

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.01.02

贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探

肖锐铨¹, 陈红旗¹, 冷洋洋², 魏云杰¹, 王文沛¹

(1. 国土资源部地质灾害应急技术指导中心, 北京 100081; 2. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 2017年8月28日, 贵州省纳雍县张家湾镇普洒村发生山体崩塌, 崩塌方量约 $6 \times 10^5 \text{ m}^3$, 造成35人遇难。本文通过应急调查、过程还原及工程地质分析, 对崩塌破坏过程及机理初步研究, 以期有益于后续防治及类似灾害防范。研究发现, 崩塌主要发生在三叠系下统夜郎组灰岩和粉砂岩地层中, 岩层面近水平, 受构造和卸荷作用, 发育有平行于坡面的陡倾节理, 受长期重力作用和风化作用影响, 溶蚀漏斗和塌陷发育, 节理在长期的风化过程中形成裂隙带和沉陷带; 崩塌过程还原显示, 崩塌可分为“沉陷带变形崩塌—坡面局部崩塌—整体溃屈崩塌—撞击地面—碎屑流”五个阶段; 根据崩塌变形和运动特征, 崩塌可分为崩塌源区、崩积区、碎屑流区和变形区四个区; 崩塌体在降雨和采矿作用影响下, 拉裂沉陷带和水体的楔形侧向挤压和劈裂作用加剧了坡顶临空岩土体的变形, 崩塌发生前的降雨过程对崩塌的发生有重要的促进作用。

关键词: 崩塌; 碎屑流; 沉陷带; 楔形劈裂作用

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)01-0003-07

Preliminary analysis on the failure process and mechanism of the August 28 collapse in Nayong County, Guizhou Province

XIAO Ruihua¹, CHEN Hongqi¹, LENG Yangyang², WEI Yunjie¹, WANG Wenpei¹

(1. Technical Center for Geological Hazards Emergency of MLR, Beijing 100081, China;

2. Guizhou Institute of Geo-environment Monitoring, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: A rock collapse with volume of about $6 \times 10^5 \text{ m}^3$ occurred in Pusa village, Zhangjiawan Town, Nayong County, Guizhou Province on August 28, 2017, causing 35 deaths. A preliminary study on the failure process and mechanism of this disaster is conducted in this paper by a series of emergency investigation, failure evolution reproducing and engineering geological analysis, aiming at a better management of the problems induced by this collapse and prevention of similar disasters in the future. This study suggests that the collapse mainly occurred in the limestone and siltstones layers which belong to the Yelang Formation of lower Trias. Due to the structural activities and unloading effects, the sub-horizontal strata have many steep joints which are parallel to the slope surface. Because of the long-term gravity and weathering effects, the corrosion funnels and subsidence are developed, and the fissure zone and subsidence area are formed. By reproducing the failure process, it is shown that the collapse can be divided into five stages as follows: (1) deformation and collapse of the subsidence area; (2) local collapse of the slope surface; (3) complete collapse; (4) impacting the ground; and (5) formation of debris flow. According to the deformation and movement characteristics, the collapse area can be divided into four zones: (1) the source zone, (2) the collapse

收稿日期: 2017-11-13; 修订日期: 2017-11-20

基金项目: 国家级地质环境监测与预报(121201014000150003); 国家级地质灾害应急与防治(1211221481001); 国家自然科学基金项目(41602323, 41775111)

第一作者: 肖锐铨(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为地质灾害监测预警与应急防治研究。E-mail: xiaorh@mail.cigem.gov.cn

deposits zone; (3) the debris flow zone; and (4) the deformation zone. Influenced by rainfall and mining activities, the deformation of the upper rock mass and soil are enhanced owing to the extension induced subsidence area as well as the lateral wedge splitting effects of the water, therefore the rainfall played an important role in the occurrence of this collapse. In addition, the risk of high-speed debris flow should be studied based on the investigation, evaluation, monitoring, warning and prevention of high collapse.

Keywords: collapse; debris flow; subsidence zone; wedge splitting

0 引言

2017 年 8 月 28 日 10 时 40 分左右,贵州省纳雍县张家湾镇普洒村老鹰岩组发生山体崩塌,主崩方向约为 NW320°,崩塌体积约 $6 \times 10^5 \text{ m}^3$,崩塌源区老鹰岩标高 2 147 m,崩塌形成碎屑流前缘最低标高 1 842 m,相对高差 305 m,崩塌发生后岩土体与地面发生撞击,形成高速碎屑流,崩塌体长约 840 m,宽约 410 m,掩埋了下部普洒村大树脚组部分房屋,共造成 35 人遇难。崩塌源区岩土体底部溃屈发生倾倒式破坏,崩落在崩积区,由于崩积区地形近似“自行车座椅”,前部高挑两侧低洼,崩落岩土体与地面撞击后,沿“座椅”两侧相对低洼地形,形成高速碎屑流,进行了长距离的运动和堆积,摧毁了下部居民生活区。

纳雍“8·28”崩塌区前期有小型崩塌发生,已被定为崩塌地质灾害隐患点,进行了监测和预警,但是由于目前的认知水平限制,对于高位崩塌转化为碎屑流长距离运动未能提前预测,酿成了悲剧。纳雍“8·28”崩塌灾害与近些年该区发生的几起崩滑灾害具有相似特点^[1-7],本文是在应急调查的基础上取得的初步认识,以期有益于后续防治规划及类似灾害的防范。

1 地质环境条件

1.1 地形地貌

崩塌区地势北低南高,为构造侵蚀、剥蚀型低中山地貌(图 1、图 2)。山脉总体走向为南西向,三叠系下统夜郎组地层形成陡峭山脊,纵贯全区,最高点标高 2 147 m,最低点标高 1 842 m,相对高差 305 m,地形坡度 $10^\circ \sim 25^\circ$,局部地段坡度达到 $55^\circ \sim 70^\circ$,坡顶植被主要为浅草。“8·28”崩塌源区的老鹰岩地势陡峭,坡顶距坡脚高差 175 m 左右,与小鹰岩相连宽度约 1 km。坡脚地势平缓,多被第四系覆盖,土地利用类型为耕地和居民建设用地。

1.2 地层岩性

崩塌区出露地层有第四系,三叠系夜郎组,二叠系长兴-大隆组和二叠系龙潭组(图 2、图 3)。地面覆

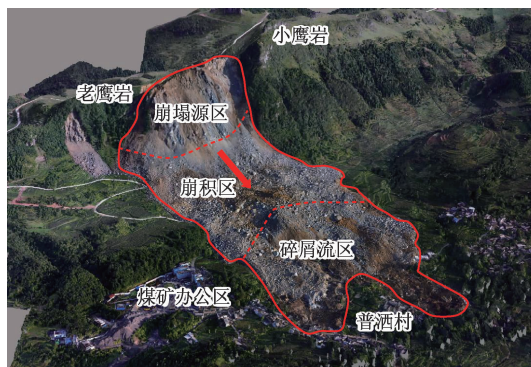


图 1 纳雍崩塌灾后影像图

Fig. 1 Image after collapse in Nayong

盖第四系(Q)土层。下三叠系夜郎组(T_1y),上部为青灰-灰褐色,薄至中厚层状灰岩,下部为灰色粉砂岩。上二叠系长兴-大隆组(P_2c+d),顶部与下三叠系夜郎组(T_1y)呈整合接触,为灰色泥质灰岩。二叠系上统龙潭组(P_3l)即煤系地层,为一套近海相含煤建造,岩性以灰至深灰色泥质粉砂岩为主,灰绿色-深灰色粉砂岩,夹薄层炭质页岩,场区出露有多层煤层,在地表被第四系土层覆盖。

1.3 地质构造

崩塌区位于织金三塘向斜北西翼西南段,地层呈单斜产出,煤层产状和地层产状一致,受断裂构造影响,地层产状变化大,倾向 $138^\circ \sim 187^\circ$,倾角 $7^\circ \sim 10^\circ$ (图 2、图 3)。附近断裂构造发育,主要断裂三条。F1 断层为正断层,呈北东向,东端抵 F3 断层,倾向 $155^\circ \sim 167^\circ$,倾角 $63^\circ \sim 70^\circ$ 。F2 断层为逆断层,倾向南东,倾角 $70^\circ \sim 75^\circ$ 。F3 断层为正断层,倾向北东,倾角 $75^\circ \sim 80^\circ$ 。F1 和 F2 断层穿过堆积区, F3 断层位于崩塌体东侧约 500 m。

1.4 水文地质

三叠系夜郎组石灰岩属可溶岩类,二叠系长兴-大隆、龙潭组地层属非可溶岩类。可溶岩出露区,溶蚀谷地、溶蚀塌陷发育,大气降水通过落水洞、漏斗等岩溶负地形迅速灌入地下补给地下水。非可溶岩地区,大气降水通过岩石的裂隙和孔隙深入地下,补给地下水。

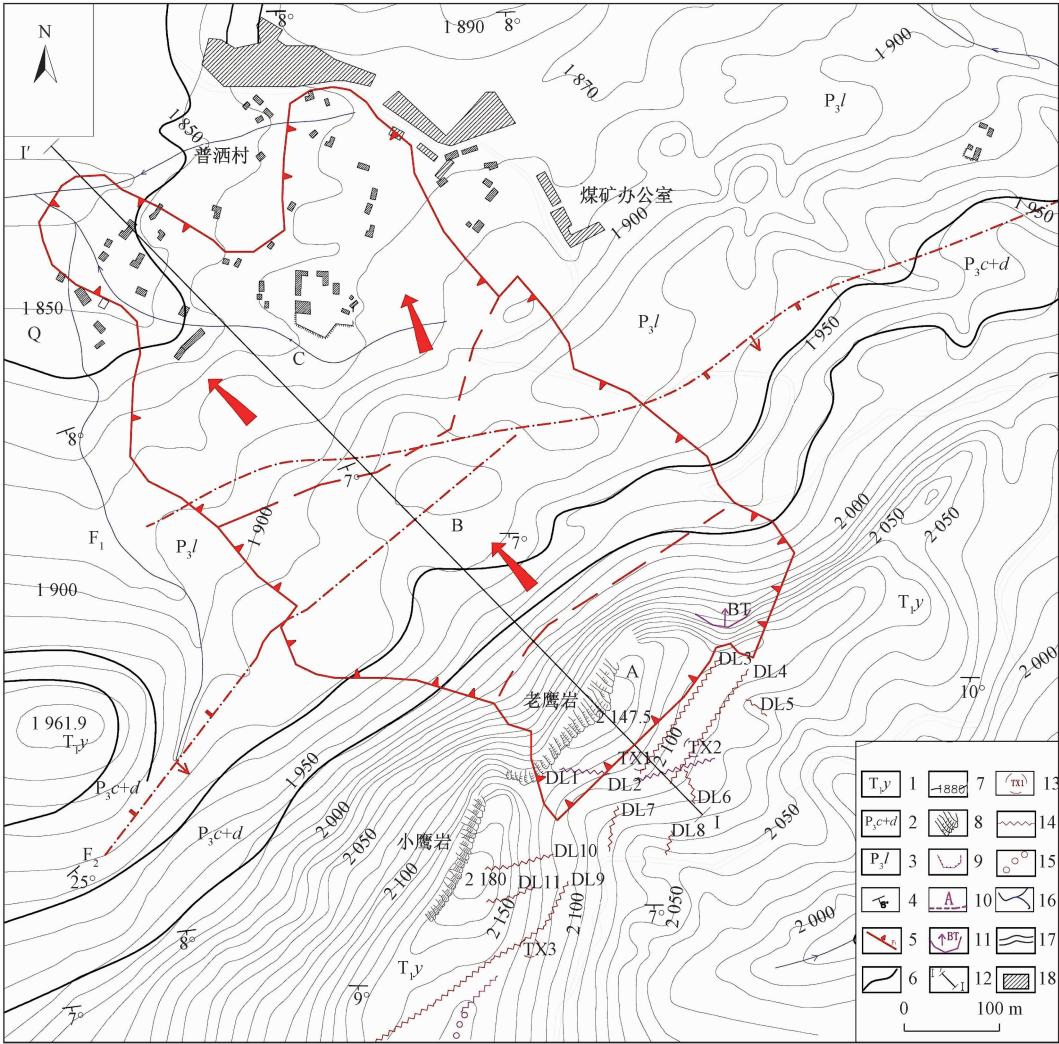


图 2 纳雍崩塌工程地质平面图

Fig. 2 Engineering geological map of Nayong collapse

1—三叠系夜郎组;2—二叠系长兴—大隆组;3—二叠系龙潭组;4—岩层产状;5—断层;6—地层界限;7—等高线;8—陡崖;9—崩塌边界;
10—分区界限;11—前期崩塌隐患;12—剖面线;13—塌陷坑;14—地裂缝;15—串珠状溶蚀洼地;16—水沟;17—道路;18—房屋和居民区。
(图中裂缝、塌陷坑和崩塌,红色为灾害后新发生的,玫红色为灾前发生的)

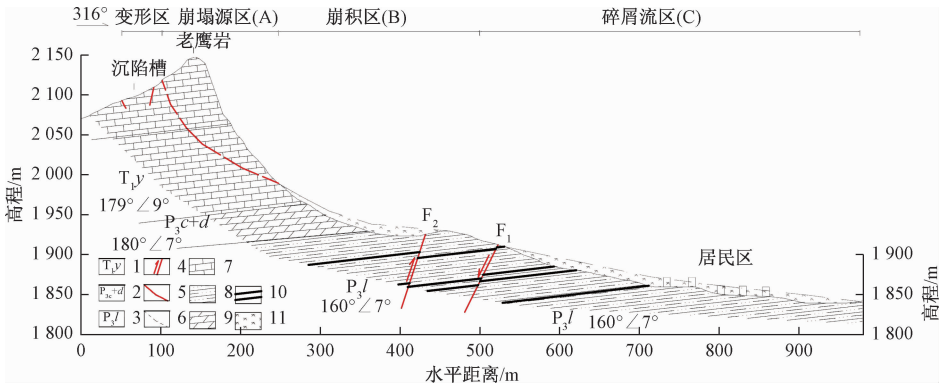


图 3 纳雍崩塌工程地质剖面示意图

Fig. 3 Cross section of Nayong collapse

1—三叠系夜郎组;2—二叠系长兴—大隆组;3—二叠系龙潭组;4—断层;5—崩塌界面;
6—崩塌后地形线;7—灰岩;8—粉砂岩;9—泥灰岩;10—煤层;11—崩塌堆积物。

老鹰岩处上部岩层属可溶岩,下部岩层属非可溶岩,降雨通过岩溶通道入渗后有利于地下水的汇集。

2 崩塌破坏过程

本次崩塌发生过程中留下了珍贵的影像资料。资料包括侧面的录像和正面的录像,结合两份影像资料将变形破坏过程分为“沉陷带变形崩塌-坡面局部崩塌-整体溃屈崩塌-撞击地面-碎屑流”5个阶段。

首先是沉陷带变形崩塌阶段(图4a、图5a)。拉裂沉陷带的东南端切穿斜坡,出露在坡表,是整个崩塌灾害最先发生局部崩塌的位置。后续是坡面崩塌阶段(图4b、图5b、c)。坡面崩塌自崩塌源区右边界逐渐向崩塌源区中间发展,既有坡顶表面崩塌也有坡体中部表面崩塌,说明整体崩塌发生前整个坡体应力不断调整,水平向位移不断增大。随着坡体整体水平位移的增加,边坡变形破坏进入整体溃屈阶段(图4c、图5d)。从整体崩塌运动形态可以看出,崩塌源区岩土体底部溃屈发生倾倒式破坏,崩塌源区岩土体一泻而下,崩积在近似平台的地面。由于崩塌源区顶部距崩积平台高差近200余m,势能瞬间转化为动能,崩塌物质没有停留在崩积区,而是转化为高速碎屑流冲向下部老鹰岩组居民区,碎屑流所经之地房屋和植被被全部摧毁。

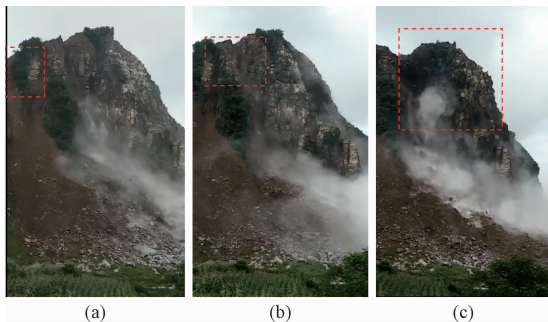


图4 崩塌过程图(侧视)

Fig. 4 Images of collapse process (side-view)

3 崩塌分区特征

根据纳雍“8·28”崩塌变形破坏过程和特征,将崩塌进行了分区,共分为四个大区:崩塌源区(图2中A区,图6)、崩积区(图2中B区,图6)、碎屑流区(图2中C区,图6)和变形区(图6中I、II和III)。

3.1 崩塌源区

位于老鹰岩中上部(图2、图6),主要分布在高程1990~2147 m范围内,地层岩性主要为三叠系夜郎

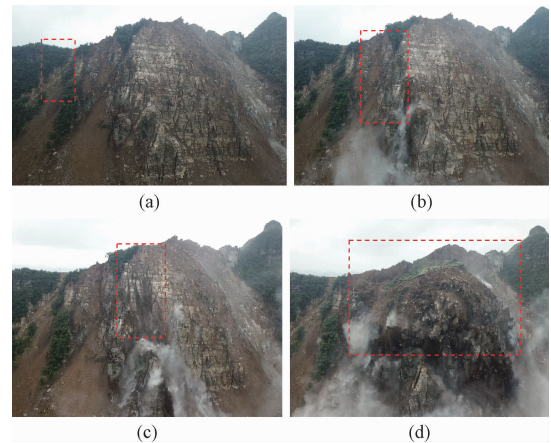


图5 崩塌过程图(正视)

Fig. 5 Images of collapse process (front view)

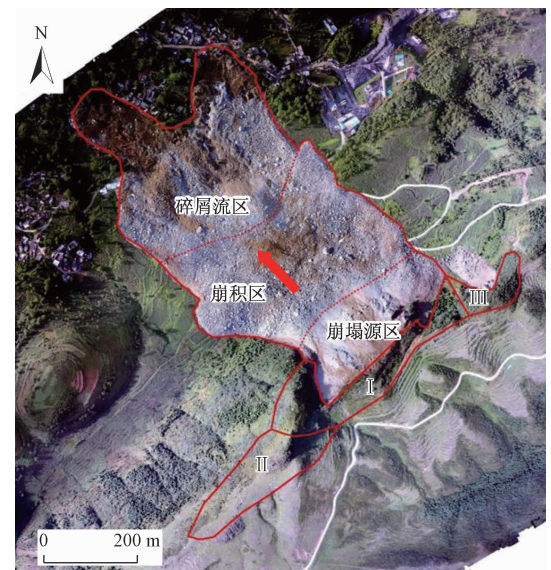


图6 纳雍崩塌分区图

Fig. 6 Zonation map of Nayong collapse

组(T_1y),上部为灰岩夹泥灰岩,下部为砂质泥岩夹粉砂岩,原始地形 $55^\circ \sim 70^\circ$ 。崩塌发生时崩塌源区岩土体底部溃屈发生倾倒式破坏,崩塌源区上部岩体重力作用导致下部岩土体逐渐发生溃屈,上部发生近似倾倒式的压裂溃屈破坏,崩塌发生后后缘残留近直立的陡壁,中下部则残留有近乎平面的陡坡(图7)。

3.2 崩积区

崩积区主要分布在高程1920~1990 m,地形坡度 $10^\circ \sim 25^\circ$,原始地形较缓似“自行车座椅”状(图2),中间为平台,略高于左右两侧,形成前部高挑两侧低洼地势,两侧的低洼处与下部负地形相连。崩落岩土体与地面撞击后,沿“座椅”两侧相对低洼地形,形成高速碎屑流,进行了长距离的运动和堆积。



图7 崩塌源区和变形区I区

Fig.7 Image of source area and the deformation zone I

“座椅”(崩积区)前部高挑地形下方为一陡坡,灾害尚有树木存活,说明崩积区前部对崩塌体的运动有一定的阻滞作用。

3.3 碎屑流区

碎屑流区主要分布在高程 1 920 ~ 1 842 m,原始地形为缓坡平台,左侧相对较低,有冲沟发育,是普洒村老鹰岩组的生活聚居地。灾害发生后碎屑流堆积体呈“裤衩状”,左侧由于地势较低,运动距离较右侧运动距离远。碎屑流区中部由于崩积区中部地形相对高挑,崩塌堆积物较少,运动距离较短。

3.4 变形区

变形区可分为强烈变形区(I)、次强烈变形区(II)和一般变形区(III)(图6)。强烈变形区(I)位于崩塌源区正后方,左侧未贯通山体,右侧贯通山体在坡面上出露(图7)。灾前(2009年)此处已发生过地裂缝和塌陷(图2中DL1、DL2和TX1、TX2),灾后此处已经形成了宽30~40 m,长100余m的拉陷槽,可见槽深超过7 m,走向25°~51°,槽内岩体破碎,块石土散落,系表层强全风化物,槽两壁呈米黄色,为强风化灰岩,可见局部球形风化。槽两侧(图2中DL3、DL4)与2009年发生的TX1、TX2两个塌陷坑对应良好,推测为老拉裂缝新扩展形成的。灾害以崩塌形式发生,没有发生较大的水平运动,而陷槽规模较大,推测前期底部应有一定的溶蚀空间,本次既发生了一定的拉裂沉降也发生了较大的溶蚀沉降。

次强烈变形区(II)位于崩塌源区左后方小鹰岩一代,发生的变形主要为地裂缝和岩溶塌陷(图2)。其中,DL9裂缝总长约200 m,西南端走向55°,宽约30 cm,北侧轻微下错,可见深度大于3 m(图8),裂缝内可见充填残积土(含量较好,泥化)、掉落块石(块径

小于20 cm);东北端走向46°,宽20 cm,无位错。DL10裂缝走向65°~59°,山体沿结构面拉裂,宽约1 m,北侧下错30 cm,北侧10 m处见走向100°方向岩体裂缝。DL10裂缝与DL11裂缝近平行。DL12裂缝为一陷槽,槽宽1 m,可见槽深20 cm,表层草皮覆盖。延展长度超过20 m。与下方串珠状溶蚀洼地发育的干沟相连(图2)。



图8 DL9裂缝(镜向235°)

Fig.8 Ground fissure DL9

一般变形区(III)位于崩塌源区的右后方,本次灾害过程中未发生明显变形,前缘在灾前发生过崩塌。

4 变形破坏机理

引发纳雍“8·28”崩塌变形破坏的主要因素有以下几个方面:不利于岩体稳定的结构面发育、灰岩岩体溶蚀风化强烈、前期过程降雨量较大和采矿工程的采空区及振动影响。

4.1 岩体结构不利于岩体稳定

受构造运动和卸荷作用影响,岩体结构面发育。现场调查获取了4组主要结构面(图9),产状分别为:110°∠87°(J1),326°∠86°(J2),140°∠88°(J3),225°∠88°(J4)。老鹰岩边坡面坡向320°,顶部陡崖坡度70°,灰岩岩层面产状179°∠8°(P)。其中,J1和J2两组节理走向与坡面走向基本一致,且均为陡倾节理,有利于形成沿坡顶的裂缝和溶蚀作用的发展,有利于降雨的入渗,不利于老鹰岩顶部岩体的稳定性。根据搜集资料(图2),老鹰岩坡顶在2009年时已形成L1、L2两条裂缝和TX1、TX2两个塌陷坑,本次崩塌发生后变形区产生的裂缝也基本与主要的节理面产状一致。

4.2 溶蚀风化强烈

三叠系夜郎组在老鹰岩处主要为上部灰岩和下部

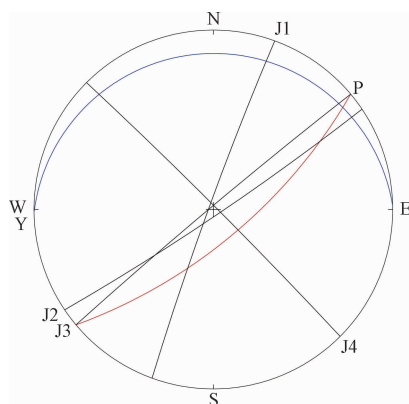


图9 主要结构面赤平投影图

Fig.9 Stereogram of main structure planes

粉砂岩,上部灰岩属于可溶岩。叠加附近岩体结构发育,岩体溶蚀风化强烈,发育有多个岩溶塌陷坑,在小鹰岩处发育一条串珠状溶蚀洼地(图10),部分溶蚀洼地发育成塌陷坑(图11)。2009年在老鹰岩坡顶发生的TX1、TX2两个塌陷坑,说明老鹰岩顶部岩体溶蚀强烈,溶蚀风化作用对老鹰岩的稳定性有较大影响。



图10 串珠状溶蚀洼地

Fig.10 A string of uvalas

老鹰岩上部为可溶岩,下部为非可溶岩,特殊的岩层结构既为降雨提供了加大的人渗通道,又提供了下部隔水面,有利于地下水的汇集。

本次灾害以崩塌形式发生,没有发生较大的水平运动,而陷槽规模较大,推测前期底部应有一定的溶蚀空间,本次既发生了一定的拉裂沉降也发生了较大的溶蚀沉降。拉陷槽在右侧贯通山体,并在整体崩塌发



图11 新发生的岩溶塌陷坑

Fig.11 The new karst collapse pits

生前发生了局部崩塌,推测后缘拉陷槽在崩塌发生前发生了沉陷变形,拉陷槽在灾前的楔形沉降变形和地下水所产生的侧向推挤作用和底劈作用是整体崩塌发生的直接触发因素。

4.3 崩塌前过程降雨较大

崩塌发生前一周内有一次较强的降雨过程,本次搜集了距离崩塌灾害距离较近的两个雨量站的雨量数据,分别是布置在织金县三塘镇的雨量站(位于普洒村东北方向,距普洒村约10 km)和纳雍县雍熙镇上的一个雨量站(位于普洒村西北方向,距普洒村约13 km)。崩塌发生前一周,附近有60~120 mm的降雨过程(图12),特别是8月24日的24 h降雨量已经达到了暴雨级别,周围站点在24日的12 h降雨量均达到了26.8 mm,加上前期斜坡顶部裂缝和塌陷坑发育,下部粉砂岩相对隔水,有利于地下水的入渗和汇集,增加了沉陷带内岩土体的容重和静水压力,沉陷带形成的土体楔形体和水楔作用产生侧向推挤力加大。

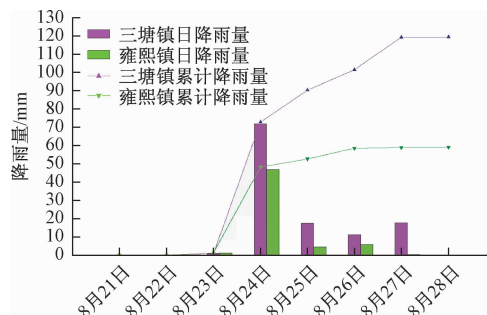


图12 纳雍崩塌前降雨过程曲线图

Fig.12 The diagram of the rainfall process before the Nayong collapse

根据有关估算^[3],结合老鹰岩顶部前期的裂缝分布情况,假定后缘裂缝前期长约100 m、平均宽约0.1 m,深约50 m,估算后缘裂缝的充水情况。根据微地形情况和24日降雨量可得到:

汇水区域面积 $S = 19\,531\text{ m}^2$

汇入后缘裂缝总水量 $Q_1 = 914 \sim 1\,404\text{ m}^3$

裂缝可储水量 $Q_2 = 500\text{ m}^3$

不考虑降雨损耗或仅考虑降雨有部分损耗时 24 日降雨量足以将后缘裂缝填满,为老鹰岩岩体的倾倒破坏提供水平向推力。

4.4 采矿工程活动的影响

下部煤层的开采活动会影响和改变上覆山体的应力场环境,影响上部岩土体的稳定性。采矿产生的采空区会对上覆岩土体产生一定的影响。同时采矿的产生的振动活动,引起上覆岩体振动,加剧沉陷带土体和水的楔形劈裂作用。

5 结论

(1) 根据崩塌过程还原分析,崩塌可分为“沉陷带变形崩塌-坡面局部崩塌-整体溃屈崩塌-撞击地面-碎屑流”五个阶段;根据崩塌变形和运动特征,崩塌可分为崩塌源区、崩积区、碎屑流区和变形区四个区。

(2) 崩塌主要发生在三叠系夜郎组灰岩、粉砂岩岩层中,引发崩塌变形破坏的主要因素主要为:不利于岩体稳定的结构面发育、灰岩岩体溶蚀风化强烈、前期过程降雨量较大和采矿工程的采空区及振动影响。崩塌发生前的降雨过程对崩塌的发生有重要的促进作用。

(3) 高位地质灾害隐蔽性强和危害性大,其运动形式呈现出高速远程的特点,应加强对高位地质灾害隐患点的排查和防范工作。在针对高位地质灾害点的调查、评价、监测预警和防治工作时,应研究其转化为高速远程碎屑流的可能性来进行风险评价。

致谢:本文的研究工作尤其是资料来源方面包含了众多人员的心血。感谢殷跃平研究员的指导,感谢贵州省国土资源厅、应急中心、地质环境监测院、108 地质队各级领导和工作人员的帮助。四川省川核测绘地理信息有限公司提供了航拍数据支持,国家气象中心提供了雨量数据,在此表示衷心地感谢。

参考文献:

- [1] 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, 15(4): 120-121.
- LIU Chuangzheng, GUO Qiang, CHEN Hongqi. Investigation of rockfall hazard at Yanjiao in Nayong of

Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(4): 120-121.

- [2] 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 Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. 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.

- [3] 刘传正. 贵州关岭大寨崩滑碎屑流灾害初步研究. 工程地质学报[J]. 2010, 18(5): 623-630.

LIU Chuangzheng. Preliminary findings on Dazhai landslide-debris flow disaster in Guizhou province [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 623-630.

- [4] 陈泽富,孔纪名,王成华. 贵州纳雍成灾机理及其避灾警示作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(3): 32-35.

CHEN Zefu, KONG Jiming, WANG Chenghua. Characteristics of the falling-slide type landslide in Nayong in Guizhou province and the lessons learned for disaster mitigation in other areas [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(3): 32-35.

- [5] 董秀军,裴向军,黄润秋. 贵州凯里龙场镇山体崩塌基本特征与成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 3-9.

DONG Xiujun, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. The Longchangzhen collapse in Kaili, Guizhou: characteristics and failure causes [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 3-9.

- [6] 殷跃平. 云南镇雄特大滑坡灾害的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): I-II.

YIN Yueping. The revelation of the Zhenxiong catastrophic landslide disaster [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(1): I-II.

- [7] 刘传正. 论地质灾害风险识别问题[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 1-7.

LIU Chuangzheng. Research on the risk recognition of geological disasters [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 1-7.