引文格式：张成立,范瑜,赵国记. 多Newmark位移经验模型下的地震滑坡危险性评价[J]. 地理空间信息, 2025, 23(8):86-89. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.08.017

多Newmark位移经验模型下的地震滑坡危险性评价

张成立[1]，范　瑜[2*]，赵国记[3]
（1. 云南建投第一勘察设计有限公司，云南 昆明 650102；2. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司，云南 昆明 650051；
3. 云南宾鹤高速公路投资开发有限公司，云南 大理 671599）

摘　要：Newmark法在滑坡危险性评价中显示出显著的优势，主要体现在其计算效率高，且无需大量的数据反演或复杂的训练过程。因此，着重对比3种不同的Newmark位移经验模型，对鲁甸地震诱发的滑坡危险性进行了深入分析。模型1、2和模型3的AUC值分别为0.617、0.686和0.702，表明模型3在预测准确性上表现最佳。研究结果揭示，考虑近断层地震动中的脉冲效应的位移模型，能够更准确地评估鲁甸地震的滑坡危险性。这强调了在选择滑坡危险性评价模型时，必须考虑地震事件及受灾区的自身特点。选择适合的Newmark位移经验模型对于提高区域斜坡稳定性分析的可靠性具有重要意义。同时，建议在未来的滑坡危险性评价中，特别是在类似鲁甸地震的近断层地区，优先采用考虑脉冲效应的模型。

关键词：鲁甸地震；地震滑坡；Newmark位移模型；危险性评价
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）08-0086-04

Seismic Landslide Hazard Evaluation Under Multi-Newmark Displacement Empirical Model

ZHANG Chengli[1], FAN Yu[2], ZHAO Guoji[3]
(1. Yunnan Construction Investment First Survey and Design Co., Ltd., Kunming 650102, China;2. PowerChina Kunming Engineering Co., Ltd., Kunming 650051, China; 3. Yunnan Binhe Highway Investment & Development Co., Ltd., Dali 671599, China)

Abstract: The Newmark method shows significant advantages in landslide hazard evaluation, mainly in terms of its high computational efficiency and the fact that it does not require a large amount of data inversion or a complicated training process. Therefore, we carried out an in-depth analysis of the landslide hazard induced by the Ludian earthquake by comparing three different Newmark displacement models. The AUC values of model1, model2 and model3 are 0.617, 0.686 and 0.702, respectively, indicating that model3 performs the best in terms of prediction accuracy. The result reveals that the displacement model considering the impulse effect in near-fault ground shaking can more accurately assess the landslide hazard of the Ludian earthquake, which emphasizes the importance of considering the own characteristics of seismic event when selecting a landslide hazard assessment model. The selection of adapted Newmark displacement model is of great significance in improving the reliability of regional slope stability analysis. At the same time, it is recommended that models that take into account the impulse effect should be prioritized in future landslide hazard evaluations, especially in near-fault areas similar to the Ludian earthquake.

Key words: Ludian earthquake, seismic landslide, Newmark displacement model, hazard evaluation

Newmark位移模型作为一种经典的地震边坡稳定性分析工具，在地震工程领域被广泛采用[1-3]。该模型通过计算斜坡在地震荷载作用下的位移来评估其稳定性，从而能够较为准确地预测潜在的滑坡风险。与传统的静力分析方法相比，Newmark位移模型考虑了动力效应，能够更全面地反映地震作用下的斜坡行为。同时，Newmark法以其高计算效率，并且不依赖于数据反演或复杂训练过程，在资源有限或数据不完整的地区具有明显优势。然而值得注意的是，当前存在众多Newmark位移经验模型，它们在参数设置、计算方法等方面各有侧重，每种模型都有其独特的假设和适用范围。对比不同Newmark位移经验模型的适用性和预测效果，对于提高滑坡危险性评价的准确性和可靠性具有重要意义。本文将采用不同的Newmark位移经验模型，针对鲁甸地震下的滑坡危险性进行评价，并探讨各模型的优势与局限性，为云南鲁甸地区滑坡危险性评估提供更为科学和精确的方法论指导。

1　Newmark位移模型

Newmark法最早由美国地震工程学家Newmark在20世纪50年代提出[4-5]，随后Newmark位移模型成为一种用于评估地震作用下斜坡稳定性的经典方法。

第一作者简介：张成立（1982—），本科，高级工程师，主要从事结构设计、岩土设计及地质灾害防治工作，E-mail：49281507@qq.com。
通信作者：范瑜（1985—），本科，正高级工程师，主要从事结构设计、岩土设计及科研工作，E-mail：5371446@qq.com。

该模型的核心思想是通过计算斜坡在地震荷载作用下的位移来判断其稳定性。该模型将斜坡视为斜面，滑坡体为刚体，当滑坡发生时，刚体在斜面上克服外力作用产生移动。模型通过研究刚体受外界作用力影响与临界加速度和安全系数等的关系，判断坡体是否产生滑移，只有当外力作用大于临界加速度时，才会产生有限位移。而在持续地震作用下，通过累积的永久位移分析判断斜坡的稳定性。

该模型的临界加速度可表示为：

$$a_c=(F_s-1)g\sin\alpha \tag{1}$$

式中，a_c 为临界加速度；F_s 为安全系数；α 为边坡坡角。

$$F_s=\frac{c}{\gamma t\sin\alpha}+\frac{\tan\varphi}{\tan\alpha}-\frac{m\gamma_w\tan\varphi}{\gamma\tan\alpha} \tag{2}$$

式中，c 为粘聚力；φ 为摩擦角；γ 为容重；γ_w 为水的容重；t 为坡体的厚度；m 为滑动条块含水厚度比例。

累积位移是通过地震动加速度的实际值与时间的积分来计算的，它是评估滑坡危险性的关键参数。然而，由于实际地震记录的不完整性，获取精确的累积位移值面临挑战。为了克服这一难题，本文采纳了由地震工程专家提出的累积位移函数计算方法。这种方法通过一个数学表达式来近似实际的累积位移，该表达式已被证实能够有效地捕捉累积位移随时间变化的趋势。通过使用这个函数关系，能够在没有完整地震记录的情况下，对滑坡体的累积位移进行估算。这种方法不仅提高了滑坡危险性评价的可行性，而且通过简化计算过程，使得分析更加高效，有助于在不同地震情景下进行快速而准确的评估。因此，本文选取当前最具代表性的3个Newmark位移经验模型。

$$\log D_N=-2.710+\log\left[\left(1-\frac{a_c}{\mathrm{PGA}}\right)^{2.335}\left(\frac{a_c}{\mathrm{PGA}}\right)^{-1.478}\right]+0.424M\pm0.454 \tag{3}$$

$$\ln D_N=5.52-4.43(a_c/\mathrm{PGA})-20.93(a_c/\mathrm{PGA})^2+42.61(a_c/\mathrm{PGA})^3-28.74(a_c/\mathrm{PGA})^4+0.72\ln(\mathrm{PGA}) \tag{4}$$

$$\ln D_N=-2.885-0.575\ln a_c+1.475\ln\mathrm{PGA}-6.802\left(\frac{a_c}{\mathrm{PGA}}\right)\pm0.678 \tag{5}$$

式中，M 为震级。

模型1（公式3）为Jibson[6]通过30次地震的2 270条地震动数据采用刚性滑块法建立的不同地震动参数组成的模型；模型2（公式4）为Saygili等[7]选取了震级为5.0~7.9，断层距小于100 km的地震动数据建立的位移模型；随着地震事件的增多，研究逐渐发现许多次大地震的近断层区域都遭受了巨大的破坏，具有显著的速度脉冲效应。因此，高广运等[8]基于小波分析法识别出了189条脉冲地震动数据，并建立了典型的脉冲型位移模型，为模型3（公式5）。

2　鲁甸地震滑坡危险性评价

2014-08-03，云南省昭通市鲁甸县发生6.5级地震。此次地震造成了严重的直接损失，给灾区人民的生命财产安全带来了巨大威胁。据相关数据统计，地震共导致近600人死亡，数千人受伤，数万间房屋倒塌或严重损坏。

图1直观地展示了研究区域及其滑坡灾害的分布情况，滑坡直接造成了大量人员伤亡与房屋损毁，对当地居民的生命财产安全构成了严重威胁，生活秩序遭受重创。其次，滑坡还严重阻碍了交通要道的畅通，不仅限制了人员的安全撤离，更拖延了救援物资和设备的及时送达，进一步加剧了灾害的救援难度与影响范围。

因此，对鲁甸地震诱发的滑坡灾害进行深入研究，能够提前识别潜在的滑坡风险区域，为救援队伍提供关键信息，从而更有效地部署救援资源和制定救援策略。通过科学评估滑坡发生的可能性和潜在影响，可以优化救援行动的优先级，确保救援工作更加迅速和精准。此外，准确的危险性评价还能够为灾后重建和长期防灾规划提供决策支持，减少未来灾害的潜在损失，这对于保护人民生命财产安全和促进地区经济的恢复与可持续发展至关重要。

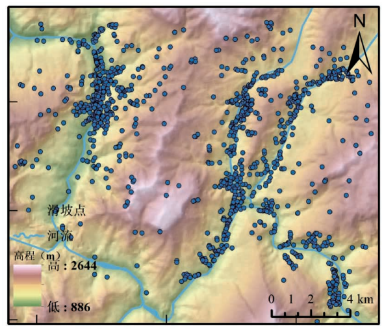


图1　研究区灾害分布图

2.1　Newmark位移计算参数的确定

通过收集相关资料，获取研究区的航拍遥感影像、30 m分辨率的数字高程模型、地层岩性、地震动数据等。研究区内岩土体类型主要为页岩、石英砂岩、白云岩、灰岩、玄武岩、泥岩、沙黏土等类型，根据研究区岩石坚硬程度、岩体完整程度、岩石成因

及岩性组合关系等要素，将研究区域的地层岩性划分为5类：坚硬、较硬、较软、软弱和松散（依次对应图2中的Ⅰ–Ⅴ岩性）。参照《工程岩体分级标准》GB/T 50218–1994（中华人民共和国国家标准编写组，1995）、《岩土工程勘察规范》GB50021–2001（中华人民共和国建设部，2009）等相关规定和国内外工程岩土分组经验等[9-10]进行取值，具体取值情况见表1；再利用地理信息系统平台，通过30 m分辨率的DEM完成空间分析，获得坡度值（见图3）；参考文献[13]设置 m 取值为0，t 取值为3 m；结合岩性物理参数根据公式2计算得到静力安全系数 F_s 分布情况（见图4），这里需要注意的是，得到 F_s 值会出现 <1 的情况（意味着在地震发生前便不稳定）。需将静态系数 $F_s<1$ 的区域设为1.01，以便后续工作开展。再根据公式1获得临界加速度 a_c，计算结果见图5所示。地震动数据PGA与PGV分布情况来源于USGS（https://earthquake.usgs.gov/），其数据分布情况见图6与图7。

表1 研究区岩性参数取值

土层	c /kPa	φ /（°）	γ /kN·m^{-3}
Ⅰ	40	50	28
Ⅱ	35	40	26
Ⅲ	30	35	24
Ⅳ	20	25	22
Ⅴ	15	20	20

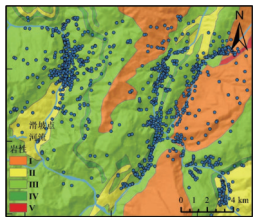


图2 研究区岩性分布图

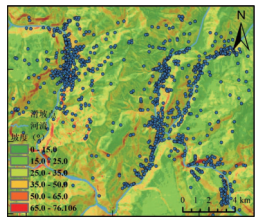


图3 研究区坡度分布图

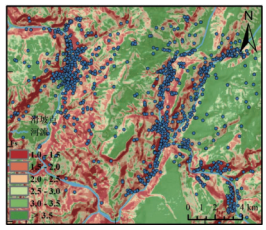


图4 研究区 F_s 分布图

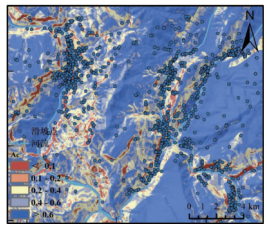


图5 研究区 a_c 分布图

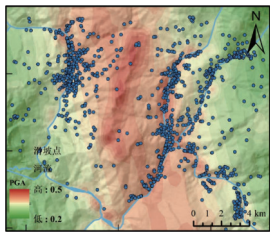


图6 研究区PGA分布图

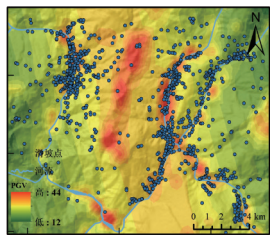


图7 研究区PGV分布图

2.2 不同Newmark位移模型计算结果分析

1）地震滑坡的危险性区划结果分析。选择最具代表性的3个Newmark（见3.1节），采用GIS栅格计算区域内地震滑坡Newmark累积位移分布，并根据位移值分类得到地震滑坡危险性分布图[11]。根据位移值情况，分为5个级别：高危险性、较高危险性、中等危险性、较低危险性以及低危险性。具体结果的各面积占比见表2，其中模型1的结果较为保守，整体处于较低危险，而模型2和3中的高危险区占比较多。

由图8~10可看出3个模型的极高危险区均分布在实际地震滑坡分布较密集的区域，这说明基本每个模型都能较为准确的评价地震滑坡的危险性。根据区划结果分析，显示出鲁甸地震诱发的滑坡主要集中分布在牛栏江河谷两岸以及鲁甸–昭通断裂带附近。这一分布特征揭示了陡峭的地形、河流的侵蚀作用以及断层的活动性是导致这些区域在地震影响下容易发生滑坡的关键因素，这点与前人研究结果一致[12-13]。

表2 危险性等级区划面积占比/%

危险等级	模型1	模型2	模型3
低危险	93.271	91.790	93.658
较低危险	4.299	2.417	1.810
中等危险	1.365	0.844	0.627
较高危险	0.422	0.658	0.515
高危险	0.643	4.291	3.390

2）区划结果定量分析（图11）。为了更好地对结果进行评估，采用ROC曲线（见图8d）进行结果的定量验证，其中模型1~3的AUC值分为0.617、0.686以及0.702。分析导致该结果的原因在于：鲁甸地震属于典型的近断层地震，滑坡也主要分布于20 km范围的近断层区域[14]。

模型1的结果相对保守，整体倾向于较低危险性，这可能是由于模型1在构建时采用了较为宽泛的地震动数据集（包含30次地震的2 270条记录），涵盖了不同地区、不同震级的地震事件，从而增强了模型的泛化能力，但也牺牲了针对特定区域或特定地震类型的精度。

模型2专注于震级为5.0~7.9，断层距小于100 km的地震动数据。这种数据选择策略显著提升了模型在近断层地震条件下的响应能力。在本次鲁甸地震危险区划中，模型2的高危险区占比较多，表明其更适用于此类特定地震环境，体现了模型的专业性和针对性优势。然而，这也意味着模型2可能对于远离断层或震级差异较大的地震区域预测效果有限，显示出其局限性。

模型3基于189条脉冲型地震动数据建立，这一特性在实际应用中得到了充分验证，表现为最佳的性能（AUC值为0.702）。这不仅说明了本次鲁甸地震确实具有显著的脉冲效应，也证明了模型3在捕捉此类地震特性方面的精准性。与此同时，模型3的优势同样伴随着局限性，即它可能对于非脉冲型地震或脉冲特征不明显的地震区域的预测效果欠佳。

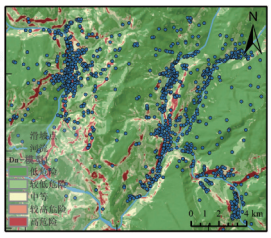


图8　地震滑坡危险性区划结果–模型1

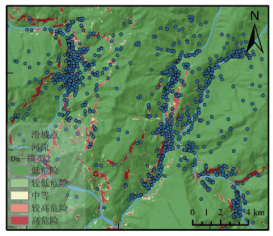


图9　地震滑坡危险性区划结果–模型2

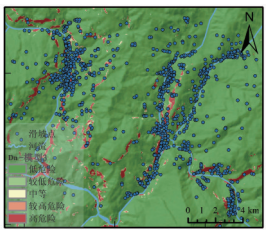


图10　地震滑坡危险性区划结果–模型3

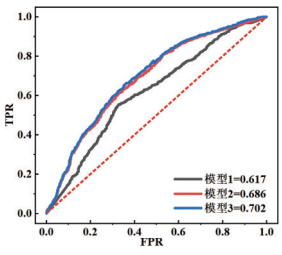


图11　区划结果ROC曲线及AUC值

3　结　语

本文通过采用Newmark法对鲁甸地震诱发的滑坡危险性进行了深入分析。Newmark法在滑坡危险性评价中显示出显著的优势，主要体现在其计算效率高，且无需大量的数据反演或复杂的训练过程。这使得该方法在资源有限或数据不完整的地区尤为适用，能够快速提供滑坡危险性的评估结果。同时，研究结果显示，模型3由于考虑了地震动中的脉冲效应，从而在预测本次鲁甸地震滑坡危险性方面展现出更高的预测精度。说明脉冲效应对斜坡稳定性的影响不容忽视，尤其是在强震作用下，这种效应可能导致更大的位移和更高的滑坡风险。基于以上研究发现，强调了在选择滑坡危险性评价模型时，必须考虑地震事件及受灾区的自身特点。同时，建议在未来类似地区的近断层地震滑坡危险性评价中优先采用考虑脉冲效应的模型。尽管3种经验模型的预测结果在整体上与实际滑坡分布相吻合，但仍存在较大的精度提升空间。未来的研究可以通过进一步优化模型参数、引入更精细的地质数据和提高计算精度，来增强模型的预测准确性。

参考文献

[1] Jibson R W, Harp E L, Michael J A. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3-4):271-289

[2] Jibson R W, Harp E L, Michael J A. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic landslide Hazard Maps: An Example from the Los Angeles, California, Area[J]. Open File Report, 1998:98-113

[3] Zeng Y, Zhang Y, Liu J. Assessment of Earthquake-induced landslide Hazard Zoning Using the Physics-environmental Coupled Model[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(9):2 644-2 668

[4] 许冲，徐锡伟，沈玲玲，等. 2014年鲁甸M_S6.5地震触发滑坡编录及其对一些地震参数的指示[J]. 地震地质，2014，36(4):1 186-1 203

[5] Newmark N M. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments[J]. Geotechnique, 1965, 15(10):139-160

[6] Jibson R W. Regression Models for Eestimating Coseismic Landslide Displacement[J]. Engineering Geology, 2007, 91(2):209-218

[7] Saygili G, Rathje E M. Empirical Predictive Models for Earthquake-induced Sliding Displacements of Slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers, 2008, 134(6):790-803

[8] 高广运，宋健. 近断层速度脉冲地震动引起的边坡永久位移预测模型[J]. 岩土力学，2014，35(5):1 340-1 347

[9] 赵海军，马凤山，李志清，等. 基于Newmark模型的概率地震滑坡危险性模型参数优化与应用:以鲁甸地震区为例[J]. 地球科学，2022，47(12):4 401-4 416

[10] Chen X, Shan X, Wang M, et al. Distribution Pattern of Coseismic Landslides Triggered by the 2017 Jiuzhaigou Ms 7.0 Earthquake of China:Control of Seismic Landslide Susceptibility[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 9(4):198-211

[11] 陈晓利，刘春国，传一健，等. 鲁甸地震的滑坡物质运移规律与地形特征[J]. 地震地质，2021，43(1):92-104

[12] 曾营，张迎宾，张钟远，等. 基于X-多层感知器耦合模型的滑坡易发性评价:以贵州省松桃自治县为例[J]. 山地学报，2023，41(2):280-294

[13] 罗相涛. 九寨沟漳扎地震区滑坡易发性对比分析[J]. 地理空间信息，2023，21(6):103-107

[14] 陈晓利，张凌，王明明. 基于地震滑坡敏感性分析的同震滑坡分布格局:以2014年M_S6.5鲁甸地震诱发滑坡为例[J]. 地震地质，2018，40(5):1 129-1 139