

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.04.010

基于 ArcGIS 的湖北省远安县地质灾害风险定量评价

连志鹏, 厉一宁, 刘磊, 王宁涛*

LIAN Zhi-Peng, LI Yi-Ning, LIU Lei, WANG Ning-Tao*

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

Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China

摘要: 地质灾害风险评价是进行地质灾害防范化解的有效途径。本文在地质灾害详细调查和资料收集的基础上, 利用 ArcGIS 与信息量模型、专家打分模型相结合的方法, 分析了远安县地质灾害的易发性、危险性、易损性的评价因子及权重, 在此基础上开展远安县县域尺度的地质灾害风险分区评价。评价结果表明, 远安县县域可划分为高、中、低三级风险区, 分别占全区面积的 3.98%、29.97%、66.05%, 评价结果与实地调查基本一致, 可作为研究区的地质灾害风险预测和防灾减灾管理工作的参考, 同时为远安县国土空间规划及生态文明建设提供科学依据。

关键词: 地质灾害; 风险评价; 信息量模型; 湖北省远安县

中图分类号: P595; X142

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2022)04-0680-09

Lian Z P, Li Y N, Liu L and Wang N T. 2022. Quantitative Evaluation of Geohazard Risk Based on ArcGIS in Yuan'an County, Hubei Province. *South China Geology*, 38(4):680-688.

Abstract: Geohazards Risk Assessment is an effective way to prevent and mitigate the damages. The evaluating factors were analyzed related to susceptibility, danger and vulnerability of the geohazards in Yuan'an County, Hubei Province on the basis of detailed field investigation and data collection, with use of ArcGIS and information model as well as scoring method by experts. Then the distributed risk assessment of geohazards were carried out in Yuan'an county, which showed the whole county could be divided into the high, medium and low-level risk areas with proportion of 3.98%, 29.97%, 66.05%, respectively of the total area. It is consistent with the field investigation and can be used as a reference for the geohazards prediction, prevention and mitigation management, and can provide a scientific indication for the land and space planning and ecological civilization establishment of Yuan'an County.

Key words: geohazards; risk assessment; information model; Yuan'an Country, Hubei Province

地质灾害风险评价是有效化解灾害风险的方式之一(黄润秋, 2007)。国外对地质灾害风险评价研究起步相对较早, 目前已形成比较成熟的灾害风险评价及管理体系, 如澳大利亚地质力学学会

(AGS, 2007)建立的一套由风险分析、风险评价和风险管理 3 个层次构成的地质灾害风险管理体系。国内地质灾害风险评价起步相对较晚, 自然资源经济研究院从 20 世纪 90 年代起开始致力于地质灾害

收稿日期: 2022-4-12; 修回日期: 2022-7-8

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190315)、国家自然科学基金青年基金项目(41702383)

第一作者: 连志鹏(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查与风险评价研究工作, E-mail: 119593730@qq.com

通讯作者: 王宁涛(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查与研究, E-mail: wnt113@126.com

易损性分析、风险评价的理论与方法研究(唐亚明, 2015)。周寅康(1995)提出了包含自然灾害评价模型、风险区承灾体抗灾性能模型及风险区承灾体价值评价模型的自然灾害风险评价体系的概念。张梁(1996)、黄崇福(1999)、彭满华等(2001)、马寅生等(2004)通过地质灾害危险性分析、承灾体易损性分析和破坏损失分析建立了地质灾害风险评价体系。近年来,石菊松等(2009)、吴树仁等(2009)提倡实用性技术方法和 GIS 技术的推广应用,从数据获取与更新、风险评价方法与制图、风险准则与技术方法体系和结果的验证等方面进行了详细的论述,并提出了相应的对策。在研究方法方面,不同研究领域学者引入了许多新的研究方法,使得地质灾害风险评价研究越来越精细化。杨柳等(2020)基于 GIS 平台,结合 SBAS-InSAR 监测数据,构建了适用于延安地区的评价指标体系,并对延安市宝塔区开展了地质灾害风险评价;赖波等(2021)利用 ArcGIS 的空间分析工具选取地形坡度、地貌类型、地质构造、地层岩性、降雨量和人类工程活动 6 个致灾因子制作形成了珠海市地质灾害危险性等级单元格图,并在此基础上叠加村界、地质灾害年度巡查路线和面积对珠海市的地质灾害巡查单元进行了划分;李冠宇等(2021)基于系统聚类、K 平均聚类分析法对韩城市开展了地质灾害风险评价和分级。李阳春等(2021)将机器学习用于地质灾害风险评价的研究。总体来说,越来越多的学者专家认识到地质灾害风险评价在地质灾害防灾减灾中的重要作用。

本文以湖北省远安县为例,采用信息量模型和专家打分模型相结合的方法,分析远安县地质灾害的易发程度,并对远安县域开展地质灾害风险分区评价,旨在为远安县相关职能部门制定地质灾害防治规划以及风险管控提供科学依据。

1 研究区概况

远安县处于鄂西山地向江汉平原过渡的低山丘陵地带,面积为 1752 km²。区内大的地质构造自西向东分别为黄陵背斜、石桥坪向斜、远安地堑和当阳向斜。山势、水系的发育明显受地质构造的制

约,呈近南北向展布,总体地形西北高、东南低(图 1),沮河自中部穿境而过,研究区内可分为构造剥蚀中低山区、构造剥蚀低山丘陵区 and 沮河冲积平原区三大地貌单元。地层除新近系外,自前南华系至新生界第四系均有出露。岩性以灰岩、白云岩等碳酸盐岩和砂岩、泥岩等碎屑岩为主,西南部分布有少量前南华系片麻岩、片岩。远安县地质环境条件复杂、雨量充沛、人类工程活动强烈,地质灾害十分发育,具有类型多样、点多面广、突发性强、危害大的特点。发育的灾害类型有滑坡、崩塌、不稳定斜坡、地面塌陷、泥石流等,其中以滑坡为主,崩塌、不稳定斜坡次之。根据远安县地质灾害详细调查资料(谭建民等,2011),远安县共发育地质灾害 285 处,其中滑坡 177 处、崩塌(含危岩体)70 处、不稳定斜坡 25 处、泥石流 3 处、塌陷 10 处,规模以中、小型为主(闫举生等,2017)。

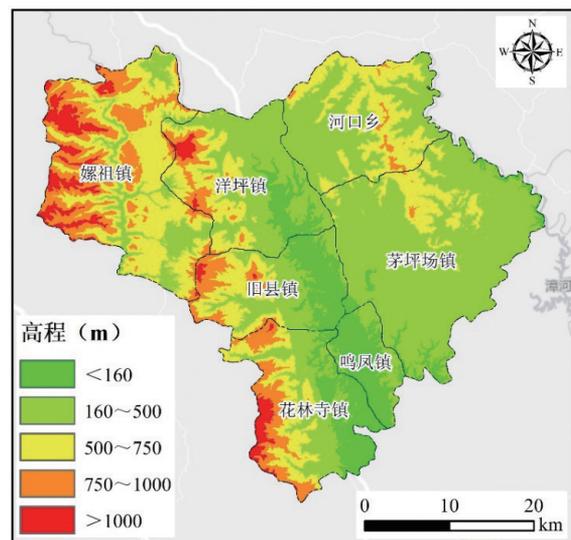


图1 远安县高程分布图

Fig. 1 Elevation Distribution Map of Yuan'an County

2 评价思路和方法

2.1 评价思路

通过对远安县地质灾害的详查及汛期排查资料的分析,区内主要地质灾害类型为滑坡、崩塌、不稳定斜坡,基于地质灾害发育的规律和特征,确定了以下评价思路:(1)开展远安县地质灾害易发性

评价时主要选取滑坡、崩塌和不稳定斜坡三种灾害类型合并统计分析;(2)通过对远安县多年降雨量的统计分析,得到远安县年降雨量等值线图与降雨强度等级,叠加易发性进行远安县地质灾害危险性分区评价;(3)选取人口密度、经济总值、土地利用类型三类易损性评价因子,开展地质灾害易损性分析评价;(4)将地质灾害危险性和易损性评价结果叠加分析得出远安县地质灾害风险评价结果。

2.2 评价方法

本文以远安县为研究对象,开展全县域尺度下的地质灾害风险评价,选用信息量模型完成远安县地质灾害易发性评价。基于信息论发展起来的信息量模型是进行区域地质灾害预测的经典方法。在地质灾害预测中,信息量模型可代表地质灾害事件发生的可能性;该模型重点考虑地质灾害发生的可能性大小与地质灾害空间预测过程中所获取信息的数量和质量之间的关系;讨论了在某种影响因子组合的情况下地质灾害发生概率,即为某种影响因子组合对地质灾害所贡献的信息量(王宁涛等,2012;连志鹏等,2020)。受限于远安县人口、财产等相关数据的精度,文中选用专家打分模型完成远安县地质灾害易损性评价。专家打分模型是一种定性描述定量化的方法,主要依据专家意见进行统计、处理、分析和归纳(甄艳等,2016)。通过采用信息量模型和专家打分模型相结合的方法开展地质灾害风险评价研究,最终得到远安县县域尺度的地质灾害风险评价结果。

3 远安县地质灾害风险评价

3.1 易发性评价

地质灾害易发性评价是风险评价的基础,特别是为地质灾害空间概率提供关键的中间数据,是一个地区内现有或潜在地质灾害空间分布的定性或定量评价(陈慧敏等,2021;李冠宇等,2021)。本文采用信息量模型对远安县地质灾害进行易发性评价。

3.1.1 指标因子的选取

通过对远安县1:5万地质灾害详细调查成果

资料的分析,以及对典型地质灾害点勘查成果的研究,本文选取斜坡几何形态、斜坡结构类型、工程岩组、地质构造、水文地质条件和人类工程活动六类指标因子用于信息量模型的评价,其中斜坡几何形态又包含了坡高和坡度两个评价因子。

3.1.2 信息量模型的计算与分析

利用ArcGIS的空间分析功能,选取栅格单元大小为 $30\times 30\text{m}^2$,得到各因子的栅格图层,然后将各指标因子图与地质灾害分布图进行叠加分析,得到地质灾害在各因子分类中的分布状况(Cascini, 2008)。利用ArcGIS的重分类功能进行各因子栅格图层重分类,根据信息量值重新生成各因子的信息量图,最后利用ArcGIS的栅格计算功能完成信息量计算,计算结果如表1所示。

通过对27种分级指标计算结果的信息量大小进行排序,排在前6的指标分别是:斜坡结构类型为顺向坡、与河谷的表面距离50~350 m、强烈的人类工程活动、软硬相间碎屑岩类、软硬相间碳酸盐岩类、斜坡坡度 $10^\circ\sim 25^\circ$,这些指标因子是地质灾害形成的主要控制条件,对远安县地质灾害的形成发育起决定性作用。

3.1.3 易发性分区

在信息量模型中某一地区的信息量值越大,该地区发生滑坡的可能性越大(Fell et al., 2008)。根据信息量计算结果,采用自然断点法(natural break)将远安县地质灾害易发性划分为三级:高易发区、中易发区、低易发区,分区结果见表2。

由表2可知,高易发区内包含了59.47%的已知地质灾害体,中易发区包含了39.41%的已知地质灾害体,低易发区中仅包含了0.85%的已知地质灾害体。通过信息量模型计算得到的各易发程度中包含的已知地质灾害数量随着易发程度的降低而减少,地质灾害实际发生的比率(b/a)同样随之减小,计算结果亦说明这种划分标准较为理想(王宁涛等,2012)。依此标准分类后,得到基于综合信息量的远安县地质灾害易发性分区图(图2a)。

3.2 危险性评价

地质灾害危险性是指在某种诱发因素作用下,一定区域内某一时间段发生特定规模和类型地质灾害的概率(Tang Y M, 2020;郑洁等,2021)。地质

表 1 评价因子信息量计算结果表
Table 1 The result of all influence factors information

类别	评价因子	分级指标	信息量计算				信息量排序	
			Sj	Nj	Natj	修改值		
斜坡几何形态	坡高 $h(m)$	$h < 100$	1388	516016	0.04835	0.1	16	
		$100 < h < 500$	7781	1165068	0.95777	0.22	13	
		$500 < h < 1000$	220	256005	-1.09271	-1.1	24	
		$h > 1000$	0	3658	-1.78352	-3.0	27	
	坡度 $p(^{\circ})$	$p < 10$	1753	506307	0.30080	-0.3	19	
		$10 < p < 25$	6037	874058	1.09138	1	6	
		$25 < p < 35$	1028	362688	0.10069	0.2	14	
		$p > 35$	571	197696	0.11952	0.12	15	
		斜坡结构类型	近水平	811	178495	0.57257	0.5	12
			顺向坡	750	174052	0.51958	1.5	1
横向坡	826		145412	0.79589	-0.7	23		
斜向坡	1674		326990	0.69191	0.7	10		
逆向坡	3382		641978	0.72053	-0.3	20		
工程地质岩组	第四系松散岩土类	16	70473	-2.42378	0.6	11		
	软硬相间碎屑岩类	8125	854317	1.42726	1.4	4		
	坚硬碎屑岩类	183	336176	-1.54928	-1.6	26		
	软硬相间碳酸盐岩类	514	276392	0.92073	1.2	5		
	坚硬碳酸盐岩类	524	391009	-0.64838	-0.65	22		
	较坚硬变质岩类	27	12888	-0.20160	-0.21	18		
地质构造	断裂带影响	1 km 之内	5324	967681	0.76520	0.8	8	
		1 km 之外	4065	973068	0.48858	-0.2	17	
水文	与河(沟)谷的表面积距离(m)	$< 50, 350-550$	2003	276501	0.43905	1	7	
		50-350	4002	333215	1.24463	1.5	2	
		550-800	1236	224371	0.76394	0.8	9	
		> 800	2148	1106662	-0.27795	-0.3	21	
人类工程活动	强烈	7684	719938	1.42659	1.427	3		
	一般	1705	1221677	-0.60780	-1.5	25		

注:Sj为当前因子条件下发育地质灾害的单元个数;Nj为当前因子的单元个数;Natj为当前因子的信息量.

表 2 易发性分区表
Table 2 Geo-hazards susceptibility zonation table

易发程度	信息量值Nat	栅格单元个数	a(%)	c	b(%)	b/a
高易发区	1.9 ~ 4.26459	310374	27.39	12847	59.74	2.1811
中易发区	-0.1 ~ 1.9	624454	55.11	4789	39.41	0.7151
低易发区	-5.66152 ~ -0.1	198325	17.50	26	0.85	0.0486
合计		1133153	100.00	17662	100	2.9448

注:a为该类易发分区等级的面积占远安县总面积的百分比;b为处在该易发分区等级内的灾害点占总灾害点数的百分比;c为处在该易发分区等级内的灾害点所占栅格总数;b/a为灾害实际发生的比率。

灾害危险性包含时间概率和空间概率两个因子。时间概率是指地质灾害发生的重现周期,空间概率是指受时间概率影响的区域地质灾害发生的概率,也

就是易发性。降雨是远安县地质灾害的主要诱发因素,基于研究区范围与数据资料限制,本文以远安县平均年降雨量来作为地质灾害危险性评价的时

间概率指标(刘艳辉和苏永超,2019),以斜坡几何形态、斜坡结构类型、工程岩组、水文、地质构造、人类工程活动作为地质灾害危险性评价的空间概率指标。

本文采用ArcGIS 数据分析功能对远安县气

象站获得的远安县县域范围1989年至2019年的30年降雨数据进行分析,划分了三个等级,分别为年平均降雨量800~1000 mm、1000~1200 mm、>1200 mm,以此等级对应地质灾害危险性评价指标分级标准的低危险性、中危险性、高危险性(表3)。

表3 降雨危险性评价分级标准

Table 3 Classification criteria for rain risk assessment

评价因子	危险性评价指标分级		
	低危险性	中危险性	高危险性
降雨量(mm)	800~1000	1000~1200	>1200

将降雨危险性评价分级与易发性通过ArcGIS 进行叠加处理,得到远安县地质灾害危险性分区

图(图2b),地质灾害危险性分区特征见表4。其中:低危险区位于远安地堇内沮河沿岸,南襄村-

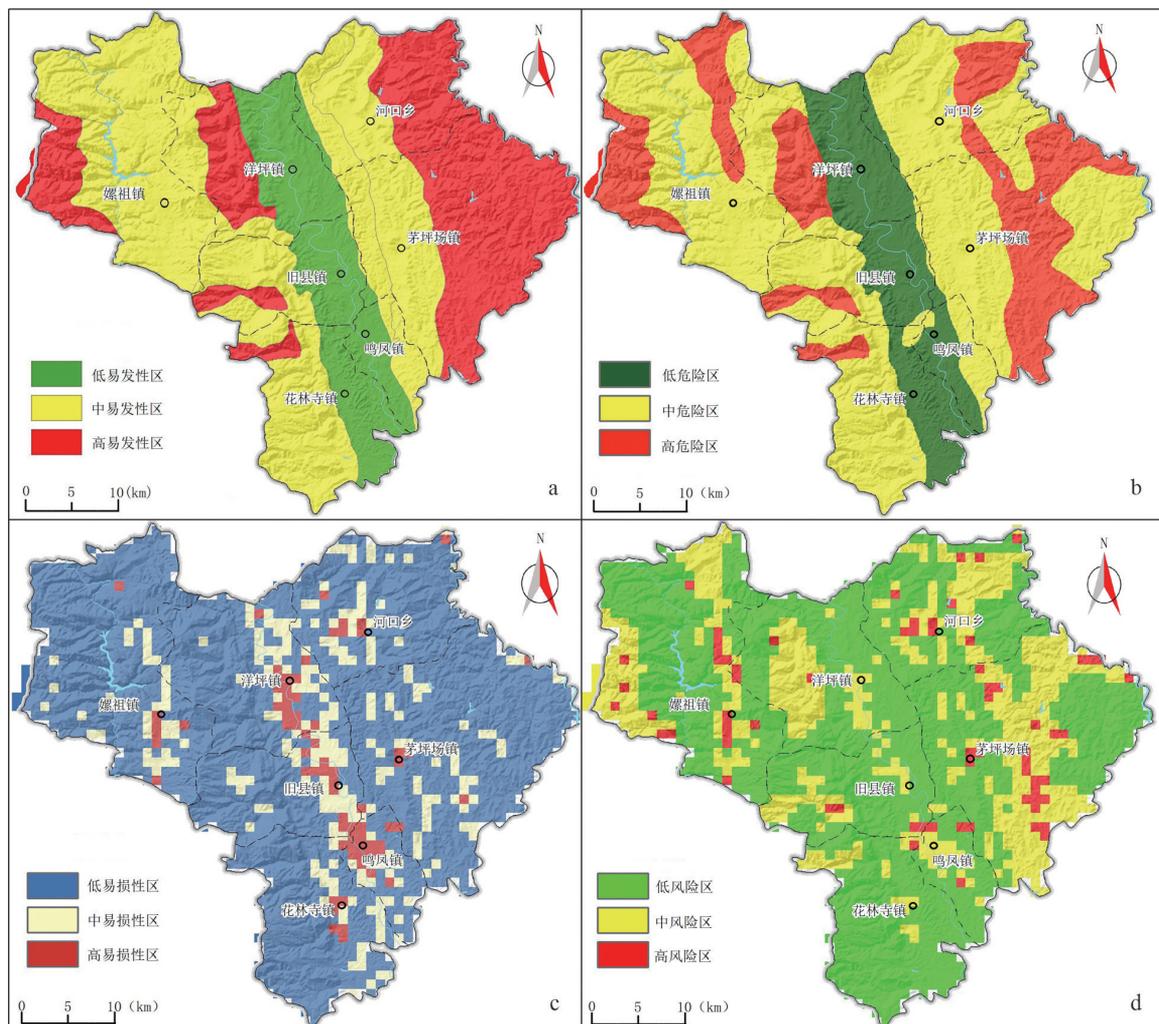


图2 远安县地质灾害易发性(a)、危险性(b)、易损性(c)、风险(d)分区图

Fig. 2 Zoning map of geological hazard susceptibility (a), dangerousness (b), vulnerability (c) and (d) in Yuan'an Country

表4 远安县危险性分区特征表

Table 4 Characteristics of dangerous zoning in Yuan'an County

等级划分	面积(km ²)	占全县面积比例(%)	特征情况
低危险区	304.7	17.39	位于远安地堑内沮河沿岸,洋坪镇南襄村-旧县镇-鸣凤镇慈化一带,该区主要为地质灾害低易发区和不易发区,面积304.7km ² ,占全县面积的17.39%。区内以滑坡为主,发育地质灾害27处,其中滑坡17处、不稳定斜坡5处、崩塌5处,威胁人数288人,财产490万元。
中危险区	1008.31	57.55	主要分布在远安县螺祖镇高峰-贾家山、洋坪镇蔡家沟-花林寺镇龙凤、河口乡紫山-茅坪场镇汤家、河口乡朝阳-茅坪场镇望山宫、河口乡狮子坪-茅坪场镇李家台、茅坪场镇肖家山-李家湾、鸣凤镇鸣凤山-北门一带,发育灾点66处,其中滑坡55处、泥石流3处、塌陷8处,威胁人数823人,财产2806万元。
高危险区	438.99	25.06	主要分布在远安县螺祖镇神农-盐池河、螺祖镇真金-花庙冲、洋坪镇百井-余家畈、旧县镇中南-台子、花林寺镇横岩坪-宝华、河口乡赵家河-茅坪场镇两河一带。发育灾点192处,其中滑坡118处,崩塌55处、泥石流2处、塌陷3处、不稳定斜坡14处,威胁人数3236人,财产4475万元。

旧县-慈化一带,占全县总面积的17.39%,发育地质灾害27处,威胁人数288人,财产490万元;中危险区主要分布在远安县螺祖镇高峰-贾家山、洋坪镇蔡家沟-花林寺镇龙凤、河口乡紫山-茅坪场镇汤家、河口乡朝阳-茅坪场镇望山宫、河口乡狮子坪-茅坪场镇李家台、茅坪场镇肖家山-李家湾、鸣凤镇鸣凤山-北门一带,占全县总面积的57.55%,发育地质灾害66处,威胁人数823人,财产2806万元;高危险区主要分布在远安县螺祖镇神农-盐池河、螺祖镇真金-花庙冲、洋坪镇百井-余家畈、旧县镇中南-台子、花林寺镇横岩坪-宝华、河口乡赵家河-茅坪场镇两河一带,占全县总面积的25.06%,发育地质灾害192处,威胁人数3236人,财产4475万元。

3.3 易损性评价

易损性是暴露于危险之中的某一特定对象的潜在损失程度(用0-1之间的无量纲系数表示)(徐勇等,2018),是承灾体在面对特定强度地质灾害时抗灾能力的度量,其定义表明易损性主要表现在致灾强度和承灾体抗灾能力。受限于人口、财产等相

关数据的精度,本文拟采用定性-半定量的方式进行易损性评价。

3.3.1 评价因子及权重

通过对资料数据的分析,本文选择了人口密度、经济总值、土地利用类型3类评价因子进行易损性评价,通过专家打分确定了各因子权重分别为0.4、0.4、0.2。按易损程度对各评价因子划分为高、中、低三个等级,赋予各等级评价价值分别为3、2、1,作为后续易损性计算的依据,易损性评价分级标准见表5。

3.3.2 易损性计算

以表5的易损性评价分级标准为依据,本文易损性(V)采用公式 $V = \sum M_{ij} \cdot N_i$ 进行计算(李泽威等,2018)。

式中: $i = X、Y、Z$; $j = g、z、d$; M :评价因素值; N :因素权重值。

根据易损性计算值(V),采用自然断点法将评价区划分为三个等级区,即高易损区($2.2 \leq V < 3$)、中易损区($1.6 \leq V < 2.2$)、低易损区($1 \leq V < 1.6$)。其中高易损区占研究区总面积的6.57%,主要分布在

表5 远安县地质灾害易损性评价分级标准

Table 5 Classification criteria for vulnerability of geologic hazard in Yuan'an County

评价因子	权重(N)	高易损程度	中易损程度	低易损程度
		$M_{ig} = 3$	$M_{iz} = 2$	$M_{id} = 1$
X 人口密度(人/km ²)	0.4	>1000	500-1000	<500
Y 经济总值(万元/km ²)	0.4	>5000	1000-5000	<1000
Z 土地利用类型	0.2	县城、乡镇、公路、铁路等	水系、采矿用地、水利设施、耕地等	山地、林地、草地等

鸣凤镇、旧县镇、洋坪镇、茅坪场镇等城镇区;中易损区主要分布在洋坪-花林寺一带及河口乡、螺祖镇等人口活动相对密集的村落、采矿区等,占研究区总面积的24.63%;低易损区分布于人口活动较

少的林地、山地等区域,占研究区总面积的68.8%,如图2c和表6所示。高易损区对应远安县人口密度最大、经济发展最活跃、工程活动强度最大的区域,评价成果与实际情况相符。

表6 远安县易损性分区特征表

Table 6 Characteristics of Vulnerability zoning in Yuan'an County

等级划分	面积(km ²)	占全县面积比例(%)	特征情况
高易损区	115	6.57	主要分布在鸣凤镇、旧县镇、洋坪镇、茅坪场镇等城镇经济较繁荣、人口较稠密的区域,以及主要交通线附近
中易损区	432	24.63	主要分布在洋坪-花林寺一带及河口乡、螺祖镇等人口活动相对密集的村落、采矿区等。
低易损区	1205	68.8	分布于人口活动较少的林地、山地等区域。

3.4 风险评价

3.4.1 风险评价方法

地质灾害风险可定义为危险性、易损性与承灾体三者的乘积(李佳佳,2014;赵阳等,2022),地质灾害风险性评价是在地质灾害危险评价和易损性评价的基础上,由危险性评价结果和易损性评价结果叠加得到(王嘉君等,2018)。风险分区图是风险性评价结果的主要表达形式。

通过 ArcGIS 对远安县地质灾害危险性和易损性进行叠加分析,可得到远安县地质灾害风险指

数,该指数代表了区域内发生地质灾害的风险程度,数值越高,地质灾害的风险就越高。

3.4.2 远安县地质灾害风险区划

在远安县地质灾害详细调查成果的统计分析基础上,采用信息量模型与专家打分模型相结合的方法,对远安县地质灾害易发性、危险性以及易损性进行评价,最终形成远安县地质灾害风险区划。远安县共划分为三个风险区:高风险区、中风险区和低风险区(图2d,表7)。

(1)高风险区:面积为69 km²,占远安县总面积

表7 地质灾害风险性分级统计

Table 7 Geological hazard risk classification statistics

风险分区	面积(km ²)	占全区面积比例(%)	灾害数量(处)	占灾害总数比例(%)
高风险区	69	3.98	27	9.47
中风险区	520	29.97	167	58.60
低风险区	1146	66.05	91	31.93

的3.98%,共分布地质灾害点27处,占灾害总数的9.47%,主要分布于人口活动强烈的城镇与地质灾害高危险区重叠的区域,比如河口乡、茅坪场镇的乡镇区域,这些区域在极端降雨情况下易发生崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害,灾害的风险程度大。

(2)中风险区:面积为520 km²,占远安县总面

积的29.97%,共分布地质灾害点167处,占灾害总数的58.60%,主要分布于人口活动相对密集的村落、采矿区等与中危险区重叠的区域,部分区域地质构造发育,人类工程活动对地质环境破坏较多,灾害的风险程度较大。

(3)低风险区:主要分布于人口活动较少的林地、山地等区域,总面积1146 km²,占远安县总面积

的66.05%,共分布地质灾害点91处,占灾害总数的31.93%。

4 结语

本文以湖北省远安县为研究区,采用信息量模型和专家打分相结合的地质灾害评价方法,进行区域地质灾害风险分区评价,得到如下结论:

(1)基于ArcGIS的空间分析,采用信息量模型开展了远安县地质灾害易发性分区评价,结果表明:59.47%的已知地质灾害点在高易发区、39.41%的已知地质灾害点在中易发区,分区结果与实际情况吻合度高。

(2)选取斜坡几何形态、斜坡结构类型、工程岩组、水文、地质构造、人类工程活动、年均降雨量共七个指标为危险性评价因子,将远安县地质灾害划分了低危险性、中危险性、高危险性三个等级,并进行了分区;选取人口密度、经济总值、土地利用类型三个指标为易损性评价因子,采用自然断点法将评价区划分为高、中、低三个等级易损区;通过ArcGIS对远安县地质灾害危险性和易损性进行叠加分析,划分出了高、中、低三级风险区。

(3)本文评价成果是在远安县地质灾害详细调查和人口经济数据收集的基础上,通过ArcGIS平台处理后得到的。经过与实际调查数据的验证,评价结果与实际情况基本吻合,可以为远安县地质灾害风险管控及国土空间规划提供科学依据。

参考文献:

陈慧敏,杨尽,向明顺,杨文博. 2021. 基于地理信息系统和加权信息量的茂县地质灾害易发性评价[J]. 科学技术与工程, 21(29):12490-12499.

黄崇福. 1999. 自然灾害风险分析的基本原理[J]. 自然灾害学报, 8(2):21-30.

黄润秋. 2007. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 26(3):433-454.

赖波,刘佳,吴舒天. 2021. 基于ArcGIS的地质灾害巡查单元划分——以珠海市为例[J]. 华南地质, 37(1):75-82.

李李佳. 2014. 榆林市子洲县地质灾害风险评价研究[D]. 西安科技大学硕士学位论文, 34-38.

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.

刘艳辉,苏永超. 2019. 四川青川县区域地质灾害气象风险预警模型研究[J]. 工程地质学报, 27(1):134-143.

连志鹏,徐勇,付圣,陈丽霞,刘磊. 2020. 采用多模型融合方法评价滑坡灾害易发性:以湖北省五峰县为例[J]. 地质科技通报, 39(3):178-186.

李冠宇,李鹏,郭敏,苏生瑞,董永超. 2021. 基于聚类分析法的地质灾害风险评价——以韩城市为例[J]. 科学技术与工程, 21(25):10629-10638.

李阳春,刘黔云,李潇,顾天红,张楠. 2021. 基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 32(3):118-123.

马寅生,张业成,张春山,王金山. 2004. 地质灾害风险评价的理论与方法[J]. 地质力学学报, 24(1):7-18.

彭满华,张海顺,唐祥达. 2001. 滑坡地质灾害风险分析方法[J]. 岩土工程技术, 15(4):235-240.

石菊松,石玲,吴树仁,王涛. 2009. 滑坡风险评估实践中的难点与对策[J]. 地质通报, 28(8):1020-1030.

谭建民,连志鹏,闫举生,章昱. 2011. 远安县地质灾害详细调查报告[R]. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 42-48.

唐亚明,张茂省,李政国,冯卫. 2015. 国内外地质灾害风险管理对比及评述[J]. 西北地质, 48(2):238-246.

吴树仁,石菊松,张春山,王涛. 2009. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 28(8):995-1005.

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.

王嘉君,何亚伯,杨琳,陈瑶. 2018. 基于GIS的山区村镇多灾种耦合风险评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 29(1):102-112.

徐勇,连志鹏,郭春迎. 2018. 降雨型滑坡定量风险评价研究——以宣恩县干坝滑坡为例[J]. 华南地质与矿产, 34(4):294-301.

闫举生,谭建民,连志鹏,章昱. 2017. 鄂西远安县地质灾害发育特征与形成条件分析[J]. 华南地质与矿产, 33(4):394-400.

杨柳,牟鑫亮,李晨,郑续,邱东霞. 2020. 延安市宝塔区地质灾害风险评价[J]. 山地学报, 38(5):679-690.

周寅康. 1995. 自然灾害风险评价初步研究[J]. 自然灾害学报, 4(1):6-11.

张梁. 1996. 地质灾害风险评价理论与方法[J]. 中国地质矿产经济, (4):40-45+14.

甄艳,鲁小丫,蒲慧龙,王蕾. 2016. 都江堰虹口乡地质灾害

- 风险评价 [J]. 测绘科学, 41(11):66-71+97.
- 郑洁, 孙姣姣, 杨力成, 李娜. 2021. 基于GIS的滑坡灾害影响因子危险性评价——以茂县为例 [J]. 科学技术创新, (1):49-51.
- 赵阳, 倪化勇, 张泰丽, 孙强, 伍剑波, 朱延辉. 2022. 浙江丽水地区地质灾害风险可接受程度 [J]. 科学技术与工程, 22(3):953-959.
- AGS. 2007. Guideline for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use Management [J]. Australian Geomechanics, 42(1):13-36.
- Cascini L. 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales [J]. Engineering Geology, 102(3-4): 164-177.
- 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): 99-111.
- Tang Y M, Feng F, Guo Z Z, Feng W, Li Z G, Wang J Y, Sun Q Y, Ma H N, Li Y N. 2020. Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping: A comparative study from the loess plateau area in Shanxi(China) [J]. Journal of Cleaner Production, 277:124159.