

引用格式: 辛鹏, 王涛, 刘甲美, 等, 2022. 西藏易贡滑坡源区坡体赋存的地质结构及其滑动模式 [J]. 地质力学学报, 28 (6): 1012–1023. DOI: 10. 12090/j. issn. 1006–6616. 2022072

Citation: XIN P, WANG T, LIU J M, et al. , 2022. The geological structure and sliding mode of the slopes in the Yigong landslide source area, Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 28 (6): 1012–1023. DOI: 10. 12090/j. issn. 1006–6616. 2022072

西藏易贡滑坡源区坡体赋存的地质结构及其滑动模式

辛 鹏^{1,2,3}, 王 涛^{1,2,3}, 刘甲美^{1,2,3}, 刘 锋¹, 杜建军^{1,2,3}, 赵建磊^{1,2,3}
XIN Peng^{1,2,3}, WANG Tao^{1,2,3}, LIU Jiamei^{1,2,3}, LIU Feng¹, DU Jianjun^{1,2,3}, ZHAO Jianlei^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;

3. 自然资源部陕西宝鸡野外科学观测研究站, 北京 100081
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

3. *Observation and Research Station of Geological Disaster in Baoji, Shaanxi Province, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*

The geological structure and sliding mode of the slopes in the Yigong landslide source area, Tibet

Abstract: The unstable slopes of BH01, BH02, and BH03 in the Yigong landslide source area in Tibet threaten the safety of major engineering facilities downstream. In order to prevent and control the disaster risk caused by the high-elevation sliding of blocks, it is urgent to analyze the geological structure of the slope in the above-mentioned source area and their deformation trends. Based on the Pleiades digital elevation model with a precision of 2 m and its topographical shadow, this paper draws up evidence from three aspects: quantitative geomorphology, geological structure, and landslide science. In addition, it is preliminarily determined that the source area of the Yigong landslide has four secondary slope units, including the cuesta in the front imbricated thrust-fault zone, the block in the thrust-fault zone, the block in the strike-slip fault zone, and the NE-trending rift zone. There are two primary control structural planes in the slope, dipping southeast and southwest, respectively. The geological survey of the line has confirmed that the above two groups of structural planes are related to thrust faults and strike-slip faults in the imbricated nappe. The NE-trending rift crosscutting the ridge may be related to the recent EW-extensional deformation of the nappe. With the above-mentioned geological structures, the slopes in the Yigong landslide source area show multi-stage and multi-phase deep sliding along the NE-trending rift zone and have the creep-tension-shear sliding mechanism with rock landslide. According to the extension depth of the tensile fractures in the source area, the BH02 block has the potential risk of accelerated slippage. Moreover, the BH03 block is also unstable.

Keywords: geological disaster; Yigong landslide; source area; imbricated nappe structure; fault; sliding mode

摘 要: 西藏易贡滑坡源区 BH01、BH02 与 BH03 斜坡体呈不稳定状, 严重威胁下游工程设施安全。为防控源区坡体再次高位滑动致灾, 亟待开展斜坡赋存的地质结构及变形趋势分析。文章基于 2 m 精度的 Pleiades 数字高程模型及地形影像, 厘定了定量地貌学、地质构造与滑坡学 3 方面证据, 确定易贡滑坡源区具有前缘叠瓦式逆冲断裂区单面山、逆冲断裂区块体、走滑断裂区块体、走滑断裂区北东向拉裂槽 4 个次级斜坡单元。现场地质调查发现源区坡体内发育倾向南东、南西两组主控结构面, 这两组结构面是滑

坡前缘逆冲断裂、后缘走滑断裂渐进活动的结果。与山脊近直交的北东向拉裂槽可能与晚期东西伸展变形背景相关。研究认为在地质构造影响下,易贡源区斜坡沿着北东向拉裂槽下延结构面呈现多级、多期次深层滑移,具有岩质滑坡蠕滑-拉裂-剪断型滑动机制。依据源区拉裂缝扩展的深度判断,源区BH02坡体具有潜在加速滑移风险,且BH03坡体亦不稳定。

关键词: 地质灾害;易贡滑坡;源区;叠瓦式推覆构造;断层;滑动模式

中图分类号: P694; P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 06-1012-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022072

0 引言

西藏易贡滑坡规模巨大。1900年,易贡滑坡发生首次有记录的崩滑碎屑流、堵江事件(郭广猛,2005;Guo et al.,2020;袁浩等,2021)。2000年4月9日20点5分,滑坡源区再次发生高位远程滑坡-碎屑流灾害,巨大型崩滑体沿沟谷冲入易贡藏布江,形成长约2.5 km堰塞坝,上游堰塞湖的水量一度超过 $3.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。同年6月8日,易贡堰塞湖发生溃坝,巨量洪水一路下泄、摧毁了下游的桥梁,导致印度平原约50万人无家可归(鲁修元等,2000;王治华和吕杰堂,2001;吕杰堂等,2003)。在融雪、冰劈及地震等内外营力耦合作用下,易贡滑坡源区潜在不稳定斜坡具有再次失稳成灾的风险(刘铮等,2020),威胁下游公路、桥梁等工程设施。

2000年易贡滑坡发生后,诸多学者系统研究了滑坡滑移、链式致灾过程以及复发周期,对滑坡、堰塞湖、洪水巨型灾害链式过程进行了模拟(胡明鉴等,2009;戴兴建等,2019;王哲等,2021)。部分学者研究认为易贡滑坡体为花岗岩组成的楔形体结构,其内部的三组原生结构面($\text{NW}328^\circ \angle 46.5^\circ$ 、 $\text{S}180^\circ \angle 48^\circ$ 、 $\text{SW}228^\circ \angle 59^\circ$)与多组临空卸荷结构面控制了源区的岩崩,岩体表生卸荷是滑动的主控因素(许强等,2007)。也有学者结合喜马拉雅东构造结的应力环境,认定易贡滑坡为断裂构造控制型滑体,源区发育北西向嘉黎走滑断裂带、北西向达德-阿尼扎断裂与北东向鲁朗-易贡走滑断裂(刘伟,2002)。另有学者认为易贡滑坡受石炭纪地层内软弱层带控制,滑体沿着软弱层滑移变形(殷跃平,2000;郭广猛,2005)。近年来,新的研究发现岩质滑坡的启程滑移易受关键块体、锁固段控制(薛雷等,2018;邬爱清,2019;胡乐等,2021),其高频活

动具有岩质滑坡的力链式破坏特征,锁固区岩体具有控制性作用。易贡滑坡亦不例外,李俊等(2017,2018)将易贡滑坡源区的不稳定斜坡分为BH01、BH02两个区域。但上述研究均未回答易贡滑坡源区是否有断裂带存在,亦不能确定BH01、BH02坡体结构与卸荷结构面、深大断裂带间的作用关系。因此,进一步的调查源区坡体赋存的地质结构,则可为滑坡的力学稳定性分析及监测提供依据。

近年来,喜马拉雅东构造结地质过程的研究新进展为易贡滑坡地质结构研究提供了基础(张进江和丁林,2003;丁林和钟大赟,2013)。易贡滑坡源区为极高山区,人迹罕至,难以通过测绘、线路调查获取精细的地形、地质结构数据与信息。文章以易贡滑坡源区为研究区,基于Pleiades卫星2 m精度数字高程模型,结合线路地质调查,获得源区内坡体的地貌学、地质结构与滑坡学的证据,并进一步将源区分为BH01、BH02与BH03 3个潜在强变形区域,以研究源区斜坡赋存的地质结构、潜在滑动模式与变形破坏趋势。

1 易贡滑坡工程地质条件

易贡滑坡位于青藏高原东南部南迦巴瓦构造结的西北向弧顶部位,毗邻易贡藏布江大峡谷左岸。易贡藏布江自西向东流经通麦村汇入帕隆藏布江,而后再汇入雅鲁藏布江。滑坡前缘为狮泉河-嘉黎-察隅深大断裂带,该断裂宽约10 km,为东构造结的北部边界断裂(图1a)。受区域内构造地貌过程影响,东构造结西北部的易贡-通麦-培龙段沟谷的岸坡地形高差超过3 km,坡体表生卸荷裂隙发育。此外,区域发育深成硬质变质岩体,在地壳强烈挤压缩短作用下,北西-南东向嘉黎-察隅断裂带滑移错动产生的共轭伴生断裂结构面(图1b)。

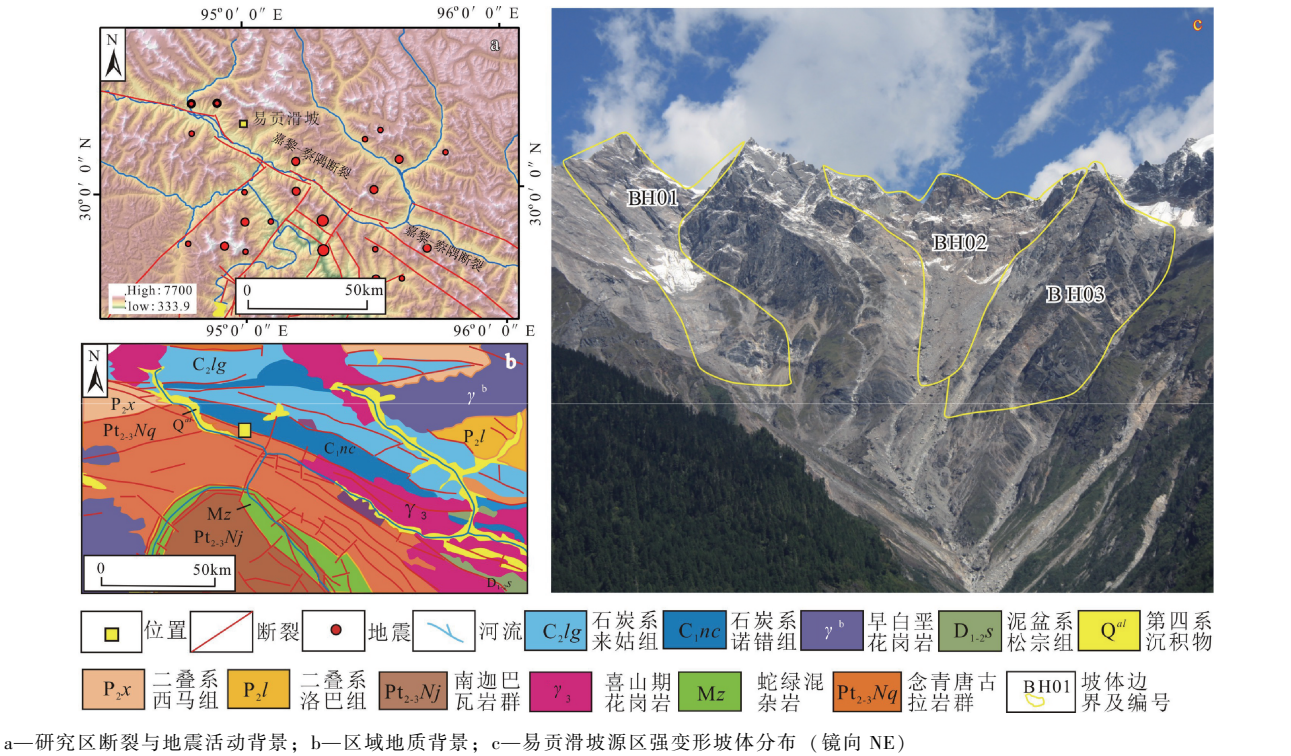


图 1 西藏林芝易贡滑坡构造背景与关键块体位置
Fig. 1 The tectonic geological background and key block location of the Yigong landslide in Nyingchi city, Tibet
(a) The background of fault and seismicity in the study area; (b) The regional geological background; (c) The distribution of strongly deformed slopes in the source area (towards NE)

易贡滑坡所在的扎木弄沟呈近南北向，源区坡体长约 2.3 km，东西宽约 3.1 km，2000 年失稳滑动的岩体体积超过 $8.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。滑坡体由南东向、南西向两组主控滑动面分隔形成，整体呈楔形体状（许强等，2007）。滑动面埋深超过 1 km，远超沟谷卸荷影响带的深度（杜世回等，2021）。
现今，根据三维地貌形态分析，按照岩体结构面展布特征，斜坡源区除了发育 BH01、BH02 两个关键块体外，尚存在 BH03 块体，它们均具有进一步渐进变形扩展的趋势（图 1c）。

2 不对称地貌形态证据

易贡滑坡源区具有地貌裂点特征，南北向沟谷两侧地貌呈现不对称状形态，发育多个次级地貌单元，且后缘具有独特的裂槽地貌、重力滑塌地貌，它们均与多期构造地貌复合作用相关。具体特征如下。

(1) 沟谷形态与东西两侧差异大

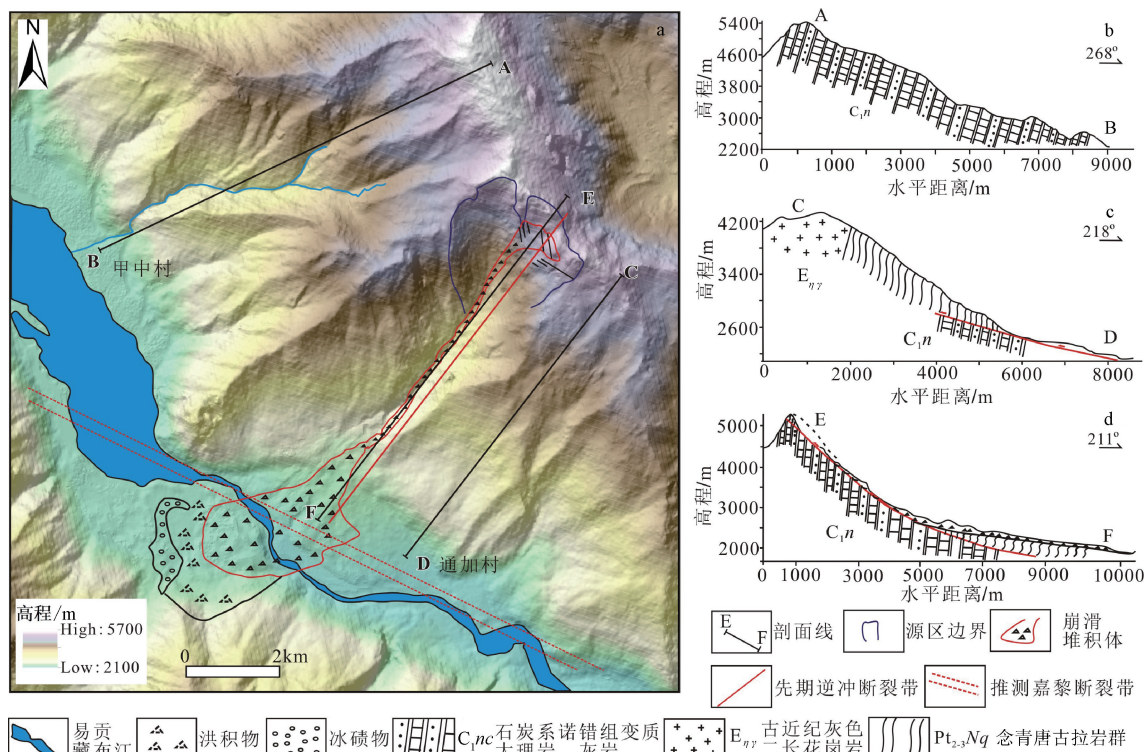
易贡滑坡源区东侧易贡茶厂甲中村、西侧通加村沟谷均呈近南北向，具有相似形态特征，沟

谷内无大型崩滑体发育，具有区域沟谷演化的一般特征（图 2a）。沟谷底部至海拔 2600 m 段为深切 V 型峡谷区，岸坡形成于 9.0~2.0 a BP；海拔 2600~3300 m 段为 V 型峡谷与 U 型谷复合发育区，坡地形成于白玉冰期至冰消期；海拔 3300~4000 m 段呈 V 峡型谷，为流域的上游峡谷段；海拔 4000 m 及以上区域为高原面，形成于末次冰期，坡地多呈圆丘状，发育冰川 U 型谷（图 2b、2c；央金拉姆等，2019）。

与东西两侧地貌形态不同，易贡滑坡源区沟谷地形破碎、地形陡峻、地貌形态多样，为崩滑重力地貌控制，沟谷呈 V 形状，具有孕育大型崩滑体的地貌环境（图 2d）。

(2) 源头山脊地形渐次降低

易贡滑坡源区为高山、极高山陡变带，源区高原面受到强烈破坏。沟谷后缘山脊走向呈近东西向，由西向东高程逐步降低（图 3a、3b）。自易贡滑坡后缘，海拔最高点位于西北角，高程为 5560 m；海拔最低点位于东侧，高程为 5105 m。源区发育 3 条近南北向沟谷，在高程约 3500 m 处汇聚成主沟。3 条近南北向次级支沟将易贡滑坡后缘



a—滑坡源区及临区地貌; b—甲中村至后山地质剖面; c—通加村至后山地质剖面; d—易贡扎木弄沟地质剖面

图2 易贡滑坡及相邻沟谷地质地貌特征

Fig. 2 The geologic and geomorphic characteristics of the Yigong landslide and adjacent valleys

(a) The geomorphic characteristics in the source and adjacent areas; (b) The geological section from Jiazong village to the top of the slope; (c) The geological section from Tongjia village to the top of the slope; (d) The geological section of the Zhamunong gully at Yigong village

分割成4个次级斜坡单元。自西向东,这3条沟谷的宽度依次为200 m、150 m与800 m(图3c)。其中,斜坡S3与S4之间沟谷最宽。源区地形高程、沟谷宽度与构造地貌过程存在密切关系。

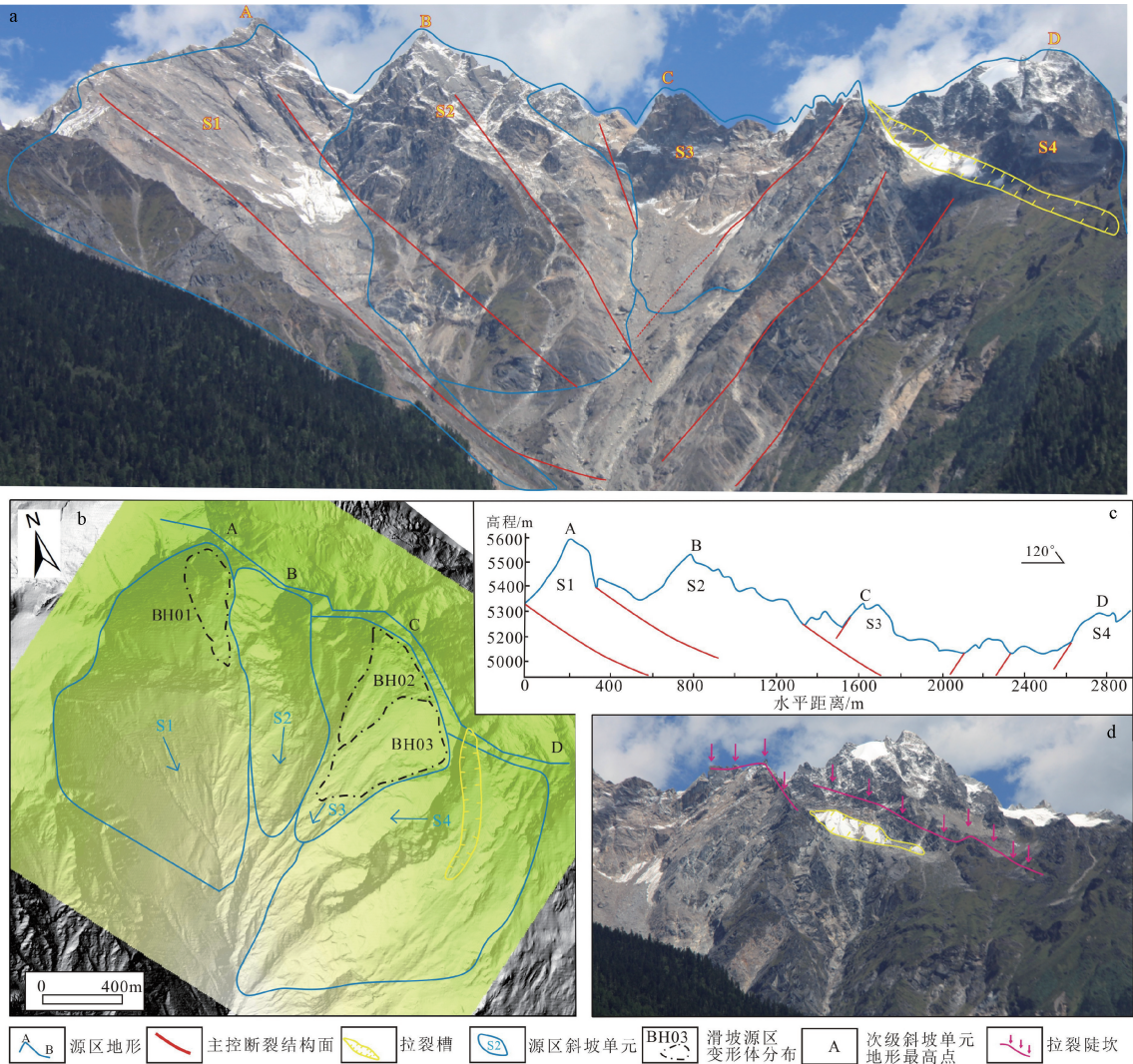
(3) 单面山与裂槽地貌

基于2 m精度数值高程模型,获得了易贡滑坡源区的地形阴影(图3b)。根据地形与坡度分析,4个次级斜坡单元依次为:单面山、两个四面块体、裂槽(图3b—3d)。每个斜坡单元均有着独特的岩体结构特征。其中,斜坡S1呈单面山状,位于沟谷的左侧,坡向东,南北向长约2.7 km,东西宽约0.74 km,高约2.1 km,坡度为25°~32°,可能为1900年滑坡的侧边界(图3a、3b),现存BH01次级变形体。斜坡S2为四面块体状柱形山,南北长约1.2 km,宽约0.79 km,高约1.6 km。四面体山体呈凸出状,发育3组临空面,南西、西北两个方向临空面呈直立状,坡度超过65°,可能为1900年滑坡的侧边界。南东向临空面坡度为25°~32°,系2000年滑坡的控滑结构面之一(图3a、3b)。斜坡S3四面体山体南北长约1.6 km,宽约

0.4 km,发育南西、南东临空面,坡度超过56°。斜坡内部发育BH02和BH03两个次级变形体。南西向结构面系2000年滑坡的主控结构面(图3a、3b)。斜坡S4与S3间发育宽阔的拉裂槽,呈近南北向,槽内地形平缓(图3a、3b、3d),见明显的崩积物堆积,亦具有冰川侵蚀痕迹。该拉裂槽横切整个山脊,沿S4斜坡顶部自南向北延伸,长约3.1 km,重力底劈扩展特征较弱,该特征呈现出较强的构造地貌特征。

3 叠瓦式推覆构造证据

在东构造结以西地区,板块碰撞导致的早期变形主要表现为东西向延伸的逆冲-推覆构造系统和藏南拆离系向北的断裂活动(丁林和钟大赉, 2013; 赵远方等, 2021)。自中新世中期至第四纪,东西向伸展变形可能是南北向挤压的变形分解所致,表现为近南北向断裂的走滑位移、沿东西向断裂的拉张断陷。在形成机制上,东西向伸展形成的构造可能为嘉黎断裂带的共轭走滑断裂



a—源区斜坡单元划分（镜向 NE）；b—源于 2 m 精度地形数据的地貌形态；c—斜坡后缘地形；d—斜坡后缘拉裂槽（镜向 SE）

图 3 易贡滑坡源区地形及其次级地貌单元

Fig. 3 The topography of the Yigong landslide source area and its secondary geomorphic units
(a) The slope zoning in the source area (towards NE); (b) The geomorphology derived from the 2 m precision topographic data;
(c) The geomorphic morphology at the upper edge; (d) The crown cracks at the upper edge (towards SE)

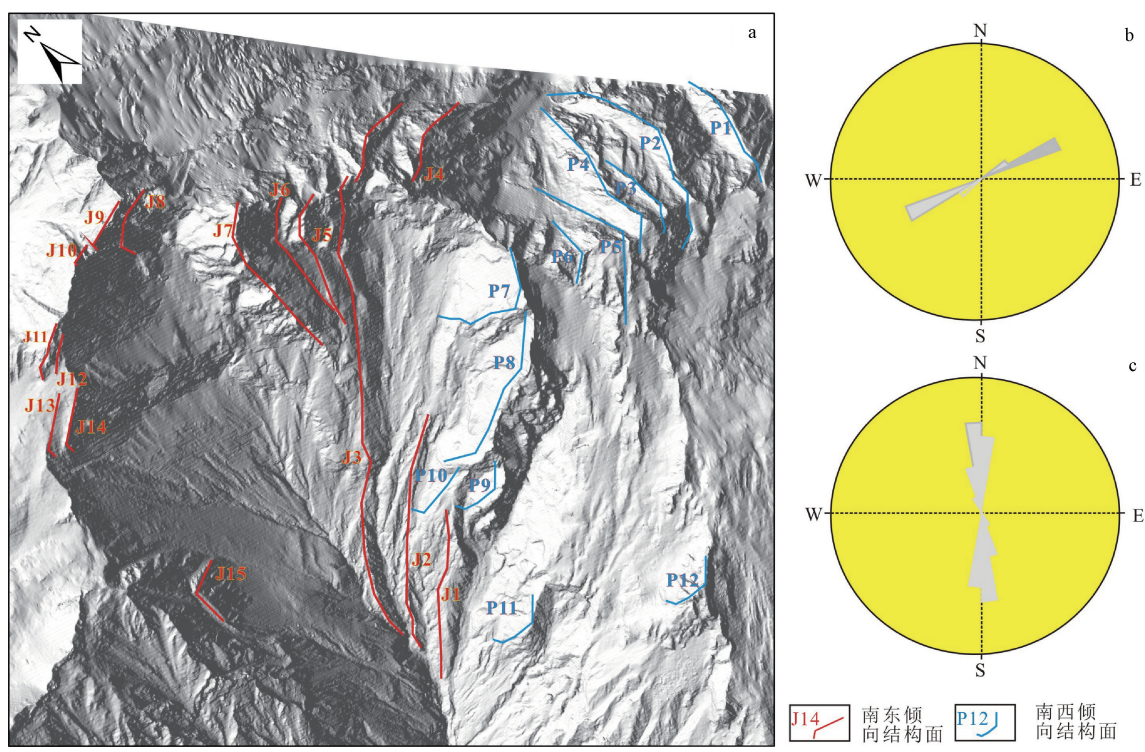
系，指示着南北向挤压的应力状态（张近江等，2003b）。易贡滑坡紧邻东构造的北边界嘉黎断裂带，坡体结构更易受到构造背景的影响。

(1) 两组结构面的解析

高精度地形阴影上清晰可见，源区斜坡具有两组清晰的结构面（图 4a）。其中，第一组结构面（J1—J15）倾向南东（图 4b），与斜坡 S1 的坡向一致，坡度约为 25°~32°，该结构面形成时代较早，呈低角度、逆冲状，与东西向逆冲-推覆过程有关；第二组结构面（P1—P12）倾向南西（图 4c），坡度约 78°，该结构面叠置于 J1 结构面之上，形成时代晚于逆冲结构面，与南北向挤压的

协调变形有关。这两组结构面在易贡湖至通麦大桥段普遍发育，与易贡藏布高边坡平硐内结构面产状相近（杜世回等，2021）。

两组不同产状结构面的产生与区域构造应力环境相关。线路地质调查发现：受到岩层间能干性差异影响，局部有剪切强变形带发育。其中，倾向南东低角度断裂带及构造破碎带（J1—J15）与早期逆冲推覆作用相关，在沟谷上游 4 km 处可见露头（图 5a），其断裂面产状为 103°∠21°。断裂带局部呈压剪韧性-脆性破坏特征，厚度不一（图 5b—5d）。该断裂面的产状与单面山坡体 S1 具有相同的产状。



a—易贡滑坡源区 2m 精度地形及内部结构面展布; b—倾向 SE、走向 NE 结构面投影; c—倾向 W、走向 SN 结构面投影

图 4 易贡滑坡源区主控结构面展布特征

Fig. 4 The distribution characteristics of the main controlling structural planes in the Yigong landslide source area
(a) The topography and the internal structural plane distribution derived from the 2 m precision data; (b) The projection of a SE-dipping and NE-striking structural plane; (c) The projection of a W-dipping and SN-striking structural plane

易贡滑坡的沟谷下游亦可见走滑兼逆冲断裂带, 即倾向南西结构面 (P1—P12), 宽度约 280 m, 发育 4 组断裂面, 局部有强烈的岩体碎裂与泥化现象 (图 5c)。其左边界断层宽约 0.8 m, 产状为 $243^{\circ} \angle 72^{\circ}$ (图 5e), 右边界断层产状为 $150^{\circ} \angle 75^{\circ}$ 。断裂带的中间部位发育强变形带, 见角砾岩和断层泥, 产状为 $154^{\circ} \angle 82^{\circ}$ (图 5f)。上述断裂均未见到清晰的、强活动产生的断层泥, 或多期活动摩擦特征, 第四纪以来的活动特征不明显。

(2) 源区具有叠瓦式构造特征

易贡滑坡源区的低角度逆冲断裂、高角度走滑断裂与东构造结地壳渐进缩短有关, 其组合结构指示了叠瓦式逆冲推覆构造 (图 6a)。按照源区断裂结构面的展布形态, 该组合特征符合逆冲挤压和走滑作用共存的压扭性构造变形模式 (图 6b; Abd El-Wahed et al., 2016; Li et al., 2017)。

在东西向挤压作用下, 西侧斜坡 S1、斜坡 S2 为逆冲推覆构造前缘, 中下构造层深成的变质岩层沿两组逆冲断层推覆至地表, 两组逆冲断层生成序列由西向东排列。从控滑结构面埋深可见: 第

一组断层面 (F1—F3) 埋深超过 3 km, 第二组断层面 (F4—F6) 的埋深超过 2 km (图 6a)。按照上述深度推测: 断层间的层间错动应该为塑性、韧性变形主导, 伴生表层的卸荷脆性破坏。在形成时间上, 可能具有同时期逆冲生成特征, 也可能具有不同期渐进逆冲覆盖特征。

受到持续挤压应力后期, 为协调逆冲推覆构造体变形, 在推覆体的后缘, 易产生南北向的伸展变形。其结构面 (F7) 与逆冲断裂结构面正相交 (图 6a)。但它的层间错动变形量较逆冲断裂变形量小, 断层面产生时期的埋深低于 1 km, 层间剪切多脆性破坏主导。受到岩石能干性、剪切强度差异的影响, 层间错动伴生产生次级结构面以及伴生张裂隙。

在构造地貌连续变化过程中, 易贡滑坡源区初始作为逆冲推覆构造与走滑断裂发育区, 具有局部应变集中特征。在中新世中期至第四纪, 受到区域南北向伸展的影响, 斜坡 S4 也发生了伸展变形 (图 3a)。受先存构造异性、局部地形、冰川侵蚀和重力失稳等多种因素的影响, 在紧邻易贡

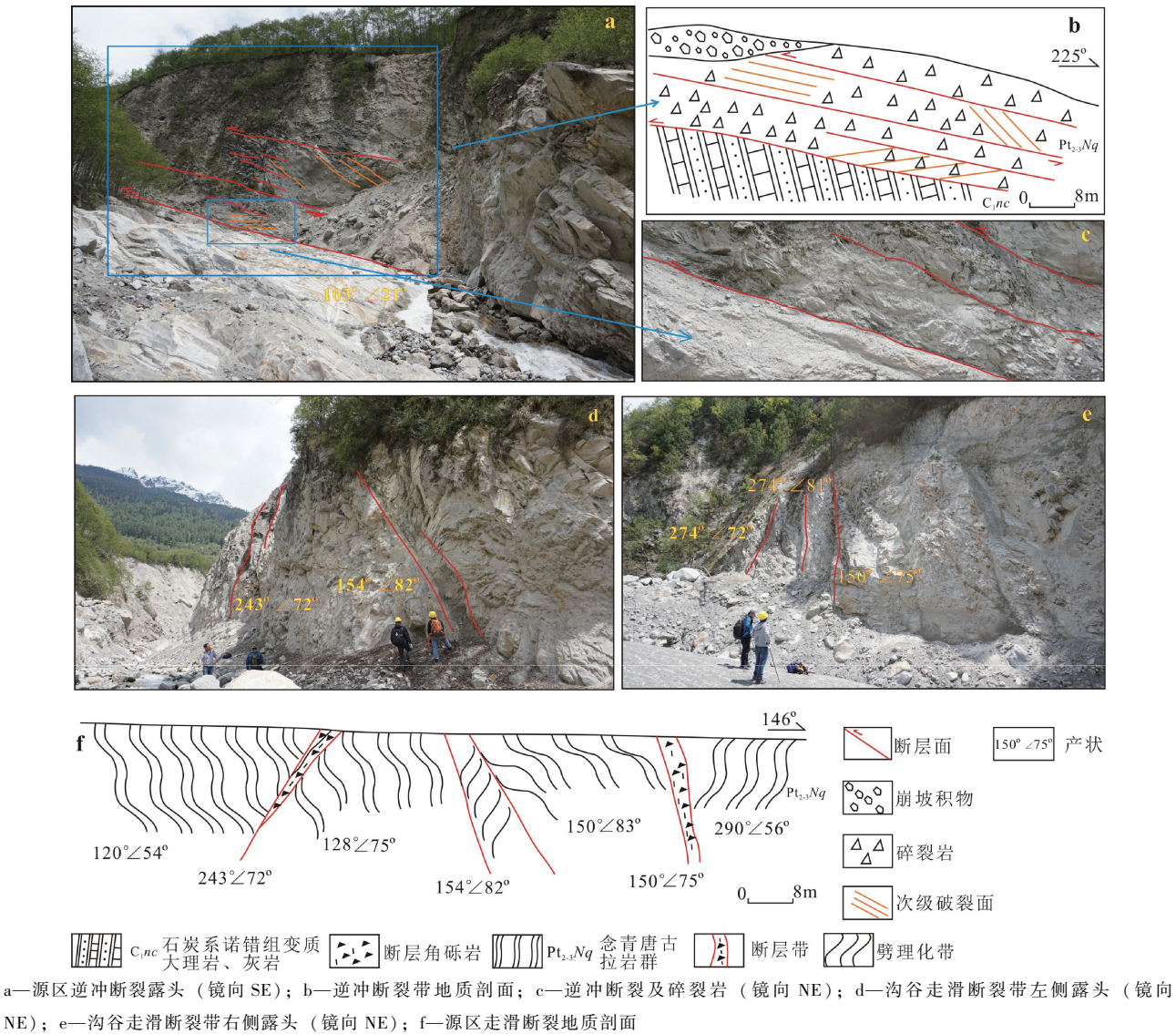


图 5 易贡滑坡源区断裂带露头及其地质剖面
Fig. 5 The outcrop of the fault zone and its geological profile in the Yigong landslide source area
(a) The outcrop of the thrust fault in the source area (towards SE); (b) The geological profile of the thrust-fault zone; (c) The cataclastic rock and the thrust fault (towards NE); (d) The left outcrop of the strike-slip fault zone (towards NE); (e) The right outcrop of the strike-slip fault zone (towards NE); (f) The geological profile of the strike-slip fault in the source area

滑坡源区走滑断裂带区，出现了清晰的张性拉裂槽。平行拉裂槽亦可见多组深度张裂缝（图 3d）。当拉裂槽出现之后，张裂隙逐步加速向坡体下部扩展，并与走滑断裂面贯通，失去后缘张拉应力的坡体逐步沿逆冲断裂结构面楔形体滑出。

4 滑坡学的证据

岩质滑坡多具有蠕滑-拉裂-剪断破坏机制（付小林等，2021；胡乐等，2021；任申，2021；唐鹏，2021；张永双等，2021）。在蠕滑变形阶

段，斜坡沿近水平或缓倾软弱结构面蠕滑，坡体后缘率先产生近直立的拉张裂缝，导致原后缘拉张应力边界解锁，裂缝加速向中前部锁固段发展。持续卸荷作用促使斜坡后缘拉裂扩展至临界深度，坡体前缘的锁固端承受的推力逐渐增大，出现鼓胀现象，后缘滑体的蠕动变形会随之加剧（Bedoui et al.，2009）。当锁固段区内剪切带贯通时，高位岩体会快速滑动、剪出。鉴于上述分析可见：易贡滑坡后缘拉裂槽、张裂缝以及内部断裂软弱带的扩展是滑坡能够启程滑移的关键要素。

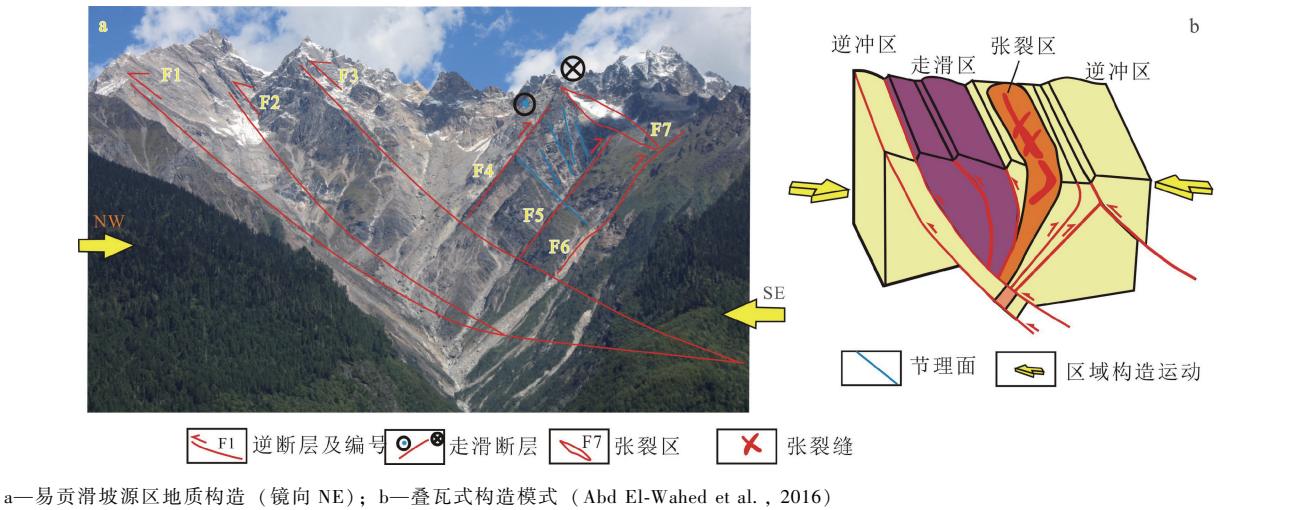


图 6 易贡滑坡源区叠瓦式推覆构造
Fig. 6 The imbricated nappe structures in the Yigong landslide source area
(a) The geological structure in the source area (towards NE) ; (b) The imbricated structural model (Abd El-Wahed et al. , 2016)

(1) 滑面沿着断层破碎带扩展

在 2000 年，易贡巨型滑坡继承了先期的地貌与地质结构。由滑坡形态可见，滑体呈不对称楔形体状（图 7a）。在走滑断裂发育区，坡体 S3 左侧破裂面为主滑面，沿着前期断裂带扩展。破裂面呈近直立状，最大埋深超过 1 km，表面可见清晰的剪切摩擦痕迹（图 7b）。右侧破裂面为次级滑面，面积较小，沿着推覆体的逆冲断层面发育，倾角较缓，受埋深超过 3 km 的韧性剪切带控制。两个滑动面的最大埋深均超出了流域内沟谷卸荷带 50~300 m 的深度（杜世回等，2021），间接佐证易贡滑坡为构造控制滑体。

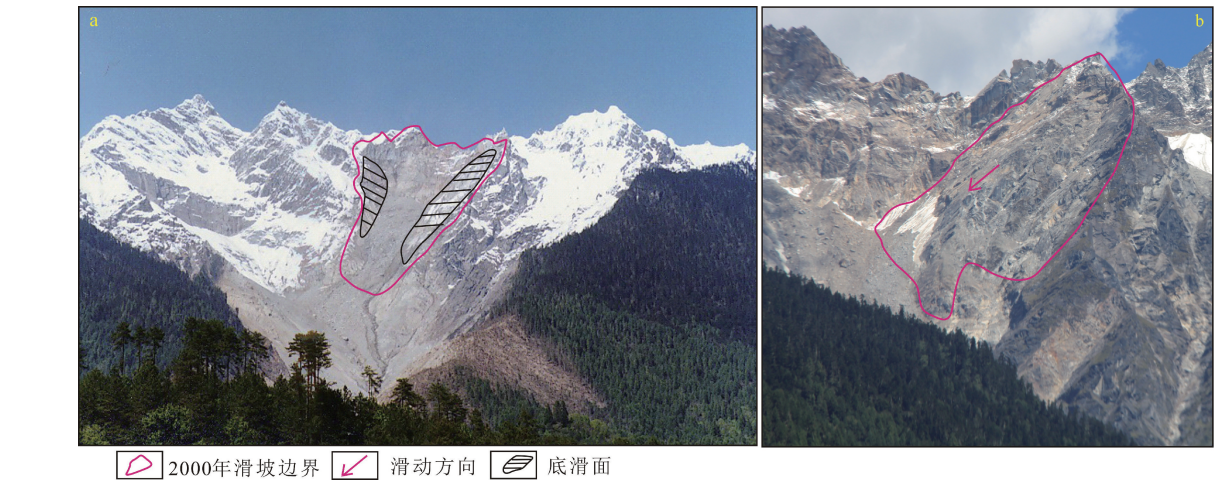


图 7 易贡滑坡 2000 年源区滑面形态
Fig. 7 The slip surface morphology in the Yigong landslide source area in 2000
(a) Double-slip surface of the Yigong landslide (towards NE) ; (b) The main slip surface of the Yigong landslide (towards E)

(2) 主滑面发源于拉裂应力区

后缘的拉裂破坏是滑坡启动滑移的必要条件。受到侧壁边界的限制，重力卸荷型滑坡后缘的张裂缝、陡坎多呈弧形状，倾角多超过 60°。与重力卸荷型滑坡不同，易贡滑坡发育于大型叠瓦式推覆构造体的走滑区与张裂区（图 6b），后缘拉裂缝呈近笔直状，而非弧形状（图 7b）。由此可见，易贡滑坡后缘拉裂区的形态受到区域构造地貌过程影响，沿着南北向拉裂槽扩展。若拉裂槽具有足够的深度，易贡源区斜坡再次活动可能仍会沿着

拉裂缝扩展。

5 讨论

基于上述3方面证据可知,易贡滑坡为深层滑坡,其滑动面位于构造滑移产生的两组局部强变形的断层带内,后缘拉裂缝、拉裂槽为东构造结南北向伸展断裂带。这两组断裂结构面赋存于叠瓦式逆冲推覆构造体内。在内外动力作用下,逐步呈蠕滑-拉裂-剪断式破坏。然而,该大型构造体内的次级断裂带是否具有活动性,易贡滑坡BH01、BH02块体的稳定性与赋存的地质结构间存在什么关系?这两个关键问题影响着源区斜坡稳定性的判断。

(1) 源区断裂带的活动性

走滑断裂带是易贡滑坡源区滑坡体控滑结构面之一,该类断裂有压扭性和张扭性两种形成机制,它们多具有协调地质结构的挤压、拉张变形的作用,是一种重要的转换性构造。由新发现的

走滑兼逆冲剖面可见(图5e—5f),断裂带内强应变带碎粒岩的宽度为0.7 m,角砾岩的宽度约为180 m。结合有限应变理论,按照坚硬岩的应变率为3%~5%反算,控制断裂带变形的块体长度范围在10~18 km(徐连民等,2004;莫云川等,2021)。由此可知,源区的北东向断裂带为局部强变形带,它可能为嘉黎断裂带的共轭走滑断裂系,指示南北向挤压的应力状态(张近江等,2003)。

从断层的活动性而言,断裂具有黏滑、蠕滑两种模式。在黏滑变形作用下,断层面上会发育“镜面构造”,碎裂岩中心会发育断层泥。但在蠕滑变形作用下,韧脆性剪切面发育,常见角砾岩。由调查发现的断层露头可见,断裂带内物质大部分为黏土-碎石屑组合的构造(图8a),灰岩碎屑在剪切方向上具有发散破裂,造成方解石脉和小碎屑发生位错,且无断层泥出露(图8b)。因此,蠕变滑移是北东向断裂带的渐进变形主要形式,动力来源可能为嘉黎断裂带通麦段的大规模滑移。



a—易贡源区走滑断裂带(镜向NE); b—易贡源区走滑断裂带内碎裂岩结构(镜向NE)

图8 易贡源区走滑断裂带及内部碎裂岩结构

Fig. 8 The strike-slip fault zone and its internal cataclastic rocks in the Yigong landslide source area

(a) The strike-slip fault zone (towards NE); (b) The cataclastic rocks in the strike-slip fault zone (towards NE)

(2) 拉裂槽形成的力学机制及效应

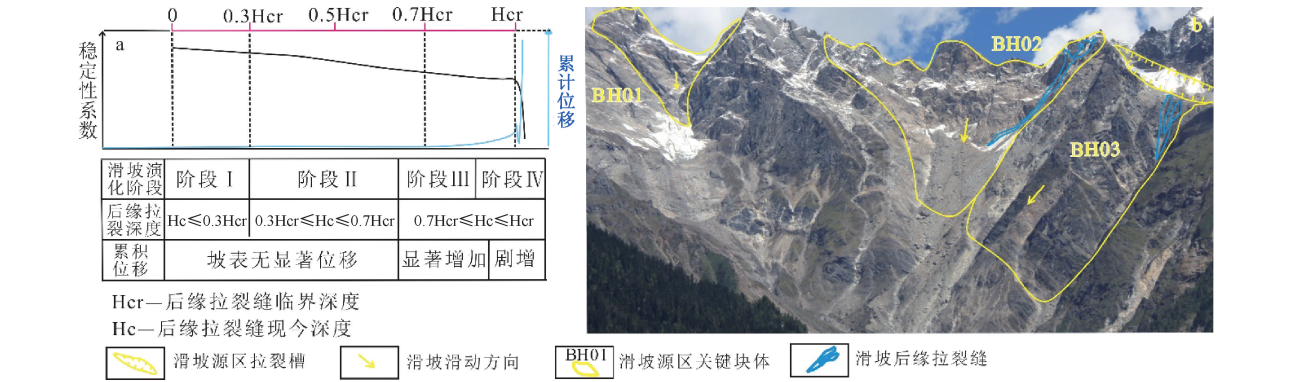
多数大型岩质滑坡的稳定性受控于潜在锁固段强度,蠕滑-拉裂-剪断机制是该类滑坡最主要的破坏模式之一。在初始变形阶段,因重力作用,滑坡前缘沿着软弱结构面蠕滑,斜坡后缘率先出现拉张破坏;当进入快速变形阶段后,滑坡后缘拉裂缝持续向下扩展,直至延伸至斜坡的剪切锁固应力区。因滑坡后缘拉张引力解锁,坡体中前部剪切应力区成为控制坡体滑动关键因素。在此

阶段,因地表水沿着拉张槽汇聚、下渗,滑带强度快速折减,坡体应力重分配后,滑体逐步加速蠕变(张佳佳等,2018; Zhou et al., 2019)。最终,当坡体内赋存水分突然增大时,或者锁固段强度强烈折损时,滑坡体出现高位剪出。

为量化分析上述过程,部分学者从定量实验的角度发现: H_{cr} 为后缘拉裂缝临界深度, H_c 为后缘拉张裂缝现今深度。二者存在如下关系: 当 $0.3H_{cr} \leq H_c \leq 0.7H_{cr}$ 时,坡体表面几乎无显著

的位移; 当 $0.7H_{cr} \leq H_c \leq H_{cr}$, 滑移速度会显著增大, 滑坡体会转入快速破坏阶段 (图 9a)。对比上述关系可知, 以拉裂槽所在的位置为底滑面, 易贡滑坡的 BH02 滑体后缘拉裂缝近乎贯通, 具有快速滑移破坏的风险。此外, 紧邻 BH02 坡体存在另

外一个高度裂隙化坡体 BH03, 该块体后缘与拉裂区相连, 其后缘拉裂缝深度小于 $0.7H_{cr}$, 仍处于缓慢变形转快速滑移的阶段。而相对于上述两个滑体, BH01 坡体后缘其他位置还未见明显的拉裂缝, 整体相对安全 (图 9b)。



a—蠕滑-拉裂-剪断型锁固岩质滑坡早期识别模式 (唐鹏, 2021); b—易贡滑坡源区斜坡变形体分布 (镜向 NE)

图 9 易贡滑坡源区关键块体及其拉裂缝展布形态

Fig. 9 The key blocks in the Yigong landslide source area and the distribution pattern of their tensile cracks
(a) The failure mode of the creep-tension-shear mechanism; (b) The distribution of the deformed slopes in the source area (towards NE)

基于 2 m 精度地形数据的地貌形态 (图 3b) 对 BH02 滑体的矢量测量可知: 该变形区宽约 600 m, 长约 280 m, 高约 800 m, 潜在滑坡体的体积约 $7.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。在蠕动滑移作用下, 当高位变形体自 5000 m 高程位置启动后, 经过下滑、撞击形成的碎屑流会产生强烈的沟道铲刮效应, 裹挟大量松散体, 导致体积剧增。监测 BH02 号高位变形的位移变化趋势成为易贡滑坡源区风险防控的主要关注点。

6 结论

西藏易贡滑坡源区斜坡赋存于独特的地质结构内, 为典型的构造型滑坡。由上述现场地质调查与控滑结构力学解析, 可得到如下结论。

(1) 易贡滑坡为深层滑坡, 源区坡体具有断裂构造地貌特征, 呈不对称状形态。源区斜坡结构赋存于大型叠瓦推覆构造体内, 可分为前缘叠瓦式逆冲断裂区单面山、逆冲断裂区块体、走滑断裂区块体、走滑断裂区北东向拉裂槽 4 个次级斜坡单元, BH01、BH02 与 BH03 共 3 个次级斜坡变形体均赋存于上述结构内。

(2) 易贡源区坡体自北东向裂谷区呈现多级、多期次深层渐进滑移, 具有岩质滑坡蠕滑-拉裂-

剪断型滑动机制。依据后缘拉裂缝扩展的深度推断, 坡体 BH02 具有潜在加速滑移风险, 且坡体 BH03 亦不稳定, 坡体 BH01 相对稳定。

(3) 易贡滑坡源区北东向断裂带为局部强变形带, 可能为嘉黎断裂带的共轭走滑断裂系, 指示南北向挤压的应力状态, 蠕变滑移是断裂带的渐进变形主要形式。在冰雪冻融循环作用下, 拉张槽汇水、导水与剪胀裂隙输水是坡体蠕滑速度逐步加快的主控因素。

致谢: 感谢中国地质科学院地质力学研究所李建华研究员、谭成轩研究员、李滨研究员和中国地质环境监测院冯振教授级高工提出的宝贵意见。

References

ABD EL-WAHED M, HARRAZ H, EL-BEHAIRY M H, 2016. Transpressional imbricate thrust zones controlling gold mineralization in the central eastern desert of Egypt [J]. Ore Geology Reviews, 78: 424-446.

DAI X J, YIN Y P, XING A G, 2019. Simulation and dynamic analysis of Yigong rockslide-debris avalanche-dam breaking disaster chain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30 (5): 1-8. (in Chinese with English abstract)

DING L, ZHONG D L, 2013. The tectonic evolution of the eastern Himalaya syntaxis since the collision of the Indian and Eurasian plates [J]. Chinese Journal of Geology, 48 (2): 317-333. (in Chinese)

- with English abstract)
- DU S H, ZHANG X Y, ZHANG G C, et al., 2021. Development characteristics of unloading zones of high and steep bank slope in the Yiong Tsangpo of Tibet and its engineering significance [J]. Geological Bulletin of China, 40 (12): 2043-2051. (in Chinese with English abstract)
- EL BEDOUI S, GUGLIELMI Y, LEBOURG T, et al., 2009. Deep-seated failure propagation in a fractured rock slope over 10, 000 years: The La Clapière slope, the south-eastern French Alps. Geomorphology, 105 (3-4): 232-238.
- FU X L, TANG M G, YE R Q, et al., 2021. Study on deformation and stability of hydrodynamic landslide under different reservoir water fluctuation modes [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 52 (1): 201-211. (in Chinese with English abstract)
- GUO C B, MONTGOMERY D R, ZHANG Y S, et al., 2020. Evidence for repeated failure of the giant Yigong landslide on the edge of the Tibetan Plateau [J]. Scientific Reports, 10 (1): 14371.
- HU L, XIN P, WANG T, et al., 2021. Centrifuge model tests on the near-horizontal slide of hard soil-soft rock landslides [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- HU M J, CHENG Q G, WANG F W, 2009. Experimental study on formation of Yigong long-distance high-speed landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28 (1): 138-143. (in Chinese with English abstract)
- LHAMO Y, JI J Q, XU Q Q, et al., 2019. Fluvial geomorphological characteristics and its evolution of the Parlung Zangbo in Southeast Tibet [J]. Chinese Journal of Geology, 54 (4): 1062-1084. (in Chinese with English abstract)
- LI J, CHEN N S, OUYANG C J, et al., 2017. Volume of loose materials and the analysis of possibility of blocking and dam break triggered by debris flows in Zhamunonggou [J]. Journal of Catastrophology, 32 (1): 80-84, 116. (in Chinese with English abstract)
- LI J, CHEN N S, LIU M, et al., 2018. Analysis of main factors for landslide-triggered debris flow in Zhamunong gully on April 9th, 2000 [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 16 (6): 187-193. (in Chinese with English abstract)
- LI J H, ZHANG Y Q, ZHAO G C, et al., 2017. New insights into Phanerozoic tectonics of South China: early Paleozoic sinistral and Triassic dextral transpression in the east Wuyishan and Chencai domains, NE Cathaysia [J]. Tectonics, 36 (5): 819-853.
- LIU W, 2002. Study on the characteristics of huge scale-super Highspeed-long distance landslide chain in Yigong, Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 13 (3): 9-18. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong Landslide in Tibet under strong earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 471-480. (in Chinese with English abstract)
- LU X Y, YANG M G, ZHAO D, et al., 2000. Causes and outburst analysis of a large landslide in Zhamulonggou, Yigongzangbu, Tibet [C] //Proceedings of the sixth National Engineering Geology Congress. Beijing: Geological Society of China: 263-264. (in Chinese)
- LV J T, WANG Z H, ZHOU C H, 2003. Discussion on the Occurrence of Yigong Landslide in Tibet [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 28 (1): 107-110. (in Chinese with English abstract)
- MO Y C, ZUO S Y, WU Z T, et al., 2021. Experiment study on in-situ shearing characteristics and crack propagation of shale structural plane [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 52 (3): 134-143. (in Chinese with English abstract)
- REN S, 2021. Numerical simulation study on the stability of unfavorable geological bodies of a high speed railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 47 (6): 39-43. (in Chinese with English abstract)
- TANG P, 2021. Study on critical tension depth and stability in rockslides that conform to the “creep-tension-shear” mechanism [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z, ZHAO C Y, LIU X J, et al., 2021. Evolution analysis and deformation monitoring of Yigong landslide in Tibet with optical remote sensing and InSAR [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 46 (10): 1569-1578. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z H, LV J T, 2001. Understand Yigong landslide in Tibet based on the satellite image [J]. Journal of Remote Sensing, 5 (4): 312-316. (in Chinese with English abstract)
- WU A Q, 2019. Series methods of analyzing rock mass stability based on key block theory and their applications to Three Gorges Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 36 (2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- XU L M, WANG T Z, QI D Q, et al., 2004. Study on geotechnical shear band localization: retrospect and prospect [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 25 (4): 484-489. (in Chinese with English abstract)
- XU Q, WANG S T, CHAI H J, et al., 2007. The rock avalanche-flow landslide event in Yigong of Tibet [C] //Proceedings of the first Academic Conference on Rock mechanics and Engineering Examples in China. Sanya: Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering: 53-58. (in Chinese)
- XUE L, QIN S Q, PAN X H, CHEN H G, 2018. Mechanism and physical prediction model of instability of the locked-segment type slopes [J]. Journal of Engineering Geology, 26 (1): 179-192. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y P, 2000. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 27 (4): 8-11. (in Chinese with English abstract)
- YUAN H, GUO C B, WU R A, et al., 2021. Research progress and prospects of the giant Yigong long run-out landslide, Tibetan Plateau, China [J/OL]. Geological Bulletin of China, 1-19 (2021-12-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZQYD20211224001&uniplatform=NZKPT&v=6NsVd1mv4-TVf339iB4QJtZUauj0xYWfAZlPDk7X7nkxg43Nada9LHIKwA9CQp8>. (in Chinese with English abstract)

abstract)

ZHANG J J, DING L, 2003. East-west extension in Tibetan Plateau and its significance to tectonic evolution [J]. Chinese Journal of Geology, 38 (2): 179-189. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J J, JI J Q, ZHONG D L, et al., 2004. Structural pattern of eastern Himalayan Syntaxis in Namjagbarwa and its formation process [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 47 (2): 138-150.

ZHANG J J, LIU J K, GAO B, et al., 2018. Characteristics of material sources of Galongqu glacial debris flow and the influence to Zhamo road [J]. Journal of Geomechanics, 24 (1): 106-115. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y S, DU G L, GUO C B, et al., 2021. Research on typical geomechanical model of high-position landslides on the Sichuan-Tibet traffic corridor [J]. Acta Geologica Sinica, 95 (3): 605-617. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y F, GONG W B, JIANG W, et al., 2021. Multi-stage characteristics and tectonic significance of the Jiali fault in Guxiang-Tongmai section, South Tibet [J]. Geoscience, 35 (1): 220-233. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J W, CUI P, HAO M H, 2016. Comprehensive analyses of the initiation and entrainment processes of the 2000 Yigong catastrophic landslide in Tibet, China [J]. Landslides, 13 (1): 39-54.

附中文参考文献

戴兴建, 殷跃平, 邢爱国, 2019. 易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 30 (5): 1-8.

丁林, 钟大赉, 2013. 印度与欧亚板块碰撞以来东喜马拉雅构造结的演化 [J]. 地质科学, 48 (2): 317-333.

杜世回, 张晓宇, 章广成, 等, 2021. 西藏易贡藏布高陡岸坡卸荷带发育特征及其工程意义 [J]. 地质通报, 40 (12): 2043-2051.

付小林, 汤明高, 叶润青, 等, 2021. 不同库水消落方式下水压力型滑坡变形与稳定性响应研究 [J]. 水利水电技术, 52 (1): 201-211.

胡乐, 辛鹏, 王涛, 等, 2021. 硬土软岩滑坡近水平滑移的离心机模型试验研究 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 73-82.

胡明鉴, 程谦恭, 汪发武, 2009. 易贡远程高速滑坡形成原因试验探索 [J]. 岩石力学与工程学报, 28 (1): 138-143.

李俊, 陈宁生, 欧阳朝军, 等, 2017. 扎木弄沟滑坡型泥石流物源及堵河溃坝可能性分析 [J]. 灾害学, 32 (1): 80-84, 116.

李俊, 陈宁生, 刘美, 等, 2018. 2000 年易贡乡扎木弄沟滑坡型泥石流主控因素分析 [J]. 南水北调与水利科技, 16 (6): 187-193.

刘伟, 2002. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 13 (3): 9-18.

刘铮, 李滨, 贺凯, 等, 2020. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 471-480.

鲁修元, 杨明刚, 赵丹, 等, 2000. 西藏易贡藏布扎木弄沟特大型滑

坡成因及溃决分析 [C] //第六届全国工程地质大会论文集. 北京: 中国地质学会: 263-264.

吕杰堂, 王治华, 周成虎, 2003. 西藏易贡大滑坡成因探讨 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 28 (1): 107-110.

莫云川, 左双英, 吴占廷, 等, 2021. 页岩结构面原位剪切特性及裂缝扩展试验研究 [J]. 水利水电技术, 52 (3): 134-143.

任申, 2021. 某高速铁路不良地质体稳定性研究 [J]. 铁道勘察, 47 (6): 39-43.

唐鹏, 2021. “蠕滑-拉裂-剪断”型锁固岩质滑坡后缘拉裂临界深度与稳定性研究 [D]. 成都: 成都理工大学.

王哲, 赵超英, 刘晓杰, 等, 2021. 西藏易贡滑坡演化光学遥感分析与 InSAR 形变监测 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 46 (10): 1569-1578.

王治华, 吕杰堂, 2001. 从卫星图像上认识西藏易贡滑坡 [J]. 遥感学报, 5 (4): 312-316.

邹爱清, 2019. 基于关键块体理论的岩体稳定性分析方法及其在三峡工程中的应用 [J]. 长江科学院院报, 36 (2): 1-7.

徐连民, 王天竹, 祁德庆, 等, 2004. 岩土中的剪切带局部化问题研究: 回顾与展望 [J]. 力学季刊, 25 (4): 484-489.

许强, 王士天, 柴贺军, 等, 2007. 西藏易贡特大山体崩塌滑坡事件 [C] //中国岩石力学与工程实例第一届学术会议论文集. 三亚: 中国岩石力学与工程学会: 53-58.

薛雷, 秦四清, 泮晓华, 等, 2018. 锁固型斜坡失稳机理及其物理预测模型 [J]. 工程地质学报, 26 (1): 179-192.

央金拉姆, 李建清, 徐芹芹, 等, 2019. 藏东南帕隆藏布现今河流地貌特征及其晚第四纪演化 [J]. 地质科学, 54 (4): 1062-1084.

殷跃平, 2000. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J]. 水文地质工程地质, 27 (4): 8-11.

袁浩, 郭长宝, 吴瑞安, 等, 2021. 西藏易贡高位远程滑坡研究进展与展望 [J/OL]. 地质通报, 1-19 (2021-12-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZQYD20211224001&uniplatform=NZKPT&v=6NsVd1mv4-TVf339iB4QJJtzUauj0xYWfAZlPDk7X7nkxg43Nada9LHlKwA9CQp8>.

张佳佳, 刘建康, 高波, 等, 2018. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 106-115.

张进江, 丁林, 2003. 青藏高原东西向伸展及其地质意义 [J]. 地质科学, 38 (2): 179-189.

张进江, 李建清, 钟大赉, 等, 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨 [J]. 中国科学 (D 辑), 33 (4): 373-383.

张永双, 杜国梁, 郭长宝, 等, 2021. 川藏交通廊道典型高位滑坡地质力学模式 [J]. 地质学报, 95 (3): 605-617.

赵远方, 公王斌, 江万, 等, 2021. 藏南嘉黎断裂古乡-通麦段多期活动特征及其构造意义 [J]. 现代地质, 35 (1): 220-233.