中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

岩溶山区危岩稳定性分析及危害性预测

王　琦，胡亚净，宋伟利，穆启超

Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province

WANG Qi, HU Yajing, SONG Weili, and MU Qichao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112031

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析

Analyses on failure modes and effectiveness of the prevention measures of Jianchuandong dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area

蒋文明, 王鲁琦, 赵鹏, 黄波林, 张枝华, 胡明军　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 105–112

北京雁栖镇典型危岩基本特征及稳定性分析

Basic characteristics and stability evaluation of dangerous rockmasses in Yanqi Town, Beijing

夏相骅, 刘德成, 李玉倩, 高雪媛　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 28–34

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysison the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48–53

河北阜平县石滩地村危岩体变形破坏模式及稳定性分析

${suggestArticle.titleEn}

刘贺军, 吴玉涛, 李晓乐, 于鸿坤, 杨为民　中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 50–57

贵州纳雍岭镇危岩带稳定性及危害范围分析

${suggestArticle.titleEn}

程宇, 张健, 陈进, 龙举　中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 9–15

基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型

Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey:A case study at simianshan scenic area of Chongqing

熊开治, 任志远, 赵亚龙, 杨忠平, 张黎健　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62–69

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202112031
王琦, 胡亚净, 宋伟利, 等. 岩溶山区危岩稳定性分析及危害性预测——以贵州松桃县长冲危岩体为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 75-84.
WANG Qi, HU Yajing, SONG Weili, et al. Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 75-84.

岩溶山区危岩稳定性分析及危害性预测
——以贵州松桃县长冲危岩体为例

王　琦[1,2,3], 胡亚净[1,2,3], 宋伟利[1,2,3], 穆启超[1,2,3]
（1. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院，河南 洛阳　471023；2. 生态与勘查地球化学应用工程技术研究中心，河南 洛阳　471023；3. 自然资源部贵金属分析与勘查技术重点实验室，河南 洛阳　471023）

摘要: 岩溶地区山体岩石裸露, 地形坡度陡, 其发育的危岩体一旦失稳, 将对威胁区的居民生命财产造成严重危害, 故及时准确地分析灾体的稳定及危害性极具意义。文中以贵州省松桃县和平社区长冲组危岩体为对象, 结合工程勘查成果, 分析了危岩体区的地形地貌、地质构造和水文特征等孕灾背景, 并结合危岩体发育特征深入分析论证危岩体变形破坏模式及影响因素。在此基础上对危岩体稳定性进行定性及定量分析, 评估了危岩体的危害程度及发展趋势。结果表明: 发育于岩溶山区的危岩体, 独特的喀斯特地貌、岩溶特征及复杂的结构面是控制其稳定性的关键因素, 降雨、风化等作用为主要诱发因素。提出了初步防治方案建议, 为后续采取治理措施提供参考依据。

关键词: 危岩体; 稳定性分析; 运动轨迹特征; 赤平投影; rockfall
中图分类号: P642.21　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1003-8035(2023)01-0075-10

Stability analysis and hazard prediction of dangerous rock masses in karst mountainous area: A case study of Changchong dangerous rock mass in Songtao County, Guizhou Province

WANG Qi[1,2,3], HU Yajing[1,2,3], SONG Weili[1,2,3], MU Qichao[1,2,3]
(1. *No.1 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan*, *Luoyang*, *Henan*　471023, *China*; 2. *Research Center for Applied Engineering Technology of Ecology and Exploration Geochemistry*, *Luoyang*, *Henan*　471023, *China*; 3. *Key Laboratory of Precions Metals Analysis and Exploration Technology*, *Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China*, *Luoyang*, *Henan*　471023, *China*)

Abstract: In karst areas, the mountains are bare and the terrain is steep. Once the dangerous rock mass developed instability, it will threaten the lives and properties of the residents. So it is significant to analyze the stability and hazards of the disasters in a timely and accurate manner. Taking the dangerous rock mass of Changchong Group in Heping Community, Songtao County, Guizhou Province as the object, combined with the results of engineering survey, the disaster-generating background of the

收稿日期: 2021-12-28; **修订日期:** 2022-04-20　　**投稿网址:** https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目: 贵州省第三批 10 个县(市、区)地质灾害详细调查及风险评价项目(GZMC-ZG20201064)
第一作者: 王　琦(1982-), 女, 河南洛阳人, 本科, 工程师, 主要从事矿山地质环境恢复治理、地质灾害调查评价工作。
E-mail: 366868769@qq.com

dangerous rock mass areas, such as topography, geological structure and hydrology, were analyzed, and the development characteristics of the dangerous rock mass were analyzed deeply. The failure mode and influencing factors of dangerous rock mass was demonstrated. On this basis, qualitative and quantitative analysis of the stability of the dangerous rock mass was carried out, and the hazard degree and development trend of the dangerous rock mass are evaluated. The results show that the unique karst landforms, karst features and complex structural planes of the dangerous rock mass developed in karst mountainous areas are the key factors controlling the stability, and rainfall and weathering are the main inducing factors. A preliminary prevention plan has been proposed to provide a reference for subsequent treatment measures.

Keywords: dangerous rock mass；stability analysis；motion trajectory characteristics；stereographic projection；rockfall

0 引言

由危岩体引起的崩塌为岩溶山区主要的地质灾害[1－2]，孕发过程具有渐进性，经历孕育、发展到破坏，最终失稳崩塌产生突变性伤害[3]。加上时间-空间的不确定性、运动速度极快等特点，危岩体一旦发生破坏失稳，会直接威胁到危岩体前方的居民、公路及建筑物等，给人类生命财产造成严重的威胁。对危岩体稳定性评价方法主要集中于四类：以赤平投影图解法[4－5]为主的定性方法；以极限平衡法[6－7]为主的定量方法；以有限元法[6－7]和离散元法[8－9]为主的数值模拟法以及灰色理论[10]和模糊数学等不确定性分析方法。例如，肖瞳[4]和冯亮[5]利用赤平投影法分别对三峡库区和中硐河的岸坡危岩体稳定性进行研究分析。周游等[11]基于刚体极限平衡法和一次二阶矩阵方法（FOSM），研究了危岩体稳定安全系数及失稳概率。谢全敏等[10]基于灰色系统理论提出了危岩块体稳定性的灰色聚类评价方法，并结合可靠性理论和时序分析方法，进而实现对危岩块体稳定性的综合评价。

贵州省域内碳酸盐岩分布广、岩溶特征明显，喀斯特区占全省总面积的 61.9%[12]。岩溶发育区，地形陡峭，基岩节理裂隙发育，山体边坡稳定性差。在暴雨等外界因素影响下，容易诱发以滑坡和崩塌为主的地质灾害[13－15]。铜仁松桃县因其特殊的自然地理环境和复杂的地质背景，导致地质灾害频发，分布广且影响范围大，亟需对该地区存在变形迹象的危岩体进行稳定性评价以及采取相应的防治措施。

针对喀斯特地区特殊的地形地貌和地质条件，本文以贵州省松桃县和平社区长冲组危岩体为例，结合现场调查、工程勘查结果以及历史资料，在详细分析危岩区的孕灾背景以及危岩体的规模、发育特征及变形破坏模式的基础上，利用赤平投影图解法、极限平衡理论和 Rockfall 数值模拟软件，判断不同工况下危岩体的稳定性并对其变形运动特征及发展趋势进行预测，并根据分析结果给出防治建议，作为后续工程治理以及监测提供决策基础，以期为岩溶地区同类工程及研究提供参考。

1 孕灾背景

松桃县地处云贵高原向湘西丘陵过渡的岩溶斜坡地带，为山体滑坡、崩塌和泥石流等次生灾害的高发区[16]。长冲危岩体为松桃县典型岩溶孕育灾害之一，首次变形于 2014 年 7 月 16 日，2016 年 8 月发生过一次小规模崩塌，崩塌体崩落至村民房屋附近。近年来，在降雨的影响下，变形逐步加剧。危岩体位于松桃县大路镇和平社区长冲组东侧斜坡上，距松桃县城 20 km。危岩区属低山侵蚀地貌，斜坡地形，地势东南高，西北低。危岩体发育于山体中上部陡崖处，山体坡度 15° ~ 80°，危岩体所处区域地形坡度 60° ~ 70°，以陡崖、陡坡为主，前缘堆积区斜坡坡度 30° ~ 50°，以灌木林为主，威胁区以建房、耕地为主。危岩体底部高程 531 m，斜坡坡脚村庄高程 465 m，高差 66 m，危岩体斜坡底部前缘为村民聚集区，危岩及崩塌区平面图见图 1，全貌图见图 2。

危岩区上覆主要为第四系残坡堆积物（Q^{dl+el}），出露地层为寒武系中上统娄山关组（$\in_{2-3}ls$）白云岩，岩层产状：125° ~ 144°∠55° ~ 68°。根据区域地质资料和工程钻探成果[17]：①上覆第四系黏土：土黄色、棕红色，土质较均匀，硬—可塑状态，稍湿—湿，稍有光泽，切面光滑，层理特征不明显。无摇震反应，强度中等，韧性中—强，含有少量角砾，呈棱角状，粒径 0.3 ~ 0.8 cm，含量 5% ~ 10%，见图 3（a）；②基岩寒武系白云岩：灰白色，隐晶质结构，中厚层块状构造。裂隙节理发育，裂隙面充填有硅质细脉，脉宽 1 ~ 2 mm，岩石坚硬，锤击声较脆，岩石力学性质较好，较难击碎，揭露厚度 7.2 ~ 11.2 m，见图 3（b）。

在区域构造上，地处扬子准地台与华南皱褶带交汇部位及构造变形区，危岩体位于上洞背斜轴部，受孟溪断层影响，区内岩体节理发育，岩体较为破碎。地质构

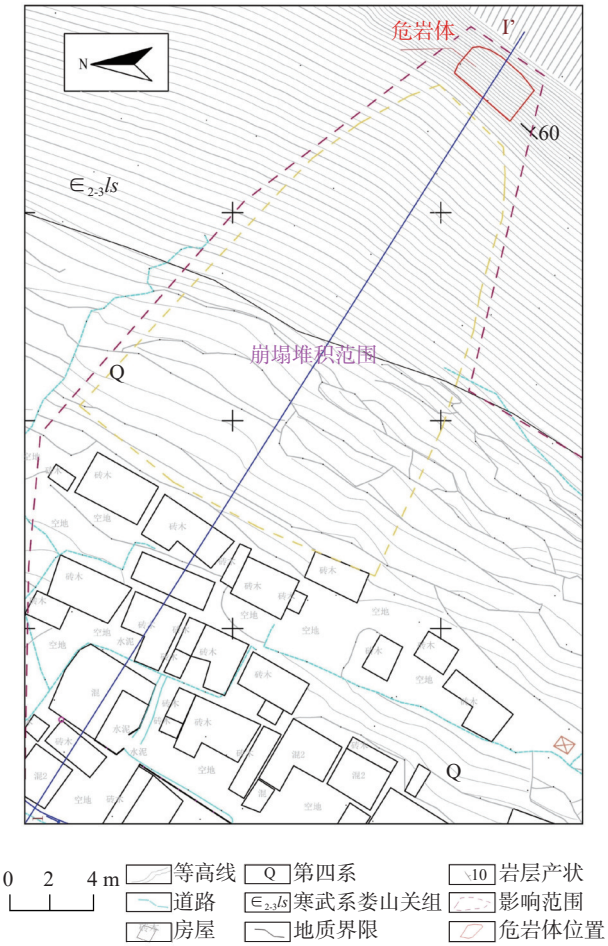

图 1　危岩崩塌区平面图

Fig. 1　Plan of the dangerous rock and the rockfall area

造运动降低了危岩体结构面强度以及岩体的稳定性，使之发生位移、错动，直至脱离母岩发生崩塌[18]。研究区地震活动较弱，地震动反应谱特征周期为 0.35 s，地震动峰值加速度为 0.05 g，地震基本烈度为Ⅵ度区，松桃县无地震史，1999 年印江县北部发生地震，松桃县西北部

图 2　危岩崩塌区全貌图

Fig. 2　Overall view of the dangerous rock and the rockfall area

微有震感，但未造成破坏。

区内地下水为松散岩类孔隙水和碳酸盐岩岩溶水。松散岩类孔隙水赋存于第四系松散层中，含水性弱，主要接受大气降水，部分沿地表径流，部分渗入地下沿基岩面径流。碳酸盐岩岩溶水主要赋存于基岩白云岩的溶蚀裂隙和溶洞中，接受大气降水、上伏地层地下水及相邻含水层侧向补给，在溶蚀裂隙和管道中径流，部分地区形成地下暗河，最终排泄于斜坡南面大路河中，且富水性较强。

2　危岩体基本特征

2.1　分布规模及结构面特征

危岩体位于长冲组后山斜坡上部，分布高程为 530.3 ~ 550.6 m，地形上表现为高陡崖，坡度 60° ~ 80°，局部达 85°，危岩体顶宽 16.5 m，底宽 19.5 m，均高 14.55 m，

（a）第四系黏土　　（b）寒武系娄山关组白云岩

图 3　钻孔勘查现场图

Fig. 3　Site drilling survey map

均厚 11.30 m, 总体积约 1.058×10^3 m^3, 崩塌方向 302°。危岩体由结构面切割而成, 其形态受结构面控制, 发育有 8 组较明显裂隙, 各结构面特征见表 1。不同比例尺下的工程地质剖面见图 4。

表 1　危岩体的结构面特征

Table 1　Structural surface characteristics of dangerous rock mass

编号	位置	倾向/(°)	倾角/(°)	切割深度/m	张开度/cm	充填物	裂面形态	裂面粗糙度	裂隙间距/m
L1	正面	254	15	2 ~ 4	2 ~ 10	岩屑、腐殖土	平直	较光滑	1 ~ 3
L2	正面	250	14	2 ~ 5	2 ~ 10	岩屑、腐殖土	平直	较光滑	1 ~ 3
L3	正面	315	20	3 ~ 6	1 ~ 8	岩屑、腐殖土	平直	较粗糙	2 ~ 5
L4	正面	24	81	5 ~ 9	4 ~ 20	岩屑	弯曲	粗糙	1 ~ 2
L5	后缘	112	57	3 ~ 7	20 ~ 30	岩屑、腐殖土	平直	粗糙	1 ~ 4
L6	后缘上部	300	42	2 ~ 5	10 ~ 30	岩屑、腐殖土	平直	较粗糙	2 ~ 4
L7	后缘	295	38	2 ~ 4	5 ~ 20	岩屑、腐殖土	弯曲	较粗糙	1 ~ 4
L8	控滑面	321	50	7 ~ 9	5 ~ 30	泥、岩屑、腐殖土	平直	较光滑	—

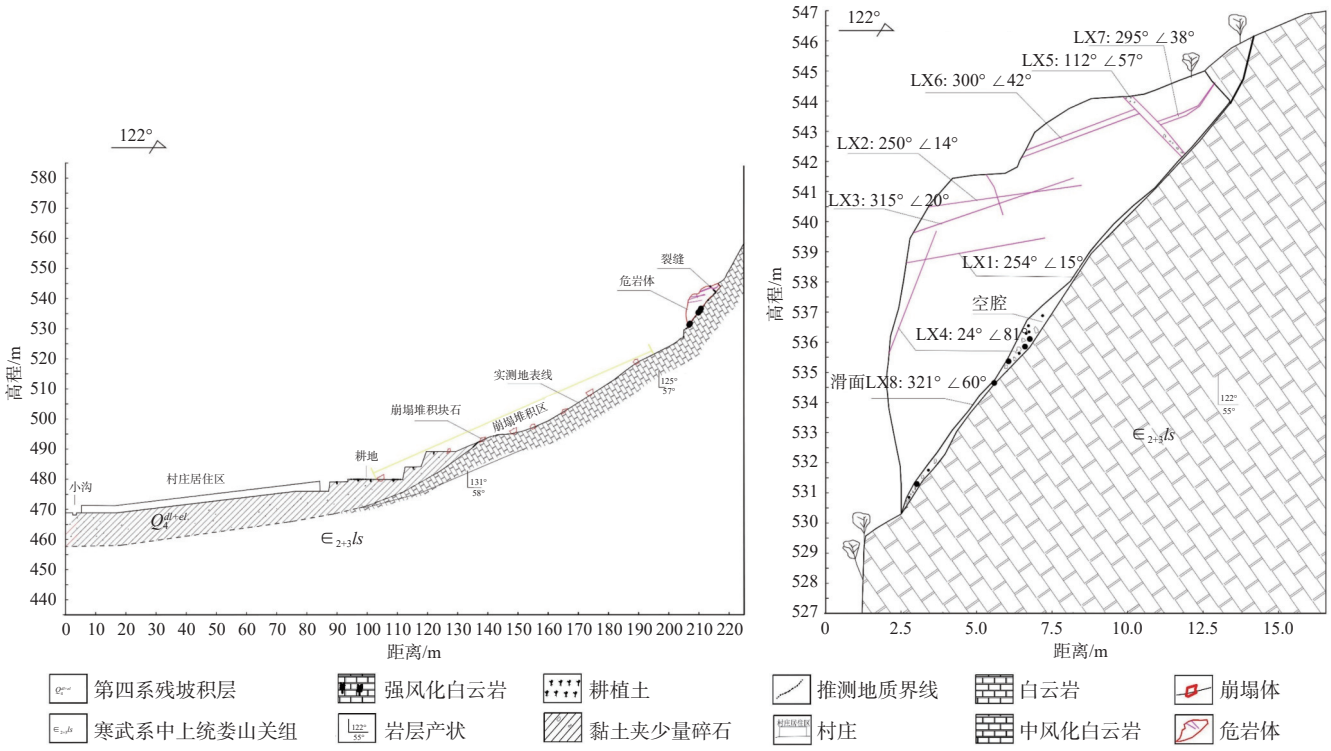

图 4　工程地质剖面图

Fig. 4　Engineering geological section

2.2　控制因素和诱发因素分析

岩溶危岩崩塌的形成及发展由多种因素共同影响, 根据内因和外因将影响因素分为控制因素和诱发因素[19]。长冲组危岩体受独特的喀斯特地貌、地层岩性和构造活动等地质因素的控制, 是其发育的内因。主要受降雨气候条件、风化及植被发育等诱发因素作用, 是产生崩塌的外因。

2.2.1　控制因素

据相关研究统计, 75% 的危岩体发育于地形坡度大于 45°的陡坡上[20]。长冲危岩体所处的斜坡地形坡度较大, 岩层产状与坡向相反, 外侧临空面坡度 60° ~ 90°, 局部 40° ~ 50°。陡峭的地形地貌满足了危岩体产生的依托条件, 为斜坡的变形提供临空的条件, 也为破碎的岩体和崩塌体的运动提供了空间条件。

危岩以岩溶岩中的中厚层白云岩为基岩, 并局部夹泥质白云岩。泥质白云岩的存在对于整个危岩体的强度、抗风化能力、抗侵蚀能力有较大影响, 大大降低了岩体的完整性。另结构面作为危岩体失稳的边界条件,

对岩体的稳定性具有控制性作用[21－22]。危岩体西侧、南侧岩体裸露，岩体受层面和多组节理裂隙控制，节理裂隙相互切割，后缘 L5 和底部控制裂隙 L8 已完全贯通，使得岩体进一步破碎，为零星崩塌甚至整体性滑动崩塌提供了可能。

2.2.2　诱发因素

强降雨是触发长冲危岩体失稳致灾的主要因素之一。松桃县境内多年平均降雨量 1 383 mm，最高达 2 295 mm，雨旱季分明，50% ~ 70% 集中于 4—8 月，且多以暴雨的形式呈现。一方面基岩白云岩其独特的刀砍纹，在降雨的作用下，使危岩体的自重大大增加，随着雨水的渗入，其应力分布及强度发生改变，导致危岩体稳定性降低[23]。另一方面溶蚀裂隙及其充填物在水的浸泡下，发生溶蚀和侵蚀，抗剪强度大大降低，减小了岩体间的侧向摩擦力，同时雨水不断的注入已形成的裂缝中产生水压力，使结构面变形，当裂隙到达临界值时，岩体平衡条件被破坏，即发生崩塌。

岩体悬臂临空，经过长期风化作用，岩体中的结构面不断张开，由闭合、微张、张开至宽张发展，伴随节理裂隙的卸荷加深，母岩外侧的岩体逐渐被切割成独立块体，岩体完整及稳定性随之降低，从而形成危岩体。岩体裂隙中通常充填有碎石及土壤，形成地表水渗透的通道，为植物生长提供了一个良好的环境，后部的岩体裂隙中就多有植物生长。植物在岩体裂隙中生长，植物根系及枝干的生长膨胀将使得岩体裂隙加速扩张，从而降低岩体稳定性[24]。降雨、风化和植被发育等共同作用，构成诱发危岩体变形失稳的外界因素。

2.3　变形破坏模式

长冲组危岩体形成及稳定性主要受底部剪切裂隙和上部张拉裂隙控制，底部存在与边坡坡向和地层产状一致且完全贯通的破裂面 L8，且地段岩层产状呈陡外倾，破裂面的剪出部位为近直立陡崖。上部有一组横向贯通裂隙 L5，与底部裂隙共同将危岩体与坡体基岩完全割裂开。目前两处裂隙均已完全贯通，有土石及树叶等混合物充填，底部裂缝与斜坡坡面基本平行，倾角陡立，同时坡面形成多种不同方位的裂隙，构成危岩底部层面裂隙与卸荷裂隙组合，整体构成一个近长方体块状危岩单体。

根据调查测绘及危岩体结构面的统计分析，判断危岩体变形破坏模式为滑移式，失稳模式以危岩掉块、危岩沿底部整体向下滑动为主，形成的主要原因为岩体受结构面切割方式引起。若在降雨等不利条件下，底部抗滑力小于下滑力后，危岩体将脱离母岩后沿着破裂面(L8)滑移失稳，分解为较大块体的方式运动至坡脚。

3　危岩体稳定性分析

3.1　赤平投影定性分析

赤平投影可以较为直观的反映岩体各控制结构面的空间组合关系、组合切割体与坡面的相对关系，对不同结构面组合块体稳定性做出定性评价，初步确定危岩体的稳定性[25－26]。

以岩层层面和 8 组裂隙结构面为控制条件，将其综合反映于赤平投影图上，其中 BP 为边坡(图 5)。根据赤平投影结果，各组合交线倾向与坡向基本一致，L4∧L8 组合交梭线倾角大于坡面倾角，表明该组合结构面切割的块体稳定性良好，判定为稳定岩块；BP∧L4 组合交梭线倾角等于坡面倾角，故稳定性较好；BP∧L8、L4∧L6 和 L4∧L7三组交线倾角小于坡角，但夹角较小(小于 15°)，为欠稳定块体；其余多组交线明显小于坡面倾角，表明其切割的块体稳定性较差，在降雨等诱发因素的影响下容易发生滑移破坏，判定为不稳定块体，见表 2，初步判定长冲危岩体为欠稳定-不稳定状态。

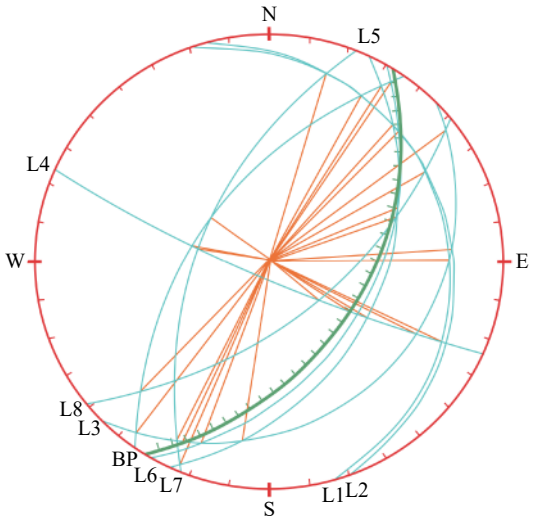

图 5　坡面及结构面的赤平投影结果

Fig. 5　Stereographic projection result of slope surface and structural plane

3.2　定量分析

3.2.1　计算模型及计算公式

前述分析可知，长冲危岩体破坏模式为滑移式。进行稳定性定量计算时作如下基本假设：①危岩体崩塌破坏前，视为一个整体；②将危岩体崩塌后的复杂空间运动过程简化于平面，考虑单一宽度危岩体带入计算；③忽略危岩体与其两侧接触面的摩擦作用。

表 2 结构面组合与坡面关系稳定性定性评价结果

Table 2 The stability qualitative evaluation results of the relationship between structural plane combination and the slope surface

组合交梭线	交线产状	坡面产状	交线与坡面倾角的关系	稳定性判别
BP∧L4	303°∠45°		倾角=坡角	较稳定
BP∧L8	253°∠34°		倾角<坡角	欠稳定
L1∧L3	270°∠14°		倾角<坡角	不稳定
L1∧L8	240°∠15°		倾角<坡角	不稳定
L2∧L4	296°∠10°		倾角<坡角	不稳定
L3∧L4	297°∠19°	302°∠45°	倾角<坡角	不稳定
L4∧L6	302°∠42°		倾角<坡角	欠稳定
L4∧L7	301°∠38°		倾角<坡角	欠稳定
L4∧L8	310°∠50°		倾角>坡角	稳定
L6∧L7	239°∠24°		倾角<坡角	不稳定
L7∧L8	249°∠29°		倾角<坡角	不稳定

根据刚体极限平衡理论，按照图 6 计算模型，确定滑移式危岩稳定性计算公式如下：

$$F=\frac{(W\cos\theta-V)W\tan\varphi+cl}{W\sin\theta} \tag{1}$$

式中：F——危岩体稳定系数；

W——危岩体自重/(kN·m^{-1})；

θ——滑面倾角/(°)；

V——结构面承受的总裂隙水压力/(kN·m^{-1})，$V=\frac{1}{2}r_w h_w^2$，r_w是水的重度，取 10 kN/m^3，h_w是后缘裂隙充水高度/m；

φ——后缘裂隙内摩擦角标准值/(°)；

c——后缘裂隙黏聚力标准值/kPa；

l——滑面长度/m。

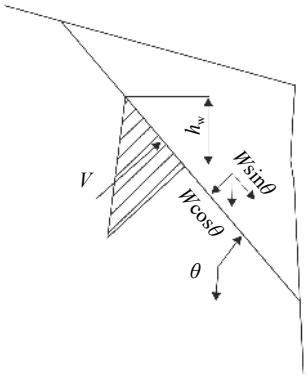

图 6 滑移式危岩体稳定性计算模型

Fig. 6 Stability calculation model of slipping dangerous rock mass

3.2.2 稳定性评判标准

考虑长冲危岩体位于农村山区，人类工程活动较弱，主要影响因素为自然因素。参考《地质灾害防治工程勘察规范》(DB50/143—2003)，确定该危岩体稳定性判别标准见表 3。

表 3 危岩体稳定状态划分表

Table 3 Classification table of stability state of dangerous rock mass

危岩类型	危岩稳定状态			
	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
滑移式危岩	$k<1.0$	$1.0\leqslant k<1.2$	$1.2\leqslant k<1.3$	$k\geqslant 1.3$

3.2.3 计算工况及参数确定

(1)荷载及计算工况

危岩体上的荷载包括危岩体自重(天然状态)、裂隙水压力(暴雨状态)和地震作用。根据前文，松桃县地震基本烈度Ⅵ度，属震率不频繁活动区，区域稳定性较好，故对危岩体稳定性计算不考虑地震作用。因此，对长冲危岩体的稳定性定量计算采用以下三种工况：

工况 1：自重(天然状态)(不考虑滑移面及后缘裂隙充水)；

工况 2：自重+暴雨状态(考虑水对滑移面抗剪强度的降低作用，考虑滑移面充水扬压力，裂隙充水高度不大于裂隙总高度 1/3)；

工况 3：自重+50 年一遇暴雨(考虑水对滑移面抗剪强度的降低作用，考虑滑移面充水扬压力，裂隙充水高度不大于裂隙总高度 2/3)。

其中，裂隙充水高度依据《崩塌防治工程勘查规范》(TCAGHP011-2018)、经验公式以及结合现场裂缝调查情况综合确定。

(2)计算参数选取

岩体物理力学参数的选取准确与否，将直接影响危岩稳定性计算结果的可靠性。根据取样试验、参数反演和类似工程经验，以确定模型计算参数。对现场采取 9 份土样进行常规物理试验、饱水状态下的峰值剪强度等试验，其力学性能试验数据见表 4。以室内试验结果为主，并参考类似工程综合取值确定结构面黏土天然 c 值为 37.2 kPa，天然 φ 值为 7.5°，饱和 c 值为 25.0 kPa，结构面饱和 φ 值为 5.5°；中风化白云岩天然 c 值为 1.50 MPa，天然 φ 值为 34.2°，饱和 c 值为 1.35 MPa，饱和 φ 值为 32.3°(表 5)。

3.2.4 稳定性评价结果

据表 6 稳定性计算结果，工况 1、工况 2 情况下危岩体处于欠稳定状态，工况 3 情况下处于不稳定状态。结合赤平投影定性评价结果，综合评价危岩体的稳定性较差。根据调查可知危岩体在天然和暴雨状态欠稳定，

表 4　危岩体力学性能试验数据统计表

Table 4　Statistical table of mechanical performance testing data of dangerous rock mass

土样编号		密度/(g·cm^{-3})		黏聚力/kPa		摩擦角/(°)	
		天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
TY-1		1.71	1.78	36.9	24.4	7.9	6.1
TY-2		1.70	1.77	37.7	25.6	7.3	4.5
TY-3		1.69	1.75	37.5	25.5	8.1	5.7
TY-4		1.69	1.77	36.2	23.9	7.7	5.8
TY-5		1.72	1.78	36.8	24.3	8.0	6.2
TY-6		1.70	1.76	36.0	23.6	5.9	5.2
TY-7		1.71	1.80	37.0	24.5	6.4	4.5
TY-8		1.73	1.81	38.9	26.4	8.7	5.8
TY-9		1.70	1.76	37.8	26.3	7.0	5.6
参数统计	最大值	1.69	1.75	36.00	23.60	5.90	4.50
	最小值	1.73	1.81	38.90	26.40	8.70	6.20
	平均值	1.70	1.76	37.20	24.94	7.44	5.49
	标准值	1.69	1.75	36.64	24.30	6.89	5.10

表 5　危岩体力学性质指标

Table 5　Mechanical property indexes of dangerous rock mass

岩土类型	重度/(kN·m^{-3})		黏聚力/kPa		摩擦角/(°)	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
黏土	17.0	17.6	37.2	25.0	7.5	5.5
中风化基岩(白云岩)	26.7	27.0	1 500.0	1 350.0	34.2	32.3

偶有局部崩塌，于持续暴雨时会有大型块体失稳破坏，危岩体稳定性计算结果基本与危岩体实际变形破坏特征相符。

4　危害性预测分析

4.1　落石运动轨迹预测

落石运动距离作为危岩崩塌危害性预测中的一个重要参考指标，反映致灾范围[27]。目前，常用的落石轨迹预测方法主要有数值模拟法、理论计算法以及经验分析法等[28－29]。Rockfall 数值模拟基于概率统计理论，通过随机重复的试验，以更准确地获取模拟落石的运动过程[30－32]。该方法考虑了坡面材料等随机因素对滚石运动的影响，通过设定法向恢复系数、切向恢复系数等参数，模拟出滚石的运动轨迹以及在运动全程中的冲击能量、速度和弹跳高度分布结果。

表 6　危岩体稳定性计算结果表

Table 6　Stability calculation resultsof of dangerous rock mass

失稳方式	计算工况	稳定系数	设防安全系数	稳定性评价
滑移	工况1	1.13	1.5	欠稳定
滑移	工况2	1.01	1.5	欠稳定
滑移	工况3	0.99	1.5	不稳定

通过对研究区工程地质的调查研究以及危岩分布特征和稳定性分析，本次计算研究区域内的坡面覆盖层主要为白云岩及含粉质黏土的残坡积层或少量含块石土的崩坡积层，危岩体岩性为白云岩，重度取饱和重度 27.0 kN·m^{-3}，结合危岩内坡面覆盖层的物质组分、植被、坡度等因素确定对应的碰撞恢复系数值见表 7。采用 Rocscience Rockfall 软件模拟计算危岩的主控面 L8 在失稳后滚落的运动轨迹及弹跳高度如图 7、图 8 所示。危岩体发生崩塌滑落后，理论计算崩塌体的最大落距约为 160 m，最大弹跳高度约 6.5 m。距危岩体 150 m 处即为长冲组村庄居民集聚地，最近距离 130 m，崩塌体将对其村庄造成直接威胁。

表 7　恢复系数取值表

Table 7　Recovery coefficient value

坡面材料	法向恢复系数	切向恢复系数
白云岩	0.42	0.82
含粉质黏土残积层	0.25	0.85
含块石土崩积层	0.3	0.8

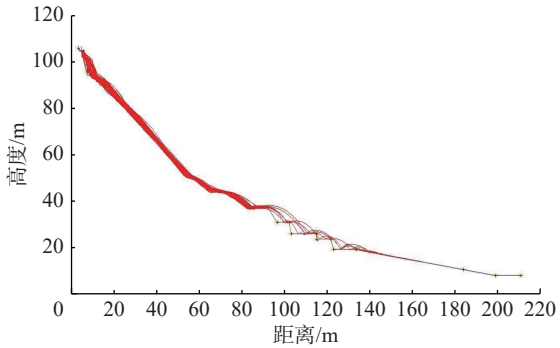

图 7　落石轨迹计算(L8)

Fig. 7　Calculating of rockfall trajectory

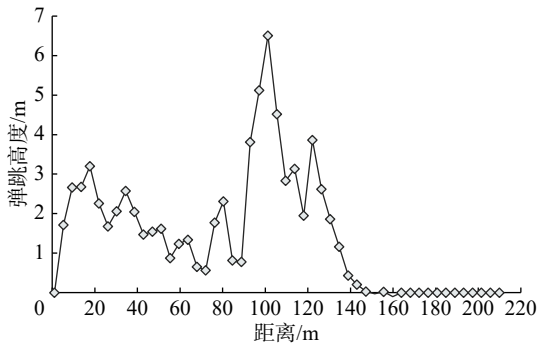

图 8　落石弹跳高度与距离关系(L8)

Fig. 8　The relationship between the jumping height and distance of rockfall trajectory

4.2　危害性分析

稳定性结果揭示，长冲危岩体处于欠稳定—不稳定

状态，加之危岩自身完整性差，节理裂隙发育，易崩解塌落，且坡面滚石稳定性较差，故在暴雨等外因影响下，产生崩塌、滚落的可能性较大。

房屋均位于危岩体下方坡脚前方，距离危岩体有一定距离，危岩崩塌后将主要以大块石状态向下滚落，以坠落—弹跳—滚落的运动轨迹运动，落石在崩落后由坡面弹跳—滚动后撞击房屋，直至动能消失而停止，对威胁区的人民生命财产造成严重危害。据走访调查，危岩体主要危害对象为山脚 25 户 102 人，房屋面积共计 3 200 m^2，另有供电线路、道路、水池、供水管道等设施，房屋按照 3 000 元每平方米进行估算，其它设施按照 500 万预估，潜在威胁资产约 1 460 万元。近年的崩落的岩块体积 1 ~ 6 m^3，落石冲击力 500 ~ 1 000 kN，所幸受到植被和部分梯田的阻挡，无人员及财产损失。

4.3 防治建议

危岩体整体在自然和暴雨工况下均处于欠稳定状态，为防止其进一步变形而威胁前部居民区，需及时危岩体采取工程治理措施。建议防治方案一为采用“危岩清除+被动防护”彻底治理措施，该方案对危岩体整体进行清除，达到防灾减灾目的，但工程费用较高；方案二可采用“局部清除+主动防护网+监测防治”，该方案经济效益高，对自然和地质环境扰动小，缺点是不能完全消除危岩体带来的隐患，且后期监测也需投入；方案三采用“局部清除+截排水沟+缝隙填浆+防护网”进行整体防护，既能消除不良危岩体的威胁，又能减小后续威胁，增加危岩体的稳定性。综合考虑地质灾害治理效果和经济效应，推荐推荐方案三的工程治理方案。

5 结论

贵州松桃长冲危岩体发育特征典型，且历史资料、现场工程地质勘查数据完备准确，是作为岩溶区危岩崩塌稳定性及危险性分析及研究的很好实例。针对该危岩体，主要认识如下：

(1)以白云岩为基岩，岩溶岩体和多组节理裂隙控制危岩体发育。降雨、风化和植被发育等共同作用，构成诱发危岩体变形失稳的外界因素。

(2)判定其变形破坏模式属滑移式，失稳模式以危岩掉块、危岩沿底部整体向下滑动为主。危岩体形成的主要原因为岩体受结构面切割方式引起。

(3)在自然和暴雨工况下均处于欠稳定状态，与危岩体实际变形破坏特征相符。综合赤平投影定性评价和定量计算结果，认为该危岩体稳定性较差。

(4)危岩体发生破坏后，以坠落—弹跳—滚落的运动轨迹运动，将直接危及坡下长冲组村庄，建议采取“局部清除+截排水沟+缝隙填浆+防护网”的工程防治方案。

参考文献(References)：

[1] 陈洪凯，唐红梅，王林峰. 危岩崩塌演化理论及应用[M]. 北京：科学出版社，2009. [CHEN Hongkai, TANG Hongmei, WANG Linfeng. Evolution theory and application of dangerous rock collapse [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]

[2] 陈国宝. 易崩落危岩的调查与防治[J]. 煤田地质与勘探，1999, 27(3)：17－18. [CHEN Guobao. Investigation and controlling measures for the rock dangerous to cave [J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(3): 17－18. (in Chinese with English abstract)]

[3] 庞伟军，杨昊天，李元彪. 青海合群峡202省道边坡危岩发育特性研究[J]. 工程勘察，2015, 43(12)：7－12. [PANG Weijun, YANG Haotian, LI Yuanbiao. Study on development characteristics of dangerous rocks along slopes of the 202 provincial road in Hequn gorge of Qinghai [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(12): 7－12. (in Chinese with English abstract)]

[4] 肖瞳. 重庆市万州区三峡库区某危岩稳定性分析[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2019. [XIAO Tong. Stability analysis of a dangerous rock in Three Gorges dam area, Wanzhou District, Chongqing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. (in Chinese with English abstract)]

[5] 冯亮. 中硐河两岸边坡危岩体发育特征及稳定性评价[D]. 成都：西南交通大学，2016. [FENG Liang. Mechanism of destuction and stability evaluation of unstable rock mass at Zhongdong River's both sides [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]

[6] 周小飞，曹红娟. 湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报，2020, 31(5)：48－53. [ZHOU Xiaofei, CAO Hongjuan. Development characteristics and stability analysison the Loutuan landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 48－53. (in Chinese with English abstract)]

[7] 孙自强，焦姗. 岩质边坡崩塌地质特征及稳定性分析[J]. 煤炭技术，2019, 38(5)：84－87. [SUN Ziqiang, JIAO Shan. Stability analysis and prevention of rock slope collapse [J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 84－87. (in Chinese with English abstract)]

[8] SHI Chong, YANG Bo, ZHANG Yiping, et al. Application of discrete-element numerical simulation for calculating the stability of dangerous rock mass: A case study [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(12): 1－11.

[9] 孙琪皓，马凤山，刘港，等. G109国道拉萨—羊八井段喀努纳危岩体变形破坏模式及稳定性分析［J］. 工程地质学报，2021，29(2)：495－507.［SUN Qihao, MA Fengshan, LIU Gang, et al. Deformation failure mode and stability analysis of kanuna unstable rock mass in Lhasa-yangbajing section of G109 national highway［J］. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 495－507.（in Chinese with English abstract）］

[10] 谢全敏，夏元友. 危岩块体稳定性的综合评价方法分析［J］. 岩土力学，2002，23(6)：775－777.［XIE Quanmin, XIA Yuanyou. Comprehensive assessment method of stability of critical rock-block mass and its application［J］. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 775－777.（in Chinese with English abstract）］

[11] 周游，黄静美，谢红强. 西南地区某高速公路边坡危岩体稳定可靠性评价［J］. 地下空间与工程学报，2020，16(增刊2)：1022－1029.［ZHOU You, HUANG Jingmei, XIE Hongqiang. Reliability evaluation for slopes in highway of southwest China［J］. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(Sup 2): 1022－1029.（in Chinese with English abstract）］

[12] 王金艳，王雅敬，杨滢智，等. 贵州喀斯特地区地质灾害防治对策研究：以铜仁市为例［J］. 铜仁学院学报，2017，19(3)：87－89.［WANG Jinyan, WANG Yajing, YANG Yingzhi, et al. Study on the prevention countermeasures of geological hazards in Guizhou karst areas: Taking Tongren City as an example［J］. Journal of Tongren University, 2017, 19(3): 87－89.（in Chinese with English abstract）］

[13] 宋同清，彭晚霞，杜虎，等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策［J］. 生态学报，2014，34(18)：5328－5341.［SONG Tongqing, PENG Wanxia, DU Hu, et al. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in southwest China［J］. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5328－5341.（in Chinese with English abstract）］

[14] 郭振春. 贵州地质灾害的主要类型和诱因及其预防建议［J］. 贵州地质，2003，20(2)：103－105.［GUO Zhenchun. Major types of geological hazards and predisposition in Guizhou and its preventive suggestion［J］. Guizhou Geology, 2003, 20(2): 103－105.（in Chinese with English abstract）］

[15] 高杨，贺凯，李壮，等. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析［J］. 水文地质工程地质，2020，47(4)：14－23.［GAO Yang, HE Kai, LI Zhuang, et al. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 14－23.（in Chinese with English abstract）］

[16] 冉文明，龙昭腾. 松桃县地质灾害特征、成因及防治［J］. 魅力中国，2020(9)：362.［RAN Wenming, LONG Zhaoteng. Characteristics, causes and prevention of geological disasters in Songtao County［J］. Charming China, 2020(9): 362.（in Chinese with English abstract）］

[17] 冉文明，王万迁，穆启超，等. 松桃县大路镇和平社区长冲组滑坡及崩塌防治工程勘查报告［R］. 贵州：贵州省地质矿产勘查开发局一O一地质大队，河南：河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院，2019.［RAN Wenming, WANG Wanqian, MU Qichao, et al. Investigation report on landslide and collapse prevention project of Changchong formation in Heping Community, Dalu Town, Songtao County［R］. Guizhou: Guizhou Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources of 101 Geological Brigade, Henan: No. 1 Institute of Geological & Mineral Resources Survey of Henan, 2019.(in Chinese)］

[18] 范可，冯佐海，王翔，等. 桂林市岩质崩塌发育特征与影响因素［J］. 自然灾害学报，2019，28(2)：169－182.［FAN Ke, FENG Zuohai, WANG Xiang, et al. Development of rockfalls in Guilin and its influencement factors［J］. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(2): 169－182.（in Chinese with English abstract）］

[19] 田正国，程温鸣，卢书强，等. 三峡库区滑坡崩塌发育的控制与诱发因素分析［J］. 资源环境与工程，2013，27(1)：50－55.［TIAN Zhengguo, CHENG Wenming, LU Shuqiang, et al. Control and triggering factors analysis of landslides and rockfalls in the Three Gorges Reservoir area［J］. Resources Environment & Engineering, 2013, 27(1): 50－55.（in Chinese with English abstract）］

[20] 胡厚田. 崩塌与落石［M］. 北京：中国铁道出版社，1989.［HU Houtian. Collapse and rockfall［M］. Beijing: China Railway Publishing House, 1989.（in Chinese）］

[21] 赵宪民. 三河口拱坝建基岩体特征及坝肩稳定研究［D］. 西安：长安大学，2013.［ZHAO Xianmin. Study on caracteristics of foudation rock and abutment stability of sanhekou arch dam［D］. Xi'an: Changan University, 2013.（in Chinese with English abstract）］

[22] 黄波林，殷跃平，李滨，等. 三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应［J］. 水文地质工程地质，2020，47(4)：51－61.［HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, et al. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of Karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir area［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 51－61.（in Chinese with English abstract）］

[23] 杨秀元，孙强，晏鄂川，等. 基于实测的望霞W1危岩体失稳动态过程分析［J］. 水文地质工程地质，2014，41(1)：96－100.［YANG Xiuyuan, SUN Qiang, YAN Echuan, et al. A study of the failure process of the Wangxia dangerous rockmass W1 based on site-monitoring［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 96－100.（in Chinese with English abstract）］

[24] 王朋，贾洪彪，马淑芝，等. 梳妆台危岩体稳定性评价及落石运动特征研究［J］. 安全与环境工程，2022，29(4)：139－146. ［WANG Peng, JIA Hongbiao, MA Shuzhi, et al. Stability evaluation and rockfall movement characteristics of unstable rock block in Shuzhuangtai［J］. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(4): 139－146. (in Chinese with English abstract)］

[25] 龚芯磊. 岩质边坡稳定性分析研究：以贵州铜仁地区某库区边坡为例［D］. 西安：长安大学，2018. ［GONG Xinlei. The research of rock slope stability analysis: Take the slope of a reservoir in Tongren area of Guizhou Province as an example［D］. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese with English abstract)］

[26] 胡显明，晏鄂川，杨建国，等. 巫溪南门湾危岩体稳定性分区研究［J］. 工程地质学报，2011，19(3)：397－403. ［HU Xianming, YAN Echuan, YANG Jianguo, et al. Stability assessment of unstable rock blocks at Nanmenwan in Wuxi County［J］. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(3): 397－403. (in Chinese with English abstract)］

[27] 黄海宁，巨能攀，黄健，等. 郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征［J］. 水文地质工程地质，2020，47(3)：164－172. ［HUANG Haining, JU Nengpan, HUANG Jian, et al. Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou—Wanzhou high-speed railway［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 164－172. (in Chinese with English abstract)］

[28] 韩振华，陈鑫，王学良，等. 四川罗家青杠岭崩塌风险的定量评价研究［J］. 工程地质学报，2017，25(2)：520－530. ［HAN Zhenhua, CHEN Xin, WANG Xueliang, et al. Risk assessment for Luojia Qinggangling rockfall［J］. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 520－530. (in Chinese with English abstract)］

[29] 吴朋宇，张志红，戴福初，等. 顺层岩质边坡溃屈变形机制及失稳判定方法［J］. 吉林大学学报(地球科学版)，2022，52(2)：517－525. ［WU Pengyu, ZHANG Zhihong, DAI Fuchu, et al. Buckling deformation mechanism and instability judgment method of bedding rock slope［J］. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 517－525. (in Chinese with English abstract)］

[30] 何宇航，裴向军，梁靖，等. 基于Rockfall的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例［J］. 中国地质灾害与防治学报，2020，31(4)：24－33. ［HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on Rockfall: A case study of the Xuangou collapse［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 24－33. (in Chinese with English abstract)］

[31] 王栋，王剑锋，李天斌，等. 西南山区某铁路隧道口高位落石三维运动特征分析［J］. 地质力学学报，2021，27(1)：96－104. ［WANG Dong, WANG Jianfeng, LI Tianbin, et al. Analysis of three-dimensional movement characteristics of rockfall: A case study at a railway tunnel entrance in the southwestern mountainous area, China［J］. Journal of Geomechanics, 2021, 27(1): 96－104. (in Chinese with English abstract)］

[32] 张永海，谢武平，罗忠行，等. 四川名山白马沟危岩体稳定性评价与落石轨迹分析［J］. 中国地质灾害与防治学报，2022，33(4)：37－46. ［ZHANG Yonghai, XIE Wuping, LUO Zhongxing, et al. Stability evaluation and rockfall trajectory analysis of the Baimagou dangerous rock mass in Mingshan County of Sichuan Province［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 37－46. (in Chinese with English abstract)］