



全国中文核心期刊

中国百强报刊

ISSN 1000-6915

中国科协精品期刊

湖北十大名刊

CODEN YLGXF5

中国最具国际影响力学术期刊

EI核心收录期刊

岩石力学与工程学报

CHINESE JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND ENGINEERING

第43卷 第4期 (总第421期)

Vol.43 No.4(Total No.421)



CSRME

4

2024

ISSN 1000-6915



9 771000 691246

04>

中国岩石力学与工程学会 主办

科学出版社 出版

《岩石力学与工程学报》第九届编辑委员会

名 誉 主 编:	孙 钧	王思敬	钱七虎	冯夏庭						
主 编:	何满潮									
执 行 主 编:	李海波									
常务副主编:	刘才华									
副 主 编:	(按姓氏拼音排序)									
	康红普	李术才	唐春安	郭爱清	谢先启	杨春和	杨 强	姚仰平	殷跃平	张建民
	张宗亮	周创兵	朱合华							
编 委:	(按姓氏拼音排序)									
	包小华	蔡袁强	曹 洪	曹文贵	陈从新	陈国庆	陈善雄	陈卫忠	陈湘生	陈益峰
	陈云敏	崔宏志	崔玉军	崔振东	戴 峰	戴自航	党发宁	邓建辉	丁秀丽	董陵军
	杜时贵	杜修力	冯国瑞	高玉峰	宫凤强	何本国	何 川	何满潮	胡夏嵩	黄宏伟
	黄 昕	姜德义	姜立春	蒋宇静	金 衍	井兰如	靖洪文	康红普	孔 亮	来兴平
	赖远明	李国维	李海波	李建林	李利平	李邵军	李术才	李天斌	李夕兵	李 晓
	李晓昭	李新平	李兆平	梁 冰	梁卫国	梁正召	林 鹏	刘 斌	刘才华	刘 春
	刘飞禹	刘汉龙	刘建军	刘泉声	刘新荣	卢文波	路德春	马国伟	马 巍	年廷凯
	潘 泓	潘一山	浦 海	单仁亮	尚彦军	邵建富	盛 谦	施 斌	石根华	石少帅
	孙红月	孙晓明	谭云亮	唐春安	唐辉明	唐巨鹏	陶志刚	汪小刚	王成虎	王川婴
	王洪新	王乐华	王 琦	王 伟	王旭东	王学滨	王 媛	翁孟嘉	郭爱清	吴必胜
	吴宏伟	吴世勇	吴顺川	吴志军	伍法权	夏才初	夏开文	谢先启	谢雄耀	徐奴文
	徐锡伟	许 强	杨春和	杨更社	杨光华	杨 强	姚海林	姚仰平	殷跃平	袁 亮
	岳中琦	张传庆	张春生	张顶立	张丰收	张吉雄	张建民	张 洁	张强勇	张世殊
	张友良	张玉芳	张子新	张宗亮	赵 坚	赵 勇	赵志宏	郑 宏	郑俊杰	钟登华
	周创兵	周翠英	周宏伟	周 辉	周小平	朱合华	朱其志	朱万成	朱哲明	左建平
顾 问 编 委:	(按姓氏拼音排序)									
	蔡美峰	陈祖煜	樊启祥	方祖烈	葛修润	龚晓南	顾金才	谢和平	郑颖人	

本刊为 EI 核心收录期刊；土木工程类和力学类总被引频次和影响因子居前列期刊；建筑科学与水利工程类国家核心期刊；百种中国杰出学术期刊。

岩石力学与工程学报

YANSHI LIXUE YU GONGCHENG XUEBAO

(月刊 1982 年创刊)

2024 年 4 月 1 日 第 43 卷 第 4 期 (总第 421 期)

CHINESE JOURNAL OF

ROCK MECHANICS AND ENGINEERING

(Monthly, started in 1982)

Vol.43 No.4 (Total No.421) April 1, 2024

编 辑:《岩石力学与工程学报》编辑部(设在承办单位中国科学院武汉岩土力学研究所)
(武汉市武昌小洪山 430071)

主 管: 中国科学技术协会

主 办: 中国岩石力学与工程学会

主 编: 何满潮

出 版: 科 学 出 版 社

(北京市东黄城根北街 16 号, 100717)

印刷装订: 武汉中科兴业印务有限公司

发行范围: 国内外公开发行

国内发行: 武汉市邮局报刊发行局

国外发行: 中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)

发行代号: 国内 38 - 315/国外 MO 4526

Edited by Editorial Office for
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering
(c/o under Auspices of Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Tel. and Fax: +86 - 27 - 8719 9250

Superintended by China Association for Science and Technology

Sponsored by Chinese Society for Rock Mechanics
and Engineering

Editor-in-Chief: HE Manchao

Published by Science Press, 16 North Street,
Donghuangchenggen, Beijing 100717, China

Oversea distributed by China International Book Trading
Corporation, P.O. Box 399, Beijing 100044, China

Website: <http://rockmech.whrsm.ac.cn>

E-mail: rock@whrsm.ac.cn



岩石力学与工程学报

2024 年 4 月 1 日 第 43 卷 第 4 期(总第 421 期)

目次

基于循环荷载损伤定量控制的岩石 CWFS 改进模型研究	苗胜军, 刘泽京, 梁明纯, 赵子岐 (781)
三向应力下花岗岩水力剪切和渗流试验研究	唐巨鹏, 余泓浩, 魏志豪, 张 泉 (797)
岩质边坡阶梯状破坏及岩桥破裂机制研究	陈国庆, 秦昌安, 魏 涛, 马金根, 吴章雷 (809)
基于 LSSVR 与灰色理论的急倾斜巨厚煤层群开采冒落高度与时滞特征研究	崔 峰, 何仕凤, 朱兴平, 刘旭东, 蒋新军, 孙秉成, 贾 冲, 宗 程, 李宜霖 (822)
基于物理过程不确定性的降雨诱发浅层滑坡易发性快速区划: GIS-FORM 技术开发与应用	姬 建, 崔红志, 佟 斌, 吕 庆, 高玉峰 (838)
煤岩界面粗糙度对超低摩擦效应影响研究	李利萍, 胡学锦, 潘一山, 孙媛涛 (851)
不同围压与水压下红砂岩三轴剪切-渗流试验研究	赵成业, 梁正召, 张培森, 唐世斌, 陈 凡, 宋文成 (862)
考虑浆液渗流-岩体变形耦合作用的裂隙注浆模拟试验系统研制与应用	翟明磊, 李振华, 杜 锋, 白海波, 王文强 (878)
岩石强度理论及不同拉压应力状态下岩石强度试验研究现状	何鹏飞, 何满潮, 李 鑫, 陶志刚, 刘冬桥 (890)
应力及含水状态对裂隙花岗岩蠕变特性的影响研究	王春萍, 廖益林, 刘建铎, 刘 健, 赵星光, 陈 亮, 王 璐 (907)
长期水浸作用下煤样渐进破坏特征及损伤本构模型	韩鹏华, 赵毅鑫, 高 森, 高艺瑞, 张 村, 胡 勇 (918)
巷道开挖应力旋转路径下弱胶结软岩剪应力-应变及非共轴特性研究	刘家顺, 朱开新, 左建平, 王来贵, 生彦涛, 孙能洋 (934)
盐岩变速率循环试验中的疲劳特性与声发射特征研究	杨镇宇, 陈 结, 范金洋, 姜德义, 王同涛, 杨春和 (951)
局部安全系数引入下岩质边坡稳定性分析极限平衡滑面应力法	邓东平, 彭一航, 陈浩宇, 王翊民 (964)
考虑物理模型与有效降雨入渗的滑坡危险性预测框架——以青藏高原山南市雅鲁藏布江流域为例	郭子正, 周新勇, 黄 达, 田碧霞, 何 俊 (986)
恒定法向刚度条件下吸能锚杆锚固节理岩体剪切特性试验研究	韩观胜, 陈志靖, 李 博, 周 宇, 丁书学, 钟 振 (999)
土工基础	
考虑变井阻的碎石桩复合地基非线性固结分析	马昊晔, 李传勋, 陆向综, 郭 霄 (1013)
考虑天然地层层间保护影响的深厚覆盖层允许水力坡降研究	邱子源, 张兴杰, 罗玉龙, 金 伟, 张 丹, 盛金昌, 王惠民 (1026)
博士学位论文摘要	
基于深度学习的深部复杂地应力场反演算法研究	周家兴 (1040)
动 态	
下期内容预告	(1025)

责任编辑: 刘素锦 排版: 刘玉英

期刊基本参数 CN 42 - 1397/O3*1982*m*A4*264*zh*P*¥60.00*3100*18*2024 - 04

Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

Vol. 43, No. 4 (Total No. 421) April 1, 2024

CONTENTS

Rock improved CWFS model based on cyclic loading quantitative damage control experiment	
..... MIAO Shengjun, LIU Zejing, LIANG Mingchun, ZHAO Ziqi	(781)
Experimental study on hydraulic shear and seepage of granite under three-dimensional stress	
..... TANG Jupeng, YU Honghao, WEI Zhihao, ZHANG Xiao	(797)
Study on the stepped failure of rock slopes and fracture mechanism of rock bridges	
..... CHEN Guoqing, QIN Chang'an, WEI Tao, MA Jingen, WU Zhanglei	(809)
Study on collapse height and time delayed characteristics in the mining of steeply inclined extra-thick coal seam group based on LSSVR and grey theory	
..... CUI Feng, HE Shifeng, LAI Xingping, LIU Xudong, JIANG Xinjun, SUN Bingcheng, JIA Chong, ZONG Cheng, LI Yifei	(822)
Fast zoning of rainfall-induced shallow landslide susceptibility based on physical process uncertainty: development and application of GIS-FORM	
..... JI Jian, CUI Hongzhi, TONG Bin, LYU Qing, GAO Yufeng	(838)
Study on the influence of coal-rock interface roughness on ultra-low friction effect	
..... LI Liping, HU Xuejin, PAN Yishan, SUN Yuantao	(851)
Experimental study on triaxial shear-seepage of red sandstone under different confining pressures and water pressures	
..... ZHAO Chengye, LIANG Zhengzhao, ZHANG Peisen, TANG Shibin, CHEN Fan, SONG Wencheng	(862)
Development and application of grouting simulation test system considering slurry seepage-rock mass deformation coupling effect	
..... ZHAI Minglei, LI Zhenhua, DU Feng, BAI Haibo, WANG Wenqiang	(878)
State-of-the-art review of the rock strength criteria and rock strength experiments subjected to different tensile-compressive stress states	
..... HE Pengfei, HE Manchao, LI Xin, TAO Zhigang, LIU Dongqiao	(890)
Study on the influence of stress and water content on creep characteristics of fractured granite	
..... WANG Chunping, LIAO Yilin, LIU Jianfeng, LIU Jian, ZHAO Xingguang, CHEN Liang, WANG Lu	(907)
Progressive damage characteristics and damage constitutive model of coal samples under long-term immersion	
..... HAN Penghua, ZHAO Yixin, GAO Sen, GAO Yirui, ZHANG Cun, HU Yong	(918)
The shear stress strain characteristics of weakly cemented soft rock under roadway excavation stress path and its non-coaxial characteristics	
..... LIU Jiashun, ZHU Kaixin, ZUO Jianping, WANG Laigui, SHENG Yantao, SUN Kaiyang	(934)
Experimental study on fatigue properties and acoustic emission characteristics of salt rock under variable cyclic rate effect	
..... YANG Zhenyu, CHEN Jie, FAN Jinyang, JIANG Deyi, WANG Tongtao, YANG Chunhe	(951)
Limit equilibrium method based on stresses of slip surface for stability analysis of rock slope with introduction of local factor of safety	
..... DENG Dongping, PENG Yihang, CHEN Haoyu, WANG Yimin	(964)
A landslide hazard prediction framework by considering physically-based model and effective rainfall infiltration—A case study from Yarlung Zangbo River of Shannan City in the Tibetan Plateau	
..... GUO Zizheng, ZHOU Xinyong, HUANG Da, TIAN Bixia, HE Jun	(986)
Experimental study on shear characteristics of energy-absorbing bolt anchored jointed rock mass under constant normal stiffness condition	
..... HAN Guansheng, CHEN Zhifeng, LI Bo, ZHOU Yu, DING Shuxue, ZHONG Zhen	(999)
A numerical solution for nonlinear consolidation of stone column composite foundation considering variable well resistance	
..... MA Haoxuan, LI Chuanxun, LU Xiangzong, GUO Xiao	(1013)
Study on the influence of interlayer protection on the allowable hydraulic gradient of deep overburden soil	
..... QIU Ziyuan, ZHANG Xingjie, LUO Yulong, JIN Wei, ZHANG Dan, SHENG Jinchang, WANG Huimin	(1026)

Editor: LIU Sujin Typist: LIU Yuying

基于物理过程不确定性的降雨诱发浅层滑坡易发性快速区划：GIS-FORM 技术开发与应用

姬建¹, 崔红志^{1, 2}, 佟斌¹, 吕庆³, 高玉峰¹

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 211000; 2. 加泰罗尼亚理工大学 岩土与地球科学系, 西班牙 巴塞罗那 08034;

3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 高效绘制降雨诱发山体滑坡易发性分布图是区域尺度滑坡预测和地质灾害早期预警的重要技术手段。考虑降雨导致地表径流情况, 采用无限长斜坡模型耦合孔隙水压力(PWP)变化规律, 提出一种能够模拟区域边坡湿润锋深度随时空变化的简化瞬态降雨入渗模型 PRL-STIM(physically-based probabilistic modelling of rainfall landslide using simplified transient infiltration model)。该模型通过引入一阶可靠度方法(FORM)开展高效概率计算, 模拟区域尺度内地质条件的内在不确定性, 实现区域尺度滑坡失效概率空间分布快速评估。以地理信息系统(GIS)为平台, 采用 Python 程序语言, 开发一种能够自动执行区域滑坡易发性分析的 PRL-STIM v1.0 工具。以我国甘肃娘娘坝镇于 2013 年 7 月发生的降雨诱发区域浅层滑坡为例, 进行所提模型在区域滑坡易发性评估中的工程应用。结果表明, 考虑 50%失效概率阈值可有效地表征区域滑坡灾害易发性分布; 简化的瞬态降雨入渗模型能够有效识别高风险滑坡区域, 设置 20 m 缓冲区后的确定性和概率预测精度分别达到 79%和 81%; 此外, 相比于 TRIGRS 模型 72%的预测精度, PRL-STIM 预测精度达到 75%, 且服从相关非正态分布的岩土参数对降雨滑坡预测与区域尺度滑坡易发性有显著影响。

关键词: 边坡工程; 滑坡易发性评估; 降雨斜坡稳定性模型; 概率分析; 一阶可靠度方法(FORM); GIS 工具箱

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2024)04 - 0838 - 13

Fast zoning of rainfall-induced shallow landslide susceptibility based on physical process uncertainty: development and application of GIS-FORM

Ji Jian¹, Cui Hongzhi^{1, 2}, Tong Bin¹, Lyu Qing³, Gao Yufeng¹

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211000, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, UPC BarcelonaTECH, Barcelona 08034, Spain; 3. College of Architecture and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Efficient mapping of rainfall-induced landslide susceptibility is crucial to the success of regional-scale landslide prediction and the early warning of geological hazards. In this paper, a physically-based probabilistic modelling tool, herein named the probabilistic rainfall-induced landslide using simplified transient infiltration model (PRL-STIM), was proposed to deal with the fast mapping of landslide susceptibility at regional scales. This modelling tool integrates the infinite slope model with considerations of rainfall-induced pore water pressure(PWP) and surface runoff. The first-order reliability method(FORM) for efficiently performing probabilistic computations

收稿日期: 2023 - 08 - 14; **修回日期:** 2023 - 11 - 01

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A20594); 国家自然科学基金面上项目(52079045)

Supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(Grant No. U22A20594) and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52079045)

作者简介: 姬建(1983 -), 男, 2012 年于新加坡南洋理工大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事工程地质灾害风险和区域滑坡预测、岩土工程风险分析等方面的教学和研究工作。E-mail: JI0003AN@e.ntu.edu.sg

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2023.0724

is employed to simulate the geotechnical and geological uncertainties. The proposed PRL-STIM v1.0 tool is developed based on the Python programming language integrating with the Geographic Information System(GIS) framework. Validation of the proposed model is illustrated by an engineering case study of the rainfall-induced regional shallow landslides that occurred in July 2013 in Niangniangba, Gansu Province, China. The analysis results demonstrate that the adoption of the 50% failure probability threshold can effectively characterize the region's landslide hazard susceptibility distribution. High-risk landslide areas can be well identified, with deterministic and probabilistic prediction accuracies reaching 79% and 81%, respectively, when a 20m buffer zone is used. Furthermore, it is shown that the probabilistic prediction accuracy of the rainfall-induced landslide susceptibility by PRL-STIM achieves 75%, surpassing the 72% prediction accuracy of the TRIGRS model based on the Richards equation, and it is worth noting that non-normal distributions of random geotechnical parameters may exert a significant influence on the predicted landslide susceptibility.

Key words: slope engineering; landslide susceptibility assessment; rainfall slope stability model; probabilistic analysis; first order reliability method(FORM); GIS toolbox

1 引言

山体滑坡是最常见的工程地质灾害,其典型诱发因素包括降雨^[1]、地震^[2]以及人类工程活动等。自然条件下区域范围内山体滑坡多为深度仅有几米的浅层滑坡,但因其发生隐蔽性强、大多靠近人们工程活动区、灾害后果严重,对人们生命财产构成严重威胁^[3]。从国土资源管理角度出发,基于区域尺度的滑坡易发性精准区划是有效预测和预防滑坡灾害风险的最重要手段。

滑坡易发性区划及评估包括定性和定量两种手段^[4],定量方法一般可归纳为 2 类:(1) 基于机器学习和/或统计模型的数据驱动法^[5-6];(2) 基于物理模型的方法^[7]。其中,数据驱动方法侧重于探索滑坡趋势与诱发因素之间的统计关系^[8],而完全依赖历史事件数据,导致忽略了滑坡内在破坏机制和相关物理参数之间的关系。此外,在未获得区域详细历史数据情况下,可能无法得出可信的结果^[9]。相比之下,物理模型方法仅需要相应的参数信息,应用局限性相对较小,很容易嵌入地理信息系统(GIS)中进行滑坡易发性分析。因此,众多学者针对区域尺度下降雨诱发浅层滑坡提出了多种物理模型:如 SINMAP^[10], TRIGRS^[11], SHALSTAB^[12], GEOtop-FS^[13], FSLAM^[14]。尽管 SINMAP, SHALSTAB 模型使用简单,但无法反映降雨诱发浅层斜坡的失稳机制;TRIGRS 模型理论严密,但所需的计算参数多而降低了计算效率;FSLAM 具有极高的计算效率,但无法模拟持续降雨过程中的边坡稳定性变化。对于瞬时降雨诱发的滑坡则需要考虑降雨入渗引起的地下水位上升和孔隙水压力增加,往往计算时间较长,效率较低,不利于

区域滑坡的快速评估。因此,迫切需要一个兼顾计算效率和精度的区域降雨诱发滑坡模型。

此外,滑坡敏感性分析中不可避免的涉及岩土参数不确定性问题^[15]。因此,区域尺度下使用物理模型进行滑坡易发性分析时,首先面临的关键问题是如何考虑岩土参数不确定性。鉴于此,国内外相关学者以无限长边坡模型为基础,结合概率方法进行区域滑坡概率易发性评估^[16-17]: V. Medina 等^[14]提出 FSLAM 进行区域滑坡易发性评估时采用了随机方法模拟参数的不确定性,但该模型无法考虑物理模型所有参数的概率信息;蒙特卡罗模拟(MCS)方法由于简单易行且能考虑物理参数全部概率信息,故广泛应用于滑坡概率易发性评估,如与 TRIGRS 模型的耦合^[18]。但 MCS 在区域尺度滑坡计算下相当耗时,为提高计算效率,一次二阶矩方法(FOSM)等其他快速高效的概率算法被进一步应用于区域滑坡预测^[19]。然而, FOSM 作为一种概率分析工具,不仅忽略了随机变量的统计分布信息,而且未考虑变量之间的相关性,因此可能导致预测出现严重误差。鉴于此,一阶可靠度方法(FORM)^[20]因计算收敛速度快,可考虑潜在的非正态分布和参数交叉相关性而广泛应用于工程概率分析,但在区域滑坡灾害评估中的应用却相对较少见。这主要由于采用 FORM 进行概率计算时不可避免地涉及迭代过程,而仅通过 GIS 的栅格计算却很难实现上述过程。因此,如何在区域尺度滑坡灾害概率评估中高效的应用 FORM 方法仍是一个亟待解决的问题。

综上,区域尺度降雨诱发浅层滑坡评估面临两大挑战:一是现有物理模型在充分模拟降雨瞬时入渗过程机制无法兼顾计算效率;其次,如何嵌入高效概率算法来模拟岩土体强度参数的随机性,从而降低模型预测结果的不确定性。

鉴于此, 本文旨在进一步探索和优化模型的计算方法, 同时深入研究物理参数不确定性的影响, 以期提高模型的实用性和预测精度。本文基于无限长边坡模型, 考虑了孔隙水压力(PWP)剖面 and 地表径流的影响, 探究了瞬时降雨条件下坡面下湿润锋深度变化规律, 提出了一种新的区域浅层滑坡物理模型 PRL-STIM(Physically-based probabilistic modelling of rainfall landslide using simplified transient infiltration model)。本文首次通过引入递归的 FORM 可靠度分析方法(HLRF_x)来考虑物理参数的不确定性, 并采用 Python 编程语言开发了名为“PRL-STIM v1.0”的 ArcGIS 插件, 从而实现了概率框架下的区域浅层滑坡灾害快速评估。为深入了解输入参数对物理模型的影响, 对所提模型进行了敏感性分析, 并以我国甘肃娘娘坝区域降雨诱发浅层滑坡为实例, 验证了 PRL-STIM 在区域尺度滑坡灾害评估方面的可靠性和实用性。

2 方 法

2.1 简化瞬时入渗模型描述

2.1.1 无限长边坡模型

降雨诱发的区域滑坡主要表现为浅层滑坡。这类滑坡的特点是滑动面大致平行, 深度通常在 4 m 以内, 其中大多数的深度范围为 1~3 m。由于其长度远大于深度, 因此常采用无限长边坡模型来计算其安全系数(F_s)。蒋水华等^[21]的研究表明随着降雨持续, 湿润锋的推进会逐渐加剧斜坡的失稳趋势, 直至斜坡在湿润锋附近失稳; 此外, J. Zhang 等^[22-24]研究表明, 浅层滑坡的滑移面位置与湿润锋一致。为确保本文所用无限长边坡模型的合理性和准确性, 做出如下几点假设: (1) 滑动面与坡面平行; (2) 破坏仅发生在湿润锋深度(z_w); (3) 土体中存在渗流。

H. Rahardjo 等^[25]针对降雨入渗过程中非饱和土体的孔隙水压力提出了一个理想化的剖面模型(见图 1), 即图 1 中, 地表以下 z 深度处($0 \leq z \leq z_w$)的孔压 u_w : 剖面 a(细粒土中较为常见)表示地表的基质吸力为 0, 而随着深度的增加, 基质吸力逐渐增大, 湿润锋深度 z_w 会随着时间的推移逐渐推进, 直至达到静水压力线; 剖面 b(粗粒土中常见)代表了一个尖锐的湿润锋, 其推进速度较快, 形态较为明显; 剖面 c(适用于模拟地下水位的短暂上升情况)表示湿润锋上方存在一个透水层, 而下方则是一个低渗透性的土层。因此, 不同 PWP 剖面可如下所示:

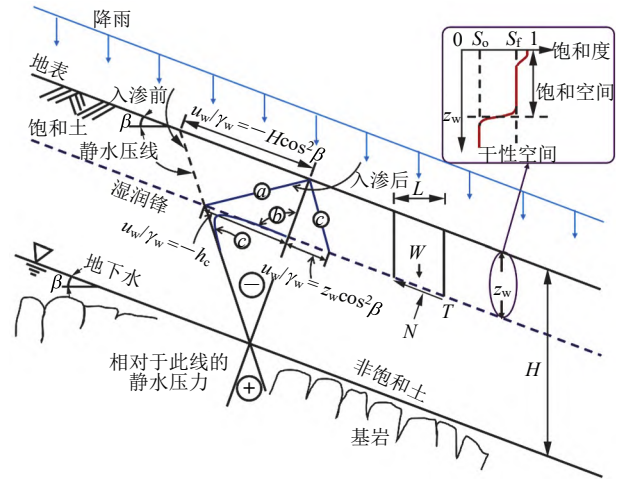


图 1 简化的降雨瞬时入渗模型示意图

Fig.1 The simplified transient rainfall infiltration model

$$u_w(z) = \begin{cases} -z / z_w \gamma_w h_c & (PWP-a) \\ 0 & (PWP-b) \\ \gamma_w z \cos^2 \beta & (PWP-c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: z_w 为湿润锋的深度; γ_w 为水的重度; h_c 为降雨入渗前 $z = z_w$ 的初始压力水头, 且 $h_c = (H - z_w) \cos^2 \beta$; β 为坡度。

根据莫尔-库仑强度准则, 土体的抗剪强度:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad (2)$$

式中: c' 为土体有效黏聚力, ϕ' 为土体有效内摩擦角, τ 为总剪应力, σ 为总法向应力。

滑动面土体单元总法向应力 σ 和总剪应力 τ 分别为

$$\begin{cases} \sigma = (\gamma_{sat} z_w + q_t) \cos^2 \beta \\ \tau = (\gamma_{sat} z_w + q_t) \sin \beta \cos \beta \end{cases} \quad (3)$$

式中: γ_{sat} 为饱和土体的容重, q_t 为边坡表面的植被荷载。

土体单元底部产生的抗剪应力:

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d = c'_d + (\sigma - \chi u_w) \tan \phi'_d \quad (4)$$

式中: c'_d , ϕ'_d 均为启动强度参数; χ 为有效应力参数; σ' 为有效应力。

由式(3), (4)得

$$\begin{aligned} & (\gamma_{sat} z_w + q_t) \sin \beta \cos \beta = \\ & c'_d + (\gamma_{sat} z_w \cos^2 \beta + q_t \cos^2 \beta - \chi u_w) \tan \phi'_d \end{aligned} \quad (5)$$

临界失稳启动强度可通过 F_s 由下式^[26]表示:

$$\left. \begin{aligned} \tan \phi'_d &= \frac{\tan \phi'}{F_s} \\ c'_d &= \frac{c'}{F_s} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

进一步有

$$F_s = \frac{c'}{(\gamma_{\text{sat}} z_w + q_t) \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} - \frac{\chi u_w}{\gamma_{\text{sat}} z_w + q_t} \frac{\tan \phi'}{\sin \beta \cos \beta} \quad (7)$$

其中,

$$c' = c'_s + c'_r$$

式中: c'_s 和 c'_r 分别为土体黏聚力和根系黏聚力。

对于岩土模型而言, 不考虑 q_t 作用下 F_s 可进一步简化为

$$F_s = \frac{c'_s}{\gamma_{\text{sat}} z_w \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} - \frac{\chi u_w}{\gamma_{\text{sat}} z_w} \frac{\tan \phi'}{\sin \beta \cos \beta} \quad (8)$$

式(8)是图 1 所示各种 PWP 剖面的 F_s 一般表达式, 其中 u_w 根据式(1)在 $z = z_w$ 下计算, 其中饱和土体边坡的有效应力参数 $\chi=1$ 。

2.1.2 水文模型

目前, 涉及浅层滑坡的水文模型主要包括“横向流”和“竖向流”2种^[14], 其中“竖向流”表征降雨受重力作用从地表垂直入渗到土体内地运动: R. M. Iverson 等^[27]为“竖向流”提供了详细的数学解释; L. A. Richards^[28]基于达西定律提出了非饱和土体的一维瞬态流模型来研究降雨入渗下的边坡稳定性; P. Lumb^[29]根据大量试验进一步提出了简化的一维 Richards 方程来计算湿润锋深度 z_w :

$$z_w = \sqrt{Dt} + \frac{k_s t}{n(S_f - S_o)} \quad (9)$$

式中: D 为扩散系数, n 为土体孔隙比, S_f 为最终饱和度, S_o 为初始饱和度, k_s 为饱和导水率, t 为降雨时间。

扩散系数 D 随降雨强度增加迅速减小, 在持续强降雨情况下, 扩散系数可视为 0, 式(9)可简化为

$$z_w = \frac{k_s t}{n(S_f - S_o)} \quad (10)$$

但 Lumb 湿润锋方程(式(10))仅适用于 $I_R \geq k_s$ 的情况(I_R 为降雨速率(mm/h)), 故 H. W. Sun 等^[30]在 Lumb 湿润锋方程的基础上进一步提出了广义湿润锋方程, 即 $I_R < k_s$ 的情况(见 L. L. Zhang 等^[31]):

$$z_w = \frac{I_R t}{\theta_s - \theta_o} \quad (11)$$

式中: θ_o 为初始体积含水量, 相当于 u_o ; θ_s 为最终体积含水量。

参数 n 和 S_o 不能明确给出, 可根据 L. L. Zhang 等^[31]提出的土体水分特征曲线经验公式进行换算:

$$\left. \begin{aligned} S_f &= \frac{\theta_s}{n} \\ S_o &= \frac{\theta_o}{n} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在降雨强度 I_R 随时间变化的情况下, z_w 可根据以下公式确定:

$$z_{wti} = z_{wt(i-1)} + \Delta z_{wti} \quad (13)$$

式中: z_{wti} 为第 t_i 时刻的湿润锋深度, Δz_{wti} 为第 t_i 时刻增加的湿润锋深度。对于边坡模型, 进一步引入坡度分量来加以表征 Δz_{wti} ^[31]:

$$\Delta z_{wti} = \begin{cases} \frac{k_s \Delta t}{(\theta_s - \theta_o) \cos \beta} & (I_R \geq k_s) \\ \frac{I_R \Delta t}{(\theta_s - \theta_o) \cos \beta} & (I_R < k_s) \end{cases} \quad (14)$$

最后 z_{wti} 受到边坡土体深度(h_s)的控制:

$$z_{wti} = \begin{cases} h_s & (z_{wti} \geq h_s) \\ z_{wti} & (z_{wti} < h_s) \end{cases} \quad (15)$$

2.1.3 径流模型

降雨是径流产生的主要途径, 当降雨强度大于土体渗透能力时, 未能入渗到地层的残余地表水会形成地表径流。根据 TRIGRS^[11]模型径的流计算方法, 本文基于 D8 流向法计算降雨过程中各栅格单元产生的地表径流量及下坡单元位置的水量。其中, 各栅格单元入渗量(I_R)为降水量(P)与任意上坡单元径流量(R_u)之和, 且入渗量受到饱和导水率(k_s)的控制, 即

$$I_R = \begin{cases} P + R_u & (P + R_u < k_s) \\ k_s & (P + R_u \geq k_s) \end{cases} \quad (16)$$

若栅格单元的 $P + R_u$ 超过 k_s , 残余流量视为径流 R_d , 并根据 D8 流向流入相邻的单元。 R_d 的计算公式如下:

$$R_d = \begin{cases} P + R_u - k_s & (P + R_u - k_s > 0) \\ 0 & (P + R_u - k_s \leq 0) \end{cases} \quad (17)$$

考虑入渗量 I_R 与饱和导水率可得实际入渗量 I :

$$I = \begin{cases} k_s & (I_R \geq k_s) \\ I_R & (I_R < k_s) \end{cases} \quad (18)$$

2.1.4 土体厚度模型

对于区域范围的浅层滑坡评估, 如何准确确定滑

动土体的厚度是一个巨大的挑战。尽管许多研究为了简化问题常常假设土体厚度为恒定值,但这种做法往往会导致预测结果的精度受到影响。为了更接近实际情况,一些经验模型被提出用于估计土体厚度,具有代表性的包括 GIST 模型^[32]和基于地形因子的模型,如 Z 模型、S 模型、Sexp 模型^[33-34]以及耦合机器学习算法的土体厚度预测模型^[35]。

Z 模型(Z_{model})由于较高的计算效率及可接受的预测精度而得到广泛应用^[17],因此,为实现区域滑坡的快速评估,本文采用 Z 模型来计算土体深度:

$$Z_{\text{model}}: h_i = h_{\max} - \frac{Z_i - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}}(h_{\max} - h_{\min}) \quad (19)$$

式中: $h_{\max}$, $h_{\min}$ 分别为最大和最小土体厚度; h_i 为任一点的土体厚度; $Z_{\max}$, $Z_{\min}$ 分别为高程的最大值和最小值; Z_i 为任一点的高程。

2.1.5 基于 FORM 的快速计算滑坡失效概率 HLRF-x 递归算法

FORM 是岩土工程可靠度分析中广泛应用的一种半概率计算方法。在边坡物理力学稳定性模型的基础上,可利用随机参量的边际概率分布快速计算出模型极限状态函数的失效概率^[36]。FORM 概率计算的基本思想是寻求从平均值向量(MV)到极限状态函数上最可能失效点(MPP)之间的最小距离,即可靠度指标(β_f)^[20]。本文采用 J. Ji 和 J. K. Kodikara^[37]提出的 HLRF-x 快速递归一阶可靠度算法,首次在 GIS 平台实现了 FORM 概率计算方法。该算法在原始随机变量空间(x 空间)中迭代求解确定 MPP,避免了循环转换到不相关标准正态随机变量空间(u 空间)的冗繁分析步骤,其递归算式如下:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \boldsymbol{\mu}_k^N + \frac{1}{\nabla g(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{T}_k \nabla g(\mathbf{x}_k)} [\nabla g(\mathbf{x}_k)^T (\mathbf{x}_k - \boldsymbol{\mu}_k^N) - g(\mathbf{x}_k)] \mathbf{T}_k \nabla g(\mathbf{x}_k) \quad (20)$$

其中,

$$\mathbf{T}_k = [\boldsymbol{\sigma}_k^N]^T \mathbf{R} [\boldsymbol{\sigma}_k^N]^T$$

$$[\boldsymbol{\sigma}_k^N] = \begin{bmatrix} \sigma_{k,i}^N & \cdots & 0 \\ \vdots & \sigma_{k,i}^N & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{k,i}^N \end{bmatrix}$$

式中: $\mathbf{x}_k$ 为 x 空间中的随机变量向量; $g(\mathbf{x}_k)$ 为可靠度分析目标对应的功能函数,即本文问题的极限状态方程 $g(\mathbf{x}_k) = F_s(\mathbf{x}_k) - 1$; $\nabla g(\mathbf{x}_k)$ 为在 $\mathbf{x}_k$ 处评估的功能函数梯度向量; $\mathbf{T}_k$ 为变换矩阵; $\boldsymbol{\mu}_k^N$ 为将随机变量转换为正态分布的等效 MV ; $[\boldsymbol{\sigma}_k^N]$ 为对角矩阵; $\sigma_{k,i}^N$ 为 $\mathbf{x}_k$ 处第 i 个随机变量的等效正态标准差; $\mathbf{R}$

为所有随机变量的相关性矩阵。

在收敛的 MPP 处,按照 B. K. Low 和 W. H. Tang^[20]的可靠度指标概念, β_f 由下式计算:

$$\beta_f = \sqrt{\mathbf{n}^{*T} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{n}^*} = \sqrt{\left[\frac{x_i^* - \mu_i^N}{\sigma_i^N} \right]^T \mathbf{R}^{-1} \left[\frac{x_i^* - \mu_i^N}{\sigma_i^N} \right]} \quad (21)$$

式中: x_i^* 为在 x 空间计算的第 i 个变量的 MPP 分量值; μ_i^N , σ_i^N 分别为第 i 个变量的等效正态平均值和标准差。有效正态参数 μ_i^N 和 σ_i^N 根据 Rackwitz-Fiessler 变换^[38]得到。

基于一阶可靠度的失效概率 P_f 由下式计算:

$$P_f = \Phi(-\beta_f) \quad (22)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数。

2.2 PRL-STIM 滑坡预测工具开发

2.2.1 概述

在 GIS 平台上使用基于递归的 FORM 算法 (HLRF_x) 计算 P_f , 不可避免地涉及到迭代计算,而基于 ArcGIS 等常规 GIS 软件通过栅格计算无法实现上述过程;若在多个软件平台上进行交互以构建空间数据集,无疑给用户带来了极大的挑战。因此本文采用 Python 语言开发了名为 PRL-STIM 工具并作为 ArcGIS 10.6 的插件运行,可快速便捷的实现概率滑坡易发性评估。主要步骤包括(见图 2):

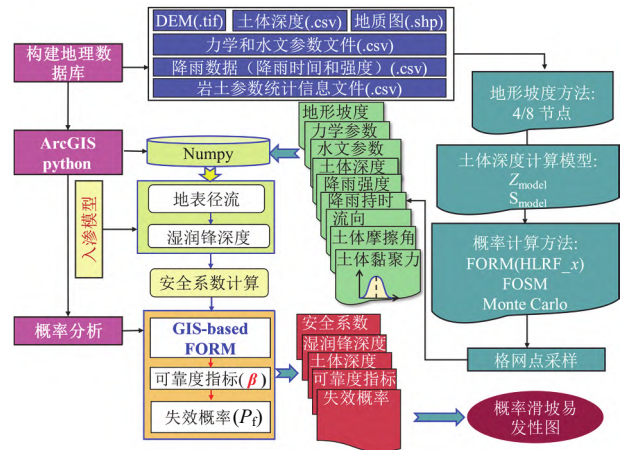


图2 PRL-STIM 工作流程图

Fig.2 PRL-STIM workflow

- (1) 生成所需文件并创建地理空间数据集;
- (2) 选择坡度计算方法、土体深度模型和概率分析方法;
- (3) 自动执行边坡稳定性计算并完成概率分析;
- (4) 生成基于栅格的滑坡易发性评估图。

2.2.2 PRL-STIM 的输入及输出

图3为PRL-STIM用户界面,输入文件主要分为2类:栅格文件和CSV文件。栅格文件包括数字高程模型(DEM)、土体类型空间分布数据;CSV文件包括最大和最小土层厚度数据、物理参数的统计数据;相关性矩阵为一个单独的CSV文件导入;统计参数的CSV文件包含7列相应的概率分布参数值,可按照10种常见的概率分布输入^[37]。完成参数输入并选择计算模型后,PRL-STIM主要输出结果包括 F_s 、湿润锋深度、土层深度、 R_I 和 P_f 的栅格图层。

3 案例研究

3.1 研究区概况及2013年7月山体滑坡事件

研究区位于甘肃娘娘坝镇,地理位置如图4所示,根据何简吟^[39]报道,该盆地面积为5381 m²,海拔为1416~2138 m,平均海拔为1777 m。地表由第四纪地层组成,包括滑坡堆积层(Q⁴_{del})和冲积层(Q⁴_{pal})。其中Q⁴_{pal}地层仅限于残留的山谷阶地,结构松散,密度较低,容易在降雨时引发滑坡;此外,该区属于温带大陆性气候,介于半湿润和半干旱之间,年平均降水量为501 mm,降雨主要集中在7月至9月,约占全年降雨量的68%。

2013年7月21日,持续降雨导致该区发生大量的浅层滑坡,主要集中在海拔1506~2047 m^[39],地形坡度为22°~33°。本文考虑降雨持时与降雨强度两影响因素,选择滑坡前后的降雨集中期(7月21日

12:00至7月22日6:00)作为研究时段,降雨概况如图5所示。

3.2 模型参数

模型所需输入参数包括基于数字高程模型(DEM)的地形参数(高程、坡角、流向),岩土强度参数以及降雨数据:12.5 m分辨率的DEM(<https://search.asf.alaska.edu>);降雨强度参数和相关物理参数参考何简吟^[39],增加了用于敏感性分析的物理参数值范围,如表1所示;研究区地质条件主要为风化岩和砾质土,滑坡以浅层滑坡为主,属于沉积型土体滑坡,最大和最小深度分别为0.1和3 m。

3.3 模型参数的敏感性分析

为研究本文模型对特定参数变化的敏感性,在保持其它参数不变的情况下,通过改变目标参数探究 F_s 的变化规律,图6展示了3种不同PWP剖面不同参数的敏感性结果:当 I_R 作为特定参数时,基于PWP-a得到 F_s 范围为0.99~88.3,PWP-b对应的 F_s 为1.31~59.64,PWP-c下 F_s 为0.88~59.22。无论采用哪种PWP,较其他参数, I_R 增加变化最为显著,表明所提模型对降雨强度(I_R)最为敏感;另一个变化显著的参数是饱和导水率(k_s),这也进一步说明模型对降雨相关的参数非常敏感。其它参数中,坡度对模型影响较为明显,这表明坡度是模型中一个较为敏感的参数。该参数是通过GIS内置算法获取的,其本身已经考虑了内在不确定性。除坡度外,无论模型采用哪种PWP条件,内摩擦角对边坡稳

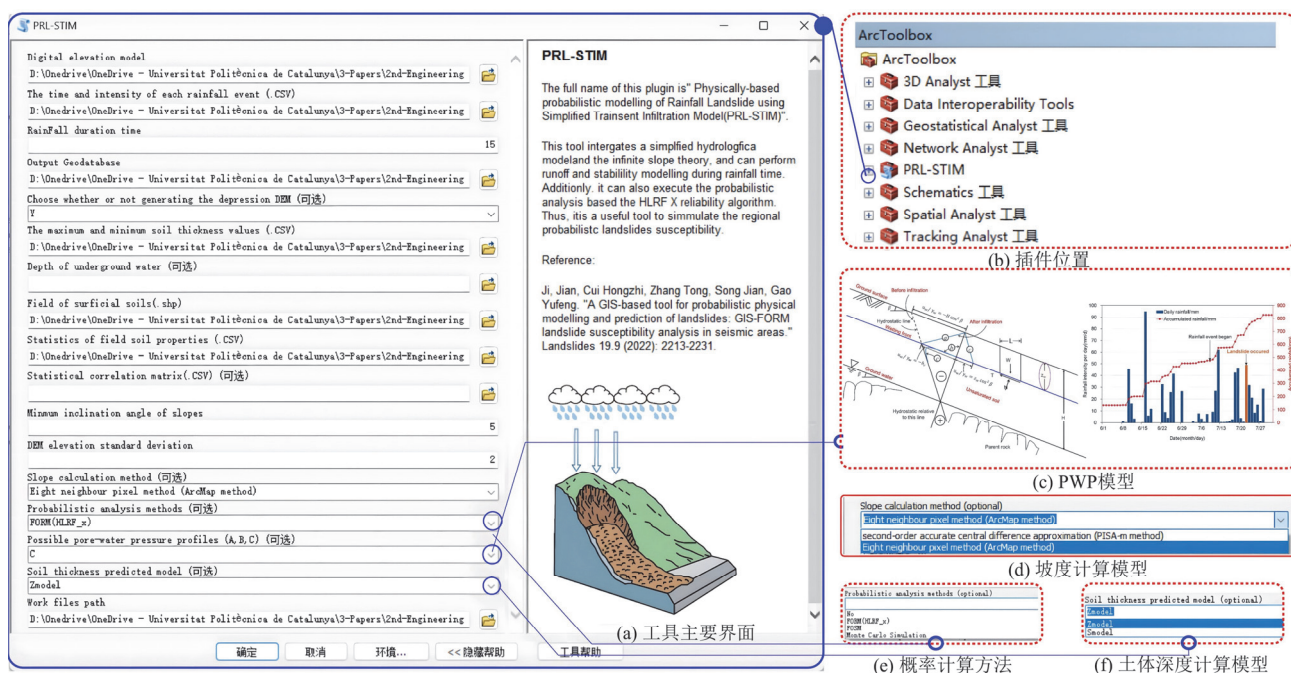


图3 PRL-STIM用户界面

Fig.3 PRL-STIM user interface

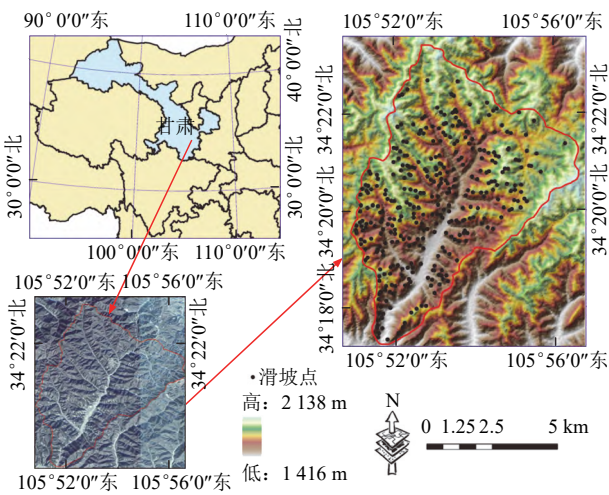


图4 娘娘坝研究区位置及滑坡点分布图

Fig.4 Location of the Niangniangba study area and landslide site distribution map

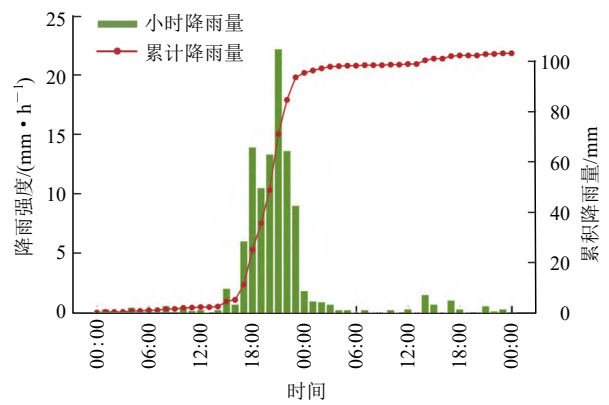


图5 2013年7月的降雨情况

Fig.5 Rainfall in July 2013

定性的影响都显著高于剩余参数。这一点也被 FSLAM 模型^[14]证实;不同 *PWP* 条件下,模型对饱和重度的敏感度也不同,这说明了土体吸水能力对模型的影响也很大,例如,细粒土为代表的土类在 *PWP*-a 条件下, F_s 随 γ_{sat} 的变化并不显著,在粗粒土为代表的土类中其次,而对于具有渗透层的土体中变化最为显著。这也再次验证了选择合适的 *PWP* 剖面来模拟不同土体类型具有重要的意义。

综上所述,在降雨诱发浅层滑坡预测中,采用

合适的参数取值对提高预测精度至关重要,而这些都已纳入了所提模型的概率计算框架内。

3.4 模型性能指标的选择

为评估模型性能,本文引入受试者工作特征曲线(ROC)。曲线下面积(*AUC*)经常被用于分析模型的准确性和误报率,较高的 *AUC* 表示更准确的模型预测结果;然而,由于 ROC 无法直接反映模型在特异性(即模型正确预测为负类的样本比例,也称为 *true negative rate*)上的性能,因此,击中率(*POD*)、平衡精度(*BA*)和准确度(*ACC*)也被作为额外的评估指标来综合评价模型性能,具体表达如下:

$$POD = \frac{TP}{TP + FN}$$

(23)

$$BA = \frac{TPR + TNR}{2}$$

(24)

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

(25)

式中: *TP* 为真阳性, *TN* 为真阴性, *FP* 为伪阳性, *FN* 为伪阴性, *TPR* 为真阳性率, *TNR* 为真阴性率。为避免将稳定区域错误地预测为不稳定区域,从研究区的非滑坡区域随机选择 5 000 个点作为负样本,以考虑假阳性的存在。

3.5 结果

本文基于研究区土层特性,选用 *PWP*-c 孔压剖面,并考虑参数的概率信息(见表 2),分布形式和统计相关性全面评估了预测性能。

3.5.1 模型性能评估

由于缺乏滑坡的实时数据,本研究以观测到的滑坡群发时间(降雨开始后 9 h(21: 00))的结果作为基准,考虑到滑坡数据的精确性,通过设置缓冲区来提高数据的可用性。

为对比 PRL-STIM 确定性分析精度,本文采用 TRIGRS 进行分析;为比较 FORM 方法的精度, PRL-STIM 概率模块增加一次二阶矩(FOSM)方法。如图 7(a)所示,当不考虑缓冲区时, TRIGRS 和 PRL-STIM 的 *AUC* 均为 0.72,使用 FOSM 和 FORM 后

表 1 模型验证及敏感性分析参数范围

Table 1 Parametric ranges for model verification and susceptibility analysis

类型	降雨强度 $I_R /$ ($m \cdot h^{-1}$)	坡角 $\beta(^{\circ})$	土体 黏聚力 $c_s /$ kPa	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$	土体 孔隙比 n	最终 饱和度 S_f	初始 饱和度 S_o	土体饱和单位 重度 $\gamma_{sat} /$ ($kg \cdot m^{-3}$)	对数饱和导水率 $lg k_s /$ ($m \cdot h^{-1}$)
取值范围	0.0002/0.003/ 0.004/0.052	15/22.5/30/ 37.5/45	9.25/13.875/18.5/ 23.125/27.75	16/24/32/ 40/48	0.06/0.09/0.12/ 0.15/0.18	0.6/0.7/0.8/ 0.9/1.0	0.27/0.37/0.47/ 0.57/0.67	12.5/18.75/25/ 31.25/37.5	18.04/1.28/0.09/ 0.006/0.00045
默认值	0.052	30	18.5	20	0.12	1	0.67	25	0.09

AUC 分别达到 0.74 和 0.75，这意味着概率分析方法具有更高的精度。

此外，当缓冲区接近 30 m 时，基于 F_s 和 P_f 的 AUC 值分别增至 0.79 和 0.82，这表明设置缓冲区

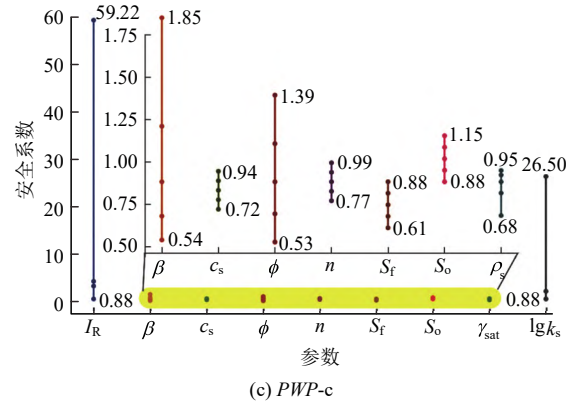
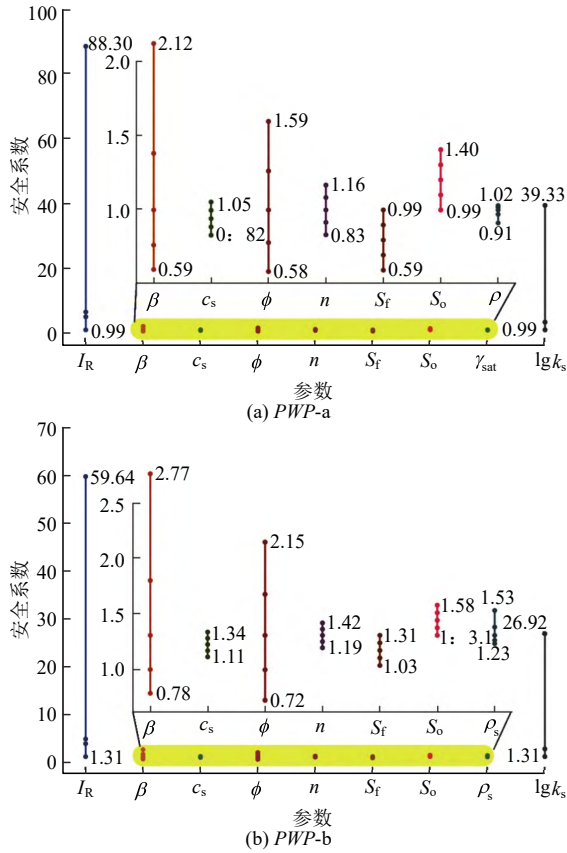


图 6 不同 PWP 剖面的输入参数敏感性分析

Fig.6 Sensitivity analysis of input parameters for different PWP profiles

能显著提高预测精度，因此，PRL-STIM 在降雨诱发的浅层滑坡预测中表现出了良好的性能。

以 0.5 作为 P_f 阈值时不同的预测性能指标如表 3 所示，当缓冲区从 0 m 增加至 20 m 后， POD 从 0.78 升高至 0.85， BA 也从 0.62 增长到 0.77，相应的 ACC 从 0.67 提升至 0.78，这也进一步证明 50% 失效概率阈值可有效表征区域滑坡灾害分布。

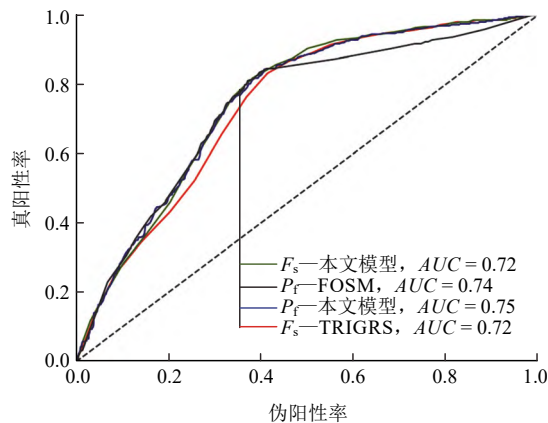
3.5.2 湿润锋深度分析

图 8(a)~(c)展示了不同时刻湿润锋深度(WFD)的空间分布。可以看到为降雨 3 h 后(见图 8(a))， WFD 为 0.01~0.07 m，这表明此时土体湿润锋深度

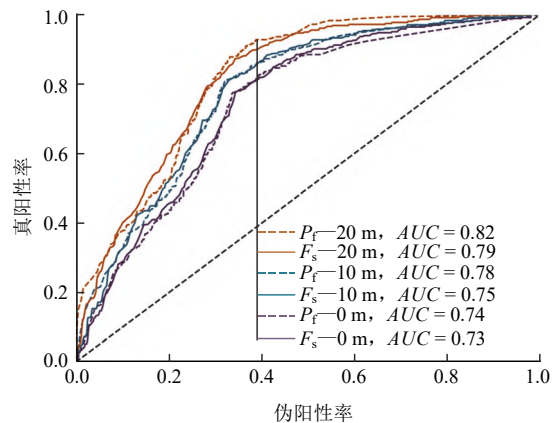
表 2 采用正态分布的模型概率参数值

Table 2 Values of model probability parameters using normal Distribution

类型	土体黏聚力 c_s/kPa	内摩擦角 $\phi/^\circ$	土体 孔隙比 n	最终 饱和度 S_f	初始 饱和度 S_o	土体饱和单位 重度 $\gamma_{\text{sat}} /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	对数饱和和导水率 $\lg k_s /$ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
均值	18.5	22	0.12	1	0.67	25	0.09
标准差	1.85/3.7/5.55	2.2/4.4/6/6	0.012/0.024/0.036	0.1/0.2/0.3	0.067/0.134/0.201	2.5/5/7.5	0.009/0.018/0.027



(a) 不同方法下受试者工作特征曲线



(b) 不同缓冲区下受试者工作特征曲线

图 7 模型预测的滑坡易发性评估精度对比

Fig.7 Comparison of accuracy of landslide hazard assessment predicted by models

表 3 $P_f = 0.5$ 阈值下不同缓冲区预测性能的比较
Table 3 Comparison of prediction performance of different buffers at $P_f = 50\%$

缓冲区	TP	TN	FP	FN	POD	FPR	BA	ACC
0 m	284	1 577	826	81	0.78	0.34	0.62	0.67
10 m	580	1 552	742	137	0.81	0.32	0.74	0.71
20 m	2 507	1 580	739	442	0.85	0.32	0.77	0.78

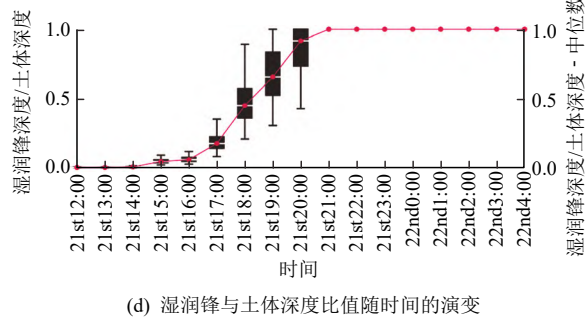
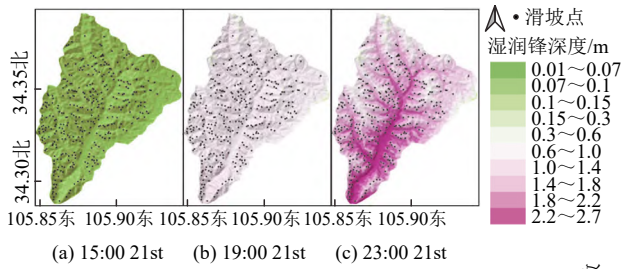


图 8 降雨过程中湿润锋深度的时间演变

Fig.8 Temporal evolution of the depth of the wetting front during rainfall

较浅； WFD 的最大值在降雨 11 h 后(见图 8(c))，达到 2.7 m，这意味随着降雨的持续，湿润锋深度迅速增加直至贯穿整个土层。

图 8(d)表征了降雨 0~16 h 不同时间段湿润锋深度与土体深度之比(WFD/h_s)的变化趋势：随着降雨的持续， WFD/h_s 逐渐变大；降雨 9 h 后， WFD/h_s 达到最大值并保持恒定，土体已处于饱和状态。值得注意的是，此时(21: 00)与何简吟^[39]中滑坡数量最多的时刻也相吻合。

3.5.3 浅层滑坡易发性的确定性和概率分析

针对确定性条件下滑坡易发性分析，图 9(a)~(c)为降雨开始后 4, 7 和 10 h 时 F_s 的空间分布。首先，不稳定区域比例随着 F_s 阈值提高明显增加，即 F_s 阈值越高，低于该 F_s 阈值的区域越多^[9]；其次，不稳定区域的时空差异更显著：对比不同时刻不同 F_s 阈值下的不稳定区域可以发现(见图 9(d))，降雨前 4 h 几乎不变化；5 h 后(17: 00)，仅 0.2% 的区域的 F_s 值小于 1.0；6 h 后潜在不稳定区域的比例增加到 25.1%；9 h 后潜在不稳定区域的比例急剧上升至

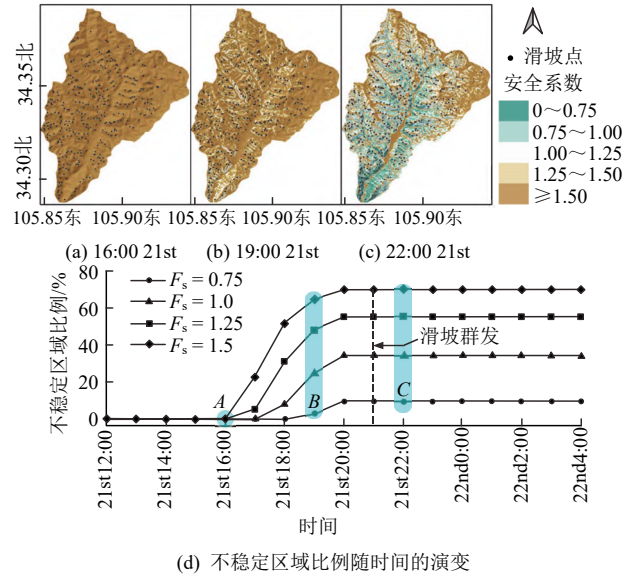


Fig.9 Deterministic analysis results

34.2%。基于 F_s (即确定性分析)的不稳定区域与湿润锋深度之间密切相关，随着湿润锋深度不断向地表以下推进，不稳定区域比例显著增多，加剧了边坡失稳的可能(见图 8(d), 9(d))。因此，在评估降雨诱发斜坡稳定性时，湿润锋深度至关重要。

针对概率滑坡易发性方面，不同敏感等级根据 5 个分类水平的 P_f 进行划分：I(极低)： $P_f \leq 1\%$ ；II(低)： $1\% < P_f \leq 10\%$ ；III(中等)： $10\% < P_f \leq 50\%$ ；IV(高)： $50\% < P_f \leq 90\%$ ；以及 V(极高)： $P_f \geq 90\%$ 。合理的 P_f 阈值决定了模型的预测性能：高阈值可能会导致模型偏向负类而忽略真正的正类；换言之，采用不同的 P_f 阈值会影响不稳定区域比例，较低的 P_f 阈值会导致更大比例的不稳定区域。图 10(a)~(c)为降雨 4, 7 和 10 h 后不同敏感等级的空间分布：随着降雨的持续，高敏感区域显著增加。结合图 10(e)可知，随着 P_f 阈值增加， BA 呈先升后降的趋势；但 P_f 在 0.1~0.5 范围内， BA 的变化率相对较慢，说明以 50% 的 P_f 阈值可有效表征区域概率滑坡灾害易发性分布，这在 V.Medina 等^[14]中也有所报道。

由图 10(d)可知，不稳定区域比例总体上随着降雨时间持续呈现逐渐增加的趋势：降雨 4 h 后(16: 00)，尚未发现失效概率大于 50% 的区域，表明整个区域此时处于稳定状态；7 h 后(19: 00)，潜在不稳定区域的比例迅速增加到 24.9%；由于强降雨的持续，8 h 后(20: 00)，约 33.4% 的研究区域为高易发区域；最终在降雨 11 h 后(23: 00)趋于稳定，此时不稳定区域占总面积的 34.1%。

综合对比可以看到，概率分析与确定性分析结

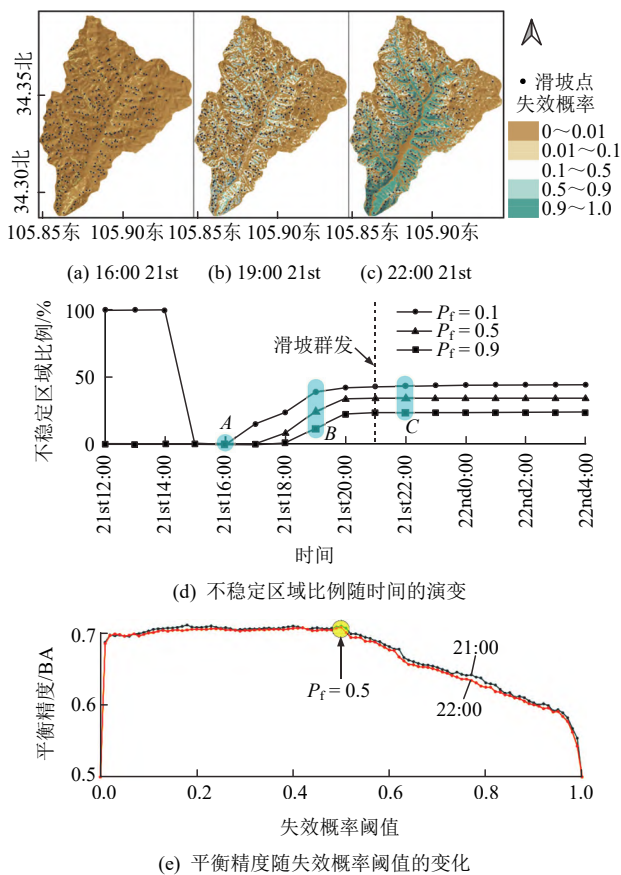


图 10 概率分析结果
Fig.10 Probabilistic analysis results

果存在差异, 概率分析中考虑的参数不确定性的影响最终反映在不稳定区域的比例中, 较高的不稳定区域导致假阳性增多, 因此, 概率方法在处理区域滑坡易发性问题时表现出了更优越的性能。

3.5.4 考虑不同 COV 条件下区域滑坡易发性的对比

概率分析的精度也依赖于统计信息的准确性, 其中一个关键因素是输入概率参数的变异系数 (COV)。为进一步分析不同 COV (0.1, 0.2 和 0.3) 对滑坡易发性的影响, 本节中假定所有参数都服从正态分布, 以降雨 11 h 后的结果进行分析。

可以看到, 高敏感度区域(IV 和 V)随降雨的持续显著增加(见图 11(a)~(c)), 另一方面, 如图 11(d) 所示, 不同敏感度分布随 COV 的增大呈现出显著差异, 即 COV 越大, 位于 II~IV 敏感度范围内的区域越多: 当 COV 为 0.1 时, 约占总研究区的 8.3%; COV 为 0.2 时增加到 18.6%; COV 增加到 0.3, 约 27% 区域位于该敏感度范围内。这表明随着参数变异性的增大, 潜在不稳定区域增多。

图 11(e) 为不同 COV 下敏感度水平随降雨时间的变化: 降雨 4 h 后, COV 为 0.1 时, 所有区域位于极低敏感水平 ($P_f \leq 1\%$); 当 COV 增大到 0.2 时,

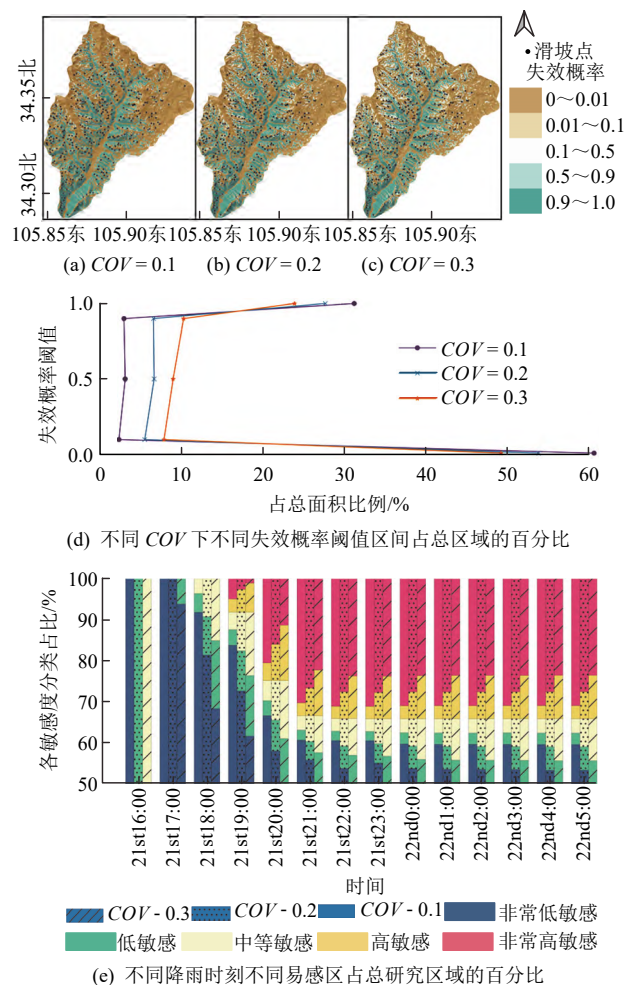


图 11 不同 COV 下的概率滑坡易发性分析
Fig.11 Analysis of probabilistic landslide susceptibility under different COV s

99.9% 的区域位于低敏感 ($1\% < P_f \leq 10\%$); 当 COV 增加到 0.3 时, 几乎所有地区 (99.4%) 都被判定为中等敏感 ($10\% < P_f \leq 50\%$)。尽管 F_s 值相对较大 (≥ 1.5), 但失效概率却较高, 说明参数变异性会增加边坡失稳概率。

3.5.5 考虑统计相关性和非正态分布的概率结果比较

参数间的统计相关性在概率分析中起到关键作用, 尤其在区域概率滑坡分析。土体黏聚力 c 和内摩擦角 (ϕ) 等非正态分布特性可能会影响滑坡的概率预测。为进行全面分析, 本文在其他参数被视为确定性的前提下, 考虑土体黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 之间的负相关性及其非正态分布对滑坡易发性的影响, 相关系数 $\rho_{c, \phi} = -0.5$ [37], COV 值为 0.3。如图 12(a)~(d) 所示, 降雨 11 h 的结果表明, 不同统计分布 (如正态分布和对数正态分布等) 且交叉负相关性对滑坡敏感性的空间分布影响显著。进一步的, 如图 12(e) 所示, 正态不相关、正态相关、对数正态不相关和对

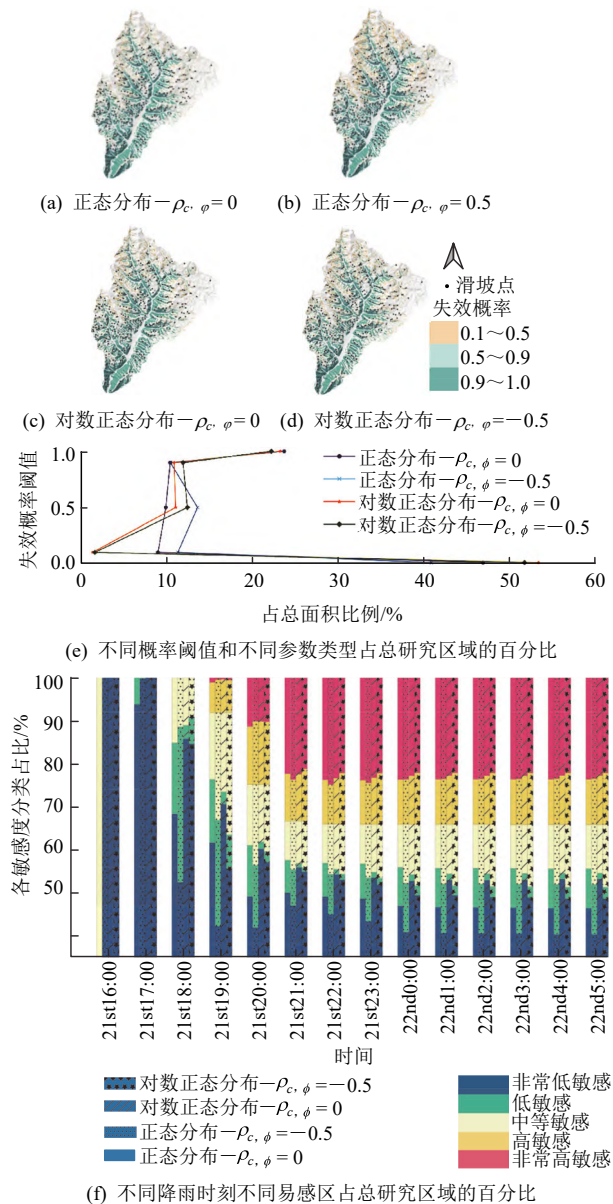


图 12 参数相关性和非正态分布下的滑坡易发性概率分析
 Fig.12 Probabilistic analysis of landslide susceptibility under parametric correlation and non-normal distribution

数正态相关下分别有约 10.40%, 10.42%, 10.86% 和 11.90% 的区域位于高敏感水平 (P_f : 50%~90%), 极高敏感度区域分别占比 23.74%, 23.72%, 23.28% 和 22.24%。这不仅说明考虑参数之间的相关性会显著增加高敏感性区域的分布, 也说明了在考虑参数的非正态分布情况下, 潜在滑坡区域的识别概率也更高, 即更多的区域被划定为高风险地区。

图 12(f) 为参数相关和不相关时不同敏感度区域随降雨时间的变化: 降雨 4 h 后 (16:00), 统计参数属于正态分布且不相关时, 预测的结果都是中等敏感水平; 而考虑参数交叉负相关时, 无论正态分布还是对数正态分布, 所有区域都被归类为低敏感等级, 这进一步表明了参数的相关性以及统计

分布形式对于合理判定区域滑坡易发性相当重要。

4 讨 论

针对区域尺度降雨诱发浅层滑坡预测模型方面, 尽管已有大量的研究基于物理模型开展了滑坡易发性评估, 但仍然面临 2 个问题: 采用简化的无限长边坡模型难以考虑区域边坡在持续降雨条件下的稳定性, 特别是孔隙水压力和地下水位变化; 高精度评估需要复杂的物理模型, 但计算成本过高, 不适合快速评估^[14]。此外, 如果无法获得准确的基岩深度信息, 就无法合理地使用 FSLAM 这类模型, 而 SINMAP 和 SHALSTAB 都需要事先了解地下水位的深度, 但并非所有地区都能获得精确的地下水位深度分布。故考虑湿润锋的变化是一种简单明了且适用广泛的方法。本文基于无限长边坡模型, 耦合不同孔隙水压力剖面 and 径流模型来模拟边坡在持续降雨条件下的湿润锋深度变化, 不仅考虑了瞬时降雨条件下区域边坡的时空稳定性, 还能兼顾较高的计算效率。

另一方面, 准确获得区域范围内各位置岩土体的参数十分困难^[15]。采用诸如 TRIGRS 等确定性模型进行区域尺度滑坡易发性分析无法考虑参数的不确定性。前文敏感性分析结果也表明, 土体饱和渗透率、黏聚力和内摩擦角等参数对边坡稳定性具有重要影响。因此将参数视为随机变量并使用概率方法来评估滑坡易发性, 可在一定程度上缓解参数不确定性的影响。尽管耦合 TRIGRS 与 MCS 方法在考虑区域滑坡模型的参数不确定性方面具有较高精度^[9], 但 MCS 计算精度高度依赖于样本量和模拟次数, 计算效率较低。其他如 FSLAM 中的概率分析, 尽管计算效率较高, 但随机参数只考虑了标准正态分布下的土体黏聚力和内摩擦角。综合比较, 本文的 PRL-STIM 概率分析模块耦合了 HLRF_x 方法, 不仅能够充分考虑参数相关性和非正态分布等统计特征, 还能够实现失效概率高效计算。

5 结 论

针对区域尺度浅层滑坡问题, 本文提出了滑坡易发性快速评估的简化瞬时降雨入渗模型。结合一阶可靠度递归算法 (HLRF_x), 可有效实现区域尺度滑坡易发性概率计算, 并通过实例进行了验证。所得主要结论如下:

(1) 开发了一种可用于区域尺度降雨诱发浅层

滑坡易发性评估的概率模型 PRL-STIM, 可根据降雨入渗及地表径流来计算坡面以下的湿润锋变化, 同时考虑了岩土体参数的不确定性来计算边坡失效概率。通过模型参数敏感性分析表明, 降雨强度(I_R)和饱和导水率(k_s)是最关键的滑坡诱发因素, 其次是土体黏聚力和内摩擦角等强度参数。

(2) 应用 PRL-STIM 模型对 2013 年娘娘坝区域降雨诱发浅层滑坡预测的结果显示, 不稳定区域占比与湿润锋深度密切相关, 考虑 50% 失效概率阈值可有效表征区域滑坡灾害易发性的空间分布。随着降雨的持续, 滑坡易发性区域呈现逐渐增加的趋势, 模型概率分析可有效预测滑坡的发生。考虑不同物理参数 COV 、统计相关性和非正态分布的情况会对区域滑坡概率评估产生显著影响。

(3) 将 PRL-STIM 与 TRIGRS 进行对比, 结果显示未设置缓冲区的情况下 PRL-STIM 概率评估的 AUC 精度为 75%, 高于 TRIGRS 的 72%。设置 20 m 缓冲区后, 基于失效概率的滑坡易发性预测精度达到 82%, 而确定性分析精度为 79%。

总体而言, 本文所提出的 PRL-STIM 能够根据不同降雨时刻湿润锋变化进行边坡稳定性分析, 避免了复杂的 Richards 方程入渗计算, 特点是参数简化和计算高效, 适用于大规模滑坡易发性快速评估。同时, 该模型能充分反映物理参数不确定的影响(变异系数, 相关性及非正态分布等), 在滑坡概率易发性快速区划中具有较好的应用前景。通过增加考虑土体参数的空间相关距离, 本模型还可以进一步拓展, 以描述区域尺度下因滑坡体材料空间变异性引起的易发性变化。基于本模型开发的插件还具有较强的可移植性, 即可以进一步采用程序语言进行编译, 构建独立的 Windows 软件包。

参考文献(References):

- [1] 张珍, 李世海, 马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3185 - 3191.(ZHANG Zhen, LI Shihai, MA Li. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3185 - 3191.(in Chinese))
- [2] 罗路广, 裴向军, 黄润秋. 强震山区地震滑坡发生概率研究——以九寨沟国家地质公园为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2079 - 2093.(LUO Luguang, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. Earthquake-triggered landslide occurrence probability in strong seismically mountainous areas: a case study of Jiuzhaigou National Geopark[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2079 - 2093.(in Chinese))
- [3] 张群, 许强, 易靖松, 等. 南江红层地区缓倾角浅层土质滑坡降雨入渗深度与成因机制研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1447 - 1455.(ZHANG Qun, XU Qiang, YI Jingsong, et al. Rainfall infiltration depth and formation mechanism of slow-inclination soil landslides in Nanjiang[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1447 - 1455.(in Chinese))
- [4] 王伟, 袁雯宇, 邹丽芳, 等. 基于滑坡敏感性评价的库区水动力型滑坡区域综合预警研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 479 - 491.(WANG Wei, YUAN Wenyu, ZOU Lifang, et al. Comprehensive regional-scale early warning of water-induced landslides in reservoir areas based on landslide susceptibility assessment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 479 - 491.(in Chinese))
- [5] 黄发明, 曾诗怡, 姚池, 等. 滑坡易发性预测建模的不确定性: 不同“非滑坡样本”选择方式的影响[J]. 工程科学与技术, 2024(待刊).(HUANG Faming, ZENG Shiyi, YAO Chi, et al. Uncertainties of landslide susceptibility prediction modeling: influence of different selection methods of “non-landslide samples”[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024(to be Pressed).(in Chinese))
- [6] 窦杰, 向子林, 许强, 等. 机器学习在滑坡智能防灾减灾中的应用与发展趋势[J]. 地球科学, 2023, 48(5): 1657 - 1675.(DOU Jie, XIANG Zilin, XU Qiang, et al. Application and development trend of machine learning in landslide intelligent disaster prevention and mitigation[J]. Earth Science, 2023, 48(5): 1657 - 1675.(in Chinese))
- [7] FELL R, COROMINAS J, BONNARD C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning[J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4): 99 - 111.
- [8] 仇文岗, 何昱苇, 王鲁琦, 等. 基于水系分区的滑坡易发性机器学习分析方法: 以重庆市奉节县为例[J]. 地球科学, 2023, 48(5): 2024 - 2038.(ZHANG Wengang, HE Yuwei, WANG Luqi, et al. machine learning solution for landslide susceptibility based on hydrographic division: case study of Fengjie County in Chongqing[J]. Earth Science, 2023, 48(5): 2024 - 2038.(in Chinese))
- [9] PARK H J, JANG J Y, LEE J H. Assessment of rainfall-induced landslide susceptibility at the regional scale using a physically based model and fuzzy-based Monte Carlo simulation[J]. Landslides, 2019, 16(4): 695 - 713.
- [10] PACK R T, TARBOTON D G, GOODWIN C N. The SINMAP approach to terrain stability mapping[C]// Proceedings of the 8th Congress of the International Association of Engineering Geology. Columbia, Canada: A. A. Balkema, 1998: 1157 - 1165.
- [11] BAUM R L, SAVAGE W Z, GODT J W. TRIGRS: a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0[R]. [S. l.]: [s. n.], 2008.

- [12] MONTGOMERY D R, DIETRICH W E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(4): 1 153 – 1 171.
- [13] SIMONI S, ZANOTTI F, BERTOLDI G, et al. Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOTOP-FS[J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, 22(4): 532 – 545.
- [14] MEDINA V, HÜRLIMANN M, GUO Z, et al. Fast physically-based model for rainfall-induced landslide susceptibility assessment at regional scale[J]. *Catena*, 2021, 201: 1 – 16.
- [15] JUANG C H, ZHANG J, SHEN M, et al. Probabilistic methods for unified treatment of geotechnical and geological uncertainties in a geotechnical analysis[J]. *Engineering Geology*, 2019, 249: 148 – 161.
- [16] HAMMOND C. Level I stability analysis(LISA) documentation for version 2.0: Vol. 285[R]. [S. l.]: [s. n.], 1992.
- [17] HWANG I T, PARK H J, LEE J H. Probabilistic analysis of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a physically based model and the bootstrap method[J]. *Landslides*, 2023, 20(4): 829 – 844.
- [18] LEE J H, PARK H J. Assessment of shallow landslide susceptibility using the transient infiltration flow model and GIS-based probabilistic approach[J]. *Landslides*, 2015, 13(5): 885 – 903.
- [19] HANEBERG W C. A Rational probabilistic method for spatially distributed landslide hazard assessment[J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2004, 10(1): 27 – 43.
- [20] LOW B K, TANG W H. Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2007, 133(12): 1 378 – 1 387.
- [21] 蒋水华, 刘 贤, 黄发明, 等. 融合观测信息的降雨诱发斜坡失稳机制及可靠度分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(8): 1 367 – 1 375. (JIANG Shuihua, LIU Xian, HUANG Faming, et al. Rainfall-induced slope failure mechanism and reliability analyses based on observation information[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(8): 1 367 – 1 375.(in Chinese))
- [22] ZHANG J, HUANG H W, ZHANG L M, et al. Probabilistic prediction of rainfall-induced slope failure using a mechanics-based model[J]. *Engineering Geology*, 2014, 168: 129 – 140.
- [23] GAVIN K, XUE J. A simple method to analyze infiltration into unsaturated soil slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(2): 223 – 230.
- [24] MUNTOHAR A S, LIAO H J. Analysis of rainfall-induced infinite slope failure during typhoon using a hydrological-geotechnical model[J]. *Environmental Geology*, 2009, 56(6): 1 145 – 1 159.
- [25] RAHARDJO H, LIM T T, CHANG M F, et al. Shear-strength characteristics of a residual soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(1): 60 – 77.
- [26] CUI H, JI J, SONG J, et al. Limit state line-based seismic stability charts for homogeneous earth slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 146: 104749.
- [27] IVERSON R M, REID M E, LAHUSEN R G. Debris-flow mobilization from landslides[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1997, 25(1): 85 – 138.
- [28] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1(5): 318 – 333.
- [29] LUMB P. Effect of rain storms on slope stability[C]// *Proceedings of the Symposium on Hong Kong Soils*. Hong Kong: Printed by Local Property and Printing Co., Ltd., 1962: 73 – 87.
- [30] SUN H W, WONG H N, HO K K S. Analysis of infiltration in unsaturated ground[C]// *Proceedings of the Annual Seminar on Slope Engineering*. Hong Kong: Printed by Local Property and Printing Co., Ltd., 1998: 101 – 109.
- [31] ZHANG L L, ZHANG J, ZHANG L M, et al. Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2011, 164(5): 299 – 316.
- [32] CATANI F, SEGONI S, FALORNI G. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(5): 1 – 15.
- [33] TRAN T V, ALVIOLI M, LEE G, et al. Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: a case study[J]. *Landslides*, 2018, 15(6): 1 071 – 1 084.
- [34] SALCIARINI D, GODT J W, SAVAGE W Z, et al. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy[J]. *Landslides*, 2006, 3(3): 181 – 194.
- [35] XIAO T, SEGONI S, LIANG X, et al. Generating soil thickness maps by means of geomorphological-empirical approach and random forest algorithm in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir[J]. *Geoscience Frontiers*, 2023, 14(2): 101514.
- [36] HASOFER A M, LIND N C. Exact and invariant second-moment code format[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1974, 100(1): 111 – 121.
- [37] JI J, KODIKARA J K. Efficient reliability method for implicit limit state surface with correlated non-Gaussian variables[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 39(17): 1 898 – 1 911.
- [38] RACKWITZ R, FLESSLER B. Structural reliability under combined random load sequences[J]. *Computers and Structures*, 1978, 9(5): 489 – 494.
- [39] 何简吟. 降雨型浅层滑坡稳定性研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西北大学, 2021.(HE Jianyin. Stability analysis of rainfall-induced shallow landslide based on TRIGRS model and Scoops3D model[M. S. Thesis][D]. Xian: Northwest University, 2021.(in Chinese))



高温高压岩石三轴仪

● 符合 ASTM 和 ISRM 规范要求

功能 岩石力学：高温高压单轴/三轴应力-应变全曲线试验、单轴/三轴动态循环加载疲劳试验、流变/蠕变试验以及间接拉伸、断裂韧性、水压致裂、变角度剪切和真三轴试验等。

岩石物性：超声波速试验、电阻率试验、稳态渗透试验、脉冲衰减超低渗(瞬态)试验、油层物理驱替试验(油-水相对渗透率)、腐蚀性液体渗透试验、低/高温冻融膨胀试验等。

岩石地应力：CVA径向波速各向异性试验、DSA应变分析试验、高温高压三轴声发射三维成像分析、Kaiser效应试验等。

特点 压力室全密封技术，无需人工紧固；

轴压：1 000~4 600 kN；
围压和孔压：140 MPa，210 MPa；
刚度最大：10.6 MN/mm；
试样尺寸：25~100 mm；
温控范围：-30 ℃~200 ℃；
动态加载：0~10 Hz；
应力/应变或荷载，位移控制，可捕捉峰后行为；
过载/过压/过热/误操作等多重自动保护。

应用 美国GCTS岩石三轴试验系统已广泛服务于中石油、中石化、中海油三大石油公司的石油勘探开发、煤成气开采研究，以及中科院、高校等煤矿和金属矿地下开采、深埋高应力隧道、海洋地质、火山调查等行业/专业所涉及的岩石力学试验以及极地冰力学性能和深部可燃冰材料力学性能测试，高端特殊试验可以在温度-水力-应力-化学(THMC)多场耦合条件下完成。



RPN-150超高压三轴
三方向应力/应变独立控制



超声波及声发射测试
测量压应变和剪切应变



DSA动态应变测试装置
测量立方体试样三向地应力



CAV径向波速各向异性测试装置
测量地应力主应力方向



快速脉冲渗透测试装置
可以测量小于1μD的岩石渗透性

美国GCTS公司中国总代理

BS 北京双杰特科技有限公司
BEIJING BRILLIANT SUN TECHNOLOGY CO.,LTD

北京办事处
电话:010-82251761

上海办事处
电话:021-56085109

成都办事处
电话:028-86707002

武汉办事处
电话:027-87866189

西安办事处
电话:029-88867541

www.bsctest.com info@bsctest.com

国际标准连续出版物号 ISSN 1000-6915
中国标准统一连续出版物号 CN 42-1397/O3

广告经营
许可证

鄂工商广字 4200004000186 定价 60.00元/册
720.00元/年