

无限斜坡模型在县域地质灾害危险性评价中的应用

——以四川金阳县为例

李金洋^{1,2}, 易靖松^{1,2*}, 张 勇^{1,2}, 尹国龙^{1,2}

(1. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 四川 成都 611734; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 本文以四川金阳县域为研究区, 针对区域地质灾害危险性评价需求, 探讨了无限斜坡模型在县域地质灾害危险性评价中的应用。本研究采用斜坡单元作为评价单元, 基于高精度地形数据、地质调查数据, 应用简化入渗模型计算降雨入渗深度, 完成模型参数输入。借助 ARCGIS 平台, 实现了基于无限斜坡模型的县域地质灾害危险性分区与评价, 并将评价结果与历史灾害数据、INSAR 解译数据进行对比验证。结果表明, 该方法适用于县域尺度地质灾害危险性的精细化评估, 评价结果可靠、操作性强, 可为区域风险防控与土地规划提供科学依据。

关键词: 无限斜坡模型; 危险性评价; 斜坡单元; 县域尺度; 地质灾害

中图分类号: P642.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0115-07

Application of infinite slope model in geological hazard risk assessment in county areas: Taking Jinyang County in Sichuan Province as an example

LI Jinyang^{1,2}, YI Jingsong^{1,2*}, ZHANG Yong^{1,2}, YIN Guolong^{1,2}

(1. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, China Geological Survey, Chengdu Sichuan 611734, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: This article takes Jinyang County in Sichuan Province as the research area and explores the application of the infinite slope model in the assessment of geological hazard risk in the county, in response to the demand for regional geological hazard risk assessment. This study used slope units as evaluation units, and based on high-precision terrain data and geological survey data, applies a simplified infiltration model to calculate rainfall infiltration depth and complete model parameter input. With the help of the ARCGIS platform, a county-level geological hazard zoning and evaluation based on the infinite slope model was achieved, and the evaluation results were compared and verified with historical disaster data and INSAR interpretation data. The results indicate that this method is suitable for fine assessment of geological hazard risk at the county level, with reliable evaluation results and strong operability, and can provide scientific basis for regional risk prevention and land planning.

Key words: infinite slope model; risk assessment; slope unit; county level; geological hazard risk

0 引言

县域是我国行政管理、灾害应急和国土空间治理的基本单元, 在这一尺度开展地质灾害危险性评

价结果直接影响到监测预警点布设、避险搬迁选址与工程治理决策的有效性。传统的危险性评价方法多依赖于定性或半定量模型, 如层次分析法、信

收稿日期: 2025-09-03; 修回日期: 2025-11-26 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.03.014

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20230087)

第一作者: 李金洋, 男, 汉族, 1988年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 主要从事地质灾害调查评价与防治技术研究工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 316053914@qq.com。

通信作者: 易靖松, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 硕士, 从事地质灾害调查评价工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 991591136@qq.com。

引用格式: 李金洋, 易靖松, 张勇, 等. 无限斜坡模型在县域地质灾害危险性评价中的应用——以四川金阳县为例[J]. 钻探工程, 2026, 53(3): 115-121.

LI Jinyang, YI Jingsong, ZHANG Yong, et al. Application of infinite slope model in geological hazard risk assessment in county areas: Taking Jinyang County in Sichuan Province as an example[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 115-121.

息量模型等^[1-6],主要依靠统计分析原理,虽在早期应用中发挥了重要作用,但普遍存在主观性强、物理机制考虑不足等局限。随着对地质灾害成灾过程理解的深化和地理信息技术的迅猛发展,基于物理机制的确定性模型逐渐成为精细化评价的重要路径。阳帅等^[7]通过修正的Green-Ampt模型开展了区域浅层斜坡失稳风险评价,殷玮民等^[8]考虑岩土体物理力学参数空间校准分区的滑坡危险性评价,武利^[9]基于SINMAP模型完成了区域滑坡危险性定量评估并开展了模型验证。

无限斜坡模型(Infinite Slope Model)因其概念清晰、参数可获取性强,并能够有效耦合水文过程与斜坡稳定性,被广泛应用于区域浅层滑坡的危险性预测中^[10-11]。易靖松等^[12]基于无限斜坡模型,采用斜坡单元尺度,开展了不同降雨工况条件下的山区地质灾害风险定量评价尝试,证明该方法在大比例尺评价中具有一定的可靠性。本文以四川金阳县域地质灾害危险性评价为研究对象,聚焦无限斜坡模型的应用与优化,整合多源地形、地质数据,基于GIS空间分析实现县域尺度逐斜坡单元的危险性分级制图。旨在提升地质灾害危险性评价的物理基础与时空精度,为县域灾害风险管理提供可操作、可信赖的科学工具,提供理论依据与实践支撑。

1 研究区概述

1.1 地质环境条件

研究区为四川金阳县,地貌上属凉山山原向西南山地地貌过渡区域,北部为凉山山原地区,南部为山地地貌。总体地势西高东低,最高点狮子山海拔4076.5 m,最低点位于金沙江出境处向岭乡的葫芦坪子,海拔460 m,相对高差超过3600 m。区内金沙江为主干河流,由于迅猛的下切侵蚀,河谷深狭,两岸陡峭,高差1000~3000 m,为典型的巨大峡谷;支流西溪河、金阳河等也均为峡谷型河流,横断面呈V形,纵坡降大。

研究区内出露除缺失石炭系和白垩系外较为完备的震旦系至第四系地层,地层分布见图1,地层岩性变化异常复杂,第四系(Q)主要为松散一半胶结岩,侏罗系(J)、三叠系(T)、泥盆系(D)主要为泥岩、页岩、砂岩等互层状半坚硬岩,二叠系(P)、震旦系亚界(Pt)主要为薄层砂岩、页岩、煤线、铝土岩,以及少量千枚岩等软弱岩,志留系(S)、奥陶系

(O)、寒武系(Є)、震旦系(Zz)主要为灰岩、白云岩、泥灰岩等互层状半坚硬—坚硬岩类。

该区属“川滇经向构造带”的北段东缘,东部与华夏式构造交接,区内以北东向和南北向构造最为明显,北西向构造以小型断裂为主,断裂带附近岩体受构造挤压作用强烈,岩体较破碎。

区内地质灾害以滑坡灾害为主,根据收集的资料,共记录162处斜坡灾害,并通过调查完成了研究区内滑坡灾害的边界勾绘。

1.2 斜坡单元划分

利用高分辨率遥感影像、地形地质图、DEM底图,完成了四川金阳县全县域斜坡单元划分工作,并进行野外复核。金阳县县域面积1587.58 km²,斜坡单元共划分15306个,见图2,绝大部分斜坡单元<0.1 km²。

通过现场详细调查,获取了研究区斜坡单元覆盖层厚度、长度、坡度等基础数据,结合取样试验分析和工程地质类比,获取了不同类型覆盖层土体的物理力学等参数。

2 模型简介及参数取值

2.1 模型简介

无限斜坡模型是一种广泛应用于区域尺度斜坡稳定性评价的经典力学模型。其核心思想是将复杂的天然斜坡简化为一个无限延伸的、均质的平板状斜坡,从而基于极限平衡,用相对简单的物理公式来计算其在特定条件下的安全系数^[13]。

模型的输出结果为安全系数(F_s),其计算公式如下:

$$F_s = \frac{c + [r'h' + r(h - h')] \cos \beta \tan \varphi}{rh \sin \beta} \quad (1)$$

式中: F_s ——斜坡稳定性系数; c ——有效黏聚力,kPa; φ ——有效内摩擦角,(°); h ——覆盖层厚度,m; h' ——降雨入渗深度,m; β ——滑面倾角,(°); r ——滑体天然重度,kN/m³; r' ——滑体浮重度,kN/m³。

2.2 基础数据

黏聚力 c 与内摩擦角 φ 是影响斜坡稳定性的关键参数。为提高计算精度,本研究中的参数取值综合参考了金阳县32处治理工程的岩土力学测试结果、相关工程经验数据、《工程地质手册》推荐值以及

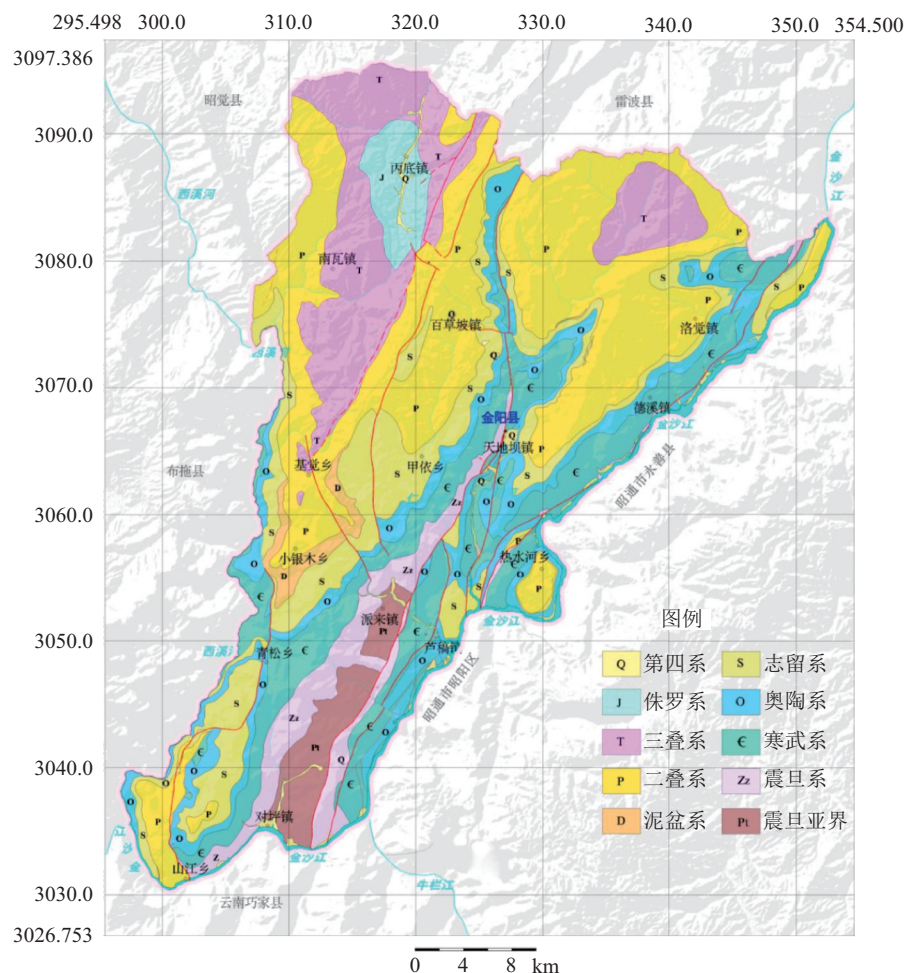


图1 研究区地质环境条件

Fig.1 The geological environment conditions of the study area

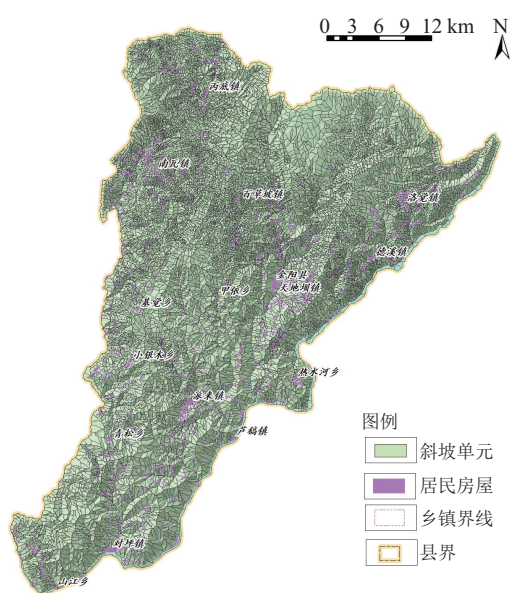


图2 研究区斜坡单元划分

Fig.2 The division of slope units in the study area

地质条件相似地区的实验参数,经系统分析后最终确定。此外,斜坡覆盖层厚度 h 主要依据逐坡实地调查数据获取,共计获取15306个斜坡的覆盖层厚度。

降雨入渗过程十分复杂,降雨入渗深度(h)与降雨量、地形条件、土体性质密切相关,在参数取值过程中,比较难以确定,本次根据陈策等^[14]提出的降雨入渗深度简化计算模型进行计算确定,计算公式如下:

$$y = k \frac{1+e}{e} t \quad (2)$$

式中: y ——入渗深度, m; k ——入渗系数, cm/s; e ——土体孔隙比, mm/d; t ——降雨入渗时间, s, 近似取降雨时间。

金阳县降雨类型以对流性降雨和地形雨为主,特点是强度大、持续时间相对较短,短时强降雨是引发山洪和滑坡泥石流的主要诱因,由于缺少降雨

监测数据,为简化分析,区域降雨时间考虑为定值,取3600 s。土体的孔隙比根据室内土工试验测试结果获取,渗透系数根据现场双环法测定。

地形坡度对降雨入渗深度有较大影响^[15],坡度越陡,地表径流产生越快、量越大,从而导致降雨入渗深度越浅;反之,坡度越平缓,越有利于雨水下渗,入渗深度也越深。因此本文在上述计算值基础上乘以相应的坡度影响系数,最终得到每个斜坡单元的降雨入渗深度 h' ,即:斜坡坡度 $\alpha \leq 15^\circ$ 时,系数为0.85; $15^\circ < \alpha \leq 30^\circ$ 时,系数为0.6; $\alpha \geq 45^\circ$ 时,系数为0.35。受调查数据限制,本文未考虑植被影响。

根据上述取值方法获得不同覆盖层的物理力学参数,见表1。并采用ARCGIS软件插值分析生成金阳县斜坡黏聚力(c)、内摩擦角(φ)、浮重度(γ')、天然重度(γ)、覆盖层厚度(h)、入渗深度 h' 基础数据计算图层(图3)。

表1 各类覆盖层物理力学参数取值
Table 1 The physical and mechanical parameter value of the various surface soil layer

覆盖层类型	$c/$ kPa	$\varphi/$ (°)	$\gamma/$ (kN· m ⁻³)	$\gamma'/$ (kN· m ⁻³)	$h'/$ m
冲洪积层	8.6	32.2	19.3	20.2	3.80
泥岩、页岩区坡积层	23.1	18.1	19.8	21.2	1.00
千枚岩区坡积层	21.7	20.8	21.2	22.5	3.00
砂岩区坡积层	22.5	18.3	20.4	20.9	2.80
灰岩、白云岩区坡积层	15.0	28.9	21.1	22.8	3.70
火山岩区坡积层	17.4	27.6	20.5	21.3	0.35

3 评价结果

3.1 危险性评价

利用ARCGIS栅格计算器功能,将赋值好的各参数图层代入无限斜坡模型进行计算,得到不同降雨工况条件下的稳定性系数计算值(F_s)。研究区稳定性计算值在[0.408, 2.655]区间,根据《地质灾害技术规范》,对应稳定性系数分级为不稳定、基本稳定、欠稳定、稳定4个区间,将计算值划分为[0.408, 0.8)、[0.8, 1.0)、[1.0, 1.2)、[1.2, 2.655) 4个区间,依次对应极高危险、高危险、中危险和低危险4个等级。

在ARCGIS平台中,危险性评价必须借助地图代数模块下的栅格计算器完成,所得结果因此为栅

格数据格式。由于单个斜坡单元内部常涵盖多个不同风险赋值的栅格像元,而单元整体需对应统一的风险等级,本研究采用ARCGIS的分区统计功能,统计各斜坡单元内不同危险性等级栅格的数量,并以占比最高的等级作为该单元最终的危险性等级。按照上述概化方法,得到斜坡单元尺度的危险性评价图(图4)。

统计表明:金阳县极高危险斜坡单元358个,面积49.74 km²,面积占比3.13%;高危险斜坡单元1180个,面积147.69 km²,面积占比9.30%;中危险斜坡单元4903个,面积581.58 km²,面积占比36.63%;低危险斜坡单元8865个,面积808.57 km²,面积占比50.93%。

3.2 评价结果验证

将收集的历史灾害点与评价结果在ARCGIS中进行叠加分析,表明金阳县162处历史斜坡灾害点有101处发生在高一极高危险斜坡单元内,占62.3%,48处斜坡灾害点发生于中危险斜坡单元内,占29.6%,仅13处斜坡灾害点发生于低危险斜坡单元内,占8.0%。评价结果与灾害历史吻合度较高。

根据评价结果,高一极高危险区主要沿金沙江及金阳河等水系呈带状分布,同时也密集发育于主要断裂带两侧一定范围。本次收集到了金沙江沿岸INSAR解译数据,根据解译结果,研究区形变速率主要分布在-10~10 mm/a,其中金阳县域内存在形变速率 $> \pm 13$ mm/a以上的区域共有9处,主要分布于金沙江岸坡。通过图4对比可以看出,9处变形速率较大的区域与本次评价的中危险区、高一极高危险区基本对应。

4 结论与讨论

本文基于无限斜坡模型与简化入渗模型相结合的金阳县危险性评价,评价结果与历史灾害点、INSAR解译数据具有较高的契合度,证明基于无限斜坡模型的危险性评价结果可靠性较高,该评价方法能够适用于县域尺度地质灾害危险性的精细化评估,具有一定的应用推广价值。

无限斜坡模型与简化入渗模型相结合的评价理论和方法摆脱了基于统计模型评价过程中的一些不足,但在实际应用过程中仍存在以下两方面的问题:

(1)在划分完斜坡单元后,需要对各覆盖层物

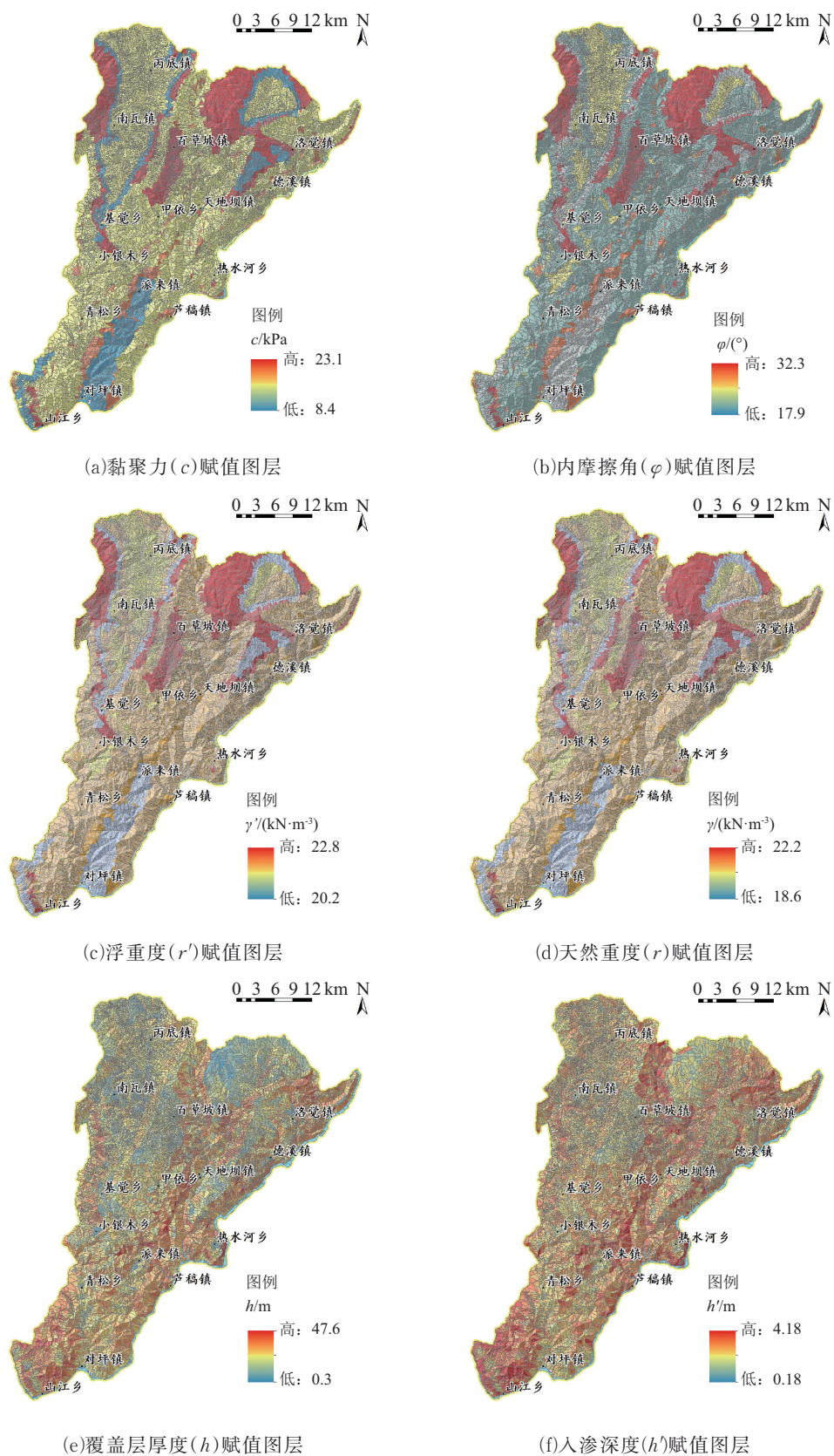


图3 参数赋值图层

Fig.3 Parameter assignment diagram

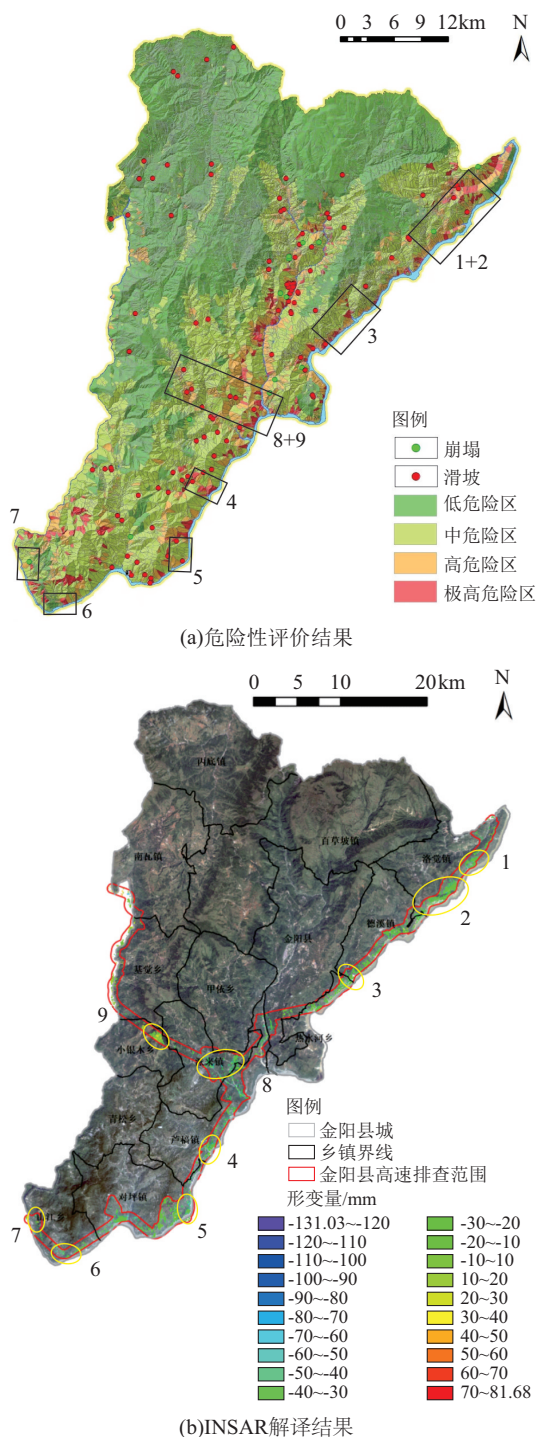


图4 危险性结果与历史灾害点、INSAR解译结果对照
Fig.4 Comparison of hazard results with historical disaster points and INSAR interpretation results

理力学参数进行赋值,数据的可靠性一定程度影响评价结论的准确性,为保障评价结果的精度,则需要大量地质调查数据、试验数据的支撑,这无疑给前期调查精度提出了更高要求;

(2)模型中降雨入渗深度是最为关键的输入参数之一,因降雨入渗过程十分复杂,精确刻画难度极大,且存在地区差异,本文采用的简化入渗模型为地区经验模型,原理上存在不足。

因此,事先开展针对性大比例尺的调查工作是本模型具有可操作性的关键前提;进一步开展特定区域的降雨入渗试验研究,对模型参数进行修正并应用,决定了评价结果是否准确和可靠。

参考文献(References):

- [1] 王念秦,郭有金,刘铁铭,等.基于支持向量机模型的滑坡危险性评价[J].科学技术与工程,2019,19(35):70-78.
WANG Nianqin, GUO Youjin, LIU Tieming, et al. Landslide susceptibility assessment based on support vector machine model [J]. Science Technology and Engineering, 2019,19(35):70-78.
- [2] 李冠宇,李鹏,郭敏,等.基于聚类分析法的地质灾害风险评价——以韩城市为例[J].科学技术与工程,2021,21(25):10629-10638.
LI Guanyu, LI Peng, GUO Min, et al. Application of cluster analysis method in geological hazard risk assessment: A case study of Hancheng City [J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(25):10629-10638.
- [3] 张茂省,薛强,贾俊,等.山区城镇地质灾害调查与风险评价方法及实践[J].西北地质,2019,52(2):125-135.
ZHANG Maosheng, XUE Qiang, JIA Jun, et al. Methods and practices for the investigation and risk assessment of geo-hazards in mountainous towns [J]. Northwestern Geology, 2019,52(2):125-135.
- [4] 罗路广,裴向军,谷虎,等.基于GIS的“8.8”九寨沟地震景区地质灾害风险评价[J].自然灾害学报,2020,29(3):193-202.
LUO Luguang, PEI Xiangjun, GU Hu, et al. Risk assessment of geohazards induced by "8.8" earthquake based on GIS in Jiuzhaigou scenic area [J]. Journal of Natural Disasters, 2020,29(3):193-202.
- [5] 孟庆华.秦岭山区地质灾害风险评估方法研究——以陕西凤县为例[D].北京:中国地质科学院,2011.
MENG Qinghua. Study on the methods of geo-hazards risk assessment in Qinling Mountain—A case study of Feng County, Baoji City, Shaanxi Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- [6] 易靖松,张勇,石胜伟,等.基于斜坡单元的山区城镇地质灾害风险快速评价研究——以江口镇为例[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(8):72-78.
YI Jingsong, ZHANG Yong, SHI Shengwei, et al. Study on the rapid evaluation of geological hazards in mountain towns based on slope unit: Taking Jiangkou Town for example [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(8):72-78.
- [7] 阳帅,谭泽颖,陈宏信,等.基于修正Green-Ampt模型的降雨诱发区域浅层斜坡失稳灾害分析[J].地质科技通报,2022,41(2):219-227.
YANG Shuai, TAN Zeying, CHEN Hongxin, et al. Analysis

- of instability disaster of rainfall-induced shallow landslides at the regional scale based on the modified Green-Ampt model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 219-227.
- [8] 殷玮民,李远耀,李星,等.考虑岩土体物理力学参数空间校准分区的滑坡危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(2):162-174.
- YIN Weimin, LI Yuanyao, LI Xing, et al. Landslide assessment considering spatial calibration zoning of physical and mechanical parameters of rock and soil mass[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 162-174.
- [9] 武利.基于SINMAP模型的区域滑坡危险性定量评估及模型验证[J].地理与地理信息科学,2012,28(2):35-39.
- WU Li. A SINMAP-Based quantitative assessment and model verification of regional landslide hazard[J]. Geography and Geo-Information Science, 2012, 28(2): 35-39.
- [10] 梁树,谢强,郭永春,等.不同降雨条件下成都黏土基坑边坡入渗深度研究[J].水文地质工程地质,2017,44(5):107-111, 130.
- LIANG Shu, XIE Qiang, GUO Yongchun, et al. Infiltration depth of Chengdu clay foundation pit slope under different rainfall conditions[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017, 44(5): 107-111, 130.
- [11] 陈亮胜,韦秉旭,廖欢,等.膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析[J].水文地质工程地质,2020,47(4):132-140.
- CHEN Liangsheng, WEI Bingxu, LIAO Huan, et al. A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(4): 132-140.
- [12] 易靖松,张群,张勇,等.基于无限斜坡模型的山区城镇地质灾害风险评价[J].科学技术与工程,2023,23(2):509-517.
- YI Jingsong, ZHANG Qun, ZHANG Yong, et al. Geological hazard risk assessment of mountain town based on infinite slope model[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(2): 509-517.
- [13] 潘俊义,侯大勇,李荣建,等.不同雨强下黄土边坡降雨入渗测试与分析[J].工程地质学报,2018,26(5):1170-1177.
- PAN Junyi, HOU Dayong, LI Rongjian, et al. Rainfall infiltration test and analysis of loess slope under different rainfall intensities[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1170-1177.
- [14] 陈策,张劲欣,范理云,等.降雨入渗简化计算和重力式挡墙在滑坡应急治理中的应用[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2025,43(6):88-91.
- CHEN Ce, ZHANG Jinxin, FAN Liyun, et al. Simplified calculation of rainfall infiltration and application of gravity retaining wall in landslide emergency treatment[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2025, 43(6): 88-91.
- [15] 张丽娜,李萍,胡向阳,等.不同坡度和植被覆盖黄土对降雨入渗的响应规律[J].水土保持学报,2024,38(6):113-121.
- ZHANG Lina, LI Ping, HU Xiangyang, et al. Responses of loess ground with different slopes and vegetation covers to rainfall infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 113-121.

(编辑 王文)