

地震滑坡危险性评估及预测研究综述

马 慧*, 石邦宇, 谭鹏祥, 雷 真[#]

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年2月20日; 录用日期: 2025年3月12日; 发布日期: 2025年3月21日

摘 要

地质灾害是目前人类社会面临的主要威胁之一, 仅2018年全国范围内发生地质灾害高达2966起, 直接造成经济损失约14.7亿元。地震滑坡作为地震引起的主要地质灾害之一, 不仅存在范围广、数量多, 而且危险性高, 波及范围极大, 易对人类生命及财产安全造成重大损害, 所以分析研究地震滑坡成因与机理, 建立地震滑坡危险性评价及预测模型变得极为重要。本文通过系统地梳理、回顾了国内外对地震滑坡危险性的研究现状, 对目前的地震滑坡危险性相关研究进行总结, 分类论述了滑坡危险性预测方法及评价模型, 讨论各类方法的优缺点, 提出存在的问题与发展方向, 为以后更为深入的研究提供参考。

关键词

地震滑坡, 危险性, 预测模型, 评估

Research Progress on the Hazard Assessment and Prediction of Seismic Landslide

Hui Ma*, Bangyu Shi, Pengxiang Tan, Zhen Lei[#]

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Feb. 20th, 2025; accepted: Mar. 12th, 2025; published: Mar. 21st, 2025

Abstract

Geological disaster is one of the major threats to the development of human society. In 2018, 2966 geological disasters occurred nationwide, causing economic losses about ¥1.47 billion. Earthquake landslide is one of the main geological disasters caused by earthquake, which not only has a wide

*第一作者。

[#]通讯作者。

range and a large number, but also high risks and a wide range of impacts causing significant damage to human life and property safety. So the research on the causes and mechanism of earthquake landslide as well as the seismic landslide hazard evaluation and prediction model is extremely important. This article reviews and summarizes the domestic and foreign research about the risks of seismic landslide hazard, discusses the classification of landslide hazard prediction methods and the evaluation model. Besides, the article discusses the advantages and disadvantages of various methods, proposes the existing problems and development direction, and provides a reference for more in-depth research in the future.

Keywords

Seismic Landslides, Hazard, Prediction Mode, Assessment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

地震滑坡是危害性最大的地震次生地质灾害之一,往往造成数以千计的伤亡和巨大的经济损失。滑坡会破坏工程建设,影响水、气、油、电等生命线工程,会使道路堵塞,严重影响抢险救灾工作,增加灾害损失。2008年“5.12”汶川8.0级地震,触发了15,000余处滑坡、崩塌等地质灾害,直接造成近2万人死亡[1]。

我国大陆处在欧亚板块、印度板块、太平洋板块与菲律宾海板块之间,在性质不同的板块碰撞和俯冲推挤下,地震断裂带活动十分活跃,强震活动十分频繁,易发生大规模地震。根据以往的研究表明,4级以上地震将会诱发滑坡,然而大震更可能诱发更大规模的滑坡灾害[2]。与此同时,我国山区面积广大,约占国土陆地面积的2/3,存在大量斜坡。就长期来看,我国大部分地区具有较高的地震滑坡危险性,面临着较大的地震滑坡风险。因此,对于潜在滑坡地区进行地震危险性预测,在道路线路规划、城市发展选址和保障地震高发地区人类生命安全等方面,显得尤为重要。

由地震引发的滑坡与崩塌,不仅仅取决于地震运动本身,还与地区地形地貌、地质构造、岩组参数、植被指数、人类活动等因素有关。对于在地震中发生岩土结构破坏的坡体,也会因为降水产生滞后性滑坡[3]。所以,目前关于滑坡危险性研究主要是包括滑坡易发性和地震诱发滑坡两方面,但由于成因机理复杂和认识程度的差异,很难给出一个确切的危险性评估方法。本文将对国内外滑坡危险性研究方法的进展情况进行较为全面的综述,归纳了不同的滑坡危险性预测方法,并在此基础上提出进一步研究的建议。

2. 地震滑坡危险性预测方法概述

国内外学者对地震滑坡危险性进行了大量研究,得到许多切实可行的危险性评估模型。目前对于地震滑坡危险性的研究,根据应用领域不同主要可以分为震时应急危险性评估、震后老滑坡复活和潜在地震滑坡危险性区划三个方面[4]。本文通过系统梳理,归纳总结了近几十年来关于地震滑坡危险性的研究方法,大致分为基于贡献程度的权重型分析方法、基于数理统计的相关型分析方法、基于机器学习的智能型分析方法、基于概率理论的随机型分析方法、基于力学模型的确定型分析方法5类(图1)。

2.1. 基于贡献程度的权重型分析方法

基于贡献程度的权重型分析方法,本质是在大量的滑坡历史数据基础上,通过数学手段,根据影响

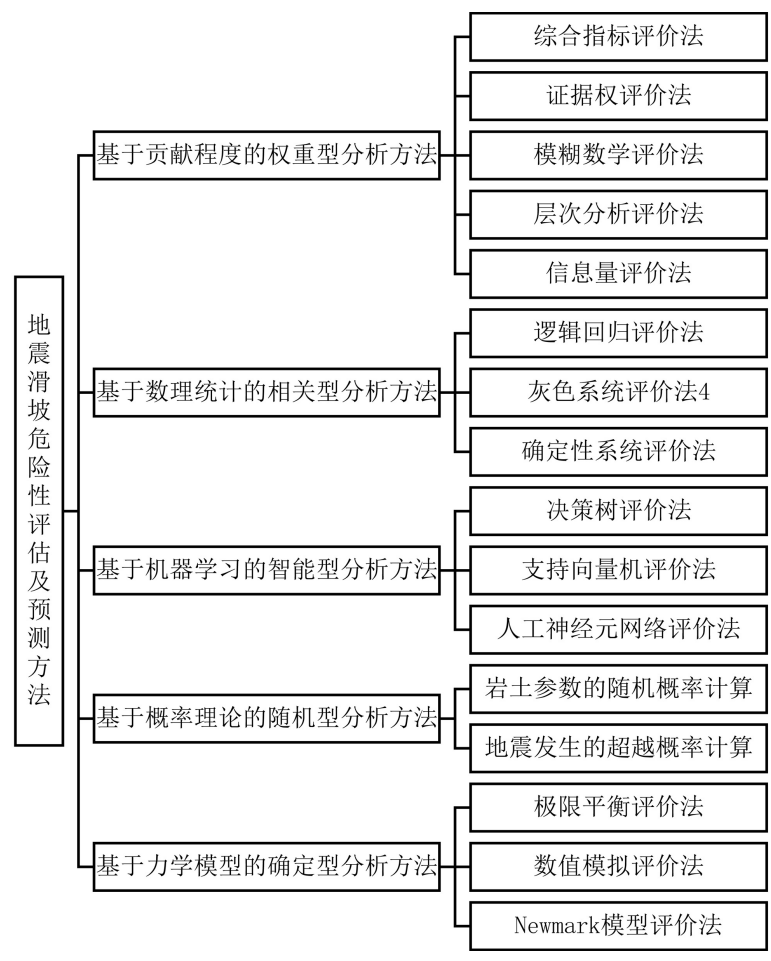


Figure 1. Classification diagram of seismic landslide risk method
图 1. 地震滑坡危险性研究方法分类图

地震滑坡各个因子对于滑坡的贡献程度，对各个因子按一定标准赋予权重，权重大的，影响程度大，反之则影响程度小，最后再利用地震滑坡危险性索引(LHI)进行整合，得到评判危险性的标准。这种研究方法，由于与地震滑坡危险性相关的参数众多，研究者所选的影响因素往往是根据自己本身专业素养和经验积累所决定的，具有一定的主观性，属于偏定性的研究方法，主要可分为以下四种评价法。

2.1.1. 综合指标评价法

综合指标法是指对地震滑坡的影响因数，通常是根据数量关系进行赋值，综合考虑每个影响因子对于滑坡的影响，通常利用计算模型(1)或(2)。

$$H(X_i) = \sum x_i \tag{1}$$

式中： $H(X_i)$ 为滑坡危险性程度函数， x_i 为滑坡影响因子。

$$H = (S \times S_a \times S_h)(T_s + T_p) \tag{2}$$

式中： H 为滑坡危险性程度函数， S_i 为滑坡内部影响因子， T_i 为滑坡外部影响因子。

王余庆[5]将影响因素分为内部与外部两部分，拟定 4 个可执行的计算方案，将计算结果与天然地震滑坡灾害进行对比，提出两个改进的基于综合指标法的危险性计算公式。

乔建平[6]根据汶川地震为背景，以都江堰等五个市、县，为研究区，采用岩性、高程、坡度、坡向、

密度五个影响因子为研究对象, 提出各因素的本身的自权重与相互影响的互权重, 将自权重、互权重与因子贡献度相乘, 得到危险性结果。

许冲[7]以海底太子港地震诱发的 30,828 处滑坡为研究对象, 将高程、坡向等 8 个因素作为影响因子, 根据二元统计分析的权重模型, 对滑坡危险性进行研究。

Sangeeta [8]以北阿坎德邦查莫利区为研究对象, 利用综合指标法, 对坡面、坡角、坡曲率、植被因子及峰值加速度五个影响因子进行赋值, 在根据各因子权重的加权线性组合计算得到滑坡危险性指数 (LHI)。

2.1.2. 证据权评价法

证据权评价法最初主要是应用于矿产资源的储量评估, 近年来逐渐被应用在边坡稳定性研究领域。此方法的理论基础是贝叶斯概率统计分析, 是指在假设条件独立的基础上, 综合考虑各个证据因子得到各个因子的权重。先通过计算得到各个因子的正相关系数与负相关系数, 通过式(3)~(5)计算得到权重[9]。

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{B_i/D\}}{P\{B_i/D^-\}} \quad (3)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{B_i^-/D\}}{P\{B_i^-/D^-\}} \quad (4)$$

$$W_{\bar{B}_i} = W_i^+ - W_i^- \quad (5)$$

式中 W_i^+ 表示当前影响因子对于滑坡的形成概率, 即正相关系数, W_i^- 表示其他影响因子对于滑坡的形成概率, 即负相关系数。 $W_{\bar{B}_i}$ 表示此影响因子在区域内的权重。 B 表示有此影响因子的滑坡数量或滑坡面积, D 表示总区域内的滑坡数量或滑坡面积。

许冲[10]采用证据权的分析方法, 以汶川地震地区滑坡为例, 探究地震滑烈度、岩性等八个影响因子对滑坡作用的权重, 再根据叠加操作得到危险性评价。

王珂[11]利用证据权模型, 对鲜水河断裂带地区进行危险性评估, 采用包括活动断裂在内的 11 个参数进行权重计算, 并通过成功率曲线检验此法的准确度。

Pamela [12]以 Takengon 地区为研究对象, 将 251 处滑坡分为训练组(70%)与测试组(30%), 计算地面峰值加速度、降水、地层岩性等 12 个影响因子的权重, 并利用危险性评价指标, 对整个地区进行危险性评价。

2.1.3. 模糊数学评价法

目前关于模糊数学的研究主要是在应用方面, 而在边坡稳定性领域模糊综合评价是热点。模糊综合评价法就是通过模糊数学, 应用模糊关系合成的原理, 将一些(例如: 高、低、快、慢等)不易辨清边界、不易量化计算的因素定量化, 根据各个因素对于被评价事物的隶属等级进行综合评价的方法(图 2)。

王秀英[13]在 Newmark 累积位移模型的基础上, 利用模糊数学中的隶属函数的计算方法, 实现累积位移的定量计算, 以此为根据进行危险性分级。

杨海龙[14]采用该方法对苏宝河流域进行地震滑坡危险性评判, 同时通过对照数据验证此法的准确性。

Razifard M [15]以 2012 年 8 月 2 日在 Ahbr-Varzeghan 发生的双重地震为研究背景, 采用基于地理信息系统的模糊逻辑模型, 以地面强度等级、坡角、归一化差分水分指数等为输入层数据, 对整个地震灾区滑坡危险性进行了区划。

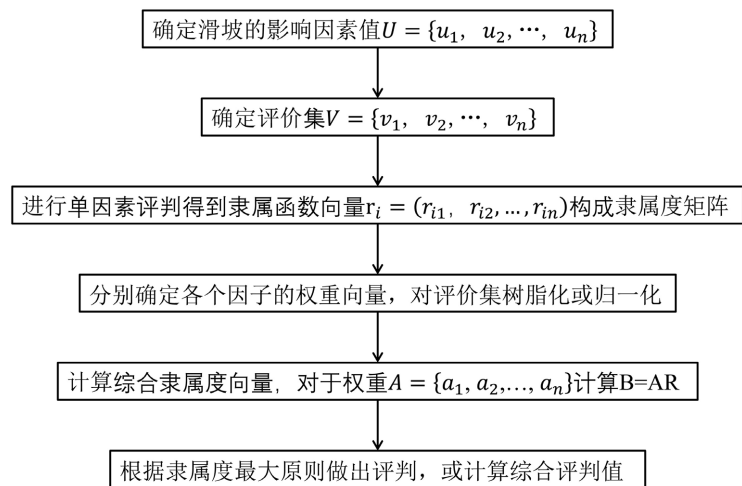


Figure 2. Flow chart of fuzzy comprehensive evaluation method
图 2. 模糊综合评价法流程图

2.1.4. 层次分析评价法

层次分析法证(AHP)是基于运筹学的理论, 将与目标有关的元素分拆为多个层次, 每个层次选取不同的评价因子, 两两因子之间进行相互比较, 基于专家经验构建与之对应的判断矩阵, 通过几何平均法、算术平均法或特征向量法计算得到各个评价因子的优先权重, 再利用加权和得到最终权重。

陈晓利[16]基于汶川地震, 以坡度、岩性等五个因子为研究对象, 得到各因子的权重, 建立区域滑坡危险性区划图。

刘丽娜[17]以芦山地震区为研究对象, 建立 6 个影响因素之间的 6 个关系矩阵, 综合分析各个参数的权重, 建立区域内的滑坡危险性分布图。

李芸芸[18]基于该法得到一种震时快速评估的方法, 利用包含地震烈度在内的 6 个影响因子, 根据两两对比矩阵, 得到各个因子的权重。

邹雪晴[19]以炉霍地震灾区为研究对象, 采用地层岩性、地质构造等 6 个因素为滑坡影响因子, 利用层次分析法, 确定各个因素的权重。

2.1.5. 信息量评价法

信息量的基本思想就是, 在对一个全新的、未知的问题, 通过各种途径获得信息, 逐渐消除对此问题的不确定性[20] (图 3)。

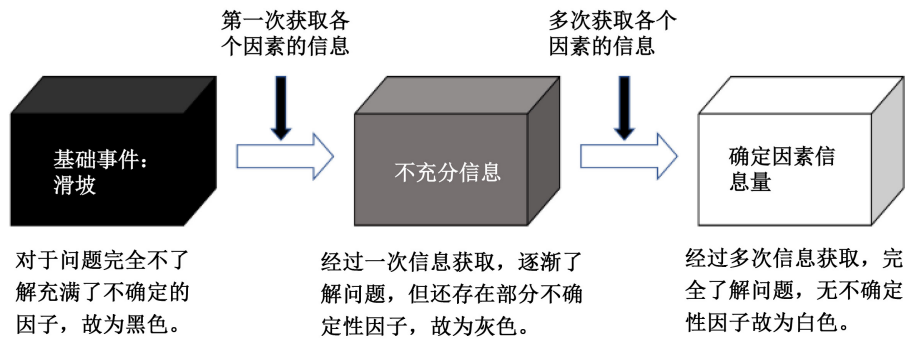


Figure 3. Flow chart of information methods for understanding things
图 3. 认识事物的信息方法流程图

而信息量评价法的本质是将滑坡的发生作为基础事件,使用公式(6),计算得到每个因素的信息量,并用信息量代替各个因素的权重,通过累计求和得到各个因素共同作用下的信息量。

$$I = \sum_i^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (6)$$

式中: I 表示区域内某单元的信息量; N_i 表示具有第 i 个影响因子的滑坡数量; S_i 表示具有第 i 个影响因子的滑坡面积, N 与 S 分别表示区域内滑坡总数和总面积。

牛全福[21]以青海玉树 $M_s = 7.1$ 级地震为背景,利用地理信息系统,建立灾区次生地质灾害危险性评估的信息量模型,充分考虑坡度、断层距等因素的作用,对各个因素进行空间建模,构建危险性评价体系。

张丹丹[22]采用信息量模型对芦山地震对龙门山地区滑坡危险性进行研究,以包括距离发震断层距离在内的 5 个因子为主要的评价指标进行危险性划分。

孙艳萍[23]以 2008 年汶川地震为背景,选取武都区与文县为研究区,通过 GIS 对历史数据进行处理,采用加权的的信息量评价模型,对研究区进行危险性程度的区划。

2.2. 基于数理统计的相关型分析方法

基于数理统计的分析方法是指通过对历史滑坡编录图、地形地貌条件及地震动参数等数据进行分析,根据不同的计算方法,求出各个因素之间的相关性,得到结果进行敏感性制图与历史数据进行比对,从而寻找出拟合度最好的模型。根据计算方法和模型选取不同大致可以分为以下三种评价法。

2.2.1. 逻辑回归评价法

逻辑回归法是指一个因变量与多个自变量之间形成多元回归关系。将滑坡危险性预测作为因变量,影响滑坡的各个因素作为自变量,探求一个拟合度较好的关系,从而形成预测模型。通常采用式(7)与(8)的回归模型。

$$Z = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i \chi_i \quad (7)$$

$$P = 1 / (1 + e^{-Z}) \quad (8)$$

式中: P 表示滑坡发生概率; Z 表示各个因素权重之和; B 表示回归系数; χ_i 表示各个影响因子。

许冲[24]基于高分辨率的遥感解译与现场调查,以玉树地震所诱发的 2036 处滑坡为研究对象,确定高程、坡向、坡度、地震峰值加速度等 12 个因子为影响因素,应用逻辑回归危险性评估的模型,对此次地震滑坡进行评估及验证。

Mondal S [25]采用基于 GIS 和遥感的逻辑回归模型,研究了以包括地面峰值加速度在内的 11 个影响因子,编制了大吉岭喜马拉雅巴拉松河流域的滑坡易感性图,准确度高达 96.1%。

马思远[26]利用 SPSS 软件分析了通过遥感解译得到的 4834 处滑坡,以坡度、坡向等 10 个因子作为研究对象,通过逻辑回归模型,对九寨沟滑坡进行应急危险性评价。

2.2.2. 灰色系统评价法

所谓“灰色”是指既包含已知信息(白色)与未知信息(黑色)。灰色系统法实质是对反应各因素变化特征的数据序列进行几何比较,通常将滑坡发生的典型样本作为母序列,将可能与滑坡成因有关的影响因子作为子序列,对子序列与母序列进行比较得到因子的相关性(图 4)。此法可以在不完全的数据库中进行,非常适合于边坡失稳这种数据缺乏的研究。

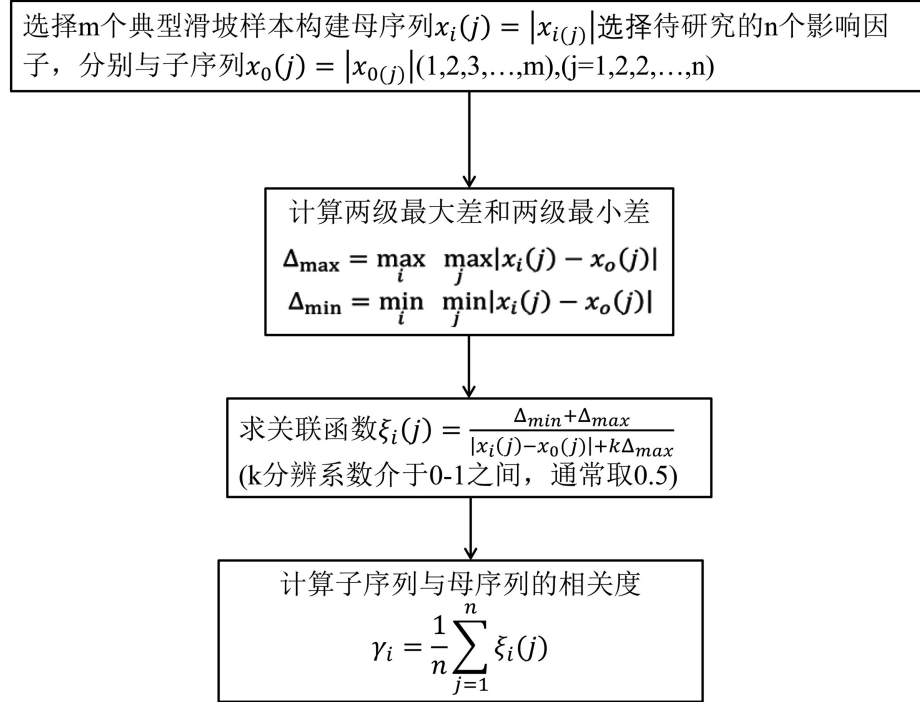


Figure 4. Flow chart of grey correlation evaluation method

图 4. 灰色关联评价法流程图

王余庆[27]将灰色聚类模型应用于地震滑坡危险性领域，对岩土力学参数、新构造运动等进行研究，并用邢台、丽江等地的多个历史地震滑坡进行准确性检验。

涂长红[28]以广东省为研究对象，提出一种改进的灰色关联滑坡危险性模型，研究了包括地震构造特征、地震在内的 9 个评价因子的关联度，计算出各个因素与滑坡成因之间的定量关系。

李嘉良[29]提出一种基于证据权重与灰色关联的地震滑坡危险性评价方法，以证据权模型为基础，用灰色关联法研究评估体系的确信度，建立危险性的识别框架。

2.2.3. 确定性系数评价法

确定性系数评价法(CF)是通过确定性系数来分析触发滑坡的各个因素敏感性的方法，可用公式(9)表示[30]。

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & (PP_a \geq PP_s) \\ \frac{PP_s - PP_a}{PP_s(1 - PP_a)} & (PP_s \geq PP_a) \end{cases} \quad (9)$$

式中： P_a 表示 a 因素下发生滑坡的概率， P_s 表示在整个研究区内的先验概率，在地震滑坡危险性的研究中，通常用滑坡面积之间的比值来代替概率。

陈晓利[31]选取包括地震烈度、震中距在内的 8 个因子作为滑坡的影响因子，采用确定性系数评价法，确定每个因素的 CF 值，以此为基础进行龙陵地震的滑坡敏感性分析。

许冲[32]以汶川地震为研究背景，利用确定性系数法分析研究了地震烈度、断层等 8 个影响因子，确定各个因子的 CF 值，利用 GIS 的分析计算，分别对 16 种不同影响因子的组合类型进行危险性评价，并利用 AUC 曲线得到最佳评价方法。

向灵芝[33]以汶川地震所发生的滑坡为研究对象,通过确定性系数法分组计算得出地层岩性、距断裂距离等因子的 CF 值,并通过 CF 值对危险性进行评价。确定各因子在区域内最易导致滑坡的数值区间。

金家梁[34]以龙门山断裂带为研究区,选取地震、地质等 4 个方面,共 10 个影响因子为研究对象,按照烈度进行分级,计算得到各个因素各级的 CF 值,对汶川与芦山地震进行滑坡危险性分析。

2.3. 基于机器学习的智能型分析方法

机器学习是一种基于概率论、统计学、逼近论等多门学科的综合科学,采用归纳和综合的方法来得到知识与技能。机器学习在滑坡危险性上的应用主要分为以下三种评价法。

2.3.1. 决策树评价法

决策树模型是一种常常用来解决分类与回归问题的树形模型,主要表示对象各个因子属性与对象值之间的一种映射关系,在关于滑坡稳定性的研究中,常把滑坡的发生作为对象,待研究的滑坡影响因子作为因子属性,用树形节点与枝干之间的关系进行研究。

赵建华[35]提出了一种基于决策树理论的滑坡危险性区划分法,以浙江庆元县滑坡集中区为研究对象,分析了高程、坡度等影响因子,进行滑坡危险性区划,并将结果与实际滑坡情况进行比较。

Park Lee [36]以江原道平昌地区为研究对象,将记录的 3994 个滑坡随机分为两组,分别用于训练和验证,利用决策树模型进行评估,再利用历史数据进行验证。

毛伊敏[37]提出了一种基于不确定决策树算法的滑坡危险性预测方法,通过将不确定因子—降雨和其余评价因子一起,构建出不确定决策树,建立危险性预测模型,并利用延安市宝塔区的滑坡实例进行验证。

2.3.2. 支持向量机评价法

支持向量机法是根据结构风险最小化原则,提高学习机的泛化能力,有不完整的训练集样本得到的小的误差能够保证对独立测试集仍能保持小的误差。

许冲[38]以青海玉树县为研究对象,采用支持向量机模型,选取包含地震动峰值加速度在内的 12 个因素,作为影响因子,采用线性核函数、多项式核函数等四类不同的核函数对研究区进行危险性评价,将得到的结果进行比较得到每种核函数的支持向量机模型的准确性。

邱丹丹[39]选取芦山地震中受灾最严重的宝盛乡为研究对象,建立以支持向量机理论为基础的滑坡敏感性评价模型。

林齐根[40]以 Newmark 累计位移模型和支持向量机为理论基础,提出了一种新的地震滑坡危险性评价方法,并以汶川地震汶川县收集到的滑坡数据为试验样本与验证样本,验证此法的准确性。

2.3.3. 人工神经网络评价法

人工神经网络是一种运算模型(图 5),包含了节点与节点间的联系,每个节点表示一种输出函数,每两个节点间的联系表示两个节点之间的加权值,即权重。求出权重值,利用网络输出,从而逐渐逼近关联函数。

García-Rodríguez [41]采用人工神经网络评价模型,对 El Salvador 地区进行地震滑坡危险性评价,并将 ANN 评价方法与逻辑回归评价方法(LR)进行准确度的比较。

许冲[42]以青海省玉树市发生的 2036 处滑坡为研究对象,选取包含地震峰值加速度在内的 12 个因素,为影响因子,采用人工神经网络进行滑坡危险性评价,并进行准确度验证。

Bagheri V [43]采用多层感知器(MLP)与高斯径向基函数(RPF)两人工神经网络对 1:50,000 尺度的地震滑坡进行分区,并对两种模型进行精度比较。

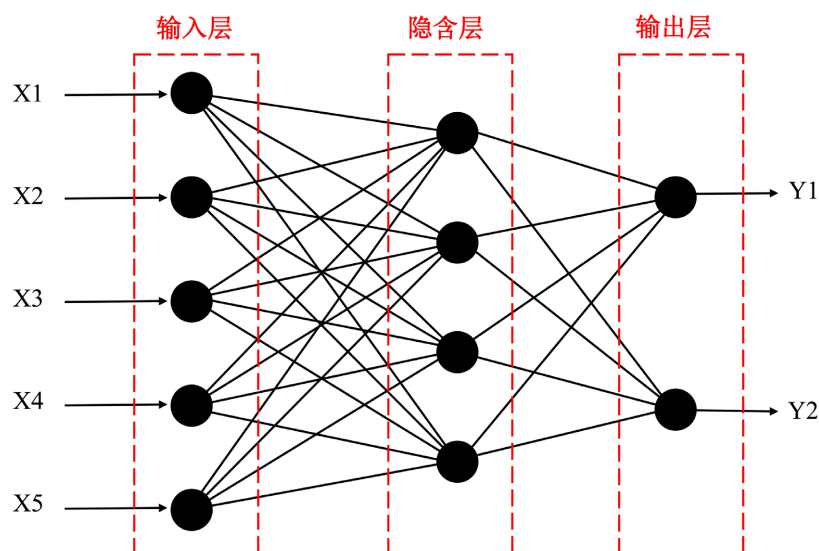


Figure 5. Schematic diagram of artificial neural network
图 5. 人工神经网络示意图

2.4. 基于概率理论的随机型分析方法

由于滑坡发生地区岩土力学参数分布不均匀,地震发生的时间、空间、强度、频率,也具有一定的不确定性,因此许多研究者希望利用概率理论寻求出一种通过概率来评判滑坡的方法,主要分为以下三种。

2.4.1. 岩土参数的随机概率计算

岩土力学参数是研究滑坡易发性极为重要的一个方面,而通常整个基地环境中,岩土力学参数及孔隙水压力等值是不均匀分布的,其具有一定的随机性和相关性。所以基于此种考虑,基于随机概率的评价方法得到了发展,通常利用一次二阶矩、蒙特卡罗(Monte Carlo)等可靠度分析理论进行研究。

汪华斌[44]充分考虑了研究区中岩土环境分布不均匀和地震动参数的变异性,采用蒙特卡罗与Newmark模型相结合的方法对日本新泻中越地区地震滑坡危险性进行评价。

刘莉[45]以古滑坡复活为主题,采用基于蒙特卡罗为基础的滑坡可靠度的计算方法,对贵州桐梓河流域古滑坡进行可靠度和概率的计算。

张湑[46]利用蒙特卡罗法,以太阳河滑坡体为例,根据滑坡滑向和横向的力学性质差异性与坡面地形起伏情况,将其分成若干条块进行计算。

2.4.2. 地震发生的超越概率计算

地震的发生预测指标目前是通过超越概率的计算而得到的,而将此种方法引入滑坡危险性的评估,既可充分考虑地震的影响,又为滑坡的危险性评价提供了新指标。

刘甲美[47]以天水地区为例,提出了一种基于Newmark累计位移模型,考虑潜在地震影响的概率性地震滑坡危险性区划方法。

Caccavale M [48]将概率地震危险性分析(PSHA)与Newmark累计位移模型相结合,用不同的年超越概率输入,以累计位移 D_n 为阈值确定了Phlegrean Islands地区的地震区边坡危险性。

Salvatore M [49]以Alcoy Basin地区为研究对象,运用概率方法对易震区,进行老滑坡活化评估与震时边坡稳定性分析。

2.5. 基于力学模型的确定型分析方法

根据力学和运动学的基本原理,对坡体失稳和坡体滑移两个过程进行定量的研究,得到的参数直接作为滑坡危险性划分的依据。这是一种直接根据成因的判别方法,属于直接的定量计算方法,可分为以下三种。

2.5.1. 极限平衡分析法

极限平衡分析法是以静力平衡为原理,分析地震发生时坡体的受力状态,以边坡的抗滑力和下滑力之间的关系计算得到边坡体的稳定性。

卞建华[50]采用极限平衡分析,通过室内试验与参数反演等方法得到岩土力学参数,利用滑坡推力法,评估了汶川地震灾区三兴庙滑坡稳定性。

党杰[51]以云贵交界处“9.7”地震为例,采用功能关系,利用摩擦力做功转换为物体内能的原理,针对滑坡,提出了关于强度的评价方法与指标值。

Saade A [52]提出了一种基于极限平衡分析和圆滑面模型的地震边坡失稳修正方法,以 1994 年加州北岭地震滑坡为例进行分析比较。

2.5.2. 数值模拟分析法

数值模拟指利用有限元软件对滑坡体进行建模,模拟边坡整个失稳过程。

张杰[53]运用 FLAC3d 软件对陕西凤凰山滑坡进行数值模拟,分析其稳定性,并使用 MSARMA 法对结果进行合理性检验。

杜飞[54]以甘肃省白龙江流域老滑坡为研究对象,依靠 GeoStudio 软件中的动力响应模块,进行了老旧滑坡复活机制的研究。

王立伟[55]以鲁甸地震甘家寨滑坡为例,依托 QUAKE/W 模块分析地震作用时的动力响应情况,将结果导入 SLOPE/W 模块中,进行稳定性分析。

2.5.3. Newmark 累积位移分析法

Newark [56]提出累积位移法评估地震作用下的斜坡稳定性(图 6),该方法将大于滑坡体临界加速度 a_c 的地震动加速度部分进行积分求得滑块累积位移时程曲线,最终的位移即为 Newmark 累积位移。

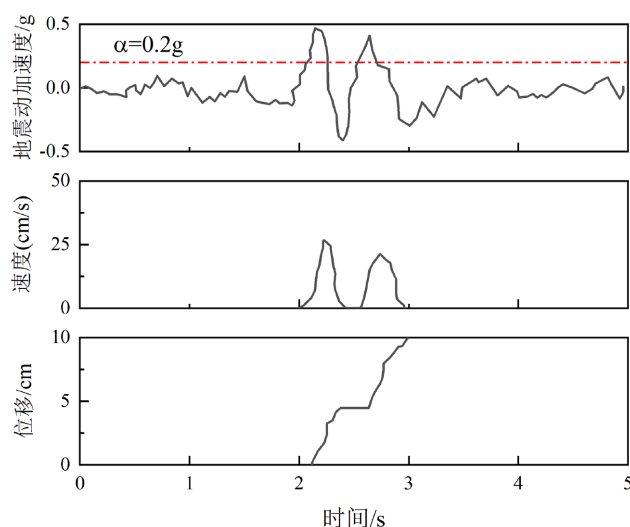


Figure 6. Newmark cumulative displacement calculation diagram
图 6. Newmark 累计位移计算示意图

$$Dn = \int_t \int_t [a(t) - a_c] dt dt \quad (10)$$

式中： Dn 表示累计位移值， $a(t)$ 表示地震动加速度， a_c 表示临界加速度。

王涛[57]利用汶川地震所记录到的地震动参数实时数据、岩性经验分组和地形坡度数据，借助 ArcGIS 编制了地震滑坡危险性快速评价模块。利用 Newmark 法的累计位移 Dn ，作为评判标准，绘制危险性评估图。

陈晓利[58]以芦山地震为例，通过灾区震后航空照片及遥感影像的解译，得到地震诱发滑坡的分布情况，利用岩性和地形的分析资料，采用 Newmark 物理平衡模型，对该地区地震滑坡危险性进行了预测。

刘甲美[59]以天水地区为研究对象，基于不同的位移模型进行危险性评估，探讨得出最适用于中国的 Newmark 位移模型。

金凯平[60]考虑滑动面在地震作用时抗剪强度的衰减效应，将 Newmark 累计位移模型进行修正，利用汶川地震滑坡资料对修正后的方法进行验证。

3. 结语

目前，大量国内外学者围绕地震滑坡危险性评估进行研究，技术手段和研究方法也不断地在进步，依托 GIS、GPS、RS 等地球科学软件，近几年得到了广泛的应用，成果丰硕。笔者通过学习众多分析方法和研究成果，做出如下总结：

1) 基于贡献程度的权重型研究方法，在本世纪初期得到了广泛的应用，是当时的主流方法，通过研究各个影响因素的贡献程度大小，从而确定权重，进而得到危险性的评价指标。该方法由于影响因子甚至是权重赋值是根据专家经验进行选取的，具有一定的局限性，属于主观的研究方法。

2) 基于数理统计的相关型研究方法，方法有很强的可操作性，结果准确性较好。但其关键点也在于影响因子的选择，而这一过程往往是由研究者自己所决定的，属于一种半定量的范畴。再因为通过历史数据的探究，只能对于某一处滑坡或某一块地区的滑坡进行数据的拟合，正因为这种地域的局限性，所以得到的结论无法推广到所有的滑坡研究中。

3) 基于机器学习的智能型研究方法，以历史滑坡数据为训练资料，逐渐得到滑坡与各影响因素之间的函数关系。这种方法准确性较高，能够很好地反应滑坡与环境因子之间的非线性关系，也是目前推广度较高的方法之一。但此方法必须基于大量数据的训练，训练数据越多，准确度越高，因此对于灾区滑坡快速评估和危险性区划与预测有一定的局限性。由于建立在训练数据的基础上，因此也存在一定的地域性。

4) 基于概率理论的随机型研究方法利用概率模型解决了地震发生和岩土参数空间分布不均匀的问题。目前对此方面的研究主要集中在解决岩土参数的不均匀问题上，而基于地震超越概率的研究方法还停留在初级阶段。

5) 基于力学模型的确定型研究方法，根据力学模型对滑坡进行模拟，得到一种确定型的研究方法。相较于前几种方法，确定型的研究优势在于有固定的评价模式，不受地域的局限，不需要大量历史数据支持，是目前一种简单快捷、国际采用最广泛的研究方法，尤其是基于 Newmark 累计位移模型的研究，更是时下研究的热点。无论是在灾后地区的快速评估，还是在潜在地区的预测及区划方面，都有广泛的应用。

综上所述，本文建议今后可以从以下方向进行研究：

1) 将熵权法与主观赋权结合，引入数据驱动的客观赋权法将主观权重(专家经验)与客观权重(数据统计)结合，基于实际滑坡数据量化因子重要性，修正专家赋权偏差。文凯[61]将客观赋权法(熵权法)与主观

赋权法(权的最小平方方法)相结合,确定各影响因子指标的权重系数,并通过工程实例证明了该方法的可行性和可靠性。

2) 采用两种或多种模型耦合的方式开展地震滑坡危险性评价研究,郑志成[62]用四种耦合模型对九寨沟地震滑坡危险性进行评价,四种模型都能客观准确地评价九寨沟地震滑坡危险性。王悦等[63]提出了一种耦合多模型的区域滑坡易发性建模框架,应用信息量法定量分析各指标对滑坡空间发育的影响程度。

3) 利用计算机、地理信息和遥感等技术,构建动态更新的多源数据库,优化现有模型(如 Newmark 位移模型)的输入参数与算法结构。

4) 针对不同地质单元(如断裂带、黄土高原)建立分区统计模型,结合区域地质特征(如岩性、断裂活动性)调整模型参数。比如黄发明等[64]针对黄土高原创新地提出了“权重均值法”来综合计算出更准确的滑坡主控因子。

基金项目

国家自然科学基金(52268038); 云南省应用基础研究计划面上项目(202201A070159); 云南省兴滇英才支持计划青年人才专项项目。

参考文献

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
- [2] Keefer, D.K. (1984) Landslides Caused by Earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, **95**, Article 406.
- [3] 李忠生. 国内外地震滑坡灾害研究综述[J]. 灾害学, 2003, 18(4): 64-70.
- [4] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 地震滑坡危险性概念和基于力学模型的评估方法探讨[J]. 工程地质学报, 2015(1): 93-104.
- [5] 王余庆, 辛鸿博, 高艳平, 周根寿. 预测岩土边坡地震崩滑的综合指标法研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 311-314.
- [6] 乔建平, 蒲晓虹, 王萌, 等. 大地震诱发滑坡的分布特点及危险性区划研究[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 25-29.
- [7] 许冲. 2010 年海地太子港地震触发滑坡危险性区划和合理性检验[J]. 科技导报, 2013, 31(12): 42-47.
- [8] Sangeeta Maheshwari, B.K. (2018) Earthquake-induced Landslide Hazard Assessment of Chamoli District, Uttarakhand Using Relative Frequency Ratio Method. *Indian Geotechnical Journal*, **49**, 108-123.
<https://doi.org/10.1007/s40098-018-0334-2>
- [9] 赵艳南, 牛瑞卿. 基于证据权法的滑坡危险性区划探索[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(6): 19-23.
- [10] 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 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, 2011, 36(6): 1155-1164.
- [11] 王珂, 郭长宝, 马施民, 等. 基于证据权模型的川西鲜水河断裂带滑坡易发性评价[J]. 现代地质, 2016, 30(3): 705-715.
- [12] Pamela Sadisun, I.A. and Arifianti, Y. (2018) Weights of Evidence Method for Landslide Susceptibility Mapping in Takengon, Central Aceh, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **118**, Article 012037.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012037>
- [13] 王秀英, 聂高众, 王松. 利用模糊数学方法建立汶川地震滑坡灾害评判标准[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 403-410.
- [14] 杨海龙, 樊晓一. 基于模糊综合评判法的苏宝河流域地震滑坡潜在危险性评判[J]. 路基工程, 2016(6): 6-10.
- [15] Razifard, M., Shoaie, G. and Zare, M. (2018) Application of Fuzzy Logic in the Preparation of Hazard Maps of Landslides Triggered by the Twin Ahar-Varzeghan Earthquakes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **78**, 223-245. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1235-4>
- [16] 陈晓利, 冉洪流, 王明明. 潜在地震滑坡危险区区划方法[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1269-1277.
- [17] 刘丽娜, 许冲, 徐锡伟, 等. GIS 支持下基于 AHP 方法的 2013 年芦山地震区滑坡危险性评价[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 183-191.
- [18] 李芸芸, 孙柏涛, 陈相兆, 等. 基于 GIS 平台的地震滑坡危险性快速评估方法的初步研究[J]. 地震工程与工程振

- 动, 2016, 36(6): 111-119.
- [19] 邹雪晴, 母剑桥, 石思. 基于层次分析法的炉霍地震滑坡触发因素分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2017, 18(1): 52-56.
- [20] 高克昌, 崔鹏, 赵纯勇, 等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价——以重庆万州为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 991-996.
- [21] 牛全福, 程维明, 兰恒星, 等. 基于信息量模型的玉树地震次生地质灾害危险性评价[J]. 山地学报, 2011, 29(2): 243-249.
- [22] 张丹丹, 常鸣, 马国超, 等. 四川雅安“4.20”芦山地震龙门乡崩塌滑坡发育分布特征及危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(1): 16-21.
- [23] 孙艳萍, 张苏平, 陈文凯, 等. 汶川地震滑坡危险性评价——以武都区 and 文县为例[J]. 地震工程学报, 2018, 40(5): 1084-1091.
- [24] 许冲, 徐锡伟. 逻辑回归模型在玉树地震滑坡危险性评价中的应用与检验[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 326-333.
- [25] Mondal, S. and Mandal, S. (2017) RS & GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping of the Balason River Basin, Darjeeling Himalaya, Using Logistic Regression (LR) Model. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 12, 29-44. <https://doi.org/10.1080/17499518.2017.1347949>
- [26] 马思远, 许冲, 田颖颖, 等. 基于逻辑回归模型的九寨沟地震滑坡危险性评估[J]. 地震地质, 2019, 41(1): 162-177.
- [27] 王余庆, 高艳平, 辛鸿博. 用灰色聚类方法预测边坡地震稳定性研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(6): 44-47.
- [28] 涂长红, 商建林, 谢叶彩, 等. 改进的灰色关联分析在滑坡危险性评价中的应用——以广东省滑坡危险性评价为例[J]. 灾害学, 2007, 22(1): 86-89.
- [29] 李嘉良, 马东辉, 王威. 基于证据理论和熵权灰色关联的潜在地震滑坡危险性评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1730-1736.
- [30] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于 GIS 的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29(S1): 2972-2981.
- [31] 陈晓利, 冉洪流, 祁生文. 1976 年龙陵地震诱发滑坡的影响因子敏感性分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 45(1): 104-110.
- [32] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于 GIS 与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 15-26.
- [33] 向灵芝, 崔鹏, 张建强, 等. 汶川县地震诱发崩滑灾害影响因素的敏感性分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 105-112.
- [34] 金家梁, 王盈, 袁仁茂, 等. 基于确定性系数方法的龙门山地区地震滑坡影响因子敏感性分析——以汶川地震与芦山地震诱发滑坡为例[J]. 第四纪研究, 2018, 38(2): 355-366.
- [35] 赵建华, 陈汉林, 杨树锋, 等. 基于决策树算法的滑坡危险性区划评价[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2004, 31(4): 465-470.
- [36] Park, I. and Lee, S. (2014) Spatial Prediction of Landslide Susceptibility Using a Decision Tree Approach: A Case Study of the Pyeongchang Area, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 6089-6112. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.943326>
- [37] 毛伊敏, 彭喆, 陈志刚, 等. 基于不确定决策树分类算法在滑坡危险性预测的应用[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(12): 3646-3650.
- [38] 许冲, 徐锡伟. 基于不同核函数的 2010 年玉树地震滑坡空间预测模型研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2994-3005.
- [39] 邱丹丹, 牛瑞卿, 杨耘. 相关向量机在地震滑坡敏感性分析中的应用[J]. 科技导报, 2017, 35(15): 70-76.
- [40] 林齐根, 刘燕仪, 刘连友, 等. 支持向量机与 Newmark 模型结合的地震滑坡易发性评估研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1623-1633.
- [41] García-Rodríguez, M.J. and Malpica, J.A. (2010) Assessment of Earthquake-Triggered Landslide Susceptibility in El Salvador Based on an Artificial Neural Network Model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 1307-1315. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1307-2010>.
- [42] 许冲, 徐锡伟. 基于 GIS 与 ANN 模型的地震滑坡易发性区划[J]. 地质科技情报, 2012, 31(3): 116-121.
- [43] Bagheri, V., Uromeihy, A. and Razifard, M. (2017) Evaluation of MLP and RBF Methods for Hazard Zonation of

- Landslides Triggered by the Twin Ahar-Varzeghan Earthquakes. *Geotechnical and Geological Engineering*, **35**, 2163-2190. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0236-6>
- [44] 汪华斌, Kyoji, S. 蒙特卡罗模拟在区域地震滑坡灾害评价中应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2565-2569.
- [45] 刘莉, 杨永康. 基于 Monte-Carlo 随机法涉水古滑坡复活概率分析[J]. 施工技术, 2017, 46(17): 126-130.
- [46] 张焱. 基于 Monte Carlo 法的滑坡稳定性可靠度分析研究[J]. 中国锰业, 2017, 35(2): 160-161+167.
- [47] 刘甲美, 高孟潭, 吴树仁. 概率性地震滑坡危险性区划方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(S1): 3100-3110.
- [48] Caccavale, M., Matano, F. and Sacchi, M. (2017) An Integrated Approach to Earthquake-Induced Landslide Hazard Zoning Based on Probabilistic Seismic Scenario for Phlegrean Islands (Ischia, Procida and Vivara), Italy. *Geomorphology*, **295**, 235-259. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.010>
- [49] Martino, S., Battaglia, S., Delgado, J., Esposito, C., Martini, G. and Missori, C. (2018) Probabilistic Approach to Provide Scenarios of Earthquake-Induced Slope Failures (PARSIFAL) Applied to the Alcoy Basin (South Spain). *Geosciences*, **8**, Article 57. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020057>
- [50] 卞建宁, 邢志斌, 李精英. 四川地震灾区三兴庙滑坡稳定性评价及治理研究[J]. 地质学刊, 2011, 35(3): 290-295.
- [51] 党杰, 陈筠, 杨胜元, 等. 地震诱发滑坡地质灾害的强度评估方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 86-89.
- [52] Saade, A., Abou-Jaoude, G. and Wartman, J. (2016) Regional-Scale Co-Seismic Landslide Assessment Using Limit Equilibrium Analysis. *Engineering Geology*, **204**, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.004>
- [53] 张杰, 侯定贵, 张晓航, 等. 地震诱发滑坡的数值模拟与敏感性分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10254-10258.
- [54] 杜飞, 任光明, 夏敏, 等. 地震作用诱发老滑坡复活机制的数值模拟[J]. 山地学报, 2015, 33(2): 233-239.
- [55] 王立伟, 文海, 张振平, 等. 基于 QUAKE/W 和 SLOPE/W 下甘家寨滑坡地震动力响应分析及稳定性评价[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 274-280.
- [56] Newmark, N.M. (1965) Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Géotechnique*, **15**, 139-160. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>
- [57] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 基于简化 Newmark 位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估——以汶川 M_S8.0 级地震为例[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 16-24.
- [58] 陈晓利, 袁仁茂, 庾露. Newmark 方法在芦山地震诱发滑坡分布预测研究中的应用[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 661-670.
- [59] 刘甲美, 王涛, 石菊松, 等. 基于不同位移预测模型的地震滑坡危险性评估研究——以天水地区为例[J]. 地质力学学报, 2018, 24(1): 87-95.
- [60] 金凯平, 姚令侃, 陈秒单. Newmark 模型的修正以及地震触发崩塌滑坡危险性区划方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 301-308.
- [61] 文凯, 孟绘坤, 余学坚, 等. 基于改进的组合权重-功效系数法的滑坡危险性评价[J]. 价值工程, 2017, 36(10): 48-51.
- [62] 郑志成, 郭红梅, 赵真, 等. 基于耦合模型的九寨沟地震滑坡危险性对比研究[J]. 黑龙江科学, 2025, 16(2): 7-15.
- [63] 王悦, 曹颖, 许方党, 等. 考虑非滑坡样本选取和集成机器学习方法的水库滑坡易发性预测[J]. 地球科学, 2024, 49(5): 1619-1635.
- [64] 黄发明, 胡松雁, 闫学涯, 等. 基于机器学习的滑坡易发性预测建模及其主控因子识别[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 79-90.