引文格式：蔡子睿,阮一可,刘华娇. 基于证据权法的滑坡敏感性评价[J]. 地理空间信息, 2023, 21(7): 78-81. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.07.019

基于证据权法的滑坡敏感性评价
——以海地为例

蔡子睿[1]，阮一可[2]，刘华娇[3]
（1. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430079；2. 中国地质大学（武汉）地理与信息工程学院，湖北 武汉 430074；
3. 湖北省航测遥感院，湖北 武汉 430074）

摘　要：震后生态脆弱区滑坡敏感性评价是当前环境保护领域中的一个重要研究方向。针对目前震后生态脆弱区滑坡敏感性评价中存在的问题，以海地为例，提出了一种基于证据权法和多源数据的滑坡敏感性评价方法。通过收集多源数据，选取高程、坡度、坡向、剖面曲率、地形起伏度5个地形因子和土地利用、植被指数两个生态因子建立滑坡敏感性评价指标体系，再利用证据权法计算指标权重，最终得到滑坡敏感性评价结果。与传统信息量方法相比，该方法具有较高的准确性和可靠性，可为生态环境保护提供重要决策支持。

关键词：生态脆弱区；滑坡敏感性评价；证据权法；多源数据
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）07-0078-04

Landslide Sensitivity Evaluation Based on Weight-of-evidence Method: A Case Study of Haiti

CAI Zirui[1], RUAN Yike[2], LIU Huajiao[3]
(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
3. Hubei Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Wuhan 430074, China)

Abstract: Landslide sensitivity evaluation in post-earthquake ecological fragile areas is an important research direction in the field of environmental protection. Aiming at the problems existing in landslide sensitivity evaluation in post-earthquake ecological fragile areas, we proposed a landslide sensitivity evaluation method based on weight-of-evidence method and multi-source data in Haiti. By collecting multi-source data, we selected five topographic factors including elevation, slope, slope direction, profile curvature, terrain fluctuation, and two ecological factors including NDVI and land-use to establish the landslide sensitivity evaluation index system, and calculated the weights of indexes by using weight-of-evidence method. Finally, we obtained the landslide sensitivity evaluation result. Experimental results show that compared with conventional informative methods, the method has higher accuracy and reliability, and can provide important decision support for ecological environment protection.

Key words: ecological fragile area, landslide sensitivity evaluation, weight-of-evidence method, multi-source data

滑坡是指与母体脱离、经过滑动的岩土体，是三大致死自然灾害之一。滑坡敏感性是指某区域在现有地质环境条件下，发生滑坡等地质灾害的可能性以及被未来斜坡运动所影响的程度，国内通常称为易发性。从数学角度来讲，滑坡敏感性评价是一项映射分析，即在现有地质环境条件下计算斜坡失稳的空间概率。在生态脆弱区，滑坡等地质灾害频发，严重威胁着人民生命财产安全和生态环境稳定。因此，评价生态脆弱区的滑坡敏感性，对于科学合理制定生态环境保护措施具有重要意义[1-2]。

从实地考察或遥感图像分析中收集滑坡敏感性研究所需数据主要包括滑坡清单、环境和触发因素。环境因素主要包括坡度、坡向、蓄水、岩性、地质构造与断层的距离、土壤类型、土壤厚度、土地利用类型与变化等；触发因素包括日降雨量、降雨强度持续时间、地震和火山爆发[3]。

滑坡敏感性评价方法主要包括启发式地形和敏感性分区、统计方法、确定性方法、概率方法等。从广义上讲，这些方法可分为定性和定量方法，定性方法包括分布分析或库存、地貌分析和专家（启发式）评

收稿日期：2023-04-07；修回日期：2023-05-11。
第一作者简介：蔡子睿（2002—），研究方向为高精度GNSS数据处理、遥感影像数据处理及应用研究，E-mail：2020302142265@whu.edu.cn。

估技术，主要基于评估者的知识和经验；定量方法包括统计、确定性、概率等技术[4-8]。目前生态脆弱区滑坡敏感性评价研究中存在评价指标体系不完善、权重计算方法不合理等问题，因此本文提出了一种基于证据权法与多源数据的生态脆弱区滑坡敏感性评价方法，并与传统信息量法进行了对比，以证明该方法的有效性。

1　研究区概况

2010年1月12日海地发生了里氏7.0级的地震，震源位于海地首都太子港西南方25 km，即海地西部省莱奥甘附近，震源距离地表约13 km。据报道，这次地震共造成22万人死亡。太子港位于海地共和国西部，是海地首都和政治、经济、文化中心。太子港地形是一个圆形剧场，商业区靠近海边，而住宅区则逐渐拉升；气候属于热带雨林气候[9]。本文选取的研究区位于太子港东南方向。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源

本文采用的数据包括滑坡编目和高精度孕灾因子数据，滑坡编目利用已有资料获取；高精度孕灾因子数据来源于激光雷达数据生成的1 m分辨率DEM和1 m分辨率的高分影像数据[10]。

1）滑坡编目数据。通过整理分析甄别研究区已有滑坡灾害研究资料、遥感影像解译等方法建立研究区详细、可靠的滑坡空间分布矢量数据；再将矢量数据按1 m栅格大小转换为栅格图，共得到36 363个滑坡栅格单元，整个研究区栅格单元数为3 339 280个。

2）孕灾因子数据。滑坡孕灾因子包括高程、坡度、坡向、剖面曲率、地形起伏度5个地形因子和土地利用、植被指数两个生态因子。地形因子均基于研究区的DEM数据，生态因子通过高分影像获取。

2.2　研究方法

证据权法（WOE）常用于预测潜在的滑坡敏感区域[11]，通过定量数据驱动的方法对滑坡数据集进行组合。利用WOE方法的先验概率可计算得到滑坡敏感性的条件概率以及负、正权值。先验概率的计算公式为：

$$p\{S\}=\frac{N_{\mathrm{pix}}(\mathrm{slide})}{N_{\mathrm{pix}}(\mathrm{total})} \tag{1}$$

式中，$p\{S\}$为发生滑坡S的条件概率；$N_{\mathrm{pix}}(\mathrm{slide})$为研究区域滑坡内的像素总数；$N_{\mathrm{pix}}(\mathrm{total})$为研究区域内的像素总数。

条件概率的计算公式为：

$$P\left\{\frac{S}{B}\right\}=\frac{P\{SnB\}}{P\{B\}}=\frac{N_{\mathrm{pix}}\{SnB\}}{N_{\mathrm{pix}}\{B\}} \tag{2}$$

式中，$N_{\mathrm{pix}}\{SnB\}$为滑坡中参数类别B的像素总数；$N_{\mathrm{pix}}\{B\}$为参数类别B在总研究区域中的像素总数。

WOE方法确定了所有关于该地区有无滑坡的预测原因因素的权重。

$$\begin{cases} W_i^+=\ln\left(\dfrac{P\left\{\dfrac{B_i}{S}\right\}}{P\left\{\dfrac{B_i}{\bar{S}}\right\}}\right) \\ W_i^-=\ln\left(\dfrac{P\left\{\dfrac{\bar{B}_i}{S}\right\}}{P\left\{\dfrac{\bar{B}_i}{\bar{S}}\right\}}\right) \end{cases} \tag{3}$$

$$C_i=W_i^+-W_i^- \tag{4}$$

式中，B_i为潜在的滑坡预测因素；$\bar{B}_i$为缺乏潜在的滑坡预测因素；S为存在滑坡；$\bar{S}$为不存在滑坡；W_i^+为正权重，表示存在可预测的因素；W_i^-为负权重，表明滑坡中没有可预测的因素；C_i为每个因子的敏感值，值越高，表明该因子对滑坡的响应和敏感性越高。

WOE方法的适用条件是各证据因子与滑坡点的分布满足条件独立。本文假设它们具有独立性，对于证据因子，研究区内任一单元为滑坡单元的可能性，即R在实际应用中可表示为：

$$\ln R=W_0+\sum_i^n W_i^k \quad i=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

式中，$W_0=\ln[P_0/(1-P_0)]$；P_0为滑坡先验概率；W_i^k为第i个证据因子的权重；后验概率$P_{\text{后验}}=R/(1+R)$。

2.3　对比方法

为了验证本文方法在滑坡敏感性评价中的准确性，本文选择传统的信息量方法进行对比。信息量法是根据已知的变形或破坏区域的现实情况和所得信息，将反映各影响区域稳定性因素的实测值转换为影响该区域稳定性的信息量值[12]。定量评价因子对结果影响程度的数学运算模型为：

$$I=LN\left(\frac{N_i/S_i}{N/S}\right) \tag{6}$$

式中，S为研究区单元格个数；N为滑坡灾害单元格个数；S_i为某因子单元格个数；N_i为某因子内发生灾害的单元格个数。

3　滑坡因子整体敏感性分析评价

根据研究区的高分影像数据和DEM，本文对高程、坡度、植被指数、土地利用类型、坡向、起伏度和剖面曲率7个孕灾因子进行分级；再利用该区域的滑坡矢量数据，基于WOE方法计算得到各因子等级

的证据权值；最后得到各因子对滑坡的整体敏感性值、后验概率和信息量（表1）。由表1可知，滑坡对于不同影响因子的敏感度依次为起伏度>坡度>坡向>土地利用类型>高程>植被指数>剖面曲率，与信息量的结果一致。其中，起伏度40~584 m范围较利于灾害发育，高起伏度影响地表物质的侵蚀、搬运、堆积等过程，在很大程度上决定了滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的易发程度；坡度40°~60°范围较利于灾害发育，该区域多为山地，坡度越大、灾害越易发；坡向东北向较利于灾害发育，该方向受季风气候影响，灾害易发；河流附近区域灾害敏感性值较高，河流冲刷作用对河岸造成一定影响，灾害易发；高程963~1 200 m范围主要对应起伏山地区域，灾害易发。起伏度、坡度和坡向是区域内滑坡发育的关键控制因子，这与实际滑坡分布是吻合的。由此可见地形因子控制和决定了区域内滑坡的形成和发育。

表1 各评价指标证据权重、后验概率和信息量

孕灾因子	等级	B_i	$\bar{B}_i$	W_i^+	W_i^-	C_i	$P_{后验}$	I
高程/m	1 200~1 400	1 753	1 294 841	−1.726 22	0.517 04	−2.243 26	0.001 37	−1.719 99
	963~1 200	19 953	1 562 924	0.517 66	−1.675 13	2.192 79	0.013 49	0.512 56
坡度/(°)	0~20	577	708 880	−2.235 00	1.293 33	−3.528 33	0.000 82	−2.228 24
	20~40	4 124	914 883	−0.523 38	1.190 97	−1.714 35	0.004 62	−0.520 29
	40~60	12 486	741 757	0.794 18	0.576 76	0.217 42	0.018 01	0.785 07
	60~89	4 624	493 172	0.209 00	0.951 71	−0.742 71	0.009 79	0.207 25
植被指数	极高	3 707	929 469	−0.645 79	0.205 58	−0.851 37	0.004 08	−0.642 20
	高	13 291	1 411 581	0.213 22	−0.262 02	0.475 23	0.009 83	0.211 43
	中	3 712	346 256	0.342 99	−0.057 84	0.400 83	0.011 25	0.339 90
	低	1 055	164 345	−0.169 83	0.009 45	−0.179 28	0.006 63	−0.168 65
	极低	19	5 287	−0.749 97	0.000 97	−0.750 94	0.003 67	−0.745 98
土地利用类型	林地	12 855	1 701 474	−0.006 92	0.010 02	−0.016 94	0.007 84	−0.006 87
	居民区	2 240	275 323	0.067 13	−0.007 40	0.074 53	0.008 46	0.066 60
	水泥路	1 046	128 210	0.069 90	−0.003 40	0.073 30	0.008 48	0.069 35
	耕地与绿地	4 434	660 669	−0.125 35	0.034 67	−0.160 03	0.006 94	−0.124 46
	河流	1 209	91 262	0.554 66	−0.024 68	0.579 33	0.014 02	0.549 07
坡向	北	5 614	449 542	0.495 63	−0.127 04	0.622 67	0.013 18	0.490 80
	东北	5 813	397 222	0.654 20	−0.160 81	0.815 01	0.015 55	0.647 25
	东	2 129	266 735	0.047 99	−0.005 06	0.053 05	0.008 29	0.047 62
	东南	1 175	221 441	−0.360 29	0.025 01	−0.385 30	0.005 45	−0.358 00
	南	806	304 356	−1.055 27	0.074 57	−1.129 85	0.002 69	−1.050 34
	西南	1 938	414 306	−0.486 35	0.063 03	−0.549 38	0.004 80	−0.483 44
	西	1 656	382 691	−0.564 23	0.064 31	−0.628 54	0.004 43	−0.560 96
	西北	2 679	421 310	−0.179 33	0.027 89	−0.207 22	0.006 57	−0.178 09
起伏度/m	0~5	17 378	2 246 263	0.016 78	−0.063 19	0.079 97	0.008 03	0.016 65
	5~15	3 576	509 203	−0.080 00	0.016 47	−0.096 47	0.007 27	−0.079 42
	15~25	49	85 046	−2.580 53	0.027 86	−2.608 39	0.000 58	−2.573 53
	25~40	12	10 430	−1.888 94	0.003 09	−1.892 03	0.001 16	−1.882 51
	40~584	796	7 750	2.602 75	−0.034 47	2.637 22	0.126 96	2.512 56
剖面曲率	0	6 106	635 290	0.233 79	−0.077 93	0.311 72	0.010 05	0.231 80
	0~21	8 795	1 032 934	0.112 62	−0.069 50	0.182 12	0.008 86	0.111 72
	21~32	4 260	497 888	0.117 49	−0.026 55	0.144 04	0.008 91	0.116 55
	32~43	2 181	469 218	−0.492 69	0.073 37	−0.566 06	0.004 77	−0.489 75
	43~59	469	222 272	−1.282 46	0.058 96	−1.341 42	0.002 14	−1.276 99

注：S=21 811，$\bar{S}$=2 866 971。

根据后验概率结果，运用叠加分析工具，得到研究区每个栅格的后验概率叠加值；再采用自然断点法将滑坡敏感性划分为极低敏感区、低敏感区、中敏感区、高敏感区、极高敏感区5类（图1），可以看出，极高敏感区、高敏感区主要分布在山脉侧部，通常在起伏度>40 m，坡度>40°，朝东北向范围内，长期受雨水侵蚀、冲刷和季风气候影响，区域稳定性变差，易发生滑坡灾害；低敏感区主要集中在起伏度小的居民区域。

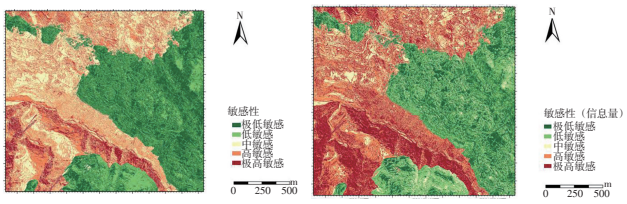
4 预测精度分析

对研究区滑坡敏感性分区结果进行统计（表2），可以看出，约43%的滑坡发生在极高敏感区，约37%的滑坡发生在高敏感区，约占滑坡总面积的80%。

表2　研究区滑坡敏感性分区统计表

敏感性分区	滑坡栅格数	占总滑坡比例/%
极低敏感区	206	1
低敏感区	1 363	6
中敏感区	2 761	13
高敏感区	7 997	37
极高敏感区	9 457	43

为进一步证明本文方法在滑坡敏感性评价中的准确性，将其与信息量方法进行对比，结果见图1b；并利用受试者工作特征曲线对证据权模型进行预测能力验证。按等面积将敏感区划分为若干份，分别求取每一等份内滑坡发生的面积占比，并绘制ROC曲线（图2）；再通过ROC曲线与 X 轴围成的面积AUC值来衡量评价结果的精度，AUC值越大，精度越高。通过计算，WOE方法、信息量法预测模型的AUC值分别为81.7%和76.3%，说明两种方法均能较客观准确地评价研究区地质灾害敏感性，且WOE方法模型在研究区的预测正确率更高。WOE方法是一个计算证据层后验概率的模型，能较好地避免预测指标选择及其权重赋值的主观性，对于权的解释是相对直观且独立确定的。



a WOE方法　　b 信息量法

图1　研究区滑坡敏感性分区图

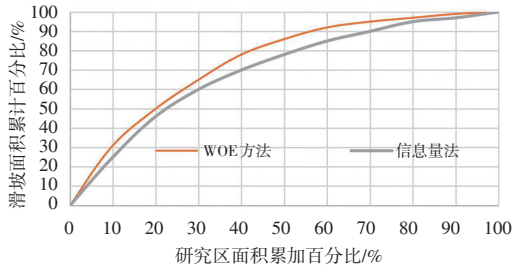


图2　敏感性评价ROC曲线

5　结　语

本文基于WOE方法，利用多源数据对海地震后脆弱区滑坡敏感性进行了评价；通过建立评价指标体系，计算指标权重和后验概率，开展脆弱区滑坡敏感性分析。

1）采用滑坡敏感性值表示各因子对滑坡发育的整体影响程度。研究区滑坡对于各影响因子的敏感度依次为起伏度>坡度>坡向>土地利用类型>高程>植被指数>剖面曲率。其中，地形起伏度、坡度和坡向是研究区滑坡发育最重要的控制因子，即地形因子控制和决定了滑坡的形成发育。

2）根据易发性等级划分结果，80%的滑坡发生在极高敏感区和高敏感区内；由ROC曲线可知，研究区滑坡易发性评价结果的预测精度达到了81.7%，优于信息量法的76.3%，证明WOE方法能较好地避免预测指标选择及其权重赋值的主观性，具有较好的精度。

区域滑坡灾害敏感性评价能为滑坡风险管理、城市规划等提供重要的科学依据，对区域滑坡灾害防灾减灾具有一定的指导意义，也是滑坡灾害研究领域的科技难题。虽然目前滑坡敏感性研究水平不断提高、成果日趋成熟完善；但由于滑坡敏感性研究的复杂性，仍有许多问题需要深入探索和解决。

参考文献

[1] 王志恒,汪东川,胡炳旭,等.考虑滑坡敏感性的天津市蓟州区生态网络构建[J].生态学报,2018,38(12):4 351-4 362

[2] 朱庆,张旻迪,丁雨淋,等.环境因子空间特征约束的区域滑坡敏感性模糊逻辑分析方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 431-1 440

[3] 车文超,秦胜伍,苗强,等.滑坡敏感性评价中因子分类方法的研究[C]//第十一届全国工程地质大会论文集,武汉,2020

[4] 邵健.基于机器学习的滑坡敏感性评价研究[D].贵阳:贵州大学,2022

[5] 赵忠国.基于空间数据库和机器学习的滑坡敏感性评价:以新源县为例[D].乌鲁木齐:新疆大学,2020

[6] 王卫东,何卓磊,韩征,等.基于深度信念网络的滑坡敏感性评价[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(5):609-615

[7] 冯凡,唐亚明,卢全中,等.数理统计模型在黄土滑坡敏感性评价中的应用[J].甘肃科学学报,2019,31(3):68-76

[8] 郑向东,妙丹,薛东剑.滑坡敏感性评价模型研究[J].地理空间信息,2016,14(7):98-100

[9] Gorum T,Westen C J V,Korup O,等.2010年海地地震的复杂破裂机制与地形控制的滑坡样式对称性[J].世界地震译丛,2014,45(3):63-76

[10] 焦其松,张景发,蒋洪波,等.基于机载LiDAR数据的海地地震震后建筑物信息提取与三维建模[J]. 地壳构造与地壳应力文集,2016(2):107-115

[11] 李霞,宿星,张满银,等.基于证据权法与多源数据的陇中生态脆弱区滑坡敏感性评价:以天水市为例[J].冰川冻土,2023,45(1):67-79

[12] 李光辉,铁永波.基于信息量模型的综合地质灾害易发性建模方法对比研究[J/OL].(2023-02-27)[2023-03-15].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVl2pW9UrhTDCdPD674k102rgjwmV6lJnzVQpeerib--u4e_yFj1GTzzgYMMrE1L2Q6iLs5&uniplatform=NZKPT