

doi: 10.12029/gc20220201

杨志华, 吴瑞安, 郭长宝, 张永双, 兰恒星, 任三绍, 闫怡秋. 2022. 川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征[J]. 中国地质, 49(2): 355–368.

Yang Zhihua, Wu Ruian, Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Lan Hengxing, Ren Sanshao, Yan Yiqiu. 2022. Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan[J]. Geology in China, 49(2): 355–368(in Chinese with English abstract).

川西巴塘断裂带地质灾害效应与典型滑坡发育特征

杨志华^{1,2}, 吴瑞安^{1,2}, 郭长宝^{1,2}, 张永双³, 兰恒星⁴, 任三绍³, 闫怡秋^{1,5}

(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. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄, 050061; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 5. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要:【研究目的】川西巴塘断裂带地质背景复杂, 研究地质灾害发育特征, 有利于揭示活动断裂带的地质灾害效应。【研究方法】本文在巴塘断裂带地质灾害成灾背景分析和野外调查研究的基础上, 剖析了区域地质灾害分布规律与典型滑坡发育特征, 探讨了巴塘断裂带的地质灾害效应。【研究结果】研究认为: (1) 巴塘断裂带附近碎裂岩体结构为地质灾害孕育提供了物质基础, 断裂剧烈活动(地震)或蠕滑直接诱发地质灾害, 断裂带强烈地质灾害效应主要发生在断裂两侧 3000 m 范围以内; (2) 巴塘断裂带地质灾害具有点多面广、分布不均、局部集中等特点, 金沙江干流沿岸深切峡谷区发育大量蠕滑型滑坡和历史地震堵江滑坡; (3) 巴塘断裂带地震滑坡和古滑坡发育, 部分滑坡直接跨越断层, 受断裂、降雨和人类工程等内外动力作用的综合影响, 局部复活明显。【结论】巴塘断裂带对区域地质灾害发育分布具有显著的控制作用, 巴塘断裂带部分居民点和公路存在地质灾害风险, 城镇规划区应远离河谷岸坡和泥石流堆积扇等易受地质灾害影响区域。研究成果对于认识青藏高原东缘活动断裂带地质灾害效应和防灾减灾具有重要的科学意义。

关键词: 青藏高原; 巴塘断裂带; 地质灾害效应; 地震滑坡; 成灾机理; 地质调查工程

创新点: 深入剖析了青藏高原东缘巴塘活动断裂带的地质灾害效应和成灾机理。

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)02-0355-14

Geo-hazard effects and typical landslide characteristics of the Batang fault zone in the western Sichuan

YANG Zhihua^{1,2}, WU Ruian^{1,2}, GUO Changbao^{1,2}, ZHANG Yongshuang³,
LAN Hengxing⁴, REN Sanshao³, YAN Yiqiu^{1,5}

(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. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China; 5. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2020-12-13; 改回日期: 2021-01-03

基金项目: 中国地质调查项目(DD20190319)和国家自然科学基金项目(41731287, 41941019)共同资助。

作者简介: 杨志华, 男, 1982 年生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要从事地质灾害方面的研究; E-mail: yangzh99@163.com。

通讯作者: 吴瑞安, 男, 1991 年生, 博士, 副研究员, 主要从事地质灾害方面的研究; E-mail: 648266126@qq.com。

[Abstract]: This paper is the result of the geological disaster prevention and control engineering and geological hazard prevention and control engineering.

[Objective] The Batang fault zone in the western Sichuan and eastern Tibet Plateau has complex geological settings. The study on the geo-hazard development characteristics is helpful to reveal the geo-hazard effect of active fault zone. **[Methods]** Based on the forming background analysis and field geo-hazard investigation of the Batang fault zone, this paper analyzes the geo-hazard distribution law and typical landslide development characteristics, and discusses the geo-hazard effects of the Batang fault zone. **[Results]** The study shows that: (1) The fragmented rock mass structure effected by fault activity can promote the development and formation of geo-hazard, and the violent fault activity (earthquake) or the creeping activity can induce geo-hazards, and the strong geo-hazard effects mainly occur within 3000 m on both sides of the fault. (2) Geo-hazards in the Batang fault zone have the characteristics of wide areas, uneven distribution, local concentration, and so on. There are a large number of creep landslides and seismic landslides in the deep-cut canyon along the main stream of the Jinsha River. (3) Seismic landslides and ancient landslides are developed in the Batang fault zone, and some landslides directly cross the fault zone. The superimposed influence of internal and external forces such as faults, rainfall and human engineering, has induced some local revival of some landslides. **[Conclusions]** The Batang fault has a significant control effect on regional geo-hazard development and distribution. Some residential areas and roads in the Batang fault zone are at geo-hazard risk. The town planning area should be far away from the river valley bank slopes and debris flow accumulation fans and other areas vulnerable to geo-hazard. The research results have important scientific significance for understanding the geo-hazard effects of the active fault zone in the eastern Tibet Plateau and for disaster prevention and mitigation.

Key words: eastern Tibet Plateau; Batang fault zone; geo-hazard effects; seismic landslides; disaster mechanism; geological survey engineering

Highlights: The geo-hazard effect and disaster mechanism of the Batang active fault zone in the eastern Tibet are deeply analyzed.

About the first author: YANG Zhihua, male, born in 1982, doctor, associate researcher, engaged in the research on geo-hazard; E-mail: yangzh99@163.com.

About the corresponding author: WU Ruian, male, born in 1991, doctor, associate researcher, engaged in research on geo-hazard; E-mail: 648266126@qq.com

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190319) and National Natural Science Foundation of China (No. 41731287, No.41941019).

1 引 言

青藏高原东缘高山峡谷区地形地貌和地质条件复杂,新构造运动强烈,一系列大型崩塌、滑坡和泥石流密集分布,是地质灾害高发区(黄润秋,2007;郭长宝等,2015;殷跃平等,2017;王涛等,2021),如近年来发生的四川茂县新磨村滑坡(Su et al.,2017)和西藏金沙江白格滑坡(Fan et al.,2019;Ouyang et al.,2019;王立朝等,2019;张永双等,2019)。在复杂的内外动力耦合作用下,地质灾害形成机制复杂,除降雨、人类工程活动等外动力因素外,断裂蠕滑和地震作用是活动构造区地质灾害发育形成的重要内动力影响因素。随着人类工程活动逐渐深入活动构造区等复杂艰险地区,活动断裂的地质灾害效应研究得到国内外学者的普遍关注(王思敬,2002;Martel,2004;李晓等,2008;张永双等,2016),尤其是在地震滑坡发育特征

(Keefer,2000;Dai et al.,2011;Hovius et al.,2012)、形成机理(Tang et al.,2015)和危险性评价(Kamp et al.,2008)等方面取得了丰富研究成果。断裂构造的运动方式(走滑/逆冲等)和活动强度(蠕滑/地震等)对斜坡体稳定性的影响较大,是内动力作用影响地质灾害发育形成的主要表现形式之一(王思敬,2002;李晓等,2008)。断裂构造改变斜坡体应力场,加剧岩体卸荷作用,造成岩体结构破碎,增加地质灾害发育强度,特别是对于大型—巨型地质灾害的形成具有重要影响(许向宁等,2005;Peng et al.,2009;郭长宝等,2015)。

巴塘断裂带是位于青藏高原东部的一条大型右旋走滑断裂带,全新世以来活动性强(徐锡伟等,2005)。巴塘断裂带地处高山峡谷区,地质构造复杂,沿断裂带历史地震频发,加之松散破碎的岩土体及其较差的力学性质,导致断裂带内大型—巨型地质灾害极为发育,具有活动频繁、危害严重等特点。本文在

总结巴塘断裂带地质灾害成灾背景与主要地质灾害类型的基础上,剖析了巴塘断裂带地质灾害发育分布特征,通过典型实例探讨了降雨和地震滑坡发育特征与发生机制,分析了巴塘断裂带地质灾害成灾机理及其对城镇建设和公路等重大工程的潜在危害,研究结果对于活动构造带地质灾害效应、成灾机理研究和防灾减灾工作具有重要意义。

2 地质背景

巴塘断裂带位于青藏高原川西藏东交界区域,北东起于巴塘县莫西附近,向南西延伸经松多、雅洼、黄草坪、巴塘、水磨沟,过金沙江后继续向南西延伸,经莽岭至澜沧江边消失,全长约 200 km,总体走向 NE30°,倾向 NW,倾角较陡,是一条以右旋走滑活动为主的全新世活动断裂带,斜切金沙江断裂带约 20~30 km(图 1),全新世晚期以来的水平滑动速率为 3~4 mm/a(徐锡伟等, 2005;周荣军等, 2005;程佳, 2008)。综合来看,巴塘断裂带的活动性存在由 SW 向 NE 逐渐减弱的趋势,巴塘段的活动性明显不如莽岭段。巴塘断裂带最高地震动峰值加速度为 0.2 g,地震基本烈度为 VIII 度区,属丽江—巴塘地震块体,为地震强活动带,历史上多次发生 6.0 级以上地震(郭劲等, 1990;王新民, 1990;何玉林等, 1997)。

巴塘断裂带附近地层岩性复杂,以大规模发育区域变质岩和岩浆岩为特征,出露地层以三叠系和二叠系最为广泛。奥陶系—石炭系主要分布在巴塘县莫多乡、松多乡和白玉县沙马乡和盖玉乡,以及金沙江东界断裂西侧。第四系分布于各级河流漫滩、I 级和 II 级阶地及山坡地带,以冲洪积、残坡积、冰碛物为主。巴塘断裂带区域属青藏高原东部亚湿润气候区,年均气温 12.8℃,年均降雨量 503.69 mm,降雨多集中于 5—9 月。受金沙江干热河谷的影响,金沙江岸边的竹巴笼乡至苏哇龙乡一线干热少雨,年均降雨量介于 300~400 mm。区内河流主要有金沙江干流及其支流巴曲等。区内地下水主要为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩裂隙岩溶水三大类。

3 巴塘断裂带地质灾害发育特征

3.1 主要地质灾害类型

巴塘断裂带沿线岩体结构破碎,部分地段断裂破碎带宽几百米至数公里,在地震、断裂蠕滑和强

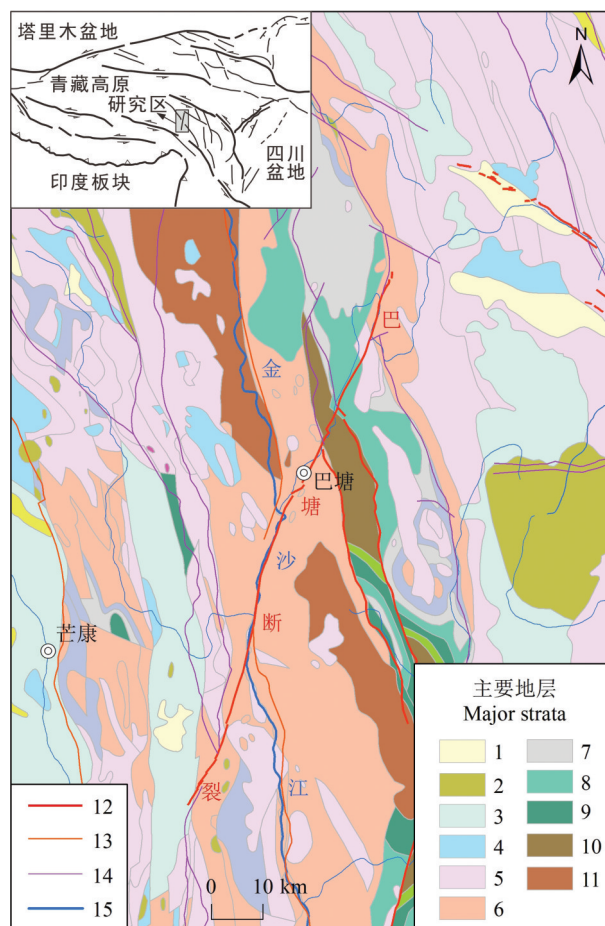


图 1 巴塘断裂带地质背景图

1—第四系;2—古近系;3—白垩系;4—侏罗系;5—三叠系;6—二叠系;7—泥盆系;8—志留系;9—奥陶系;10—震旦系;11—元古宇;12—全新世活动断裂;13—晚更新世活动断裂;14—早—中更新世断裂;15—河流

Fig.1 Geological setting of the Batang fault zone

1—Quaternary; 2—Paleogene; 3—Cretaceous; 4—Jurassic; 5—Triassic; 6—Permian; 7—Devonian; 8—Silurian; 9—Ordovician; 10—Sinian; 11—Proterozoic; 12—Holocene active fault; 13—Late Pleistocene active fault; 14—Early—Middle Pleistocene fault; 15—River

降雨等因素作用下,地质灾害强烈发育,危害大。同时,近年来,随着社会经济的快速发展,公路交通、矿山开采、水利水电建设项目日益增多,区内森林、植被等生态环境、斜坡微地貌等不同程度遭受破坏,坡体深切冲沟发育,加剧地质灾害发育形成(李明辉等, 2010)。根据资料收集、遥感解译和野外调查,巴塘断裂带地质灾害类型主要为滑坡、崩塌、泥石流等,沿巴塘断裂带两侧各 30 km 范围内发育地质灾害共 452 处(图 2),其中,崩塌 37 处,占比 8%;滑坡 342 处,占比 76%;泥石流 34 处,占比

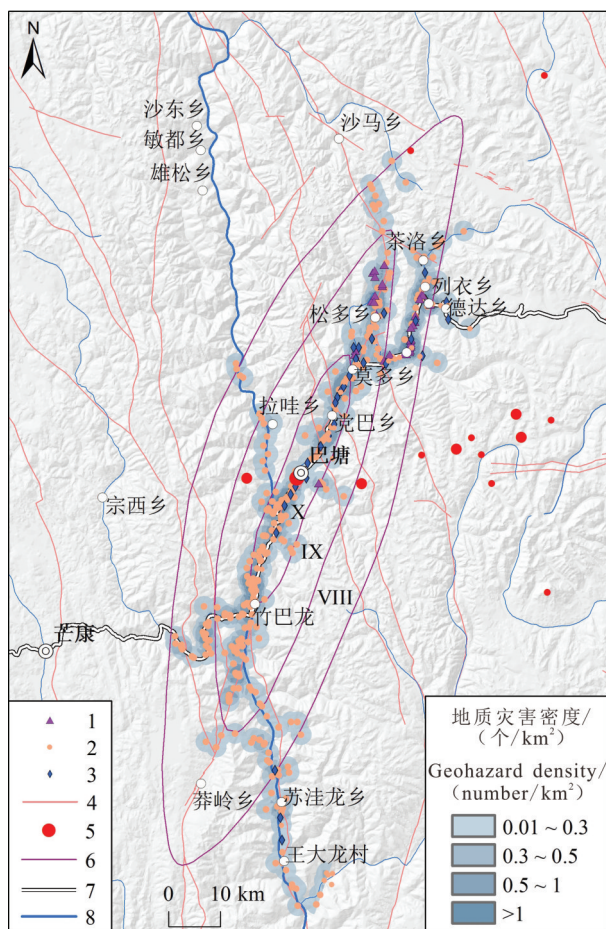


图2 巴塘断裂带地质灾害发育分布图

1—崩塌;2—滑坡;3—泥石流;4—断裂;5—震中;6—1870年地震烈度等值线;7—国道G318;8—河流

Fig.2 Geo-hazard map of the Batang fault zone

1—Avalanche; 2—Landslide; 3—Debris flow; 4—Fault; 5—Epicenter; 6—1870 earthquake intensity contour; 7—State road 318; 8—River

16%。滑坡类型主要有岩质滑坡和堆积层滑坡,以堆积层滑坡为主,且蠕滑型滑坡和老滑坡较发育,

岩质滑坡规模以中小型为主,而堆积层滑坡规模以大中型为主,且滑面普遍埋深较大;崩塌主要为岩质崩塌,规模以中小型为主;泥石流类型主要有沟谷型泥石流和坡面型泥石流,以低频稀性降雨沟谷型泥石流为主,规模多为中小型。

3.2 地质灾害发育分布规律

3.2.1 活动断裂对地质灾害发育分布的影响

构造活动在地质灾害形成过程中起着非常重要的作用,地壳抬升、断裂活动、地震等内动力作用直接或间接影响着地质灾害孕育、形成和演化。统计分析表明,地质灾害主要分布在巴塘断裂带两侧,大约22%、15%、13%和8%的地质灾害分别分布在距离巴塘断裂0~500 m, 500~1000 m, 1000~2000 m和2000~3000 m区域内,约2/3的地质灾害分布在巴塘断裂3000 m范围内(图3)。随着远离断裂带,地质灾害数量逐渐降低,尤其是以3000 m为界,地质灾害数量先是快速降低,然后缓慢降低,直至基本一致。因此,可以判断巴塘活动断裂的强烈地质灾害效应主要发生在断裂两侧3000 m范围以内。

3.2.2 区域性地质灾害发育分布特征

巴塘断裂带地质灾害具有点多面广、分布不均、局部集中等特点(图2)。从地貌分区上看,地质灾害主要分布于西部高山峡谷区金沙江沿岸,以及东部高山区的深切河谷区,尤其在巴曲德达至松多段的地形高陡地带集中密集发育(李明辉等,2010;白永健等,2014),而其他高山、极高山和高原夷平面地区由于人类工程活动强度低,地质灾害不发育。区内主要发育金沙江及其支流巴曲,巴曲流域地形切割强烈,坡降大,沟谷发育,人类工程活动强烈,共发育地质灾害242处,以滑坡为主;金沙江干

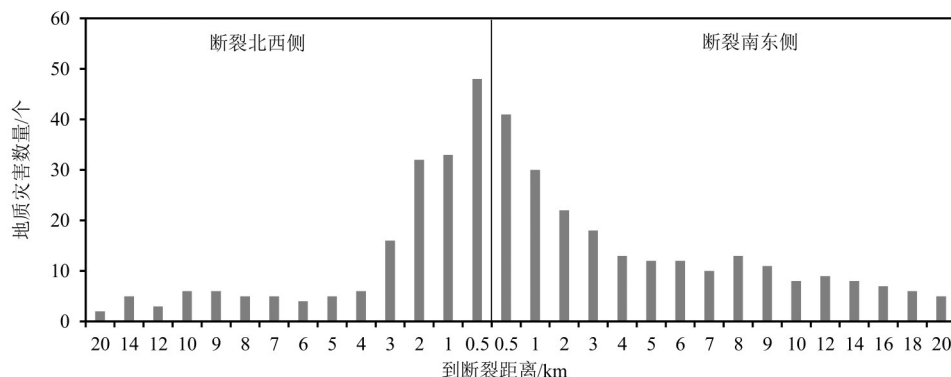


图3 地质灾害空间发育分布与巴塘断裂关系图

Fig.3 Statistical relationship of geo-hazard spatial distribution and Batang fault

流段发育地质灾害210处,其中泥石流主要集中在竹巴笼段,以坡面泥石流为主。区内地震滑坡发育,部分滑坡发生复活失稳,如茶树山古地震滑坡在后续降雨、长期灌溉作用下发生局部复活等,对城镇、公路等安全造成影响;巴塘断裂直接穿越部分滑坡、泥石流,并控制着其稳定性,如茶树山滑坡、郎多二村滑坡等。

区域地形地貌、地层岩性和地质构造等地质背景差异明显,导致各区段地质灾害类型和发育特征明显不同:(1)巴曲松多乡段发育大量中小型岩质地震滑坡群,主要沿河流左岸呈串珠状分布,滑坡体挤压河道,导致河流局部弯曲,部分滑体曾堵塞巴曲,该地震滑坡群受巴塘断裂松多乡段控制(图4);(2)巴塘县列衣乡、措拉乡、波戈溪乡等深切峡谷区,下部陡峭坡体中崩塌较为发育,威胁公路、桥梁安全(图5a),此外,大型深层堆积层(或风化层)蠕滑型滑坡较为发育;(3)受巴塘断裂影响,巴塘县党巴乡至夏邛镇,巴曲两岸斜坡岩体破碎,发育大量蠕滑型滑坡(图5b),厚层堆积体中发育大量冲沟,以及小型泥石流;(4)巴塘县夏邛镇和竹巴笼乡区域为北北东向巴塘活动构造带和北北西向多条金沙江分支断裂构造带的交切部位,大面积发育千枚岩和片岩,节理裂隙发育,岩体工程性质较差,地质灾害发育,以滑坡和泥石流危害较为突出,泥石流以暴雨型为主(图5c),具有规模小、点多密集、集中分布特征

(李明辉等,2010);(5)在金沙江干流沿岸深切峡谷区,受长期河流冲刷和重力持续作用,发育大量蠕滑型滑坡或不稳定斜坡体,并且大型地震诱发岩质堵江滑坡极为发育(Chen et al., 2013),如金沙江雪隆囊堵江滑坡(Wang et al., 2014)(图5d)。

4 巴塘断裂带典型滑坡发育特征

4.1 典型降雨型滑坡发育特征

降雨是巴塘断裂带滑坡形成的重要诱发因素。降雨不仅增加土体自重,增大下滑力,还产生渗透力、扬压力,软化滑动面,对松散土质斜坡稳定性极为不利。区内斜坡的强变形时间主要集中在每年的6至9月份,与强降雨时间一致或略有滞后,表明斜坡变形破坏与降雨关系密切(李明辉等, 2010)。

4.1.1 茶树山滑坡

茶树山滑坡位于巴塘县夏邛镇茶雪村,金沙江支流巴曲左岸,国道G318穿过滑坡坡脚(图6a)。滑坡位于茶树山—竹巴龙背斜核部,巴塘断裂从滑坡后部通过,受到断裂活动的强烈影响,地质构造复杂,新构造运动强烈。滑坡区地层主要为二叠—三叠系的软弱—坚硬薄—厚层状变质岩夹碳酸岩、火山岩。受构造作用影响,区内岩体节理裂隙发育,破碎程度高、力学性质差。滑坡区地下水类型主要为表层松散覆盖层的孔隙水、基岩裂隙水、风

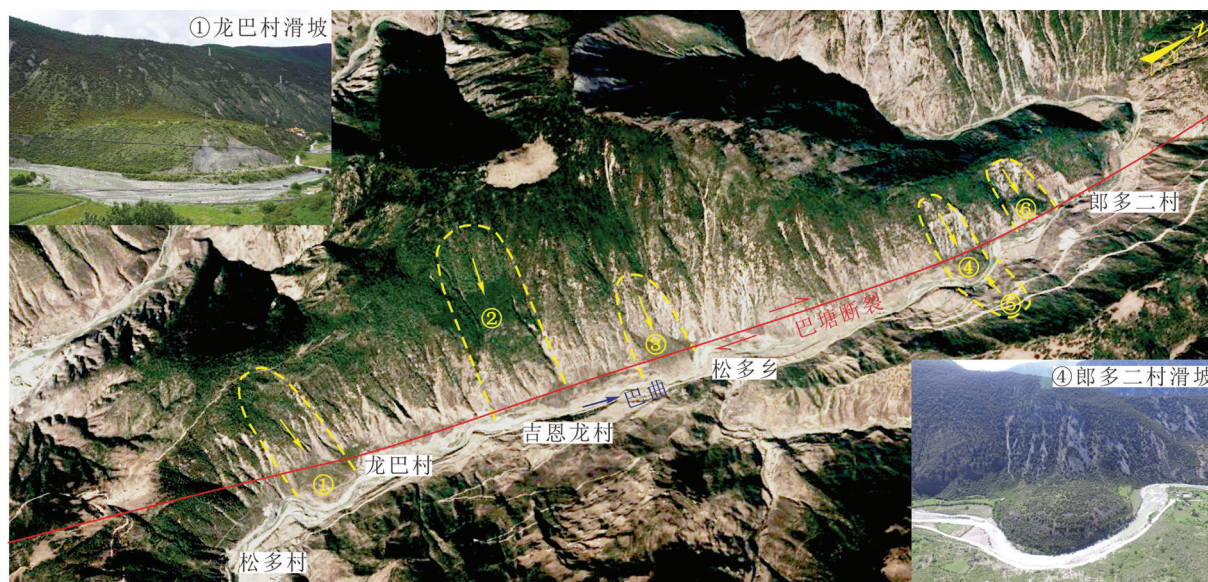


图4 巴塘巴曲松多乡地震滑坡群(据 Google Earth)

Fig.4 Seismic landslide group along the Baqu River (after the Google Earth)



图5 巴塘断裂带典型地质灾害实例

a—国道G318波戈溪隧道口崩塌;b—巴塘县党巴乡蠕滑型滑坡;c—巴塘县夏邛镇雪村泥石流;d—金沙江雪隆囊堵江滑坡

Fig.5 Typical geo-hazards in the Batang fault zone

a—Avalanche at the entrance of Bogexi tunnel of state road 318; b—Creeping landslide in the Dangba Town, Batang County; c—Debris flow in Huaxue Village of Xiaqiong Town, Batang County; d—Xuelongnang landslide in the Jinsha River

化裂隙水(任三绍等,2017)。

茶树山滑坡平面上呈“圈椅状”地貌,上陡下缓,滑坡主滑方向 290° ,坡度 $18^{\circ}\sim 37^{\circ}$,平均坡度 26° (图6a)。滑坡前缘高程2560 m,后缘高程2834 m,高差274 m,纵向长约620 m,宽400~520 m,平均厚度约30 m,体积约 $7.2\times 10^6\text{ m}^3$ 。茶树山滑坡为一大型碎石土滑坡,滑床基岩产状 $125^{\circ}\angle 36^{\circ}$,属反向坡结构。滑体物质在后部主要为灰白色大理岩形成的碎裂岩体及碎块石土,在滑坡的前部则以碎石土为主,碎块石直径大部分在1~12 cm,最大可达150 cm。碎石土为灰白色碎块石夹粉质黏土,多呈硬塑状态。滑体厚度差异大,一般5~35 m;滑床为黄褐色变质细砂岩夹紫红色页岩、板岩及少量大理岩;滑带土为棕红色粉质黏土,可塑,厚度一般2 m;滑坡上部滑动面在土岩结合面处,下部从土体中间剪出。茶树山滑坡在2001年7月首次出现滑动变形,之后以蠕滑变形为主。在不断的变形作用下,促使

滑坡变形速度加快,滑坡上出现了各种滑坡形迹(图6a、b),2006年1月7日发生大规模滑动,造成后缘水渠错位破坏,滑坡中上部发育多条横向的拉裂缝,出现大面积地面沉降和下挫陡坎,形成阶状地貌(任三绍等,2017)。茶树山滑坡为巨型古地震滑坡复活形成,受断裂构造作用,岩体结构面密集发育,断裂带及其附近一定范围内斜坡的完整性大大降低,岩体破碎程度高、岩土体力学性质差;上部透水路,下部隔水层的二元结构,为滑坡体的富水提供了有利条件;强降雨作用降低了滑坡稳定性,渠水长期入渗诱发滑坡失稳(任三绍等,2017)。

4.1.2 自热村滑坡

自热村滑坡位于巴塘县列衣乡自热村,滑坡平面形态上窄下宽,呈不规则形,右侧以山脊为界,左侧以凹地形为界,前缘以老国道G318为界,后缘以斜坡中上部由缓变陡处为界(图7a、c)。滑坡剖面形态呈折线形,平均坡度 27° ,坡向 199° (图7b)。岩

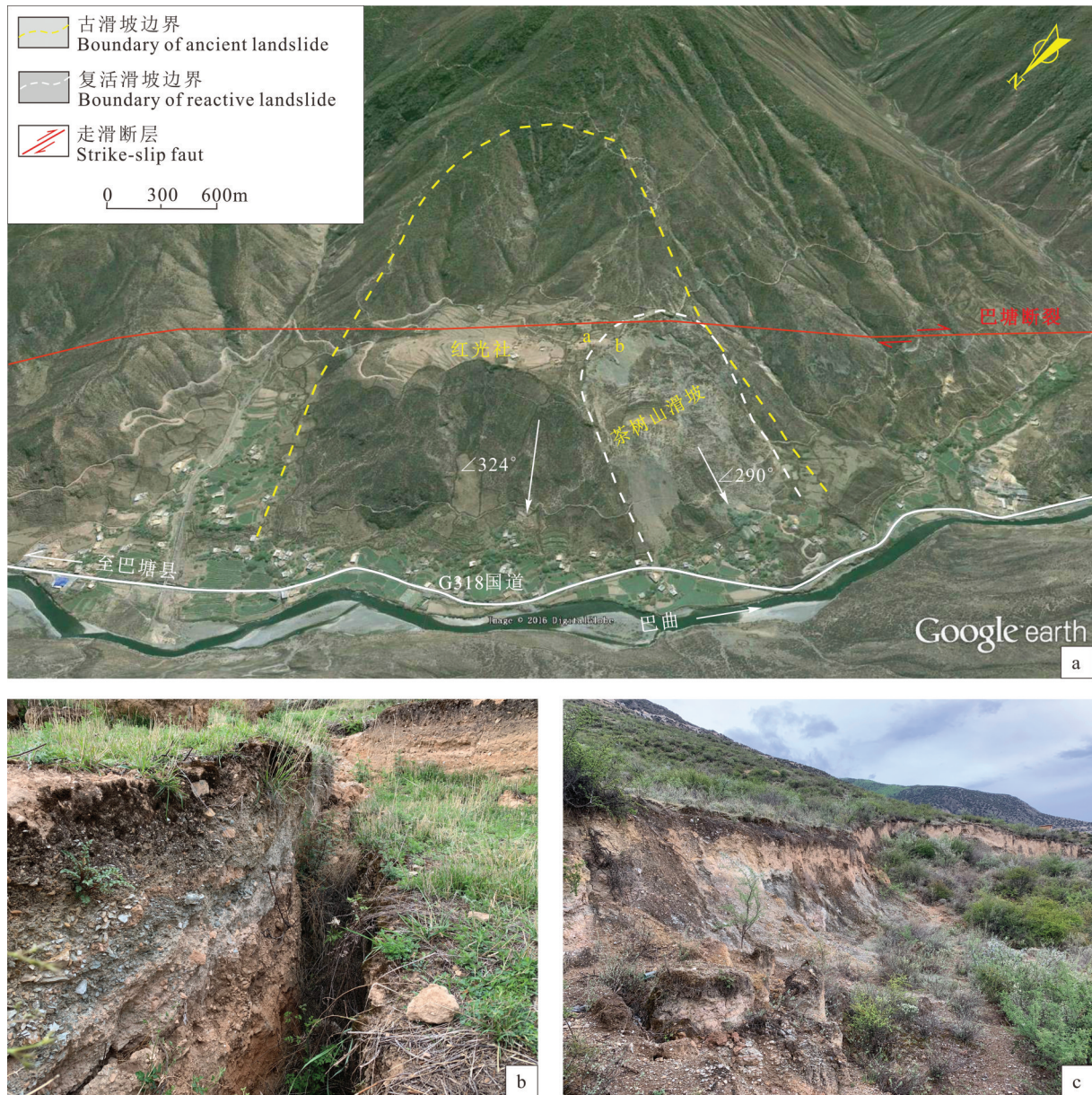


图6 巴塘县茶树山滑坡发育特征

a—巴塘茶树山滑坡卫星影像图(据 Google Earth); b—滑坡拉裂缝(图 a 中 a 处); c—滑坡下挫陡坎(图 a 中 b 处)

Fig.6 Characteristics of the Chashushan landslide of the Batang County

a—Satellite image of the Chashushan landslide in the Batang county (after the Google Earth); b—Landslide pulled cracks (place a in figure a);

c—Landslide falling steep ridge (place b in figure a)

层产状 $91^\circ \angle 40^\circ$, 总体上属于横向坡。滑坡长 960 m, 宽 370~640 m, 厚度 15~35 m, 体积约 $900 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属于大型碎石土蠕滑型滑坡。滑坡距巴塘主断裂约 10 km, 距分支断裂约 4.5 km, 位于巴塘断裂较弱地质灾害效应范围内, 滑坡发育于第四系残坡积堆积层和强风化带中, 岩性为灰色、灰黄色碎石土, 碎石含量 60%~70%, 粒径 3~15 cm, 局部可见块石, 块

径最大可达 80 cm, 碎块石成分以板岩、砂岩为主, 其余为角砾、粉质黏土充填, 堆积体结构松散, 厚度 15~35 m; 钻探揭露滑带为角砾土、粉质黏土, 滑床为三叠系中下统灰黑色板岩、灰色砂岩。

滑坡体于 1998 年开始变形, 现阶段以降雨和坡体自重作用引起的局部变形为主。滑坡中上部可见 1 处浅表层溜滑迹象, 前缘发育 2 处次级滑

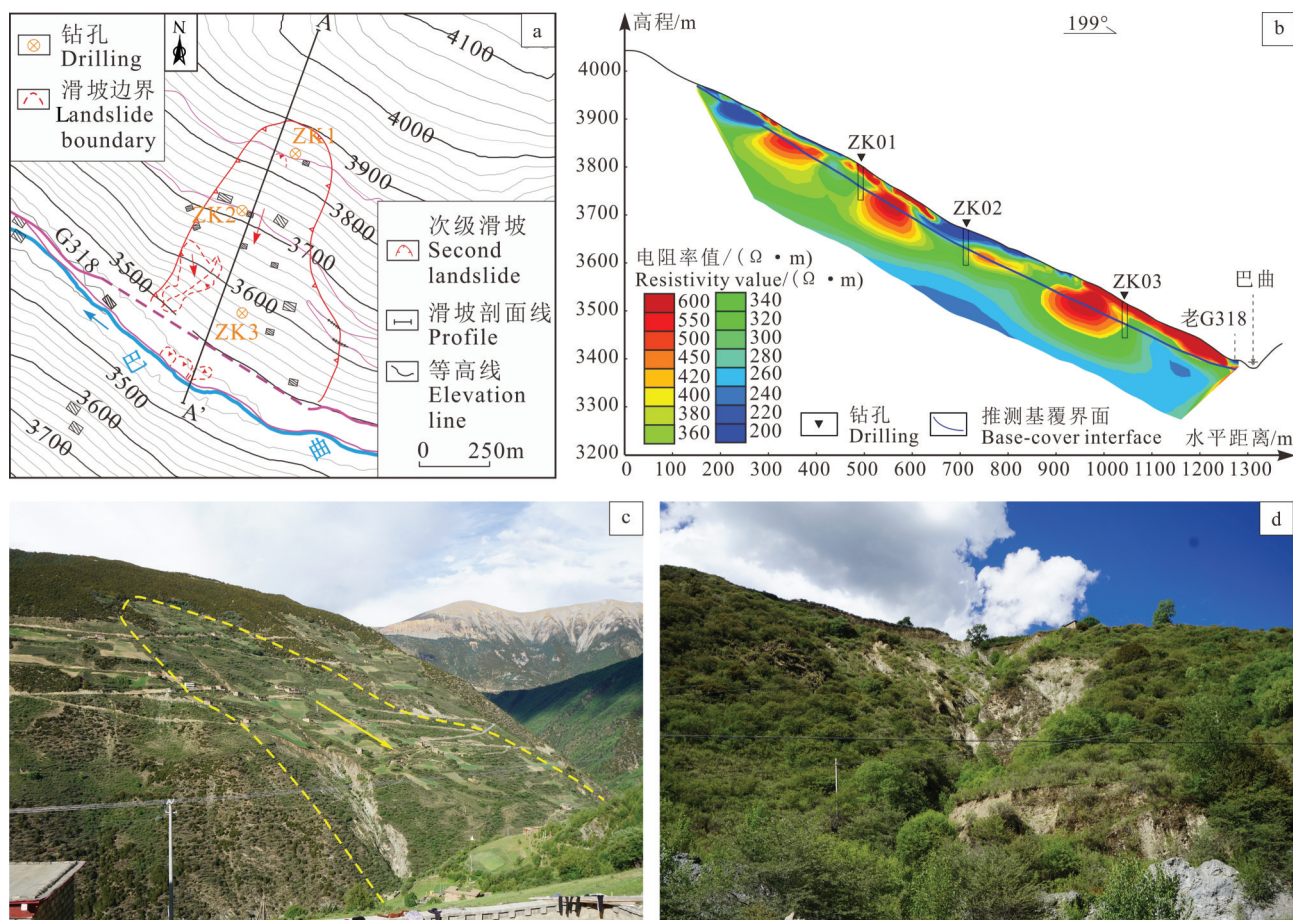


图7 巴塘县自热村滑坡发育特征

a—工程地质平面图;b—物探剖面图;c—滑坡全貌;d—滑坡体上的冲沟

Fig.7 Characteristics of the Zirecun landslide of the Batang County

a—Engineering geology flat map;b—Geophysical profile map;c—Landslide overview;d—Gully on landslide

体,近右侧边界区域发育一条冲沟,冲沟由上至下逐渐变宽,斜坡中下部冲沟两侧坡体向冲沟垮塌(图7d);滑坡左侧中下部公路处可见两条裂缝,裂缝宽3~8 cm,长度10~20 m,走向近垂直于滑动方向,滑坡中部居民房屋有轻微开裂变形。滑坡现今总体基本稳定,但在后续强降雨、地震等外动力下,可能导致局部甚至整体失稳,在前缘开挖削坡等人类工程活动作用下,可能诱发前缘滑动,进而引起渐进式破坏。

4.2 典型地震滑坡发育特征

根据历史地震资料和野外调查结果,沿巴塘断裂带仍残留有多处历史地震滑坡,发育特征表现为:①以岩质滑坡为主,滑坡形态特征明显,平面以舌形、半圆形为主,后缘处陡坎和拉张裂缝清晰,如特米滑坡等;②滑坡发育区地形高陡,顶底

高差一般在200 m左右,滑前坡度一般在30°以上;③地震滑坡一般沿断裂带分布,规模较大,部分为大型—特大型,容易堵塞狭窄河道,形成堰塞湖等链式灾害;④受地形限制,部分滑坡失稳后直接堆积在坡脚,形成明显的堆积鼓包,现今基本稳定,如郎多二村滑坡。

4.2.1 金沙江特米滑坡

特米滑坡位于金沙江上游左岸,距离巴塘县城约4 km,历史上曾堵塞金沙江。距离巴塘断裂约2.5 km,且金沙江断裂的分支断裂雄松—苏洼龙断裂从滑坡后缘穿过,受断裂构造影响,滑坡区岩体结构面发育。滑坡地貌特征明显,后缘边界清晰,表层可见红褐色黏土,坡脚堆积大量的松散块碎石。滑坡纵长约1800 m,横宽约900 m,滑体平均厚约40 m,体积约 $3.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ (图8a)(陈剑等,2020)。

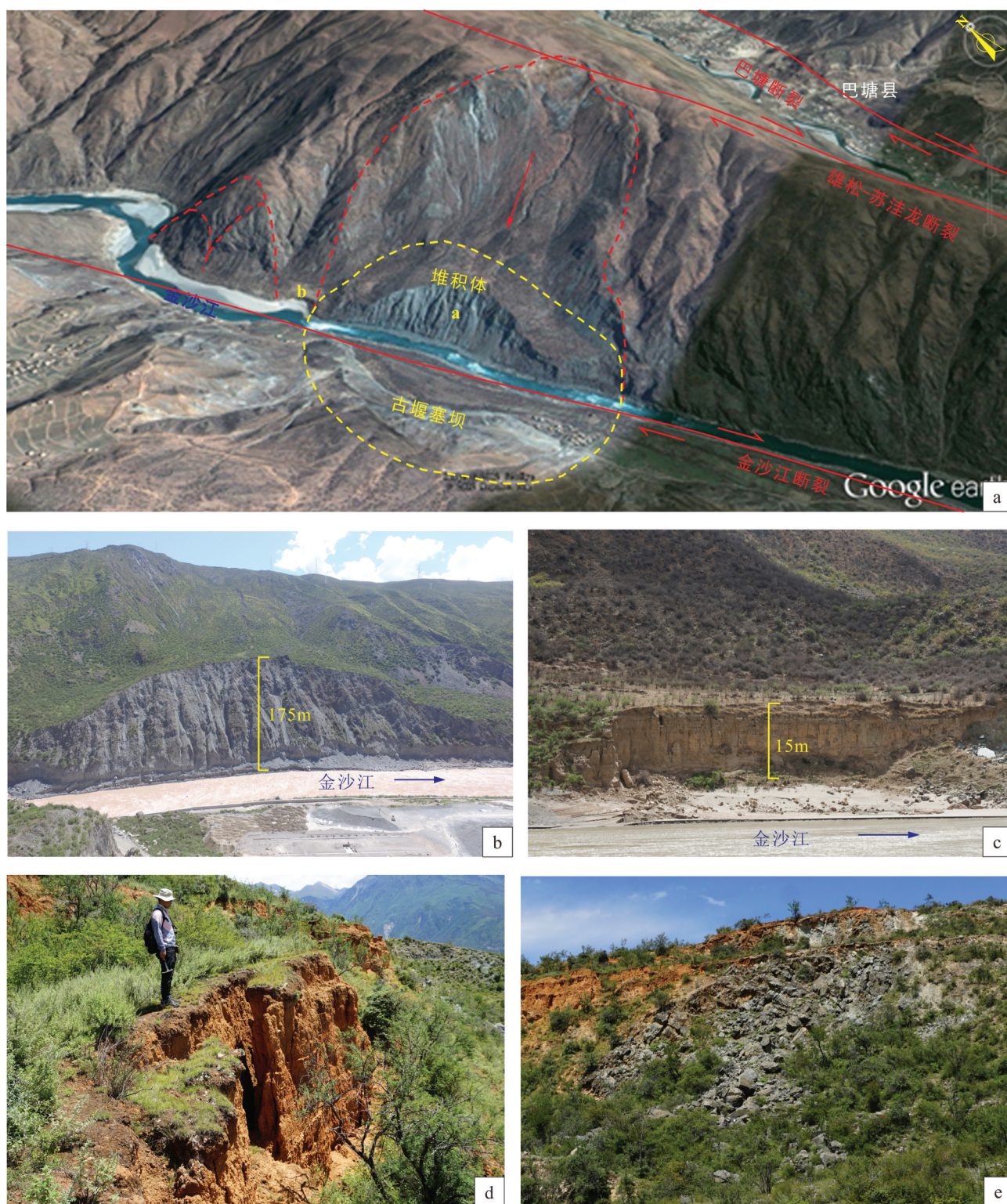


图8 巴塘特米滑坡发育特征

a—滑坡遥感影像图;b—左岸滑坡堆积体(图a中a处);c—左岸湖相沉积层(图a中b处);d—滑坡后缘拉裂缝;e—滑坡后缘局部垮塌

Fig.8 Characteristics of the Temi landslide in the Batang county

a—Remote sensing image of landslide; b—Landslide accumulation on the left bank (place a in figure a); c—Lake sedimentary layer on the left bank (place b in figure a); d—Cracks in the trailing edge of landslide; e—Local collapse in the trailing edge of landslide

金沙江左岸滑坡残留堆积体体积较大,拔河高度约175 m(图8b),右岸残留少量滑坡堆积体覆盖于右岸谷坡之上,主要为块碎石,粒径差异较大。滑坡堆积体上游分布有粉土和黏土等湖相沉积物,厚约15 m,层理清晰(图8c),而右岸堆积体的下游可见大量滑坡坝溃决后形成的堆积物(龙维等,2005)。

特米滑坡原始斜坡坡面较陡,前缘临深切金沙江河谷,整体地形突出。在地震荷载作用下,滑体后缘岩体产生拉裂缝,然后迅速扩展剪断岩桥,并与其他邻近结构面相互连通。坡体前缘首先发生失稳,滑面逐渐贯通,巨大的岩体克服滑动面摩擦阻力高速滑动,冲向对岸并抬升爬高,滑坡堆积体堵塞金沙江(龙维等,2005)。根据测年研究,特米古地震滑坡发生时间为距今约1800年(陈剑等,2020)。特米滑坡堆积体目前整体较稳定,受河流冲刷和多次地震作用,并未明显复活滑动,但后缘

发育大量拉裂缝(图8d)和局部垮塌(图8e),在后续强降雨、地震和河流冲刷等外动力作用下,存在进一步复活变形的危险性。

4.2.2 郎多二村滑坡

郎多二村滑坡位于巴塘县松多乡巴曲左岸(图9a),滑坡后缘顶点高程约3200 m,坡脚高程约2955 m,相对高差达245 m,主滑方向为90°。滑坡发育于泥盆系中统穷错组(D_2q)灰岩中,岩层产状 $248^\circ\angle 64^\circ$,倾向坡内。巴塘断裂从坡脚处通过,受断裂活动强烈影响,斜坡岩体节理发育,风化严重,结构破碎。滑坡后壁呈阶状,坡表形成明显的滑后凹槽,残留少量碎块石堆积体。滑源区平面上呈矩形,纵长约410 m,横宽约360 m,滑床表面凹凸不平,无统一平直滑面。滑体主要堆积在斜坡坡脚和巴曲的河流阶地上,形似小山包,明显挤压前缘河流。堆积区顺滑动方向平均长约240 m,沿河平均

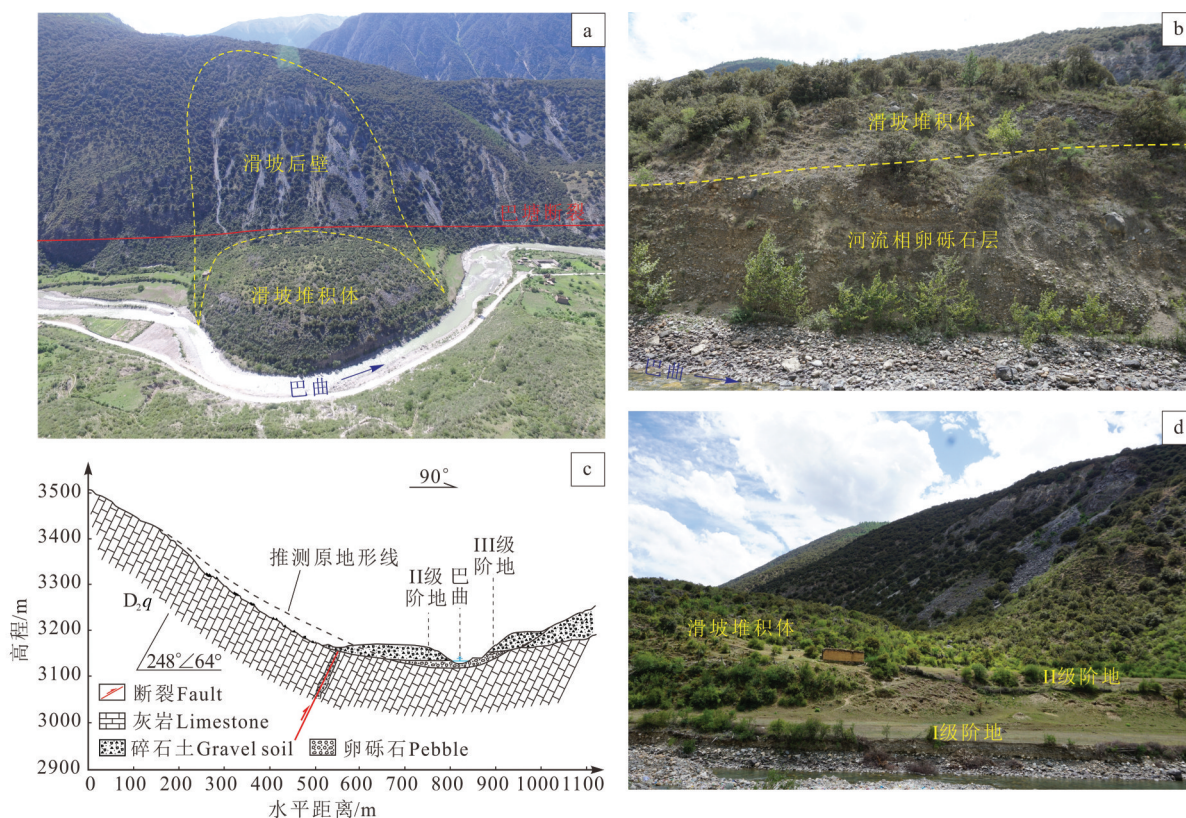


图9 巴塘郎多二村滑坡发育特征

a—滑坡全貌;b—滑坡堆积体前缘;c—滑坡工程地质剖面;d—滑坡左侧河流阶地

Fig.9 Characteristics of the Langduoercun landslide of the Batang County

a—Landslide overview; b—Front edge of landslide accumulation; c—Engineering geological profile of the landslide; d—River terrace on the left side of the landslide

宽约380 m,平均厚约20 m,推测体积 $184 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堆积体以块石为主,块径多为0.8~1.5 m,呈架空或镶嵌结构,中间充填少量岩屑和砂土。滑坡区附近河流阶地物质多为磨圆很好的卵砾石,粒径多为5~10 cm,中间混杂充填细砂(图9b)。滑体主要堆积于Ⅱ级阶地之上,堆积体前缘局部出露Ⅰ级阶地(图9c、d),推测滑坡发生时间应该在Ⅱ级阶地形成之后、Ⅰ级阶地形成之前。

在郎多二村滑坡的巴曲上下游还发育多处滑坡(图4),斜坡结构与郎多二村滑坡相近,后缘启滑高程大体一致,堆积形态也相似,挤压河道明显。根据巴塘多年降雨资料和滑坡记载可知,区内由降雨集中诱发滑坡群的可能性小。巴塘断裂晚第四纪以来活动性明显,断裂带附近岩体节理发育、结构极为破碎,力学性质差。在由硬质灰岩构成的反向斜坡中发育大型岩质滑坡,不利的岩体结构和强烈的外动力是其失稳破坏的重要条件,综合分析认为,郎多二村滑坡及其周边滑坡群是由巴塘断裂带历史地震诱发形成。

5 巴塘断裂带地质灾害成灾机理及危害

5.1 巴塘断裂带地质灾害成灾机理分析

巴塘断裂带地质灾害的发育特征不仅与斜坡自身地质属性、降雨和人类活动有关,还受断裂构造的强烈影响,主要表现为以下几个方面:

(1)断裂活动控制斜坡结构演化,断裂带附近岩体在多期构造运动作用下,节理裂隙发育,破碎程度高,力学强度低,斜坡稳定性差,如松多乡巴曲两侧发育的大量岩质滑坡。构造抬升作用加速河流下切,造成河谷两岸地形高陡,为地质灾害发生提供了势能条件和应力释放环境,如列衣乡自热村滑坡和波戈溪乡党恩村滑坡。

(2)地震力作用于岩土体会造成过大的附加荷载而使其沿软弱结构面滑动,还会导致软弱地层强度进一步降低,增加斜坡体不稳定性;断裂的剧烈滑动(如地震)造成岩土体破碎,诱发的古地震滑坡发育密度大,既有“一滑到底”目前稳定性较好的滑坡,也有“裂而未滑”目前稳定性差的滑坡,如巴曲松多乡段形成的地震滑坡群。

(3)断裂蠕滑作用对地形地貌、斜坡岩体结构、

水文地质条件、局域应力场等地质灾害成灾背景具有重要影响,特别是当活动断裂直接穿越滑坡、泥石流等地质灾害体时,对地质灾害具有直接的影响和触发作用,如夏邛镇茶雪村泥石流。

(4)区内第四纪残坡积物、崩坡积物、泥石流堆积物、冰水堆积物等多顺斜坡发育,前缘坡脚多遭受河流或沟道水流侵蚀,易形成高陡临空面,利于斜坡发生变形破坏。松散堆积物也为泥石流提供了丰富物源,且部分冰水堆积物、冻融风化剥蚀物位置较高,具有发生高位泥石流的潜在危险。

(5)短时强降雨在一定程度上加速了地质灾害发生,降雨形成的坡面流对滑坡发生具有直接触发作用;坡面流顺坡而下,形成面蚀或入渗裂缝中,雨水下渗增加坡体容重,软化滑动带土体,加剧了斜坡变形发展,如党巴乡巴曲两岸斜坡深切冲沟和蠕滑型滑坡。

5.2 巴塘断裂带地质灾害危害

5.2.1 地质灾害对城镇规划影响分析

(1)巴曲松多乡段居民点主要位于河流右岸,左岸地震滑坡群对村庄的直接威胁较小,但数个历史地震滑坡曾经堵塞河流,形成堰塞湖。因此,需要关注潜在地震滑坡堵河堰塞湖对乡镇村庄带来的安全威胁。

(2)巴塘县列衣乡、措拉乡、波戈溪乡等深切峡谷区的大型厚层堆积体平台往往是居民点等人类活动区,在持续强降雨和强震作用下,这些厚层堆积体存在变形破坏危险,威胁居民点安全,需加强变形监测。

(3)巴曲党巴乡—巴塘县城段河谷宽阔,岸坡地质灾害主要威胁坡脚公路和部分居民点,对城镇规划建设影响较小,但要注意城镇规划区应远离河谷岸坡和泥石流堆积扇等易受地质灾害影响区域。

5.2.2 地质灾害对公路运营的影响分析

(1)蠕滑型滑坡前缘直接挤压公路,如列衣乡自热村滑坡、波戈溪乡滑坡挤占原国道G318,该类滑坡还挤压河道,增加河流侵蚀侧蚀作用,掏蚀破坏公路路基。

(2)强降雨诱发的泥石流可能会淤积、阻断、破坏公路。

(3)波戈溪隧道出入口、公路沿线部分高陡边坡地段等仍存在落石与崩塌的潜在威胁。

6 结 论

青藏高原东部高山峡谷区地质灾害发育,受断裂活动影响显著。本文在资料收集、遥感解译和野外调查分析的基础上,剖析了区域地质灾害分布规律与典型滑坡发育特征,探讨了巴塘断裂带的地质灾害效应,取得以下主要认识和结论:

(1)巴塘断裂带现今活动性强且历史地震频发,岩体结构破碎,地质灾害发育且形成机理复杂,地质灾害类型主要有滑坡、崩塌和泥石流等。

(2)巴塘断裂带对地质灾害的影响主要表现为断裂带岩体结构促进地质灾害发育、断裂带剧烈活动(地震)诱发地质灾害、断裂蠕滑加剧地质灾害形成等;约2/3的地质灾害分布在巴塘断裂两侧各3000 m范围内,断裂带强烈地质灾害效应主要发生在断裂两侧3000 m范围以内。

(3)巴塘断裂带地质灾害具有点多面广、分布不均、局部集中等特点;地质灾害主要分布于西部高山峡谷区金沙江沿岸,以及东部高山区的深切河谷区。金沙江沿岸发育大量蠕滑型滑坡和大型历史地震堵江滑坡。

(4)巴塘断裂带地震滑坡和古滑坡发育,既有滑动彻底且目前稳定性较好的滑坡,也有裂而未滑且目前稳定性较差的滑坡,部分滑坡直接跨越断层,受断裂活动、降雨和人类工程活动的叠加影响,局部发生复活变形。

(5)巴塘断裂带城镇、公路沿巴曲密集分布,且巴曲沿岸又是地质灾害高发区,部分居民点和公路存在地质灾害风险,城镇规划区应远离河谷岸坡和泥石流堆积扇等易受地质灾害影响区域,公路等线性工程需加强防护和汛期排查。

致谢:中国地质科学院地质力学研究所金继军硕士、张怡颖硕士和四川省地质调查院廖维高级工程师、何元宵高级工程师参加了部分野外地质调查工作,在此一并表示感谢。

References

Bai Yongjian, Li Minghui, Wang Donghui, Gao Yanchao. 2014. Characteristics and disastrous rule research of geohazards in Batang County, the middle reaches of Jinsha River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 25(2): 103—109(in Chinese with English abstract).

Chen Jian, Dai Fuchu, Lü Tongyan, Cui Zhijiu. 2013. Holocene landslide-dammed lake deposits in the Upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau and their ages[J]. Quaternary International, 298: 107—113.

Chen Jian, Cui Zhijiu. 2015. Discovery of outburst deposits induced by the Xuelongnang paleolandslide-dammed lake in the Upper Jinsha River, China and its environmental and hazard significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(2): 275—284(in Chinese with English abstract).

Chen Jian, Cui Zhijiu, Chen Ruichen, Zheng Xinxin. 2020. The origin and evolution of the Temi Paleo- landslide dammed lake in the upper Jinsha River[J]. Earth Science Frontiers, 28(2): 85—93(in Chinese with English abstract).

Cheng Jia. 2008. Present-day Crustal Deformation of Western Sichuan Inferred from Geodetic Observations[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration(in Chinese with English abstract).

Dai F C, Xu C, Yao X, Xu L, Tu X B, Gong Q M. 2011. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 40(4): 883—895.

Fan Xuanmei, Xu Qiang, Andres Alonso-Rodriguez, Srikrishnan Siva Subramanian, Li Weile, Zheng Guang, Dong Xiujun, Huang Runqiu. 2019. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: Prime investigation, early warning, and emergency response[J]. Landslides, 16(5): 1003—1020.

Guo Jin, Zhang Qingyun, Yuan Canlin. 1990. Disaster and its impact of Batang M6.7 Strong Earthquake Swarm[J]. Earthquake Research in Sichuan, (1): 43—47(in Chinese with English abstract).

Guo Changbao, Du Yuben, Zhang Yongshuang, Zhang Guangze, Yao Xin, Wang Ke, Liu Jian. 2015. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan[J]. Geological Bulletin of China, 34(1): 121—134(in Chinese with English abstract).

He Yulin, Zhang Xuqi, Guo Jing. 1997. Investigation on intensity distribution of the 1996 M5.5 Baiyu-Batang Earthquake[J]. Earthquake Research in Sichuan, (2): 46—53(in Chinese with English abstract).

Huang Renqiu. 1997. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, (2): 46—53(in Chinese with English abstract).

Kamp Ulrich, Growley Benjamin J, Khattak Ghazanfar A, Owen Lewis A. 2008. GIS based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. Geomorphology, 101: 631—642.

Keefer David K. 2000. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution—the 1989 Loma Prieta, California event[J]. Engineering Geology, 58: 231—249.

- Li Xiao, Li Shouding, Chen Jian, Liao Qiulin. 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 with English abstract).
- Li Minghui, Wang Donghui, Gao Yanchao, Bai Yongjian, Liu Xiaoxia. 2010. Report of Detailed Survey on Geological Disasters in the Batang County of Ganzi State[R]. Chengdu Geological Survey Center(in Chinese).
- Long Wei, Chen Jian, Wang Pengfei, Xu Chong, Liu Hui, Sun Jinzhong. 2015. Formation mechanism and back analysis of paleoseismic parameters of the Temi large-scale ancient landslide in the upper Jinsha River[J]. Journal of Seismological Research, 38(4): 568–575(in Chinese with English abstract).
- Martel S J. 2004. Mechanics of landslide initiation as a shear fracture phenomenon [J]. Marine Geology, (23): 319–339.
- Ouyang Chaojun, An Huicong, Zhou Shu, Wang Zhongwen, Su Pengcheng, Wang Dongpo, Cheng Duoxiang, She Jinxing. 2019. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China[J]. Landslides, 16(7): 1397–1414.
- Ren Sanshao, Guo Changbao, Zhang Yongshuang, Zhou Nengjuan, Du Guoliang. 2017. Development characteristics and formation mechanism of Chashushan landslide in Batang, western Sichuan[J]. Geoscience, 38(4): 568–575(in Chinese with English abstract).
- Peng W F, Wang C L, Chen S T, Lee S T. 2009. A seismic landslide hazard analysis with topographic effect, a case study in the 99 Peaks region, Central Taiwan[J]. Environmental Geology, 57(3): 537–549.
- Su Lijun, Hu Kaiheng, Zhang Weifeng, Wang Jiao, Lei Yu, Zhang Chonglei, Cui Peng, Alessandro Pasuto, Zheng Quanhong. 2017. Characteristics and triggering mechanism of Xinmo landslide on 24 June 2017 in Sichuan, China[J]. Journal of Mountain Science, 14(9): 1689–1700.
- Tang Huiming, Liu Xiao, Hu Xinli, Griffiths D V. 2015. Evaluation of landslide mechanisms characterized by high-speed mass ejection and long-run-out based on events following the Wenchuan earthquake[J]. Engineering Geology, 194: 12–24.
- Wang Xinmin. 1990. Characteristics of intensity and isoseismic of the 1870 Sichuan Batang Earthquake[J]. Earthquake Research in Sichuan, (4): 89–94(in Chinese with English abstract).
- Wang Sijing. 2002. Coupling of earth's endogenic and exogenic geological processes and origins on serious geological disasters[J]. Journal of Engineering Geology, 10(2): 115–117(in Chinese with English abstract).
- Wang Pengfei, Chen Jian, Dai Fuchu, Long Wei, Xu Chong, Sun Jimin, Cui Zhijiu. 2014. Chronology of relict lake deposits around the Suwalong paleolandslide in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implications to Holocene tectonic perturbations[J]. Geomorphology, 217: 193–203.
- Wang Lichao, Wen Mingsheng, Feng Zhen, Sun Weifeng, Wei Yunjie, Li Junfeng, Wang Wenpei. 2019. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 30(1): 5–13(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Liu Jiamei, Li Zetong, Xin Peng, Shi Jusong, Wu Shuren. 2021. Seismic landslide hazard assessment of China and its impact on national territory spatial planning[J]. Geology in China, 48(1): 21–39(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Zhang Peizhen, Wen Xueze, Qin Zunli, Chen Guihua, Zhu Ailan. 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan Province and its adjacent regions[J]. Seismology and Geology, 27(3): 446–461(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiangning, Li Shengwei. 2005. Risk evaluation and precautionary measures for bank slope instability in the hydroelectric project area on the mainstream of the Jinsha River[J]. Geology in China, 32(1): 155–161(in Chinese with English abstract).
- Yin Yueping, Wang Wenpei, Zhang Nan, Yan Jingkai, Wei Yunjie, Yang Longwei. 2017. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province[J]. Geology in China, 44(5): 827–841(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, Yang Zhihua, Wu Ruian, Du Guoliang. 2016. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(3): 277–286(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Ba Renji, Ren Sanshao, Li Zongliang. 2019. Analysis on geo-mechanism of the Baige landslide in Jinsha River, Tibet, China[J]. Geology in China, 47(6): 1637–1645(in Chinese with English abstract).
- Zhou Rongjun, Chen Guoxing, Li Yong, Zhou Zhaohui, Gong Yu, He Yulin, Li Xiaogang. 2005. Research on active faults in Litang-Batang region, western Sichuan Province, and the seismogenic structures of the 1989 Batang M6.7 earthquake swarm[J]. Seismology and Geology, 27(1): 31–43(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白永健, 李明辉, 王东辉, 高延超. 2014. 金沙江中游巴塘县地质灾害发育特征及成灾规律分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 25(2): 103–109.
- 陈剑, 崔之久. 2015. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积体的发现及其环境与灾害意义[J]. 沉积学报, 33(2): 275–284.
- 陈剑, 崔之久, 陈瑞琛, 郑欣欣. 2020. 金沙江上游特米古滑坡堰塞湖

- 成因与演化[J]. 地学前缘, 28(2): 85-93.
- 程佳. 2008. 川西地区现今地壳运动的大地测量观测研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 郭劲, 张庆云, 袁灿林. 1990. 巴塘 6.7 级强震群灾害及其影响[J]. 四川地震, (1): 43-47.
- 郭长宝, 杜宇本, 张永双, 张广泽, 姚鑫, 王珂, 刘健. 2015. 川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理[J]. 地质通报, 34(1): 121-134.
- 何玉林, 张绪奇, 郭劲. 1997. 1996 年 12 月 21 日四川白玉、巴塘间 5.5 级地震烈度考察[J]. 四川地震, (2): 46-53.
- 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): 433-451.
- 李晓, 李守定, 陈剑, 廖秋林. 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.
- 李明辉, 王东辉, 高延超, 白永健, 刘小霞. 2010. 甘孜地区(巴塘县)地质灾害详细调查报告[R]. 成都地质调查中心.
- 龙维, 陈剑, 王鹏飞, 许冲, 刘辉, 孙进忠. 2015. 金沙江上游特米大型古滑坡的成因及古地震参数反分析[J]. 地震研究, 38(4): 568-575.
- 任三绍, 郭长宝, 张永双, 周能娟, 杜国梁. 2017. 川西巴塘茶树山滑坡发育特征及形成机理[J]. 现代地质, 31(5): 978-989.
- 王新民. 1990. 1870 年四川巴塘地震的烈度及等震线特征[J]. 四川地震, (4): 89-94.
- 王思敬. 2002. 地球内外动力耦合作用与重大地质灾害的成因初探[J]. 工程地质学报, 10(2): 115-117.
- 王立朝, 温铭生, 冯振, 孙炜锋, 魏云杰, 李俊峰, 王文沛. 2019. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 30(1): 5-13.
- 王涛, 刘甲美, 栗泽桐, 辛鹏, 石菊松, 吴树仁. 2021. 中国地震滑坡危险性评估及其对国土空间规划的影响研究[J]. 中国地质, 48(1): 21-39.
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质, 27(3): 446-461.
- 许向宁, 李胜伟. 2005. 金沙江干流水电工程区岸坡失稳危险性预测及防治对策[J]. 中国地质, 32(1): 155-161.
- 殷跃平, 王文沛, 张楠, 闫金凯, 魏云杰, 杨龙伟. 2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质, 44(5): 827-841.
- 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 杨志华, 吴瑞安, 杜国梁. 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 37(3): 277-286.
- 张永双, 巴仁基, 任三绍, 李宗亮. 2019. 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.
- 周荣军, 陈国星, 李勇, 周朝晖, 龚宇, 何玉林, 黎小刚. 2005. 四川西部理塘-巴塘地区的活动断裂与 1989 年巴塘 6.7 级震群发震构造研究[J]. 地震地质, 27(1): 31-43.