

基于多元回归的黄土滑坡滑动距离预测模型探讨 ——以甘肃天水地区为例

邵葆蓉^{1,2}, 孙即超^{1,2}, 朱月琴^{2,3}, 王涛⁴, 刘甲美⁴, 陈晨^{1,2}

SHAO Baorong^{1,2}, SUN Jichao^{1,2}, ZHU Yueqin^{2,3}, WANG Tao⁴, LIU Jiamei⁴, CHEN Chen^{1,2}

1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;

2. 自然资源部地质信息工程技术创新中心, 北京 100037;

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Geological Information Technology Innovation Center, MNR, Beijing 100037, China;

3. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

摘要:滑坡滑动距离的预测是实现大比例尺滑坡风险评估的关键瓶颈之一。为定量分析滑坡地形高差、滑坡体积、坡体长宽比、滑坡平面曲率、斜坡坡度、植被覆盖等因素对黄土滑坡滑动距离的影响,以天水地区多年滑坡数据为例,应用因子相关分析法对滑动距离影响因子进行了综合分析,基于舒德格尔公式,采用多元回归模型对降雨、地震诱发滑坡滑动距离估测方程进行了优化。结果表明,滑坡前后缘高差、滑坡体积、坡体长宽比和斜坡坡度可作为天水地区滑坡滑动距离预测模型的输入因子,其对滑坡滑动距离的影响程度可用偏回归系数定量描述。滑动距离预测模型优化后比舒德格尔公式增加了坡体长宽比和斜坡坡度2个指标,提高了模型在天水地区应用的准确度。

关键词:滑动距离;相关性分析;优化舒德格尔公式;多元回归模型

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)12-1993-11

Shao B R, Sun J C, Zhu Y Q, Wang T, Liu J M, Chen C. Research on gliding distance estimation of loess landslide based on multiple regression: A case study of Tianshui region, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1993–2003

Abstract: The prediction of the gliding distance of landslide is one of the key problems in the risk assessment of large slip landslide. To quantitatively analyze the effects of landslide topography height difference, landslide volume, landslide length-width ratio, landslide plane curvature, slope and vegetation cover on the runout distance of loess landslide, the authors chose long-term landslide data in the Tianshui region as an example to analyze the significance of the factors affecting the gliding distance by the factor correlation analysis and revised the gliding distance induced by rainfall and earthquake estimation equation based on Schudger formula and multiple regression in this paper. The results show that elevation difference, landslide volume, landslide length-width ratio and slope can be used as the input of landslide gliding distance prediction model in Tianshui region, and the degree of influence of each factor on the gliding distance of landslide can be quantitatively described by partial regression coefficient. After the optimization of the gliding distance prediction model in

收稿日期: 2020-06-10; **修订日期:** 2020-09-12

资助项目: 国家自然科学基金项目《大数据环境下的滑坡危险性评估模型构建方法研究》(批准号:41872253)、《考虑震源机制的设定地震滑坡危险性评价研究》(批准号:41702343)、国家重点研发计划项目《基于地质云的灾害基础信息提取与大数据分析挖掘》(编号:2018YFC1505501)、《地震及震源滑坡危险性分析方法研究及算法研发》(编号:2018YFC1504601)

作者简介: 邵葆蓉(1994-),女,在读硕士生,从事水利工程及地质灾害研究。E-mail:2105180022@cugb.edu.cn

通讯作者: 孙即超(1979-),男,博士,副教授,从事地质灾害、地下水渗流及水利工程教学与研究。E-mail:sunjic@cugb.edu.cn

朱月琴(1975-),女,博士,教授级高级工程师,从事地质大数据及生态地质学理论技术方法研究。E-mail:yueqinzh@163.com

this paper, two indexes of landslide length-width ratio and slope are increased by the Schudger formula, which improves the accuracy of the model applied in the Tianshui region.

Key words: gliding distance of landslide; correlation analysis; optimization of Schudger formula; multiple regression

中国西北黄土高原地区,地质构造复杂,发育有大量褶皱、断裂,再加上极端降雨天气的影响,使该区近年来频发黄土滑坡地质灾害。如,1654 年天水 8.0 级地震诱发滑坡^[1];1718 年通渭地震,在约 3500 km² 范围内,滑坡面积达 665 km²,震区内滑坡规模巨大,占地震区面积的 90%,死伤 30000 余人^[2];2013 年 7 月 25 日,甘肃省天水市麦积区、秦州区等县区遭遇大范围罕有暴雨天气,致使天水市 7 个县(区)等多处地区发生滑坡、崩塌、泥石流等群发性地质灾害,导致 24 人死亡及 1 人失踪,造成直接经济损失达 82.75 亿元^[3]。

基于滑坡造成的损失和人们对土地资源的需求,加强滑坡潜在风险的研究成为亟待解决的难题。近年来,鲜有研究者探讨各种因素对甘肃省天水地区滑坡运动距离及其预测的有效性。而滑坡滑动距离(滑距)直接决定了滑坡冲击、堆积范围的大小,是估算滑坡受灾面积、评估滑坡潜在风险的重要参数,也是滑坡防灾减灾工作中需要重点关注的指标^[4]。滑坡滑动距离不仅受滑坡体积和落差的影响,还与滑坡运动的地质环境作用等有关。如何有效确定滑坡滑动距离,一直是滑坡研究领域的热点课题。

本次以甘肃省天水市为研究区,采用统计分析方法探讨不同类型滑坡的滑动距离主要影响因素,利用易获取的滑坡影响因子,构建滑坡滑动距离预测模型。同时,基于舒德格尔公式对滑坡滑动距离估测方程进行优化,通过构建适用于本区域的滑动距离预测模型,为研究区常见滑坡运动距离的预测、防灾、减灾提供参考依据,力求提高估测精度,以期为黄土区域滑坡滑动距离预测提供一种新思路。

1 现有滑动距离预测方法与应用

关于滑坡因子对滑坡滑动距离的影响,国内外研究者进行了广泛、深入的研究,提出了多种滑坡滑动距离的预测模型和方法,大致分为 4 类。

(1)经验统计预测模型。主要通过一定数量滑坡的滑动距离与其几何特征及诱发因素等关系的统计与分析,获得滑动距离与其影响因素之间相关关系的统计公式。如 Budetta 等^[5]发现,滑坡的水平滑动

距离与滑坡体体积有较好的正相关关系;李秀珍等^[6]对汶川 46 个典型地震滑坡进行了统计分析,并采用二元线性回归建立了滑距预测公式;Guo 等^[7]指出,岩石类型、滑动源体积和坡体过渡角是影响滑坡移动距离的主要因素,得到滑坡移动距离预测的经验模型。

(2)物理机制预测模型。主要是依据质点的动力学原理,将滑坡运动模式和机理与能量或动量守恒定律等相结合提出的一系列物理模型。如 Heim^[8]提出的雪橇模型,Scheidegger^[9]提出的摩擦模型等;张克亮^[10]采用流体连续滑动模型,以反演计算的滑动摩擦角作为视摩擦角,预测了滑坡再次发生时的滑动距离;孙即超等^[11]提出了膨胀土膨胀力模型;吴忠腾^[12]基于运动学原理推导出滑坡滑动距离预测公式;Sassa 等^[13]利用环剪试验测得视摩擦角,采用流体介质平衡方程和连续介质方程,推导出滑坡运动的微分方程,运用有限差分法,实现了滑动范围的预测。

(3)数值模拟预测模型。采用离散元等数值方法对滑坡运动的整个过程进行模拟,从而预测滑坡的滑动距离。如江晓禹等^[14]及 Hungr^[15]采用数值相似方法预测了滑坡的运动距离;Yoichi 等^[16]证明了滑坡体体积越大,滑坡体颗粒由于碰撞作用导致的能量传递就越多,运行距离就越远,合理解释了高速远程滑坡碎屑流的“尺寸效应”。

(4)模糊信息理论模型。模糊信息化处理模式针对地震滑坡取样的局限性及数据的不完整性进行优化处理,可以用来分析信息的模糊性,以便更好的帮助决策。刘悦等^[17]根据模糊信息有关理论提出黄土滑坡滑距预测的模糊信息优化处理模型;王甯等^[18]提出基于模糊信息优化处理的地震滑坡滑距预测方法。

目前基于力学、运动学、滑坡物理机制等对滑距预测展开了研究,取得了较好的成果。对于诱发因素相同,地质背景相近的滑坡,建立与其特征参数相关的滑动距离统计预测模型是切实可行的,但由于现有模型对参数需求较高,而实际中可获取参数较少,在某种程度上限制了模型的应用。黄土区

域降雨型滑坡和地震滑坡诱因不同,当下对其因素的考虑不够全面,其预测模型也有差异,应具体分析。

统计模型和信息模型预测不侧重于滑坡机理的严格数学表达,重点在于对现有滑坡与其地质环境因素和外界作用因素关系的宏观调查与统计,获得统计规律和信息量,由于其着眼的相对范围较单体滑坡大得多,故被广泛应用于城市或重要国土开发区的滑坡空间预测^[19]。采用经验统计方法不需要严格的运动力学流变学参数或细节,该方法是一个可以实现滑动距离估测相对简单的工具,故本文采用统计学方法研究因子与滑动距离之间的非线性关系,以便更好的辅助决策。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

天水市位于陇西黄土高原东南部,渭河及其支流藉河河谷地带,区域范围为东经 104° 35′ ~ 106° 44′、北纬 34° 05′ ~ 35° 10′,呈条带状展布,为典型的河谷盆地型城市,是关中平原城市群重要节点城市。天水市下辖 2 区 5 县,总面积 1.4325×10^4 km²,总人口 382.9 万。天水境内地形复杂,高低悬殊,绝大部分属黄土丘陵区,研究区黄土分布面广,覆盖较厚,加之黄土垂直节理、裂隙发育,受特殊地

形地貌、地质构造、岩土性质的控制和影响,地质环境十分脆弱,滑坡频繁发生,严重威胁人民生命财产的安全并制约城市的可持续发展^[20]。天水市是华夏文明的重要发祥地之一,素有“羲皇故里”之称,同时地处丝绸之路经济带的战略位置,对潜在滑坡危害进行有效防控,显得尤为重要^[21]。研究区地形概况及历史滑坡灾害点空间分布位置如图 1 所示。

2.2 数据来源

历史滑坡灾害点数据及环境因子数据的收集和预处理是滑坡危险范围估测的首要前提,也是影响评价结果准确度的重要因素之一。本文所用基础数据的类型、分辨率、获取方式等如表 1 所示,滑坡参数如表 2 所示。

表 1 基础数据类型及来源
Table 1 Basic data types and sources

数据名称	数据类型	空间分辨率	数据来源
数字高程 (DEM)	栅格 (.tif)	25 m * 25 m	中国地质科学院地质力学研究所
天水市历史滑坡灾害点	矢量 (.shp)	-	中国地质科学院地质力学研究所
归一化植被指数 (NDVI)	栅格 (.tif)	1 km	中国科学院资源环境信息中心

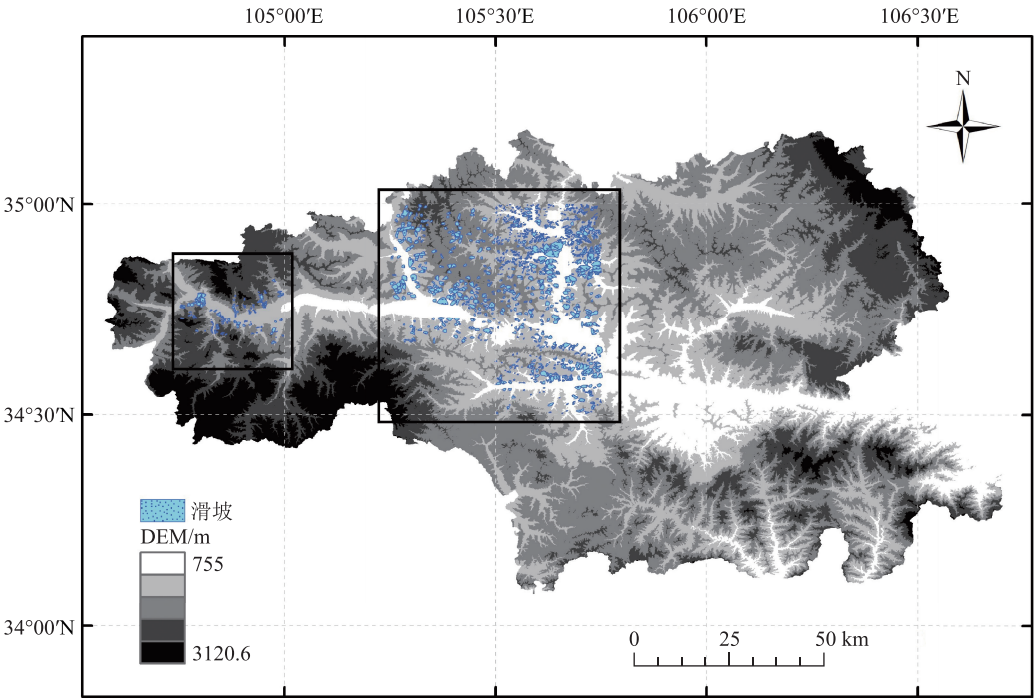


图 1 研究区滑坡灾害分布图
Fig. 1 Landslide distribution of the study area

表 2 天水市滑坡参数统计

Table 2 Statistics of landslide parameters in Tianshui region

序号	诱因	剖面形态	规模	滑坡体积/m ³	前后缘高差/m	植被覆盖度	坡度/°	滑动距离/m
1	地震	凹形	大	5181684	254.23	0.80	1.17	713.45
2	降雨	直线	小	2811160	112.34	0.80	1.67	412.84
3	降雨	直线	小	3554304	89.94	0.70	4.15	324.91
4	降雨	复合	大	557351	87.10	0.70	4.44	262.28
5	降雨	复合	大	557351	71.33	0.40	5.86	256.02
6	降雨	直线	小	600471.6	55.75	0.70	5.86	182.97
7	降雨	直线	小	600471.6	42.30	0.70	5.87	255.14
8	地震	直线	大	1330968	169.17	0.70	7.66	425.62
9	降雨	凹形	小	49581.6	180.84	0.40	9.58	401.49
10	地震	凹形	小	49581.6	201.24	0.40	9.96	470.21
11	降雨	直线	小	878660	134.56	0.40	10.28	407.53
12	地震	凹形	中	4342725	139.28	0.40	10.37	421.08
13	降雨	凹形	大	787000	78.82	0.40	11.06	258.25
14	降雨	直线	大	5547253	85.57	0.80	11.77	245.12
15	降雨	直线	大	5547253	130.44	0.70	12.01	346.69
...	...	...	...	...	...	...	...	...
192	降雨	直线	中	84419.2	137.75	0.40	12.45	273.26

3 滑坡影响因素相关性分析

为了分析各因子对滑坡滑动距离的影响,对天水市 192 个滑坡体进行了综合分析。本次研究认定相关程度高的因子为主要影响因素,相关程度低的因子为次要因子,相关程度极低的视为无关因子。滑坡要素关系示意图如图 2 所示。

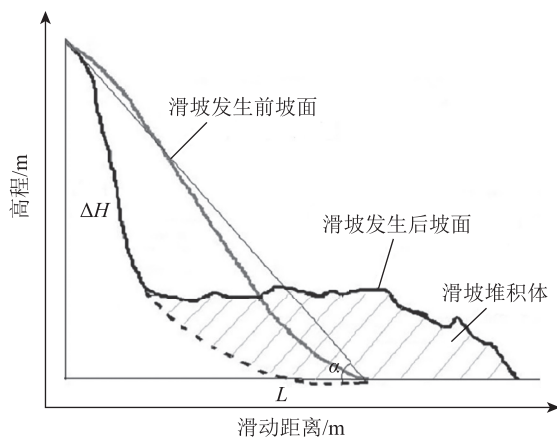
图 2 滑坡要素关系图^[22]

Fig. 2 The relationship of key elements of landslide

研究区自变量包括地学变量和环境变量。根据滑坡滑动距离与各因子的相关性并参考相关文献^[22-29],提取滑坡前后缘高差、滑坡体积、滑坡长宽比、滑坡平面曲率、植被覆盖度、斜坡坡度等,进行初步因子分析,为进一步确定模型变量奠定基础,分析结果如图 3 所示。

(1) 滑坡前后缘高差(ΔH)

滑坡前后缘高差控制了滑坡质心的位置,是滑坡势能大小的体现^[4]。将滑坡高差与滑坡滑动距离进行统计,分析滑坡水平滑距与滑坡前后缘高差的相关性。结果发现,在 0.05 检验水平上滑坡水平滑距与高差的皮尔逊相关系数为 0.62,相关程度较高。表明 ΔH 是影响天水市黄土地区滑坡滑动能力的主要因素之一。

(2) 滑坡体积(V)

前人已从滑坡体积(V)入手研究其与水平滑动距离相关性^[23]。滑坡体积等因素可以影响滑坡运动的机械能,其值越大,滑坡滑行的总能量越大^[6]。本文将滑坡体积取对数与滑坡滑动距离进行统计,分析滑坡滑距与滑坡体积的相关性。结果发现,在 0.05 检验水平上滑坡水平滑距与体积对数的相关

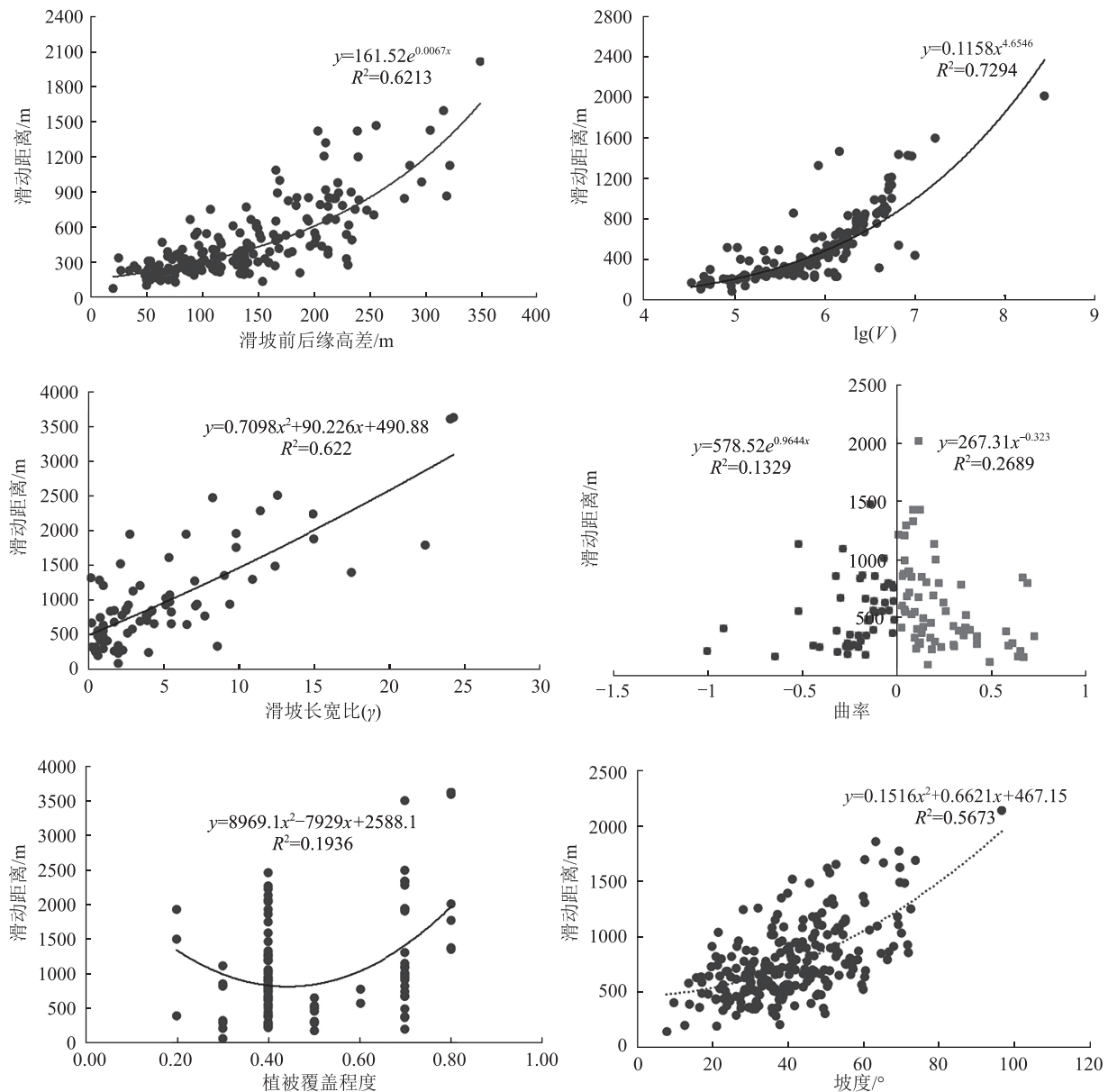


图 3 各因子与滑动距离相关性

Fig. 3 Correlation of factor and slip distance

系数为 0.73, 相关程度高, 说明滑坡体积是影响天水市滑坡滑动能力的影响因素。

(3) 坡体长宽比(γ)

滑坡运动过程中, 不同形态的等体积滑坡能量耗散速度不一样。宽展型坡体能量消散快, 不利于滑坡长距离运动; 而狭长型滑坡则能较长时间保持能量集中, 有利于滑动过程中的能量持续供给^[4]。为分析不同平面形态坡体对滑动水平距离的影响, 此处引入长宽比(γ)作为滑坡平面形态的表征因素之一。结果显示, 滑坡滑距和滑坡长宽比的相关系

数为 0.62, 在 0.05 检验水平上相关性显著。表明坡体平面形态(长宽比)对滑坡滑动能力具有影响, 长宽比更能够明确指示滑移距离的特征, 可用此项参数作为模型输入因子。

(4) 滑坡平面曲率(C)

平面曲率描述的是地形在水平方向的特征, 在数值上等于某栅格处坡向在坡度上的变化^[24]。由于黄土自身的湿陷性, 加之地震等外营力及降雨导致土体本身自重, 滑动距离应该依赖于滑坡表面起伏状况。为进一步表征滑坡平面曲率, 本次研究尝

试引入曲率,分析不同曲率的滑坡对滑动水平距离的影响。曲率小于 0 为凹坡,(0,1)为凸坡,0 为平面。采用双尾显著性检验,结果表明,曲率小于 0 (凹坡)时,滑坡曲率对滑动距离相关性检验系数为 0.13;曲率大于 0 (凸坡)时,滑坡曲率对滑动距离相关性检验系数为 0.27,相关性较低。故认为曲率对滑动距离有一定影响,但不是天水市黄土滑坡水平滑动距离的主要影响因素。

(5) 植被覆盖程度(P)

植被的不同覆盖程度会对滑坡活动产生一系列的影响。目前植被对斜坡稳定性的影响存在诸多争议。一方面,目前被广泛接受的理论为,强降雨作用下植被的根系可以对滑坡土体起到加固作用,提高土体抗剪程度,同时蒸腾作用消耗部分土体水分,减小土体内孔隙水压力,地表植被覆盖可增加地表粗糙度,增大滑坡体滑动摩擦阻力;另一方面,则是越来越多学者注意到在一些情况下,植被反而会促进滑坡的发生^[28]。因此,本次研究拟引入植被覆盖因子,以探究不同类型植被区滑坡的影响情况。通过斯皮尔曼相关系数检验,相关系数为 0.19,表明植被覆盖度对滑坡滑动距离有一定影响,但不作为模型输入因子。

(6) 斜坡坡度(α)

为了尽量降低统计结果的离散性,在统计滑坡滑距与斜坡原始坡度相关性时,采用分级统计区间坡度均值的方法,将坡度按 5°一个分析区间进行分级,统计每个坡度级别内滑坡水平滑距的平均值和斜坡原始坡度均值。利用 SPSS 统计分析发现滑坡相关性为 0.56。表明斜坡坡度对滑坡滑动距离有一定影响,可作为模型输入因子。

4 基于多元回归的滑动距离预测模型改进优化

根据相关文献^[30]和资料,天水市黄土地区滑坡类型主要为浅层黄土滑坡和浅层黄土-泥岩滑坡 2 种。考虑到本次实际调查数据以浅层黄土滑坡为主,故暂不作区分。本文首先利用 SPSS 对滑坡影响因子进行相关性分析,确定构建模型的因子。然后把确定下来的指标因子作为自变量 X,滑坡滑动距离作为因变量 Y。将数据导入 MATLAB 做多元回归分析,得到各因子的回归系数,再利用皮尔逊相关系数法对各因子进行相关性检验,通过检验的,

确定为回归方程的系数。

4.1 多元回归模型

多元线性回归模型是研究一个因变量和多个自变量间的线性关系的方法,在仅考虑各因素对水平滑动距离线性作用条件下,即可运用多元线性回归模型对各因素对滑坡水平滑动距离的影响程度进行定量描述;在考虑非线性影响条件下,通过变量代换,将非线性项线性化后,仍可运用多元线性回归模型定量描述各因素对滑坡水平滑动距离影响程度,即应用多元回归模型对滑坡水平滑动距离进行定量描述是合适的。

对于具有 i 个解释变量的多元线性回归模型,其一般形式表述如下^[31]:

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \cdots + \beta_k x_{ki} + e_i \quad (1)$$

式中: y_i 为因变量; α 为截距; β_k 为偏回归系数,表示其他变量不变的情况下,第 i 个变量变化一个单位所引起的因变量变化值; e_i 为残差, $e_i \sim N(0, \sigma^2)$ 。设 β 的估计值为 $\hat{\beta}(b_0, b_1, \cdots, b_k)$, y 的估计值为 $\hat{y}(\hat{y}_0, \hat{y}_1, \cdots, \hat{y}_k)$, 根据最小二乘法,得出多元线性回归模型 $\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_k x_k$ 。

4.2 建模因子选取

为使选择的因子更合理,利用皮尔逊相关系数法对各因子间的相关性进行分析,筛选出关联较大的因子用来构建模型。一般情况下, $0.8 < r \leq 1.0$ 为极强相关、 $0.6 < r \leq 0.8$ 为强相关、 $0.4 < r \leq 0.6$ 为中等程度相关、 $0.2 < r \leq 0.4$ 为弱相关、 $0.0 \leq r \leq 0.2$ 为极弱相关或无相关。由前述可知,滑坡前后缘高差(ΔH)、滑坡体积(V)、坡体长宽比(γ)和斜坡坡度(α)与滑坡滑动距离强相关。因此,剔除弱相关因子,保留滑坡前后缘高差(ΔH)、滑坡体积(V)和坡体长宽比(γ)和斜坡坡度(α)4 个因子作为最终的评价指标,各因子间相关系数矩阵如表 3 所示。由此可见,影响因子之间不存在共线性。

表 3 影响因子间的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix between impact factors

因子	ΔH	$\lg(V)$	α	γ
ΔH	1.000	-0.005	0.038	-0.262
$\lg(V)$	-0.005	1.000	0.010	-0.073
α	0.038	0.010	1.000	-0.021
γ	-0.262	-0.073	-0.021	1.000

4.3 模型改进优化

本文在舒德格尔公式 $\lg\left(\frac{H}{L}\right)=a\lg(V)+b$ 的基础上,基于多元回归进行滑动距离预测方程的改进。改进后的公式为

$$\lg\left(\frac{H}{L}\right)=a\lg(V)+b\times\alpha+c\times\gamma+d \tag{2}$$

式中: H 为滑坡滑动高差,单位 m ; V 为滑坡体积, m^3 ; α 为斜坡坡度, $^\circ$; γ 为坡体长宽比,即坡体形态; a, b, c, d 分别为模型参数。

基于天水市滑坡资料,此次选取 134 个样本(本文取 70% 的样本构建模型)用来建模,基于 MATLAB 和 SPSS,分别对降雨诱发滑坡(86 个)和地震诱发滑坡(48 个)拟合,得到优化方程为式(3)。模型残差见图 4。

降雨诱发 $\lg\left(\frac{H}{L}\right)=-0.128\lg(V)-0.006\alpha-0.016\gamma+0.286$

地震诱发 $\lg\left(\frac{H}{L}\right)=-0.074\lg(V)-0.013\gamma+0.9 \tag{3}$

经方差分析及显著性检验可得:降雨诱发滑坡德宾-沃森检验 $(D-W)=1.330$,数据满足独立性, $F=8.094>F_{0.05}$ (约 2.61);地震诱发滑坡德宾-沃森检验 $(D-W)=2.077$,数据满足独立性,

表 4 多元回归分析输出
Table 4 Multiple regression analysis output

滑坡类型	模型参数	系数	标准差	显著性(P 值)
降雨诱发	(常量)	0.286	0.286	0.000
	a	-0.128	0.047	0.008
	b	-0.006	0.002	0.005
	c	-0.016	0.005	0.004
地震诱发	(常量)	0.900	0.179	0.001
	a	-0.074	0.031	0.030
	c	-0.013	0.021	0.002

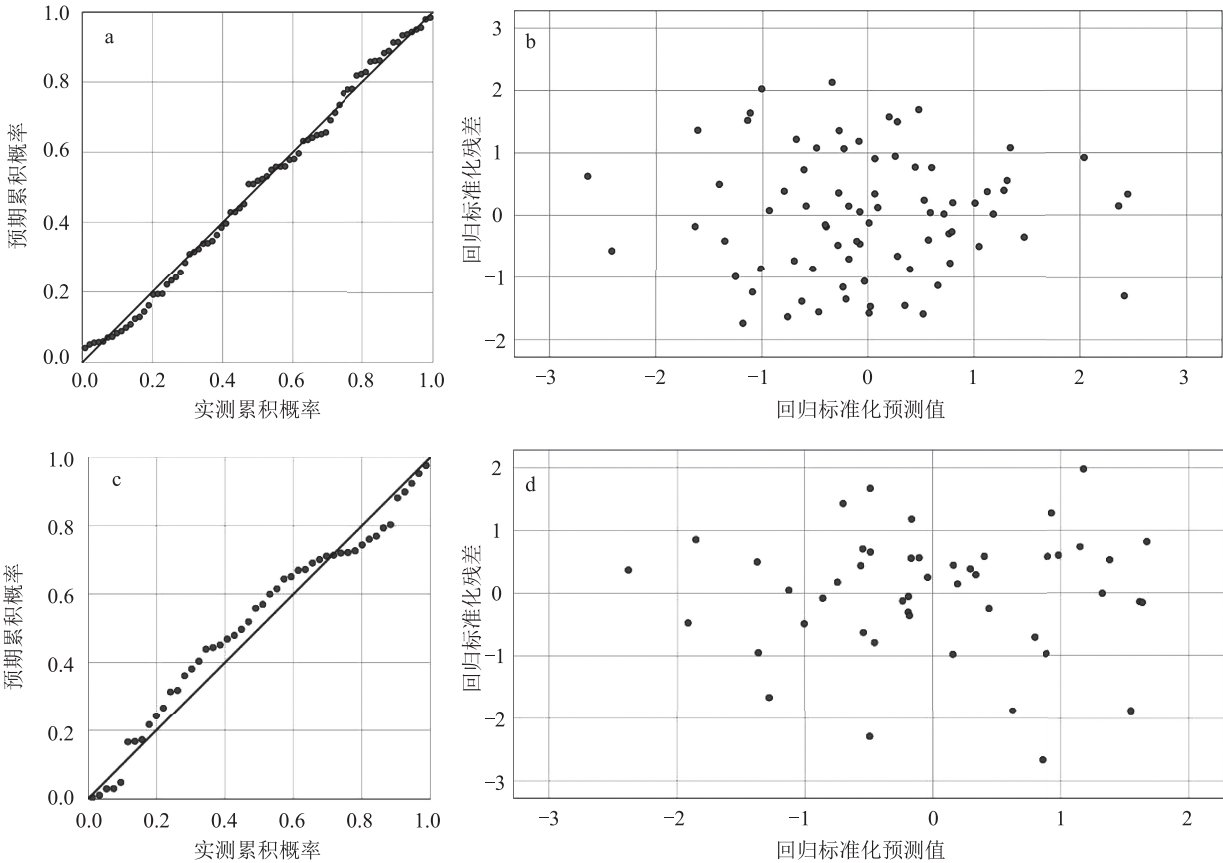


图 4 降雨诱发滑坡(a、b)和地震诱发滑坡(c、d)模型残差
Fig. 4 The model residuals of rainfall-induced landslides(a,b)and earthquake-induced landslides(c,d)
a、c—回归标准化残差正态 P-P 图;b、d—回归标准化预测值散点图

$F=19.51>F_{0.05}$ (约 2.61)。除常数项外, P 均小于 0.05, 模型具有统计学意义, 说明在 0.05 检验水平上, 线性回归模型有显著意义。

运用 SPSS 软件进行模型拟合度检验可得: 降雨诱发滑坡模型的 R^2 为 0.914, 调整 R^2 为 0.901; 地震诱发滑坡模型的 R^2 为 0.778, 调整 R^2 为 0.773, 说明预测模型与预测指标之间呈较好正相关关系。又因 R^2 表明了模型对样本数据的拟合程度, 其值越高说明模型对样本拟合越好, 表明该模型的拟合度较好, 较可靠。

图 4-a、c 列出了模型标准化残差的标准 P-P 图, 可以看出, 滑坡水平滑距预测模型标准化残差对于正态分布的服从较好。图 4-b、d 列出了模型预测值与标准化残差散点图, 数据点基本全部在 3 个标准差之内, 说明总体效果较好, 无异常点, 数据基本在 0 上下对称分布, 分布较均匀。故判定该回归方程有效, 可用于滑坡滑动距离估侧。

5 模型验证与分析

5.1 滑动距离预测优化模型验证

在以往的研究中, 选择验证样本时, 难免具有一定的主观性。为了使建立的回归模型具有更好的稳定性, 选取研究区内实际已发生滑坡但并未参与建模的 58 个滑坡信息 (约占总个数的 30%) 作为验证样本, 本文利用优化后模型和舒德格尔公式计算的结果, 与实际滑动距离进行比较, 采用直接结果比对与纳什系数评价 2 种形式, 对模型结果的精度和可信度进行验证 (图 5、图 6)。

(1) 优化方程精度检验结果

结果显示, 对于降雨诱发滑坡, 优化公式计算结果的 RMSE 为 5.126, 舒德格尔公式计算结果的 RMSE 为 9.579; 对于地震诱发滑坡, 优化公式计算结果的 RMSE 为 8.845, 舒德格尔公式计算结果的 RMSE 为 12.501。总体上, 本文优化后的公式对降

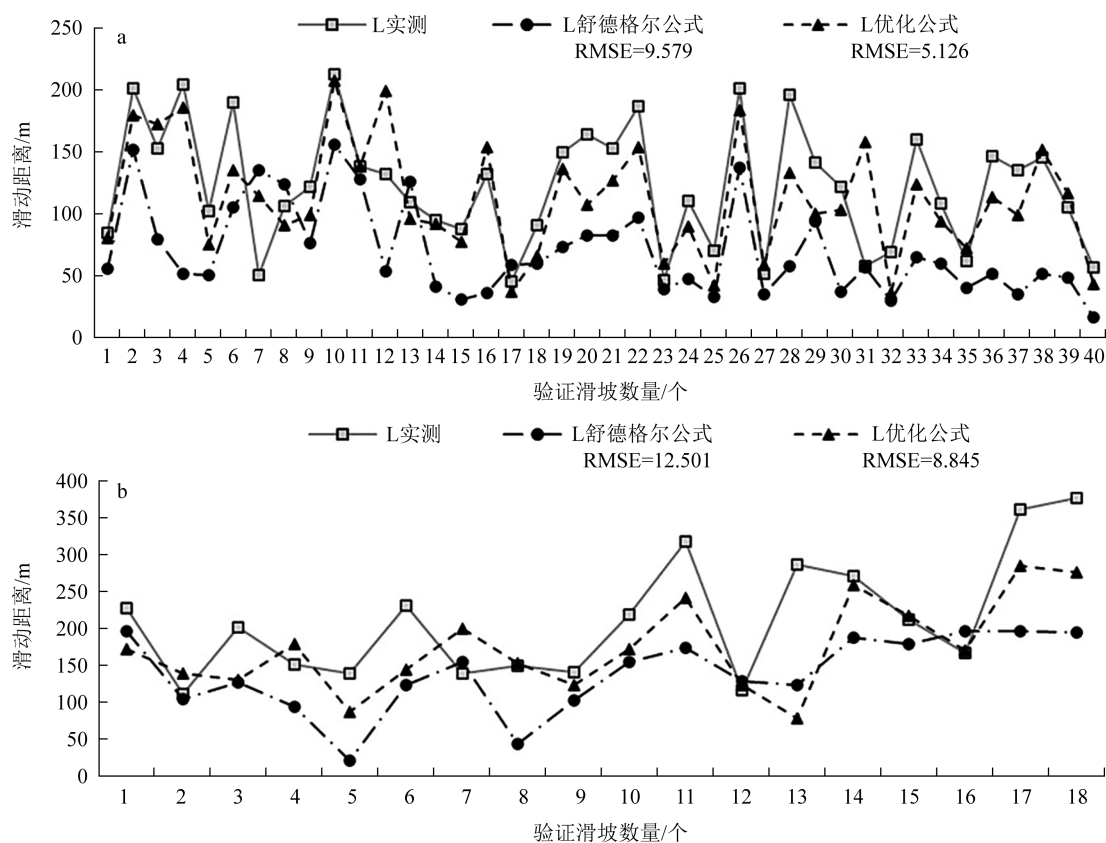


图 5 降雨诱发滑坡(a)和地震诱发滑坡(b)验证结果对比

Fig. 5 Comparison of verification results between rainfall-induced landslides(a) and earthquake-induced landslides(b)

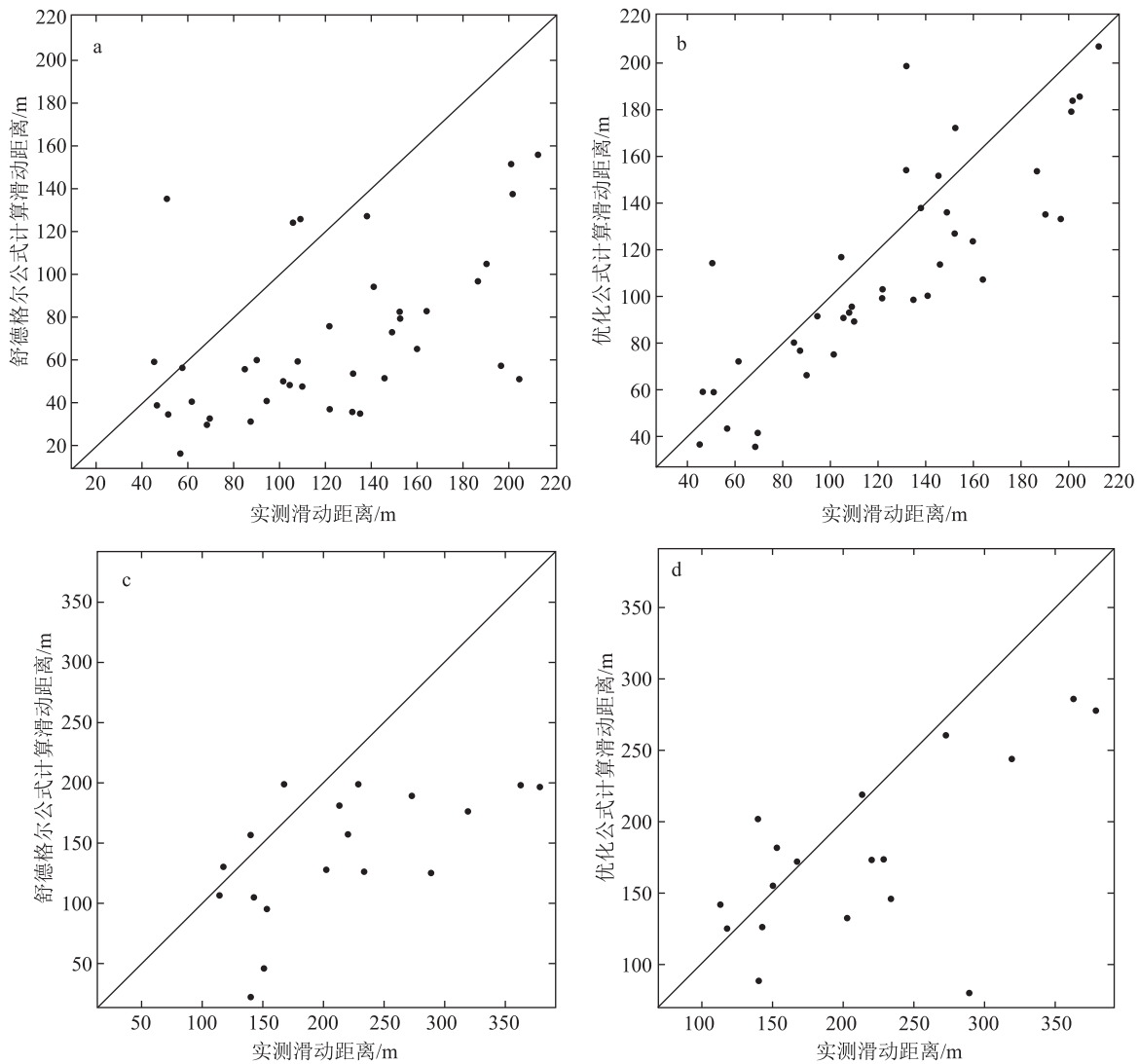


图 6 降雨诱发滑坡(a,b)和地震诱发滑坡(c,d)模型可信度检验

Fig. 6 Reliability test of rainfall-induced landslides(a,b) and earthquake-induced landslides(c,d)

a、c—舒德格尔公式计算的滑动距离;b、d—优化公式计算的滑动距离

雨、地震诱发滑坡滑动距离的估测结果精度均优于舒德格尔公式,同时优化公式对降雨诱发滑坡的验证结果较地震诱发滑坡好,表明该优化公式对降雨诱发滑坡的计算精度更高。

(2) 模型质量评价

本文引入纳什系数 NSE(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)评价模型质量,一般用以验证水文模型模拟结果的好坏,也可以用于其他模型^[32]。公式如下:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (4)$$

式中: Q_0 为观测值; Q_m 为模拟值; Q^t 为第 t 时刻的某个值; $\bar{Q}_0$ 为观测值的总平均。

E 取值为负无穷至 1, E 接近 1,表示模型质量好,模型可信度高; E 接近 0,表示模拟结果接近观测值的平均值水平,即总体结果可信,但过程模拟误差大; E 远远小于 0,说明模型不可信。

对天水地区滑坡数据分别用舒德格尔公式和本文优化后的公式 2 种方法进行计算,得到降雨诱发滑坡舒德格尔公式 E 值为 0.51,优化后公式 E 值为 0.72;地震诱发滑坡舒德格尔公式 E 值为 0.32,优化后公式 E 值为 0.47。表明总体上模型质量较好,但仍有提升的余地,该优化模型对降雨诱发滑

坡的模拟结果可信度高于地震诱发滑坡。

5.2 结果分析

本文将天水地区未参与构建模型的58个滑坡数据分别带入该优化方程和舒德格尔公式,将所得滑动距离估测值与实际滑动距离进行比较,并采用纳什效率系数对模型可信度进行检验,结果显示优化公式精度和可信度均优于舒德格尔公式,总体上模型质量较好,该优化公式对降雨诱发的滑坡类型的滑动距离估测结果较地震诱发滑坡好,可能由于地震诱发滑坡受地质内力等不可控因素影响,相比之下降雨诱因较易探索其阈值和可控因子。模型总体上仍有提升的余地。

综合来看,舒德格尔公式中的参数与天水地区滑坡的地质条件、发育规律有较大的偏差,预测精度较低;本文提出的优化模型,对于天水区域滑坡滑动距离具有较强的针对性。因此,采用此多元回归模型对潜在危险滑坡进行滑动距离预测是合理的。

6 讨论

本次研究利用统计分析方法,基于多元回归提出了滑动距离(危害范围)预测优化模型。经过模型检验和实例验证,该模型针对天水地区滑坡具有较高的精度。同时,模型中的参数通过现场调查容易获得,且简单、易行并具有较好的适用性和实用性,可对天水地区潜在危险型滑坡危害范围进行估测。

滑坡灾害是由降水、自然因素、人为因素、人文因素等共同形成的复杂系统,具有显著的非线性特征和不确定性。本次研究暂采用确定性的非线性回归方法,结果检验时可能存在一定偏差。若要验证多元回归模型分别对黄土区域地震、降雨等不同滑坡类型是否更具适用性,还需要在以后的工作中不断扩大样本量,进一步完善。今后的研究中,会考虑更多的影响因子,使用更大数据量的数据,考虑超越概率等不确定性统计方法,得到更精确的评价结果。

7 结论

为定量分析各因子对天水地区滑坡滑动距离的影响,本文根据研究区滑坡数据,综合考虑诱发滑坡灾害的致灾因子与孕灾环境,将可量化的因

子,应用多元线性回归模型对滑坡滑动距离影响因素进行了显著性分析,基于舒德格尔公式,得到优化后的滑动距离预测方程。利用历史滑坡数据模型结果进行了验证,并引入纳什系数对模型可信度进行检验,表明优化的舒德格尔公式提高了舒德格尔公式应用于天水地区的准确度与可靠度。通过研究得出的主要结论如下。

(1)因子相关性分析适用于滑坡滑动距离影响因素显著性分析,天水地区降雨诱发滑坡滑动距离影响因素主要是高差、滑坡体积、滑坡平面曲率和滑坡坡度,地震诱发滑坡滑动距离影响因素主要是高差、滑坡体积和滑坡平面曲率,利用相关性分析进行影响因子的确定,在某种程度上也降低了主观因素对选择权重的影响。

(2)在舒德格尔公式基础上,基于多元回归就天水地区滑坡建立滑动距离估测优化模型,部分因子通过线性变换,将非线性项线性化后,能够反映各因素对滑坡滑动距离的非线性影响。各因素对滑动距离的影响程度可用偏回归系数定量描述。

(3)与舒德格式公式相比,对天水区域,此次拟合的优化模型对天水地区更具适用性。可将此方法进一步推广到具有类似滑坡发育特征的较广泛的黄土区域,即可在已有滑坡资料的基础上,预测该区不稳定斜坡体可能发生的滑动距离,预测其致灾范围和损失。

致谢:本文滑坡数据由中国地质科学院地质力学所提供,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]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.
- [2]彭达,杨顺,李孝波.甘肃通渭县黄土地震滑坡分布特征及发育机理[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(3): 31-38.
- [3]田尤,杨为民,黄晓,等.天水市麦积区幅黄土滑坡发育分布特征及其孕灾因素分析[J].地质力学学报,2016,22(1): 25-38.
- [4]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及预测[J].人民长江,2017,48(14): 45-49,54.
- [5]Budetta P, De Riso R. The mobility of some debris flows in pyroclastic deposits of the northwestern Campanian region (southern Italy) [J]. Bull. Eng. Geol. Environ., 2004, 63: 293-302.
- [6]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.
- [7]Guo D, Masanori H, He C, et al. An empirical model for landslide travel

- distance prediction in Wenchuan earthquake area [J]. Landslides, 2014, 11(2): 281-291.
- [8] Heim A. Bergsturz und Menschenleben [M]. Zütich: Naturforschenden Gesellschaft, 1932.
- [9] Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. Rock Mechanics, 1973, 5(4): 231-236.
- [10] 张克亮. 贵州江口县土司城滑坡成因分析及滑距预测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3): 29-33.
- [11] 孙即超, 王光谦, 董希斌, 等. 膨胀土膨胀模型及其反演 [J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2055-2059.
- [12] 吴钟腾. 基于运动学原理的滑坡运动距离预测方法研究 [C] // 中国地质学会工程地质专业委员会. 2016 年全国工程地质学术年会论文集, 2016: 690-697.
- [13] Sassa K, Fukuoka H, Wang G H, Naohide Ishikawa. Undrained dynamic - loading ring - shear apparatus and its application to landslide dynamics [J]. Landslides, 2004, 1(1): 7-19.
- [14] 江晓禹, 乔建平. 典型滑坡危险性的接触力学预测模型 [J]. 工程力学, 2006, 23(8): 106-109.
- [15] Hungr O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and Avalanches [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32: 610-623.
- [16] Yoichi O, Hikaru K, Toshiaki S. The effects of rock fall volume on run out distance [J]. Engineering Geology, 2000, 58: 109-124.
- [17] 刘悦, 黄强兵. 一种黄土滑坡滑距预测模型 [J]. 灾害学, 2001, (3): 7-12.
- [18] 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.
- [19] 殷坤龙, 晏同珍. 滑坡预测及相关模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, (1): 1-8.
- [20] Wang L, Wang N, Wang Q. Prediction of sliding distance of seismic landslides in Loess Plateau, China [J]. Japanese Geotechnical Society, 2016, 32(2): 1177-1182.
- [21] 翟张辉. 天水市大沟滑坡-泥石流运动过程模拟分析 [C] // 中国地质学会、中国地质学会工程地质专业委员会. 2017 年全国工程地质学术年会论文集, 2017: 408-414.
- [22] 王念秦, 张倬元, 王家鼎. 一种典型黄土滑坡的滑距预测方法 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2003, (1): 111-114.
- [23] 孟华君, 姜元俊, 张树轩, 等. 汶川地震前后都江堰山区滑坡滑动距离影响因素变化分析 [J]. 地质力学学报, 2017, 23(6): 904-913.
- [24] 黄发明, 殷坤龙, 蒋水华, 等. 基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 156-176.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 彭建兵, 吴迪, 段钊, 等. 典型人类工程活动诱发黄土滑坡灾害特征与致灾机理 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 971-980.
- [28] 黄恒伟. 云南昌宁“9·16”群发性浅层滑坡与植被关系研究 [D]. 昆明理工大学硕士学位论文, 2017.
- [29] 谭龙, 陈冠, 曾润强, 等. 人工神经网络在滑坡敏感性评价中的应用 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 15-20.
- [30] 张茂省, 校培喜, 魏兴丽, 等. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害 [M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-187.
- [31] 谭楚琰. 多元线性回归模型分析 [J]. 现代商业, 2019, (2): 161-162.
- [32] 桑非凡, 宋孝玉. 黄土高原沟壑区土壤水分入渗模型适用性探讨 [J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(S1): 183-185.