

文章编号: 1008-2786-(2016)3-317-06

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000134

# 条形孤立单薄山体演化机制

李满意<sup>1,2</sup>, 司洪涛<sup>1</sup>, 魏燕珍<sup>1</sup>, 廖云平<sup>1</sup>

(1. 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室/重庆地质矿产研究院, 重庆 400042;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室/成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 条形孤立山体、单薄山脊地质环境较为脆弱, 极易形成高陡临空的陡崖带, 进而形成危岩单体。现行的规范、专著中对危岩体的勘查及评价方法较多, 但对条形孤立单薄山体及陡崖带的勘查及稳定性评价方法较少。以重庆市万盛经济开发区刀子岩为地质原型, 对其赋存的地质环境条件、坡体结构特征、溶蚀发育特征及陡崖带下方堆积状况进行分析的基础上, 采用以今推古的地质分析方法, 得出该类山体的历史演化机制、岩体变形的地质力学模式, 再现了该类山体在历史时期内的地质活动过程; 最后提出刀子岩陡崖带勘查建议。对刀子岩陡崖带下方规划区的安全具有重要的工程指导意义, 同时为同类山体的分析及评价提供一定的参考。

**关键词:** 条形孤立单薄山体; 陡崖带; 演化机制分析; 地质力学模式; 溶蚀; 危岩体; 勘查建议

中图分类号: P642

文献标志码: A

条形孤立山体、单薄山脊地质环境较为脆弱, 该类山体极易形成高陡临空的陡崖带, 进而形成危岩单体<sup>[1-3]</sup>。现行的规范、专著中对危岩体的勘查及评价方法较多, 取得了丰富的研究成果<sup>[4-10]</sup>, 但对条形孤立单薄山体的勘查及稳定性评价方法较少。笔者根据生产项目中遇到的实际问题, 以重庆市万盛区刀子岩为地质原型, 在对其赋存的地质环境条件、坡体结构特征、溶蚀发育特征、裂隙展布特征以及陡崖带下方堆积状况进行分析的基础上, 依据“地质过程机制分析—定量评价”、“以今推古、以古论今”等地质思想<sup>[1-2]</sup>, 揭示该类山体的历史演化机制、岩体失稳的力学机理及稳定性控制因素, 最后提出诸如该类山体(陡崖带)的勘查建议。对刀子岩下方是否进行规划的决策具有重要的工程指导意义, 同时也为同类山体的分析及评价提供一定的参考。

## 1 地质环境条件

刀子岩山体所在的区域属中~低山喀斯特地

貌, 呈南北走向条形展布(图1、图2)。根据地质调查, 并结合区域地质资料分析, 刀子岩山体主要出露的地层为二叠系下统茅口组( $P_{1m}$ ), 中—厚层状灰岩、薄—中厚层状泥质灰岩互层出露, 隐晶质结构, 局部含少量泥质及方解石脉。该山体在区域上位于半边山背斜南端之西翼, 岩层呈单斜产出, 产状变化不大, 为 $280^{\circ}\angle 79^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。

经地质原型调查并结合区域地质资料分析, 刀子岩山体发育有构造裂隙、卸荷裂隙、溶蚀裂隙等三类裂隙, 各类裂隙发育特征如下: ①构造裂隙主要发育有三组: L1组, 产状 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}\angle 68^{\circ}\sim 82^{\circ}$ , 延伸长度3~8 m, 发育间距3~5 m, 开度3~10 mm, 无充填或少量岩屑充填, 节理面较平直; L2组, 产状 $350^{\circ}\sim 360^{\circ}\angle 18^{\circ}\sim 32^{\circ}$ , 延伸长度2~25 m, 发育间距1.5~5.0 m, 多数闭合, 局部张开3~50 mm, 少量岩屑充填, 节理面较平直; L3组, 产状 $160^{\circ}\sim 175^{\circ}\angle 5^{\circ}\sim 12^{\circ}$ , 延伸长度1~3 m, 发育间距1.5~3.0 m, 闭合—微张, 节理面较平直。②卸荷裂隙: 陡崖应力释放回弹形成, 沿陡崖带边缘断续延伸, 形成卸荷带宽

收稿日期(Received date): 2014-03-05; 修回日期(Accepted): 2015-04-02。

作者简介(Biography): 李满意(1986-), 男, 安徽砀山人, 工程师, 工学硕士, 主要从事岩土体稳定性评价及地质灾害防治等方面的研究。[Li Manyi(1986-), male, born in Dangshan of Anhui Province, Engineer, Master of Engineering, mainly engaged in the research of geotechnical stability assessment and geological disaster prevention.] Tel: 15213197163, E-mail: 562365608@qq.com

3~5 m,延伸长度一般3~15 m,可见深度一般0.5~6.0 m,张开度为10~200 mm;其延伸方向与陡崖带一致,倾角近于直立。③溶蚀裂隙:沿原构造裂隙、卸荷裂隙的缝隙溶蚀作用进一步加宽、加深所形成,空间特征随时间呈动态变化,其发育方向无规律,一般同构造裂隙、卸荷裂隙的方向一致。

刀子岩山体所在的区域属碳酸盐岩类分布区,受中亚热带湿润季风气候的影响,其降雨充沛,喀斯特较发育,宏观上发育有溶隙、溶孔、溶洞等地表形态。溶隙,是雨水的通道,受降雨影响原溶隙加宽、加深,切割岩体。溶孔,呈蜂窝状圆孔,多竖向发育,影响岩体的完整性,降低岩体的力学性质。

## 2 刀子岩山体基本特征

刀子岩山体位于重庆市万盛经开区东林街道腰子口处,该山体具有条形(南北向约500 m纵向展布)、孤立(与周围山体相对孤立)、单薄(山体厚15.0~25.0 m)等特征,呈南北走向阶梯状展布,且由北向南逐渐升高。陡崖带南北向纵长约500 m,崖顶高程340.94~540.10 m,崖脚高程332.50~

468.08 m,陡崖相对高度8.44~72.82 m,陡崖面多数近于直立,部分反倾。陡崖面可见多级台阶(01)现每一台阶均有树木生长,从这一方面可以推测出反倾陡崖面在历史时期内曾发生折断-倾倒的现象(陡崖下方层状巨石即证实这点)。陡崖下方为一自然斜坡,坡角一般为25°~30°,局部较陡处可达45°~60°,斜坡上可见落石,多呈板状停积在斜坡上。

据地质原型调查,依据“地质过程机制分析-定量评价”、“以今推古、以古论今”等地质思想<sup>[1]</sup>,并结合前述该山体的岩性组合、坡体结构特征、陡崖面台阶分布特征,推测该山体在历史时期内曾发生多期次以拉裂-折断-倾倒-崩落为主的破坏(山体前缘以下台阶状旋转滑移-拉裂破坏为主),最终演化为图1中条形孤立单薄的山体。

## 3 演化机制

根据前述并结合山体地貌特征,刀子岩山体在历史时期内曾发生多期次以拉裂-折断-倾倒-崩落失稳模式为主的破坏,山体前缘部分失稳机制为下



图1 刀子岩陡崖带全貌照片

Fig. 1 Daoziyan crag panorama photo

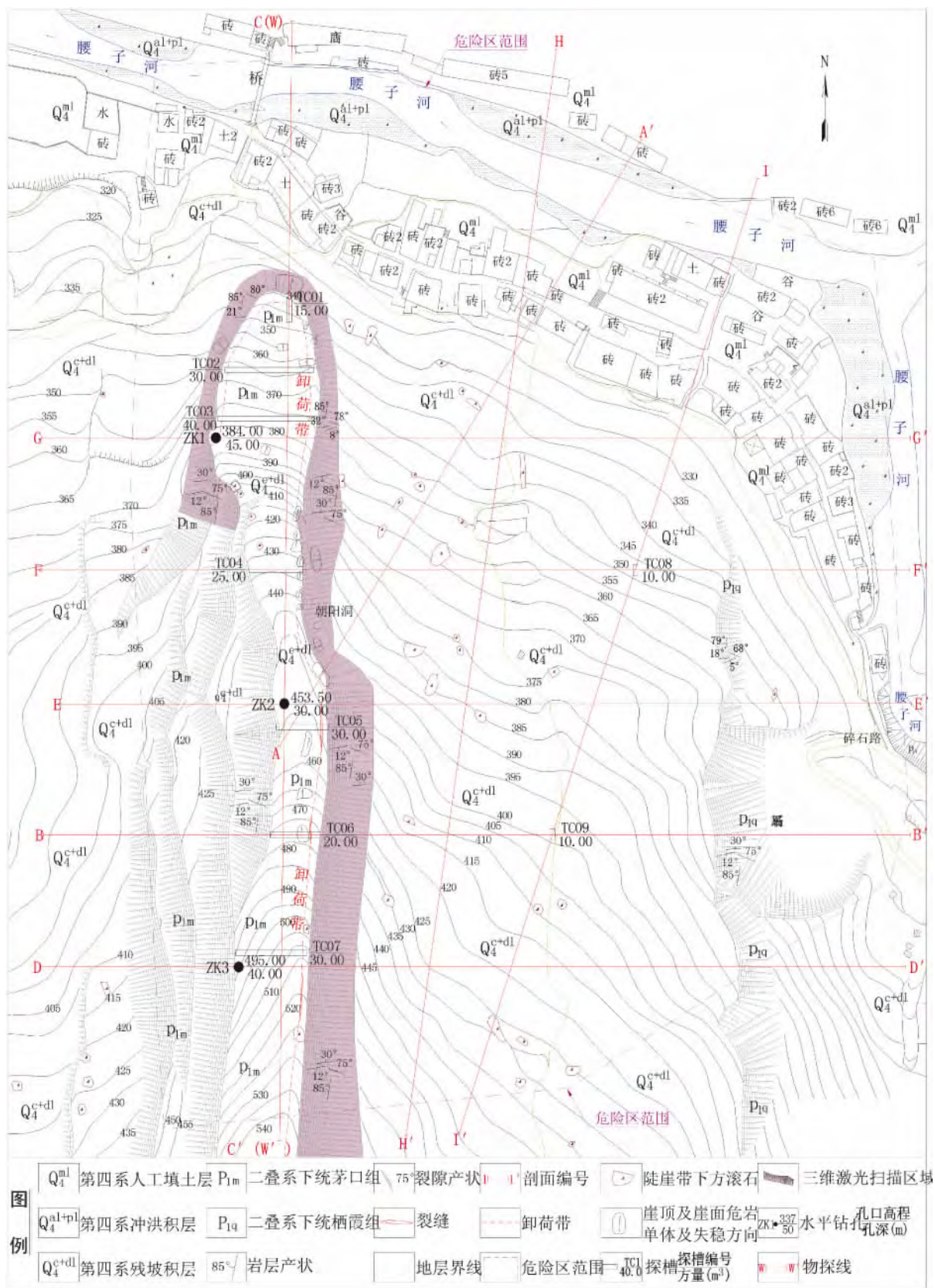


图 2 工程地质平面图

Fig.2 Engineering geological plan



台阶状旋转滑移-拉裂,最终演化为条形孤立单薄的山体(图1~3)。以往的研究成果表明,倾倒变形通常受控斜坡特殊的动力地质与岩体力学环境,不仅与斜坡内部的地层结构及其物理力学性质密切相关,还与外界因素作用存在关联;其孕灾机理具有动态性、历史性和阶段性,其发生、发展和演化是以一个较为复杂的动态过程<sup>[1-2]</sup>。

根据陡倾层状山体(陡崖带)发生拉裂-倾倒-折断-崩落变形的阶段,以宏观方面的变形形式和力学机制分析为基础,分析倾倒变形过程中岩体变形的力学机制。

基于陡倾层状山体(陡崖带)的这一特点,先针对山体的变形进行分析,取其中的单个岩板,采用“悬臂式叠合梁”建立力学模式(图4),分析岩板在自重及层间错动的作用下,产生自重弯矩,进而发生弯曲-拉裂的问题,这系平面应力问题<sup>[11]</sup>。其中图4中①左边为“悬臂式叠合梁”模型简图,①右边为单个梁的应力简图。刀子岩山岩体变形的力学机制先后经历了岩层间剪切错动-岩层内拉张变形-切层张性剪切破坏等阶段。

通过对地质原型的调查,根据山体的坡体结构及岩体变形破裂的地质力学机制分析,刀子岩山体变形的地质力学模式以拉裂-折断-倾倒-崩落型

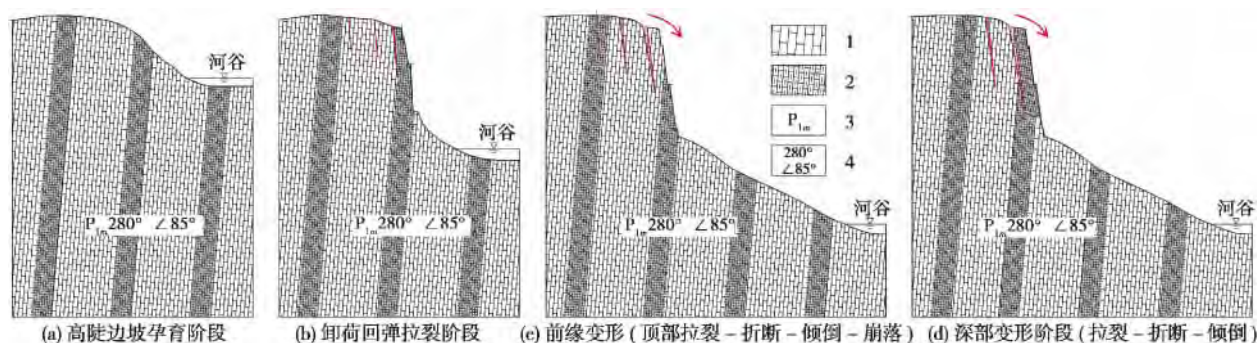
为主,山体前缘部分失稳机制为下台阶状旋转滑移-拉裂型。根据以上分析,把刀子岩山体的演化过程划分为4个阶段。

### 3.1 高陡边坡孕育阶段

在成坡过程中,斜坡表层均质连续的岩土体向临空方向发生进一步的卸荷回弹,发生应力重分布和应力集中效应。由于应力重分布,造成坡表附近出现应力集中带,坡脚附近越接近坡表形成由应力差而产生的最大剪应力增高带;在坡肩附近部位,形成拉应力集中带。工程分析证明,坡肩附近易发生拉裂变形。

### 3.2 卸荷回弹拉裂阶段

刀子岩山体前缘为腰子河,在历史时期内,由于河谷下切,致使岸坡变高、坡度变陡。根据岩体的卸荷规律,岩体卸荷存在上部强下部弱的渐变规律,对于坡脚表现出锁固和应力集中效应。根据3.1,卸荷回弹导致在坡缘附近易形成垂直于坡面的陡倾拉张裂缝,或应力集中部位产生一系列浅表生结构面,岩体结构松弛;伴随着河谷下切,在坡顶位置形成继承性的“V”字形拉裂缝,其张开度及扩展深度呈现出自坡面向坡内递减的规律。另外,该山体受构造裂隙、卸荷裂隙及溶蚀裂隙的切割,也易产生上述拉裂缝。



1—中~厚层状灰岩;2—薄~中厚层状泥质灰岩;3—二叠系下统茅口组灰岩、泥质灰岩;4—岩层产状。

图3 刀子岩山体演化机制分析示意图

Fig. 3 Schematic evolution mechanism of Daoziyan mountain

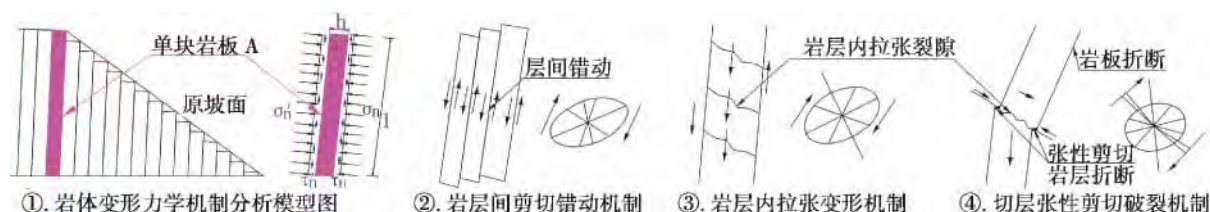


图4 刀子岩山体岩体变形地质力学模式

Fig. 4 Geomechanical model of rock deformation of Daoziyan mountain

### 3.3 前缘变形(顶部拉裂-折断-倾倒-崩落)阶段

坡顶拉裂缝的形成首先出现在坡缘附近,且表现出距离坡缘越近其深度及宽度均变大的规律。伴随着河谷下切、岩体溶蚀及岩性组合(陡倾的灰岩与泥质灰岩互层)等影响,造成新的拉裂缝形成,或原有拉裂缝进一步发展,陡倾的岩体由于溶蚀等作用被切割成岩柱,充水后极易向临空方向发生拉裂-倾倒-折断型破坏。

### 3.4 深部变形(深部拉裂-折断-倾倒-崩落)阶段

随着山体的前缘的变形、拉裂缝的进一步发展,其出现的部位由坡缘向后推移。与山体前缘变形类似,产生多期次拉裂-倾倒-折断破坏,最终形成条形孤立单薄的山体(陡崖带)。其失稳及崩落模式从陡崖带下方堆积体也得到证实。

根据前述裂隙(构造裂隙、卸荷裂隙及溶蚀裂隙)发育特征,刀子岩失稳表现为拉裂-折断-倾倒面、旋转滑移-拉裂沿以上结构面追踪发展。山体的变形及演化机制是裂缝的追踪发展的过程,而后或发生拉裂-折断-倾倒破坏,或突破锁固段发生滑移-拉裂破坏,最终演化为条形孤立单薄的山体。

## 4 结论及建议

1. 刀子岩山体在历史时期内经过多期次山体失稳,最终演化成条形、孤立、单薄的陡崖带。

2. 刀子岩山体演化的地质力学机制以拉裂-折断-倾倒-崩落失稳模式为主,山体前缘部分失稳机制为下台阶状旋转滑移-拉裂。

3. 刀子岩山体倾倒过程中,岩体变形的力学机制先后经历了岩层间剪切错动-岩层内拉张变形-切层张性剪切破坏等阶段。

4. 条形孤立陡崖带的演化受溶蚀、裂隙切割、高陡临空条件等因素的控制,其演化机理大致经历了高陡边坡孕育阶段、卸荷回弹拉裂阶段、前缘变形(顶部拉裂-折断-倾倒-崩落)阶段、深部变形(拉裂-折断-倾倒)阶段。

5. 为陡崖带下方是否进行规划的决策提供可靠的依据,考虑到陡崖带的高、陡特点,为揭示现状裂隙的发育程度、展布情况,以准确评价其稳定性,建议对陡崖带在地质原型调查分析的基础上,采用贯穿陡崖带的水平钻孔、崖顶槽探等山地工程,并沿陡崖带进行三维激光扫描及物探等勘查手段(图2)。

## 参考文献(References)

- [1] 张倬元,王士天,王兰生,等.工程地质分析原理(第三版)[M].北京:地质出版社,2009:272-275 [Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng et al. Principle of engineering geology(Third edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 272-275]
- [2] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 434-454 [Huang Runqiu. In China since the 20th century large landslide and its mechanism[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 434-454]
- [3] 陈智强,李渝生. 重庆市南川龛子岩危岩形成演化机制分析及防治措施探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(1): 78-81 [Chen Zhiqiang, Li Yusheng. Analysis on formation and development mechanism and discussion on prevention measures for Zhenziyan dangerous rock mass in Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(1): 78-81]
- [4] 陈洪凯. 三峡库区危岩链式规律的地貌学解译[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(1): 92-95 [Chen Hongkai. Geomorphology research on chained regularity of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Sciences), 2008, 27(1): 92-95]
- [5] 王林峰,陈洪凯. 危岩链式规律的力学演绎[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(2): 94-97 [Wang Linfeng, Chen Hongkai. Mechanical evolution of chained regularity of perilous rock[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(2): 94-97]
- [6] 陈洪凯,唐红梅,鲜学福. 缓倾角层状岩体边坡链式演化规律[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(1): 20-25 [Chen Hongkai, Tang Hongmei, Xian Xuefu. Chained developing pattern for rock slopes with gentle dip strata[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2009, 45(1): 20-25]
- [7] 陈洪凯,唐红梅,王林峰,等. 缓倾角岩质陡坡后退演化的力学机制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 468-473 [Chen Hongkai, Tang Hongmei, Wang Linfeng et al. Mechanical mechanism for retreat evolution of steep rock slopes with gentle dip[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 468-473]
- [8] 何潇,陈洪凯,赵鹏,等. 长江巫峡岸坡座滑式危岩稳定性研究[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 468-473 [He Xiao, Chen Hongkai, Zhao Peng et al. On the stability of slide type crag in Wu gorge bank slope Yangtze River[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 468-473]
- [9] 刘雪梅. 三峡库区万州区地貌特征及滑坡演化过程研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010: 1-6 [Liu Xuemei. A study on geomorphic character and landslide evolution in Wanzhou City, Three Gorges Reservoir[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010: 1-6]
- [10] 王林峰. 复杂岩体边坡损伤断裂破坏机制[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012: 3-5 [Wang Linfeng. Complex rock mass slope's damage and fracture failure mechanism[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012: 3-5]
- [11] 李满意. 强震作用下青川县桅杆梁斜坡动力响应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 90-9 [Li Manyi. Research on the dynamic response under severe earthquake of Weiganliang slope in Qingchuan county[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 90-966]

## Evolution Mechanism of Thin Strip Isolated Mountain

LI Manyi<sup>1 2</sup>, SI Hongtao<sup>1</sup>, WEI Yanzhen<sup>1</sup>, LIAO Yunping<sup>1</sup>

(1. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment/Chongqing Institute of Geology

and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;

2. State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection/Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The geological environment of thin strip isolated mountains is fragile, which form high steep cliffs overhead belt easily, and then form crag monomer. There are more exploration and evaluation methods in existing norms and monographs, but less for thin strip isolated mountains and cliffs. In this study, we took Daoziyan cliffs in Wanshen, Chongqing of China as an example to study the perambulation and stability analysis method of isolated mountain. Based on its geological environment, structural characteristics of the slope, dissolution development characteristics and accumulation conditions below the belt, by using geological analysis methods of tracing to its source base on present situation, we concluded that the historical evolution mechanism of such mountains and the geotechnical model of rock deformation. Besides, we reproduced the geological activity of such mountain during the history. Finally, advice were given about exploration recommendations of Daoziyan cliffs. The project has an important guiding significance for the safety of the planning area under the rock cliffs. At the same time, it provides a reference for the analysis and evaluation of the same mountain.

**Key words:** thin strip isolated mountain; cliffs; evolution mechanism; geomechanical model; rockfall; exploration proposal

---

### 封面照片: 梯田

梯田是人们在山地丘陵区的山坡上沿等高线方向修筑的阶台式的田地。因其水平或基本水平,对农田的蓄水、保土、保肥和增产都有着显著的作用,是有效治理坡耕地水土流失的主要措施;加之,其通风透光条件较好,有利于作物生长和营养物质的积累,在保护水土资源、改善生态环境、发展农村生产力中发挥着不可替代的作用。梯田的建设和管理有着悠久的历史,梯田的作用、生态意义与管理,在当今也更加受到人类的重视。本期刊发的《梯田生态系统服务与管理研究进展》对此有详细论述。

照片为广西龙脊梯田。

(嘉 益)