

基于尺度效应的滑坡影响因素的权重修正研究

朱吉祥, 张礼中, 周小元, 王乾, 陆琰

(中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要:控制滑坡发生的影响因素主要包括地层岩性、地质构造、地形地貌以及降水等因素。各影响因素在滑坡演变过程中地位存在差别,这种差别可以用影响因素的权重表征。考虑到滑坡及其影响因素的尺度特征,滑坡灾害危险性评价的结果必然也会受尺度效应的影响,主要表现为不同影响因素的权重会随尺度规模的改变而产生差异性的变化。以小尺度的旺苍县滑坡危险性评价为例,比较分析影响因素权重修正前后的滑坡危险性评价结果与验证结果,结果表明:在小尺度上,空间变化速率较慢的影响因素,包括地层岩性、地貌类型、多年降水分布等,权重会变小;而空间变化速率变化较快的影响因素,包括坡度、坡向等,权重则会变大;在大尺度上,空间变化速率较慢的影响因素,包括地层岩性、地貌类型、多年降水分布等,权重会变大;而空间变化速率变化较快的影响因素,包括坡度、坡向等,权重则会变小。

关键词:滑坡; 危险性评价; 尺度效应; 权重; 四川旺苍

中图分类号: P694

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0181-05

Study of Scale Effect-Based Calibration on Weight of Factors Influencing Landslide

ZHU Jixiang, ZHANG Lizhong, ZHOU Xiaoyuan, WANG Qian, LU Yan

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: The influencing factors which control the landslide occurrence mainly include lithology, geological structure, topography, precipitation and so on. The status of the factors in landslide evolution is different, and can be expressed by weight. As considering the scale characteristic of the landslide and its influencing factors, it is inevitable that the result of landslide hazard assessment would be influenced by scale effects, which mainly represents the change of the weights of landslide influencing factors with the change of the scales. We compared and analyzed the result of the landslide assessment which obtained before and after the weight of factor modification. The result showed that on the small scale, the weight of these factors of which the rate of spatial change was slow such as lithology, topography, precipitation and so on, would be smaller, however, the weight of other factors of which the rate of spatial change was rapid, such as slope, aspect slope and so on, would be greater; on the large scale, the weight of landslide influencing factors was contrary direction to change.

Keywords: landslide; hazard assessment; scale effect; weight; Wangcang County of Sichuan Province

滑坡影响因素的权重体现其在整个滑坡演变与发生过程中的地位^[1],反映了滑坡与其敏感程度,是整个滑坡危险性评价过程中所应获取的最重要的参数之一^[2-3]。权重的确定依赖于对滑坡背景条件的认识程度,通过专家的知识与经验,或利用监测资料进行分析获取,目前常用的权重确定方法有模糊法^[4-5]、神经网络法^[6-8]、证据信度函数法^[9-10]、智能算法^[11-12]、数理统计法^[13-14]与多模型耦合评价法^[15-18]等。由于控制滑坡发育的影响因素在时空尺度内具有不同的变化速率,其中地层岩性与地质构造最慢,地貌类型、年平均降水分布次之,坡度、坡向、单次降水量大小最快。利用这些具有不同时空变化速率的

影响因素进行评价必然会产生一系列的问题,其中最为突出的是这些具有不同时空变化速率的影响因素的权重会随尺度的变化而发生变化。在大尺度上,滑坡危险性评价关注的重点是滑坡的空间格局,它主要受控于变化速率较慢的地层岩性与地质构造,此时变化速率较快的坡度、单次降水等影响因素的地位会相对下降,因此对应的权重也应当相应减小;在小尺度上,滑坡危险性评价需要体现更多的局部区划信息,它主要受控于变化速率较快的坡度、单次降水等影响因素,此时它们地位会相对提升,因此对应的权重也应当相应增大。在以往的研究中,往往忽略区域滑坡灾害评价的多尺度性,而假设所有参与评价的影响因

素均具有同样的变化速率,因此可能会降低评价的精度。本文以旺苍县滑坡危险性区划为例,分析区域滑坡灾害影响因素权重的修正对评价结果精度的影响。

1 研究区概况

旺苍县地处四川盆地北缘,东经 105°58′—106°48′,北纬 31°59′—32°42′。属亚热带湿润季风气候,降水充足,多年平均降水量 1209 mm,降水时空分布不均。地势北高南低,河谷切割较深。岩性以灰岩、砂岩、泥质页岩为主,局部地区分布少量的岩浆岩。米仓山东西向构造带为境内地质构造主体,其次为四川盆地边缘弧形构造带。地貌类型主要为构造侵蚀溶蚀中山与侵蚀堆积河谷平坝。因为该区不仅具有产生滑坡动能(势能)的坡度,而且地势相对平缓,大量的松散堆积物在这些地区进行积累,同时又是人类活动的密集区,农田灌溉、坡脚开挖等行为加剧了斜坡的失稳,形成滑坡。因此,旺苍县滑坡灾害主要受控于研究区的地层岩性、地貌类型、地形特征以及降水量。本研究选取旺苍县 90 个历史滑坡点作为评价对象,这些滑坡点在各影响因素中分布如附图 4—5 所示。通过构建基于信息熵的灰色模型,对研究区滑坡

灾害的危险性进行分析与评价。

2 构建基于信息熵的灰色模型进行滑坡危险性评价

灰色模型的基本原理就是从滑坡演变的机制与影响因素的作用模式出发,运用概率统计的方式构建用于刻画滑坡演变特征的函数^[19-20],由于能较好地评判滑坡演变中各影响因素对滑坡的影响模式,基于该理论的评价模型在滑坡危险性区划中得到了广泛的应用^[21-25]。由于在评价的过程中需要人为主观判断对模型的假设进行耦合,具有一定的主观性与随意性。为了克服这个问题,本研究引入信息熵理论对模型进行修正。信息熵理论主要关注的是事件中某一特定信息出现的不确定性^[26],是基于样本数据的统计分析理论,具有严密的数学与逻辑论证过程,所获的结论是对样本数据所蕴含规律的客观揭示。

基于信息熵的灰色评价模型,其原理就是利用 90 个历史滑坡点统计出研究区滑坡各影响因素熵值的大小(表 1),并以此通过归一化处理获取各影响因素在评价中的权重(表 2),从而取代了传统的利用人为主观判断确定权重的形式。

表 1 旺苍县滑坡危险性评价指标的熵值汇总

评价指标	因子类	滑坡数量/个	面积/km ²	熵值
地层岩性	灰岩	34	1232.346	-0.082
	泥、砂岩夹页岩	28	882.085	0.058
	砂砾岩	3	937.011	0.066
	岩浆岩	5	161.371	0.034
	页岩	15	521.432	-0.041
	其他(第四纪松散堆积物等)	5	113.065	0.390
		总熵值:0.425		
地貌类型	构造侵蚀中山	14	854.621	-0.604
	构造侵蚀溶蚀中山	48	1229.357	0.265
	构造剥蚀低山	26	887.897	-0.023
	侵蚀堆积河谷平坝	2	32.126	0.731
		总熵值:0.369		
坡度/(°)	<15	0	45.833	—
	15~60	6	95.475	0.741
	60~75	5	165.313	0.010
	75~80	6	213.953	-0.066
	80~85	26	899.290	-0.036
	85~90	47	1584.136	-0.010
		总熵值:0.639		
高程/m	<500	3	115.098	-0.139
	500~800	42	659.089	0.755
	800~1000	29	580.969	0.511
	1000~1200	9	552.248	-0.609
	1200~1500	6	694.416	-1.243
	≥1500	1	402.181	-2.489
		总熵值:-3.214		
多年平均 降水量/mm	<900	10	432.661	-0.259
	900~1000	25	498.005	0.516
	1000~1100	22	690.625	0.061
	1100~1200	18	1116.620	-0.620
	≥1200	15	266.086	0.632
		总熵值:0.330		

表 2 各评价指标的标准聚类权重				
评价指标	地层岩性	地貌类型	坡度	多年平均降水量
累积熵值	0.548	0.996	0.751	1.209
聚类权重	0.156	0.284	0.215	0.345

熵值越大,表明滑坡对于该因素的响应越敏感,亦即该影响因素的权重越大;而熵值为负的,表明该影响因素与滑坡的相关性不明显,因此在确定旺苍县滑坡危险性评价的评价因子(影响因素)时,选取地层岩性、地貌类型、坡度以及多年平均降水量 4 个影响因素参与评价,将高程舍去。将 4 个影响因素的熵值进行归一化处理,确定权重(表 2)。

表 3 不稳定斜坡在权重修正前后的滑坡危险性区划中的统计								
滑坡易发性区划	滑坡不危险分区		滑坡低危险分区		滑坡中危险分区		滑坡高危险分区	
	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
不稳定斜坡个数/个	9	9	13	12	5	11	12	7
危险分区面积/km ²	1327.004	1240.127	822.34	798.772	253.709	655.444	600.948	309.657
不稳定斜坡的熵值	-0.541	-0.582	0.305	0.146	0.526	0.257	0.539	0.555

通过分析滑坡各影响因素的熵值统计(表 1)发现,坡度的熵值明显要高于其他 3 个影响因素,达到了 0.639,尤其是坡度范围为 15°~60°,熵值为 0.741。说明滑坡对于坡度变化的敏感程度要远高于其他因素,在实际的野外调查中也发现了这个现象,由于旺苍县属于典型的丘陵地貌,加之纵横的河流对山体的下切作用使得该区的山体大都非常陡峭,往往都超过了 60°,导致这些地区不易形成松散堆积,不易蓄水。因此该区的农耕活动与社会经济活动主要集中在坡度范围为 15°~60°的地区,松散的坡积物与适宜的坡度为滑坡的发生提供了非常有利的条件。评价结果对于这一点并没有体现出来,说明评价结果的实用性不高。

另外,分析验证结果(表 3)发现,各滑坡危险性分区的熵值分布虽然总体上符合区划结果,但是并不非常合理。首先是滑坡低危险分区的熵值太大,为 0.305,滑坡低危险分区作为不利于滑坡发育的分区,从熵值大小的体现来看,应当趋于 0,甚至可以是负值。其次是滑坡中危险分区与滑坡高危险分区的熵值相近,根据信息熵理论,熵值的大小体现了滑坡危险性分区对滑坡的敏感程度,二者呈正相关的关系。从检验的结果来看,滑坡中、高危险分区的熵值分别为 0.526,0.539,说明滑坡中、高危险分区与滑坡的敏感程度差别并不明显,甚至二者可以统一为一类危险性分区。从上述分析可以看出,评价结果的精度不高。

2.2 修正分析

作为小尺度(对应比例尺一般大于 10 万)的县级滑坡灾害评价,评价的结果应当更多关注局部的细节

2.1 结果分析

利用 GIS 的空间分析功能,将各影响因素的权重迭代至灰色评价模型中进行综合分析,根据最大隶属度原则确定一个评价单元的聚类归属,最终获取旺苍县滑坡危险性区划(附图 6A)。为了验证评价结果的正确性,对研究区内 39 个不稳定斜坡进行分析,验证结果如表 3 所示。不稳定斜坡作为未来可能发生的滑坡,在滑坡高危险分区的熵重最大,为 0.539,说明在该危险分区未来发生滑坡的可能性最大,其次依次为滑坡中危险分区、滑坡低危险分区和滑坡不危险分区。

信息,以获取更高精度的区划结果,从而提高其实用性。根据尺度理论,在不同尺度的空间范围内,不同变量可能具有不同的空间变化速率,其中地层岩性、地貌类型最慢,年平均降水次之,坡度最快;同时在大尺度上,空间变化速率快的变量的地位会提高,而变化慢的变量的地位会下降,反之亦然。亦即在小尺度的旺苍县滑坡危险性评价中,空间变化速率快的坡度的权重应当相应增大,而空间变化速率慢的地层岩性、地貌类型等影响因素的权重则应当相应减小。

区域滑坡灾害影响因素的空间变化速率是关于尺度的函数,而针对具体的区域滑坡灾害评价,其评价的尺度一般都是确定的。权重的修正思路是:在确定尺度下,区域滑坡灾害影响因素的空间变化速率可以用其所在尺度的空间变化量来表征。例如在相同的时间内,可以通过测量两个物体运动的路程来获取各自速度的快慢(假设都是匀速行驶)。假设有一图层具有 A,B,C,D 四类不同的属性,例如地层岩性图层中的砂岩、板岩、泥岩、花岗岩等。它们在空间上的分布构成了图层的空间格局,而空间格局体现了该图层的复杂性。从尺度理论上讲,在统一的比例尺下,图层的空间格局越复杂,图层体现的宏观性趋势会越弱,而所需的局部(细节)信息也越多;而从地图学上讲,图层的空间格局实质上是由不同的地图要素组成,图层越复杂,所需的地图要素及其组合一般也就越多。

本方案利用统计不同类型的剖分网格来描述区域滑坡灾害影响因素的空间变化量。在对评价指标所属图层进行网格剖分时,一定会出现两类剖分单元:一类是由多种属性域构成的 I 类剖分单元;另一

类别是由惟一的属性域构成的Ⅱ类剖分单元。Ⅰ类剖分单元代表着不同属性域的空间组合,决定了图层空间变化量的上限;Ⅱ类剖分单元代表独立属性域的空间分布,决定了图层空间变化量的下限。由于在小尺度上,空间变化速率较快的影响因素在整个评价过程中的地位会提高,也就是在小尺度下,如果影响因素对应的图层中Ⅰ类剖分单元数目越多,在评价的过程中越重要,权重也就越大,反之亦然;同理在大尺度上,由于空间变化速率较慢的影响因素,其在整个评价过程中的地位会提高,因此如果影响因素对应的图层中Ⅱ类剖分单元数目越多,在评价的过程中越重要,权重也就越大,反之亦然。因此,通过统计不同影响因素的Ⅰ、Ⅱ类剖分单元的数量,可以获取在相应比例尺范围下的修正系数。

具体的修正思路如下:

(1) 统计各自影响因素中Ⅰ、Ⅱ类与总剖分单元的数量: T_{1j}, T_{2j}, T_j 。

(2) 获取各影响因素中Ⅰ类剖分单元所占的修正系数 k_j :

$$k_j = \frac{T_{1j}}{T_j}$$

(1)

(3) 根据各影响因素修正前的权重 η_j , 获取该影响因素的修正权重 φ_j :

$$\varphi_j = k_j \eta_j$$

(2)

(4) 将修正权重进行归一化处理, 获取本次评价中各影响因素的有效权重 ψ_j :

$$\psi_j = \frac{\varphi_j}{\sum_{j=1}^4 \varphi_j}$$

(3)

(5) 利用基于信息熵的灰色模型, 进行旺苍县滑坡危险性评价。

修正滑坡各影响因素的权重如表 4 所示。

表 4 旺苍县滑坡危险性评价各影响因素的权重修正时所涉及的相关数值

影响因素	地层岩性	地貌类型	坡度	多年平均降水分布
Ⅰ类剖分单元/个	2702	550	5269	1703
修正系数 k_j	0.144	0.029	0.280	0.091
修正权重 φ_j	0.022	0.008	0.060	0.031
有效权重 ψ_j	0.183	0.068	0.493	0.256

对比修正前后滑坡影响因素的权重大小, 其中坡度、地层岩性的权重增大, 以前者最为明显, 从旺苍县的地层岩性分布与坡度分布(附图 4A, 4C)可以看出, 研究区的地层岩性与坡度在局部的变化比较明显, 特别是后者, 导致在该比例尺下, 二者的空间变化速率都比较快, 因此在该比例尺下的权重增大; 相反,

地貌类型与多年平均降水分布的权重下降, 其中以地貌类型的权重减小最为明显, 通过分析旺苍县的地貌类型分布与多年平均降水分布可以发现, 由于该地区的地貌类型与降水分布均比较简单, 使得二者具有较慢的空间变化速率, 因此权重减小。

对比权重修正前的旺苍县滑坡危险性区划结果(附图 6), 最大的区别就是基于坡度体现的局部信息明显丰富; 但是由于导致区划结果发生改变的最重要的坡度分布范围 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 在研究区分布非常小, 因此从宏观上看, 这种改变并不明显, 但是如果各级坡度范围在研究区的分布比较均匀, 权重修正前后的区划结果会发生明显改变。

从表 4 可以看出, 虽然滑坡低危险分区的检验熵值依然不趋于 0, 但从整体看, 检验结果中各危险性分区的熵值大小依次具有较明显的“阶梯”特征, 表明各区划等级的熵值域间隔比较明显, 证明了修正的评价结果具有更好的精度。

3 结 论

(1) 区域滑坡灾害评价是将具有不同时空变化速率的影响因素进行综合考虑的过程, 受尺度效应的影响, 在不同尺度范围内, 各影响因素对评价结果并不一致。大尺度上, 具有较慢时空变化速率的影响因素, 例如地形地貌、多年平均降水量分布等影响因素在评价中的地位提高, 权重增大; 小尺度上, 具有较快时空变化速率的影响因素, 例如坡度、坡向分布等影响因素在评价中的地位提高, 权重增大。

(2) 以尺度理论为基本依据, 提出了一种基于剖分单元类型的权重修正方案。将剖分单元分为两大类: Ⅰ类剖分单元、Ⅱ类剖分单元, 通过统计各影响因素中两类剖分单元的数量, 根据尺度规模选择不同的剖分单元作为修正依据; 在小尺度下, 选择表征具有较快时空变化速率的Ⅰ类剖分单元; 在大尺度下, 选择表征具有较慢时空变化速率的Ⅱ类剖分单元。本文以旺苍县滑坡危险性评价为例, 选择Ⅰ类剖分单元作为修正依据, 确定其与总剖分数的权重修正系数, 将其与各影响因素的原始权重作为修正权重, 经过归一化处理后获取权重修正后的权重。

(3) 宏观上分析, 旺苍县滑坡危险性区划主要受地貌类型与多年平均降水分布的控制; 但从局部上分析, 坡度对其滑坡发育的影响使得研究区的滑坡危险性更加复杂。一方面是由于坡度控制着局部地区第四纪松散堆积物的积累以及地下水的存储条件, 坡度更陡的地区 ($\geq 60^{\circ}$) 往往更容易发生崩塌灾害; 另一方面, 适宜的坡度为坡体滑动提供了足够的势能,

地势比较平缓的地区($\leq 15^\circ$)往往更容易发生泥石流灾害。导致该地区滑坡的危险性区划从坡度范围上分析具有较好的分带特征。

参考文献:

- [1] 王正帅,邓喀中. 基于模糊群决策的老采空区稳定性评价指标权重确定[J]. 煤矿安全,2014,45(3):197-199.
- [2] 叶回春,张世文,黄元仿,等. 粗糙集理论在土壤肥力评价指标权重确定中的应用[J]. 中国农业科学,2014,47(4):710-717.
- [3] 黄定轩,武振业,宗蕴璋. 基于属性重要性的多属性客观权重分配方法[J]. 系统工程理论方法应用,2004,13(3):203-207.
- [4] Ilanloo M. A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2011,19:668-676.
- [5] Wang W D, Xie C M, Xiang-Gang D U. Landslides susceptibility mapping in Guizhou province based on fuzzy theory[J]. Mining Science and Technology,2009,19(3):399-404.
- [6] Tien Bui D, Pradhan B, Lofman O, et al. Landslide susceptibility mapping at Hoa Binh province (Vietnam) using an adaptive neuro-fuzzy inference system and GIS [J]. Computers & Geosciences,2012,45(4):199-211.
- [7] Kayastha P, Dhital M R, De Smedt F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal[J]. Computers & Geosciences, 2013,52(1):398-408.
- [8] Vahidnia M H, Alesheikh A A, Alimohammadi A, et al. A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping[J]. Computers & Geosciences,2010,36(9):1101-1114.
- [9] Lee S, Hwang J, Park I. Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea[J]. Catena,2013,100(2):15-30.
- [10] Althuwaynee O F, Pradhan B, Lee S. Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping[J]. Computers & Geosciences,2012,44(13):120-135.
- [11] Marjanović M, Kovačević M, Bajat B, et al. Landslide susceptibility assessment using SVM machine learning algorithm[J]. Engineering Geology,2011,123(3):225-234.
- [12] Yao X, Tham L G, Dai F C. Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China [J]. Geomorphology,2008,101(4):572-582.
- [13] Wang L J, Sawada K, Moriguchi S. Landslide susceptibility analysis with logistic regression model based on FCM sampling strategy [J]. Computers & Geosciences,2013,57(4):81-92.
- [14] Piacentini D, Troiani F, Soldati M, et al. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy) [J]. Geomorphology,2012,151(1):196-206.
- [15] Oh H J, Pradhan B. Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area[J]. Computers & Geosciences,2011,37(9):1264-1276.
- [16] Vahidnia M H, Alesheikh A A, Alimohammadi A, et al. A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping [J]. Computers & Geosciences,2010,36(9):1101-1114.
- [17] Ercanoglu M, Temiz F A. Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey)[J]. Environmental Earth Sciences,2011,64(4):949-964.
- [18] Pourghasemi H R, Mohammady M, Pradhan B. Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran[J]. Catena,2012,97(15):71-84.
- [19] 刘明贵,杨永波. 边坡位移预测组合灰色神经网络方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,2006,17(2):74-78.
- [20] 马文涛. 基于灰色最小二乘支持向量机的边坡位移预测[J]. 岩土力学,2010,31(5):1670-1674.
- [21] 徐峰,汪洋,杜娟,等. 基于时间序列分析的滑坡位移预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(4):746-750.
- [22] 俞政. 灰色模型在忠武输气管道沿线滑坡预警预报中的应用[J]. 工程地球物理学报,2011,8(5):622-626.
- [23] 王朝阳,许强,范宣梅,等. 灰色新陈代谢 GM(1,1)模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2009,36(2):108-111.
- [24] 姜刚,康艳霞,杨志强,等. 灰色理论模型在矿区滑坡变形预测中的应用[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(3):49-51.
- [25] 王冬,黄鑫,王明东,等. 灰色 GM(2,1)模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 水文地质工程地质,2013,40(3):121-125.
- [26] 马建华. 系统科学及其在地理学中的应用[M]. 北京: 科学出版社,2003.