

基于智能网格降水和水文-滑坡耦合模型的全国 洪水和滑坡灾害滚动预报

张春堂^{1,2}, 张珂^{1,2,3,4,5,6}, 陈国鼎^{1,2}, 王晟^{4,5,7}, 包红军^{4,8}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 江苏 南京 210098;
5. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210098; 6. 水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098;
7. 河海大学计算机与软件学院, 江苏 南京 211100; 8. 中国气象局国家气象中心, 北京 100081)

摘要:为解决洪水和滑坡灾害在大尺度下实时预报中面临驱动数据、土水参数难以获取以及计算负荷的问题,以水文-滑坡耦合模型(CRESLIDE)为基础,引入无缝隙精细化智能网格降水数据作为驱动因子,利用土壤厚度模型及土壤类型数据获取分布式土水参数,结合地表覆盖信息及累积降水量动态识别滑坡敏感区域,采用并行技术加速计算过程,构建了全国尺度的 CRESLIDE 模型,对 2022—2023 年降雨诱发洪水和滑坡灾害进行实时预报,并基于汛期 6—8 月的长序列和个例灾害对模型进行检验。结果表明:CRESLIDE 模型在并行计算时的加速比最高可达 5.53;洪水灾害整体上集中于华北和西南一带,滑坡灾害多发生在我国南方地区,7—8 月北方滑坡开始增加;在长序列检验中,模型预报精度评价指标 ROC 曲线下面积均超过或接近 0.7,其中洪水灾害预报效果优于滑坡灾害;在个例检验中,模型预测的灾害发生位置和时间与实测结果较为一致。

关键词:智能网格降水;水文-滑坡耦合模型;洪水与滑坡灾害;大尺度滚动预报;中国

中图分类号:X43 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0083-10

Flood and landslide disaster rolling forecast in China based on intelligent-grid precipitation and coupled hydrological-landslide model//ZHANG Chuntang^{1,2}, ZHANG Ke^{1,2,3,4,5,6}, CHEN Guoding^{1,2}, WANG Sheng^{4,5,7}, BAO Hongjun^{4,8}(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210098, China; 5. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China; 6. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Nanjing 210098, China; 7. College of Computer Science and Software Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 8. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: To address the challenges of obtaining driving data and soil-water parameters, as well as the computational load in real-time forecasting of flood and landslide disasters on a large scale, based on the coupled hydrological-landslide model (CRESLIDE), seamless refined intelligent-grid precipitation data were introduced as the driving factor. A soil thickness model and soil type data were employed to obtain distributed soil-water parameters, land cover information and accumulated rainfall were combined to dynamically identify landslide-sensitive areas, and parallel computing technology was utilized to accelerate the computational process. Subsequently, a national-scale CRESLIDE model was constructed to conduct real-time forecasting of rainfall-induced flood and landslide disasters from 2022 to 2023, and it was verified in long-sequence and individual disaster cases during the flood period from June to August. The results show that the maximum parallel computing speed-up ratio of the CRESLIDE model can reach up to 5.53. Flood disasters are primarily distributed across North and Southwest China, and landslide disasters are predominantly concentrated in South China, with a notable increase in frequency observed in North China during July and August. In long-sequence validation, the area under ROC curve for evaluation of the forecast accuracy of the model is above or close to 0.7, and the forecast accuracy for flood disasters is higher than that for landslide disasters. In individual case validation, the location and time of disasters forecast by the

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006500)
作者简介:张春堂(1999—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:chuntangzhang@hhu.edu.cn
通信作者:张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

model are consistent with the observed results.

Key words: intelligent-grid precipitation; coupled hydrological-landslide model; flood and landslide disasters; large-scale rolling forecasting; China

洪水与滑坡是分布广泛且危害巨大的两种自然灾害,严重制约着社会经济的持续稳定发展^[1-3]。降雨作为引发洪水的直接因素和滑坡的间接因素,对于洪水与滑坡灾害的发生有着十分重要的驱动作用^[4]。近年来,我国夏季极端降水事件频率和强度总体有所增加,加剧了洪水事件的发生,每年因洪涝灾害造成经济损失约 1 100 亿元,死亡人数超过 5 000 人^[5]。同时,我国山区众多,在复杂的地质和气候条件影响下,地质灾害频发,据统计,2013—2021 年全国共发生地质灾害 73 525 起,伤亡人数 3 914 人,共造成 375.5 亿元直接经济损失。在所有地质灾害中,滑坡所占比重最大,而降雨诱发的滑坡则占到滑坡总数的 90% 以上^[6]。因此正确认知洪水和滑坡的发生发展规律,对其进行早期预警预报,降低此类灾害造成的生命财产损失是亟待解决的问题。

目前,对滑坡进行预测的方法主要包括经验统计模型和物理机制模型两种,经验统计模型通过构建降雨特征和边坡稳定性之间的相关关系,捕捉滑坡事件,从区域到全球尺度均有应用^[7-8],但这种方法往往适应性差,无法解释滑坡发生的内在机制,且缺少对洪水灾害的考虑。而物理机制模型可以较为准确地描述水文过程与边坡失稳的内在联系,逐渐成为研究的重点。例如:Simoni 等^[9]将分布式水文模型 GEOTop 和无限边坡模型耦合,分析地质灾害发生的可能性;Zhang 等^[10]利用 CREST 水文模型计算各项水文要素与通量,从水文学角度改进了 TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability) 模型中的降雨入渗过程,提高了模型对灾害的预报能力;He 等^[11]通过耦合 CREST 水文模型与 SLIDE 滑坡模型构建出水文-滑坡耦合模型 (CRESLIDE),系统考虑了前期土壤含水量和降雨入渗过程,其预报效果优于单一的 SLIDE 模型;包红军等^[12]在我国陕西省月河流域开展的预报试验表明,CRESLIDE 模型在预报滑坡的时空分布上表现稳定;Wang 等^[13]利用地形湿度指数对土壤水进行降尺度,将不同分辨率的水文模型和边坡稳定模型连接起来,实现区域性大范围洪水和滑坡灾害的模拟;Chen 等^[14]将水文模型与三维边坡稳定模型耦合建立了 iHydroSlide3D 模型,弥补了二维边坡稳定模型无法描述滑坡几何特性的缺点。

当前 CRESLIDE 模型的应用多局限于中小尺度区域,当扩展至全国等大尺度范围时,面临双重挑

战:①需要更高精度的驱动数据与土水参数支持;②受到计算资源需求的显著制约^[15-17]。本文基于 CRESLIDE 模型,嵌入智能网格降水数据^[18]、土壤厚度模型和下垫面属性信息,并行化模型空间迭代过程,实现全国尺度下洪水和滑坡灾害的准确、高效、滚动预报,并进行验证分析,以期应急转移处置方案的制定以及降低和规避灾害风险提供科学依据和技术支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文针对全国尺度下洪水和滑坡灾害进行预报和验证分析。中国地理特征空间分布如图 1 所示(本文地图均基于审图号为 GS2023 (2767) 号的标准地图制作)。我国整体地势西高东低,呈三级阶梯状分布,在大起伏高山地区及丘陵地带坡度大,个别地区超过 60°,而在各大平原及盆地沉积地形区坡度起伏平缓;地表覆盖以草地、林地、裸地、耕地为主;土壤类型主要为壤土,全国各地均有分布,其间分散着各类砂土和黏土。一般而言,在土壤质地松软且坡度较陡的山区,滑坡等地质灾害的发生率较高。

受纬度、气象因子、地形地貌等因素的影响,我国气候区划特征明显,大致划分为东部季风区、西北干旱半干旱区及青藏高原高寒区 3 个气候区,降水条件复杂且空间分布不均,总体呈西北低、东南高的特点。东部季风区气候湿润,雨热同期,降水年内分配不均,主要集中在 5—9 月,年降水量大于 400 mm,是洪涝灾害频发的地区。

1.2 数据来源

气象驱动数据作为模型的重要输入,包括降水量和蒸散发。降水量采用国家气象中心提供的智能网格降水量预报数据^[19],时空分辨率分别为 1 h 和 5 km。蒸散发数据由全球陆面数据同化系统提供,并使用双线性插值将原时空分辨率分别为 3 h、0.25°的蒸散发数据缩小到 5 km 的分辨率,并进一步使用线性插值缩小至 1 h 尺度。

静态下垫面数据包括 DEM、地表覆盖以及土壤类型数据,其中 DEM 数据下载自地理空间数据云平台网站 (<https://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 5 km;地表覆盖数据采用 GlobeLand30-2010 产品,空间分辨率为 30 m,研究中将其重采样至 5 km 以匹配

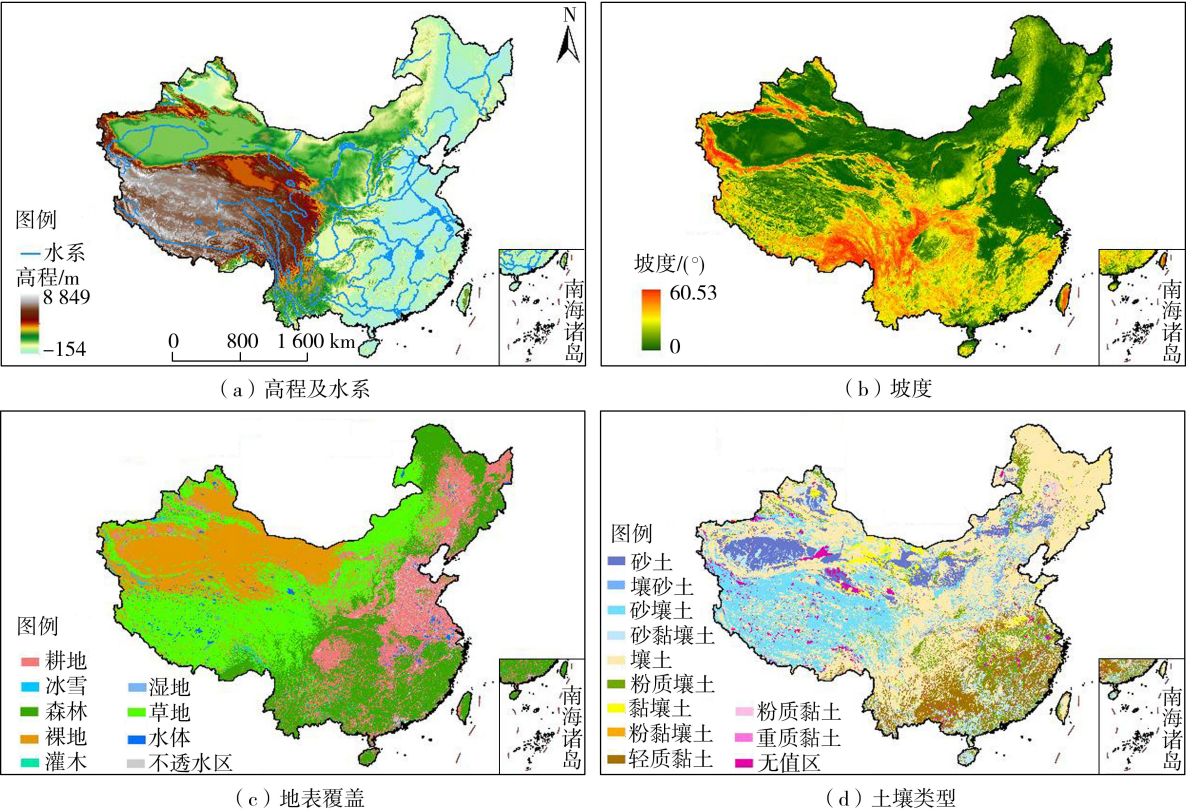


图 1 中国地理特征空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of geographical features in China

其他数据资料;土壤类型数据来自世界土壤数据库 (V1.2 版本),空间分辨率为 1 km,同样将其重采样至 5 km。洪水和滑坡灾害数据来源于中国气象局,该数据记录了 2020—2023 年全国范围内洪水及滑坡灾害的位置、发生时间、人员财产损失等信息,选取其中 2020—2021 年数据进行模型率定,2022—2023 年数据用于预报结果的验证评估。

2 研究方法

2.1 CRESLIDE 模型

CRESLIDE 模型是由模拟水文过程的 CREST 模型^[20]和量化边坡稳定性的 SLIDE 模型^[21]耦合构建(图 2)。CREST 模型可以在网格尺度上模拟水量和能量通量的时空变化,其中产流过程与新安江模型相同^[22]。汇流部分采用多线性水库在每个时间步长上分别模拟地表径流和壤中流,计算上游网格的产流到达下游网格的汇流时间,通过考虑产流和汇流之间的反馈机制,使模型对降雨入渗和径流过程的模拟更加贴合实际。

SLIDE 模型考虑了土壤黏聚力对土壤抗剪强度的贡献,并通过模拟降雨入渗过程评估其对土壤下渗层厚度的影响。模型假设滑坡发生的主要特征在于饱和土壤区域不断扩展,直至在滑动面处形成具有有限厚度的饱和均匀土层,从而达到失稳状态。

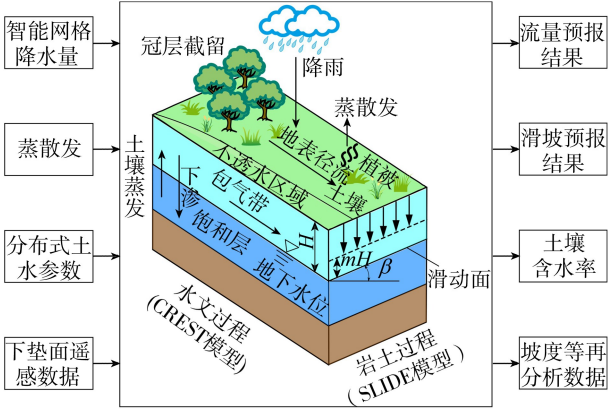


图 2 CRESLIDE 模型系统框架

Fig. 2 Systematic framework of CRESLIDE model

为此,土层被划分为两个区域:①部分饱和层,以土壤含水率进行表征;②完全饱和层,与降雨、土壤水等因素密切相关,其厚度记作 mH ,其中 H 为土壤厚度, m 为介于 0~1 之间的无量纲参数,其计算公式如下:

$$m = W/[nH(1 - S_r)] \tag{1}$$

式中: W 为土壤蓄水量; n 为孔隙度; S_r 为土壤含水率。

土壤黏聚力包括有效黏聚力和表观黏聚力,有效黏聚力取决于土壤类型,而表观黏聚力与基质吸力相关,基质吸力又取决于土壤含水率。土壤黏聚力计算公式为

$$c=c'+AS_r(1-S_r)^{\lambda}(1-m)^{\alpha} \quad (2)$$

式中: c 为土壤黏聚力; c' 为有效黏聚力; A 、 λ 为与土壤类型有关的参数; α 为表示黏聚力曲线非线性趋势的参数。

边坡稳定性用安全系数(F_s)来表征, $F_s>1$ 表示边坡稳定, $F_s<1$ 表示边坡失稳, $F_s=1$ 表示边坡处于临界状态, F_s 计算公式为

$$F_s=\frac{[\cot\beta\tan\varphi'(\Gamma+m(n_w-1))+C\Omega]/(\Gamma+mn_w)}{\quad} \quad (3)$$

式中: β 为坡度角; φ' 为摩擦角; Γ 为容重、孔隙度和土壤含水率的函数; n_w 为孔隙度和土壤含水率的函数; Ω 为坡度和地下水埋深的函数。本文根据 F_s 值的大小将滑坡风险划分为 4 个等级: $0\leq F_s<1$ 表示风险很高; $1\leq F_s<2$ 表示风险较高; $2\leq F_s<3$ 表示风险一般; $F_s\geq 3$ 表示风险较低。

通过耦合 CREST 水文模型,进一步考虑植被截留、蒸散发、降雨入渗、产流、汇流和地表径流的再下渗等过程,从而为 SLIDE 模型提供更加准确的土壤含水量及初始条件,提高滑坡模拟预报的精度,并实现同时预报洪水和滑坡灾害的目标^[23]。

2.2 土壤厚度模型及敏感区域处理

土壤厚度(即滑动面的土壤层深度)对边坡稳定性评价至关重要,若采用简单的假设(如在整个区域上采用均匀的土壤厚度)将造成估计误差,且受复杂地形的限制,在较大尺度上获取土壤厚度空间分布的难度较大。因此,本文引入参数化的土壤厚度模型^[24],通过坡度与土壤厚度建立联系,其计算公式为

$$H_{i,j}=H_{\max}-\frac{(\tan\beta_{i,j}-\tan\beta_{\min})(H_{\max}-H_{\min})}{\tan\beta_{\max}-\tan\beta_{\min}} \quad (4)$$

式中: $H_{i,j}$ 为网格单元(i,j)的土壤厚度; $H_{\min}$ 、 $H_{\max}$ 分别为研究区内土壤的最小和最大厚度; $\beta_{i,j}$ 为网格单元(i,j)的坡度; $\beta_{\min}$ 、 $\beta_{\max}$ 分别为研究区内最小和最大坡度值。研究表明,浅层滑坡的土壤厚度一般小

于 2 m,下限值为 0.1 m^[25]。滑坡模型其他参数均由土壤类型确定^[26],不同土壤类型的参数取值如表 1 所示。

滑坡发生的前提是土体失稳,因此该类灾害不会发生在湖泊、沙漠、人造地表及耕地平原地区。模型中预先采用地表覆盖等遥感数据识别以上无条件稳定区域,而对于城市和山区交界处,放宽过滤条件,即不能忽略此类非常靠近人造地表区域的滑坡。此外,针对我国西部地区对滑坡灾害较为敏感的情况,利用模型通过累积降水量动态调整滑坡易发性,若在模拟时间节点前后 24 h 内的累积降水量为 0,则不计入滑坡计算,反之则正常输出预报结果。

2.3 基于智能网格降水的滚动预报模式

无缝隙精细化智能网格降水预报数据是通过雷达-卫星-地面降水观测多源降水融合技术形成的覆盖中国区域完整的降水融合产品,由临近、短时、中短期、延伸期多尺度不同时效($0\sim 4\text{ h}$ 、 $>4\sim 24\text{ h}$ 、 $>1\sim 10\text{ d}$ 、 $>10\sim 30\text{ d}$)无缝衔接的模式生成,预报时可快速融入最新观测资料,实现逐小时滚动更新^[27]。

本文在 CRESLIDE 模型中增加了对多种格式智能网格降水的读取方法,以适应多种预报模式的需求。为实现洪水及滑坡灾害的滚动预报,将模型设置为根据不同的预报模式,自动保存前一次模拟结果作为下次启动的初始条件,实现水文过程变量的无缝衔接,并为滑坡模块提供实时土壤含水量。为了进一步促进滚动预报结果的快速生成,研究中基于 OpenMP 架构对模型的逐网格空间迭代过程进行简单的并行处理^[28]。具体而言,利用 Fortran 语言中列优先的存储模式,将外层迭代划分为多个片段,即将研究区域分解为不同的矩阵块,使用多个核心同时分别处理这些矩阵块,以达到减少计算耗时的目的。模型可输出包括流量、安全系数、滑坡灾害风险、土壤含水率以及地形坡度等空间分布图,展示灾害的演进过程,为我国中小河流洪水、山洪及滑坡泥

表 1 不同类型土壤的参数取值

Table 1 Parameter values for various soil types

土壤类型	土壤黏聚力/kPa	饱和水力传导度/(10^{-3} m/s)	孔隙度	摩擦角/($^{\circ}$)	土壤干容重/(kN/m^3)	田间持水量/(m^3/m^3)	凋萎含水量/(m^3/m^3)
粉质黏土	30	0.11	0.49	18.5	18.0	0.36	0.21
重质黏土	40	0.13	0.47	16.5	19.5	0.36	0.21
轻质黏土	40	0.13	0.47	16.5	19.5	0.36	0.21
粉黏壤土	50	0.14	0.48	16.5	14.0	0.34	0.19
黏壤土	35	0.27	0.46	20.0	14.0	0.34	0.21
粉质壤土	9	0.25	0.46	24.0	14.0	0.30	0.15
壤土	10	0.45	0.43	22.5	13.0	0.26	0.12
砂黏壤土	29	0.66	0.39	20.0	15.0	0.33	0.18
砂壤土	6	1.02	0.40	32.0	15.0	0.23	0.10
壤砂土	8	1.78	0.42	28.5	20.5	0.14	0.06
砂土	5	2.44	0.43	40.0	21.0	0.12	0.04

石流灾害的预警预报提供服务。

2.4 模型验证方法

考虑到实测数据的限制,研究中采用灾害发生时的位置坐标作为验证数据,进而将灾害事件转化为二分类问题,利用受试者操作特征曲线(ROC)进行评价^[29],两个统计指标的计算公式为

T_{PR} = T_p / (T_p + F_N) \tag{5}

F_{PR} = F_p / (F_p + T_N) \tag{6}

式中: T_{PR} 为命中率,表示灾害区域被正确预测的比例; F_{PR} 为空报率,表示非灾害区域被错误预测的比例; T_p 为真阳性; F_N 为假阴性; F_p 为假阳性; T_N 为真阴性。具体计算时,首先将各个网格的实测值和对应的预测值统一按照预测值的大小进行排序(滑坡模型升序,水文模型降序),然后分别设定不同的分类阈值(滑坡模型为安全系数,水文模型为流量)。每个阈值下,预测值大于(或小于)该阈值的样本被判定为灾害点,其中实测为灾害点的样本数即为 T_p ,而实测为非灾害点的样本数为 F_p ,所有实测灾害点样本数减去 T_p 即为 F_N ,表示预报的非灾害点在灾害实况区域内,所有实测非灾害点样本数减去 F_p 即为 T_N ,表示预报的非灾害点在灾害实况区域外。利用 ROC 曲线下面积(AUC)反映全局准确度,其范围为 0~1,值越高表示模型的性能越好。

3 结果与分析

3.1 多核并行计算加速测试

本文对 CRESLIDE 模型的测试在华为 MateBook D16 上进行,硬件配置为 14 核 CPU 和 16GB 运行内存。测试过程中,通过改变并行线程数来衡量 CRESLIDE 模型的多核计算性能。考虑到计算资源的限制,最大线程数设置为 40,而模型外循环的迭代次数为 708,远超最大线程数,保证了单一线程能够同时执行多项任务,并行有效。图 3 揭示了加速比、加速效率与线程数之间的相关关系,线程数为 39 时加速比达到峰值 5.53,说明并行技术一

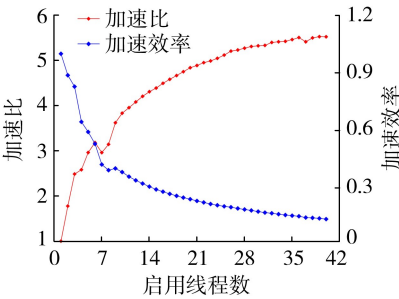


图3 不同线程数的加速比及加速效率
Fig.3 Speed-up ratio and efficiency for different numbers of threads

定程度上提高了模型的计算效率。由于模型中并行代码占比小于串行代码,整体加速效果受限于串行计算的时间;加速效率则随线程数的增加逐渐降低,最低效率值为 0.14,再次反映了模型中并行部分占比较少少的情况,同时也表明在应用过程中平衡加速比与加速效率的重要性。需要指出的是,本文中 CRESLIDE 模型单独运行,更加关注加速比的提升,即对绝对运行时间的缩短程度,因此设置最终线程数为 39 进行后续灾害的预报。

3.2 长序列洪水和滑坡灾害预报效果评估

通过对灾害数据分析发现,我国洪水和滑坡灾害集中发生在每年汛期的 6—8 月,因此本文选取 2022—2023 年 6—8 月的预报结果进行分析。

3.2.1 洪水和滑坡灾害时空分布

图 4 为模型对 2022—2023 年 6—8 月长序列洪水和滑坡灾害预报结果。2022 年洪水灾害预报结果(图 4(a))表明,6 月洪水主要集中在华北、华东和华南等地,模型低估了部分华东和华北地区的洪水,表明水文模型存在一些不确定性,此外,大部分地区的实报洪水灾害位置都位于计算流量较高网格内;7、8 月除北京、广西等地持续遭受洪水灾害外,陕西、宁夏、甘肃、青海一带洪水也开始集中出现。2022 年滑坡灾害预报结果(图 4(b))表明,6—8 月滑坡灾害共计 516 处,其中 6、7、8 月分别为 248、141、127 处。6 月滑坡集中在我国中部以南地区,7—8 月北方地区滑坡开始增多,但西南一带滑坡灾害风险持续较高。通过在长序列计算中考虑最不利情况,记录每个网格的安全系数最小值作为最终预报值,可以发现安全系数 $F_s < 1$ 的网格主要分布在西南地区,即该地区边坡失稳概率大。

2023 年洪水灾害预报结果如图 4(c) 所示,华北和西南部分地区处于流量高值区域,超过 3000 m³/s,与实报洪灾位置较为符合,而在河南、湖北一带,模型高估了该地区的洪水。时间分布上,6—8 月中小河流洪水和山洪灾害共计 218 起,6、7、8 月分别为 69、88、61 起,较 2022 年洪水灾害数量有所减少。2023 年大部分滑坡点(图 4(d))分布在我国西南和华中部分地区,其中重庆、贵州、云南等为滑坡灾害频发地。这些地区由于其土壤质地较为松软且坡度较陡,在汛期经历长时间降雨后,土壤处于较饱和状态,极易发生滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害。具体而言,6 月共记录滑坡 79 处,大多集中在我国中部以南区域,7、8 月滑坡开始大规模出现,共记录 281 处,其中西南地区占比大,且预报的灾害风险较高。

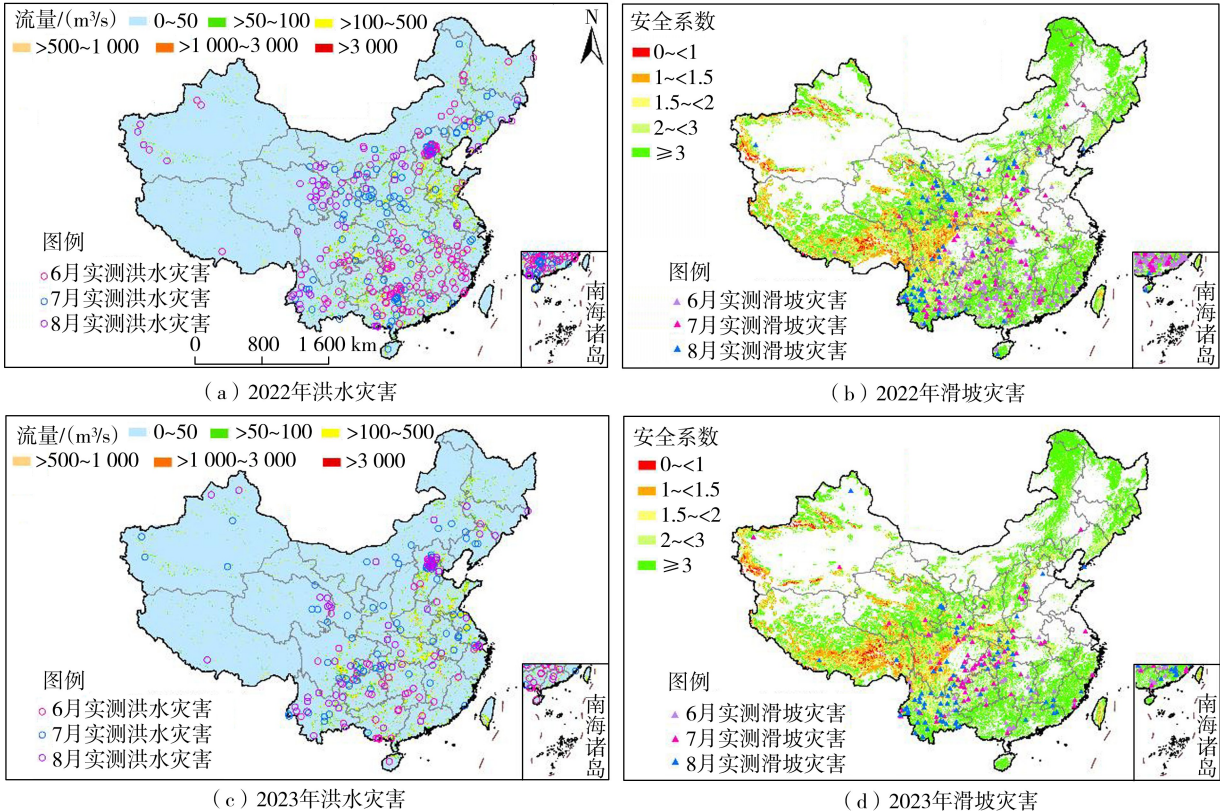


图 4 2022—2023 年 6—8 月洪水和滑坡灾害时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distributions of flood and landslide disasters from June to August in 2022-2023

3.2.2 模型预报结果精度评价

利用 AUC 指标分析耦合模型的预报精度,结果如图 5 所示。2022 年、2023 年洪水灾害预报精度指标 AUC 值分别为 0.89、0.84,由于模型对河南、湖北等地洪水的高估,导致 2023 年预报精度有所降低,但整体上具备对洪水灾害的预报能力。对于滑坡灾害而言,2022 年、2023 年的 AUC 值分别为 0.69、0.70,表明模型可以较好地捕捉滑坡事件。需要指出的是,在西藏和新疆的部分区域,由于地处偏远,存在滑坡点难以统计的情况,会增加模型的误差,体现在模型预报能力上,可能会存在过度预报的情况。在后续研究中需要进一步加强对敏感及非敏

感区域的识别,以提升模型预报精度。此外,可以发现洪水灾害的预报精度明显优于滑坡灾害,相比于水文过程,边坡失稳过程的影响因素更多,如地质岩性、参数不确定性等在本文中尚未考虑,加之尺度较大,易受到复杂人类活动影响,从而导致预报精度有所降低。

3.3 降水引发的灾害个例预报效果评估

2022 年 6 月 2—10 日,云南省昭通市巧家县遭受暴雨天气,局部降水量达 80 mm,辖区内多点发生山洪、泥石流和山体滑坡灾害,受灾人口 1 452 人,造成直接经济损失 154.15 万元。图 6 为巧家县在该时段内的洪水流量和滑坡灾害风险分布(星号表示受灾最严重的区域,下图同),预报结果显示受灾地区洪水流量有超过 5 000 m³/s 的区域,且到 10 日 1 时仍有较大流量存在,同时该地处于滑坡灾害高风险区域,极易引发泥石流灾害。在灾害演进过程中,仅巧家县南部部分地区被预报为风险很高的区域,模型对于多种灾害的捕捉能力不足,在模型后续改进中,将在滑坡灾害风险计算中考虑地表径流,以提高对泥石流等次生灾害的风险预报能力。

2022 年 6 月 19 日 4 时至 20 日 8 时,湖南省怀化市辰溪县遭受暴雨洪涝灾害,造成街镇洪水内涝,房屋被冲毁 50 余间,其中谭家场乡、柿溪乡、修溪镇受灾最为严重。智能降水产品(图 7(a)~(c))显示

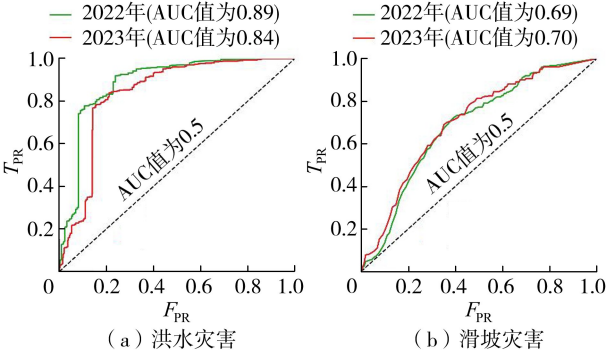


图 5 2022—2023 年洪水和滑坡灾害预报精度

Fig. 5 Forecast accuracy of flood and landslide disasters from 2022 to 2023

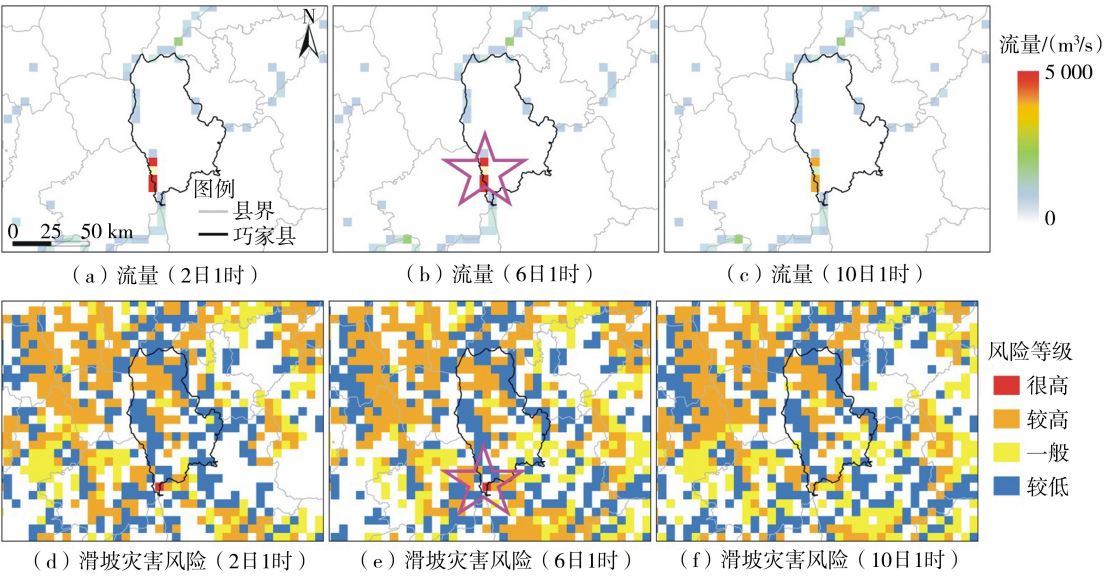


图 6 2022 年 6 月巧家县洪水流量和滑坡灾害风险分布

Fig. 6 Flood discharge and landslide disaster risk distributions in Qiaojia County in June 2022

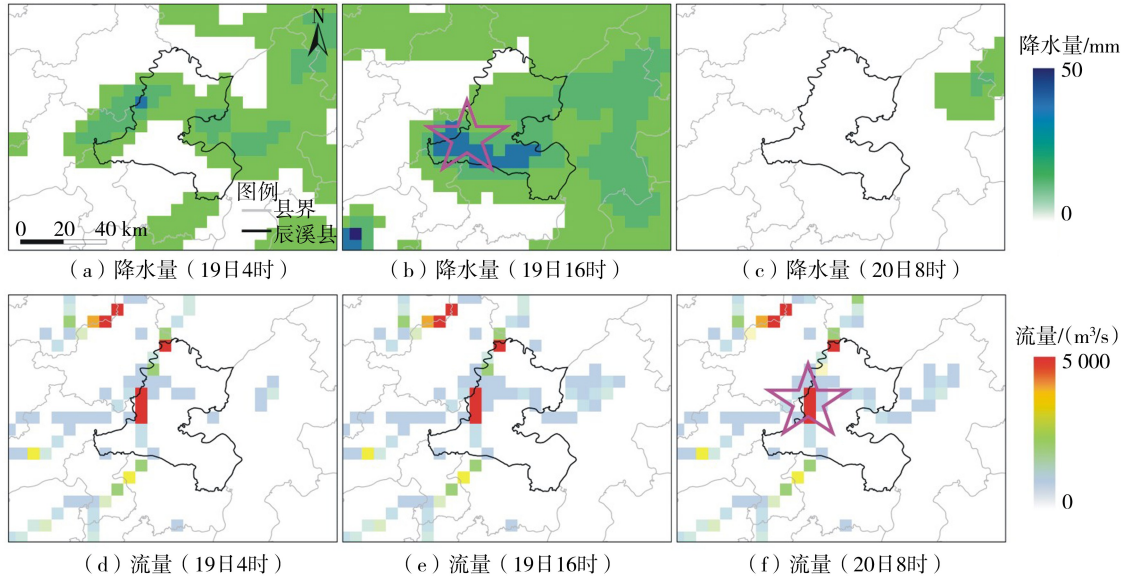


图 7 2022 年 6 月辰溪县降水量与流量分布

Fig. 7 Precipitation and discharge distributions in Chenxi County in June 2022

该区域在 19 日 4 时出现暴雨,随后降雨范围逐渐扩大,至 16 时几乎笼罩辰溪县全境,部分地区 1 h 降水量超 50 mm,此后暴雨中心向东南方向迁移,于 20 日 8 时前后逐渐停止。模型流量预报结果(图 7(d)~(f))显示,降雨初期辰溪县已出现网格流量超过 5000 m³/s 的区域,且洪水持续不断,在降雨过境后依然存在,主要是因为汛期土壤湿度大,随着降雨的推进趋向饱和,而饱和的土壤水仍可以发展为洪水,并且洪峰需要一定的消退时间。对辰溪县洪水灾害个例检验表明,模型较好地捕捉了本次洪灾过程。

2023 年 7 月 25 日 2—15 时,湖北恩施咸丰县遭遇大到暴雨天气,此轮降雨造成 11 个乡镇 3.48 万人

受灾,部分乡镇道路基础设施严重受损,公路、通信大面积中断。图 8 的预报结果显示,25 日 2 时咸丰县降雨开始增加,部分地区的 1 h 降水量达 40 mm,且在 8 时并无消退,新的暴雨中心又在逐渐接近,随后降雨逐渐减少。流量预报结果表明,当日 2 时已有部分网格流量超 5000 m³/s,到 15 时较大流量的网格数量增多,洪水形势更加严峻。本次对咸丰县的个例检验表明,模型在评估此类短时强降雨导致的洪水灾害方面具有较好的预报能力。

2023 年 7 月 31 日晚,湖北省十堰市竹溪县出现持续强降雨天气过程,3 h 内累积降水量超过 100 mm,引发山洪,造成滑坡、泥石流灾害。图 9 为 7 月 31 日 18—23 时的降水和滑坡灾害风险分布,

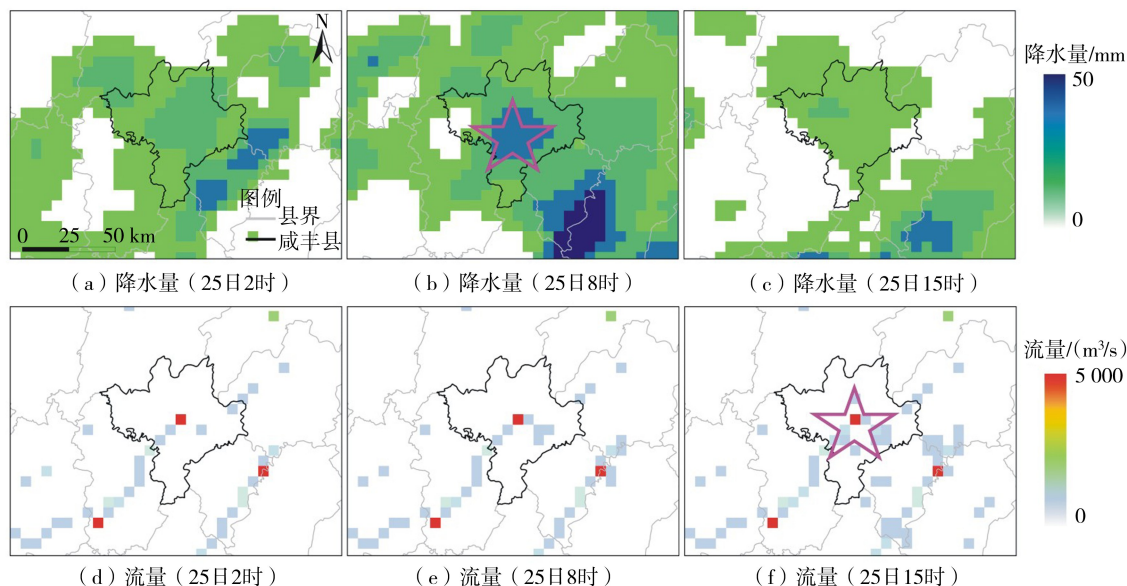


图 8 2023 年 7 月 25 日咸丰县降水量和流量分布

Fig. 8 Precipitation and discharge distributions in Xianfeng County on July 25, 2023

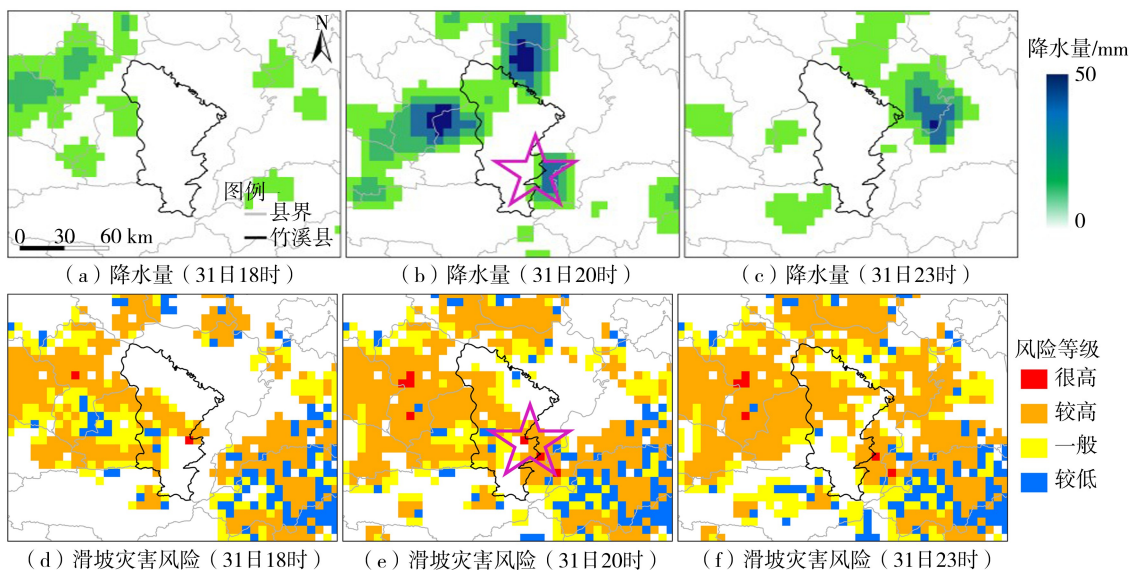


图 9 2023 年 7 月 31 日竹溪县降水量和滑坡灾害风险分布

Fig. 9 Precipitation and landslide disaster risk distributions in Zhuxi County on July 31, 2023

结果显示,18 时降雨中心逐渐向竹溪县靠近,20 时竹溪县境内出现大面积降雨,一些地区 1 h 降水量达 35 mm。滑坡灾害预报结果也显示,从 18—23 时灾害风险区域不断扩展,大部分地区被预报为风险较高的区域,个别地区位于风险很高区域,与报道的竹溪县灾害情况相符,表明模型成功捕捉到本次短时强降雨引发的滑坡灾害事件。

4 结 论

a. 并行技术在一定程度上提升了模型的计算效率,并行后的 CRESLIDE 模型加速比与线程数呈正相关关系,加速比峰值为 5.53,但模型的整体加速效果受限于串行部分的计算时间;加速效率与线

程数呈负相关关系,最低效率值为 0.14。CRESLIDE 模型在应用过程中需进一步平衡加速比与效率之间的关系,保证计算资源的最优配置,本文设置最终线程数为 39。

b. 时空分布上,我国洪水灾害整体上集中于华北和西南一带,大部分地区的实报洪水灾害位置处于计算流量较高的网格内;滑坡灾害则集中分布在我国南方地区,且预报结果表明,安全系数小于 1 的网格主要分布在西南等地,该区域边坡失稳概率大,7—8 月北方滑坡开始增加,与 2022 年相比,2023 年的洪水和滑坡灾害事件均有所减少。

c. 在长序列检验中,模型对区域性洪水和滑坡灾害的整体预报效果较好,精度评价指标 AUC 值均

超过或接近 0.7,洪水灾害的预报效果优于滑坡灾害;在短时强降水引发的灾害个例检验中,模型计算的灾害发生位置和时间与实际报道相符,即模型捕捉灾害事件的能力较强。针对模型在部分地区出现的空报、漏报现象,后续应继续加强对敏感及非敏感区域的预识别,并将地表径流纳入滑坡风险的计算中,考虑洪水和滑坡的链式效应,进而对灾害风险进行更加准确的评价。

参考文献:

[1] PETLEY D. Global patterns of loss of life from landslides [J]. *Geology*,2012,40(10):927-930.

[2] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2022,50(3):55-64. (CHAO Lijun, ZHANG Ke, CHEN Xinyu, et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2022,50(3):55-64. (in Chinese))

[3] 周宇阳,宋豫秦,沈焕庭. 洪水风险认知研究综述与展望[J]. *亚热带资源与环境学报*,2015,10(2):1-8. (ZHOU Yuyang, SONG Yuqin, SHEN Huanting. A review of flood risk perceptions [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2015, 10 (2): 1-8. (in Chinese))

[4] WANG Sheng,ZHANG Ke,CHAO Lijun,et al. Exploring the utility of radar and satellite-sensed precipitation and their dynamic bias correction for integrated prediction of flood and landslide hazards [J]. *Journal of Hydrology*, 2021,603:126964.

[5] 刘彤,闫天池. 我国的主要气象灾害及其经济损失[J]. *自然灾害学报*,2011,20(2):90-95. (LIU Tong, YAN Tianchi. Main meteorological disasters in China and their economic losses[J]. *Journal of Natural Disasters*,2011,20(2):90-95. (in Chinese))

[6] 杨阳,徐海峰,何勇军,等. 降雨山洪引发滑坡预报预警研究现状及评述[J]. *人民黄河*,2014,36(8):43-46. (YANG Yang, XU Haifeng, HE Yongjun, et al. The research status and review of rainfall and flash floods triggered landslide forecasting and warning [J]. *Yellow River*,2014,36(8):43-46. (in Chinese))

[7] SEGONI S,PICIULLO L,GARIANO S L. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence[J]. *Landslides*,2018,15(8):1483-1501.

[8] JIA Guoqiang,TANG Qihong,XU Ximeng. Evaluating the performances of satellite-based rainfall data for global rainfall-induced landslide warnings[J]. *Landslides*,2020,17(2):283-299.

[9] 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*,2008,22(4):532-545.

[10] ZHANG Ke, XUE Xianwu, HONG Yang, et al. iCRESTRIGRS:a coupled modeling system for cascading flood-landslide disaster forecasting [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,2016,20(12):5035-5048.

[11] HE Xiaogang, HONG Yang, VERGARA H, et al. Development of a coupled hydrological-geotechnical framework for rainfall-induced landslides prediction [J]. *Journal of Hydrology*,2016,543:395-405.

[12] 包红军,张珂,晁丽君,等. 基于水土耦合机制的流域滑坡预报研究[J]. *气象*,2017,43(9):1117-1129. (BAO Hongjun, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Landslides forecasting using a physically-based, coupled hydrological-geotechnical framework [J]. *Meteorological Monthly*,2017,43(9):1117-1129. (in Chinese))

[13] WANG Sheng, ZHANG Ke, VAN BEEK L P H, et al. Physically-based landslide prediction over a large region: scaling low-resolution hydrological model results for high-resolution slope stability assessment [J]. *Environmental Modelling & Software*,2020,124:104607.

[14] CHEN Guoding, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. iHydroSlide3D v1. 0: an advanced hydrological-geotechnical model for hydrological simulation and three-dimensional landslide prediction [J]. *Geoscientific Model Development*,2023,16(10):2915-2937.

[15] RAI S, ALVIOLI M, ROSSI M, et al. Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach [J]. *Geoscientific Model Development*,2014,7(2):495-514.

[16] MONDINI A C, GUZZETTI F, MELILLO M. Deep learning forecast of rainfall-induced shallow landslides [J]. *Nature Communications*,2023,14(1):2466.

[17] 陈悦丽,陈德辉,李泽椿,等. 降雨型滑坡的集合预报模型及其初步应用的试验研究[J]. *大气科学*,2016,40(3):515-527. (CHEN Yueli, CHEN Dehui, LI Zechun, et al. An ensemble prediction model for rainfall-induced landslides and its preliminary application [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2016,40(3):515-527. (in Chinese))

[18] 包红军,张恒德,许凤雯,等. 国家级水文气象预报业务技术进展与挑战 [J]. *气象*, 2021, 47 (6): 671-684. (BAO Hongjun, ZHANG Hengde, XU Fengwen, et al. Progress and challenge of national level operational technology for hydrometeorological forecasting [J]. *METEOROLOGICAL MONTHLY*,2021,47(6):671-684. (in Chinese))

[19] 韦青,代刊,林建,等. 2016—2018 年全国智能网格降水及温度预报检验评估 [J]. *气象*, 2020, 46 (10): 1272-

1285. (WEI Qing, DAI Kan, LIN Jian, et al. Evaluation on the 2016-2018 fine gridded precipitation and temperature forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(10): 1272-1285. (in Chinese))

[20] WANG Jiahu, HONG Yang, LI Li, et al. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(1): 84-98.

[21] MONTRASIO L, VALENTINO R. A model for triggering mechanisms of shallow landslides[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8(5): 1149-1159.

[22] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinanjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology, 2012, 468-469: 47-62.

[23] 王晟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于集合模拟的汉江上游洪水与滑坡灾害风险评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 70-76. (WANG Sheng, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Assessment of flood and landslide hazard risk based on ensemble simulation over upstream of the Han River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 70-76. (in Chinese))

[24] GATANI 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): W05508.

[25] MALONE B, SEARLE R. Improvements to the Australian national soil thickness map using an integrated data mining approach[J]. Geoderma, 2020, 377: 114579.

[26] ZHANG Yonggen, SCHAAP M G, ZHA Yuanyuan. A high-resolution global map of soil hydraulic properties produced by a hierarchical parameterization of a physically based water retention model[J]. Water Resources Research, 2018, 54(12): 9774-9790.

[27] 金荣花, 代刊, 赵瑞霞, 等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2019, 45(4): 445-457. (JIN Ronghua, DAI Kan, ZHAO Ruixia, et al. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(4): 445-457. (in Chinese))

[28] CHEN Guoding, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. PHyL v1.0: a parallel, flexible, and advanced software for hydrological and slope stability modeling at a regional scale[J]. Environmental Modelling & Software, 2024, 172: 105882.

[29] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874. (收稿日期: 2024-07-22 编辑: 施业)

(上接第 82 页)

[33] 姚孝迭. 对永定河历史洪水几次波及北京城区的探讨[J]. 海河水利, 1999(1): 46-47. (YAO Xiaodie. Discussion on several historical floods of Yongding River affecting Beijing urban area[J]. Haihe Water Resources, 1999(1): 46-47. (in Chinese))

[34] 刘军梅, 杨毅, 郭金燕, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水北京市永定河洪水调查分析及对设计洪水的建议[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(1): 52-57. (LIU Junmei, YANG Yi, GUO Jinyan, et al. Flood investigation and analysis of Yongding River, Beijing of Haihe “23·7” basin-wide extreme flood and suggestions on flood design[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(1): 52-57. (in Chinese))

[35] 水利部海河水利委员会. 海河“23·7”流域性特大洪水调查分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.

[36] 中华人民共和国水利部. 海河流域永定河发生 2023 年第 1 号洪水[EB/OL]. (2023-07-31) [2024-04-17]. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/202307/t20230731_1676775.html.

[37] 刘昌军, 周剑, 文磊, 等. 中小流域时空变源混合产流模型及参数区域化方法研究[J]. 中国水利水电科学研究学报, 2021, 19(1): 99-114. (LIU Changjun, ZHOU Jian, WEN Lei, et al. Research on spatio temporally-mixed runoff model and parameter regionalization for small and medium-sized catchments[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(1): 99-114. (in Chinese))

[38] 刘昌军, 文磊, 周剑, 等. 小流域暴雨山洪水文模型与水动力学方法计算比较分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 262-270. (LIU Changjun, WEN Lei, ZHOU Jian, et al. Comparative analysis of hydrological and hydrodynamic calculation method for flash flood in small watershed[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 262-270. (in Chinese))

[39] 张大伟, 李丹勋, 陈稚聪, 等. 溃堤洪水的一维、二维耦合水动力模型及应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 149-154. (ZHANG Dawei, LI Danxun, CHEN Zhicong, et al. Coupled one and two-dimensional hydrodynamic models for levee-breach flood and its application[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 149-154. (in Chinese)) (收稿日期: 2024-09-08 编辑: 施业)