

# 基于斜坡单元的区域斜坡稳定性评价方法

谷天峰<sup>1,2</sup>, 王家鼎<sup>1</sup>, 付新平<sup>3</sup>

(1. 西北大学地质系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中交通力建设股份有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

**摘要:** 为对大范围区域斜坡的稳定性进行有效、定量的评价, 提出一个耦合二维力学分析模型的区域斜坡稳定性评价方法。选择宝鸡市金台区的一段黄土沟谷作为研究区, 对文章提出的方法进行验证。首先, 利用GIS实现斜坡单元的划分; 然后, 利用钻探及调查得到的地层数据形成区域的多层Grid模型; 在此基础上, 开发程序, 完成计算剖面生成、滑面搜索、稳定性评价等工作; 最后, 根据各单元的稳定性系数, 生成区域斜坡稳定性分区图。这种方法以二维极限平衡方法为基础, 即可得到研究区域的二维安全系数分布图, 又可求得最危险滑动面的位置和规模。

**关键词:** 黄土滑坡; 稳定性分析; GIS

**中图分类号:** P 642.22      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2013)11-1400-06

在对大范围自然斜坡进行区域斜坡稳定性评价中, 目前多采用基于概率的分析方法。这类方法将各种与斜坡稳定性相关的因子(地形地貌、地质构造、岩性、植被、人类活动等)按照特定的方法(分级、赋值、归一化等)处理后进行叠合(权重叠加、模糊运算、聚类等), 生成综合评价图, 并以此为依据对研究区域进行危险性区划<sup>[1-5]</sup>。这些方法得到广泛应用, 取得大量的研究成果<sup>[6-10]</sup>。但是, 这种研究方法需要大量滑坡调查数据来判断各因子对边坡稳定性的影响程度, 通常只能应用在滑坡灾害多发的地区, 建立的分析模型只适用于相同地形、地质条件的地区, 应用上存在局限性。此外, 这种评价方法缺乏力学理论支持, 无法对滑坡可能发生的位置、规模等进行定量计算。基于力学原理的斜坡稳定性评价方法, 尤其是二维极限平衡方法, 得到广泛认可, 在工程边坡的稳定性评价中得到了很好的应用。近年来, 随着计算机技术的发展, 一些确定性方法被应用于区域斜坡的稳定性评价中<sup>[9, 11-14]</sup>。虽然, 三维模型能够较真实的反映滑体的实际情况, 但三维稳定性分析方法不仅在理论及几何建模方面较为复杂, 而且在滑

面搜索、稳定性计算等方面也有很多困难。相对于一维、三维稳定性分析来说, 二维稳定性分析成果更易为工程界所接受。

为对大范围自然斜坡稳定性进行有效、定量的评价, 本文提出一个耦合二维力学分析模型的区域斜坡评价方法。首先依据地形条件把研究区域划分为多个斜坡单元, 确定斜坡单元的主滑方向, 搜索最危险的滑动面, 计算每个潜在滑动面的稳定性, 进而进行斜坡失稳危险性的区划。这种方法既可以得到研究区域的二维安全系数分布图, 又可求得最危险滑动面的位置和规模。

## 1 基于GIS的二维力学模型计算方法

### 1.1 基于GIS的三维地质模型建立

为了对区域斜坡的稳定性进行评价, 需要建立区域的三维地质模型。基于GIS的三维地质数据模型, 大体上可划分为面模型、实体模型、混合模型等<sup>[15]</sup>。地质层面模型的表达方式主要有2种: 不规则三角网(TIN)、规则格网法(Grid)。由于Grid的数据结构简单, 易于实现, 因此本文采用多层Grid方法构建三维地质模型。

**收稿日期:** 2013-01-13; **修订日期:** 2013-03-10

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(41202187)、高等学校博士学科重点基金(20116101130001)、高等学校博士学科点专项科研基金(20106101120008)资助。

**作者简介:** 谷天峰(1978 -), 男, 河南南阳人, 博士, 讲师, 主要从事黄土地质灾害方面研究。E-mail: tfgu@163.com

相对于地层界面,地表数据容易获取并且精度较高。可以将地形图转换为 Grid 数据,作为模型的表面。将钻孔及调查得到的层底标高整理后,采用内插的方法得到地层分界面的 Grid。将地表、地层分界面的 Grid 数据进行处理、组合后,即可得到区域的三维地质模型。

### 1.2 斜坡单元的划分

在地质灾害形成过程中,地形地貌对区内滑坡、崩塌具有明显的控制作用。以沟谷面划分的评价单元是地质灾害发生的基本地形地貌单元,能够综合体现各种控制与影响因素的作用。从地形图上看,斜坡单元可以看作是一个集水区的一部分,用山谷线去分割集水区,就可以得到2个斜坡单元(图1中的A、B)。利用GIS的水文分析方法实现基于沟谷的评价单元划分。

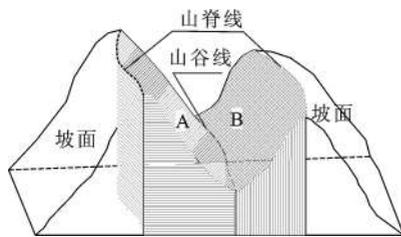


图1 斜坡单元的划分  
Fig.1 The division of the slope unit

在GIS的水文工具中,可以方便地得到集水区及其边界,即山脊线。为找出山谷线,利用反向DEM数据进行水文分析,原来的山谷线便变成山脊线。于是,使用DEM和反向DEM数据分别得到的山脊线和山谷线去分割集水区,就可以划分出斜坡单元。

### 1.3 剖面的提取

对斜坡单元进行稳定性分析,需要确定计算剖面。计算剖面的确定主要包括剖面线位置的确定和剖面的提取。

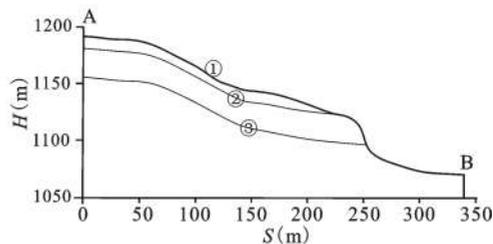
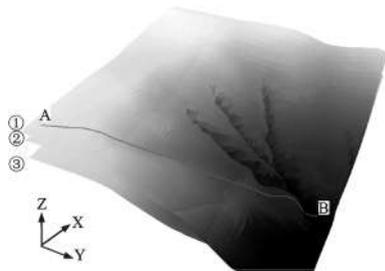


图2 计算剖面生成  
Fig.2 The generation of the computing profile

1) 剖面线位置确定。剖面线的选取对稳定性评价结论的正确性有着重要的影响,一般要求所选剖面具有代表性,剖面线的方向要与潜在主滑动方向一致。使用空间分析方法,可以得到斜坡单元内部各点的倾角和坡向。统计显示,单元内坡角、坡向等大致呈正态分布,因此可以利用坡向的平均值作为主滑方向。本文以通过斜坡单元质心点,平均坡向方向的线段作为剖面线。

2) 剖面的提取。GIS软件提供了图切剖面的功能,但往往只能生成地表的剖面。很多学者在地质剖面的数据模型、GIS环境下地质剖面的生成技术方面进行了研究<sup>[16,17]</sup>,取得一些成果。本文在前人基础上,利用多层Grid模型,进行计算剖面的生成。首先,将剖面线分成若干段,然后分别求出剖面线起点、终点连线以及各节点与各层Grid格网的交点,最后分层按距离和高程连线,修饰生成计算剖面(图2)。在生成剖面时,需进行高程的插值。对于起始点和终止点高程,通过其周围的4个格网点内插得到;而剖面节点与格网交点高程则采用线性内插进行计算。

### 1.4 稳定性分析

在土坡稳定分析中,目前广泛采用的是二维极限平衡法,其计算模型主要有Fellenius法、简化Bishop法、Janbu法、Sarma法等。简化Bishop考虑了条间水平力的作用,是目前在工程中最常用的方法。因此本文以简化Bishop为基础,进行区域的稳定性分析。

极限平衡理论分析边坡稳定性时,关键在于确定潜在滑动面位置及其对应的最小稳定性系数。因此,临界滑裂面的搜索方法是极限平衡分析的一个关键问题。虽然,近年来出现了多种优化技术联合的搜索方法,但是以圆心网格枚举搜索方法为代表的几何优化法目前依然广泛被工程界所青睐,也是国内外一些知名的边坡工程软件所采

用的算法。因此,本文采用采用圆心网格枚举搜索以及指定潜在滑面入口、出口范围的搜索方法实现潜在滑面的搜索。如果随机产生的滑动面位置低于岩土分界面,则认为岩土分界面为潜在滑动面。

### 1.5 计算程序

GIS 提供了空间数据的处理、分析、输出等基本操作,而不具备稳定性分析等功能。要实现计算剖面生成、滑面搜索及稳定性计算等功能,需要在 GIS 软件基础上进行开发。本文开发了区域稳定性评价程序(图3),该程序可以读取 GIS 生成的栅格、矢量数据文件,批量提取剖面,计算稳定性,并能将计算结果生成为 GIS 可以识别的数据。

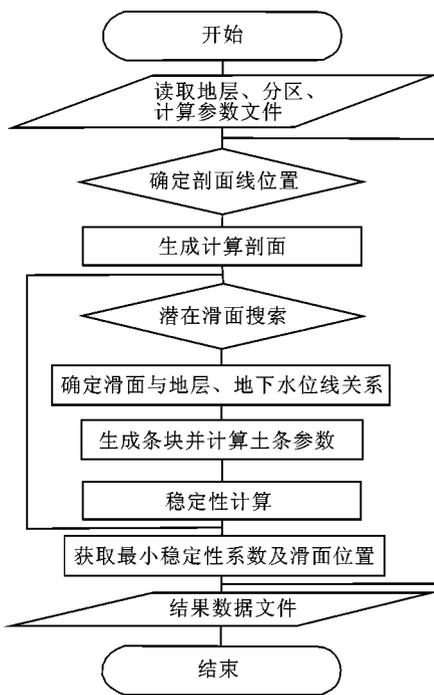


图3 区域斜坡稳定性评价程序流程

Fig.3 Flow chart of regional slope stability assessment program

## 2 基于斜坡单元的斜坡稳定性分析实例

### 2.1 研究区概况

研究区位于宝鸡市金台区内,研究区地貌受构造断裂控制,为黄土丘陵与黄土台塬交界地貌,区内黄土冲沟发育,纵横交错(图4)。由于雨水的冲刷作用,使沟谷切割不断加深、加宽,形成较陡的临空面,为滑坡的形成提供了有利的地形条件。

现场调查,结合宝鸡地震小区划钻探、试验资

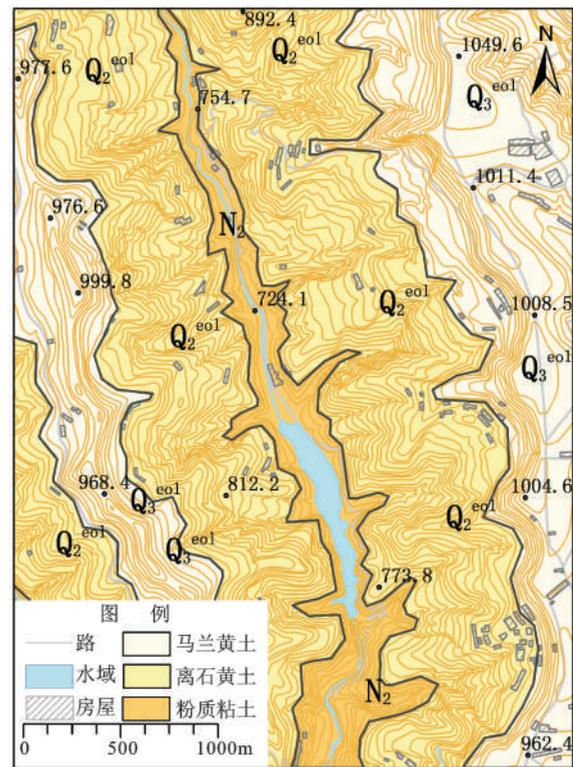


图4 工程地质平面图

Fig.4 Geological engineering map

料,区出露的地层按时代由老到新为: ① 新第三系(N)上新统下部灞河组(N<sub>2</sub><sup>b</sup>)红粘土、粉质粘土。② 第四系(Q),下部为中更新统(Q<sub>2</sub>)黄土,厚度约30~40 m,上部为上更新统(Q<sub>3</sub>)风积黄土,厚度约10 m。在沟口、漫滩等还分布有全新统(Q<sub>4</sub>)地层,其按照成因可分为冲积、洪积、滑坡堆积3种。

### 2.2 地质模型建立及评价单元划分

1) 地质模型建立。地质建模中用到的地层界面主要包括地面、地层分界面、地下水位面等。  
① 地面的生成:将地形图导入GIS中,提取等高线、高程点,生成地面的TIN模型;  
② 地层分界面及地下水位面的生成:以地质图、野外调查以及钻孔地层分层点作为控制点,利用克里格插值算法优化各层初始曲面;根据层与层的逻辑关系,通过布尔运算(切割),得到地层分界面。

对地面、地层分界面等层面按照同一标准(范围、栅格大小)进行栅格化,生成评价区的多层Grid模型。本文中,平面范围取3 km×4 km,栅格单元为10 m。

2) 评价单元的生成。根据1.2节中的方法,将目标区进行斜坡单元划分(图5)。

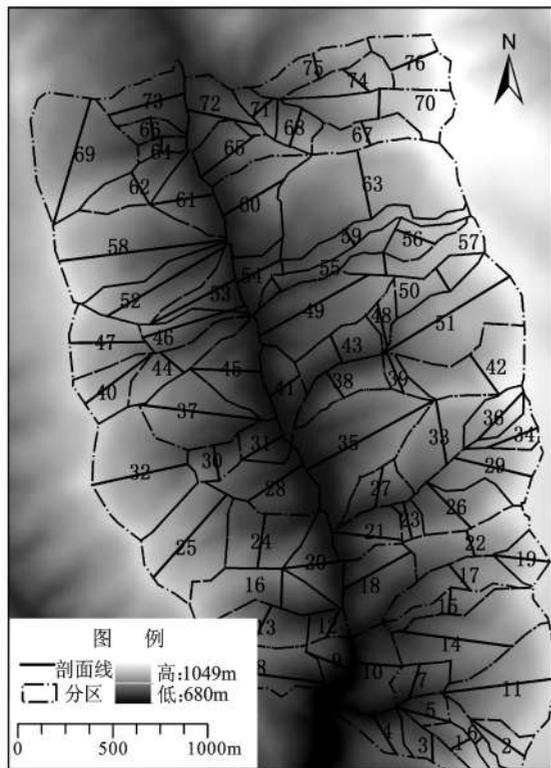


图5 评价单元划分

Fig.5 Classification of evaluation unit

### 2.3 计算参数的选取

参数的选取一直以来都是岩土工程计算中的难点,一方面由于地质环境和岩土体应力历史等方面的差异,使得同类岩土体力学性质存在一定的变异性,另一方面,取样、试验方法等问题也导致数据具有一定的离散性。本文根据数十组室内试验结果,结合收集到的岩土勘察资料综合确定(表1)。

表1 计算参数表

Table 1 Calculation parameter

土层名称	水上			水下		
	$\rho(\text{kN/m}^3)$	$C(\text{kPa})$	$\varphi(^{\circ})$	$\rho(\text{kN/m}^3)$	$C(\text{kPa})$	$\varphi(^{\circ})$
马兰黄土	16.1	24.7	23.1	-	-	-
离石黄土	17.3	34.0	24.7	-	-	-
粉质粘土	18.0	58.4	28.1	18.5	47	26.0
粘土岩	22.3	300.0	27.5	22.9	200.0	26.5

注: $\rho$ 为重度; $C$ 为粘聚力; $\varphi$ 为内摩擦角;-为缺省。

### 2.4 区域稳定性分析

首先利用GIS实现地质模型建立、评价单元划

分等工作,在此基础上,导出地层、评价单元等数据,利用本文开发的区域稳定性评价程序,对各个单元的稳定性进行计算,将计算的结果与评价单元相连接,即可生成区域评价结果。

本文采用指定潜在滑面入口、出口范围的搜索方法进行潜在滑面的搜索,出入口范围指定为坡面线范围,搜索最小半径设置为出入口连线长度的一半,最大半径设置为连线长度的3倍。

本文使用简化Bishop法计算稳定性系数。简化Bishop法计算稳定性系数,需要进行迭代,本文采用二分法进行迭代。本文程序还可将任意计算断面的剖面图及搜索结果输出至CAD平台或GIS平台(图6),方便查看和分析。

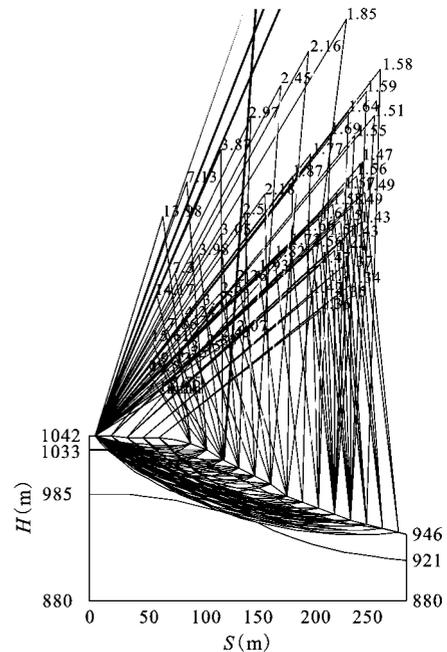


图6 断面5计算结果

Fig.6 Calculation results of section 5

通过计算可以得到各个计算断面的稳定性系数,按照表2将稳定性系数进行分级,以分级结果作为区域危险性划分的依据,分区结果见图7。可以看出,研究区有一个高风险区。中危险区面积较小,主要分布在沟谷的上部,马兰黄土覆盖区内,潜在滑移面主要分布在马兰黄土层与上离石黄层中,这主要是由马兰黄土强度较低,坡度较陡造成的。低风险区和无危险区面积较大。本文评价结果与灾害调查结论基本一致。

表2 区域危险性分级表

Table 2 Regional risk classification

斜坡稳定性系数 $F_s$	$F_s \leq 1.10$	$1.10 < F_s \leq 1.30$	$1.30 < F_s \leq 1.50$	$F_s > 1.50$
区域斜坡危险性分级	高危险区	中危险区	低危险区	无危险区

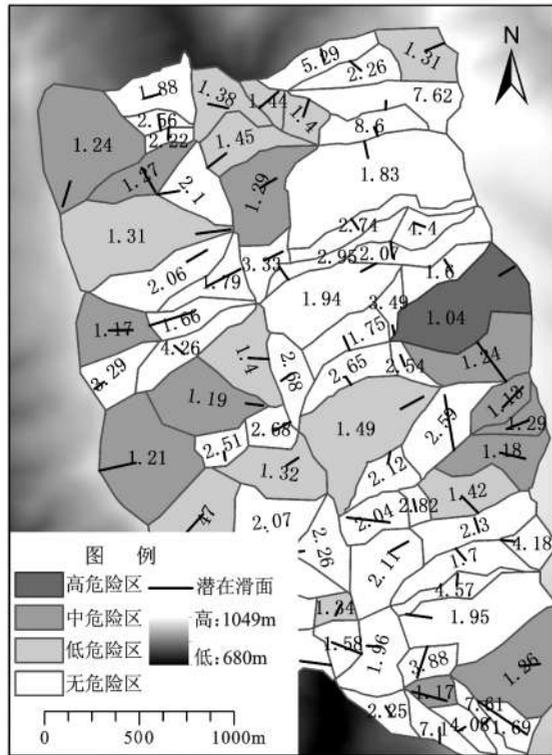


图7 区域斜坡危险性评价结果

Fig.7 Regional slope risk assessment results

### 3 结 论

本文提出一个耦合二维力学模型的区域斜坡稳定性评价方法。首先依据地形条件把研究区域划分为多个斜坡单元,根据斜坡单元平均坡向,确定斜坡的主滑面位置,在一定范围内,搜索最危险的滑动面,采用基于GIS的二维力学方法计算每个潜在滑动面的稳定性,进而对区域斜坡失稳的危险性进行分区。

开发的区域稳定性评价程序可以读取GIS数据,按照评价单元批量生成计算剖面,完成最危险滑动面的搜索与稳定性的评价工作,评价结果可直接输入GIS中完成分区图的编制。

选择宝鸡市金台区的一段黄土沟谷作为研究区,对本文提出的方法进行了验证,生成了区域的多层Grid模型,完成了斜坡单元的划分,采用简布

法对每个单元进行了稳定性评价,生成了区域斜坡稳定性分区图。这种方法以工程上最为常用的二维极限平衡方法为基础,既可以得到研究区域的二维稳定性系数分布图,又可以求得最危险滑动面的位置和规模,为大范围自然斜坡的稳定性评价提供了一种新的思路。这种思路在宝鸡市地震地质灾害的评价中得以应用,获得良好效果,具有广泛的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Fall M, Azzam R, Noubactep C. A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping[J]. *Engineering Geology*, 2006, **82**(4): 241-263.
- [2] 王亚强, 王兰民, 张小曳. GIS支持下的黄土高原地震滑坡区划研究[J]. *地理科学*, 2004, **24**(2): 170-176.
- [3] 闫满存, 王光谦. 基于GIS的澜沧江下游区滑坡灾害危险性分析[J]. *地理科学*, 2007, **27**(3): 365-370.
- [4] 谷天峰, 王家鼎, 王煜, 等. 咸阳市地质环境综合评价研究[J]. *水土保持通报*, 2007, **27**(3): 69-74.
- [5] 吴树仁, 石菊松, 王涛, 等. 地质灾害活动强度评估的原理、方法和实例[J]. *地质通报*, 2009, **28**(8): 1127-1137.
- [6] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于GIS与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(1): 15-26.
- [7] 胡凯衡, 游勇, 庄建琦, 等. 北川地震重灾区泥石流特征与减灾对策[J]. *地理科学*, 2010, **30**(4): 566-570.
- [8] Xu C, Dai F, Xu X. GIS-Based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River Watershed, China[J]. *Geomorphology*, 2012, **145-146**(1): 70-80.
- [9] Zolfaghari A, Heath A. A GIS application for assessing landslide hazard over a large area[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, **35**(2): 278-285.
- [10] Conoscenti C, Di Maggio C, Rotigliano E. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of Nw Sicily (Italy)[J]. *Geomorphology*, 2008, **94**(3-4): 325-339.
- [11] 康超, 谌文武, 张帆宇, 等. 确定性模型在黄土沟壑区斜坡稳定性预测中的应用[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(1): 207-210+260.
- [12] Grenon M, Hadjigeorgiou J. Integrated structural stability analysis for preliminary open pit design[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, **47**(3): 450-460.
- [13] 谢谟文, 江崎哲郎, 邱骋, 等. 空间三维滑坡敏感性分区工具及其应用[J]. *地学前缘*, 2007, **14**(6): 73-84.
- [14] 王纯祥, 蒋宇静, 谢谟文, 等. 基于GIS区域边坡失稳灾害预测与

- 评价[J].岩石力学与工程学报,2008,27(12): 2449~2454.
- [15] 潘 懋,方 裕,屈红刚.三维地质建模若干基本问题探讨[J].地理与地理信息科学,2007,23(3):1~5.
- [16] 王建芳,包世泰,余应刚,等.基于GIS模板的地质剖面图模型及其实现[J].测绘科学,2008,33(5):184~186.
- [17] 周翠英,陈 恒,温少荣,等.地下空间GIS二次开发中的数字制图方法研究[J].岩土力学,2006,27(5):833~837.

## Regional Slope Stability Analysis Method Based on the Slope Unit

GU Tian-feng<sup>1,2</sup>, WANG Jia-ding<sup>1</sup>, FU Xin-ping<sup>3</sup>

(1. Department of Geology/ State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. Zhongjiao Tongli Construction Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China; 3. The Third Railway Survey and

Design Institute Group Cooperation, Tianjin 300142, China)

**Abstract:** Landslide is one of the most damaging natural hazards in China, thus landslide susceptibility mapping plays an important role in disaster prevention. Probability-based analysis is the most popular method to evaluate a wide range of natural slope instability risk. But the applications of it are limiting factor for lack of landslides data. In order to evaluate a wide range of natural slope instability risk effectively and quantitatively, this article presents a new method which evaluate regional slope instability risk, combining with two-dimensional mechanical analysis model and Geographic Information System (GIS) method. Firstly, a region is divided into a group of slope zones according to the terrain condition by using watershed hydrology analysis method in GIS. The location of main section line of each slope zone is set according to its average slope inclination and angle. A series of possible sliding surfaces are formed and the minimum safety factor of every slope zone is calculated based on two-dimensional mechanical analysis model. On the basis of calculation results, slope risk zoning map is drawn. A loess gully region in Jintai District of Baoji City, Shaanxi Province, China, is selected as the study area. The proposed method is verified. First of all, the topographic map is changed into a digital elevation model, with the planar range is 3 km×4 km and grid size is 10 m. According to the process mentioned above, the area is divided into 76 zones using hydrology tools. Secondly, the grid layers of strata interfaces are interpolated with the data of stratums, which is obtained from drilling and investigation. And then, geologic model of this area is set up using multi grid layers method. Thirdly, a regional stability evaluation program is developed according to the stability factor of each unit. It can read files in GIS formats, extract sections automatically, access stability, and convert the results into GIS data. Finally, with this program, calculation profile of every zone is generated automatically and the minimum safety factor of every profile is figured out by using 2D Bishop simplified method. The coefficients of the zones are sorted into four groups. According to the groups, regional slope risk zoning map is drawn. The method proposed in this paper is based on two-dimensional limit equilibrium method, which is the most commonly used in engineering. It can obtain not only the distribution map of safety coefficient, but also the scale and location of most dangerous slip surface. The method and program are used in seismic geological disasters assessment in Baoji City, and good results have been obtained. This study provides a new way to evaluate natural slope risk of large area.

**Key words:** loess landslide; stability analysis; GIS