文章编号：1006－4362(2024)01－0007－07

基于GIS的云南省永善县滑坡地质灾害风险性评价

罗荣，张世涛，牟东川，刘志明
（昆明理工大学国土资源工程学院，昆明　650093）

摘要： 永善县位于云南省东北部，是云南省受地质灾害影响最严重的区域之一。根据云南省永善县地质灾害精细化调查与风险评价工作统计，县域内共有滑坡地质灾害隐患点398个，占全县540个地质灾害隐患点的一半以上，滑坡是永善县危害程度最大的地质灾害。本文选取了工程地质岩组、水系密度、道路距离、人类活动、构造距离、高程、地类和坡度作为评价因子，与10 a平均降雨量和永善县地震动峰值加速度区划相叠加得出危险性指标，将人口密度、物质密度和经济密度三者归一化后叠加得到易损性，基于信息量法，使用地理信息系统(GIS)空间分析技术，进行风险性评价。所得结果与永善县滑坡地质灾害现状吻合，为县政府开展防灾减灾工作与地质灾害风险管控提供依据。

关键词： 滑坡；风险性评价；信息量法；地质灾害；永善县
中图分类号： P642.22；P56；X4　　**文献标识码：** A

RISK ASSESSMENT OF LANDSLIDE GEOLOGICAL HAZARDS IN YONGSHAN COUNTY, YUNNAN PROVINCE BASED ON GIS

LUO Rong, ZHANG Shi-tao, MOU Dong-chuan, LIU Zhi-ming
(Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming　650093, China)

Abstract: Yongshan County is located in the northeast of Yunnan Province, which is one of the areas are most affected by geological disasters in Yunnan Province. According to the detailed survey and risk assessment of Yunnan Province, a total of 398 landslide geological disasters were found in Yongshan County, it accounts for more than half of the 540 geological hazards in the county, so the landslide geological hazards are the most harmful hazards in Yongshan County. This paper has selected engineering geological rock group, the density of water system, the distance of roads, human activities, the distance of structure, height, the kinds of lands, and the slope as the factors for assessment, and the risk index was obtained by superimposing the data of 10-year average rainfall and the peak acceleration zone of earthquake in Yongshan County, normalizing and then superimposing the density of population, material and economic to obtain the vulnerability, based on the information computation method, by using the spatial analysis technology of geographic information system (GIS) to do the risk assessment. The results are consistent with the current situation of landslide geological disasters in Yongshan County, which can provide a basis for the prevention and mitigation of geological hazards and the risk management of geological hazards for the government.

Key words: landslide; risk assessment; information computation method; geological hazard; Yongshan County

收稿日期： 2023-04-20　　**改回日期：** 2023-06-13

永善县位于云南省东北部，金沙江南东岸，昭通北部。区内地质构造复杂，褶皱和断裂发育，地质环境十分脆弱，地质灾害频发，危害严重[1]。近年来，随着社会经济的发展，人类工程活动越来越频繁，各种地质灾害诱发因素明显增多，地质灾害、特别是滑坡的危害程度逐年加剧，极大地损害了当地人民群众的生命财产安全。

据统计，永善县域内共有滑坡隐患点 398 个，崩塌隐患点 123 个，泥石流隐患点 18 个，地面塌陷隐患点 1 个，共计 540 个。其中，滑坡隐患点占全县地质灾害隐患点的绝大多数，主要分布在河谷岸坡和山间坡度相对较缓的斜坡地带，这些地带承载了大部分人类活动，切坡修路建房，开垦农耕等活动强烈，易引起边坡失稳，为滑坡的诱发和加剧创造了有利条件[2]。

因此，本文对永善县滑坡地质灾害进行风险性评价，并做出相应风险性分区，对永善县地质灾害防治和地质灾害风险管控提供依据，并以此研究成果为永善县地质灾害防治“十四五”规划提供支撑[2]。

1 风险性评价方法

地质灾害风险性评价综合了地质灾害以及承灾体的信息，包括地质灾害易发性、危险性评价以及承灾体易损性评价，评价结果对研究区地质灾害防治和城镇建设规划具有参考价值[3]。本文以永善县滑坡地质灾害为研究对象，在相关资料数据收集和整理的基础上，基于 GIS 技术，以栅格为评价单元，提出采用信息量模型进行滑坡易发性进行评价；选择 10 a 平均降雨量和永善县地震动峰值加速度区划为诱发因素进行滑坡危险性分析评价；基于承灾体的特征，根据第七次人口普查数据，求得人口密度、物质密度和经济密度，再将三者归一化后叠加，以评价调查区易损性。最后，基于危险性和易损性评价结果，选取“风险性＝危险性×易损性”风险性评价模型，利用 GIS 技术进行永善县滑坡地质灾害风险性评价和分区[3]。

2 永善县滑坡地质灾害易发性评价

2.1 评价方法

本文采用信息量法模型，选取了工程地质岩组、水系密度、道路距离、人类活动、构造距离、高程、地类和坡度作为信息量因子，对调查区内滑坡和崩塌的易发性进行了评价。

信息量法是以 Van Westen 在 C. E. Shannon 创立的信息论为基础，运用熵的减少来表示某一事物发生的概率。运用到地质灾害评价中，主要通过各指标区间已知灾点信息量值的计算，表征各指标区间对发生该类型地质灾害的贡献值，最终进行区域地质灾害易发性的评价。对某种因素特定状态下地质灾害信息量计算公式为：

$$I_{xi\to A} = \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{1}$$

式中，$I_{xi\to A}$为对应因素 x 在 i 状态或区间条件下，地质灾害 A 发生的信息量值；N_i 为对应因素 x 在 i 状态或区间条件下，地质灾害 A 面积或点数；N 为调查区地质灾害 A 总面积或总点数；S_i 为对应因素 x 在 i 状态或区间条件下的分布面积；S 为调查区总面积。

当 $I_{xi\to A}>0$ 时，反映了地质灾害 A 在对应因素 x 在 i 状态或区间下发生地质灾害的可能性较大，或者说该状态或区间有利于地质灾害 A 的发生；当 $I_{xi\to A}<0$ 时，则反之说明不利于地质灾害 A 的发生；当 $I_{xi\to A}=0$ 时，反映了不提供有关地质灾害 A 发生与否的任何信息[4]。

每个评价单元地质灾害的易发性是各因素综合影响的结果，各影响因素又存在不同的状态或区间，各因素各状态区间地质灾害发生的总信息量值计算公式为：

$$I = \sum_{i=1}^{n} \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \tag{2}$$

式中，I 为每个评价单元地质灾害发生的总信息量值；N_i 为对应因素在 i 状态或区间条件下地质灾害的面积或地质灾害的数量；S_i 为对应因素在 i 状态或区间分布的总面积；N 为调查区地质灾害的总面积或总地质灾害数量；S 为调查区总面积。

2.2 评价过程

2.2.1 评价单元的划分

地质灾害危险性评价常用的评价单元主要有行政单元、栅格单元、均一条件单元、自然地貌单元及斜坡单元等。本文结合研究区具体情况和不同评价单元的特点，最终选取了栅格单元作为评价单元。根据以往学者得到的经验公式[5]：

$$G_s = 7.49 + 0.000\,6\,s - 2.0\times10^{-9}s^2 + 2.9\times10^{-15}s^3 \tag{3}$$

式中，G_s 为建议评价栅格单元的大小；S 为评价工作比例尺的分母。

本研究所使用的 DEM 数据比例尺为 1∶5 万，所得栅格单元的大小计算结果为 42.68 m，共划分出 68 319 122 个栅格单元。

2.2.2 评价因子的选取

地质灾害的发生是由灾害体自身内部基础地质

条件与外界地形地貌、地质构造等因素共同作用的结果。跟据野外实地调查结果分析，得出永善县滑坡地质灾害发育特征和分布规律如下：

（1）全县滑坡滑体主要为土质，滑体物质主要为坡面松散土体；其扩展方式主要以牵引式为主，推移式滑坡次之；诱发滑坡的主导因素主要是因为地形地貌、地层岩性、工程地质岩组、自然斜坡结构等自然因素引发滑坡；滑坡主要发育于坡度为15°～44°的斜坡上，主要为层状软弱工程岩组中。

（2）全县滑坡在时间上的分布规律为在每年汛期4～9月份，特别是7、8月份发育最多；在空间上的分布规律为主要分布于河谷岸坡和山间坡度相对较缓的斜坡地带。

因此，选择了后文中9类影响因素作为一级评价因子，并根据各评价因子对滑坡地质灾害的影响程度，按照以下影响程度从高到低的顺序依次排序：

（1）一级评价因子

通过分析永善县滑坡地质灾害的发育情况与分布规律，结合滑坡地质灾害孕灾地质条件分析结果，综合考虑各项滑坡影响因素，本次滑坡易发性评价选取了工程地质岩组、水系密度、道路距离、构造距离、建筑物密度、高程、地类、坡度和斜坡结构9个一级评价因子。

（2）二级评价因子

在一级评价因子的基础上，将各类因子划分为不同层级的区间作为二级评价因子。共划分出73个二级评价因子。

2.2.3　评价因子信息量值计算

滑坡评价因子的信息量值，是通过计算滑坡地质灾害点在各评价因子内不同层级的区间占比情况与各评价因子内不同层级的区间面积占比情况之间的比值求自然对数得出的[6]。

将各评价因子的总信息量值按从大到小的顺序依次排布，结果是：工程地质岩组、构造距离、水系距离、高程、地类、坡度、斜坡结构、道路距离、建筑物密度。根据不同次级评价因子信息量值的正负相关性判断，在层状软弱和软硬相间工程地质岩组，水系密度高的区域，距离道路越近，距离构造距离越近，建筑物密度越大，高程越大，地类属于城镇村及工矿用地、公共管理与公共服务用地、交通运输用地、其他土地、住宅用地和园地，坡度在缓坡向陡坡过渡区，斜坡结构类型为顺向坡结构的条件下容易发生滑坡。

2.2.4　信息量值与可靠度分析

（1）工程地质岩组

由工程地质岩组因子的信息量值可以看出，滑坡在层状软弱和软硬相间工程地质岩组中易发。因为层状结构面与面之间因密度、孔隙度、渗透率和完整性等不同易产生层间间隙，地表水下渗至层间间隙，易沿层面径流，减小层间摩擦力；在水流浸润作用下，软弱和软硬相间岩层易发生软化变形诱发地表形变；软弱岩层抗风化能力较弱，地表常形成较厚的风化残积层，为滑坡创造了有利条件[7]。

（2）水系密度

对水系密度因子的信息量值进行分析，水系密度高的区域滑坡易发。因为水系越发育，地表径流对岸坡的侵蚀和沿孔隙、裂隙下渗作用越明显，岩土体自重增加，内摩擦力降低，静水压力和动水压力增大，越易造成地表岩土体下滑，从而诱发滑坡。

（3）道路距离

修建道路时，边坡开挖易形成高陡边坡，破坏了原有斜坡的稳定性和岩体的完整性，岩石物理力学强度降低，易诱发滑坡；道路外侧路基回填易造成路基下沉；同时边坡开挖产生的废渣石随意堆放至斜坡和冲沟，形成弃渣边坡，易诱发渣土滑坡。故道路距离信息量反映距离道路越近，滑坡越易发。

（4）构造距离

由构造距离因子的信息量值可以看出，距离构造越近，滑坡越易发。构造发育的区域，岩层变形和断裂迹象明显，裂隙发育，岩层完整性被破坏，岩土体物理力学强度降低，稳定性降低，易诱发滑坡；同时可能产生构造裂隙水增大附近岩土体的富水性，加剧滑坡的发生。

（5）建筑物密度

建筑物密度越大，人类活动越强烈，房屋建设造成加载、切坡、地基回填等情况破坏了原有斜坡的稳定性，滑坡越易发。

（6）高程

高程对滑坡易发程度的影响主要反映为高程所对应的地形地貌特征。滑坡易发的高程区域多位于河谷及其岸坡，为多级斜坡和陡崖的微地貌组合；随着高程继续升高，地形地貌逐渐过渡为台地区，地势总体较平缓，高差降低，滑坡相应减少。

（7）地类

从地类因子的信息量分析，滑坡信息量较高的主要为城镇村及工矿用地、公共管理与公共服务用地、交通运输用地、其他土地、住宅用地和园地，为人类活动较强的区域，边坡开挖、矿山开采、农业灌溉等活动易诱发滑坡的发生。

（8）坡度

从坡度分析，坡度过缓虽有利于滑体物质堆积，

但产生的下滑力不足；坡度太陡虽有利于滑体下滑，但滑体物质难于堆积。故滑坡在缓坡向陡坡过渡区易发。

（9）斜坡结构

从斜坡结构分析，滑坡集中发育于顺向坡结构中，其原因是顺向坡结构层面形成有利的滑动结构面，同时层间间隙有利于地表地下水的自然排泄，减小了层与层之间的摩擦力，使得地表覆盖层和软弱岩层更易软化变形顺坡滑动，从而诱发滑坡。

各评价因子滑坡易发性信息量值计算结果如表 1 所示。

表 1　滑坡易发性信息量值统计表

一级评价因子	二级评价因子	信息量值	一级评价因子	二级评价因子	信息量值
工程地质岩组	坚硬碳酸盐岩工程岩组Ⅰ1类	−0.078 8	高程/m	<783.06	0.326 9
	坚硬块状玄武岩工程岩组Ⅰ2类	−1.023 8		783.06～1 144.47	1.094 5
	层状较坚硬工程岩组Ⅱ类	0.080 2		1 144.47～1 472.00	0.780 8
	层状软硬相间工程岩组Ⅲ类	0.558 4		1 472.00～1 799.53	−0.115
	层状软弱工程岩组Ⅳ类	0.608 7		1 799.53～2 104.47	−0.359 7
	松散工程岩组Ⅴ类	−0.000 8		2 104.47～2 375.53	−1.333 7
水系密度 /km·km^{-2}	<0.37	−1.888 2		2 375.53～2 669.18	−1.879
	0.37～0.53	−0.997 1		>2 669.18	−2.692 2
	0.53～0.68	−0.208 1	地类	草地	−1.270 6
	0.68～0.82	0.120 8		城镇村及工矿用地	1.712
	0.82～0.97	0.467 8		耕地	0.248 6
	0.97～1.16	0.753 1		工矿及仓储用地	0
	1.16～1.50	0.987 1		公共管理与公共服务用地	1.556 2
	>1.50	0.544 7		交通运输用地	1.093 4
道路距离/m	<500	0.584 9		林地	−0.400 9
	500～1 000	−0.323 8		其他土地	1.383 6
	1 000～1 500	−0.370 5		商服用地	0
	1 500～2 000	−0.955 2		水域及水利设施用地	0
	2 000～2 500	−1.348 8		特殊用地	0
	2 500～3 000	−1.387 8		园地	0.961 7
	3 000～3 500	−2.611 9		住宅用地	2.102
	>3 500	0	坡度/°	<6.78°	−1.027 6
构造距离/m	<500	0.473 1		6.78°～17.64°	0.226 3
	500～1 000	0.081 7		17.64°～26.12°	0.568 3
	1 000～1 500	−0.062 4		26.12°～33.58°	0.168 4
	1 500～2 000	−0.477 3		33.58°～40.37°	−0.065 1
	2 000～2 500	−0.241 6		40.37°～47.83°	−0.631 5
	2 500～3 000	0.006 3		47.83°～57.67°	−0.653 6
	3 000～3 500	−0.001 6		>57.67°	−1.034 6
	>3 500 m	0.321 2	斜坡结构	顺向坡	0.599 8
建筑物密度 /km·km^{-2}	<0.65	−4.775 9		切向坡	−0.003 1
	0.65～1.31	−0.252 9		横向坡	0.196 5
	1.31～1.99	1.025 9		逆向坡	0.123 7
	1.99～2.76	1.633 5		近水平层状坡	−0.136 9
	2.76～3.54	1.706 9		块状岩体斜坡	−1.093 1
	3.54～4.43	2.019 6			
	4.43～5.50	2.321 5			
	>5.50	2.513 9			

2.3　评价结果

利用 ArcGIS 对各评价因子的栅格图层按次级因子的划分进行重分类，再将栅格值赋值为对应的信息量值，通过加权叠加功能对各评价因子的栅格图层进行叠加分析，得到各灾害类型的易发性指数栅格图层[8]。

因此，将滑坡评价因子信息量值相互叠加后得到的所有因子的信息量总值按取值区间高易发≥5.0、中易发介于 2.0～5.0、低易发介于−1.5～2.0、非易发<−1.5 进行分区，从而得到滑坡的易发性评价图，如图 1 所示。

3　永善县滑坡地质灾害危险性评价

地质灾害危险性的评价，就是利用地质学原理、

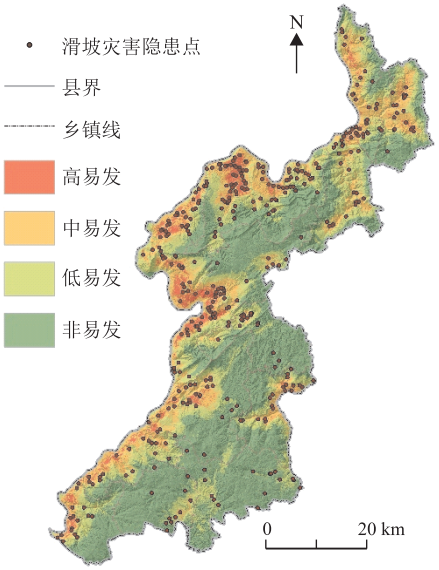

图 1　永善县滑坡易发性评价图

数学方法等相结合，充分考虑地质灾害系统的各种特征，对系统内部各影响因素及其相互关系进行综合的、动态的分析，建立区域地质灾害发展模式，进而分析确定区域内现今或是将来一段时间内、特定条件下，地质灾害发生的可能性[9]。

本研究在滑坡易发性评价基础上，选择 10 a 平均降雨量和永善县地震动峰值加速度区划为诱发因素进行地质灾害危险性分析评价。通过提取与叠加分析，得出调查区内 10 a 平均降雨栅格数据和永善县地震动峰值加速度区划。结合滑坡隐患点在降雨和地震动峰值加速度区间的统计分析，分别计算出各降雨和地震动峰值加速度区间的信息量值，再叠加易发性信息量值得到危险性信息量值，再根据信息量值取值区间危险性高≥5.0、危险性高介于−0.5～5.0、危险性中介于−8～0.5、危险性低<−8进行分区，得到调查区危险性评价图，如图 2 所示。

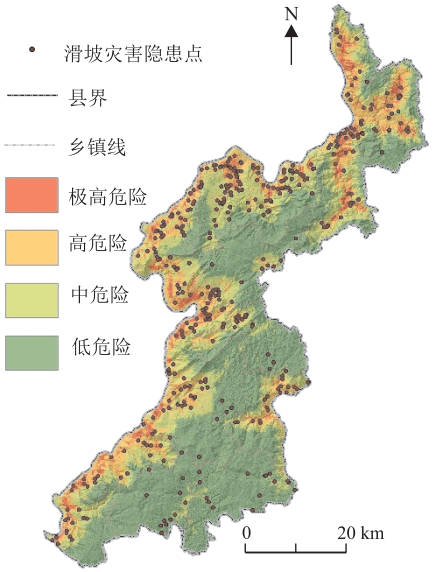

图 2　永善县滑坡危险性评价图

根据危险性评价，结合调查区各区域地理位置、地质灾害易发程度、承灾体情况、险情规模进行了危险性分区，共划分 4 个大区 20 个小区，如表 2 所示。

表 2　永善县滑坡危险性分区统计表

分区	面积/km²	占比/%	分布位置
极高危险区	104.98	3.93	主要位于各河流中下游河谷岸坡，以及永善县县城级南部斜坡，务基镇、黄华镇、大兴镇、码口镇局部分布
高危险区	563.12	21.06	主要位于金沙江右岸河谷及其支流流域，以及位于洒渔河左岸河谷和上小河流域
中危险区	733.59	27.43	主要位于金沙江右岸河谷后缘及其支流流域，洒渔河左岸河谷及其上小河流域后缘，冷水河流域河谷岸坡，新场河支流中上游流域
低危险区	1 377.52	47.58	主要位于永善县北部、东北部山区，中部至南部山区和台地

4　永善县滑坡地质灾害易损性评价

4.1　评价方法

基于承灾体的特征，本次工作将易损性主要反映在乡镇人口分布、物质分布和经济分布上。

根据 2021 年永善县完成地区生产总值和永善县第七次人口普查数据，分别将人口分布、物质分布和经济分布与建筑物密度、道路密度和建筑物道路密度挂钩，求得各分区人口密度、物质密度和经济密度，再将三者归一化后叠加，以评价调查区易损性。

4.2　易损性评价

在人口密度、物质密度和经济密度分布的基础上，进行调查区易损性评价。由于各密度区间不同，需对各密度值进行归一化处理，之后将三者分别按人口密度 0.4、物质密度 0.3 和经济密度 0.3 的权重进行加权叠加，得到调查区易损性指数。再将易损性指数按自然间断点分级法(Jenks)分为 4 个区间，得到调查区易损性评价结果如图 3 所示。

5　永善县滑坡地质灾害风险性评价

地质灾害风险性评价是指在一定区域和时期内，对各类承灾体因地质灾害而造成的损失的可能性进行评价，是在充分调查分析地质灾害各孕灾地质条件及其各诱发因素的基础上，结合范围内人口、

经济等可能造成损失的大小、程度及其抗灾强度等的分析评价，最终进行的地质灾害综合性评价[10]。

5.1 评价方法

风险性评价采用风险性评价模型“风险性＝危险性×易损性”和矩阵分析方法（如表 3 所示）对地质灾害的危险性和易损性评价结果进行叠加运算[11]。

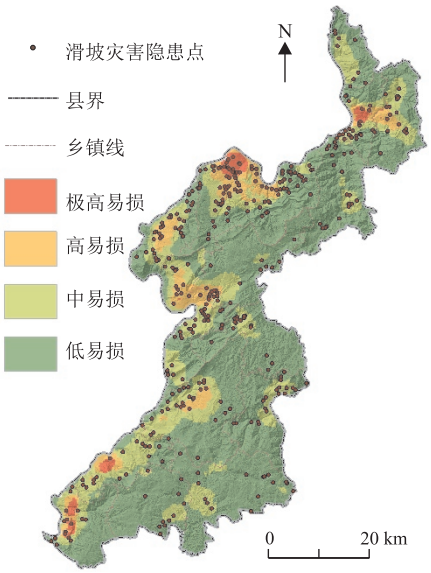

图 3 永善县滑坡易损性评价图

表 3 地质灾害风险等级划分表

易损性＼危险性（风险等级）	极高	高	中	低
极高	极高	极高	高	中
高	极高	高	中	中
中	高	高	中	低
低	高	中	低	低

5.2 风险性评价

通过对危险性和易损性评价结果分别进行赋值并利用 ArcGIS 将两者按照：地质灾害风险性指数＝地质灾害危险性指数×易损性指数进行叠加运算[12]，得到风险性评价结果指数表，并根据指数值大小，使用自然间断点法将其划分为极高、高、中、低 4 个风险等级。

根据风险性评价，结合调查区各区域地理位置、滑坡地质灾害易发程度、承灾体情况、险情等级和地质灾害防治能力等进行了最终永善县滑坡地质灾害风险性分区，共划分出 9 个极高风险区、8 个高风险区、5 个中风险区和 1 个低风险区。如表 4 和图 4 所示。

根据表 4 和图 4 对分区结果进行分析：

表 4 永善县滑坡风险性分区表

大区	子区名称	面积/km²	占比/%
极高风险区Ⅰ	桧溪极高风险区	13.39	0.48
	细沙极高风险区	7.09	0.26
	马路-明子极高风险区	10.48	0.38
	县城东南部极高风险区	26.1	0.94
	务基极高风险区	7.23	0.26
	黄华极高风险区	14.69	0.53
	新店极高风险区	2.91	0.10
	大兴极高风险区	13.66	0.49
	码口极高风险区	15.69	0.56
高风险区Ⅱ	青胜高风险区	33.76	1.21
	细沙-桧溪-团结高风险区	112.88	4.06
	溪洛渡高风险区	62.07	2.23
	务基高风险区	53.49	1.92
	务基-黄华高风险区	128.19	4.61
	水竹双旋高风险区	6.08	0.22
	莲峰-码口高风险区	166.03	5.97
	墨翰高风险区	30.94	1.11
中风险区Ⅲ	青胜-团结中风险区	97.15	3.50
	溪洛渡-码口中风险区	295.96	10.65
	马楠冷水中风险区	9.68	0.35
	墨翰中风险区	23.56	0.85
	茂林-伍寨中风险区	18.91	0.68
低风险区Ⅳ	永善县低风险区	1 629.27	58.62

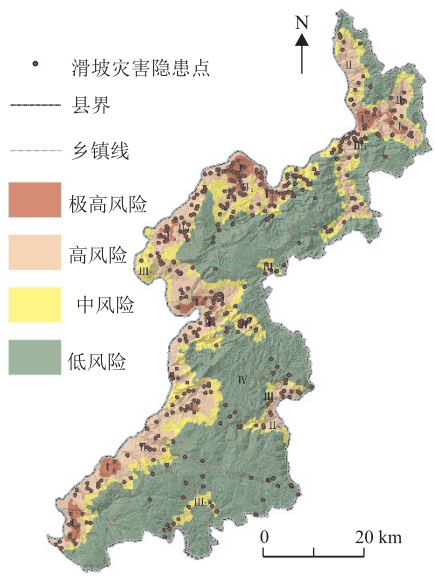

图 4 永善县滑坡地质灾害风险性分区图

（1）极高风险区

永善县滑坡地质灾害极高风险区主要分布在桧溪河下游河口两岸斜坡，细沙河流域及细沙河与桧溪河分水岭区域，杨桥河沟左岸至明子村斜坡，永善县城井底小河流域中下游，务基八角村-凉台村斜坡，莲峰镇新店村、石板滩河中上游支流斜坡，大兴镇驿马沟和板厂沟下游流域，码口镇至利其村金沙江河谷岸坡等区域。极高风险区总面积 111.24 km²，占全县总面积的 4.00%。

（2）高风险区

永善县滑坡地质灾害高风险区主要分布在金沙江右岸大河沟、炭厂沟和水星坝小河流域中下游，溪洛渡段佛滩社区-雪柏村，井底小河中游，务基镇回龙村至黄华镇三合村；金沙江沿岸莲峰-码口段；桧溪河、水炉沟和团结河及其支流流域；洒渔河河谷岸坡以及水竹乡双旋村。高风险区总面积 593.44 km^2，占全县总面积的 21.35%。

（3）中风险区

永善县滑坡地质灾害中风险区主要分布在青胜乡、桧溪河和团结河河谷边缘；金沙江右岸河谷溪洛渡-码口段河谷区与山地区过渡区域；新场河流域中下游河谷区域；墨翰乡上下小河流域中游以及冷水河流域。中风险区总面积 445.26 km^2，占全县总面积的 16.02%。

（4）低风险区

永善县滑坡地质灾害低风险区主要分布在永善县境内的山地和台地区，以及除上述风险区以外的地区。低风险区总面积 1 629.27 km^2，占全县总面积的 58.62%。

6　结论

本文以永善县滑坡地质灾害为研究对象，根据相关资料数据，选取了滑坡危险性和易损性评价指标，基于 GIS 平台，利用信息量模型，对研究区滑坡地质灾害进行了易发性、危险性、易损性和风险性的评价以及分区研究。得出结论如下：

（1）选取工程地质岩组、水系密度、道路距离、人类活动、构造距离、高程、地类和坡度 8 个指标作为研究区滑坡地质灾害易发评价指标，采用信息量模型进行了易发性评价。

（2）选择 10 a 平均降雨量和永善县地震动峰值加速度区划为诱发因素进行永善县滑坡地质灾害危险性分析评价。评价结果显示：永善县滑坡地质灾害极高危险区面积为 104.98 km^2，占全县面积的 3.93%；高危险区面积为 563.12 km^2，占全县面积的 21.06%；中危险区面积为 733.59 km^2，占全县面积的 27.43%；低危险区面积为 1 377.52 km^2，占全县面积的 47.58%。

（3）选取人口密度、物质密度和经济密度 3 个易损性指标建立永善县滑坡地质灾害易损性评价指标体系，以栅格为评价单元，将三者归一化后叠加对研究区进行地质灾害易损性评价。易损性评价分区结果为：极高易损性分区的面积为 47.46 km^2，占全县面积比例为 1.71%；高易损性分区的面积为 196.95 km^2，占全县面积比例为 7.09%；中易损性分区的面积为 616.22 km^2，占全县面积比例为 22.17%；低易损性分区的面积为 1 918.59 km^2，占全县面积比例为 69.03%。

（4）根据永善县滑坡地质灾害危险性和易损性评价分区结果，采用风险性评价模型“风险性＝危险性×易损性”和风险等级判断矩阵，将永善县滑坡地质灾害危险性和易损性评价结果叠加，得到永善县滑坡地质灾害风险性分区图，并分为极高、高、中、低风险性 4 个风险等级。其中，极高风险区总面积 111.24 km^2，占全县总面积的 4.00%；高风险区总面积 593.44 km^2，占全县总面积的 21.35%；中风险区总面积 445.26 km^2，占全县总面积的 16.02%；低风险区总面积 1 629.27 km^2，占全县总面积的 58.62%。

参考文献

[1] 杨吉忠，张准，张颖. 永善县地质灾害类型与成因研究[J]. 防灾科技学院学报，2007，9(3)：61-63＋141.

[2] 赫念学，李星宇. 永善县城东部滑坡演化及复活滑动机理分析[A]. 中国地质学会. 2021 年全国工程地质学术年会论文集[C]. 科学出版社，2021：038-045.

[3] 王磊，常鸣，邢月龙. 基于信息量法模型与 GIS 的滑坡地质灾害风险性评价[J]. 地质灾害与环境保护，2021，32(2)：14-20.

[4] 赵魁. 基于 ArcGIS 的云安区地质灾害易发性分区评价[J]. 地质灾害与环境保护，2020，31(4)：38-42.

[5] 汤国安，刘学军，闾国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 科学出版社，2006.

[6] 赵魁. 基于 ArcGIS 的云安区地质灾害易发性分区评价[J]. 地质灾害与环境保护，2020，31(4)：38-42.

[7] 魏哲. 甘肃省临夏地区工程地质岩组对地质灾害的控制研究[J]. 工程技术研究，2022，7(10)：227-229.

[8] 张钟远，徐世光，李超，等. 基于 GIS 和加权信息量模型的绿春县城地质灾害易发性评价[J]. 地质灾害与环境保护，2022，33(1)：37-43.

[9] 苏越. GIS 下基于 FAHP 的广东省信宜市地质灾害危险性分区评价[J]. 地质灾害与环境保护，2017，28(2)：32-39.

[10] 郭邦梅，权开兄. 基于 ArcGIS 的青海隆务河流域灾害风险性评价[J]. 地质与资源，2019，28(3)：289-292.

[11] 姚淼. 基于 GIS 的延安市吴起县地质灾害风险性评价[D]. 西安科技大学，2018.

[12] 卢文徽. 福建省古田县地质灾害风险调查评价研究[J]. 能源与环境，2022，175(6)：105-109.

作者简介： 罗荣(1998－　)，男，硕士研究生，从事灾害地质与环境地质方面的研究。E-mail：411734303@qq.com

通讯作者： 张世涛(1964－　)，男，博士，教授，从事区域地质与环境地质方面的研究。E-mail：taogezhang@hotmail.com