

文章编号:1004-4574(2007)03-0001-06

云南虎跳峡“滑石板”岩质滑坡的 基本特征与成因

曾庆利¹, 张西娟², 杨志法¹

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029;

2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘要:1996 年 10 月 28 日云南虎跳峡左岸发生“滑石板”顺层岩质滑坡。滑坡体呈不规则菱形, 长 800 多 m、宽 250 m、厚 30 多 m, 体积不小于 500 万 m³, 高速下滑 300 多 m 入金沙江, 并堵江成坝。通过详细野外调查和室内资料对比分析, 发现该段斜坡系由内外两层结构组成, 内层为原生节理的层状结构, 外层为节理裂隙化松散结构。揭示了虎跳峡滑石地段斜坡发生滑坡的复杂成因机制, 认为该滑坡是在玉龙—哈巴雪山断块强烈隆升背景下, 地震、降雨和深切峡谷的强卸荷改造等地球内、外部动力耦合作用的结果。最后对该段斜坡的稳定性进行了初步评价, 认为将来还可能再次发生类似岩质顺层滑坡, 其周期长短则受内外动力的联合控制。

关键词:虎跳峡; 岩质滑坡; 丽江地震; 地球内外动力耦合作用

中图分类号: P425.5

文献标识码: A

Principal characteristics and formation mechanism of plate type rock landslide in Hutiao-Gorge, Yunnan

ZENG Qing-li¹, ZHANG Xi-juan², YANG Zhi-fa¹

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science,

Beijing 100029, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Plate type rock landslide occurred on the 28th, October 1996 to the left bank of Hutiao-Gorges, Yunnan, just 267 days after the M_s 7.0 Lijiang earthquake on 3rd, February 1996. The landslide is about 800 meters long, 250 meters wide and 30 meter thick, appearing rhombus in geometry. The total 5,000,000 cube meters rock slid for about 300 meters into the Jinsha River and temporarily blocked the river. Through carefully field investigation and indoor data analysis, the principal characteristics and complex formation mechanism of the landslide is discussed in the paper. It is found that the slope there consists of two layers of rock mass, the outer jointed and fissured loose rock and the inner original joint sandwich integrate rock. The paper put forwards that the landslide results from the Coupling of the earth's endogenic and exogenic action, such as the strong uplift of Yulong-Haba block, seismic activities, strong unloading of alteration of deep-cut gorge and rainfall. Lastly, stability of the segment is preliminarily analyzed and evaluated. It is believed that landslides similar to 1996 plate type rock landslide will occur periodically on the segment of the left bank of Hutiao-Gorges in the future. The periodicity is controlled by the coupling of the earth's endogenic and exogenic action.

Keywords: Hutiao-Gorge; rock landslide; Lijiang earthquake; coupling of the earth's endogenic and exogenic action

收稿日期: 2005-10-20; 修订日期: 2006-04-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-134); 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412701)

作者简介: 曾庆利(1973-), 男, 博士, 主要从事地质灾害及新构造方面的研究。E-mail: qlzeng2008@126.com

地球内外动力耦合作用下重大地质灾害发生的成因机制研究是一个崭新的科学命题,也是当前地质灾害研究的前沿和热点^[1]。云南虎跳峡地区地处青藏高原东南缘的大陆地形陡降坡度带,受青藏高原阶段性强烈隆升的作用,形成了高地应力、强断裂和地震活动性、深切峡谷的强卸荷改造等内外动力环境^[2]。在这样特殊的地质地貌背景下,在虎跳峡两岸长达 20 km 的深切峡谷段内,崩塌、滑坡等地质灾害特别发育^[3-5],对来此的国内外游客的生命安全和拟建的虎跳峡水电枢纽工程形成严重威胁。本文以 1996 年 2 月 3 日云南丽江 $M_s 7.0$ 级强震后的 10 月 28 日发生的虎跳峡左岸“滑石板”岩质顺层滑坡为例,介绍了该滑坡的基本特征,探讨了在地震、卸荷改造、降雨等地球内外动力耦合作用环境下“滑石板”岩质顺层滑坡的成因机制,最后对滑石板地段斜坡的稳定性进行了初步评价。这对进一步深入研究滑石板地段滑坡发育周期和预防重大灾害发生提供了思路和依据。

1 地质地貌背景

“滑石板”滑坡位于虎跳峡左岸,下峡口以西约 500 m,坐标位置: $N27^{\circ}18.1', E100^{\circ}11.8'$ 。虎跳峡地处青藏高原东南缘横断山区,峡长 20 km,自然落差 210 m,谷深流急。河谷最窄处跨度仅有 30 多米,两岸岩壁峭立,南北侧分别为高耸的玉龙雪山和哈巴雪山,峰谷相对高差达 500 至 3900 多米。

虎跳峡位于松潘 - 甘孜褶皱系与扬子准地台两个一级大地构造单元复合部位靠东一侧,属扬子准地台西侧台缘褶皱带,川滇菱形地块西侧^[6](图 1)。区内构造以近南北向的印支期褶皱和断裂为主,并叠加了北西向和北东向两组喜山期褶皱和断裂,总体呈现断块构造格局。

研究区新构造运动强烈,主要表现为断块的差异性活动和断陷盆地的形成^[7]。研究区主要边界断裂为龙蟠 - 乔后断裂(F1),玉龙雪山东麓断裂(F2),中甸 - 大具断裂(F3),丽江 - 剑川断裂(F4)(图 1)。在近南北向现今区域构造应力场作用下,各边界断裂表现为强烈地构造活动性^[3,8-9]。其中,南北向弧形龙蟠 - 乔后断裂为正断左旋走滑,近南北向玉龙雪山东麓断裂为左旋走滑正断,北西向中甸 - 大具断裂为正断右旋走滑,北东向丽江 - 剑川断裂为左旋走滑正断。除龙蟠 - 乔后断裂外,均有发震历史记录。1996 年 2 月 3 日沿玉龙雪山东麓断裂发生了主震震级 $M_s = 7.0$ 的强烈地震,虎跳峡位于 VIII - IX 度地震烈度区(图 1)。

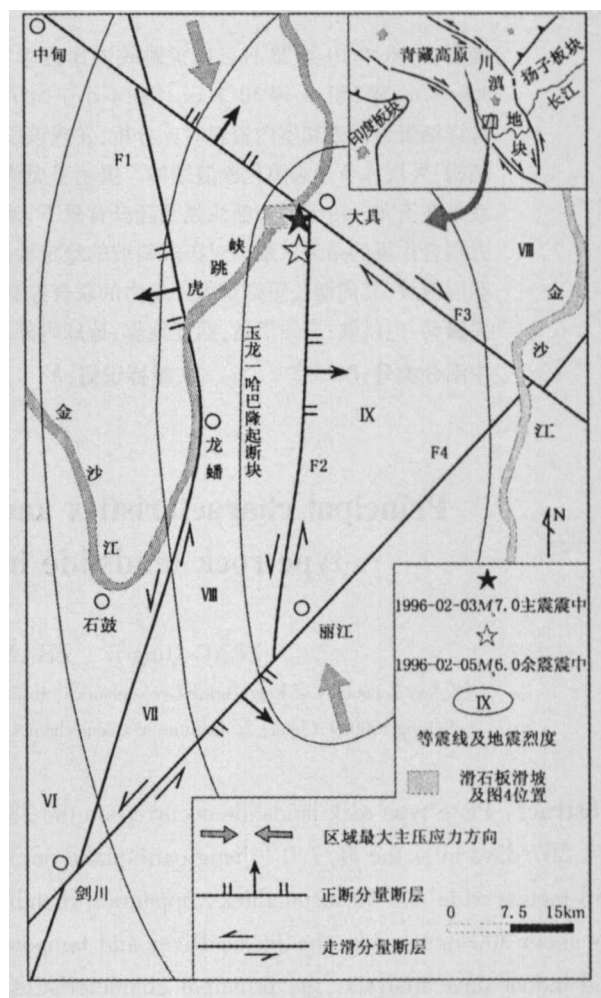


图 1 虎跳峡地区构造简图

Fig. 1 Schematic structural map in Hutiao Gorges region^[7]

2 “滑石板”滑坡的基本特征

2.1 滑坡发生概况

1996 年 10 月 28 日上午 8 时左右,虎跳峡左岸距离下峡口约 500 m 处发生崩塌滑坡,约 500 万 m^3 固体物质高速下滑 300 m 冲入金沙江,堵江断流时间长达 40 多 min,高峡出平湖(图 2,图 3)。所激起尘灰高达百米,遮天蔽日,笼罩整个大具盆地。滑坡体堵江成坝,坝高约 100 m,长约 70 m,厚约 300 m,造成坝上游水位上升 50 多米,坝下游水位下降 30 多米。丽江 - 中甸公路被毁坏。



图2 “滑石板”岩质滑坡(镜向北)
Fig.2 Plate type rock landslide
(lens facing north)

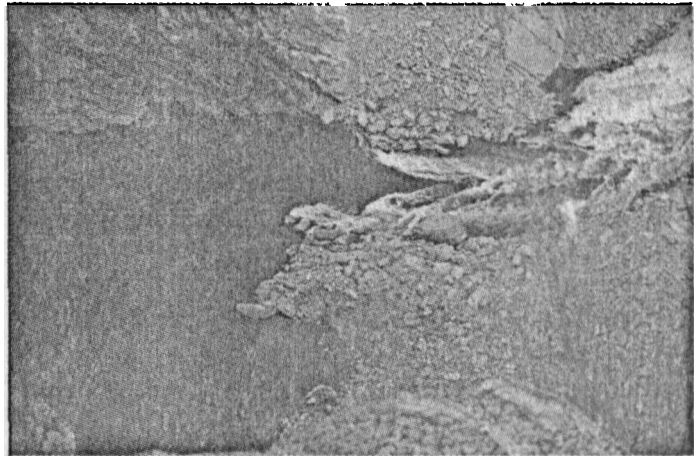


图3 滑坡体堵江成坝-高峡出平湖(镜向北,照片:税晓洁)
Fig.3 The landslide mass temporarily blocked Jinsha River, and a lake appeared (The view is to the north, Mr. Shui Xiaojie supplies the picture)

2.2 滑坡体组成和几何形态

发生滑坡的地层为下二叠统厚层状大理岩,含泥质条带和少量云母片。岩层产状 $90^{\circ} \angle 48^{\circ}$,南缓北陡,上缓下陡。通过野外现场调查、滑坡发生后大比例尺航片解译分析及地形图对比等方法,得到滑坡体纵长约 800 m,横宽约 250 m,厚约 30 m,体积不小于 500 万 m^3 。平面上呈不规则菱形,如图 4 所示。

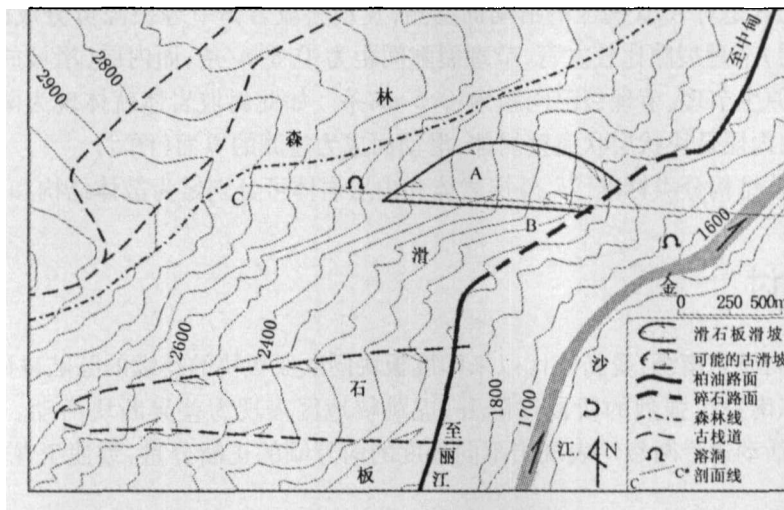


图4 “滑石板”岩质滑坡平面图
Fig.4 Plain view drawing of plate type rock landslide

从滑坡后缘断面看,断面岩石新鲜,参差不其,明显具有被拉断的痕迹;而从滑坡侧缘断面看,大部分断面呈现土黄色,比较平直,是沿着原生节理和后生卸荷裂隙发育的;滑坡基本上是顺着大理岩层理发生滑动的,滑动面上具有明显的滑动擦痕;从滑动面形态上看,上部平整基本沿厚层大理岩层面发育,下部凸凹不平,存在诸多切层断面,确定为滑坡锁固段位置(图 5)。

图 6 显示,滑坡后缘高程 2 450 m,前缘剪出口高程 1 880 m,金沙江江面高程 1 570 m。500 万 m^3 岩体沿着岩层面高速下滑 300 多 m 冲入金沙江中,滑坡体在滑动过程中完全解体。根据现场调查和遥感照片解译,此次滑坡所带来的巨大的冲击和震动,还使滑坡周边岩体发生多处崩塌(图 7)。对当地群众的访问也证

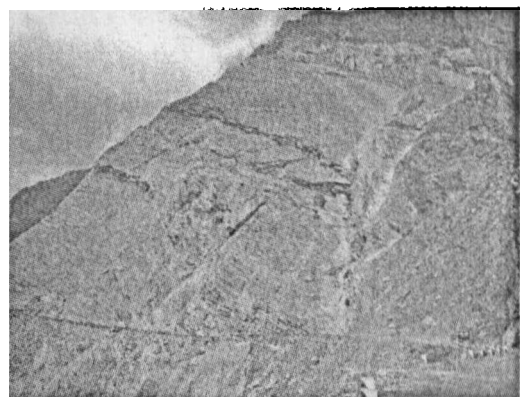


图5 “滑石板”岩质滑坡近照(镜向北)。比例尺为松花江微型面包车,其外型尺寸:长/宽/高(mm): 3562/1480/1793
Fig.5 Near image of plate-type rock landslide with a “Songhuajiang” brand microbus as a dimensional reference

实了当时曾传出两次轰隆隆的巨大响声。

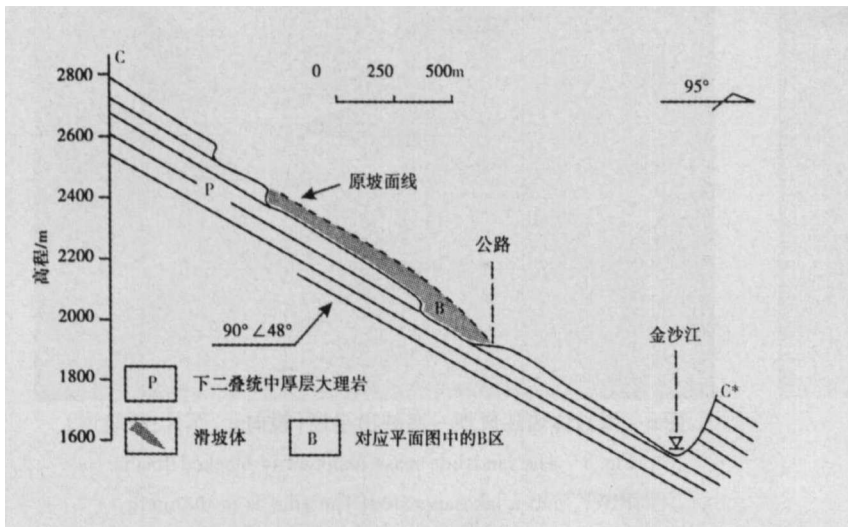


图6 “滑石板”岩质滑坡剖面图
 Fig. 6 Profile of plate type rock landslide

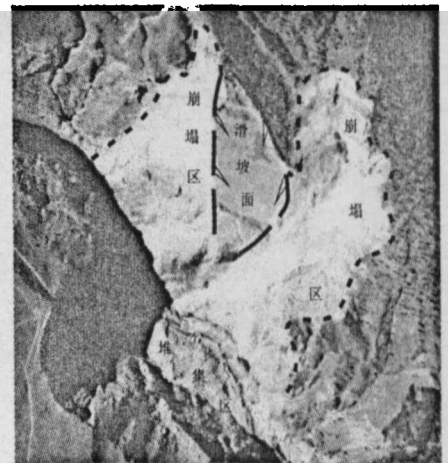


图7 伴随岩质滑坡发生的周围岩体的崩塌(1996年12月航摄照片)
 Fig. 7 Collapse of surrounding rock mass accompanying rocky landslide

2.3 岩体结构

野外详细勘测,尤其是对 A, B 两区的滑动面勘测,发现斜坡岩体节理裂隙可分成内外两层,外层(即发生滑坡的 30 m 厚岩层)节理裂隙比较发育,节理裂隙间距为:0.8 m/条;而内层(滑坡的滑动面以下岩体)节理裂隙少且基本上是原生节理,节理裂隙间距为:2.5 m/条。如此斜坡岩体就体现为两元结构,外层是节理裂隙化层状松散岩体,内层是块状层状完整岩体,滑动面成为过渡的界面(图 5)。

按照谷德振的岩体结构分类标准^[10],外层岩体和内层岩体可分别定为散体结构和层状结构。

3 成因机制探讨

虎跳峡位于青藏高原东南缘,受新生代以来印度板块同欧亚板块的持续的陆陆碰撞影响,川滇菱形地块发生顺时针转动,藏东南发生强烈的阶段性隆升,虎跳峡地区表现为差异断块活动。从图 1 看出,围限玉龙—哈巴雪山的 4 条活动边界断裂均表现出不同程度的向外倾的正断分量,致使玉龙—哈巴雪山呈现出持续断块构造隆升^[7]。

玉龙—哈巴背斜核部时代不明的片岩与两翼上覆中泥盆世以后的沉积地层之间的拆离滑脱事件是玉龙—哈巴雪山强烈断块隆起的外在响应。张家声等^[10]通过对玉龙—哈巴背斜构造变形序列的研究,发现在东翼的盖层与基底之间存在一条厚度超过 2 m、发育有糜棱岩的低角度正断层带,认为褶皱的基底变质岩系与盖层岩石之间在 2.4 Ma 前发生过侧向伸展拆离事件^[11](图 8)。这种伸展拆离在玉龙—哈巴背斜的两翼均有表现:西翼为两条高角度正断层;东翼的拆离构造在核桃园处最为明显,盖层之间发育的玉龙雪山东麓正断层也是例证。

第四纪以来玉龙—哈巴雪山强烈的断块构造隆升使虎跳峡段河流快速下切,原有的水系平衡被打破,北北东向虎跳峡袭夺了原来南北向的冲江河水系,形成了陡峭的虎跳峡峡谷。在深切峡谷的形成过程中,谷坡岩体卸荷回弹发生表生改造,生成卸荷裂隙。资料表明,虎跳峡地区这种卸荷裂隙的平均延伸达到 40 m。这与发生滑坡的外层岩体厚度基本一致,即发生滑坡的岩体,卸荷裂隙相当发育,而滑动面以下的岩体中基本是原生的节理,节理密度及节理得张开度都大大减小。

此外,1996 年 2 月 3 日发生 M_s 7.0 级丽江地震,主震震源机制 P 波初动解说明主震主压应力轴为近南北向,仰角达 75°,显示地震以垂向力作用为主。而滑石板距离震中仅 3 km,位于 IX 度极震区,但是“滑石板”滑坡当时并没有接着发生,而是在当年的 10 月 28 日发生。这说明滑坡体自重和地震动荷载所产生的下滑力尚不足以克服锁固段上的抗滑力。但是,节理裂隙化斜坡岩体在强震中结构进一步被破坏,尤其是锁固

段岩体,已经接近临界滑动状态。

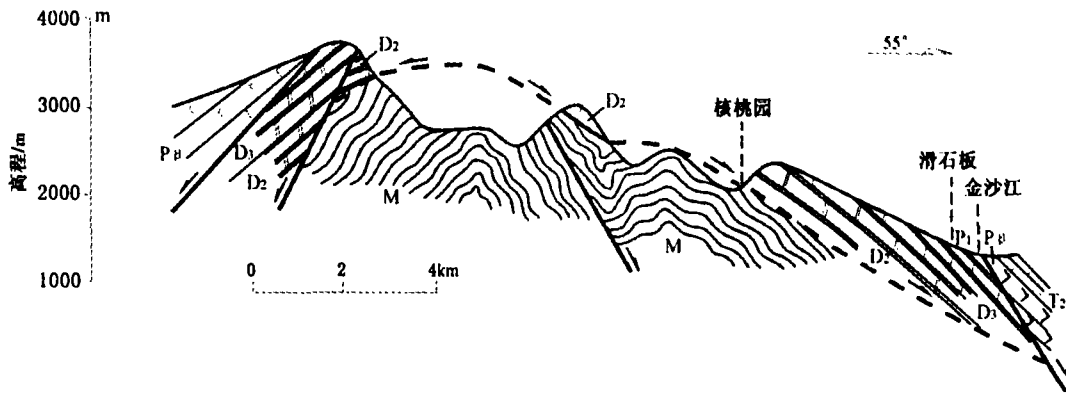


图8 玉龙—哈巴背斜两翼的拆离构造(据张家声等^[11])

Fig. 8 The detachment structures in the both flanks of Yulong-Haba anticline(after Zhang Jiasheng et al. ^[11])

根据历史资料,丽江地区一般5-10月为雨季,而11月至次年4月为旱季。在漫长雨季的中,降雨顺着节理裂隙进入滑面,与滑面岩体发生水岩相互作用。这种作用可以对滑坡体产生力学、物理和化学等效应,促进滑坡的发育发生。就滑石板滑坡而言,但是根据来自国家气象信息中心气象资料室的降水数据,如图9所示,1996年3月份的降雨量就达到了62.7 mm,超过历史同期降雨水平。根据降雨数据统计,地震发生后至滑石板滑坡发生前的267 d中小雨有69 d(0.1~10 mm/24 h),中雨27 d(10~25 mm/24 h),大雨11 d(25~50 mm/24 h)。这期间共发生降雨量大于10 mm/24 h,最短间隔2 d的干湿交替28次。强烈的干湿交替使滑面锁固段岩体中的泥质条带和云母片加速风化和软化,滑面上锁固段岩体抗滑力逐渐减弱。滑坡体上部和江边存在两个溶洞(图4),这说明该处的大理岩可溶性较强,那么由降雨渗进裂隙形成的裂隙水流动同时也对大理岩进行着溶蚀,溶蚀也能降低滑面锁固段岩体的整体强度而有利于滑坡的发生。降雨资料显示,在滑坡发生的前两天还有8 mm的降雨。最终,整个滑面上下滑力超过抗滑力,滑坡得以瞬间爆发。

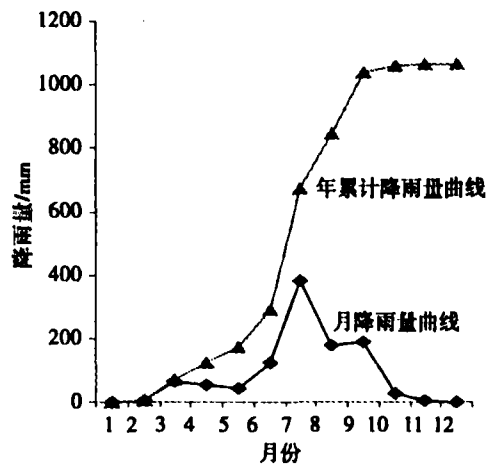


图9 丽江地区1996年1-12月月降雨量和累积雨量(引自国家气象信息中心)

Fig.9 Monthly rainfall and accumulated rainfall in Lijiang Regionin 1996 (from National Weather Information Center)

此外,地震与滑坡之间还有一个特殊的关系,即地震滑坡的滞后效应。也就是说,有些滑坡与地震几乎同时发生,而有些滑坡则是落后地震一段时间才发生。本文中的滑石板滑坡就是一个比较典型的地震滞后型滑坡。唐川等^[4]在灾后的复查中也指出了存在滞后型滑坡这一类型。1995年7月22日甘肃永登发生5.8级地震,8月10日位于震中区的苏家峡村在地震中开裂的山体发生滑坡,并造成人员和财产损失^[12]。1999年台湾Chi-Chi地震发生后,所造成的斜坡破坏并不是很多,但是几个月过后,斜坡的破坏(包括滑坡、坍塌、崩塌等)大量出现。目前对地震滞后型滑坡的研究很少,但却是一个好的研究方向。

因此,虎跳峡“滑石板”岩质顺层滑坡的发生不是独立事件,而是地球内外动力耦合作用的结果,是虎跳峡河谷岸坡发展演化历史进程中的必然事件。

4 稳定性初步评价

从“滑石板”滑坡后缘残留的2级阶梯状岩体看(图6,图7),此处斜坡至少发生过2次类似滑坡。从虎跳峡下峡口至核桃园东约5 km长的顺倾斜坡的地形上看,至少还有另一处的地形具有“滑石板”滑坡发生

前后的地形特点(图3)。结合对当地群众对这段斜坡的命名-“滑石板”,说明这里历史上曾经发生过类似于1996年的岩质滑坡。滑坡发生时,表面卸荷裂隙多的外层岩体发生滑坡而被移除,内层岩体继续遭受卸荷作用,如此周而复始,循环往复。从上节地球内外动力耦合作用诱发滑坡发育这样一个成因机制看,该段斜坡未来再次发生类似1996“滑石板”滑坡的新滑坡的可能性非常大。

这种高速岩质滑坡发育的周期与虎跳峡地区高地应力、强烈的断块构造隆升、强烈的地震活动性和深切峡谷的强卸荷改造效应等这些内外动力地质作用的联合作用密不可分,值得作为一个地球内外动力耦合作用下发生滑坡灾害的典型实例进行深入和详细研究。

5 结论

虎跳峡“滑石板”岩质顺层滑坡是一个体积大于500万 m^3 、下滑300多米入江的高速滑坡。滑坡体为大理岩节理裂隙化层状岩体。滑坡是玉龙-哈巴雪山断块差异快速隆升所导致的河流快速下切过程中,内外动力耦合作用的必然结果,是河谷发展演化历史过程的一部分。滑石板段斜坡未来再次发生新岩质滑坡的可能性很大。滑坡发育周期是由该地区地球内外动力耦合作用来控制 and 决定的。

致谢:特别感谢中国科学院地质与地球物理研究所许兵、潘裕生、胡瑞林研究员在野外考察期间给予的热情指导和帮助。十分感谢自由撰稿人和游记作家税晓洁先生无私提供有关照片。

参考文献:

- [1] 王思敬. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害发生的成因初探[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 115-117.
- [2] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 443-450.
- [3] 夏金梧, 周乐群, 胡宗云. 金沙江虎跳峡河段水电开发中存在的主要地质问题[J]. 人民长江, 1997, 28(12): 29-31.
- [4] 唐川, 黄楚兴, 万晔. 云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 76-84.
- [5] 刘衡秋, 胡瑞林, 曾如意. 云南虎跳峡两家人松散堆积体的基本特征及成因探讨[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 100-106.
- [6] 潘裕生. 横断山区地质构造分区[J]. 山地研究, 1989, 7(1): 3-12.
- [7] 张西娟, 曾庆利, 马寅生. 玉龙-哈巴雪山断块差异隆升的基本特征及其地质灾害效应[J]. 中国地质, 2006(5): 75-82.
- [8] 苏生瑞, 王士天, 王兰生. 丽江地震区应力场研究[J]. 地质论评, 2004, 50(1): 57-64.
- [9] 韩竹军, 魏顺民, 向宏发, 等. 1996年2月3日云南丽江7.0级地震发生的构造环境[J]. 地震学报, 2004, 26(4): 410-418.
- [10] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 271-290.
- [11] 张家声, 韩竹军. 滇西北玉龙-哈巴雪山的递进变形、FT年代和区域构造联系[M]//马宗晋. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北京: 地震出版社, 2001: 136-147.
- [12] 冯学才. 永登5.8级地震的震害与环境工程地质[J]. 甘肃科学学报, 1996, 8(2): 60-63.