

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.141

引用格式: 林高聪,刘欢,王洪磊,等. 不同比例尺度下的地质灾害风险评价分析——以湖南黄溪口为例[J]. 中国地质调查, 2024,11(6): 100–110. (Lin G C, Liu H, Wang H L, et al. Risk assessment of geological hazards under different plotting scales: A case study of Huangxikou Town in Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 2023, 11(6): 100–110.)

# 不同比例尺度下的地质灾害风险评价分析 ——以湖南黄溪口镇为例

林高聪<sup>1,2,3</sup>, 刘欢<sup>4</sup>, 王洪磊<sup>2,3\*</sup>, 潘书华<sup>2,3</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 3. 自然资源部三峡库区地质灾害监测预警野外科学观测基地, 重庆 404100; 4. 河北金融学院 保险与财政学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 为探讨多尺度地质灾害风险评价模型、方法的差异和适用性,以湖南省黄溪口镇为研究区,在图幅单元灾害地质调查基础上,选取工程地质岩组、斜坡结构等8个评价指标,采用信息量模型开展以栅格为单元的1:5万地质灾害风险评价,得出研究区低、中、高和极高风险区分别占总面积的32.0%、24.6%、38.0%和5.4%。采用水文学与人工干涉方法划分161处斜坡单元,选取发生地质灾害的可能性、灾害强度、承灾体类型和数量、易损性下的17个指标30个因子构建层次分析评分分级模型,开展以斜坡为单元的1:1万重点区地质灾害风险评价,得出重点区地质灾害低风险斜坡84处、中风险斜坡49处、高风险斜坡24处、极高风险斜坡4处。受调查精度和评价方法影响,同一地段两种模型方法的评价结果不完全一致,应当依据调查精度和研究程度选用适当的评价方法。对于中小比例尺区域地质灾害风险评价,可采用基于数理统计定量计算的信息量评价模型,模型简单,易于推广,建模效率高,适合区域性推广;对于大比例尺重点区地质灾害风险评价,基于精细化斜坡单元调查结果,可以建立层次分析多指标评分分级评价模型,评价指标详细易懂,可实现对逐个斜坡单元的风险评价,适用于边坡管理和斜坡风险动态更新。研究成果可为不同比例尺度下的地质灾害风险评价方法选取和应用提供参考。

**关键词:** 地质灾害; 风险评价; 信息量法; 层次分析法; 不同比例尺度

**中图分类号:** P681.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095–8706(2024)06–0100–11

## 0 引言

湖南雪峰山北部地区广泛分布浅变质岩和红层碎屑岩,岩石风化强烈,地质环境脆弱<sup>[1]</sup>,由降雨诱发的地质灾害频发,是湖南省地质灾害重点防治区之一<sup>[2]</sup>。开展地质灾害风险评价,研究灾害脆弱性,制定防灾减灾决策,已成为当前应对灾害风险的关键所在<sup>[3]</sup>。近年来,我国众多区县相继完成了地质灾害调查评价工作<sup>[4–5]</sup>,并以此为契机开展了以流域、县(市)域、调查图幅为主的地质灾害风险评价<sup>[6–10]</sup>,对确定性模型<sup>[11–13]</sup>、统计模型<sup>[14–15]</sup>、灰色

模型<sup>[16–19]</sup>、机器学习模型<sup>[20–22]</sup>以及上述模型间的耦合<sup>[23]</sup>评价方法开展了大量的探索和研究。研究成果显示采用单一或耦合模型评价的结果与实际情况均有较高的一致性,预测精度为75%~85%,都能较客观准确地做出评价。尽管采用耦合模型的评价结果比采用单一模型具有更高的准确率,但单一模型方法简单,具有更高的建模效率,易于推广,可满足中小比例尺下的区域性防灾减灾工作和国土空间管理等需求。对于承灾体的信息,通常通过搜集地理测绘信息、国情信息<sup>[5–6,24]</sup>或遥感识别<sup>[25]</sup>、倾斜摄影测量<sup>[26]</sup>等手段获得,将承灾体及其易损性按密度、用途、等级等进行分类并赋值<sup>[8,24]</sup>,亦

收稿日期: 2024–02–20; 修订日期: 2024–11–05。

基金项目: 中国地质调查局“陇东南地区特大地质灾害链调查评价(编号: DD20221813)”和“三峡库区城镇危岩崩塌风险减缓技术示范(编号: DD20242410)”项目联合资助。

第一作者简介: 林高聪(1989—),男,工程师,主要从事地质灾害调查评价与监测预警方面的研究工作。Email: lingaocong@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 王洪磊(1982—),男,高级工程师,主要从事地质灾害调查评价与监测预警方面的研究工作。Email: 270987133@qq.com。

或基于以往因灾死亡人数、财产损失与人口总数、财产总额的占比期望值作为评价单元人员和财产的易损值<sup>[5-6,26]</sup>,开展中小比例尺度的区域风险评价。也有学者采用数值模拟等方法对单体地质灾害风险进行评价,尽管这些方法可以模拟地质灾害破坏、运动、堆积过程中对承灾体的影响<sup>[27-32]</sup>,也能够进一步刻画承灾体的构成、结构、防御能力等<sup>[30-32]</sup>,但是由于复杂的建模和计算过程,并不适用于区域性的评价和快速评估的推广。由此可见,风险评价的准确性关键在于评价尺度的选择、资料数据的质量和参数因子的分析,可以将单体地质灾害风险评价中获取的统计模型、经验模型结合指标体系和精细化的调查用于大比例尺的小区域风险评价中,开展多尺度的风险评价,提高评价结果的准确性和应用性。对于低山丘陵区公路切坡、建房切坡形成的规模较小的边坡地质灾害,以往的中小比例尺评价是难以刻画的,因此对这类灾害需要开展围绕以承灾体对象为主的大比例尺区域地质灾害风险评价。

本文以湖南省怀化市黄溪口集镇区为例,分别对1:5万灾害地质调查图幅和1:1万重点集镇区开展基于栅格单元信息量评价方法以及基于斜坡单元层次分析分级方法的地质灾害风险评价方法研究,对比评价结果的差异,实现多尺度和评价单元的地质灾害风险评价,可为地质灾害风险管控等提供依据。

## 1 研究区概况

研究区位于湖南省湘西低山丘陵地质灾害重点防治区中的辰溪县、溆浦县境内,处于雪峰山中段北西麓与沅麻盆地南东缘的过渡地带,面积约为416.7 km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。沅江从研究区南部蜿蜒向北流出,境内群山起伏,沟壑纵横,地形变化较大,地貌以构造-剥蚀切割中低山、丘陵和河流侵蚀残丘为主(图1)。在出露地层中,青白口系浅变质黏土岩和白垩系紫红色砂岩、粉砂岩、砂质泥岩为研究区易崩易滑地层。区内构造复杂,推覆作用形成叠瓦状排列的推覆构造带,构造带及断层周边形成的破碎带、节理劣化带和构造角砾岩沿构造迹线普遍发育,这些较老的变质岩、黏土岩和碎屑岩及受构造作用形成的破碎岩带在后期各地质营力作用下形成了研究区内分布较为广泛的强-全风化岩带和残坡积层,为研究区内的滑坡、崩塌等地质灾害提供了孕灾基础。加之丘陵区城镇建设、交通建设和农村切坡建房现象普遍,多产生崩塌、滑坡等地质

灾害,发育密度为20处/100 km<sup>2</sup>~40处/100 km<sup>2</sup>。

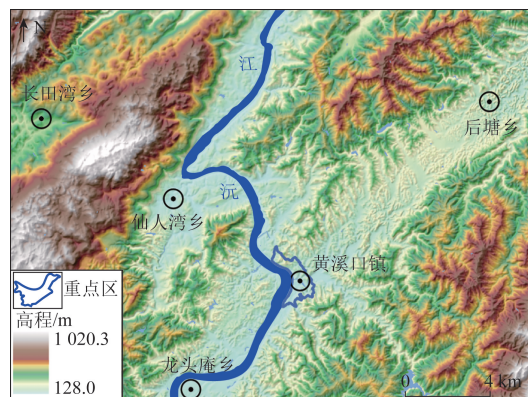


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

黄溪口集镇区为本次研究重点区,位于研究区中南部沅江左岸黄溪入口处,地质条件复杂,镇区被西侧沅江和东面连绵的丘陵山体包夹,面积约1 km<sup>2</sup>,人口约1.2万人,是湖南省小城镇建设示范镇,全国建设重点镇之一。镇区居民建筑密集,人均建设用地70 m<sup>2</sup>/人,总建设用地约0.85 km<sup>2</sup>,是典型的人口密集城镇。在缺少适宜建设用地的情况下,居民选择依山建房、切坡建房,甚至部分房屋建设在斜坡体上,增大了居民面临地质灾害的风险。选取研究区和重点区黄溪口集镇分别开展1:5万和1:1万地质灾害风险评价,建立不同级别的地质灾害风险评价方法,旨在为当地土地利用规划、建设场地选取及地质灾害风险分级管控提供依据。

## 2 研究区1:5万地质灾害风险评价

选用信息量模型对研究区进行1:5万地质灾害风险评价。信息量法是以已知灾害点的孕灾条件、影响因素为依据,计算出评价指标的信息量,建立评价模型,并依照工程类比原则推到相邻地区,综合信息量越大地质灾害越容易发生。

### 2.1 评价指标选取

依据研究区野外108处地质灾害开展调查和分析,根据地质灾害的孕灾条件和人类活动的影响,结合研究区的地形地貌、地质环境,确定影响研究区地质灾害发生的6项控制因素,分别为工程地质岩组、斜坡结构、坡度、距构造距离、距水系距离、距居民区距离,综合人员易损性和道路易损性作为研究区地质灾害风险评价的指标。其中分别采用建筑物核密度和道路线密度来表征承灾体暴露在地质灾害前的空间可能和易损性指标(图2)。

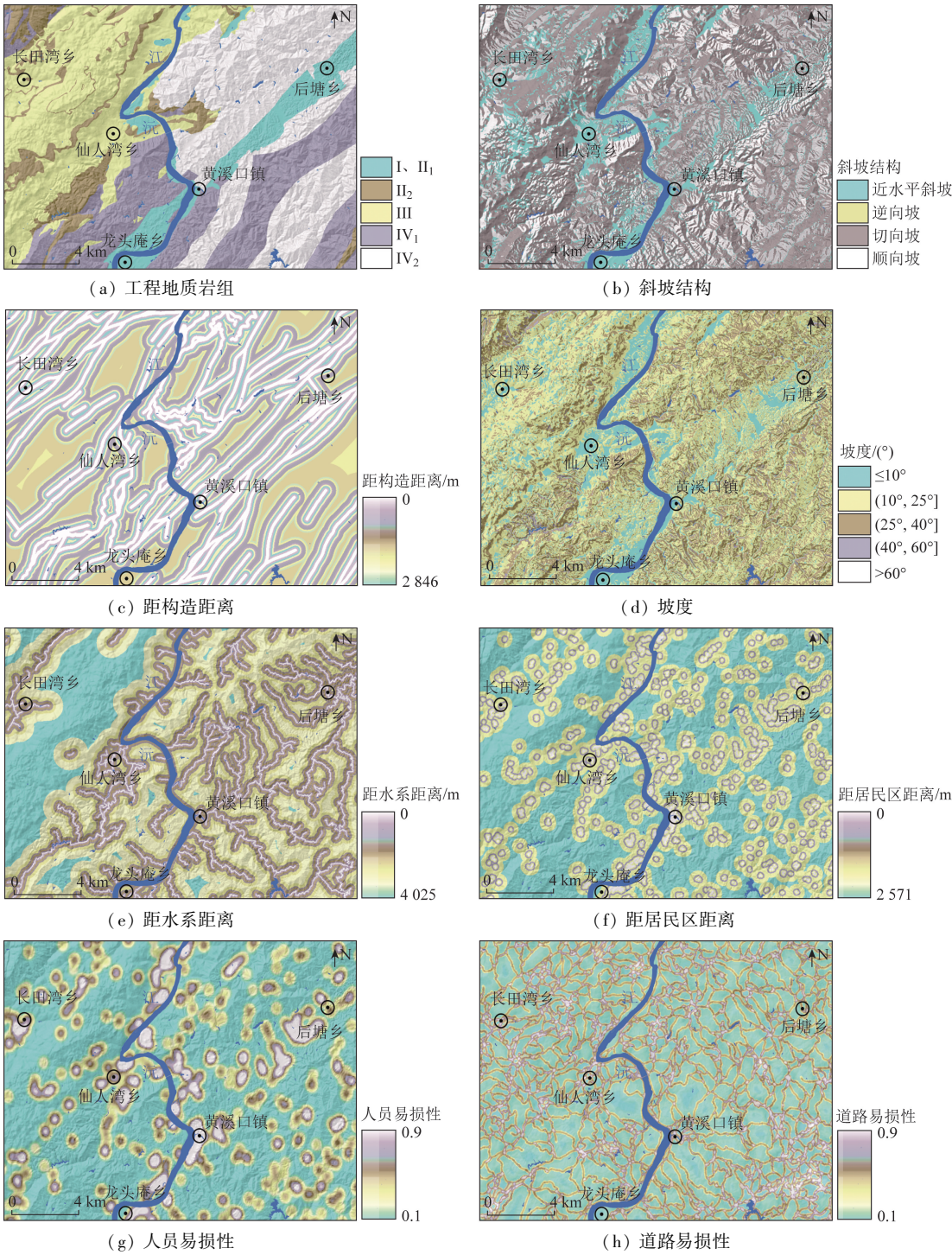


图 2 研究区 1:5 万地质灾害风险评价指标

Fig.2 Geological hazard risk assessment indicators of the study area under 1:50 000 scale

尽管降雨是引发研究区地质灾害发生的主要因素,但通过对研究区内及周边 7 处乡镇级气象站点降雨量数据统计分析,2013—2016 年 4—8 月月降雨量变异系数为 0.09 ~ 0.26,平均变异系数为

0.15,显示在研究区范围内各地区降雨在空间上分布差异较小,研究区内因降雨差异导致的地质灾害风险结果差异也会较小,因此本文未考虑降雨因素对研究区地质灾害风险差异的影响。

2.2 评价指标计算

主要数据源包括研究区 108 处地质灾害点数据库和 1:5 万灾害地质填图图件,25 m×25 m DEM 数据和 1:5 万地形图用于提取水系、居民点、路网等信息。通过 ArcGIS 软件对上述 8 种地质灾害风险评价指标进行分级分类,将其中 6 种地质灾害评价指标与 108 处地质灾害点进行空间分析和信息量计算,得到各评价指标对地质灾害发生可能性的信息量值(表 1)。选取居民点密度和路网密度作为人员、车辆可能遭受地质灾害破坏的易损程度因子。

| 表 1 研究区各地质灾害评价指标信息量值                                                                    |                               |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------|
| Tab.1 Information values for the geological hazard evaluation factors in the study area |                               |        |
| 评价指标                                                                                    | 类别                            | 信息量值   |
| 工程地质岩组                                                                                  | I 河流沉积、冲洪积相砾、砂岩岩组             | 无      |
|                                                                                         | II <sub>1</sub> 坚硬整体状砂岩岩组     | 无      |
|                                                                                         | II <sub>2</sub> 较软质层状、碎裂状页岩岩组 | -0.36  |
|                                                                                         | III 坚硬-较坚硬块状、层状中等岩            | -1.64  |
|                                                                                         | 溶化碳酸盐岩组                       |        |
|                                                                                         | IV <sub>1</sub> 较坚硬-较软块状、碎裂状浅 | 0.037  |
|                                                                                         | 变质砂岩、板岩岩组                     |        |
|                                                                                         | IV <sub>2</sub> 较软-软岩碎裂状与散体状浅 | 0.73   |
|                                                                                         | 变质砂岩、板岩岩组                     |        |
| 斜坡结构                                                                                    | 近水平斜坡                         | 无      |
|                                                                                         | 顺向坡                           | 0.380  |
|                                                                                         | 切向坡                           | 0.270  |
|                                                                                         | 逆向坡                           | -0.040 |
| 距构造距离/m                                                                                 | ≤100                          | 0.390  |
|                                                                                         | (100,200]                     | 0.370  |
|                                                                                         | (200,300]                     | -0.790 |
|                                                                                         | (300,400]                     | -0.390 |
|                                                                                         | (400,500]                     | 0.220  |
|                                                                                         | (500,600]                     | 0.075  |
|                                                                                         | (600,700]                     | 0.094  |
|                                                                                         | (700,800]                     | -0.970 |
|                                                                                         | (800,900]                     | -0.730 |
|                                                                                         | (900,1 800]                   | -0.310 |
| 坡度/(°)                                                                                  | ≤10°                          | 无      |
|                                                                                         | (0°,25°]                      | -2.08  |
|                                                                                         | (25°,40°]                     | 0.59   |
|                                                                                         | (45°,60°]                     | 3.19   |
|                                                                                         | >60°                          | 9.41   |
| 距水系距离/m                                                                                 | ≤25                           | 1.23   |
|                                                                                         | (25,100]                      | 0.56   |
|                                                                                         | (100,200]                     | 0.28   |
|                                                                                         | (200,300]                     | 0.37   |
|                                                                                         | (300,500]                     | -0.28  |
|                                                                                         | (500,1 000]                   | -0.97  |
|                                                                                         | >1 000                        | -2.10  |
| 距居民区距离/m                                                                                | ≤25                           | 1.950  |
|                                                                                         | (25,100]                      | -0.030 |
|                                                                                         | (100,200]                     | 0.410  |
|                                                                                         | (200,500]                     | -0.120 |
|                                                                                         | >500                          | -0.700 |

注:“无”表示在研究区内含此类因子的地质环境中不发生地质灾害。

2.3 评价过程及结果

将上述信息量值赋值至各评价指标中,在 ArcGIS 软件中对其叠加生成研究区地质灾害危险性信息量指数图和易损性指数图,随后采用危险性×易损性的风险分析方法,将计算结果划分为 4 个等级,即低、中、高和极高风险区(图 3),其分别占研究区总面积的 32.0%、24.6%、38.0% 和 5.4%。低风险区主要分布在沅江两岸、黄溪口镇至后塘乡断陷盆地和山间盆地,以及研究区西北部碳酸盐岩地质灾害低易发区;中风险区和高风险区主要分布在研究区东侧元古界变质岩区,岩体强度较低,风化作用强烈,地质构造发育密集,容易发生地质灾害,地质灾害发育占灾害总数的 90%;极高风险区主要分布于研究区东部山谷间居民聚集点及周边交通沿线,此处人类工程活动密度较大。除重点研究区外,其余乡镇城区多位于宽缓的山间盆地低风险区。

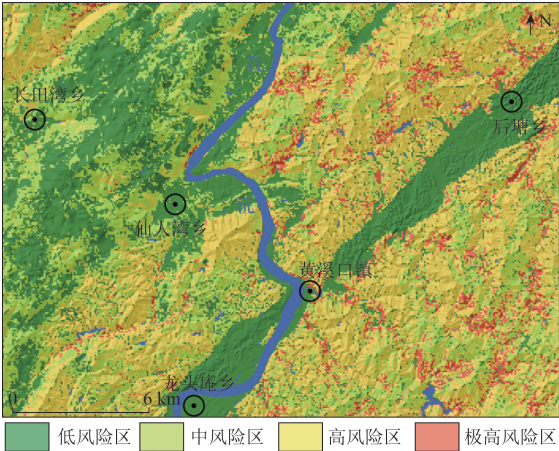


图 3 研究区 1:5 万地质灾害风险评价分区

Fig.3 Geological hazard risk assessment zoning of the study area under 1:50 000 scale

3 重点区 1:1 万地质灾害风险评价

重点区黄溪口镇集镇区地质灾害主要沿公路和居民场址两侧边坡发育,岩土体多为残坡积土或具有优势结构面的碎裂岩体,与研究区地质环境条件具有共性。对于不同斜坡,重点区内变形迹象、防护工程、排水措施等差异较大。因此,依据黄溪口镇地区的工程地质环境条件,对其约 1 km<sup>2</sup> 的集镇区,采用层次分析法确定各斜坡单元的地质灾害风险评价等级。设计地质灾害风险评价等级系统,首先划分斜坡评价单元,将各个斜坡单元的地质灾害风险评价认作一个多目标决策系统,其次把风险分解为若干个递进层次的多个指标或准则,将风险评价归结为低层指标相对于高层指标的重要权值的

计算,然后通过定性指标定量化算出各层次指标权重和总权重,作为地质灾害风险决策的系统方法。

3.1 评价指标选取

基于对 1:1 万重点区野外调查数据的统计规律,确定重点区的地质灾害风险评价由 3 个层次的评级体系进行。第一层次为准则体系,认为重点区

地质灾害的风险由其危险性和危害后果确定;第二层次为指标体系,由发生地质灾害的可能性、灾害强度、承灾体类型和数量、易损性构成,总计 17 个评价指标;第三层次为因子指标体系,对 17 个评价指标细分为 30 个评价因子,构成了 1:1 万重点区地质灾害风险评价指标体系(图 4,图 5)。

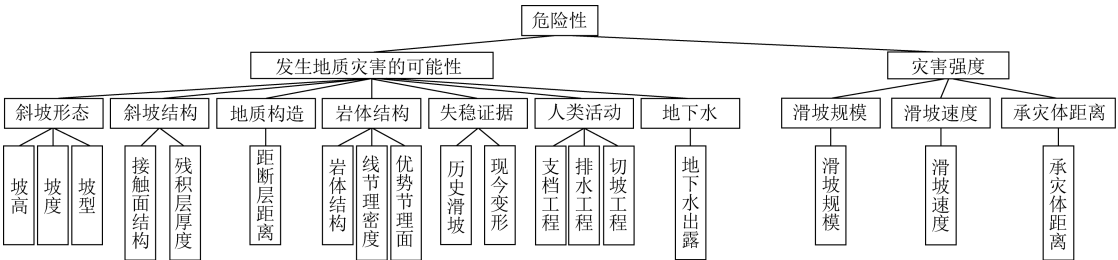


图 4 重点区地质灾害危险性评价递阶层次模型

Fig.4 Hierarchical structure model for geological hazard dangerousness assessment in the key study area

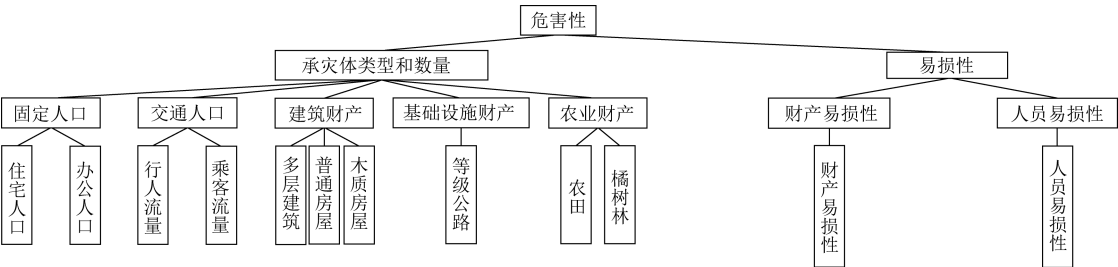


图 5 重点区地质灾害危害性评价递阶层次模型

Fig.5 Hierarchical structure model for geological hazard perniciousness assessment in the key study area

3.2 评价指标计算

权重分析是由上而下进行的,以危险性评价指标计算为例:①采用层次分析构建判断矩阵模型(表 2,表 3),标度表示因素之间的强弱;②对第二层和第三层因子通过方根法求解特征向量,求得各指标和因子权重为  $B_i$  和  $C_i$ ;③判断矩阵一致性检验,以岩体结构指标矩阵为例,求得最大特征根为 3.09,一致性指标为 0.046 7,平均随机一

表 3 判断矩阵  $P_4(B_4 \rightarrow C_{7-8})$  及权重值  
Tab.3 Discriminant matrix  $P_4(B_4 \rightarrow C_{7-8})$  and weights values

| $B_4$ | $C_7$ | $C_8$ | $C_9$ | $C_i$   |
|-------|-------|-------|-------|---------|
| $C_7$ | 1     | 3     | 1/2   | 0.326 2 |
| $C_8$ | 1/3   | 1     | 1/5   | 0.149 8 |
| $C_9$ | 2     | 5     | 1     | 0.524 1 |

注:  $B_4$  为滑坡危险性评价二级指标中的岩体结构评价指标,  $C_7$ 、 $C_8$ 、 $C_9$  为  $B_4$  的三级评价因子,分别为岩体结构、线节理密度和优势节理面评价指标,  $C_i$  为其获得的权重分值。

表 2 判断矩阵  $P_1(A \rightarrow B_{1-8})$  及权重值  
Tab.2 Discriminant matrix  $P_1(A \rightarrow B_{1-8})$  and weight values

| $A$   | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ | $B_5$ | $B_6$ | $B_7$ | $B_8$ | $B_i$   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| $B_1$ | 1     | 2     | 3     | 1     | 1/2   | 1/2   | 4     | 1/2   | 0.122 5 |
| $B_2$ | 1/2   | 1     | 3     | 1/2   | 1/3   | 1/3   | 3     | 1/2   | 0.082 3 |
| $B_3$ | 1/3   | 1/3   | 1     | 1/3   | 1/4   | 1/4   | 2     | 1/2   | 0.050 0 |
| $B_4$ | 1     | 2     | 3     | 1     | 1/2   | 1/2   | 4     | 1/2   | 0.122 5 |
| $B_5$ | 2     | 3     | 4     | 2     | 1     | 2     | 5     | 1/2   | 0.211 8 |
| $B_6$ | 2     | 3     | 4     | 2     | 1/2   | 1     | 5     | 1/2   | 0.178 1 |
| $B_7$ | 1/4   | 1/3   | 1/2   | 1/4   | 1/5   | 1/5   | 1     | 1/2   | 0.037 0 |
| $B_8$ | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 1     | 0.195 8 |

注:  $A$  为滑坡危害性,其评价结果由危险性二级评价指标  $B$  综合计算获得,其中  $B_1 - B_8$  分别为斜坡形态、斜坡结构、地质构造、岩体结构、失稳证据、人类活动、地下水、灾害强度评价指标,  $B_i$  为其对应应获得的权重分值。

致性指标为 0.58,一致性比例为 0.08,小于 0.1,一致性良好,检验通过。对所有判断矩阵做一致性检验,结果显示其一致性比例均小于 0.08,表明重点区风险评价指标判断矩阵一致性良好;④建立评价模型,采用  $A_i = B_i \times C_i$  即可计算获得危险性评价指标权重,  $A_i$  为 (0.078、0.013、0.032、0.055、0.027、0.05、0.04、0.018、0.064、0.071、0.141、0.093、0.058、0.032、0.037、0.065、0.065、0.065)(表 4)。采用相同方法可获得危害性评价指标权重(表 5)。根据各级评价因子及其权重的计算结果,设计出重点区斜坡单元地质灾害危险性和危害性程度评分表。

| 表 4 重点区地质灾害危险性评分                                                                |                            |       |                |             |           |         |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------|----------------|-------------|-----------|---------|
| Tab.4 Rating scale of the geological hazard dangerousness in the key study area |                            |       |                |             |           |         |
| 准则                                                                              | 评价指标                       | 权重    | 评分标准           |             |           |         |
|                                                                                 |                            |       | 10 分           | 7 分         | 4 分       | 1 分     |
| 斜坡形态                                                                            | 坡度/(°)                     | 0.078 | >60°           | (40°,60°]   | (25°,40°] | ≤25°    |
|                                                                                 | 坡高/m                       | 0.013 | >80            | (60,80]     | (40,60]   | ≤40     |
|                                                                                 | 坡型                         | 0.032 | 凸型             | 阶梯状         | 直线型       | 凹形      |
| 斜坡结构                                                                            | 接触面结构                      | 0.055 | 顺向坡倾角>坡脚       | 顺向坡倾角<坡脚    | 横向与土层状坡   | 逆向坡     |
|                                                                                 | 残积层厚度/m                    | 0.027 | >2             | (1.5,2]     | (1,1.5]   | <1      |
| 地质构造                                                                            | 距断层距离/m                    | 0.05  | (0,50]         | (50,100]    | (100,200] | ≥200    |
| 岩体结构                                                                            | 岩体结构                       | 0.04  | 散体状            | 碎裂状         | 层状        | 完整状     |
|                                                                                 | 线节理密度/(条·m <sup>-1</sup> ) | 0.018 | >4             | 3           | 2         | ≤1      |
|                                                                                 | 优势节理面                      | 0.064 | 楔形体            | 平面块体        | 反倾块体      | 无       |
| 失稳证据                                                                            | 历史滑坡                       | 0.071 | 经常发生           | 有发生         | 很少发生      | 无发生     |
|                                                                                 | 现今变形                       | 0.141 | 迹象明显           | 迹象较明显       | 迹象不明显     | 无迹象     |
| 人类活动                                                                            | 支挡工程                       | 0.093 | 无支挡            | 有支挡         | 支挡较好      | 支挡很好    |
|                                                                                 | 切坡工程/m                     | 0.058 | ≥10            | (5,10]      | (2,5]     | ≤2      |
|                                                                                 | 排水工程                       | 0.032 | 无排水            | 有排水         | 排水较好      | 排水很好    |
| 地下水                                                                             | 地下水出露                      | 0.037 | 有地下水流、井出现      | 有岩体裂隙渗流     | 岩土体潮湿     | 无地下水    |
| 滑坡规模                                                                            | 滑坡规模/m <sup>3</sup>        | 0.065 | (1 000,10 000] | (500,1 000] | (100,500] | ≤100    |
| 滑坡速度                                                                            | 滑坡速度                       | 0.065 | 极快             | 快速          | 中速        | 慢速      |
| 承灾体距离                                                                           | 承灾体距离/m                    | 0.065 | 斜坡内            | (0,10]      | (10,20]   | (20,50] |

| 表 5 重点区地质灾害危害性评分                                                                 |                                |       |                   |                  |                  |                |              |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------|-------------------|------------------|------------------|----------------|--------------|
| Tab.5 Rating scale of the geological hazard perniciousness in the key study area |                                |       |                   |                  |                  |                |              |
| 准则                                                                               | 评价指标                           | 权重    | 评分标准              |                  |                  |                |              |
|                                                                                  |                                |       | 10 分              | 8 分              | 5 分              | 3 分            | 1 分          |
| 固定人口                                                                             | 住宅人口/人                         | 0.177 | >100              | [ 51 ,100 ]      | [ 11 ,50 ]       | [ 6 ,10 ]      | [ 1 ,5 ]     |
|                                                                                  | 办公人口/人                         | 0.089 | >200              | [ 101 ,200 ]     | [ 51 ,100 ]      | [ 11 ,50 ]     | [ 1 ,10 ]    |
| 交通人口                                                                             | 行人流量/( 人 · min <sup>-1</sup> ) | 0.106 | >15               | ( 10 ,15 ]       | ( 5 ,10 ]        | ( 1 ,5 ]       | ≤1           |
|                                                                                  | 乘客流量/( 辆 · min <sup>-1</sup> ) | 0.106 | >15               | ( 10 ,15 ]       | ( 5 ,10 ]        | [ 2 ,5 ]       | ≤1           |
| 建筑财产                                                                             | 多层建筑/栋                         | 0.062 | 5                 | 4                | 3                | 2              | 1            |
|                                                                                  | 普通房屋                           | 0.038 | 5                 | 4                | 3                | 2              | 1            |
|                                                                                  | 木质房屋                           | 0.018 | 5                 | 4                | 3                | 2              | 1            |
| 基础设施财产                                                                           | 等级公路/m                         | 0.059 | >100              | ( 50 ,100 ]      | ( 20 ,50 ]       | ( 10 ,20 ]     | ≤10          |
| 农业财产                                                                             | 农田/m <sup>2</sup>              | 0.013 | ( 5 000 ,10 000 ] | ( 2 500 ,5 000 ] | ( 1 000 ,2 500 ] | ( 100 ,1 000 ] | ≤100         |
|                                                                                  | 橘树林/2                          | 0.026 | ( 5 000 ,10 000 ] | ( 2 500 ,5 000 ] | ( 1 000 ,2 500 ] | ( 100 ,1 000 ] | ≤100         |
| 人员易损性                                                                            | 人员易损性                          | 0.205 | ( 0.8 ,1 ]        | ( 0.6 ,0.8 ]     | ( 0.4 ,0.6 ]     | ( 0.2 ,0.4 ]   | ( 0.0 ,0.2 ] |
| 财产易损性                                                                            | 财产易损性                          | 0.103 | ( 0.8 ,1 ]        | ( 0.6 ,0.8 ]     | ( 0.4 ,0.6 ]     | ( 0.2 ,0.4 ]   | ( 0.0 ,0.2 ] |

3.3 斜坡评价单元划分

利用 1:5 000 地形测绘数据以及航拍 DOM 影像,在 ArcGIS 软件中采用水文学方法与人工干涉的方法划分斜坡单元,共计划分黄溪口镇区斜坡单元 161 处。依据精细化调查结果对 161 处斜坡单元地质灾害危险性及危害性进行打分和统计。在斜坡单元危险性评价中,如果斜坡单元未涉及相关因子,如残坡积土质斜坡中未涉及岩体结构指标,则相应该项为 0 分,表明该斜坡无潜在岩质斜坡的破坏可能性,就该项而言斜坡单元危险性较小。在危害性的打分中,如果未涉及到威胁对

象或指标体系则按照 0 分赋值,如固定人口、交通人口、建筑财产、基础设施财产等,表明此处斜坡单元即使发生地质灾害,产生的损失和存在的风险也较小。在指标体系的评价方法中,各斜坡按照指标相对应的等级打分即可,最终所呈现的结果是针对重点区内风险的“相对”高低,并不是“绝对”的高低。

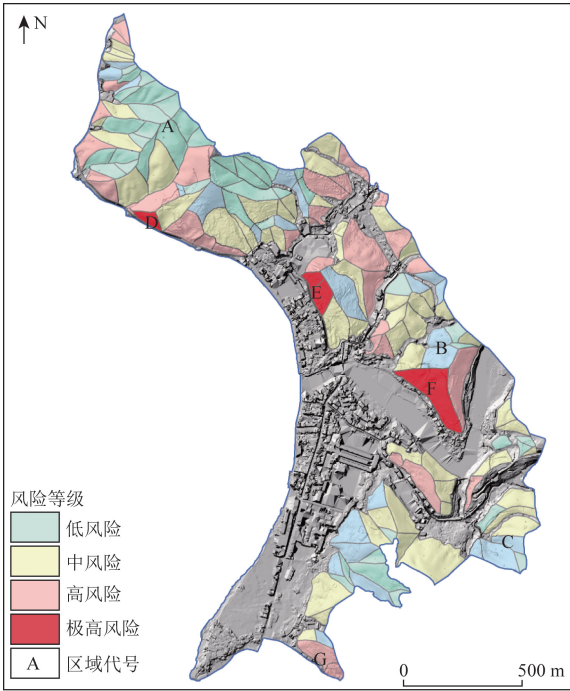
3.4 评价过程及结果

基于斜坡单元和层次分析法的评价结果表明,最终 161 处斜坡单元其危险性得分为 2.77~7.86,危害性得分为 0.31~5.09,采用等分划分标准将危

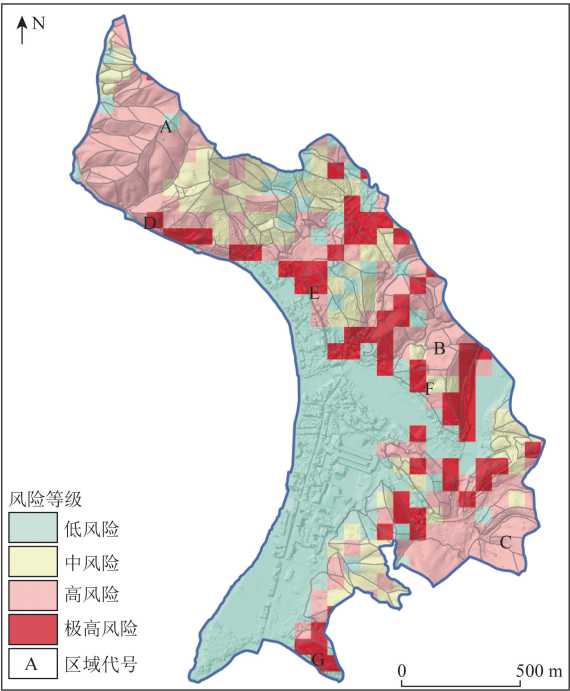
险性和危害性分别划分为极高、高、中、低 4 级。采用矩阵综合危险性和危害性结果判别斜坡单元的风险级别,分为低(L)、中(M)、高(H)和极高(VH)风险(表 6)。评价结果显示重点区极高风险斜坡 4 个、高风险斜坡 24 个、中风险斜坡 49 个、低风险斜坡 84 个(图 6(a))。

表 6 风险分级矩阵判定表  
Tab. 6 Decision table of risk grading matrix

| 危害性  | 危险性 |     |     |      |
|------|-----|-----|-----|------|
|      | 低危险 | 中危险 | 高危险 | 极高危险 |
| 低危害  | L   | L   | M   | H    |
| 中危害  | L   | M   | H   | H    |
| 高危害  | M   | M   | H   | VH   |
| 极高危害 | M   | H   | VH  | VH   |



(a) 基于 1:1 万斜坡单元和层次分析法的评价结果



(b) 基于 1:5 万栅格单元和信息量法的评价结果

图 6 重点区多尺度下评价结果差异对比

Fig. 6 Comparison of differences in the evaluation results under different scales in the key study area

4 不同比例尺度下评价方法和结果

在 1:5 万研究区地质灾害风险评价中,有 108 处地质灾害样本,适用于基于数理统计的信息量模型评价。重点区由于只有 5 处地质灾害点,样本数量较少,不宜采用统计模型。层次分析法将定性指标量化并在地质灾害风险评价中广泛应用,故选用该方法对重点区 1:1 万尺度进行评价。

研究区 1:5 万评价尺度采用 25 m × 25 m 栅格单元作为评价单元,对评价结果进行区划,可服务于区域性土地利用规划和防治规划制定。重点区采用斜坡作为评价单元,评价结果以斜坡为载体,对重点区城镇规划、居民建房选址以及边坡管理等更加具有针对性意义图 6(b)。

对比两种方法的评价结果可以看出(图 6),在

重点区的斜坡地段,采用 1:5 万栅格单元的评价的风险结果整体要高于采用斜坡单元的评价结果,特别是在 A、B、C 这些地质灾害点分布较少的区域内,斜坡单元评价结果为低风险区,而栅格单元评价为高风险区,这与 1:5 万评价尺度采用的数据源和基于密度分级的易损性评价方法有关。在 1:5 万尺度下会将如重点区这样的密集城镇划分为较大区域的高易损区,导致该区域内风险评价级别整体偏高。对比之下 1:1 万重点区调查显示该区域以林地为主,为无人居住和同行的区域,即使发生地质灾害,灾害产生的经济损失和人员伤亡也比较小。再比如,D 区斜坡单元整体显示为极高风险区域,野外调查显示该区域为地质结构相似的公路边坡,为通往黄溪口集镇的主要交通通道,并且以往发生过多起危岩崩塌情况,评价结果较为准确,而采用栅格单元评价的结果中显示局部为极高风险

或高风险,割裂了斜坡的整体性。基于栅格单元的1:5万比例尺度评价结果和基于斜坡单元的重点区1:1万比例尺度评价结果尽管在部分地段不尽相同,但在重点区以南西坡向为主的顺向斜坡中(图中D、E、F、G位置),两种评价结果均显示其处于高风险和极高风险级别中,评价结果同样也具有一定的一致性。结果对比显示,在重点集镇研究区采用基于1:1万调查尺度的层次分析指标体系地质灾害风险评价结果,要较基于1:5万区域调查的信息量法地质灾害风险评价结果,更为精准和符合实际情况。

5 结论

(1)研究区1:5万比例尺度下,地质灾害低、中、高和极高风险区分别占全区总面积的32.0%、24.6%、38.0%和5.4%。其中:低风险区主要分布在沅江两岸、黄溪口镇至后塘乡断陷盆地和山间盆地,以及研究区西北部碳酸盐岩地质灾害低易发区;中风险区和高风险区主要分布在研究区东侧元古界变质岩区,岩体强度较低,风化作用强烈,地质构造发育密集,容易发生地质灾害;极高风险区主要分布于研究区东部山谷间居民聚集点及周边交通沿线。除重点研究区外,其余乡镇城区多位于宽缓的山间盆谷低风险区。

(2)重点区1:1万比例尺度下,低风险斜坡84个、中风险斜坡49个、高风险斜坡24个、极高风险斜坡4个。重点区地质灾害风险评价以斜坡为评价单元,采用详细的分级评分系统,评价结果更符合实际情况,对城镇规划、居民建房选址以及边坡管理等更具可用性。

(3)应当依据调查的精度和研究的程度选用适当的评价方法对不同区域开展不同层次的地质灾害风险评价。在中小比例尺度下,基于调查数据,采用如信息量法等数理模型开展区域性地质灾害风险评价,模型简单,建模效率高,适合区域性推广。对于广大重点集镇,基于大比例尺度的斜坡单元调查,建立如层次分析多指标评分分级评价模型,评价指标详细易懂,适用于边坡管理和斜坡风险动态更新。

参考文献(References):

[1] 王洪磊,潘书华,林高聪,等.雪峰山区北部地质灾害调查二

级项目成果报告[R].中国地质调查水文地质环境地质调查中心,2019.

Wang H L, Pan S H, Lin G C, et al. The Report of the Second - level Project of Geological Disaster Investigation in the Northern Mountain Xuefeng Area[R]. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geology Survey, 2019.

[2] 湖南省自然资源厅.湖南省“十四五”地质灾害防治规划(2021—2025年)[EB/OL].(2021-04-25)[2023-01-31].[http://www.hunan.gov.cn/topic/hnsswgh/ghwj/202108/t20210812\\_20317217.html](http://www.hunan.gov.cn/topic/hnsswgh/ghwj/202108/t20210812_20317217.html).

Hunan Provincial Natural Resources Department. Geological disaster prevention and control plan of Hunan Province during the 14th five - year plan period (2021—2025) [EB/OL]. (2021 - 04 - 25) [2023 - 01 - 31]. [http://www.hunan.gov.cn/topic/hnsswgh/ghwj/202108/t20210812\\_20317217.html](http://www.hunan.gov.cn/topic/hnsswgh/ghwj/202108/t20210812_20317217.html).

[3] 孔锋.透视大尺度综合自然灾害风险评估的主要进展和展望[J].灾害学,2020,35(2):148-153.

Kong F. Perspective on the main progress and prospect of large - scale integrated natural disaster risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35 (2) : 148 - 153.

[4] 郝爱兵,石菊松,乐琪浪,等.坚持示范引领定位 从地质灾害调查走向灾害地质调查[J].水文地质工程地质,2017,44(6):3.

Hao A B, Shi J S, Le Q L, et al. Adhere to the demonstration and leadership positioning to transition from geological disaster survey to disaster geological survey [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44 (6) : 3.

[5] 李春燕,孟晖,张若琳,等.基于承灾体易损性的县域单元地质灾害风险评估[J].地质通报,2021,40(9):1547-1559.

Li C Y, Meng H, Zhang R L, et al. Geological hazard risk assessment based on vulnerability of disaster - bearing body at county unite scale [J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40 (9) : 1547 - 1559.

[6] 孟晖,李春燕,张若琳,等.京津冀地区县域单元地质灾害风险评估[J].地理科学进展,2017,36(3):327-334.

Meng H, Li C Y, Zhang R L, et al. Risk assessment of geological hazards for counties and districts of the Beijing - Tianjin - Hebei region [J]. Progress in Geography, 2017, 36 (3) : 327 - 334.

[7] 张群,易靖松,张勇,等.西南山区县域单元的地质灾害风险评价——以怒江流域泸水市为例[J].自然灾害学报,2022,31(5):212-221.

Zhang Q, Yi J S, Zhang Y, et al. Geohazard risk assessment about county units in southwest mountainous areas of China: Take Lushui County of Nujiang river basin as an example [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31 (5) : 212 - 221.

[8] 舒和平,刘东飞,顾春杰,等.中小尺度区域泥石流灾害风险评价[J].山地学报,2014,32(6):754-760.

Shu H P, Liu D F, Gu C J, et al. Risk assessment of medium and small - scale regional debris flow [J]. Mountain Research, 2014, 32 (6) : 754 - 760.

[9] 张以晨,郎秋玲,陈亚南,等.基于自然灾害风险评价框架的

- 省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 104–110.
- Zhang Y C, Lang Q L, Chen Y N, et al. Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: A case study of Jilin Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 104–110.
- [10] 杨柳, 牟鑫亮, 李晨, 等. 延安市宝塔区地质灾害风险评价[J]. 山地学报, 2020, 38(5): 679–690.
- Yang L, Mu X L, Li C, et al. Risk assessment of geological hazards in Baota District, Yan'an City, Shanxi, China[J]. Mountain Research, 2020, 38(5): 679–690.
- [11] 林高聪, 潘书华, 叶振南. 基于 Newmark 法的设定地震滑坡危险性评估[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(3): 525–532.
- Lin G C, Pan S H, Ye Z N. Assessment of landslide risk based on Newmark and preset earthquake[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(3): 525–532.
- [12] 高波, 王晓勇. 基于 SINMAP 模型的延安市滑坡危险性区划[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 211–216.
- Gao B, Wang X Y. Risk Zoning of landslide based on SINMAP model in Yan'an City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 211–216.
- [13] He J Y, Qiu H J, Qu F H, et al. Prediction of spatiotemporal stability and rainfall threshold of shallow landslides using the TRI-GRS and Scoops3D models[J]. CATENA, 2021(197): 104999.
- [14] 方然可, 刘艳辉, 苏永超, 等. 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 181–187.
- Fang R K, Liu Y H, Su Y C, et al. A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 181–187.
- [15] 李冠宇, 李鹏, 郭敏, 等. 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, 2021, 21(25): 10629–10638.
- Li G Y, Li P, Guo M, et al. Application of cluster analysis method in geological hazard risk assessment: A case study of Hancheng City[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10629–10638.
- [16] 罗鸿东, 李瑞冬, 张勃, 等. 基于信息量法的地质灾害气象风险预警模型: 以甘肃省陇南地区为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 289–297.
- Luo R D, Li R D, Zhang B, et al. An early warning model system for predicting meteorological risk associated with geological disasters in the Longnan area, Gansu Province based on the information value method[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 289–297.
- [17] 胡现振, 付少杰, 迟宏庆, 等. 基于层次分析-信息量耦合模型的地质灾害风险评价——以河北省武安市为例[J]. 中国地质调查, 2023, 10(5): 109–117.
- Hu X Z, Fu S J, Chi H Q, et al. Geological hazard risk assessment based on AHP – information coupling model: A case study of Wu'an City in Hebei Province[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(5): 109–117.
- [18] 陈风光, 姚海林, 史卫国. 模糊综合评价法在堰塞湖风险评估中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(S1): 67–70, 75.
- Chen F G, Yao H L, Shi W G. Application of fuzzy and synthetic judgment to risk assessment of dammed lake[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(S1): 67–70, 75.
- [19] 巩书华, 李少青, 王焕银, 等. 湖南张家界市永定区地质灾害发育规律及易发性评价研究[J]. 中国地质调查, 2023, 10(6): 101–110.
- Gong S H, Li S Q, Wang H Y, et al. Research on the development law and susceptibility evaluation of geological disasters in Yongding District of Zhangjiajie City in Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(6): 101–110.
- [20] 周超, 殷坤龙, 曹颖, 等. 基于集成学习与径向神经网络耦合模型的三峡库区滑坡易发性评价[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1865–1876.
- Zhou C, Yin K L, Cao Y, et al. Landslide susceptibility assessment by applying the coupling method of radial basis neural network and adaboost: A case study from the Three Gorges reservoir area[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 1865–1876.
- [21] 刘纪平, 梁恩婕, 徐胜华, 等. 顾及样本优化选择的多核支持向量机滑坡灾害易发性分析评价[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2034–2045.
- Liu J P, Liang E J, Xu S H, et al. Multi – kernel support vector machine considering sample optimization selection for analysis and evaluation of landslide disaster susceptibility[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2034–2045.
- [22] 张钟远, 邓明国, 徐世光, 等. 镇康县滑坡易发性评价模型对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 157–171.
- Zhang Z Y, Deng M G, Xu S G, et al. Comparison of landslide susceptibility assessment models in Zhenkang County, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 157–171.
- [23] 刘玥, 申玉松, 李旭, 等. 基于不同耦合模型的区域地质灾害易发性评价——以河南商城县为例[J]. 中国地质调查, 2024, 11(1): 83–92.
- Liu Y, Shen Y S, Li X, et al. Evaluation of regional geological disaster susceptibility based on different coupling models: A case study of Shangcheng County of Henan Province[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(1): 83–92.
- [24] 高玉欣, 刘德成, 高雪媛. 区县地质灾害风险评价中易损性评价研究[J]. 环境生态学, 2021, 3(5): 49–54.
- Gao Y X, Liu D C, Gao X Y. Study on vulnerability assessment of geological hazard risk assessment in districts and counties[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(5): 49–54.
- [25] 李金香, 温和平, 张治广, 等. 三维影像技术在承灾体基础数据调查中的应用——以吐鲁番市主城区为例[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(2): 424–438.
- Li J X, Wen H P, Zhang Z G, et al. Application of 3D imaging technique in basic data investigation of disaster bearing body: A

- case study of Turpan City, Xinjiang Uygur autonomous region[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(2): 424–438.
- [26] 刘光旭, 席建超, 戴尔阜, 等. 中国滑坡灾害承灾体损失风险定量评估[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 39–46.
- Liu G X, Xi J C, Dai E F, et al. Loss risk assessment of the hazard-affected body of landslides in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(2): 39–46.
- [27] 武中鹏, 刘宏, 董秀群, 等. 单体危岩崩塌灾害危险性评价——以贵州威宁县新发乡樊家岩为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 30–34.
- Wu Z P, Liu H, Dong X Q, et al. Hazard assessment of rockfall disaster of a dangerous rock: A case study at Fanjiayan, Xinfu Township, Weining County of Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 30–34.
- [28] 覃乙根, 杨根兰, 鲁鲲鹏, 等. 贵州寨子危岩崩塌风险定量评价研究[J]. 人民长江, 2019, 50(10): 113–119.
- Qin Y G, Yang G L, Lu K P, et al. Quantitative risk assessment for Zhaizi rockfall in Guizhou Province[J]. Yangtze River, 2019, 50(10): 113–119.
- [29] 王高峰, 杨强, 陈宗良, 等. 白龙江流域甘家沟泥石流风险评价研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(4): 66–73, 65.
- Wang G F, Yang Q, Chen Z L, et al. Risk assessment of debris flow in the Ganjia Gully of the Bailongjiang Basin[J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(4): 66–73, 65.
- [30] 毕钰璋, 孙新坡, 何思明, 等. 滑坡受灾结构体易损性离散元分析[J]. 金属矿山, 2018(7): 167–174.
- Bi Y Z, Sun X P, He S M, et al. Analysis on vulnerability of the structure induced by landslide based on discrete element method[J]. Metal Mine, 2018(7): 167–174.
- [31] 陈旭丹, 孙新利, 程金星, 等. 单体滑坡灾害承灾体的有限元模拟与易损性评估[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(9): 69–75.
- Chen X D, Sun X L, Cheng J X, et al. Finite element simulation and vulnerability assessment for bearing body caused by single landslide[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(9): 69–75.
- [32] 陈鑫, 赵洲, 杨鹏. 基于颗粒流方法的滑坡灾变过程及冲击致灾预测研究[J]. 水力发电, 2020, 46(4): 35–40.
- Chen X, Zhao Z, Yang P. Simulation on landslide disaster process and impact disaster prediction based on PFC2D[J]. Water Power, 2020, 46(4): 35–40.

## Risk assessment of geological hazards under different plotting scales: A case study of Huangxikou Town in Hunan Province

LIN Gaocong<sup>1,2,3</sup>, LIU Huan<sup>4</sup>, WANG Honglei<sup>2,3</sup>, PAN Shuhua<sup>2,3</sup>

(1. School of Water Resource and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geological Survey, China Geological Survey, Hebei Baoding 071051, China; 3. Field Scientific Observation Base for Geological Disaster Monitoring and Early Warning in the Three Gorges Reservoir Area of the Ministry of Natural Resources, Chongqing 404100, China; 4. School of Insurance and Public Finance, Hebei Finance University, Hebei Baoding 071000, China)

**Abstract:** In order to explore the differences and applicability of geological disaster risk assessment models and methods under different plotting scales, the authors took Huangxikou Town in Hunan Province as the study area and selected 8 evaluation indicators, such as engineering geological petrofabric and slope structure, to assess the geological disaster risk under 1: 50,000 scale with grid unit using information model, on the basis of disaster geological survey map unit. The results show that the low, medium, high, and extremely high risk areas in the study region account for 32.0%, 24.6%, 38.0%, and 5.4% respectively of the total area. One hundred and sixty-one slope units were divided using hydrological methods and manual intervention methods, and 17 indicators and 30 factors under the categories of the possibility, intensity, category and quantity of disaster-bearing bodies and vulnerability of geological disasters, were selected to construct an analytic hierarchy process grading model. The 1:10,000 scale risk assessment of geological disasters with slope as the basic unit was carried out, and 84 low-risk slopes, 49 medium-risk slopes, 24 high-risk slopes, and 4 extremely high-risk slopes were identified within the key study area. Due to the influence of survey accuracy and evaluation methods, the assessment results of the two model methods for the same location are not entirely consistent. Therefore, it is advisable to select an appropriate evaluation method based on survey accuracy and research depth. For geological disaster risk assessments in areas under small and medium scales, the information quantity evaluation model based on quantitative calculations using mathematical statistics is recommended, with characteristics of simple, easy to promote, and ef-

ficient in modeling , making it suitable for regional promotion. For geological disaster risk assessments in key areas under large scales , the multi – indicator scoring and grading evaluation model on the basis of hierarchical analysis is recommended based on detailed slope unit survey results. These evaluation indicators are detailed and easy to understand , allowing for risk assessments of individual slope units , which is suitable for slope management and dynamic updates of slope risks. This study results could provide some references for the selection and application of geological disaster risk evaluation methods under different scales.

**Keywords:** geological hazards ; risk assessment ; information model ; analytic hierarchy process model ; different scales

( 责任编辑 : 刘丹 )