

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.02002

李洪梁,陈龙,杨栋,张佳佳,田尤,蔡佳君,王灵,李宝幸,2022. 藏东昌都觉学红层滑坡的地质成因分析. 沉积与特提斯地质, 42(4):684-695.
DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.02002

LI H L, CHEN L, YANG D, ZHANG J J, TIAN Y, CAI J J, WANG L, LI B X, 2022. Geological genesis of the Juexue red strata landslide in Qamdo, eastern Tibet. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4):684-695. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.02002

藏东昌都觉学红层滑坡的地质成因分析

李洪梁^{1,2}, 陈 龙^{1,2}, 杨 栋^{1,2}, 张佳佳^{1,2}, 田 尤^{1,2},
蔡佳君^{1,2}, 王 灵³, 李宝幸^{1,2,4}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734; 3. 西南石油大学土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:觉学红层滑坡发育于向斜北东翼形成的反向坡,是近年来依托川藏交通廊道沿线灾害地质调查在新厘定的“藏东昌都红层区”发现的典型红层滑坡。为厘定其成因,以基础地质为切入点,进行了详实的地质调查与分析。结果表明,滑坡区地层岩性主要为中侏罗统东大桥组(J_2d)紫红色、灰色薄层泥岩、粉砂质泥岩夹中—厚层砂岩。地层内发育与区域构造活动配套的轴面劈理(S_1)、“X”型共轭剪节理(S_2 、 S_3)和层间剪切劈理(S_4)。文章从沉积环境控制地层岩性及物理力学性质、区域构造演化制约斜坡结构与岩体结构面组合特征和地下水及重力作用加剧斜坡失稳等角度,提出觉学红层滑坡形成于内外地质营力耦合的失稳机理,对区域红层滑坡防治和川藏交通建设具有一定参考价值。

关键词:红层滑坡;反向坡;地质成因;结构面;构造演化;川藏交通廊道

中图分类号:P694; P542

文献标识码:A

Geological genesis of the Juexue red strata landslide in Qamdo, eastern Tibet

LI Hongliang^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, YANG Dong^{1,2}, ZHANG Jiajia^{1,2}, TIAN You^{1,2},
CAI Jiajun^{1,2}, WANG Ling³, LI Baoxing^{1,2,4}

(1. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, China; 2. Geohazard Prevention Technology Center, China Geological Survey, Chengdu 611734, China; 3. College of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610050, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Juexue red strata landslide developed on the reverse slope formed in the northeast wing of the syncline, and it is a typical red strata landslide found in the newly defined "Qamdo red strata area" based on the geohazards survey along the Sichuan-Tibet traffic corridor in recent years. To determine its genesis, based on basic geology, detailed geological investigation and analysis are carried out. The results show that the stratigraphic lithology of the landslide area is mainly purplish red and gray thin mudstone and silty mudstone interbedded with middle-thick sandstone of middle Jurassic Dongdaqiao Formation (J_2d). The axial plane cleavage (S_1), X-type

收稿日期: 2021-08-18; 改回日期: 2021-11-13 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 李洪梁(1990—),男,工程师,博士,主要从事青藏高原基础地质与灾害地质研究。E-mail: siliang2222@126.com

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20221741, DD20190644, DD20190505),第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0902),国家自然科学基金青年项目(41807300),西藏自治区自然资源厅项目(藏财采【2020】0890-1)和中国地质科学院探矿工艺研究所科研结余资金项目(2022004)联合资助

conjugate shear joints (S_2 , S_3) and interlayer shear cleavage (S_4) are developed in the strata, which are compatible with regional tectonic activity. From the point of view that sedimentary environment controlling stratum lithology and physical and mechanical properties, regional tectonic evolution restricting slope structure and rock mass structural plane combination characteristics, and groundwater and gravity aggravating slope instability, it is suggested that Juexue red strata landslide is formed by the coupling mechanism of internal and external geological forces, which has certain reference value for regional red strata landslide prevention and control and Sichuan-Tibet transportation construction.

Key words: red strata landslide; reverse slope; geological genesis; structural plane; tectonic evolution; Sichuan-Tibet traffic corridor

0 引言

红层由于其特殊的工程地质特性,如水理性质差、膨胀崩解严重、物理力学强度低等,属于典型的易崩、易滑地层(张涛等,2017;李江等,2015;2016;耿兴福等,2014;殷坤龙等,2014;武鹏,2015),在强降雨、地震等突发因素或公路、铁路建设等工程活动影响下,常发生大规模滑坡,影响工程施工,甚至造成人员伤亡。中国红层广泛发育,主要分布在西北、西南和中南及东南,其中以西南地区红层研究程度较高,主要涉及扬子地台西南四川、重庆和湖北等地,主要发育滑坡和崩塌(程强等,2004;张明等,2014;吴红刚等,2010;吴玮江等,1993)。随着川藏交通建设的推进,中国地质调查局围绕交通廊道内面临的地质安全问题开展了大量基础与灾害地质调查工作,为其规划设计提供技术支撑(李洪梁,2021a;2022)。在此过程中,项目组在藏东昌都地区发现大面积分布三叠系(T)和侏罗系(J)红层,红层沿吉多—类乌齐—昌都—察雅—阿孜呈北西南东向展布,延伸长逾 600 km,宽度约 100 km,面积近 6 万 km^2 ,暂命名为“藏东昌都红层区”。区内地质灾害广泛发育,主要以崩塌和滑坡为主,其中滑坡多为大型,主要分布于澜沧江河谷两岸,使坡脚居民面临着严重威胁。

针对红层滑坡,众多学者对其成因和演化机制进行了大量研究,如黄润秋等(2003,2004,2007)、Huang et al. (2011) 通过对扬子地台区典型滑坡案例分析,提出了滑移—拉裂—剪断模式、平推模式、挡墙溃决模式、蠕滑—弯曲—剪断模式和倾倒变形模式;范宣梅等(2008)和杜岩等(2019)在此基础上对平推模式进行了深化;吴红刚等(2010)利用地质分析和室内模型试验相结合的手段提出红层滑坡的变形与成因机制为:“原始地貌→坡体卸荷松弛→岩土强度衰减→坡体整体滑移”;在川藏交通廊

道,张永双等(2021)以地貌特征、斜坡岩体结构、触发条件等为基本要素,总结归纳了堆积体滑移型、顺层滑移拉裂型、卸荷剪断型、岩溶贯通拉裂型、崩滑溃散型和构造控制型等 6 种地质力学模型。毫无疑问,这些研究成果为红层滑坡的成因机制研究奠定了理论基础,也多被应用于工程实践中,但研究方法多采用物理模拟试验或工程地质分析(陶志刚等,2021;马文著等,2020;蔡俊超,2020;谭儒蛟等,2009;任光明等,2003;郑达等,2019),侧重于从地质体现状分析灾害成因,对地质体的形成和演化过程却鲜有涉及。同时,由于不同区域构造体制的巨大差异,很多成因机制无法应用于受大陆碰撞造山作用影响的青藏高原东缘。

本文以藏东昌都市主城区西侧约 800 m、澜沧江右岸的觉学红层滑坡为例,通过详实的野外地质调查,结合区域地质演化,以基础地质为切入点,分析其形成机理,以期丰富和完善红层滑坡的成因研究,为后续滑坡的防治工作和川藏交通建设提供基础参考资料。

1 地质背景概述

研究区大地构造位置位于青藏高原东缘金沙江缝合带与澜沧江缝合带之间的北羌塘—昌都—思茅地体东段南侧(潘桂棠等,2009),紧邻澜沧江缝合带北侧(图 1a),该缝合带所代表的澜沧江古特提斯洋演化依次经历了早寒武世—晚三叠世的打开、扩张、俯冲削减到闭合的完整威尔逊旋回(范建军等,2014;许志琴等,2013;魏君奇等,2008;李才,2008),同时也是印度与欧亚大陆碰撞造山作用的强烈影响区域。区内构造线与区域构造线一致,呈北西—南东向展布,断裂、复式褶皱密集发育(图 1b),常常组成小型褶冲带,层间及切层剪切作用极为强烈。地层主要分布下侏罗统汪布组(J_1w)、中

侏罗统东大桥组(J_2d)和上侏罗统小索卡组(J_3x),岩性以紫红色、红色薄—中层砂岩、粉砂岩和泥岩为主,局部夹紫红色中层砾岩,是藏东昌都红层区的主要组成部分。新生代以来,伴随青藏高原的强烈隆升,澜沧江缝合带复活转化为右旋斜冲断裂,区域大面积出现整体间歇性掀斜抬升和垂直差异升降运动,地震、水热活动较为发育,具有继承性、新生性和间歇性的特点(潘桂棠等,2020a)。

觉学红层滑坡位于青藏高原东缘他年他翁山

与芒康山夹持的澜沧江河谷右岸,河流侵蚀作用强烈,地势险要,切割深,起伏大,总体表现为高原高山峡谷地貌。受内外地质营力作用耦合的影响,山脉、河流走向与区域构造线一致,且具有“向斜成山、背斜呈谷”的地貌特征。区内夏季气候温和湿润,冬季气候干燥寒冷,空气稀薄,光照充足,年温差小,日温差大,干湿分明,总体属于高原温带半湿润半干旱山地季风气候。年降水量为 450 ~ 570 mL,夏秋多雨,雨季集中在 5 ~ 9 月份。

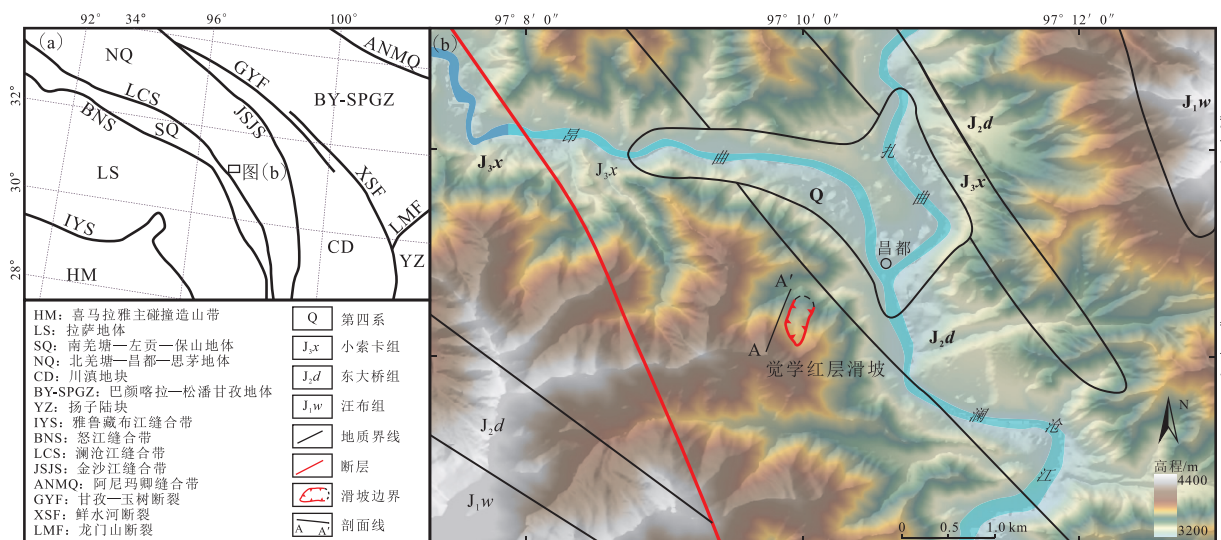


图 1 研究区地质背景图(图 a 据许志琴等,2011)

Fig. 1 Geological background map of the study area (after Xu et al., 2011 for figure a)

2 觉学红层滑坡基本特征

2.1 斜坡结构特征

区域构造演化形成的斜坡结构及其内部结构面组合特征是滑坡地质灾害形成的主控因素之一,为此对滑坡区域进行了详实的基础地质调查。滑坡区地层为中侏罗统东大桥组(J_2d),岩性为紫红色或橘红色、灰色薄—中层泥岩、粉砂质泥岩夹同层厚的砂岩,两者厚度比例介于 3:1 ~ 10:1 之间。觉学滑坡位于区域复式向斜的北东翼(图 1b),滑坡后缘更靠近复式向斜核部,层间小褶皱极为发育,以“M”型和“S”型为主(图 2a),但从局部来看,滑坡四周地层均呈单斜构造产出,地层原生层理产状约:240°∠60°(S_0),斜坡坡面(S_p)产状:40°∠53° ~ 18°,两者倾向相反,形成典型的反向坡。

由于地处金沙江缝合带与澜沧江缝合带之间,伴随强烈的印度—欧亚板块强烈的造山作用和由此导致的青藏高原巨量隆升,加上滑坡区地层岩性

主体以物理力学性质弱的泥质岩为主,地层内与褶皱、断层配套的构造结构面,如轴面劈理和“X”型共轭剪节理,极为发育。其中,轴面劈理与复式向斜配套,在滑坡后缘中侏罗统东大桥组(J_2d)地层内的次级褶皱内极为发育,且较为完整,呈扇状分布(图 2b-d)。觉学红层滑坡区分布的轴面劈理主要呈半扇形分布在复式向斜北东翼,是向斜轴面劈理的一部分,产状约为:25°∠(81° ~ 45°)(S_1)(图 2e);“X”型共轭剪节理在整个昌都地区均有发育,且产状变化不大,是区域北东—南西向构造应力的产物,产状分别为:119°∠59°(S_2)、321°∠74°(S_3),节理面光滑、平直(图 2f-h),延伸远,局部可见低温热液活动形成的方解石薄膜,薄膜上可见节理面剪切形成的钉子痕和阶步(图 2i),表明节理面透入性强,且曾有过地下水热液活动。另外,由于褶皱广泛发育,顺层剪切作用强烈,在层内形成了密集(layer)的层间剪切劈理(S_4),但因不同岩性层之间的劈理面存在劈理折射(图 2e-j),因此未单独进行产状测量。

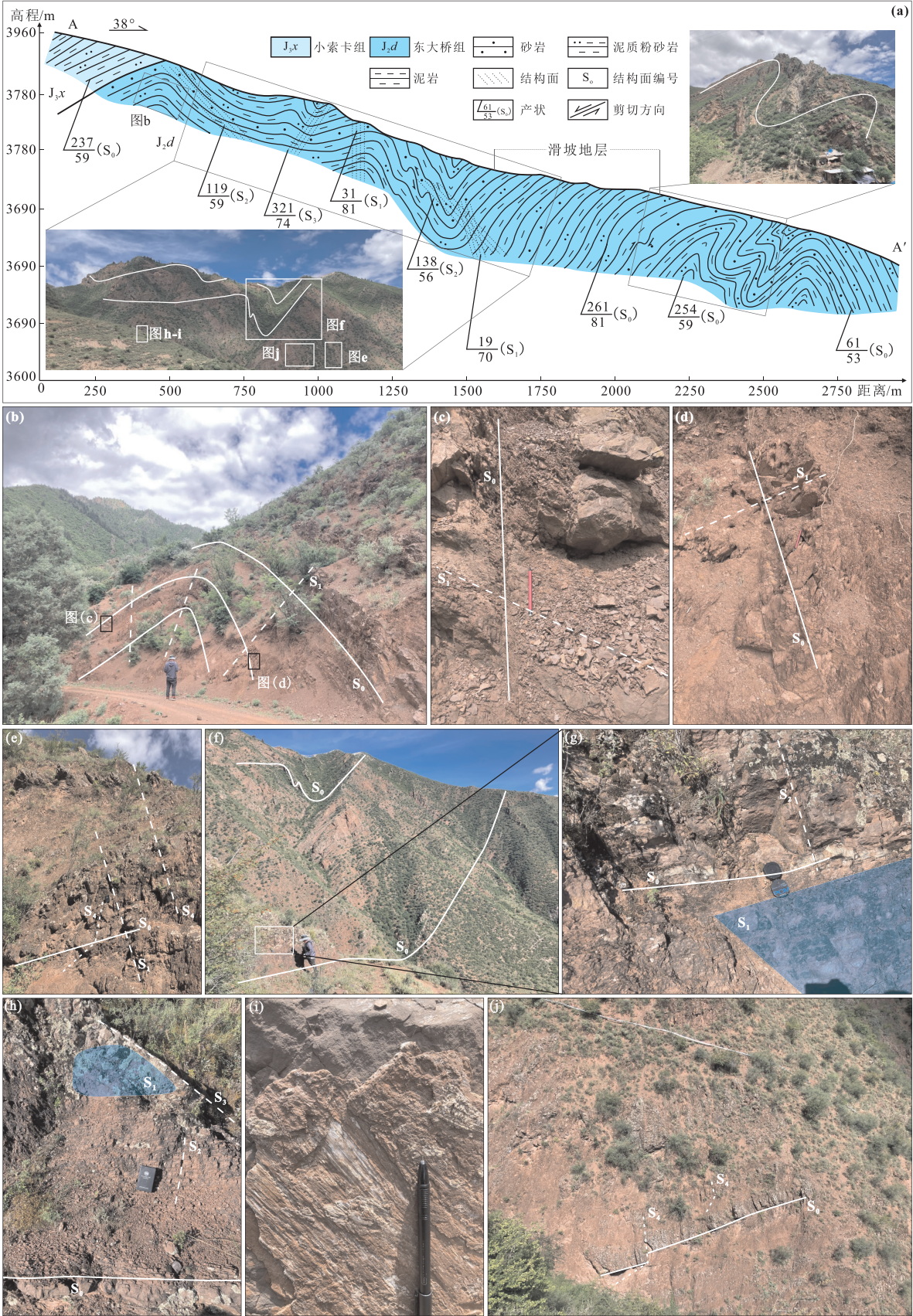


图2 滑坡区地质构造与结构面特征图

Fig.2 Geological structure and structural plane characteristic map of landslide area

除构造结构面外,斜坡内还发育重力、风化及斜坡物理地质作用形成的张性卸荷裂隙,发育深度较浅,其产状与斜坡坡面产状较为接近,裂隙面呈不规则的锯齿状,上宽下窄,延伸距离短,透入性弱。

2.2 滑坡特征

现场调查发现,觉学红层滑坡总体滑向约 21° ,与褶皱枢纽走向垂直,与轴面劈理(S_1)倾向接近。滑坡北东侧与南西侧为季节性小冲沟,滑坡后缘位于反倾斜坡中下部,高程约3692 m,前缘为澜沧江右岸一支沟沟口(图1b),高程为3462 m,相对高差约230 m。按照摄影测量规范化流程(李洪梁等,2019a;2020;2021b),采用无人机载 Lidar 获取去植被后的滑坡区 DEM,可见后缘地层反倾特征明显(图3a)。滑坡区地形总体较陡,滑坡后壁产状与轴面劈理(S_1)产状近于一致,坡度约 53° ,滑体后部相对平缓,具微弱的高低起伏现象,坡度约 18° 。滑体中部微地形显著,发育次级弧形或圈椅状滑坡后壁(图3b),指示主滑体形成后曾发生过二次滑坡。滑体平面呈舌状或长条状,纵长约650 m,宽度介于约220~460 m,平均约300 m。

觉学红层滑坡堆积体主要由碎石块土、砂土和粉土组成,以砂土和粉土为主,约占总体积的60%~70%,主要岩性为泥质岩。碎石块土体积占比约30%~40%,呈角砾状,长轴粒径多在5~30 cm,主要岩性为砂岩。

由于地表及滑坡后缘植被覆盖,除在滑坡后缘右侧轴面劈理(S_1)面发育滑动留下的阶步(图3c)外,并未见到明显的滑带与滑面。不过,野外地质调查发现,滑坡前缘发育3处串珠状地下水渗流点(图3d),且沿基覆界面展布,表明基覆界面已贯通,暗示基覆界面应为滑坡滑面。钻探工程的揭露表明,滑带位于潜水面之下,厚度介于1.8~5.5 m之间,可能在形成过程中追踪、改造原有结构面而呈波状或阶梯状起伏(图3e)。由于滑体及滑坡区地层岩性以泥质岩为主,在地下水的改造下极易软化,因而钻孔内滑面及滑带特征难以保留。

钻孔编录资料也能很好的印证这一推论。以ZK06钻孔19.2~28.8 m的揭露情况(图3e)为例可见,19.2~23.1 m为紫红色含碎石土,湿度较大,碎石呈角砾状,岩性为砂岩,含量在15%~20%之间,最大粒径约1.5 cm,无分选性,与滑坡堆积体物质组成相似;23.1~25.4 m为紫红色粉土、黏土,含少量(<5%)次棱角状—次圆状碎石,粒径小于0.5

cm,岩性为砂岩、泥质粉砂岩,其刻划硬度小于指甲。该段土体总体湿润,含泥量大,遇水软化严重,干燥后可见明显收缩纹。这些特征表明滑体在滑动剪出过程中大部分碎石经历挤压碾磨,形成了细粒的粉土或黏土,出现了碎石含量降低、泥质物质含量升高的现象,由此推测该段为滑带土,厚度约2.3 m;25.4 m~28.2 m为中侏罗统东大桥组(J_2d)基岩,层理清晰,岩性为砂岩、泥质粉砂岩,与上覆滑带土之间呈现明显的突变接触。由于泥质岩透水性差,基覆界面就成了地下水渗流的良好通道。

以此为基础,综合各钻孔的揭露情况认为,滑坡堆积体厚度变化于21~42 m之间(图3e),平均厚度约28 m,由此估算的滑坡堆积物体积约为546万 m^3 ,属大型滑坡。

3 觉学红层滑坡形成机理探讨

不同区域的滑坡由于区域地质条件的差异,有着不同的成因机制,表明区域地质演化对滑坡等地质灾害形成的具有控制作用,但在进行成因分析时,很多学者多强调从滑坡形成后滑带及滑体的工程地质学特征入手,往往造成基础地质与灾害地质的脱节,难以把握地质灾害形成的本质原因(张永双等,2009;2020;李晓等,2008;李洪梁等,2022)。因此,作者以觉学红层滑坡为例,结合区域地质演化特征,分析滑坡区地层的沉积环境,探讨滑坡区地质构造与区域构造演化的关系,以及滑坡区地质构造特征在滑坡形成过程中扮演的角色。最后,讨论地下水动力等外动力地质作用在区域地质格架形成之后对滑坡发育的促进作用。

3.1 沉积相控制岩体物理力学性质

沉积相,即沉积物形成的环境、条件和特征的总和,是一定沉积环境下形成的具一定岩性和古生物标志的地层单元(吴崇筠等,1981)。前已述及,觉学红层滑坡所在的昌都红层地区位于金沙江缝合带与澜沧江缝合带之间(图1a),受晚二叠世(P_3)海西运动和中三叠世(T_2)印支运动影响,澜沧江洋和金沙江洋相继闭合形成三江联合地体增生于扬子克拉通西缘。晚三叠世(T_3),昌都地区发生陆内拉张拗陷形成昌都盆地之后,受金沙江造山带和北澜沧江造山带的双向挤压影响,盆地快速萎缩,期间接收沉积形成了碎屑岩夹碳酸盐建造。到了侏罗纪(J),西侧怒江洋盆逐渐打开,昌都盆地再次打开形成陆内湖泊环境,在炎热干旱和氧化环境下接

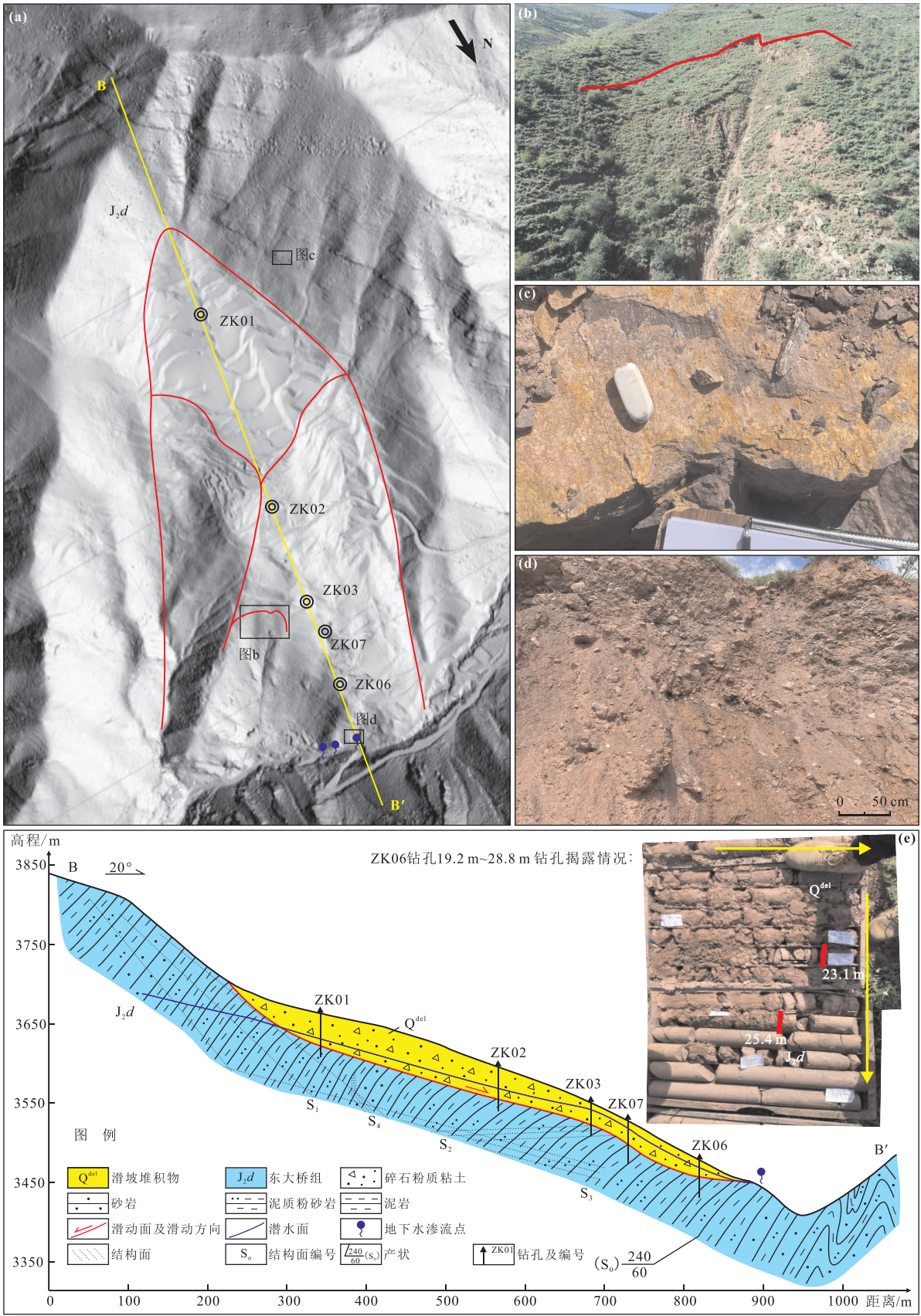


Fig. 3 Engineering geological characteristics of Juexue red strata landslide

受周缘岩石风化、剥蚀、搬运而来的碎屑物质沉积,依次形成了觉学红层滑坡所在区域上的下侏罗统汪布组(J_1w)、中侏罗统东大桥组(J_2d)和上侏罗统小索卡组(J_3x)紫红色泥岩、泥质岩夹砂岩(Liu et al., 2013; 曹代勇等, 2019; 占王忠等, 2018; Chung et al., 2005; 吴悠等, 2010; 唐菊兴等, 2006; 潘桂棠等, 2020b; 王保弟等, 2021; An et al., 2001; 朱弟成等, 2021)。在此过程中形成的三叠系(T)、侏罗系(J)地层也就是如今我们所见的“藏东昌都红层区”的雏形。

从沉积学角度来看,泥岩及粉砂质泥岩为泥质结构,粒度细,在沉积过程中极易受水动力条件的改变而形成细层,因此层理极为发育,一次水动力条件下形成的单层泥质岩厚度多小于5 cm(图4a)。从岩石物理力学性质来看,泥质岩水理性质差、膨胀崩解严重(图4),属软岩范畴,极易受到后期风化作用的改造。相比较而言,砂岩粒度较粗,胶结较好,单层厚度较大(图4b),物理力学性质也相对较好,抗风化能力强于泥质岩,但由于受物源补给和沉积过程中的物理分选作用的制约而形成了侏罗系(J)以泥质岩为主的“软夹硬”的地层结构(图4c)。在泥岩夹砂岩组成“软夹硬”地层结构中,泥岩作为非能干性层,砂岩则为相对能干性层,在受到挤压应力形成纵弯褶皱过程中,极易发生层间滑动剪切,会在层内形成剪切劈理。由于泥岩沉积层单层沉积厚度小,且粒度较细,物理力学性质相对较弱,更容易发生剪切作用,在层间形成与原始层理面(S_0)相交的剪切劈理;砂岩层则反之,且调查发现,通常单层沉积厚度越大,沉积物粒度越粗,但同时剪切形成的劈理面(S_4)与原始层理面(S_0)之间的夹角也越大(图4b),从而将地层切割为破碎的块体,由此表现出强度低、易风化崩解等特点。觉

学红层滑坡所在的中侏罗统东大桥组(J_2d)上部地层正是发育这些“软夹硬”层序的典型地段。因此,侏罗系(J)红层沉积是觉学红层滑坡发育的沉积建造基础。

3.2 区域构造演化制约斜坡与岩体结构

根据沉积学原理,原始湖相沉积的地层是水平或近于水平的,且在无构造活动影响的前提下,其内部除原始沉积层理面(S_0)外,并无其他构造结构面。野外调查发现,觉学红层滑坡区构造线呈北西南东向展布,尤以褶皱分布广泛,背斜、向斜相间发育,主应力方向为北东—南西向。觉学红层滑坡所在地层除发育倾斜的沉积层理面(S_0)外,还广泛发育2种类型(轴面劈理和“X”型共轭剪节理)的3组透入性极强的构造结构面,表明沉积地层形成后经历了强烈的构造活动影响。据昌都地区区域地质调查资料(西藏自治区地质调查院, 2007^①),始新统(E_2)紫红色磨拉石建造角度不整合于下伏古生界(Pz)、三叠系(T)、侏罗系(J)和白垩系(K)地层之上,指示晚白垩世(K_2)—古新世(E_1)强烈的构造运动,而这一时间段与印度板块向北(青藏高原)、北东(青藏高原东缘)俯冲与欧亚大陆碰撞造山作用的启动时间(Zhu et al., 2013; 莫宣学等, 2003; 2007; Leech et al., 2005; 李洪梁等, 2019b)极为吻合,表明区域构造演化制约了昌都地区现今的构造格架。

在印度—欧亚大陆碰撞造山作用影响下,经历始新世(E_2)和中新世(N_1)强烈的褶皱造山运动(曹代勇等, 2019; 占王忠等, 2018; Chung et al., 2005; 吴悠等, 2010; 唐菊兴等, 2006),地层掀斜、弯曲形成褶皱,两翼挤压剪切,会在两翼层间形成剪切劈理,在核部形成走向平行于褶皱枢纽的扇状劈

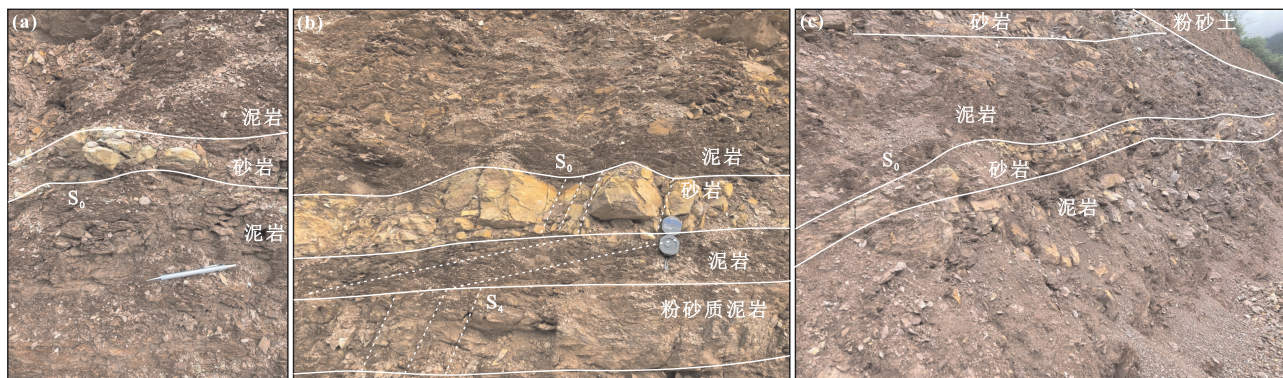


图4 觉学红层滑坡区地层结构特征

Fig. 4 Structural characteristics of strata in Juexue red strata landslide area

理(图5),如上述层间剪切劈理 S_4 和轴面劈理 S_1 ,其中对于轴面劈理,劈理面从褶皱外弧向内弧收敛,形成正扇形,外弧拉张、内弧挤压,使得同处于地表的向斜核部岩体完整度和抗风化能力远远高于背斜核部岩体,因此向斜核部易形成山岭,而背斜核部多形成沟谷,沟谷两侧斜坡结构也就自然发展为反向坡。这也就是区域地形地貌呈现出“向斜成山、背斜成谷”的原因。觉学红层滑坡正好位于核部为澜沧江河谷的背斜南西翼或核部为澜沧江右岸山岭的向斜北东翼形成的反向坡。

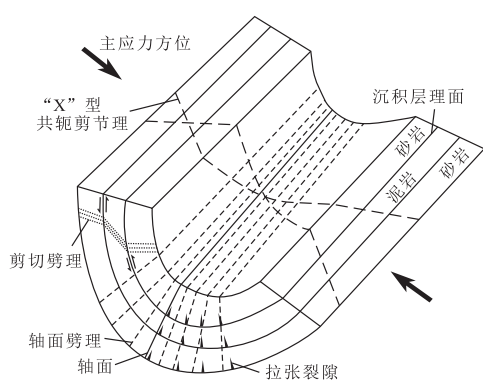


图5 纵弯向斜相关结构面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structural planes associated with longitudinal bending syncline

挤压应力在沉积地层中形成褶皱及伴生轴面劈理外,最为常见的构造结构面即为“X”型共轭剪节理(图5),且两组节理面走向锐夹角平分线方位代表了主应力方向。野外地质调查发现,觉学红层滑坡区发育“X”型共轭剪节理(S_2 、 S_3),根据上述原理统计区内44个产状点数据,计算得最大主应力方位介于 $30^\circ \sim 45^\circ$ 之间,平均约 40° (另文发表),与印度-欧亚大陆在青藏高原东缘碰撞的主应力方向(唐菊兴等,2006)一致(图6),暗示 S_2 、 S_3 剪节理是区域构造应力场的产物。

对于岩体结构,觉学红层滑坡区地层宏观上呈层状结构,但层理面(S_0)及穿切层理的构造结构面(S_1 、 S_2 和 S_3)已经贯穿,透入性强且密集发育,层理面(S_0)与轴面劈理(S_1)之间以及两组共轭剪节理(S_2 和 S_3)之间均大致互为反倾,且 S_0 、 S_1 与 S_2 、 S_3 走向近于垂直(图6),将岩体切割为菱形块体(图2g、h,图4),整体表现为较为松散的层状-碎裂状结构,是滑坡形成的物源准备。同时,“X”型共轭剪节理(S_2 、 S_3)交线产状、轴面劈理(S_1)产状与滑坡后壁(S_p)产状近于一致(图6),在滑坡后缘右侧砂岩

层发育的轴面劈理(S_1)面上还可见明显的滑动痕迹(图3d),表明“X”型共轭剪节理(S_2 、 S_3)和轴面劈理(S_1)的发育对斜坡物质的滑动具有促进作用,滑面可能是由轴面劈理(S_1)演化而来。由于滑坡区地层构造结构面密集发育、原生层理厚度小,且岩性以物理力学性质弱的泥质岩为主,后期又受风化作用的改造,因此觉学红层滑坡堆积体呈现出以砂土和粉土为主要成分的特征。

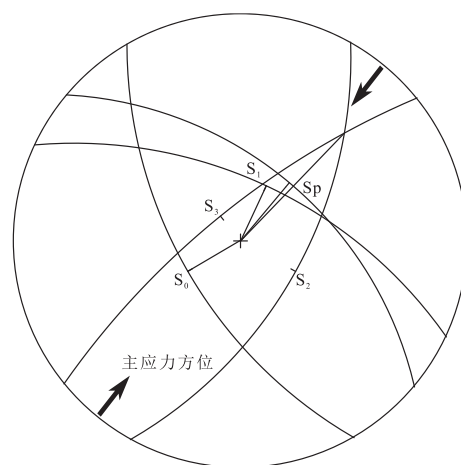


图6 觉学红层滑坡区主要结构面赤平投影图

Fig. 6 Stereographic projection of main structural planes in Juexue red strata landslide area

除此之外,褶皱形成过程中的层间剪切作用对岩体物理力学性质的弱化也不容忽视。层间强烈的剪切作用会导致碎屑岩粒度细化,颗粒出现定向性,粒径较大颗粒沿剪切方向出现虚脱空间而发生碎裂、溶蚀现象,粉粒和黏粒含量增加,蒙脱石、伊利石等黏土矿物含量升高(李晓等,2008),比表面积增大,水岩交互作用增强,使岩体 c 、 φ 值降低,从而破坏岩体结构、弱化岩体物理力学性质。

3.3 地下水动力与重力作用加剧斜坡失稳

钻孔资料揭示及觉学红层滑坡前缘地下水渗流现象表明,地下水潜水面埋深较浅,位于滑面之上(图3d),且活动为较为强烈。层理面(S_0)及穿切层理的构造结构面(S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4)正是地下水活动的良好通道。由于滑坡区地层以泥质岩为主,地下水在结构面内循环过程中,水岩交互作用强烈,在与泥质岩发生物质交换的同时,还会改变岩体结构,使其变得疏松,发生泥化现象,进而形成泥化夹层。

由于大气降水、地表水和地下水是地壳表层次的循环系统,地下水动力作用的强弱主要受气候环

境决定,湿热的气候环境往往地下水动力作用强烈,干冷气候环境则反之。自印度-欧亚大陆初始碰撞以来,青藏高原东缘的隆升可划分为4幕,呈现间歇式隆升的特征(唐菊兴等,2006),对亚洲古气候包括现今的东亚季风气候系统的塑造具有深远的影响(Kirkpatrick et al., 2020; Kapp et al., 2019),仅晚更新世(Q_3)以来,青藏高原东缘就至少经历了4次湿热气候,降雨量充沛(覃建勋等,2014; 朱宗敏等,2007)。大气降水沿层理面及结构面下渗,与围岩发生强烈的水岩交互作用,软化岩石,使结构面不断加宽、松弛、贯通,进一步破坏了岩体的完整度。

另外,数值模拟、物理概化模拟(陶志刚等,2021; 马文著,2020; 郑达等,2019; 杨国香等,2012; 张以晨等,2011)以及野外工作实践证实,反倾岩质边坡普遍发育倾倒变形,且通常单层厚度越小、岩体强度越低,其倾倒深度往往越深,地层内部以褶皱转折端纵张裂隙的形式逐渐形成拉张裂隙。随着倾倒变形的持续,这些张裂隙不断扩展、贯通,形成潜在的滑面。觉学红层滑坡发育于反向坡,地层内发育近于平行坡面的轴面劈理(S_1),为地层的倾倒变形创造了良好条件。在平行斜坡表面的重力分力作用下形成弯矩作用,地层向下做悬臂梁弯曲(黄润秋等,2007),追踪、改造轴面劈理(S_1)形成张裂隙。伴随重力作用的持续加载,坡脚由于应力最为集中,张裂隙不断向上扩展,地层持续弯曲,引发层间及张裂隙两侧岩体剪切,为地层的弯曲倾倒提供空间。如此循环往复,地层根部折断,形成断续分布的折断面,逐渐贯通,张裂隙倾向发生小角度偏转,形成弧面,进而错断地层,破坏了反倾地层的锁固效应。在与地下水动力作用耦合改造下,由张裂隙发展而来的弧面内岩石不断软化,形成泥化带,进而发展为潜在滑面。在后期强降雨、地震等突发因素诱发下,斜坡失稳形成滑坡。

3.4 滑坡演化过程分析

尽管觉学红层滑坡发育在反倾斜坡,但前缘剪出口滑坡堆积物直接覆盖于基岩之上,前缘下伏滑面平整(图3d),且滑坡后缘具有沿先成轴面劈理(S_1)下挫的破坏特征,加上滑坡区地层岩性整体为以泥质岩为主的软岩,表明滑体为顺“层(即结构面)”滑动,可见觉学红层滑坡并不具备“锁固段”失稳机理。因此,依据上述对觉学红层滑坡形成的3个关键地质过程的分析可见,该滑坡的形成是内、

外动力地质作用耦合的结果,可从滑坡地层沉积相、区域构造演化和滑面的形成出发,将觉学红层滑坡的演化过程概化为滑坡地层沉积建造形成阶段、岩体构造破碎阶段、滑面初始贯通阶段和破坏4个阶段(图7)。详述如下:

(1)滑坡地层沉积建造形成阶段:中侏罗世(J_2)时期,觉学红层滑坡所在的昌都盆地属于陆内湖泊,在炎热干旱的氧化环境下,接收周缘岩石风化、剥蚀、搬运而来的陆源碎屑物质沉积,形成了中侏罗统东大桥组(J_2d)上部物理力学性质弱的泥质岩夹砂岩组合(Liu et al., 2013; 曹代勇等,2019; 占王忠等,2018; Chung et al., 2005; 吴悠等,2010; 唐菊兴等,2006; 潘桂棠等,2020b; 王保弟等,2021; An et al., 2001; 朱弟成等,2021)(图7a),是觉学红层滑坡发育的沉积建造基础。

(2)岩体构造破碎阶段:晚白垩世(K_2)-古新世(E_1)开始,印度与欧亚板块对接碰撞(Zhu et al., 2013; 莫宣学等,2003,2007; Leech et al., 2005),昌都盆地上升为陆。伴随碰撞造山的持续,区内经历了4幕强烈的褶皱造山运动,形成了昌都地区连续发育的褶皱及伴生的逆冲推覆断层(唐菊兴等,2006),在同期风化作用的强烈改造下形成了“向斜成山、背斜成谷”的地形地貌。受造山运动巨大的构造应力影响,侏罗系(J)沉积地层在形成褶皱、断层的同时,也在岩体内部形成了大量与褶皱配套的透入性轴面劈理(S_1)、层间剪切劈理(S_4)和响应北东-南西向最大主应力的“X”型共轭剪节理(S_2 、 S_3),这些密集分布结构面与原生层理面(S_0)组合将地层切割为菱形块体,严重破坏了岩体的完整度(图7b),是结构面发展为滑坡滑面的必要条件。

(3)滑面初始贯通阶段:晚更新世(Q_3)以来,昌都地区湿热气候频繁,雨量充沛(覃建勋等,2014; 朱宗敏等,2007),大气降水沿层理面及结构面下渗,与围岩发生强烈的水岩交互作用,软化岩石,使结构面不断加宽、松弛、贯通,进一步破坏了岩体的完整度。同时,在自身重力作用的加持下,反倾地层做悬臂梁式倾倒变形,追踪、改造先成轴面劈理(S_1)、导致层间剪切,进而加剧倾倒变形,形成弧面,错断地层,破坏地层的锁固效应。倾倒变形的加剧增强了地下水动力作用,水岩交互作用增强,不断软化弧面内岩石。如此循环往复,在地下水动力与重力作用的耦合下,沿弧面形成泥化带(图7c),进而发展为潜在滑面。

(4)破坏阶段:由于斜坡坡脚为应力最为集中的地段,在滑面初始贯通后,在坡体重力长期作用下,前缘逐渐出现缓慢的剪切蠕滑变形;随着变形的加剧,上部坡体逐渐失去支撑产生拉裂,进而整个坡体逐渐发生倾倒变形,造成蠕滑—拉裂—倾倒

破坏模式。在后期强降雨或断层活动(地震)等突发因素影响下,弧形潜在滑面强度峰值被突然克服,坡体沿初始贯通滑面整体失稳,形成滑坡(图7d)。随后,在降雨、风化及人类工程活动等影响下,滑体前缘出现临空面,逐渐失稳,形成二次滑坡。

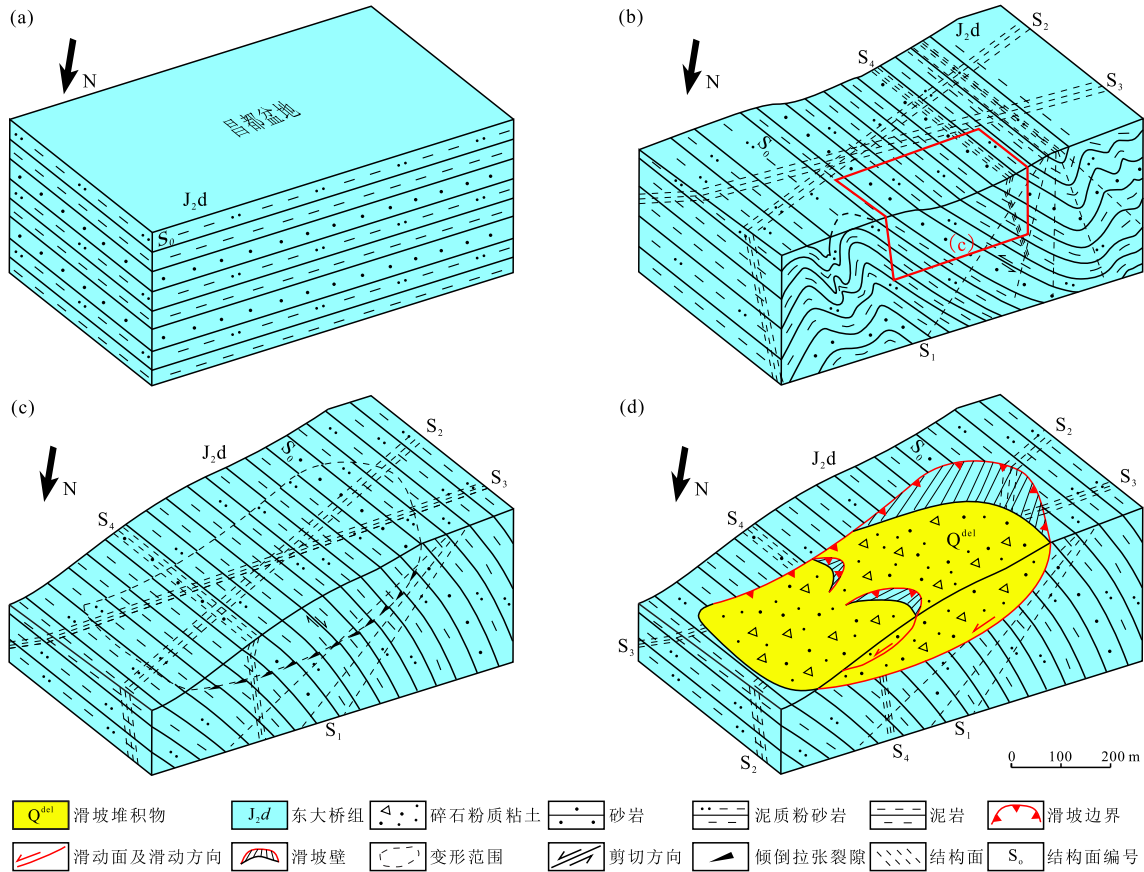


图7 觉学红层滑坡形成演化过程简图

Fig. 7 Schematic map of the formation and evolution of the Juexue red strata landslide

4 结论

(1)觉学红层滑坡发育在澜沧江河谷右岸反倾斜坡。滑坡区地层岩性为中侏罗统东大桥组(J_{2d})上部物理力学性质弱的泥质岩夹砂岩。除原生层理(S₀)外,地层内发育轴面劈理(S₁)、“X”型共轭剪节理(S₂,S₃)和层间剪切劈理(S₄)等4组与区域构造演化密切相关的透人性结构面。

(2)觉学红层滑坡是内、外动力地质作用耦合的产物。侏罗系(J)昌都盆地所处的炎热干旱氧化环境下形成了物理力学性质弱的、以泥质岩为主要岩性的红层沉积是滑坡发育的沉积建造基础。晚白垩世(K₂)以来的印度-欧亚板块碰撞造山作用奠定了区域构造格架,是滑坡发育的必要条件。进

入更新世(Q₃),昌都地区频繁的湿热气候环境诱发强烈的地下水动力作用以及斜坡自身重力作用是觉学红层滑坡的主要诱发因素。

注释:

①西藏自治区地质调查院,2007. 中华人民共和国1:25万区域地质调查报告(囊谦县幅、昌都县幅和江达县幅)[R]. 拉萨:西藏地质区地质西藏自治区地质调查院一分院。

参考文献(References):

An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al, 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times[J]. Nature, 411(6833): 62-66.

- Chung S, Chu M, Zhang Y, et al, 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism[J]. *Earth - Science Reviews*, 68(3-4): 173-196.
- Huang R Q, Li W L, 2011. Formation, distribution and risk control of landslides in China [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(2): 97-116.
- Kapp P, Decelles P G, 2019. Mesozoic - Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses [J]. *American Journal of Science*, 319(3): 159-254.
- Kirkpatrick H M, Moon S, Yin A, et al, 2020. Impact of fault damage on eastern Tibet topography[J]. *Geology*, 49(1): 30-34.
- Leech M L, Singh S, Jain A K, et al, 2005. The onset of India-Asia continental collision; Early, steep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 234(1): 83-97.
- Liu S S, Deng B, Li Z, et al, 2013. Geological evolution of the longmenshan intracontinental composite orogen and the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Earth Science*, 24(6): 874-890.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al, 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1429-1454.
- 蔡俊超, 2020. 反倾岩质边坡柔性弯曲型倾倒变形全过程力学行为及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 曹代勇, 宋时雨, 马志凯, 等, 2019. 晚三叠世昌都盆地构造背景及对成煤作用的控制[J]. *地学前缘*, 26(2): 169-178.
- 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等, 2004. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. *工程地质学报*, 12(1): 34-40.
- 杜岩, 谢谟文, 吴志祥, 等, 2019. 平推式滑坡成因机制及其稳定性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 38(S1): 2871-2880.
- 范建军, 李才, 彭虎, 等, 2014. 藏北龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带发现晚石炭世—早二叠世洋岛型岩石组合[J]. *地质通报*, 33(11): 1690-1695.
- 范宣梅, 许强, 张俅元, 等, 2008. 平推式滑坡成因机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 27(S2): 3753-3759.
- 耿兴福, 苗天德, 2014. 近水平层状红层软岩滑坡成因机制研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 25(1): 9-12.
- 黄润秋, 2000. 岩石高边坡的时效变形分析及其工程地质意义[J]. *工程地质学报*, 8(2): 148-153.
- 黄润秋, 2003. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. *第四纪研究*, 23(6): 640-647.
- 黄润秋, 2004. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. *地球科学进展*, 19(3): 443-450.
- 黄润秋, 2007. 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*, 26(3): 433-454.
- 黄润秋, 李渝生, 严明, 2017. 斜坡倾倒变形的工程地质分析[J]. *工程地质学报*, 25(5): 1165-1181.
- 李才, 2008. 青藏高原龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带研究二十年[J]. *地质评论*, 54(1): 105-119.
- 李洪梁, 黄海, 李元灵, 等, 2022. 川藏铁路沿线板块缝合带地质灾害效应研究[J]. *地球科学*, doi:10.3799/dqkx.2022.263.
- 李洪梁, 李光明, 张志, 等, 2021a. 特提斯喜马拉雅东段扎西康矿区姐纳各普金矿床成因: 黄铁矿 He-Ar 及原位 S 同位素约束[J]. *地球科学*, 46(12): 4291-4315.
- 李洪梁, 施富强, 王立娟, 等, 2021. 基于三维激光扫描技术的金沙江“11·03”白格堰塞湖应急测绘研究[J]. *金属矿山*, 50(4): 154-159.
- 李洪梁, 王立娟, 尹恒, 等, 2021b. 金属矿山高速率筑坝尾矿库稳定性分析[J]. *矿业研究与开发*, 40(1): 95-102.
- 李洪梁, 王立娟, 马松, 等, 2019a. 深切割区尾矿库排洪系统“空天地一体化”行洪能力评估[J]. *金属矿山*, 48(1): 181-186.
- 李洪梁, 李光明, 刘洪, 等, 2019b. 拉萨地体西段达若地区古新世花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的约束[J]. *地球科学*, 44(7): 2275-2297.
- 李洪梁, 黄海, 李元灵, 等, 2022. 川藏交通廊道沿线板块缝合带地质灾害效应研究[J]. *地球科学*, 47(12): 1-23.
- 李江, 许强, 胡泽铭, 等, 2015. 川东红层原状滑带土饱水软化试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 34(S2): 4333-4342.
- 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(S2): 4053-4062.
- 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.
- 马文著, 徐衍, 李晓雷, 等, 2020. 基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟[J]. *水文地质工程地质*, 47(5): 150-160.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等, 2003. 印度—亚洲大陆碰撞过程的火山作用响应[J]. *地学前缘*, 10(3): 135-148.
- 莫宣学, 赵志丹, 周肃, 等, 2007. 印度—亚洲大陆碰撞的时限[J]. *地质通报*, 26(10): 1240-1244.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1-28.
- 潘桂棠, 任飞, 尹福光, 等, 2020a. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带[J]. *地球科学*, 45(7): 2293-2304.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 等, 2020b. 班公湖—双湖—怒江—昌宁—孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. *沉积与特提斯地质*, 40(3): 1-19.
- 任光明, 聂德新, 刘高, 2003. 反倾向岩质斜坡变形破坏特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 22(S2): 2707-2710.
- 覃建勋, 韩鹏, 车晓超, 等, 2014. 利用荣玛地区温泉钙华 $\delta^{18}\text{O}$ 及微量元素重建西藏全新世以来古气候[J]. *地学前缘*, 21(2): 312-322.
- 谭儒蛟, 杨旭朝, 胡瑞林, 2009. 反倾岩体边坡变形机制与稳定性评价研究综述[J]. *岩土力学*, 30(S2): 479-484.
- 唐菊兴, 钟康惠, 刘肇昌, 等, 2006. 藏东缘昌都大型复合盆地喜马拉雅期陆内造山与成矿作用[J]. *地质学报*, 80(9): 1364-1376.
- 陶志刚, 任树林, 郝宇, 等, 2021. 层状反倾边坡破坏机制及 NPR 锚索控制效果物理模型试验[J]. *岩土力学*, 42(4): 976-990.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2021. 西南三江金沙江弧盆系时空结构及构造演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(2): 246-264.
- 魏君奇, 王晓地, 庄晓, 等, 2008. 澜沧江缝合带吉岔蛇纹岩中闪长岩和俄辉辉长岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩*

- 石学报, 24(6): 1297–1301.
- 吴崇筠, 刘宝珺, 王德发, 等, 1981. 碎屑岩沉积相模式[J]. 石油学报, 2(4): 1–10.
- 吴红刚, 马惠民, 侯殿英, 等, 2010. 青海高原龙穆尔沟红层滑坡变形机制的地质分析与模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 29(10): 2094–2102.
- 吴玮江, 何琼, 程建祥, 等, 1993. 甘肃省东部滑坡发育规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 4(3): 91–97.
- 吴悠, 陈红汉, 肖秋苟, 等, 2010. 青藏高原昌都盆地上三叠统流体活动特征[J]. 地质科技情报, 29(2): 82–86.
- 武鹏, 2015. 红粘土的工程地质性质与滑坡形成机理[D]. 西安: 长安大学.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2011. 印度—亚洲大地碰撞构造[J]. 地质学报, 85(1): 1–33.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等, 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报, 29(6): 1847–1860.
- 杨国香, 叶海林, 伍法权, 等, 2012. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 31(11): 2214–2221.
- 殷坤龙, 周春梅, 柴波, 2014. 三峡库区巫峡段反倾岩石边坡的破坏机制及判据[J]. 岩石力学与工程学报, 33(8): 1635–1643.
- 占王忠, 谭富文, 陈明, 2018. 藏东昌都盆地沉积构造演化及油气远景分析[J]. 沉积与特提斯地质, 38(4): 85–96.
- 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等, 2014. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 33(S2): 3783–3790.
- 张涛, 谢忠胜, 石胜伟, 等, 2017. 川东红层缓倾岩质滑坡的演化过程及其识别标志探讨[J]. 工程地质学报, 25(2): 496–503.
- 张以晨, 仵磊, 沈世伟, 等, 2011. 反倾层状岩质边坡倾倒破坏力学模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(S1): 207–213.
- 张永双, 石菊松, 孙萍, 等, 2009. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例[J]. 地质力学学报, 15(2): 131–141.
- 张永双, 巴仁基, 任三绍, 等, 2020. 中国西藏金沙江白格滑坡的地质成因分析[J]. 中国地质, 47(6): 1637–1645.
- 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.
- 郑达, 王沁沅, 毛峰, 等, 2019. 反倾层状岩质边坡深层倾倒变形关键致灾因子及成灾模式的离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 38(10): 1954–1963.
- 朱弟成, 王青, 詹琼窰, 等, 2021. 三江北段晚三叠世构造—岩浆作用和几个相关的科学问题[J]. 沉积与特提斯地质, 41(2): 232–245.
- 朱宗敏, 寸金鸿, 庞龙飞, 等, 2007. 西藏米林地区湖积物的磁性特征及其古气候意义[J]. 地球科学, 32(5): 622–628.