

青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究

杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 任三绍

Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau

YANG Zhihua, GUO Changbao, WU Ruian, ZHONG Ning, and REN Sanshao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160

大武水源地断裂带关键水动力参数确定及污染防治对策

Determination of the key hydrodynamic parameters of the fault zone using colloidal borescope in the Dawu well field and strategies for contamination prevention and control

包锡麟, 费宇红, 李亚松, 曹胜伟 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 56-63

隧道施工期岩爆危险性评价的属性识别模型及工程应用

Attribute recognition model of fatalness assessment of rockburst in tunnel construction and its application

何怡帆, 李天斌, 曹海洋 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 102-111

基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation

侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143-151

四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan

赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 81-89

川藏公路102滑坡后缘平台物质特征及其形成机制新思考

New thoughts on the material characteristics and formation mechanism of the platform at the back edge of the 102 Landslide on the Sichuan-Tibet Highway

杨德宏, 武博强, 黄勇, 陈兴强 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 133-140



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202009024

青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究

杨志华^{1,2,3}, 郭长宝^{1,2,3}, 吴瑞安^{1,2,3}, 钟宁^{1,2,3}, 任三绍¹

(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. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081)

摘要: 全新世以来青藏高原东部巴塘断裂带活动强烈, 地形地貌和地质构造复杂, 历史地震频发, 并诱发大量滑坡灾害。基于巴塘断裂带地震滑坡长期防控的需要, 在分析区域地质灾害成灾背景和发育分布特征的基础上, 采用Newmark模型完成了巴塘断裂带50年超越概率10%的潜在地震滑坡危险性预测评价, 并完成地震滑坡危险性区划。结果表明: 巴塘断裂带及其临近的金沙江断裂带区域、金沙江及其支流沿岸具有较高的潜在地震滑坡危险性, 地震滑坡危险区具有沿断裂带和大江大河等峡谷区分布的总体趋势, 受活动断裂和地形地貌影响显著; 距离断层越近、坡度越大的斜坡, 地震滑坡危险性越高; 规划建设中的川藏铁路经巴塘县德达乡、白玉县沙马乡, 向西北延伸, 跨越金沙江, 可以穿越较少的地震滑坡危险区, 金沙江水电工程规划建设需加强潜在地震滑坡危害研判及防控。巴塘断裂带潜在地震滑坡危险性评价结果可为区域城镇开发和重大工程规划建设的地震滑坡长期防控提供科学参考。

关键词: 青藏高原; 巴塘断裂带; 概率地震; 地震滑坡危险性; Newmark模型

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)05-0091-11

Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau

YANG Zhihua^{1,2,3}, GUO Changbao^{1,2,3}, WU Ruian^{1,2,3}, ZHONG Ning^{1,2,3}, REN Sanshao¹

(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. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China*)

Abstract: The Batang fault on the eastern Qinghai-Tibet Plateau has strong activity since the Holocene, where the geomorphology and geological structure is complex, and the historical earthquakes occurred frequently, which induced abundant landslides. For the long-term prevention of regional earthquake landslides in the Batang fault zone, based on analyzing the geological background and development characteristics of regional landslides, the Newmark model was used to complete the seismic landslide hazard assessment with exceeding probability 10% of 50 years in the Batang fault zone. The results show that the Batang fault zone and its adjacent Jinshajiang fault zone, the Jinsha River and its tributaries coast have the high seismic landslide hazard. The potential seismic landslide hazard zone has a general distribution trend of along the fault zone and the river canyons, which is significantly affected by the active faults and topography. The closer the slope to the fault is and the greater the slope angle is, the higher the seismic landslide hazard is. The Sichuan-Tibet Railway line under planning and

收稿日期: 2020-09-08; 修订日期: 2021-01-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190319); 国家自然科学基金项目(41877279; 41731287); 中国地质科学院基本科研业务费项目(所科研30)

第一作者: 杨志华(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地质灾害评价方面的研究。E-mail: yangzh99@163.com

通讯作者: 吴瑞安(1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事地质灾害评价方面的研究。E-mail: 648266126@qq.com

construction extends from the Deda Town and Shama Town to the northwest and crosses the Jinsha River, and can traverse fewer zones with potential seismic landslide hazard. The planning and construction of Jinsha River hydropower project needs to strengthen the assessment and prevention of potential seismic landslide hazard. The potential seismic landslide hazard assessment results in the Batang fault zone can provide a scientific reference for the long-term prevention and control of earthquake landslides in the regional urban development and major engineering planning and construction.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; Batang fault zone; probabilistic earthquake; seismic landslide hazard; Newmark model

我国地质条件复杂, 地质灾害点多面广、防范难度大, 是世界上地质灾害最严重、受威胁人口最多的国家之一^[1]。青藏高原是我国现今构造活动最为强烈的地区, 地形地貌和地质构造复杂, 是地质灾害高易发区。区内构造活动强烈, 活动断裂发育, 历史地震频发, 并诱发了大量滑坡、堵江堰塞湖等次生地质灾害, 地震地质灾害危险性高。近年来, 青藏高原发生了多次强震事件。2008 年汶川 M_s 8.0 级地震触发了大量的次生地质灾害, 对震区居民和重大工程安全构成严重威胁^[2]。汶川地震后, 又相继发生了 2013 年芦山 M_s 7.0 级地震^[3]、2014 年鲁甸 M_s 6.5 级地震和 2014 年康定 M_s 6.3 级地震, 地震造成的大量松散堆积物为地质灾害发生提供了丰富物源, 在震后降雨作用下易再次转化为地质灾害, 地震作用增加了地质灾害易发性和活动强度。地震滑坡已经引起地质灾害研究领域的广泛关注, 国内外学者对地震滑坡发育特征^[4-5]、地震滑坡形成机理^[6-7]、活动断裂的地质灾害效应^[8]以及地震滑坡易发性、危险性和风险性评价方面^[9]开展了大量研究工作, 取得了一些成果, 推进了地震滑坡的研究进展。目前, 地震滑坡危险性研究成果较为丰富, 但活动断裂带等地震高发区域的潜在地震滑坡预测研究尚需加强。

随着我国西部大开发战略实施, 青藏高原铁路、公路、水电站和跨区域电网等重大工程建设势必面临着活动构造区潜在地震地质灾害的严重威胁^[10-11]。巴塘断裂带地处西藏和四川的交界部位, 是一条右旋走滑断裂带, 全新世以来活动速率高, 为地震强活动带^[12-13]。断裂带岩土体结构破碎, 地质灾害发育, 具有发生频率高、运动速度快、危害严重等特点。巴塘断裂带控制着自川入藏的交通大廊道, 在未来一段时间内, 巴塘断裂带仍将处于地震活跃期, 地震滑坡的长期防控面临着严峻形势, 有必要针对巴塘断裂带潜在地震滑坡危险性开展深入研究。基于巴塘断裂带

地震活动特征、重大工程和城镇规划建设的地震滑坡长期防控需要, 在分析总结巴塘断裂带地质灾害成灾背景和典型地震滑坡的基础上, 采用 Newmark 斜坡累积位移模型^[14-16]开展了巴塘断裂带 50 年超越概率 10% 的潜在地震滑坡危险性预测评价, 初步反映了巴塘断裂带潜在地震滑坡危险性空间分布特征, 研究结果可为巴塘断裂带重大工程和城镇规划建设的地震滑坡长期防控提供科学参考。

1 地质背景

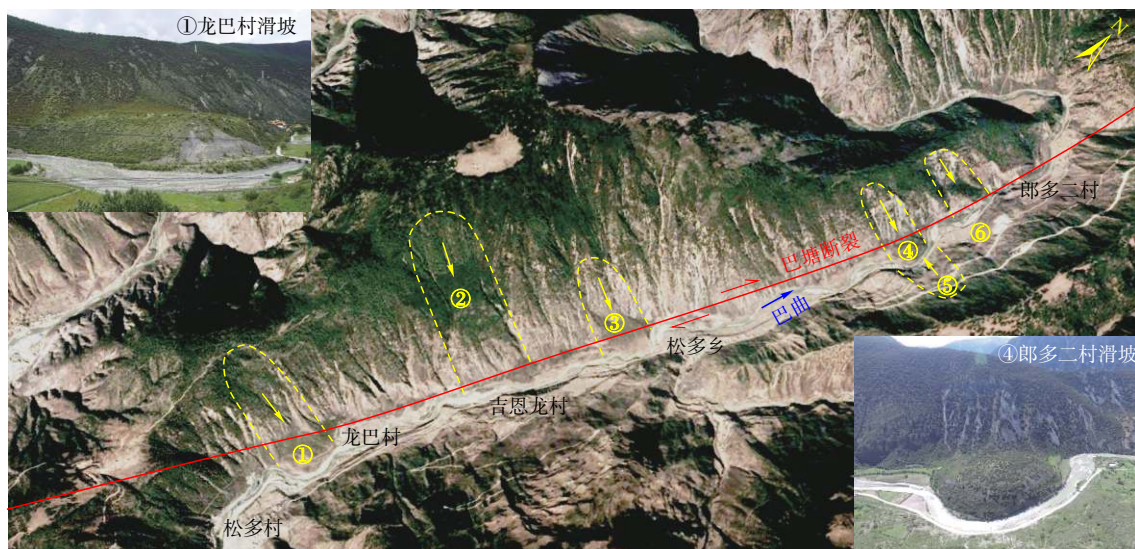
1.1 区域地质背景

巴塘断裂带位于青藏高原东部(图 1), 全长约 200 km, 总体走向呈 NE 30°, 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, 晚新生代以来的右旋总位移量至少在 10 km 左右^[17]。巴塘断裂带晚更新世以来活动迹象较显著, 表现为河流深切、比降大、阶地发育; 在莽岭段, 断裂切错古近纪红层, 形成达 40 m 的构造破碎带。巴塘断裂带分段活动性差异明显, 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, 但在黄草坪、雅洼及巴塘县城附近也发育了坡中槽地貌。综合前人研究成果和现今 GPS 观测数据, 巴塘断裂全新世晚期以来的水平滑动速率在 3 ~ 4 mm/a^[12-13, 18]。莽岭乡探槽剖面揭露出 4 次古地震事件, 倒数第二次古地震事件时间限定在距今 850±30 ~ 730±30 a BP, 最新一次古地震事件时间限定在距今 550±30 a BP, 说明距今约 850 年以来, 巴塘断裂带可能进入了一个新的活跃期, 重复间隔约 700 年^[19]。

据《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2015), 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, 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(图 2), 1870 年发生 M_s 7.2 级地震, 震中在巴塘附近, 震中烈

滑坡为主。部分地震滑坡发生失稳复活,对城镇安全和公路安全运营造成影响,如巴塘茶树山滑坡等^[23-24]。巴塘断裂直接穿越部分滑坡、泥石流等灾害体,并控制着其稳定性。巴曲党巴乡—巴塘县城段两岸岩体破碎,在坡面堆积层和岩体强风化层中发育大量蠕滑型滑坡,厚层堆积体中发育大量冲沟,且泥石流发育。巴曲松多乡段发育大量中小型地震滑坡,形成地

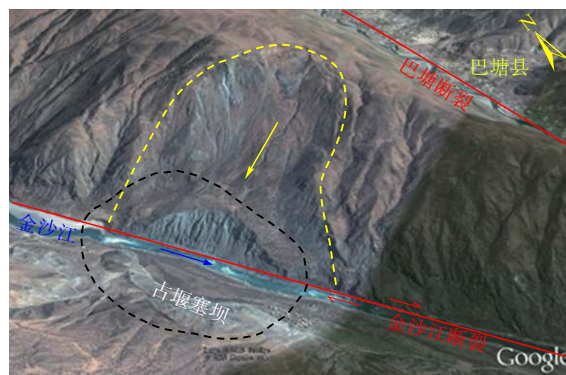
震滑坡群,主要沿河流左岸和巴塘断裂呈串珠状分布(图 3a),如郎多二村滑坡和龙巴村滑坡等,这些地震滑坡堆积体覆于河流 II 级阶地之上,推测地震滑坡发生时间最早在河流 II 级阶地形成之后,如图 3(a)所示。在巴塘断裂带邻区的金沙江沿岸,地震诱发大型堵江滑坡也极为发育,如雪隆囊堵江滑坡、苏洼龙堵江滑坡和特米堵江滑坡^[25],如图 3(b)(c)所示。



(a) 巴塘巴曲松多乡地震滑坡群



(b) 巴塘雪隆囊堵江滑坡 (镜向209°)



(c) 巴塘特米堵江滑坡

图 3 巴塘断裂带典型地震滑坡特征

Fig. 3 Characteristics of typical seismic landslides in the Batang fault zone

2 巴塘断裂带潜在地震滑坡危险性评价

近年来,地震滑坡危害愈加突出,对地震滑坡危险性研究也逐渐从定性向半定量、量化发展,采用的模型方法也愈加丰富。包括:(1) 基于统计分析的综合评价法:是在统计分析地震滑坡与地震地质背景相关性的基础上,揭示地震地质背景对滑坡发生的控制作用,挖掘地震滑坡的主控因素,采用支持向量机、

信息量和逻辑回归等方法完成基于多因素的地震滑坡危险性评价^[26-27];(2) 基于极限平衡理论的拟静力法:将作用于坡体上的地震动力沿滑动面(或最大坡度方向)分解,然后计算地震作用下的斜坡下滑力与抗滑力比值来评价滑坡危险性;(3) 基于 Newmark 的边坡累积位移模型:通过计算地震荷载作用下的斜坡位移来预测评价地震滑坡危险性^[14],并得到广泛应用^[15,28]。本文在考虑区域地震地质背景基础上,基于

Newmark 模型方法的定量化评价优势,开展巴塘断裂带地震滑坡危险性评价研究。

2.1 Newmark 斜坡位移模型

Newmark 模型理论基础是无限斜坡的极限平衡理论,该模型将滑体视为一个刚体,主要研究坡体本身的临界加速度和稳定系数,当受到的外力作用大于临界加速度时,就会发生有限位移,滑块的永久位移是在地震荷载作用下,滑动块体失稳后位移不断累积所致^[14]。将外荷载加速度与临界加速度的差值部分对时间进行二次积分即可得到永久位移(图4)^[14-16,29]。

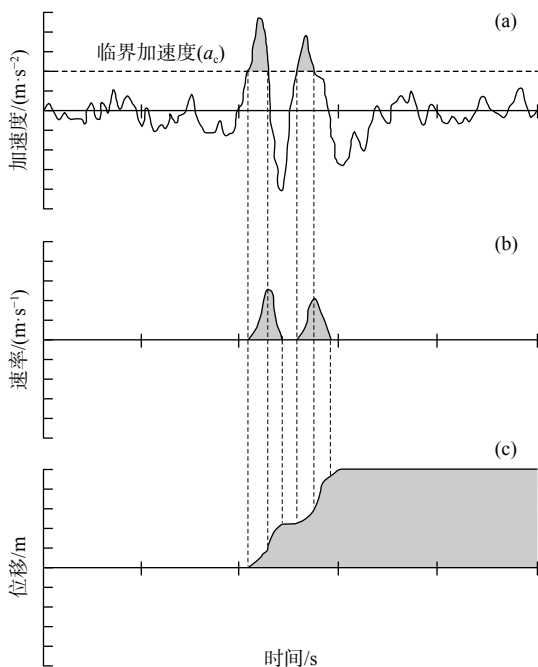


图4 Newmark 累积位移计算过程示意图^[15]

Fig. 4 Calculation process diagram of Newmark cumulative displacement^[15]

许多学者基于全球大量地震滑坡统计分析结果对 Newmark 模型进行了改进,增加了其适应性,针对地震加速度记录、阿里亚斯强度(Arias)、峰值地面加速度等地震参数,分别发展了基于统计规律的计算模型^[15,30]。本文潜在地震参数采用概率地震条件下的地震动峰值加速度,采用的地震滑坡危险性计算步骤主要有:(1)基于区域地质背景,选择合适的岩土体强度和斜坡形态参数,计算区域斜坡静态稳定系数(F_s);(2)进一步利用 F_s 和斜坡形态参数,计算坡体临界加速度(a_c);(3)利用 a_c 和地震动峰值地面加速度(PGA),计算概率地震扰动下的坡体永久滑动位移(D_n);(4)根据斜坡位移和滑坡发生概率的统计规律,预测评价概率地震滑坡危险性^[28,31-32]。

采用 ArcGIS 平台实现基于 Newmark 模型的潜在地震滑坡危险性评价,地层岩性和工程地质岩组数据来自于 1:20 万区域地质图,DEM 数据来自于 1:5 万地形数据,地形坡度由 DEM 生成,潜在地震荷载参考中国第五代地震动峰值地面加速度。计算栅格分辨率为 25 m×25 m,工程地质岩组和 PGA 等矢量数据转换为栅格数据参与计算。

2.2 静态稳定系数

采用基于极限平衡理论的斜坡稳定系数公式(式1)计算区域斜坡体的静态稳定系数(F_s)^[15,30]。

$$F_s = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma \tan \alpha} = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + \left(1 - \frac{m \gamma_w}{\gamma}\right) \times \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad (1)$$

式中: c' ——岩土体有效黏聚力/kPa;

φ' ——岩土体有效内摩擦角/(°);

γ ——岩土体重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

γ_w ——地下水重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

t ——潜在滑体厚度/m;

α ——潜在滑面倾角/(°);

m ——潜在滑体中饱和部分占总滑体厚度的比例。

综合考虑地质成因、岩性组合、岩石坚硬程度和岩体完整程度等因素将巴塘断裂带地层岩土体划分为 13 个工程地质岩组(图5,表1)。根据工程地质手册^[33]、工程岩体分级标准(GB/T 50218—2014)^[34]和相关文献资料^[15,28]中的参考值,综合初始工程地质岩组的物理力学参数,作为有效强度参数 c' 和 φ' 。然后,采用式(1)计算斜坡静态稳定系数,在多次迭代循环计算过程中,调整模型参数,保证斜坡在无内外动力作用下的静态稳定系数大于 1,以此确定模型参数为: c' 、 φ' 和 γ 见表 1, $\gamma_w=10 \text{ kN/m}^3$, $t=2.5 \text{ m}$, $m=0.3$, α 取值地形坡度(图6)。计算得到的巴塘断裂带斜坡静态稳定系数见图7。

2.3 斜坡临界加速度

在地震动荷载作用下,滑块的下滑力等于抗滑力时(极限平衡状态)对应的地震动加速度即为斜坡临界加速度(a_c),可以表征在地震荷载作用下,斜坡由于固有属性而发生坡体失稳的潜势。通过比较静力和地震动力条件下的滑块受力状态,可以建立地震动作用下的滑块极限平衡状态方程,进而推导出斜坡临界加速度的计算公式(式2)^[35],计算过程中采用地形坡度。计算得到的巴塘断裂带斜坡临界加速度见图8。

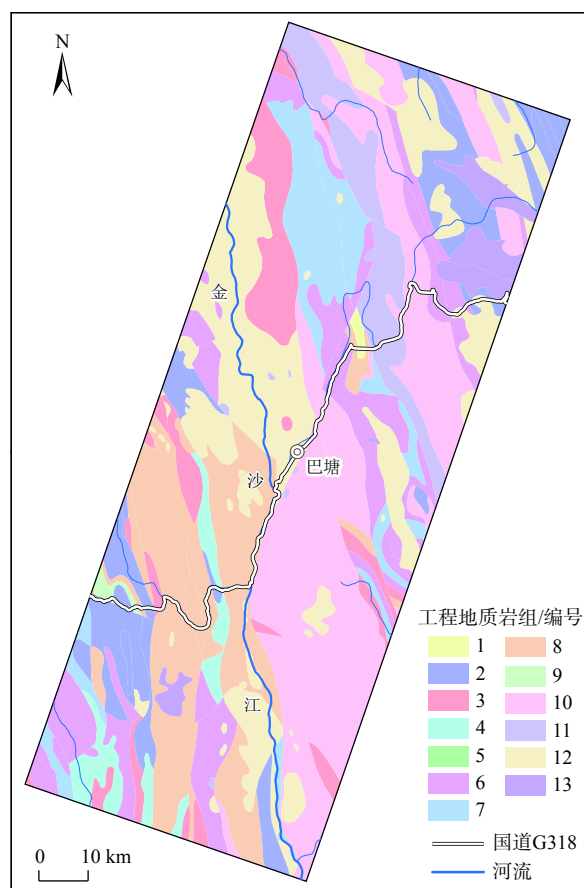


图 5 巴塘断裂带工程地质岩组

Fig. 5 Engineering geological groups in the Batang fault zone

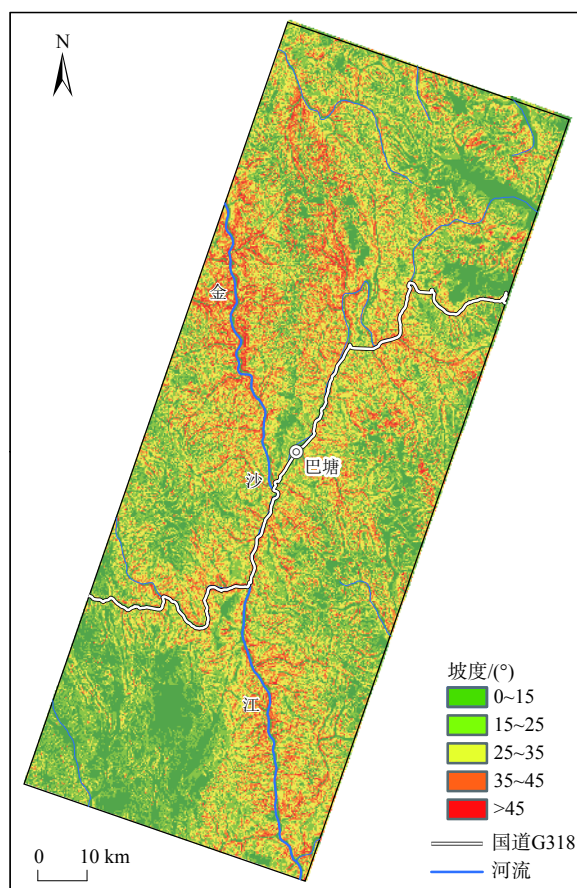


图 6 巴塘断裂带地形坡度

Fig. 6 Terrain slope in the Batang fault zone

表 1 巴塘断裂带工程地质岩组物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of engineering geological groups in the Batang fault zone

ID	工程地质岩组	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
1	坚硬的厚层状砂岩岩组	26	33	26
2	较坚硬-坚硬的中-厚层状砂岩夹砾岩、泥岩、板岩岩组	25	32	25
3	软硬相间的中-厚层状砂岩、泥岩夹灰岩、泥质灰岩及其互层岩组	23	30	24
4	软弱-较坚硬薄-中厚层状砂岩、泥岩及砾岩、泥岩互层岩组	22	28	23
5	软弱的薄层状泥岩、页岩岩组	20	27	21
6	坚硬的中-厚层状灰岩及白云岩岩组	24	31	25
7	较坚硬的薄-中厚层状灰岩、泥质灰岩岩组	23	30	24
8	软硬相间的中-厚层状灰岩、白云岩夹砂岩、泥岩、千枚岩、板岩岩组	22	29	23
9	较坚硬-坚硬薄-中厚层状板岩、千枚岩与变质砂岩互层岩组	21	28	22
10	较弱-较坚硬的薄-中厚层状千枚岩、片岩夹灰岩、砂岩、火山岩岩组	20	26	21
11	坚硬的块状玄武岩为主的岩组	27	34	29
12	坚硬块状花岗岩、安山岩、闪长岩岩组	26	33	28
13	软质散体结构岩组	15	25	18

注: ID与图5中的工程地质岩组编号一致, c' 为有效黏聚力, ϕ' 为有效内摩擦角, γ 为岩土体重度。

$$a_c = (F_s - 1)g \sin \alpha \quad (2)$$

式中: g ——重力加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$;
 α ——滑面倾角/ $(^{\circ})$ 。

2.4 地震诱发斜坡位移

通过统计大量地震加速度记录和地震滑坡实例,分析它们之间的相关性,获得了地震诱发斜坡累积位移(D_n)与斜坡临界加速度(a_c)、地震动峰值地面加速度(PGA)的函数关系式(式3)^[36]。采用我国第五代地震动峰值地面加速度区划图,采用反距离插值方法,细化地震动峰值地面加速度区划(图9),区划间隔为0.01 g,然后计算巴塘断裂带区域50年超越概率10%地震诱发斜坡位移,计算结果见图10。

$$\lg D_n = 0.215 + \lg \left[\left(1 - \frac{a_c}{PGA} \right)^{2.341} \left(\frac{a_c}{PGA} \right)^{-1.438} \right] \quad (3)$$

2.5 地震滑坡危险性

地震荷载条件下,斜坡发生位移并不表征一定会发生滑坡灾害,只有斜坡位移累积到一定程度,斜坡才会失稳并沿滑动面滑动而发生滑坡灾害。根据斜坡位移和滑坡发生概率之间的统计关系(式4)^[15],计

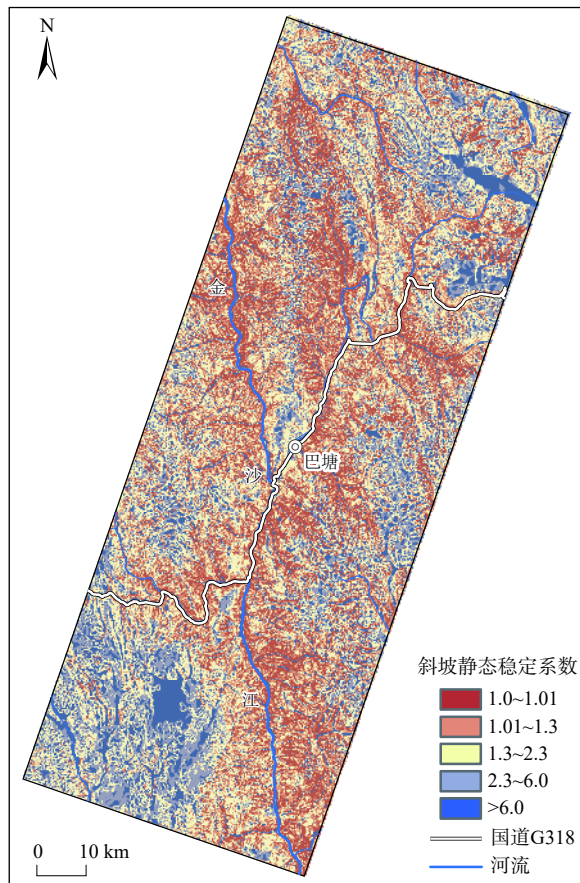


图7 巴塘断裂带斜坡静态稳定系数

Fig. 7 Static factor of safety in the Batang fault zone

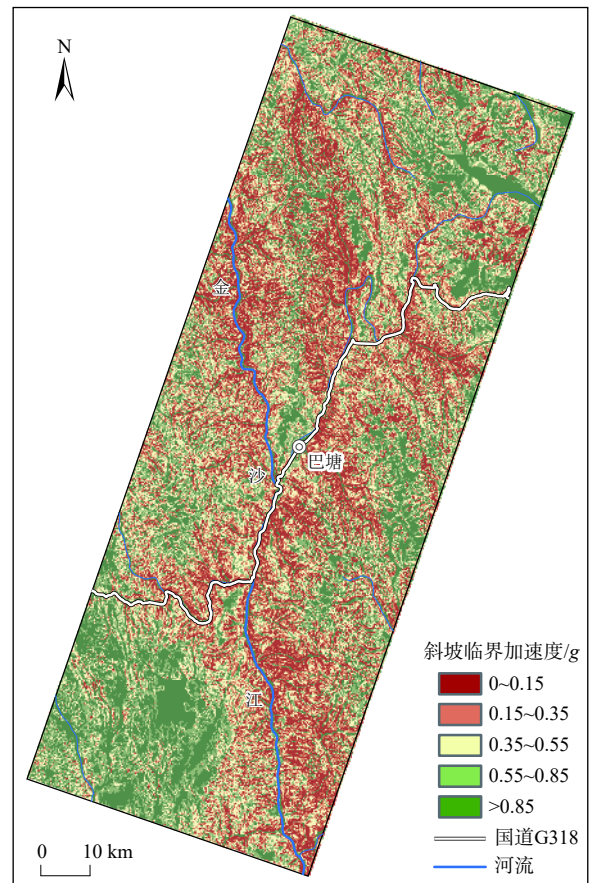


图8 巴塘断裂带临界加速度

Fig. 8 Critical acceleration in the Batang fault zone

算巴塘断裂带潜在50年超越概率10%地震动作用下的滑坡发生概率(P)。

$$P = 0.335 [1 - \exp(-0.048D_n^{1.565})] \quad (4)$$

3 巴塘断裂带地震滑坡危险性评价结果

3.1 地震滑坡危险性分区结果

根据地震滑坡发生概率,参考《地质灾害危险性评估规范》(DZ/T 0286—2015)和国内外地震滑坡危险性分区研究成果^[15],把地震滑坡危险性划分为4个等级(图11):低危险性(地震滑坡发生概率小于5%),约占区域面积的62.87%,中等危险性(地震滑坡发生概率为5%~15%),约占区域面积的22.19%,高危险性(地震滑坡发生概率为15%~25%),约占区域面积的13.23%,极高危险性(地震滑坡发生概率大于25%),约占区域面积的1.71%。

3.2 地震滑坡危险区分布特征

巴塘断裂带潜在地震滑坡危险区(包括极高危险区和高危险区)(图12)的空间分布主要有以下特点:(1)潜在地震滑坡危险区具有沿断裂带集中分布的趋

势,尤其是NNE向巴塘断裂带及其临近的金沙江断裂带区域具有较高的地震滑坡危险性,距离断裂越近,地震滑坡危险性越高,地震滑坡危险区面积越大,这主要是由于断裂活动形成高山峡谷等构造地貌,且断裂带区域地震动参数较高,岩体破碎,增加了滑坡灾害发生的有利条件;(2)潜在地震滑坡危险区具有沿大江大河等峡谷区分布特征,尤其是金沙江及其支流巴曲两岸具有较高的地震滑坡危险性,高陡斜坡在自身重力长期作用下卸荷裂隙发育,且部分斜坡存在蠕滑形变,叠加地震作用,滑坡危险性高,坡度越大,地震滑坡危险性越大;(3)总体上,巴塘断裂带潜在地震滑坡危险性评价结果符合断裂带地震滑坡空间分布特征的已有研究成果和既有认识^[2, 28, 32]。

3.3 潜在地震滑坡危险性讨论

3.3.1 概率地震和设定地震滑坡危险性

地震危险性分析主要包括确定分析和概率分析两种方法。概率地震分析方法强调地震发生的随机性和不确定性,我国《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2001)除考虑地震发生的不确定性,还考

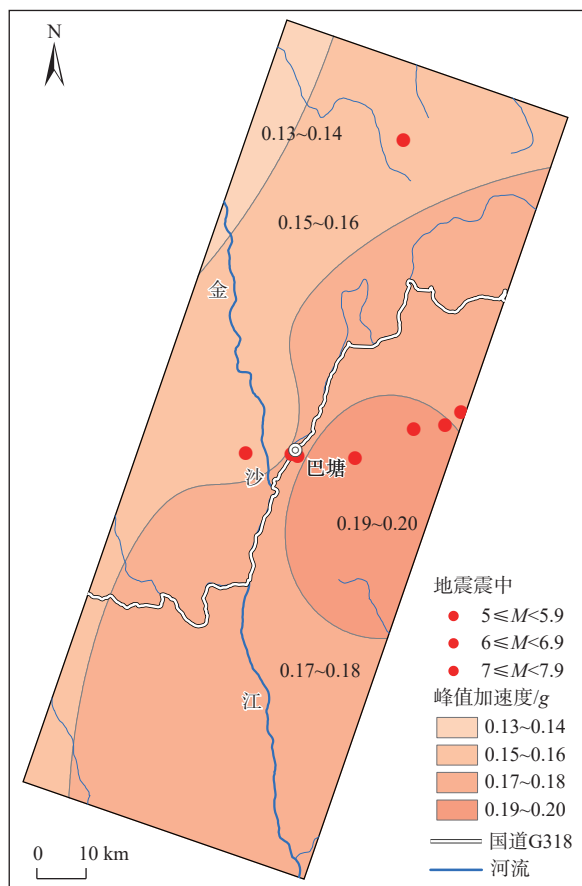


图 9 巴塘断裂带地震动峰值地面加速度

Fig. 9 Seismic peak ground acceleration in the Batang fault zone

考虑地震时空分布的不均匀性和地震预测研究成果的应用,给出了区域未来一定时间内可能的地震危险程度。本文采用 50 年超越概率 10% 的基本地震动(地震复发周期约为 475 年)开展了潜在地震滑坡危险性研究,反映了巴塘断裂带区域未来一段时间内可能遭受的潜在地震滑坡危险性,是一段时间内区域静态地震滑坡危险性。确定分析也称设定地震法,主要是总结地震构造特征和历史地震发生规律,给出确切的震中位置与震级,该方法较少考虑地震的复发周期,其结果不具有概率意义,一般用于破坏后果无法承受的重大工程场地地震滑坡危险性分析中。两种方法各有特点,且适用范围也不同,概率地震滑坡危险性适用于区域社会经济和重大工程选线选址规划,设定地震滑坡危险性适用于典型重大工程和城镇场地工程地质条件评价。

3.3.2 潜在地震滑坡危险性对重大工程建设的影响

巴塘断裂带控制着自川入藏的交通大廊道,如重要入藏公路 G318 穿越巴塘断裂带区域,时常发生地质灾害掩埋、阻断公路等事件,受到地质灾害严重威

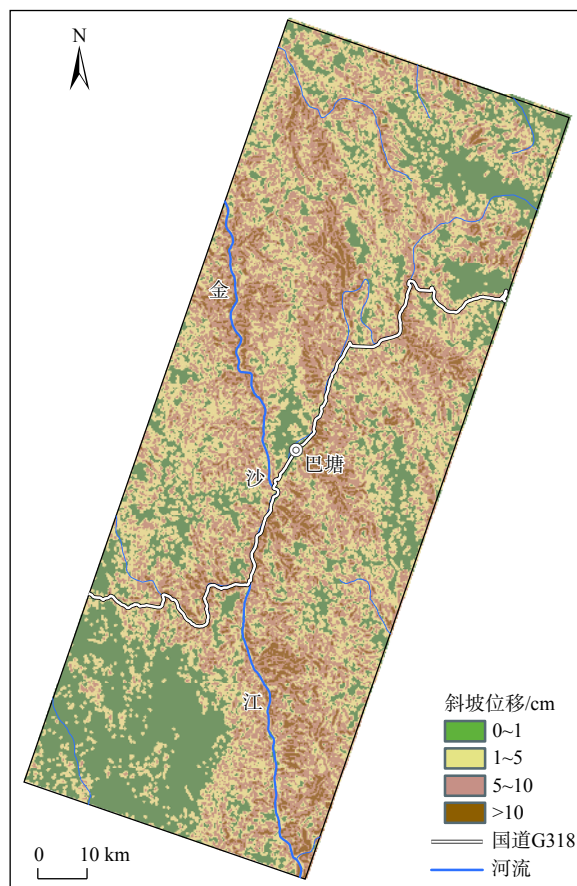


图 10 巴塘断裂带斜坡位移

Fig. 10 Slope displacement in the Batang fault zone

胁,需加强潜在地震地质灾害防控意识和处置措施。川藏铁路是我国正在规划建设中的一条西南入藏重要铁路,规划铁路线经巴塘县德达乡、白玉县沙马乡,向西北延伸,跨越金沙江,可以穿越较少的潜在地震滑坡危险区。

金沙江沿岸高陡边坡、大型堆积层(或强风化带)蠕滑型滑坡、地震堵江滑坡极为发育,如雄巴滑坡、特米堵江滑坡和雪隆囊堵江滑坡等。在潜在强震作用下,金沙江河谷区地震滑坡危险性高,水电站库区岸坡存在发生滑坡-堵江-堰塞湖-溃决洪水、滑坡涌浪、冲击坝体等潜在灾害威胁,水电工程规划建设需加强潜在地震滑坡危害研判及防控。

4 结论

(1)巴塘断裂带是川西藏东重要的工程建设区,基于区域地震滑坡长期防控需要,本文采用 Newmark 斜坡累积位移模型完成了潜在地震滑坡危险性预测评价,为区域重大工程和城镇规划建设提供防灾减灾科学参考。

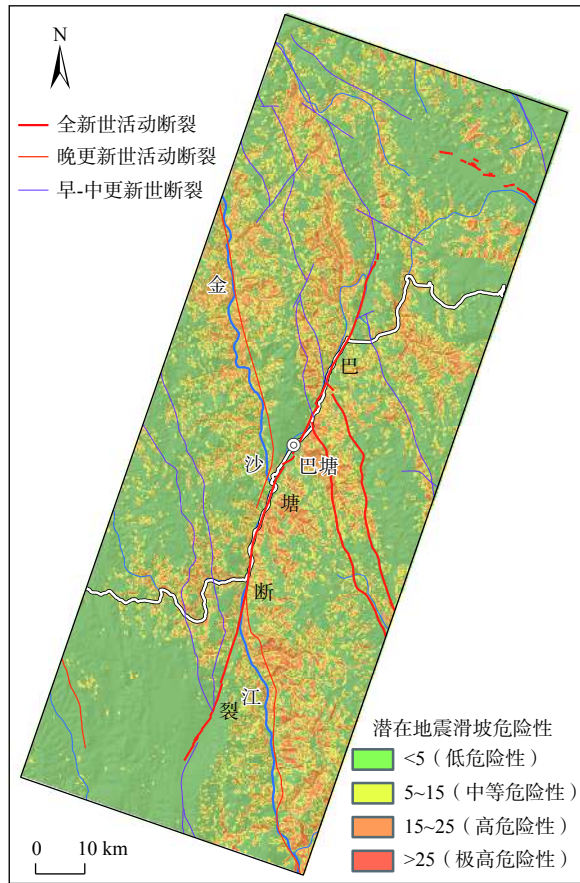


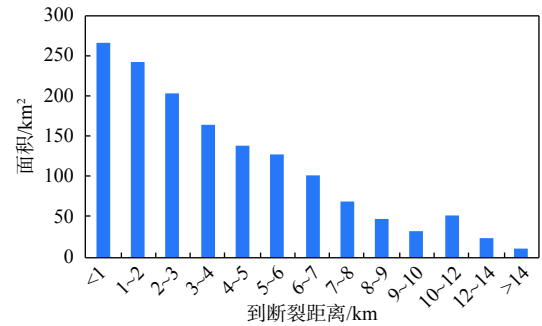
图 11 巴塘断裂带潜在概率地震滑坡危险性分布图

Fig. 11 Potential probabilistic seismic landslide hazard in the Batang fault zone

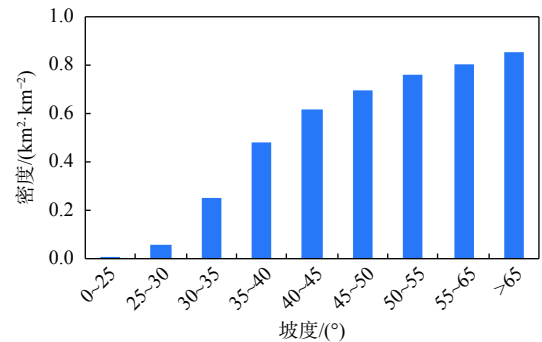
(2) 50 年超越概率 10% 潜在地震动力作用下, 巴塘断裂带地震滑坡危险性空间分布的主要特征有: 潜在地震滑坡危险区具有沿断裂带集中分布的总体趋势, 尤其是 NE 向巴塘断裂带及其临近的金沙江断裂带区域具有较高的地震滑坡危险性, 距离断裂越近, 地震滑坡危险性越高; 潜在地震滑坡危险区具有沿大江大河等峡谷区分布特征, 受地形地貌影响显著, 尤其是金沙江及其支流沿岸具有较高的地震滑坡危险性。

(3) 巴塘断裂带控制着川西藏东交通大廊道, 川藏铁路是我国正在规划建设中的一条西南入藏重要铁路, 规划铁路线经巴塘县德达乡、白玉县沙马乡, 向西北延伸, 跨越金沙江, 可以穿越较少的潜在地震滑坡危险区。

(4) 金沙江河谷潜在地震滑坡危险性高, 水电站库区边坡存在发生滑坡-堵江-堰塞湖-溃决洪水、滑坡涌浪、冲击坝体等潜在灾害威胁, 水电工程规划建设需加强潜在地震滑坡危害研判及防控。



(a) 地震滑坡危险区与断裂的关系



(b) 地震滑坡危险区与坡度的关系

图 12 潜在地震滑坡极高和高危险区分布特征

Fig. 12 Distribution characteristics of very high and high seismic landslides hazard zone

参考文献 (References) :

[1] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957 - 966. [XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957 - 966. (in Chinese with English abstract)]

[2] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433 - 444. [YIN Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433 - 444. (in Chinese with English abstract)]

[3] ZHANG Y S, DONG S W, HOU C T, et al. Geohazards induced by the Lushan Ms7.0 earthquake in Sichuan Province, southwest China: typical examples, types and distributional characteristics[J]. Acta Geologica Sinica(-English Edition), 2013, 87(3): 646 - 657.

[4] KEEFER D K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution - the 1989 Loma Prieta, California event[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 231 - 249.

[5] 乔建平, 黄栋, 杨宗佶, 等. 汶川大地震诱发滑坡的震

- 中距[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 1 - 7. [QIAO Jianping, HUANG Dong, YANG Zongji, et al. The landslide epicenter distance triggered by the Wenchuan earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [6] TANG H M, LIU X, HU X L, et al. Evaluation of landslide mechanisms characterized by high-speed mass ejection and long-run-out based on events following the Wenchuan earthquake[J]. *Engineering Geology*, 2015, 194: 12 - 24.
- [7] 张永双, 成余粮, 姚鑫, 等. 四川汶川地震-滑坡-泥石流灾害链形成演化过程[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1900 - 1910. [ZHANG Yongshuang, CHENG Yuliang, YAO Xin, et al. The evolution process of Wenchuan earthquake-landslide-debris flow geohazard chain[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 1900 - 1910. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张永双, 郭长宝, 姚鑫, 等. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 277 - 286. [ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, YAO Xin, et al. Research on the geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 277 - 286. (in Chinese with English abstract)]
- [9] KAMP U, GROWLEY B J, KHATTAK G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region[J]. *Geomorphology*, 2008, 101(4): 631 - 642.
- [10] 郭长宝, 张永双, 蒋良文, 等. 川藏铁路沿线及邻区环境工程地质问题概论[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 877 - 889. [GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, JIANG Liangwen, et al. Discussion on the environmental and engineering geological problems along the Sichuan-Tibet Railway and its adjacent area[J]. *Geoscience*, 2017, 31(5): 877 - 889. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 邹强, 蒋良文, 游勇, 等. 川藏铁路山地灾害信息化管理平台及其应用[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(10): 177 - 182. [ZOU Qiang, JIANG Liangwen, YOU Yong, et al. Information management system of mountain hazards along Sichuan-Tibet Railway[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(10): 177 - 182. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周荣军, 陈国星, 李勇, 等. 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, 2005, 27(1): 31 - 43. [ZHOU Rongjun, CHEN Guoxing, LI Yong, et al. 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*, 2005, 27(1): 31 - 43. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 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, 2005, 27(3): 446 - 461. [XU Xiwei, ZHANG Peizhen, WEN Xueze, et al. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan province and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(3): 446 - 461. (in Chinese with English abstract)]
- [14] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. *Géotechnique*, 1965, 15(2): 139 - 160.
- [15] JIBSON R W, HARP E L, MICHAEL J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(3/4): 271 - 289.
- [16] ROMEO R. Seismically induced landslide displacements: a predictive model[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58(3/4): 337 - 351.
- [17] WANG E, BURCHFIEL B C, ROYDEN L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red river, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China[C]//Geological Society of America Special Paper, 1998, 327.
- [18] 程佳. 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, 2008. [CHENG Jia. Present-day crustal deformation of western Sichuan inferred from geodetic observations[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈立春. 地壳稳定性、活动断裂及对铁路影响评价专题研究报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2019. [CHEN Lichun. Crust stability, active faults, and their impact evaluation on railway[R]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese)]
- [20] 王新民. 1870年四川巴塘地震的烈度及等震线特征[J]. 四川地震, 1990(4): 89 - 94. [WANG Xinmin. Characteristics of intensity and isoseismic of the 1870 Sichuan Batang earthquake[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1990(4): 89 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 郭劲, 张庆云, 袁灿林. 巴塘6.7级强震群灾害及其影响[J]. 四川地震, 1990(1): 43 - 47. [GUO Jin, ZHANG Qingyun, YUAN Canlin. Disaster and its impact of Batang M6.7 strong earthquake swarm[J]. *Earthquake*

- Research in Sichuan, 1990(1): 43 – 47. (in Chinese)]
- [22] 何玉林, 张绪奇, 郭劲. 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, 1997, 2(2): 46 – 53. [HE Yulin, ZHANG Xuqi, GUO Jin. Investigation on intensity distribution of the 1996 M5.5 Baiyu-Batang earthquake[J]. Earthquake Research in Sichuan, 1997, 2(2): 46 – 53. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 白永健, 郑万模, 李明辉, 等. 川藏公路茶树山滑坡特征及成因机制分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 862 – 866. [BAI Yongjian, ZHENG Wanmo, LI Minghui, et al. Characteristics and formation mechanism of Chashushan landslide on Sichuan-Tibet highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 862 – 866. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 任三绍, 郭长宝, 张永双, 等. 川西巴塘茶树山滑坡发育特征及形成机理[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 978 – 989. [REN Sanshao, GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, et al. Development characteristics and formation mechanism of Chashushan landslide in Batang, western Sichuan[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 978 – 989. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 陈剑, 崔之久. 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, 2015, 33(2): 275 – 284. [CHEN Jian, CUI Zhijiu. 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, 2015, 33(2): 275 – 284. (in Chinese with English abstract)]
- [26] YANG Z H, LAN H X, GAO X, et al. Urgent landslide susceptibility assessment in the 2013 Lushan earthquake-impacted area, Sichuan province, China[J]. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2467 – 2487.
- [27] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 地震滑坡危险性概念和基于力学模型的评估方法探讨[J]. 工程地质学报, 2015, 23(1): 93 – 104. [WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Concepts and mechanical assessment method for seismic landslide hazard: a review[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(1): 93 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [28] ZHANG Y S, YANG Z H, GUO C B, et al. Predicting landslide scenes under potential earthquake scenarios in the Xianshuihe fault zone, southwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(7): 1262 – 1278.
- [29] JIBSON R W. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis[J]. Transportation Research Record, 1993, 1411: 9 – 17.
- [30] MILES S B, HO C L. Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(4): 305 – 323.
- [31] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 基于简化Newmark位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估: 以汶川Ms8.0级地震为例[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 16 – 24. [WANG Tao, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Case study on rapid assessment of regional seismic landslide hazard based on simplified Newmark displacement model: Wenchuan M_s 8.0 earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 16 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 等. 考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 154 – 160. [FENG Wei, TANG Yaming, ZHAO Fasuo, et al. Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 154 – 160. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. [Engineering geology manual Editorial Board. Engineering geology manual[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese)]
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)]
- [35] WILSON R C, KEEFER D K. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote lake, California, earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1983, 73(3): 863 – 877.
- [36] JIBSON R W. Regression models for estimating coseismic landslide displacement[J]. Engineering Geology, 2007, 91(2/3/4): 209 – 218.