

杨顺,常晁瑜,李孝波,等.基于 Logistic 回归模型的黄土斜坡地震稳定性快速评判方法[J].地震工程学报,2020,42(2):512-516.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.512

YANG Shun, CHANG Chaoyu, LI Xiaobo, et al. Quick Assessment of the Seismic Stability of Loess Slopes Based on a Logistic Regression Model [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 512-516. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.512

基于 Logistic 回归模型的黄土斜坡地震 稳定性快速评判方法

杨 顺¹, 常晁瑜², 李孝波², 韩 昕²

(1. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 黄土地震滑坡是陇西地区黄土丘陵地区的主要地质灾害之一, 快速评价黄土斜坡的地震稳定性是陇西地区工程建设规划选址以及地震应急救援的需求。在野外调查及遥感解译获取坡高 H 、坡角 α 及估计烈度值 I 的基础上, 运用逻辑回归分析方法, 拟合得到研究区黄土斜坡地震稳定性的快速评价经验公式, 经回判、判别校验及实例判别应用证明, 该经验公式适用于快速评估陇西地区内黄土斜坡的地震稳定性。该方法提出的方法对黄土地区城市建设和地震应急救援有重要的应用价值。

关键词: Logistic 回归模型; 黄土斜坡; 地震稳定性; 快速评价

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)02-0512-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.512

Quick Assessment of the Seismic Stability of Loess Slopes Based on a Logistic Regression Model

YANG Shun¹, CHANG Chaoyu², LI Xiaobo², HAN Xin²

(1. Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China;

2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

Abstract: Seismic loess landslides are one of the main geological disasters in the Longxi area. A method to quickly evaluate seismic stability of loess slopes is necessary for large-scale site selection and earthquake emergency response in the study region. On the basis of a field survey and remote sensing interpretation, the slope height H , slope angle α , and estimated intensity value I , were obtained. Using the logistic regression analysis method, an empirical formula for quickly evaluating the seismic stability of loess slopes was obtained. Through back-judgment, validations, and application in real cases, it can be concluded that the formula proposed in this study is suitable for quickly evaluating the seismic stability of loess slopes in the Longxi area.

Keywords: logistic regression model; loess slope; seismic stability; quick assessment

0 引言

陇西地区黄土斜坡发育,地震多发。由地震诱发的黄土地震滑坡是区内主要的地震地质灾害,严重威胁着当地居民的生命财产安全,也是工程建设中必经防范的灾害问题。因此,提出一套快速评判区内黄土斜坡地震稳定性的评判方法是陇西地区经济社会发展、工程建设以及震后应急救援的必然需求。

逻辑回归分析是一种处理多因素复杂变量的多元统计分析方法,在医学、生物学和社会学等研究领域广泛应用。斜坡稳定的状态通常分为“滑动”和“未滑动”两种情况,若规定判定结果中“滑动”为 1,“未滑动”为 0,则滑坡稳定性判别可归结为二元变量的回归问题。斜坡地震稳定性评价时,由于受影响因素的耦合影响以及地震发生的不确定性,用稳定性系数表达的稳定(未滑动)与不稳定(滑动)尚未包含滑动的可能性,没有给出危险性的概率表达。逻辑回归分析能够较好地处理复杂的、非连续性问题,适合预测滑坡滑动与否的二元分类变量问题,并能给出滑动的概率表达。同时,逻辑回归分析对自变量的要求较为灵活,自然变量可以为连续变量、顺序变量及名义变量等,能够较好地消除单因素离散度过大对预测结果造成失真的影响。

逻辑回归作为一种概率评价方法主要应用于金融行业。国内逻辑回归方法在地质灾害、斜坡稳定性分析中的最早应用于编制地质灾害区划图。王卫东等^[1]根据地理信息系统(GIS),以滑坡发生确定性系数(CF)和 Logistic 回归模型编制贵州省滑坡灾害区划图,通过统计回归分析划分地质灾害危险区域。陶舒等^[2]运用逻辑回归模型对汶川县北部地区次生滑坡灾害敏感性进行了评价。方苗等^[3]根据逻辑回归模型在 Arc map 中绘制了兰州市滑坡灾害敏感性区划图,其与实际的滑坡分布情况基本吻合。王进等^[4]采用主客观权重线性组合(WLC)模型并结合确定性系数的逻辑回归模型(LR)分析了研究区内各致灾因子与滑坡发生的相关性。谭龙等^[5]运用二元逻辑回归模型对白龙江流域滑坡的敏感性进行了评价,结果表明模型能够对该区域滑坡敏感性进行评价。饶运章等^[6]应用 Logistic 回归模型确定滑坡影响因子权重,并用模糊数学方法综合评判滑坡稳定性。本文依据大量的野外调查数据,通过运用逻辑回归方法,回归拟合黄土斜坡地震稳

定性快速评价公式,经回判校验及实例验证,该公式判别准确率高,适用于陇西地区黄土斜坡地震稳定性的快速评价。本文所提的快速评估方法可为今后这一地区的工程建设选址提供基础资参考,且对震后地震应急救援有着有效的指导及参考价值。

1 回归模型及稳定性评价指标

1.1 回归模型

若设 P 为发生滑坡的概率,取值范围为 $[0, 1]$,则 $(1-P)$ 为不发生滑坡的概率,将两者的比值取自然对数并令 $Z = \ln[P/(1-P)]$,将其作为因变量,将影响因子指标 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 作为自变量,则可建立线性影响因子与 Z 的回归方程:

$$Z = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

显然:

$$P = \frac{\exp^{(Z)}}{1 + \exp^{(Z)}} = \frac{\exp^{(b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n)}}{1 + \exp^{(b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n)}} \quad (2)$$

式中: $b_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为回归常数。

逻辑回归的基本原理是利用已知统计数据建立由式(1)和式(2)所表达的逻辑回归模型,将自变量与因变量之间的非线性关系转变为自变量与逻辑之间的线性关系,并通过参数估计求得自变量的系数。基于逻辑回归分析的黄土斜坡地震稳定性方法给出了斜坡坡高、坡角、地震烈度与失稳滑动概率之间的对应关系。自变量变化时不是直接影响概率结果,而是表示对逻辑计算结果的改变程度,这一方法消除了单一因素出现奇异值时对结果造成的误判影响。

1.2 稳定性快速评价指标

斜坡稳定性受其斜坡地形地貌、岩性组成、水文地质条件及地震动强度等多因素的影响,评价一个斜坡是否稳定存在着诸多不确定性及困难。在大面积场地勘选和地震应急救援中,有时需对斜坡的稳定性进行快速评估。能够通过现场调查、地形图或遥感影像快速获取的评价指标是开展区域斜坡地震稳定性快速评判的前提。斜坡的坡高 H 、坡脚 A 及其所处场区的估计烈度值 I 是黄土斜坡的基本地质模型参数,同时也是影响斜坡稳定的重要指标。该指标可通过现场调查、空间数据提取及规范查询等手段快速获取,因此可作为快速评判区域黄土斜坡稳定性的评价指标。

2 黄土斜坡地震稳定性快速评价方法

2.1 数据来源

本文回归分析数据主要来源于野外实测,部分稳定斜坡数据来源于遥感解译,共统计数据 708 组,其中 617 组数据用于回归拟合判别公式,91 组用来验证公式的准确性^[7]。野外测量工具采用 360B 激

光测距仪,测距仪能够较为精确测量斜坡坡高及坡角。遥感解译主要根据读取坡顶、坡底海拔高来确定斜坡坡高,测量两点的直线距离作为坡长,通过反余弦函数计算求得斜坡坡角。遥感解译是一种快速、高效的统计手段,解译所得坡高、坡脚数据野外实测数据误差较小,如表 1 和 2 所列,基本适用于获取本文公式所需数据的精度。

表 1 坡高 H 野外实测与遥感解译误差分析表

Table 1 The error analysis table of slope height H by field measurement and RS interpretation											
坡高 H 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
野外实测	101	67	92	98	125	144	110	99	105	71	88
遥感解译	100	65	88	100	130	140	110	102	110	75	85
误差差值	1	2	4	2	5	4	0	3	5	4	3

表 2 坡角 α 野外实测与遥感解译误差分析表

Table 2 The error analysis table of slope angle α by field measurement and RS interpretation											
坡角 α 编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
野外实测	12°	15°	15°	16°	18°	16°	14°	15°	16°	17°	13°
遥感解译	11.3°	15°	15.2°	15°	17.5°	17.6°	13°	15°	15.7°	16°	14°
误差差值	0.7°	0°	0.2°	1°	0.5°	1.6°	1°	0°	0.3°	1°	1°

2.2 基于 Logistic 的黄土斜坡地震稳定性评价公式

本文运用统计分析软件 SPSS(Statistical Product and Service Solutions)中的回归分析模块实现逻辑回归模型中自变量系数的计算。式(3)是以坡高、坡角、烈度三个常规参数为评价指标的黄土斜坡地震稳定性评价逻辑回归公式对 617 组斜坡调查数据进行回归分析:

$$P=\frac{1}{1+e^{-z}} \tag{3}$$

式中: P 为斜坡发生滑动的概率,本文规定,若 $P\geq 0.5$,则判定为滑动, $P<0.5$ 时,则判定为稳定; z 为稳定性评价指数,由调查数据回归给出,如式(4)所示:

$$z=-22.880\ 5+0.003\ 858H+1.319\ 32\alpha+0.875\ 739I \tag{4}$$

式中: z 的意义同式(3); H 为斜坡坡高(m); α 为斜坡坡脚(°); I 为斜坡所处地区地震烈度。将式(4)代入式(3)得:

$$P=\frac{1}{1+e^{-(-22.880\ 5+0.003\ 858H+1.319\ 32\alpha+0.875\ 739I)}} \tag{5}$$

式(5)是由研究区黄土斜坡实测数据资料直接确定的,将地震的不确定性及各影响因素间的相互作用作为隐含量给予考虑。在对研究区进行区域性斜坡稳定性预测或地震应急救援过程中,通过直接测量坡高、坡角及估计地震烈度,利用式(5)快速评

价区内黄土斜坡的地震稳定性。区内未滑斜坡坡角绝大部分小于 10°,但区内仍发育有坡角为 20°左右的稳定斜坡,此类斜坡由于黄土覆盖厚度较薄,从而未发育滑坡^[7]。因此,根据研究区地质条件及区内黄土地震滑坡分布特征,本文给出判别公式的适用条件是:(1)仅限于研究区内的黄土丘陵地区;(2)黄土斜坡黄土覆盖厚度大于 10 m;(3)评价时应结合区内黄土地震滑坡的空间区域分布特征^[7]。

2.3 校合验证

本文通过校验 617 组回归分析数据及 91 组未回归分析数据,验证逻辑回归分析所得黄土斜坡地震稳定性评价公式的合理性及适用性,结果列于表 3。由表 3 可见,运用 617 组回归分析数据回判校验成功率平均可达 94.3%,回判结果优良;运用区内 91 组未参与回归分析的斜坡数据进行判别验证,成功率可达 98.3%,判别结果优良(表 4)。可见,本公式在满足适用条件时,可用于区内黄土斜坡地震稳定性的快速评判。

表 3 回归分析数据回判校验结果表

Table 3 The check result table of regression analysis data	校验结果		
	稳定性判别		百分比 /%
	稳定 0	滑动 1	
参与回归分析稳定斜坡 0	280	16	94.6
参与回归分析滑动斜坡 1	19	302	94.1
平均百分比/%			94.3

表 4 经验公式校验判别结果表

Table 4 The discriminant results of empirical formula	校验判别结果		
	稳定性判别		百分比 /%
	稳定 0	滑动 1	
参与判别稳定斜坡 0	56	2	100
参与判别滑动斜坡 1	0	33	96.6
平均百分比/%			98.3

3 通渭县黄土斜坡地震稳定性判别实例

1718 年通渭 7¼ 级大地震和 1920 年海原 8.5 级大地震在通渭县境内诱发了大量的黄土地震滑坡,造成了惨重的人员伤亡和经济损失。由于 1718 年通渭地震距今太久,研究程度不够。本文通过野外现场调查及 Google Earth 高精度影像解译等手段,对通渭县境内 80 组黄土地震滑坡的坡高、坡角进行统计,并运用黄土斜坡地震稳定性快速评价方法进行评判校验。

3.1 地质和地震背景

通渭县位于渭河中上游北部黄土沟壑区,地形总体呈西北高、东南低,区内主要发育有河谷平原、黄土丘陵两大地貌单元。受地震、河流侵蚀及重力等因素的综合影响,大量滑坡体堆积于河谷区,使河谷形成滑坡堆积体波状起伏地貌形态。县区广泛分布的黄土地层与构造抬升的高原形态相结合,在流水及其他各类内外动力地质作用下,形成千沟万壑黄土高原丘陵地貌景观,成为研究区的地貌主体^[8]。

通渭县地震活动继承于中生代断裂及岩浆活动,反应强烈,造成区内大规模山体滑坡。1718 年和 1920 年的两次大地震中产生的滑坡规模巨大,在区内东南部李店、常河一带留下大面积滑坡形迹,这些滑坡体对这一地区地质灾害活动仍有强烈影响^[8]。

3.2 黄土地震滑坡发育概况

本文通过对研究区内 80 处滑坡的实地调查和统计,得出研究区滑坡主要分布于县区西南部李店、第三铺乡等一带(图 1)。区内滑坡类型主要以黄土层内、黄土泥岩接触面为主,黄土泥岩切层滑坡较少发育。通过调查数据分析得出,区内滑坡具有低角度、中远距离、大体积等特点^[8]。

3.3 地震滑坡的回判校验

区内黄土覆盖较厚,滑坡类型类似于西吉、静宁地区,因此满足判别公式的适用条件。通渭县区内黄土地震滑坡主要由 1718 年通渭 7¼ 级地震及 1920 年海原大地震造成。通渭 7¼ 级大地震时,县

区内估计烈度可达Ⅺ度;海原大地震时县区为高烈度异常区,烈度可达Ⅸ~Ⅺ度,因此本文估计计算烈度确定为Ⅺ度。通过对区内 80 组滑坡的回判验证,其结果列于表 5。由表 5 可见,回判验证准确率可达 90%,判别结果优良。因此可以说明,本文提出的黄土斜坡地震稳定性快速评价公式在陇西黄土地区实际可行,具有一定的工程应用价值。

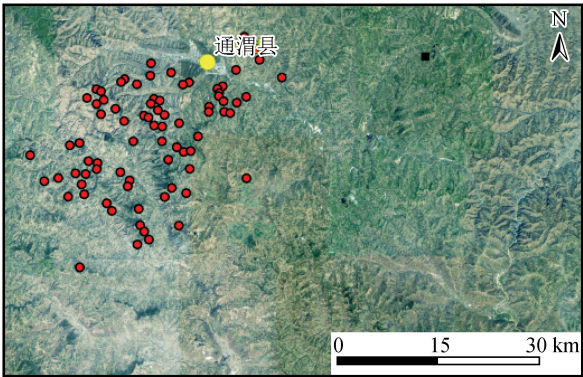


图 1 通渭县黄土地震滑坡分布图

Fig.1 The distribution diagram of loess seismic landslides in Tongwei County

表 5 通渭县区黄土地震滑坡回判校验结果表

Table 5 The check result table of loess seismic landslides in Tongwei county	校验结果		
	稳定性判别		百分比 /%
	稳定 0	滑动 1	
参与回归分析滑动斜坡 1	8	72	90

4 斜坡稳定性快速评价流程

本文所提出的公式适用于区内黄土斜坡地震稳定性的快速评价,评价指标获取及稳定性结果计算较为快速,能够为研究区内的地震应急救援及大规模工程规划选址工作提供科学依据。稳定性评价指标主要通过现场调查、遥感解译及地形图等手段快速获取,获取所需测量仪器或软件操作较为简单、工作人员需求较少,可满足现实工作的需求。本方法稳定性计算公式简单,计算方便快捷,能够快速反映关心地区斜坡的地震稳定性状态。为便于使用,根据本文所提公式可编制出一套嵌入至移动设备的简单软件,通过无线传输系统实时反映区内目标斜坡的地震稳定性,从而大大提高工作效率。具体快速评价流程如图 2 所示:

5 结语

本文主要依据逻辑回归分析方法,提出了基于

坡高 H 、坡角 α 及烈度 I 的三参数经验公式,总结了其主要适用于黄土覆盖厚度大于 10 m 的黄土丘陵地区的适用条件。经使用 617 组回归分析数据回判校验及 91 组斜坡数据判别检验证实,该公式判别成功率高,适用于研究区黄土斜坡地震稳定性的快速评判。根据野外勘查及遥感解译方法,获得了通渭县区内 80 组滑坡的原始坡高、坡角及地震烈度,运用本文提出的判别公式对其进行验证,校验成功率可达 90%。因此说明,本文所提判别公式适用于快速评价陇西黄土丘陵地区斜坡的地震稳定性。

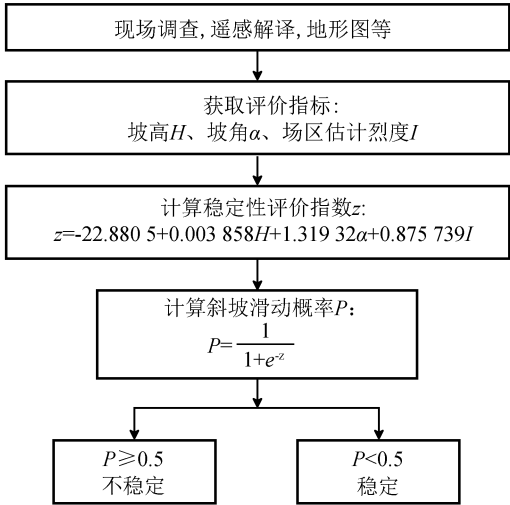


图2 黄土斜坡地震稳定性快速评价流程图
Fig.2 The flow chart for rapid evaluation of seismic stability of loess slope

需要强调,影响黄土斜坡地震稳定性的因素很多,为了快速评估,本文只选取了坡高、坡角和地震烈度这三个易于快速获取的参数作为评价指标。评估黄土斜坡的地震稳定性需深入研究探索利用更多的参数,且黄土地震滑坡野外调查数量及质量是影响评价结果的重要因素,因此今后还应开展大量的野外调查工作来不断完善这一方法。

致谢:参加黄土地震滑坡野外调查的有兰州地震研究所的王兰民研究员、吴志坚研究员,宁夏地震局柴炽章研究员,中国地质大学孙进忠教授,防灾科技学院薄景山教授及其团队的硕博士。在此,对以上专家、老师及同门为野外调查工作做出的辛勤奉献表示衷心的感谢!

参考文献(References)

[1] 王卫东,陈燕平,钟晟.应用CF和Logistic回归模型编制滑坡危险性区划图[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(4):

1127-1132.
WANG Weidong, CHEN Yanping, ZHONG Sheng. Landslides Susceptibility Mapped with CF and Logistic Regression Model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1127-1132.
[2] 陶舒,胡德勇,赵文吉,等.基于信息量与逻辑回归模型的次生滑坡灾害敏感性评价:以汶川县北部为例[J].地理研究,2010,29(9):1594-1605.
TAO Shu, HU Deyong, ZHAO Wenji, et al. Susceptibility Assessment of Secondary Landslides Triggered by Earthquakes: A Case Study of Northern Wenchuan [J]. Geographical Research, 2010, 29(9): 1594-1605.
[3] 方苗,张金龙,徐填.基于GIS和Logistic回归模型的兰州市滑坡灾害敏感性区划研究[J].遥感技术与应用,2011,26(6):845-854.
FANG Miao, ZHANG Jinlong, XU Zhen. Landslide Susceptibility Zoning Study in Lanzhou City Based on GIS and Logistic Regression Model [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 845-854.
[4] 王进,郭靖,王卫东,等.权重线性组合与逻辑回归模型在滑坡易发性区划中的应用与比较[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(5):1932-1939.
WANG Jin, GUO Jing, WANG Weidong, et al. Application and Comparison of Weighted Linear Combination Model and Logistic Regression Model in Landslide Susceptibility Mapping [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(5): 1932-1939.
[5] 谭龙,陈冠,王思源,等.逻辑回归与支持向量机模型在滑坡敏感性评价中的应用[J].工程地质学报,2014,22(1):56-63.
TAN Long, CHEN Guan, WANG Siyuan, et al. Landslide Susceptibility Mapping Based on Logistic Regression and Support Vector Machine [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 56-63.
[6] 饶运章,张学焱.基于Logistic回归模型确定权重的模糊综合评判法在边坡稳定性分析中的应用[J].有色金属科学与工程,2015,6(6):111-115.
RAO Yunzhang, ZHANG Xueyan. Based on Logistic Regression Model to Determine the Weight Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in the Application of the Slope Stability Analysis [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015, 6(6): 111-115.
[7] 杨顺.海原大地震滑坡分布特征及快速评估方法的研究[D].廊坊:防灾科技学院,2017.
YANG Shun. Research on the Distribution Characteristic and Rapid Evaluation Method of Haiyuan Earthquake-Induced Landslide [D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2017.
[8] 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. PENG Da, YANG Shun, LI Xiaobo. Distribution and Mechanism of Loess Landslides Induced by Earthquake in Tongwei, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3): 31-38.