

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1827

岩质滑坡-碎屑流的运动距离计算公式研究

郑 光, 许 强, 彭双麒

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 滑坡-碎屑流的远程运动距离是碎屑流体所能达到的最大堆积距离, 是灾害预警和评估的重要指标。通过总结已有碎屑流运动距离研究成果, 从岩体势能入手开展研究, 并结合量纲分析, 首先建立了运动距离与势能之间的基本方程。其后, 采用 4 种颗粒材料开展岩质碎屑流滑槽试验, 研究碎屑体体积 V 、滑移区坡度 α 、碎屑粒径 d 以及最大垂直运动距离 H 等对碎屑流运动距离 L 的影响, 通过逐步拟合回归, 建立了基于势能的岩质滑坡-碎屑流最大水平运动距离的计算公式。最后, 采用汶川地震触发的 38 个岩质碎屑流以及 17 个其他典型岩质滑坡碎屑流数据对计算公式进行了验证, 结果表明, 考虑该运动距离计算公式具有较好的可靠性, 能够为山区滑坡-碎屑流灾害预警工作提供理论指导。

关 键 词: 滑坡-碎屑流; 远程运动距离; 计算模型; 滑槽试验; 颗粒流; 逐步回归

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 12-4897-10

Calculation model of the long-runout distance of rock avalanche

ZHENG Guang, XU Qiang, PENG Shuang-qi

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The long-runout distance of rock avalanches is the largest accumulation range that sediment can reach, which has great significance in disaster warning and risk assessment. This paper describes a calculation model to predict the long-runout distance, which is of interest in connection with the motion of landslide and mass movement. By summarizing the research results of long-runout distance of rock avalanches and basing on dimensional analysis, it is considered that the potential energy of rock mass plays an important role on long-runout, and that the long-runout distance (L) is the function of potential energy. Then, experiments were performed with 4 different quartz granular materials, and masses of these granular materials with various initial volumes were released from rest in a chute. The front position of avalanches was recorded. The effect of mass volume(V), the slope angle of transport zone(α), fragments particle size(d) and maximum vertical travel distance(H) on the long-runout distance(L) were studied. The calculation model for long-runout distance on potential energy was established by stepwise regression method. The data of 38 landslide-avalanches triggered by the Wenchuan earthquake and other 17 typical landslide rock avalanches that are widely used internationally were taken to verify the calculation model. The results show that the transport distance calculation model established by potential energy of rock mass is reliable and that the transport distance calculation model is suitable for rock avalanche disaster warning and risk assessment in mountainous areas.

Keywords: rock avalanche; long runout distance; calculation model; chute experiment; granular flow; stepwise regression

1 引 言

在我国西部山区, 常有一些大方量高位岩体失稳后形成高速、远程的“崩→滑→流”复合灾害体, 带来毁灭性破坏, 这种灾害体被称为远程滑坡-碎屑流。近年来发生的典型碎屑流有云南昭通头寨沟

滑坡^[1]、重庆武隆鸡尾山滑坡^[2]、贵州关岭大寨滑坡^[3]、四川茂县新磨村滑坡^[4]和贵州纳雍普洒村崩塌碎屑流^[5]等。2008 年 5 月汶川地震也触发了一系列高速远程滑坡^[6], 造成了重大人员伤亡和经济损失。

远程运动距离是滑坡-碎屑流重要的形态参

收稿日期: 2018-09-30

基金项目: 国家创新研究群体科学基金 (No.41521002); 国家自然科学基金重点项目 (No.41630640); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题 (No.SKLP2015Z023)。

This work was supported by the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(41521002), the Key Program of National Natural Science Foundation of China(41630640) and the Original Research Subject of SKLP (Chengdu University of Technology) (SKLP2015Z023).

第一作者简介: 郑光, 男, 1981 年生, 博士, 实验师, 主要从事地质灾害防治和模型试验方面的工作。E-mail: flywing140@163.com

通讯作者: 许强, 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害预警及防治处理方面的研究工作。E-mail: xq@cdu.edu.cn

量,也是其灾害预警和危险性评估最重要的参量之一。1932 年海姆(Heim)在研究 Elm 滑坡(1881)时提出了碎屑流等效摩擦系数(Fahrböschung,即 $f_e = H/L$)的概念,最早在研究中引入了碎屑流的远程运动距离^[7]。其后,Scheidegger^[8]提出等效摩擦系数与滑坡体积之间存在函数关系: $\lg f_e = a \lg V + b$ 。HSU^[7]绘制了反映碎屑流运动性的强度包络线图,并提出用超运动距离(excessive travel distance)评价碎屑流的运动特性。近年来,研究人员^[9-12]发现碎屑流最大运动距离(L)或等效摩擦系数($f_e = H/L$)与体积(V)之间存在幂函数统计关系,即

$$\left. \begin{aligned} L &= CV^b \\ H/L &= CV^d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Rickenmann^[13]和 Lorente 等^[14]在研究泥石流时,通过数据统计拟合得到方程(2)(V 为泥石流体积, H 为泥石流前后缘高差),他们得到的系数 b 分别为 0.25 和 0.271。

$$L = A(VH)^b \quad (2)$$

这些研究成果大都是已发生碎屑流数据的统计模型。统计模型无法考虑反映碎屑流个体属性的物理量,如破碎程度、势能损失、沟道宽度和坡度等,这使得在进行单体运动距离计算时误差较大。为此,本文基于能量守恒原理,结合量纲分析,先得到碎屑流运动距离与势能之间的基本方程,再开展岩质碎屑流滑槽试验,考虑岩质碎屑流块径 d 、滑移区宽度 B 和倾角 α 等的影响,建立能对单体岩质滑坡—碎屑流运动距离进行预测的计算模型。

2 碎屑流运动距离的量纲分析

对滑坡—碎屑流来说,当不考虑岩体碎裂和体积扩张耗能时,满足能量守恒:

$$mgH = \frac{1}{2}mv^2 + fL \quad (3)$$

其中:

$$m = \rho V \quad (4)$$

式中: m 为滑体质量; H 为滑体下落高度; v 为滑体运动速度; f 为滑体与滑床之间的摩擦力; L 为滑体运动距离; ρ 为滑体密度; V 为滑体体积。

亦即,碎屑流停积后,当 $v = 0$ 时:

$$\rho g V H = f L \quad (5)$$

因此,决定碎屑流最大远程运动距离的是其势

能,即 $L \propto VH$ 。

式(3)~(5)是基于刚体滑动提出的。当碎屑物质作类液态流动时,其本构方程^[15]为

$$\sigma_{ij} = a_{ij}(C, \mu, e) \rho_p D^2 \dot{\gamma} \quad (6)$$

式中: σ_{ij} 为碎屑体的应力; a_{ij} 为与颗粒物质的颗粒体积分数 C 、摩擦系数 μ 和恢复系数 e 等相关的物理量; ρ_p 为颗粒密度; D 为颗粒直径; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。因此,碎屑流的体摩擦力为

$$f = f(C, \mu, e, \rho_p, D, \dot{\gamma}, l, t, g) \quad (7)$$

公式的复杂性使体摩擦力难以被细致考虑。

由于自然界中不同碎屑体的颗粒密度和体积分数是接近的,可以将碎屑体的密度近似地看作常量。这样,不显式体现密度和摩擦力,式(5)可变换为

$$L = a(VH)^b g^c \quad (8)$$

式中:由白金汉定理,系数 a 是由摩擦力、密度、颗粒直径、剪切速率等物理量所构成无量纲 Π 项的组合; $\Pi_i = (VH)^b g^c L^{-1}$ 也是一个无量纲 Π 项;指数 b 和 c 为待定实数。根据量纲齐次性原理,由式(8)可得

方程左边: $\dim(L) = L^1$;

方程右边: $\dim(a(VH)^b) = (L^3 L^1)^b = L^{4b}$, $\dim(g) = (LT^{-2})^c$ 。

由量纲齐次性原理,可知: $1 = 4b$, $c = 0$; 即 $b = 0.25$ 。

因此,式(8)可以变换为

$$L = a(VH)^{0.25} \quad (9)$$

这表明碎屑流的远程运动距离与碎屑体的势能直接相关。

文献[9]列举了 32 个陆地非火山碎屑流、50 个陆地火山碎屑流和 26 个火星滑坡碎屑流数据,文献[16]列举了 19 个泥石流数据。用这些数据(本文不再列举)对式(9)进行分析验证。

图 1 是用回归拟合方法获得的 $L-VH$ 关系曲线图。可以看到,火星碎屑流数据的回归拟合相关性系数达到 0.952 52,而陆地碎屑流的为 0.757 26 和 0.724 06,泥石流数据的仅为 0.672 62。当横坐标相同时,泥石流运动距离最大,火山碎屑流次之,火星碎屑流最小,陆地非火山碎屑流居中。据原文描述,火星碎屑流皆位于火星水手谷,堆积体停积区在谷底的平原上,受到的干扰远比地球滑坡少,对势能的影响更加敏感,故其拟合相关性最好。总体而言,采用式(9)进行回归拟合的相关性是比较好

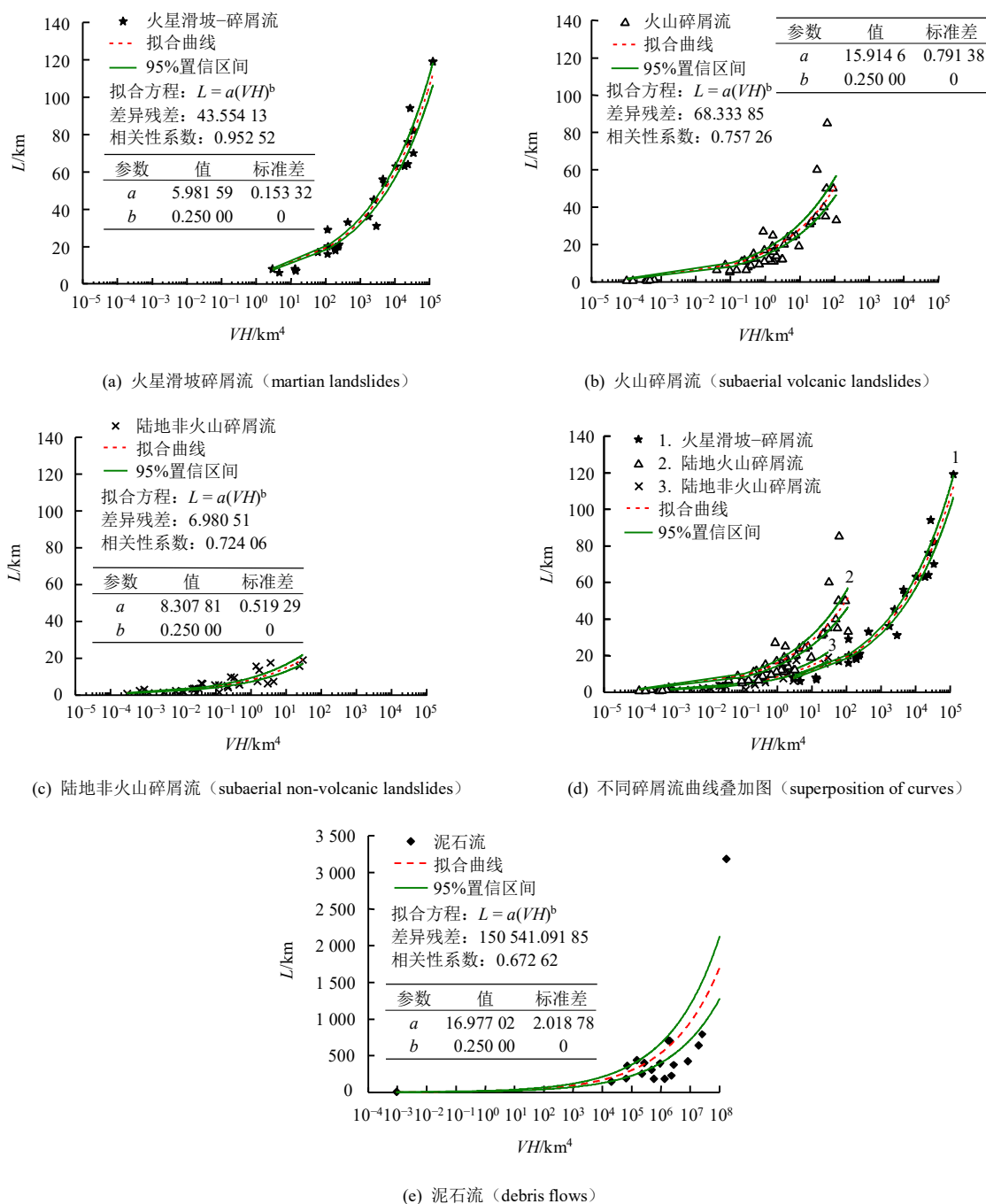


图 1 滑坡碎屑流和泥石流数据拟合曲线

Fig.1 Fitting curves of data of landslides and debris flow

的, 回归模型显著。

因此, 采用式 (9) 作为建立单体滑坡-碎屑流远程运动距离公式的基础。由于不同碎屑流的特性不同, 可视具体情况采用不同的系数 a 来建立有针对性的运动距离计算公式。

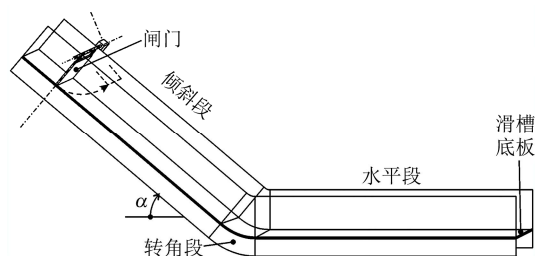
3 岩质碎屑流滑槽试验与运动距离计算公式

开展岩质碎屑流滑槽试验, 研究粒径 d 、滑移段倾角 α 等物理量与系数 a 之间的函数关系, 以建

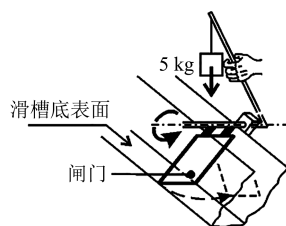
立岩质滑坡-碎屑流远程运动距离的计算公式。

3.1 滑槽试验装置

开展试验的有机玻璃滑槽如图 2 所示。当斜槽上部的闸门 (挡板) 关闭时, 其与斜槽底板垂直。闸门在杠杆的作用下绕水平轴旋转开启 (见图 2(b))。金属杠杆上悬挂 5 kg 重物, 释放后, 可保证闸门在统一时间内开启。闸门上部空间的尺寸为 20 cm×20 cm×20 cm。通过相机拍摄记录整个试验过程。闸门转轴位置固定, 随斜槽倾角的改变, 闸门的高度和水平长会发生变化。图 3 为滑槽实物。



(a) 滑槽整体结构



(b) 闸门细部结构

图2 滑槽试验装置结构图

Fig.2 Perspective view of the chute test device with 30° inclination angle

3.2 试验材料及其物理性质

据统计, 头寨沟滑坡^[2]的堆积厚度约为 10~15 m, 最大块径约 7 m; 鸡尾山滑坡^[3]堆积体最大厚度约 30 m, 最大块径约 30 m; 关岭大寨滑坡^[4]的堆积厚度约 5~20 m, 最大块径约 4 m。考虑到堆积区岩土体厚度远大于滑移段厚度, 取碎屑流滑

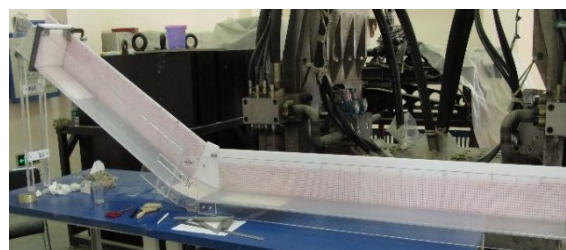


图3 滑槽试验装置实物图

Fig.3 Picture of the chute test device

移过程中平均厚度为 10 m, 设堆积体中停积的块石平均粒径约为 1 m, 为了能够在滑槽中进行模拟, 取如下相似关系:

$$N = \frac{h}{10 \text{ m}} = \frac{d}{1 \text{ m}} \quad (10)$$

经测试, 不同体积 (4 L、5 L、6 L)、粒径为 1.0 mm 的石英砂释放后, 滑移段厚度约 10 mm, 取 $h = 10 \text{ mm}$, 代入式 (10) 得到试验颗粒粒径 $d = 1.0 \text{ mm}$ 。此时, 试验的几何缩尺比为 $N = 1/1\,000$ 。取相同缩尺比, 采用粒径 1.0、2.5、5.0、7.5 mm 的石英砂材料 (见图 4) 开展试验能够概括主要的碎屑流块径尺寸。碎屑体积采用 1、2、3、4、5、6 L 共 6 个等级。表 2 为 4 种石英砂材料的物理参数, 本次试验未考虑颗粒材料与滑槽的侧摩擦。



(a) 1.0 mm



(b) 2.5 mm



(c) 5.0 mm



(d) 7.5 mm

图4 石英砂试验材料展示图

Fig.4 Samples of the quartz granular materials

表2 石英砂颗粒材料性质参数表

Table 2 Material constants of quartz granular materials

d /mm	ρ_0 /(g/cm ³)	ρ_b /(g/cm ³)	石英砂材料内 摩擦角/(°)		与有机玻璃滑面的 摩擦系数	
			均值	标准差	摩擦系数	标准差
1.0	2.719	1.303	44.0	1.4	0.305	0.020
2.5	2.640	1.399	44.7	1.1	0.331	0.027
5.0	2.630	1.416	45.4	1.6	0.391	0.051
7.5	2.625	1.379	47.9	1.7	0.417	0.086

注: d 为颗粒的粒径; ρ_0 为颗粒材料的密度; ρ_b 为颗粒材料的堆积密度。

水可在碎屑流中起润滑的作用, 在泥石流中则

起驱动力的作用。经过测定, 湿碎屑流和泥石流 (水石流) 的含水率阈值区间为 12%~18%^[17]。此外, 天然条件下含黏粒地表土的含水率值在 5%~20% 之间^[18], 加之降雨多是滑体失稳的重要因素, 为了尽可能真实地再现滑坡-碎屑流岩土体的含水率条件, 选取含水率 $w=10\%$ 来开展相关试验。

3.3 碎屑材料的启动过程

滑槽闸门在杠杆的作用下开启, 所悬挂 5 kg 重物可保证闸门在相同作用力条件下及统一时间内打开。如图 5 所示, 闸门在 1/18 s 时间内开启, 闸门

瞬间脱离石英砂颗粒。可见, 闸门只是起到初始阻隔所用, 其开启对石英砂体坍塌的过程影响甚微。

3.4 试验曲线特征分析

湿石英砂颗粒之间由于受到粒间液桥的作用^[15], 相互之间会粘连在一起。这使得随着碎屑流体滑向斜槽下部, 部分碎屑会粘连在滑槽底部, 造成碎屑体前锋体积不断损失。每次试验结束后, 只有部分湿碎屑体能滑到斜槽底部; 当斜槽倾角小于

20°时, 大部分碎屑会停留在斜槽上部; 当斜槽倾角大于 20°时, 仅有少部分碎屑粘连在斜槽上, 大部分会堆积在斜槽下部。

图 6 为试验数据曲线, 纵坐标为碎屑流前锋的运动距离 L , 横坐标为体积与垂直位移的乘积 VH 。可以看到, 相同粒径时, 斜槽倾角越大, VH 值越大, 碎屑体前缘的运动距离越大; 相同斜槽倾角时, 粒径越大, 运动距离越大; 斜槽倾角和粒径均相同

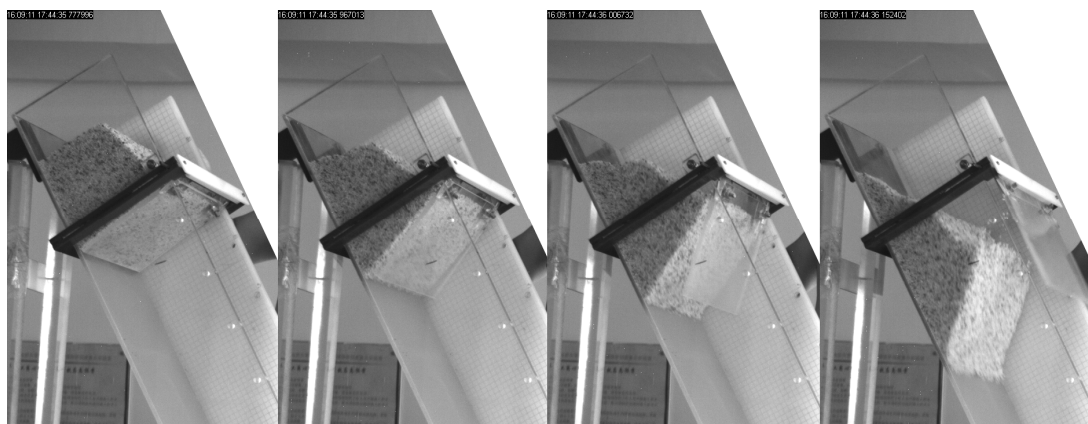


图 5 滑槽挡板开启过程 (图示照片时间间隔为 1/18 s)

Fig.5 Photo series of the opening process of the shutter (time intervals between consecutive pictures are 1/18 second)

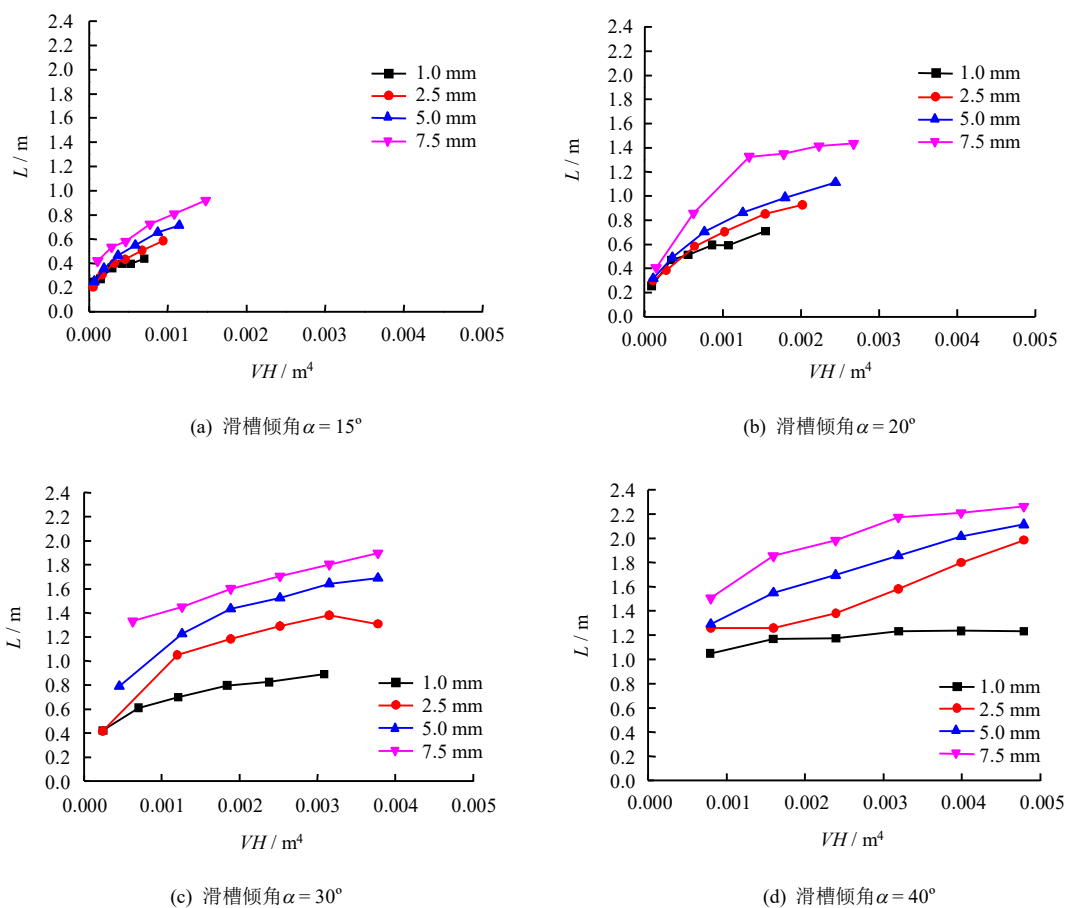


图 6 $w = 10\%$ 时不同 α 角的 $L-VH$ 关系曲线

Fig.6 Relation curves of $L-VH$ at different α when water content is 10%

时, 体积越大, 运动距离越大。

3.5 计算方程的函数形式

采用 $L = a(VH)^{0.25}$ 函数形式对试验曲线进行回归拟合, 所得幂函数系数 a 、相关性系数和差异残差等列于表 3。可以看到: ①仅一组数据的拟合相关性系数小于 0.8, 相关性系数大于 0.9 的占比 62.5%, 整体拟合度较高; ②滑槽倾角相同时, 随着粒径 d 的增大, 函数系数 a 值增大; ③粒径 d 相同时, 随着滑槽倾角的增大, 函数系数 a 值增大。幂函数系数 a 与粒径 d 和滑移段倾角 α 成正比, 即 $a \propto d$; $a \propto \alpha$ 。

表 3 $w = 10\%$ 时 L - VH 计算模型系数表

Table 3 Coefficients of L - VH trends of data from granular chute experiments when water content is 10%

斜槽倾角 α /(°)	颗粒粒径 /mm	系数 a	幂指数	相关性系数	差异残差
15	1.0	2.677 63	0.25	0.966 89	0.000 191
	2.5	3.035 59	0.25	0.914 87	0.001 600
	5.0	3.555 91	0.25	0.902 90	0.003 040
	7.5	4.357 97	0.25	0.942 79	0.001 990
20	1.0	3.373 62	0.25	0.932 49	0.001 600
	2.5	3.934 36	0.25	0.869 57	0.008 170
	5.0	4.495 28	0.25	0.875 20	0.011 420
	7.5	6.253 97	0.25	0.858 24	0.024 170
30	1.0	3.743 65	0.25	0.982 14	0.000 522
	2.5	5.485 71	0.25	0.863 28	0.017 370
	5.0	6.692 58	0.25	0.923 44	0.008 600
	7.5	7.712 69	0.25	0.943 40	0.002 620
40	1.0	5.215 76	0.25	-1.750 03	0.014 290
	2.5	6.920 58	0.25	0.818 46	0.016 410
	5.0	7.853 23	0.25	0.985 12	0.001 380
	7.5	8.919 47	0.25	0.961 28	0.003 180

用 d 除以滑槽宽度 B ($B = 0.2$ m), 并对斜槽倾角 α 取正切值, 分别得到无量纲量 d/B 和 $\tan\alpha$; 再对 3 个无量纲量 (d/B , $\tan\alpha$ 和 a) 分别取常用对数, 得到 $\lg(d/B)$, $\lg(\tan\alpha)$ 和 $\lg a$, 在 X - Y - Z 坐标系中绘制 $\lg(d/B)$ - $\lg(\tan\alpha)$ - $\lg a$ 图像。如图 7 所示, 图像近似于三维平面, 可用多元线性回归得到函数系数的最优回归模型:

$$\lg a = 0.321 \lg(d/B) + 0.663 \lg(\tan\alpha) + 1.5 \quad (11)$$

式 (11) 的拟合相关性系数为 0.957 67, 差异残差为 0.001 07, 回归拟合度较好。对式 (11) 进行变换, 得到幂函数系数 a 的显式表达式为

$$a = 31.623(d/B)^{0.321}(\tan\alpha)^{0.663} \quad (12)$$

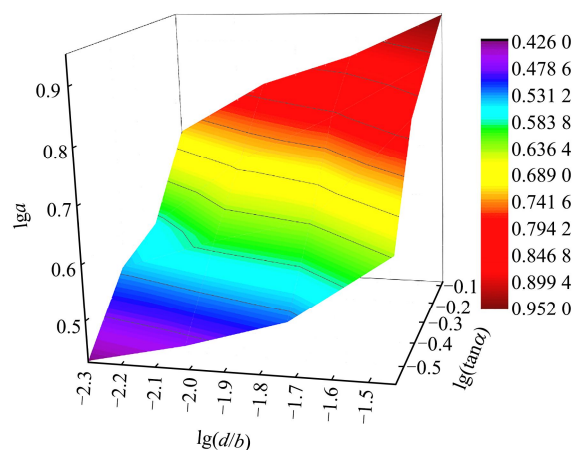


图 7 $\lg(d/B)$ - $\lg(\tan\alpha)$ - $\lg a$ 的关系图像

Fig.7 Illustration of the relationship of $\lg(d/B)$ - $\lg(\tan\alpha)$ - $\lg a$

将式 (12) 代入式 (8)、(9) 可以得到岩质碎屑流水平运动距离的计算公式:

$$L = 31.623(d/B)^{0.321}(\tan\alpha)^{0.663}(VH)^{0.25} \quad (13)$$

4 计算公式的验证

选用岩质滑坡 (崩塌) - 碎屑流实例数据对式 (12)、(13) 的可靠性进行验证。

4.1 汶川地震滑坡数据验证

表 4 所列汶川地震触发滑坡, 数据经较多研究人员引用, 可信度高。表中滑移段宽度 B 和停积区最大块径 d 为利用 Google Earth 卫星图像测量所得, 其中, B 取滑移段中部碎屑流所能达到的最大宽度值。

将表 4 中的基础数据代入式 (12)、(13) 计算, 所得的计算运动距离值 L 与实际值 $L_{\max}$ 误差小于 15% 的占 84.2%, 误差小于 10% 的占 68.4%, 误差小于 5% 的占 39.5%, 吻合度较好。

图 8 是计算值 L 与实际值 $L_{\max}$ 对比图。可以看到, 当在 2 000 m 范围内时, 计算值接近实际值, 预测精度较高; 当超过 2 000 m 后, 计算值小于实际值。误差较大的 4 个碎屑流分别为文家沟滑坡、红石沟滑坡、东河口滑坡和牛眠沟滑坡, 它们的实际运动距离都超过了 2 500 m。这 4 个碎屑流都是干岩质碎屑流, 而本次滑槽试验所采用的是含水率为 10% 的湿石英砂, 湿颗粒之间由于受到粒间液桥的作用而相互粘连在一起, 使试验运动距离小于干燥颗粒的运动距离, 从而导致计算值小于 4 个干碎屑流的实际运动距离。当确定了含水率对运动距离的影响后, 可以通过在式 (12)、(13) 中乘以一个系数来消除此误差。

4.2 其他典型滑坡数据验证

表 5 中所列为 17 个国内外典型滑坡碎屑流数据，体积范围在 $0.4\times 10^6\sim 300.0\times 10^6\text{ m}^3$ 之间，远程

运动距离在 788~10 000 m 之间，变化范围大，来验证式 (12)、(13) 可靠度较高。经过计算，有 15 个滑坡的计算值误差小于 10%，占比 88.2%，吻合

表 4 汶川地震触发滑坡-碎屑流数据计算表^[7]
Table 4 Work sheet for calculating distance using data of landslides triggered by Wenchuan earthquake^[7]

序号	滑坡名称	滑坡体积 V/m^3	滑移段坡度 $\alpha(^{\circ})$	最大垂直运动 距离 H_{max}/m	最大水平运动 距离 L_{max}/m	滑移段宽度 B/m	停积区最大 块径 d/m	计算系数 a	计算运动 距离 L/m	误差
1	文家沟	50 000 000	18	1 320	4 000	300	12.0	5.375 655	2 724.69	0.319
2	水磨沟	19 959 932	10	860	2 000	180	16.8	4.709 580	1 704.69	0.148
3	大屋基	16 326 032	13	880	1 900	100	8.4	5.439 884	1 883.35	0.009
4	东河口	15 000 000	11	640	2 400	150	14.8	5.112 638	1 600.34	0.333
5	红石沟	13 410 911	17	1 040	2 700	130	12.0	6.748 385	2 319.12	0.141
6	窝前	12 000 000	10	560	1 600	173	18.0	4.876 215	1 396.13	0.127
7	肖家山	7 814 385	24	930	1 350	150	2.0	4.656 346	1 359.53	0.007
8	牛眠沟	7 500 000	13	800	2 640	100	8.0	5.355 612	1 490.55	0.435
9	立起沟	5 360 623	12	650	1 500	85	13.0	6.239 948	1 516.05	0.011
10	草槽坪	5 338 279	17	580	1 340	184	13.0	6.195 037	1 461.34	0.091
11	火石沟	4 682 742	17	700	1 320	140	8.0	5.788 307	1 385.00	0.049
12	石板沟村	4 500 000	12	650	1 800	128	19.5	6.232 138	1 449.33	0.195
13	谢家店子	4 000 000	15	720	1 600	100	10.0	6.346 213	1 470.15	0.081
14	大水沟	3 145 769	17	560	1 400	80	7.0	6.633 860	1 359.08	0.029
15	长坪	2 839 115	16	500	1 200	160	18.0	6.891 543	1 337.69	0.115
16	小木岭	2 735 439	26	710	1 025	110	2.0	5.461 148	1 146.45	0.118
17	柏树岭	2 567 895	20	620	1 200	80	4.5	6.461 639	1 290.73	0.076
18	大湾	2 482 853	20	480	1 000	51	2.0	5.757 191	1 069.69	0.070
19	曾家山	2 385 499	20	650	1 135	60	2.2	5.634 694	1 118.13	0.015
20	石湊子	1 921 037	26	640	1 200	60	2.0	6.630 117	1 241.51	0.035
21	长滩	1 637 197	25	1 050	1 650	142	9.8	8.124 263	1 654.27	0.003
22	红麻公	1 541 570	14	330	800	86	8.0	5.913 140	888.05	0.110
23	白果村	1 469 843	12	260	800	153	13.0	5.170 039	722.86	0.096
24	青龙村	1 387 013	11	200	600	96	6.0	4.417 658	570.12	0.050
25	彭家山	1 288 622	28	580	1 000	78	1.5	5.886 051	973.22	0.027
26	龙湾村	920 924	28	460	860	60	1.0	5.622 593	806.64	0.062
27	张正波	919 717	15	320	800	100	7.0	5.661 689	741.56	0.073
28	杜家岩	856 882	17	400	880	60	5.9	6.886 333	936.99	0.065
29	麻地坪	855 159	31	395	740	140	3.0	6.605 543	895.51	0.210
30	岩碛窝	823 909	26	390	800	44	1.0	5.865 366	785.29	0.018
31	窗子沟	818 816	15	295	670	55	4.0	5.731 361	714.51	0.066
32	赵家山	704 840	16	280	700	40	3.0	6.052 952	717.43	0.025
33	围子坪	615 400	18	240	600	50	2.0	5.375 655	592.62	0.012
34	毛虫山 2 [#]	565 535	22	500	740	50	2.0	6.207 111	804.91	0.088
35	瓦前山	562 808	18	250	620	65	5.0	6.626 898	721.75	0.164
36	木红坪	543 718	20	420	970	50	5.4	7.961 577	978.71	0.009
37	大坪上	515 331	29	365	640	110	1.5	5.419 757	634.71	0.008
38	柳树坪 2 [#]	400 724	16	240	580	82	7.0	6.308 972	624.77	0.077

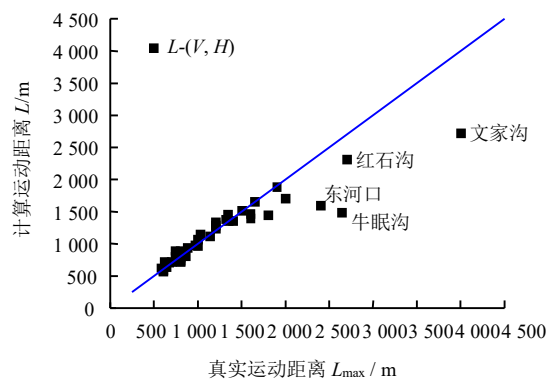


图8 汶川地震诱发碎屑流运动距离计算模型值 L 与真实运动距离 $L_{\max}$ 的比较

Fig.8 Comparison between calculated values L and actual $L_{\max}$ values of landslides triggered by Wenchuan earthquake

表5 岩质滑坡-碎屑流规模统计数据

Table 5 Work sheet for calculating distance using data of several typical rock landslides

序号	滑坡名称, 时间	体积 $V/10^6 \text{ m}^3$	滑移段坡度 $\beta/(\circ)$	最大垂直运动距离 $H_{\max}/\text{m}$	最大水平运动距离 $L_{\max}/\text{m}$	滑移段宽度 B/m	停积区最大块径 d/m	计算模型系数 a	计算运动距离 L/m	误差	数据来源
1	Elm, 1881	10.00	41.5	600	2 300	240	4.5	8.170 600	2 274.01	0.011	Hsu ^[7]
2	Frank, 1903	36.50	42.0	800	3 290	1 320	20.0	7.721 019	3 191.69	0.030	Cruden 等 ^[21]
3	Stalk Lakes, unk.	53.00	30.0	700	3 000	640	18.0	7.018 747	3 080.37	0.027	Nicoletti 等 ^[22]
4	Costantino, 1973	20.00	25.0	940	2 240	470	14.0	6.208 884	2 299.07	0.026	Nicoletti 等 ^[22]
5	Madison Canyon, 1959	28.00	30.0	430	1 680	830	8.0	4.982 345	1 650.41	0.018	Nicoletti 等 ^[22]
6	Monte Zandilia, 1987	40.00	35.0	1 390	3 950	750	25.0	8.417 263	4 087.33	0.035	Nicoletti 等 ^[22]
7	头寨沟, 1991	15.00	38.0	960	3 650	130	7.0	10.549 310	3 654.39	0.001	黄润秋等 ^[23]
8	烂泥沟, 1965	214.00	47.0	1 770	6 530	580	8.0	8.408 508	6 596.53	0.010	徐则民等 ^[23]
9	大寨, 2010	2.00	35.0	420	1 500	114	4.5	8.885 219	1 512.65	0.008	刘传正 ^[24]
10	易贡, 2000	300.00	30.0	3 350	10 000	490	42.0	10.025 980	10 038.49	0.004	许强 ^[25]
11	溪口, 1989	1.00	36.0	500	1 500	90	5.0	10.156 520	1 518.76	0.013	黄润秋 ^[23]
12	赵家沟, 2013	0.40	25.0	300	800	110	7.0	7.916 069	828.52	0.036	殷跃平等 ^[26]
13	新磨村, 2017	4.50	31.0	1 094	2 572	470	40.0	10.270 190	2 720.42	0.058	许强等 ^[4]
14	普洒村, 2017	0.49	27.0	267	788	220	10.0	7.536 231	805.99	0.023	郑光等 ^[5]
15	Hope, 1965	47.00	30.0	1 220	2 800	1 100	25.0	5.901 896	2 888.06	0.031	Nicoletti 等 ^[22]
16	Silver Reef, unk.	227.00	45.0	760	6 670	1 488	20.0	7.963 366	5 132.24	0.231	Shreve ^[19]
17	Blackhawk, unk.	283.00	45.0	1 100	9 860	1 640	20.0	7.719 329	5 766.00	0.415	Shreve ^[19]

注: unk.指滑坡时间未知。

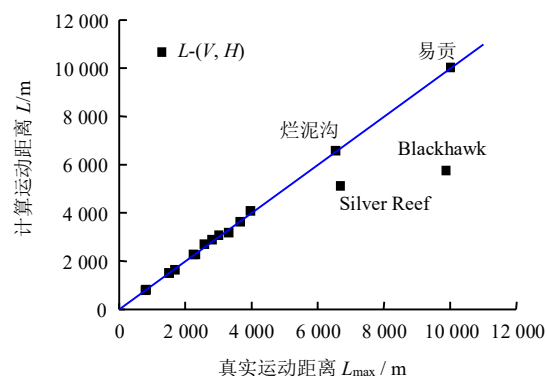


图9 碎屑流运动距离计算模型值 L 与真实运动距离 $L_{\max}$ 的比较

Fig.9 Comparison between calculated values L and existing actual $L_{\max}$ values of several landslides around the world

度较好。

图9是计算值 L 与实际值 $L_{\max}$ 对比图。可以看到, 运动距离最大是西藏易贡滑坡, 计算误差为0.4%; 运动距离最小的是贵州纳雍县普洒村崩塌碎屑流, 计算误差为2.3%。误差最大的两个滑坡分别为 BlackHawk 滑坡和 Silver Reef 滑坡, 计算误差分别为41.5%和23.1%。

BlackHawk 滑坡和 Silver Reef 滑坡位于美国加州西南部, 彼此相邻, 其平均滑面倾角不到 3° , 它们在近水平的地面上运动了接近 10 km。这种超强的运动特性, Shreve^[19]认为是气垫层润滑效应造成的, 而 Erismann^[20]则认为是第四纪冰川融水的润滑

作用造成的。这两个滑坡的发生时间和成因尚在在争论中。

4.3 计算方程的使用条件

本文建立的运动距离计算公式的基本方程是基于势能关系构建, 并结合量纲分析获得的, 适用于各种碎屑流。但是基本方程的系数 a 与 d/B 和 $\tan\alpha$ 之间的函数关系是通过开展岩质碎屑滑槽试验获得的, 它反映的是岩质碎屑流的运动过程。这使得最终计算公式仅适用于岩质-滑坡碎屑流, 而不适用于土质滑坡-碎屑流和冰川碎屑流等。

为此, 可以先确定土质滑坡-碎屑流和冰川碎屑流特有的影响因素, 再开展系列试验, 确定系数 a ,

进而建立有针对性的计算公式。

5 结论与认识

本文通过开展运动距离与势能的关系研究, 结合量纲分析、滑槽试验及数据逐步回归拟合, 得到了可用于计算单体岩质滑坡-碎屑流远程运动距离的公式。具体结论如下:

(1) 在研究碎屑流运动距离与势能关系的基础上, 结合量纲分析, 得到远程运动距离 L 与势能 VH 之间的基本方程。采用滑坡实例数据对方程进行拟合验证, 相关性较好。该基本方程是建立单体岩质滑坡-碎屑流远程运动距离公式的基础。

(2) 开展岩质碎屑流滑槽试验, 研究运动距离与不同影响因素之间的关系: 当粒径相同时, 斜槽倾角越大, 势能 VH 值越大, 碎屑体的运动距离 L 越大; 斜槽倾角相同时, 粒径越大, 运动距离 L 越大; 斜槽倾角和粒径均相同时, 体积越大, 运动距离 L 越大。

(3) 通过对滑槽试验数据拟合和逐步回归, 研究了 3 个无量纲量 (a 、 d/B 、 $\tan\alpha$) 之间的关系。在三维坐标系中 $\lg(d/B)$ - $\lg(\tan\alpha)$ - $\lg a$ 图像近似于三维平面, 并由此建立了系数 a 与 d/B 和 $\tan\alpha$ 之间的函数关系式。将该关系式代入基本方程, 得到了可用于计算单体岩质滑坡-碎屑流远程运动距离的公式。

(4) 采用汶川地震诱发的 38 个岩质滑坡-碎屑流和其他 17 个典型岩质滑坡-碎屑流数据对计算公式进行验证, 结果显示误差小于 10% 的比例分别为 68.4% 和 88.2%, 说明该计算公式的可靠性良好。

(5) 本文是对岩质滑坡-碎屑流远程运动距离计算公式的一次探索。基本方程适用于各种碎屑流, 但是基本方程系数 a 的函数关系式是通过开展岩质碎屑 (石英砂) 滑槽试验获得的, 使得最终计算公式仅适用于岩质-滑坡碎屑流。

相对于实际案例, 室内模型试验的试验条件过于理想化, 计算公式中的粒径是直接给定的; 在可靠性验证时, 采用的也是已发生碎屑流实例, 有现成的块体可供量测粒径。当斜坡尚未失稳时, 如何选取颗粒粒径进行计算, 还需要进一步研究。

参 考 文 献

[1] 唐川. 昭通头寨沟特大型灾害性滑坡研究[J]. 云南地理环境研究, 1991, 3(2): 64—71.
TANG Chuan. A study on large-scale catastrophic landslide at Touzai Gully of Zhaotong[J]. *Yunnan*

Geographic Environment Research, 1991, 3(2): 64—71.

[2] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009 年 6.5 重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 433—444.

XU Qiang, HUANG Run-qiu, YIN Yue-ping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(4): 433—444.

[3] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡—碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445—454.

YIN Yue-ping, ZHU Ji-liang, YANG Sheng-yuan. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(4): 445—454.

[4] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2612—2628.

XU Qiang, LI Wei-le, DONG Xiu-jun, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2612—2628.

[5] 郑光, 许强, 巨袁臻, 等. 2018 年 8 月 28 日贵州纳雍县张家湾镇普洒村崩塌特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 223—240.

ZHENG Guang, XU Qiang, JU Yuan-zhen, et al. The Pusacun rock avalanche on August 28, 2018 in Zhangjiawan Nayongxian, Guizhou: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(1): 223—240.

[6] 许强, 裴向军, 黄润秋. 汶川地震大型滑坡研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

XU Qiang, PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu. Large-scale landslides induced by Wenchuan earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[7] HSU K J. Catastrophic debris streams(sturzstroms) generated by rockfalls[J]. *GSA Bulletin*, 1975, 86(1): 129—140.

[8] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides[J]. *Rock Mechanics*, 1973, 5(4): 231—236.

[9] LEGROS F. The mobility of long-runout landslides[J].

- Engineering Geology**, 2002, 63(3): 301—331.
- [10] ADUSHKIN V V. Mobility of rock avalanches triggered by underground nuclear explosions[C]//Landslides from massive rock slope failure. [S. l.]: Springer Netherlands, 2006: 267—284.
- [11] 乔建平, 等. 大地震诱发滑坡分布规律及危险性评价方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- QIAO Jian-ping, et al. Earthquake-induced landslide distribution regularity and hazard assessment method[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [12] 雷先顺, 朱大勇, 刘诚, 等. 考虑滑道坡度和宽度的滑坡模型试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1281—1288.
- LEI Xian-shun, ZHU Da-yong, LIU Cheng, et al. Model test study of the effect of slope angle and chute width on landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1281—1288.
- [13] RICKENMANN D. Empirical relationships for debris flows[J]. **Natural Hazards**, 1999, 19(1): 47—77.
- [14] LORENTE A, BEGUERUA S, GARCIA-RUIZ J M. Debris flow characteristics and relationships in the central Spanish Pyrenees[J]. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 2003, 3(6): 683—692.
- [15] 孙其诚, 厚美瑛, 金峰. 颗粒物质物理与力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- SUN Qi-cheng, HOU Mei-ying, JIN Feng. Physics and mechanics of granular material[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [16] PROCHASKA A B, SANTI P M, HIGGINS J D, et al. Debris-flow runout predictions based on the average channel slope (ACS)[J]. **Engineering Geology**, 2008, 98(1-2): 29—40.
- [17] 郑光. 滑坡-碎屑流远程运动距离研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- ZHENG Guang. Study on the long-runout distance of rock avalanche[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [18] LU NING, LIKOS WILLIAM J. 非饱和土力学[M]. 韦昌富译. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- LU NING, LIKOS WILLIAM J. Unsaturated soil mechanics[M]. Translated by WEI Chang-fu. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [19] SHREVE R L. Leakage and fluidization in air-layer lubricated avalanches[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 1968, 79(1): 653—658.
- [20] ERISMANN T H. Mechanisms of large landslides[J]. **Rock Mechanics**, 1979, 12(1): 15—46.
- [21] CRUDEN DAVID M, MARTIN C DEREK. Before the Frank Slide[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(7): 765—780.
- [22] NICOLETTI P G, SORRISO-VALVO M. Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 1991, 103(10): 1365—1373.
- [23] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- HUANG Run-qiu, XU Qiang. Typical catastrophic landslide in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [24] 刘传正. 贵州关岭大寨崩滑碎屑流灾害初步研究[J]. 工程地质学报, 2010(5): 623—630.
- LIU Chuan-zheng. Preliminary findings on Dazhai landslide-debris flow Disaster in Guizhou province of June 28, 2010[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010(5): 623—630.
- [25] XU Qiang, SHANG Yan-jun, ASCHTHEO VAN, et al. Observations from the large, rapid Yigong rock slide — debris avalanche, southeast Tibet[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2012, 49(5): 589—606.
- [26] 殷跃平, 刘传正, 陈红旗, 等. 2013 年 1 月 11 日云南镇雄赵家沟特大滑坡灾害研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 6—15.
- YIN Yue-ping, LIU Chuan-zheng, CHEN Hong-qi, et al. Investigation on catastrophic landslide of January 11, 2013 at Zhaojiagou, Zhenxiong County, Yunnan Province[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2013, 21(1): 6—15.