

大型红层缓倾岩层滑坡形成机制 ——以川北断渠滑坡为例

唐 然^{1,2}, 任穗川¹, 范宣梅², 许 强²

1. 成都大学 建筑与土木工程学院, 成都 610106

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), 成都 610059

[摘要] 大型缓倾岩层滑坡在红层地区广泛分布, 由于滑前迹象不明显, 很难做到早期防范。为了探索此类滑坡的风险斜坡判识和早期识别, 以四川北部南江县断渠滑坡为例, 从孕灾地层沉积相和岩性组合特征、区域地质构造演化和层间剪切带发育特征等角度, 分析了该滑坡的形成机制。该滑坡体积约为 $1.153 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主滑方向总体向南(170°), 为一特大型缓倾岩层古滑坡。滑坡发育于侏罗系中统沙溪庙组上段和沙溪庙组下段交界部位, 是岩性和岩相的转换面。沉积相的组合特征决定了斜坡上硬下软的坡体结构。滑坡位于四川盆地北缘新华向斜北西翼, 受到了多期地质构造作用, 米仓山南缘前陆盆地盖层底部楔入冲断构造模式产生了上部地层原地掀斜效应, 增加了层间机械破碎作用, 并且软硬2个系列地层交界处应力更易集中, 在孕灾地层上下厚度约80 m范围内共计发育了数10条层间剪切带。在地下水大量参与下, 破碎程度高且原岩含大量黏土矿物的层间剪切带被逐渐泥化, 为滑坡下滑提供了力学条件。

[关键词] 缓倾岩层滑坡; 断渠滑坡; 沉积相; 构造模式; 形成机制

[分类号] P642.22

[文献标志码] A

Formation mechanism of large-scale red bed gently inclined strata landslide: Taking Duanqu landslide in north Sichuan as an example

TANG Ran^{1,2}, REN Suichuan¹, FAN Xuanmei², Xu qiang²

1. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. State key laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: Large-scale slow dip landslides are widely distributed in the red bed area, and it is difficult to

[收稿日期] 2024-04-24。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(42293353)。

[第一作者] 唐然(1983—), 男, 副教授, 研究方向: 地质灾害成因机理与监测预警, E-mail: 546488149@qq.com。

[通信作者] 范宣梅(1981—), 女, 教授, 研究方向: 地质灾害风险评估, E-mail: fxm_cdut@qq.com。

[引用格式] 唐然, 任穗川, 范宣梅, 等, 2024. 大型红层缓倾岩层滑坡形成机制——以川北断渠滑坡为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(4): 673-686.

Tang R, Ren S C, Fan X M, et al., 2024. Formation mechanism of large-scale red bed gently inclined strata landslide: Taking Duanqu landslide in north Sichuan as an example[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(4): 673-686.

prevent them early because the signs before sliding are not apparent. In order to study the potential risk of such landslides slope identification and early warning, the formation mechanism of the Duanqu landslide in northern Sichuan basin is analyzed in this study, with a focus on several key aspects including the sedimentary facies and lithological combination characteristics of the disaster-prone strata, the regional geological tectonic evolution, and the basic features of interlayer shear zones in bed rock around the landslide. The volume of the landslide is approximately $1.153 \times 10^4 \text{ m}^3$, with a main sliding direction of 170° . Duanqu landslide is a large-scale, thick-layer, gently inclined strata ancient landslide. The disaster-prone strata of the landslide are situated at the junction of the Middle Jurassic Upper Shaximiao Formation and Lower Shaximiao Formation, marking a lithological and lithofacies transition zone. The combination characteristics of sedimentary facies determine the slope's structure of hard on top and soft on the bottom. The Duanqu landslide is located on the northern margin of the Sichuan Basin, on the northwestern wing of the Xinhua syncline, and has been subjected to multiple phases of geological tectonic activity. The wedge thrust tectonic mode at the base of the foreland basin cover on the southern margin of the Micang Mountain has induced an in situ tilting effect on the upper layers, resulting in the regional occurrence of shallow monoclinical red beds. This deformation pattern is more prone to generate layer disturbances distributed throughout the entire layer along the stratigraphic tilting range, thereby increasing interlayer mechanical fragmentation to some extent, and the junction between the soft and hard strata is more prone to stress concentration, which make dozens of interlayer shear zones distributed surrounding the disaster-breeding strata within the thickness range about 80 meters. With significant groundwater involvement, these interlayer shear zones, characterized by high degrees of fragmentation and containing abundant clay minerals in the parent rock, gradually become mud, which providing mechanical conditions for sliding.

Key words: gently inclined strata landslide; Duanqu landslide; sedimentary facies; structural pattern; formation mechanism

红层是各地质历史时期沉积的红色岩系的总称(彭华等,2013),在中国广泛分布,是一类著名的“易滑地层”。西南山区是中国红层分布最为集中的地区,分布大量危害巨大、成因复杂的滑坡,缓倾岩层滑坡是其中最典型的类型之一(许强和唐然,2020)。此类滑坡孕育在传统认为较为稳定的缓倾单斜地层斜坡中,倾角一般在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 左右,其成因机理较为特殊,具有显著的群发性。2011年9月,川北南江县红层地区在极端强降雨下诱发上千处滑坡,其中岩质滑坡 577 处,超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型岩质滑坡数十处,皆为缓倾岩层滑坡(张涛等,2013;李江等,2016;卢远航,2016;张凡等,2017)。2014年9月,特大暴雨在三峡库区共诱发 2 000 多处滑坡,超过 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上的大型滑坡达 55 处,其中不乏缓倾岩层滑坡(李滨等,2016),造成了大量的人员伤亡与财产损失。

对红层缓倾岩层滑坡的研究主要集中在形成条件、失稳模式及软弱层的水岩作用方面。单斜红层地层中存在的层间剪切带、泥化夹层等软弱层是平缓岩层滑坡发生的必要条件(胡泽铭,2013;Zhang et al.,2016;许强和唐然,2023)。此类滑坡的失稳模式主要为平推-滑移和滑移-拉裂 2 种模式。前者的力学模式与平推式滑坡类似,存在后缘静水推力与基底扬压力作用,孔隙水压力过大时可能会导致滑带土液化而使滑坡产生远程滑移(张涛等,2013)。若软弱层几乎完全泥化后,其强度受含水率影响较大,随浸水时间呈指数衰减,因此滑带饱水软化范围足够大时,则以滑移-拉裂模式失稳(李江等,2016;Zhang et al.,2016)。

大型红层缓倾岩层古滑坡的主体结构大部分都与基岩相似,也即假基岩(王子忠等,2011;曾锦秀,2014;赵勇等,2018;宋国虎等,2022)。此类古

老滑坡在不受外界影响的情况下可以长期保持基本稳定,但随着滑带在地下水长期作用下黏土矿物含量增加,古老滑坡会出现缓慢蠕变特征(Jian et al., 2009; Xu et al., 2016)。在受到库水水位升降、地貌改造等因素影响时,古滑坡体易产生局部复活(王子忠等, 2011; 章志峰, 2011; Zhao et al., 2014; 陶盛宇, 2020)。在特殊条件下可能会诱发再次整体大规模滑移,如强震后的特大暴雨导致了都江堰三溪村滑坡整体复活(Yin et al., 2016; Wu et al., 2017; Pei et al., 2022)。

断渠滑坡是典型的大型红层缓倾岩层滑坡,经过年代测试判断其为发生于更新世末期的古滑坡(王森, 2017)。断渠滑坡体积超过千万立方米,具有独特的破坏模式,包括了整体滑移-拉裂、旋转滑移-拉裂和“迷宫式”滑移-拉裂3种。“断渠”因滑坡体发育多条规模较大的拉陷槽而得名,到目前为止,断渠滑坡尚未出现复活变形的历史记录。红层缓倾岩层斜坡结构在西南红层地区广泛发育,近年来随着极端气候的频繁出现,多个大型缓倾岩层滑坡不断被诱发形成(陶盛宇, 2020; 吴鑫鑫, 2021; 雍平, 2021; 朱赛楠等, 2021; 宋国虎等, 2022)。由于这类滑坡滑前迹象不明,很难做到早期防范,使得防灾减灾常处于被动状态。本

文以断渠滑坡为主要研究对象,从沉积相及岩性组合特征、地质构造演化等方面分析研究该滑坡的形成机制,总结了其孕灾地质条件的特殊性,以期做到对此类滑坡潜在风险斜坡判识、早期识别和防灾避险提供有益的借鉴。

1 断渠滑坡概况

1.1 区域地质背景

断渠滑坡构造部位处在扬子准地台的北缘,米仓山推覆构造带与四川盆地北部边缘过渡带上,位于新华向斜北西翼,地理位置及构造纲要图如图1所示。断渠滑坡位于四川北部南江县城北碾盘山,地貌类型属浅中切割单面山地貌,海拔高度480~760 m。断渠滑坡发育于山体南坡,斜坡倾向约175°,地表坡度为13°~17°。滑坡区域地层为侏罗系沙溪庙组(J_2s),岩性为砂泥岩不等厚互层,岩层产状 $165^\circ\sim 171^\circ\angle 14^\circ\sim 16^\circ$ 。滑坡发育在沙溪庙组下段(J_2s^1)与上段(J_2s^2)地层界面附近,斜坡表层覆盖数十米厚沙溪庙组上段巨厚层长石石英砂岩,下伏以紫红色泥质类岩石为主的沙溪庙组下段地层,其中夹少量厚度不稳定的浅灰色砂岩层。断渠滑坡全貌如图2所示。

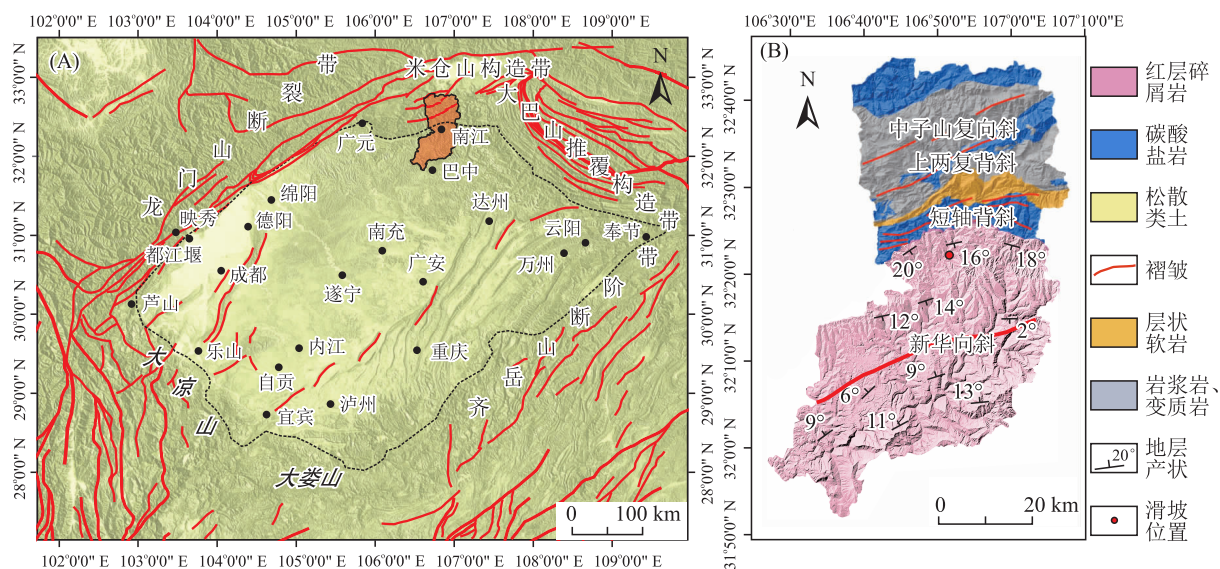


图1 南江县地理位置及地质构造纲要图

Fig. 1 Outline map of geographic location and geological structure

(A) 四川盆地构造纲要图及南江县地理位置; (B) 南江县构造纲要图及断渠滑坡地理位置

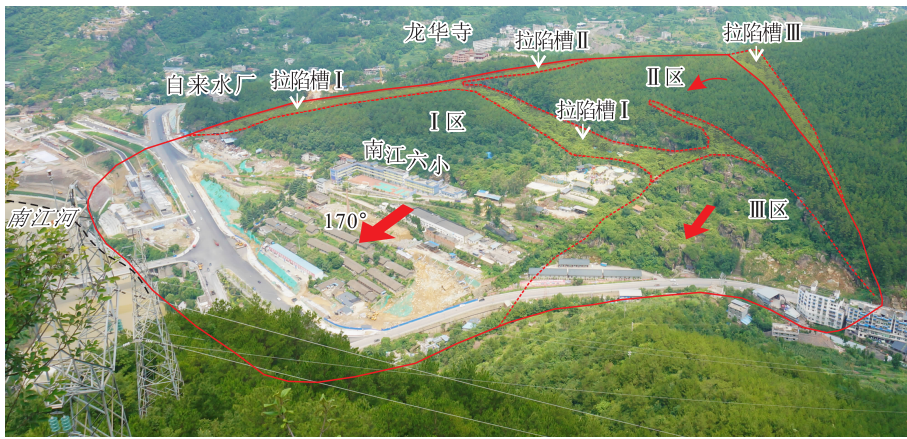


图 2 四川北部南江县断渠滑坡全貌

Fig. 2 Full view of Duanqu landslide, Nanjiang County, northern Sichuan Province

I 区:整体滑移区, II 区:旋转-滑移区, III 区:滑移解体区

1.2 滑坡边界规模与分区特征

断渠滑坡整体形态呈五边形,滑坡后缘边界沿北东向展布,总体上以分水岭为界,两侧边界以拉陷槽为界,并延伸至南江河及石船沟内。滑坡前缘中部及右侧进入南江河,现被冲洪积层、防洪坝肩、河堤及建筑物覆盖,局部零星出露滑体结构;前缘左侧滑体充填石船沟,沟内可见大量巨型

块石,如图 3 所示。滑坡区总面积约为 $36.17 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体厚度 $15 \sim 39 \text{ m}$,体积约为 $1\ 153 \times 10^4 \text{ m}^3$;主滑方向总体向南为 170° ,为一特大型厚层单斜岩质古滑坡。

断渠滑坡发育的 3 条长大拉陷槽组成了滑坡边界及分区边界,均为滑坡滑移后形成。拉陷槽的发育特征能大致判断滑体的运动特征,其平面



图 3 断渠滑坡发育特征平面图

Fig. 3 Duanqu landslide basic characteristics plan

(A)断渠滑坡平面分区;(B)拉陷槽 I 前缘横断面;(C)龙华寺东侧拉陷槽 II;(D)拉陷槽 I 中部;
(E)拉陷槽 III 东侧陡壁;(F)石船沟内滑坡堆积体;(G)石船沟内残留巨石;(H)古滑体充填石船沟

分布见图3-A所示。拉陷槽I为滑坡I区滑动后与后部及右侧边界岩体分离形成。后缘拉陷槽延伸方向大致为NE 79°,深度18~25 m,宽度5~59 m(图3-D)。右侧边界拉陷槽延伸方向大致为NE 24°,深度3~10 m,宽度5~20 m。滑坡中前部开挖揭露了右侧边界拉陷槽I的横断面(图3-B),其内主要充填块石土。拉陷槽II为II区滑体与龙华寺部位基岩分离后形成(图3-C),形成II区滑体西侧边界。拉陷槽III为II区滑体右

侧边界(图3-E),开口宽度约29 m,向南东方向逐渐变为窄缝直至消失,反映出II区滑体逆时针旋转滑移变形的特征。

根据变形特征及结构特征将其分为3个变形区:整体滑移区(I区),旋转-滑移区(II区),滑移解体区(III区),各分区特征详见表1。其中I区为主滑区,滑动距离最长,方量最大。II区为牵引变形区,III区位于I区左侧边界外,受I区滑动影响产生滑移。

表1 断渠滑坡分区特征表

Table 1 Regional characteristics of Duanqu landslide

滑坡分区	横宽/m	纵长/m	面积/10 ⁴ m ²	体积/10 ⁴ m ³	基本特征
整体滑移区 (I区)	470~590	400	22.0	704	平面上呈梯形,滑体沿滑带产生整体滑移,前缘进入南江河及石船沟
旋转滑移区 (II区)	85~415	285	9.6	289	平面上呈钝角三角形形态,以南东角为支点整体产生逆时针旋转滑移变形
滑移解体区 (III区)	108~332	22	5.0	160	平面呈圈椅状,滑体已完全解体为块石、石柱,表现为“迷宫式”滑坡的形态

1.3 滑体及滑带结构特征

滑体主要为J₂s²底部的米黄色~棕黄色巨厚层长石石英砂岩,滑体底部包含了J₂s¹顶部的砂质泥岩和砂岩透镜体,滑带发育在粉砂质泥页岩中,滑床为砂质泥岩夹薄层粉砂岩。工程地质剖面图见图4。滑体I区基本保持了原有层状结构,滑体石英砂岩心完整,强度较高,紫红色砂质泥岩层岩心多为碎裂结构。滑体由于整体滑移,前缘左侧滑体将石船沟充填(图3-G~H),岩层出现反翘和层间剪裂(图4-B)。滑坡I区滑带成分主要为紫红色粉质黏土夹具有一定磨圆的砾石。总体上从上到下滑带的黏粒含量逐渐增加,滑带以下岩心的破碎程度也逐渐增加(图4-A)。

II区滑体石英砂岩层岩心与I区滑体类似,下部砂质泥岩层岩心多呈短柱状和块状。II区后部边界靠近分水岭处巨厚层石英砂岩层被拉裂,岩体向后倾倒形成空腔(图4-B~C)。该区滑带主要为碎裂泥岩,含少量粉粒和黏粒(图4-B~C)。

III区滑体结构与I区及II区有较大差异,滑体已完全解体,地表可见大量柱状巨石矗立、倾倒。钻探揭露巨石之间主要充填大块石及碎石土,碎石土体积含量约占20%~30%。滑体表层为石英砂岩块碎石土,深层为砂质泥岩块石土。滑带以碎砾石为主,夹少量粉粒黏粒,物质组成与滑坡II区接近(图4-C)。

2 孕灾地层沉积相与岩性组合特征

斜坡体的岩性组合是滑坡产生的主要内因之一,地层的沉积环境对于地层的物质成分有至关重要的作用,地层沉积时的古气候特征、区域构造、沉积物质和后生作用等控制着地层岩性(李晓等,2008)。滑坡孕灾地层层位处于侏罗纪中统上沙溪庙组(J₂s²)和下沙溪庙组(J₂s¹)交界部位,是岩性、岩相的转换面。中侏罗世时期盆地周边山系的活动加强,沉积相以湖相沉积为主转变为以河流相沉积为主(王永标和徐海军,2001),四川盆地从陆内坳陷盆地沉积期过渡为山前坳陷盆地沉积期,沉积湖盆从扩张过渡为收缩,湖盆扩张期晚期大致相当于J₂s¹沉积时期,J₂s²沉积期为湖盆收缩期早期(李朝辉,2016)。

滑坡区出露地层为曲流河沉积相,沉积相与岩性组合特征如图5所示,露头如图6-A~G所示,露头点位分布如图6-H所示。J₂s²底部为河道边滩沉积相,形成一套厚度40~50 m左右的米黄色巨厚层长石石英砂岩,该层在川北地区J₂s²底部稳定发育(钱利军,2013)。滑体内多处可见大型楔状交错层理、槽状交错层理、浪成交错层理(图6-B~D),显示多期河道砂体。其上为泛滥平原相紫红色至灰绿色中厚层泥岩-暗色砂质泥岩夹暗色块状细砂岩(图6-A)。滑坡区外局部

可见 J_2s^2 底部砂岩与 J_2s^1 顶部泥页岩间的底冲刷面。 J_2s^1 顶部为溢岸沼泽沉积相,发育数十厘米厚青灰色-深灰色砂质页岩(图 6-E)。其下为泛滥平原相沉积,上部为 4~5 m 厚紫红色粉砂质泥岩,含浅灰色粉细砂岩透镜体,形成了泥岩占比较高的岩性组合,呈现出“泥包砂”特征。下伏规模较大紫红色泥岩,夹灰褐色粉细砂岩,向上多

以薄层状发育于泥岩中(图 6-F);下部为厚层紫红色粉砂质泥页岩(图 6-G)。综上所述,滑坡总体上发育在 2 个相邻的正粒序沉积旋回底部和顶部交界处附近。上覆沉积旋回的底部为硅质-钙质胶结米黄色石英砂岩,下伏沉积旋回顶部为泥质胶结砂质泥岩,形成了力学性质差异极大的上硬下软的坡体结构。

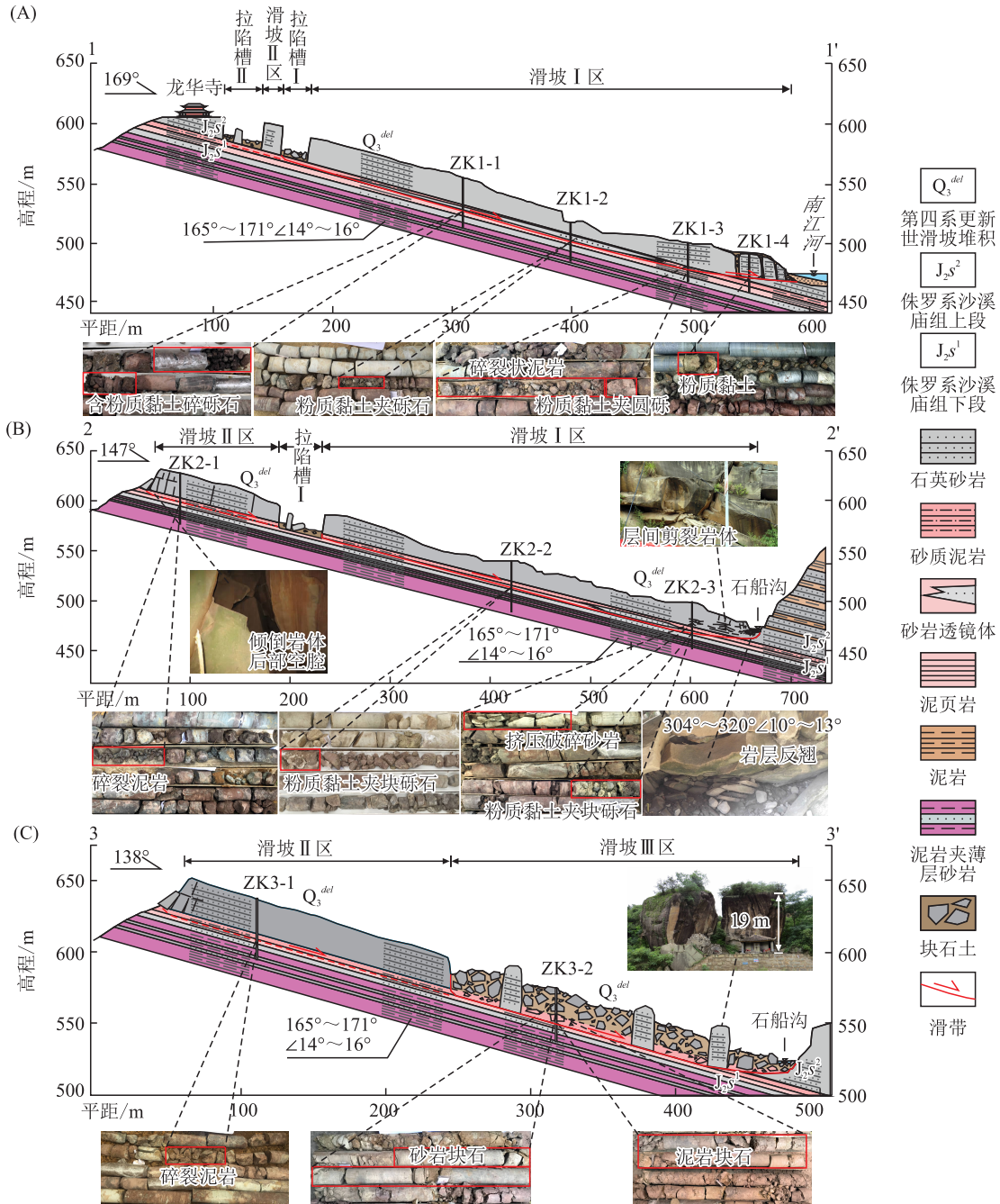


图 4 断渠滑坡工程地质剖面图

Fig. 4 Duanqu landslide engineering geological profile

(A)1-1'工程地质剖面图;(B)2-2'工程地质剖面图;(C)3-3'工程地质剖面图

地层	厚度/m	岩性及层间剪切带层位	沉积构造	岩性描述	沉积相		
					微相	亚相	相
上沙溪庙组 J_2s^2	3~4	A	暗色砂质泥岩夹中厚层灰色细砂岩	泛滥平原	溢岸	曲流	
		B	紫红色至灰绿色中层至厚层泥岩-砂质泥岩				
	40~50	C	米黄色巨厚层-块状长石砂岩、长石石英砂岩 中层粉砂质泥岩	边滩	河道		
		D	米黄色巨厚层-块状长石砂岩、长石石英砂岩，底部含少量钙质砂岩				
下沙溪庙组 J_2s^1	0.6~0.8		青灰色-深灰色砂质页岩	沼泽		溢岸 河	
	9.5~12	E	中厚层紫色粉砂质泥岩夹砂岩透镜体				
	3~4	F	中层浅灰色粉细砂岩				
	10~15		紫红色粉砂质泥岩，上部夹灰褐色粉细砂岩条带 紫红色粉砂质泥岩	泛滥平原			



图 5 滑坡区沉积相及岩性组合特征

Fig. 5 Characterization of sedimentary facies and lithologic association in landslide areas

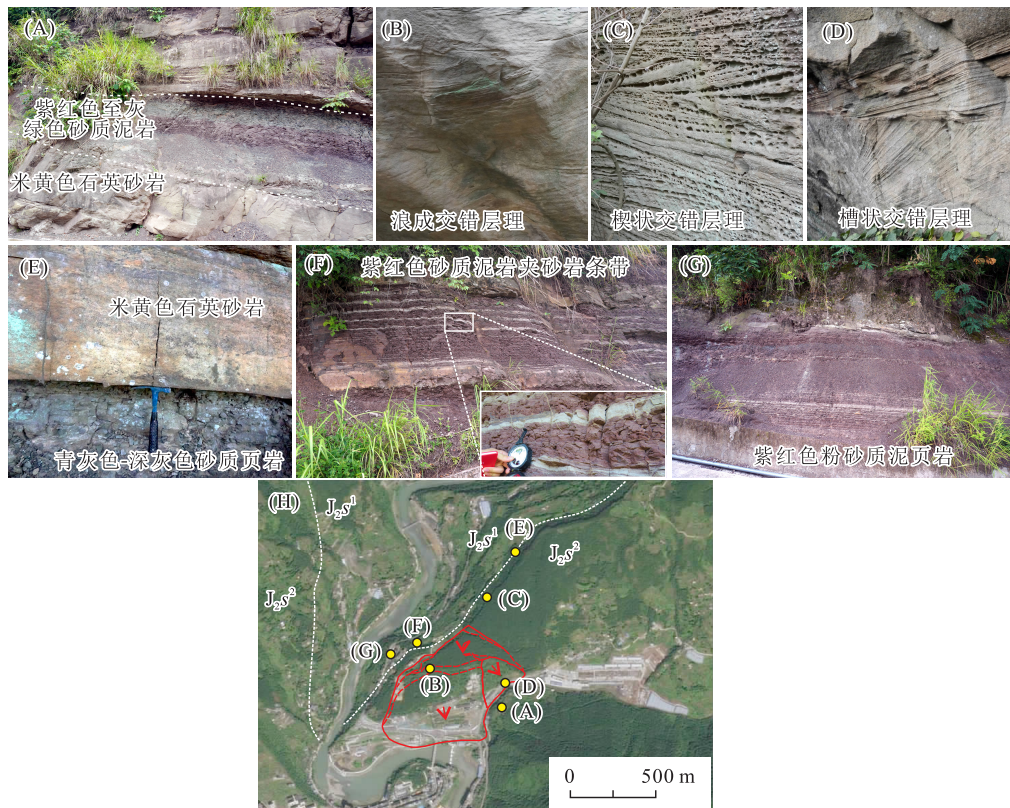


图 6 滑坡区外地层岩性露头特征

Fig. 6 Characteristics of lithologic outcrops of strata outside the landslide area
(A)上层泛滥平原相;(B)浪成交错层理;(C)楔形交错层理;(D)槽状交错层理;(E)下部溢岸沼泽沉积相;
(F)下层泛滥平原相;(G)紫红色砂质泥页岩;(H)露头点位分布

3 单斜红层原地掀斜构造模式

断渠滑坡位于米仓山构造带南缘,新华向斜北西翼单斜地层。米仓山构造带处于扬子板块向北突出的边缘,东西两侧分别被大巴山冲断带和龙门山冲断带所夹持,北侧为秦岭造山带和汉南隆起,南与四川盆地相接(图 7-A)。米仓山构造带从印支期开始发育,燕山期继承发展,喜马拉雅期被叠加改造。侏罗系地层形成以来主要经历了 4 期地质构造作用:第一期为早白垩世晚期,受扬子板块向秦岭造山带楔入影响,米仓山南缘大规模隆起在四川盆地北部产生近南北向的挤压应力场,造成侏罗系地层初步产生由北而南的掀斜变形,形成了近 EW 走向的梓潼—通江向斜;第二期大约为

晚白垩世至古新世,区域受到 NW-SE 向的挤压构造作用,在梓潼—通江向斜北翼发育了包括新华向斜在内的多个 NE 走向褶皱;第三期大约在古新世晚期至始新世早期,南大巴山向四川盆地内部沉积盖层扩展,形成近 NW 走向背斜复合叠加于梓潼—通江向斜和龙凤场背斜之上;第四期构造受青藏高原隆升影响,表现为近 EW 向挤压,时间大致在渐新世以来(孙东,2011)。

新华向斜北西翼红层单斜地层的形成构造模式具有一定的特殊性,四川盆地大部分倾斜红层是纵弯褶皱的一部分,地层倾斜是在近水平构造作用力下形成的,而米仓山南缘单斜红层是在近垂直的构造作用力下原地掀斜形成的。研究发现,红层盖层底部具有底板断裂和顶板滑脱的

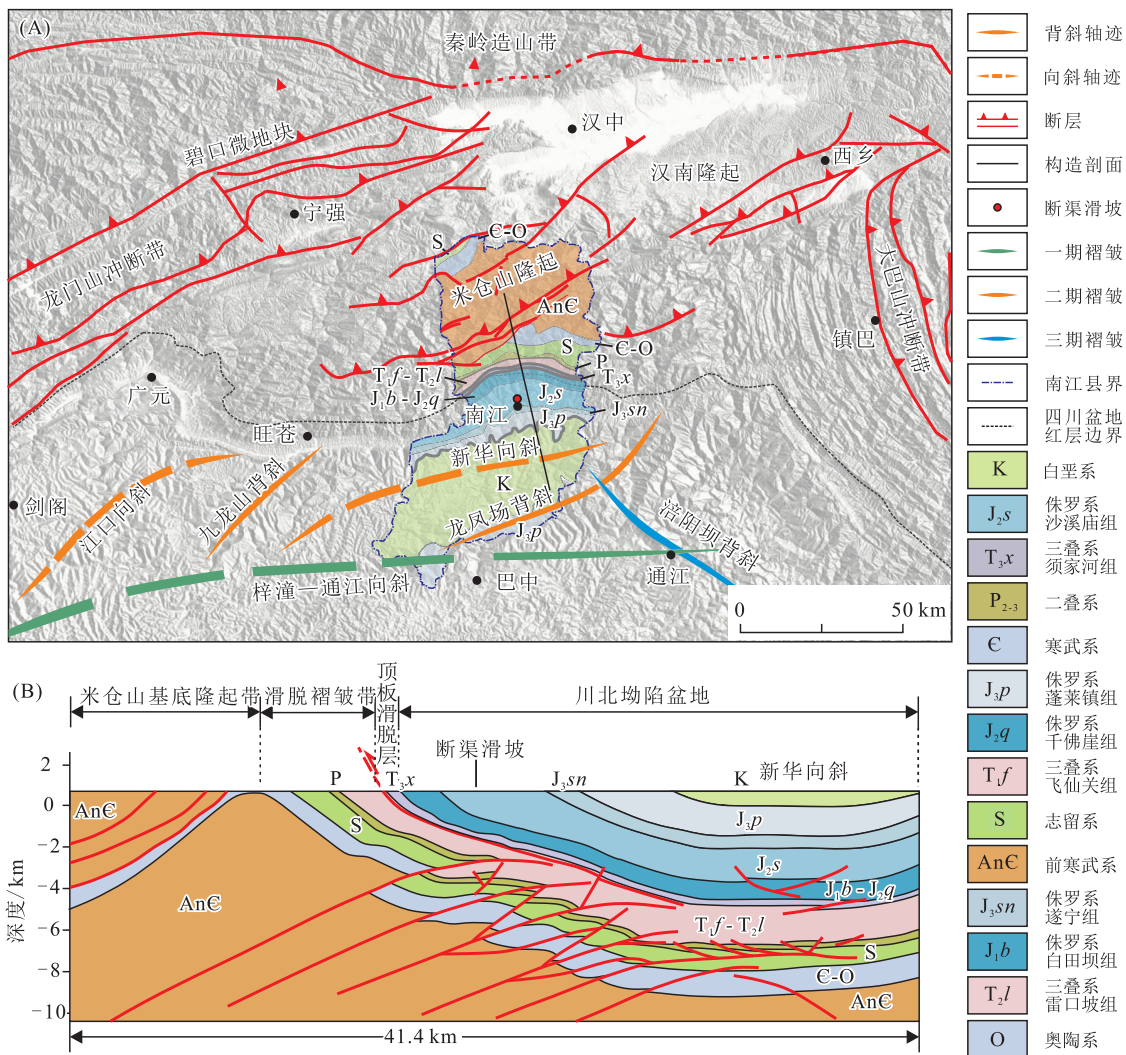


图 7 米仓山构造带南缘川北红层深部构造特征
 Fig. 7 Deep structural characteristics of the northern Sichuan red bed in the southern margin of the Micangshan structural belt
 (A)米仓山构造带及川北红层地质简图;(B)米仓山南缘构造剖面(据孙东,2011 修改)

双重构造,底板断裂从深层地层向南逆冲,不穿过三叠系地层;顶板沿中、下三叠统膏岩层滑脱向后陆方向反向逆冲,如图 7-B 所示。上下双重构造形成的构造楔向南楔入红层盖层底部,引起上部地层倾斜,形成向南倾斜的单斜地层。这种构造模式可将其简化为楔入冲断构造模式(邓宾等,2014),如图 8-A 所示。浅部红层原地

抬升掀斜的力学机制模型如图 8-B 所示。与纵弯褶皱形成机制不同的是,区内红层在地层抬升过程中,被掀斜地层靠后陆端可大致认为是自由端,在地层掀斜范围内更易产生沿全层分布的层间位错,从一定程度上增加了剪切破碎效应。造就了米仓山南缘单斜红层中广泛发育的层间剪切带。

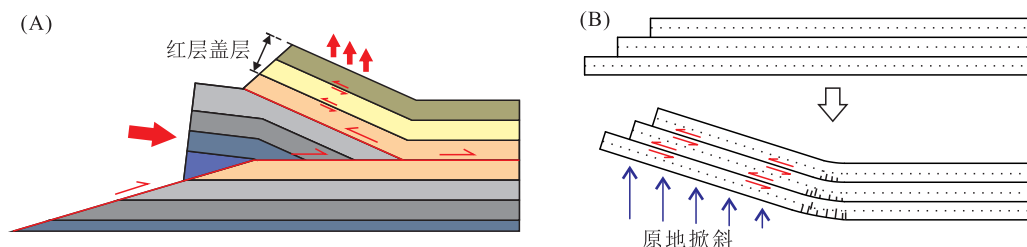


图 8 米仓山构造带南缘红层原地掀斜构造模型

Fig. 8 In situ tilted structural model of the red beds at the southern margin of the Micang mountain tectonic zone (A)楔入冲断构造模型(据邓宾等,2014 修改);(B)浅部红层原地掀斜层间剪切力学机制示意

4 层间剪切带发育特征

地质构造运动造成地层倾斜过程中,岩层之间出现相互错动,软硬相间部位更易应力集中,软硬强度差异越大,接触面应力越集中(朱赛楠等,2018)。在上沙溪庙组(J_2s^2)底部边滩相以硬岩为主和下沙溪庙组(J_2s^1)顶部泛滥平原相以软岩

为主 2 套地层附近,层间剪切带极为发育。经过在滑坡区外的详细调查发现,层间剪切带在孕灾地层上下厚度约 80 m 范围内 6 个层位出现,分别用 A~F 表示,共计发育了数十条层间剪切带。发育层位及编号见图 5,部分层间剪切带的详细特征如表 2、图 9-A~F 所示,层间剪切带露头分布如图 9-G 所示。按照泥化程度总体上可分为

表 2 滑坡区层间剪切带发育层位及详细特征描述

Table 2 Layers and detailed characterization of interlayer shear zones development in the landslide area

层位编号	剪切带类型	原生结构	厚度/cm	发育特征、地下水活动性
A	I-2:片状劈理	I-2:块状细砂岩	I-2:25~40	I-2:羽状裂隙定向排列,未泥化,地下水活动强烈
B	II:粉质黏土夹砾石	II:薄层砂质泥岩	II:5~8	II:部分泥化,地下水作用微弱
C	I-2:片状劈理 I-3:条状劈理	I-2:中层泥质砂岩 I-3:巨厚层石英砂岩	I-2:20~30 I-3:40~50	I-2:层面裂隙与羽状裂隙交叉排列,未泥化,地下水作用轻微 I-3:剪节理稀疏分布,未泥化,地下水作用轻微
D	具有明显分带特性 II上:粉砂夹砾石 I-1:鳞片状劈理夹砂岩碎石 II下:粉质黏土夹泥岩砾石	II上:中层钙质砂岩 I-1:薄层页岩~钙质砂岩 II下:中层粉砂质泥岩	II上:10~20 I-1:40~60 II下:10~15	II上:沿石英砂岩底部分布,与下层无明显界面,地下水作用轻微 I-1:劈理无序排列,受多期构造作用,与上下层无明显界面,少量粉黏粒 II下:与上下层无明显界面,地下水作用轻微,部分泥化
E	III:泥化夹层 I-3:条状劈理	III:中层砂质泥岩 I-3:厚层砂质泥岩	III:5~8 I-3:15~20	III:泥化程度高,地下水活动强烈 I-3:剪节理定向排列,未泥化,地下水活动强烈
F	I-1:鳞片状劈理 I-3:条状劈理	I-1:薄层泥质细砂岩 I-3:块状细砂岩	I-1:8~10 I-3:15~20	I-1:劈理无序排列,受多期构造作用,少量粉黏粒,地下水活动强烈 I-3:剪节理定向排列,未泥化,地下水活动强烈

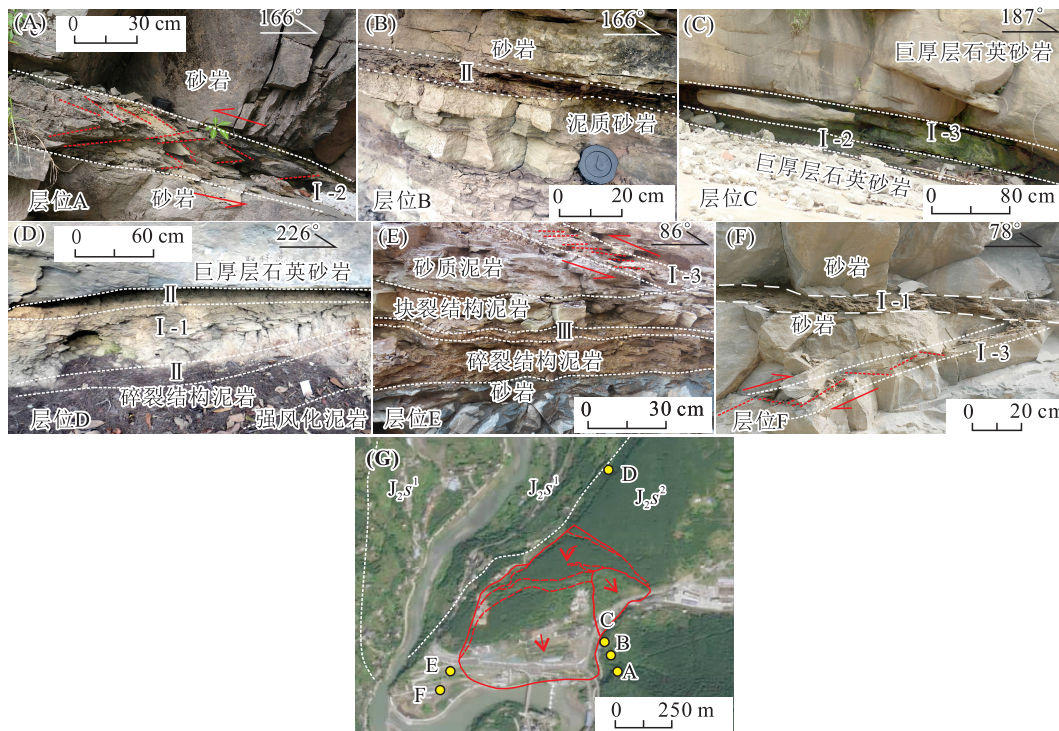


图 9 滑坡周边层间剪切带发育特征

Fig. 9 Basic characteristics of interlayer shear zone around landslide

(A)层位 A 发育 I 类剪切带;(B)层位 B 发育 II 类剪切带;(C)层位 C 发育 I 类剪切带;(D)层位 D 发育 I 类及 II 类剪切带;(E)层位 E 发育 III 类及 I 类剪切带;(F)层位 F 发育 I 类剪切带;(G)露头点分布

3 类:劈理剪切带(I 类)、粉质黏土或粉细砂夹砾石(II 类)、泥化夹层(III 类),其中劈理剪切带(I 类)按劈理间距增大可进一步细分为鳞片状劈理(I-1)、片状劈理(I-2)和条状劈理(I-3)(曲永新和徐瑞春,1983)。其中层位 E 和 F 中的 I-3 类剪切带倾向 NEE 和 SWW 向,推测是在第三期构造运动中大巴山构造带向 SW 方向挤压形成,其他剪切带产状与地层产状大致相同,应与地层掀斜同期形成。

各条层间剪切带粉粒黏粒含量差异较大,综合分析表 2 中的发育特征后可以得到以下规律:(1) I-2 类和 I-3 类剪切带破碎化程度低,无论黏土含量高低、地下水活跃与否都难以泥化;(2) I-1 类剪切带发育在砂岩层内,破碎化程度高,受限于黏土矿物含量低,含少量粉粒;(3) II 类剪切带多发育在泥岩层内,破碎化程度高,黏土矿物含量相对较高,但地下水参与度低,剪切带部分泥化,仍然含有不少原岩角砾和碎屑;(4) III 类剪切带几乎完全泥化,其原岩中黏土矿物含量高、破碎化程度高且地下水大量参与。由此可见,层间剪切带要演变为泥化夹层,3 个条件缺一不可。经

过钻探揭露断渠滑坡的滑带沿层位 E 的 III 类剪切带发育见图 9-E。

5 断渠滑坡演化过程

渐新世以来,受青藏高原隆起影响,川北地区构造运动表现为整体抬升,接受强烈的剥蚀作用(孙东,2011;邓宾,2013),形成现今的单面山和似单面山地貌,单面山地貌形成过程如图 10 所示。缓倾顺层滑坡均发育在单面山地貌的长缓斜坡一侧(图 11-A)。随着河流逐渐下切,将层间剪切带暴露于地表或接近地表时,斜坡具备了早期蠕变的空间条件。在长期重力作用下斜坡沿软弱层产生非协调变形(李嘉雨,2016;许强和唐然,2023),在斜坡上部出现横向张拉裂缝(图 11-B)。在降雨和地下水长期作用下,层间剪切带与地下水发生水岩作用,产生物理化学性质变化,黏土矿物逐渐增加,剪切带逐渐泥化形成泥化夹层,这期间坡体进一步产生蠕变,斜坡上部横向张拉裂缝增多形成拉裂变形带,形成滑坡后缘边界(图 11-C)。在某次大暴雨作用下,泥化夹层大面积饱水,强度大幅降低,滑坡快速启动下滑进入南江河,后缘拉

裂变形带形成拉陷槽,大型孤块石残留拉陷槽内 (图 11-D)。

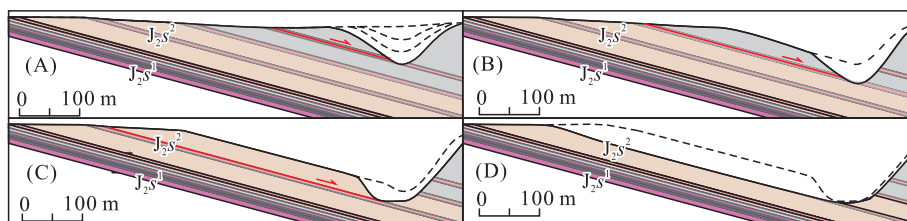


图 10 单面山地貌形成过程示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the formation process of single-sided mountain landform
 (A) 河谷下切揭露层间剪切带; (B) 顺层谷坡侧产生滑移; (C) 河流侧蚀拓宽河谷;
 (D) 顺层谷坡侧不断滑移形成两岸不对称地貌

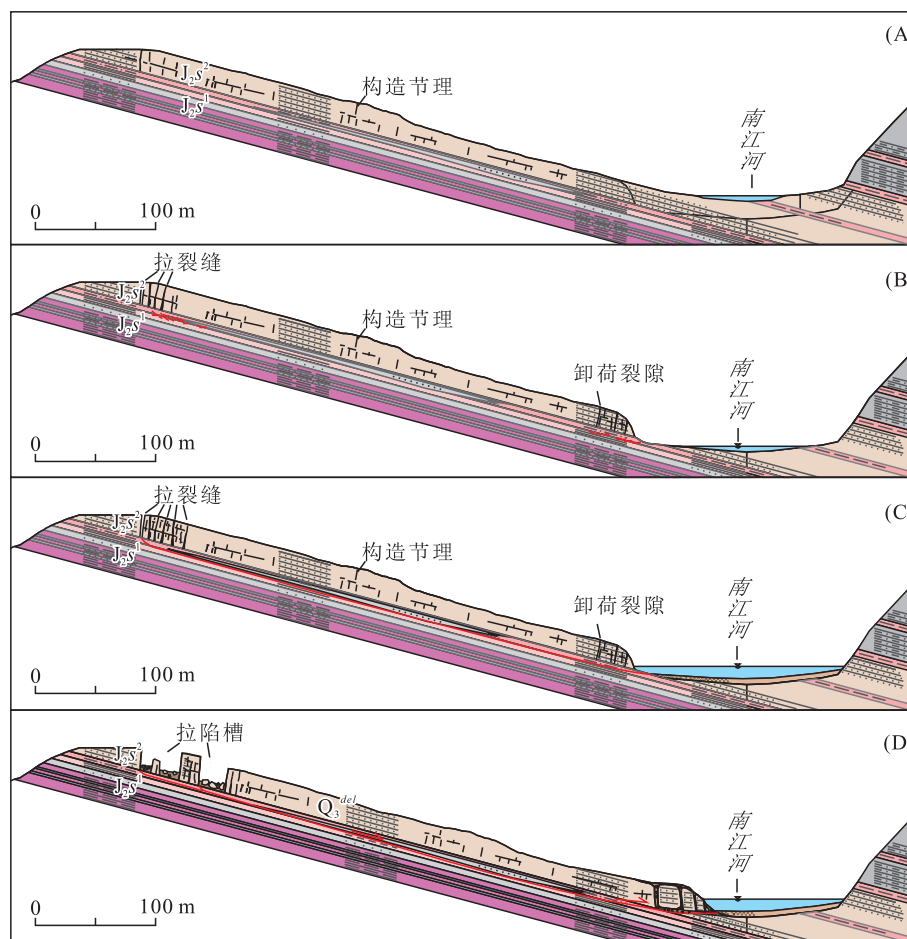


图 11 断渠滑坡形成演化过程示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the evolutionary process of Duanqu landslide formation
 (A) 河谷下切形成单面山地貌; (B) 层间剪切带接近地表斜坡产生非协调变形;
 (C) 层间剪切带逐步泥化, 变形加剧; (D) 变形体整体滑移; Q_3^{del} : 古滑坡堆积物

根据滑坡变形特征和结构特征推测断渠古滑坡 I 区首先快速形成, 随后 III 区、II 区缓慢形成。前文述及, 3 个滑坡区滑带发育层位一致, 均为紫红色砂质泥岩, 但钻探揭露其物质组成有明显差异。I 区滑带介于 III 类和 II 类剪切带之间。

II 区及 III 区滑带总体上属于 I 类剪切带。显然 I 区滑带抗剪强度低于 II 区及 III 区。试验得到黏粒含量极高的泥化夹层 (III 类剪切带) 内摩擦角 $\varphi < 8^\circ$, 砂质泥岩中 I 类层间剪切带在浸水 5 天后内摩擦角 φ 从 32° 左右降低到 15° 左右 (王森,

2017)。当滑面内摩擦角 φ 显著小于滑面倾角 α 时,发生整体滑移-拉裂;当 $\varphi \approx \alpha$ 时则产生以蠕滑变形为主的“迷宫式”滑移-拉裂,最终表现为滑体逐渐解体(张倬元等,1994)。因此 I 区首先产生整体滑移,形成拉陷槽 I,给 II 区和 III 区提供了变形空间条件,随后 II 区和 III 区缓慢蠕滑。由于 III 区变形缓慢,在 II 区前缘南东角产生了砥柱效应,迫使 II 区产生逆时针旋转。

6 结论

本文详细分析了四川北部南江县断渠滑坡发育特征、孕灾地层沉积相和岩性组合特征、区域地质构造演化和滑坡周边层间剪切带发育特征,得到以下认识:

a. 断渠滑坡位于米仓山构造带南缘、新华向斜北西翼,呈单斜构造。滑坡区总面积约为 $36.17 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体厚度 $15 \sim 39 \text{ m}$,体积约为 $1.153 \times 10^4 \text{ m}^3$,主滑方向总体为 170° ,为一典型的大型红层缓倾岩层古滑坡。

b. 断渠滑坡发育在沙溪庙组下段(J_2s^1)与上段(J_2s^2)沉积地质界面附近,总体上在河道边滩沉积相和溢岸泛滥平原沉积相转换面附近,也是 2 个相邻的正粒序沉积旋回底部和顶部交界处,沉积建造形成的上硬下软 2 套地层结构是滑坡产生的物质基础。

c. 米仓山南缘前陆盆地红层盖层底部特殊的楔入冲断构造形成了新华向斜北西翼红层单斜构造。原地掀斜构造模式造就了区域内单斜红层中广泛发育的层间剪切带。地质构造作用在此处形成了数十处层间剪切带。分析发现,破碎程度高、黏土矿物含量高且地下水活动强烈的层间剪切带最易产生泥化夹层,这也是滑面形成的前提条件。

d. 与断渠滑坡相似的沉积建造特征在其他同类型滑坡也曾发现。例如,中江县垮梁子滑坡侏罗系蓬莱镇组地层存在景福院泥页岩,滑带发育在该层附近;宣汉县天台乡滑坡和万州大包梁滑坡都发育在侏罗系上统遂宁组与中统沙溪庙组地层界面附近。可见,沉积地质界面对大型红层平缓岩层滑坡的孕育具有一定的控制作用。

[参 考 文 献]

邓宾,2013. 四川盆地中—新生代盆—山结构与油气分布 [D]. 成都:成都理工大学档案馆.

Deng B, 2013. Meso-Cenozoic Architecture of Basin-Mountain System in the Sichuan Basin and Its Gas Distribution [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

邓宾, Sueoka Shigeru, 刘树根, 等, 2014. 米仓山楔入冲断构造模型低温热年代学证据及其意义 [J]. 地球物理学报, 57(4): 1155—1168.

Deng B, Sueoka S, Liu S G, *et al.*, 2014. Wedge-thrust folding in the Micangshan constrained by low-temperature thermochronometer model and its significance [J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(4): 1155—1168. (in Chinese)

胡泽铭, 2013. 四川红层地区缓倾角滑坡成因机理研究 [D]. 成都:成都理工大学档案馆.

Hu Z M, 2013. Study on Formation Mechanism of the Slow-Inclination Landslide in Red Stratum Region, Sichuan [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

李滨, 冯振, 赵瑞欣, 等, 2016. 三峡地区“14·9”极端暴雨型滑坡泥石流成灾机理分析 [J]. 水文地质工程地质, 43(4): 118—127.

Li B, Feng Z, Zhao R X, *et al.*, 2016. Mechanism of “14·9” rainstorm triggered landslides and debris-flows in the Three Gorges area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 43(4): 118—127. (in Chinese)

李朝辉, 2016. 四川盆地侏罗纪岩相古地理研究 [D]. 成都:成都理工大学档案馆.

Li C H, 2016. Study on the Jurassic Lithofacies and Paleogeography of Sichuan Basin [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

李嘉雨, 2016. 红层地区平缓岩层斜坡拉张裂缝形成机理研究 [D]. 成都:成都理工大学档案馆.

Li J Y, 2016. Research on Formation Mechanism of Tension Crack in Gentle Terrane Slope of Red Bed Region at Nanjiang Sichuan [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)

李江, 许强, 王森, 等, 2016. 川东红层地区降雨入渗模式与岩质滑坡成因机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 35(增刊 2): 4053—4062.

Li J, Xu Q, Wang S, *et al.*, 2016. Research on rainfall infiltration models of slopes and formation mechanism of rock landslides in red stratum in the east of Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(S2): 4053—4062. (in Chinese)

李晓, 李守定, 陈剑, 等, 2008. 地质灾害形成的内外动力

- 耦合作用机制[J]. 岩石力学与工程学报, 27(9): 1792—1806.
- Li X, Li S D, Chen J, *et al.*, 2008. Coupling effect mechanism of endogenic and exogenic geological processes of geological hazards evolution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27(9): 1792—1806. (in Chinese)
- 卢远航, 2016. 南江县红层地区两面临空型滑坡成因机理与早期识别研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Lu Y H, 2016. Study on Formation Mechanism and Early Identification of Two Free Faces of Red Bed Landslides in NanJiang [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 彭华, 潘志新, 闫罗彬, 等, 2013. 国内外红层与丹霞地貌研究述评[J]. 地理学报, 68(9): 1170—1181.
- Peng H, Pan Z X, Yan L B, *et al.*, 2013. A review of the research on red beds and Danxia landform[J]. Acta Geographica Sinica, 68(9): 1170—1181. (in Chinese)
- 钱利军, 2013. 川西北地区中、下侏罗统物质分布规律与沉积充填过程[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Qian L J, 2013. Regulation of Sedimentary Distribution and Sedimentary Filling Process during Middle and Lower Jurassic in Western and Northern Sichuan, China [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 曲永新, 徐瑞春, 1983. 长江葛洲坝工程层间剪切带的研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 全国首届工程地质学术会议论文选集. 北京: 科学出版社.
- 宋国虎, 杨楨贤, 郭朝旭, 等, 2022. 成都五家坟滑坡变形破坏特征和复活机制分析[J]. 科学技术与工程, 22(2): 496—503.
- Song G H, Yang Z X, Guo C X, *et al.*, 2022. Analysis on deformation characteristics and resurrection mechanism of Wujiafen landslide [J]. Science Technology and Engineering, 22(2): 496—503. (in Chinese)
- 孙东, 2011. 米仓山构造带构造特征及中—新生代构造演化[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Sun D, 2011. The Structural Character and Meso-Cenozoic Evolution of Micang Mountain Structural Zone, Northern Sichuan Basin, China [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 陶盛宇, 2020. 四川宣汉县大园包滑坡复活机理及稳定性评价[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Tao S Y, 2020. Resurrection Mechanism and Stability Evaluation of Dayuanbao Landslide in Xuanhan County, Sichuan Province [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 王森, 2017. 红层地区软弱夹层形成演化规律及泥化特征研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Wang S, 2017. Study on the Feature of Argillitization and the Evolution Law of Formation about Weak Inter-layer in Red Strata Area [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 王永标, 徐海军, 2001. 四川盆地侏罗纪至早白垩世沉积旋回与构造隆升的关系[J]. 地球科学, 26(3): 241—246.
- Wang Y B, Xu H J, 2001. Relations between evolution of sedimentary cycles and tectonic uplift around Sichuan basin from Jurassic to early Cretaceous [J]. Earth Science, 26(3): 241—246. (in Chinese)
- 王子忠, 许模, 杨绍平, 2011. 瓦屋山水电站厂房区红层岩体古滑坡稳定性研究[J]. 工程地质学报, 19(2): 213—218.
- Wang Z Z, Xu M, Yang S P, 2011. Stability analysis of paleo-slided red bedrock mass at powerhouse site of Wawu mountain hydropower project [J]. Journal of Engineering Geology, 19(2): 213—218.
- 吴鑫鑫, 2021. 四川省简阳市丹景乡雷打石滑坡形成与复活机理研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Wu X X, 2021. Formation Mechanism and Stability Analysis of Leidashi Landslide in Danjing Town, Jianyang City, Sichuan Province [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 许强, 唐然, 2020. 降雨诱发红层滑坡研究——以四川盆地为例[M]. 北京: 科学出版社.
- Xu Q, Tang R, 2020. Study on Rainfall-Induced Red Bed Landslides; A Case Study in the Sichuan Basin [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 许强, 唐然, 2023. 红层及其地质灾害研究[J]. 岩石力学与工程学报, 42(1): 28—50.
- Xu Q, Tang R, 2023. Study on red beds and its geological hazards [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 42(1): 28—50. (in Chinese)
- 雍平, 2021. 四川省眉山天府新区熊家湾滑坡形成机理研究[J]. 四川地质学报, 41(增刊1): 96—101.
- Yong P, 2021. A study of genetic mechanism of the Xiongjiawan landslide in Tianfu new district, Meishan, Sichuan Province [J]. Acta Geologica Sichuan, 41(S1): 96—101. (in Chinese)
- 曾锦秀, 2014. 四川泸州岩窝头滑坡形成机制及稳定性评价[D]. 成都: 西南交通大学档案馆.
- Zeng J X, 2014. The Formation Mechanism and Stability Evaluation of Yanwotou Landslide in Luzhou City,

- Sichuan Province [D]. Chengdu: The Archive of Southwest Jiaotong University.
- 张凡, 易加强, 黄杨荣, 等, 2017. 南江县窑厂坪滑坡稳定性分析及防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 28(2): 1—5.
- Zhang F, Yi J Q, Huang Y R, *et al.*, 2017. Stability analysis and prevention measures of yaochangping landslide, Nanjiang County [J]. Journal of Geological Hazards and Environment, 28(2): 1—5. (in Chinese)
- 张涛, 谢忠胜, 石胜伟, 等, 2013. 南江县石板沟滑坡特征、成因及演化过程研究[J]. 长江科学院院报, 30(7): 33—37.
- Zhang T, Xie Z S, Shi S W, *et al.*, 2013. Characteristics, geological causes and evolution of Shibangou landslide in Nanjiang County [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 30(7): 33—37. (in Chinese)
- 张倬元, 王士天, 王兰生, 1994. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社.
- Zhang Z Y, Wang S T, Wang L S, 1994. Principles of Engineering Geological Analysis [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- 章志峰, 2011. 四川省通江县永安中学滑坡复活机制及防治措施研究[D]. 成都: 成都理工大学档案馆.
- Zhang Z F, 2011. Yongan Landslide Mechanism of Resurrection and Preventive Measures in Tongjiang County of Sichuan [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 赵勇, 王瀚玉, 何朝阳, 2018. 巴中袁家坝巨型旋转-滑移拉裂式古滑坡的野外识别及形成机制分析[J]. 甘肃水利水电技术, 54(2): 24—27+40.
- Zhao Y, Wang H Y, He C Y, 2018. Field identification and formation mechanism analysis of giant rotation-slip pull-apart ancient landslide in Yuanjiaba, Bazhong [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 54(2): 24—27+40. (in Chinese)
- 朱赛楠, 魏英娟, 王平, 等, 2021. 大型单斜层状基岩滑坡变形特征与失稳机制研究——以重庆石柱县龙井滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 40(4): 739—750.
- Zhu S N, Wei Y J, Wang P, *et al.*, 2021. Research on deformation characteristics and instability mechanisms of large monoclinical layered bedrock landslides: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County, Chongqing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(4): 739—750. (in Chinese)
- 朱赛楠, 殷跃平, 李滨, 2018. 大型层状基岩滑坡软弱夹层演化特征研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 工程地质学报, 26(6): 1638—1647.
- Zhu S N, Yin Y P, Li B, 2018. Evolution characteristics of weak intercalation in massive layered rockslides—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. Journal of Engineering Geology, 26(6): 1638—1647. (in Chinese)
- Jian W X, Wang Z J, Yin K L, 2009. Mechanism of the Anleshi landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Engineering Geology, 108(1—2): 86—95.
- Pei X J, Cui S H, Ling Z, *et al.*, 2022. Sanxicun landslide: An investigation of progressive failure of a gentle bedding slope [J]. Natural Hazards, 111: 51—78.
- Wu L Z, Shi J S, Xu Q, 2017. The rainfall-induced Wulipo rockslide, China: A modified model for rockslide initiation [J]. Environmental Earth Sciences, 76(14): 497.
- Xu Q, Liu H X, Ran J X, *et al.*, 2016. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan basin, southwestern China [J]. Landslides, 13(6): 1555—1570.
- Yin Y P, Cheng Y L, Liang J T, *et al.*, 2016. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. Landslides, 13(1): 9—23.
- Zhao Y, Xu M, Guo J, *et al.*, 2014. Accumulation characteristics, mechanism, and identification of an ancient translational landslide in China [J]. Landslides, 12(6): 1119—1130.
- Zhang S, Xu Q, Hu Z M, 2016. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China [J]. Engineering Geology, 204: 1—13.

(责任编辑: 黄维婷)