

Fig. 7 a-b elevation profile of Riyinka landslide

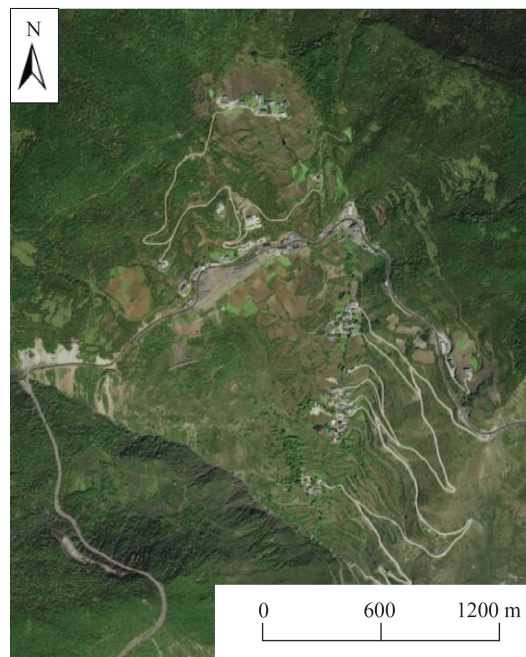


图 8 滑坡边界条件特征

Fig. 8 Landslide boundary condition characteristics

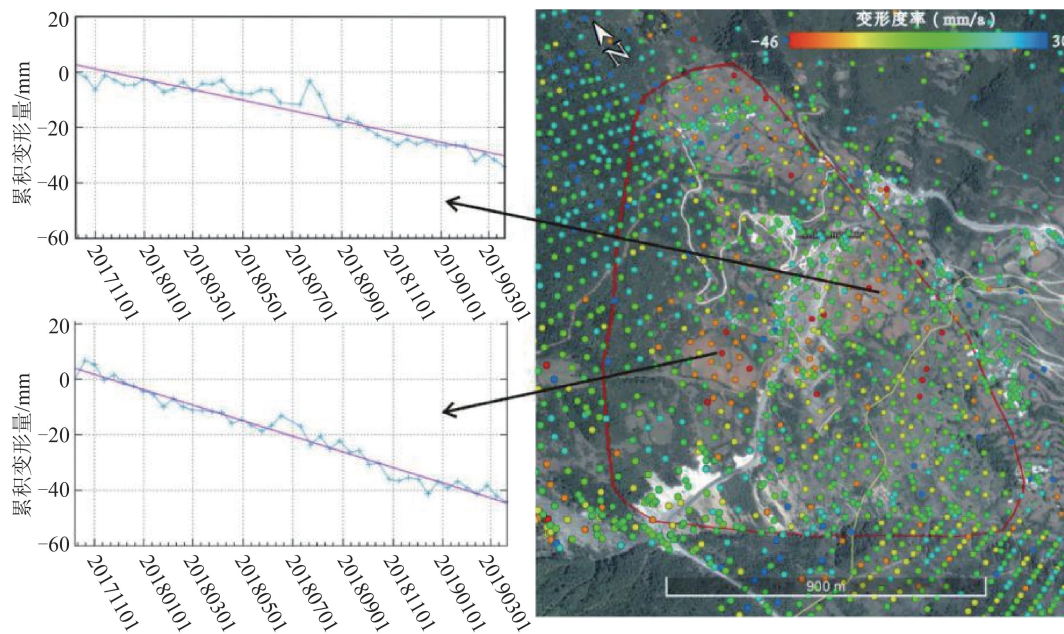


图 9 日因卡滑坡 TS-InSAR 变形图

Fig. 9 TS-InSAR deformation map of Riyinka landslide



图 10 钻孔揭露滑坡土、滑带土体岩心特征

Fig. 10 Drilling core characteristics of landslide and sliding zone soil

日因卡滑坡区滑体物质以灰色-灰褐色夹角砾的碎石土为主, 碎石呈棱角状, 块碎石母岩成分主要为强风化的砂岩、泥岩、灰岩、石英片岩等, 充填物为粉质粘土。滑带主要位于土岩接触面附近, 主要成分以粘土夹碎石、砾石为主, 岩屑及含泥量较大, 一般大于 35%, 角砾粒径较小, 结构混杂, 排列紊乱, 局部发育挤压性结构面。堆积体物质粗细颗粒含量存在差异, 结构不均一, 密实度也存在差别, 通过对比日因卡滑体土和滑带土岩土体物理力学参数(图 11), 如滑坡体密度、天然含水率、液限、塑性指数等。滑带土天然含水率、液限明显高于滑体土参数, 天然和饱和状态下快剪内聚力值、内摩擦角岩土体参数数值, 滑带土低于滑体土。岩土力学参数之间的差距表明, 日因卡滑坡滑带土本身含水率较高, 较软, 内摩擦角和内聚力数值较低, 滑坡体

内部存在易滑结构面, 在降雨、地震、人工扰动等情况下滑坡易沿着软弱结构面产生变形破坏, 威胁人民生命财产安全^[12-16]。

3 滑坡形成的潜在影响因素

日因卡滑坡潜在风险巨大, 危险的影响因素主要为内在环境地质条件和外部因素。影响和威胁此滑坡稳定性因素主要为地层岩性构造、降雨、冰雪冻融、切坡卸荷等工程活动^[17-21]。

3.1 降雨和冻融渗透影响

冻融渗透型滑坡主要是由冰雪冻融引发斜坡岩土体的变形破坏造成的。其影响滑坡稳定性作用机理为降雨、冰雪融水灌入滑坡体裂缝造成滑坡体岩土软化并在滑坡体表层发生渗流作用。破坏模式为开裂、蠕动、座落、滑移和冲出^[22-26]。由于德

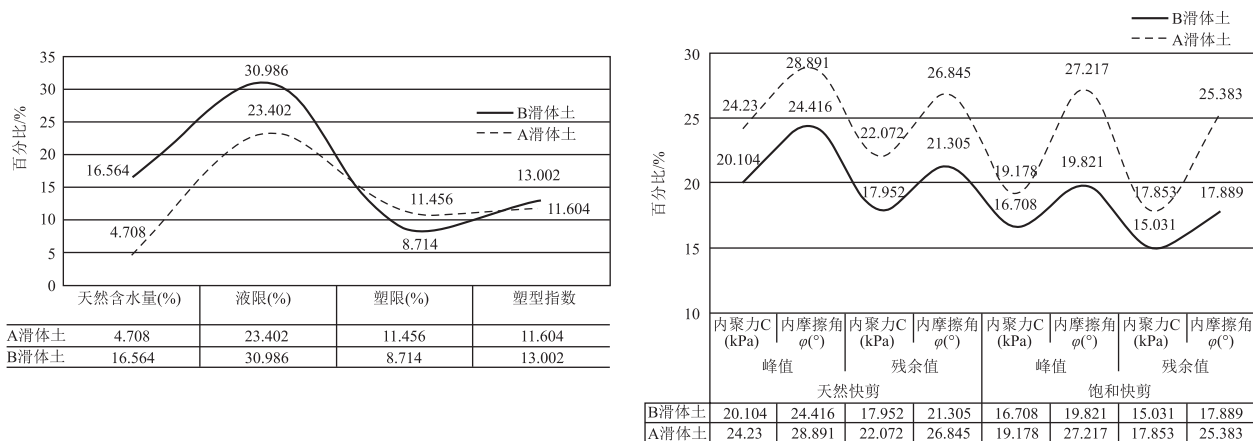


图 11 滑体土、滑带土体岩土体物理力学特征

Fig. 11 Physico-mechanical characteristics of landslide body and soil

钦地处高山峡谷区域,滑坡区表层土体多在每年 11 月至来年 3 月发生结冻,在 3 月份融化解冻,昼夜温差大,夜晚气温基本在 0°C 以下,白天气温快速升至 0°C 以上,滑坡体表层土体经历着年复一年的冻融循环作用。加之部分区域被过度开垦,农田过度耕种灌溉,这些区域存在地表水渗漏,局部区域存在漫流。农林灌溉水渗入斜坡内部隔水层积水,形成“滞水效应”,孔隙水成冰膨胀等都为滑坡的发生创造了条件。冰雪消融渗水逐步使土体重量增加,结构软化,强度降低,渗入的水在隔水界面聚集后发生软化侵蚀作用形成滑动带,逐渐破坏其整体稳定性而发展成滑坡。

3.2 切坡卸荷影响

切坡卸荷型滑坡主要是由于地表截断斜坡或坡脚开挖切坡引发的,作用机理是前缘卸荷减压导致滑坡前缘支撑力弱化,随着时间的推移,前缘坡脚不足以支撑整个滑坡体,进而产生滑坡前移。切坡卸荷的主要破坏模式是座落、牵引发展成崩塌或滑坡。日因卡滑坡位于县城附近,人类工程活动较强,公路建设开挖切坡、房屋建设开挖加载、农田耕种等较严重,G214 国道线横穿滑坡中部,高切坡现象明显(图 12)。公路开挖在内侧形成高陡边坡,最大可达 10 m 以上,局部已形成溜滑垮塌,大量房屋切坡修建增加滑坡载荷,这些切坡建房使滑坡体原有受力平衡被破坏,前缘卸荷减压导致支撑力弱化,进而影响斜坡的整体稳定性,极易引发滑坡灾害。



图 12 局部开挖切坡形成高陡临空面

Fig. 12 High and steep empty surface formed by local excavation and cutting slope

2010 年 9 月 1 日 22 时 20 分,云南保山市隆阳区瓦马乡河东村大石房后山发生滑坡,主要原因就是切坡卸荷,乡村公路从滑坡体中后部呈“之”字形 3 次穿过,3 次开挖切坡且未进行任何支护,破坏了斜坡的完整性。多级卸荷牵引导致滑坡体原有力学结构改变,滑坡体变形破坏,上部岩土体整体下滑形成山体滑坡,酿成 48 人死亡的惨剧。

3.3 地质构造影响

德钦—中甸断裂从研究区经过,沿德钦—奔子栏一线延伸,北西走向,错切与之相交的南北向断裂,至今仍在活动,断面倾向北东,对滑坡的影响极强烈。滑坡区及附近构造节理、结构面等发育,岩体被切割成块状、易发生滑坡、崩塌等。日因卡滑坡内部基岩主要为下二叠统吉东龙组的板岩、变质砂岩互层,容易形成软弱带,在雨水入渗、冻融循环、地震构造、人类工程活动等多种因素作用下,含水量增大,滑体土体重度增大,抗剪强度降低,岩土体稳定性降低,易沿软弱面发生滑移。

4 滑坡形成机理及其破坏模式

滑坡斜坡整体坡度较缓,前缘冲刷作用的存在形成高陡临空面,继续发展可能会影响滑坡整体稳定性,前缘坡体滑移后,后部失去支撑而失稳,形成牵引式滑坡。日因卡滑坡一旦发生滑动,必将对滑坡周边人民生命财产造成严重损失,其成灾模式大致可概括为:前缘局部滑动阶段→蠕滑—拉裂阶段→整体滑动阶段→铲刮覆盖致灾阶段(图 13)。

(1) 滑坡前缘发生局部滑动。伴随着巨水河对河流两侧岸坡不断侵蚀冲刷掏蚀岸坡,加之滑坡前缘公路切破严重,在滑坡前缘形成高陡临空面,使滑坡前缘失去支撑,改变原有力学结构,滑坡体在自身重力作用下,前缘局部出现滑动^[27-30](图 13-a)。

(2) 滑坡中、后部拉裂阶段。滑坡前缘临空,发生局部滑移,在滑坡体中、后部形成拉裂隙。雨水、冰雪融水等沿着裂隙通道下渗进入滑坡体内部,使上部岩土体内部含水率上升,岩土体逐渐从固体状态转变为液体状态,体积趋于压缩,土中孔隙水压力逐步增大,有效应力逐步减小,导致岩土体抗剪能力大大降低。在冻胀作用下产生新的节理裂隙,使滑体内部裂隙进一步扩大。新增裂隙不断增加,逐渐将不同裂隙末端联通,在滑体内部形成巨大的潜在易滑面,滑坡体在重力作用下沿滑移面发生蠕

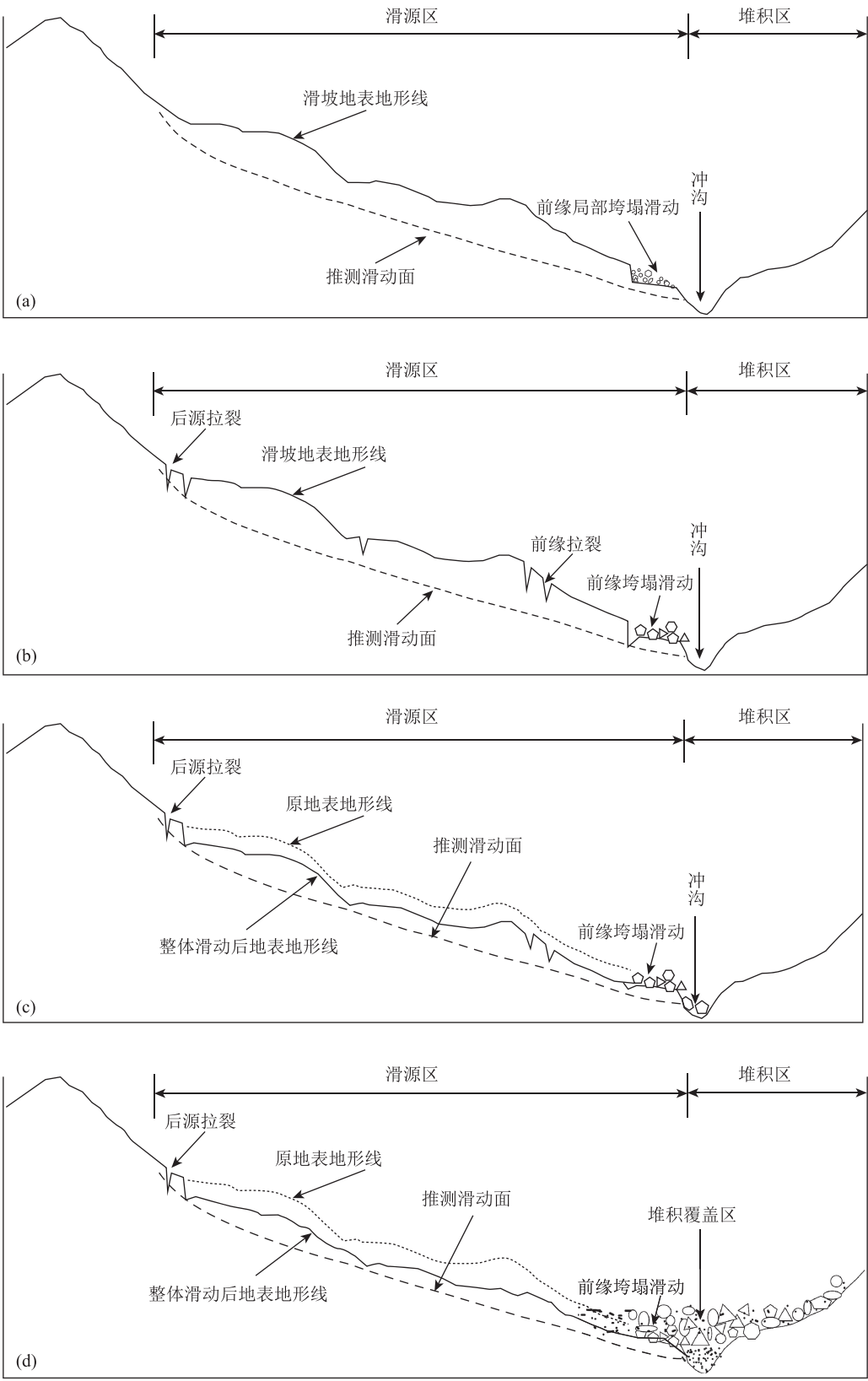


图 13 滑坡成灾机理模式

Fig. 13 Model of landslide disaster mechanism

a—前缘局部滑动、垮塌阶段;b—滑坡中、后部拉裂阶段;c—整体滑动阶段;d—铲刮覆盖致灾阶段

滑,滑坡体拉裂不断扩大,形成拉裂破坏(图13-b)。

(3)滑坡体整体滑动阶段。雨水、冰雪融水等不断沿裂隙进入滑坡内部,滑体内部含水趋于饱和,在坡体内部地下水的冻结滞水效应和坡体表层冻融循环作用下,裂隙不断贯通,土体内部摩擦力急剧减小,原有土体稳定结构遭到破坏。内部滑移面不断扩大,滑面力学强度不断降低,抗剪强度持续减小,滑坡体在自身重力作用下沿内部薄弱易滑层快速下滑(图13-c)。

(4)铲刮覆盖致灾阶段。滑坡整体下滑后,快速滑下的岩土块体首先铲刮滑坡底部沟道中松散堆积物、卵砾石等,使其成为滑坡体的一部分,一并向下滑移。高速下滑的滑坡体直接覆盖滑坡底部的村民房屋、公路、农田等,导致人员伤亡和财产损失^[31-34](图13-d)。

5 讨论

5.1 日因卡滑坡孕灾背景

日因卡滑坡主要受降雨、冻融渗透及地表开挖切坡卸荷影响,降雨和冰雪融水入渗导致滑坡体含水增加,岩土体内部孔隙水压力增大;坡脚切坡使滑坡体前缘形成临空,力学性质发生改变,滑坡整体稳定性系数降低;在滑坡体自身重力作用下发生整体拉裂、滑移,对底部村镇造成威胁,对人类的生命财产造成损失。该类滑坡在德钦地区分布较普遍,从县城周边中山-高山区均有分布,大部分滑坡分布于澜沧江两岸,部分滑坡存在堵江风险。

5.2 滑坡形成机理

日因卡滑坡潜在孕灾模式为:前缘局部滑动阶段→蠕滑—拉裂阶段→整体滑动阶段→铲刮覆盖阶段。

威胁影响滑坡变形破坏的因素分为内在环境地质条件和外部因素,主要包括地层岩性构造、降雨、冰雪冻融、人类切坡建房等工程活动。降雨、冰雪融水入渗,节理裂隙末端联通,冻融循环破坏,切坡建房导致支撑力减弱,断裂地质构造等都成为诱发滑坡体失稳发生地质灾害的不稳定因素。

6 结论

日因卡滑坡属于老滑坡,滑坡整体处于基本稳定—稳定状态,滑坡堆积体上坡已被改造,滑坡前缘、滑坡区中部G214国道线存在高切坡现象,局部

有溜滑,存在安全隐患,一旦发生滑坡灾害,将造成重大生命财产损失。建议加强对该类滑坡地质灾害的监测预警工作,加强对滑坡区监测设备的管护,落实群测群防人员及防灾预案,进行地质灾害防灾知识培训,必要时做好地质灾害应急避险演练等。合理安排滑坡区人类工程活动,如公路及建房加载、切坡等的扰动,合理优化耕地灌溉措施,避免因不合理的灌溉引发滑坡或坡面侵蚀等,切实保护好人民的生命财产安全。

本文以云南德钦日因卡滑坡为例,借助“空—天—地”一体化地质灾害调查方法,充分发挥遥感、InSAR等新技术和新方法的优势,开展区域变形分析、灾害解译,而后开展基于无人机航测的超高清影像解译验证和激光LiDAR解译验证;最终通过地面调查测绘、工程地质勘查、岩土实验分析、物理实验模拟、数值计算分析和专业监测等综合手段开展地质灾害调查,查明工作区地质灾害发育分布特征,总结地质灾害成灾机理,有针对性地开展高山峡谷区地质灾害调查工作,为该类地区地质灾害调查进行了示范,并有针对性提出了三区三州高海拔贫困区地质灾害的防治措施和建议,为贫困区科学防灾减灾提供技术支撑和科学依据,切实保障贫困群众的生命财产安全。

致谢:感谢四川省地质环境监测院、四川省地质调查院、四川二八二核地质工程有限公司与四川省华地建设工程有限责任公司在相关地质灾害调查工作过程中给予的支持和帮助。

参考文献

- [1] 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):6-10.
- [2] 刘传正,刘艳辉,温铭生,等.中国地质灾害区域预警方法与应用[M].北京:地质出版社,2009:11-23.
- [3] 魏云杰,邵海,朱赛楠,等.新疆伊宁县皮里青河滑坡成灾机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):22-26.
- [4] 庄茂国,魏云杰,邵海,等.新疆伊犁皮里青河黄土滑坡类型及其发育特征[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(1):54-59.
- [5] 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—以重庆武陵鸡尾山滑坡为例[J].工程地质学报,2018,26(6):1638-1647.
- [6] 殷跃平,王文沛,张楠,等.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,2017,44(5):827-841.
- [7] Yin Y P, Cheng Y L, Liang J T, et al. Heavy rain fall induced catastrophic rock slide Debris low at Sanxicun, Dujiangyan, after the

- Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Landslides, 2016, 13(1): 9–23.
- [8] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181–189.
- [9] 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.
- [10] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858–868.
- [11] 铁永波, 徐勇, 张勇, 等. 南方山地丘陵区地质灾害调查工程主要进展与成果[J]. 中国地质调查, 2020, 7(2): 1–12.
- [12] 刘传正, 郭强, 陈红旗. 贵州省纳雍县岩脚寨危岩崩塌灾害成因初步分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, (4): 123–144.
- [13] 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.
- [14] Hung O. Rockavalanche occurrence, process and modelling [C]// Evans S G. Landslides from Massive Rock Slope Failure, 2006: 243–266.
- [15] Yin Y P, Wang F W, Sun P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Landslides, 2009, (2): 139–152.
- [16] Conte E, Donato A, Pugliese L, et al. Analysis of the Maierato landslide (Calabria, Southern Italy) [J]. Landslides, 2018, 15(10): 1935–1950.
- [17] 殷跃平, 康宏达, 何思为, 等. 乌江鸡冠岭危岩体整治爆破工程方案[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(增 1): 324–331.
- [18] 黄润秋. 汶川地震地质灾害研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [19] 崔鹏, 何思明, 姚令凯, 等. 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, 2011.
- [20] 殷跃平, 张永双. 汶川地震工程地质与地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [21] 王掌权, 许健, 郑翔, 等. 反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, (2): 15–21.
- [22] 褚宏亮, 孙长勇, 张希夷, 等. 四川峨眉山市王山—抓口寺滑坡带工程地质特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, (1): 48–52.
- [23] 王晓明, 买振军. 新疆伊犁典型特大型黄土滑坡群成因机制及变形特征[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, (4): 195–200.
- [24] 魏云杰, 褚宏亮, 庄茂国, 等. 四川省峨眉山市王山—抓口寺滑坡成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, (3): 477–483.
- [25] 程秀娟, 张茂省, 朱立峰, 等. 季节性冻融作用及其对斜坡土体强度的影响——以甘肃永靖黑方台地区为例[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 904–909.
- [26] 安海堂, 刘平. 新疆伊犁地区黄土滑坡成因及影响因素分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, (3): 22–25.
- [27] 王念秦, 姚勇. 季节冻土区冻融期黄土滑坡基本特征与机理[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, (2): 163–166.
- [28] Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. Rock Mechanics Felsmechanik Mécaniques des Roches, 1973, (4): 231–236.
- [29] Zhuang Q L, Peng J B. A coupled slope cutting—prolonged rainfall—induced loess landslide: a 17 October 2011 case study [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, (4): 997–1011.
- [30] 张永双, 吴瑞安, 郭长宝, 等. 古滑坡复活问题研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, (7): 728–740.
- [31] 冯文凯, 张国强, 白慧林, 等. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析[J]. 工程地质学报, 2019, (2): 415–425.
- [32] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, (1): 1–9.
- [33] 郭长宝, 任三绍, 李雪, 等. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理[J]. 现代地质, 2019, (1): 206–217.
- [34] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 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[J]. 工程地质学报, 2018, (6): 1534–1551.