

澜沧江昌都段滑坡发育特征及形成机制

张佳佳^{1,2,3}, 田尤^{1,2}, 陈龙^{1,2}, 李元灵^{1,2}, 高波^{1,2}, 李洪梁^{1,2}

ZHANG Jiajia^{1,2,3}, TIAN You^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, LI Yuanling^{1,2}, GAO Bo^{1,2}, LI Hongliang^{1,2}

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. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, Sichuan, China;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu 611734, Sichuan, China;

3. School of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要: 中国的山区和高原发育的滑坡地质灾害最严重, 青藏高原东部横断山区的大江大河沿岸发育一系列严重和频繁的地质灾害。基于前期 InSAR 遥感解译的工作, 通过现场的野外详细调查, 最终确定了澜沧江昌都段的 75 处滑坡地质灾害, 详细分析了滑坡的发育特征和主要影响因素, 总结了砂泥岩软弱地层区滑坡、断裂控制型滑坡、堆积层滑坡共 6 类典型滑坡的形成机制。结果表明: ①澜沧江干流岸坡的滑坡中, 堆积层的土质蠕滑滑坡最发育, 河流切坡是临江土质滑坡的主要触发因素。临江高位滑坡往往表现出高位但不远程的特征; ②岩质滑坡中最发育的两类斜坡结构分别为反向斜坡和顺向斜坡, 这与砂泥岩软弱岩体中发育的层理及垂直于层理的主控节理直接相关; ③85% 以上的滑坡发育在软—较软沉积岩岩组中, 表明岩石强度一定程度上影响了滑坡的发育。区内斜坡表层的强风化带及古(老)滑坡的堆积体为堆积层滑坡提供物质基础, 该类滑坡多存在蠕滑和多级滑动的特征; ④卡贡—盐井活动断裂对滑坡灾害空间分布具有明显的控制作用, 表现在断裂带控制滑坡边界和破碎带直接成为滑体。研究结果可为铁路修建过程的边坡灾害管控提供参考和支撑。

关键词: 发育规律; 形成机制; 滑坡; 澜沧江

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)12-2024-10

Zhang J J, Tian Y, Chen L, Li Y L, Gao B, Li H L. Development and formation mechanism of landslides along Changdu section of Lancang River. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(12): 2024–2033

Abstract: The most serious geo-hazards always occur in mountainous areas and plateaus in China, and a series of serious geo-hazards have occurred along the major rivers in eastern Tibet Plateau. Based on the previous research of InSAR remote sensing interpretation, through detailed field investigation, 75 landslides were determined along the Changdu section of Lancang River. Based on the analysis of the development characteristics and main influencing factors of landslides in detail, the formation mechanism of 6 types of typical landslides was summarized. The result shows that among the landslides along the Lancang River, the creep landslide in the accumulation layer is the most developed, and the river-cut slope caused by the rise and fall of the water level is the main influencing factor of the soil landslides along the river. High-location landslides near the river often slip directly into the valley, showing the high location but not remote characteristics. The two most developed types of slope structures in rock landslides are reverse and dip slopes, which are directly related to the bedding developed in the weak rock mass of sand and mudstone and the main joints perpendicular to the bedding. More than 85% landslides occur in the soft – little soft sedimentary rock association, indicating that the rock strength affects the development

收稿日期: 2021-07-07; **修订日期:** 2021-08-26

资助项目: 中国地质调查局项目《藏东昌都地区城镇灾害地质调查》(编号: DD20190644)、自然资源部深地动力学重点实验室自主(开放)研究课题《映秀—北川断裂带南坝段断裂变形结构对同震大型滑坡的作用机制研究》(编号: J1901)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目《重大泥石流灾害及风险》(编号: 2019QZKK0902)

作者简介: 张佳佳(1988—), 男, 在读博士生, 工程师, 从事内动力地质灾害研究。E-mail: jimjia2008@163.com

of landslides to a certain extent. The strong weathering zone on the surface of the slope and the accumulation body of the ancient landslide provide the material foundation for the landslides in accumulation layer, and these landslides are mostly characterized by creep sliding and multi-stage sliding. The Kagong-Yanjing active fault controls the spatial distribution of landslides. The faults control the landslide boundary and the fracture zone directly becomes the slide body. The results can provide reference and support for slope hazard management during the railway construction.

Key words: development characteristics; formation mechanism; landslides; Lancang River

滑坡灾害是目前山区经济活动面临的重大挑战。在许多国家,滑坡造成的社会经济影响大于任何其他自然灾害^[1-2],严重影响人类工程设施的运营管理^[3-5]。在中国,山区和高原发育的滑坡地质灾害最严重^[6],随着气候变化的加剧,这一趋势会更加明显^[3,7]。青藏高原东部的横断山区(金沙江、澜沧江、怒江并流地区),高山峡谷地形、大量松散岩屑和突发性强降雨事件诱发一系列严重和频繁的地质灾害,如岩石崩塌、高位滑坡、冰川泥石流、岩屑蠕滑、土壤蠕滑,以及极少数情况下的雪崩^[8-13]。2018年,白格滑坡甚至直接堵断金沙江,溃决后冲断金沙江大桥,造成下游巨大经济损失^[14-15]。这些地质灾害对人类工程设施和周围环境造成了巨大的破坏。川藏铁路是中国正在规划建设的重大铁路工程,铁路沿线地形地貌和地质构造条件极复杂,滑坡等地质灾害极其发育^[16-17]。因此,对青藏高原周边重要江河开展滑坡灾害发育特征研究,尤其是研究川藏铁路与重要江河交汇区域上下游的滑坡发育特征及其形成机制显得尤为重要。

本文聚焦川藏铁路与澜沧江的交会区域,以澜沧江大桥的上下游 160 km 为研究区,该区段同时也是澜沧江昌都段人类工程活动最密集的区段。重点分析该区段内滑坡地质灾害的空间分布特征、主要影响因素及典型滑坡的形成机制。前人关于研究区滑坡研究的精度和深度较有限,汤明高等^[18]针对昌都镇的地质灾害发育特征进行了研究,认为昌都镇主要的滑坡灾害类型为土质滑坡,多与人类工程活动相关;苏鹏程等^[19]对整个澜沧江流域的滑坡泥石流危险性进行了分区,昌都市至德钦段位于极高风险区最密集的区段;刘欢等^[20]通过遥感信息识别出昌都县的澜沧江沿岸为地质灾害的密集发育区;张佳佳等^[21]采用 SBAS-InSAR 技术,通过升轨和降轨互补处理的方式,对川藏铁路澜沧江段的斜坡形变信息进行解译,基于 2018 年 8 月至 2021 年 2 月近一年半时间尺度的斜坡平均形变速率,识别了研究区 113 处滑坡隐患,本文是在该研究成果的基

础上完成的,研究成果可为川藏铁路重大工程修建过程的边坡灾害管控提供参考和支撑。

1 研究区概况

澜沧江为横断山区南北向的主要河流之一,川藏铁路与澜沧江交汇于昌都市域范围内。研究区以川藏铁路澜沧江段的上下游 160 km 为南北边界,以澜沧江干流两岸 10 km 为东西边界,地理位置属于澜沧江的昌都段,为昌都段人类工程活动最密集的区段(图 1)。该区域位于澜沧江的中上游段,整体位于西藏自治区昌都市境内,属青藏高原东部的横断山系,构造位置上属于三江构造带,出露地层以三叠系、侏罗系砂泥岩为主,有少量岩浆岩和灰岩分布,分布巨厚的三叠系、侏罗系砂泥岩构成多个北西—南东向褶皱,断裂走向也以北西—南东为主^[22]。研究区海拔 2500~4500 m,发育中—高山地貌,沟壑纵横,河谷深切,为典型高山峡谷区,为滑坡、崩塌等斜坡地质灾害的发生提供了有利的地形条件。整个高海拔环境导致气候相对干旱,年降水量小于 500 mm,其中 70% 分布在 7~9 月。植被覆盖率较低,以低矮灌木为主。

2 滑坡发育基本特征

2.1 滑坡编目

为全面准确获取澜沧江沿岸的滑坡隐患,基于 StamPS 软件^[23],采用 SBAS-InSAR 处理方法,通过 Sentinel-1(升轨)和 RADARSAT-2(降轨)数据互补处理的方式(表 1),对澜沧江沿岸进行滑坡隐患进行识别。采用强度互相关算法进行主辅影像配准,通过改善配准窗口、信噪比阈值等参数进行多级匹配,达到子像元级影像配准;通过去除平地效应和地形相位及滤波处理,筛选差分干涉像对;通过相干系数阈值法、幅度离差阈值法提取高相干目标,利用时空滤波方法去除大气延迟误差,最终得到形变速率。解译结果显示,2018 年 8 月至 2020 年 2 月研究区 LOS 向的形变速率分别

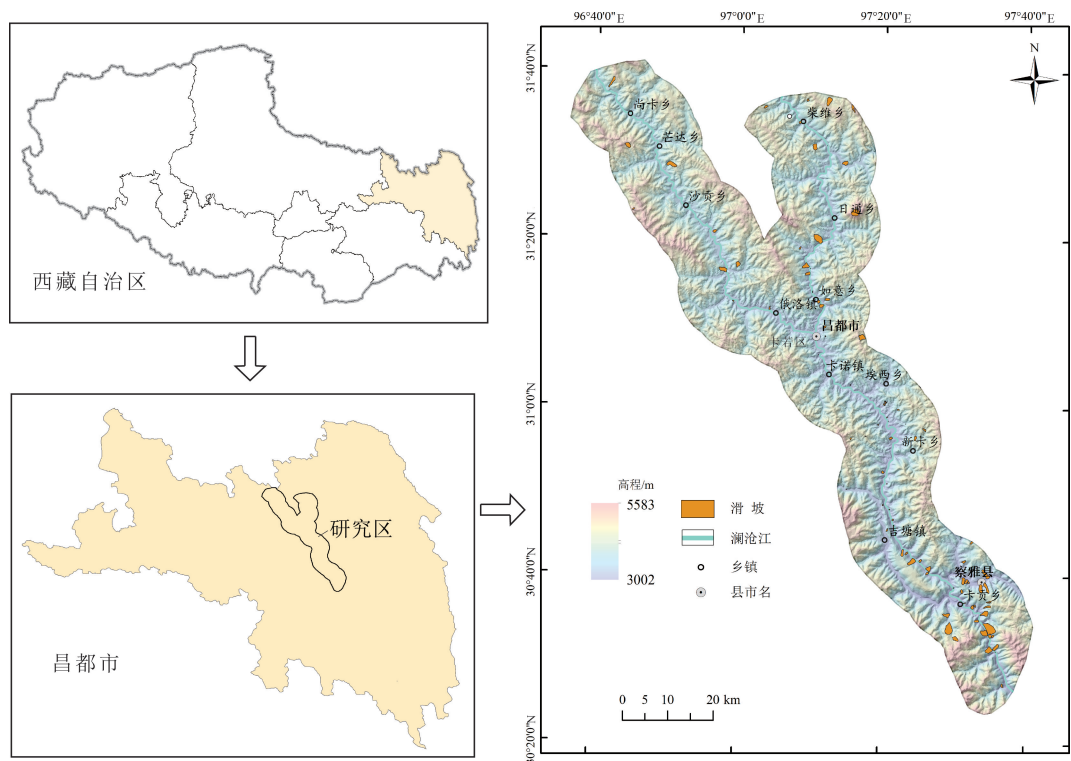


图 1 澜沧江昌都段地理位置
Fig. 1 Location of Changdu section of Lancang River

为 $-58 \sim 21 \text{ mm/a}$ (升轨) 和 $-42 \sim 16 \text{ mm/a}$ (降轨)^[21], 转换整合后的斜坡向最大平均速率达到 -128 mm/a (图 2-a)。基于形变结果, 选取数据标准差 (-15 mm/a) 作为稳定点的阈值, 据此圈定不稳定点密集发育的区域, 识别出澜沧江沿岸的 113 处滑坡隐患点。

表 1 卫星 SAR 影像数据基本参数信息
Table 1 Basic parameters of the satellite SAR image datasets

参 数	SAR 传感器	
	RADARSAT-2	Sentinel-1
轨道方向	降轨	升轨
所处波段	C	C
雷达波长/cm	5.6	5.6
空间分辨率/m	5	5×20
重访周期/d	24	12
入射角/°	35.6	33.9
影像时间(年-月)	2018-08—2020-02	2018-08—2020-02
影像数量/景	10	45

在前文所述的 InSAR 解译成果的基础上 (图 2-a), 开展了研究区的滑坡隐患野外核查, 剔除了岩崩、冰雪消融等非滑坡指示的形变信息, 以及人类工程活动造成的小型浅表层滑坡。通过古 (老) 滑坡的光学遥感解译和野外调查, 补充了已经发生的滑坡及时代久远的古 (老) 滑坡, 最终确定川藏铁路澜沧江段共发育滑坡总数 75 个 (图 2-b), 包含岩质滑坡 35 个, 土质滑坡 40 个。35 处岩质滑坡中, 中-大型占总数的 85%, 居雪村滑坡、约达村滑坡等特大型滑坡均为岩质滑坡。而土质滑坡规模多为中小型, 40 个土质滑坡中, 中小型占总数的 70%, 这些滑坡多以斜坡表层强风化层的失稳为主。

2.2 滑坡空间分布特征

空间分布上, 研究区滑坡主要沿澜沧江及其支流河谷发育, 澜沧江干流沿岸斜坡发育滑坡 29 个, 其中 14 个为大型及以上规模的滑坡, 典型的特大型岩质滑坡, 如居雪村滑坡、约达村滑坡、森林公园滑坡分布在澜沧江干流河谷岸坡; 规模类型上, 研究区大型及特大型滑坡有 32 个, 中型滑坡 34 个, 小型滑坡 9 个, 且不乏多处特大型的深层岩质滑坡, 所有

滑坡中规模最小的滑坡体积为 $8 \times 10^2 \text{ m}^3$, 最大的体积为 $1.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为研究区南端卡贡乡附近的居雪村滑坡(图 2)。

3 滑坡主要影响因素

澜沧江昌都段的滑坡地质灾害主要发育于澜沧江及其支沟岸坡, 以及部分人工开挖形成的公路边坡, 区域工程地质条件受岩性、澜沧江断裂带活动的影响较大, 外在触发条件主要有降雨、河流侵蚀及人工切坡, 基于笔者 2019—2021 年野外的详细调查, 认为该区滑坡地质灾害的发育主要受河流侵蚀、斜坡结构、工程地质岩组和活动断裂四方面因素的控制。

3.1 河流侵蚀

澜沧江 6—9 月丰水期流量占全年总流量的 55%~78%, 为一年内其他时间的 2 倍左右, 昌都市水文观测站监测到的洪峰流量均值为 $2180 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应测算出的水位值约为 7.5 m ^①, 那么枯水期的水位值估算为 3~4 m, 即澜沧江丰水期和枯水期会形成至少 3.5 m 的水位变幅, 这与野外观测的结果较一

致。每年水位的升高会直接冲蚀临江的滑坡坡脚, 从而牵引滑坡中上部物质逐渐向下滑移, 形成蠕滑(图 3-a)。此类滑坡在临江滑坡中最常见, 29 个临江滑坡中有 15 个为土质蠕滑滑坡, 为临江滑坡中数量最多的类型。

临江滑坡中剪出口位置位于澜沧江以上的滑坡有 9 个(图 4), 包含古(老)滑坡, 也有正在发生形变的滑坡隐患点。根据现今的滑坡地貌判断, 高位但不远程是这些滑坡的共同特点。滑坡滑动下错后均直接堆积在澜沧江河谷中, 未能形成高速远程的运移过程, 这跟滑坡的形成机制及澜沧江沿岸斜坡的地貌特征关系密切(图 3-b)。

3.2 斜坡结构

基于对 35 处岩质滑坡的野外调查, 研究区滑坡的斜坡结构统计结果如图 5 所示, 可以看出反向坡和顺向坡为区内滑坡最主要的两类斜坡结构。澜沧江沿岸的昌都市森林公园滑坡为区内典型的反向坡滑坡(图 6-a), 层理产状与滑坡主滑方向相反, 主控结构面为近垂直于层理发育的节理面; 同样位于澜沧江右岸的约达村滑坡, 其主控结构面即为砂

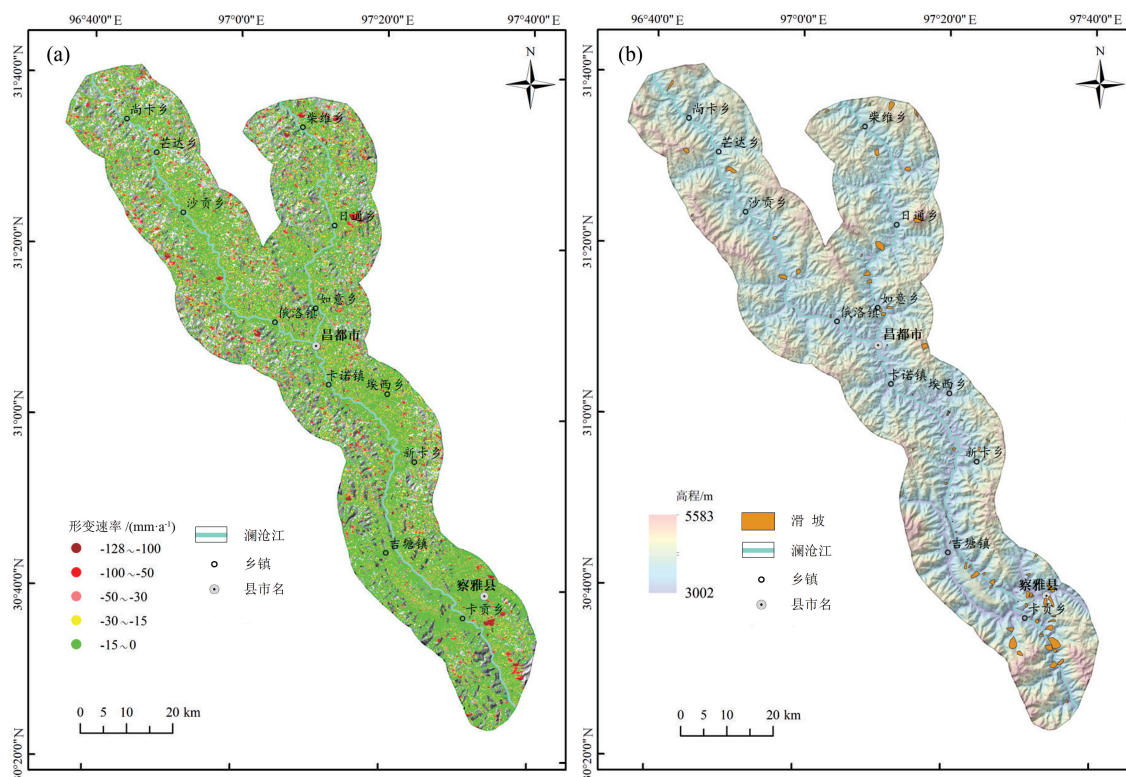


图 2 澜沧江昌都段斜坡形变速率(a)及滑坡地质灾害分布(b)

Fig. 2 Deformation rate of slop(a) and distribution of landslides(b) in Changdu section of Lancang River

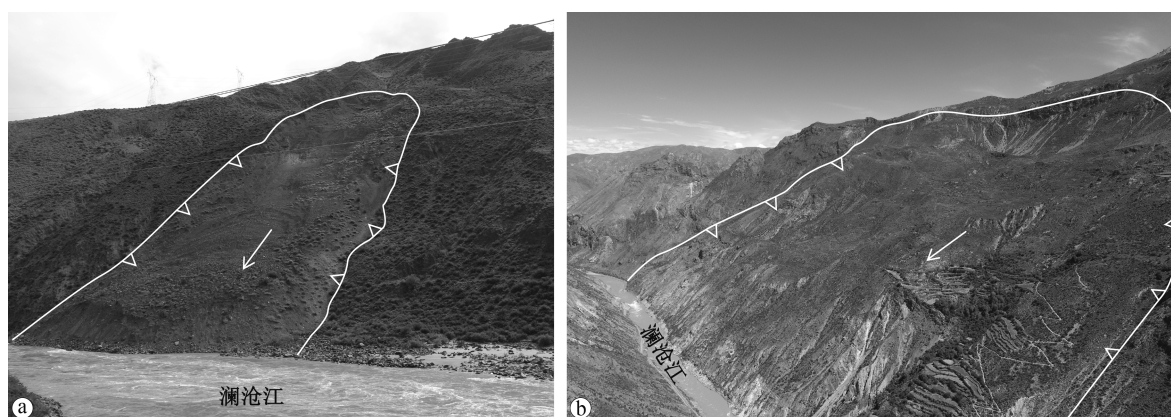


图3 澜沧江沿岸典型蠕滑动滑坡和高位滑坡

Fig. 3 Typical creeping and high-locality landslide along Lancang River

a—河流切坡诱发蠕滑滑坡(如给村滑坡); b—典型高位滑坡(居雪村滑坡)

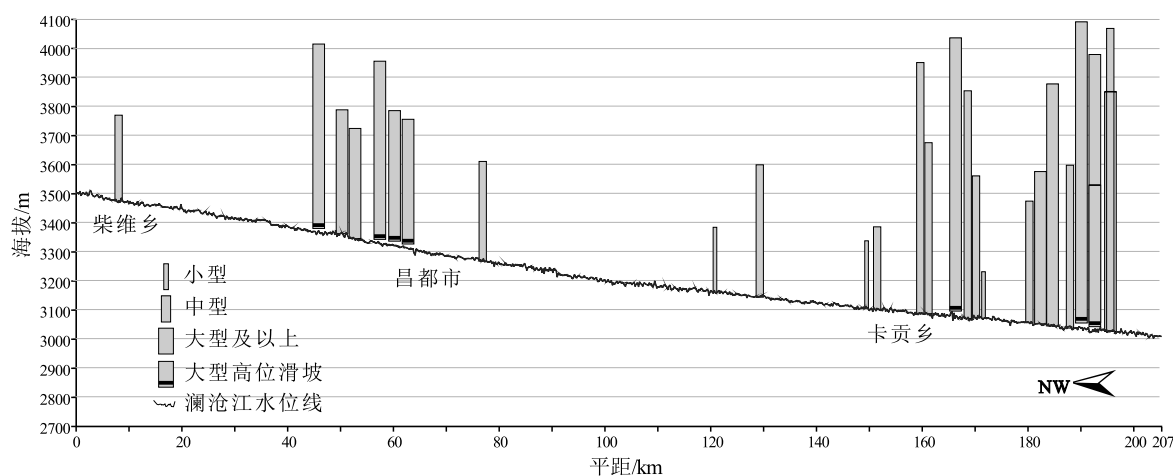


图4 沿岸滑坡与澜沧江水位相对位置关系

Fig. 4 Relationship between landslides and water level of Lancang River

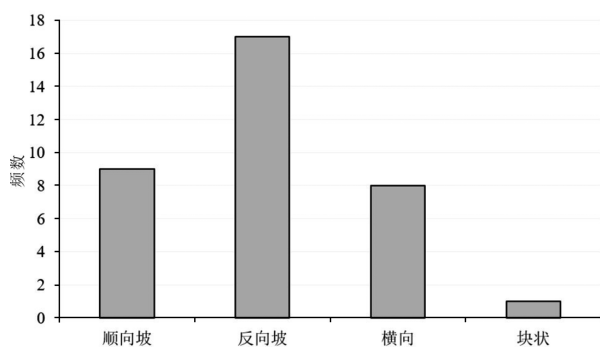


图5 滑坡所在斜坡结构的数量统计

Fig. 5 Number of landslides in different slop structure

泥岩地层中的层理,为区内典型的大型缓倾顺层岩质滑坡^[23](图6-b)。

3.3 工程地质岩组

研究区工程地质岩组分区如表2所示。据统计,75处滑坡中,95%以上的滑坡发育在软—较软沉积岩岩组和较软—较硬浅变质岩、碳酸盐岩岩组中,其中软—较软沉积岩岩组中有64处,占比85%。较软—较硬浅变质岩、碳酸盐岩岩组中有10处,松散—稍密堆积物岩组中发育1处,其他2类岩组无滑坡发育,而这2类岩组总体岩石强度最高,表明研究区岩组组合的岩石强度一定程度上影响了滑坡的发育(图7)。

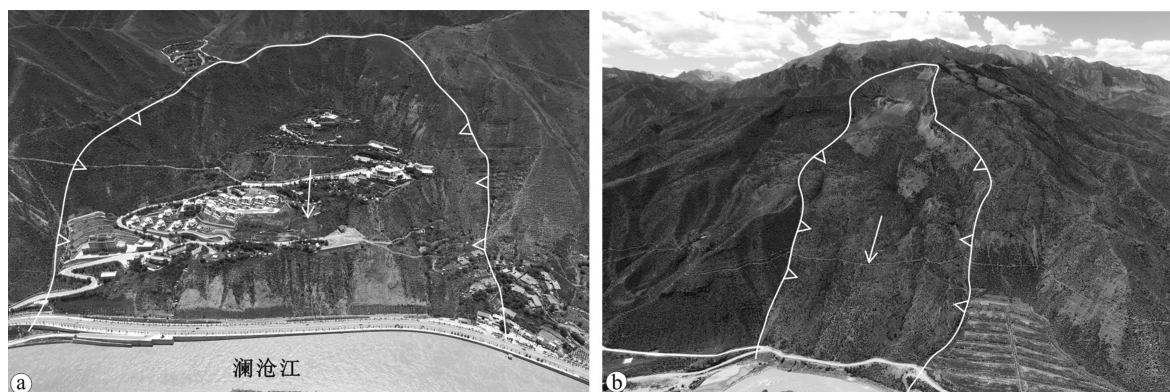


图 6 无人机摄取的典型反向坡和顺向坡滑坡全貌图

Fig. 6 Full view of typical landslides with reverse and forward slopes by UAV

a—反向坡滑坡(森林公园滑坡); b—缓倾顺层滑坡(约达村滑坡)

表 2 研究区工程地质岩组分区

Table 2 Partition of engineering geological rock association in study area

工程地质岩组	地 层	岩性、分布特征
软-较软沉积沉岩组	古近系贡觉组(E_g)、侏罗系汪布组(J_1w)、东大桥组(J_2d)、小索卡组(J_3x)、白垩系景星组(K_1j)、南新组(K_2n)、新近系拉屋拉组(Nl)、二叠系妥坝组(P_3t)、三叠系阿堵拉组(T_3a)、盖拉组(T_3d)、东达村组(T_3ddc)、甲丕拉组(T_3j)	岩性以层理发育的砾岩、砂岩、泥岩为主
较软-较硬浅变质岩、碳酸盐岩岩组	石炭系卡贡岩组(C_1k)、泥盆系卓戈洞组(D_3z)、二叠系里查组(P_1l)、交嘎组(P_2j)、三叠系波里拉组(T_3b)	岩性以板岩夹千枚岩、厚层灰岩、白云岩、大理岩为主
较坚硬块状深变质岩组	元古宇吉塘岩群(Pt_{1-2j})、卡穷岩群(Pt_{1-2k})、西西群(Pt_3Y)	岩性以片麻岩、变粒岩、石英片岩等为主
坚硬-较坚硬块状火成岩组	二叠系夏牙村组(P_3x)、三叠系馬拉松多组(T_{1-2m})、竹卡群(T_{2-3z})	零星分布, 主要分布在澜沧江沿岸, 主要为块状结构花岗岩、闪长岩及岩浆岩岩脉
松散-稍密堆积物岩组	第四系(Q)	物质组成主要为冲积卵石土、崩滑堆积碎石土、块石土, 主要分布在研究区内澜沧江及其支流河谷两岸

另一方面, 澜沧江作为深切峡谷, 沿岸斜坡因长期的风化会形成一定厚度的强风化带^[24], 据澜沧江上游西藏段某水电站坝址处 9 个平硐揭示, 澜沧江斜坡强风化带的发育深度为 5~20 m, 弱风化带最深为 160 m 以上, 风化带深度随着高程的增加而加深, 且在山脊区域呈加深、加强趋势^[25]。澜沧江沿岸的风化带也为土质蠕滑滑坡的发生提供了物质基础。

古滑坡堆积物也是区内土质滑坡的主要物质来源, 澜沧江及其支流沿岸古滑坡堆积目前保留下来的均是规模较大的堆积体, 往往直接堆积在现今

河道里, 并在一定程度上造成河道阻塞, 堆积体在后期流水切坡的作用下局部形成复活滑坡(图 8)。

3.4 断 裂

研究区南端的卡贡-盐井断裂呈现出明显的对滑坡灾害空间分布的控制作用(图 9), 由于断裂规模和活动性差异, 研究区其他断裂没有表现出明显的控灾特征。卡贡-盐井断裂是区内规模最大的活动断裂, 形成的断裂破碎带宽度及每年的位移量是其控制滑坡空间分布的主要因素。可以看到, 卡贡-盐井断裂两侧 2 km 滑坡密集分布, 其中研究区规模最大的居雪村滑坡也在该范围内, 断裂直接从

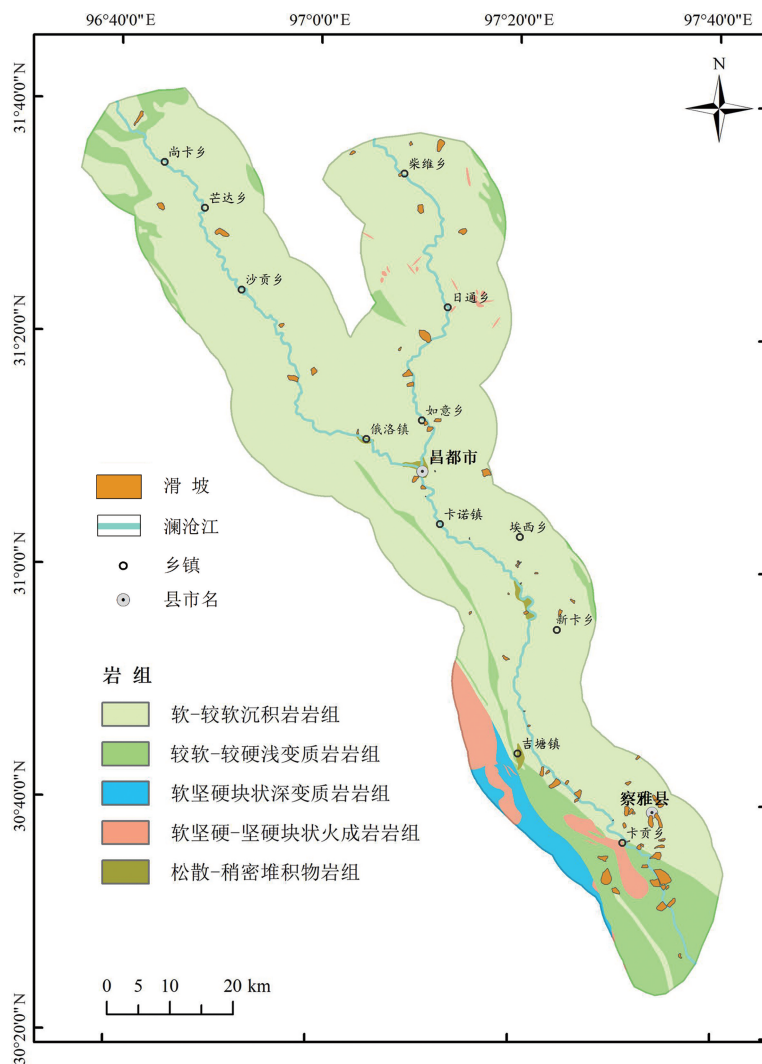


图7 澜沧江沿岸岩组中滑坡发育图

Fig. 7 Development of landslides in different rock association along Lancang River

其后缘穿过(图10)。这也是澜沧江沿岸滑坡分布规律中,距起点160~200 km区段,滑坡尤其是大型及以上滑坡密集发育的缘故(图3)。

4 典型滑坡形成机制

基于前述研究区滑坡主要影响因素的分析,以区内典型的滑坡案例为原型,总结区内典型滑坡的形成机制,根据主要影响因素的区别,分为砂泥岩软弱地层区滑坡、断裂控制的滑坡、堆积层滑坡3类。

4.1 砂泥岩软弱地层区滑坡形成机制

研究区很大范围属于藏东昌都盆地的砂泥岩软弱地层区。事实上,包括藏东昌都盆地,川东地区及三峡库区均发育大量的中生代砂泥岩地层^[26-28]。这些软弱地层基于当地不同的地质环境特征,孕育了一系列主要的滑坡形成机制,以川东红层为例,是以缓倾顺层滑坡为典型,也是该区最主要的滑坡类型^[28-31]。与其他红层地区一致,澜沧江沿岸的侏罗系、三叠系中顺层理滑动的滑坡也较常见(图11-a)。然而,研究区因为强烈的构造运动,造就了现今的高山峡谷地貌,岩层产状陡峻,岩体中除层理发育外,还发育一系列垂直于层理方向的节理裂隙,很大程度上控制了区内反倾滑坡的发育(图11-b)。

4.2 断裂控制型滑坡形成机制

川藏铁路澜沧江段沟谷两侧斜坡陡立,长期的

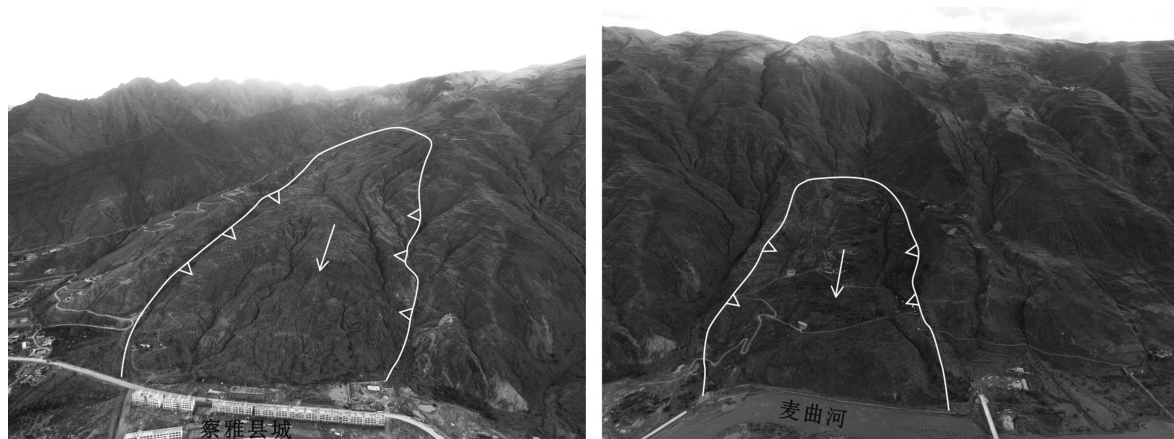


图8 澜沧江支流麦曲河沿岸古滑坡堆积体及其活动迹象(察雅县城1号和2号滑坡)

Fig. 8 Full view of typical ancient landslides along Maiqu River, a tributary of Lancang River

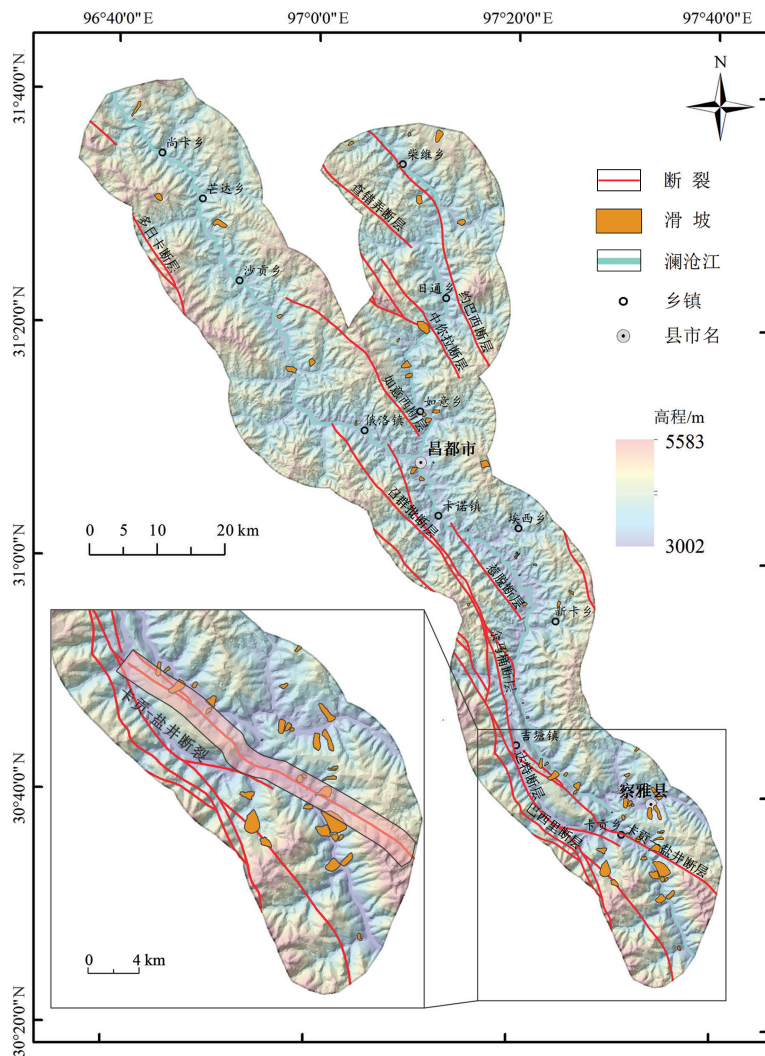


图 9 澜沧江断裂沿线滑坡发育图

Fig. 9 Distribution of landslides along typical faults in Lancang River

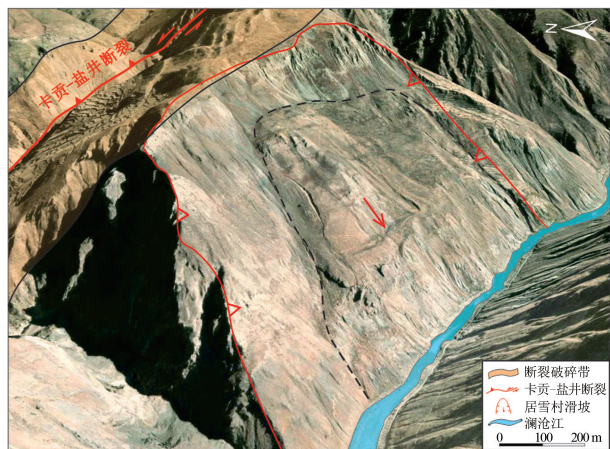


图 10 居雪村滑坡与卡贡-盐井断裂空间关系

Fig. 10 Spatial relationship between Kagong-Yanjing fault and Juxue landslide

区域构造运动形成了现今的高山峡谷地貌,为滑坡的发生提供了有利的地形条件。活动断裂穿越斜坡体时,断裂活动造成岩体破碎,形成一定宽度的破碎带,为斜坡中相对软弱的岩体,极有可能成为滑坡体的边界^[32-33](图 11-c)。破碎带岩土体在降雨或者河流切坡作用下失稳,直接形成滑坡(图 11-d)。虽然研究区与居雪村滑坡类似规模的特大型滑坡具体的触发因素已无从追溯,但根据其与活动断裂的空间展布关系,很大程度上与活动断裂息息相关。

4.3 堆积层滑坡形成机制

区内斜坡表层的残坡积、崩塌堆积、滑坡堆积分布广泛。一定规模的强风化带是横断山区三江沿岸的共同特征^[34],这些强风化带为斜坡表层松散堆积层的滑动提供可能,其诱发因素多为降雨、河流切坡、人类工程活动(图 11-e)。已有的古(老)崩滑堆积体在后期降雨及河流切坡的作用下,加之合适的地形地貌,存在进一步失稳可能,此类滑坡多存在蠕滑和多级滑动的特征(图 11-f)。

5 结 论

(1) 澜沧江昌都段干流岸坡发育的滑坡中,堆积层的土质蠕滑滑坡最发育,澜沧江江水的水位升降造成的河流切坡是临江土质滑坡的主要触发因素。临江高位滑坡往往直接下座堆积在河谷中,表现出高位但不远程的特征。

(2) 岩质滑坡中最发育的两类斜坡结构分别为反向斜坡和顺向斜坡,这与砂泥岩软弱岩体中发育的层理及垂直于层理的主控节理直接相关。

(3) 澜沧江昌都段 85% 以上的滑坡发育在软-较软沉积岩岩组中,表明岩石强度一定程度影响了滑坡的发育。区内斜坡表层的强风化带及古(老)滑坡的堆积体为堆积层滑坡提供物质基础,该类滑坡多存在蠕滑和多级滑动的特征。

(4) 卡贡-盐井活动断裂对滑坡灾害空间分布具有明显的控制作用,一方面,活动断裂穿越斜坡体,形成一定宽度的破碎带,为斜坡中相对软弱的

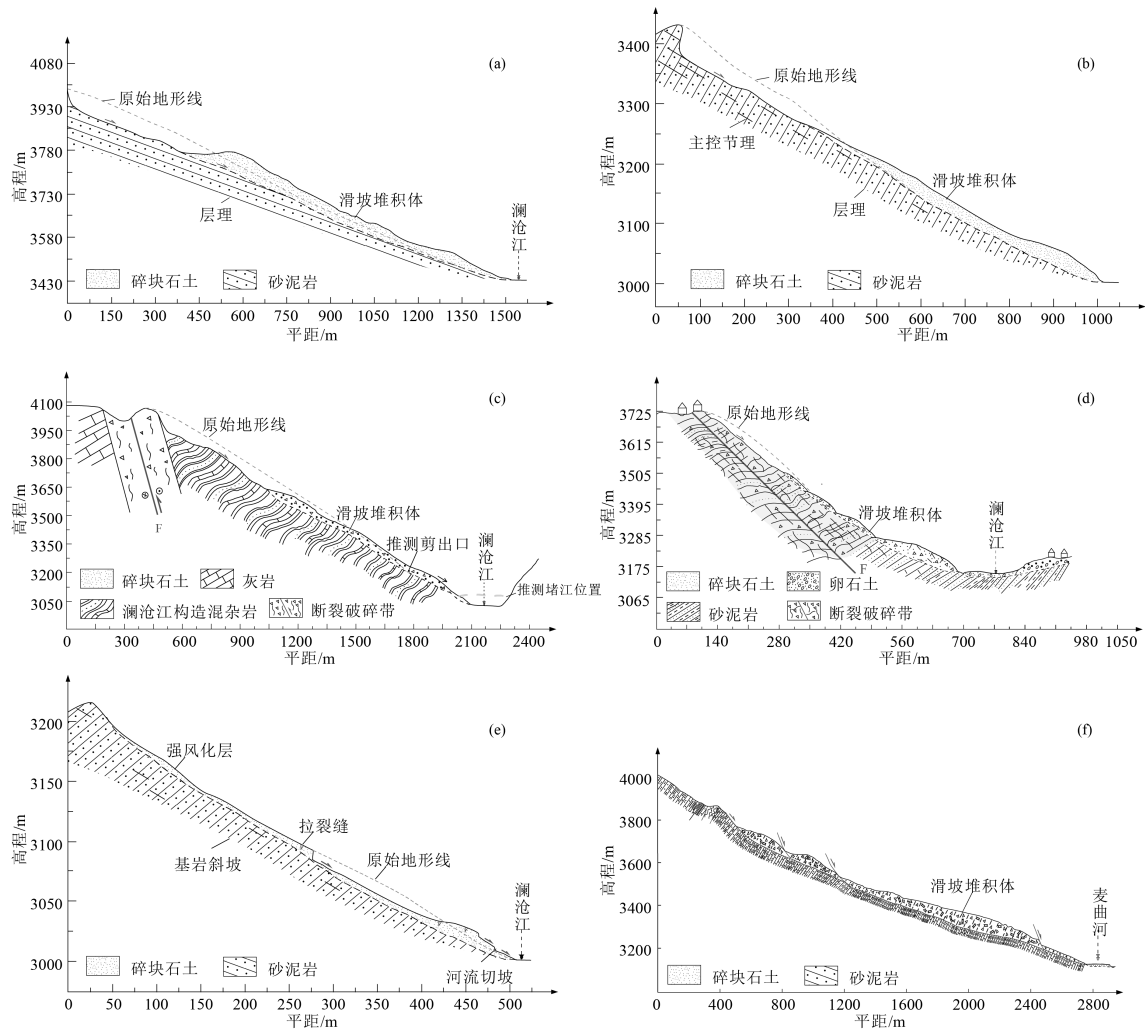


图 11 研究区典型滑坡形成机制

Fig. 11 Formation mechanism of typical landslides in the study area

a—砂泥岩地层中的顺层滑坡;b—砂泥岩地层反向斜坡中的滑坡;c—断裂控制滑坡边界;
d—断裂破碎带成为滑体;e—河流切坡触发强风化带中的滑坡;f—滑坡堆积体中的蠕滑滑坡

岩体,进而控制滑坡边界的形成;另一方面,破碎带岩土体在降雨或河流切坡作用下失稳,可以直接形成滑坡。

致谢:成文过程中,得到昌都市自然资源局、察雅县自然资源局、卡若区俄洛镇约达村委会的帮助,中国地质科学院探矿工艺研究所硕士研究生李宝幸,成都理工大学硕士研究生张伟、汪久钦,西南科技大学硕士研究生张浩韦参与了部分野外工作,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Glade T. Establishing the frequency and magnitude of landslide - triggering rainstorm events in New Zealand[J]. Environ. Geol., 1998, 35(2/3): 160-174.
- [2] Wallemacq P, Below R, McLean D. Economic losses, poverty and disasters 1998-2017 [M]. United Nations Office for disaster risk reduction (UNDRR) and Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) publications, 2018.
- [3] Turner A K. Social and environmental impacts of landslides[J]. Innov. Infrastruct. Solut., 2018, 3(1).
- [4] Liu W, Yan S X, He S M. Landslide damage incurred to buildings: A case study of Shenzhen landslide[J]. Engineering Geology, 2018, 247: 69-83.
- [5] Çelik S, Ozyazıcıoğlu M, Sahin R, et al. The destruction of Erzurum ski-jumping complex by a landslide: evaluation of an engineering design failure[J]. Nat Hazards, 2021, 107: 475-496.
- [6] Shi P. Natural Disasters in China[M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [7] Tomáš P. Landslides and Quaternary climate changes—The state of the

- art[J].Earth-Science Reviews,2019,196: 102871.
- [8] Zhang Y,Zhao X,Lan H,et al.A pleistocene landslidedammed lake,Jinsha River,Yunnan,China[J].Quaternary International,2011,233(1): 72-80.
- [9] Chen J,Dai F,Lv T,et al.Holocene landslide-dammed lake deposits in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau and their ages [J]. Quaternary International,2013,298: 107-123.
- [10] Wang P, Chen J, Dai F, et al. Chronology of relict lake deposits around the Suwalong paleo landslide in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implications to Holocene tectonic perturbations[J]. Geomorphology,2017,217: 193-203.
- [11] Dai F C,Deng J H.Development characteristics of landslide hazards in Three - rivers basin of southeast Tibetan Plateau [J]. Advanced Engineering Sciences,2020,52(5): 3-15.
- [12] Lv L Q , Xu M Z, Wang Z Y, et al.Impact of densely distributed debris flow dams on river morphology of the Grand Canyon of the Nu River (upper Salween River) at the east margin of the Tibetan Plateau[J].Landslides,2021,18(5): 979-991.
- [13] Hu M M, Wu Z H, Reicherter K, et al. A Historical Earthquake - Induced Landslide Damming Event at the Qiaojia Reach of the Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implication for the Seismic Hazard of the Xiaojiang Fault[J].Frontiers in Earth Science,2021,(9): 1-25.
- [14] Xiong Z Q,Feng G C,Feng Z X,et al.Pre-and post-failure spatial-temporal deformation pattern of the Baige landslide retrieved from multiple radar and optical satellite images[J].Engineering Geology, 2020,279(11): 105880.
- [15] An H C,Ouyang C J,Zhou S.Dynamic process analysis of the Baige landslide by the combination of DEM and long -period seismic waves[J].Landslides,2021,3: 1625-1639.
- [16] Lu C F,Cai C X.Challenges and Countermeasures for Construction Safety during the Sichuan -Tibet Railway Project [J].Engineering, 2019,5(5): 833-838.
- [17] 郭长宝,吴瑞安,蒋良文,等.川藏铁路雅安-林芝段典型地质灾害与工程地质问题[J].现代地质,2021,35(1): 1-17.
- [18] 汤明高,许强,马和平,等.西藏昌都镇地质灾害发育特征及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(4): 11-16.
- [19] 苏鹏程,韦方强.澜沧江流域滑坡泥石流空间分布及危险性分区[J].资源科学,2014,36(2): 273-281.
- [20] 刘欢,朱谷昌,刘海利,等.基于RS和GIS的西藏昌都县地质灾害危险性评价[J].地质找矿论丛,2011,26(1): 102-107.
- [21] 张佳佳,高波,刘建康,等.基于SBAS-InSAR技术的川藏铁路澜沧江段滑坡隐患早期识别[J].现代地质,2021,35(1): 64-73.
- [22] 彭勇民.昌都地区三叠纪层序地层与沉积盆地演化[D].成都理工大学博士学位论文,1999.
- [23] Hooper A, Bekaert D, Spaans K, et al. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation[J]. Tectonophysics,2012,514/517: 1-13.
- [24] 蓝康文.川藏铁路高山峡谷边坡卸荷带变形破坏模式及稳定性研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2018.
- [25] 邹俊.高寒山区深切峡谷碎裂松动岩体发育特征及稳定性研究[D].成都理工大学硕士学位论文,2016.
- [26] 程强,寇小兵,黄绍彬,等.中国红层的分布及地质环境特征[J].工程地质学报,2004,12(1): 34-41.
- [27] 殷跃平,胡瑞林.三峡库区巴东组(T_2b)紫红色泥岩工程地质特征研究[J].工程地质学报,2004,12(2): 124-136.
- [28] 易劲松.川东红层滑坡的形成条件与早期识别研究[D].成都理工大学硕士学位论文,2015.
- [29] 胡泽铭.四川红层地区缓倾角滑坡成因机理研究[D].成都理工大学硕士学位论文,2015.
- [30] 李江,许强,王森,等.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,2016,35(A2): 4053-4062.
- [31] 张涛,谢忠胜,石胜伟,等.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,2017,25(2): 496-503.
- [32] 张永双,苏生瑞,吴树仁,等.强震区断裂活动与大型滑坡关系研究[J].岩石力学与工程学报,2011,28(z2): 3503-3513.
- [33] 张佳佳,陈龙,王军朝,等.藏东南鲁朗-通麦崩塌滑坡孕灾地质背景特征研究[J].地质力学学报,2018,24(4): 474-481.
- [34] 戴福初,邓建辉.青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征[J].工程科学与技术,2020,52(5): 3-15.
- ①西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院.西藏昌都澜沧江河道治理工程(西藏)水文报告.西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院,2014.