

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.004

地形起伏对滑坡运动的影响规律研究*

李小琴, 富海鹰, 张迎宾, 夏 逍, 董 琰, 相晨琳

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 地形作为滑坡运动的重要约束条件,对滑坡运动行为及致损效应具有较大影响,研究其影响规律具有实际意义。通过分析地形对滑坡运动的作用机理,初步推导了考虑地形效应的雪橇模型,利用已有模型及试验结果验证其具有相当准确性,进而推导了地形引起的摩擦耗能增量 E_T 表达式。利用耗能增量 E_T 与总能量 E_G 的比值定义地形影响率 η ,作为地形影响程度的指标,对100个滑坡地形进行了计算分析。结果表明:(1)16%的滑坡地形影响率保持在20%以上,地形影响不可忽略;(2)局部地形为滑坡短时加减速创造了良好条件,对滑坡运动具有显著影响;(3)地形对近程滑坡的影响明显大于远程滑坡;(4)滑坡的地形缓急大致可以反映滑坡运动受地形影响的大小。建议对潜在下滑地形较平缓的不稳定坡体给予足够重视,且通过微小改变地形可能会大幅减小滑坡运动距离,以达到减灾目的。

关键词: 滑坡; 滑坡运动; 地形影响; 耗能增量

中图分类号: P642.3 文献标识码: A 文章编号: 1672-2132(2020)06-0867-11

Study on the Influences of Topography on Landslide Mobility

LI Xiaoqin, FU Haiying, ZHANG Yingbin, XIA Xiao, DONG Yan, XIANG Chenlin

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610037, China)

Abstract: Topography, as an important constraint condition on landslide movement, has great influences on the behavior and damage effect of landslide movement. Based on the analysis of the action mechanism of terrain on the landslide movement, the sled model considering the terrain effect was preliminarily derived. The existing model and test results showed that the new model is quite accurate. Then the expression of friction energy consumption increment E_T induced by terrain was derived. The ratio of energy consumption increment E_T to total energy E_G was used to define the terrain influence rate η . As an index of terrain influence degree, the ratio η of 100 landslides were calculated and analyzed. The results show that: 1) the topography influence rate for 16% of the total landslide is above 20%, which means the influence of topography cannot be ignored; 2) local topography creates good conditions for short-time acceleration and deceleration of landslide, which has a significant impact on landslide movement; 3) topography has a greater impact on short-distance landslide than on long-dis-

* 收稿日期:2020-01-03;修回日期:2020-02-28

基金项目:四川省科技计划重点研发项目(2019YFG0001)、国家自然科学基金(41672286,41977213)、四川省科技计划项目(20GJHZ0232,20ZDYF2887)资助

作者简介:李小琴(1994-),女,硕士研究生。主要从事滑坡运动机制及防灾减灾方面的研究。Email: Shelly_lee@163.com

通讯作者:张迎宾(1983-),男,教授,博导,博士。主要从事地震岩土工程及数值分析方法的研究。

Email:yingbinz719@swjtu.cn

tance landslide; 4) the gradient of the topography can roughly reflect the influence of topography on landslide movement. It is suggested that enough attention should be paid to the unstable slope with gentle sliding terrain, and the sliding distance may be greatly reduced by changing the terrain slightly, so as to achieve the purpose of disaster reduction.

Keywords: landslide; landslide movement; topography influence; energy consumption increment

引言

地形是滑坡受扰失稳的重要原因^[1-2]。同时,滑坡启程后,其运动受到天然滑动路径的地形约束,滑坡近程、远程的运动和堆积特征同样受到显著影响,一定程度造成不同滑坡的致损行为呈现出差异^[3-5],成为防灾减灾研究领域的一大难点。因此,研究地形对滑坡运动影响规律有助于滑坡运动范围及致灾特征预测,从地形角度为滑坡防灾减灾提供一定参考。

由于地形对滑坡运动的影响机理尚不明确,相关探讨多基于定性方法开展。常用方法是將地形特征分解为滑坡滑动距离 L 、垂直落差 H 、各级坡角 θ 等单个地形因素,进而利用大量的滑坡数据给出地形因素对滑坡运动影响的统计规律,樊晓一等^[6-7]通过分析90个汶川地震诱发的坡脚型滑坡,统计其运动参数与地形因子的关系,发现地形坡度对滑坡运动参数具有较大影响,而坡脚转动角度的影响具有较大显著性;G.Devoli等^[8]统计分析了发生于Nicaragua等中美洲国家的367个滑坡,并与世界范围内527个滑坡进行了对比,发现大样本中体积与等效摩擦系数呈现出高度相关性。

另有一种常用的方法是,利用试验方法对影响规律进行单个地形因素的变量分析,郝明辉等^[9]利用实验方法,通过在滑动路径上设置挑坎,与原工况对比发现实验滑体堆积形态发生显著变化。X.Y.Fan等^[10]采用斜-平轨道模拟滑坡地形,不同斜-平转角工况的结果显示滑坡运动速度受该角影响显著。

亦有学者针对实际的单体滑坡开展实验或数值模拟研究,定性分析地形影响规律,王玉峰等^[5]制作了文家沟滑坡的三维缩尺地形,在此条件上能反演出与实际滑坡较为相似的堆积形态及速度,说明运动路径的地形对滑坡运动堆积参数具有较大控制作用,且初步揭示了复杂滑动地形促进滑坡能量快速耗散的机理。杜鹃等^[11]采用有限体积法建立

了El Picacho滑坡的三维真实地形模型,模拟结果表明滑坡运动加速滑行、减速堆积都受到地形的控制作用。

以上代表性结论可概括为三点:(1)自然地形对滑坡运动具有不可忽略的影响,整体而言,呈现出促进滑坡动能耗散的特征;(2)滑坡在竖直面内典型的坡度变化对滑坡运动参数及堆积形态具有显著影响;(3)滑坡运动等效坡度与运动距离、运动落差以及地形坡度都具有一定关系。

无论是基于大量滑坡样本的统计分析方法、基于滑坡概化模型的室内试验方法,还是对单体滑坡多维度研究的方法,都是在拆分地形影响为多个单一因素的前提下进行的。而分析滑坡受地形影响规律的确切机理,进行影响规律的定量研究以及利用影响规律开展防灾减灾工程建设却极少受到重视。因此,本文分析了地形起伏对滑坡运动的力学作用原理,在此基础上定义地形影响率以评价地形对滑坡运动的影响程度,并对国内100个典型滑坡进行了地形影响规律分析,以期对滑坡防灾减灾工程及相关研究提供一定的理论与实践指导。

1 地形对滑坡的作用机理分析

1.1 地形作用理论分析

地形是地面及地面构造物起伏状态的汇总^[12-13],抽象为数学模型,则是三维变曲率面。连续或不连续变化的曲率是地形最重要的特征之一,滑坡受较连续、平缓的曲率变化将产生向心或离心运动,受较不连续、陡峭的曲率变化将产生抛体或碰撞运动。为简化问题,本文将滑坡的地形抽象为二维变曲率线(下文简称地形线,如图1所示),并忽略少部分滑坡存在的抛体运动。

则一点的摩擦可表示为:

$$f = \mu N \quad (1)$$

式中, f 为摩擦力; μ 为摩擦系数; N 为正压力。

考虑向离心作用,滑坡的正压力可表示为:

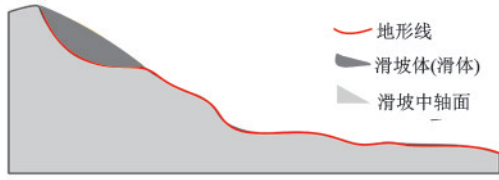


图1 地形线示意

Fig.1 Sketch Map of Landslide Topographic line^[15]

$$N = \begin{cases} mg \cos\theta + \frac{v_c^2}{r} m & (\text{地形为凹状}) \\ mg \cos\theta - \frac{v_c^2}{r} m & (\text{地形为凸状}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, m 为坡体质量; θ 为瞬时地形坡度; v_c 为滑坡相应的运动速度; r 为瞬时地形曲率, 可表示为:

$$r = \frac{1}{K} = \frac{\{1 + [f'(x)]^2\}^{3/2}}{|f''(x)|} \quad (3)$$

式中, K 为曲率; x 为地形水平位置; $f(x)$ 为地形函数, $f'(x)$, $f''(x)$ 分别为其一阶、二阶导数。

由于 $f''(x) > 0$ 时, 函数为凹状, $f''(x) < 0$ 时, 函数为凸状, 故令:

$$r = \frac{1}{K} = \frac{\{1 + [f'(x)]^2\}^{3/2}}{f''(x)} \quad (4)$$

则,

$$f = \mu \left(mg \cos\theta + \frac{v_c^2}{r} m \right) \quad (5)$$

亦即地形凹凸性通过改变摩擦正应力, 使得摩擦力发生一定变化, 从而对滑坡运动产生一定影响。且由此可知, 下凹地形对应摩擦力增加, 趋向于阻止滑坡运动; 上凸地形对应摩擦力减小, 趋向于促进滑坡运动。

从能量角度, 地形引起滑坡滑动全程额外耗散的能量值 E_t 为:

$$E_t = \int_{x_0}^x \mu m \frac{v_c^2}{r} \frac{dx}{\cos\theta} \quad (6)$$

其中, r , θ 可由地形函数确定。

滑坡摩擦系数 μ 可由下式大致确定^[14]:

$$\mu = 1.2V^{-0.089} \quad (7)$$

式中, V 为滑坡总体积。

据此, 定义 E_t 与滑坡总能量 E_g 的比值为地形影响率 η :

$$\eta = \frac{E_t}{E_g} = \frac{\int_{x_0}^x \mu m \frac{v_c^2}{r} \frac{dx}{\cos\theta}}{mg\Delta h} = \frac{\mu}{g\Delta h} \int_{x_0}^x \frac{v_c^2}{r} \frac{dx}{\cos\theta} \quad (8)$$

由式(5)、(8)可知, $\eta > 0$ 时, 地形造成滑坡运动额外耗能, 即地形具有阻滑作用, 反之, 则具有促滑作用。由其定义式可知, x 处 η 值为滑坡从 x_0 处到 x 处受地形影响额外消耗的能量占这段总势能的比率, 定义全程整体的地形影响率为 η_a 。为方便探讨局部地形影响, 定义一点处的瞬态地形影响率 η_p 。

为获得不同滑坡的 η 值, 需要获得其全程速度函数, 由于通过监测获得大量滑坡实际发生过程中的真实速度具有较大难度。因此, 本文通过在雪橇模型中考虑地形引起的向离心作用, 进而获取一个粗略的 η 值, 利用大量滑坡数据(20年内发生在国内的100个滑坡)的整体规律弥补, 以期获得具有一定客观性的地形对滑坡运动特征的影响规律。同时, 考虑地形引起滑体的转动动能, 则全程速度函数可由以下计算式大致获取:

$$mg\Delta h - \int \mu \left(mg \cos\theta + \frac{v_c^2}{r} m \right) \frac{dx}{\cos\theta} = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} (mr^2) \frac{v^2}{r^2} \quad (9)$$

1.2 地形作用验证

参文[15]研究了四组不同体积、不同初始高度的同种颗粒在同种坡面上释放后的堆积距离及运动速度, 四组试验参数如表1、图2所示。坡面为45°斜面, 于坡脚处平滑连接曲率半径为0.2 m的弧线(如图2试验1中所示), 并过渡至水平面, 试验采用干砂, 其材料参数见表1。利用四组实验的运动距离及试验1的全程速度对考虑地形影响和未考虑地形影响的计算式(即雪橇模型)进行验证(图3)。结果表明在雪橇模型的基础上, 考虑地形作用后的模型结果将比雪橇模型结果更加符合试验结果, 且利用式(9)获取的全程速度函数具有相当准确度。

表1 四组试验基本参数

Table 1 Basic parameters of four-group tests

试验编号	斜坡坡度/(°)	释放高度/m	体积/L	摩擦系数
1	45	1	40	0.42
2	45	1	20	0.42
3	45	1.5	40	0.42
4	45	1.5	20	0.42

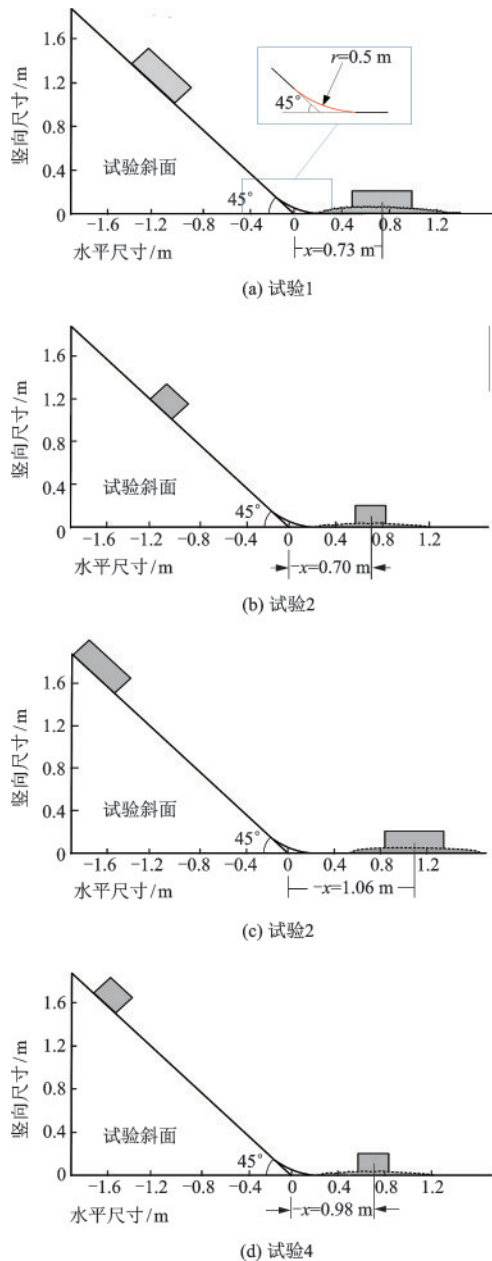


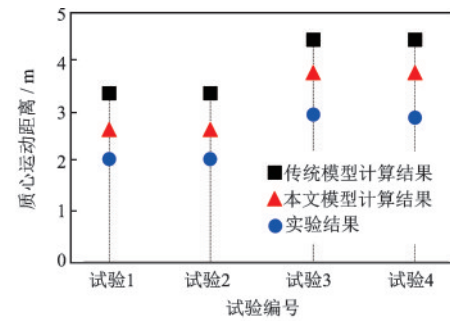
图2 四组试验示意^[15]

Fig.2 Schematic diagram of four-group tests^[15]

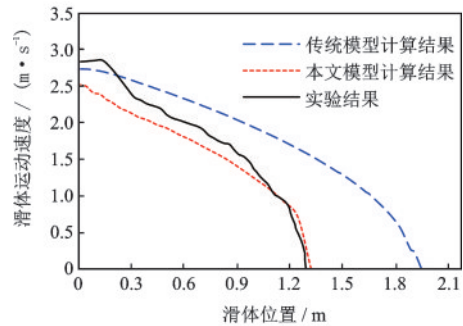
2 滑坡地形数据

通过汶川地震滑坡数据库,利用GIS提取了90个滑坡的位置、体积及地形数据等基本信息,另采集近十年来发生在国内各地的十个大型滑坡相关数据,汇总成为包含100个滑坡事件的滑坡地形数据^[16-23]。地形数据详见附件。

利用考虑地形影响的雪橇模型大致获取滑坡全程的速度时程,再计算地形影响率 η , η_a , η_p 。计算结果详见附件。



(a) 质心运动距离对照



(b) 试验1速度对照

图3 计算结果与实验对照

Fig.3 The comparison between the calculated results and the experimental results

注:试验采用的是前缘速度,且从图2 $x=0$ 处开始监测

3 地形影响规律分析

(1)统计地形影响率的分布,如图4所示。由于样本中所有滑坡的 η_a 值都大于0,表明整体上,地形对滑坡运动基本倾向于阻滑作用。不同滑坡运动全程受地形影响的程度具有较大差异,16%的滑坡地形引起的耗能作用占总势能20%及以上,说明地形对滑坡运动的作用不容忽视。

(2)提取样本中四个具有典型微地形的滑坡,如图5所示,对比其地形曲线与 η 、 η_p 曲线,发现某些滑坡最终的地形影响率 η_a 值虽然不大,但在运动过

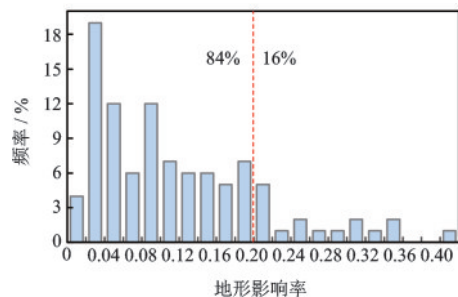


图4 地形影响率频率分布统计

Fig.4 Frequency distribution statistics of terrain impact rate

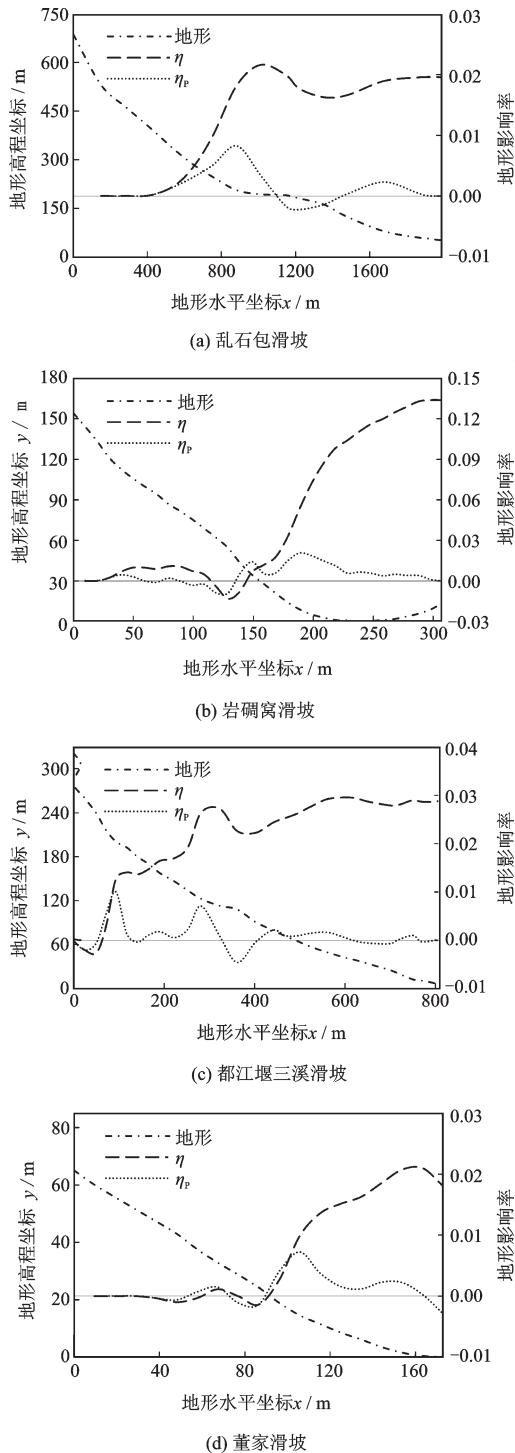


图5 滑坡地形与地形影响率全程变化对比

Fig.5 Comparison of the whole process change of landslide topography and terrain influence rate

程中, η 、 η_p 曲线受局部地形影响呈现较大变化。以乱石包滑坡(图5(a))为例, 其最终 η 值约为2%, 但在运动过程中, 经过第一个地形平缓下凹时(约在 $x=800$ m 处), 地形影响率剧烈上升, 达到第一个极值, 由式(9)可知, 滑坡经历了一个剧烈减速过程;

经过第一个平缓地形凸起时(约在 $x=1300$ m 处), 地形影响率剧烈下降, 意味着滑坡在地形促进下经历了一个缓步加速过程。由此可见, 局部的地形上凸及下凹为滑坡短时加速及减速创造了良好条件, 对滑坡运动具有显著影响。因而, 通过微小地改变不稳定坡体的潜在运动路径起伏状态, 可能会大幅减小滑坡运动距离。

(3) 统计100个滑坡样本, 发现全程地形影响率 η_a 与滑坡竖向下滑高差和其水平运动距离的比值强相关(图6, $R^2=0.61$)。由于 $\Delta y/\Delta x$ 也是近程滑坡与远程滑坡的区分指标, 所以由图6可知, 近程滑坡受地形影响明显大于远程滑坡, 亦即地形对运动能力较强的滑坡具有相对较小的阻滑作用, 对运动能力较弱的滑坡具有相对较强的阻滑作用。

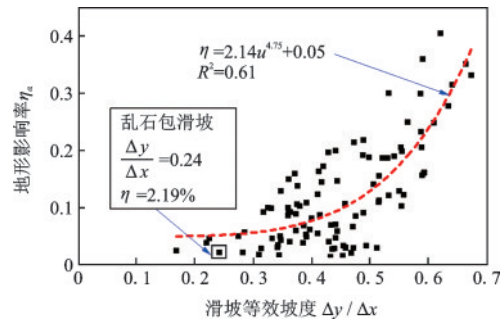


图6 η_a 与 $\Delta y/\Delta x$ 相关分析

Fig.6 Correlation analysis on η_a and $\Delta y/\Delta x$

(4) 按值的大小, 提取全程地形影响率 η_a 前十位及后十位的滑坡中地形高差相当的五组滑坡, 在同一尺度下对比其地形, 如图7所示。可见总能量相当的情况下, 滑坡的地形缓急大致可以反映滑坡运动受地形影响的大小, 运动路径上地形平缓的滑坡可能因此运动更远的距离。提示潜在下滑地形较平缓的不稳定坡体可能更容易孕育破坏能力极大的高速远程滑坡, 应当给予足够重视。

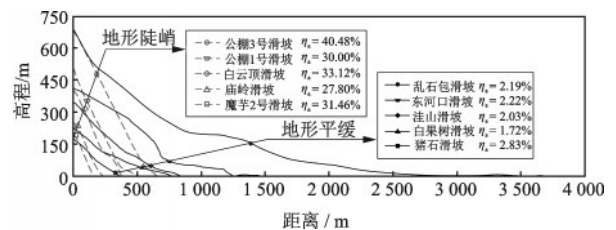


图7 滑坡的地形缓急与地形影响大小的关系

Fig.7 The relationship between the topographic condition of landslide and the influence extent

4 讨 论

(1)通过对100个滑坡地形的分析,发现地形对滑坡运动的影响不可忽视,由于微小的局部地形变化可能引起滑坡运动状态剧烈的变化,可能通过改变不稳定坡体潜在运动地形的起伏状态,能实现对滑坡运动能力的大幅削弱。

(2)结果表明,地形对运动能力强的滑坡具有较弱的阻滑能力,对运动弱的滑坡具有较强的阻滑能力,亦可能因为地形阻滑能力较弱,滑坡才获得了更强的运动能力。因而改变坡底地形,使之具有较强阻滑能力,可能实现滑坡减灾的目的。

(3)地形缓急大致与滑坡地形影响率相关,往往地形平缓的地形能孕育运动能力较强的高速远程滑坡,如图7中的乱石包滑坡、东河口滑坡等。因而,对于潜在滑动地形较平缓的不稳定坡体,应当给予足够重视。

(4)本文研究的样本90%取自地震滑坡数据库,且样本全部来源于国内,滑坡发生机制及区域性是否对运动计算结果产生影响,尚不明确。

(5)本文定义的地形影响率依赖于全程速度分布,通过雪橇模型中考虑地形引起的向离心作用,获取的 η 值较为粗略,虽然利用大量滑坡数据的整体规律可以一定程度弥补,但将来利用更准确的速度计算方法,可以实现更精确的 η 值,以期从地形角度为滑坡减灾提供一定的理论和实践参考。

5 结 论

通过地形对滑坡运动的作用机理分析,推导了地形引起滑坡运动的额外耗能式,定义了地形影响率 η 、 η_a 、 η_p ,对近20年来国内发生的100个典型滑坡进行了地形影响规律分析,结果表明:

(1)地形整体趋向于阻止滑坡运动,不同地形阻滑能力具有较大差异,约16%的滑坡全程的地形影响率 η_a 在20%及以上。

(2)局部地形上凸及下凹为滑坡短时加速及减速创造了良好条件,对滑坡运动具有显著影响。提示可通过微小地改变滑坡地形实现滑坡大幅的运动能力削弱。

(3)近程滑坡受地形影响大,远程滑坡受地形影响小,亦即滑坡运动能力越弱,受地形影响的程

度越大,滑坡运动能力越强,受地形影响程度越小。

(4)地形缓急大致反映了滑坡地形影响率的大小,总能量相当时,越缓的地形越可能孕育运动能力越强的滑坡。提示对潜在滑动地形平缓的不稳定坡体给予足够重视。

参考文献:

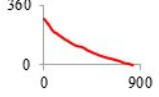
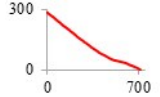

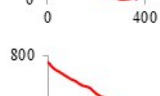
- [1] Gorum T, Van Westen C J, Korup O, et al. Complex rupture mechanism and topography control symmetry of mass-wasting pattern, 2010 Haiti earthquake [J]. *Geomorphology*, 2013, 184(15):127-138.
- [2] 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017年8月8日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(4):1 151-1 164. Dai L X, Xu Q, Fan X M, et al. A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jiuzhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4):1 151-1 164. (in Chinese)
- [3] 易树健, 李渝生, 黄超, 等. 金沙江杀威台子滑坡成因动力学特性研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(2):297-304. Yi Sh J, Li Y Sh, Huang Ch, et al. The genetic dynamic characteristics of the Jinsha river Shaweitaizi landslide [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(2):297-304. (in Chinese)
- [4] 艾挥, 吴红刚, 冯文强, 等. 多滑动面滑坡变形破坏机理的振动台试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(1):65-71. Ai H, Wu H G, Feng W Q, et al. Shaking table study on deformation and failure mechanism of landslide with multiple slip surface [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(1):65-71. (in Chinese)
- [5] 王玉峰, 许强, 程谦恭, 等. 复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9):1 776-1 791. Wang Y F, Xu Q, Cheng Q G, et al. Experimental study on the propagation and deposit features of rock avalanche along 3D complex topography [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9):1 776-1 791. (in chinese)
- [6] 樊晓一, 田述军, 段晓冬, 等. 地形因子对坡脚型地震滑坡运动参数的影响研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(增2):4 056-4 066.

- Fan X Y, Tian Sh J, Duan X D, et al. Study of topography factors influence on motion parameters for seismic slope-toe landslides [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (Sup 2) : 4 056-4 066. (in Chinese)
- [7] 樊晓一, 冷晓玉, 段晓冬. 坡脚型与偏转型地震滑坡运动距离及地形因素作用[J]. *岩土力学*, 2015, 36 (5):1 380-1 388.
- Fan X Y, Leng X Y, Duan X D. Influence of topographical factors on movement distances of toe-type and turning-type landslides triggered by earthquake [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (5) :1 380-1 388. (in Chinese)
- [8] Devoli G, De Blasio F V, Elverhoi A, et al. Statistical analysis of landslide events in central America and their run-out distance[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(1):23-42.
- [9] 郝明辉, 许强, 杨磊, 等. 滑坡-碎屑流物理模型试验及运动机制探讨[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增1): 127-132.
- Hao M H, Xu Q, Yang L, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup 1) :127-132. (in Chinese)
- [10] Fan X Y, Tian S J, Zhang Y Y. Mass-front velocity of dry granular flows influenced by the angle of the slope to the runout plane and particle size gradation[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(2):234-245.
- [11] 杜娟, 殷坤龙, 王佳佳. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(3):480-488.
- Du J, Yin K L, Wang J J. Simulation of three-dimensional movement of landslide-debris flow based on finite volume method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(3):480-488. (in Chinese)
- [12] Fleitout L, Froidevaux C. Tectonics and topography for a lithosphere containing density heterogeneities [J]. *Tectonics*, 1982, 1(1):21-56.
- [13] Koons P O. Three-dimensional critical wedges: Tectonics and topography in oblique collisional orogens [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (B6) : 12 301.
- [14] Lucas A, Mangeney A, Ampuero J P. Frictional velocity-weakening in landslides on earth and on other planetary bodies[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(9) : 3 417.
- [15] Manzella I, Labiouse V. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation [J]. *Landslides*, 2013, 10 (1) : 23-36.
- [16] Wang Y F, Cheng Q G, Shi A W, et al. Sedimentary deformation structures in the Nyixoi Chongco rock avalanche: implications on rock avalanche transport mechanisms[J]. *Landslides*, 2019, 16(3):523-532.
- [17] Gao Y, Yin Y, Li B, et al. Characteristics and numerical runout modeling of the heavy rainfall-induced catastrophic landslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, China, following the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Landslides*, 2017, 14(4):1 361-1 374.
- [18] Xing A G, Wang G, Yin Y P, et al. Dynamic analysis and field investigation of a fluidized landslide in Guanling, Guizhou, China [J]. *Engineering Geology*, 2014, 181:1-14.
- [19] Kang C, Chan D, Su F, et al. Runout and entrainment analysis of an extremely large rock avalanche—a case study of Yigong, Tibet, China [J]. *Landslides*, 2017, 14(1):123-139.
- [20] 邬爱清, 丁秀丽, 李会中, 等. 非连续变形分析方法模拟千将坪滑坡启动与滑坡全过程 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(7):1 297-1 303.
- Wu A Q, Ding X L, Li H Zh, et al. Numerical simulation of startup and whole failure process of Qianjiangping landslide using discontinuous deformation analysis method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(7):1 297-1 303. (in Chinese)
- [21] Dai Z L, Wang F W, Cheng Q G, et al. A giant historical landslide on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(3) : 2 055-2 068.
- [22] 兰恒星, 仇义星, 伍宇明. 岩体结构效应与长远程滑坡动力学 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(1):108-122.
- Lan H X, Zhang Y X, Wu Y M. Effects of rock mass structure on the dynamics of Long-runout landslide [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27 (1) : 108-122. (in Chinese)
- [23] Yin Y P, Xing A G, Wang G H, et al. Experimental and numerical investigations of a catastrophic long-runout landslide in Zhenxiong, Yunnan, southwestern China [J]. *Landslides*, 2017, 14(2) : 649-659.

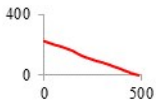
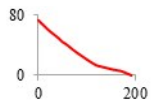
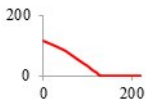
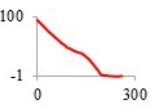

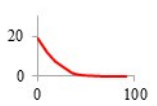
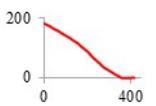
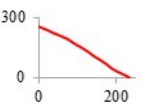
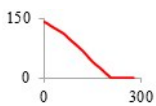
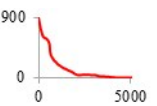
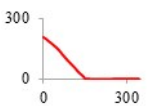
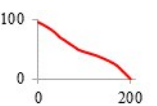
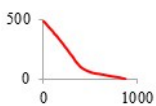
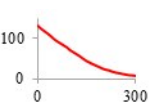
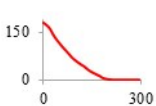
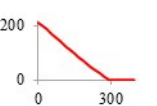
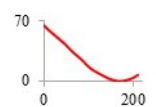
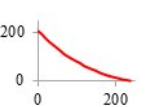
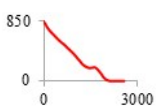
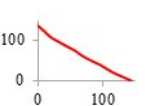
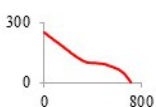
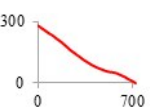
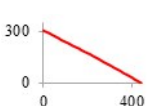
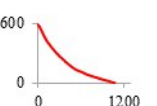
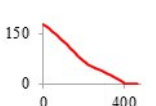
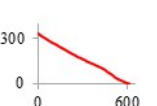
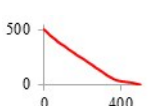
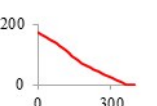
(本文责编:池营营)

附录

滑坡信息数据
Landslide information data

滑坡名称	滑坡位/°	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%	滑坡名称	滑坡位/°	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%
陈山村滑坡	N31.802 E104.390	31.8		5.47	都江堰 三溪村滑坡	N30.915 E103.563	190.0		3.08
玉皇庙1号滑坡	N31.754 E104.169	6.7		1.36	易贡滑坡	N30.201 E94.968	9 000.0		3.86
杨家山滑坡	N31.530 E104.083	8.8		15.61	云南正雄滑坡	N27.551 E104.988	2 000.0		4.96
白云顶滑坡	N30.992 E103.470	6		33.12	千将坪滑坡	N30.976 E110.615	2 400.0		2.87
枫香树滑坡	N31.059 E103.494	17.4		7.04	乱石包滑坡	N30.201 E99.936	8 500.0		2.19
立起沟滑坡	N105.207 E32.169	35.5		12.96	东河口滑坡	N32.405 E105.115	1 500.0		2.22
大水沟滑坡	N103.675 E31.199	24.2		4.65	唐家山滑坡	N104.431 E31.842	2 000.0		5.68
大湾滑坡	N104.536 E31.907	20.4		10.00	牛眠沟滑坡	N31.045 E103.458	950.0		9.88
曾家山滑坡	N104.182 E31.486	19.8		13.79	福泉小坝滑坡	N26.958 E107.361	141.0		8.90
石湊子滑坡	N104.918 E32.243	17		3.49	文家沟滑坡	N32.223 E104.865	28 500.0		4.64
长滩滑坡	N104.133 E31.508	15.1		10.59	陈家坝滑坡	N104.579 E31.916	120.0		9.20
白果村滑坡	N105.088 E32.385	14.7		1.72	大光包滑坡	N31.645 E104.121	75 000		2.51
岩碛窝滑坡	N105.099 E32.391	8.2		14.53	新磨村滑坡	N32.080 E103.663	1 300.0		6.20

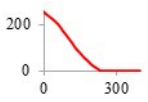
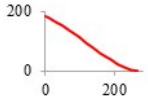

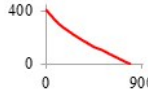

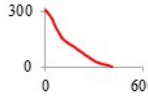
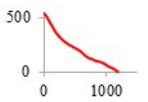

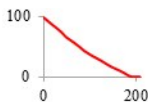
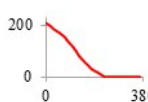
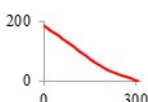
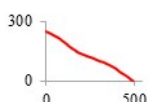
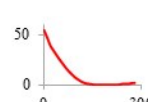
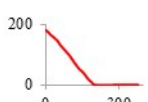
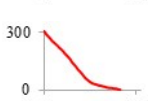
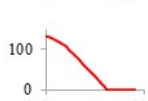


续表

滑坡名称	滑坡位/ (°)	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%	滑坡名称	滑坡位/ (°)	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%
大坪上滑坡	N104.542 E31.889	5.2		4.90	关岭滑坡	N25.987 E105.285	180.0		4.30
龚家坪滑坡	N31.733 E104.146	12.0		18.69	郑家山滑坡	N32.265 E104.925	210.0		8.65
白果坪滑坡	N30.900 E103.371	8.0		18.94	大堡子滑坡	N108.883 E34.484	21.0		6.96
柏兴滑坡	N31.804 E104.350	13.0		4.68	百花香滑坡	N31.001 E103.478	17.0		29.94
板厂滑坡	N31.758 E104.249	5.0		11.23	尼续村滑坡	N29.021 E89.681	2 800.0		4.97
大水井滑坡	N31.075 E103.612	10.0		35.10	羊儿坪滑坡	N31.568 E104.209	8.0		3.36
大竹坪滑坡	N31.617 E104.148	400.0		16.00	杨家桥滑坡	N31.131 E103.575	107.0		4.01
东地平滑坡	N32.274 E104.933	2.0		16.08	杨家岩滑坡	N31.752 E104.326	4.0		12.13
董家滑坡	N32.343 E105.031	44.0		1.74	窑子滑坡	N31.210 E103.548	122.0		19.63
独木桥滑坡	N31.811 E104.338	767.0		9.96	油碾村滑坡	N30.990 E103.467	27.0		19.15
风岩滑坡	N31.754 E104.421	19.2		3.40	玉皇庙2号 滑坡	N31.753 E104.169	11.0		1.55
甘海子滑坡	N32.730 E104.483	139.0		20.00	张家山滑坡	N31.572 E104.192	474.0		15.00
高地坪滑坡	N32.330 E104.990	53.0		3.82	长河坝滑坡	N31.196 E103.542	106.0		10.83
公棚1号滑坡	N31.167 E103.478	133.0		30.00	猪石滑坡	N32.550 E104.543	11.0		2.83

续表

滑坡名称	滑坡位/ (°)	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%	滑坡名称	滑坡位/ (°)	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%
公棚2号滑坡	N31.150 E103.466	43.0		35.95	沙坝滑坡	N31.847 E104.487	20.0		18.83
公棚3号滑坡	N31.149 E103.466	53.0		40.48	石板沟滑坡	N32.420 E105.091	917.0		9.17
鼓儿山 1号滑坡	N31.919 E104.577	216.0		9.28	孙家1号滑坡	N30.880 E103.321	7.0		2.98
鼓儿山 2号滑坡	N31.918 E104.575	56.0		5.34	孙家2号滑坡	N30.881 E103.321	8.0		6.67
鼓儿山 3号滑坡	N31.921 E104.577	122.0		16.38	塔子坪滑坡	N31.108 E103.629	75.0		12.32
黑草坪 1号滑坡	N31.103 E103.378	7.0		19.84	头道桥滑坡	N31.083 E103.452	38.0		21.80
黑草坪 2号滑坡	N31.098 E103.377	6.0		23.28	洼山滑坡	N32.332 E104.999	5.0		2.03
鸡棚滑坡	N30.831 E103.237	2.0		16.16	王家坪滑坡	N31.537 E104.073	5.0		2.97
老虎嘴滑坡	N31.090 E103.486	42.0		14.73	王家岩滑坡	N31.826 E104.449	139.0		10.28
老木沟滑坡	N31.848 E104.375	16.0		3.99	五仙庙滑坡	N31.795 E104.373	7.0		9.14
岭岗滑坡	N31.807 E104.289	2.0		3.35	夏家坪滑坡	N31.122 E103.655	101.0		6.00
骆家山滑坡	N31.243 E103.856	8.0		20.59	夏家湾滑坡	N31.812 E104.400	10.0		18.70
马家河 1号滑坡	N31.102 E103.475	3.0		12.93	香樟树 1号滑坡	N31.804 E104.398	2.0		2.99
马家河 2号滑坡	N31.103 E103.475	2.0		15.63	香樟树 2号滑坡	N31.802 E104.390	32.0		6.88

续表

滑坡名称	滑坡位/ (°)	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%	滑坡名称	滑坡位/ (°)	体积/ (10 ⁴ m ³)	滑坡地形/ m	η /%
庙岭滑坡	N32.290 E105.025	5.0		27.80	肖家湾滑坡	N31.673 E104.343	112.0		17.27
魔芋1号滑坡	N31.886 E104.483	5.0		24.83	新店子滑坡	N31.755 E104.262	14.0		5.89
魔芋2号滑坡	N31.888 E104.483	8.0		31.46	杏子坪滑坡	N31.845 E104.376	53.0		21.41
莫家坪滑坡	N31.758 E104.301	60.0		8.14	玄享庙滑坡	N32.535 E104.376	2.0		10.28
木瓜园滑坡	N32.299 E105.064	7.0		3.07	岩上1号滑坡	N31.833 E104.381	12.0		24.91
偏桥滑坡	N31.822 E104.370	9.0		8.56	岩上2号滑坡	N31.834 E104.385	43.0		8.69
平溪村滑坡	N32.276 E104.403	48.0		12.25	燕岩村滑坡	N31.089 E103.621	4.0		20.55
七郎庙滑坡	N31.738 E104.241	18.0		10.66	秧坪1号滑坡	N31.530 E104.083	9.0		14.09
邱家山滑坡	N32.378 E105.046	12.0		2.74	秧坪2号滑坡	N31.526 E104.080	5.0		10.95