

西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式

徐伟, 冉涛, 田凯

Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province

XU Wei, RAN Tao, and TIAN Kai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析

Characteristics, types, main causes and development of high-position geohazard chains along the Jiali fault zone, Tibet, China

万佳威, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 贺凯, 李壮, 李艺豪 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 51-60

基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析

Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongsong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation

李军, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 42-50

强震区叠溪松坪沟景区地质灾害发育分布规律

Development and distribution rules of geohazards in Diexi- Songpinggou scenic area in a meizoseismic area

穆成林, 习朝辉, 裴向军, 崔圣华 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 124-130

西藏波密茶隆隆巴曲高位地质灾害类型及发育特征

Types and development characteristics of high geological disasters in Chalongsongbaqu gully, Bomi, Tibet

张田田, 殷跃平, 李滨, 贺凯, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 9-16

雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41

西藏然乌湖口高位地质灾害变形特征分析

Analysis on deformation characteristics of geological hazards in Ranwu Lake Estuary

赵志男, 李滨, 高杨, 赵超英, 刘晓杰, 王猛 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 25-32



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-15

西南红层地区地质灾害发育规律与成灾模式 ——以云南彝良县为例

徐 伟^{1,2}, 冉 涛², 田 凯²

- (1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610081;
2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 红层区边坡的变形破坏引发的地质灾害类型多、数量大, 造成的人员伤亡和财产损失较大。以彝良县红层地区地质灾害为研究对象, 结合实地调查, 对彝良县红层边坡变形破坏所引发的 49 处不稳定斜坡、150 处滑坡、53 处崩塌进行了统计分析, 总结了发育规律及特征。对不同斜坡结构下的红层边坡的成灾模式及破坏过程进行了分析, 红层顺向边坡常见破坏模式为滑移-拉裂式; 横向边坡常见破坏模式为崩解-冲刷式; 反向坡、斜向坡的常见破坏模式为软岩崩解剥落-硬岩卸荷拉裂坠落式。研究可为彝良县等红层发育地区的地质灾害防治和管理提供一定的技术支持和参考。

关键词: 红层; 地质灾害; 发育规律; 成灾模式

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0127-07

Developing law and disaster modes of geohazards in red bed region of southwestern China: A case study of Yiliang County of Yunnan Province

XU Wei^{1,2}, RAN Tao², TIAN Kai²

- (1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: The deformation and destruction of slope in red bed area frequently cause many types and large quantities of geological hazards, resulting in large casualties and property losses. Taking the geological hazards in the red bed area of Yiliang county as the research object, the overall developing laws and characteristics of the geohazards were statistically analyzed based on a detailed field survey of 49 unstable slopes, 150 landslides, and 53 rockfalls. Then, the disaster modes and failure process of slopes under different models of slope structures are carried out systematically. The failure mode of consequent slopes are sliding-cracking modes, the failure mode of transverse slopes are disintegrating and scouring mode, the failure mode of reverse and oblique slopes are soft rock disintegration and peeling-hard rock cracking and falling. The research can provide some technical support and reference for the prevention and management of geological disasters in other red bed areas.

Keywords: red bed; geohazards; developing law; disaster modes

0 引言

红层软岩具有岩体强度低、抗风化能力差、透水性

弱、水敏感性强、亲水性强, 浸水后膨胀软化, 失水后崩解的特性。红层边坡自稳能力差, 不及时治理会发生变形破坏, 进而诱发滑坡、崩塌落石等地质灾害。西南地

收稿日期: 2020-08-07; 修订日期: 2020-10-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190640); 国家自然科学基金项目 (41977252); 四川省青年科技创新研究团队专项计划项目 (2017TD0018)

第一作者: 徐 伟 (1986-), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 工程师, 主要从事区域地质灾害调查评价与研究工作。E-mail: 052054@163.com

区的红层集中分布在四川和云南。彝良县境内红层发育,由于红层边坡变形破坏引发的地质灾害类型多数量大,给当地造成了较大的人员伤亡和财产损失,因此对于红层边坡的孕灾成灾方面的研究具有紧迫性和必要性。

近年来,许多学者对中国红层、云南红层、四川红层的分布及工程地质特性进行了研究^[1-11];对红层软化、崩解特性试验研究^[12-15];对红层软岩软弱夹层的蠕变性质实验研究^[16-19];对软岩软化微观机理研究^[20-22];对软硬相间边坡的失稳模式和稳定性研究^[23-30]。前人的研究取得了许多新的进展和成果,积累了丰富的经验。以彝良县红层地区地质灾害为研究对象,从地层时代、规模、坡度 3 个方面对彝良县红层边坡的分布规律及特征进行统计分析;结合典型灾害点对不同斜坡结构下的红层边坡的成灾模式及演化过程进行总结研究。研究可为红层发育地区的地质灾害防治和管理提供一定的技术支持和参考。

1 彝良县地质环境条件

彝良县隶属于昭通市,地处云南省东北部的云、贵、川三省结合部的乌蒙山区,云贵高原东北部边缘斜坡地带,乌蒙山脉五莲峰支系,境内山高谷深,地势自南向西向北东倾斜。

彝良县具有高原季风立体气候特征,全县多年平均降雨量 967.68 mm。雨量集中于雨季(5~10月),占全年降雨量的 93.6%,24 h 最大降雨量高达 235.4 mm(1992 年 7 月 13 日),10 min 雨强高达 13.36 mm(1990 年 6 月 28 日)。县境内河流均属金沙江水系横江支流,全县大小河流 150 多条,较大者为洛泽河和白水江。

彝良县位于扬子准地台滇东北拗褶带昭通镇雄拗褶区,构造形迹以褶皱为主,断裂相对较少,主导构造以北东向为主,北西向为辅。彝良县处于大关-马边地震活动带,地震活动频繁,震级大。2012 年 9 月 7 日,彝良县连续发生 M5.7 级、M5.6 级地震,震中距离彝良县城约 15 km。

2 彝良县红层边坡发育特征

彝良县红层软岩主要分布于该县的西部和南部,具体分布情况为:(1)白垩系(K),主要分布于洛旺乡北东、洛泽河镇北一带;(2)侏罗系(遂宁组 J_{2s}、沙溪庙组 J_{2sx}、自流井组 J_{1z}),主要分布于角奎镇新场、发达、洛泽河镇及洛旺乡等地;(3)三叠系(关岭组 T_{2g}、飞仙关组 T_{1f}),主要分布于角奎镇、荞山乡、牛街镇、柳溪乡、

两河乡、龙安乡和小草坝乡等地。

彝良县共发育不稳定斜坡 101 处、滑坡 288 处、崩塌 161 处(图 1)。其中发育在上述红层地层中的不稳定斜坡 49 处,占斜坡总数的 48.5%;滑坡 150 处,占滑坡总数的 52.1%,崩塌 53 处,占崩塌总数的 32.9%。根据不同地层时代、不同斜坡结构类型、不同规模、不同坡度对红层边坡发生的灾害数量分别进行了统计。

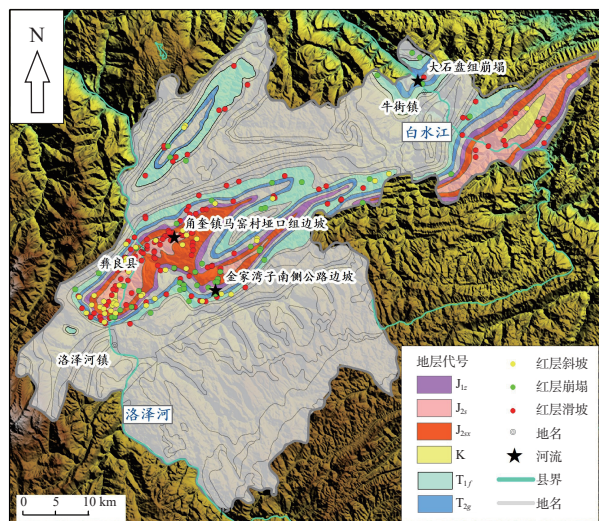


图 1 彝良县红层区地质灾害分布图

Fig. 1 Distributions of geological hazards in red strata area of Yiliang County

2.1 不同地层时代发育特征及规律

统计红层灾害发育的地层时代如图 2 所示。红层不稳定斜坡中,沙溪庙组 J_{2sx} 最多,21 处;飞仙关组 T_{1f} 和遂宁组 J_{2s} 次之,分别为 12 处和 8 处。红层滑坡中,以飞仙关组 T_{1f} 最多,46 处,沙溪庙组 J_{2sx} 和遂宁组 J_{2s} 次之,分别为 41 处和 39 处。红层崩塌中,沙溪庙组 J_{2sx} 最多,21 处;飞仙关组 T_{1f} 次之,19 处。

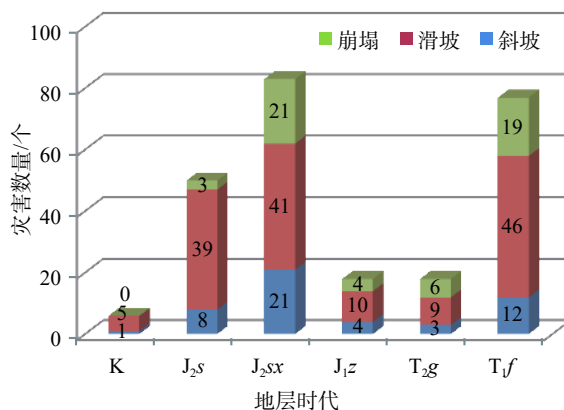


图 2 按不同地层时代统计灾害数量规律图

Fig. 2 Statistics on the number of disasters according to different strata ages

在构造作用以及其他外动力作用影响下,软弱地层容易成为潜在的滑动面或滑动带。同时,由于抗风化能力弱,易形成大量的松散物质。彝良县的沙溪庙组 J_2sx 、飞仙关组 T_1f 和遂宁组 J_2s 三种地层,尤其是沙溪庙组 J_2sx 发育的红层边坡最易发生变形破坏、发生地质灾害数量也最多,以上地层尤其要加强地质灾害的排查和防范。

2.2 不同规模等级发育特征及规律

统计红层灾害发育的规模等级如图 3 所示。红层不稳定斜坡和红层滑坡的数量均随着规模等级的增大而减少,其中小型规模的最多,中型规模的次之。红层崩塌中,中型规模的最多,小型和大型的次之。

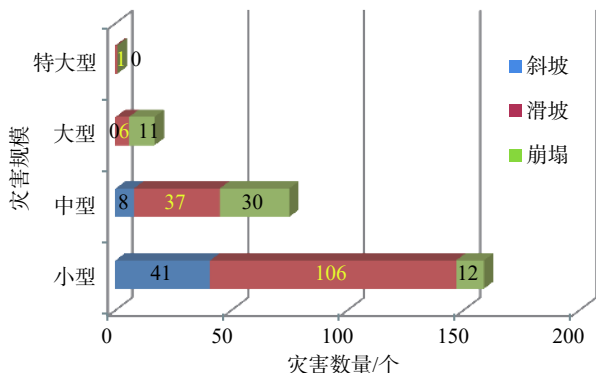


图 3 按不同规模等级统计灾害数量规律图

Fig. 3 Statistics of the number of disasters according to different scales

2.3 不同坡度区间发育特征及规律

统计红层灾害发育的坡度如图 4 所示,边坡坡度与地质灾害坡度比率分布呈似正态分布,小于 20° 的边坡,地层稳定,地质灾害发育弱;随着坡度增大,边坡失稳滑动的概率增大, $20^\circ \sim 50^\circ$ 的边坡地带,多发育滑坡、不稳定斜坡,特别是在软弱岩层形成的 $20^\circ \sim 40^\circ$ 斜坡,既有

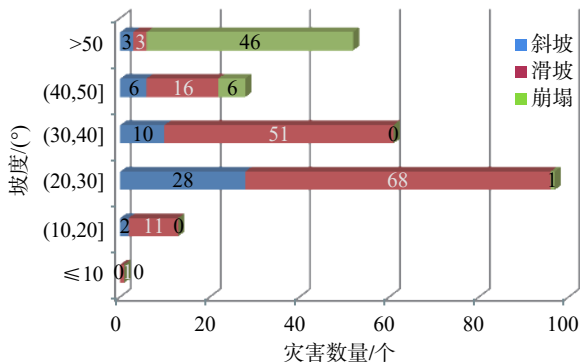


图 4 按不同坡度区间统计灾害数量规律图

Fig. 4 Statistics of the number of disasters according to different slope intervals

利于松散物质的形成堆积,又易于形成滑动面,是滑坡、不稳定斜坡的主要发生区;大于 50° 的斜坡地带,多发生崩塌类地质灾害,彝良县内崩塌均发生在具高陡临空面的陡坡和陡崖地段。

3 红层边坡成灾模式及演化过程分析

岩体结构是在漫长的地质历史过程中,通过原生建造、构造改造及表生改造三个阶段综合作用的产物。原生建造是基础,构造改造是主体,而浅、表生改造则是一定程度、一定范围内进一步恶化了岩体结构及其工程性状。不同斜坡结构与不同岩体结构组合下,红层边坡的变形破坏结果不同。

3.1 顺向红层边坡的成灾模式及演化过程

顺向红层边坡的变形主控界面是岩层层面,基本上都具有后壁陡直,滑面平缓的特点,属座滑型滑坡。一般发育在上部为巨厚层砂岩,下伏薄层-中厚层粉砂质泥岩、泥岩。在构造应力作用下往往形成两组近正交的共轭节理,且与岩层层面近垂直,节理裂隙间距大,且切割较深,岩体为整体巨厚层状。顺向边坡最常见的成灾模式为滑移-拉裂式的顺层滑坡或崩塌。软岩岩层层面为滑动面,硬岩后缘拉张裂隙贯通,造成硬岩沿软岩层面滑动,破坏力极强,潜在危害极大。

以彝良县牛街镇南厂村大石盘组崩塌为例,该处崩塌发生于 2016 年 6 月 16 日,造成 3 栋房屋倒塌、1 人死亡、1 人受伤(图 5)。崩塌区为基岩边坡,陡峭近直立。该崩塌所在边坡为顺向边坡,出露地层岩性为三叠系关岭组的灰岩(T_2g),中间夹暗紫红色及灰绿色泥页岩,属软硬相间地层。

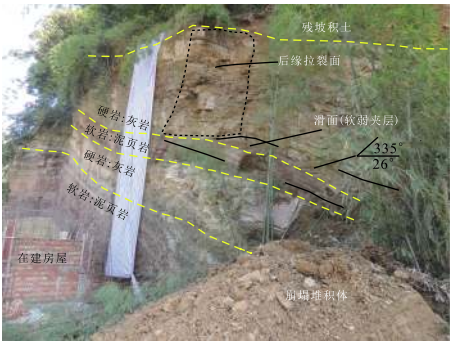


图 5 大石盘崩塌特征图

Fig. 5 Characteristic diagram of Dashipan collapse

顺向红层边坡常见的成灾模式为拉裂—滑移式滑坡或崩塌,演化过程如图 6 所示。

(1) 岩体的损伤和拉张裂缝的形成。边坡岩体中切割坡面的陡直拉张裂缝,在长期的降雨及风化、溶蚀

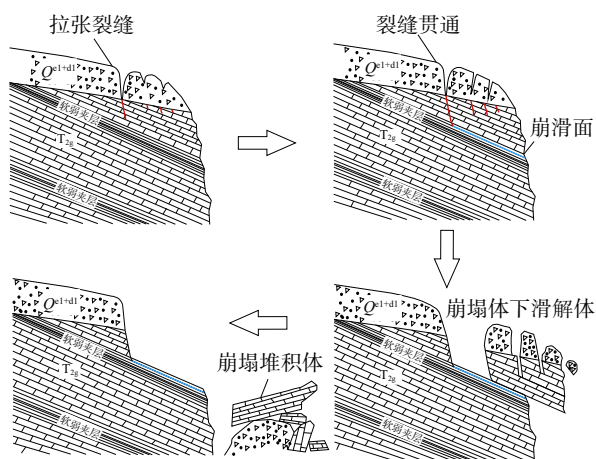


图 6 顺层边坡破坏过程示意图

Fig. 6 Failure process diagram of bedding slope

等作用下,地下水灌入结构面中,产生较大的静水压力,并软化、溶蚀裂隙表面,造成后缘拉张裂缝张开度增大,连通率提高,延伸长度增加,最终贯通至软岩层面处。

(2)软岩在裂隙水浸润、岩溶、温差变化等作用下,后缘裂隙充水产生强大的静水压力,结构面抗剪强度降低,阻滑段支撑力下降。

(3)后缘拉张裂缝贯通后,形成了孤立的危岩体,随着时间的积累,软岩层面的抗剪强度进一步降低,阻滑段的支撑力小于危岩体的下滑力,造成了软岩层面的贯通,危岩体在重力作用下沿层面由剪出口发生剪切滑移。

(4)由于有力的地形条件,危岩体携带着上覆残坡积土层整体滑移下错,滑坡或崩塌体在坠落过程中沿控制性节理面进一步拉裂解体,最终堆积在边坡坡脚处趋于稳定。

3.2 横向红层边坡的成灾模式及演化过程

横向红层边坡的变形破坏主要受岩体结构的浅表生改造过程所产生的卸荷裂隙控制,岩体卸荷松动,裂隙发育,加剧了岩体后期的风化、地下水淋滤溶蚀等次生改造作用,次生改造作用又进一步恶化了岩体结构强度。在彝良县境内,横向边坡最常见的成灾模式为崩解冲刷—剪切坠落式,常因差异风化形成局部风化剥落和小型冲沟。

以金家湾子南侧公路边坡为例,该边坡地层岩性为紫红色泥岩,页岩,粉砂岩,属陡倾的横向坡,由于软硬相间岩层的差异风化,坡面产生了三条明显的冲沟,三条沟的风化深度分别为 3 m、1.5 m、4 m 左右,冲沟成为了天然的排泄通道(图 7)。泥岩、页岩经过长期风化作用,岩石碎屑附着在边坡表面,表层松散的全风化层易

在雨水冲刷下剥落沿冲沟冲出,形成坡面泥石流,堵塞公路,在冲沟出口可见泥岩页岩堆积物(图 8)。

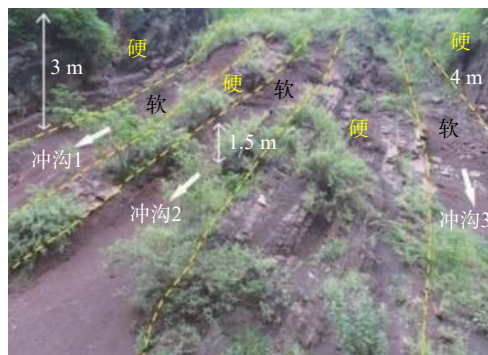


图 7 边坡差异风化形成多条冲沟

Fig. 7 Multiple gully formed by difference weathering



图 8 边坡坡脚处的堆积物

Fig. 8 Debris on the toe of slope

上述横向红层边坡的成灾模式为崩解-冲刷式崩塌,在彝良县境内发育广泛,尤其是在公路沿线的边坡尤为常见,演化过程如图 9 所示。

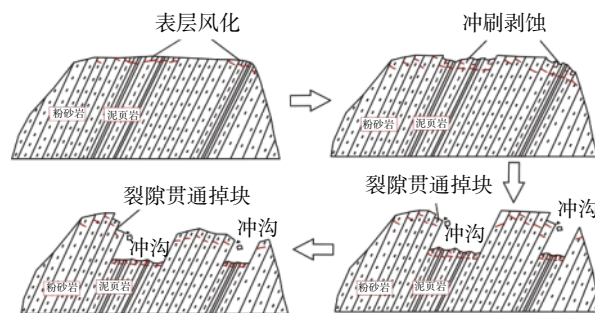


图 9 横向边坡破坏过程示意图

Fig. 9 Failure process diagram of transverse slope

(1)红层软岩岩体中的泥岩、页岩具有透水性差,亲水性强,浸湿后岩体强度降低,失水后容易产生崩解的特性,因此在经历降雨后表层的泥岩、页岩崩解呈散体状颗粒物;而粉砂岩在经历降雨等风化作用后,陡倾

节理会逐渐变宽变长。

(2)由于长期的差异风化,泥岩页岩不断剥蚀下切,两侧粉砂岩形成天然的侧壁,冲沟深度逐渐加深。

(3)新鲜的崩解物和少量被节理面贯通掉落的粉砂岩岩块会堆积在沟内,下次降雨时雨水汇集于沟内裹挟着这些物质形成坡面碎屑流一并冲向坡脚处。

3.3 反向坡、斜向坡的成灾模式及演化过程

反向坡和斜向坡的变形破坏也主要受构造节理的一系列浅表生改造过程所产生的陡倾节理面控制,常见的成灾模式为软岩崩解剥落-硬岩剪切滑移坠落。主要发生在反向高陡斜坡,陡倾节理面倾向坡外的临空面处,主要发育的灾害类型为局部小型的崩塌落石,隐蔽性较强,危害较大。顺斜向坡的变形破坏受卸荷裂隙和层面共同控制,易引发沿层面滑动的顺层滑坡,危害性大。

以彝良县角奎镇马窑村垭口组的一处逆斜向边坡为例。地层岩性为侏罗系中统遂宁组 J_2s 紫红色泥岩、钙质泥岩、粉砂质泥岩夹细砂岩及泥灰岩。由于泥岩和砂岩的差异风化,泥岩崩解剥落形成凹槽,砂岩悬空,陡倾节理的岩桥剪断形成贯通性结构面(图 10)。



图 10 差异风化形成的凹槽

Fig. 10 Groove formed by difference weathering

反向边坡、斜向边坡的成灾模式大都为软岩崩解剥落-硬岩卸荷拉裂坠落,其演化过程如图 11 所示。

(1)在降雨、冻融、温度、阳光、生物等的综合作用下,特别是长期反复的干湿效应、气温波动、阳光交替,泥岩、砂岩抗风化性能有所差异,风化作用将泥岩崩解剥蚀后,形成向岩体内部的凹槽。

(2)随着深度不断加大,导致上部砂岩悬空,形成危岩,砂岩中的陡倾节理或张拉裂缝的“岩桥”被剪断形成贯通性结构面。

(3)变形体在自重应力作用下,发生坠落,形成落石或崩塌。

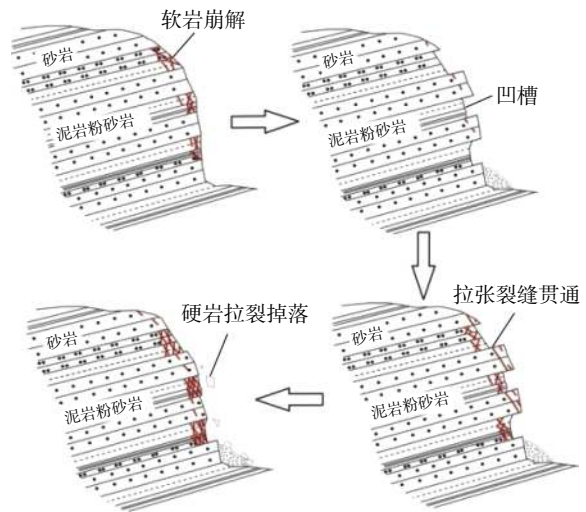


图 11 反向、斜向红层边坡的破坏过程

Fig. 11 Failure process diagram of reverse and oblique slope

4 结论

(1)对彝良县红层边坡的发育特征及规律进行统计总结得知,彝良县的沙溪庙组 J_2sx 、飞仙关组 T_1f 和遂宁组 J_2s 三种地层,尤其是沙溪庙组 J_2sx 发育的红层边坡最易发生变形破坏、发生地质灾害数量也最多;红层边坡变形破坏形成的不稳定斜坡、滑坡的规模以小型为主,崩塌以中型为主;坡度在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的红层边坡最易发生滑坡、不稳定斜坡;坡度在 50° 以上的红层边坡最易发生崩塌。

(2)不同斜坡结构与不同岩体结构组合下,红层边坡的成灾模式及破坏过程是不同的。红层顺向边坡常见成灾模式为滑移-拉裂式的顺层滑坡或崩塌;横向边坡常见成灾模式为崩解冲刷-剪切坠落式,常因差异风化形成局部风化剥落和小型冲沟;反向坡和斜向坡常见成灾模式为软岩崩解剥落-硬岩卸荷拉裂坠落,主要发育的灾害类型为局部小型的崩塌落石。

参考文献 (References):

- [1] 胡厚田,赵晓彦.中国红层边坡岩体结构类型的研究[J].岩土工程学报,2006,28(6):689-694. [HU Houtian, ZHAO Xiaoyan. Studies on rockmass structure in slope of red bed in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 689-694. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 程强,寇小兵,黄绍彬,等.中国红层的分布及地质环境特征[J].工程地质学报,2004,12(1):34-40. [CHENG Qiang, KOU Xiaobing, HUANG Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1):

- 34–40. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李廷勇, 王健力. 中国的红层及发育的地貌类型 [J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2002, 25(4): 427–431. [LI Tingyong, WANG Jianli. Chinese red beds and developing landforms [J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2002, 25(4): 427–431. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 67–71. [GUO Yongchun, XIE Qiang, WEN Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(6): 67–71. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 陈军, 王自高, 曾宪强, 等. 云南红层工程地质特性研究 [J]. 水力发电, 2006, 32(11): 31–34. [CHEN Jun, WANG Zigao, ZENG Xianqiang, et al. Study on engineering geologic properties of red rocks [J]. Water Power, 2006, 32(11): 31–34. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄绍槟, 程强, 胡厚田. 四川红层分布及工程环境特征研究 [J]. 公路, 2005, 50(5): 81–85. [HUANG Shaobin, CHENG Qiang, HU Houtian. A study on distribution of Sichuan red beds and engineering environment characteristics [J]. Highway, 2005, 50(5): 81–85. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郑勇. 四川盆地红层丘陵地区地下水开发前景 [J]. 四川地质学报, 2000, 20(4): 262–264. [ZHENG Yong. The prospects for underground water exploitation in red bed hill region in Sichuan basin [J]. Acta Geologica Sichuan, 2000, 20(4): 262–264. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 魏伦武. 西南地区水工环地质大调查成果综述 [J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(4): 103–105. [WEI Lunwu. Summary of the results of the geological survey of hydraulic ring in southwest China [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2004, 24(4): 103–105. (in Chinese)]
- [9] 惠浪波, 郭进京, 赵海涛, 等. 西秦岭岷县地区红层砂岩成因分析 [J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(2): 38–46. [HUI Langbo, GUO Jinjing, ZHAO Haitao, et al. Genesis of red-bed sandstones in the Minxian region, western Qinling Mountains [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2016, 36(2): 38–46. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈启国, 郑万模, 常小军. 典型红层地区地下水的补、径、排关系探讨: 以重庆市荣昌县为例 [J]. 沉积与特提斯地质, 2011, 31(3): 107–112. [CHEN Qiguo, ZHENG Wanmo, CHANG Xiaojun. An approach to the relationship between recharge, runoff and drainage of groundwater in the typical red beds: An example from Rongchang in Chongqing [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2011, 31(3): 107–112. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 高鹏鹏, 高胜利, 朱冠芳, 等. 试论川渝河包场地区上三叠统须家河组沉积相 [J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(1): 71–77. [GAO Pengpeng, GAO Shengli, ZHU Guanfang, et al. An approach to the sedimentary facies in the Upper Triassic Xujiache Formation in the Hebaochang region at the boundary of the Sichuan-Chongqing zone [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2009, 29(1): 71–77. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 33–38. [ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33–38. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 谭罗荣. 关于粘土岩崩解、泥化机理的讨论 [J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 1–5. [TAN Luorong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 1–5. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 赵明华, 陈炳初, 苏永华. 红层软岩崩解破碎过程的分形分析及数值模拟 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 351–356. [ZHAO Minghua, CHEN Bingchu, SU Yonghua. Fractal analysis and numerical modeling disintegrate process of red-bed soft rock [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007, 38(2): 351–356. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4173–4179. [WU Daoxiang, LIU Hongjie, WANG Guoqiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 2): 4173–4179. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 程强, 周德培, 封志军. 典型红层软岩软弱夹层剪切蠕变性质研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 3176–3180. [CHENG Qiang, ZHOU Depei, FENG Zhijun. Research on shear creep property of typical weak intercalation in redbed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 1): 3176–3180. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 朱杰, 徐颖, 亓燕秋. 冻结红层软岩的蠕变特性研究 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2013, 33(4): 26–31. [ZHU Jie, XU Ying, QI Yanqiu. Research on the creep characteristics of frozen red-bed soft rock [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 33(4): 26–31. (in Chinese with English abstract)]

- [18] 谌文武,原鹏博,刘小伟.分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3076-3081. [CHEN Wenwu, YUAN Pengbo, LIU Xiaowei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup 1): 3076-3081. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王志俭,殷坤龙,简文星.万州区红层软弱夹层蠕变试验研究[J].岩土力学,2007,28(增刊1):40-44. [WANG Zhijian, YIN Kunlong, JIAN Wenxing. Experimental research on creep of incompetent beds in Jurassic red clastic rocks in Wanzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Sup 1): 40-44. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 黄宏伟,车平.泥岩遇水软化微观机理研究[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(7):866-870. [HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on micro-mechanism of softening and argillitization of mudstone [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2007, 35(7): 866-870. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 周翠英,谭祥韶,邓毅梅,等.特殊软岩软化的微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(3):394-400. [ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 394-400. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 谭罗荣,孔令伟.某类红粘土的基本特性与微观结构模型[J].岩土工程学报,2001,23(4):458-462. [TAN Luorong, KONG Lingwei. Fundamental property and microstructure model of red clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 458-462. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 殷跃平.三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J].工程地质学报,2005,13(2):145-154. [YIN Yueping. Human-cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 145-154. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 黄波林,刘广宁,彭轩明.重庆市涪陵区厚层软硬相间岩体失稳模式[J].工程地质学报,2009,17(4):516-521. [HUANG Bolin, LIU Guangning, PENG Xuanming. Analysis of cut rock slope failure modes with thick soft-hard inter-beddings in Fuling County, Chongqing [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 516-521. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 卢海峰,陈从新,袁从华,等.巴东组红层软岩缓倾顺层边坡破坏机制分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3569-3577. [LU Haifeng, CHEN Congxin, YUAN Conghua, et al. Analysis of failure mechanism of Badong red bed soft rock gently inclined bedding slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 2): 3569-3577. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 曹先康,温智,陈海兰.四川巴中市红层地区滑坡发育特征与防范措施[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(6):20-24. [CAO Xiankang, WEN Zhi, CHEN Hailan. Landslide development characteristics and preventive measures in the area with red beds in Bazhong City, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 20-24. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 蒋正,倪俊勇,宋志.重庆丰都县城区红层边坡变形破坏模式与稳定性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(6):23-32. [JIANG Zheng, NI Huayong, SONG Zhi. Deformation and failure modes and stability assessment of red bed slope in the urban area of Fengdu, Chongqing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(6): 23-32. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 刘义,武选民,王兵虎,等.青海东部西宁盆地北缘红层滑坡成因机制与稳定性评价:以石板滩滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):34-41. [LIU Yi, WU Xuanmin, WANG Binghu, et al. Formation mechanism and stability evaluation of a bedding landslide in red-bed strata in Xining north basin, eastern Qinghai Province—a case study of Shibantan landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 34-41. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 王家柱,葛华,高延超,等.川南红层区黄子树滑坡形成过程与运动特征[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(2):9-17. [WANG Jiazhu, GE Hua, GAO Yanchao, et al. Mechanism and kinematic characteristics of Huangzishu Landslide in the red mudstone of southern Sichuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 9-17. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 余小龙,安玉科.甘肃徽-成盆地红层工程滑坡特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(3):31-35. [YU Xiaolong, AN Yuke. Characteristics of engineering landslide in red bed rock area of the Hui-Cheng basin in Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 31-35. (in Chinese with English abstract)]