

基于量化因子的地质灾害易发性评价

张复金, 徐曙林, 王平, 蔡诚, 陈怡

Susceptibility assessment of geological hazards based on susceptibility quantitative factors: A case study in Qijiang District, Chongqing City

ZHANG Fujin, XU Shulin, WANG Ping, CAI Cheng, and CHEN Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

北京山区突发性地质灾害易发性评价

Assessment on the susceptibility of sudden geological hazards in mountainous areas of Beijing

罗守敬, 王珊珊, 付德荃 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 126-133

基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价

Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP

郭学飞, 王志一, 焦润成, 曹颖 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 70-76

香丽高速公路边坡地质灾害发育特征与易发性区划

Development characteristics and susceptibility zoning of slope geological hazards in Xiangli expressway

廖小平, 徐风光, 蔡旭东, 周文皎, 魏家旭 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 121-129

基于快速聚类-信息量模型的汶川及周边两县滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment based on K-means cluster information model in Wenchuan and two neighboring counties, China

周天伦, 曾超, 范晨, 毕鸿基, 龚恩慧, 刘晓 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 137-150

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202203042

张复金, 徐曙林, 王平, 等. 基于量化因子的地质灾害易发性评价——以重庆市綦江区为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 136-144.

ZHANG Fujin, XU Shulin, WANG Ping, et al. Susceptibility assessment of geological hazards based on susceptibility quantitative factors: A case study in Qijiang District, Chongqing City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(3): 136-144.

基于量化因子的地质灾害易发性评价 ——以重庆市綦江区为例

张复金¹, 徐曙林², 王平¹, 蔡诚¹, 陈怡¹

(1. 重庆市二零八地质环境研究院有限公司, 重庆 400700;

2. 重庆市北碚区规划和自然资源局, 重庆 400700)

摘要: 綦江区是重庆市地质灾害高发区域, 本研究以綦江区为研究区, 根据区内地形地貌、地质构造并结合 DEM 数据, 提取了斜坡单元内的斜坡结构、坡度、地灾点密度、工程地质岩组、距水系距离、岩层倾角和地质构造共 7 项主要致灾因子, 进行量化分析并结合地质灾害野外现场核查和修正其各因子权重和分级赋值后, 采用层次分析法进行斜坡单元地质灾害易发性评价, 探索建立适合綦江区的地质灾害易发性评价体系。

关键词: 綦江区; 斜坡单元; 量化因子; 层次分析法; 易发性模型

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)03-0136-09

Susceptibility assessment of geological hazards based on susceptibility quantitative factors: A case study in Qijiang District, Chongqing City

ZHANG Fujin¹, XU Shulin², WANG Ping¹, CAI Cheng¹, CHEN Yi¹

(1. Chongqing 208 Institute of Geological Environment Co. Ltd., Chongqing 400700, China;

2. Chongqing Planning and Natural Resources Bureau of Beibei District, Chongqing 400700, China)

Abstract: Qijiang District is a high-risk area for geological hazards in Chongqing. In this study, Qijiang District is selected as the research area. Based on the topography, geomorphology, geological structure, and DEM data of the region, seven main factors of geological hazards within slope units were extracted, including slope structure, slope gradient, density of geological disaster points, engineering geological lithology, distance to the water system, inclination angle of rock strata, and geological structure. These factors were quantitatively analyzed and combined with field inspection of geological hazards to revise the weights and grading of each factor. The analytic hierarchy process was used to evaluate the susceptibility of geological hazards within slope units. Through this process, this study aims to establish a geological disaster susceptibility evaluation system suitable for Qijiang District.

Keywords: Qijiang District; slope unit; quantitative factor; analytic hierarchy process; susceptibility model

收稿日期: 2022-03-28; 修订日期: 2022-04-28

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

第一作者: 张复金(1979-), 男, 江苏丹阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害风险研究等工作。E-mail: 25204504@qq.com

通讯作者: 徐曙林(1980-), 男, 江苏泰兴人, 学士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治、矿产资源管理和土地矿产执法等工作。

E-mail: 23135248@qq.com

0 引言

地质灾害易发性评价是对地质灾害进行区域预测较为有效的手段^[1-7],主要目的是通过对评价单元内各易发性因子数据处理和计算分析来找出最易发生地质灾害的区域范围。本次研究选择斜坡单元作为易发性评价单元来研究。斜坡单元各类评价因子是易发性评价的基本尺度,提取多种与地质灾害发生相关的因子构成评价指标体系。研究地质灾害易发性评价的准确性、适用性依赖于评价指标体系的影响因子选取是否合理、可靠,对易发性评价尤为重要,但是影响因子又是相互作用、相互影响而组成的复合体,是一个复杂的非线性系统。

针对地质灾害易发性评价影响因子的特征,本研究以綦江区为例,根据研究区各斜坡单元的地质环境特征,选取易发性评价因子并采用层次分析法建立一套以斜坡单元为基础易发性模型并修正其各因子权重和分级赋值,探索建立适合綦江区的地质灾害易发性评价体系。

1 研究区概况

綦江区位于重庆市西南部,素有“重庆南大门”之称,面积为 2 187.48 km²。全区现辖 5 个街道、16 个镇。研究区属中亚热带湿润季风气候区,区内沟谷切割深、纵坡陡、碎屑岩破碎、风化层较厚的地形地貌特点。区内出露地层中寒武系—三叠系的碳酸岩类地层面积占 20.50%,白垩系—侏罗系的红层软岩面积占 79.50%。构造上位于四川盆地东南边缘,具有褶皱多、断层发育,地质构造比较复杂。区内地表水系发育,綦江河及支流是区域最低侵蚀基准面、溶蚀基面和地下水的集中排泄区。

2 易发性因子选取

2.1 易发性评价概述

重庆市綦江区有地质灾害 327 处,类型以滑坡、崩塌为主,其次是地面塌陷。滑坡灾害点共 239 处,占比 74.09%,危岩(崩塌)灾害点共 78 处,占比 23.85%,地面塌陷 10 处,占比 3.06%,地质灾害分布图(图 1)。本研究中区域易发性评价单元是数据处理和计算分析的基本单元,也是最终评价结果呈现的基本单元,选取合适的斜坡单元是建立易发性模型的首要步骤;其次是易发性评价因子的选取,基于现有调查数据和研究区地质条件,选择斜坡结构类型^[8-9]、地灾点点密度^[10-17]、工

程地质岩组、坡度、距水系距离^[18]、岩层倾角、地质构造^[19]共 7 个易发性评价因子来量化评价,其中地灾点点密度因子是根据重庆市区县 1:5 万地质灾害风险评价指标体系新增易发性评价因子。另外綦江区地面塌陷为冒顶型塌陷,主要因素为采空区域内煤层倾角大,顶板岩性、厚度和受力不均匀。此类地质灾害的样本数量少,基于 GIS 的风险评价无法计算,因此,以采空区范围、地面变形特征来人工校核该类因子作用于斜坡单元的易发性评价结果。

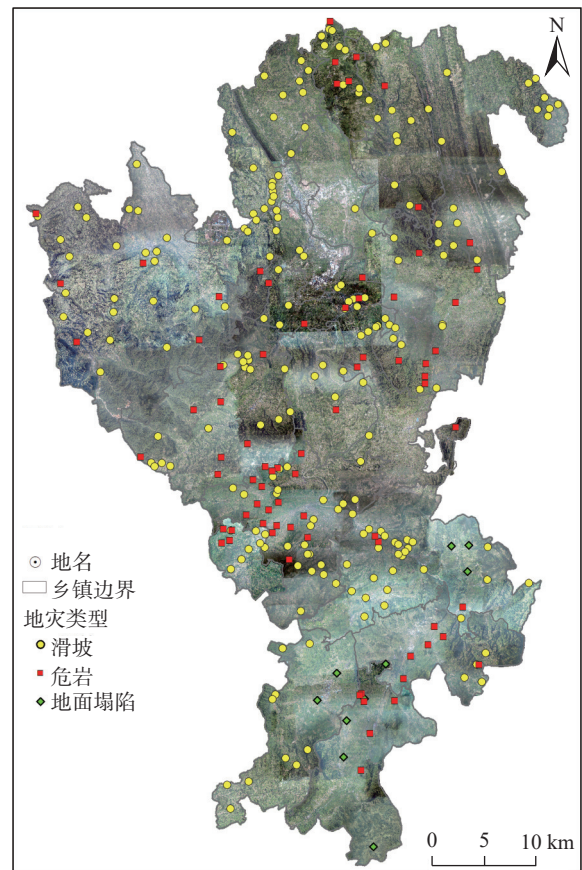


图 1 綦江区地质灾害分布图

Fig. 1 Distribution map of geological hazards in Qijiang District

2.2 易发性因子量化评价

2.2.1 斜坡结构因子

斜坡结构类型包括五类:顺向坡、切向坡、横向坡、逆向坡、近水平层状坡。根据斜坡结构因子易发性量化指标统计表(表 1)和评价因子量化分级图 2(a)来看,滑坡数据中顺向坡区间内指标值(I_{ij})>0 时,表明此区间地质灾害发生的信息量大,发生的可能大;横向坡、斜向坡区间内易发性指标(I_{ij}) \approx 0,无法提供地质灾害发生与否的判断信息,发生的可能不确定;而近水平坡、逆向坡内滑坡易发性指标(I_{ij})<0,说明在此区间内滑坡灾

表 1 斜坡结构因子易发性量化指标

Table 1 Quantitative index of susceptibility factor of slope structure

地灾类型	斜坡结构	分级面积比	地灾面积占比	易发性指标
滑坡数据	近水平	0.06	0.01	-1.80
	顺向坡	0.17	0.56	1.20
	斜向坡	0.31	0.17	-0.60
	横向坡	0.30	0.20	-0.40
	逆向坡	0.16	0.06	-1.00
崩塌数据	近水平	0.06	0.004	-2.78
	顺向坡	0.17	0.105	-0.47
	斜向坡	0.31	0.340	0.09
	横向坡	0.30	0.202	-0.39
	逆向坡	0.16	0.349	0.76

害相对不易发生,发生的可能性小。与綦江区内滑坡地质灾害易发规律相符。

崩塌数据中斜向坡和逆向坡区间内易发性指标>0,表明此区间崩塌发生的信息量大,发生的可能大;顺向坡和横向坡区间内易发性指标≈0,无法提供崩塌发生与否的判断信息,发生的可能不确定;而近水平坡易发性指标<0,说明在此区间内崩塌相对不易发生,发生的可能性小。据调查数据显示綦江区内崩塌发生于近水平产状的岩质陡坡上较多,地质灾害易发生规律与量化指标显示的信息量不完全相符,主要原因是崩塌稳定性受斜坡结构和外倾卸荷裂隙共同控制,所以量化指标值有偏差。

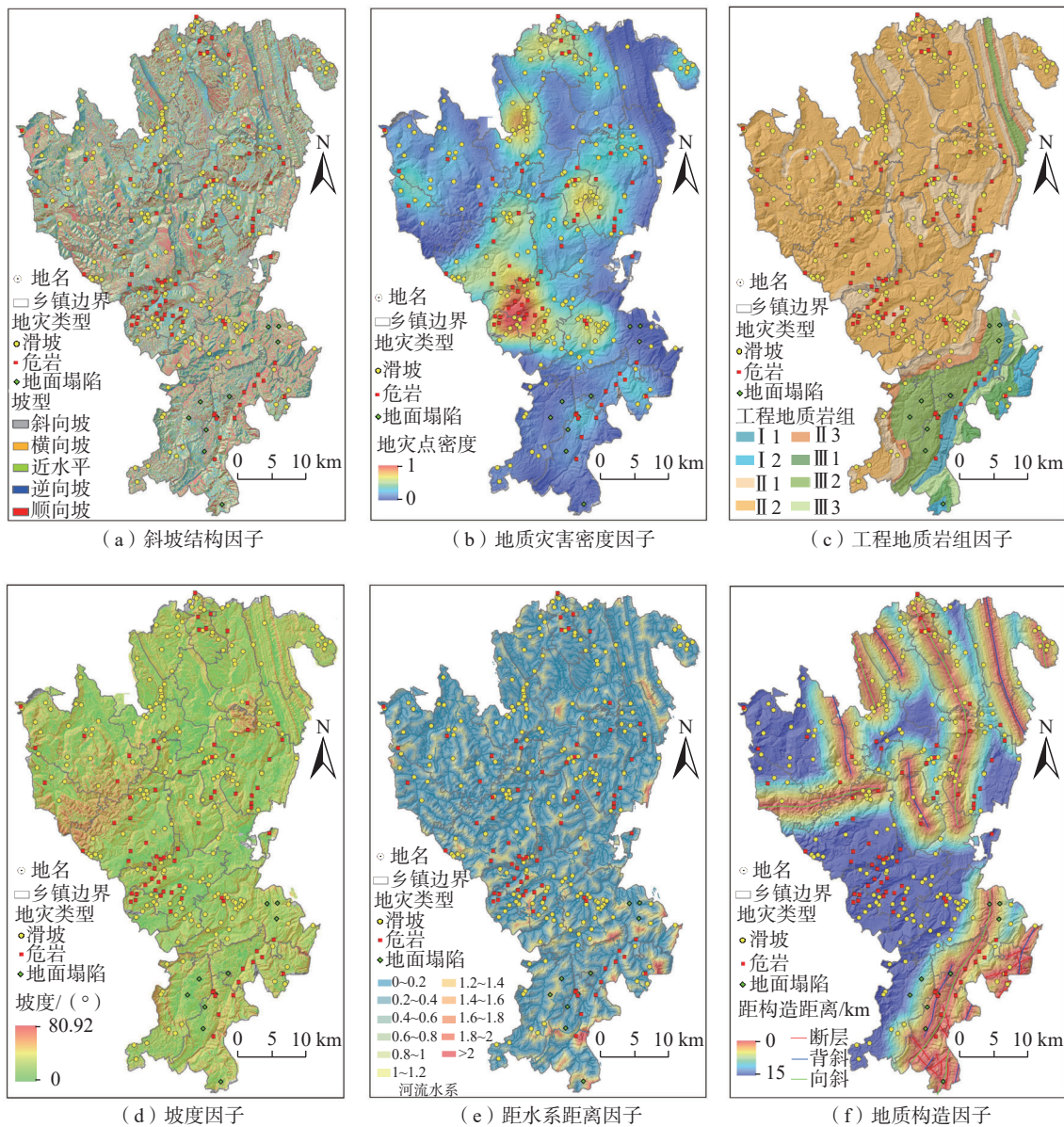


图 2 研究区各评价因子分级图

Fig. 2 Classification chart of each evaluation factor in the study area

2.2.2 孕灾体点密度因子

根据孕灾体点密度因子易发性量化指标统计表(表2)和评价因子量化分级图2(b)来看, 滑坡易发性指标值大小与地灾点密度密切相关, 孕灾体点密度值大于0.4或越高, 易发性指标>0或越高, 表明此区间滑坡发生的信息量大, 发生的可能大; 当孕灾体点密度值<0.4时, 此区间内滑坡发生的可能性显著降低, 发生的可能小。而崩塌易发性指标大小与发生的可能性无明显关联。

表2 孕灾体点密度因子易发性量化指标

Table 2 Quantitative index of susceptibility factor of the point density of the disaster-pregnant body

地灾类型	斜坡结构	分级面积比	地灾面积占比	易发性指标
滑坡数据	<0.2	0.47	0.14	-1.33
	[0.2, 0.4)	0.34	0.30	-0.24
	[0.4, 0.6)	0.11	0.24	0.61
	[0.6, 0.8)	0.06	0.24	1.35
	[0.8, 1.0]	0.02	0.08	1.47
崩塌数据	<0.2	0.47	0.49	0.30
	[0.2, 0.4)	0.34	0.96	0.59
	[0.4, 0.6)	0.11	0.05	0.03
	[0.6, 0.8)	0.06	0.09	0.05
	[0.8, 1.0]	0.02	0.05	0.03

2.2.3 工程地质岩组因子

岩性是斜坡岩体的物质基础, 是发生灾害的重要因素, 岩性决定了斜坡岩体的应力分布、强度及变形破坏特征, 灾害发育特征与岩性种类、内部结构有关。根据工程地质岩组因子易发性量化指标统计表(表3)和评价因子量化分级图2(c)来看, 滑坡易发性指标在工程地质岩组 II₂、III₁ 内>0, 说明在此区间内滑坡灾害易发程度较高; 在工程地质岩组 I₁、II₁、II₃ 内滑坡易发性指标≈0, 说明在此区间滑坡灾害易发程度相对而言不确定; 在工程地质岩组 I₂、III₂、III₃ 内滑坡易发性指标<0, 说明在此区间内滑坡灾害相对不易发生。

崩塌易发性指标在工程地质岩组 I₁、III₂ 内 I_{ij}>0, 说明在此区间内崩塌灾害易发程度较高; 工程地质岩组 I₂、II₂ 内崩塌易发性指标≈0, 说明在此区间崩塌灾害易发程度不确定; 在工程地质岩组 II₁、III₁ 内崩塌易发性指标<0, 说明在此区间内滑坡灾害相对不易发生; 工程地质岩组 II₃、III₃ 内因未发育有崩塌地质灾害点, 不列入统计。

2.2.4 坡度

区内地形坡度是滑坡发生的主要影响因子之一, 对其发生起到控制性作用, 不同坡度的坡体, 其内部应力分布不同, 稳定性不同。在 ArcGIS 空间分析模块中以

表3 工程地质岩组因子易发性量化指标

Table 3 Quantitative index of susceptibility factor of engineering geological lithology

地灾类型	地质岩组	主要岩性	分级面积比	地灾面积占比	易发性指标
滑坡数据	I ₁	灰岩、白云岩	0.02	0.014	-0.49
	I ₂	含泥质灰岩	0.01	0.004	-1.22
	II ₁	泥岩、砂岩	0.17	0.175	0.08
	II ₂	砂岩夹页岩	0.63	0.761	0.20
	II ₃	厚层状砂岩	0.03	0.013	-0.80
	III ₁	泥灰岩夹粉砂岩、页岩	0.02	0.030	0.52
	III ₂	灰岩夹页岩	0.10	0.001	-4.55
	III ₃	页岩与灰岩	0.02	0.002	-2.40
	崩塌数据	I ₁	灰岩、白云岩	0.02	0.187
I ₂		含泥质灰岩	0.01	0.007	-0.69
II ₁		泥岩、砂岩	0.17	0.040	-1.40
II ₂		砂岩夹页岩	0.63	0.491	-0.24
II ₃		厚层状砂岩	0.03	/	/
III ₁		泥灰岩夹粉砂岩、页岩	0.02	0.002	-1.92
III ₂		灰岩夹页岩	0.10	0.273	1.05
III ₃		页岩与灰岩	0.02	/	/

DEM 为基础获取地形坡度, 将綦江区地形坡度划分为 8 类, 即<10°、[10°, 20°)、[20°, 30°)、[30°, 40°)、[40°, 50°)、[50°, 60°)、[60°, 70°)、>70°。根据坡度因子易发性量化指标统计表(表4)和评价因子量化分级图2(d)来看, 在坡度 10°~30°区间内滑坡易发性指标>0, 表明此区间滑坡发生的信息量大, 发生的可能大; 在坡度<10°和 [30°, 40°) 区间内滑坡易发性指标≈0, 说明在此区间滑坡灾害

表4 坡度因子易发性量化指标

Table 4 Quantitative index of susceptibility factor of slope gradient

地灾类型	坡度/(°)	分级面积比	地灾面积占比	易发性指标
滑坡数据	<10	0.219 9	0.161	-0.31
	[10, 20)	0.396 9	0.482	0.20
	[20, 30)	0.253 0	0.298	0.16
	[30, 40)	0.094 9	0.051	-0.61
	[40, 50)	0.026 4	0.007	-1.38
	[50, 60)	0.006 7	0.001	-1.62
	[60, 70)	0.001 7	/	/
	>70	0.000 5	/	/
	崩塌数据	<10	0.219 9	0.015
[10, 20)		0.396 9	0.090	-1.48
[20, 30)		0.253 0	0.203	-0.22
[30, 40)		0.094 9	0.273	1.07
[40, 50)		0.026 4	0.231	2.19
[50, 60)		0.006 7	0.129	3.02
[60, 70)		0.001 7	0.057	3.78
>70		0.000 5	0.002	3.11

易发程度不确定;在坡度>40°区间内滑坡易发性指标小于 0,说明在此区间内滑坡灾害相对不易发生或不发生。崩塌在坡度>30°时,其易发性指标>0,表明此区间崩塌发生的信息量大,发生的可能大,且坡度越大,易发性指标越大,发生的可能越大;在坡度<30°时,崩塌易发性指标<0,其它坡度段崩塌灾害相对不易发生。表明此区间崩塌发生的信息量小,发生的可能小。

2.2.5 距水系距离

区内地表水系发达,主要河流有綦江河及其支流羊渡河、藻渡河、蒲河、清溪河、通惠河等。河流水系对斜坡起冲蚀作用、引发滑坡体内地下水位及孔隙水压力变化,是引起滑坡等地质灾害的主要因素。在提取地表水与滑坡、崩塌地质灾害易发性指标时,将地表水影响范围(m)划分为 6 个区间:<0.2、[0.2~0.4)、[0.4~0.6)、[0.6~0.8)、[0.8~1.0)、>1.0,根据距水系距离因子易发性量化指标统计(表 5)和评价因子量化分级图 2(e)来看,滑坡在距水系距离<0.2 km时,易发性指标>0,说明在此区间内滑坡灾害易发程度较高;其它段距水系距离越远,滑坡易发性指标越小,易发程度越小。崩塌分布位置较高,与水系距离较远,与该量化指标无明显相关,不参与模型计算。

表 5 距水系距离因子易发性量化指标

Table 5 Quantitative index of susceptibility factor of distance from water system

地灾类型	距水系距离/km	分级面积比	地灾面积占比	易发性指标
滑坡数据	<0.2	0.33	0.612	0.64
	[0.2, 0.4)	0.26	0.176	-0.39
	[0.4, 0.6)	0.18	0.124	-0.38
	[0.6, 0.8)	0.12	0.068	-0.57
	[0.8, 1)	0.06	0.019	-1.16
	≥1.0	0.05	0.001	-4.35

2.2.6 岩层倾角

綦江区褶皱发育,岩层倾角变化较大,不同倾角的岩体,其内部应力分布不同,稳定性不同。基于 ArcGIS 平台利用产状点插值法获得岩层倾角图层,并将其分为 8 个区间:<10°、[10°~20°)、[20°~30°)、[30°~40°)、[40°~50°)、[50°~60°)、[60°~70°)、>70°。根据岩层倾角因子易发性量化指标统计表(表 6)来看,在岩层倾角<20°时滑坡易发性指标≈0,滑坡灾害易发程度不确定;岩层倾角为 20°~30°内滑坡易发性指标值>0,说明滑坡灾害易发程度高;其它段滑坡易发性指标<0 时,滑坡灾害易发程度小。崩塌在岩层倾角内<10°和 20°~30°崩塌易发性指标>0,崩塌灾害易发程度较高;其它段易发

表 6 岩层倾角因子易发性量化指标

Table 6 Quantitative index of susceptibility factor of inclination angle of rock strata

地灾类型	岩层倾角/(°)	分区面积比	地灾面积占比	易发性指标
滑坡数据	<10	0.191	0.225	0.18
	[10, 20)	0.455	0.409	-0.09
	[20, 30)	0.216	0.343	0.48
	[30, 40)	0.081	0.015	-1.70
	[40, 50)	0.038	0.005	-2.06
	[50, 60)	0.015	0.002	-1.86
	[60, 70)	0.003	/	/
	>70	0.001	0.001	-0.47
崩塌数据	<10	0.191	0.421 4	0.81
	[10, 20)	0.455	0.148 3	-1.10
	[20, 30)	0.216	0.342 1	0.48
	[30, 40)	0.081	0.066 6	-0.18
	[40, 50)	0.038	0.021 0	-0.59
	[50, 60)	0.015	/	/
	[60, 70)	0.003	0.000 6	-1.83
	>70	0.001	/	/

性指标≈0,崩塌易发程度小或不确定。

2.2.7 地质构造

綦江区内构造发育,地质构造运动强烈与否决定岩体的扰动程度,受扰程度不同导致稳定性不同。在提取断层线与滑坡、崩塌地质灾害易发性指标时,将断层线影响范围(km)划分为 11 个区间:<0.5、[0.5, 1)、[1, 1.5)、[1.5, 2)、[2, 2.5)、[2.5, 3)、[3, 3.5)、[3.5, 4)、[4, 4.5)、[4.5, 5)、>5。根据地质构造因子易发性量化指标统计表(表 7)和评价因子量化分级图 2(f)来看,滑坡距构造线、断层距离<3 时易发性指标>0,说明在此区间内滑坡灾害易发程度较高;其它段易发性指标≈0,滑坡易发程度小或不确定;崩塌距构造线、断层距离<2 时易发性指标>0,说明在此区间内崩塌灾害易发程度较高;其它段易发性指标≈0,崩塌易发程度小或不确定。

3 易发性模型构建

易发性评价中各因子与滑坡、崩塌地质灾害统计表中的易发性指标进行归一化处理,再根据《重庆区 1:5 万地质灾害风险评价指标体系》对滑坡和崩塌灾害的各因子权重、分级赋值(A_{ij})进行赋值、校核(表 8、表 9)。最后使用层次分析法评价斜坡单元易发性,构建綦江区地质灾害易发性评价模型见式(1):

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \times A_{ij} \quad (1)$$

式中: S——易发性值;

W_i——第 i 种因素的权重(取值参考《重庆区 1:

表 7 地质构造因子易发性量化指标

Table 7 Quantitative index of susceptibility factor of geological structure

地灾类型	距断层距离/km	分区面积比	地灾面积占比	易发性指标
滑坡数据	(0, 0.5]	0.084	0.139	0.51
	(0.5, 1]	0.079	0.079	0.01
	(1, 1.5]	0.076	0.041	0.63
	(1.5, 2]	0.075	0.068	0.08
	(2, 2.5]	0.073	0.056	0.26
	(2.5, 3]	0.068	0.085	0.23
	(3, 3.5]	0.063	0.023	-0.99
	(3.5, 4]	0.054	0.015	-1.30
	(4, 4.5]	0.045	0.017	-0.95
	(4.5, 5]	0.038	0.018	-1.77
	>5	0.345	0.459	-0.29
崩塌数据	(0, 0.5]	0.084	0.072	0.09
	(0.5, 1]	0.079	0.133	0.76
	(1, 1.5]	0.076	0.069	0.14
	(1.5, 2]	0.075	0.061	0.04
	(2, 2.5]	0.073	0.003	-3.00
	(2.5, 3]	0.068	0.228	-1.86
	(3, 3.5]	0.063	0.134	-1.99
	(3.5, 4]	0.054	0.088	-1.71
	(4, 4.5]	0.045	0.105	-1.09
	(4.5, 5]	0.038	0.004	-1.90
	>5	0.345	0.103	-0.97

5 万地质灾害风险评价指标体系》并根据研究区各因子特征综合取值);

A_{ij} ——第 i 种因素第 j 个范围的易发性赋值。

信息量模型是一种定量分析方法, 其物理意义明确, 广泛应用于区域地质灾害风险评价, 评价过程中可较好反映致灾因子与地质灾害的关联性。本次研究中, 该值由信息量法计算出的易发性指标 I_{ij} 、野外实地判断、《重庆区 1:5 万地质灾害风险评价指标体系》共同决定。

表 8 滑坡影响因素分级层次分析法权重取值表

Table 8 The weighted value table of the hierarchical analysis for landslide influencing factors

滑坡评价因子	权重	因子分级	易发性指标	易发性指标归一化
斜坡结构	0.20	近水平	-1.80	0.00
		顺向坡	1.20	0.47
		斜向坡	-0.60	0.19
		横向坡	-0.40	0.22
		逆向坡	-1.00	0.13
地灾点密度	0.17	<0.2	-1.33	0.00
		[0.2, 0.4)	-0.24	0.11
		[0.4, 0.6)	0.61	0.22
		[0.6, 0.8)	1.35	0.33
		[0.8, 1.0)	1.47	0.34

续表 8

滑坡评价因子	权重	因子分级	易发性指标	易发性指标归一化
工程地质岩组	0.15	I ₁	-0.49	0.15
		I ₂	-1.22	0.12
		II ₁	0.08	0.17
		II ₂	0.20	0.17
		II ₃	-0.80	0.14
		III ₁	0.52	0.18
		III ₂	-4.55	0.00
		III ₃	-2.40	0.08
		坡度/(°)	0.20	(0, 10]
(10, 20]	0.20			0.30
(20, 30]	0.16			0.29
(30, 40]	-0.61			0.16
(40, 50]	-1.38			0.04
(50, 60]	-1.62			0.00
(60, 70]	/			/
>70	/	/		
距水系距离/km	0.15	<0.2	0.64	0.25
		[0.2, 0.4)	-0.39	0.20
		[0.4, 0.6)	-0.38	0.20
		[0.6, 0.8)	-0.57	0.19
		[0.8, 1.0)	-1.16	0.16
		≥1.0	-4.35	0.00
岩层倾角/(°)	0.08	(0, 10]	0.18	0.25
		(10, 20]	-0.09	0.22
		(20, 30]	0.48	0.29
		(30, 40]	-1.70	0.04
		(40, 50]	-2.06	0.00
		(50, 60]	-1.86	0.02
		(60, 70]	/	/
>70	-0.47	0.18		
距断层距离/km	0.05	(0, 0.5]	0.51	0.17
		(0.5, 1]	0.01	0.13
		(1, 1.5]	-0.63	0.06
		(1.5, 2]	-0.08	0.12
		(2, 2.5]	-0.26	0.10
		(2.5, 3]	0.23	0.15
		(3, 3.5]	-0.99	0.03
		(3.5, 4]	-1.30	0.00
		(4, 4.5]	-0.95	0.03
(4.5, 5]	-0.77	0.05		
>5	0.29	0.15		

易发性指标:

$$I_{ij} = \ln \frac{N_j/N}{S_j/S} \quad (2)$$

式中: N_j —— i 因素的 j 范围面积/km²;

N ——研究区总面积/km²;

S_j —— i 因素 j 范围内地灾面积/km²;

S ——研究区内地灾总面积/km²。

I_{ij} —— i 因子 j 区间下的地质灾害信息量值。

表 9 崩塌影响因素分级层次分析法权重取值表

Table 9 The weighted value table of the hierarchical analysis for the collapse influencing factors

崩塌评价因子	权重	因子分级	易发性指标	易发性指标归一化
斜坡结构	0.20	近水平	-2.78	0.00
		顺向坡	-0.47	0.21
		斜向坡	0.09	0.26
		横向坡	-0.39	0.22
		逆向坡	0.76	0.32
地灾点密度	0.15	<0.2	0.30	0.23
		[0.2, 0.4)	0.59	0.45
		[0.4, 0.6)	0.03	0.02
		[0.6, 0.8)	0.05	0.04
		[0.8, 1.0]	0.03	0.02
		>1.0	0.30	0.23
工程地质岩组	0.20	I ₁	2.07	0.38
		I ₂	-0.69	0.12
		II ₁	-1.40	0.05
		II ₂	-0.24	0.16
		II ₃	-	-
		III ₁	-1.92	0.00
		III ₂	1.05	0.29
		III ₃	-	-
坡度/(°)	0.30	(0, 10]	-2.65	0.00
		(10, 20]	-1.48	0.04
		(20, 30]	-0.22	0.08
		(30, 40]	1.07	0.12
		(40, 50]	2.19	0.16
		(50, 60]	3.02	0.19
		(60, 70]	3.78	0.21
		>70	3.11	0.19
岩层倾角/(°)	0.05	(0, 10]	0.81	0.31
		(10, 20]	-1.10	0.09
		(20, 30]	0.48	0.27
		(30, 40]	-0.18	0.19
		(40, 50]	-0.59	0.14
		(50, 60]	-	-
		(60, 70]	-1.83	0
		>70	-	-
距断层距离/km	0.10	(0, 0.5]	0.09	0.10
		(0.5, 1]	0.76	0.12
		(1, 1.5]	0.14	0.10
		(1.5, 2]	0.04	0.10
		(2, 2.5]	-3.00	0.00
		(2.5, 3]	-0.86	0.07
		(3, 3.5]	0.99	0.13
		(3.5, 4]	0.71	0.12
		(4, 4.5]	1.09	0.14
		(4.5, 5]	-1.90	0.04
		>5	-0.97	0.07

当 $I_{ij} > 0$ 时,表明 i 因素的 j 区间下地质灾害发生的信息量较大,地质灾害发生的可能性较大,利于地质灾害发生;当 I_{ij} 接近于 0 时,表明 i 因素的 j 区间不提供有关地质灾害发生与否的判断信息,无法判断该区间是否有利于地质灾害发生;当 $I_{ij} < 0$ 时,表明 i 因素的 j 区间下地质灾害发生的信息量较小,地质灾害发生的可能性较小,不利于地质灾害发生。

评价以 GIS 平台的自然间断点法为基础,并根据綦江区地质灾害实际情况调整后的信息量值为易发性分区界线,由此分别构建基于斜坡单元和层次分析法的滑坡、崩塌灾害易发性模型,并结合滑坡、崩塌易发性分析及野外判断、校核每个斜坡单元地质灾害易发性,得到綦江区 2 081 个斜坡单元易发性评价结果,包括高易发区 406 个、中等易发区 1 108 个、低易发区 533 个和非易发区 34 个(图 3、表 10)。

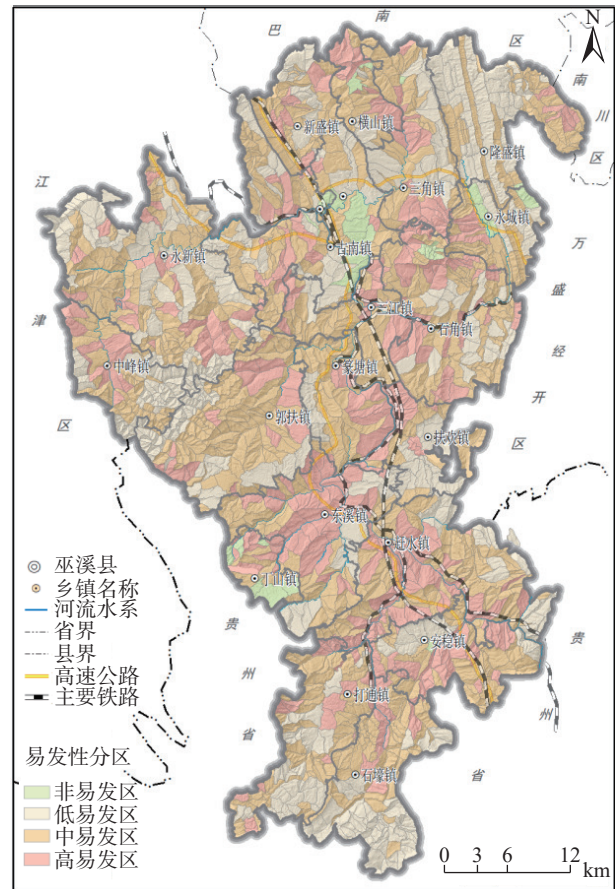


图 3 綦江区地质灾害易发性分区图

Fig. 3 Zoning map of geological disaster susceptibility assessment in Qijiang District

4 成果验证

通过对近 5 a(2018—2020 年)的 51 起地质灾害灾

表 10 地质灾害易发性分区统计表

Table 10 Statistical table of geological disaster susceptibility zones

易发性等级	高易发区	中易发区	低易发区	非易发区
斜坡面积/km ²	519.99	1 021.29	598.93	47.27
占比/%	23.77	46.69	27.38	2.16

(险)情中,30起位于高易发区,占比58.82%;17处位于中易发区,占比33.33%;4处位于低易发区,占比7.85%;非易发区未发生灾(险)情,与本次地质灾害的易发性研究结果相符(表11)。

表 11 近年来灾(险)情易发性统计表

Table 11 Statistical table of geological disasters (hazards) susceptibility in recent years

易发分区	地灾点数量/个	占比/%
高易发区	30	58.82
中易发区	17	33.33
低易发区	4	7.85
非易发区	0	0

5 结论

通过对研究区数据分析,得出以下结论:

(1)结合重庆市区域地质灾害评价体系,滑坡选取斜坡结构类型、地灾点密度、工程地质岩组、坡度、距水系距离、岩层倾角和地质构造七大因子;崩塌选取斜坡结构类型、地灾点密度、工程地质岩组、坡度、岩层倾角和地质构造六大因子,选用层次分析法对研究区斜坡单元地质灾害易发性进行评价,其中高易发区面积519.99 km²,占研究区面积23.77%;中等易发区1 021.29 km²,占研究区面积46.69%;低易发区和非易发区面积646.2 km²,占研究区面积29.54%。

(2)根据綦江区地质灾害易发性评价结果及分区特征表明研究区内地质灾害高易发区主要分布于南部石壕镇、安稳镇一线的上硬下软易发高位崩滑地灾体高易发区和采煤沉陷高易发区,南中部赶水镇、篆塘镇、郭扶镇一线的单斜山区顺层岩质滑坡高易发区及北部中峰镇、永新镇等倒置山边缘危岩带高易发区;其次地质灾害中易发区分布于构造剥蚀中丘、斜面状深丘区域,多有浅表地质灾害和小型危岩崩塌灾害;地质灾害低易发区和非易发区分布于地形较为平坦区域。比较正确的反映了綦江区地质灾害分布规律,客观、正确完成地质灾害地灾易发性分区评价工作,为今后綦江区地质灾害风险评价及管控相关工作提供了依据。

参考文献(References):

- [1] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].2版.北京:地质出版社,1994. [ZHANG Zhuoyuan. Principles of engineering geological analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese)]
- [2] 李滨,殷跃平,高杨,等.西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J].水文地质工程地质,2020,47(4):5-13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 5-13. (in Chinese with English abstract)]
- [3] YIN Yueping, WANG Fawu, SUN Ping. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China [J]. Landslides, 2009, 6(2): 139-152.
- [4] 刘乐,杨智,孙健,等.安徽黄山市徽州地区地质灾害危险性评价研究[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):110-116. [LIU Le, YANG Zhi, SUN Jian, et al. Study on risk assessment of geological hazards in Huizhou District, Huangshan City, Anhui Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 110-116. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 周粤,王运生,赵逊,等.怒江支流迪麻洛河流域泥石流易发性评价[J].地质通报,2022,41(4):702-712. [ZHOU Yue, WANG Yunsheng, ZHAO Xun, et al. Susceptibility assessment of debris flow in Dimaluo River, branch of Nujiang River [J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(4): 702-712. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 殷跃平,李滨,张田田,等.印度查莫利“2·7”冰岩山崩塌江溃决洪水灾害链研究[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):1-8. [YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. Study on flood disaster chain of “2·7” ice rock landslide in Chamorri, India [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 许冲.汶川地震滑坡分布规律与危险性评价[J].岩石力学与工程学报,2012,31(2):432. [XU Chong. Distribution law and risk assessment for Wenchuan earthquake-triggered landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 432. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 孟祥瑞,裴向军,刘清华,等.GIS支持下基于因子分析法的都汶路沿线地质灾害易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):106-115. [MENG Xiangrui, PEI Xiangjun, LIU Qinghua, et al. GIS-Based susceptibility assessment of geological hazards along the road from Dujiangyan to Wenchuan by factor analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 106-115. (in Chinese with English abstract)]

- [9] 田春山, 刘希林, 汪佳. 基于CF和Logistic回归模型的广东省地质灾害易发性评价 [J] . *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 154 – 161. [TIAN Chunshan, LIU Xilin, WANG Jia. Geohazard susceptibility assessment based on CF model and Logistic Regression models in Guangdong [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 154 – 161. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张瑛. “5·12”汶川大地震震裂山体灾害勘查评价与治理设计方法研究 [D] . 成都: 成都理工大学, 2009. [ZHANG Ying. Study on exploration, evaluation and treatment design method of mountain disaster caused by “5·12” Wenchuan earthquake [D] . Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [11] NILSEN T, BRABB E. 18 slope-stability studies in the San francisco bay region, California [J] . *Reviews in Engineering Geology*, 1977: 233-244.
- [12] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化 [J] . *地球科学进展*, 2005, 20(3): 292 – 297. [HUANG Runqiu. Main characteristics of high rock slopes in southwestern China and their dynamic evolution [J] . *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(3): 292 – 297. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 邓茂林, 许强, 郑光, 等. 基于离心模型试验的武隆鸡尾山滑坡形成机制研究 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊1): 3024 – 3035. [DENG Maolin, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Study on the formation mechanism of Jiweishan landslide in Wulong, Chongqing, China-based on centrifugal model test [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup 1): 3024 – 3035. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈国庆, 黄润秋, 周辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究 [J] . *岩土力学*, 2013, 34(4): 1140 – 1146. [CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, ZHOU Hui, et al. Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(4): 1140 – 1146. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 韩用顺, 梁川, 崔鹏, 等. 地形条件对次生山地灾害易发性分析 [J] . *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(增刊1): 15 – 21. [HAN Yongshun, LIANG Chuan, CUI Peng, et al. Susceptibility of mountain hazards triggered by Wenchuan earthquake to topographic factors [J] . *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(Sup 1): 15 – 21. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析 [J] . *工程地质学报*, 2010, 18(2): 168 – 177. [HUANG Heqing, ZHAO Qihua. Basic characteristics and preliminary mechanism analysis of large scale rockslide-sturzstrom at Wenjiagou triggered by Wenchuan earthquake [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(2): 168 – 177. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(19): 3381 – 3388. [ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction fem in soil and rock slope [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(19): 3381 – 3388. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李文娟, 邵海. 基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 94 – 99. [LI Wenjuan, SHAO Hai. Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 94 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 郭学飞, 王志一, 焦润成, 等. 基于层次分析法的北京市地质环境质量综合评价 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(1): 70 – 76. [GUO Xuefei, WANG Zhiyi, JIAO Runcheng, et al. Comprehensive evaluation method of geological environment quality in Beijing based on AHP [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(1): 70 – 76. (in Chinese with English abstract)]