

基于失稳概率的单体滑坡灾害风险定量评价及其工程应用

刘东升, 吴越, 李珂, 王艳磊

Quantitative risk assessment and its application for individual landslide disaster based on slope failure probability

LIU Dongsheng, WU Yue, LI Ke, and WANG Yanlei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202212012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104-110

渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价

Risk assessment of high-level collapse and landslide disasters in typical basin-edge mountainous areas in northeast Chongqing: A case study of the Ningqiao area in Wuxi

谭真艳, 罗晓龙, 陈怡, 周灏 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 70-78

基于机器学习的区域滑坡危险性评价方法综述

A review of the methods of regional landslide hazard assessment based on machine learning

方然可, 刘艳辉, 黄志全 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 1-8

基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用

Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation

刘福臻, 王灵, 肖东升 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 98-106

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202212012

刘东升, 吴越, 李珂, 等. 基于失稳概率的单体滑坡灾害风险定量评价及其工程应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 67-74.

LIU Dongsheng, WU Yue, LI Ke, et al. Quantitative risk assessment and its application for individual landslide disaster based on slope failure probability[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 67-74.

基于失稳概率的单体滑坡灾害风险定量评价 及其工程应用

刘东升¹, 吴越², 李珂¹, 王艳磊^{1,3}

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401121; 2. 重庆科技大学建筑工程学院, 重庆 401331;
3. 重庆大学煤矿灾害动态与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 对潜在滑坡灾害实施风险评价至关重要, 但在实际工程中单体滑坡灾害风险评价仍然以定性评价方法为主, 由危险性和损失通过风险矩阵得到定性风险等级, 存在风险标准多重性和不连续性的问题, 不利于在实际工程中对风险大小进行比较并实施分类处置, 还可能导致风险评价结果出现误差, 误导风险处置。为此, 运用概率模型定量描述滑坡灾害的稳定性, 同时考虑承灾体的损失大小, 得到单体滑坡灾害风险定量评价指标, 提出了滑坡灾害风险曲面及风险等值线的概念, 并开发相应的评估计算软件, 形成了滑坡灾害风险定量评价方法, 消除了传统滑坡风险矩阵带来的风险标准多重性和不连续性, 提高了评估的准确性。通过对重庆市奉节县 6 个单体滑坡进行风险定量评价, 验证了所提方法的正确性和可靠性, 为滑坡灾害风险评价提供了新的途径。

关键词: 滑坡灾害; 定量风险评价; 概率模型; 工程应用

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)04-0067-08

Quantitative risk assessment and its application for individual landslide disaster based on slope failure probability

LIU Dongsheng¹, WU Yue², LI Ke¹, WANG Yanlei^{1,3}

(1. Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Effective risk assessment of potential landslide disasters is crucial for informed decision-making in engineering projects. In practical engineering, the risk assessment of individual landslide disasters still relies mainly on qualitative evaluation methods. The qualitative risk level is obtained through the risk matrix based on danger and loss, which poses problems of multiple and discontinuous risk standards. This makes it difficult to compare and classify risks in actual engineering, and may also lead to errors in risk assessment results, misleading risk management. To address these issues, a probability model is employed to quantitatively describe the stability of landslide disasters, considering the size of losses to the

收稿日期: 2022-12-23; 修订日期: 2023-05-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0228)

第一作者: 刘东升(1962—), 男, 贵州遵义人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害风险评估研究。E-mail: 575669376@qq.com

通讯作者: 吴越(1981—), 男, 贵州黔西人, 博士, 高工, 主要从事地质灾害风险评估研究。E-mail: wuyue@cqust.edu.cn

element at risk. A quantified risk index for individual landslide disasters is obtained, introducing the concept of landslide disaster risk surface and risk contour. Corresponding evaluation and calculation software are developed to form a quantified risk assessment method for landslide disasters, eliminating the multiplicity and discontinuity of risk standards brought about by traditional landslide risk matrices. The accuracy of the evaluation is improved. By conducting quantitative risk assessment on six individual landslides in Fengjie County, Chongqing, the correctness and reliability of the quantitative risk assessment method were verified, providing a new approach for landslide disaster risk assessment.

Keywords: landslide disaster; quantitative risk assessment method; probability model; project application

0 引言

我国西南部山高坡陡,江河众多,地质构造复杂,是地质灾害多发地区,地质灾害防治任务十分艰巨。据统计已查明的潜在地质灾害隐患中 80% 以上为滑坡,因此,滑坡灾害已成为最严重的地质环境问题之一^[1-3]。数量巨大的潜在地质灾害隐患与有限的地质灾害防治人力物力之间出现了较大的差异,由此对地质灾害风险的精准评价和有效防治提出了更高的要求。如何准确地评估潜在滑坡灾害点的严重程度,如何准确判别不同滑坡灾害体的风险高低,并在此基础上有针对性地实施相应的风险处置措施已经成为地灾防治相关部门高度重视的关键问题^[4-6]。

目前滑坡风险评价处于定性和半定量阶段,从工程应用的结果看,通常存在同一个风险等级中有多个滑坡点导致无法进行排序比较的问题,另外风险等级存在边缘突变的不合理现象,例如在低风险和高风险的边缘处一两个受威胁人员的增加或减少就会导致风险等级的变化,而在非边缘处几十个人的变化也不会产生等级的差异,这明显是不合理的。针对这些问题,提出了定量风险评价的概念和方法,运用概率模型定量描述滑坡灾害的稳定性,同时考虑承灾体的损失大小,得到单体滑坡灾害定量评价风险指标,提出了滑坡灾害风险曲面及风险等值线的概念,并开发相应的评估计算软件,形成了滑坡灾害定量风险评价方法,消除了传统滑坡风险矩阵带来的风险标准多重性和不连续性,提高了评估的准确性。为滑坡灾害风险评价提供了新的途径。

1 滑坡灾害风险评价的传统方法

1.1 滑坡灾害的定性风险评价

根据滑坡现场地质调查收集的资料,结合专家和地质工程师的工程经验,对滑坡的稳定状态进行描述,并定性给出了相应的稳定性等级。滑坡稳定状态特征的定性描述一般包括以下几个方面^[7-12]: (1)滑坡场地的区域地质背景; (2)滑坡的主导和诱发因素; (3)滑坡

的阶段和发展趋势及可能的破坏模式。根据相关规范^[13-14],可以对滑坡进行定性稳定性评价,并建立相应的稳定性高、中、低等级划分。类似地,潜在滑坡可能造成的损失统计通常包括以下三个方面: (1)威胁人身安全; (2)经济损失; (3)受滑坡威胁的对象的重要性(社会和经济方面)。基于以上三个方面的损失统计结果,可初步估计潜在滑坡造成的损失,并按大、中、小划分相应的损失等级。

基于风险评价的定义,结合滑坡的稳定状态和可能的损失等级,可形成一个可用于初步判断滑坡灾害风险水平的定性风险矩阵(图 1)。

滑坡稳定性	滑坡引起损失程度		
	大	中	小
低 (不稳定)	高	高	中
中 (欠稳定)	高	中	低
高 (稳定)	中	低	低

图 1 基于滑坡定性风险评价的风险矩阵

Fig. 1 Risk matrix based on qualitative landslide risk assessment

滑坡定性风险评价的优势在于,它是基于现场地质调查的结果,不需要测量、绘图、钻探和测试等实物工作量。它相对简单、快捷,易于在实际工程中应用。但由于缺乏详细的技术工作基础,风险影响因子的确定具有一定的主观性,相应的风险等级划分和风险水平评价结果也相对粗糙。定性风险评价适用于对大量潜在滑坡的初步筛选和比较^[15],从而初选出相对的高风险滑坡体作为研判对象,实施进一步研究或评价。

1.2 滑坡灾害的半定量风险评价

为了进一步提高滑坡定性风险评价结果的准确性,可在定性风险评价中引入稳定系数,由此使得相应的风险矩阵比定性风险评价结果更为准确。

基于稳定系数的定义,滑坡稳定性分类参照《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016),分类标准见

表 1, 如表 2 所示保护对象的价值或潜在滑坡可能造成的损失可分为 3 个等级。

表 1 滑坡稳定状态分类^[14]
Table 1 Classification of landslide stability states^[14]

稳定系数(F_s)	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$1.15 \leq F_s$
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

表 2 保护对象的等级^[14]
Table 2 Classification of protection object levels^[14]

保护等级	I	II	III
EL/(万元)	$EL \geq 5\,000$	$5\,000 > EL \geq 500$	$EL < 500$
TP	$TP \geq 500$	$500 > TP \geq 100$	$TP < 100$
PI	非常重要	重要	一般

EL—经济损失; TP—受威胁者; PI—公共基础设施;
只要满足一个条件即可以定义为相应的保护等级

根据上述两个表, 可以得到滑坡灾害的半定量的风险矩阵(图 2), 并由此来判断滑坡灾害的风险水平。

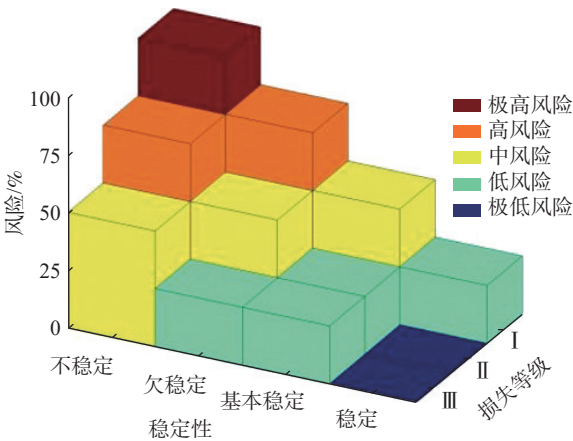


图 2 半定量风险水平与控制因素关系图

Fig. 2 Spatial relationship diagram between semi-empirical risk levels and controlling factors

图 2 表明, 半定量风险评价给出了具体的判断标准和划分依据, 趋势正确, 判别方便, 适用性强。然而, 由

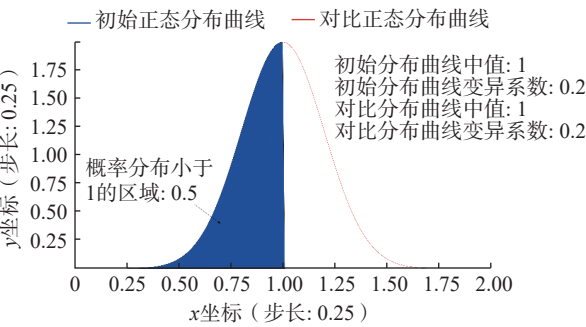


图 3 F_s 的 PDF(均值=1, $n=0.2$)

Fig. 3 PDF of F_s (mean=1, $n=0.2$)

于风险区间划分的不连续性, 在应用过程中仍存在一些缺陷, 从而导致风险判断结果出现一些不合理现象, 需要进一步改进和完善。

以滑坡的受威胁人员数量(TP)为例, 参照图 2 所给出的风险矩阵, 如果滑坡的稳定状态保持不变, 即 F_s 为常数($F_s=1.04$), 则受威胁人员数量 TP 的变化会导致滑坡的风险水平发生以下变化(表 3)。

表 3 受威胁人员数量引起的风险水平的变化
Table 3 Variations in risk levels caused by the number of endangered individuals

稳定系数: $F_s=1.04$		稳定状态: 欠稳定
TP: 99	等级: III	风险水平: 低
TP: 101	等级: II	风险水平: 中等
TP: 499	等级: II	风险水平: 中等
TP: 501	等级: I	风险水平: 高

表 3 显示, 即使 F_s 保持不变, TP 只需增加 2 人(从 99 人增加到 101 人或从 499 人增加到 501 人)即可改变风险水平(从低风险到中风险或从中风险到高风险); 相反, 即便在同样的稳定状态下, TP 增加 398 人(从 101 人增加到 499 人)却始终保持着相同的风险水平(中风险), 这显然不是一个合理的结论。

同样, 以经济损失(EL)为例, 即使滑坡保持在相同稳定状态($F_s=1.04$), EL 的变化可能会对滑坡的风险水平产生以下变化(表 4)。

表 4 经济损失引起的风险水平的变化
Table 4 Variations in risk levels caused by the number of endangered individuals

稳定系数: $F_s=1.04$		稳定状态: 欠稳定
EL(万元): 490	等级: III	风险水平: 低
EL(万元): 510	等级: II	风险水平: 中等
EL(万元): 4 990	等级: II	风险水平: 中等
EL(万元): 5 010	等级: I	风险水平: 高

表 4 显示, 即使 F_s 保持不变, EL 增加仅仅 20 万元(从 490 万增加到 510 万或从 4 990 万增加到 5 010 万)就会改变滑坡灾害的风险水平(从低风险到中风险或从中风险到高风险); 但在相同的稳定状态下, EL 增加 4 480 万(从 510 万到 4 990 万)却不会改变滑坡灾害的风险水平(保持中风险); 这也是一个不合理的结论。

同样, 对稳定系数也可做相同的分析。当 F_s 增加 0.01(从 1.04 到 1.05)时, 稳定状态将从欠稳定变为基本稳定, 而稳定系数增加 0.1(从 1.05 到 1.15), 稳定状态却保持不变。

究其原因, 主要是因为滑坡的稳定状态和保护对象

价值的分类都是基于区间划分的,因此风险矩阵中存在区域内部风险的不变性和区域边缘风险的突变性,由此划分的风险等级也产生相应的不变性和突变性。解决这一问题的方法是对系统的稳定状态和保护对象进行连续描述,即用连续的分布曲线代替离散的区间划分,从而实现对风险评价的综合全定量分析。

2 定量评价滑坡风险评价

滑坡的稳定状态和潜在损失进行定量分析是准确评价滑坡风险的必然趋势。定量评价中应充分考虑滑坡风险指标影响因素的变异性,建立其与滑坡稳定系数之间的联系。因此,相比半定性的稳定性评价方法,引入失稳概率来描述滑坡的稳定状态更合理。

根据滑坡稳定系数的定义, F_s 可表示为

$$F_s = N/T \quad (1)$$

式中: N ——抗滑力;

T ——滑动力。

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

如将岩土材料的相关强度参数视为正态分布的随机变量,则相应的 F_s 也可视为随机变量。假设 F_s 是一个随机变量,且服从正态分布,则 F_s 的概率密度函数 PDF(Probability density function) 可以表示为^[16-19]:

$$P(0 < x \leq 1) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^1 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx \quad (3)$$

其中, $x=F_s$, $\mu=M_{F_s}$, $\sigma=\Delta_{F_s}=n \cdot M_{F_s}$, M_{F_s} 是 F_s 的均值, Δ_{F_s} 是 F_s 的标准差, n 是 F_s 的变异系数,是 F_s 的标准差与均值的比值,变异系数的大小反映了随机变量(F_s)的离散程度。滑坡失稳概率 P 与 F_s 的均值和变异系数 n 相关。

$F_s=1.0$, $n=0.2$ 情况下式(3)求得的滑坡失稳概率如图 3 所示,失稳概率 50%。

为了进一步研究 F_s 和 n 对滑坡失稳概率的影响规律,本文对不同 F_s (步长 0.05)和 n (步长 0.1)条件下的失稳概率进行了多工况计算分析,得到滑坡失稳概率 P 的部分计算结果如图 4 所示。图 4 中,图 4(a)—(c)为稳定系数相同且小于 1($F_s=0.95$),变异系数不同($n=0.1, 0.2, 0.3$)时滑坡失稳概率的变化情况;图 4(d)—(f)为稳定系数相同且大于 1($F_s=1.20$),变异系数不同($n=0.1, 0.2, 0.3$)时的滑坡失稳概率。

对稳定系数均值的变化也可做类似分析,对结算结

果进行统计(表 5—7)。

通过统计分析可知, P 随 F_s 均值和 n 的变化趋势如图 5 所示。

从图 5 所反映 P 与 F_s 均值和 n 的相关规律可知:在均值大于 1.0 的区间范围内, P 随 n 呈递增趋势;在均值小于 1.0 的区间范围内, P 随 n 呈递减趋势。基于上述 P 的计算方法,并考虑潜在滑坡损失(C)的统计结果,可以将滑坡的风险指数(R)表示如下^[20]:

$$R = P \cdot C \quad (4)$$

依据式(4),建立了全定量风险评价概率评价模型,技术流程路线图如图 6 所示。

根据全定量风险评价概率模型与技术流程路线图,得到了相应的全定量的 R 及其随 P 和 C 变化的三维分布曲面图,(图 7)和滑坡灾害风险等值线图(图 8),并开发了全定量风险评价软件。

3 滑坡评估的工程应用

为了验证全定量风险评价概率模型的准确性与可靠性,本文选取了重庆市奉节县 6 个不同规模滑坡的地质勘查资料,利用全定量风险评价软件进行了定量风险评价,得到了 6 份定量评价地灾风险评价报告,得到了针对受威胁人数(TP)以及经济损失(EL)的定量评价风险指标,并根据风险大小分类进行了排序,计算结果如表 8、表 9 所示。其中稳定系数是规范中常用的评估方法,风险等级是目前风险评价中采用的半定量评估方法,与定量风险评价结果进行了比较:

(1)根据定量评价风险指数可见,单体滑坡的风险高低不仅仅与稳定系数有关,还与受威胁人数多少或潜在经济损失大小有关。而传统评估方法的稳定系数最低的滑坡(火石梁滑坡)风险不一定最大,单体滑坡灾害的风险指数会因为滑坡稳定状态的不同、 TP 与 EL 的差异而不同,滑坡风险度是一个综合评价指标,而定量评价滑坡风险评价方法则可以给出这一指标的量化评估值,该指标可以作为滑坡灾害综合风险评价、对比分析和处置需求的重要依据,从而解决滑坡灾害风险评价中的不确定性问题,而传统的稳定系数只反映了稳定状态,而没有考虑可能的损失。

(2)采用半定量风险评价得到结果是风险等级,可见同一个风险等级中会有多个单体滑坡,就不能比较同一风险等级的单体滑坡的风险大小,而定量评价风险指标可以实现所有单体滑坡灾害风险的排序,同时从表 8 和表 9 的结果来看,定量评价指标的结果与半定量的结

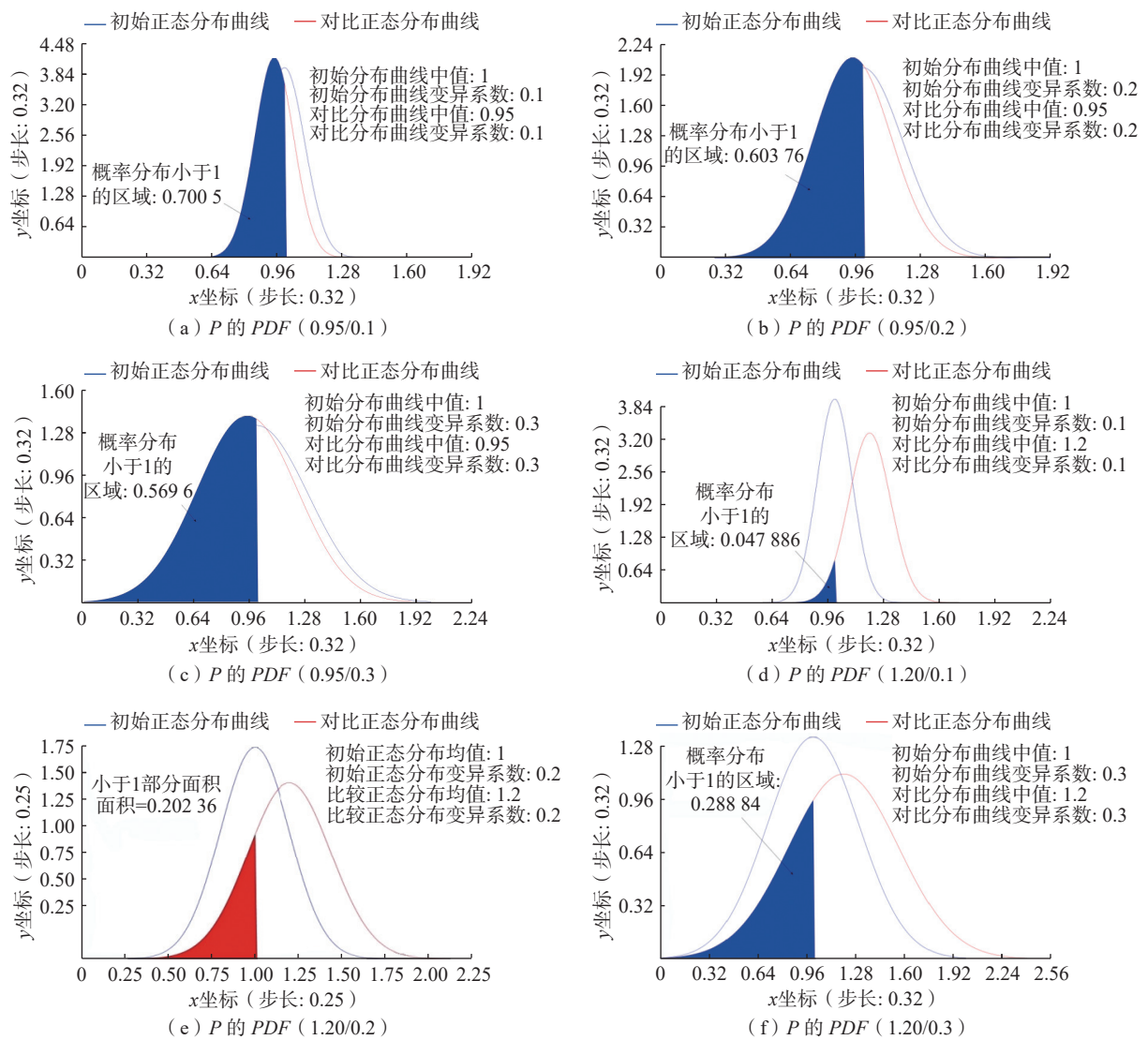


图 4 不同稳定系数(F_s)均值和变异系数(n)情况下的滑坡失稳概率图

Fig. 4 Probability of landslide instability under various mean stability coefficient (F_s) and variation coefficient (n)

表 5 失稳概率随稳定系数的变化范围($n=0.2$)

Table 5 Variation range of failure probability with stability factor F_s ($n=0.2$)				
F_s	0.95	1.00	1.05	1.15
$P/\%$	60.38	50.00	40.59	25.71

表 6 失稳概率随变异系数的变化范围($F_s=0.95$)

Table 6 Variation range of failure probability with coefficient of variation n ($F_s=0.95$)			
n	0.10	0.20	0.30
$P/\%$	70.05	60.38	56.92

果是一致的,并没有出现矛盾,验证了定量评价指标的正确性,定量评价指标克服了半定量方法不能比较同一风险等级内的风险大小的缺点。

表 7 失稳概率随变异系数的变化范围($F_s=1.20$)

Table 7 Variation range of failure probability with coefficient of variation n ($F_s=1.20$)			
n	0.10	0.20	0.30
$P/\%$	4.78	20.24	28.88

4 结语

文章在滑坡失稳概率分析基础上,提出了滑坡定量风险评价方法,得到了滑坡定量风险评价模型,形成了定量风险评价判别技术路线。开发了相应的滑坡定量风险评价软件,得到了滑坡灾害量化风险指标变化曲面和风险等值线图。运用量化风险评价软件对重庆市奉节县 6 个单体滑坡进行了全定量风险评价,得到了相应的量化风险指标并与传统的稳定性评估方法和半定量

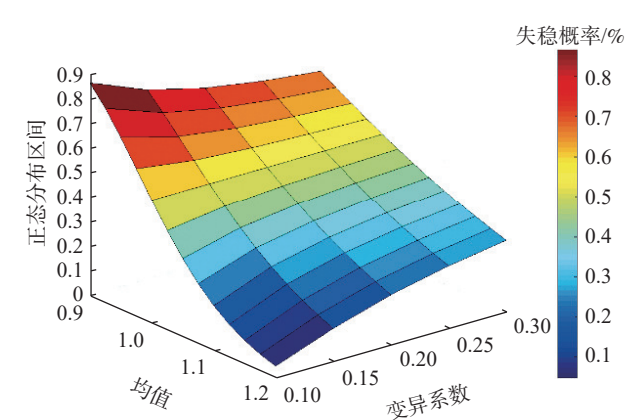


图 5 失稳概率随稳定系数均值和变异系数变化的趋势面

Fig. 5 Trend surface of probability of instability with changes in the mean of F_s and n

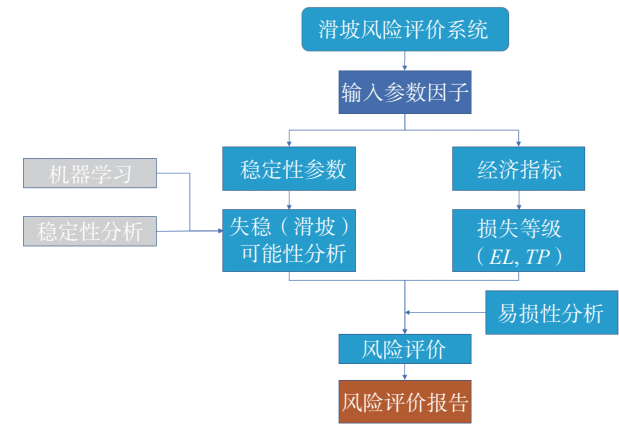


图 6 滑坡风险量化评价流程图

Fig. 6 Flowchart of quantitative risk assessment for landslide

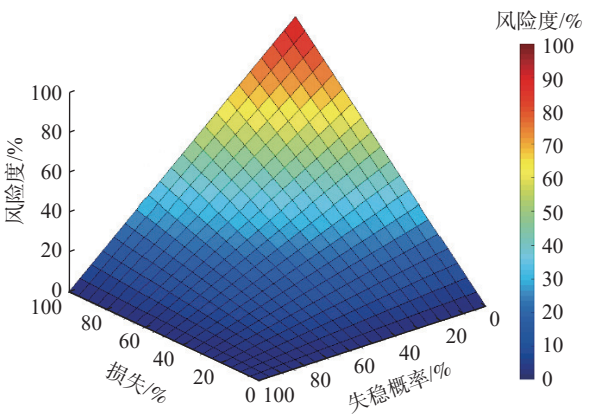


图 7 风险指数的分布

Fig. 7 Spatial distribution of risk index

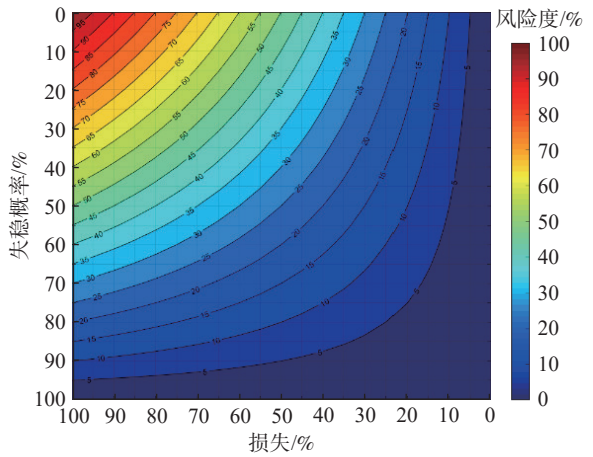


图 8 风险指数等值线图

Fig. 8 Contour map of risk index

表 8 重庆市奉节县 6 个滑坡的 TP 风险水平

Table 8 Ranking of TP risk for 6 landslides in Fengjie County, Chongqing

滑坡名称	分析状态	TP等级	稳定状态	失稳概率/%	TP风险等级	TP风险指数	TP 风险排名
车家坝滑坡	大雨	I	1.075 基本稳定	28.52	高风险	1.589	1
火石梁滑坡	大雨	II	1.013 欠稳定	34.75	中风险	0.753	2
万家坪滑坡	大雨	II	1.037 欠稳定	31.18	中风险	0.433	3
陈家沟滑坡	大雨 高水位	II	1.069 基本稳定	29.16	中风险	0.412	4
放牛坪滑坡	大雨	II	1.065 基本稳定	29.34	中风险	0.299	5
老林沟滑坡	大雨	II	1.356 稳定	11.77	低风险	0.264	6

评估方法进行了对比分析,验证了定量风险评价的准确性与可靠性。

定量风险评价可为滑坡地质灾害危害程度的判断

提供重要的依据,在地质灾害风险管理中发挥关键的技术支撑作用,为提高地质灾害防治工作的针对性和有效性提供了可靠技术保障。

表 9 重庆市奉节县 6 个滑坡的 EL 风险水平

Table 9 Ranking of EL risk for 6 landslides in Fengjie County, Chongqing

滑坡名称	分析状态	EL等级	稳定状态	失稳概率/%	TP风险等级	EL风险指数	EL风险排名
车家坝滑坡	大雨	I	1.075 基本稳定	28.52	高风险	1.142	1
陈家沟滑坡	大雨 高水位	II	1.069 基本稳定	29.16	中风险	1.091	2
火石梁滑坡	大雨	II	1.013 欠稳定	34.75	中风险	0.691	3
万家坪滑坡	大雨	II	1.037 欠稳定	31.18	中风险	0.570	4
放牛坪滑坡	大雨	II	1.065 基本稳定	29.34	中风险	0.293	5
老林沟滑坡	大雨	II	1.356 稳定	11.77	低风险	0.141	6

参考文献 (References):

[1] 宋德光, 吴瑞安, 马德芹, 等. 四川泸定昔格达组滑坡灾害运动过程模拟分析 [J]. 地质通报, 2023, 42(12): 2185 – 2197. [SONG Deguang, WU Ruian, MA Deqin, et al. Simulation analysis of landslide disaster movement process in Xigeda Formation, Luding County, Sichuan Province [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(12): 2185 – 2197. (in Chinese with English abstract)]

[2] 陶伟, 胡晓波, 姜元俊, 等. 颗粒粒径对滑坡碎屑流动力特征及能量转化的影响——以四川省三溪村滑坡为例 [J]. 地质通报, 2023, 42(9): 1610 – 1619. [TAO Wei, HU Xiaobo, JIANG Yuanjun, et al. Influence of particle size on dynamic characteristics and energy conversion of debris flow in landslide: A case study of Sanxicun landslide in Sichuan Province [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(9): 1610 – 1619. (in Chinese with English abstract)]

[3] 张宇, 徐宗恒, 查玲珑, 等. 不同计算方法的云南省永胜县下院滑坡堰塞湖沉积物粒度特征及沉积历史重建 [J/OL]. 中国地质 (2022-08-22) [2023-07-12]. [ZHANG Yu, XU Zongheng, ZHA Linglong et al. [J/OL] Geology in China (2022-08-22) [2023-07-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220822.1500.018.html>. (in Chinese with English abstract)]

[4] 邹凤钗, 冷洋洋, 陶小郎, 等. 基于斜坡单元的滑坡风险识别——以贵州万山浅层土质斜坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 114 – 122. [ZOU Fengchai, LENG Yangyang, TAO Xiaolang, et al. Landslide hazard identification based on slope unit: A case study of shallow soil slope in Wanshan, Guizhou Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 114 – 122. (in Chinese with English abstract)]

[5] 曾斌, 吕权儒, 寇磊, 等. 基于 Logistic 回归和随机森林的清江流域长阳库岸段堆积层滑坡易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(4): 105 – 113. [ZENG

Bin, LYU Quanru, KOU Lei, et al. Susceptibility assessment of colluvium landslides along the Changyang section of Qingjiang River using Logistic regression and random forest methods [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(4): 105 – 113. (in Chinese with English abstract)]

[6] 贾雨霏, 魏文豪, 陈稳, 等. 基于 SOM-I-SVM 耦合模型的滑坡易发性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 125 – 137. [JIA Yufei, WEI Wenhao, CHEN Wen, et al. Landslide susceptibility assessment based on the SOM-I-SVM model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 125 – 137. (in Chinese with English abstract)]

[7] ABEDINI M, GHASEMIAN B, SHIRZADI A, et al. A novel hybrid approach of bayesian logistic regression and its ensembles for landslide susceptibility assessment [J]. [Geocarto International](#), 2019, 34(13): 1427 – 1457.

[8] POURGHASEMI H R, KORNEJADY A, KERLE N, et al. Investigating the effects of different landslide positioning techniques, landslide partitioning approaches, and presence-absence balances on landslide susceptibility mapping [J]. [CATENA](#), 2020, 187: 104364.

[9] SHAFIZADEH-MOGHADAM H, MINAEI M, SHAHABI H, et al. Big data in Geohazard; pattern mining and large scale analysis of landslides in Iran [J]. [Earth Science Informatics](#), 2019, 12(1): 1 – 17.

[10] GAO Wenwei, GAO Wei, HU Ruilin, et al. Microtremor survey and stability analysis of a soil-rock mixture landslide: A case study in Baidian town, China [J]. [Landslides](#), 2018, 15(10): 1951 – 1961.

[11] WU Yiping, MIAO Fasheng, LI Linwei, et al. Time-varying reliability analysis of Huangtupo Riverside No. 2 Landslide in the Three Gorges Reservoir based on water-soil coupling [J]. [Engineering Geology](#), 2017, 226: 267 – 276.

[12] YANG Beibei, YIN Kunlong, XIAO Ting, et al. Annual

- variation of landslide stability under the effect of water level fluctuation and rainfall in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(16): 564.
- [13] 重庆市城乡建设委员会. 重庆市城市地质灾害防治工程设计规范: JTG D70—2004 [S]. 重庆: 2004. [Chongqing Urban Rural Development Committee E. C. S. i (2004) Code for design of geological hazard control engineering: JTG D70—2004 [S]. Chongqing: 2004. (in Chinese)]
- [14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 滑坡防治工程勘查规范: GB/T 32864—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for geological investigation of landslide prevention: GB/T 32864—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [15] 解明礼, 巨能攀, 刘蕴琨, 等. 崩塌滑坡地质灾害风险排序方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 48(5): 184—191. [XIE Mingli, JU Nengpan, LIU Yunkun, et. A study of the risk ranking method of landslides and collapses [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*. 2022, 48(5): 184—191 (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吴越, 刘东升, 孙树国, 等. 岩土强度参数正态-逆伽马分布的最大后验估计 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1188—1196. [WU Yue, LIU Dongsheng, SUN Shuguo, et al. Maximum posteriori estimation of strength parameters for geotechnical material obeying normal-inverse Gamma distribution [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(6): 1188—1196. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019. [SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Probability and mathematical statistics [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019. (in Chinese)]
- [18] VAN DAO D, JAAFARI A, BAYAT M, et al. A spatially explicit deep learning neural network model for the prediction of landslide susceptibility [J]. *CATENA*, 2020, 188: 104451.
- [19] CHEN Wei, SHAHABI H, SHIRZADI A, et al. Novel hybrid artificial intelligence approach of bivariate statistical-methods-based kernel logistic regression classifier for landslide susceptibility modeling [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4397—4419.
- [20] 吴越, 向灵均, 吴同情, 等. 基于受灾体空间概率的滑坡灾害财产风险定量评估 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 2): 3464—3474. [WU Yue, XIANG Lingjun, WU Tongqing, et al. Quantitative assessment of property risk of landslide disaster based on spatial probability of affected body [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(Sup 2): 3464—3474. (in Chinese with English abstract)]