引文格式：兰明易,田乃满,刘世杰,等. 改进频率比法的怒江中游滑坡易发性评价[J]. 地理空间信息, 2025, 23(4):79-82. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.04.017

改进频率比法的怒江中游滑坡易发性评价

兰明易[1]，田乃满[2]，刘世杰[1*]，李郎平[2]，孙巍锋[1]
（1. 长安大学 地质工程与测绘学院，陕西 西安 710054；
2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室，北京 100101）

摘　要：受印度板块推挤的影响，青藏高原怒江流域的构造活动强烈、地质灾害高发。以怒江中游西藏段为研究对象，采用改进的频率比方法对区内的滑坡易发性进行评估，取得主要结论如下：①改进频率比法减少了传统方法预测结果中滑坡易发性指数的不连续性，评估滑坡易发性的效率、准确率更高；②怒江中游西藏段滑坡灾害的极高/高易发区集中分布于怒江干流及其主要支流沿线河流深切区，尤其是怒江流入八宿以南的高山峡谷区；③部分极高/高易发区为人工不透水面、道路的穿越区，受工程建设的扰动作用，滑坡、落石、泥石流等灾害的易发性会显著增加。怒江中游区域尺度的滑坡易发性评估对于这一区域的滑坡风险评估与防范具有重要意义。

关键词：青藏高原；怒江中游；滑坡；易发性评价；改进频率比法
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）04-0079-04

Landslide Susceptibility Evaluation in the Middle Reaches of the Nu River Based on Improved Frequency Ratio Method

LAN Mingyi[1], TIAN Naiman[2], LIU Shijie[1], LI Langping[2], SUN Weifeng[1]
(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Due to the collision of the Indian plate with the Eurasian Plate, the Nu River basin is characterized by intense tectonic activities and frequent geological hazards. Taking the middle reaches of the Nu River as the research area, we used an improved frequency ratio method (IFRM) to evaluate the susceptibility of landslides. The main conclusions show that ① IFRM reduces the discontinuity of landslide susceptibility index compared with traditional methods, and makes the evaluation of landslide susceptibility more efficient and accurate. ②The extremely high/high susceptible zones of landslides are concentrated in the deep-cut areas of main stream and major tributaries of the Nu River, especially in the high mountain gorge areas, south of Basu. ③Some of the extremely high/high susceptible zones are located in artificial impermeable surfaces and roads. The frequency of landslides increases significantly with the disturbances by engineering constructions. The susceptibility evaluation of landslides at a regional scale in the middle reaches of the Nu River is of great importance for landslide risk management.

Key words: Tibetan Plateau, the Nu River basin, landslide, susceptibility evaluation, IFRM

滑坡是岩石、泥土或碎石等沿着斜坡向下的运动[1]。我国约 80%的大型滑坡发生在青藏高原东缘，即我国第一阶梯向第二阶梯的过渡带内[2]。怒江流域地处青藏高原东南缘，穿越我国西藏、云南，是青藏高原东南缘典型的滑坡高发区。由于特大滑坡、泥石流灾害高发，怒江云南段的滑坡灾害易发性特征近年来得到了一定关注[3]。但怒江西藏段具有更活跃的内外动力作用、更复杂的地质地貌条件、更发育的地质灾害风险，急需开展滑坡易发性评价工作。

滑坡易发性是对某一地区发生滑坡的可能性或者概率进行评估，按照驱动方法可将其可以分为 3 种，即定性的知识驱动方法、定量的数据驱动方法和定量的物理驱动方法[4]。数据驱动方法具有显著的优势，已经成为区域尺度滑坡易发性评估的常用方法[5]。

频率比法（frequency ratio，FR）是应用广泛的数据驱动方法之一，其原理是基于数据统计分析，利用已知的滑坡分布与影响因子之间的频率比值来表示滑坡空间分布与影响因子的相关程度，频率比越大表明该滑坡影响引子诱发滑坡的可能性越大。其优势在于原理简单明了，在 GIS 环境中易于实现，可以分析各因素对滑坡的影响特征。但是，传统频率比法需要对滑坡影响因素进行人工分类或分级，具有主观性的同时

项目来源：国家自然科学基金重大专项项目（42041006）。
第一作者简介：兰明易（1995—），硕士研究生，研究方向为地理信息技术与地质灾害风险评价，E-mail：lanmingyi@simtop.art。
通信作者：刘世杰（1995—），博士，讲师，研究方向为高山峡谷区地质灾害评价与防治，E-mail：lsj0502@hotmail.com。

导致了频率比数值分布的不连续[6-7]。

鉴于此，相关专家提出了改进频率比法。该方法的原理是针对整个评价区域，采用预设大小的统计窗口，对每一个滑坡影响因子进行连续的频率统计，得到各个滑坡影响引子的频率值分布。改进频率比法可以更有效地区分滑坡影响因子的不同值，并且减少了对影响因子进行人工分类的主观性[8]。

本文在分析怒江西藏段的滑坡发育背景的基础上，综合利用历史地质灾害数据，采用改进频率比方法对怒江西藏段的滑坡易发性进行评价，研究成果对这一区域的重大工程建设和人居安全具有重要意义。

1 研究区概况

怒江发源于青藏高原唐古拉山南麓，向东南流经洛隆县嘉玉桥后称为怒江，与金沙江和澜沧江流向大致平行（图1）。怒江在中国部分长2 013 km，分为上、中、下游三段，上游自怒江源头至那曲市比如县，中游自比如县至察隅县，下游自察隅县至边境。怒江穿越的班公湖–怒江缝合带为一级深大断裂带，由韧性剪切带、逆冲断裂带以及多个断陷盆地组成。该地区特殊的大地构造演化过程导致构造活动强烈、地质灾害频发，严重威胁着该地区的工程建设和人居安全。

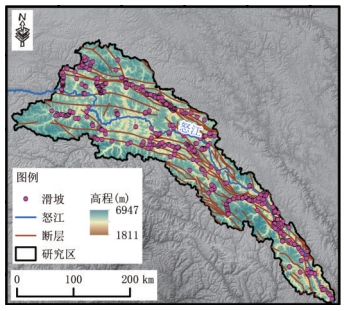


图1 怒江中游地区概况图

审图号：GS(2016)2556号

2 研究方法

2.1 传统频率比方法

传统频率比方法的原理是分析滑坡和影响因子类别的相关性，可通过下式计算影响因子的频率比：

$$F_iR=\frac{F_i\text{中}L\text{的频率}}{\text{研究区中}L\text{的总频率}}=\frac{P(L|F_i)}{P(L)} \quad (1)$$

式中，F 为影响因子；L 为滑坡；P 为条件概率。

研究区滑坡 L 的易发性指数LSI，可用下式求得：

$$\mathrm{LSI}=F_i^1R+F_i^2R+\ldots+F_i^nR \quad (2)$$

2.2 采用改进频率比法

传统频率比方法需要对滑坡影响因子 F_i 进行分类或分级，导致了频率比不连续。因此，本研究采用改进频率比方法怒江中游的滑坡易发性进行评价[9-10]。其流程如图2所示。

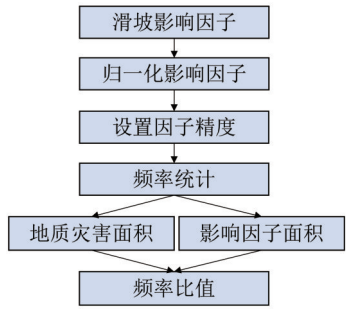


图2 改进频率比法的分析流程图

首先对每一个滑坡影响因子进行归一化处理，将其线性映射到[0,1]内；随后设置因子计算精度以提高计算速度，进而统计在规定窗口内的滑坡面积/数量以及每一个影响因子的面积/数量，逐一计算影响因子值的频率比值；最后，将各个影响因子的计算结果求和，从而得到怒江中游的LSI。

3 滑坡易发性影响因子分析

参考前人研究[11-12]，本文结合研究区特征以及数据可获取情况选取了14个影响因子开展滑坡易发性因子的分析。影响因子按照其类型可分为：①地形因子，包括高程、坡度、坡向、地形曲率、平面曲率、剖面曲率、地形起伏度；②地质因子，包括归一化植被指数（NDVI），工程地质岩组类型，到断层距离，到河流水系距离，降雨量；③人工扰动因子，包括到道路距离、到人工不透水面距离。

高程会影响降雨、降雪、人类活动、植被的空间分布，从而影响滑坡的发生。图3a、4a分别为怒江中游区内高程的空间分布及频率比。总体上，滑坡的敏感性随高程的增大先增加后减小，高程值在2 290~4 320 m之间的频率比值大于1，表明其有利于滑坡的发生。

坡度为滑坡的启动提供了有利条件。图3b、4b分别为怒江中游区内坡度的空间分布及频率比。基于30 m分辨率DEM数据计算的坡度显示，坡度值在0°~20°之间的绝大部分频率比值大于1。

坡向会影响太阳照射、降雨冲刷等引起的坡面侵蚀。图3c、4c分别为怒江中游区内坡向的空间分布及频率比。滑坡的敏感性随坡向的增大先增加后减小，坡向在55°~73°和123°~260°之间的频率比值大于1。

地形曲率、平面曲率、剖面曲率会对水流和滑坡物质的集散造成影响。图3d、4d分别为怒江中游区内地形曲率的空间分布及频率比。地形曲率过高和过低都不利于滑坡的发生。图3e、4e分别为怒江中游区内剖面曲率的空间分布及频率比。剖面曲率值在–1.42 ~

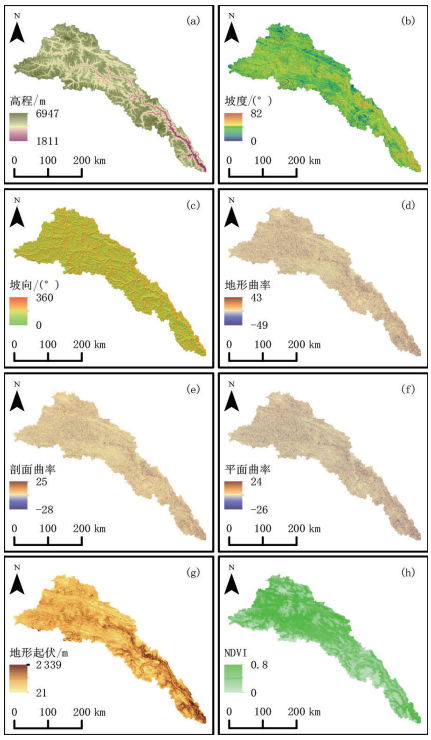


图3　怒江中游滑坡易发性影响因子空间分析（一）

2.55之间的频率比值基本都大于1。图3f、4f分别为怒江中游区内平面曲率的空间分布及频率比。平面曲率值在–2.13~2.07之间的频率比值基本都大于1。

地形起伏（高差）相比坡度在更大范围上反映了地形的崎岖程度。基于30 m分辨率DEM数据，本文以50×50的窗口计算了地形起伏度数据，（图3g、4g）。滑坡的敏感性随地形起伏的增大先增加后减小，地形起伏在100~490 m之间的频率比值大于1。

植被对滑坡的影响较为复杂，植被会阻挡降雨对坡面的冲刷从而缓解滑坡的发生，然而浅层的植被根系会增加土体重量，从而促进滑坡的发生。为了反映研究区植被覆盖的综合情况，对多年（1998—2018年）的NDVI数据进行了统计（图3h、4h）。NDVI的频率比在0.3附近存在波峰，波峰后先下降后上升。

岩土体是滑坡产生的物质基础，本研究将研究区的地质岩性划分为13个工程地质岩组：①厚层砂岩；②中厚层状砂砾岩；③中厚层砂泥岩；④薄中层砂泥岩；⑤薄层泥页岩；⑥中厚层灰岩；⑦薄中层灰岩；⑧中厚层灰岩；⑨较中厚层板岩；⑩中厚层千枚岩；⑪块状玄武岩；⑫块状花岗岩；⑬堆积体。岩组②③⑤⑥⑪⑬的频率比值超过了1。

降雨是重要的滑坡触发因素。为了反映研究区降雨的总体特征，本研究对1980—2015年年度降雨量数据进行统计。5a、6a分别为怒江中游区岩组的空间分布及频率比。滑坡的敏感性随着降水量的增加呈先增

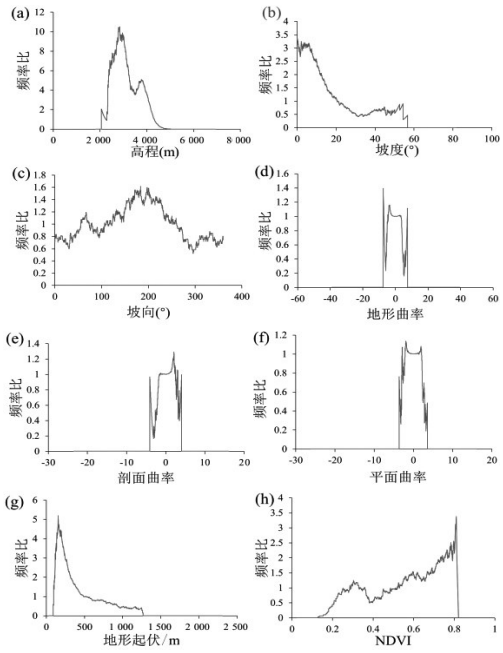


图4　怒江中游滑坡易发性影响因子频率比（一）

加后减小的变化趋势，图5b、6b分别为怒江中游区内降雨的空间分布及频率比，并在500 mm附近达到峰值。

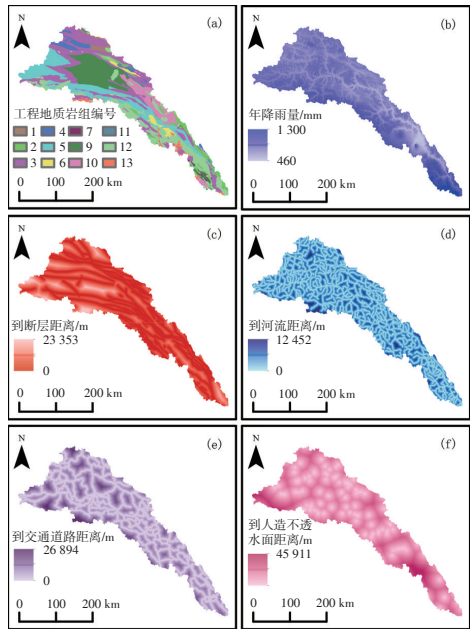


图5　怒江中游滑坡易发性影响因子空间分析（二）

断层邻区是地震活跃区域，地震活动是滑坡的重要诱发因素。本研究使用1∶250万比例尺断层分布数据，图5c、6c分别为怒江中游区断层距离的空间分布及频率比。滑坡敏感性随着到断层距离的增加先降低后上升再降低的趋势，高频率比值分布在0~3 000 m和12 000 ~16 000 m。

河流对边坡的冲刷和侵蚀是重要的滑坡诱发因素。图5d、6d分别为怒江中游区内到河流水系距离的空间分布及频率比。滑坡敏感性随着到河流距离的增加逐渐降低，大于1的区间为0~880 m。

道路和人工不透水面是工程建设活跃区，频繁的工程扰动容易造成边坡失稳导致滑坡。研究区内到道路距离和频率比分布情况如图5e和图6e所示。滑坡敏感性随着到道路距离的增加逐渐降低，*FR*大于1的区间为0~1 500 m。研究区内到人工不透水面距离和频率比分布情况分别如图5f和图6f所示。滑坡敏感性随着到人工不透水面距离的增加逐渐降低，大于1的区间为0~6 900 m。

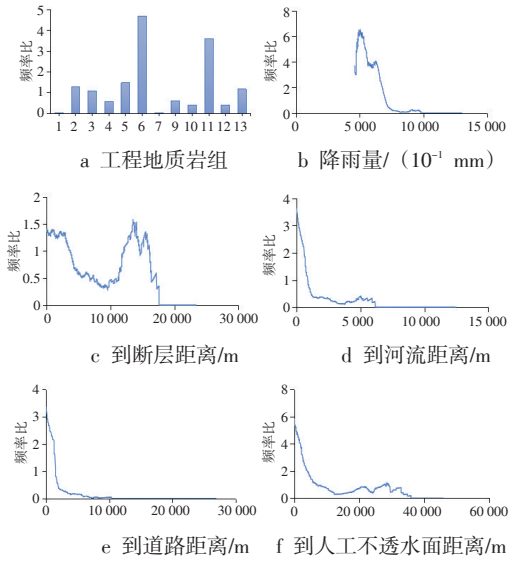


图6 怒江中游滑坡易发性影响因子频率比（二）

4 滑坡易发性结果分析

4.1 分析结果检验

ROC（receiver operating characteristic）是验证灾害易发性评价结果的重要指标。AUC（area under curve）是ROC曲线下的面积，取值区间为[0, 1]，值越大分类则模型的正确率越高。0.5 < AUC < 1表明预测模型优于随机预测。

为了对比传统频率比和改进频率比模型，本研究基于传统频率比模型，使用相同的滑坡易发性影响因子，分析了研究区的滑坡易发性。将滑坡点数据按照7∶3的比例划分为训练集和测试集，训练集用于训练模型，测试集用于判断预测结果的准确率。测试集和训练集的ROC曲线和AUC值如图7所示。改进频率比模型训练集和测试集AUC值分别是0.94和0.92，表示模型获得了优秀的滑坡易发性分析结果。改进频率比模型测试集和训练集的AUC值高于传统频率比模型，证明了改进频率比模型优于传统频率比模型。

4.2 滑坡易发性分析结果

本研究使用自然断点法将获得的滑坡易发性数据划分为4个类别，分别为低易发性、中易发性、高易发性、极高易发性4个区域（表2）。

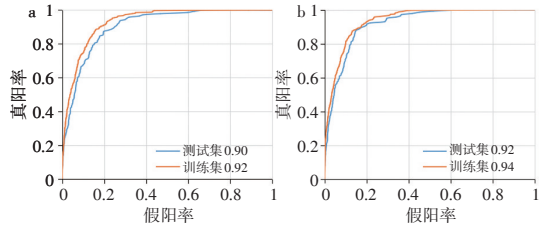


图7 测试集和训练集ROC曲线与AUC值比较

表2 怒江中游滑坡灾害易发性分区面积及比例

易发性分区	面积/km²	占比/%
极高易发性	3 199.11	6.5
高易发性	8 058.66	16.4
中等易发性	16 045.93	32.7
低易发性	21 824.13	44.4
合计	49 127.83	100

其中，极高易发区集中分布于怒江干流及其主要支流沿线的河流陡切峡谷区，沿水系干道呈条网状分布。强烈的地质构造作用造成地形切割强烈、坡陡谷深的地貌格局，同时长期的流水作用使两岸遭受侵蚀和冲刷，为地质灾害的发生创造了有利的条件；高易发区集中分布于怒江主要支流沿线两侧区域，呈现出明显的网状分布。部分高易发区为水系、道路的穿越区，具有较大的威胁性；中易发区集中分布于怒江次级支流河道区及部分冲沟区，地形变化相对和缓，高差较小，地质灾害威胁较小；低易发区集中分布于区内起伏程度较小、且远离水系干道的高原夷平面区域，海拔较高，地势相对较为平坦，灾害发生的可能性较小。

5 结 语

本文以怒江中游西藏段的地质灾害为研究对象，采用改进的频率比方法，结合研究区特征及历史地质灾害数据，对怒江中游地质灾害易发性进行预测评估。结果表明，怒江中游滑坡灾害的极高/高易发区主要集中在怒江干流及其主要支流沿线的河流陡切峡谷区，尤其是八宿以南的高山峡谷区，沿水系呈条网状分布。怒江西藏段受滑坡显著威胁的区段主要位于深大断裂活动和水系侵蚀切割作用形成的高山峡谷区内。此外，部分极高/高易发区为人工不透水面、道路穿越区，工程建设会改变边坡原有应力状态，易诱发新生滑坡灾害或使原有灾害复活，增加灾害发生频率还威胁到人类活动区的安全，需重点监测。

参考文献

[1] Cruden D. A Simple Definition of a Landslide[J]. Bull Eng Geol Environ,1991,43(1):27-29

[2] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩

（下转第104页）