

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-14

冯凡, 唐亚明, 潘学树, 等. 不同尺度下地质灾害风险评价方法探讨——以陕西吴堡县为例——以陕西吴堡县为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 115-124.

FENG Fan, TANG Yaming, PAN Xueshu, *et al.* An attempt of risk assessment of geological hazards in different scales: A case study in Wubao County of Shaanxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 115-124.

# 不同尺度下地质灾害风险评价方法探讨

## ——以陕西吴堡县为例

冯 凡<sup>1</sup>, 唐亚明<sup>1</sup>, 潘学树<sup>2</sup>, 王小浩<sup>3</sup>, 赵宇宣<sup>1</sup>, 白 轩<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 2. 西安笛卡尔信息技术有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 陕西核工业工程勘察院有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 吴堡县地处陕北黄土高原东北部, 区内地质灾害发育, 严重威胁当地居民生命及财产安全。在充分分析吴堡县地质灾害调查数据的基础上, 针对全县域尺度选取坡度、坡向、地表曲率等评价指标, 采用信息量模型基于 GIS 平台按 25 m×25 m 栅格单元进行风险评价。评价结果划分为: 极高风险区、高风险区、中风险区、低风险区, 分别占全区面积的 0.63%、12.58%、24.40%、62.39%。针对重点区尺度, 选取坡度、坡高等因子, 采用层次分析模型基于 GIS 平台按水文法划分的斜坡单元开展风险评价, 其中极高风险斜坡 19 个、高风险斜坡 69 个、中风险斜坡 145 个、低风险斜坡 359 个。选取两种尺度下同一区域(A区), 对风险评价结果进行差异性分析。表明: 在不同的尺度下, 同一地理位置, 风险高低的评价结果可能不一致。在全县域尺度下宜采用各类具备预测功能的数理统计模型, 但是在更小的重点区尺度下, 由于用来训练的样本数量不够, 不宜采用数理统计模型。相应的, 县域尺度下可采用基于 GIS 工具划分的栅格单元作为评价单元; 重点区尺度下可采用实际的斜坡体作为评价单元。

**关键词:** 不同尺度; 地质灾害; 信息量模型; 层次分析模型; 风险评价

**中图分类号:** P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)02-0115-10

## An attempt of risk assessment of geological hazards in different scales: A case study in Wubao County of Shaanxi Province

FENG Fan<sup>1</sup>, TANG Yaming<sup>1</sup>, PAN Xueshu<sup>2</sup>, WANG Xiaohao<sup>3</sup>, ZHAO Yuxuan<sup>1</sup>, BAI Xuan<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geology Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2. Xi'an Descartes Information Technology Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Shaanxi Nuclear Industry Engineering Survey Institute Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** Wubao County is located in the northeastern part of the loess plateau in northern Shaanxi, geological disasters are developing in the area, which seriously threatens the life and property safety of local residents. On the basis of fully analyzing the geological disaster survey data in Wubao County, the evaluation indicators such as slope, slope aspect, and surface curvature were selected for the whole county scale, and the risk assessment was carried out based on the 25 m×25 m grid unit based on the information model based on the GIS platform. The evaluation results are divided into: extremely high risk area, high risk area, medium risk area and low risk area, accounting for 0.63%, 12.58%, 24.40% and 62.39% of the total area respectively.

收稿日期: 2022-02-27; 修订日期: 2022-03-10

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190642); 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF07-07-02)

第一作者: 冯 凡(1993-), 男, 四川广元人, 地质工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害机理及地质灾害风险评估工作。

E-mail: 384488166@qq.com

According to the scale of key areas, the factors of slope and slope height are selected, and the analytic hierarchy process model is used to carry out risk assessment of slope units divided by hydrological method based on GIS platform, including 19 extremely high-risk slopes, 69 high-risk slopes, 145 medium-risk slopes, 359 low-risk slopes. The same area (area A) under the two scales was selected to conduct variance analysis on the risk assessment results. It shows that at different scales and the same geographical location, the evaluation results of risk level may be inconsistent. At the county-wide scale, various mathematical statistical models with predictive functions should be used, but at the smaller key area scale, due to the insufficient number of samples used for training, it is not appropriate to use mathematical statistical models. Correspondingly, the grid unit based on GIS tools can be used as the evaluation unit at the county scale; the actual slope body can be used as the evaluation unit at the key area scale.

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

## 0 引言

陕北黄土高原,沟壑纵横、地质环境条件相对脆弱、地质灾害发育且分布广泛<sup>[1]</sup>,以崩塌、滑坡为主。地质灾害风险评价可为地方政府拟定地质灾害防治管理措施、实施国土空间规划和制定经济发展战略等提供基础依据,从而最大程度降低因灾伤亡和经济损失<sup>[2]</sup>。1982年联合国救灾组织(UN-DRO)将自然灾害风险定义为:“风险(Risk)=危险(Hazard)×暴露(Elements at risk)×易损性(Vulnerability)”<sup>[3]</sup>。1984年美国滑坡专家Varnes<sup>[4]</sup>提出地质灾害风险就是地质灾害发生后,因其破坏而产生不良后果的可能性,包括两个方面:一是地质灾害发生破坏的可能性,二是其产生的损失。国内关于该方面的研究起步稍晚,可以追溯到20世纪90年代,国土资源经济研究院主要致力于地质灾害易损性、风险评价、经济评价等方面的研究<sup>[5]</sup>。吴树仁等<sup>[6]</sup>的《滑坡风险评估理论与技术》逐步把国外的风险管理理论引入国内。唐亚明等<sup>[7]</sup>系统整理了国内外通用滑坡分类体系并提出了基于风险评价的黄土滑坡分类方法。孙冉等<sup>[8]</sup>使用层次分析法-信息量模型基于GIS平台对山东费县开展了地质灾害风险评价。李春燕等<sup>[9]</sup>探讨了以县域为单元易损性量化评价方法及其分级标准,在此基础上对全国2 869个县域单元进行了地质灾害风险评价。王嘉君等<sup>[10]</sup>以神龙架林区为研究区,基于GIS平台进行了多灾种风险耦合分析。李泽威等<sup>[11]</sup>对龙凤镇开展了地质灾害风险评价工作。唐亚明等<sup>[12]</sup>基于GIS平台,构建了三种数理统计模型对黄河中游石楼—吉县段崩塌、滑坡地质灾害进行了空间预测。杨柳等<sup>[13]</sup>基于GIS平台,结合SBAS-InSAR监测数据,构建了较为完善的、适用于延安地区的评价指标体系,并对其开展了地质灾害风险评价。邱维蓉等<sup>[14]</sup>利用混合高斯聚类、支持向量机等4种模型构建了滑坡易

发性评价分析模型。李冠宇等<sup>[15]</sup>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<sup>[16]</sup>和刘福臻等<sup>[17]</sup>将机器学习用于地质灾害风险评价的研究。

以往的研究成果大多基于GIS平台,采用数理统计模型、神经网络等来开展风险评价。研究区以大区域、小比例尺居多。针对更小的重点区尺度,由于用来训练的样本数量不够,数理模型等方法往往不适用。鉴于此,文中以吴堡县为例,针对全县域尺度和重点区尺度分别开展地质灾害风险评价,从而探讨不同尺度下评价模型、方法的差异,同时可为当地地质灾害预防和国土空间规划提供依据。

## 1 研究区概况

吴堡县地处陕西省榆林市东南部,面积约为420.85 km<sup>2</sup>。地势大致西高东低,向黄河河谷倾斜。区内地形破碎、沟壑纵横交错。吴堡县位于黄河东岸—吕梁山西坡南北向挠皱带以西,祁吕—贺兰山字型构造的伊陕盾地与新华夏系第三沉降带复合部位以东<sup>[18]</sup>,在吴堡县南部可见东西向地堑式断裂,影响较大的地方有柳壕沟、吴堡石城等地。区内河流大多由北向南或者由西向东汇入黄河。吴堡县受地质环境、地理位置、自然条件的限制,人口主要分布在公路沿线、沟谷两侧和斜坡地带,削坡筑窑、切坡修路等人类工程活动强烈。由于上述复杂的工程地质条件,致使全县地质灾害发育,对人民生命和财产安全威胁巨大。对全县开展地质灾害风险评价势在必行。其中县域南部为县城所在地,人口密集,加之近年来由于县城扩张,人类工程活动愈加强烈,该区受地质灾害威胁严重。文中将该区域作为重点区(图1)开展地质灾害风险评价,可以为该区的防灾减灾、国土空间规划等提供科学依据。

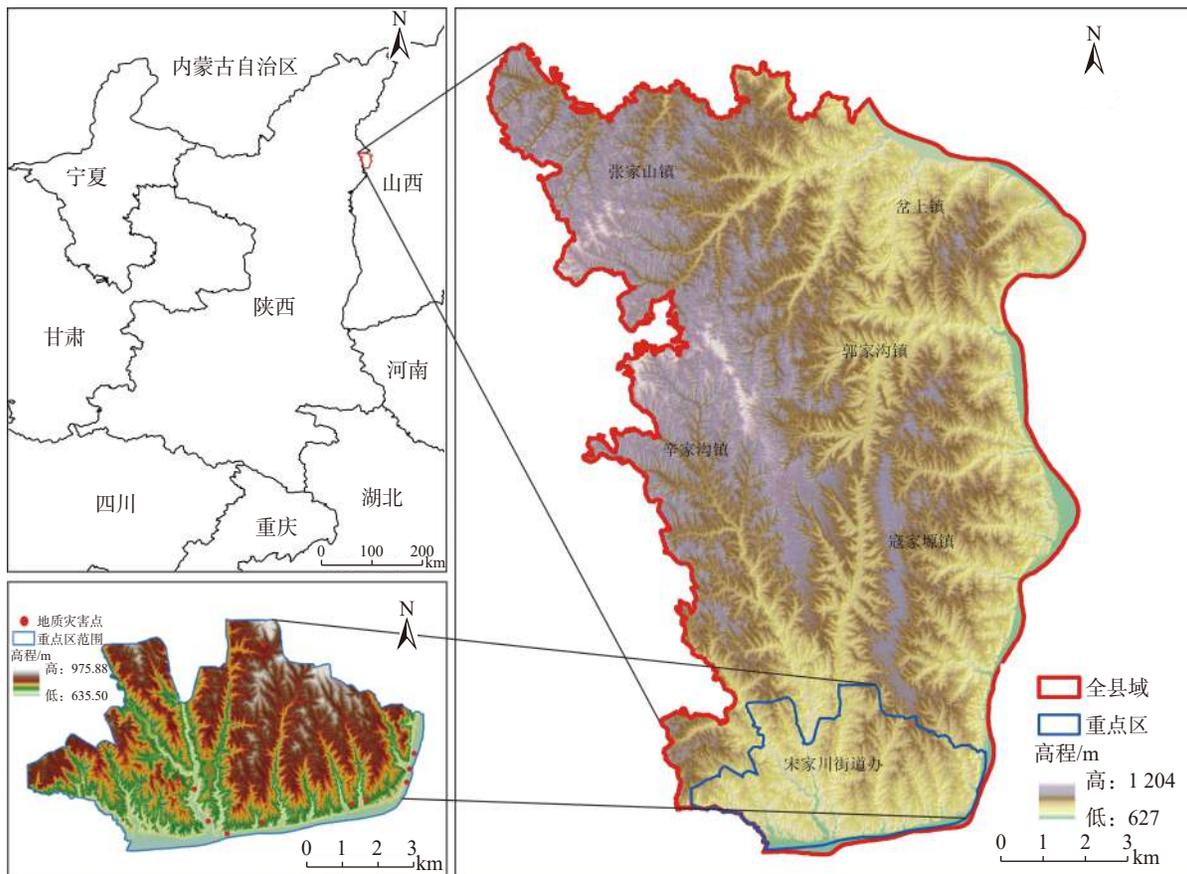


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

## 2 全县域评价

### 2.1 评价模型

针对全县域尺度下的地质灾害风险评价,文中选用信息量模型。信息量模型主要是通过分析已有地质灾害(崩塌、滑坡)的情况,把各影响因子的实测值转化为反映地质灾害发生的信息量值<sup>[19]</sup>。信息量越大,灾害发生可能性越大。美国滑坡灾害专家 Varnes<sup>[4]</sup>提出灾害风险概念普遍得到大众认可,即因地质灾害(崩塌、滑坡等)造成不好结果的可能性,包括地质灾害发生的可能性和其发生后导致的损失两个方面。

$$R = H \times \sum (E \times V)$$

式中:  $R$ ——风险,即一定时间段内某区域,由于某自然灾害而引起的居民生命财产和经济活动的期望损失值。

$H$ ——危险度,即一定时间段内某区域,由于某自然灾害而引起破坏产生不良后果的可能性。

$E$ ——暴露,即承灾体暴露在地质灾害面前的时空概率。

$V$ ——易损性,即地质灾害发生后,对其影响范围内承灾体可能遭受破坏的严重程度。

### 2.2 评价指标选择及依据

地质灾害的发生是斜坡自身本底因素与外部诱发因素共同作用的结果<sup>[13]</sup>。综合考虑当地地质灾害的形成机理、诱发条件、承灾体的基本特征等,确定坡度、坡向、地表曲率(坡型)、地貌、构造影响距、水系影响距、道路影响距、人员易损性、交通设施易损性等9个指标作为全县域地质灾害风险评价的指标。其中人员易损性用建筑物密度来表征。各指标详见图2。

### 2.3 评价指标权重确定

将选取的7类危险性评价因子分别与已调查的59处地质灾害点在GIS中做空间分析,得到地质灾害点在不同因子中不同分类下的分布情况,最后计算出各因子图层的各个类别对地质灾害影响的信息量值(表1)。

### 2.4 数据源及评价单元划分

基于吴堡县详细的地质灾害调查资料,建立吴堡县地质灾害编录数据库,从而对研究区内地质灾害进行编

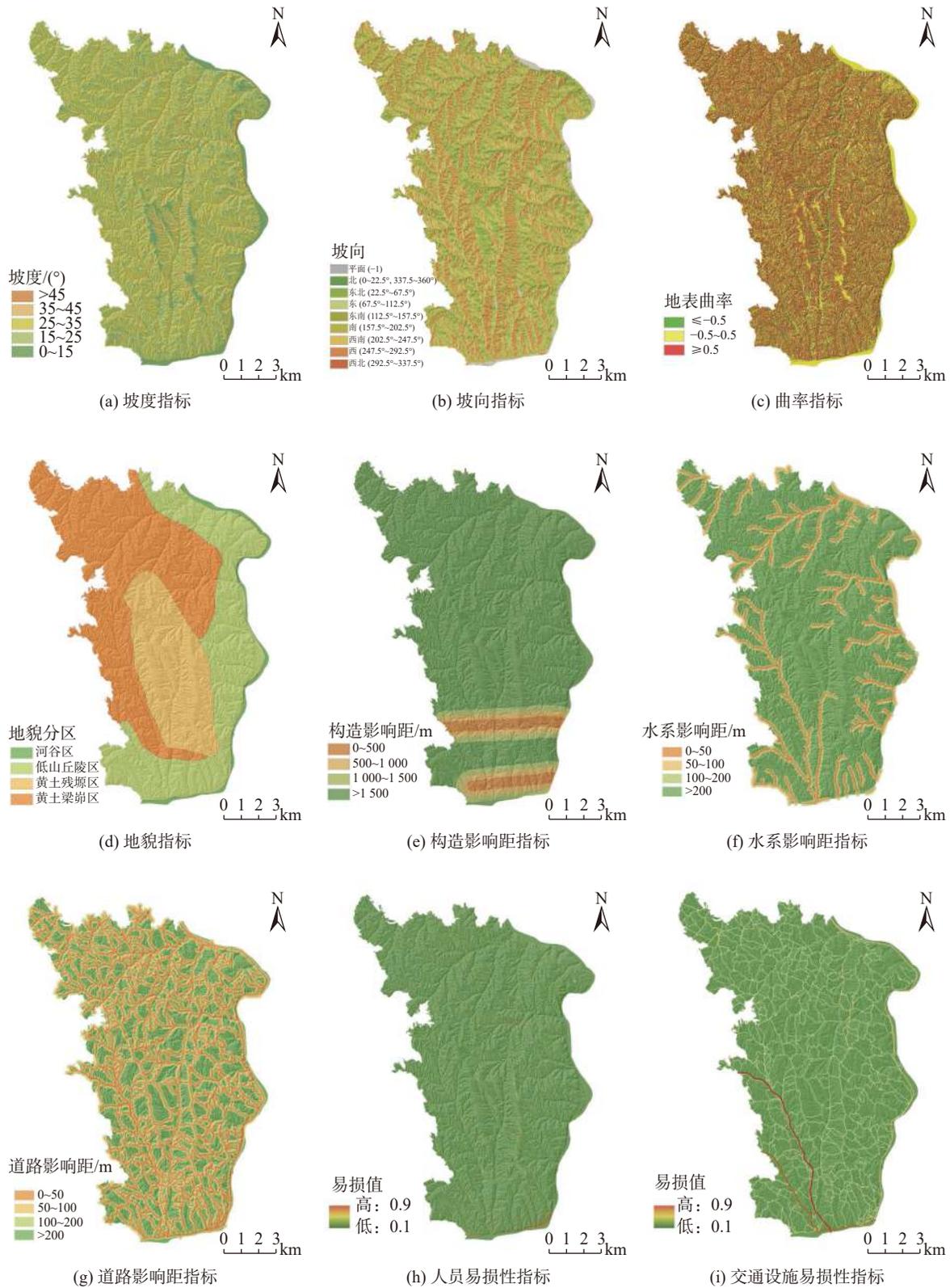


图 2 全县域尺度下地质灾害风险评价指标

Fig. 2 Geological hazard risk assessment indicators at the county scale

录与制图。将吴堡县按 25 m×25 m 划分为 670 962 个栅格单元,以便提取地质灾害定量评价指标。主要数据

来源包括:(1)吴堡县 1:5 万 DEM,用于提取坡度、坡向等基本信息;(2)吴堡县 1:5 万地形图,用于提取道

表 1 各因子图层分类情况及其对应的信息量值  
Table 1 Classification of each factor layer and its corresponding information value

指标	类别	信息量值	指标	类别	信息量值
坡度/(°)	0~15	-0.9270	地貌	河谷地貌	0.0035
	15~25	-0.2098		低山丘陵地貌	0.0277
	25~35	1.2051		黄土残源地貌	-1.6479
	35~45	1.7910		黄土梁崩地貌	1.6852
	>45	2.5331		0~500	0.7346
坡向	平面	1.3221	构造影响距/m	500~1000	0.5067
	N	0.2601		1000~1500	0.2643
	NE	-0.0998		>1500	-0.1185
	E	-0.4112	0~50	2.8334	
地表曲率	SE	0.1231	水系影响距/m	50~100	3.1000
	S	-0.1942		100~200	2.1943
	SW	-0.3190		>200	-0.8067
	NW	0.2133	0~50	2.1502	
	W	0.3204	50~100	1.9809	
道路影响距/m	≤-0.5	0.1242	100~200	1.0235	
	-0.5~0.5	0.0054	>200	-1.0120	
	≥0.5	-0.1718			

路、水系等基本信息; (3) 吴堡县 1:10 万地质图, 1:20 万构造纲要图, 用于提取地层、构造等信息; (4) 全区地质灾害点分布图, 用于确定地质灾害点分布状况。 (5) 高清影像数据, 用于提取建筑物轮廓等基本信息。

### 2.5 评价过程及结果

根据上述信息量值, 将危险性评价因子生成信息量图, 然后对其进行空间叠加分析, 生成地质灾害危险性指数图。将研究区人员易损性、交通设施易损性叠加, 得到地质灾害易损性指数图。随后将两者在 GIS 平台中进行空间分析, 将得到的结果运用自然断点法划分为 4 个级别: 极高风险区、高风险区、中风险区、低风险区, 分别占全区面积的 0.63%、12.58%、24.40%、62.39% (图 3)。

## 3 重点区评价

### 3.1 评价模型

层次分析法 (简称 AHP) 可把复杂问题按照主次关系分组, 从而形成有序的递阶层次结构, 利用数学方法确定所有元素的相对重要性值, 最后通过排序来确定每个因子的权重, 该方法将定性定量相结合, 可以将复杂问题简单化<sup>[20]</sup>。重点区评价选用层次分析法计算各指标权重。对于物理模型的选择, 重点区尺度下地质灾害风险评价仍然选择 Varnes<sup>[4]</sup> 提出的模型。

### 3.2 评价指标选择及依据

根据研究区地质灾害的形成机理、诱发条件, 结合

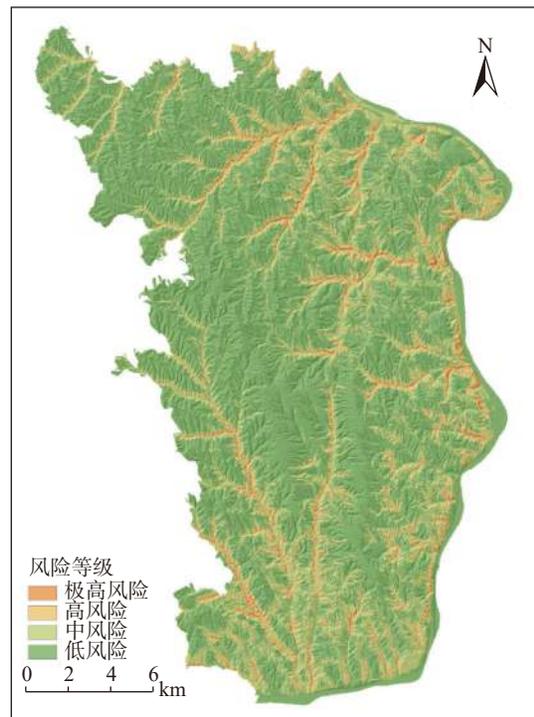


图 3 全县域尺度下地质灾害风险评价分区图

Fig. 3 Geological hazard risk assessment zoning map at the county scale

重点区特殊的地质环境、承灾体基本特征等选取坡度、坡高、地表曲率、工程地质岩组、构造影响距、道路影响距、人员易损性、交通设施易损性等 8 类指标构建重点区地质灾害风险评价体系。其中人员易损性大小用居民建筑物密度的高低来表征, 建筑物密集的区域往往人口多 (图 4)。

### 3.3 评价指标权重确定

采用层次分析模型建模, 文中主要按 5 个步骤进行: ①建立递阶层次结构模型; ②建立判断矩阵; ③计算权重向量; ④一致性检验; ⑤建立评价模型。

以地质灾害危险性分级为目标层, 以影响地质灾害危险性分级的内在因素和外在因素为评价的准则层, 再以建立的 6 个评价指标为方案层, 建立层次结构模型 (图 5)。

利用 1-9 标度法<sup>[21]</sup> (AHP 法) 表示因素之间的强弱, 逐项就每层中的因子对上一层目标的相对重要性进行两两判别, 然后构建判断矩阵。再计算出判断矩阵的最大特征根、对应的特征向量以及进行判断矩阵一致性检验。

根据上述的层次分析法确定 6 个评价指标的权重, 过程如下:

构建 A-B 判别矩阵表 (表 2)。

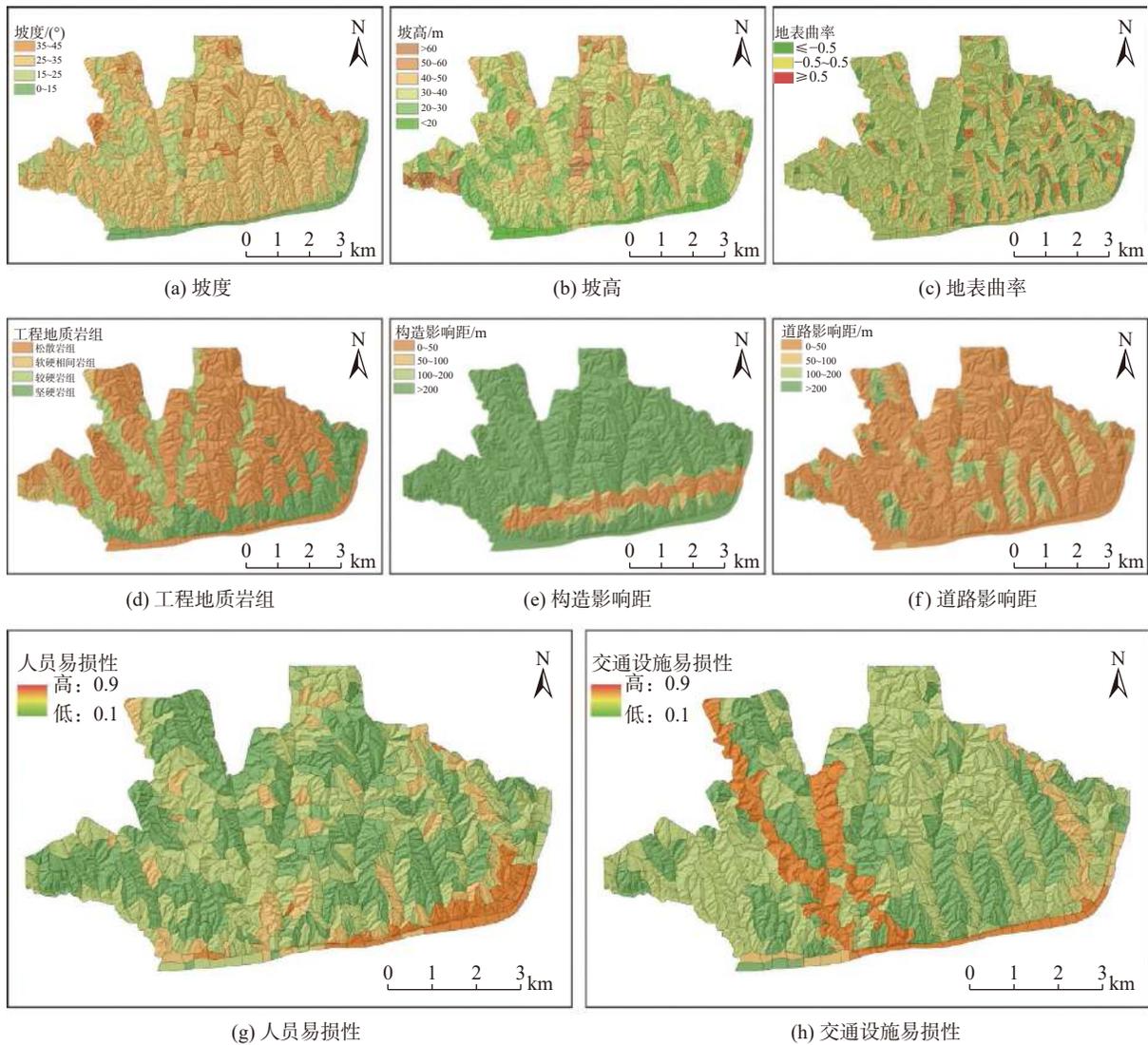


图 4 重点区尺度下地质灾害风险评价指标

Fig. 4 Risk assessment indicators of geological hazards at the scale of key areas

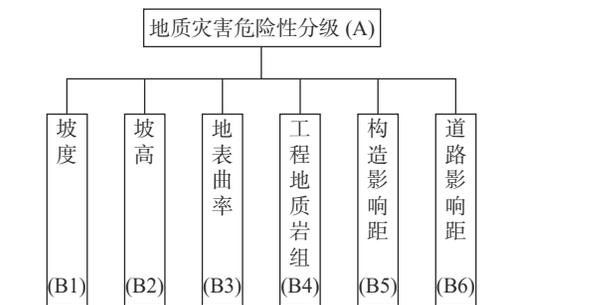


图 5 地质灾害危险性分区评价层次结构模型图

Fig. 5 Hierarchical structure model diagram of geological hazard risk zoning assessment

$\lambda_{\max}=6.29$ ,  $CR=0.047<0.1$ , 满足一致性检验, 上述特征向量  $W$  可以作为权向量。

根据层次分析法计算结果, 重点区尺度下地质灾害

表 2 A-B 判别矩阵

Table 2 A-B discriminant matrix							
A	B1	B2	B3	B4	B5	B6	$W_i$
B1	1	2	5	3	7	3	0.37
B2	1/2	1	3	3	5	3	0.26
B3	1/5	1/3	1	1/3	3	1/3	0.07
B4	1/3	1/3	3	1	3	1/2	0.12
B5	1/7	1/5	1/3	1/3	1	1/3	0.04
B6	1/3	1/3	3	2	3	1	0.14

危险性区划的 6 个指标(坡度、坡高、地表曲率、工程地质岩组、构造影响距、道路影响距)的权重  $W_A=(0.37, 0.26, 0.07, 0.12, 0.04, 0.14)$ 。从 6 个指标权重中可以看出, 坡度、坡高、道路影响距、工程地质岩组是影响地质灾害危险性分区的重要因素, 该结果与野外调查情况基本吻合。

依据上述 6 个二级评价指标权重的计算结果, 确定地质灾害危险程度量化评分表(表 3)。

表 3 地质灾害危险程度量化评分表

Table 3 Quantitative scoring table of geological disaster risk degree

指标	权重	类别	赋值	指标	权重	类别	赋值
坡度/(°)	0.37	0~15	0.2	工程地质岩组	0.12	松散岩组	0.8
		15~25	0.4			软硬相间岩组	0.6
		25~35	0.6			较硬岩组	0.4
		35~45	0.8			坚硬岩组	0.2
坡高/m	0.26	<20	0.3	构造影响距/m	0.04	0~50	0.8
		20~30	0.4			50~100	0.6
		30~40	0.5			100~200	0.4
		40~50	0.6			>200	0.2
		50~60	0.7			0~50	0.8
地表曲率	0.07	>60	0.8	道路影响距/m	0.14	50~100	0.6
		≤-0.5	0.3			100~200	0.4
		-0.5~0.5	0.5			>200	0.2
		≥0.5	0.7				

### 3.4 数据源及评价单元划分

基于重点区详细的地质灾害调查资料, 建立重点区地质灾害编录数据库, 从而对研究区内地质灾害进行编录与制图。将重点区按斜坡单元划分。斜坡单元采用汇水盆地与河网沟谷结合的方法进行剖分, 单元尺寸根据地形切割和地质灾害发育程度确定<sup>[22]</sup>。文中将重点区共划分为 602 个斜坡。主要数据来源包括: (1) 重点区 1:1 万 DEM, 用于提取坡度、坡高、曲率等基本信息; (2) 重点区 1:1 万地形图, 用于提取道路等基本信息; (3) 重点区地质图及构造纲要图, 用于提取工程地质岩组、构造信息。(4) 高清影像数据, 用于提取建筑物轮廓等基本信息。

### 3.5 评价过程及结果

将 6 类危险性评价指标在 GIS 平台叠加分析, 得到重点区危险性指数。将人员易损性和交通设施易损性在 GIS 平台叠加得到重点区易损性指数。将危险性指数和易损性指数在 GIS 平台作空间分析, 最后根据自然断点法实现重点区地质灾害风险分区。可分为: 低风险区、中风险区、高风险区、极高风险区。其中低风险斜坡 369 个, 中风险斜坡 145 个, 高风险斜坡 69 个, 极高风险斜坡 19 个(图 6)。

## 4 不同尺度下评价方法和结果讨论

在全县域尺度下, 地质灾害点共 59 处, 训练样本较多, 数理统计学模型适用, 文中选用信息量模型。重点

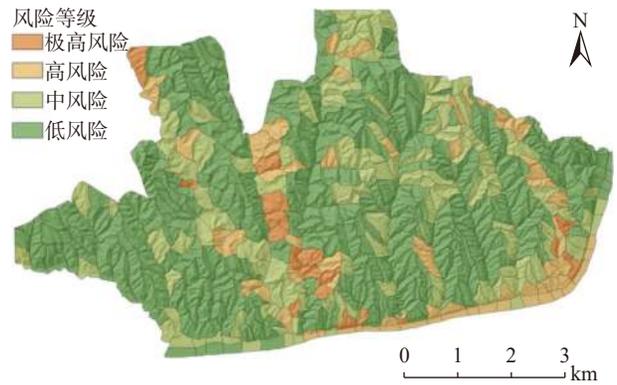


图 6 重点区尺度下地质灾害风险评价分区图

Fig. 6 Geological hazard risk assessment zoning map at the scale of key areas

区尺度下, 区内共有地质灾害点 11 处, 用作训练的样本不足, 不宜选用数理统计模型。层次分析模型将定性定量相结合, 在地质灾害评价中广泛使用, 故针对重点区尺度, 文中选择层次分析模型进行评价。

在全县域尺度下, 选取 25 m×25 m 栅格作为评价单元, 将全区共划分为 670 962 个评价单元。重点区尺度下, 按照斜坡单元划分, 斜坡单元采用汇水盆地与河网沟谷结合的方法进行剖分, 单元尺寸根据地形切割和地质灾害发育程度确定。将重点区共划分为 602 个斜坡。按斜坡单元划分更加符合实际情况, 且便于当地自然资源部门管理。

在全县域和重点区中选取相同的区域作为对比区(A区)。全县域尺度下, 评价单元为 25 m×25 m 栅格, 而重点区评价单元为斜坡单元。为了便于两者对比, 将全县域尺度下 A 区范围按重点区尺度下中 A 区中的斜坡范围进行叠加。故 A 区内共有斜坡 20 个(图 7)。县域尺度下某些高风险区, 如 A1、A2、A3 的左侧区域, 在重点区尺度下, A1、A2、A3 左侧均为低风险。而某些中低风险区, 如 A11、A17, 在重点区尺度下则为高风险区。全县域尺度下、重点区尺度下地质灾害风险评价结果不尽相同。

不同尺度下地质灾害风险评价结果出现差异的原因主要有以下几方面: (1) 评价单元大小不一致(全县域尺度下 25 m×25 m, 重点区尺度下按斜坡单元)导致坡度、地表曲率等不一致。某个斜坡范围, 如 A1, 在重点区尺度下只有一个整体坡度、地表曲率等, 而在县域尺度下, 该斜坡范围内包含多个栅格评价单元, 每个栅格单元都会有一个坡度、地表曲率等。会直接导致评价结果出现差异。(2) 全县域尺度下按栅格单元评价, 割裂了斜坡的整体性, 忽略了坡体内部之间的联系。

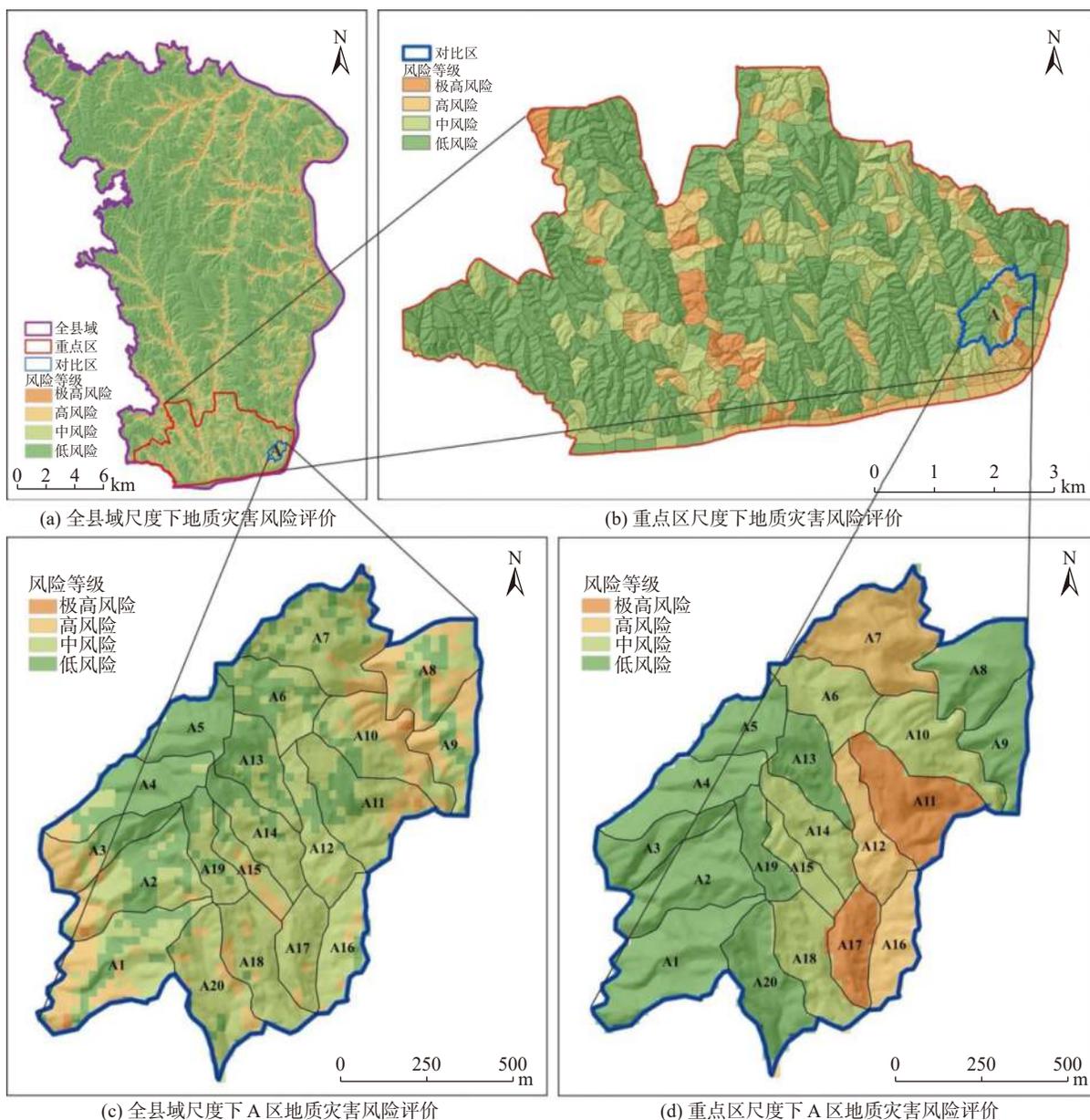


图 7 不同尺度下评价结果差异对比图

Fig. 7 Comparison of differences in evaluation results at different scales

### 5 结论

(1) 全县域尺度下, 地质灾害风险分区分为极高风险区、高风险区、中风险区、低风险区, 分别占全区面积的 0.63%、12.58%、24.40%、62.39%。其中极高风险区主要分布于部分公路沿线及沟谷中; 高风险区主要分布于县境南部、北部及东部局部地段; 中风险区分布面积较广, 在县境东北部、南部区域呈片状分布; 低风险区在全区普遍分布, 尤其是吴堡县中部(寇家塬镇、郭家沟镇)、西北部(辛家沟镇)。

(2) 重点区尺度下, 极高风险斜坡单元 19 个; 高风险斜坡单元 69 个; 中风险斜坡单元 145 个; 低风险斜坡

单元 359 个。该尺度下的地质灾害风险评价结果以水文法划分的斜坡为评价单元, 保留了斜坡的整体性, 评价结果更加符合实际情况, 可为当地相关部门拟定精细化的地质灾害防治管理措施、实施国土空间规划和制定经济发展战略等提供依据。

(3) 在全县域尺度下, 宜采用各类具备预测功能的统计学模型, 但是在更小的重点区尺度下, 由于用来训练的地质灾害点样本数量不够, 不宜采用统计学模型。相应的, 县域尺度下可采用基于 GIS 工具的栅格平均划分作为评价单元; 重点区尺度下可采用实际的斜坡体作为评价单元。

## 参考文献 (References) :

- [1] 滕宏泉, 范立民, 向茂西, 等. 陕北黄土梁峁沟壑区地质灾害与降雨关系浅析: 以陕北延安地区2013年强降雨引发地质灾害为例 [J]. *地下水*, 2016, 38(1): 155 - 157. [ TENG Hongquan, FAN Limin, XIANG Maoxi, et al. Analysis of the relationship between geological disasters and rainfall in the Liangmao gully area of northern Shaanxi—Taking geological disasters caused by heavy rainfall in Yan'an area of northern Shaanxi as an example [J]. *Ground Water*, 2016, 38(1): 155 - 157. (in Chinese with English abstract) ]
- [2] 陈慧敏, 杨尽, 向明顺, 等. 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*, 2021, 21(29): 12490 - 12499. [ CHEN Huimin, YANG Jin, XIANG Mingshun, et al. Geographic information system and weighted information value assessments of geologic hazards in Maoxian County, Sichuan [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12490 - 12499. (in Chinese with English abstract) ]
- [3] UNDRO. Natural disasters and vulnerability analysis [R]. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, 1982.
- [4] VARNES D J. Landslide hazard zonation: A review of principles and practice; UNESCO [R]. Paris: United Nations International, 1984.
- [5] 唐亚明, 张茂省, 李政国, 等. 国内外地质灾害风险管理对比及评述 [J]. *西北地质*, 2015, 48(2): 238 - 246. [ TANG Yaming, ZHANG Maosheng, LI Zhengguo, et al. Review and comparison on inland and overseas geo-hazards risk management [J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(2): 238 - 246. (in Chinese with English abstract) ]
- [6] 吴树仁, 石菊松, 王涛. 滑坡风险评估理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. [ WU Shuren, SHI Jusong, WANG Tao. Theory and technique of landslide risk assessment [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese) ]
- [7] 唐亚明, 冯卫, 毕银强, 等. 基于风险评价的黄土滑坡分类及特征 [J]. *地质通报*, 2015, 34(11): 2092 - 2099. [ TANG Yaming, FENG Wei, BI Yinqiang, et al. The classification and features of loess landslide based on risk assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(11): 2092 - 2099. (in Chinese with English abstract) ]
- [8] 孙冉, 王成都, 夏哲兵, 等. 基于AHP-信息量法的费县地质灾害风险评价 [J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(增刊1): 430 - 435. [ SUN Ran, WANG Chengdu, XIA Zhebing, et al. Geological disasters risk assessment in Fee County based on AHP-information method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(Sup 1): 430 - 435. (in Chinese with English abstract) ]
- [9] 李春燕, 孟晖, 张若琳, 等. 中国县域单元地质灾害风险评估 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(2): 160 - 166. [ LI Chunyan, MENG Hui, ZHANG Ruolin, et al. Risk assessment of geo-hazard of China in county unit [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(2): 160 - 166. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] 王嘉君, 何亚伯, 杨琳, 等. 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*, 2018, 29(1): 102 - 112. [ WANG Jiajun, HE Yabo, YANG Lin, et al. Comprehensive multi-hazard risk assessment of villages and towns in mountain areas based on GIS [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(1): 102 - 112. (in Chinese with English abstract) ]
- [11] 李泽威, 杨登银, 王明华, 等. 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*, 2018, 32(1): 113 - 118. [ LI Zewei, YANG Dengyin, WANG Minghua, et al. Risk assessment of geological hazards based on GIS in the Longfeng Town of the Enshi City [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, 32(1): 113 - 118. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] TANG Y M, FENG F, GUO Z Z, et al. 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*, 2020, 277: 124159.
- [13] 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 Liu, MU Xinliang, LI Chen, et al. Risk assessment of geological hazards in Baota District, Yan'an City, Shaanxi, China [J]. *Mountain Research*, 2020, 38(5): 679 - 690. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 邱维蓉, 吴帮玉, 潘学树, 等. 几种聚类优化的机器学习方法在灵台县滑坡易发性评价中的应用 [J]. *西北地质*, 2020, 53(1): 222 - 233. [ QIU Weirong, WU Bangyu, PAN Xueshu, et al. Application of several cluster-optimization-based machine learning methods in evaluation of landslide susceptibility in Lingtai County [J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(1): 222 - 233. (in Chinese with English abstract) ]
- [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 Guanyu, LI Peng, GUO Min, 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 李阳春, 刘黔云, 李潇, 等. 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*, 2021, 32(3): 118 - 123. [ LI Yangchun, LIU Qianyun, LI Xiao, et al. Exploring early warning and forecasting of

- meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 118 – 123. (in Chinese with English abstract)
- [ 17 ] 刘福臻, 王灵, 肖东升. 机器学习模型在滑坡易发性评价中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(6): 98 – 106. [ LIU Fuzhen, WANG Ling, XIAO Dongsheng. Application of machine learning model in landslide susceptibility evaluation [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(6): 98 – 106. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 张斌. 大型泥石流的基本特征和防治研究: 以吴堡县城北井沟特大型泥石流为例 [D]. 西安: 长安大学, 2018. [ ZHANG Bin. Research on the basic characteristics and control of large debris flow—Example for the extra large debris flow in Jinggou of northern Wubao Country [D]. Xi'an: Changan University, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 薛强, 张茂省, 李林. 基于斜坡单元与信息量法结合的宝塔区黄土滑坡易发性评价 [J]. *地质通报*, 2015, 34(11): 2108 – 2115. [ XUE Qiang, ZHANG Maosheng, LI Lin. Loess landslide susceptibility evaluation based on slope unit and information value method in Baota District, Yan 'an [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(11): 2108 – 2115. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 冯卫, 唐亚明, 马红娜, 等. 基于层次分析法的咸阳市多灾种自然灾害综合风险评价 [J]. *西北地质*, 2021, 54(2): 282 – 288. [ FENG Wei, TANG Yaming, MA Hongna, et al. Comprehensive risk assessment of multi-hazard natural disasters in Xianyang City based on AHP [J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(2): 282 – 288. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 申怀飞, 董雨, 杨梅, 等. 基于AHP与信息量法的甘肃省滑坡易发性评估 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 412 – 419. [ SHEN Huaifei, DONG Yu, YANG Mei, et al. Assessment on landslide susceptibility in Gansu Province based on AHP and information quantity method [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 412 – 419. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] JIA N, MITANI Y, XIE M, et al. Shallow landslide hazard assessment using a three-dimensional deterministic model in a mountainous area [J]. *Computers and Geotechnics*, 2012, 45: 1 – 10.