

基于层次分析-信息量模型的 地质灾害风险性评价研究

——以四川省雅安市为例

姜锡宸 刘桃

(四川省地质工程勘察院集团有限公司,成都 610032)

摘要: 雅安市地处四川盆地西缘与青藏高原的过渡地带,地形切割强烈,地质构造复杂,受“5·12”汶川地震和“4·20”芦山地震影响下,区内地质灾害频发。本文以雅安市作为研究对象,通过野外地质灾害调查和室内分析研究,开展了市域范围的地质灾害风险现状评价及预测评估。查清了研究区的地质环境条件和地质灾害类型、分布与规模,研究区内共发现地质灾害3846处,以滑坡、崩塌和泥石流为主;基于现场调查,选取坡度、流域平均坡度、工程地质岩组、斜坡结构类型、断层密度、剖面曲率、距道路距离、流域高差、主沟纵坡降、沟壑密度等因子,基于层次分析法-信息量模型对研究区各类型地质灾害易发性进行评价;结合易发性、危险性和易损性结果,运用 ArcGIS 对研究区地质灾害进行风险性综合评价和分区,预测了可能诱发或加剧的地质灾害危险性。结果表明:研究区可划分为低风险区、中风险区、高风险区和极高风险区4个等级,分别占研究区面积的89.27%、10.23%、0.49%、0.01%。研究成果可为区域性地质灾害风险评价提供方法借鉴,也可为雅安市防灾减灾及地质灾害风险管控提供参考。

关键词: 地质灾害;层次分析法;信息量法;风险

中图分类号: P694;P56 **文献标识码:** A

GEOLOGICAL HAZARD RISK ASSESSMENT STUDY BASED ON AHP-INFORMATION COUPLING MODEL ——A CASE STUDY OF YA'AN CITY IN SICHUAN PROVINCE

JIANG Xi-chen, LIU Tao

(Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd, Chengdu 610032, China)

Abstract: Ya'an City is located on the transition zone between the Sichuan Basin's western edge and the Tibetan Plateau. The geological structure of the study area is complicated. Under the influence of the “5·12” Wenchuan Earthquake and the “4·20” Lushan Earthquake, geological hazards occurred frequently in the study area. This paper evaluates the current situation and predicts the risk of geological hazards in Ya'an City through field investigation and analysis. The geological environment with types, distribution and scale of geological hazards in the study area were identified. A total of 3846 geological hazards were identified in the study area, mainly landslide, collapse and debris flow. Based on the field investigation, slope, watershed average slope, stratum lithology, slope structure, fault density, plane curvature, distance from road, watershed elevation difference, gully longitudinal gradient, gully density was selected as evaluation factors. The susceptibility of

收稿日期: 2024-01-20 **改回日期:** 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42377194);四川省自然科学基金面上项目(2023NSFSC0282);四川省中央引导地方科技发展项目(2023ZYD0151)

each type of geological hazard in the study area was evaluated by AHP-information coupling model. Based on the results of susceptibility, hazard and vulnerability, ArcGIS was used to evaluate and classify the risk of geological hazards in the study area. The potential or intensified geological hazard risk in the study area was predicted. The results show that the study area can be divided into four classes: low-risk zone, medium-risk zone, high-risk zone and very high-risk zone, respectively accounting for 89.27%, 10.23%, 0.49% and 0.01% of the study area. The research results can provide methods for regional geohazard risk evaluation and reference for geological hazard risk management in Ya'an City.

Key words: geological hazards; analytic hierarchy process; information method; risk

雅安市地处四川盆地西缘与青藏高原的过渡地带,属盆周山地地貌区,区内以低、中山地貌为主,地形切割强烈,地貌起伏变化大,山峦纵横,地质构造复杂,具有极易发生地质灾害的地质环境基础^[1]。特别是受“5·12”汶川特大地震和“4·20”芦山强烈地震影响和作用,区域地质环境破坏十分严重,地质灾害发生频率和危害十分严重。例如2021年9月25日发生在天全县喇叭河镇龙头沟的山洪泥石流致使驻地一幢施工人员板房宿舍被推覆掩埋,造成8人死亡,6人失联。地质灾害不仅给人民群众生命财产安全造成严重危害、构成严重威胁,并严重影响了全市区域经济发展和震后恢复重建成果。因此通过区域地质灾害风险性评价工作可提前预测地质灾害潜在位置,为地质灾害的预警预报、防灾减灾提供一定的科学依据^[2]。

地质灾害风险评价主要包含地质灾害易发性、危险性和易损性评价等内容^[3],是为了综合评价和预测地质灾害发生的可能性大小^[4]。用于地质灾害的评价模型众多,主要分为主观判断法和客观分析法两类。其中,主观判断法主要有层次分析法(AHP法)、专家评分法和模糊数学法等,而客观分析法则主要有信息量法、熵值法和证据权法等^[5-10]。谭真艳等基于ArcGIS平台,利用信息量模型,定量评价了巫溪宁桥片区高陡峡谷区高位地质灾害的易发性^[11];赵毅斌等采用逻辑回归模型对赣南地区某重点城镇进行了地质灾害危险性评价^[12];罗路广等采用确定性系数和逻辑回归耦合模型开展了九寨沟景区危险性评价^[13]。

通过上述分析,采用层次分析-信息量模型,通过AHP法赋予评价因子的权重,再由信息量法得到每个因素单独的信息量值进行评价,该法建模简便,思路清晰,将主客观相结合,可以更加客观、科学地为地质灾害防治工作提供指导,对研究区地质灾害防治和城市建设规划等具有重要意义。

1 研究区概况及地质灾害情况

研究区位于四川盆地西缘、邛崃山东麓,为盆地到青藏高原的过渡地带,地理坐标介于 $28^{\circ}51' \sim 30^{\circ}56'N$, $102^{\circ}16' \sim 103^{\circ}23'$ 。研究区属亚热带湿润季风气候区,年均气温分别约为 $14^{\circ}C$,年均降雨量为 $1\,506\text{ mm}$,60%降雨集中在7~9月份。区内北部、西部、南部地势高,东部和中部较低,海拔 $627 \sim 5\,793\text{ m}$ 。研究区历经晋宁-澄江运动、燕山运动、喜山运动等多次构造变动,形成了不同特征的构造体系。西北部为金汤弧形构造,北部为华夏系龙门山构造,西部为“歹”型向构造,东部为新华夏系川西褶皱带,南部为北北西向构造带。受地质构造的控制,境内山脉纵横,地表崎岖,区内地形地貌以山地为主,丘陵平坝稀少。区内地层出露齐全,从元古界的古老变质岩系至第四系松散堆积均有出露。研究区地质灾害数量多(图1),分布广,截至目前,研究区地质灾害有滑坡(2 172处),崩塌(861处),泥石流(524处),不稳定斜坡(263处),地面塌陷等其他地质灾害(26处)。地质灾害共威胁16 426户62 555人,威胁资产510 461万元。

2 雅安市地质灾害风险性评价及分区

雅安市地质灾害风险性评价按照易发性-危险性-易损性-风险性层次递进评价,完成雅安市地质灾害风险性区划。

2.1 雅安市地质灾害易发性评价及分区

2.1.1 评价方法

(1) 层次分析法

层次分析法(AHP)于20世纪70年代最早由美国著名的运筹学家T. L. Satty提出,是一种定量分析和定性分析相结合的多准则决策方法^[14]。层次分析法将复杂的研究对象作为一个系统,将决策问题分解为不同的层次结构,再构造各个相邻层次之间的判断矩阵,求取其最大特征根及其对应的特

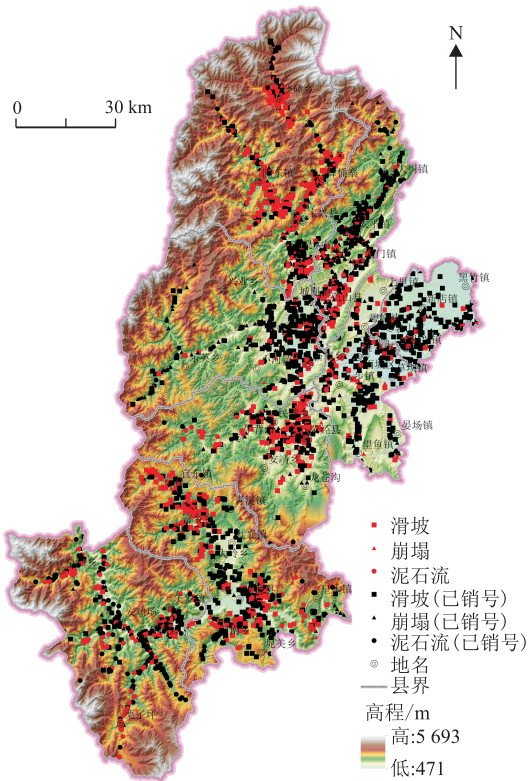


图 1 研究区地质灾害分布图

征向量,最后进行层次总排序加权求和得到评价因素相对于目标层的权重值。

(2) 信息量模型

信息量模型是从信息预测发展而来的一种评价预测方法^[15],具体是通过特定评价单元内某种因素作用下地质灾害发生频率与区域地质灾害发生频率相比较实现。由于每个评价单元受众多因素的综合影响,各因素又存在若干状态,各状态因素组合条件下地质灾害发生的总信息量可用下式确定:

$$I = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (1)$$

式中, I 为对应特定单元地质灾害发生的总信息量,指示地质灾害发生的可能性,可作为地质灾害易发性指数; N_i 为对应特定因素、第 i 状态(或区间)条件下的地质灾害面积或地质灾害点数; S_i 为对应特定因素、第 i 状态(或区间)的分布面积; N 为调查区地质灾害总面积或总地质灾害点数; S 为调查区总面积。

2.1.2 评价流程

(1) 评价单元选取

本文针对滑坡、崩塌易发性评价是基于栅格单元开展的,泥石流易发性评价是基于流域单元开展评价。其中栅格评价单元的大小为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$,共 2 846 列,4 623 行,6 023 660 个栅格单元。泥石流

易发性评价的流域单元通过 ArcGIS 水文分析工具提取获得,共计 524 个流域子单元。

(2) 评价因子确定

初步选取易发性评价因子,为保证评价过程中指标因素的相互独立性,需开展初选指标的相关性分析,剔除相关性高的因子。综合确定研究区各灾种易发性评价指标(表 1)。

表 1 研究区各灾种易发性评价因子选取表

类型	一级因子	二级因子
滑坡	地形地貌	坡度、剖面曲率
	地层岩性	工程地质岩组
	地质构造	断层密度
	斜坡构造	斜坡结构
崩塌	地形地貌	坡度
	地层岩性	工程地质岩组
	斜坡构造	斜坡结构
	地质构造	断层密度
	人类工程活动	距道路距离
泥石流	地形地貌	流域高差、流域平均坡度、主沟纵比降、沟壑密度
	物源特征	工程地质岩组

(3) 评价因子信息量计算

① 滑坡评价因子信息量计算

经计算,各因子总信息量排序为斜坡结构>断层密度>工程地质岩组>坡度>剖面曲率。根据各次二级因子信息量,在坡度为 $<15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 30^\circ$,工程地质岩组为半胶结黏土、第四系松散堆积体、薄片状泥页岩、层块状砂砾岩、红层砂泥岩,斜坡结构为逆向坡、横向坡、顺向坡,断层密度为 $10 \sim 30$ 和 $30 \sim 50$,剖面曲率为 $-0.6 \sim 0.6$ 的条件下易发生滑坡。滑坡评价因子信息量计算见表 2。

② 崩塌评价因子信息量计算

经计算,各因子总信息量排序为斜坡类型>工程地质岩组>坡度>断层密度>距道路距离。根据各次二级因子信息量,在坡度为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 、 $>60^\circ$,工程地质岩组为半胶结黏土、层块状砂砾岩、红层砂泥岩、层块状灰岩,斜坡结构为逆向坡、顺向坡,断层密度为 $10 \sim 30$ 和 $30 \sim 50$,距道路距离为 $0 \sim 20\text{ m}$ 的条件下易发生崩塌。崩塌评价因子信息量计算见表 2。

③ 泥石流评价因子信息量计算

经计算,各因子总信息量排序为流域高差>主沟纵比降>沟壑密度>流域平均坡度>工程地质岩组。根据各次二级因子信息量,在流域平均坡度为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 45^\circ$ 、 $45^\circ \sim 60^\circ$,工程地质岩组为第四系松散堆积体、层块状砂砾岩、层块状变质砂砾岩,流域高差为 $<500\text{ m}$ 、 $1\ 000 \sim 1\ 500\text{ m}$,主沟纵比降

表 2 研究区各灾种易发性信息量及权重值

评价因子	次级评价因子	滑坡		崩塌		泥石流	
		信息量值	权重值	信息量值	权重值	信息量值	权重值
坡度/°	<15	0.33		0		\	
	15~30	0.42		-5.07		\	
	30~45	-0.83	0.31	-0.88	0.28	\	\
	45~60	-1.49		1.92		\	
	>60	\		2.15		\	
流域平均坡度/°	<15	\		\		0	
	15~30	\	\	\	\	6.69	0.26
	30~45	\		\		6.3	
	45~60	\		\		1.56	
工程地质岩组	半胶结黏土	1.33		0.36		-0.44	
	第四系松散堆积体	0.59		-0.37		0.59	
	薄片状泥页岩	-0.11		-0.55		-0.52	
	层块状砂砾岩	0.77	0.25	1.05	0.27	0.44	0.23
	红层砂泥岩	0.68		0.49		-0.34	
	层块状变质砂砾岩	-2.47		-1.71		0.09	
	层块状灰岩	-0.39		0.19		-0.09	
块状侵入岩	-1.3		-1.14		0.22		
斜坡结构类型	逆向坡	4.61		4.81		\	
	横向破	1.72	0.24	-0.42	0.22	\	\
	斜向破	-0.02		-0.74		\	
	顺向坡	2.22		0.26		\	
断层密度	<10	-0.03		-1.29		\	
	10~30	1.58	0.13	0.44	0.14	\	\
	30~50	1.14		0.09		\	
	>50	-0.46		-1.35		\	
剖面曲率	<-2	-2.51		\		\	
	(-2,-0.6)	-0.93		\		\	
	(-0.6,0.6)	0.12	0.07	\	\	\	\
	(0.6~2)	-0.32		\		\	
距道路距离/m	>2	-0.41		\		\	
	0~20	\		2.16		\	
	20~50	\	\	-0.91	0.09	\	\
	50~100	\		-3.01		\	\
流域高差/m	100~200	\		-1.18		\	
	<500	\		\		7.7	
	500~1 000	\		\		5.01	
	1 000~1 500	\	\	\	\	6.25	0.22
主沟纵坡降/‰	1 500~2 000	\		\		4.75	
	2 000~2 500	\		\		3.59	
	<150	\		\		5.12	
	150~300	\		\		4	
沟壑密度	300~600	\	\	\	\	4.69	0.21
	600~800	\		\		3.89	
	>800	\		\		6.92	
	<0.1	\		\		3.03	
沟壑密度	0.1~1.0	\		\		4.37	
	1.0~2.0	\	\	\	\	4.37	0.09
	2.0~5.0	\		\		4.83	
	5.0~10.0	\		\		4.64	
>10.0	\		\		2.95		

<150‰、300‰~600‰、>800‰，沟壑密度为 1.0~2.0、2.0~5.0 和 5.0~10.0 的条件下易发生泥石流。泥石流评价因子信息量计算见表 2。

(4) 评价因子权重计算

在确定评价指标后，利用层次分析法计算权重。为了消除各指标间量纲的影响，需要对各个指标进行归一化处理。由于不同灾害类型选取评价因子有所差异，需结合各因子信息量和专家打分，分别构建

不同灾害类型的判别矩阵。计算各判别矩阵的最大特征值及特征向量，得出各评价因子权重。

为确保判断矩阵排序正确性以及权重分配的是否合理，需对判断矩阵进行一致性检验。一致性指标 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ ，其中 n 表示判断矩阵阶数，当 $n < 2$ 时， $CI=0$ ，判断矩阵具有完全一致性；当 $n \geq 3$ 时，需进行一致性检验。引入矩阵随机一致性比率 CR ， $CR=CI/RI$ ，其中 CI 为平均随机一致性指标，计算求取 CR 的值小于 0.1，则表示判断矩阵具有较好的一致性，权重分配合理；否则判断矩阵不满足一致性要求，需重建判断矩阵，直至 CR 满足要求。经计算，各评价因子权重见表 2。

(5) 易发性指数计算

将得出的评价因子信息量与其对应的权重值二者相乘计算得出易发性指数，并基于易发性指数进行评价。

2.1.3 易发性评价结果

最后将通过对上述数学模型计算的易发性评价结果整理发现，单纯根据数学模型评价得到的结果并不完全符合实际情况。主要原因是由于评价单元是栅格单元，根据栅格单元计算评价得到的结果与实际地质单元界线不一定重合，因此，需在数学模型计算结果的基础上进行人工复核以及消除零碎图斑，得到滑坡、崩塌易发性区划图(图 2，图 3)。考虑到泥石流的易发性是基于流域单元进行的评价，可将泥石流的易发性评价从流域单元上归结到沟道上，因此，通过 ArcGIS 空间链接功能，将泥石流基于流域单元的易发性评价结果提取到流域的沟道和堆积区上(图 4)，最终形成地质灾害易发性综合分区图(图 5)。

从易发性统计结果得出：研究区高易发区主要分布于宝兴县硃碛乡-陇东镇东部、芦山县大川镇-太平镇北部、石棉县草科乡-栗子坪等高山峡谷区，区域面积 3 256.71 km²，占研究区面积的 21.64%。中易发区主要分布于荥经县安靖乡-牛背山东部、汉源县大岭乡-青溪镇间等区域，面积 4 930.37 km²，占研究区面积的 32.77%。低易发区分布较为广泛，面积 6 582.49 km²，占研究区面积的 43.75%。非易发区较少，面积 276.63 km²，仅占研究区面积的 1.84%。

2.2 雅安市地质灾害危险性评价

2.2.1 评价指标体系及危险性评价过程

结合近 10 a 来研究区地质灾害发育规律，降雨仍是主要的诱灾因子。地质灾害危险性评价是在易发性的基础上叠加最大月累计降雨量因子。通过在

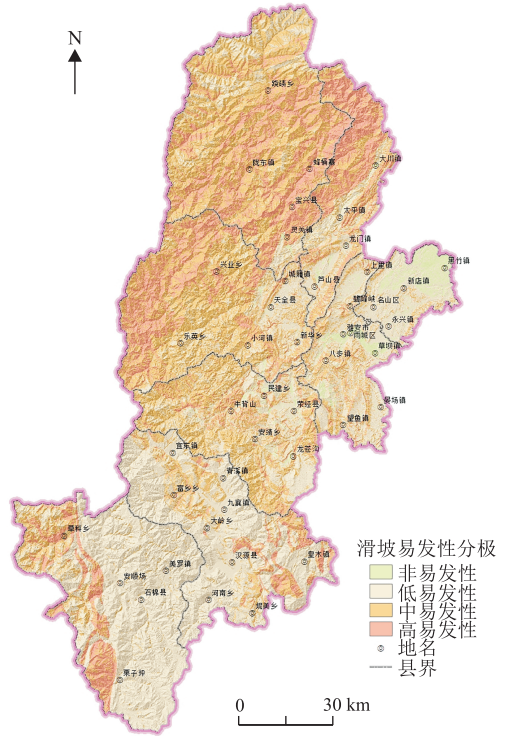


图 2 雅安市滑坡易发性评价图



图 3 雅安市崩塌易发性评价图

研究区内气象局收集的 2012~2021 年研究区合计 228 个气象站的月最大累积降雨量，得到了最大月累计降雨量等值线图(图 6)。

基于统计分析的区域危险性评价方法，是对区域地质灾害易发性评价结果的继承，在其评价结果

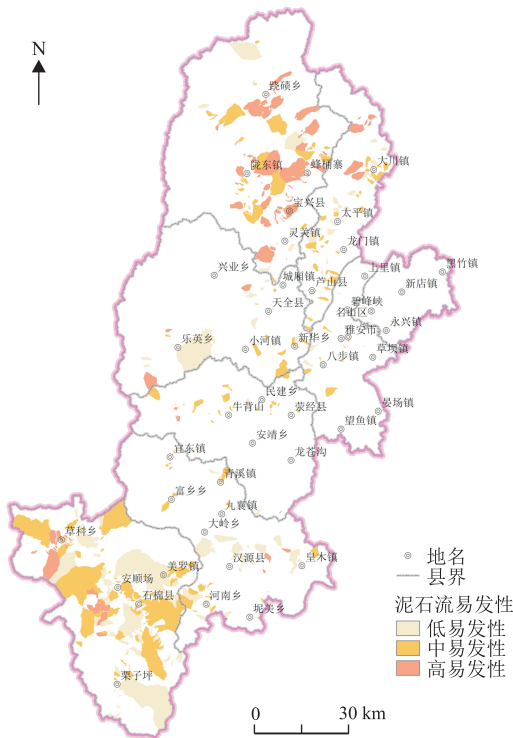


图 4 雅安市泥石流易发性评价图

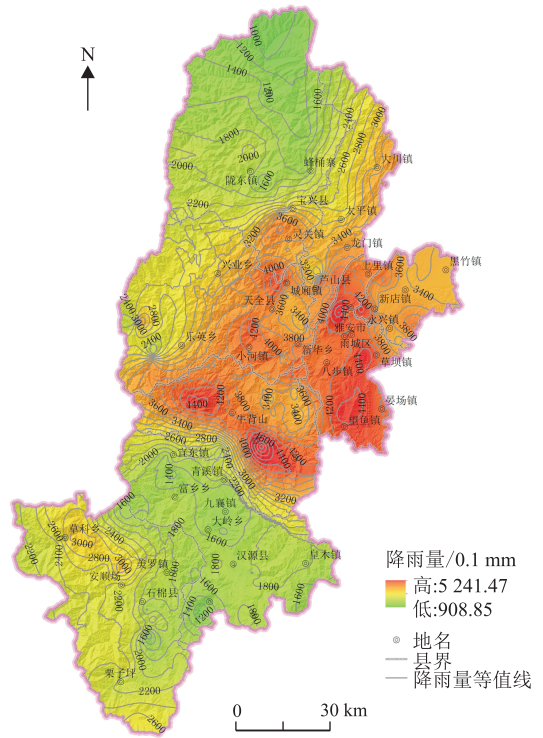


图 6 研究区最大月累计降雨量等值线图

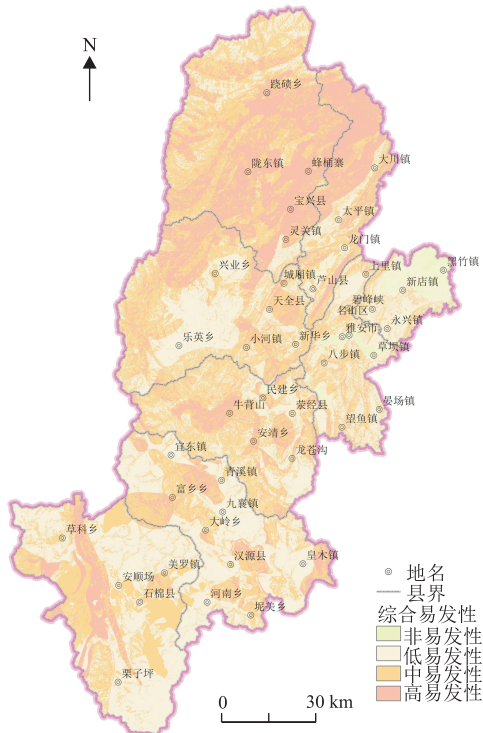


图 5 研究区地质灾害易发性评价图

的基础上考虑降雨因素对地质灾害的影响,分析降雨对地质灾害影响的基础,利用综合信息量模型对地质灾害进行危险性评价分区。

为了分析单元总信息量的分布特点和确定不同级别分区的界线,将归一化处理后的信息量值作单

元信息量累积频度分布曲线(不同步长累计信息量占总信息量的百分比),根据该分布曲线确定危险性分级分区界线值。将危险性分为“低危险”“中危险”“高危险”“极高危险”4个级别。

2.2.2 危险性评价结果

将区内基于栅格单元的灾害易发性结果叠加降雨因素得到研究区地质灾害危险性评价图,如图 7 所示。从危险性统计结果得出:研究区极高危险区分布于宝兴县城-和平村沿沟带、灵关局部地区等区域,面积 21.22 km²,占研究区面积的 0.14%;高危险区位于芦山县大川镇-龙门镇、石棉县草科乡-县饶碛乡-陇东镇东部名山区西部和南部等区域,面积 5 118.24 km²,占研究区面积的 34.02%;低危险区范围分布广泛,面积 7 932.61 km²,占研究区面积的 52.72%。

2.3 雅安市地质灾害易损性评价

2.3.1 易损性因子选取及权重确定

地质灾害易损性评价是地质灾害风险评价的重要内容,被称为承灾体具有暴露程度、应对能力以及压力后果的一种综合表现。易损性评价研究不仅能为地质灾害风险评价提供基础的社会经济数据,而且可以为区域防灾、减灾预案的制定以及工程的实施提供科学依据。以第三次全国土地普查数据为基础,结合雅安市地质灾害及其承灾体基本特征,选取人口、建筑物面积和交通作为易损性评价指标,充分

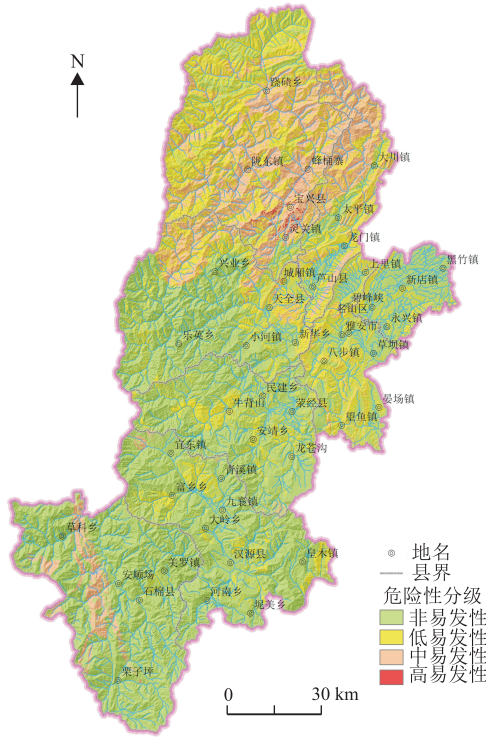


图 7 研究区地质灾害危险性评价图

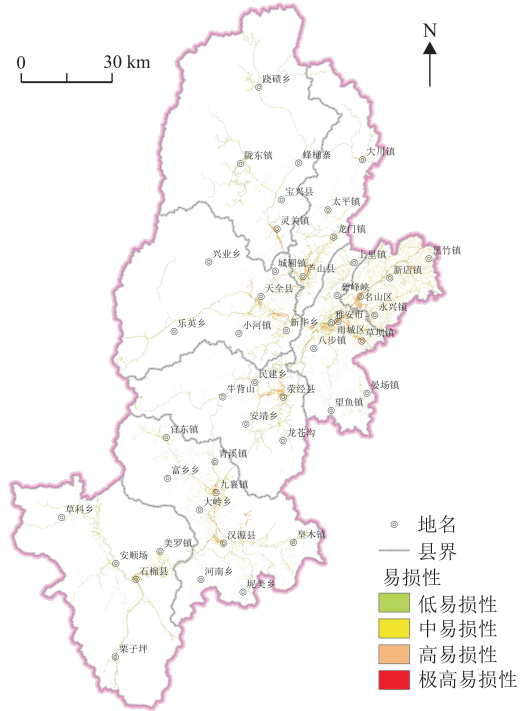


图 8 研究区地质灾害易损性分区图

反映该地区易损性的自然与社会特征。在确定评价指标的基础上,根据不同评价指标结合研究区实际情况构建各自的分级标准和赋值标准(表 3)。在易损性分级的基础上,利用层次分析法构建判别矩阵,计算各易损性评价指标权重,具体权重计算方法见 2.1.2 节,权重结果见表 4。

通过上述归一化处理,通过叠加计算得出研究区综合易损性分布图(图 8)。

表 3 易损性评价各分级因子易损性赋值表

因子	分级因子	赋值
人口	>1 000	1
	100~1 000	0.8
	10~100	0.5
	<10	0.3
建筑物面积/m ²	>10 000	1
	1 000~10 000	0.8
	100~1 000	0.5
	<100	0.3
交通	高速公路	0.9
	国道	0.8
	省道	0.5
	一般公路	0.3
	川藏铁路	0.6

表 4 易损性评价各指标归一化后权重

指标	人口	建筑物面积	交通
权重	0.65	0.23	0.12

2.3.2 地质灾害易损性区划

将小于 0.4 归为低易损性,0.4~0.6 归为中易损性,0.6~0.8 归为高易损性,大于 0.8 归为极高易损性,得到研究区易损性评价分布图,如图 8 所示。从易损性统计结果得出:研究区低易损区域面积 12 942.87 km²,占总面积的 86.53%;中易损区域面积 1 563.08 km²,占总面积的 10.45%;高易损区域面积 415.82 km²,占总面积的 2.78%;极高易损区域面积 36.12 km²,占总面积的 0.24%,主要分布于宝兴县、石棉县。

2.4 雅安市地质灾害风险性评价及分区

利用地质灾害危险性和易损性相乘叠加进行栅格运算得到研究区地质灾害的风险评价图,得到研究区风险评价分布图如图 9 所示。在 ArcGIS 中利用自然间断法将其共分为 4 级:低风险区、中风险区、高风险区和极高风险区。研究区极高风险区主要分布在宝兴县县城、灵关镇场及西河陇东至县城段两侧斜坡、天全县县城周边部分地区及荣经县牛背山等区域,面积为 1.49 km²,占研究区面积的 0.01%;高风险区位于汉源县县城东部、乌斯河镇北部、富乡乡东部、宜东镇北部区域、石棉县安顺场西部、草科乡南部区域、名山区西部平行岭谷区及荣经县名建乡和安靖乡等部分地区,面积为 73.41 km²,占研究区面积的 0.49%;中风险区位于芦山县大川镇至太平镇、石棉县县域部分沟谷地区及美罗镇周

边等部分地区,面积为 1 539.22 km²,占研究区面积的 10.23%;低风险区较为广泛,面积 13 432.08 km²,占研究区面积的 89.27%。

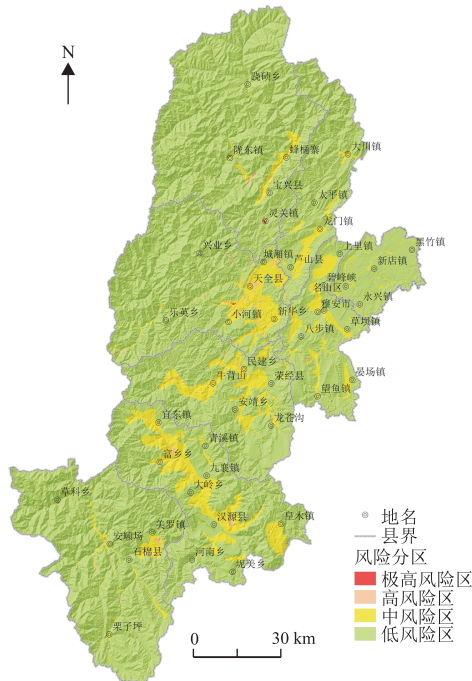


图9 研究区地质灾害风险区划图

3 结论

根据地质灾害风险性评价体系,对雅安市进行了易发性-危险性-易损性-风险性层次递进评价。对于滑坡、崩塌和泥石流,选取了一级因子和二级因子进行地质灾害易发性评价指标,再选取最大月累计降雨量作为危险性评价指标,选择人口、建筑物面积和交通作为易损性评价指标,最后利用地质灾害危险性和易损性相乘叠加得到研究区地质灾害的风险评价结果。主要结论如下:

(1) 采用 AHP-信息量法耦合进行地质灾害风险评价不仅考虑了每个因子所提供的信息量值和所占权重,而且将主观化的量值和客观化的量值进行结合。同时,将评价结果由栅格单元归并于斜坡单元,取得了较好的评价效果。但以栅格为单元进行风险评价,某种程度上会破坏地质单元的整体性,与地质环境条件的真实情况存在一定差距。今后可进一步探索斜坡单元和流域尺度的精细化风险评价,更好地指导地质灾害精准防控。

(2) 在 ArcGIS 中利用自然间断法将研究区划分低风险区、中风险区、高风险区和极高风险区 4 个等级。低风险区面积 13 432.08 km²,占 89.27%;

中风险区面积 1 539.22 km²,占 10.23%;高风险区主要分布于汉源县县城东部、乌斯河镇北部、富乡乡东部、宜东镇北部区域、石棉县安顺场西部、草科乡南部区域、名山区西部平行岭谷区及荣经县名建乡和安靖乡等部分地区,面积 73.41 km²,占 0.49%;极高风险区主要分布在宝兴县县城、灵关镇场及西河陇东至县城段两侧斜坡、天全县县城周边部分地区及荣经县牛背山等,面积 1.49 km²,占 0.01%。

参考文献

- [1] 和子祺,李波,蔡映坤,等. 云南省大关县地质灾害风险性评价及分区研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(4): 56-64.
- [2] 牟家琦,庄建琦,王世宝,等. 基于深度神经网络模型的雅安市滑坡易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 157-168.
- [3] 马晓峰,朱浩濛,张义顺,等. 省级地质灾害风险评价技术方法研究——以浙江省为例[J]. 浙江国土资源, 2021, (1): 57-65.
- [4] 齐信,唐川,陈州丰,等. 地质灾害风险评价研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(5): 33-40.
- [5] 陈朝亮,张文君,钱静,等. 基于改进 Logistic 回归模型在地质灾害评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 188-193.
- [6] 张艳玲,南征兵,周平根. 利用证据权法实现滑坡易发性区划[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 121-125.
- [7] 陈绪钰,李明辉,王伟伟,等. 基于 GIS 和信息量法的四川峨眉山市地质灾害易发性定量评价[J]. 沉积与特提斯地质, 2019, 39(4): 100-112.
- [8] 栗泽桐,王涛,周杨,等. 基于信息量、逻辑回归及其耦合模型的滑坡易发性评估研究:以青海沙塘川流域为例[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 235-245.
- [9] 刘艳辉,刘传正,唐灿,等. 基于确定性系数模型的地质灾害多因子权重计算方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 92-97.
- [10] 任敬,范宣梅,赵程,等. 贵州省都匀市滑坡易发性评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 165-172.
- [11] 谭真艳,罗晓龙,陈怡,等. 渝东北典型盆缘山区高位崩滑灾害风险评价——以巫溪县宁桥片区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 70-78.
- [12] 赵毅斌,邓必荣,王玺. 基于 Logistic-信息量耦合模型的地质灾害易发性分区研究——以赣南地区某重点城镇为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(4): 45-51.
- [13] 罗路广,裴向军,黄润秋,等. GIS 支持下 CF 与 Logistic 回归模型耦合的九寨沟景区滑坡易发性评价[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 526-535.
- [14] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process New York, NY[J]. Linda S Goldberg, 1980, 17(3): 293-322.
- [15] 罗路广,裴向军,谷虎,等. 基于 GIS 的“8·8”九寨沟地震景区地质灾害风险评价[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 193-202.