

刘红岩, 阎锡东, 张小趁, 等. 滑坡运动距离预测的统计模型及其改进[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 6-10, 17. [LIU Hongyan, YAN Xidong, ZHANG Xiaochen, et al. The Statistical Model for the Movement Distance Forecast of the Landslide and its Improvement[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 6-10, 17. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.002.]

## 滑坡运动距离预测的统计模型及其改进\*

刘红岩<sup>1</sup>, 阎锡东<sup>2</sup>, 张小趁<sup>3</sup>, 陈红旗<sup>4</sup>, 张光雄<sup>5</sup>, 邹宗山<sup>5</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089;  
3. 华北科技学院安全工程学院, 北京 101601; 4. 自然资源部地质灾害应急技术指导中心, 北京 100081;  
5. 保利民爆哈密有限公司, 新疆 哈密 839200)

**摘 要:** 滑坡运动距离是评价滑坡致灾范围的一个重要指标, 因此其预测方法一直备受关注。该文通过对前人研究现状的深入剖析, 发现滑坡势能是影响运动距离的一个重要因素, 由此将滑坡分为低位滑坡和高位滑坡。从目前运动距离预测的统计得出低位滑坡的运动距离主要与滑体体积  $V$ 、滑坡坡角  $\alpha$  和滑坡体原始高差  $H_0$  有关; 而高位滑坡的运动距离同时还在很大程度上受沿程地形坡度、滑坡体滑动前后最大高差  $H$  等因素的影响。最后以汶川地震诱发的 38 个沟谷型滑坡-碎屑流为案例, 在已有模型的基础上引入  $H$  的影响, 进而采用 origin9.0 软件进行多元回归分析得到了同时考虑  $V$ 、 $H_0$ 、 $H$  及地形坡度等多变量的运动距离预测统计模型。通过对比发现改进后的统计模型能有效提高计算精度, 这说明在高位滑坡的运动距离预测统计模型中应同时考虑  $H$  的影响。该研究将有助于进一步优化滑坡运动距离预测的统计模型, 进而为滑坡灾害评估和防治提供可靠依据。

**关键词:** 滑坡分类; 运动距离预测; 沟谷型滑坡; 统计模型; 多元回归分析; 汶川地震

**中图分类号:** P642; X43; X915.5; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)04-0006-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.04.002

地震、降雨等诱发的大型滑坡常常会掩埋坡脚附近的道路、房屋等, 造成严重的人员伤亡和财产损失。因而, 如何根据滑坡特征预测滑坡运动要素如运动距离、速度和加速度等对保障人民的生命财产安全都具有重要的实际意义。其中滑坡失稳后的运动距离(本文指最大水平运动距离)是对安全的影响最大, 它决定着滑坡的致灾范围, 也引起了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

目前滑坡失稳运动距离预测方法主要分为 4 类: ①确定性物理模型, 如 HELM<sup>[4]</sup> 提出了滑坡运动距离预测的雪橇模型。SCHEIDEGGER<sup>[5]</sup> 基于能量守恒的观点提出了滑体运动的摩擦模型, 而后 SASSA<sup>[6]</sup> 在此基础上又考虑了孔隙压力的影响。王家鼎等<sup>[7]</sup> 结合 1920 年海原大地震诱发的高速黄土滑坡案例, 提出了黄土滑坡斜抛运动距离计算公式。②统计模型, 如 MITCHELL<sup>[8]</sup>、樊晓一<sup>[9]</sup> 等基于对实际滑坡运动距离的统计分析而提出的一种预测模型。③信息模型, 王甯等<sup>[10]</sup> 采用模糊信息优化处理技术提出了一种黄土地震滑坡运动距离预测方法。常晔瑜等<sup>[11]</sup> 根据对海原特大地震诱发黄土滑坡运动距离的野外调查数据, 建立了地震诱发黄土滑坡运动距离的 BP 神经网络预测模型。④数值模型, NIAN 等<sup>[12]</sup> 采用改进的 DDA 程序计

算了汶川地震诱发的大光包滑坡的运动距离; MAO 等<sup>[13]</sup> 采用一种距离势的离散元算法预测了金沙江白格滑坡的滑动距离; LIU 等<sup>[14]</sup> 采用 PFC 程序模拟了四川茂县新茂滑坡的失稳运动过程和运动距离。

确定性预测方法一般是基于能量守恒定律和牛顿运动学原理而建立的, 多适用于单体滑坡预测。而且均采用了一定的假设, 最终可能导致理论计算结果与实际误差较大; 统计模型和信息模型均不甚关注滑坡发生机理, 而是通过对大量滑坡案例的统计分析, 建立相应的统计模型。该方法一方面需要大量的基础数据, 另一方面其使用范围有限。数值模型是基于数学物理模型而来, 它能很好地模拟整个滑坡的失稳运动过程, 但也存在着计算参数选取困难、计算过程复杂及技术门槛高等缺点。因此上述方法都存在一定的优缺点, 在实际工程中应结合具体情况进行选用。

近年来地质灾害应急防治工作愈发重要<sup>[15]</sup>, 但其具有时间短、任务重的特点, 需要迅速预估出滑坡失稳后的致灾范围, 进而为应急抢险提供科学依据。此时, 统计模型就具有很大优势, 因为对于内因(滑坡特征)和外因素(诱发因素、场地

\* 收稿日期: 2022-04-13 修回日期: 2022-10-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1509701); 哈密市科技计划项目(hm2021kj08); 国家级地质灾害应急防治项目(2022)

第一作者简介: 刘红岩(1975-), 男, 汉族, 河南扶沟人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害方面的研究与教学工作。

E-mail: lhyan1204@126.com

条件等)相近的“同类”滑坡, 统计模型不但具有较高精度, 而且计算快, 符合地质灾害应急情景要求。为此, 本文就在对国内外滑坡运动距离统计模型进行回顾、分析的基础上, 按照其关键特征对滑坡进行分类, 进而提出基于运动距离预测的滑坡分类方法, 而后结合某类滑坡的具体特点, 探究影响运动距离的关键因素, 并指出现有统计模型的不足, 进而加以改进, 以期获得更为合理的预测结果。

## 1 基于运动距离预测的滑坡分类方法研究现状

### 1.1 滑坡失稳后的运动距离影响因素分析

影响滑坡运动距离的因素有很多, 从大的方面来说可以分为两类: 内因和外因, 由此樊晓一等<sup>[16]</sup>提出了“坡”“场”的概念, 其中内因即坡体因素, 主要是指滑坡本身的特征, 包括滑坡体积、滑坡高度、滑坡坡度等; 而外因即场地特征, 主要是指滑坡运动场地上的障碍物、地形起伏等特征, 其对滑坡运动具有阻止或加速作用。为此, 不少学者采用野外调查、模型试验及数值方法研究了上述因素对滑坡运动距离的影响, 如表 1 所示。可以看出, 对于不同的滑坡类型, 影响其运动距离的因素也有所不同, 但是从总体上来看, 内因方面, 滑坡体积  $V$  及前后缘高差  $H$  为两个主要影响因素, 而外因方面, 地形条件的影响则最为显著。

表 1 滑坡运动距离影响因素研究现状

| 序号                    | 主要影响因素          |         | 滑坡概况    |
|-----------------------|-----------------|---------|---------|
|                       | 内因              | 外因      |         |
| 1 <sup>[17]</sup>     | $V$             | 地形地貌    | 地震滑坡    |
| 2 <sup>[18]</sup>     | 碎屑颗粒尺寸          |         | 碎屑流滑坡   |
| 3 <sup>[19]</sup>     | $V$             |         | 坡脚型地震滑坡 |
| 4 <sup>[20]</sup>     | $V$ 、 $H$ 、平面形态 |         | 地震滑坡    |
| 5 <sup>[21]</sup>     | $V$ 、 $H$ 、滑坡角  | 降雨量     | 黄土降雨滑坡  |
| 6 <sup>[22]</sup>     | $V$             | 诱发机制及地形 | 无明显受阻滑坡 |
| 7 <sup>[23]</sup>     | $V$ 、 $H$       |         | 地震滑坡    |
| 8 <sup>[24]</sup>     | $V$ 、落差         | 沟道段坡度   | 沟道型碎屑滑坡 |
| 9 <sup>[25]</sup>     | $V$ 、 $H$       | 沟谷区坡度   | 地震滑坡    |
| 10 <sup>[26]</sup>    | $V$ 、 $H$       |         | 高速远程滑坡  |
| 11 <sup>[27]</sup>    | $V$ 、 $H$       |         | 灾难性滑坡   |
| 12 <sup>[28-32]</sup> | $V$ 、落差         | 地形条件    | 复杂地形滑坡  |

注:  $V$ 、 $H$  分别为滑坡体积及前后缘高差。

总之, 由目前的研究现状可知, 一般可将影响滑坡运动距离的因素分为两类, 即: 触发因素和控制因素, 其中触发因素主要是指降雨和地震, 其对运动距离的影响相对较小。而控制因素主要是指坡体特征和场地特征, 其中前者主要包括滑坡体积、滑坡体原始高差、滑坡坡度, 而后者主要包括地形坡度、堆积区与坡体间的高差。同时从运动学的角度来看, 滑坡运动过程就是滑坡重力势能的转化过程, 即滑坡重力势能转化为克服滑动路径上的摩擦力所做的功。因此, 可以认为

当其他条件不变时, 滑坡重力势能越大, 其运动距离就越远, 它与滑坡的岩土体密度、体积和滑坡运动前后的重心垂直高差有关。由于岩土体密度一般为  $1\ 800 \sim 2\ 500\ \text{kg/m}^3$ , 因此其差别不大, 所以目前的运动距离计算公式通常忽略岩土体类型的影响。如李秀珍等<sup>[17]</sup>给出了汶川地震诱发的滑坡运动距离计算公式(表 2), 仅考虑了滑体体积  $V$ 、滑坡坡角  $\theta$  和滑坡体高差  $H$  的影响。由于滑坡体积可以事先通过勘察等方法获得, 因此  $H$  就成了决定滑坡运动距离的关键参数。为此, 如表 2 所示, 本文根据滑体原始高差  $H_s$  和滑坡体的最大落差  $H$  之间的相对大小关系, 将滑坡分为高位滑坡 ( $H_s < H$ ) 和低位滑坡 ( $H_s \approx H$ ) 两类, 由此给出部分学者提出的滑坡最大水平运动距离计算公式。

### 1.2 不同类型的滑坡运动距离计算公式

表 2 为不同学者给出的滑坡运动距离计算公式, 其中高位滑坡根据坡面形状的不同又分为 4 种, 即沟谷型、坡脚型、凹面型和阶地型。可以看出, 低位滑坡的运动距离主要与滑体体积、滑坡坡角和滑坡体原始高差等 3 个因素有关; 而高位滑坡的运动距离不但与滑体体积、滑坡坡角和滑坡体高差等 3 个因素有关, 同时还与地形坡度、滑坡体最大落差等有关。因此, 无论哪种类型的滑坡, 滑体体积、滑坡坡角和滑坡体原始高差等 3 个因素都是必须考虑的; 同时对于高位滑坡, 地形坡度是必须考虑的因素, 但是对于滑坡体的最大落差, 则并非所有的统计模型都进行了考虑。分析认为滑坡体的最大落差直接影响到滑坡的总势能, 因此笔者认为应该加以考虑。但是由表 1 可以看出, 滑体原始高差  $H_s$  和滑坡体的最大落差  $H$  仅考虑了其中一个, 那么为什么有的统计模型考虑  $H_s$ , 而有的统计模型考虑  $H$  呢? 二者同时考虑时是否精度更高呢? 为此下面基于实际滑坡案例采用多元统计回归的方法对该问题进行研究。

## 2 考虑多因素影响的运动距离预测的统计模型

下面采用 ZHAN 等<sup>[24]</sup>提供的滑坡数据(表 3)进行分析, 其以滑源区高差  $H_s$ 、滑坡体积  $V$  和两个地形突变点处的坡角  $\alpha$  和  $\beta$  为自变量, 以滑坡最大运动距离  $L$  为因变量, 采用多元回归的方法建立了如下所示的预测公式:

$$L = 3.6V^{0.303}H_s^{0.244}(\tan\alpha)^{-0.115}(\tan\beta)^{0.072} \quad (1)$$

由此可知, 该公式并未考虑滑坡体滑动前后的最大高差  $H$ , 因此认为式(1)仍有改进空间。为此基于 origin9.0 软件的多元回归分析功能, 对表 3 所示滑坡数据进行分析, 可获得同时考虑  $H$  时的滑坡运动距离  $L$  的预测公式:

$$L = 2.44679V^{0.09921}H_s^{-0.18977}(\tan\alpha)^{-0.24527}(\tan\beta)^{-0.26464}H^{0.85234} \quad (2)$$

其检验统计量为: 相关系数  $R^2 = 0.934$ ,  $F = 339.80$ , 显著性概率值  $P = 0.00$ , 因此, 该回归模型显著。

表 2 基于统计模型的不同类型滑坡运动距离计算表

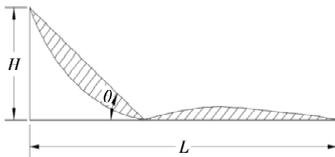
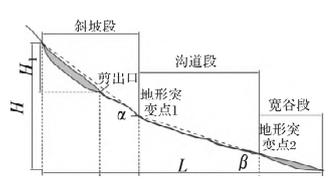
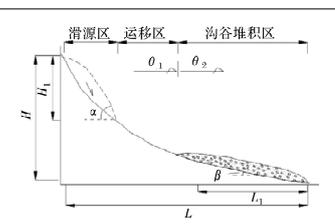
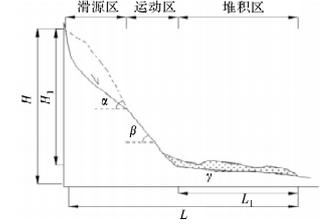
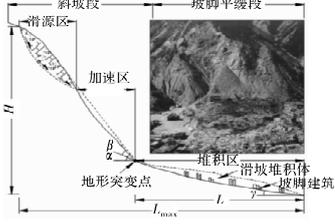
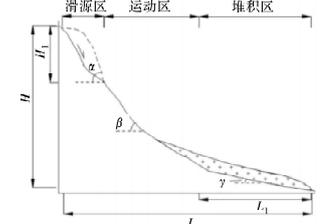
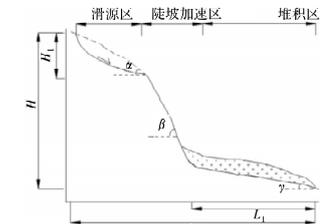
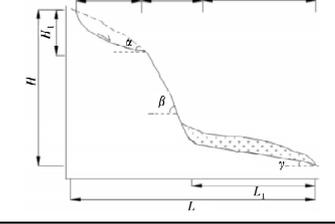
|      | 滑坡模型   | 运动距离估算经验公式  |
|------|--|---|
| 低位滑坡 | $L = V^{0.0785} (H/\tan \theta)^{1.2347}$ (适用于四川等地强震诱发的滑坡 <sup>[17]</sup> )<br>$L = 1.285H^{1.01} (\tan \theta)^{-0.506}$<br>(基于香港地区的挖方边坡建立的经验公式, 滑坡体积 $V = 0.5 \sim 7\,168\text{ m}^3$ <sup>[33]</sup> )<br>$L = V^{0.22} H^{0.57}$ (适用于地震滑坡 <sup>[23]</sup> )<br>$L = a + \frac{b \times n \times \Delta H}{0.65 \tan \varphi}$  |    |
|      | 式中: $a$ 为滑体完整性取值(2~20), 完整性好时, 取大值; $b$ 为触发因子, 正常条件下取 1, 地震、强降雨等触发因素条件下取 1.5~2.0; $n$ 为根据滑坡体临空条件及压埋区地势取 0.5~1.0; 前缘无阻挡的, 取大值。 $\varphi$ 为滑带土快剪内摩擦角, °; $\Delta H$ 为滑坡体相对高差, m。适用于黄土滑坡 <sup>[34]</sup> 。  |   |
| 沟谷型  | $L = 3.6V^{0.303} H_s^{0.244} (\tan \alpha)^{-0.115} (\tan \beta)^{0.072}$<br>式中: $L$ 为滑坡最大运动距离; $H_s$ 为滑源区高差; $V$ 为滑坡体积 <sup>[24]</sup> 。   |    |
|      | 顺直型滑坡 ( $\theta_1 - \theta_2 \leq 30^\circ$ ) <sup>[25]</sup> : $1 \times 10^4\text{ m}^3 < V < 5\,000 \times 10^4\text{ m}^3$ , $40\text{ m} < H_1 < 620\text{ m}$ , $20^\circ < \alpha < 40^\circ$ , $5^\circ < \beta < 40^\circ$<br>$L = 4.107V^{0.406} H_1^{0.035} (\tan \alpha)^{0.047} (\tan \beta)^{0.275}$   |   |
|      | 偏转型滑坡 ( $\theta_1 - \theta_2 > 30^\circ$ ) <sup>[25]</sup> : $1 \times 10^4\text{ m}^3 < V < 2\,000 \times 10^4\text{ m}^3$ , $40\text{ m} < H_1 < 850\text{ m}$ , $25^\circ < \alpha < 65^\circ$ , $5^\circ < \beta < 40^\circ$ , $30^\circ < \theta < 80^\circ$<br>$L = 3.239V^{0.325} H_1^{0.196} (\tan \alpha)^{-0.150} (\tan \beta)^{0.039} (\tan \theta)^{-0.016}$   |  |
| 高位滑坡 | $L = 2.301V^{0.208} H_1^{0.485} (\tan(\beta - \gamma))^{-0.044}$<br>$L_1 = 1.419V^{0.434} H_1^{-0.073} (\tan(\beta - \gamma))^{0.650}$<br>式中: $\alpha > 30^\circ$ , $\alpha \approx \beta > \gamma$ <sup>[28]</sup> 。  |  |
|      | $L_{\max} = 2.62 \times (VH)^{0.287} (\tan \alpha)^{-0.335} (\tan \beta)^{0.0082} (\tan \gamma)^{0.085}$ <sup>[29]</sup>   |  |
| 凹面型  | $L = 3.110V^{0.425} H_1^{-0.065} (\tan \alpha)^{-0.312}$<br>$L_1 = 1.572V^{0.396} H_1^{0.047} (\tan \alpha)^{0.722}$<br>式中: $10^4\text{ m}^3 < V < 600 \times 10^4\text{ m}^3$ , $20\text{ m} < H_1 < 450\text{ m}$ , $20^\circ < \alpha < 45^\circ$ 。 $\alpha > \beta > \gamma$ , 且坡度变化连续 <sup>[28]</sup> 。   |  |
|      | $L = 5.826V^{0.279} H_1^{0.147} (\tan \alpha)^{-0.61} (\tan \beta)^{0.028} (\tan \gamma)^{0.006}$<br>$L_1 = 11.956V^{0.171} H_1^{0.054} (\tan \alpha)^{0.184} (\tan \beta)^{0.248} (\tan \gamma)^{-0.309}$<br>式中: $0.8 \times 10^4\text{ m}^3 < V < 400 \times 10^4\text{ m}^3$ , $15\text{ m} < H_1 < 800\text{ m}$ , $20^\circ < \alpha < 50^\circ$ , $15^\circ < \beta < 60^\circ$ , $5^\circ < \gamma < 45^\circ$ 。 $\alpha, \beta, \gamma$ 存在明显变化, $\alpha, \gamma < \beta$ , 运动区地形分布陡坡; $\alpha, \gamma > \beta$ , 运动区地形分布缓坡平台 <sup>[28]</sup> 。 |  |

表3 汶川地震触发的沟谷型滑坡-碎屑流运动距离

| 序号 | 滑坡名称  | 行政区域 | $V/m^3$    | $H_s/m$ | $\alpha/(\circ)$ | $\beta/(\circ)$ | $H/m$ | $L_{max0}/m$ | $L_{max1}/m$ |        |       |        | 对比 |
|----|-------|------|------------|---------|------------------|-----------------|-------|--------------|--------------|--------|-------|--------|----|
|    |       |      |            |         |                  |                 |       |              | 文献结果         | 误差/%   | 本文结果  | 误差/%   |    |
| 1  | 文家沟   | 绵竹   | 50 000 000 | 440     | 26               | 7               | 1 320 | 4 000        | 3 194        | -20.14 | 4 247 | 6.17   | √  |
| 2  | 水磨沟   | 什邡   | 19 959 932 | 490     | 35               | 10              | 860   | 2 000        | 2 445        | 22.23  | 2 192 | 9.62   | √  |
| 3  | 大屋基   | 安县   | 16 326 032 | 540     | 29               | 13              | 880   | 1 900        | 2 467        | 29.83  | 2 122 | 11.67  | √  |
| 4  | 东河口   | 青川   | 15 000 000 | 240     | 25               | 11              | 640   | 2 400        | 1 988        | -17.19 | 2 043 | -14.89 | √  |
| 5  | 红石沟   | 安县   | 13 410 911 | 290     | 37               | 17              | 1 040 | 2 700        | 1 967        | -27.14 | 2 324 | -13.91 | √  |
| 6  | 窝前    | 青川   | 12 000 000 | 330     | 30               | 10              | 560   | 1 600        | 1 945        | 21.58  | 1 634 | 2.15   | √  |
| 7  | 肖家山   | 绵竹   | 7 814 385  | 480     | 48               | 24              | 930   | 1 350        | 1 856        | 37.47  | 1 498 | 10.99  | √  |
| 8  | 牛眠沟   | 汶川   | 7 500 000  | 320     | 32               | 13              | 800   | 2 640        | 1 692        | -35.92 | 1 942 | -26.44 | √  |
| 9  | 立起沟   | 江油   | 5 360 623  | 360     | 37               | 12              | 650   | 1 500        | 1 530        | 2.00   | 1 502 | 0.16   | √  |
| 10 | 草槽坪   | 安县   | 5 338 279  | 345     | 31               | 17              | 580   | 1 340        | 1 593        | 18.91  | 1 319 | -1.56  | √  |
| 11 | 火石沟   | 安县   | 4 682 742  | 270     | 38               | 17              | 700   | 1 320        | 1 400        | 6.03   | 1 501 | 13.73  | ×  |
| 12 | 石板沟村  | 青川   | 4 500 000  | 450     | 34               | 9               | 650   | 1 800        | 1 519        | -15.59 | 1 572 | -12.67 | √  |
| 13 | 谢家店子  | 彭州   | 4 000 000  | 400     | 34               | 15              | 720   | 1 600        | 1 480        | -7.53  | 1 508 | -5.72  | √  |
| 14 | 大水沟   | 都江堰  | 3 145 769  | 320     | 30               | 17              | 560   | 1 400        | 1 339        | -4.36  | 1 244 | -11.12 | ×  |
| 15 | 长坪    | 彭州   | 2 839 115  | 290     | 37               | 16              | 500   | 1 200        | 1 223        | 1.94   | 1 086 | -9.53  | ×  |
| 16 | 小木岭   | 绵竹   | 2 735 439  | 175     | 45               | 26              | 710   | 1 025        | 1 075        | 4.92   | 1 301 | 26.94  | ×  |
| 17 | 柏树岭   | 北川   | 2 567 895  | 335     | 36               | 20              | 620   | 1 200        | 1 256        | 4.64   | 1 190 | -0.83  | √  |
| 18 | 大湾    | 北川   | 2 482 853  | 220     | 28               | 20              | 480   | 1 000        | 1 163        | 16.27  | 1 115 | 11.50  | √  |
| 19 | 曾家山   | 绵竹   | 2 385 499  | 340     | 44               | 20              | 650   | 1 135        | 1 193        | 5.08   | 1 144 | 0.78   | √  |
| 20 | 石湊子   | 平武   | 1 921 037  | 260     | 30               | 26              | 640   | 1 200        | 1 134        | -5.54  | 1 221 | 1.71   | √  |
| 21 | 长滩    | 绵竹   | 1 637 197  | 400     | 33               | 25              | 1 050 | 1 650        | 1 180        | -28.50 | 1 660 | 0.59   | √  |
| 22 | 红麻公   | 青川   | 1 541 570  | 195     | 30               | 14              | 330   | 800          | 942          | 17.74  | 856   | 7.06   | √  |
| 23 | 白果树   | 青川   | 1 469 843  | 165     | 26               | 12              | 260   | 800          | 898          | 12.30  | 781   | -2.41  | √  |
| 24 | 青龙村   | 青川   | 1 387 013  | 90      | 21               | 11              | 200   | 600          | 778          | 29.61  | 756   | 26.02  | √  |
| 25 | 彭家山   | 北川   | 1 288 622  | 200     | 33               | 28              | 580   | 1 000        | 935          | -6.47  | 1 077 | 7.67   | ×  |
| 26 | 龙湾村   | 北川   | 920 924    | 205     | 31               | 28              | 460   | 860          | 857          | -0.29  | 867   | 0.82   | ×  |
| 27 | 张正波   | 青川   | 919 717    | 125     | 29               | 15              | 320   | 800          | 730          | -8.77  | 855   | 6.83   | ×  |
| 28 | 杜家岩   | 青川   | 856 882    | 100     | 33               | 17              | 400   | 880          | 671          | -23.79 | 995   | 13.03  | √  |
| 29 | 麻地坪   | 青川   | 855 159    | 140     | 27               | 31              | 395   | 740          | 785          | 6.14   | 819   | 10.70  | ×  |
| 30 | 岩碛窝   | 青川   | 823 909    | 145     | 30               | 26              | 390   | 800          | 761          | -4.92  | 822   | 2.74   | √  |
| 31 | 窗子沟   | 绵竹   | 818 816    | 185     | 35               | 15              | 295   | 670          | 755          | 12.65  | 691   | 3.13   | √  |
| 32 | 赵家山   | 青川   | 704 840    | 115     | 22               | 16              | 280   | 700          | 688          | -1.78  | 801   | 14.43  | ×  |
| 33 | 围子坪   | 青川   | 615 400    | 135     | 22               | 18              | 240   | 600          | 692          | 15.39  | 650   | 8.39   | √  |
| 34 | 毛虫山2# | 平武   | 565 535    | 160     | 38               | 22              | 500   | 740          | 662          | -10.49 | 937   | 26.67  | ×  |
| 35 | 瓦前山   | 青川   | 562 808    | 135     | 24               | 18              | 250   | 620          | 666          | 7.48   | 652   | 5.12   | √  |
| 36 | 木红坪   | 青川   | 543 718    | 175     | 28               | 20              | 420   | 970          | 694          | -28.45 | 894   | -7.85  | √  |
| 37 | 大坪上   | 北川   | 515 331    | 160     | 34               | 29              | 365   | 640          | 670          | 4.69   | 677   | 5.81   | ×  |
| 38 | 柳树坪   | 青川   | 400 724    | 150     | 29               | 16              | 240   | 580          | 596          | 2.78   | 584   | 0.75   | √  |

其中:  $V$  为滑坡体积;  $H_s$  为滑源区高差;  $\alpha$  为斜坡段坡度;  $\beta$  为沟道段坡度;  $H_{max}$  为滑坡最大垂直运动距离;  $L_{max0}$ 、 $L_{max1}$  分别为滑坡最大实测与计算水平运动距离; 误差 =  $(L_{max1} - L_{max0})/L_{max0} \times 100\%$ 。“√”、“×”分别表示本文计算结果优于或劣于文献计算结果。

下面利用表3中的滑坡案例,将统计模型式(2)与ZHAN等<sup>[24]</sup>给出的式(1)的计算结果进行对比,结果如表3所示。可以看出:①首先从滑坡数量来看,式(2)的计算结果优于式(1)的个数达到27个,占滑坡总数的71.05%;而式(2)的计算结果劣于式(1)的个数仅为11个,仅占滑坡总数的28.95%。因此可以认为本文方法更好。②其次,

从计算结果的误差来看,式(2)计算结果的最大和最小误差分别为26.94%和0.16%,而式(1)计算结果的最大和最小误差分别为37.47%和-0.29%,即从误差上来看,本文计算结果都明显优于詹威威等<sup>[24]</sup>的计算结果。③从回归模型的相关性来看,式(2)相关系数 $R^2 = 0.934$ , $F = 339.80$ ;而式(1)的相关系数 $R^2 = 0.933$ , $F = 173.54$ ,这说

明式(2)的相关性略高于式(1)。④最后,从计算复杂程度来看,虽然式(2)比式(1)多了一个变量 $H$ ,但是由于目前离散数据的回归分析都是借助相关软件实现的,如本文所采用的 origin9.0 软件就具有多元回归分析的功能,当采用该软件进行回归分析时,两式计算难度几乎无差别。

总之,由表3所示算例可知,当已有滑坡案例的资料较齐全时,应尽可能多地考虑对运动距离有较大影响的“坡”“场”要素,尤其是滑坡体积 $V$ 、滑源区高差 $H_s$ 、滑坡体滑动前后的最大高差 $H$ 及场地坡度等因素,只有这样才能得到与实际情况更吻合的运动距离预测模型,最终更好地指导工程实践。

### 3 结论

(1)由于滑坡势能是影响滑坡运动距离的重要因素,基于此将滑坡分为低位滑坡和高位滑坡,其中后者又可分为沟谷型、坡脚型、凹面型和阶地型。并给出了前人提出的运动距离统计模型计算公式。

(2)通过对前人提出的滑坡运动距离统计模型的分析,认为低位滑坡的运动距离主要与滑体体积、滑坡坡角和滑坡体原始高差等3个因素有关;而高位滑坡的运动距离同时还在很大程度上受沿程地形坡度、滑坡体滑动前后的最大高差等因素的影响。

(3)基于 origin9.0 软件的多元回归分析功能通过引入滑坡体滑动前后的最大高差 $H$ 对前人的运动距离统计模型进行了改进,通过对比发现引入 $H$ 后,计算结果的精度得到了较大提高。这为该类问题的研究提供了一条新思路。

同时需要说明是本文的研究主要是针对高位滑坡中的沟谷型滑坡展开的,对于其他类型的滑坡,本研究结论的适用性仍需要验证。

### 参考文献:

- [1] ZHAO T Y, LEI J Y, XU L. An efficient Bayesian method for estimating runout distance of region - specific landslides using sparse data[J]. *Georisk - Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 2022, 16 (1): 140 - 153. doi. 10.1080/17499518.2021.1952613.
- [2] AARON J, MCDUGALL S, NOLDE N. Two methodologies to calibrate landslide runout models [J]. *Landslides*, 2019, 16 (5): 907 - 920.
- [3] XU Q, LI H J, HE Y S, et al. Comparison of data - driven models of loess landslide runout distance estimation[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78: 1281 - 1294.
- [4] HELM A. *Bergsturz M* [M]. Zütich: Naturforschenden Gesellschaft, 1932: 120 - 133.
- [5] SCHEIDEGGER A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. *Rock Mechanics*, 1973, 5: 231 - 236.
- [6] SASSA R. Measurement of the apparent friction angle during rapid loading by the high - speed high stress ring shear apparatus—Interpretation of the relationship between landslide volume and the apparent friction during motion [J]. *Landslides*, 1991, 1: 545 - 552.
- [7] 王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩

- 土工程学报, 1999, 21(6): 670 - 674.
- [8] MITCHELL A, MCDUGALL S, NOLDE N, et al. Rock avalanche runout prediction using stochastic analysis of a regional dataset[J]. *Landslides*, 2020, 17(4): 777 - 792.
- [9] 樊晓一. 岩土体与场地条件作用下的滑坡碎屑流运动机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [10] 王鼎, 王兰民, 王谦, 等. 黄土高原地震作用下黄土滑坡滑距预测方法[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(4): 533 - 540.
- [11] 常晁瑜, 薄景山, 李孝波, 等. 地震黄土滑坡滑距预测的 BP 神经网络模型[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(6): 1609 - 1614.
- [12] NIAN T K, ZHANG Y J, WU H, et al. Runout simulation of seismic landslides using discontinuous deformation analysis (DDA) with state - dependent shear strength model[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(8): 1183 - 1196.
- [13] MAO J, LIU X, ZHANG C, et al. Runout prediction and deposit characteristics investigation by the distance potential - based discrete element method: the 2018 Baige landslides, Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 235 - 249.
- [14] LIU Z Y, SU L J, ZHANG C, et al. Investigation of the dynamic process of the Xinmo landslide using the discrete element method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 123: 103561.
- [15] 陈红旗, 徐永强, 庄茂国, 等. 地质灾害应急支撑体系建设基本问题分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2011, 22(4): 108 - 111.
- [16] 樊晓一, 乔建平. “坡”、“场”因素对大型滑坡运动特征的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(11): 2337 - 2347.
- [17] 李秀珍, 孔纪名. “5·12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(5): 243 - 249.
- [18] 王忠福, 何思明, 刘汉东, 等. 不同岩崩碎屑颗粒尺寸运移堆积特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 3652 - 3657.
- [19] 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(S2): 4056 - 4066.
- [20] 孟华君, 姜元俊, 张向营, 等. 地震扰动区碎石土滑坡滑动能力分析 & 预测[J]. *人民长江*, 2017, 48(14): 45 - 49, 54.
- [21] 刘悦, 黄强兵. 一种黄土滑坡滑距预测模型[J]. *灾害学*, 2001, 16(3): 6 - 11.
- [22] 樊晓一. 地震与非地震诱发滑坡的运动特征对比研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(S2): 31 - 37.
- [23] 陆盟, 张洁, 文思成. 地震作用下下坡水平运动距离概率预测模型[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(1): 92 - 99.
- [24] 詹威威, 黄润秋, 裴向军, 等. 沟道型滑坡 - 碎屑流运动距离经验预测模型研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 154 - 163.
- [25] 樊晓一, 张睿骁, 胡晓波. 沟谷地形参数对滑坡运动距离的影响研究[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(1): 106 - 114.
- [26] 陈卓根, 葛云峰. 基于统计方法的高速远程滑坡距离预测分析[J]. *人民长江*, 2016, 47(12): 42 - 47.
- [27] 尉德新, 黄涛, 张运强, 等. 基于统计方法的滑坡滑程预测分析[J]. *路基工程*, 2019, (2): 212 - 219.
- [28] 樊晓一, 胡晓波, 张睿骁, 等. 开阔型地形条件对滑坡运动距离的影响研究[J]. *自然灾害学报*, 2018, 27(5): 2337 - 2347.
- [29] 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): 1380 - 1388.
- [30] 樊晓一, 黄润秋, 乔建平, 等. 未受河流阻止的滑坡水平运动距离与滑坡坡江判别[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(1): 128 - 133.
- [31] 樊晓一, 李天话, 田述军, 等. 未完全受阻地震滑坡运动距离的影响因素及机制分析[J]. *地震地质*, 2017, 39(4): 754 - 767.
- [32] 樊晓一, 乔建平, 韩萌, 等. 灾难性地震和降雨滑坡的体积与运动距离研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 3051 - 3058.
- [33] FINLAY P J, MOSTYN G R, FELL R. Landslide risk assessment: Prediction of travel distance [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(3): 556 - 562.
- [34] 董书宁, 李保雄. 黄土滑坡的空间预报[J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(6): 46 - 47.

(下转第 17 页)

lyzed and studied. the results show that during 1998—2020, the lightning day causing disaster in Qinghai Province were mainly distributed in the pastoral region of the southern and the agricultural areas of the East in Qinghai. The sate with more in the southeast and less in the northwest are found. The annual variation is the type of multi peak oscillation. It had obvious seasonal variation and descended trend on the whole. There are lightning days causing disaster in summer (June to August), and none in late autumn and winter. Based on the weight method of index score, it is found that the load values of the first five factors of the meteorological environmental parameters are decayed rapidly. In the two types of lightning days causing disaster, The high load parameters in low - grade are 0 ~ 6 km wind vertical shear, 0 ~ 6 km wind speed difference and  $K'$ ; The high load parameters in high - grade are 0 ~ 6 km wind vertical shear, 0 ~ 6 km wind speed difference and  $\theta_{se-700\text{ hPa}}$ . Among them, 0 ~ 6 km wind vertical shear, 0 ~ 6 km wind speed difference are played a leading role in the two types. The change of their values can be indicated that the lightning day causing disaster can occur or not.

**Keywords:** lightning disaster; catastrophic lighetning day; meteorological Environmental parameters; characteristic study; principal component analysis; Qinhai Province

+++++  
(上接第 10 页)

## The Statistical Model for the Movement Distance Forecast of the Landslide and its Improvement

LIU Hongyan<sup>1</sup>, YAN Xidong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaochen<sup>3</sup>, CHEN Hongqi<sup>4</sup>,  
ZHANG Guangxiong<sup>5</sup>, ZOU Zongshan<sup>5</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. China Highway Engineering Consulting Group, Beijing 100089, China; 3. School of Safety Engineering,  
North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 4. Geological Disaster  
Emergency Technical Guidance Center of MNR, Beijing 100081, China;  
5. Poly Explosive Hami Co., Ltd., Hami 839200, China)

**Abstract:** The movement distance of a landslide is an important designation to evaluate the scope of the landslide hazard, therefore its forecast method is always being concerned. First of all, the existing studies is deeply analyzed, and it is found that the potential energy a landslide is an important factor affecting the movement distance, therefore a landslide can be classified into a low position landslide and a high position one. From the existing statistical models for the movement distance forecast, it is found that the movement distance of the low position landslide is mainly relevant to the volume  $V$ , dip angle  $\alpha$  and the original altitude difference  $H_s$  of the landslide. However, the movement distance of the high position landslide is also affected by the topographic slope along the movement distance and the maximum altitude difference  $H$  of the landslide before and after sliding. Finally, 38 gully - type rock avalanches induced by Wenchuan earthquake is taken for cases, and the effect of  $H$  is introduced into the existing model. Therefore, The statistical model for the movement distance forecast of a landslide is obtained which can take into consideration  $V$ ,  $H_s$ ,  $H$  and the topographic slope at the same time by making the multivariate regression analysis with origin9. 0 software. By comparison, it is found that the proposed model can effectively improve the computational accuracy. It is indicateed that the statistical model for the movement distance forecast of the high position landslide should take into consideration the effect of  $H$ . This study is helpful to further optimize the statistical model for the movement distance forecast of a landslide, and provides the reliable evidence for the landslide disaster evaluation and control.

**Keywords:** classification of landslides; movement distance forecast; gully - type landslide; statistical model; multivariate regression analysis; Wenchuan earthquake