



地质灾害易发性评价方法综述

兰盈盈¹, 郭昶成¹, 朱云福²

1. 南昌工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 江西省地质环境监测总站, 江西 南昌 330095

摘要: 我国地形地质条件复杂, 地质灾害多发, 人类各类工程地质活动加剧了地质灾害的发生与发展。地质灾害预防与管理工作是保障人民生命与财产安全的前提与基础。地质灾害易发性评价是地质灾害危险性评价和风险评价的前提, 也是地质灾害区划和防治工作的基础。本文基于国内外地质灾害易发性的相关研究, 对地质灾害易发性概念、评价指标体系、权重计算方法和易发性评价模型进行分析总结, 并指出了地质灾害易发性评价中亟待解决的主要问题。

关键词: 地质灾害; 易发性评价; 评价指标体系; 评价模型; “3S”技术

REVIEW ON THE EVALUATION METHODS OF GEOLOGICAL HAZARD SUSCEPTIBILITY

LAN Ying-ying¹, GUO Chang-cheng¹, ZHU Yun-fu²

1. Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

2. Jiangxi Geological Environment Monitoring Station, Nanchang 330095, China

Abstract: The topographical and geological conditions in China are complicated, with frequent geological disasters, which have been aggravated by various human engineering geological activities. The prevention and management of geological disasters are the premise and foundation of ensuring the safety of people's lives and property. Geological disaster susceptibility evaluation is the premise of hazard evaluation and risk assessment, and the basis of geohazard zoning and prevention as well. Based on related researches on geological disaster susceptibility at home and abroad, the paper discusses the concept of geohazard susceptibility, evaluation index system, weight calculation method and evaluation model, and points out the main problems to be solved in geohazard susceptibility evaluation.

Key words: geological hazard; susceptibility evaluation; evaluation index system; evaluation model; RS; GPS; GIS

0 引言

地质灾害是指由自然因素或者人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害。

它是大范围内复杂的各种影响因子共同作用的结果, 很难用明确的发生概率来表示, 是人类生存发展无法规避的重要问题。利用合适的评价模型或方法计算地质灾害的发生概率, 进行易发性评价, 对防灾减灾工作

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-12-24。编辑: 李兰英。

基金项目: 江西省教育厅科技项目“城市发展背景下降水入渗特性研究”(GJJ180922)。

作者简介: 兰盈盈(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事水文与水资源工程专业教学与科研工作, 通信地址 江西省南昌市高新区天祥大道 289号, E-mail//lan-yy@163.com

具有重要意义,也可为国家宏观经济建设、土地利用规划和资源规划、地质灾害防治体系的建立和完善、经济可持续发展等方面的决策提供科学依据^[1]。

我国经济发展水平的提升与经济社会的防灾减灾需求推动了我国地质灾害防治的历史发展进程。20 世纪 80 年代中期前,人们对滑坡、地面沉降或塌陷等地质问题的认识有限,仅仅止步于选址与防护。21 世纪以来,“地质灾害”已经不再局限于工程地质问题中的绕避与改良问题,其调查、监察、治理等已经逐渐发展成为一个行业,并获得了大量的工作成果。2021 年,全国共成功预报地质灾害 905 起,避免直接经济损失 13.5 亿元^[2]。地质灾害的发生和其带来的伤亡的数量逐年减少,这表明地质灾害预报与防治工作取得一定成果。地质灾害的多样性、易发性及区域变异性决定了我国地质环境的特殊性,并且不止于此,大量影响因子例如地形地貌、地层岩性、植被覆盖率以及人类工程活动等也在其中占有极大的主导地位。以上种种导致防灾减灾工作的需求更加多样化,以及迫切需要更多、更高效、针对性更强的技术和手段。

地质灾害易发性评价是地质灾害风险评价的重要内容。评估和预测突发性地质灾害的产生和发育,能够促进防灾减灾工作的顺利实施。由于地质灾害的发生、发展具有大量相互关系复杂的不同影响因素,故多发生于坡度较大、断裂带密集、河网密布、土质疏松、岩土体脆弱、植被稀疏的斜坡上。此外,过度的人类活动和强降雨也是泥石流、滑坡和崩塌等地质灾害演化和发展的重要诱因^[3]。所以,科学评估地质灾害的长期变化趋势,对发展地质灾害防治规划和地质灾害的调查研究具有一定的指导意义^[4]。

1 地质灾害易发性评价的概念

易发性 (Susceptibility, 意为“易受影响的敏感性”),是指某一地区发生某事件的可能性。地质灾害易发性,是指地质灾害形成条件的组合体有利于发生地质灾害的可能程度。罗守敬等^[5]将易发性界定为在一定的地质环境和人类工程活动影响条件下,地质灾害发生可能性的难易程度;薛强^[6]认为易发性为地质灾害发生难易程度,并将其定义为一种物理地质现象。易发性可通过易发区来体现,即容易产生与发展的地质灾害的区域,可以采用定性和定量评价方法根据地

质灾害的地质环境、发育状态和人类工程活动等因素来划分,与其相对立的区域称作不易发区^[7]。由此可见,易发性并非由单一因素决定的,而是大量不同的影响因素相互作用的综合结果。

20 世纪 70 年代,对于地质灾害的成因与形成机制,最早由一些欧洲的发达国家开始研究分析^[8]。进入 80 年代以来,“3S”技术以及综合 GIS 技术的数理统计模型的高速发展和广泛应用,使得其逐渐成为地质灾害易发性研究的主要方式^[9-10]。在我国,也有许多研究者对地质灾害易发性评价的概念进行了阐述。倪化勇等^[11]的观点为,地质灾害易发性评价是在地质灾害的地质环境条件下,根据相应的静态影响因子来判断地质灾害发生的可能性。张琪等^[12]将易发性评价界定为通过对研究区各影响因子的研究分析,确定地质灾害现象发生的可能性的过程。自然资源部于 2020 年 3 月发布《地质灾害风险调查评价技术要求(1:50 000)》,将地质灾害易发性评价定义为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。

2 地质灾害易发性评价指标

2.1 评价指标体系的构建

地质灾害的发生是在一定的地质环境下,由众多因素共同作用的结果。想要进行易发性评价,关键就在于如何合理把握各种影响因素且确定它们的影响程度。为了确保易发性区划的客观性、真实性、准确性与可靠性,构建一套合理且规范的易发性评价的指标体系尤为重要。

综合大量现有的研究成果,本文认为影响地质灾害易发性评价的指标主要分为以下 3 个大类:孕灾因素(指标)、致灾因素(指标)、灾害现状(指标)。具体指标体系见表 1。

2.2 评价指标权重确定方法

地质灾害易发性评价的结果准确与否取决于指标的权重值。综合国内外研究者的相关研究,易发性评价的主要评价指标赋权方法可以分成以下 3 个类别:主观赋权法、客观赋权法和组合权重法。

1) 主观赋权法,即根据决策者的丰富经验和主观意图来确定权重的方法,属于定性评价。这种方法的评价过程相对简单,但客观性相对较差。主要有层次分析法、模糊综合评价法和德尔菲法。

表 1 地质灾害易发性评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of geological
hazard susceptibility

一级指标	二级指标
孕灾因素指标	地层岩性
	地形地貌
	坡度
	高程
	水文地质
致灾因素指标	地震烈度
	降雨
	人类工程活动
灾害现状指标	分布密度
	发生规模
	发生频率

2)客观赋权法,主要基于统计学的定量评价,即通过一些历史数据的数理统计来进行评价。相对于主观赋权法更具有客观优势,且应用更加广泛,但是无法反映决策者对不同指标的重视程度,以及存在一定的权重和与实际指标相反的程度的情况。主要有信息量法、变异系数法、熵权法、贡献权重法等。

3)组合权重法。以上两种类型的赋权法都具有其各自的优劣,所以,目前很多研究者采用二者结合的方式。组合权重法,即同时采用上述两种或两种以上的评价方法,融合了两种(及以上)赋权方法优点的组合方法。通过这种方式能在一定程度上提升模型精度,使得评价结果更真实、可靠。

3 地质灾害易发性评价模型

3.1 定性评价

1)层次分析法(AHP)

层次分析法最早是在 20 世纪 70 年代由 Saaty^[13]提出的一种在当时比较新颖的、系统化的估计给定系统投入产出系数的分析方法。它是基于经济中各个部门各自的比例来划分优先级。在很多情况下,很难估计出具有大量统计数据时各个组分之间的相互关系和相对影响,故而通过把复杂系统区分为不同的层次,并将各种影响决策的因素相结合从而进行层次权重决

策分析以代替彻底而深入的研究。

层次分析法的基本思路是先将数据分层系列化,再将各种因素按照影响和关系分类组合,形成一个层次结构模型,然后根据分量的重要性定量化,构造成对比矩阵和判断矩阵,最后计算各层因素的权重向量,并进行一致性检验。

这种方法在各行各业中应用十分广泛,在确定易发性评价中的地灾影响因子权重这一方面具有科学可信、客观可靠的特性,不仅精度高,而且简单便利,能够减少主观误差。局限性在于定量数据少、定性成分多,且构造矩阵指标多、计算量大,应通过独立性检验来选取具有代表性的影响因子。在实际应用中,研究者时常将层次分析法与其他方法相结合来使用,比如专家打分法、随机森林模型等。

杨德宏等^[14]运用层次分析法对旬阳县地质灾害确定各影响因子的权重系数,采用估计两两影响因子的互相关系的方式来构造矩阵,在很大程度上规避了发生个别结果偏差过大的情况。李萍等^[15]在永德县地质灾害易发性评价中,利用了层次分析法计算各指标与要素层的权重,并采用成功率曲线对结果进行检验,证明效果较好。

2)模糊综合评价法

模糊综合评价(评判)法是在 20 世纪 90 年代由汪培庄^[16]提出的一种运用模糊变换原理和最大隶属度原则,综合多种影响因子从而作出系统评价的方法。使用这种方法处理一些较为复杂的系统问题时,可以用确定的量来表述,无需精确的数学方法,具有很好的实用性和便利性。因此,相比其他的易发性评价方法,模糊综合评价法更具分辨性和可比性。

模糊综合评价法的主要思路是先将各因素集合设定等级构建模糊综合评价指标,采用构建好的权重向量,分别求出各个因素对等级的归属程度构建矩阵,然后根据权重分配以完成隶属矩阵和权重的合成。

这种方法在易发性评价领域中得到了广泛运用。采用模糊综合评价法进行地质灾害易发性评价可以减少出现错判漏判样本数据的情况,均衡兼顾,更好地归纳和划分多目标因素。其局限性在于主观性强,通过选取合适的隶属函数能够使结果更为精确。再者,区划网格通常较大,会使评价结果不够精确。

刘福臻等^[17]选用了模糊综合评价法在宁南县滑

坡灾害点进行易发性分区,并使用 ArcGIS 软件绘制分区图与灾害点图层合并研究,数据结果验证了该方法的合理性和可靠性。张杰等^[18]利用 ArcGIS 技术在烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价中,在历史数据的基础上,分析了易发区的灾害特征,并探讨、确定了影响因子。主要采用的评价方法是模糊综合评价法,构建了各指标的隶属函数,从而实现了易发性评价,减少了人为因素的主观误差,提高了试验结果的可靠性和客观性,为当地建设规划、防灾减灾等工作提供了有力支撑与科学指导。

3) 德尔菲法(专家调查法)

德尔菲法最早是在 20 世纪 40 年代由美国兰德公司创始,本质上是一种反馈匿名函询法。其主要流程是在所要预测的问题经过专家的意见后,进行整理归纳并匿名反馈,再次征求意见、集中、反馈,如此反复,经过若干轮,直至意见一致。最终根据一致的专家意见作出评价。

该方法是公认简单、便捷和应用广泛的定性与定量结合的预测类型的评价方法,而对于信息化高度发展的时代,这种方法的运用日趋减少。在地质灾害的易发性评价中,它具有一定的代表性和权威性,但同时也具有明显的主观随意性,缺乏一定的科学性。我国研究者一般会将该方法与其他方法结合构建更为科学可靠的耦合模型。

狄靖月等^[19]提出并采用德尔菲-逆推法耦合的方式,构建了地灾气象服务效益评估模型,可同时对各区域、时间的地质灾害进行效益评估。侯林锋等^[20]在地质灾害风险评估中运用德尔菲法和层次分析法确定各指标权重,经过了进一步的数值处理后得到浙江省的地震风险评估结果,为防震防灾工作提供了有效的科学依据。

3.2 定量评价

1) 证据权法

该方法是在 20 世纪 70 年代产生的一种利用综合的各种证据来支持先前假设的统计分析方法,即综合各种证据来预测某一事件是否会发生的方法。该方法是一种数据驱动的离散多元统计法,通过统计分析确定因子权重,有效降低了因子权重估值时的人为主观性。最初用于医疗诊断,最早是由 Agterberg 引入地质领域,当时的主要用途为矿产预测^[21]。近年来,证据权

法也被越来越多的国内外研究者应用于地质灾害的易发性评价和危险性评价,产生了大量成果。

证据权法的主要流程是在总结归纳历史数据的条件下,提取相关点、线、面信息,进行相应的空间叠加从而构建新的信息进行分析。

在地质灾害易发性评价中这种方法虽然效果直观,具有一定的客观优势,但也有着一定的局限性,即所有影响因子必须拥有各自的独立性,应舍弃相关性大的,且将用于数理统计分析的影响因子都为长期性的定量^[22]。对于常年发生地质变动的地质灾害区域,影响因子之间的相关性变化可能导致实际应用效果并不是特别理想。

胡燕等^[23]对巴东县城滑坡易发区和多发区的灾害区域采用证据权法进行易发性区划。在研究分析该灾害点的多种影响因子并划分证据层后,分别计算权重和后验概率,并进行单元叠加,最后进行易发分区。唐绪波等^[24]在神农架林区滑坡灾害易发性评价的研究中,也采用了证据权法,确定了各因子权重,其数据结论也验证了该方法的科学性、可行性与高精确性。

2) 信息量法

与证据权法相似,信息量法是一种通过各影响因素对所预测事件提供的信息多少来确定预测地段发生预测事件的总信息量,从而进行定量预测的统计分析方法。最早用于矿产预测,近年也被用于区域地质灾害预测。

信息量法的主要流程是先转变为不那么复杂的单因素信息量模型,再分步计算、叠加,从而得到综合评价,并由此说明地质灾害发生的可能性大小。

这种方法在地质灾害易发性评价中并不能很好地强调各影响因子自身的差异性,影响因子的选择也会决定结果的准确性。因为在一般情况下,地质灾害的影响因子总是互相影响且共同作用的,所以在进行调查统计时,样本的调查方法总是受到一定的限制。而通过信息量法便可以将复杂的统计问题归纳合并、叠加分析,进而找到多个影响因子组合中最利于灾害形成的那一组,从而使得各种影响因子对研究区的密切程度更为清晰明确。

陈立华等^[25]在地灾点采用信息量模型的方法,借助 ArcGIS 软件叠加计算影响因子的栅格图层获取信息量图,再划分区间获得易发性分区图,最终实现了北

流市地质灾害易发性评价,马振等^[26]选择信息量法对九畹溪流域地灾进行易发性区划,充分考虑了多种影响因子对地质灾害发生的不同影响情况和综合作用关系,并进行了多种主客观结合的分析,最终实现研究区的科学评价,评价结果基本符合详查评价结果,为防灾减灾工作提供了科学的规划,很好地证明了信息量法的可行性和科学性,并且对类似的地灾调查评价具有良好的借鉴意义。李信等^[27]在对海南昌江研究区的地质灾害易发性研究中基于GIS技术构建了信息量分析模型,验证了该评价方法的可行性,也为研究区的地质灾害预警监测和避让搬迁提供了依据。

3) 随机森林模型(RF)

该模型是一种由多个决策树弱分类器构成的集成学习算法,最早由Breiman^[28]提出。

随机森林模型的主要思路是利用Bootstrap自助重采样技术,从数据集中有放回地随机抽取样本,并分别建立相同数量(k 个)的决策树模型,每棵决策树根据数据集中纯度最高的特征作为划分依据,且每棵决策树单独工作,获得 k 种分类结果,再简单表决预测最终分类结果^[29]。

随机森林模型是通过数学理论来进行权重判别的方法,该方法不但预测精度高,而且抗拟合能力强,对于高维度数据的泛化能力强。其缺点在于模型内部的运行较难人为操控,只能在变化的参数之间进行,也不能不间断地输出值,导致无法做出超越给定数据的预测。在地质灾害易发性评价中,研究者常常将其与层次分析法等定性评价方法结合使用来达到双管齐下的效果。

Goetz等^[30]在探讨地质灾害易发性评价中表现的过程中,将随机森林模型与其他的一些传统方法相比较,论证了该方法的预测精度是其他方法无可比拟的。郝国栋^[31]在进行商南县滑坡易发性评价中通过随机森林模型得到商南县滑坡易发性区划的结论成果。邓念东等^[32]在研究陕西省神木市的崩塌易发性评价中,采用随机森林模型与其他模型结合的方式测得的精度比采用单一模型得到的结果精度更高。杨硕等^[33]在滑坡灾害较为频发的乌江龙溪-石朝门段高陡岸坡采用随机森林模型的方式进行了易发性评价,采用混淆矩阵和ROC区限进行模型评估,并计算了影响因子的权重,有利于该地区的居民搬迁、建筑设计和风险调查等

工作,对研究区范围内的经济发展具有重要意义。

4) 主成分分析法(主分量分析)

该方法运用了降维的原理,其主要流程是将多指标转化为少数几个能够反映原始变量大部分信息且互不重复的综合指标。

相对于其他方法,主成分分析法具有指标选择容易、在节省工作量的同时不会漏掉关键指标等多种优势,但用该方法时也需保证提取的主成分具有实际意义,否则会造成模糊性过强等不利影响。

余丰华等^[34]在浙江沿海突发性地质灾害易发区评价中,采用了主成分分析法,通过计算各影响因子的敏感性获得评价价格网的综合分值,再根据已经获得的信息量化的数据和发展规划进行脆弱性分级和易发程度分区,从而为研究区的灾害防治措施提供切实可行的数据支撑和科学依据。

5) 变异系数法

变异系数法是利用统计学规律通过判断各项指标并结合其自身包含的信息来计算出指标权重的一种客观赋权法。其中,变异系数是用来统计观测值的变异程度的,也称标准差率,主要有全距系数、平均差系数和标准差系数,能够避免单位或平均数不同对两个或多个资料变异程度比较的影响。通过变异系数的大小来判断某一指标所能反映评价对象的差异性和权重大小,但当平均值趋近于0时,变异系数甚至会因轻微扰动而产生巨大变化导致结果并不准确。

该方法能消除不同数据的量纲差异,使之标准化,减少或避免权重的计算障碍,可以很好地避免主观赋权法中专家主观偏向导致的人为因素过强的结果影响。

丁赞等^[35]运用变异系数法进行了黄冈市地质环境承载力研究,结合层次分析法及GIS技术计算指标权重,进行综合评价并做承载力分布图,为研究区的环境发展提供了客观、精准的方法。

6) 贡献权重法

贡献权重法,又称因子贡献权重法,于2004年由乔建平^[36]提出,并优化改善后应用于滑坡危险性评价。目前也被成熟运用于经济学等行业。这种方法引入了一个贡献率的概念,它是一种用来评价作用程度的指标,以量化的方式建立贡献率转化权重关系。

贡献权重法的具体思路是以等比数列的形式划分

因子区间,分为高、中、低 3 个级别,并对各个指标贡献率 3 级划分后求均值,再进行自权重分配和互权重分配.

将单因子内部权重对灾害事件发生的贡献与多项因子之间的权重对灾害事件发生的贡献两种权重值与地质灾害本底因子贡献值相乘叠加,很好地显示了本底因子的贡献作用,使得易发性区划结果更具可靠性.这种方法的缺点在于客观赋权不可避免地忽视直觉与经验,将所有因子的重要性等同,易于出现权重系数过于理想化、远离现实的情况.

王萌等^[37]运用贡献权重模型结合 GIS 进行了攀枝花的滑坡危险性评价研究,效率高、精确度高,验证结果符合实际情况.杨海龙等^[38]运用贡献权重法进行苏宝河流域的地震滑坡本底因子敏感性分析,将贡献率作为分析指标,将互权重划分为敏感分析指标,从而确定了该领域的主要影响因子的贡献率大小,揭示了研究区地震滑坡发育的潜在风险和本底因子对其的影响与作用.

综上,以层次分析法为代表的主观赋权法是根据符合客观事实的判断结构将主观意见与客观分析结果结合进行定量描述与排序,而客观赋权法是通过设计

数理模型来获取权重系数的定量分析方法,相比之下能减小或避免主观赋权法的主观性、随意性造成的误差.各方法的优劣及适用范围见表 2.

两类方法都有各自的优缺点,有时单独运用其中一种并不能取得满意的结果,甚至与现实相悖.故而有研究者陆续提出了二者结合的组合赋权方法,结合了二者的优势,再通过多次导入导出循环修正与调整的交互式赋权法,使得评价结果更具科学性.

石辉等^[39]在进行陕西省绥德县的崩塌易发性评价的研究中,通过提出随机森林-层次分析耦合模型,用随机森林模型对不同指标进行客观权重计算,然后通过层次分析法对判断矩阵进行修正,确定综合权重.张志沛等^[40]将熵指数法与信息量法耦合,在前者的基础上得出一级权重再与信息量结合,使得结论成果更为精确可靠.连志鹏等^[41]在湖北省五峰县滑坡易发性评价的研究中,也采用了多模型耦合的方式,结合了信息量模型、证据权模型和频率比模型,并通过归一化和主成分分析的方式降低甚至避免了单一模型的不稳定性和偶然性,提高了结论的可信度和准确度,更是对其他地质灾害的易发性评价带来了借鉴的意义.周苏华等^[42]在福建省的地质灾害易发性评价中开展地灾易

表 2 各评价方法选用参考表
Table 2 Reference for selection of evaluation methods

类型	评价方法	优势	局限性	适用范围
定性评价	层次分析法	主观性较小	需构造判断矩阵且指标多,计算量大	研究区资料丰富且易得
	模糊综合评价法	影响因子易量化	主观选择隶属函数,需缩小区划网格	单体灾害点,影响因子少
	德尔菲法	简单便捷	具有明显的主观随意性	缺乏足够的资料,长远规划或大趋势预测,影响因素多
定量评价	证据权法	评价因子与滑坡灾害间的相关性易判断,效果直观	所有影响因子必须拥有各自的独立性	环境稳定,评价因子长期不变
	信息量法	适合单元划分数量较大的研究区	不能体现各因子的差异性,且需要较大数据量	研究区信息量丰富,孕灾因素相互独立
	随机森林模型	预测精度高,抗拟合能力强,对于高维度数据的泛化能力强	模型内部的运行较难人为操控,不能不间断地输出值	适用于分类或回归问题,不适用于需要高实时的场景
	主成分分析法	指标选择容易,在节省工作量的同时不会漏掉关键指标	需保证提取的主成分具有实际意义,否则会造成过强的模糊性	有多个层次的综合评价
	变异系数法	避免单位或平均数不同对两个或多个资料变异程度比较的影响,减少权重的计算障碍	当平均值趋近于 0 时,变异系数易受较大影响	数据标准化后平均值不接近于 0 的情况
	贡献权重法	很好地揭示了地质灾害本底因子的贡献作用	将所有因子的重要性等同过于理想化	研究区资料丰富且易得

发性区划的方式是基于模糊层次分析法和以熵权法结合模糊层次分析法的主客观赋权组合模型,为研究区的地灾防治和土地规划提供了参考。

4 地质灾害易发性评价现存的问题

4.1 评价指标合理量化

当前国内外大量的研究聚焦在评价指标的选取及评价指标权重确定方法上,但对某个具体指标合理分级与量化相关研究较少。评价指标因子合理分级与量化对最终评价结果影响很大,有时甚至起到决定性作用。当前一些研究成果中的评价指标量化人为性、随意性较大,缺乏理论科学的分级量化依据。加强具体因子分级量化相关研究是地质灾害易发性评价的重要基础性工作之一。

4.2 评价方法的选用

每一种易发性评价方法模型自身都有着一定的局限性。在一些特定的易发区,影响因素和指标并非具有绝对的普遍性,因为通常都是根据当地的地质条件和监测数据信息进行指标的典型选择,从而进行分析评价。具体方法选用见表2。此外,在评价中采用的定量或定性计算方式的合理性与正确性将会直接影响结论的准确程度。

参考文献(References):

- [1]魏海霞.滇西红层区地质灾害易发性评价研究——以云南省永平县为例[D].昆明:昆明理工大学,2007:10-11.
Wei H X. Study on evaluation of geological hazard susceptibility in the red bed in western Yunnan [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007: 10-11. (in Chinese)
- [2]刘传正,陈春利.中国地质灾害成因分析[J].地质论评,2020,66(5):1334-1348.
Liu C Z, Chen C L. Research on the origins of geological disasters in China[J]. Geological Review, 2020, 66(5): 1334-1348.
- [3]刘希林,庙成,田春山.区域滑坡和泥石流灾害两种危险性评价方法的比较分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(1):71-78.
Liu X L, Miao C, Tian C S. Comparative analysis of two methods for assessing hazard of landslide and debris-flow on a regional scale[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 71-78.
- [4]杨建锋,张翠光,冯艳芳.国内外地质灾害长期变化的趋势[J].地质灾害与环境保护,2012,23(1):7-12.
Yang J F, Zhang C G, Feng Y F. Long-term trend of geo-hazard occurrence [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, 23(1): 7-12.
- [5]罗守敬,王珊珊,付德荃.北京山区突发性地质灾害易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(4):126-133.
Luo S J, Wang S S, Fu D Q. Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(4): 126-133.
- [6]薛强.对地质灾害易发性危险性易损性和风险性的探讨[C]//中国地质学会工程地质专业委员会2007年学术年会暨“生态环境脆弱区工程地质”学术论坛论文集.北京:中国地质学会工程地质专业委员会,2007:135-139.
Xue Q. Discussion on susceptibility, hazard, vulnerability and risk of geological disaster [C]//Beijing: Engineering Geology Professional Committee of the Chinese Geological Society, 2007: 135-139. (in Chinese)
- [7]郑永林,宁立波,毛绪美,等.浙江省龙泉市地质灾害易发区划分分析[J].湘潭师范学院学报(自然科学版),2004,26(4):90-92.
Zheng Y L, Ning L B, Mao X M, et al. Longquan City geological disaster easy happen area analyses by the zone division in Zhejiang Province [J]. Journal of Xiangtan Normal University (Natural Science Edition), 2004, 26(4): 90-92.
- [8]Hovland H J. Three-dimensional slope stability analysis method [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, 103(9): 971-986.
- [9]van Westen C J, Rengers N, Terlien M T J, et al. Prediction of the occurrence of slope instability phenomenon through GIS-based hazard zonation [J]. Geologische Rundschau, 1997, 86(2): 404-414.
- [10]单博.基于3S技术的奔子栏水库库岸地质灾害易发性评价及灾害风险性区划研究[D].长春:吉林大学,2014:4-15.
Shan B. Reservoir bank geological disaster susceptibility assessment and study on zoning of disaster risk in Benzilan water-source reservoir area based on 3S technology [D]. Changchun: Jilin University, 2014: 4-15.
- [11]倪化勇,王德伟,陈绪钰,等.四川雅江县城地质灾害发育特征与稳定性评价[J].现代地质,2015,29(2):474-480.
Ni H Y, Wang D W, Chen X Y, et al. Formation characteristics and stability assessment of geological hazards in Yajiang City, Sichuan Province [J]. Geoscience, 2015, 29(2): 474-480.
- [12]张琪,侯晓亮,马雷,等.基于GIS与IIVM的桐城市地质灾害易发性评价[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(7):958-964.
Zhang Q, Hou X L, Ma L, et al. Evaluation of the susceptibility of geological hazards in Tongcheng City based on GIS and IIVM [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(7): 958-964.
- [13]Saaty T L, Vargas L G. Estimating technological coefficients by the analytic hierarchy process [J]. Socio-Economic Planning Sciences,

- 1979, 13(6): 333-336.
- [14] 杨德宏, 范文. 基于 ArcGIS 的地质灾害易发性分区评价——以旬阳县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 82-86, 93.
Yang D H, Fan W. Zoning of probable occurrence level of geological disasters based on ArcGIS: A case of Xunyang [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 82-86, 93.
- [15] 李萍, 叶辉, 谈树成. 基于层次分析法的永德县地质灾害易发性评价[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 394-399, 406.
Li P, Ye H, Tan S C. Evaluation of geological hazards in Yongde County based on analytic hierarchy process [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 394-399, 406.
- [16] 苏建辉, 李永才, 窦顺. 基于模糊综合评判法分析某公路边坡稳定性[J]. 路基工程, 2015(5): 38-42.
Su J H, Li Y C, Dou S. Analysis of highway slope stability by fuzzy comprehensive evaluation [J]. Subgrade Engineering, 2015(5): 38-42.
- [17] 刘福臻, 王灵, 肖东升, 等. 基于模糊综合评判法的宁南县滑坡易发性评价[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(5): 237-246.
Liu F Z, Wang L, Xiao D S, et al. Evaluation of landslide susceptibility in Ningnan County based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(5): 237-246.
- [18] 张杰, 毕攀, 魏爱华, 等. 基于模糊综合法的烟台市栖霞中桥岩溶塌陷易发性评价[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 215-220.
Zhang J, Bi P, Wei A H, et al. Assessment of susceptibility to karst collapse in the Qixia Zhongqiao district of Yantai based on fuzzy comprehensive method [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 215-220.
- [19] 狄靖月, 徐辉, 许凤雯, 等. 基于逆推法和德尔菲法的地质灾害气象服务效益评估[J]. 气象, 2019, 45(5): 705-712.
Di J Y, Xu H, Xu F W, et al. Benefit assessment of geological hazard meteorological services based on inverse algorithm and evaluation method of Delphi [J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(5): 705-712.
- [20] 侯林锋, 李大卫, 周新民. 基于指标体系的浙江省地震灾害风险评估[J]. 华北地震科学, 2019, 37(4): 23-28.
Hou L F, Li D W, Zhou X M. Earthquake risk assessment in Zhejiang Province based on index system [J]. North China Earthquake Sciences, 2019, 37(4): 23-28.
- [21] Agterberg F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation [J]. Nonrenewable Resources, 1992, 1(1): 39-50.
- [22] 刘阳. 基于 GIS 的城市地质灾害评价风险性方法——以深圳为例 [D]. 广州: 广州大学, 2018.
Liu Y. Urban geological hazard assessment method based on GIS: A case study of Shenzhen area [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.
- [23] 胡燕, 李德营, 孟颂颂, 等. 基于证据权法的巴东县城滑坡灾害易发性评价[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 187-194.
Hu Y, Li D Y, Meng S S, et al. Landslide susceptibility evaluation in Badong County based on weights of evidence method [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 187-194.
- [24] 唐绪波, 傅旭东, 黄启乐. 神农架林区滑坡灾害易发性评价研究 [J]. 公路工程, 2017, 42(5): 111-116.
Tang X B, Fu X D, Huang Q L. Susceptibility assessment of landslide for Shennongjia forestry district [J]. Highway Engineering, 2017, 42(5): 111-116.
- [25] 陈立华, 李立丰, 吴福, 等. 基于 GIS 与信息量法的北流市地质灾害易发性评价[J]. 地球与环境, 2020, 48(4): 471-479.
Chen L H, Li L F, Wu F, et al. Evaluation of the geological hazard vulnerability in the Beiliu City based on GIS and information value model [J]. Earth and Environment, 2020, 48(4): 471-479.
- [26] 马振, 谭光超, 季璇. 基于 GIS 的信息量法在九畹溪流域地质灾害易发性评价中的应用[J]. 资源环境与工程, 2021, 35(5): 667-673, 680.
Ma Z, Tan G C, Ji X. Application of information quantity method based on GIS in evaluation of geological disasters susceptibility in Jiuwanxi Basin [J]. Resources Environment & Engineering, 2021, 35(5): 667-673, 680.
- [27] 李信, 阮明, 杨峰, 等. 基于 GIS 技术和信息量法的地质灾害易发性研究——以海南省昌江县为例[J]. 地质与资源, 2022, 31(1): 98-105.
Li X, Ruan M, Yang F, et al. Evaluation of geological hazard susceptibility based on GIS and information method: A case study of Changjiang County, Hainan Province [J]. Geology and Resources, 2022, 31(1): 98-105.
- [28] 郭林飞, 柴仕琦, 董静怡, 等. 我国城市路面塌陷事故统计分析 [J]. 工程管理学报, 2020, 34(2): 49-54.
Guo L F, Chai S Q, Dong J Y, et al. A statistical analysis of urban road collapse accidents in China [J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(2): 49-54.
- [29] 刘坚, 李树林, 陈涛. 基于优化随机森林模型的滑坡易发性评价 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(7): 1085-1091.
Liu J, Li S L, Chen T. Landslide susceptibility assessment based on optimized random forest model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(7): 1085-1091.
- [30] Goetz J N, Brenning A, Petschko H, et al. Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling [J]. Computers & Geosciences, 2015, 81: 1-11.
- [31] 郝国栋. 基于随机森林模型的商南县滑坡易发性评价 [D]. 西安: 西安科技大学, 2019: 43-47.
Hao G D. Landslide susceptibility assessment based on random forest model in Shangnan County [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019: 43-47.
- [32] 邓念东, 石辉, 文强, 等. 信息量支持下的随机森林模型的崩塌易

- 发性评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2210–2217.
- Deng N D, Shi H, Wen Q, et al. Collapse susceptibility evaluation of random forest model supported by information value model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2210–2217.
- [33] 杨硕, 李德营, 严亮轩, 等. 基于随机森林模型的乌江高陡岸坡滑坡地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 131–138.
- Yang S, Li D Y, Yan L X, et al. Landslide susceptibility assessment in high and steep bank slopes along Wujiang River based on random forest model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(4): 131–138.
- [34] 余丰华, 刘正华, 夏跃珍, 等. 基于敏感指数主成分分析法的浙江沿海突发性地质灾害易发区评价[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 64–68.
- Yu F H, Liu Z H, Xia Y Z, et al. Evaluation of the unexpected geological disasters distributions in coastal region of Zhejiang Province base on sensitivity coefficient and principal component analysis[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 64–68.
- [35] 丁赞, 沈铭. 基于层次分析法和变异系数法的黄冈市地质环境承载力研究[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(S1): 70–74, 91.
- Ding Z, Shen M. Study on the bearing capacity of geological environment in Huanggang City based on analytic hierarchy process and variation coefficient method [J]. Resources Environment & Engineering, 2019, 33(S1): 70–74, 91.
- [36] 乔建平, 吴彩燕. 滑坡本底因子贡献率与权重转换研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 13–16.
- Qiao J P, Wu C Y. Study on the conversion between the contribution rate and weight of the controlling factors for landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 13–16.
- [37] 王萌, 乔建平. 贡献权重模型在区域滑坡危险性评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1): 1–6.
- Wang M, Qiao J P. Application of contributing weights model in regional landslides hazard assessment [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(1): 1–6.
- [38] 杨海龙, 樊晓一. 基于贡献权重法的苏宝河流域地震滑坡本底因子敏感性分析[J]. 路基工程, 2016(3): 1–5.
- Yang H L, Fan X Y. Sensitivity analysis of root factors of seismic landslide in Subaohe Basin based on contribution weight method[J]. Subgrade Engineering, 2016(3): 1–5.
- [39] 石辉, 邓念东, 周阳. 随机森林赋权层次分析法的崩塌易发性评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10613–10619.
- Shi H, Deng N D, Zhou Y. Evaluation of collapse susceptibility based on random forest weighted analytic hierarchy process [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10613–10619.
- [40] 张志沛, 魏在豪. 基于加权信息量模型的滑坡灾害易发性评价——以瀾桥区为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3492–3500.
- Zhang Z P, Wei Z H. Landslide susceptibility assessment based on weighted information values model: Take Baqiao District as an example [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3492–3500.
- [41] 连志鹏, 徐勇, 付圣, 等. 采用多模型融合方法评价滑坡灾害易发性: 以湖北省五峰县为例[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 178–186.
- Lian Z P, Xu Y, Fu S, et al. Landslide susceptibility assessment based on multi-model fusion method: A case study in Wufeng County, Hubei Province [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 178–186.
- [42] 周苏华, 付宇航, 徐智文, 等. 基于主客观赋权法的福建省地质灾害易发性评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(9): 3204–3214.
- Zhou S H, Fu Y H, Xu Z W, et al. Geological disasters susceptibility mapping in Fujian Province based on subjective and objective weighting [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(9): 3204–3214.