

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.05

基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡 稳定性分析与评价

瞿婧晶, 陆 燕, 吴曙亮, 刘 健, 苟富刚

(国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室(江苏省地质调查研究院), 江苏南京 210049)

摘要:边坡失稳是一定区域内的地质环境条件相互作用不断演化的结果,对边坡的稳定性评价时需要考虑多种因素。本文以镇江地区下蜀土边坡的稳定性影响因素和评价方法为主要研究对象,采用粗糙集属性约简理论得到对边坡影响较大的 6 项影响因素;通过建立影响因素相互作用关系矩阵,得出影响因素相互作用对边坡稳定性的影响程度和重要性程度以及权重值。最后建立边坡稳定性评价指标及量化标准,并确定 SII 指数的计算方法及对应的边坡稳定性分级,从而形成镇江地区下蜀土边坡稳定性的综合评价方法,为该地区边坡稳定评价提供依据。

关键词:边坡稳定性评价;粗糙集理论;影响因素;关系矩阵

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)01-0035-08

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

QU Jingjing, LU Yan, WU Shuliang, LIU Jian, GOU Fugang

(Key Laboratory of Earth Fissure and Geological Disaster Ministry of Land and Resources

(Geological Survey of Jiangsu Province), Nanjing, Jiangsu 210049, China)

Abstract: Slope instability is the result of the continuous evolution of the interaction of geological environment conditions in a certain area, so many factors should be considered when evaluating the stability of a slope. In this paper, the influence factors and evaluation methods of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang are taken as the main research objects. Using the attribute reduction of rough set theory, six influencing factors are obtained. The influence degree, importance degree and weight value of influencing factors interaction on slope stability are received by establishing an interaction matrix of influencing factors. Finally, the evaluation index and quantitative standard of slope stability were established, and the calculation method of SII index and the corresponding slope stability classification were determined. As a result, a comprehensive evaluation method for the stability of the Xiashu loess slope in Zhenjiang area is developed, which provide a basis for the slope stability evaluation in this area.

Keywords: slope stability evaluation; rough set theory; influencing factors; rough set theory

0 引言

在岩土工程领域,边坡稳定性问题一直是研究的热点之一,边坡的稳定性对于建设工程的安全具有重要影响,一旦边坡发生失稳破坏,将会对工程建设及人员安

全造成巨大损失。因此,正确评价边坡的稳定性是岩土工程的重要研究内容。

目前常用的边坡稳定性评价主要采用定性、定量以及非确定性等方法来进行。其中定性评价^[1]基于现场地质调查,通过分析边坡稳定性影响因素、现有失稳

收稿日期: 2020-02-18; 修订日期: 2020-05-06

基金项目: 江苏省地质勘查基金“镇江城市地质资源与环境”(苏财建[2011]425号)

第一作者: 瞿婧晶(1986-),女,江苏南京人,硕士研究生,工程师,主要从事区域地质调查方面的研究。E-mail: nanjinggg@163.com

破坏特征等,从定性的角度对边坡的稳定性进行评价;而定量评价由于在现阶段无法完全量化影响边坡稳定的各种条件,因此主要通过模型简化,采用数值计算的方式,进行半定量评价,如极限平衡法^[2]、无单元法^[3]、有限单元法^[4]、离散单元法^[5]、流形元法^[6]、快速拉格朗日分析法^[7]等;非确定分析评价主要采用数学计算方法,如神经网络评价^[8]、灰色聚类评价^[9]、范例推理评价^[10]、模糊综合评价^[11-12]、可靠度评价^[13-15]、多元回归评价^[16]等,针对量化之后的边坡稳定性影响因素与边坡稳定性状态之间的关系建立数学模型,从而进一步评价边坡稳定性。

本文以镇江地区下蜀土边坡为例,在现场地质调查的基础上,分析镇江地区下蜀土边坡的工程地质特征以及边坡稳定性影响因素,并采取粗糙集属性约简和相互关系矩阵法进行综合分析,先通过采用粗糙集属性约简的方法得出对下蜀土边坡稳定性影响相对重要的因素,再利用相互关系矩阵计算各影响因素的相应权重,最后建立边坡稳定性评价体系,结果可用于镇江地区下蜀土边坡稳定性的快速评价。

1 镇江地区下蜀土边坡稳定性影响因素分析

下蜀土是一种形成于中、晚更新世的风成黄土,在长江中下游地区广泛分布,其中在江苏省宁镇一带最为发育。镇江北部和东部属长江三角洲顶端新长江三角洲平原,中部为低山与丘陵,南部属岗地。丘陵及岗地一般覆盖有数米至数十米的下蜀土,边坡呈现上部为下蜀土覆盖层、下部为基岩的岩土二元结构特征。下蜀土具微膨胀性,有一定的吸水膨胀、失水收缩的特性,当土体中水的含量发生变化时,会出现反复胀缩变形、干缩裂隙发育等特性,因此浅层多发育垂直节理。垂直节理的发育易加速地表水的入渗,水入渗后会进一步导致边坡土体软化,自重增大且强度降低,若节理裂隙在其作用下逐渐发展并形成贯通的滑动面,将会造成边坡的失稳破坏。尤其在雨量充沛的夏季,由于土体渗透性大于下伏基岩的渗透性,雨水入渗易赋积于基覆界面附近,使得该位置土体软化更甚,极易产生边坡整体性失稳破坏^[17-18]。

据镇江地区 2000 年以来的月均降雨量和滑坡灾情统计,每年 6—8 月份雨季为滑坡灾害发生的高发期。当年降雨量越大,灾害发生的越多,而且灾害发生时间和降雨时间相比,滞后期不长。从多年情况看,群发性、大规模的地质灾害发生时间都在丰水年份。

同时,随着城市规模的扩大,各种工程建设越来越

频繁。人类活动类型主要包括坡上加载、斜坡开挖、地下人防工事及开山采石等。坡上加载增大斜坡土体下滑力,对斜坡稳定不利;斜坡开挖易造成坡脚临空,降低边坡抗滑力;早期地下人防工事有的由于质量较差,导致洞内冒水、坍塌,形成积水坑增加地表水入渗,诱发滑坡;而开发采石则严重破坏原始地形坡度,形成临空面,同时采石爆破也影响岩体稳定性^[19-20]。

此外,受多期构造运动的影响,镇江地区的断裂构造较为发育。调查表明,镇江地区滑坡群多呈串珠状、带状分布,与宁镇地区的断裂构造走向具有一定关系,这也说明滑坡的空间分布与区域地质构造相似。

镇江地区下蜀土滑坡是区内最常见、也是影响最严重的地质灾害。经调查,目前镇江地区分布有 30 余处滑坡隐患点,其规模多为小型,部分灾害点灾情达到大型、特大型。主要沿工程建设及露天采矿活动强烈的低山丘陵、岗地分布,丹徒区、京口区、润州区和镇江新区均有涉及。滑坡的发生和发展具有明显规律性,空间上与地质条件密不可分,时间上与气候关系密切,成因上又与人类活动息息相关。具体表现为规模小、具有周期性、突发性、危害性的特点。

综上所述,影响下蜀土边坡稳定性的因素大体可分成几何特征、地质环境条件、外部影响因素三个方面。其中,边坡几何特征是指边坡的几何尺寸等;地质条件主要影响滑坡分布规律及特征,包括地质构造、岩土风化作用、地下水作用等;外部影响因素主要是诱发滑坡的发育和产生,包括降雨、地震、人类活动等。综上影响因素众多。但相应的影响程度各有差别,因而有效的区分影响程度可为前期防治、后期治理提供依据。本次分析评价以《江苏省地质灾害危险性评估技术要求》为基础,综合前人研究成果及以上分析,选取河流相对位置、坡高、坡度、坡向、坡面形态、地质构造、人类活动、降雨情况、风化作用、地下水作用这 10 个影响因素开展分析评价。

2 基于粗糙集属性约简的边坡稳定性影响因素分析

2.1 基于粗糙集理论的属性约简

粗糙集理论,也称粗集理论,最早由波兰学者 PAWLAK^[21-24]教授于 1982 年提出,1991 年对该理论进行了全面系统地阐述,奠定了与之相对应的严密的数学基础。粗糙集理论是一种处理模糊和不确定性知识的软计算方法,主要用于研究不确定、不完整知识和数据的表达、学习和归纳。其运用时不需要先验知识,可

以直接对所处理的数据进行分析,具有强大的数据挖掘和知识发现的能力。

属性约简是粗糙集理论的核心内容之一,由于信息系统中通常会存在一些与评价目标关系不大、重复冗余或不太重要的属性,通过属性约简,在基本保持信息系统分类能力的前提下,通过评价不同属性间的依赖关系,可将不相关、重复冗余或重要性低的属性剔除以得到精简的属性集。由于属性约简后得到的约简集往往会有多个,因而在约简中一般以最小属性约简为目的。

2.2 边坡稳定性影响因素粗糙集属性约简分析

本文采用由挪威科技大学计算机与信息科学系和波兰华沙大学数学研究所合作开发而成的 ROSETTA 工具包对研究区下蜀土边坡稳定性影响因素进行属性约简,采用的算法为基于遗传算法的属性约简算法^[25]。由于粗糙集理论不能处理连续型数据,因此需对影响因素进行量化以及离散化处理后才可以进行属性约简。数据的离散化处理是将各影响因素结合其发育特征分为不同类别,根据类别的不同进行数据的离散化。而对于边坡整体稳定性级别划分则主要依据其发生失稳破坏的规模(表1)。

表1 土质边坡整体稳定性分级

Table 1 Overall stability classification of soil slope

级别	稳定性	判别条件
1	好	边坡变形的可能性很小
2	较好	边坡产生局部变形
3	较差	边坡局部土体失稳,可能引起整体变形
4	差	边坡产生整体变形
5	极差	边坡产生整体破坏

针对不同的影响因素所进行的分级赋值如表2所示。

采用基于遗传算法改进的粗糙集属性约简算法对进行离散化处理后的决策表进行属性约简计算^[26],针对所调查的发生了滑坡失稳破坏的80组边坡数据,经计算后得到的约简结果如表3所示。

通过粗糙集的属性约简,可以从这7组约简集合中看出:坡高、坡度、地质构造、降雨情况、人类活动、地下水作用这些因素对边坡稳定性的影响作用相对较大;而风化作用、坡向、坡面形态、相对河流位置的影响作用相对较小。因此采取对边坡稳定性影响较大的坡高、坡度、地质构造、降雨情况、人类活动、地下水作用这6项影响因素进行进一步分析。

粗糙集属性约简的方法通过将人为的地质分析与算法的数学分析进行结合,既可以在一定的程度上避免

表2 各因素不同类别量化取值

Table 2 The quantization value of each factor by category

类型	取值			
	1	2	3	4
坡面形态	平直	凸形	凹形	阶状
坡度	(0,10]	(10,30]	(30,50]	(50,90]
风化作用	弱	一般	强	
地下水作用	弱	一般	强	
相对河流位置	凸岸	凹岸	其他	
降雨情况	弱	一般	强	
地质构造	弱	一般	强	
人类活动	无	弱	强	
类型	坡向		坡高	
1	(0,30]		(0,25]	
2	(30,90]		(25,35]	
3	(90,150]		(35,45]	
4	(150,210]		(45,55]	
5	(210,270]		(55,+∞)	
6	(270,330]			
7	(330,360]			

表3 属性约简结果

Table 3 Attribute reduction results

序号	约简后的属性集
1	{坡向, 坡高, 坡面形态, 坡度, 风化作用, 地下水作用, 降雨情况, 地质构造, 人类活动}
2	{坡向, 坡高, 坡度, 风化作用, 地下水作用, 降雨情况, 地质构造, 人类活动}
3	{坡高, 坡面形态, 坡度, 地下水作用, 相对河流位置, 地质构造, 人类活动}
4	{坡高, 坡度, 风化作用, 地下水作用, 降雨情况, 地质构造, 人类活动}
5	{坡高, 坡度, 风化作用, 地下水作用, 降雨情况, 地质构造}
6	{坡度, 地下水作用, 降雨情况, 地质构造, 人类活动}
7	{坡高, 坡度, 地下水作用, 地质构造, 人类活动}

人为分析中的主观性,又可以防止单纯的数据分析中脱离实际的情况,同时也剔除了对边坡稳定性影响较小的因素,一定程度上减少了工作量。

3 基于相互作用关系矩阵的边坡稳定性影响因素分析

3.1 关于影响因素相互关系矩阵

相互关系矩阵是一种定性半定量的评价方法,具体是通过构建影响因素相互关系矩阵,研究影响因素之间相互作用对边坡稳定性的影响,从而确定相关权重,并定量分析各影响因素对边坡稳定性的重要程度。由于影响边坡稳定性的因素之间是相互影响相互作用,共同构建一个有机整体,而并不是相互独立的,这种方法特

别适合解决多因素之间相互作用、相互耦合等复杂问题。

3.2 矩阵建立及相互作用分析

如前所述,根据粗糙集属性约简的结果剔除了对稳定性影响较小的因素,选择坡高、坡度、降雨情况、地质构造、人类活动、地下水作用 6 个因素采用相互作用关系矩阵法进一步分析。

建立相互作用关系矩阵的原则^[27-29]是:矩阵主对角线上依次表示主要影响因素,其它表示影响因素间的相互作用。某影响因素所在行表示该因素对其它因素的影响,称该因素为原因(C),某影响因素所在列表示其它因素对其的影响,称为对该因素的结果(E)。由于影响因素造成的原因及受到的结果是不等价的,故采用

编码方式加以区别。本次关于相互作用的取值采取半定量专家取值法(ESQ法),作用程度以数值 0、1、2、3、4 依次表示影响无、弱、中等、强烈、极强。

根据以上原则建立了相互关系矩阵,根据定性分对非主对角线上的元素赋值,计算得到影响因素原因值和结果值,即因果值 $P(C, E)$ 。影响因素相互作用对稳定性的影响程度(P_A)可通过 $P_A=(C+E)/\sqrt{2}$ 计算得到,影响因素对稳定性的重要程度(P_D)可通过 $P_D=(C-E)/\sqrt{2}$ 计算得到,影响因素的活性指数(k_i)可通过 $k_i=(C_i+E_i)/\sum(C_i+E_i)$ 计算得到,赋值及计算结果如表 4 所示。据此绘制了相互作用因果关系图 1,这样能更直观的反映影响因素相互作用的关系程度。

表 4 影响因素相互作用矩阵

Table 4 Interaction matrix of influencing factors

P		C	C+E	C-E	$k_i/\%$	P_A	P_D				
P_1	3	0	0	0	1	4	11	-3	16.18	7.78	-2.12
2	P_2	0	0	0	1	3	15	-9	22.06	10.61	-6.36
1	2	P_3	0	0	2	5	10	0	14.71	7.07	0.00
3	4	2	P_4	0	2	11	11	11	16.18	7.78	7.78
1	1	2	0	P_5	4	8	8	8	11.76	5.66	5.66
0	2	1	0	0	P_6	3	13	-7	19.12	9.19	-4.95
E	7	12	5	0	0	10	68				

注: P_1 -坡高, P_2 -坡度, P_3 -地质构造, P_4 -人类活动, P_5 -降雨作用, P_6 -地下水作用。

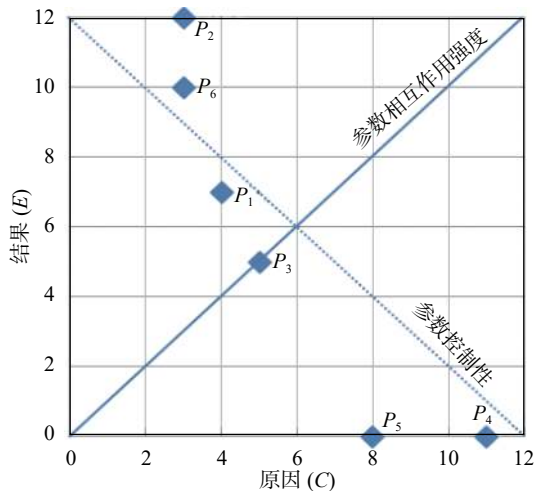


图 1 影响因素相互关系

Fig. 1 Factors affecting relations between each other

如图 1 可见,数据点集中在垂直于 $C=E$ 对角线的方向上,说明相互作用强度值并不分散,这表明通过属性约简得到的 6 个影响因素之间相互作用对边坡稳定性影响都较大,后期评价时应尽可能全部参与稳定性评价。但各影响因素对边坡稳定性的影响程度还是有很大差异的,图中右下角的点(如 P_4 、 P_5)对边坡稳定性起

主要作用,而左上角的点(如点 P_2 、 P_6)通常是对边坡稳定性起次要作用。

影响因素相互作用对边坡稳定性的影响程度 P_A 计算结果如图 2 所示,相互作用影响程度从大到小依次为: P_2 (坡度)→ P_6 (地下水作用)→ P_1 (坡高)、 P_4 (人类活动)→ P_3 (地质构造)→ P_5 (降雨作用)。一般来说相互作用越强,任何因素的微弱变化都可能导致整体稳定性的明显变化。可见坡度和地下水作用对边坡的影响比较大。其中坡度越陡,对边坡稳定性越不利;而地下水既是边坡土体赋存环境又是组成部分,会引起土体物理力学性质改变,造成土体结构软化,从而改变边坡性质,破坏边坡稳定状态,对边坡稳定性产生不利影响。

影响因素对边坡稳定性的重要程度 P_D 计算结果如图 3 所示。 P_D 代数值越大,对边坡稳定性的影响程度也越大,反之 P_D 越小,对边坡稳定性事物影响就越小。影响因素对边坡稳定性重要程度从大到小依次是: P_4 (人类活动)→ P_5 (降雨作用)→ P_3 (地质构造)→ P_1 (坡高)→ P_6 (地下水作用)→ P_2 (坡度)。可见,人类活动对边坡稳定性有明显的控制性作用, P_D 值明显高于其它,其次是降雨作用和地质构造。据调查,采取的样本当中

绝大多数边坡都或多或少的有人为活动,同时据统计,每年6—8月雨季为滑坡灾害高发期,其中7月发灾数约占总数的70%,而多年情况可见,群发性、大规模的地质灾害发生在丰水期,并且滑坡的发生与降雨量和降雨强度呈正相关关系。根据统计,有记录的300多个滑坡点中,90%以上是由于坡上加载、斜坡开挖、地下人防、开山采石等造成的,呈现成群、成片、成带状分布的特点。结果和预测及一般认识基本一致。

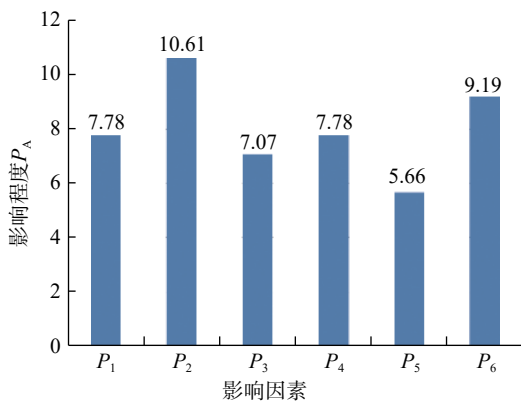


图2 影响因素的相互作用对边坡稳定性的影响程度
Fig. 2 Influence degree of interaction of influencing factors on slope stability

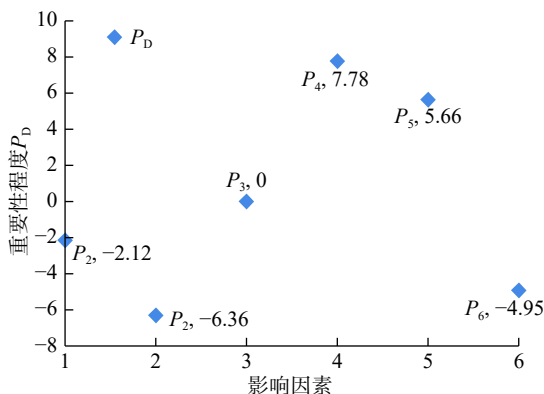


图3 影响因素对边坡稳定性的重要性程度
Fig. 3 The degree of importance of influencing factors on slope stability

以上均为定性的认识,在实际应用中需要定量评价才有意义,所以引入影响因素的活动性指数(k_i)。 k_i 值可以定量表示影响因素对边坡稳定性的影响程度,活动性指数越高,表明该因素对系统整的影响就越大,可作为后期进一步进行稳定性等级划分的权重值。具体权重大小见表5。

4 边坡稳定性评价

边坡稳定性评价是基于对边坡工程地质条件的清

表5 活动性指数说明表
Table 5 Table of activity index

影响因素	权重值 k
坡度(P_2)	0.220 6
地下水作用(P_6)	0.191 2
坡高(P_1)	0.161 8
人类活动(P_4)	0.161 8
地质构造(P_3)	0.147 1
降雨作用(P_5)	0.117 6

晰认识,对评价指标的合理选取,对评价体系的准确建立开展的,是边坡治理的关键。本次以镇江地区边坡为样本,通过分析影响边坡稳定性的相关因素,将前述影响因素作为边坡稳定性的评价指标,通过确定量化标准并综合其相互影响建立边坡稳定性评价标准及评价方法,从而实现对边坡稳定性的评价^[30]。

4.1 评价体系的建立及评价指标量化

建立科学合理的评价指标体系是边坡稳定性评价的关键和核心。通过前述分析,将坡高、坡度、地质构造、降雨情况、人类活动、地下水作用这6个影响因素作为边坡稳定性评价指标,其相应的权重值已由相互关系矩阵计算获得(表5)。

由于选取的影响因素多为定性指标,无法直接用于计算,还需建立统一标准对影响因素进行量化。本次评价采取半定量专家取值法,根据评价指标对边坡稳定性的影响程度的差异,对评价指标分别估值,得到了各评价指标的分级指数 P_i ,建立了针对 P_i 的三级取值标准并给出相关的影响程度取值范围,其中0代表“无影响或者影响微弱”,1代表“影响一般”,2代表“影响强”,取值越小则表明对边坡稳定性的影响越弱,反之可能导致边坡变形或者失稳的情况。具体量化标准如表6所示,评价指标的量化取值范围是从边坡野外调查成果中获得。

表6 评价指标量化标准
Table 6 Quantitative standard of evaluation index

评价指标	0	1	2
坡高/m	<25	25 ~ 55	>55
坡度/(°)	<30	30 ~ 50	>50
地质构造	弱	一般	强
降雨	弱	一般	强
人类活动	无	一般	强
地下水作用	弱	一般	强

4.2 边坡稳定性评价模型建立

本次评价引入边坡不稳定指数 SII (Slope Instability

Index)^[23]用以表征边坡不稳定性,即变形时的破坏程度。*SII* 值可通过各个评价指标的分级指数与权重的乘积获得。*SII* 数值越大,边坡越不稳定。计算公式如下:

$$SII = \sum k_i P_i$$

式中:*SII* 表示边坡不稳定性指数; k_i 表示评价因指标的权重,权重值均小于 1,和为 1; P_i 表示评价指标分级指数。

其中,评价指标的分级指数是根据属性约简后得到的六项评价指标对边坡稳定性的影响程度及量化后取值(表 6)确定的;权重则是通过相互作用矩阵法求得的活动性指数 k_i (表 5)。

据此不稳定性指数计算公式可进一步表示为:

$$\begin{aligned} SII &= k_1 P_1 + k_2 P_2 + k_3 P_3 + k_4 P_4 + k_5 P_5 + k_6 P_6 \\ &= 0.161 8 P_1 + 0.220 6 P_2 + 0.147 1 P_3 + 0.161 8 P_4 + \\ &\quad 0.117 6 P_5 + 0.191 2 P_6 \end{aligned}$$

4.3 边坡稳定性程度分级

为进一步确定边坡稳定性程度与 *SII* 值之间的对应关系,从发生滑坡失稳破坏的 80 组数据选择 27 组数据作为样本参与分级。这些样本稳定性程度差异明显,具有较好的代表性,能够满足研究要求。

将样本按照实际表 6 中的评价指标量化标准进行分析,得到对应的分级指数 P_i , 带入公式计算出 *SII* 值(图 4), 结合样本实际情况划分稳定性等级, 最后将边坡稳定性定量评价时的稳定性等级划分稳定性好、较好、较差、差、极差五个等级, 具体 *SII* 取值如表 7 所示。

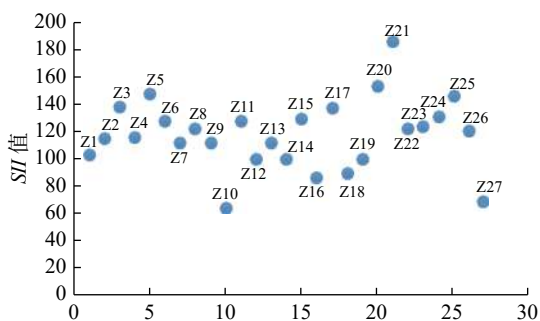


图 4 样本不稳定性指数 *SII* 统计

Fig. 4 *SII* statistics of sample instability index

表 7 边坡稳定性分级表

Table 7 Slope stability classification table

级别	稳定性	判别条件	<i>SII</i> 取值
1	好	边坡变形可能性很小	<90
2	较好	边坡产生局部变形	90 ~ 110
3	较差	边坡局部土体失稳,可能引起整体变形	110 ~ 140
4	差	边坡产生整体变形	140 ~ 170
5	极差	边坡产生整体破坏	>170

5 结论

本文以镇江地区下蜀土边坡为主要研究对象,通过采取粗糙集属性约简和相互作用关系矩阵的方法,分析了边坡稳定性影响因素间的相互作用关系,并根据边坡实际状况量化取值,建立了边坡不稳定性指数计算方法。

(1)通过粗糙集属性约简得到对边坡稳定性影响较大的因素包括坡高、坡度、地质构造、降雨情况、人类活动、地下水作用等六项。

(2)通过建立影响因素相互作用关系矩阵,定性半定量的分析了相互作用关系,得出了反映影响因素相互作用对边坡稳定性影响程度的排序和重要性程度的排序,同时还得到了影响因素权重值,可在后续稳定性评价时加以应用。

(3)通过确定评价指标量化标准,结合权重值建立了边坡稳定性评价计算公式: $SII = \sum k_i P_i$ 。通过带入样本计算,得到了针对镇江下蜀土边坡的稳定性分级标准。其评价结果对与镇江地区下蜀土边坡地质灾害的防治具有重要意义。

参考文献 (References) :

[1] 李荣伟,侯恩科. 边坡稳定性评价方法研究现状与发展趋势 [J]. *西部探矿工程*, 2007, 19(3): 4-7. [LI Rongwei, HOU Enke. Research status and development trend of slope stability evaluation methods [J] . *West-China Exploration Engineering*, 2007, 19(3): 4-7. (in Chinese with English abstract)]

[2] 杨学堂,王飞. 边坡稳定性评价方法及发展趋势 [J]. *岩土工程技术*, 2004, 18(2): 103-106. [YANG Xuetao, WANG Fei. Evaluation method of slope stability and its developing trend [J] . *Geotechnical Engineering Technique*, 2004, 18(2): 103-106. (in Chinese with English abstract)]

[3] 周维垣,寇晓东. 无单元法及其在岩土工程中的应用 [J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 5-9. [ZHOU Weiyan, KOU Xiaodong. Element free method and its application in geotechnique engineering [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 5-9. (in Chinese with English abstract)]

[4] 王勖成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. [WANG Xuncheng, SHAO Min. Basic principle of the FEM and numerical method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.(in Chinese)]

[5] GHABOUSSI J, BARBOSA R. Three-dimensional discrete element method for granular materials [J] . *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1990, 14(7): 451-472.

- [6] 裴觉民. 数值流形方法与非连续变形分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(3): 279-292. [PEI Juejin. Numerical manifold method and discontinue deformation analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(3): 279-292. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 黄润秋, 许强. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1995, 14(4): 346-354. [HUANG Runqiu, XU Qiang. Application of explicit Lagrangian finite-difference method in rock slope engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(4): 346-354. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 孙玉科, 姚宝魁. 矿山边坡稳定性研究的回顾与展望 [J]. *工程地质学报*, 1998, 6(4): 305-311. [SUN Yuke, YAO Baokui. Research of stability of slope on the open pit in China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1998, 6(4): 305-311. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 许宝田, 阎长虹, 罗国煜, 等. 优势面等级灰色聚类评价 [J]. *工程地质学报*, 2003, 11(3): 239-243. [XU Baotian, YAN Changhong, LUO Guoyu, et al. Gray cluster evaluation of preferred plane grade [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2003, 11(3): 239-243. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 刘沐宇, 朱瑞庚. 基于模糊相似优先的边坡稳定性评价范例推理方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(8): 1188-1193. [LIU Muyu, ZHU Ruigeng. Case-based reasoning approach to slope stability evaluation based on fuzzy analogy preferred ratio [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(8): 1188-1193. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王艳霞. 模糊数学在边坡稳定分析中的应用 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 3000-3004. [WANG Yanxia. Application of fuzzy mathematics to slope stability analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 3000-3004. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 许江, 李克钢. 模糊理论在公路边坡稳定性分析中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(2): 61-64. [XU Jiang, LI Kegang. Application of fuzzy theory on slope stability assessment for expressway [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(2): 61-64. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘焕喜, 刘涌江. 可靠性数学在斜坡稳定性分析中的应用 [J]. *西北地质*, 2001, 34(2): 37-42. [LIU Huanxi, LIU Yongjiang. The reliability mathematics' applications on analyzing stability of slope [J]. *Northwestern Geology*, 2001, 34(2): 37-42. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 罗文强, 张倬元, 黄润秋, 等. 斜坡系统可靠性分析研究[J]. *地学前缘*, 2008, 7(增刊): 105-111. [LUO Wenqiang, ZHANG Zhuoyuan, HUANG Runqiu, et al. Advances in the research on reliability of slope system[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 7: 105-111. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李元松, 高晖, 陈峰, 等. 乌尉高速公路边坡稳定性综合评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 150-156. [LI Yuansong, GAO Hui, CHEN Feng, et al. Comprehensive assessment of slope stability in Wu-Yu highway [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 150-156. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李雪平. 基于的区域斜坡稳定性评价 Logistic 回归模型研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2005. [LI Xueping. Study on logistic regression model applied to regional slope stability evaluation based on GIS[D]. Wuhan: China University of Geosciences: Wuhan, 2005. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李晶. 宁镇地区下蜀土滑坡区域预测预报研究 [D]. 南京: 河海大学, 2006. [LI Jing. Study On Forecast Of Landslides In Xiashu Loess In Ningzhen Region[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 穆成林, 裴向军, 裴钻, 等. 基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 150-158. [MU Chenglin, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 150-158. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 吴曙亮, 等. 镇江城市规划区地质灾害防治研究报告 [R]. 南京: 江苏省地质调查研究院, 2015. [WU Shuliang, et al. Research report on the prevention and control of geological disasters in Zhenjiang[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province, 2015. (in Chinese)]
- [20] 赵占群, 杨强国, 谷明成, 等. 四川得荣峡谷公路边坡稳定性评价与防治措施建议 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2016, 27(2): 55-60. [ZHAO Zhanqun, YANG Qiangguo, GU Mingcheng, et al. Stability evaluation and control measures of the valley highway slope in Sichuan Derong County[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2016, 27(2): 55-60. (in Chinese with English abstract)]
- [21] PAWLAK Z. Rough sets [J]. *International Journal of Computer Information Sciences*, 1982, 11(5): 341-356.
- [22] PAWLAK Z. Rough sets and decision tables[M]//*Computation Theory*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985: 187-196.
- [23] PAWLAK Z. Rough set approach to knowledge-based decision support [J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 99(1): 48-57.
- [24] PAWLAK Z. Rough set theory and its applications to data

- analysis [J] . *Cybernetics and Systems*, 1998, 29(7): 661 – 688.
- [25] 董威. 粗糙集理论及其数据挖掘应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2009. [DONG Wei. Rough set theory and data mining applications[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2009. (in Chinese)]
- [26] 宋金龙. 基于数据挖掘技术的强震区公路岩质边坡地质灾害评价体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 51-58. [SONG Jinlong. Study on evaluation system of geological hazard in rock slope along highway in highly seismic region based on data mining technique[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 51-58. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 杜广印, 尚彦军. 从影响因素相互作用关系分析岩石边坡的稳定性 [J] . *江苏地质*, 2000(1): 48 – 54. [DU Guangyin, SHANG Yanjun. Interaction of the factors affecting rock slope stability [J] . *Jiangsu Geology*, 2000(1): 48 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 赵建军. 公路边坡稳定性快速评价方法及应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007: 95-105. [ZHAO Jianjun. Study and application on rapid slope stability evaluation method for highway[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007: 95-105. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 丁继新, 周圣华, 陈梦熊, 等. 基于多因素相互作用关系矩阵的边坡稳定性定量评价 [J] . *工程勘察*, 2006, 34(7): 5 – 8. [DING Jixin, ZHOU Shenghua, CHEN Mengxiong, et al. Quantitative evaluation of slope stability based on the multi-factor interaction related matrix [J] . *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2006, 34(7): 5 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 贺小黑. 岩质边坡稳定性快速评估系统的构建及其应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 105-112. [HE Xiaohai. Construction of a rapid evaluation system for rock slope stability and its application[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 105-112. (in Chinese with English abstract)]