

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.010

基于集合模拟的汉江上游洪水与滑坡灾害风险评估

王 晟^{1,2,3}, 张 珂^{1,2,3,4}, 晁丽君^{1,3,4}, 陈国鼎^{1,3}, 夏 怡^{1,3}, 包红军^{4,5}, 张春堂^{1,3}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水文水资源学院, 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. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要:采用基于拉丁超立方抽样的集合模拟方法,分析了汉江上游区域洪水与滑坡灾害的危险性,并利用层次分析法计算了6种承灾因子的综合易损度,进而对区域内洪水与滑坡灾害的风险进行了评估。结果表明:集合模拟得到的洪水流量过程与实测流量过程的相关系数为0.66~0.69,滑坡模拟的全局精度为0.80~0.95;大部分区域洪水灾害危险度较低,其中极低危险区占94.63%,高危险区以上占0.18%,但滑坡灾害危险度高,高危险区以上占比达到了7.21%;超过80%的区域综合易损度较低,综合易损度等级与人类活动密切相关;洪水灾害风险整体偏低,高风险以上区域占0.1%,滑坡灾害高风险区集中于西南和东部,灾害综合风险空间分布与滑坡灾害风险较为相似。

关键词:洪水灾害;滑坡灾害;集合模拟;综合易损度;汉江上游

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2023)06-0070-07

Assessment of flood and landslide hazard risk based on ensemble simulation over upstream of the Han River// WANG Sheng^{1,2,3}, ZHANG Ke^{1,2,3,4}, CHAO Lijun^{1,3,4}, CHEN Guoding^{1,3}, XIA Yi^{1,3}, BAO Hongjun^{4,5}, ZHANG Chuntang^{1,3} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210098, China; 5. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the set simulation method using Latin hypercube sampling, the risk of flood and landslide disasters in the upper reaches of the Han River region was analyzed, and the comprehensive vulnerability of six disaster bearing factors was calculated using the analytic hierarchy process. The risk of flood and landslide disasters in the region was then evaluated. The results show that the correlation coefficient between the flood flow process obtained from ensemble simulation and the measured flow process is 0.66 to 0.69, and the global accuracy of landslide simulation is 0.80 to 0.95. The risk of flood disasters is relatively low in most areas, with extremely low risk areas accounting for 94.63% and high risk areas accounting for 0.18%. However, the risk of landslide disasters is high, with a proportion of 7.21% above high risk areas. More than 80% of regions have low comprehensive vulnerability levels, which are closely related to human activities. The overall risk of flood disasters is relatively low, with areas above high risk accounting for 0.1%. High risk areas of landslide disasters are concentrated in the southwest and east, and the spatial distribution of comprehensive disaster risk is relatively similar to that of landslide disasters.

Key words: flood hazard; landslide hazard; ensemble simulation; comprehensive vulnerability; upstream of the Han River

降雨诱发的洪水与滑坡灾害是世界范围内频发的两种自然灾害,严重威胁人类生命和经济财产安

全^[1]。洪水与滑坡灾害的研究一直受到广泛的关注,近年来,随着研究的深入和技术手段的进步,洪

基金项目:国家自然科学基金项目(522031511);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B220202029)

作者简介:王晟(1992—),男,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:shengwang@hhu.edu.cn

通信作者:张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

水与滑坡灾害协同研究成为重点^[2-3]。一方面,洪水的冲刷和入渗降低了边坡的稳定性,容易引发滑坡灾害;另一方面,滑坡体冲入河道则会引发涌浪甚至堵塞河道,造成更为严重的后果。为了降低洪水与滑坡灾害的危险,灾害风险评估就显得十分必要^[4-5]。经典的风险评估理论主要考虑两个方面,即灾害的危险性和承灾体易损性^[6]。对于各类承灾体而言,有些承灾体容易量化(如人口、GDP等),有些则难以通过确切数值来反映其特征(如建筑物、各类自然资源等),研究中通常使用层次分析法来解决这类问题。而随着分布式水文模型的发展应用,通过模型对研究区域内的洪水和滑坡灾害进行风险评估已成为一种新的手段^[7]。

洪水灾害危险性是指洪水对暴露于其中的各类承灾体的直接风险^[8],通常定义为洪水水深和流速的函数^[9-10],二者可通过水文模型和水力学模型进行计算^[11]。然而对水力学模型进行数值求解^[12],所需数据时空分辨率高,计算耗时长,难以适用于大尺度范围^[13]。针对滑坡灾害危险性,目前较少有研究通过滑坡模型的应用来对其危险性进行分析,滑坡模型一般通过边坡稳定模型计算栅格单元的安全系数,判断边坡是否失稳^[14-16]。洪水与滑坡链式灾害近年来受到越来越多的关注^[17],将水文模型和滑坡模型耦合可以同时洪水和滑坡灾害进行模拟研究^[18]。灾害风险是灾害对人民生命财产造成威胁的可能性,这种可能性可通过模型的集合模拟获得^[19]。模型集合模拟方法通常分为3类:不同输入数据、不同参数组合及不同模型结构^[20-21]。在数据较为缺乏和模型结构固定的情况下,改变参数及其组合就成了有效的集合模拟方法^[22]。模型参数通常是对模型涉及的一些物理意义的概化,存在不确定性^[23],因此参数取值通常需要进行大量重复性的抽样工作,才能保证抽样所得参数在参数空间内均匀分布。但因参数众多且其组合繁复,难以适用于分布式模型,而拉丁超立方抽样方法可解决此类问题。拉丁超立方抽样方法在参数累积概率分布上均匀取值,然后将该值反算回参数值,可以确保在有限抽样情况下,参数取值能够均匀分布于参数空间^[24]。

本文以汉江上游为研究区,基于拉丁超立方抽样法进行参数抽样,采用适用于大尺度范围的基于集合模拟的洪水与滑坡灾害网格化风险评估方法,通过不同的参数组合得到洪水与滑坡的模拟结果,利用该结果计算洪水与滑坡灾害的危险性,采用层次分析法计算研究区各类承灾因子的综合易损度,结合灾害危险性和承灾因子综合易损度,对研究区

洪水与滑坡灾害风险进行评估。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

汉江是长江最大的支流,发源于陕西省南部的秦巴山区。汉江上游以丹江口水库为界,位于 $31.85^{\circ}\text{N} \sim 34.17^{\circ}\text{N}$, $106.16^{\circ}\text{E} \sim 110.26^{\circ}\text{E}$,长约925 km,流域面积9.52万 km^2 ,海拔1000~3000 m,地势陡峭,河道比降大。流域年均降水量700~900 mm,降水年内分配不均,主汛期5—10月降水量占全年总降水量的60%以上。由于汉江上游流域降雨年内集中,且山区多陡峭边坡,降雨诱发的滑坡等地质灾害频发,仅2009—2012年滑坡事件就超过900次,造成大量的人员伤亡和经济财产损失。受滑坡灾害统计资料限制,选取汉江上游位于陕西省境内的区域作为分析对象(图1)。

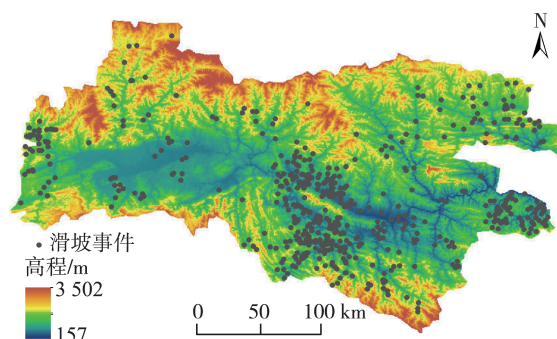


图1 汉江上游流域高程及滑坡灾害点分布

Fig.1 Elevation map and landslide hazard records of upstream of the Han River Basin

1.2 数据来源与处理

降雨数据来源于中国气象局地面站点逐日气象资料集,使用普通克里金方法将其插值为1 km空间分辨率的网格数据。潜在蒸散发数据采用GLDAS数据集^[25],空间分辨率 0.25° ,时间分辨率3 h,使用双线性插值法将其插值为1 km,并累加为日尺度数据。高程数据包括1 km和90 m空间分辨率,其中1 km分辨率的高程数据来自HydroSHEDS^[26],90 m分辨率的高程数据由地理空间数据云提供(<https://www.gscloud.cn>)。土壤类型数据来源于HWSD V1.2数据集^[27],空间分辨率1 km;地表覆盖类型数据来自GlobeLand30-2010产品^[28],空间分辨率30 m,将其重采样至1 km。流量观测数据来自水文年鉴,采用位于汉江上游中段石泉站的流量数据对模型进行率定和验证。滑坡灾害统计资料时间范围为2009—2012年,由陕西省国土资源部门地质调查局提供,包括滑坡位置、发生时间、造成的人员财产损失等。

选取人口密度、GDP 密度、城市化水平、建筑物密度、耕地密度和森林密度 6 种承灾因子进行风险评估。人口密度和 GDP 密度数据来自全球变化科学研究数据出版系统 (<https://www.geodoi.ac.cn/>), 空间分辨率 1 km, 本文选取 2010 年的数据用于风险评估研究。城市化水平数据采用城市人口统计网站公布的数据 (<https://www.citypopulation.de>), 该网站提供每个县级单位的城市化水平, 将其插值到 1 km 空间分辨率。建筑物、耕地和森林数据未找到直接来源, 使用地表覆盖数据按 1 km² 网格计算每种类型在该网格内所占比例作为其密度数据。

2 研究方法

2.1 iCRESLIDE V2.0 模型

iCRESLIDE V2.0 模型包含两个部分, 即 CREST 水文模型与 SLIDE 边坡稳定模型, 二者之间通过降雨入渗过程和土壤含水量进行耦合。由水文模型计算流域内降雨、蒸发、下渗、产流、汇流等水文过程, 由边坡稳定模型计算在降雨入渗和土壤含水量改变情况下边坡稳定性的变化过程。iCRESLIDE V2.0 模型可以同时进行洪水与滑坡的模拟预报, 同时模型中引入了基于地形湿度指数的土壤含水量降尺度方法^[17], 使得不同空间分辨率的水文模型和边坡稳定模型仍可以高效耦合, 解决了当研究区较大时, 在空间分辨率方面水文模型和边坡稳定模型难以同时满足要求的问题。本文 CREST 模型和 SLIDE 模型的空间分辨率分别为 1 km 和 90m, 受数据限制, 模型模拟时段为 2009—2012 年, 其中 2009 年为预热期, 2010—2012 年的模拟结果用作分析研究。

2.2 基于拉丁超立方抽样的集合模拟

基于参数组合的集合模拟需要进行大量的参数抽样工作, 以确保对参数空间进行遍历取值。这就使得抽样得到的参数组合数量巨大, 难以进行实际的模型计算。本文采用拉丁超立方抽样方法进行参数的抽样工作, 研究中选取了影响水文模型精度的饱和和水力传导度、张力水蓄水容量、下渗能力指数、蒸散发折算系数和影响滑坡模型结果的用于计算土壤黏聚力的 2 个指数作为取样参数。假定参数概率

分布为正态分布^[29], 每个参数的分布具有不同的均值与方差。拉丁超立方抽样方法步骤如下: ①计算参数的累积概率分布; ②将累积概率分布均分为 5 等份, 在每一等份内随机取值; ③将该值反算回参数值; ④将取样得到的各个参数值随机组合, 得到一系列的参数组合, 并从中随机选取 200 组参数用作集合模拟。

2.3 洪水与滑坡灾害危险性评估

由于数据资料限制, 风险评估模型采用联合国人道主义事业部定义的方法, 即风险等于危险性与易损性的乘积。其中灾害的危险性根据不同灾害类型有不同定义, 针对洪水灾害而言, 其对人类社会安全的威胁主要取决于洪水流速与水深:

$$F_{hr} = d(v + 0.5) + D_f \tag{1}$$

式中: F_{hr} 为洪水危险度; d 为洪水水深, 根据集合模拟结果从安全角度考虑将流量最大值转换为河道水深得到, 并根据流向和地形高度计算河道栅格能够淹没的范围; v 为洪水流速, 可通过曼宁公式近似计算获得; D_f 为泥石流因子, 由于研究区域人口和城市建筑等集中在中部降雨相对较少的平原区, 且南部森林覆盖度高, 故本文未考虑泥石流影响。

对于滑坡灾害而言, 首先计算研究时段内每组参数组合下每个网格安全系数最小值; 其次统计安全系数小于 1 的场次, 计算出滑坡发生的概率; 为了与洪水危险度分辨率保持一致, 最后计算 1 km 分辨率下对应网格概率的均值, 即为滑坡灾害危险度。

计算得到的洪水与滑坡灾害危险度还需进行归一化, 本文定义灾害危险度从 0 至 1 分为 5 个等级: 0~0.1 为极低危险性, >0.1~0.3 为低危险性, >0.3~0.5 为中危险性, >0.5~0.7 为高危险性, >0.7~1.0 为极高危险性。

2.4 承灾因子综合易损度

选取人口密度、GDP 密度、城市化水平、建筑物密度、耕地密度和森林密度作为承灾因子, 每个承灾因子根据其数值的不同分为 5 个易损性等级, 如表 1 所示。承灾因子综合易损度定义为每个承灾因子的易损性之和, 即:

表 1 6 种承灾因子易损性分级赋值
Table 1 Vulnerability grading and assignment of six disaster bearing factors

等级	人口密度/ (人/km ²)	GDP 密度/ (万元/km ²)	城市化 水平/%	建筑物密度/ (km ² /km ²)	耕地密度/ (km ² /km ²)	森林密度/ (km ² /km ²)	栅格赋值
极低	<50	<5	<10	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
低	50 ~ <200	5 ~ <20	10 ~ <30	0.1 ~ <0.3	0.1 ~ <0.3	0.1 ~ <0.3	0.3
中	200 ~ <500	20 ~ <50	30 ~ <50	0.3 ~ <0.5	0.3 ~ <0.5	0.3 ~ <0.5	0.5
高	500 ~ 1000	50 ~ 100	50 ~ 70	0.5 ~ 0.7	0.5 ~ 0.7	0.5 ~ 0.7	0.7
极高	>1000	>100	>70	>0.7	>0.7	>0.7	1.0

$$V = \sum_{j=1}^m w_j p_j \quad (2)$$

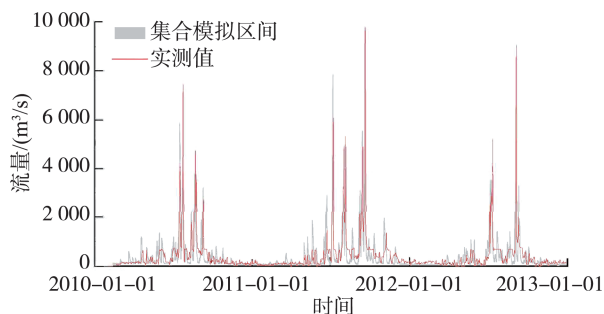
式中: V 为综合易损度; m 为承灾因子数量; p_j 为第 j 个承灾因子的值; w_j 为第 j 个承灾因子的权重, 采用层次分析法计算。

通过灾害危险性和承灾因子易损性可得到灾害的风险程度, 由于危险性和易损性均进行了归一化处理, 本文定义灾害风险等级划分标准为: $0 \sim 0.1$ 为极低风险、 $>0.1 \sim 0.3$ 为低风险、 $>0.3 \sim 0.5$ 为中风险、 $>0.5 \sim 0.7$ 为高风险、 $>0.7 \sim 1.0$ 为极高风险。

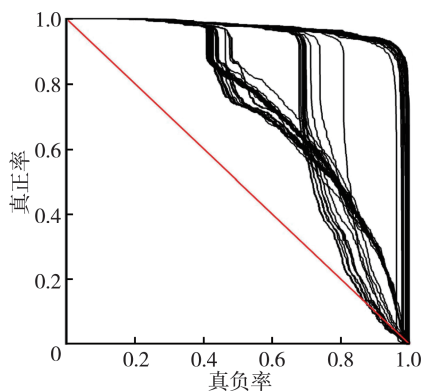
3 结果与分析

3.1 集合模拟分析

图2为洪水与滑坡灾害集合模拟结果。由图2(a)可见, 集合模拟区间与石泉站实测流量过程整体上吻合程度较高, 表明选取的参数组合能够反映真实水文过程, 同时集合模拟区间的峰值与每年汛期的洪峰流量非常匹配, 说明对于面积较大的流域, 参数的改变对流量过程模拟的影响会有所降低。统计分析显示, 不同参数组合情况下石泉站模拟流量和实测流量的相关系数为 $0.66 \sim 0.69$, 相关性较高。此外, 低流量区集合模拟结果未能很好地匹配



(a) 洪水流量过程



(b) 滑坡模拟 ROC 分析

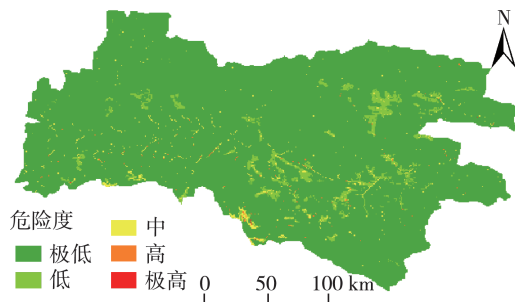
图2 洪水与滑坡灾害集合模拟结果

Fig. 2 Ensemble simulation results of flood and landslide hazards

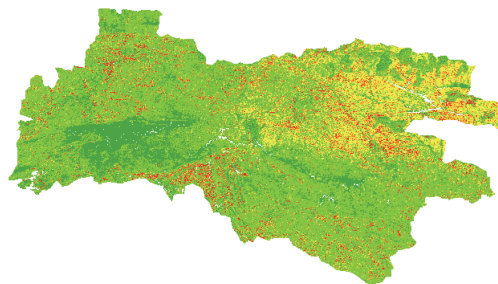
实测流量过程, 虽然单个参数的抽样取值较为合理, 但是不同参数组合对小流量模拟结果影响较大。受试者操作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线通常用于滑坡模拟的结果分析, 图2(b)中真正率为模型正确识别滑坡事件的比率, 真负率为模型正确识别非滑坡事件的比率。统计结果显示, 64% 的参数组合对应的 ROC 曲线趋近于右上角, 说明模型具有较强的稳健性, 滑坡模拟效果较好, 同时 ROC 曲线分区域集中, 说明参数不同取值和组合对于滑坡模拟效果有着较明显的影响。统计结果显示 ROC 曲线下面积 (area under curve, AUC) 为 $0.80 \sim 0.95$, 说明模型具有较高的全局精度, 对于滑坡和非滑坡事件的识别能力较强。

3.2 洪水与滑坡灾害危险性分析

基于集合模拟结果计算得到的洪水与滑坡灾害危险度分区如图3所示。由图3(a)可见, 汉江上游流域大部分区域整体上洪水灾害危险性较低, 呈线/面状分布, 中下游干流及部分支流洪水灾害危险性较高, 表明汛期集中降雨使得河道水量激增, 水位升高, 威胁河道沿岸。统计结果显示, 研究区内洪水灾害极低危险区占比为 94.63%, 低风险区占比为 3.90%, 中危险区占比为 1.29%, 高风险区占比为 0.17%, 极高风险区占比为 0.01%。由于洪水灾害主要发生在河道沿岸, 因此超过 98.50% 的区域洪水灾害在低风险性以下。由图3(b)可见, 总体上汉江上游区域受滑坡灾害威胁大, 相较于洪水灾害, 滑坡灾害的中高风险区域明显增多, 主要分布在西北、



(a) 洪水灾害危险度



(b) 滑坡灾害危险度

图3 洪水与滑坡灾害危险度分区

Fig. 3 Hazard rating map of flood and landslide hazards

南部及东北地区,仅在西南部分区域为极低滑坡灾害危险性。这是由于汉江上游为秦巴山区,地形陡峭,岩层易破碎,土壤易侵蚀,稳定性较差,同时该区域属湿润季风区,降雨较多且集中在汛期,易诱发滑坡灾害。对各级危险性分区统计显示,滑坡灾害极低危险区占比为 16.92%,低危险区占比为 61.05%,中危险区占比为 14.82%,高危险区占比为 3.27%,极高危险区占比为 3.94%,超过 22% 的区域滑坡灾害危险性在中等以上。

3.3 承灾因子综合易损性分析

针对人口密度、GDP 密度、城市化水平、建筑物密度、耕地密度、森林密度 6 种承灾因子,首先构建判断矩阵,确定各个因子之间相互的优先度;其次计算得到每个因子的相对权重,分别为 0.455 4、0.249 6、0.118 9、0.095 4、0.053 1 和 0.027 5;最后对构造的判断矩阵进行检验。得到随机一致性比率为 0.037 8,小于 0.1,因此计算结果满足随机一致性比率的检验。

图 4 为 6 个承灾因子的综合易损度分区。可见,大部分区域的综合易损度较低,这是由于汉江上游区域地表覆盖以森林为主,人烟稀少,建筑物与作物也同样较少;在西南区域和沿河沟谷等地综合易损度较高,分析发现这些地区均为人类活动较多区域,西南分布有大面积的耕地,而沿河沟谷地区通常为人类居住区,因此相对于山区森林,人类聚集区的综合易损度较高。综合易损度各级分区的统计结果显示,极低易损区占比为 70.17%,低易损区占比为 13.39%,中易损区占比为 9.43%,高易损区占比为 5.56%,极高易损区占比为 1.45%。虽然综合易损度较低的区域占比超过了 80%,然而此类区域仍存在因原始自然状态和生态环境的破坏所带来的潜在后续影响。

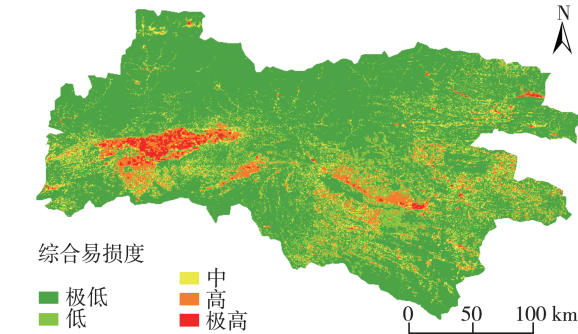


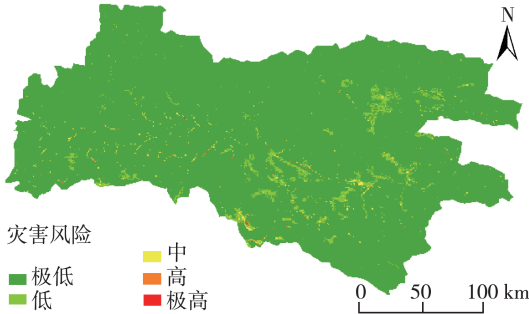
图 4 承灾因子综合易损度分区

Fig. 4 Comprehensive vulnerability map of hazard-bearing factors

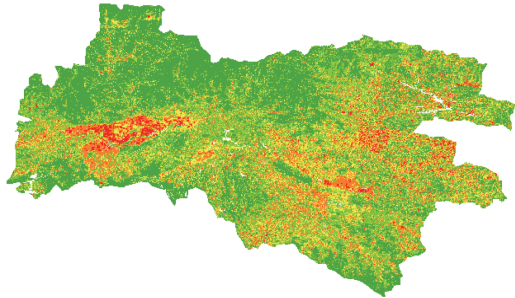
3.4 洪水与滑坡灾害风险评估

图 5(a)为洪水灾害风险分区,对比图 4 可知,

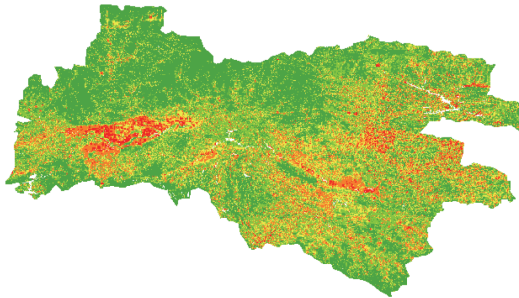
虽然中易损度以上区域较大,但是超过 95.87% 的区域洪水灾害为极低风险,低风险区以下的区域占比则达到了 99.17%,高风险以上的区域未超过 0.1%,说明汉江上游受洪水灾害的威胁较小。同时,对比洪水灾害危险性分析结果,高危险以上区域占比为 0.18%,而高风险区占比为 0.1%,说明对于部分洪水灾害严重的地区,其人口、经济、建筑、耕地等承灾因子水平较低,在发生洪水时灾害没有承受体,导致风险程度较低。图 5(b)为滑坡灾害风险分区,中等风险以上区域主要集中在西南和东部地区,对比图 3(b)可知,西北部分地区虽然滑坡灾害的危险程度较高,但是由于这些区域的综合易损度低,灾害造成的影响相对较低,因此滑坡灾害的风险为低等级;而东南部分区域危险性偏低,但是综合易损度相对较高,使得计算得到的滑坡灾害风险等级较高。洪水与滑坡灾害综合风险由两种灾害风险叠加得到,如图 5(c)所示。由于洪水灾害的风险整体偏低,



(a) 洪水灾害风险



(b) 滑坡灾害风险



(c) 洪水与滑坡灾害综合风险

图 5 洪水与滑坡灾害风险分区

Fig. 5 Risk map of flood and landslide hazards

同时洪水灾害通常沿河道分布,空间上没有滑坡灾害分布广,因此灾害综合风险的空间分布与滑坡灾害风险分区相似。然而统计结果显示,滑坡灾害高风险区占比为 12.01%,灾害综合风险较高区域占比则为 12.40%,说明虽然洪水灾害相对而言影响偏低,但是对于河道沿岸的城镇,其风险是真实存在的。洪水预报和灾害风险评估可以提前避免洪水灾害带来的潜在损失,对于城市建设和村镇规划具有重要的指导意义。

4 结 论

a. 基于拉丁超立方抽样的集合模拟可以保证参数的均匀取值,汉江上游洪水集合模拟区间与实测径流过程吻合程度较高,模型在不同参数组合下具有较好的稳健性,滑坡灾害全局模拟精度较高。

b. 汉江上游大部分地区洪水灾害危险性较低,危险性较高的区域主要分布在河道沟谷沿线,滑坡灾害危险性高值区则在西南和东部等地。

c. 汉江上游综合易损度受人类活动影响较大,人类聚集区的综合易损度普遍较高,森林为主要覆盖的山区则综合易损度较低。

d. 汉江上游大部分地区洪水灾害风险较低,在河道干流沿线有较高的风险,而滑坡灾害则在山区且综合易损度较大的区域风险较高,灾害综合风险结果表明虽然洪水灾害在区域上的影响比滑坡灾害小,但是其灾害的风险不可忽视,多灾种叠加的危险性大于单一灾种,因而灾害风险更大。

参考文献:

[1] 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))

[2] AN H, VIET T T, LEE G, et al. Development of time-variant landslide-prediction software considering three-dimensional subsurface unsaturated flow [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 85 (1): 172-183.

[3] BLÖTHER J H, KORUP O, SCHWANGHART W. Large landslides lie low: excess topography in the Himalaya-Karakoram ranges[J]. Geology,2015,43(6):523-526.

[4] ZHANG K, WANG S, BAO H, et al. Characteristics and

influencing factors of rainfall-induced landslide and debris flow hazards in Shaanxi Province, China [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19 (1): 93-105.

[5] 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))

[6] UN DHA. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management [R]. Geneva: UN DHA (United Nations Department of Humanitarian Affairs), 1992.

[7] RONCO P, BULLO M, TORRESAN S, et al. KULTURisk regional risk assessment methodology for water-related natural hazards-part 2: application to the Zurich case study [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2015,19(3):1561-1576.

[8] 吴娟,林荷娟,姜桂花,等. 太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):164-170. (WU Juan, LIN Hejuan, JIANG Guihua, et al. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 164-170. (in Chinese))

[9] PRIEST S J, WILSON T, TAPSELL S, et al. Building a model to estimate risk to life for European flood events: final report[R]. London:European Commission, 2007.

[10] 孙章丽,朱秀芳,潘耀忠,等. 洪水灾害风险分析进展与展望[J]. 灾害学,2017,32(3):125-130. (SUN Zhangli, ZHU Xiufang, PAN Yaozhong, et al. Flood risk analysis: progress, challenges and prospect [J]. Journal of Catastrophology,2017,32(3):125-130. (in Chinese))

[11] 付晓花,董增川,韩锐,等. 基于气候-水文-水动力单向耦合模型的复杂河网地区水流演进模拟及预估[J]. 水资源保护,2023,39(3):162-169. (FU Xiaohua, DONG Zengchuan, HAN Rui, et al. Simulation and prediction of water flow evolution in complex river network area based on climate-hydrology-hydrodynamic one-way coupling model[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):162-169. (in Chinese))

[12] 汪昊燃,王容,黄鹏年,等. 水文水力学结合的秦淮河流域洪水模拟与实时校正研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):25-30. (WANG Haoran, WANG Rong, HUANG Pengnian, et al. Research on flood simulation and real-time correction of Qinhuai River basin combined with hydrology and hydraulics [J]. Journal of

- Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (3) : 25-30. (in Chinese))
- [13] NEAL J, VILLANUEVA I, WRIGHT N, et al. How much physical complexity is needed to model flood inundation? [J]. Hydrological Processes, 2012, 26 (15) : 2264-2282.
- [14] 郑成成, 龙小刚, 胡广柱, 等. 基于离散元的高陡堆石边坡失稳过程模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (6) : 92-98. (ZHENG Chengcheng, LONG Xiaogang, HU Guangzhu, et al. Failure process simulation of a high and steep rockfill slope based on discrete element method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (6) : 92-98. (in Chinese))
- [15] 刘永志, 唐雯雯, 张文婷, 等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1) : 20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1) : 20-27. (in Chinese))
- [16] ZHANG K, XUE X, HONG Y, et al. iCRESTRIGRS: a coupled modeling system for cascading flood - landslide disaster forecasting [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20 (12) : 5035-5048.
- [17] WANG S, ZHANG K, VAN BEEK L P, 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.
- [18] 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. Landslide forecasting using physically-based, coupled hydrological-geotechnical framework [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43 (9) : 1117-1129. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 王一冰, 谢先红, 施建成, 等. 多源降水数据驱动下青藏高原径流集合模拟 [J]. 科学通报, 2021, 66 (32) : 4169-4186. (WANG Yibing, XIE Xianhong, SHI Jiancheng, et al. Ensemble runoff modeling driven by multi-source precipitation products over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66 : 4169-4186. (in Chinese))
- [21] 王浩, 李扬, 任立良, 等. 水文模型不确定性及集合模拟总体框架 [J]. 水利水电技术, 2015, 46 (6) : 21-26. (WANG Hao, LI Yang, REN Liliang, et al. Uncertainty of hydrologic model and general framework of ensemble simulation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46 (6) : 21-26. (in Chinese))
- [22] PAPPENBERGER F, CLOKE H, BALSAMO G, et al. Global runoff routing with the hydrological component of the ECMWF NWP system [J]. International Journal of Climatology, 2010, 30 (14) : 2155-2174.
- [23] 谷洪钦, 刘开磊, 刘玉环, 等. 综合多源不确定性的洪水概率预报试验 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (2) : 99-104. (GU Hongqin, LIU Kailei, LIU Yuhuan, et al. Experiments on flood probability forecasting accounting for multi-source uncertainty [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (2) : 99-104. (in Chinese))
- [24] SALLABERRY C J, HELTON J C, HORA S C. Extension of Latin hypercube samples with correlated variables [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93 (7) : 1047-1059.
- [25] RODELL M, Houser P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85 (3) : 381-394.
- [26] LEHNER B, VERDIN K, JARVIS A. HydroSHEDS technical documentation [M]. Washington D. C. : World Wildlife Fund US, 2006 : 1-27.
- [27] WIEDER W, BOEHNERT J, BONAN G, et al. Regrided harmonized world soil database v1. 2 [M]. Oak Ridge : ORNL DAAC, 2014.
- [28] CHEN J, CHEN J, LIAO A, et al. Global land cover mapping at 30 m resolution: a POK-based operational approach [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 103 : 7-27.
- [29] RAI A 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.

(收稿日期: 2023-01-28 编辑: 王芳)

