

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.06.001

# 采动和降雨影响下含深大裂隙岩溶山体破坏机制

刘新荣<sup>1a,1b,1c</sup>, 冉乔<sup>1a,1b</sup>, 熊飞<sup>1a,1b</sup>, 李滨<sup>2</sup>, 杨忠平<sup>1a,1b,1c</sup>

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室; c. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**为阐明采动和降雨入渗条件下含深大裂隙岩溶山体变形和破坏规律,以贵州省纳雍县普洒滑坡为例,通过块体离散元数值分析,探讨煤层开挖扰动和降雨入渗作用下含深大裂隙岩溶山体失稳破坏机制。结果表明,随着M10和M14煤层开采,山体上覆岩层向采空区方向下移,新生裂隙向坡表发育。工作面上覆岩层裂隙带高度随采空区范围的增大而增加,M10和M14开采结束后,裂隙带分别发育至30倍和40倍采高,坡顶深大岩溶裂隙向坡下扩展。降雨入渗后,上覆岩层裂隙带与深大岩溶裂隙贯通,在孔隙水压力作用下深大岩溶裂隙向坡表扩展形成贯通滑动面,岩溶坡体发生崩滑破坏。研究发现,地下采动是普洒老鹰岩山体变形破坏的控制因素,后续降雨是山体失稳的主要诱发因素。

**关键词:**岩溶斜坡;裂隙;地下开采;降雨;离散元

中图分类号:P954

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)06-001-13

## Failure mechanism of karst mountain with deep and large fissures under the influence of mining and rainfall

LIU Xinrong<sup>1a,1b,1c</sup>, RAN Qiao<sup>1a,1b</sup>, XIONG Fei<sup>1a,1b</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, YANG Zhongping<sup>1a,1b,1c</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; 1c. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To clarify the deformation and failure law of karst mountain with deep and large fissures under the action of mining and rainfall, by taking the Pusa landslide in Nayong County of Guizhou Province as an example, the instability and failure mechanisms of karst mountain with deep and large fissures under the action of mining and rainfall were discussed through block discrete element numerical analysis. The results show that the overlying strata of the mountain moved down to the mined-out area with the mining of coal seams M10 and M14, and new fractures developed to the slope surface. Simultaneously, the height of the fracture zone of the overlying strata in working face increased with the increase of the goaf range. The fracture zone developed to 30 and 40 times the mining height after mining M10 and M14, respectively, and the deep karst fissure expanded to the lower slope.

收稿日期:2022-02-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC1504802)。

Supported by National Key Research and Development Program(2018YFC1504802).

作者简介:刘新荣(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事隧道工程、边坡稳定性等研究,(E-mail)liuxrong@126.com。

通信作者:熊飞,男,博士研究生,(E-mail)xiongfei@cqu.edu.cn。

After rainfall and infiltration, the fracture zone of the overlying strata was connected with deep and large karst fissures. The deep and large karst fissures expanded to the slope surface to form a potential sliding surface under the action of pore water pressure, leading to the collapse and slide of the karst slope. Through comparative study, mining is the control factor of the deformation and destruction of the Laoyingyan Mountain, and subsequent rainfall is the main inducing factor of slope instability.

**Keywords:** karst slopes; deep and large fissures; underground mining; rainfall; UDEC

中国西南岩溶山区受长期构造运动和地下水侵蚀作用, 岩溶作用强烈。受特殊的沉积环境和地质作用控制, 山体上部普遍为陡峭硬质灰岩, 下部为较缓软弱岩层, 如页岩和泥岩等, 形成上陡下缓的“靴”形地貌<sup>[1]</sup>。同时, 这些区域采矿活动频繁, 对山体扰动强烈, 造成大量崩滑灾害<sup>[2-3]</sup>。由于山体应力分异和岩溶水的作用, 山体通常发育深大裂隙, 这些深大裂隙控制着山体的稳定性<sup>[4]</sup>。加上西南地区降雨强度大, 持续时间长, 作用在深大裂隙内的水压力极易触发受扰动岩溶山体的崩滑灾害<sup>[5]</sup>。因此, 研究采动和降雨影响下含深大裂隙岩溶山体的稳定性尤为重要。

岩溶崩滑灾害的发生受多种作用影响, 主要包括自然因素和人类工程活动。岩溶山体内部裂隙发育, 地下水的溶蚀作用强烈, 形成大量岩溶裂隙和管道, 地下水入渗后进一步扩展成深大岩溶裂隙<sup>[6]</sup>。深大裂隙底部易形成高应力集中区, 导致裂隙扩展, 影响岩溶山体的变形及破坏模式<sup>[7-8]</sup>。对于有后缘深大裂隙的边坡, 裂缝充水高度越大, 发生失稳可能性越大<sup>[9]</sup>。降雨入渗为岩溶山体的水力活动提供条件, 水的力学作用使岩体质量和滑面滑动力增大<sup>[10]</sup>; 水的润滑、软化和溶蚀以及水-岩相互作用导致裂隙发育和岩体强度降低, 易引发重大滑坡灾害<sup>[11-12]</sup>。同时, 降雨入渗使坡体含水量自上而下逐渐变化, 坡体与后缘形成较大水头差, 造成坡体承受向外的渗流力, 从而形成滑坡<sup>[13-15]</sup>。

中国西南岩溶山区蕴藏着丰富的煤炭资源, 近些年开采活动越发频繁。地下开采引起岩层移动和断裂, 在地下形成较大的采空区, 极易诱发山体滑坡, 例如, 重庆武隆鸡冠岭滑坡<sup>[16]</sup>、云南郑雄滑坡<sup>[17]</sup>、贵州水城滑坡<sup>[18]</sup>和马达岭滑坡<sup>[19]</sup>。采动滑坡受多种因素影响, 如降雨、地下采空、地震等<sup>[20]</sup>, 采动后形成沉陷区, 附近岩体发生明显变形, 导致山体稳定性下降<sup>[21-23]</sup>。西南岩溶山区采动滑坡中, 地下开采引起坡体上部陡倾岩体层间错动、矿层岩体发生倾倒破坏、矿层下部岩体发生剪切破坏, 导致山体倾倒-滑剪的失稳模式<sup>[24-26]</sup>。

前人对采动作用后, 岩溶坡体失稳破坏机制进行了详细研究, 取得较多成果, 但对于深大岩溶裂隙对采动山体稳定性的影响研究较少, 考虑降雨作用后情况更为复杂, 仍需进一步研究。以贵州省纳雍县普洒滑坡为研究对象, 在现场调查的基础上, 通过数值计算模拟高陡岩溶山体地下开采和降雨入渗过程, 阐明含深大岩溶裂隙山体的破坏机制。

## 1 滑坡基本概况

### 1.1 地质环境条件

贵州省纳雍县普洒“8·28”崩滑区属于构造剥蚀地貌, 总体走向为西南, 最高海拔2 147 m, 最低海拔1 842 m, 地形坡度 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$ , 部分地段坡度达到 $55^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。崩塌区裸露岩层主要包括三叠系下统夜郎组(T<sub>3y</sub>), 上部主要为中厚层状灰岩, 下部为砂质泥岩; 二叠系上统长兴一大隆组(P<sub>3c+d</sub>), 上部主要为泥质灰岩, 下部为灰色中厚层状、薄层状灰岩; 二叠系上统龙潭组(P<sub>3l</sub>), 即地层, 位于峨嵋山玄武岩组假整合面之上, 主要由泥岩、粉砂质泥岩及煤层组成; 地面被第四系土层覆盖。调查区内煤层和地层产状一致, 均为单斜, 倾向为 $138^{\circ} \sim 187^{\circ}$ , 倾角为 $78^{\circ} \sim 108^{\circ}$ 。受岩性组成影响, 区内多形成“上硬下软、上陡下缓”的高陡斜坡。断裂构造较发育, 主要不利断层有F1、F2、F3, 如图1所示。

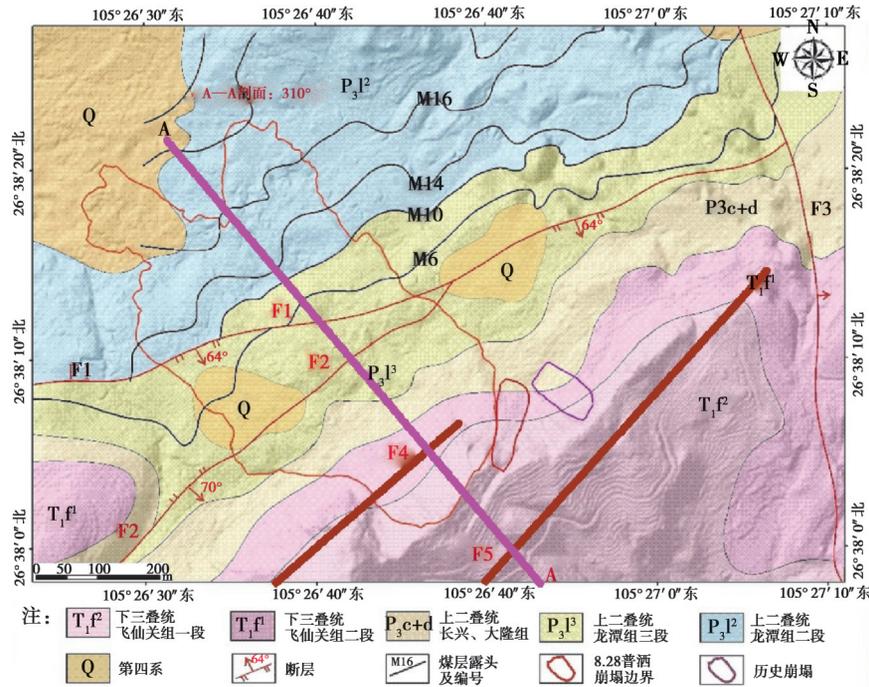


图 1 崩塌区地形地质图<sup>[1]</sup>

Fig. 1 The landform geology of the collapse area<sup>[1]</sup>

### 1.2 水文气象条件

纳雍县地处亚热带季风湿润气候区，气候温和，雨量充沛，年平均降雨量 1 200 ~ 1 300 mm。6 月份降雨量到达峰值，为 223 mm；12 月份最少，为 22 mm；5 月—9 月降雨集中，占全年总降水量的 70% 以上。由图 2 可知，纳雍县张家湾 2017 年 1 月—5 月降雨量较少，6 月和 7 月降雨集中，气候具有“久晴久雨”的特点。调查区地下水主要由大气降水提供，通过岩体微裂缝和岩溶管道渗透到地下，主要包括碳酸岩溶水、基岩裂隙水和松散岩石孔隙水。在降雨入渗下岩体裂隙形成静水压力，对山体内砂岩和泥灰岩起软化作用；纳雍地区位于云贵高原东部，阳光充足，岩体被长期暴晒，加剧岩体的碎裂程度<sup>[1]</sup>。

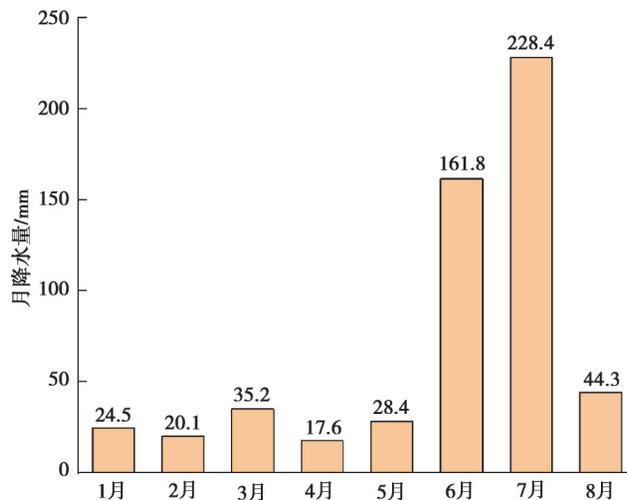


图 2 纳雍县张家湾 2017 年崩塌前逐月降雨量<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Monthly rainfall before the collapse of Zhangjiawan in Nayong County in 2017<sup>[1]</sup>

### 1.3 岩溶及裂隙发育特征

普洒山体上部为可溶性灰岩，下部弱透水泥岩形成相对隔水层，有利于地下水的汇集<sup>[6]</sup>。在强降雨过

程中,雨水不能及时渗透到泥岩以下,导致稳定水位线以上形成大面积饱和区<sup>[10]</sup>。普洒地区6月—7月降雨量最为丰富,在强降雨作用下,一方面,导致地下水剧烈运动,集中在岩性敏感地带时产生地面塌陷坑,长度达到5.2 m,如图3(a)所示;另一方面,地下水沿着可溶岩层面流动,裂隙壁不断被溶蚀和冲蚀,在裂隙内不断聚集形成巨大的瞬时水压,裂隙进一步扩展,逐渐在山体上部形成深大岩溶裂隙,如图3(b)所示。

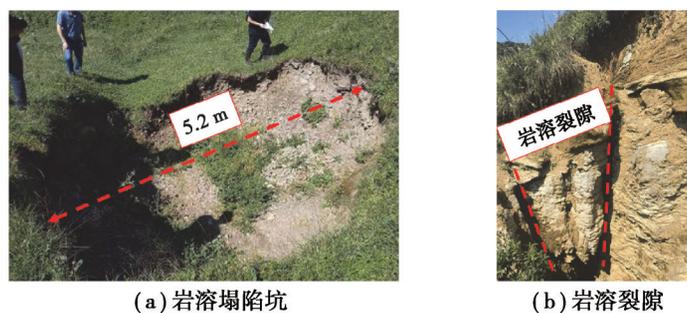


图3 岩溶塌陷坑和岩溶裂隙<sup>[6]</sup>

Fig. 3 Karst collapse pits and karst pipes<sup>[6]</sup>

根据地质资料<sup>[27]</sup>,2006年“老鹰岩”山体开始发生变形;2009年在崩塌区后缘存在1条走向为 $N30^{\circ} \sim 35^{\circ}E$ 的长大裂隙,将崩塌体与后缘母岩隔开。裂隙槽内岩体破碎,主要为表层岩体风化产物,槽壁灰岩溶蚀强烈,岩溶裂缝的宽度随着时间逐渐增长。2014年时,长大裂隙扩展到180 m,宽34 m,同时,在崩塌源区出现多条裂缝;其中,几条裂缝出现在崩塌区后缘边界,直到崩塌发生,裂缝逐年扩展。经现场调研发现,崩塌区后缘存在拉陷槽,如图4(a)所示,槽内岩体破碎,呈米黄色,有大量溶蚀裂隙。拉陷槽后有大量地裂缝,如图4(b)、(c)所示,长度约30 m,可见深度0.5~1.2 m,裂隙宽度0.2~0.8 m。

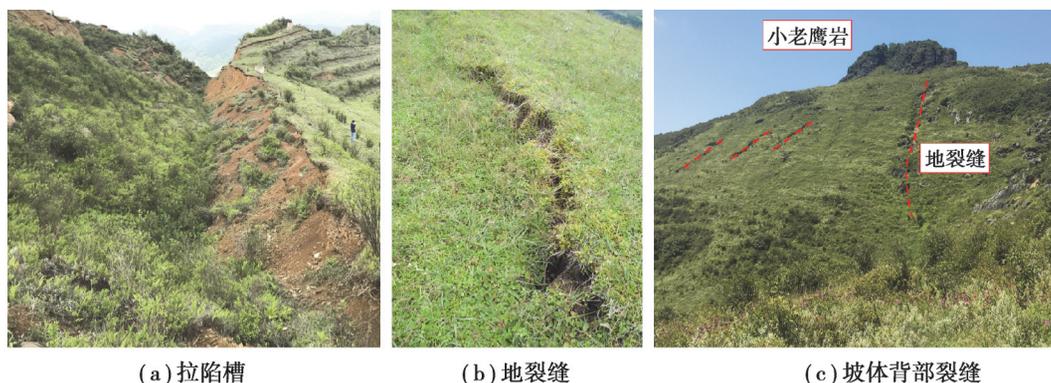


图4 现场地质调查

Fig. 4 Field geological survey

#### 1.4 煤矿开采概况

坡脚下的采煤活动是对普洒滑坡影响较大的人类活动。该煤矿从2007年开始开采,已连续开采10余年,长期的煤炭开采活动对老鹰岩以下的地层结构产生了巨大的改造作用,导致地应力重分布,对崩塌滑坡灾害产生重要影响。该区可采煤层主要为M6、M10、M14、M16、M18和M20,如图5所示,总厚度8.06 m。2010年前,主要开采F4断层上方M16煤,到2009年,老鹰岩顶部出现拉张裂缝;2011年后,主要开采M10和M14煤层,坡顶上的裂缝继续扩大,形成沉降槽,偶尔在坡面上发生小规模崩塌。

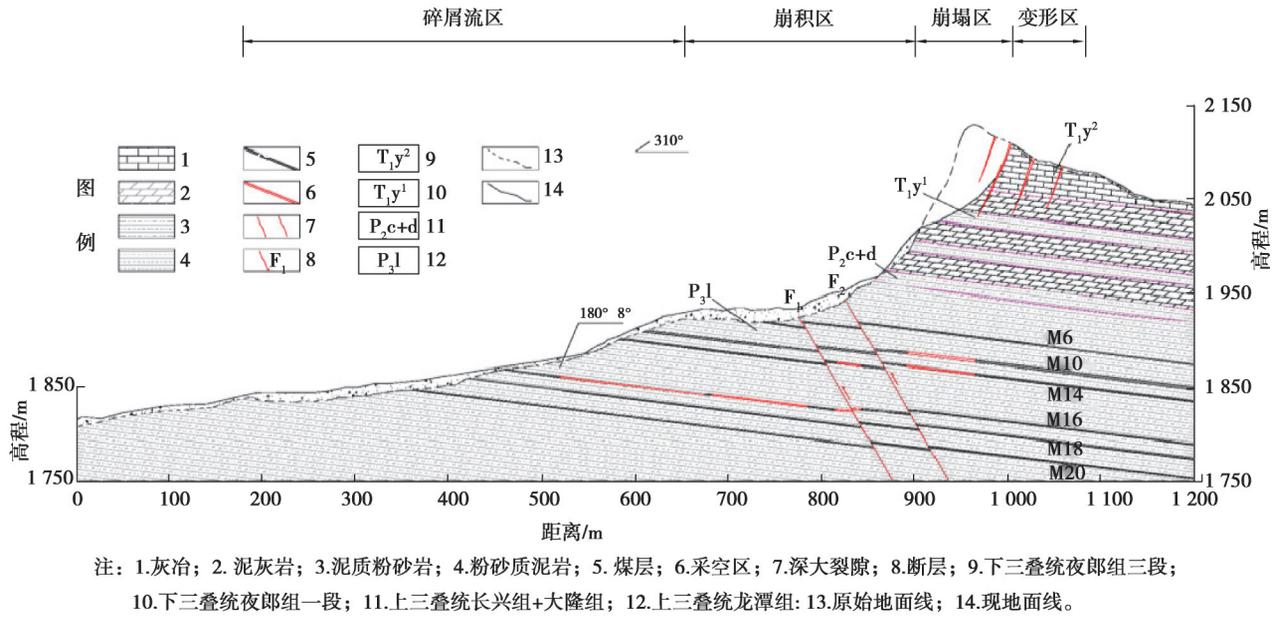


图 5 纳雍县普洒村滑坡剖面图<sup>[1,6]</sup>

Fig. 5 Landslide profile of Pusa Village in Nayong County<sup>[1,6]</sup>

## 2 数值模型的建立

### 2.1 模型基本参数

以普洒崩塌山体为基本原型,依据滑坡剖面图,建立 UDEC 二维数值计算模型。如图 5 所示,模型长 841 m,高 378 m,节理产状为 310°∠7°。通过崩塌前、后地质调查资料对比分析,发现山体节理和深大岩溶裂隙发育强烈,岩层向节理间距为 6 m,正交次级节理间距为 12 m。根据现场调研和地质资料分析<sup>[1,6]</sup>,得出崩塌区后缘深大裂隙分布范围,在坡顶设置 4 条深大岩溶裂隙,裂隙深 50~80 m,宽 1.5~2 m,倾角 70°。岩体和煤层采用摩尔-库伦弹塑性模型,节理采用摩尔-库伦平面接触滑移模型。基于文献分析类比<sup>[4,6]</sup>,岩体、煤层和节理的物理力学参数取值如表 1 所示。模型左右边界和下边界设为法向约束边界,上边界为自由边界,重力场设为初始应力场,取  $g=9.80 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

表 1 岩层力学参数表

Table 1 Mechanical parameters of rock formation

岩层	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
灰岩	2 680	21.90	11.90	32.00	2.42	4.80
泥灰岩	2 600	14.00	9.80	40.20	1.43	3.50
粉砂岩	2 600	11.80	7.50	36.50	1.41	3.60
泥岩	2 480	4.80	3.50	31.11	1.21	2.70
煤层	1 280	4.20	2.70	46.98	0.50	0.28

表 2 结构面力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of the structural surface

结构面类别	法向刚度/GPa	切向刚度 /GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
煤层面	2.80	2.70	0.80	15.22	0.10
岩层面	28.90	27.20	1.20	22.31	0.14
岩体节理面	30.10	33.30	0.75	19.30	0.22
断层面	30.30	29.50	0.48	14.80	0.00

## 2.2 煤层开采模拟

基于实际煤层开采条件,数值模拟取M10、M14煤层进行开挖。首先,计算至山体初始平衡;然后,开采煤层,每个煤层设置10个开采步,每步开采10 m,每个计算步长为 $10^5$ 步。顺坡开采M10煤层,当模型在应力平衡后再开采M14煤层,直至山体再一次平衡,两层采空区总采高3.5 m。监测点设在模型坡体表面和M10煤层面以上,位置如图6所示。

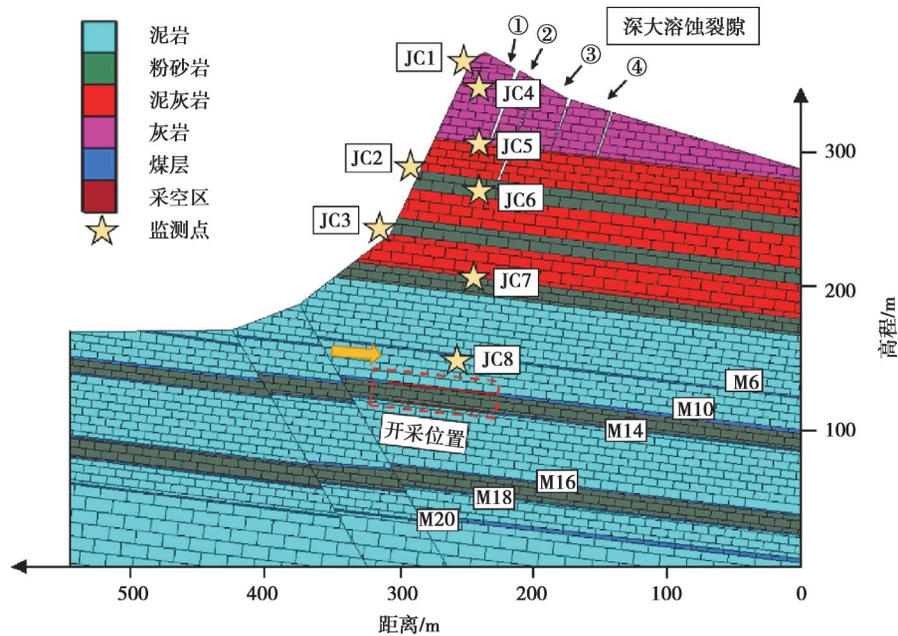


图6 滑坡二维数值模型

Fig. 6 The two-dimensional numerical model of landslide

## 2.3 降雨入渗工况

根据调查资料<sup>[28]</sup>,2013年以来,调查区山体位移逐渐变大,2017年8月发生坍塌。6月和7月份为降雨集中月,降雨量达到峰值,分别为161.8 mm、228.7 mm(见图3)。考虑到降雨入渗对深大裂隙的充水作用,结合现有文献和研究区降雨条件,计算时,把降雨等效为深大裂隙内静水压力,充水高度为裂隙深度<sup>[29-30]</sup>。在UDEAC渗流过程中,裂隙中的流体压力决定渗流场的变化,渗流场的变化反过来控制应力场的变化,渗流-应力耦合计算采用Steady-State Flow算法<sup>[31]</sup>。泥岩层和模型左边界设定为不透水边界。为简化问题,节理渗透系数统一取 $1 \times 10^8 (\text{MPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ,初始开度取0.005 m,残余开度取0.003 m<sup>[31-32]</sup>。降雨过程设置10个计算步,每个计算步长为 $10^5$ 步。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 坡体变形

采动和降雨作用下坡体变形云图,如图7所示,箭头表示位移方向。M10煤层开采后(见图7(a)),上覆岩体产生指向采空区方向的位移,顶板岩层失去支撑出现冒落,顶板最大位移为2.43 m。煤层顶板的变形传递到上覆岩层,山体出现整体沉陷。顶部裂隙槽切割的岩桥向坡体后侧倾倒,深大裂隙2上部逐渐闭合。M14煤层开采后(见图7(b)),顶板岩层冒落面积扩大,岩层卸荷带整体下移,上覆岩层继续下沉,煤层顶板的最大位移增加至3.71 m。坡顶出现明显下沉,岩桥进一步向坡体后侧倾倒,坡顶岩体沿深大裂隙2向下滑移,坡体中部岩体倾斜向临空面移动。考虑降雨条件下山体变形响应(见图7(c)),坡顶岩体进一步下沉,岩桥继续向山体后侧倾倒,山体上部岩体位移显著增大,深大裂隙1顶部位移达4.00 m。坡体向临空面移动趋势增大,中部岩体受坡顶下沉影响继续向外挤出。

在坡体变形响应中,采动和降雨对上部岩体位移的影响是一个不断调整的过程。当开采到M10煤层时,坡体发生整体下沉,被裂隙槽切割的岩桥向坡体后缘倾倒,深大裂隙2上部闭合。裂隙底部产生向右下方扩展的裂隙,扩展的裂隙阻断了采动位移影响区向坡体后缘的传递。开采到M14时,坡顶岩体沿深大裂隙2下滑,坡体中部坡顶岩体下沉受到推挤作用,该部分岩体有被临空挤出的趋势。采动位移区扩展至深大裂隙3底部,裂隙底部产生向右下方扩展的裂隙,坡体后缘逐渐形成了类悬臂梁结构。降雨结束后,受到裂隙水压推力和渗流影响,坡体中部岩体无法承受来自坡顶岩体的推力,被临空挤出,沿深大裂隙2向下滑移,坡体发生失稳。综上所述,采动和降雨作用下坡体的变形过程可概括为:坡体沉陷变形—岩桥向坡内倾倒—上部岩体沿主裂隙滑移—中部岩体挤出。

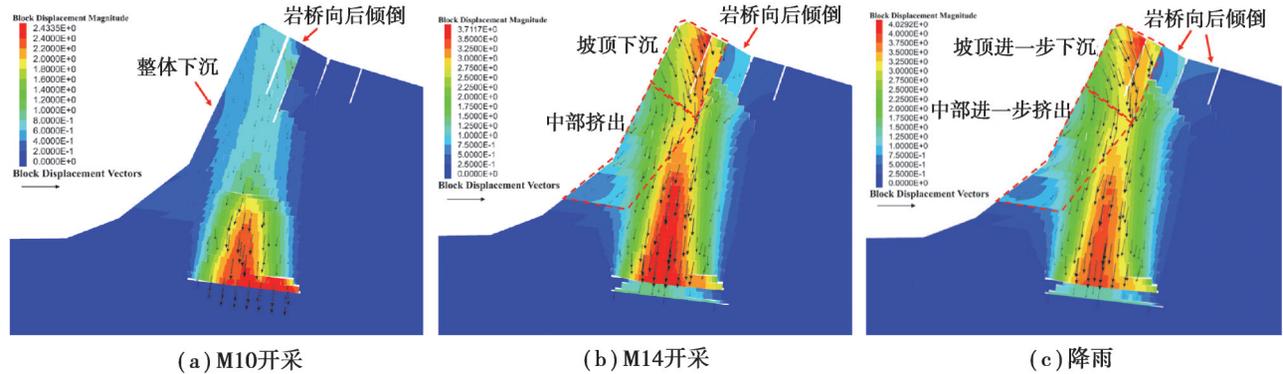


图7 煤层开采和降雨后的山体变形(单位:m)

Fig. 7 Deformation of the mountain after mining and rainfall (unit:m)

坡表监测点的水平位移、竖向位移如图8所示。由图8(a)可知,在采动和降雨后,坡顶测点1水平位移始终为正值且呈现增大趋势,表明上部岩体向坡体内侧倾倒。坡中监测点2和坡脚监测点3在开采和降雨后向着临空面方向移动,说明坡体中部岩体不断被临空挤出。在山体变形过程中,坡脚监测点3水平位移始终大于坡中监测点2,表明坡脚岩体挤出最明显。坡表监测点竖向位移如图8(b)所示,监测点1和2竖向位移在采动和降雨过程中变化过程相似,始终保持下沉趋势。测点1下沉量远大于测点2,说明越靠近坡顶下沉越严重。坡脚监测点3垂直位移变化趋势与测点1和2相差较大,M10开采后测点3保持下沉趋势,说明山体出现整体沉陷;开采M14和降雨后测点3无明显下沉,这是由于M14开采后坡脚岩体被临空挤出,变形趋势主要为水平位移。

结合图8各测点的水平位移和垂直位移可知,开采和降雨结束时,坡顶测点1的垂直位移最大达到1.15 m,水平位移向正向增加,达到0.43 m,说明坡体上部在发生沉降变形的同时向坡体内侧倾倒;坡脚测点3产生的水平位移值达到0.72 m,而垂直位移值最大仅为0.13 m,表明坡体下部主要为水平位移,被临空挤出。在整个坡表变形过程中,坡表上部受采动和降雨影响下沉和内倾明显,坡表中下部向临空面挤出。

覆岩监测点位移如图9所示。由图9(a)可知,监测点4水平位移为正值,随着采动和降雨逐渐增大,与测点1水平位移变化相似,这是由于测点4位于坡顶,在坡体变形过程中向内侧倾倒。监测点5~7在采动和降雨过程中由于受上部岩体挤压作用向临空面移动,水平位移为负值,并呈现不断增大趋势。测点8位于煤层顶板,由于煤层开采后顶板向采空区冒落,位移出现2次突变。但水平位移总体较小。覆岩检测点竖向位移如图9(b)所示,监测点4~7在开采和降雨过程中变化趋势相近,其中,测点7竖向位移最大,说明越靠近采空区竖向位移越大。测点8在坡体变形中竖向位移远大于其他测点,这是由于测点8位于煤层顶板,受采空区扰动影响最大,2次突变代表2次由于煤层开采引起的冒落带位移。

对比分析覆岩测点水平位移和竖向位移变化图可知,覆岩变形主要表现为山体整体下沉,其中,顶板测点8竖向位移最大为3.50 m,降雨对坡体变形影响主要表现为山体上部岩体临空挤出。

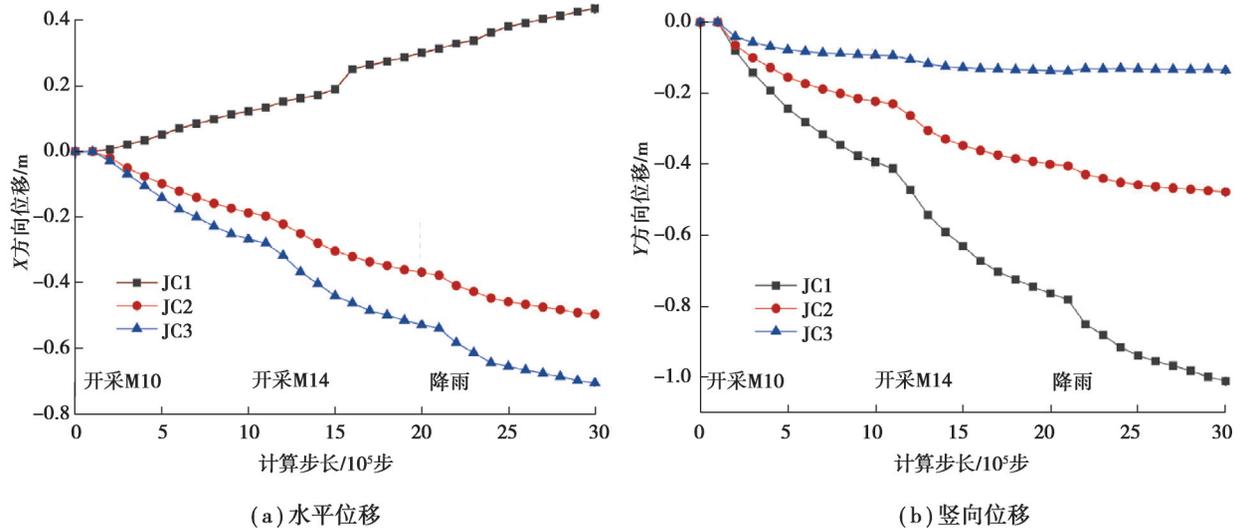


图8 坡表监测点位移

Fig. 8 Displacement of slope surface monitoring points

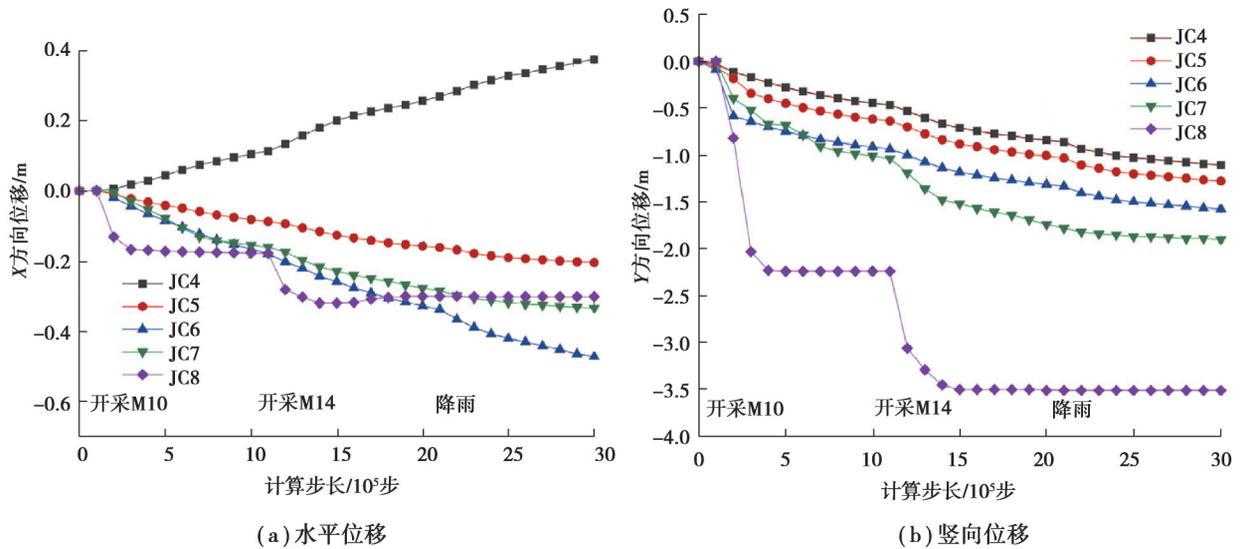


图9 覆岩监测点位移

Fig. 9 Displacement of overburden monitoring points

### 3.2 坡体裂隙演化分析

图10为M10、M14煤层开采及降雨作用下坡体裂隙发育图，蓝色线段代表开裂的节理。由图10(a)可知，M10煤层开采结束后，上覆岩层出现离层现象，采动裂隙向上发育，并扩展至坡脚高度，深大裂隙1、2向坡体右下方扩展。M14煤层开采结束后（见图10(b)），上覆岩层进一步下沉，采动裂隙扩展至坡体中部，接近深大裂隙2底部。深大裂隙3和4开始在底部发生扩展，深大岩溶裂隙1和2进一步扩展，4条深大岩溶裂隙发育区域扩大。由图10(c)可知，考虑降雨作用下，采动裂隙带扩展范围进一步增大，与深大裂隙1和2底部贯通，深大裂隙3和4继续向底部扩展。在深大裂隙水压推力和坡顶重力作用下，坡体中下部岩体受到挤推，产生潜在滑面，滑面向着深大裂隙1底部扩展。

结合3个阶段的裂隙扩展图分析，M10和M14开采后深大裂隙底部和上覆岩层裂隙发育，使坡体上部裂隙开度增大，处于不稳定的状态。降雨后，在裂隙水压和坡顶岩体挤压作用下，坡体中部裂隙贯通，形成向临空面发展的裂隙面，坡体发生破坏。

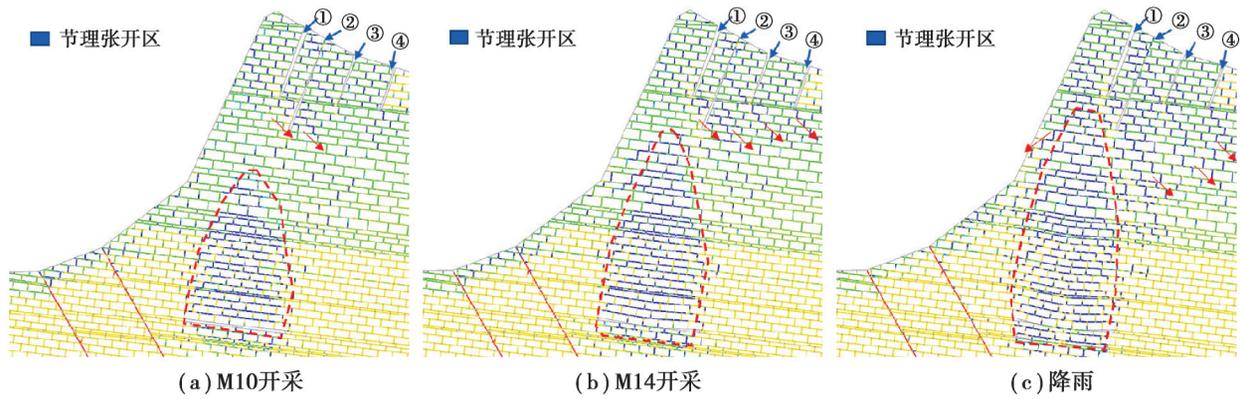


图 10 坡体裂隙发育

Fig. 10 Slope fracture development

统计不同工况下,上覆岩层裂隙带高度,绘制裂隙带高度演化图,如图 11 所示。由图可知,随着计算步长增加,裂隙带发育高度不断增大。M10 煤层开采后,裂隙带高度迅速增加,达到了 104 m,相当于 30 倍采高。M14 煤层开采后,裂隙带高度增加至 40 倍采高。因为 M14 煤层开采后形成新的采空区,当煤层顶板破碎坍塌充填采空区时,上覆岩层裂隙继续向上扩展。降雨后,坡体中部软弱岩层受到裂隙水压力的推力和上部岩体挤压影响,采动裂隙与深大裂隙 1 和 2 贯通,裂隙高度增加至 150 m。

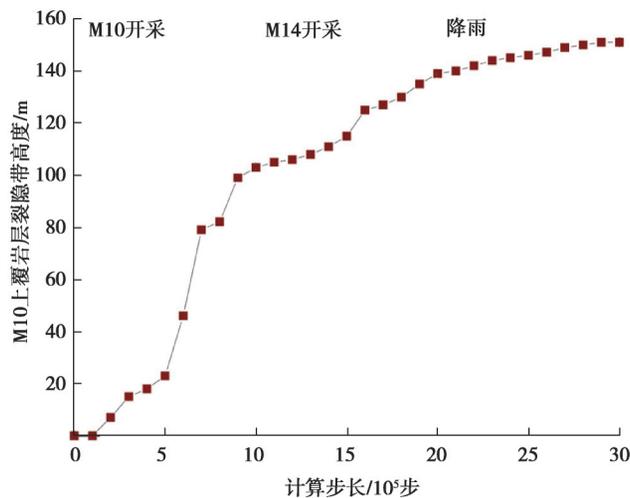


图 11 采动裂隙带高度演化图

Fig. 11 Height evolution of mining fracture zone

### 3.3 坡体渗流分析

降雨后坡体渗流速度矢量图,如图 12(a)所示,箭头表示水的流动方向,颜色表示水流速度。由图可知,坡体产生向坡下和两侧发展的渗流速率。隔水层上方中心位置流速最小,沿坡外、坡内和上方,流速增大。优势流主要在深大裂隙附近和坡中扩展开裂的节理中,坡体其他部位节理内渗流速度变化较均匀。其中,潜在滑面的水流速度较大,说明潜在滑面节理开裂严重,此处水压力可促进坡体失稳破坏。

图 12(b)为降雨后坡体节理孔隙水压力云图,由图可知,隔水层上方中心位置水压力较大,最大孔隙水压力为 0.96 MPa,沿坡外、坡内以及向上,水压力减小。深大裂隙 2 处水压较小,这是由于降雨结束后,该裂隙已完全闭合,渗流作用较弱。

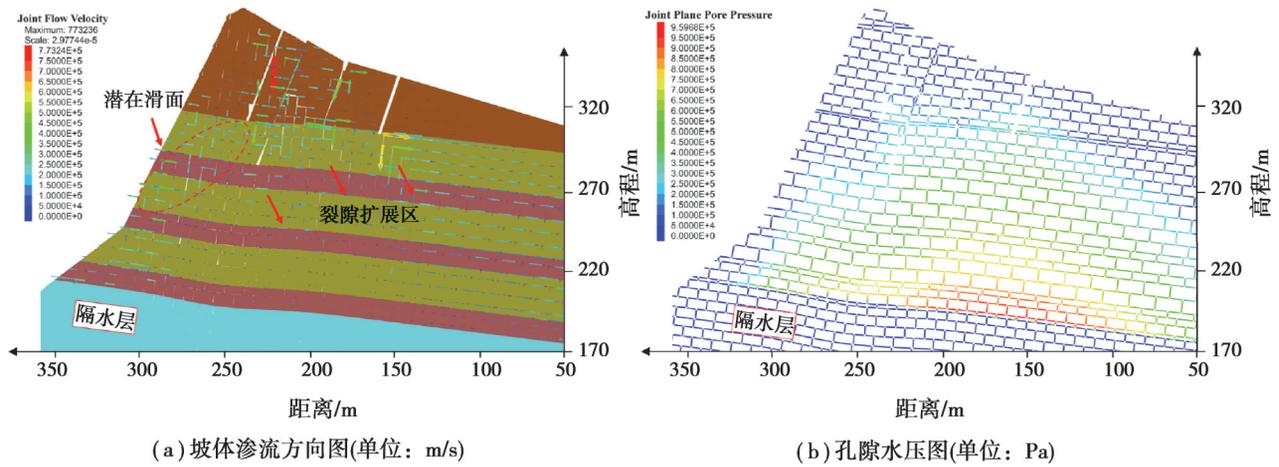


图12 坡体渗流方向和孔隙水压图

Fig. 12 Seepage direction and pore water pressure of slope

### 3.4 降雨作用对深大裂隙山体稳定性分析

图13为未采动下降雨对山体变形的影响。由图可知，裂隙充水后，在深大裂隙水压的推力作用下，坡表位移方向指向临空面，坡顶变形至上而下减小，裂隙槽附近岩体破碎。由于降雨引起的山体向内侧倾倒位移最大为0.21 m，向临空面挤出最大位移为0.20 m，与图8降雨后的坡体监测点位移图相比，位移变化量相近，坡顶最大位移值降低。原因是采动作用后，上覆岩层出现大范围的变形和裂隙扩展，山体整体较为破碎，水压对节理的渗流作用效果明显；未采动山体岩体较完整，整体稳定性较好，降雨作用主要是降低坡顶岩体完整性，使坡中岩体向临空面挤出。采动对坡体变形破坏起控制作用，后续降雨是坡体失稳的主要诱发因素。

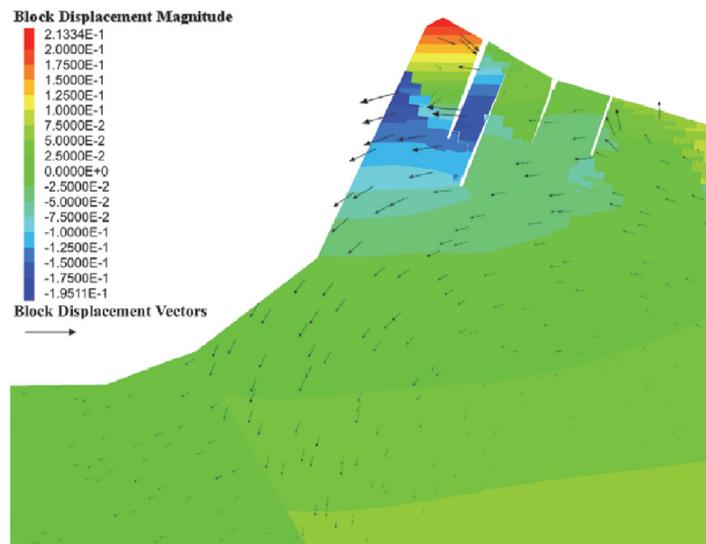


图13 未采动情况下降雨后的山体变形 (单位:m)

Fig. 13 Deformation of mountain after raining without mining (unit:m)

### 3.5 采动和降雨影响下含深大裂隙岩溶山体破坏机制分析

普洒滑坡灾害的主要形成原因是人类开采活动和降雨入渗作用，山体在崩塌前经历了一个漫长的变形过程，在前期地下水的溶蚀作用下，山顶形成了4条深大岩溶裂隙，其中，深大裂隙2为主裂隙，对山体破坏变形起控制作用。将山体失稳过程分为2个阶段,采动过程和降雨过程，如图14所示。

#### 1) 采动过程

随着M10和M14煤层开采结束，煤层顶板破碎塌陷并压实采空区，上覆岩层出现大量采动裂隙，并

呈现向上扩展趋势。坡顶岩桥向坡后倾倒,深大裂隙2上部闭合,各深大裂隙受采动沉陷影响向坡体右下方扩展。坡体上部出现明显下沉,沿闭合的主裂隙向下滑移,坡体中部软弱岩体受上部岩体推挤作用向临空面挤出。

## 2) 降雨过程

降雨后采动裂隙范围进一步扩大,深大裂隙1和2与覆岩采动裂隙贯通。坡顶岩桥继续向坡后倾倒,各深大裂隙底部裂隙继续向右下方扩展。在裂隙水压力和上部岩体挤压作用下,坡顶岩体下滑程度加剧,坡中软弱岩体进一步向临空面挤出,出现大量破碎岩体,形成贯通的潜在滑动面,岩溶坡体发生崩塌破坏。

坡体变形失稳过程可概括为:坡体沉陷变形—坡顶向坡后倾倒—主裂隙闭合—上部岩体沿主裂隙滑移—坡体中部挤出一潜在滑面贯通—崩滑。

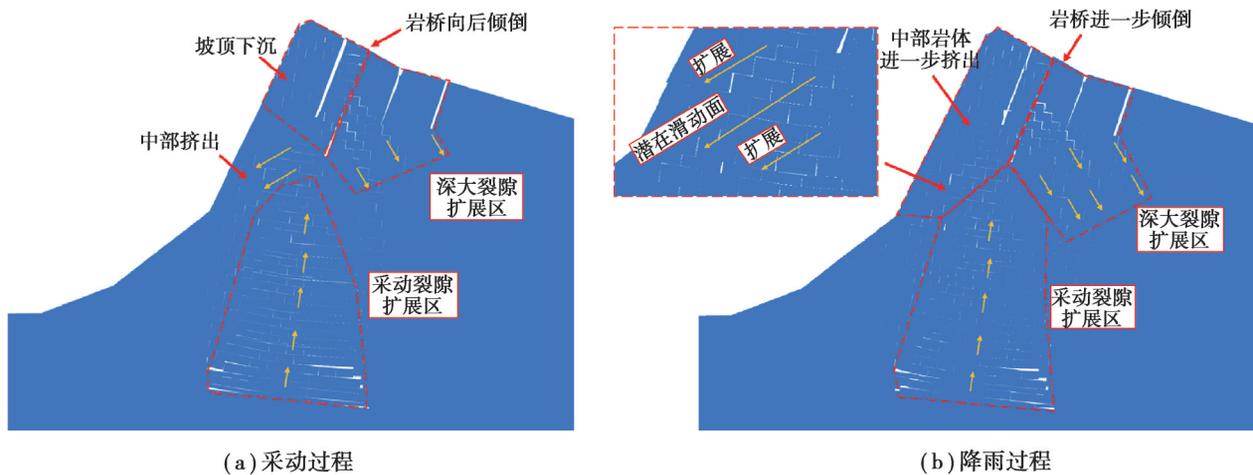


图14 坡体变形破坏示意图

Fig. 14 Schematic diagram of slope deformation and failure

## 4 结论

通过数值模拟探讨降雨作用下,含深大裂隙采动山体破坏机制,主要结论如下:

1) 地下采动作用对岩溶山体的稳定性影响较大。岩溶山体在地下采动作用下煤层上覆岩层向采空区方向下移,新生裂隙使岩体强度降低。采动裂隙不断向坡表发育,上覆岩层裂隙带高度随采空区范围的增大而增加,M10和M14开采后,裂隙带分别发育至30倍和40倍采高。坡体抗滑力逐渐减小,山体稳定性不断下降,并随顶板岩层的冒落而显著变化。

2) 深大岩溶裂隙对岩溶山体变形破坏影响显著,在采动作用下,坡顶深大岩溶裂隙向坡下和坡表扩展。随着采空区的不断增大,上覆岩层裂隙发育带逐渐向上扩展并与深大岩溶裂隙贯通,坡体向外挤出变形趋势显著增大。

3) 加入降雨作用后,坡体位移向临空面不断增加,斜坡中部继续向外挤出,深大岩溶裂隙进一步扩展,在孔隙水压力作用下深大岩溶裂隙向坡表扩展形成潜在滑动面,普洒老鹰岩发生失稳崩塌破坏。

## 参考文献

- [1] 郑光,许强,巨袁臻,等. 2017年8月28日贵州纳雍县张家湾镇普洒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 rockavalanche on August 28, 2017 in zhangjiawan nayongxian, Guizhou: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 223-240.(in Chinese)
- [2] Huang R Q. Mechanisms of large-scale landslides in China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, 71(1): 161-170.

- [ 3 ] Liu M, Liu F Z, Huang R Q, et al. Deep-seated large-scale toppling failure in metamorphic rocks: a case study of the Erguxi slope in southwest China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(12): 2094-2110.
- [ 4 ] 钟祖良, 高国富, 刘新荣, 等. 地下采动下含深大裂隙岩溶山体变形响应特征[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 97-106.  
Zhong Z L, Gao G F, Liu X R, et al. Deformation response characteristics of karst mountains with deep and large fissures under the condition of underground mining[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 97-106.(in Chinese)
- [ 5 ] 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.  
Liu C Z. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China[J]. *Geological Review*, 2014, 60(4): 858-868.(in Chinese)
- [ 6 ] 杨忠平, 蒋源文, 李滨, 等. 采动作用下岩溶山体深大裂隙扩展贯通机理研究[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(4): 459-470.  
Yang Z P, Jiang Y W, Li B, et al. Study on the mechanism of deep and large fracture propagation and transfixion in karst slope under the action of mining[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 459-470.(in Chinese)
- [ 7 ] Scholtes L, Donze F V. A DEM analysis of step-path failure in jointed rock slopes[J]. *Comptes Rendus Mecanique*, 2015, 343(2): 155-165.
- [ 8 ] 张御阳, 黄润秋, 裴向军, 等. 楞古水电站碎裂岩质边坡变形破坏模式研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(2): 556-564.  
Zhang Y Y, Huang R Q, Pei X J, et al. Deformation failure mode of fractured rock mass slope in lenggu hydropower station[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(2): 556-564.(in Chinese)
- [ 9 ] 周永利, 王建国. 降雨诱发含后缘裂缝岩质边坡失稳机制研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(4): 103-108.  
Zhou Y L, Wang J M. The research on instability mechanism of rock slope with trailing edge cracks induced by rainfall[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(4): 103-108.(in Chinese)
- [ 10 ] 刘新荣, 熊飞, 李滨, 等. 水力作用下岩质斜坡破坏机制和稳定性分析研究现状[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(4): 547-558.  
Liu X R, Xiong F, Li B, et al. Current situation of research on failure mechanism and stability of rock slopes under hydraulic action[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 547-558.(in Chinese)
- [ 11 ] Mu W P, Wu X, Qian C, et al. Triggering mechanism and reactivation probability of loess-mudstone landslides induced by rainfall infiltration: a case study in Qinghai Province, Northwestern China[J]. *Environmental earth sciences*, 2020, 79(1):22.
- [ 12 ] 李华舟, 胡斌, 陈晓龙, 等. 水力作用下含缓倾软弱夹层台阶边坡稳定性分析[J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(11): 41-45.  
Li H Z, Hu B, Chen X L, et al. Stability analysis on the gently-inclined stepped slope with weak interlayer under hydraulic action[J]. *Mining Research and Development*, 2017, 37(11): 41-45.(in Chinese)
- [ 13 ] Gao Y F, Zhu D S, Zhang F, et al. Stability analysis of three-dimensional slopes under water drawdown conditions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(11): 1355-1364.
- [ 14 ] Gu D M, Huang D, Yang W D, et al. Understanding the triggering mechanism and possible kinematic evolution of a reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. *Landslides*, 2017, 14(6): 2073-2087.
- [ 15 ] Huang D, Gu D M, Song Y X, et al. Towards a complete understanding of the triggering mechanism of a large reactivated landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. *Engineering Geology*, 2018, 238: 36-51.
- [ 16 ] 李滨, 王国章, 冯振, 等. 地下采空诱发陡倾层状岩质斜坡失稳机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1148-1161.  
Li B, Wang G Z, Feng Z, et al. Failure mechanism of steeply inclined rock slopes induced by underground mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1148-1161.(in Chinese)
- [ 17 ] 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)
- [ 18 ] Yu J L, Zhao J J, Yan H Y, et al. Deformation and failure of a high-steep slope induced by multi-layer coal mining[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(12): 2942-2960.
- [ 19 ] Zhao J J, Xiao J G, Lee M L, et al. Discrete element modeling of a mining-induced rock slide[J]. *SpringerPlus*, 2016, 5(1): 1-19.
- [ 20 ] 王永峰. 基于数值模拟的采动边坡的稳定性分析[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(6): 208-210.  
Wang Y F. Stability analysis of mining slope based on numerical simulation[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(6): 208-210.(in Chinese)
- [ 21 ] Luo G, Hu X W, Bowman E T, et al. Stability evaluation and prediction of the Dongla reactivated ancient landslide as well as emergency mitigation for the Dongla Bridge[J]. *Landslides*, 2017, 14(4): 1403-1418.
- [ 22 ] Guo W B, Wang H S, Dong G W, et al. A case study of effective support working resistance and roof support technology in thick seam fully-mechanized face mining with hard roof conditions[J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 935.

- [23] Ma G T, Hu X W, Yin Y P, et al. Failure mechanisms and development of catastrophic rockslides triggered by precipitation and open-pit mining in Emei, Sichuan, China[J]. *Landslides*, 2018, 15(7): 1401-1414.
- [24] 贺凯, 高杨, 王文沛, 等. 陡倾煤层开采条件下上覆山体变形破坏物理模型试验研究[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(3): 399-406.  
He K, Gao Y, Wang W P, et al. Physical model experimental study on deformation and failure of overlying rock slope under the condition of steep coal seam mining[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(3): 399-406.(in Chinese)
- [25] Suchowerska Iwanec A M, Carter J P, Hambleton J P. Geomechanics of subsidence above single and multi-seam coal mining [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, 8(3): 304-313.
- [26] Ghabraie B, Ghabraie K, Ren G, et al. Numerical modelling of multistage caving processes: insights from multi-seam longwall mining-induced subsidence[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2017, 41(7): 959-975.
- [27] 肖锐铎, 陈红旗, 冷洋洋, 等. 贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(1): 3-9.  
Xiao R H, Chen H Q, Leng Y Y, et al. Preliminary analysis on the failure process and mechanism of the August 28 collapse in Nayong County, Guizhou Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(1): 3-9.(in Chinese)
- [28] 王得原. 纳雍县张家湾镇普洒村老鹰岩组崩塌地质灾害应急调查报告[R]. 遵义: 贵州省地质矿产勘查开发局一〇六地质大队, 2016.  
Wang D Y. An Emergency Investigation Report of the Collapse of Geological Disasters in the Laoyingyan of Pusa Village in Zhangjiawan Town, Nayong County[R]. 106 Geological Party, Zunyi: Guizhou Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, 2016. (in Chinese)
- [29] 刘红岩, 王新生, 秦四清, 等. 岩石边坡裂隙渗流的流形元模拟[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(1): 53-58.  
Liu H Y, Wang X S, Qin S Q, et al. Numerical simulation of crack seepage in rock slope with manifold method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(1): 53-58.(in Chinese)
- [30] 李伟, 肖蓉, 吴礼舟. 岩质边坡中结构面上水压分布假设的改进研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(3): 599-608.  
Li W, Xiao R, Wu L Z. Improvement of water pressure distribution along the structural plane in rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(3): 599-608.(in Chinese)
- [31] Itasca Consulting Group, Inc. UDEC (Universal Distinct Element Code) Special Features Structures/Fluid Flow/Thermal/Dynamics[R]. Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 2019.
- [32] 熊飞, 刘新荣, 冉乔, 等. 采动-裂隙水耦合下含深大裂隙岩溶山体失稳破坏机理[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3445-3458.  
Xiong F, Xiao R, Ran Q, et al. Instability failure mechanism of karst mountain with deep and large fissures under the mining-fissure water coupling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3445-3458.

(编辑 陈移峰)