

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.03.008

武陵山区渝东南城镇滑坡灾害风险评价研究 ——以石柱县下路镇为例

刘磊¹, 徐勇¹, 连志鹏¹, 裴来政¹, 吴将², 厉一宁¹

LIU Lei¹, XU Yong¹, LIAN Zhi-Peng¹, PEI Lai-Zheng¹, WU Jiang², LI Yi-Ning¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间学院, 湖北 武汉 430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:武陵山渝东南地区地质条件复杂、降雨丰沛,加之城镇化开发,该地区的山区城镇面临着滑坡风险,迫切需要开展城镇尺度的地质灾害风险评价,从而更好地进行风险管控。本文以重庆市石柱县下路镇为研究区域,结合区内地质灾害特点,利用无限斜坡模型进行了不同重现期(10、20、50和100年)滑坡灾害的危险性计算;重点关注潜在的建筑物损失和室内人员的生命财产损失,采用经验模型,完成了区内不同情景下建筑物和人口易损性分布图;运用灾害风险量化评估模型,定量分析了区内滑坡灾害的经济风险和人口风险。结果显示,从重现期10年至100年演变中,建筑物风险将增加3倍,而人口风险将增加约11倍,空间分布从集镇建设区附近的山体进一步扩大至天泉村、白鹤村等地。本文探索的滑坡风险评估方法可为地方决策部门开展详细尺度的国土空间规划(短期、中期和长期)研究提供参考。

关键词:山区城镇;地质灾害;定量风险评价;重现期;武陵山区

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

文章编号:2097-0013(2023)03-0502-10

Liu L, Xu Y, Lian Z P, Pei L Z, Wu J and Li Y N. 2023. Study on Landslides Risk Assessment of Typical Towns of Southeast Chongqing in Wuling Mountain Area: A Case of Xialu town, Shizhu County. *South China Geology*, 39(3):502–511

Abstract: The complex geological conditions and abundant rainfall in the Wuling Mountain area, southeastern Chongqing city, coupled with urbanization development, have exposed the mountain towns in the region to landslide risks, and there is an urgent need to carry out urban-scale geohazard risk assessment for better risk management and control. In this paper, taking Xialu Town, Shizhu County, Chongqing City as the research area, combined with the characteristics of geohazards in the area, the infinite slope model was used to calculate the risk of landslide disasters with different recurrence periods (10, 20, 50, and 100 years); focusing on potential damage to buildings and the life and property loss of indoor people, an empirical model was used to complete the vulnerability distribution map of buildings and population in this area under different scenarios; the economic and demographic risks of landslide disasters in the area were quantitatively analyzed using a

收稿日期:2023-5-18;修回日期:2023-6-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41702383)、中国地质调查局地质灾害调查项目(DD20190641、DD20221740)、三峡后续工作地质灾害防治科研项目(0001212019CC60014)

第一作者:刘磊(1987—),男,高级工程师,主要从事岩土体稳定性及区域危险性评价方面的研究工作, E-mail: martianstar@163.com

quantitative disaster risk assessment model. The results show that in the evolution from 10 to 100 years of the return period, the building risk will increase by three times, while the population risk will increase by about 11 times, and the spatial distribution will be further expanded from the mountains near the town construction area to the Tianquan Village, Baihe Village, and other places. The landslide risk assessment method explored in this study can be used as a reference for local decision-making departments to conduct detailed-scale research on land and spatial planning (short-term, medium-term, and long-term).

Key words: mountain towns; geological hazards; quantitative risk assessment; return period; Wuling Mountain area

武陵山渝东南地区位于四川盆地与川鄂湘黔隆褶带的过渡地带,区内地质条件复杂、降雨丰沛,加之城镇化开发,该地区的山区城镇面临着滑坡风险,对人民生命及财产安全造成很大的威胁。开展地质灾害的风险分析和评估是减少由山体滑坡引发的人员伤亡和经济损失的有效手段。因此,开展城镇尺度的风险评价不仅可为防灾减灾提供技术支撑,同时也是对滑坡定量风险评价的有益探索。

国内外学者在滑坡风险理论和框架(van Westen et al., 2006; Fell et al., 2008)的基础上,对区域易发性、危险性及风险评价开展了大量的研究工作,前期研究主要集中在中小比例尺度,以区域性综合评价为主(Wu S R et al., 2004; Lan H X et al., 2004; Ayalew et al., 2005; Guinau et al., 2007; 吴树仁等, 2007; 殷坤龙等, 2007; Lari et al., 2011; 范林峰等, 2012; 王宁涛等, 2012; 刘磊等, 2016)。近年来,我国地质灾害风险研究取得了快速发展,滑坡风险评价的研究尺度也逐渐转向了中大比例尺的范围(Weidner et al., 2018; 周杨, 2018; Jiménez-Perálvarez, 2018; 刘磊等, 2018; 郭子正等, 2019; Jacobs et al., 2020; 张朋杰, 2020; 高鹏程, 2022; 连志鹏等, 2022; 余佳阳, 2022; 赖波等, 2023)。随着科学技术的不断发展,地质灾害风险研究进入新时代,以乡、镇行政单元作为典型研究范围(城镇尺度)的滑坡灾害风险评价研究成为了新的挑战,其地形精度(比例尺)以1:1万为主,属于大比例尺(1:5000~1:10000)的区域风险评价,不少学者进行了有益的探索。李泽威等(2018)通过实地调查和数据分析,确定了恩施市龙凤镇主要地质灾害的危险性、易损性评价因子及其权重,对地质灾害进行了半定量风险评价;

李德坤(2020)选取陕西省志丹县城及周边重要城镇作为研究对象,采用逻辑回归模型及模糊评价模型对其进行了地质灾害半定量风险评估;Fu et al. (2020)在社区层面使用1:1万的量表进行了更详细的半定量滑坡风险评估。目前,在城镇尺度的风险评价研究大多以半定量风险评价为主,而对于地方政府来说,开展城镇尺度定量风险评价能够更好地满足地方政府风险管控的实际需求。

基于此,本文以重庆市石柱县下路镇为研究区域,探索城镇尺度地质灾害风险评价技术方法,基于斜坡单元,采用无限斜坡模型、损失经验公式等滑坡风险评估模型进行了不同重现期(10年、20年、50年和100年)的地质灾害危险性、承灾体易损性、风险的定量评价。研究成果可为地方决策部门开展国土空间规划(短期、中期和长期)研究提供参考。

1 研究区概况

1.1 地质环境背景

研究区隶属于重庆市石柱土家族自治县,处于重庆市东部、长江南岸,距重庆市158 km,面积约106 km²。东接湖北省利川市,南邻彭水县,西南靠丰都县,西北连忠县,北与万州区接壤,地势东高西低,山岭连绵,峡谷深切,河溪遍布。西北方斗山、东南七曜山顺北东、南西方向绵延平行展布,纵贯全境,形成“两山夹一槽”的主要地貌景观,地理坐标为:E 107°59′~108°34′, N 29°39′~30°32′。研究区属亚热带湿润季风气候区,气候温和、雨量充沛、四季分明,降雨集中在每年的5~9月,降雨量约占全年降雨量的65%,多年平均最大日降雨量104 mm,日

最大降雨量 178.3 mm(1971 年 6 月 1 日)。

研究区大部分出露中生界侏罗系河湖相砂泥岩,岩性以砂岩、泥岩、灰岩为主,岩体风化破碎;方斗山背斜核部出露二叠系中统茅口组(P_2m);第四系土层厚度大、分布不均、结构松散,为滑坡等地质灾害的形成提供了丰富的物质来源(图 1a)。

1.2 地质灾害发育特征

研究区地质灾害以滑坡、崩塌为主,滑坡是区内分布范围最广、发生频率最高、危害性最大的地质灾害,共发育滑坡 36 处,占地质灾害总数的 87.8%,另发育崩塌 5 处(图 1b)。针对研究区地质灾害的发育特征,本文主要以滑坡灾害开展风险评价研究。

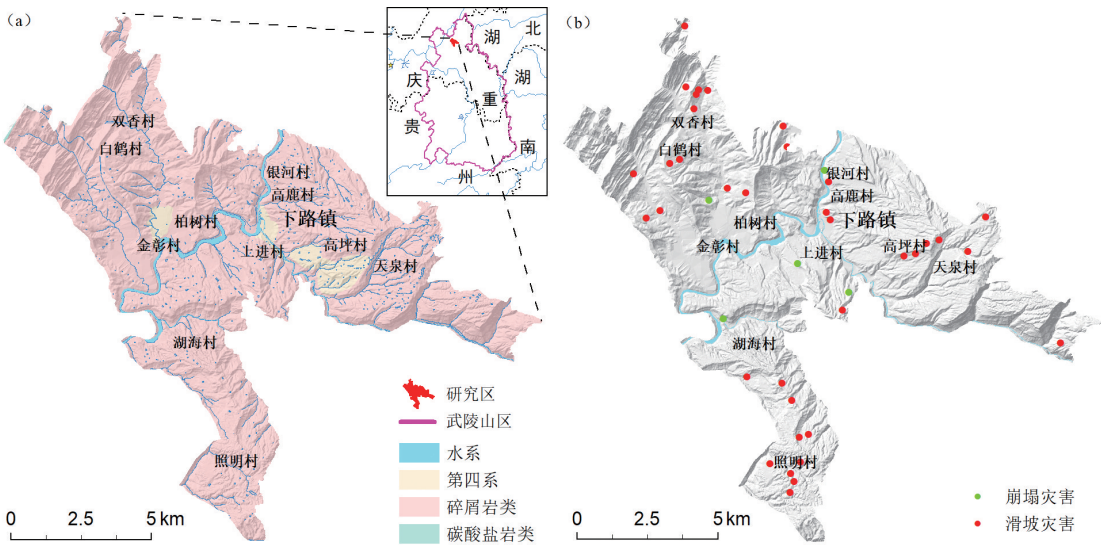


图 1 研究区工程地质简图(a)及地质灾害分布图(b)

Fig. 1 Geological engineering map (a) and Geological Hazards map(b) of the study Area

2 山区城镇地质灾害风险评价方法

2.1 风险评价基本框架

地质灾害风险是指对人民生命、健康、财产或环境所遭受的不利影响的可能性和严重程度的大小,根据 Varnes(1984)的风险评估模型,主要由危险性(Hazard)、易损性(Vulnerability)与承灾体(Elements at risk)三个方面决定,计算公式如下:

$$R=E\times H\times V$$
 (1)

式中, R 为地质灾害风险; E 为受灾害威胁的对象,包括人口、经济等; H 为特定地区范围内某种潜在灾害在一定时间内发生的概率; V 为易损性,可用 0~1 表示。

城镇尺度地质灾害风险评价工作可按以下步骤开展:首先,收集整理并分析滑坡灾害所在区域的地质环境、诱发因素以及历史滑坡灾害时空分布规律等;第二,确定滑坡灾害风险评价的单元,选取

稳定性计算的相关参数,开展滑坡灾害危险性分析;第三,确定承灾体类型及其价值,分析不同危险性滑坡对承灾体造成的影响,确定承灾体的易损性值;最后,根据风险评估模型,计算对应承灾体的风险。

2.2 危险性评价方法

地质灾害危险性评价的目的是知晓灾害在外界诱因条件下发生的可能性,描述其具体位置、规模、强度和影响范围等。地质灾害的危险性 H 由灾害发生的空间概率、时间概率和规模概率共同决定 (Guzzetti et al., 2005),其计算公式如下:

$$H=P(N_t)\times P(S)\times P(I)$$
 (2)

式中, $P(N_t)$ 是时间概率,即指不同重现期滑坡发生的超越概率; $P(S)$ 为空间概率; $P(I)$ 为规模概率,由于研究区的滑坡灾害规模极其相近,故此次评价不考虑规模概率。

2.2.1 滑坡发生的时间概率

滑坡发生的时间概率,由滑坡在测区内以不同

的重现期发生至少 1 次灾害的超越概率来确定。降雨型滑坡的发生与雨型、降雨强度和降雨历时等因素有关,通过找出滑坡发生与降雨相关的降雨量极大值的分布,确定降雨型滑坡发生的时间概率。选取 10、20、50、100 a 作为降雨重现期,通过对水文站的统计数据进行分析,并通过 Gumbel 模型计算得到不同降雨重现期下的降雨极值,作为此次的降雨参数。

2.2.2 滑坡发生的空间概率

滑坡发生的空间概率,为不同降雨重现期下滑坡发生的可能性,可由不同降雨强度所对应的稳定性状态,作为滑坡危险性的空间概率结果。不同稳定性结果的危险性等级划分标准见 表 1。

表 1 滑坡灾害危险性分级标准

Table 1 Classification standard for landslide hazard		
分级序号	稳定性系数	危险性
1	$F_s \leq 1.0$	1
2	$1.0 < F_s \leq 1.15$	0.75
3	$1.15 < F_s < 1.25$	0.5
4	$F_s \geq 1.25$	0.25

本文采用无限斜坡模型作为斜坡稳定性计算的简化模型(Baum et al., 2010)。以摩尔-库仑破坏准则为理论基础,在特定的降雨工况下,计算不同深

度 Z 处斜坡的稳定性系数 F_s :

$$F_s(Z,t)=\frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha}+\frac{c'-\psi(Z,t)\gamma_w \tan \varphi'}{\gamma_s Z \sin \alpha \cos \alpha}$$

(3)

式中, φ' 为内摩擦角; c' 为土的黏聚力; γ_w 为水的容重; γ_s 为土的容重。

以栅格单元作为基本计算单元,根据栅格单元的计算结果,进行危险性等级划分,统计各斜坡单元内栅格单元的危险性分级结果,选取占比最大的危险性等级作为该斜坡单元的危险性等级。

2.3 易损性评价方法

主要针对建筑物和室内人员进行评价。由于建筑物和人口属性的数据缺失,本次研究采用定性-半定量的方式计算其易损性。

2.3.1 建筑物易损性

本文根据滑坡的影响范围对研究的建筑和人口进行易损性评估。根据经验分别对滑坡影响范围内和滑坡影响范围外的建筑物赋易损性值,易损性值介于 0~1 之间。

对于滑坡体上的建筑物,赋值为 1;对于滑坡影响范围内的建筑物,将建筑物简化为城镇建筑物和乡村建筑物二类,分别按照不同危险性等级对其进行赋值(表 2)。

表 2 滑坡外建筑物易损性赋值参考表

Table 2 Reference Table for Vulnerability Assessment of Buildings Outside Landslides				
危险性等级 建筑物类型	低危险性	中等危险性	高危险性	极高危险性
城镇建筑物	0.1	0.3	0.6	1
乡村建筑物	0.3	0.5	0.8	1

2.3.2 人员易损性

本次评估对象仅考虑室内静态人口的风险,位于室外以及交通要道的人口风险不在本次评估范围内。由于室内人口易损性与建筑物的破坏程度直接相关(Li Z H et al., 2010),通过室内人口易损性与建筑物易损性 V_s 之间的对应关系(图 2)实现人口易损性 V_{p-s} 的计算:

$$V_{p-s}=\begin{cases} 0.0014 \times e^{6.07V_s} & \text{非滑坡体上} \\ 1 & \text{滑坡体上} \end{cases}$$

(4)

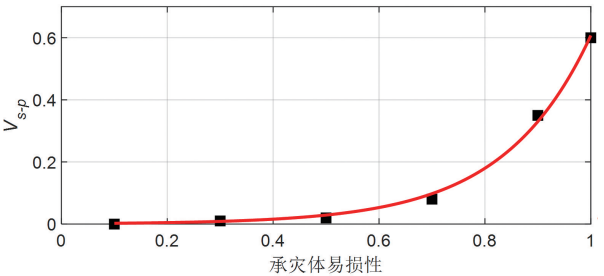


图 2 室内人口易损性与建筑物易损性关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between indoor population vulnerability and building vulnerability

3 风险评价与结果分析

3.1 计算参数的确定

3.1.1 评价单元

对于大比例尺的区域地质灾害风险评价,采用更符合滑坡灾害真实形态的斜坡单元作为本研究的基本评价单元,通过盆域分析法,根据该地区的地形地貌进行划分。单元划分的关键在于对山谷山脊线的提取:以山体阴影为对象,通过识别盆地间的山脊线,在分析窗口中描绘流域盆地,通过分析流向数据找出属于同一流域盆地的所有已连接像元组,根据流向突变处划分为多个封闭或半封闭的像元组,再经过盆域处理,结合野外调查验证,完成研究区共3768个自然斜坡单元的划分(图3)。

3.1.2 计算参数

模型所需要输入的参数较多,主要包括模型控制参数、力学及水文参数、堆积层厚度、降雨参数等。

(1)模型的控制图层

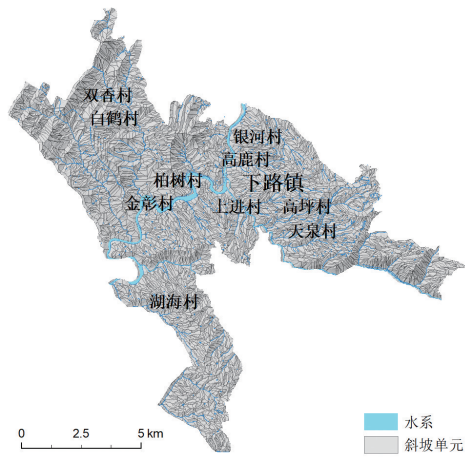


图3 研究区斜坡单元划分结果
Fig. 3 Slope units results in the study area

工作区栅格尺寸为5 m×5 m,行数为3724,列数为3862。利用GIS软件的空间分析功能,计算得到工作区的坡度、坡向、流向等模型基本参数图层(图4a、4b、4c)。根据研究区调查及钻孔点,采用克里金法(Kriging)进行覆盖层厚度的估算,计算得到研究区覆盖层厚度分区图(图4d)。

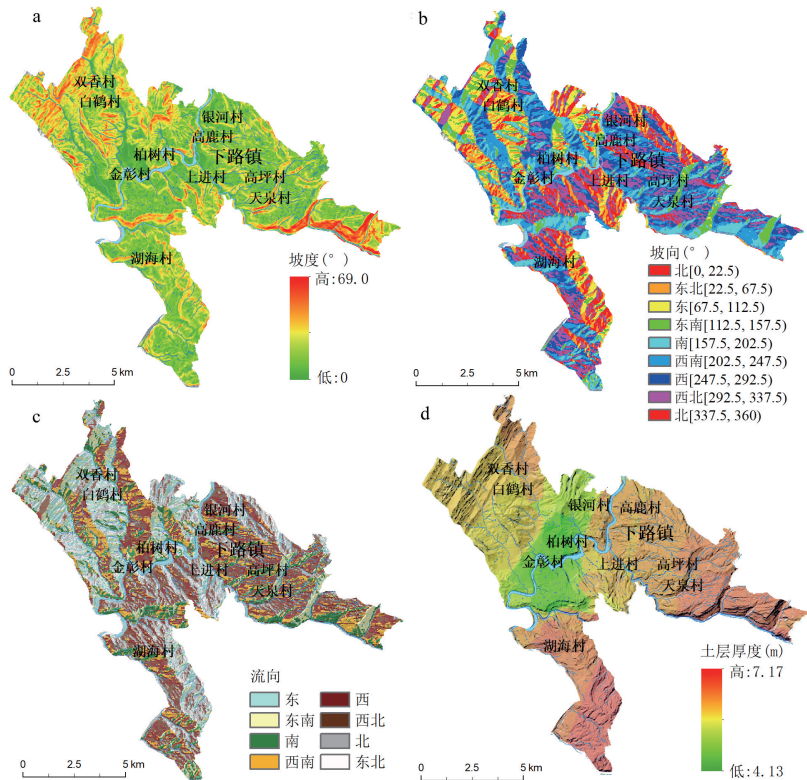


图4 研究区风险评价的基本参数图层
Fig.4 Basic parameter layer of risk assessment for study area
a.坡度图层;b.坡向图层;c.流向图层;d.覆盖层厚度图层

(2)物理力学参数

在研究区采集原状样品,开展室内实验,对实验结果求其平均值得到计算所需的物理力学参数,包括土的容重(γ_s)、黏聚力(c)、内摩擦角(φ)、饱和渗透系数(K_s)、饱和含水率(θ_s)、残余含水率(θ_r)等(表3)。

表 3 研究区的岩土体参数

Table 3 Rock and soil parameters in the research area

γ_s ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c (kPa)	φ ($^{\circ}$)	K_s ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	θ_s (%)	θ_r (%)
21.5	23.7	18.7	1.3×10^{-7}	25.26	5.12

(3)降雨强度计算

降雨强度是分析降雨型滑坡的重要数据,也是无限斜坡模型中的重要输入参数。通过对水文站的

统计数据进行分析,并采用 Gumbel 模型计算得到不同重现期下的单日降雨极值(表4)。

表 4 研究区不同重现期单日累计降雨量

Table 4 Daily cumulative rainfall at different return periods in the study area

重现期(年)	10	20	50	100
极值降雨量(mm)	99.2	118.1	148.9	178.0

3.2 危险性评价

考虑到降雨非饱和入渗的斜坡稳定性评价模型,并基于上文介绍的模型参数以及确定的各工况,应用文中危险性计算方法开展研究区4个重现期下的危险性评价(图5)。

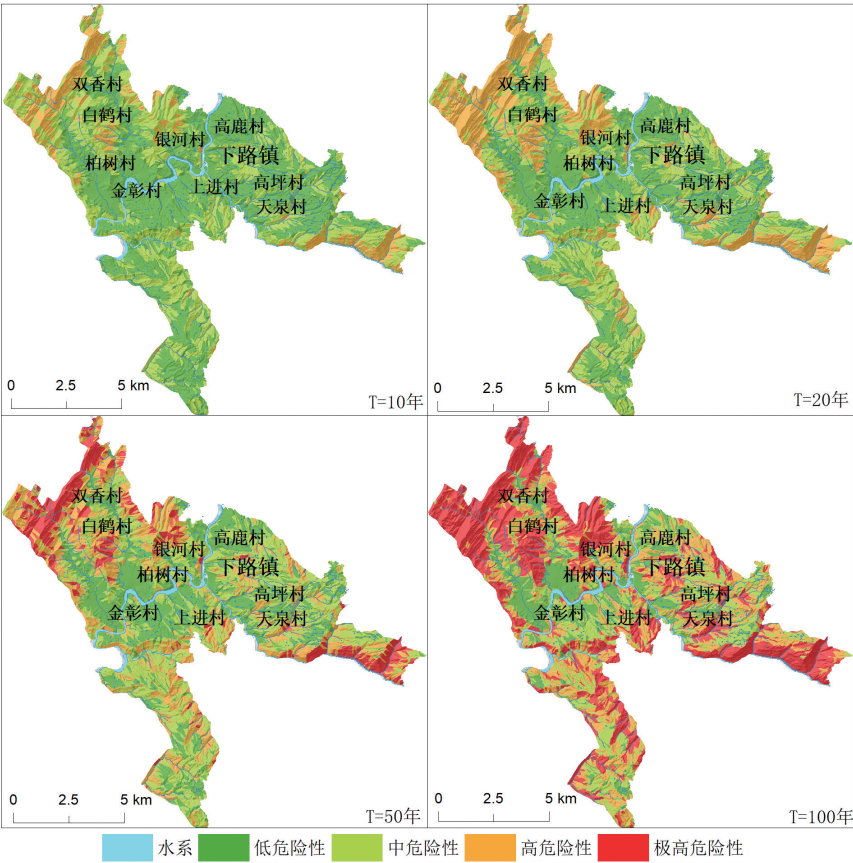


图5 不同重现期条件下的研究区滑坡灾害危险性分区图

Fig. 5 Hazard map of landslide in the study area under different return period

由图5可以看出,在四个重现期中,从10年重现期开始,各斜坡单元危险性逐渐增加,各重现期危险性较高的区域主要分布于西北部、南部及东

部,主要由于这一带堆积物厚度较薄,加之坡度较陡,在连续降雨或者暴雨的情况下斜坡稳定性较差;中危险性区域主要分布在照明村、天泉村附近,

低危险性区域主要集中在柏树村、金彰村、银河村附近。随着重现期的加长,危险性在空间分布上逐渐扩大,由西北部的双河口等地向南部、东南部的照明村、玉泉村、四龙溪等地一带扩大,危险性等级也逐步提升,由原来的中危险性提升至高危险性,甚至极高危险性。

3.3 易损性评价

在危险性计算的基础上,根据距离所提供的强度属性,结合承灾体自身属性野外调查数据与类型划分,根据本文定性-半定量的危险性计算方法,估算得到研究区建筑物易损性(图 6a)以及人口易损性分区(图 6b)。

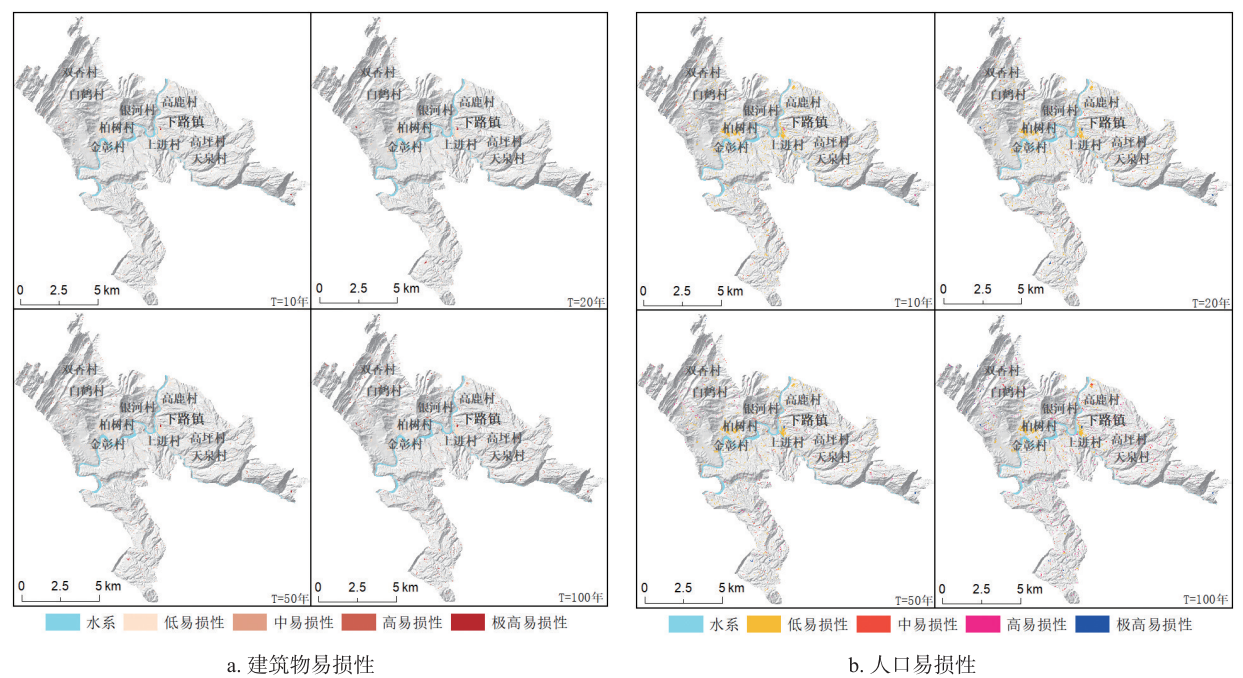


图 6 不同重现期条件下研究区易损性分区图

Fig. 6 Vulnerability zoning map of the study area under different return period

表 5 中的数据显示了在 10 年、20 年、50 年和 100 年重现期内可能受影响(高或极高危险性区域内)的承灾体(建筑物面积及人口),如 50 年重现期有约 36.8 万 m² 的建筑物和 6024 人面临滑坡灾害的风险;从 10 年到 100 年,可能受影响的建筑物面积和室内人口分别增加了九倍多和近五倍。由

图 6a 可知,大多数受影响的建筑物位于具有高或极高危险性的斜坡上,包括双香村、白鹤村和四龙溪等地,而在金彰村、柏树村附近的建筑物和室内人口受滑坡灾害影响的可能性较低,主要原因为此部分地区地势整体较平缓,其滑坡危险性等级很低。

表 5 研究区不同降雨重现期承灾体风险值

Table 5 Risk values of risk at elements in different rainfall return periods in the study area					
	重现期	10 年	20 年	50 年	100 年
承灾体	建筑物(万 m ²)	9.8	18.1	36.8	91.6
	人口(人)	1614	2927	6024	8039
风险	建筑物(万元)	4598.2	5843.5	7483.7	12479.5
	人口(人)	378	746	1138	4128

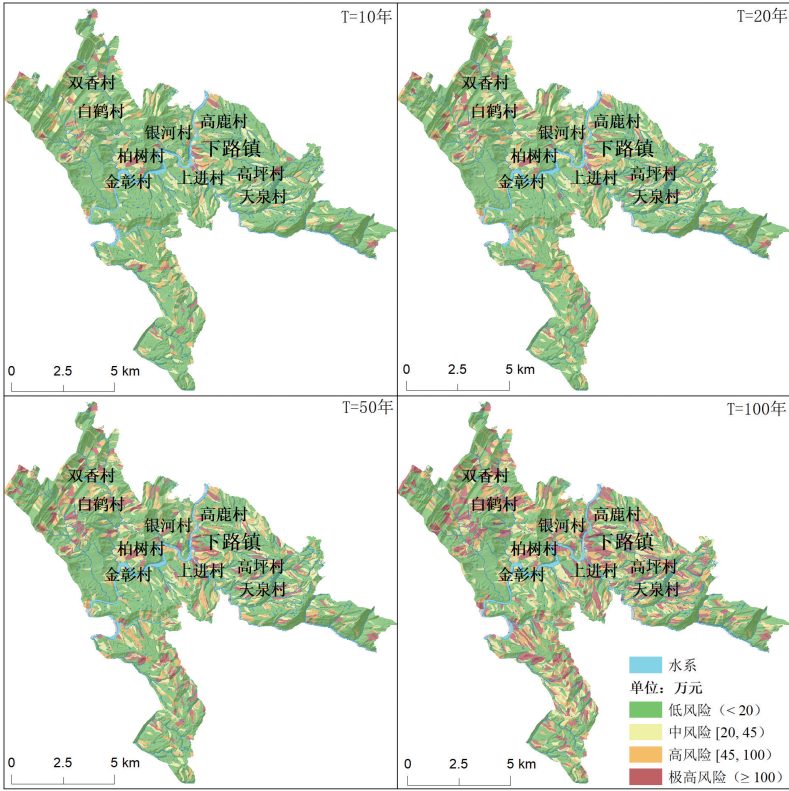


图7 不同重现期条件下研究区建筑物风险分布图

Fig. 7 Economic risk map of the study area under different return period

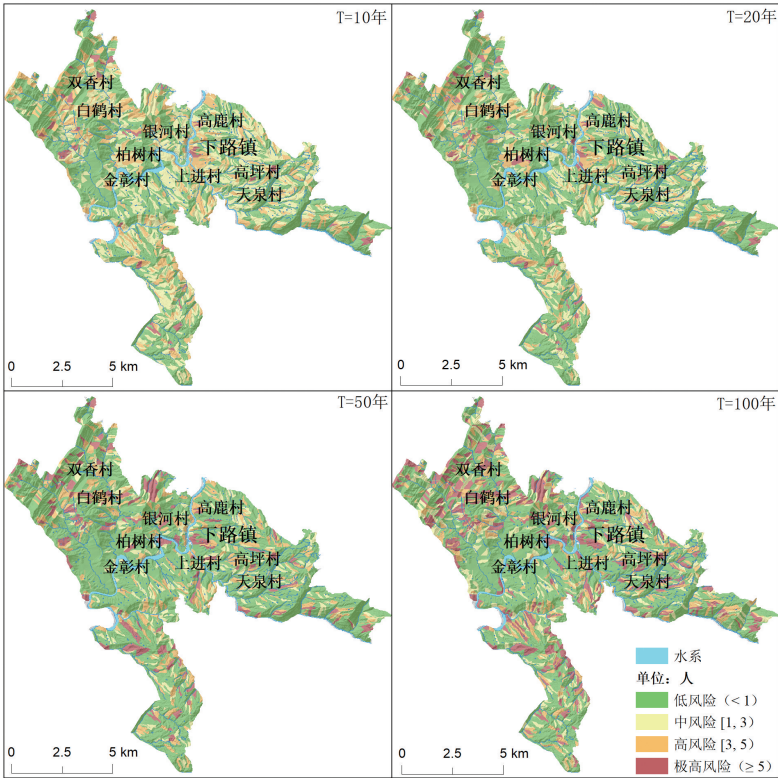


图8 不同重现期条件下研究区人口风险分布图

Fig. 8 Population risk map of the study area under different return period

3.4 风险评价

在前述灾害危险性分析、承灾体易损性分析等成果的基础上,按照承灾体属性的不同,选取受灾房屋面积乘以房屋均价(3000 元/m²)作为建筑物价值;利用人口总数除以房屋面积总数得到人口密度表征生命价值,之后,利用灾害风险量化评估模型,分析计算得到石柱县下路镇地质灾害经济风险与人口风险,再以等级划分的方式编制图件(图7、图8),不同重现期的统计结果见表5、图9。需要说明的是,建筑物价值和人口数量为静态数据,未考虑未来城市建设和经济发展引起的数据变化。

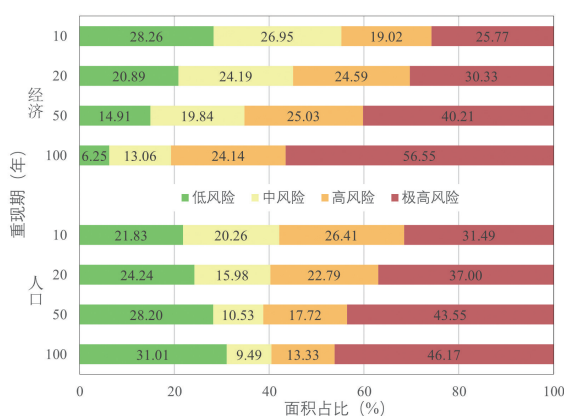


图9 不同重现期条件下研究区滑坡灾害风险区面积占比图
Fig. 9 Proportion of landslide risk area in the study area under different return period

表5给出了四个重现期的最终人口和建筑物风险。区内未来10年、20年、50年和100年内因滑坡灾害引起的建筑物经济损失估计为4598、5844、7484、12480万元,分别占建筑物相关经济价值的0.61%、0.78%、0.99%、1.66%;各重现期内潜在伤亡人数为378、746、1138、4128人,分别占社区总人口的0.91%、1.80%、2.75%、9.98%。从重现期10年至100年的演变中,建筑物风险将增加近3倍,而人口风险将增加约11倍,空间分布从集镇建设区附近的山体进一步扩大至天泉村、白鹤村等地。由图7可以看出,高风险区主要分布在物源充足,坡度较陡,地质灾害活跃的地区,如白鹤村、湖海村、天泉村和集镇中心区等地,这些地区是农村聚集地或城镇聚集区,一旦发生滑坡灾害,将对这些建筑物造成极大的破坏。

4 结论

本文探索性提出了针对城镇尺度地质灾害风险评价方法。采用无限斜坡模型开展不同重现期(10年、20年、50年、100年)条件下滑坡灾害的危险性评价;根据损失经验公式进行区内不同情景下建筑物和人口易损性分析;运用灾害风险量化评估模型计算区内滑坡灾害的经济风险和人口风险。

(1)危险性评价结果表明,各重现期危险性较高的区域主要分布于西北部、南部及东部,随着重现期的加长,危险性在空间分布上逐渐扩大,从10年到100年,可能受影响的建筑面积增加了9倍多,室内受影响的人口增长了近5倍,且大多数受影响的建筑物位于具有高或极高危险性的斜坡上。

(2)建筑物和人口的易损性和风险分析结果表明:四个重现期内因滑坡灾害引起的建筑物经济损失估计分别为4598、5844、7484、12480万元,潜在伤亡人数分别占社区总人口的0.91%、1.80%、2.75%、9.98%,从10年至100年演变中,建筑物风险增加将近3倍,而人口风险增加约11倍,滑坡灾害的空间分布由集镇建设区附近的山体向周边村庄进一步扩大。

参考文献:

- 范林峰, 胡瑞林, 曾逢春, 王珊珊, 张小艳. 2012. 加权信息量模型在滑坡易发性评价中的应用——以湖北省恩施市为例[J]. 工程地质学报, 20(4): 508-513.
- 高鹏程. 2022. 甘肃省滑坡灾害风险评价模型研究[D]. 兰州交通大学硕士学位论文, 1-76.
- 郭子正, 殷坤龙, 黄发明, 付圣, 张文. 2019. 基于滑坡分类和加权频率比模型的滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 38(2): 287-300.
- 赖波, 赵风顺, 江金进, 江山, 江宁, 李俊生. 2023. 基于AHP-信息量法的珠海市地质灾害风险评价[J]. 华南地质, 39(1): 147-156.
- 李德坤. 2020. 志丹县城及重要城镇地质灾害风险评价研究[D]. 西北大学硕士学位论文, 1-87.
- 李泽威, 杨登银, 王明华, 岳永强, 郝心宇. 2018. 基于GIS的恩施市龙凤镇地质灾害风险评价[J]. 资源环境与工程, 32(1): 113-118.

- 连志鹏, 厉一宁, 刘磊, 王宁涛. 2022. 基于ArcGIS的湖北省远安县地质灾害风险定量评价[J]. 华南地质, 38(4): 680-688.
- 刘磊, 殷坤龙, 王佳佳, 张俊, 黄发明. 2016. 降雨影响下的区域滑坡危险性动态评价研究——以三峡库区万州主城区为例[J]. 岩石力学与工程学报, 35(3): 558-569.
- 刘磊, 殷坤龙, 徐勇, 连志鹏, 王宁涛. 2018. 考虑降雨及库水位变动的区域滑坡灾害稳定性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 37(2): 403-414.
- 王宁涛, 彭轲, 黎清华, 赵信文, 黎义勇, 何军. 2012. 基于RS和GIS的地质灾害易发性定量评价: 以湖北省五峰县为例[J]. 地学前缘, 19(6): 221-229.
- 吴树仁, 张永双, 石菊松, 董诚, 雷伟志, 谭成轩, 胡道功. 2007. 三峡库区重庆市丰都县滑坡灾害危险性评价[J]. 地质通报, 26(5): 574-582.
- 殷坤龙, 陈丽霞, 张桂荣. 2007. 区域滑坡灾害预测预警与风险评价[J]. 地学前缘, 14(6): 85-97.
- 余佳阳. 2022. 低山丘陵区域地质灾害风险评价研究——以内江市为例[D]. 西华大学硕士学位论文, 1-85.
- 张朋杰. 2020. 武都地区典型小流域降雨型滑坡危险性区划定量研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 1-89.
- 周杨. 2018. 黄土丘陵区降雨滑坡易发性及动态危险性评价研究——以甘肃秦安县为例[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 1-72.
- Ayalew L, Yamagishi H. 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan[J]. Geomorphology, 65(1-2): 15-31.
- Baum R L, Godt J W, Savage W Z. 2010. Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration[J]. Journal of Geophysical Research, 115, F0313.
- Fell R, Corominas J, Bonnard C, Cascini L, Leroi E, Savage W Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning[J]. Engineering Geology, 102(3-4): 85-98.
- Fu S, Chen L X, Woldai T, Yin K L, Gui L, Li D Y, Du J, Zhou C, Xu Y, Lian Z P. 2020. Landslide hazard probability and risk assessment at the community level: a case of western Hubei, China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 20(2): 581-601.
- Guinau M, Vilajosana I, Vilaplana J M. 2007. GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data - a case study in NW Nicaragua[J]. Natural hazards and earth system sciences, 7(6): 703-716.
- Guzzetti F, Reichenbach P, Cardinali M, Galli M, Ardizzone F. 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale[J]. Geomorphology, 72(1-4): 272-299.
- Jacobs L, Kervyn M, Reichenbach P, Rossi M, Marchesini I, Alvioli M, Dewitte O. 2020. Regional susceptibility assessments with heterogeneous landslide information: Slope unit- vs. pixel-based approach[J]. Geomorphology, 356: 107084.
- Jiménez-Perálvarez J D. 2018. Landslide-risk mapping in a developing hilly area with limited information on landslide occurrence[J]. Landslides, 15(4): 741-752.
- Lan H. X, Zhou C H, Wang L J, Zhang H Y, Li R H. 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China[J]. Engineering Geology, 76(1-2): 109-128.
- Lari S, Crosta G B, Frattini P, Horton P, Jaboyedoff M. 2011. Regional-scale debris-flow risk assessment for an alpine valley[J]. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 933-940.
- Li Z H, Nadim F, Huang H W, Uzielli M, Lacasse S. 2010. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards[J]. Landslides, 7(2): 125-134.
- van Westen C J, van Asch T W J, Soeters R. 2006. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65(2): 167-184.
- Varnes D J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice[M]: United Nations Educational.
- Weidner L, Oommen T, Escobar-Wolf R, Sajinkumar K S, Samuel R A. 2018. Regional-scale back-analysis using TRIGRS: an approach to advance landslide hazard modeling and prediction in sparse data regions[J]. Landslides, 15(12): 2343-2356.
- Wu S R, Jin Y M, Zhang Y S, Shi J S, Dong C, Lei W Z, Shi L, Tan C X, Hu D G. 2004. Investigations and assessment of the landslide hazards of Fengdu county in the reservoir region of the Three Gorges project on the Yangtze River[J]. Environmental Geology, 45(4): 560-566.