

doi: [10.12097/gbc.2023.02.034](https://doi.org/10.12097/gbc.2023.02.034)

区域地质灾害易发性评价的证据权法原理与实践

冯振, 陈亮*, 王立朝, 侯圣山, 田怡帆, 刘明学

FENG Zhen, CHEN Liang*, WANG Lichao, HOU Shengshan, TIAN Yifan, LIU Mingxue

中国地质环境监测院, 北京 100081

China Institute of Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China

摘要: 在阐述证据权法概念与原理的基础上, 以西北黄土高原滑坡、崩塌地质灾害高易发的兰州市区为评价区, 详解基于证据权法的区域地质灾害易发性评价的技术流程, 利用 GIS 工具, 开展评价指标选取与相关性分析、证据因子权重与后验概率分析、评价模型检验、易发程度评价。分析结果显示, 坡度、坡向、地层岩性、断层、绿化灌溉、土地利用类型等地质灾害影响因素之间呈无相关或弱相关性, 符合相互独立的要求, 组成的模型 ROC 曲线 (接受者操作特征曲线) AUC 值 (曲线下面积) 为 0.85, 具有较高的预测精度。理论与实践表明, 与其他统计学方法相比, 证据权法同时考虑了评价指标中存在地质灾害与不存在地质灾害 2 种情况, 避免了当地质灾害不存在时权重偏大导致结果失真的问题。证据权法结果为地质灾害发生的绝对概率, 可以作为不同区域、地区的地质灾害易发程度对比的依据。

关键词: 地质灾害; 易发性评价; 证据权; 后验概率; ROC 曲线; 兰州

中图分类号: P628; P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)07-1255-11

Feng Z, Chen L, Wang L C, Hou S S, Tian Y F, Liu M X. Principle and application of the weight-of-evidence method in regional landslide susceptibility assessment. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(7): 1255-1265

Abstract: Based on elaboration of the concept and principle of WoE, Lanzhou urban area, which is highly prone to slides and falls in the Loess Plateau of Northwest China, is taken as example to detail technical process of regional geological hazards susceptibility assessment based on the WoE. GIS tools are used to carry out evaluation index selection and correlation analysis, weight and posterior probability analysis of evidence factors, assessment model verification, and susceptibility degree classification and assessment. The analysis results show that there is no correlation or weak correlation between the factors affecting geological hazards such as slope, slope direction, stratum lithology, faults, waterfalls, green irrigation and land use type, which meets the requirements of mutual independence. AUC (Area Under Curve) of the ROC curve (Receiver Operating Characteristic Curve) of the model is 0.85, which means high prediction accuracy. Theoretical analysis and empirical application have demonstrated that, in comparison with other statistical methods, the WoE takes into account both probability of the presence and absence of geological hazard within the evaluation factors. Thereby, it prevents distortion caused by overestimation of weights when geological hazards are absence. The result of the WoE is the absolute probability of the occurrence of geological hazards, which can serve as a basis for comparing the susceptibility of geological hazards from different areas.

Key words: geological hazards; susceptibility assessment; weight of evidence; posteriori probability; ROC curve; Lanzhou urban area

中国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带的交汇部位, 构造与地震活动强烈, 地形地貌、地质条件复杂, 加之气候类型多样、人类工

程活动剧烈, 地质灾害易发、多发、频发, 地质灾害防治工作形势严峻。地质灾害调查评价是地质灾害防治工作的基础。自 1999 年以来, 全国通过分阶段、

收稿日期: 2023-02-17; 修订日期: 2023-08-19

资助项目: 中国地质调查局项目《重点地区地质灾害风险调查与评价》(编号: DD20221748)、《洮河流域中游灾害地质调查》(编号: DD20190645)和贵州电科院科技项目《山区电网地质灾害危险性快速与动态评价技术研究》(编号: 0002200000089405)

作者简介: 冯振(1985-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事工程地质、地质灾害等研究。E-mail: fengzhencgs@126.com

* 通信作者: 陈亮(1983-), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事地质灾害调查与风险评价研究。E-mail: 109209183@qq.com

递进式的调查,基本摸清了地质灾害基本状况,为最大限度地减少人员伤亡和财产损失发挥了重要作用(李媛等,2004;殷跃平,2022)。当前,生态文明建设、构建平安中国等新形势对地质灾害防灾减灾提出了更高的要求,必须深入开展地质灾害孕灾条件、诱发因素和发育规律,以及极端条件下地质灾害危险性和风险评价的研究。为此,全国正在全面开展1:50000地质灾害风险调查与评价工作,“十四五”期间将继续部署1423个县1:50000地质灾害风险调查,并针对人口聚集区、重点移民城镇、公共基础设施区等地区部署开展1:10000地质灾害调查(自然资源部,2022)。

与以往相比,1:50000地质灾害风险调查评价强调评价量化,《地质灾害风险调查技术要求(1:50000)》推荐使用证据权法(自然资源部,2021)。证据权法是20世纪80年代产生的多变量统计分析方法,最初用于医疗诊断。随着GIS的应用,Agterberg、Bonham-Carter等数学地质学家将证据权法引入矿产预测中(Agterberg et al., 1993; Cheng et al., 1999; 邓勇等,2007; 孙岩等,2010; 范海明等,2017),并于21世纪初开始用于地质灾害风险评价(Lee et al., 2004; Kobayashi et al., 2005; Neuhaeuser et al., 2007; 张艳玲,2009; 赵志芳等,2010)。基于证据权法进行地质灾害评价的文献中,一般以某个工作区为例,主要介绍评价指标的选取与评价结果,证据权法原理与计算过程的解释较简略,缺少专门针对地质灾害易发性评价的详细说明(Dahal et al., 2008; 许冲等,2011; Armaş et al., 2012; 俞布等,2012; Ilia et al., 2016; 杨华阳等,2020; Goyes-Penafiel et al., 2021; 吴明堂等,2022)。本文从贝叶斯定理出发,阐述证据权法的概念、原理与技术流程,选取西北黄土高原崩滑灾害高易发地区,通过影响因子相关性分析确定地质灾害易发性评价指标,详细介绍证据权重、后验概率的计算公式与过程,开展评价模型ROC曲线检验,进行地质灾害易发程度评价与划分,开展证据权法在地质灾害易发性评价中的应用示范,为区域地质灾害风险调查与评价实践提供参考。

1 证据权法原理

1.1 先验概率

贝叶斯定理是关于2个随机独立事件的条件概率推理的一则定理,证据权法以贝叶斯定理为基础

(Zêzere et al., 2000; Velmurugan et al., 2018)。在地质灾害易发性评价中,随机独立事件可以理解为地质灾害与评价指标。利用证据权法开展地质灾害易发性评价,首先将评价指标栅格化,再按照一定的阈值重分类为多个证据因子。根据地质灾害编录与评价指标的重叠关系,假设 D 表示栅格单元中存在地质灾害, T 为栅格单元中存在证据因子,用 $P(D)$ 表示地质灾害的分布概率,用 $P(T)$ 表示证据因子的分布概率。 $P(D)$ 与 $P(T)$ 通过栅格面积(或数量)统计可知,计算表达式分别为:

$$P(D) = A_L / A_t \quad (1)$$

$$P(T) = A_j / A_t \quad (2)$$

其中, A_L 为地质灾害的面积, A_j 为某证据因子 j 的面积, A_t 为调查评价区的面积。

$P(D)$ 与 $P(T)$ 之间相互独立,计算 $P(D)$ 不需要考虑 T 、计算 $P(T)$ 不需要考虑 D ,称为先验概率。

1.2 后验概率

根据贝叶斯定理及公式,证据因子中发生灾害的概率为 $P(D|T)$ 表示,其计算公式为:

$$P(D|T) = P(T \cap D) / P(T) = P(T|D) \times P(D) / P(T) \quad (3)$$

那么相应地,证据因子中不发生灾害的概率为:

$$P(\bar{D}|T) = P(T \cap \bar{D}) / P(T) = P(T|\bar{D}) \times P(\bar{D}) / P(T) \quad (4)$$

类似地,可以得到非证据因子中发生与不发生灾害的概率分别为:

$$P(D|\bar{T}) = P(\bar{T} \cap D) / P(\bar{T}) = P(\bar{T}|D) \times P(D) / P(\bar{T}) \quad (5)$$

$$P(\bar{D}|\bar{T}) = P(\bar{T} \cap \bar{D}) / P(\bar{T}) = P(\bar{T}|\bar{D}) \times P(\bar{D}) / P(\bar{T}) \quad (6)$$

$P(D|T)$ 、 $P(\bar{D}|T)$ 等概率,是已知 $P(D)$ 与 $P(T)$ 情况下的条件概率,也称为后验概率。

1.3 后验几率

统计学中将事件发生的概率与该事件不发生概率的比值称为几率,几率比概率能够更好地表示事件发生的可能性大小,其计算表达为:

$$O = P / (1 - P) = P / \bar{P} \quad (7)$$

将公式(3)除以公式(4)、将公式(5)除以公式(6),分别得到证据因子与非证据因子中发生灾害的

后验几率为:

$$O(D|T) = \frac{P(T|D)}{P(T|\bar{D})} \times O(D) \quad (8)$$

$$O(D|\bar{T}) = \frac{P(\bar{T}|D)}{P(\bar{T}|\bar{D})} \times O(D) \quad (9)$$

在后验几率公式的两侧取自然对数, 则公式可表示为:

$$\ln O(D|T) = \ln \frac{P(T|D)}{P(T|\bar{D})} + \ln O(D) \quad (10)$$

$$\ln O(D|\bar{T}) = \ln \frac{P(\bar{T}|D)}{P(\bar{T}|\bar{D})} + \ln O(D) \quad (11)$$

1.4 证据权重

令:

$$W^+ = \ln \frac{P(T|D)}{P(T|\bar{D})} \quad (12)$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{T}|D)}{P(\bar{T}|\bar{D})} \quad (13)$$

其中, W^+ 表示评价单元中证据因子存在的权重值, W^- 表示评价单元中证据因子不存在的权重值。评价指标中证据因子 j 的证据权, 其计算公式可以表示为:

$$W_j^+ = \ln \frac{P(T_j|D)}{P(T_j|\bar{D})} = \ln \left(\frac{\frac{A_j \cap A_L}{A_L}}{\frac{A_j \cap \bar{A}_L}{\bar{A}_L}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{证据因子 } j \text{ 中的灾害面积}}{\text{调查评价区的灾害面积}}}{\frac{\text{证据因子 } j \text{ 中的非灾害面积}}{\text{调查评价区的非灾害面积}}} \right) \quad (14)$$

$$W_j^- = \ln \frac{P(\bar{T}_j|D)}{P(\bar{T}_j|\bar{D})} = \ln \left(\frac{\frac{\bar{A}_j \cap A_L}{A_L}}{\frac{\bar{A}_j \cap \bar{A}_L}{\bar{A}_L}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{非证据因子 } j \text{ 中的灾害面积}}{\text{调查评价区的灾害面积}}}{\frac{\text{非证据因子 } j \text{ 中的非灾害面积}}{\text{调查评价区的非灾害面积}}} \right) \quad (15)$$

可以看出, 权重是证据因子存在或不存在条件下, 地质灾害与非地质灾害分布概率的比值。当证据因子与地质灾害发生正相关时, 即证据因子对地质灾害发生具有显著促进作用, 权重值表示为 $W^+ > 0$; $W^- < 0$; 当证据因子与地质灾害发生负相关时,

即证据因子与地质灾害发生没有明显关系, 权重值为 $W^+ < 0$ 、 $W^- > 0$; 当证据因子与地质灾害发生不相关时, 即证据因子中没有地质灾害发生, 权重值 $W^+ = 0$ 。将正权与负权之差称为相对系数或敏感性系数:

$$C = W^+ - W^- \quad (16)$$

相较于正权或负权, 相对系数同时考虑了证据因子存在与不存在的情况, 可以更好地反映证据因子对地质灾害发生的影响, 其值越大表示证据因子的控灾作用越大。

1.5 证据综合与后验概率

通过引入证据权, 以自然对数表示的证据因子存在和不存在的后验几率可写为:

$$\ln O(D|T) = W^+ + \ln O(D) \quad (17)$$

$$\ln O(D|\bar{T}) = W^- + \ln O(D) \quad (18)$$

假设某个评价指标有 j 个 ($j=1, 2, \dots, y$) 相互独立的证据因子, 栅格单元发生灾害的后验几率可以由单元内证据因子存在或不存在条件下的后验几率叠加得到, 即:

$$O\{D|T_1^k \cap T_2^k \dots \cap T_y^k\} = \frac{P(A_1^k|A_L)}{P(A_1^k|\bar{A}_L)} \times \frac{P(A_2^k|A_L)}{P(A_2^k|\bar{A}_L)} \times \dots \times \frac{P(A_y^k|A_L)}{P(A_y^k|\bar{A}_L)} \times O(D) \quad (19)$$

当证据因子存在时, k 取 “+”, 即为正权, 采用公式(8)计算; 不存在时 k 取 “-”, 为负权, 采用公式(9)计算。每个评价指标中仅有一个证据因子为正权, 其余为负权。栅格单元发生灾害的对数后验几率为:

$$\ln O\{D|T_1^k \cap T_2^k \dots \cap T_y^k\} = \ln \frac{P(A_1^k|A_L)}{P(A_1^k|\bar{A}_L)} + \ln \frac{P(A_2^k|A_L)}{P(A_2^k|\bar{A}_L)} + \dots + \ln \frac{P(A_y^k|A_L)}{P(A_y^k|\bar{A}_L)} + \ln O(D) \quad (20)$$

在进行地质灾害易发性评价时, 一般需要考虑多个评价指标的综合影响, 即多组证据因子的综合证据权。假设 i 个 ($i=1, 2, \dots, x$) 评价指标之间是相互独立的, 任一栅格单元中灾害发生的后验几率为:

$$F = \ln O\{D|T_{11}^k \cap T_{12}^k \dots \cap T_{ij}^k \dots \cap T_{xy}^k\} = \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y W_{ij}^k + \ln O(D) \quad (21)$$

由公式(21)可以看出,栅格单元的综合后验几率可分为综合证据权与灾害先验几率,其中灾害先验几率为常数。综合证据权项是由单元内存在的证据因子的正权,与不存在的证据因子的负权之和。其中,每个评价指标有且仅有一个证据因子存在。为了省略判断各评价指标中证据因子是否存在的步骤,令证据因子的权重为:

$$W_{ij} = C_{ij} + \sum_{j=1}^y W_{ij}^- \quad (22)$$

那么可将综合后验几率写为:

$$F = \sum_{i=1}^x C_{ij} + \sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y W_{ij}^- + \ln O(D) = \sum_{i=1}^x \left(C_{ij} + \sum_{j=1}^y W_{ij}^- \right) + \ln O(D) = \sum_{i=1}^x (W_{ij}) + \ln O(D) \quad (23)$$

在 GIS 平台中,按评价指标分组计算证据因子的正权、负权,通过代数计算得到各评价指标权重图层,叠加后加上先验几率项,即可得到综合后验几率。根据公式(7),按照以下公式计算可以得到评价单元发生灾害的后验概率:

$$P_F = O_T / (1 + O_T) = \exp(F) / (1 + \exp(F)) \quad (24)$$

最终,利用证据权法计算得到评价区后验概率图层,即可开展地质灾害易发性程度评价与划分。

2 评价区概况

兰州市地处中国陇西黄土高原的西部边缘与青藏高原的交接地带。总体地势南高北低,南部为侵蚀构造低中山地貌,最高点皋兰山山顶高程 2129.6 m,中部为侵蚀堆积河谷平原,海拔 1466~1520 m,北部为侵蚀堆积黄土丘陵,海拔多在 1800 m 左右。区内出露的地层以新生界为主,包括第四系(Q₁—Q₄)风积黄土及松散堆积物,古近系始新统西柳沟组(E₁₋₂x)砂砾岩、粉砂岩,古近系渐新统野狐城组(E₃y)粉砂质泥岩、细砂岩、砾岩,新近系中新统咸水河组(N₁)粉砂质泥岩、砂岩、砂砾岩,其次为白垩系河口群(K₁hk₄)砾岩、泥质砂岩,以及前寒武系皋兰群(A_nCgl)黑云片岩、片麻岩,局部分布黑云母花岗岩、煌斑岩脉等侵入岩。自古近纪以来,兰州市褶皱、隆凹、断陷、断裂等活动构造相对活跃,查明的活动断裂有皋兰山断层、金城—马关断层、刘家堡断层、兴隆山断层等 20 余条。总而言之,兰州市自然与地质

环境呈现地表沟壑纵横、岩土体较软弱、地质构造复杂等特点。近年来,受城市扩张、提水灌溉的影响,兰州市滑坡、崩塌地质灾害高易发,成为国内受地质灾害威胁最严重的城市之一(黎志恒等,2014;尚瑾瑜等,2017;郭富赞,2019)。

本文选取兰州市主城区及南北两山地质灾害高易发区开展评价示范,评价范围为兰州市幅 1:50000 标准图幅,长 22.5 km,宽 18.5 km,面积约 414 km²。通过收集地方主管部门地质灾害台账数据,结合高精度遥感影像进行人工目视解译发现,评价区内发育新、老滑坡与崩塌共计 391 处,其中滑坡 361 处、崩塌 30 处,规模以小—中型为主(图 1)。

评价区地层岩性简单,按岩性组合可将斜坡类型分为黄土斜坡、黄土—基岩复合斜坡、第四系堆积层—基岩复合斜坡及基岩斜坡,各类斜坡中主要发生的滑坡崩塌类型有黄土滑坡与崩塌、黄土—泥岩滑坡、堆积层滑坡与崩塌、基岩滑坡与崩塌。

黄土滑坡与崩塌是发育最广泛的地质灾害,规模一般较小,平面形态多呈半椭圆形或簸箕状,主要分布于黄河河谷高阶地前缘及评价区北部黄土丘陵区大型沟谷两岸的黄土斜坡中。黄土垂直节理发育,在长期风化和降雨作用下,节理贯通向斜坡深部扩展。受黄土垂直节理控制,黄土滑坡滑动面后壁一般较陡且滑面较平直、光滑,中下部近似于弧形,表现为后倾、多级圆弧形滑动。当黄土下部存在早期阶地冲积、洪积卵砾石层时,也较容易发生黄土滑坡,滑坡沿砾石层与黄土之间的泥化夹层剪出,如皋兰山 I₁ 古滑坡。黄土崩塌主要发生在黄土陡坡边缘,土体受垂向节理切割多为塔柱状,失稳模式主要为向前倾倒或底部剪切滑移。

黄土—泥岩滑坡主要由黄土和古近系、新近系或白垩系红层组成,主要发生在评价区南部的皋兰山一带,根据斜坡结构可划分为黄土—泥岩顺层滑坡和黄土—泥岩切层滑坡。黄土—泥岩顺层滑坡发生在下伏泥岩倾向与坡向一致的斜坡,滑体主要由黄土和泥、砂岩组成,沿较软弱的泥岩层面滑动,滑坡后壁多为黄土拉裂面,规模一般较大。黄土—泥岩切层滑坡发生在下伏泥岩倾向坡内或近水平状的高陡斜坡,一般具有高陡的滑坡后壁、巨大的滑坡体、多级滑坡台地、前缘鼓丘、后部封闭洼地等滑坡地貌,滑坡规模以巨型、大型为主,如皋兰山 II 滑坡。

堆积层滑坡与崩塌发育于斜坡中下部一带的第

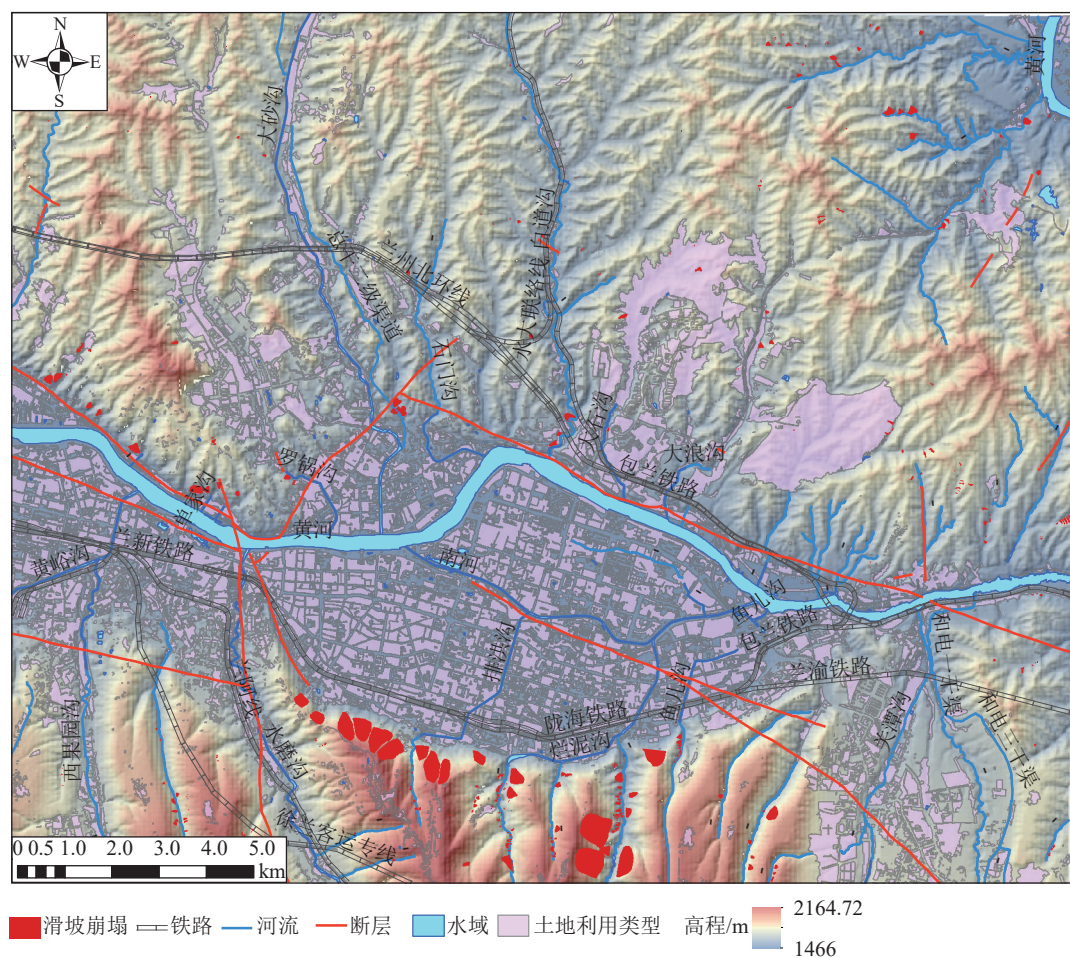


图 1 评价区地质灾害分布图

Fig. 1 Landslide distribution in study area

四系松散混杂堆积物中。堆积物的成因类型主要有坡积物、残积物、洪积物和重力堆积物,以基岩分布区较发育,一般分布于河流岸坡较陡、易受河水侵蚀的地段。

基岩滑坡与黄土-泥岩滑坡类似,滑体由古近系、新近系或白垩系泥岩、砂岩组成,如皋兰山Ⅲ滑坡。基岩崩塌主要分布于白垩系砂岩中,多集中于交通沿线。基岩滑坡与崩塌的形成主要受斜坡岩层中的构造裂隙、软弱夹层等结构面控制,降水、地震和地下水活动是主要诱发因素。

3 影响因素相关性分析

影响地质灾害发生的因素一般包括地形地貌、地层岩性、地质构造、降水及人类工程活动等。针对兰州市地形地质环境特征与地质灾害发育分布特点,选取坡度、坡向、地层岩性、断层距离、绿化灌溉

及土地利用类型作为评价指标(王立朝等,2020),依据经验划分证据因子(表 1),编制相应的重分类栅格图层。

证据权法要求证据因子之间相互独立,在确定与地质灾害形成相关的影响因素后,需要开展相关性分析,筛选相关性较小的影响因素作为评价指标。GIS 平台的“波段集统计”工具可以开展皮尔逊相关分析,通过计算栅格集的协方差和标准差得到相关系数与矩阵。图层 i 与图层 j 的皮尔逊相关系数计算公式如下:

$$\text{Corr}_{ij} = \text{Cov}_{ij} / \delta_i \delta_j \quad (25)$$

其中, Cov_{ij} 为图层 i 与图层 j 的协方差, δ_i 、 δ_j 分别为图层 i 和图层 j 的标准差。

通过在 GIS 平台中输入各影响因素的栅格图层,得到皮尔逊相关性系数矩阵,判断影响因素之间的相关程度(表 2)。当 2 个影响因素为强相关与极

表 1 评价指标及证据因子划分

Table 1 Assessment indexes and weight factors

评价指标		证据因子	
序号 <i>i</i>	名称	序号 <i>j</i>	类别
1	坡度	1	0°~10°
		2	10°~20°
		3	20°~30°
		4	30°~40°
		5	40°~50°
		6	50°~60°
2	坡向	1	342.5°~22.5°(北)
		2	22.5°~67.5°(东北)
		3	67.5°~112.5°(东)
		4	112.5°~157.5°(东南)
		5	157.5°~202.5°(南)
		6	202.5°~247.5°(西南)
		7	247.5°~292.5°(西)
		8	292.5°~342.5°(西北)
3	断层距离	1	0~1 km
		2	1~2 km
		3	2~3 km
		4	3~5 km
		5	5~10 km
4	地层岩性	1	前寒武系皋兰群(A _n Cgl)黑云片岩、片麻岩
		2	始新统西柳沟组(E ₁₋₂ x)砂砾岩、粉砂岩
		3	渐新统野狐城组(E ₂₋₃ y)粉砂质泥岩、细砂岩、砾岩
		4	白垩系河口群(K ₁ hk ⁴)砾岩、泥质砂岩
		5	中新统咸水河组(N ₁ x)粉砂质泥岩、砂岩、砂砾岩
		6	下更新统(Q ₁)午城黄土、砂砾石、亚粘土等
		7	中更新统(Q ₃)离石黄土、砂砾石、亚粘土等
		8	上更新统(Q ₂)马兰黄土、砂砾石、亚粘土等
		9	全新统(Q ₄)风积黄土、砂砾石、亚粘土等
		10	水域
		11	侵入岩
5	土地利用类型	1	城乡、工矿及居民建设用地
		2	草地
		3	林业用地与未利用地
		4	水利水电、交通建设用地
		5	农业用地
		6	水域
6	绿化灌溉	1	未灌溉
		2	1999年起喷灌区
		3	2000年起喷灌区
		4	1999年起漫灌区
		5	2000年起漫灌区

强相关时,例如高程与坡度一般具有较好的相关性,可根据权重分析,选择对地质灾害影响更显著的作为评价指标。当 2 个具有显著独立性的影响因素,计算得到的相关系数较高时,可忽略不计。

相关性分析显示,6 个评价指标之间的相关性均属于无相关—弱相关,符合相互独立的要求(表 3)。其中,坡度与断层的相关系数分别为 0.23,为弱相关程度,但实际两者之间具有显著的独立性。

4 地质灾害发生概率

确定评价指标后,利用评价指标栅格图层与地质灾害编录面图元,采用证据权法,进行证据权重计算。在实践中,一般将地质灾害编录数据分为训练样本与检验样本。训练样本是随机提取的一定比例数量的地质灾害,用于证据因子权重计算与评价模型构建,剩余的地质灾害数据为检验样本,用于评价精度检验。

按照 80% 与 20% 的比例,把兰州市评价区的地质灾害随机划分为训练组与检验组。将训练组的 312 处地质灾害,根据叠加关系,统计各证据因子的面积(栅格数)及落在证据因子内的灾害面积(栅格

表 2 皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient

相关性	正	负
极强相关	0.8~1.0	-1.0~-0.8
强相关	0.6~0.8	-0.8~-0.6
中等程度相关	0.4~0.6	-0.6~-0.4
弱相关	0.2~0.4	-0.4~-0.2
极弱相关或无相关	0.0~0.2	-0.2~-0.0

表 3 评价指标相关系数矩阵

Table 3 The matrix of correlation coefficients for evaluation indicators

相关系数	坡度	坡向	地层岩性	断层距离	绿化灌溉	土地利用类型
坡度	1.00	0.07	-0.17	0.23	0.09	-0.05
坡向	0.07	1.00	-0.02	0.01	0.02	0.00
地层岩性	-0.17	-0.02	1.00	-0.02	-0.20	0.04
断层距离	0.23	0.01	-0.02	1.00	-0.06	0.04
绿化灌溉	0.09	0.02	-0.20	-0.06	1.00	0.04
土地利用类型	-0.05	0.00	0.04	0.04	0.04	1.00

数), 计算证据因子的正权、负权、相对系数、权重、后验概率等, 得到评价指标权重图层与证据综合图层。表 4 为坡度指标的证据权计算详细过程与结果示例。

类似的, 根据公式(1)~(22) 可以计算得到所有证据因子的证据权重, 形成各评价指标权重图层(图 2)与综合权重图层(图 3)。依据公式(23)与公式(24), 采用综合权重与地质灾害分布先验几率的自然对数进行代数计算, 得到后验概率分布图(图 4)。

5 评价模型检验

地质灾害易发性评价模型与精度一般采用 ROC 曲线进行检验(谭玉敏等, 2015; 饶品增等, 2017; 方然可等, 2021; 白光顺等, 2022; 周粤等,

2022; 刘帅等, 2024)。ROC 曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, 接受者操作特征曲线)又称为敏感性曲线, 以伪阳性率为横轴、真阳性率为纵轴。ROC 曲线分析应用 AUC 值(Area Under Curve, 曲线下面积)可以定量评价预测的准确度或判别效果, AUC 值介于 0.5~1.0 之间, AUC 越接近 1, 说明预测效果越好。

在地质灾害易发性评价中, ROC 曲线基于地质灾害检验样本在后验概率图层中的概率分布绘制, 以后验概率作为下限值构建置信区间, 横纵坐标轴分别表示各置信区间内稳定区(非灾害栅格)与非稳定区(灾害栅格)的分布概率。利用兰州市评价区的 79 处地质灾害检验样本, 与后验概率分布图层叠加, 绘制 ROC 曲线(图 5)。ROC 曲线分析表明, 6 个评价指标组成的模型 AUC 值为 0.85, 说明模型具有较

表 4 坡度评价指标证据权计算结果
Table 4 The WoE calculation process of the slope index

证据因子序号(<i>j</i>)	1	2	3	4	5	6	计算公式
证据因子类别	0°~10°	10°~20°	20°~30°	30°~40°	40°~50°	50°~60°	已知
证据因子栅格数(A_j)	231104	146950	172670	95956	16030	330	已知
证据因子中灾害栅格数($A_j \cap A_L$)	101	341	1360	2010	972	25	已知
评价区栅格数(A_i)			663040				$\sum_j A_j$
评价区灾害栅格数(A_L)			4809				$\sum_j (A_j \cap A_L)$
评价区的非灾害栅格数($\overline{A_L}$)			658231				$A_i - A_L$
先验几率($O(D)$)			0.00731				$A_L / (A_i - A_L)$
证据因子中非灾害栅格数($A_j \cap \overline{A_L}$)	231003	146609	171310	93946	15058	305	$A_j - (A_j \cap A_L)$
非证据因子中灾害栅格数($\overline{A_j} \cap A_L$)	4708	4468	3449	2799	3837	4784	$A_L - (A_j \cap A_L)$
非证据因子中非灾害栅格数($\overline{A_j} \cap \overline{A_L}$)	427228	511622	486921	564285	643173	657926	$A_i - A_j - (A_j \cap A_L)$
正权(W^+)	-2.81600	-1.14458	0.08308	1.07448	2.17876	2.41763	$\ln \left(\frac{\frac{A_j \cap A_L}{A_L}}{\frac{A_j \cap \overline{A_L}}{A_i - A_L}} \right)$
负权(W^-)	0.41101	0.17842	-0.03095	-0.38723	-0.20266	-0.00475	$\ln \left(\frac{\frac{\overline{A_j} \cap A_L}{A_L}}{\frac{\overline{A_j} \cap \overline{A_L}}{A_i - A_L}} \right)$
相对系数(C)	-3.22701	-1.32300	0.11403	1.46171	2.38141	2.42238	$W_j^+ - W_j^-$
证据权重(W)	-3.26316	-1.35915	0.07788	1.42556	2.34526	2.38623	$C_j + \sum_j W_j^-$

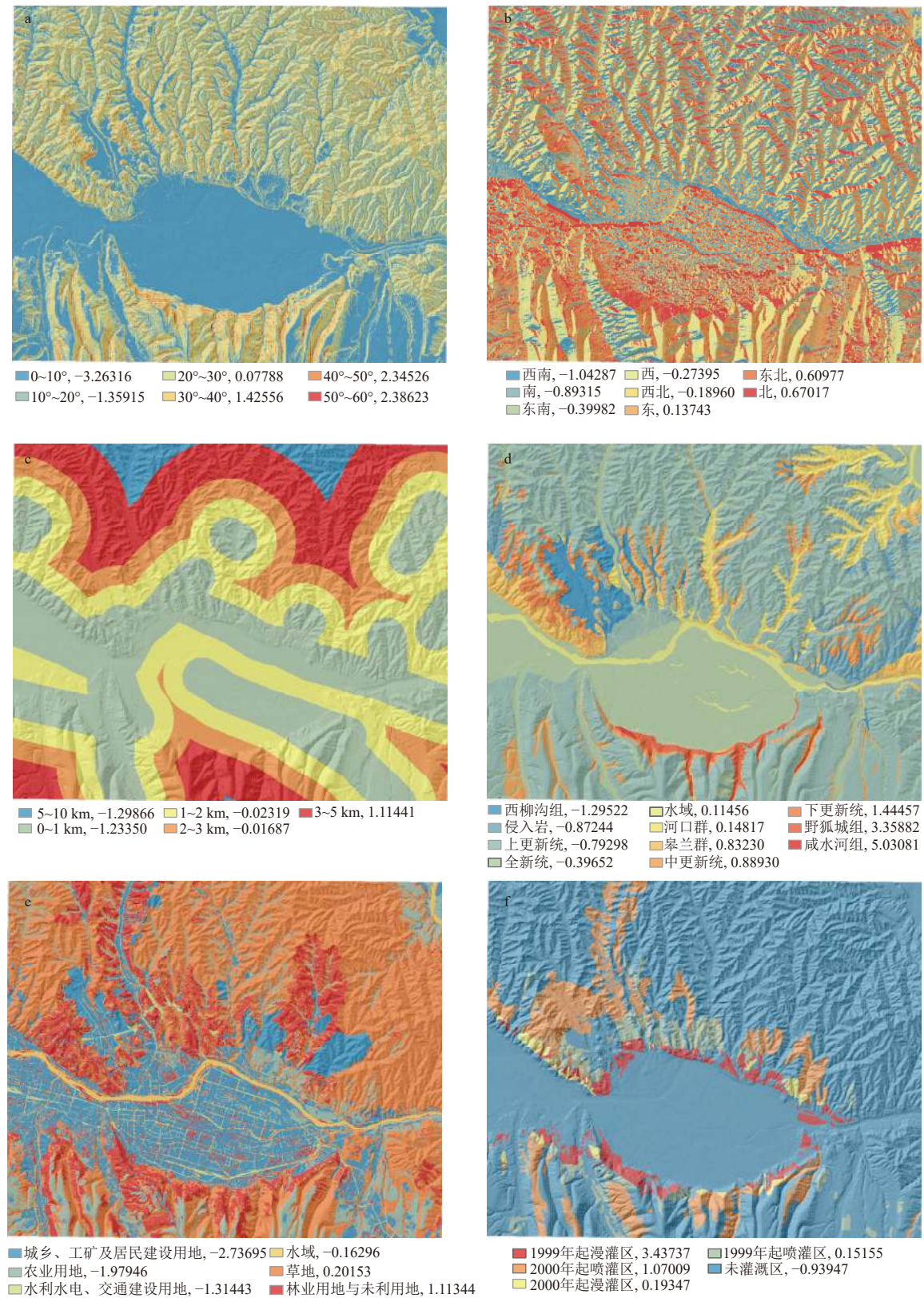


图2 评价指标证据权重(证据因子, 权重值)

Fig. 2 The WoE of indexes

a—坡度; b—坡向; c—断层距离; d—地层岩性; e—土地利用类型; f—绿化灌溉

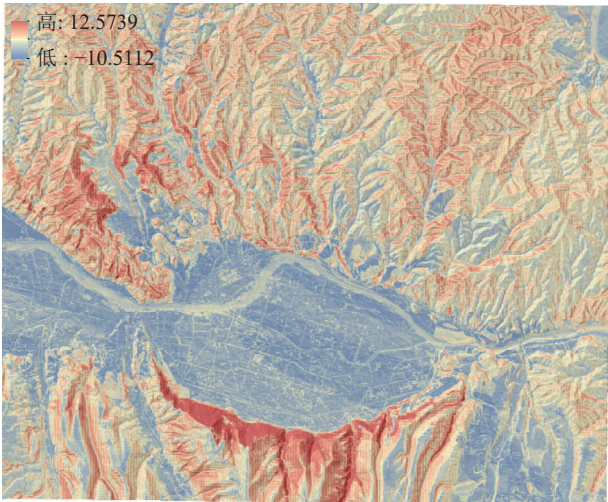


图 3 综合证据权
Fig. 3 Integrated WoE

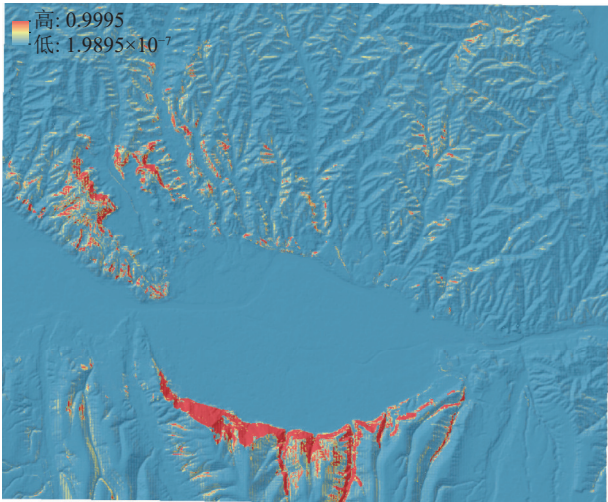


图 4 后验概率分布图
Fig. 4 Posterior probability distribution

高的预测精度,可用于地质灾害易发性评价。

6 易发性评价

后验概率分布图(图 4)显示,兰州市评价区的地

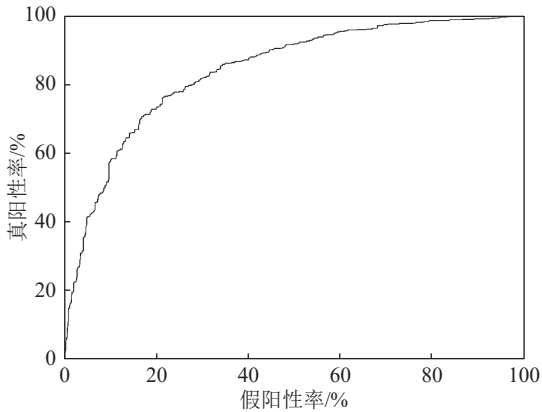


图 5 ROC 曲线
Fig. 5 The ROC curve

质灾害发生概率为 $1.9895\times10^{-7}\sim0.9995$ 。依据概率值,将评价区地质灾害发生的可能性划为非常可能、很可能、有可能、不可能(表 5),对应易发性程度为高易发、中易发、低易发、非易发 4 个级别,形成地质灾害易发性评价图(图 6)。

易发性评价结果显示,兰州市评价区的地质灾害高、中、低、非易发区的面积占比分别为 3.61%、11.89%、25.07%、59.43%。地质灾害高易发区位于河谷与盆地边缘的高陡斜坡地带,以黄土和黄土-泥岩为主要斜坡结构,人工灌溉量大,受人类工程活动影响显著,是中—大型黄土层内与黄土-泥岩切层滑坡分布的主要区域,灾害面积占比 49.59%、频率比 13.75;中易发区位于盆地与山地过渡带,斜坡较为陡峻、坡高较大,人工灌溉量较大,发育较多的小型黄土滑坡与崩塌,灾害面积占比 24.0%、频率比 2.02。低易发区主要分布于较浅的黄土沟壑两侧,发育少量小型滑坡与崩塌,灾害面积占比 18.41%、频率比 0.73;非易发区分布于盆地、黄土台塬等地形宽缓的区域,灾害面积占比 8.0%、频率比 0.13。

7 讨 论

示范应用表明,证据权法综合考虑多种影响因

表 5 地质灾害发生概率与易发性程度分级

Table 5 Classification of the probability and landslide susceptibility

概率	可能性	发生频率	易发程度	面积比例	灾害面积比例	频率比
>0.1	非常可能	常常会发生	高易发	3.61%	49.59%	13.75
0.01~0.1	很可能	某些情况下会发生	中易发	11.89%	24.0%	2.02
0.001~0.01	有可能	极少情况下发生	低易发	25.07%	18.41%	0.73
≤0.001	不可能	一般情况下不会发生	非易发	59.43%	8.0%	0.13

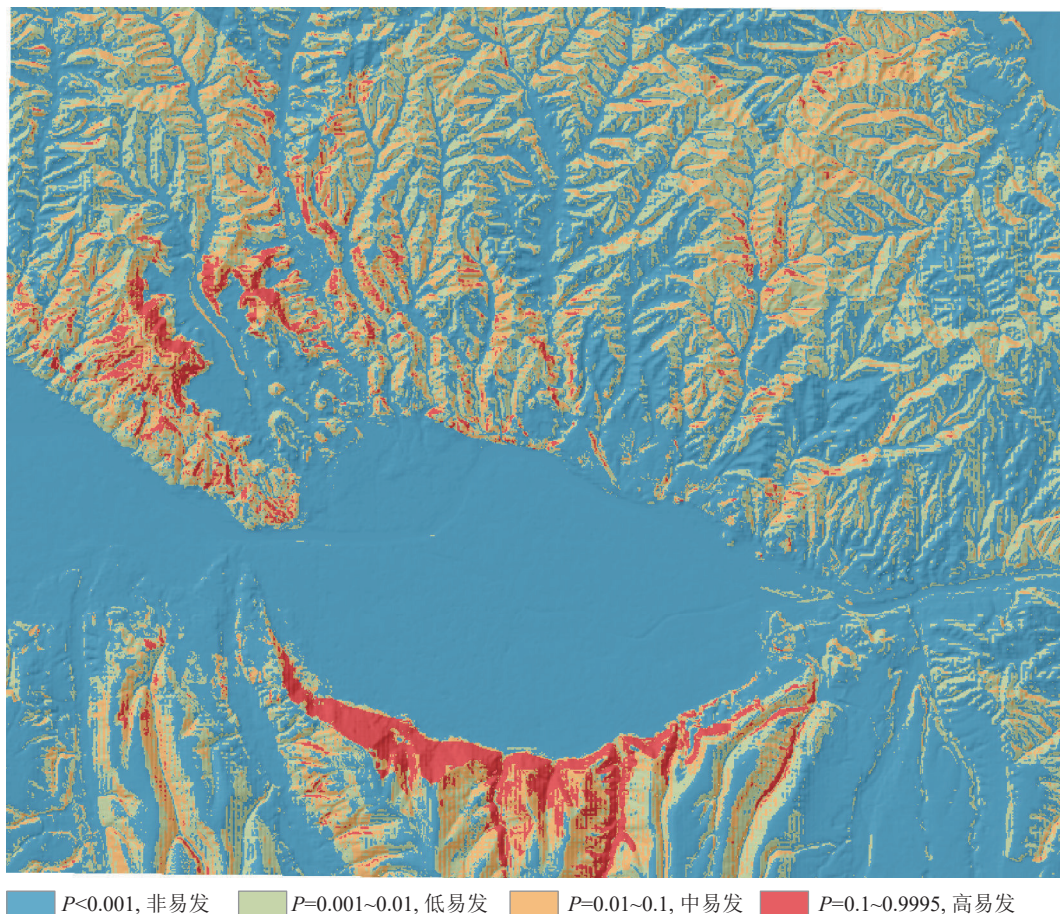


图6 兰州地质灾害易发性评价图

Fig. 6 Landslide susceptibility map of Lanzhou

素,通过计算与地质灾害空间分布的权重关系,定量评估地质灾害发生的可能性,有效降低了主观人为因素,提高了评价结果的客观性与可重复性。采用统计学方法开展地质灾害易发性评价,是基于地质灾害在评价指标中分布的概率来计算指标的影响力或权重。与其他统计学方法相比,证据权法同时考虑了评价指标中存在地质灾害与不存在地质灾害2种情况,避免了当地质灾害不存在于指标中时权重偏大导致结果失真的问题。证据权法结果为地质灾害发生的绝对概率,在评价指标选取全面且合理的条件下,可以开展不同区域、地区的地质灾害易发程度对比。

值得说明的是,证据权法作为统计学方法,采用灾害点或灾害面开展评价,因此仅适用于滑坡、崩塌等斜坡类地质灾害的易发性评价,对于泥石流等流域型地质灾害不适用。此外,地质灾害易发性是指地质灾害“一定区域内由孕灾地质条件控制的地质灾害发生的可能性”,简而言之就是什么地方易发生

地质灾害,因此开展地质灾害易发性评价时,只能选取滑坡与崩塌源区作为样本,影响范围、堆积区、危险区等不能参与评价计算。

8 结 论

本文结合区域地质灾害易发性评价,详细阐述了证据权法的概念、原理,并以西北黄土高原滑坡、崩塌地质灾害高易发的兰州市区为例,利用GIS技术,开展区域地质灾害易发性评价示范应用。

(1) 针对兰州市区的地形地质环境特征与地质灾害发育分布特点,选取坡度、坡向、地层岩性、断层距离、绿化灌溉及土地利用类型等影响因素,进行皮尔逊相关性分析。分析结果表明,6个影响因素之间呈无相关或弱相关性,符合相互独立的要求,可作为地质灾害易发性评价指标。

(2) 将兰州市区的地质灾害编录数据随机划分为训练组与检验组,利用训练组开展评价指标权重分析,综合叠加灾害分布概率,构建地质灾害发生的

后验概率评价模型。基于地质灾害检验样本在后验概率图层中的概率分布, 绘制 ROC 曲线发现, 6 个评价指标所组成的模型 AUC 值为 0.85, 表明评价模型具有较高的预测精度。

(3) 评价区地质灾害发生概率为 $1.9895 \times 10^{-7} \sim 0.9995$, 以 0.1、0.01、0.001 为阈值, 将地质灾害发生的可能性划分为非常可能、很可能、有可能、不可能, 将应易发性程度为高易发、中易发、低易发、非易发 4 个级别, 各分区面积比例分别为 3.61%、11.89%、25.07%、59.43%, 灾害面积比例为 49.59%、24.0%、18.41%、8.0%, 频率比为 13.75、2.02、0.73、0.13。

参考文献

- Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Cheng Q, et al. 1993. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping[C]//Davis J C, Herzfeld U C. Computers in geology-25 years of progress. New York: Oxford University Press: 13-32.
- Armaş I. 2012. Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping. Prahova Subcarpathians, Romania[J]. *Natural Hazards*, 60: 937-950.
- Cheng Q, Agterberg F P. 1999. Fuzzy Weights of Evidence Method and Its Application in Mineral Potential Mapping[J]. *Natural Resources Research*, 8(1): 27-35.
- Dahal R K, Hasegawa S, Nonomura A, et al. 2008. GIS-based weights-of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping[J]. *Environmental Geology*, 54(2): 311-324.
- Goyes-Penafiel P. 2021. Landslide susceptibility index based on the integration of logistic regression and weights of evidence: A case study in Popayan, Colombia[J]. *Engineering Geology*, 280: 105958.
- Ilia I, Tsangaratos P. 2016. Applying weight of evidence method and sensitivity analysis to produce a landslide susceptibility map[J]. *Landslides*, 13(2): 379-397.
- Kobayashi H, Sanga T. 2005. Application of spatial information technology to landslides Landslide vulnerability mapping using GIS and spatial statistical analysis[J]. *Journal of the Japan Landslide Society*, 42(4): 281-292.
- Lee S, Choi J. 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8): 789-814.
- Neuhäuser B, Terhorst B. 2007. Landslide susceptibility assessment using "weights-of-evidence" applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany)[J]. *Geomorphology*, 86(1/2): 12-24.
- Velmurugan J, Venkatesan M. 2018. Soft Bayesian model for landslide risk analysis[J]. *International Journal of Soft Computing*, 13(2): 31-37.
- Zêzere J L, Ferreira A B, Vieira G, et al. 2000. The use of Bayesian Probability for landslide susceptibility evaluation: a case study in the area north of Lisbon (Portugal) [C]//Bromhead E, Dixon N, Ibsen M L. Landslides in research, theory and practice: Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff. London: Thomas Telford: 1635-1640.
- 白光顺, 杨雪梅, 朱杰勇, 等. 2022. 基于证据权法的昆明五华区地质灾害易发性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 33(5): 128-138.
- 邓勇, 邱瑞山, 罗鑫, 等. 2007. 基于证据权重法的成矿预测——以广东省钨锡矿的成矿预测为例[J]. *地质通报*, 26(9): 1228-1234.
- 范海明, 王翔, 茹湘兰. 2017. 基于证据权-奇异性-灰色理论的山西五台地区金矿成矿研究[J]. *地质通报*, 36(8): 1462-1466.
- 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 2021. 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型[J]. *水文地质工程地质*, 48(1): 181-187.
- 郭富赟. 2019. 兰州市地质灾害特征与风险管控对策[J]. *城市与减灾*, (3): 59-63.
- 黎志恒, 张永军, 梁收运. 2014. 兰州城市地质灾害与人类工程活动[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 50(5): 588-593.
- 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 2004. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, (2): 32-37.
- 刘帅, 王涛, 曹佳文, 等. 2024. 基于优化随机森林模型的降雨群发滑坡易发性评价——以西秦岭极端降雨事件为例[J]. *地质通报*, 43(6): 958-970.
- 饶品增, 曹冉, 蒋卫国. 2017. 基于地理加权回归模型的云南省地质灾害易发性评价[J]. *自然灾害学报*, 26(2): 134-143.
- 尚瑾瑜, 张永军, 李松. 2017. 兰州市区地质灾害发育特征及类型研究[J]. *甘肃地质*, 26(3): 70-77.
- 孙岩, 王训练, 陈建平, 等. 2010. 基于证据权重法的沱沱河地区铅锌银矿成矿预测[J]. *地质通报*, 29(4): 556-564.
- 谭玉敏, 郭栋, 白冰心, 等. 2015. 基于信息量模型的涪陵区地质灾害易发性评价[J]. *地球信息科学学报*, 17(12): 1554-1562.
- 王立朝, 陈亮, 侯圣山, 等. 2020. 洮河流域下游地质灾害调查成果报告[R]. 中国地质调查局.
- 吴明堂, 薛正海, 崔振华, 等. 2022. 基于斜坡单元和证据权-Logistic 回归的滑坡易发性评价[J]. *人民长江*, 53(10): 87-94.
- 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 2011. 基于 GIS 平台与证据权的地震滑坡易发性评价[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 36(6): 1155-1164.
- 杨华阳, 许向宁, 杨鸿发. 2020. 基于证据权法的九寨沟地震滑坡危险性评价[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 31(3): 20-29.
- 殷跃平. 2022. 地质灾害风险调查评价方法与应用实践[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 33(4): 5-6.
- 俞布, 潘文卓, 宋健, 等. 2012. 杭州市滑坡地质灾害危险性区划与评价[J]. *岩土力学*, 33(S1): 193-199, 216.
- 张艳玲. 2009. 汶川地震区地质灾害易发性快速区划与制图[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 19-23.
- 赵志芳, 党伟, 王瑞雪, 等. 2010. 基于证据权重法的区域地质环境稳定性遥感评价研究[J]. *国土资源遥感*, (S1): 9-13.
- 周粤, 王超生, 赵逊, 等. 2022. 怒江支流迪麻洛河流域泥石流易发性评价[J]. *地质通报*, 41(4): 702-712.
- 自然资源部. 2021. 地质灾害风险调查技术要求(1:50000)[S].
- 自然资源部. 2022. 全国地质灾害防治“十四五”规划[R].