

严明, 谢婉丽, 何亚南, 等. 基于极值降雨假设法的城镇地质灾害风险性评价耦合模型研究——以安康市岚皋县官元镇为例[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 219–227. [YAN Ming, XIE Wanli, HE Yanan, et al. Research on the Coupling Model of Urban Geological Hazard Risk Assessment Based on the Assumption of Extreme Rainfall——A Case Study of Guanyuan Town, Langao County, Ankang City[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(4): 219–227. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.034.]

# 基于极值降雨假设法的城镇地质灾害风险性 评价耦合模型研究\*

——以安康市岚皋县官元镇为例

严明<sup>1,2</sup>, 谢婉丽<sup>1,2</sup>, 何亚南<sup>3</sup>, 刘琦琦<sup>1,2</sup>, 何高锐<sup>1,2</sup>, 杨惠<sup>1,2</sup>

(1. 西北大学地质学系, 陕西西安710069; 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安710069; 3. 岚皋县自然资源局, 陕西安康725400)

**摘要:** 选取安康市岚皋县官元镇为研究区, 以斜坡单元为评价单元, 采用信息量-支持向量机耦合模型进行地质灾害易发性评价, 根据自然断点法完成易发性分区; 基于极值降雨假设法分别计算大雨(35 mm/24 h)、暴雨(75 mm/24 h)、大暴雨(175 mm/24 h)和特大暴雨(250 mm/24 h)4种工况下斜坡的危险性指数, 并开展相应工况下危险性区划; 采用TOPSIS法计算易损性指数, 开展地质灾害易损性分区。综合采用信息量-支持向量机模型、极值降雨假设和TOPSIS法构建研究区风险性评价耦合模型, 根据自然断点法划分4种降雨工况的地质灾害风险性分区, 将风险区划为极高风险区、高风险区、中风险区和低风险区。

**关键词:** 地质灾害; 耦合模型; 极值降雨假设; TOPSIS法; 风险性评价; 岚皋县官元镇

**中图分类号:** X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)04-0219-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.034

我国地质灾害风险评价工作经历了40余年的发展, 随着评价技术和精度的提高, 逐步实现了全国地质灾害数据库的动态管理, 而如何构建地质灾害风险性评价模型是风险评价研究的关键<sup>[1-2]</sup>。地质灾害风险性评价模型是基于地质灾害易发性评价, 结合危险性评价和易损性评价构建而成。易发性评价模型经历了从定性到定量评价的发展过程<sup>[3-7]</sup>, 并衍生了采用耦合模型评价地质灾害易发性的新方法<sup>[8-12]</sup>, 樊芷吟等<sup>[13]</sup>构建了信息量与逻辑回归耦合模型并完成汶川地震地质灾害易发性分区, 表明了耦合模型的评价结果更好、精度更高。以往的地质灾害危险性评价主要是在易发性评价结果的基础上叠加年平均降雨量<sup>[14-16]</sup>, 反映了诱发因素在市、县范围的空间变化, 却无法体现诱发因素在镇、村范围的时空变化<sup>[17]</sup>, WANG等<sup>[18]</sup>基于极端降雨事件开展了三峡库区降雨诱发型滑坡的危险评估。易损性模型的构建及评价往往受承灾体类型及其破坏程度、调查资料的完整性、丰富性及时效性等因素的综合影响<sup>[19-22]</sup>, 许强等<sup>[23]</sup>利用空间多重标准评价方法开展西南山区城镇大比例尺的地质灾害易损性评价。

但由于我国区域地质条件复杂、地貌类型差异大、灾害种类多, 导致地质灾害的成因机理复杂、诱发因素各异、造成危害程度不同。加之近年来极端降雨频发且时空分布差异大, 使地质灾害风险性模型的构建、评价和区划具有极强的区域性<sup>[24-25]</sup>。虽然学者们在地质灾害风险性评价研究方面取得了颇丰的进展, 但是在小区域、大比例尺的研究区, 如何构建考虑诱发因素(极端降雨)在区域内时空变化的高精度耦合模型并开展地质灾害风险性评价是目前研究的重点。

本文以安康市岚皋县官元镇为研究区, 以斜坡单元为调查和评价单元, 开展1:1万的遥感解译和地质灾害野外调查(包括孕灾地质环境条件、地质灾害特征和承灾体调查), 选取坡高等10个指标基于RStudio构建信息量-支持向量机耦合模型实现地质灾害易发性评价; 基于极值降雨假设分别计算不同工况的斜坡单元危险性指数, 开展不同降雨工况的地质灾害危险性分区; 采用TOPSIS法计算评价单元的易损性指数开展易损性评价; 综合采用信息量-支持向量机模型、极值降

\* 收稿日期: 2023-03-01 修回日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金“基于微观尺度的黄土湿陷耦合模型研究”(41972292); 陕西省创新能力支撑计划“地质灾害防控数字化研究创新团队”(2021TD-54); 陕西省重点研发计划黄土高原地区边坡失稳机制及绿色生态治理修复技术研发(2022ZDLSF06-03)

第一作者简介: 严明(1997-), 男, 汉族, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害风险评价方面的研究。

E-mail: 1024652513@qq.com

通信作者: 谢婉丽(1974-), 女, 汉族, 陕西渭南人, 教授, 主要从事地质灾害防治、监测预警、风险评价及管控技术、绿色边坡防护、环境污染机理和修复技术研发及数值模拟方面的研究。E-mail: xiewanli@nwu.edu.cn

雨假设和 TOPSIS 法构建研究区风险性评价耦合模型, 结合危险性评价和易损性评价结果, 根据自然断点法完成不同降雨工况的地质灾害风险性分区。

## 1 研究区概况

### 1.1 地质环境条件

官元镇位于岚皋县西南部, 距县城 63 km, 地处  $108^{\circ}38'25'' \sim 108^{\circ}44'47''E$ ,  $32^{\circ}06'15'' \sim 32^{\circ}19'52''N$  (图 1), 全镇东西宽 9.7 km, 南北长 25.1 km, 总面积约  $142.45 \text{ km}^2$ 。

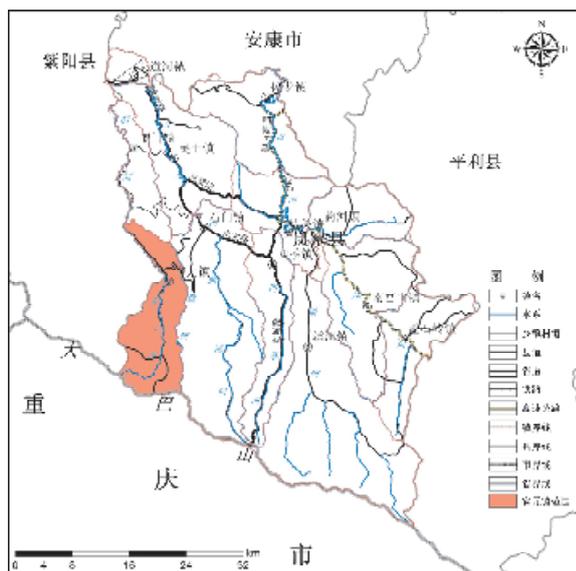


图 1 官元镇交通位置图

(审图号: 陕 S(2021)023 号, 底图无修改, 下同。)

官元镇气候为北亚热带大陆性季风气候。多年平均气温  $15^{\circ}\text{C}$ , 极端最高气温  $40.9^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量  $998.51 \text{ mm}$ , 最大年降雨量  $1702.8 \text{ mm}$  (2021 年), 最小年降雨量  $710.8 \text{ mm}$  (2006 年), 有记录以来的年最大日降水量  $194.9 \text{ mm}$  (2010 年 7 月 18 日)。降雨主要集中在 6—9 月, 降雨量约占全年降雨量的 70%。区内水系为汉江水系的洞河, 为岚皋县与紫阳县的界河, 呈近南北走向, 南中部地区河道上陡下缓, 境内流长  $25 \text{ km}$ , 流域面积  $24 \text{ km}^2$ 。该水系包括大北河、小北河、大茨盘河、黄金河和后小河 5 个支流。

官元镇地处大巴山脉, 山势自东向西倾斜, 属于山地剥蚀地貌, 大部分地区属于中山区, 部分地区属于低山区。区内最高海拔  $2521 \text{ m}$ , 最低海拔  $478 \text{ m}$ 。境内出露的地层主要有: 寒武系的灰色、深灰色中厚层泥灰岩、灰色薄层灰岩和页片状灰岩; 奥陶系、志留系的灰色、深灰色板岩夹钙质板岩、炭质板岩、粉砂质板岩和硅质板岩; 第四系冲洪积及滑坡、残坡堆积物, 主要为含碎石黏性土; 局部区域辉长岩侵入地层。境内构造为小河口—太极渡逆断层和高桥—官元向斜, 该断层位于官元镇中部, 东西向横贯全境, 断面向北, 倾角  $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ , 垂直断距约  $1.5 \sim 2 \text{ km}$ , 断层带宽  $100 \sim 500 \text{ m}$ ; 南部山区褶皱现象明显。据《中国震动参数区划图: GB 18306—2015》和《中国震动反应谱特征周期区划图: GB 18306—2015》, 区内地震动峰值加速度为  $0.05 \text{ g}$ , 地震烈度为 VI 度, 地震动反应谱特征周期为  $0.35 \sim 0.40 \text{ s}$ 。

### 1.2 地质灾害概况

官元镇现有地质灾害 25 处, 其中在册地质灾害 20 处 (滑坡 18 处, 泥石流 2 处), 经遥感解译核查后新增 5 处滑坡隐患点 (图 2) (主要采用 2018 年、2020 年、2021 年 3 期高分辨率影像数据, 地面分辨率均为  $0.8 \text{ m}$  左右, 数据来自于 worldview3-4、高分 2 号、pleiades 三颗卫星)。经现场调查, 地质灾害规模以小型为主, 共涉及到 150 户 528 人 573 间房、 $470 \text{ m}$  公路、 $1.73 \text{ hm}^2$  耕地、 $0.33 \text{ hm}^2$  林地, 可造成财产损失约 3 022 万元。

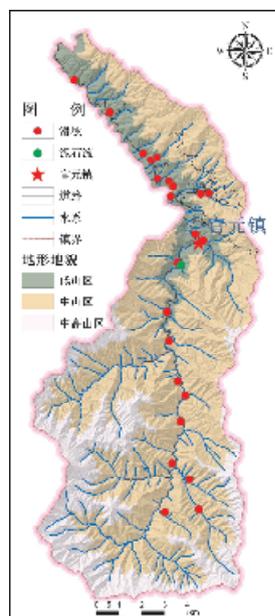


图 2 官元镇地质灾害分布图

区内地质灾害空间分布呈现以北部低山人口密集区域居多, 南部中山区、中高山区分布较少的特征; 在时间域上具有在雨季相对集中分布 (区内地质灾害多发生于 2010 年 7 月 18 日) 的特征。

## 2 基于信息量—支持向量机耦合模型的地质灾害易发性评价

### 2.1 评价单元划分及评价指标选取

#### 2.1.1 评价单元划分

针对小区域、大比例尺的研究区, 以斜坡单元为评价单元进行地质灾害易发性评价, 其结果较栅格精度更高、更合理<sup>[17,26]</sup>。在 ArcGIS 中采用正反向 DEM 法将研究区划分为 1 494 个斜坡单元, 斜坡单元最大面积  $87 \text{ 万 m}^2$ , 最小面积  $0.36 \text{ 万 m}^2$ , 平均面积  $9 \text{ 万 m}^2$ 。

#### 2.1.2 评价指标选取

根据孕灾地质环境条件, 综合斜坡特征、地质因素、水文因素和人类工程活动 4 个方面, 选取坡高、坡度、坡向、坡型、斜坡结构、NDVI、地层岩性、距构造距离、距河流距离、距道路距离 10 个指标作为易发性评价指标, 在 ArcGIS 中完成指标分级处理 (图 3、表 1)。斜坡特征 (坡高、坡度、坡向、坡型、斜坡结构和 NDVI) 使地质灾害的分布具有明显的不均匀性; 地质因素 (地层岩性、距构造距离) 是控制斜坡稳定的内在因素; 水文因素 (距河流距离) 和人类工程活动 (距道路距离) 往往改变了斜坡的形态和应力分布。

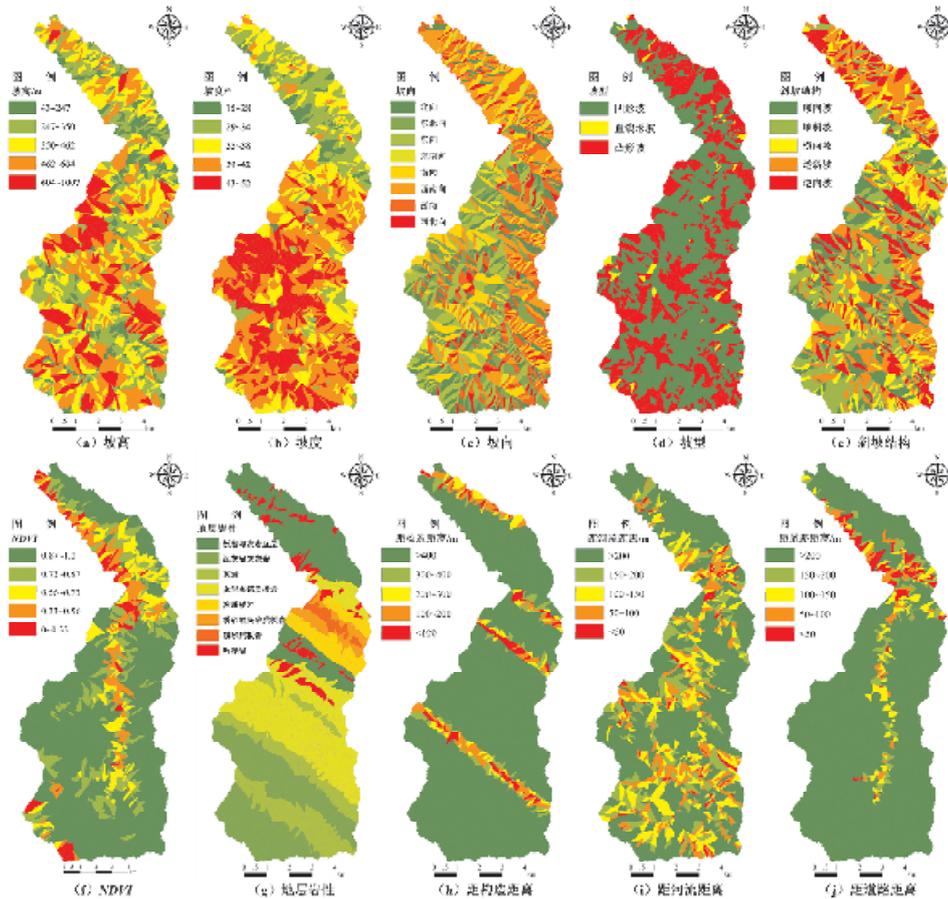


图3 易发性评价指标分布图

表1 地质灾害易发性评价指标分级表

评价指标	分级依据	指标分级	评价指标	分级依据	指标分级
坡高/m	自然断点法	43 ~ 247	NDVI	自然断点法	< 0.33
		247 ~ 350			0.33 ~ 0.56
		350 ~ 462			0.56 ~ 0.73
		462 ~ 604			0.73 ~ 0.87
		604 ~ 1 007			> 0.87
坡度/°	自然断点法	15 ~ 28	地层岩性	野外调查	板岩与灰岩互层
		28 ~ 34			泥灰岩夹灰岩
		34 ~ 38			灰岩
		38 ~ 42			灰岩夹钙质板岩
		42 ~ 52			炭质板岩
坡向/°	按方位划分	N(337.5°, 22.5°]	距构造距离/m	野外调查	粉砂岩夹砂质板岩
		NE(22.5°, 67.5°]			粉砂质板岩
		E(67.5°, 112.5°]			辉绿岩
		SE(112.5°, 157.5°]			< 100
		S(157.5°, 202.5°]			100 ~ 200
坡型	按曲率划分	SW(202.5°, 247.5°]	距河流距离/m	野外调查	200 ~ 300
		W(247.5°, 292.5°]			300 ~ 400
		NW(292.5°, 337.5°]			> 400
		凸形坡			< 50
		直线形坡			50 ~ 100
斜坡结构	野外调查	凹形坡	距道路距离/m	野外调查	100 ~ 150
		顺向坡			150 ~ 200
		顺斜坡			> 200
		横向坡			< 50
		逆斜坡			50 ~ 100
逆向坡	100 ~ 150				
					150 ~ 200
					> 200

表2 评价指标相关系数(PCC)表

	坡高	坡度	坡向	坡型	斜坡结构	NDVI	地层岩性	距构造距离	距河流距离	距道路距离
坡高	1.000	0.101	-0.015	-0.079	0.008	0.066	0.028	0.042	0.072	0.091
坡度	0.101	1.000	0.131	-0.071	-0.008	0.222	0.465	0.017	-0.042	0.365
坡向	-0.015	0.131	1.000	-0.005	0.353	0.079	0.141	0.020	-0.011	0.091
坡型	-0.079	-0.071	-0.005	1.000	-0.005	0.067	-0.073	-0.010	0.229	0.151
斜坡结构	0.008	-0.008	0.353	-0.005	1.000	0.050	-0.077	0.048	0.028	0.012
NDVI	0.066	0.222	0.079	0.067	0.050	1.000	0.155	-0.015	0.069	0.355
地层岩性	0.028	0.465	0.141	-0.073	-0.077	0.155	1.000	0.002	-0.100	0.271
距构造距离	0.042	0.017	0.020	-0.010	0.048	-0.015	0.002	1.000	0.009	0.025
距河流距离	0.072	-0.042	-0.011	0.229	0.028	0.069	-0.100	0.009	1.000	0.211
距道路距离	0.091	0.365	0.091	0.151	0.012	0.355	0.271	0.025	0.211	1.000

### 2.1.3 评价指标独立性检验

如果评价指标间高度相关,会影响后续模型的预测精度,因此需要保证各指标之间相互独立、互不干涉<sup>[9-10]</sup>。可由皮尔逊系数(Pearson Correlation Coefficient, PCC)判断各指标间的相关程度。在RStudio软件中通过cor函数计算评价指标的相关性系数(表2)。

当 $0 < |PCC| \leq 0.3$ 时为弱相关; $0.3 < |PCC| \leq 0.5$ 为中等相关; $0.5 < |PCC| \leq 1.0$ 为强相关<sup>[9]</sup>。由表2可知,评价指标间的 $|PCC|$ 均比0.5小,表明所选评价指标间相关性不大,独立性较好。

### 2.2 信息量-支持向量机耦合模型构建

针对区内地质灾害数目少、影响因素复杂、斜坡单元数目多等特点,将信息量模型和支持向量机模型相结合,构建信息量-支持向量机耦合模型,计算每个斜坡单元的地质灾害易发性指数。此耦合模型属于同尺度模型之间的耦合类型,即一种模型的输出结果经数据处理后输入到另一种同尺度模型中进行模拟,可以充分发挥基础模型的优势,不仅解决了各评价指标之间的量纲差异问题,还填补了传统信息量模型无法提供各评价指标权重的缺陷。

(1)信息量(IV)模型。通过提取已发生地质灾害点的分布情况,选取一定数目的评价指标,将实测数据转化为可量化大小的信息量值,来表征各种指标共同作用下地质灾害发生的可能性<sup>[12]</sup>。公式如下:

$$I_{ij} = \ln \frac{S_{ij}/S}{A_{ij}/A} \quad (1)$$

式中: $I_{ij}$ 为第*i*个评价指标的第*j*类信息量值; $S_{ij}$ 为第*i*个评价指标的第*j*类发生地质灾害的斜坡面积; $S$ 为研究区内地质灾害所处斜坡总面积; $A_{ij}$ 为第*i*个评价指标的第*j*类的面积; $A$ 为研究区的总面积。

确定评价指标数目*n*后,评价单元总的信息量值*I*根据下式计算:

$$I = \sum_{i=1}^n I_{ij} = \sum_{i=1}^n \ln \frac{S_{ij}/S}{A_{ij}/A} \quad (2)$$

对于每个评价单元,总信息量值越大表明越有利于地质灾害的发生,评价单元的地质灾害易发性等级越高,反之,地质灾害易发性等级越低,根据综合信息量的大小将研究区划分为不同等级的地质灾害易发分区<sup>[27]</sup>。

(2)支持向量机(SVM)模型。支持向量机模型最早是由VAPNIK在研究小样本问题提出的,其思想避开了从演绎到归纳的传统过程,实现了从训练样本到预报样本的“转导推理”,简化了传统方法的分类和回归等问题<sup>[28-29]</sup>。该模型分为2类:线性支持向量机和非线性支持向量机。

非线性分类训练集通过核函数与软间隔最优化,学习得到的分类决策函数<sup>[27]</sup>:

$$f(x) = \omega'K(X, X_i) + b; \quad (3)$$

$$K(X, X_i) = \exp(-\gamma \|X - X_i\|^2), \gamma > 0. \quad (4)$$

式中: $\omega$ 用于确定超平面的方向; $K$ 为核函数; $K(X, X_i)$ 高维特征向量的内积; $b$ 为超平面与原点之间的距离; $\|X - X_i\|^2$ 为*X*与*X<sub>i</sub>*平方欧几里得距离; $\gamma$ 为核函数的自由参数。

(3)信息量-支持向量机(IV-SVM)耦合模型。

①评价单元信息量值计算与赋值。根据式(1)计算各评价指标分级的信息量值,在ArcGIS中将信息量赋值给区内每个斜坡单元,共同组成1494组数据集。

②样本选取。以25处地质灾害斜坡单元为正样本,根据1:3比例在剩余斜坡单元中随机选取75处作为负样本,共同组成100组正、负样本数据集。将正、负样本数据集按照7:3比例划分为70组训练集和30组测试集。

③模型参数选取。SVM模型中核函数及其参数的选择直接决定模型的预测效果。本文采用径向基函数(RBF)作为SVM模型的核函数,在RStudio中通过tune.svm函数自动实现10折交叉验证,并给出预测误差最小时的参数值。最终gamma值为0.01, cost值为10。

④模型构建及精度测试。根据训练集和svm函数构建IV-SVM耦合模型,用30组测试集进行模型精度测试。测试结果显示,耦合模型的AUC值为0.895,测试集准确度为0.943,训练集准确度为0.833,受试者工作特征曲线(ROC曲线)说明耦合模型的分类效果好,能够较好地完成研究区地质灾害易发性评价(图4)。

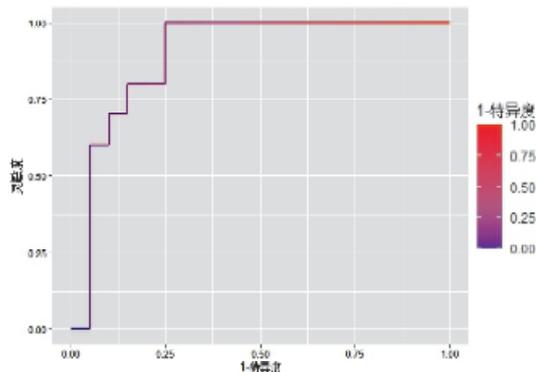


图4 受试者工作特征曲线(ROC)

### 2.3 易发性评价结果

通过信息量-支持向量机(IV-SVM)模型预测研究区所有斜坡单元的灾害发生概率,即地质灾害易发性指数,同时将信息量(IV)模型作为对照模型计算每个斜坡单元的易发性指数,在ArcGIS软件中采用自然断点法分别对两种模型的计算结果进行分级(表3、图5)。由表3可知,在两种模型的易发性分区中,易发性等级越高,落在该等级分区内的地质灾害数越多,灾点密度越大。

IV-SVM 耦合模型的易发性分区结果在极高易发区、高易发区的灾点密度均比 IV 模型的灾点密度大, 表明 IV-SVM 耦合模型在易发性评价中的灾害点分布较为集中, 预测成功率较高, 故选择耦合模型的评价结果为研究区地质灾害易发性评价最终结果。由图 5 可知, 官元镇极高易发区、高易发区斜坡分布于低山区, 沿大北河河道、官元-大北河公路分布, 主要集中于北部河道右侧斜坡、中部居民区, 其原因为区内低山区属于人类工程活动强烈区域, 切坡建房、公路修建对斜坡稳定性影响大; 中、低易发区分布于中山区、中高山区, 主要集中于南部林地, 其原因为区内林地区域人类活动少, 斜坡植被覆盖程度高。

### 3 基于极值降雨假设法的地质灾害危险性评价

结合资料收集和现场调查, 官元镇发生的地质灾害均与降雨强度有关, 同时研究区是区域稳定性相对较稳定的地区, 故选取降雨为区内地质灾害发生的诱发因素。

#### 3.1 评价方法

采用基于极值降雨假设法的地质灾害危险性评价方法<sup>[18]</sup>, 逐坡计算评价单元的危险性指数。此方法考虑了研究区内极端降雨诱发地质灾害的历史事实, 结合了区内极端降雨记录和动态降雨强度, 强调了地质灾害危险性评价与诱发因素概率

的关系, 体现了地质灾害危险性的动态评价过程。方法适用于降雨动态变化明显、灾害记录详尽的区域。公式如下:

$$H_i = \frac{Y_i}{Y_{\max}} P_i; \tag{5}$$

$$P_i = \frac{L}{L_{\max/\text{day}}} \tag{6}$$

式中:  $H_i$  为某一工况下第  $i$  个斜坡单元的危险性指数;  $Y_i$  为第  $i$  个斜坡单元的易发性指数;  $Y_{\max}$  为研究区斜坡单元最大易发性指数;  $P_i$  为某一工况下第  $i$  个斜坡单元在给定时间段内的失稳概率;  $L_{\max/\text{day}}$  为研究区有监测记录以来日最大降雨量;  $L$  为不同工况下的年最大日降雨量。

#### 3.2 危险性评价结果

研究区有记录以来的年最大日降水量为 194.9 mm(2010 年 7 月 18 日), 根据降水量等级对 24 h 降雨量的划分<sup>[30]</sup>, 选取大雨(35 mm/24 h)、暴雨(75 mm/24 h)、大暴雨(175 mm/24 h)和特大暴雨(250 mm/24 h)4 种降雨工况。在官元镇地质灾害易发性评价的基础上, 用式(6)计算 4 种降雨工况的斜坡失稳概率, 再采用式(5)计算 4 种降雨工况的斜坡危险性指数, 在 ArcGIS 软件中根据表 4 绘制 4 种降雨工况的地质灾害危险性分区图(图 6), 计算并统计 4 种降雨工况下各危险分区的面积(表 5)。由图 6 可知, 在大雨、暴雨工况下, 研究区内无极高、高危险性斜坡; 在大暴雨、特大暴雨工况下, 极高、高危险性斜坡主要集中于低山区, 沿大北河河道、官元-大北河公路两侧分布。

表 3 两种模型的地质灾害易发性分区统计表

评价模型	易发性分区	斜坡数目 / 个	灾害点数 / 个	占比 / %	面积 / km <sup>2</sup>	占比 / %	灾点密度 / (个/km <sup>2</sup> )
IV-SVM 耦合模型	极高易发区	71	17	68.0	8.02	5.6	2.12
	高易发区	98	3	12.0	8.41	5.9	0.36
	中易发区	188	5	20.0	25.21	17.7	0.20
	低易发区	1 140	0	0.0	100.81	70.8	0.00
IV 模型	极高易发区	92	15	60.0	8.02	5.6	1.87
	高易发区	332	6	24.0	26.74	18.8	0.22
	中易发区	724	4	16.0	70.81	49.7	0.06
	低易发区	346	0	0.0	36.88	25.9	0.00

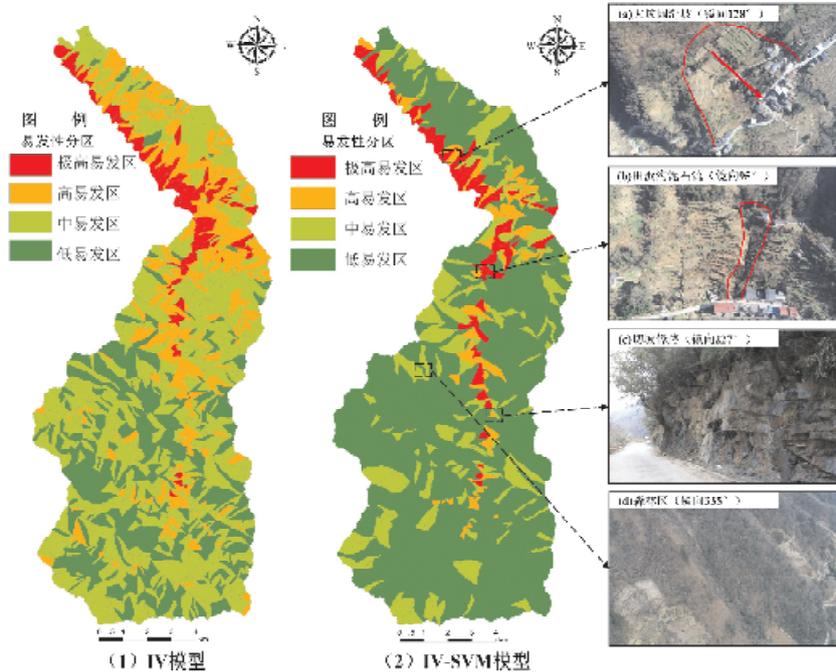


图 5 两种模型的易发性分区图及不同分区实景对比

表4 地质灾害危险程度划分标准表<sup>[18]</sup>

地质灾害危险程度	极高危险	高危险	中危险	低危险
危险性指数 $H_i$	$H_i > 0.8$	$0.6 < H_i \leq 0.8$	$0.4 < H_i \leq 0.6$	$0 < H_i \leq 0.4$

表5 4种降雨工况的危险分区统计表

危险性等级	大雨工况		暴雨工况		大暴雨工况		特大暴雨工况	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
极高危险区	0.00	0.0	0.00	0.0	5.21	3.7	11.24	7.9
高危险区	0.00	0.0	0.00	0.0	4.91	3.4	3.02	2.1
中危险区	0.00	0.0	7.75	5.4	4.33	3.0	4.23	3.0
低危险区	142.45	100.0	134.71	94.6	128.01	89.9	123.97	87.0

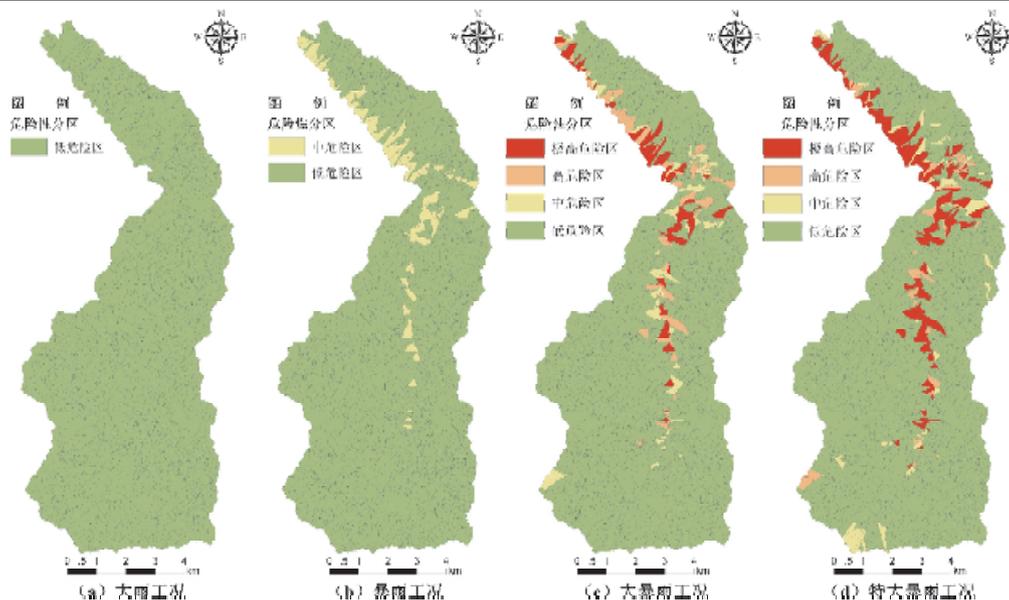


图6 4种降雨工况下官元镇地质灾害危险性分区图

## 4 地质灾害风险性评价

### 4.1 基于TOPSIS法的地质灾害易损性评价

根据承灾体调查成果和收集的资料,选取人口密度、14岁及以下人数、15~59岁人数、60岁及以上人数、房屋间数、重要建筑、道路长度、输电线长度、耕地面积及林地面积10个指标作为易损性评价指标,采用TOPSIS法计算区内每个斜坡单元的易损性指数,并对研究区易损性进行分区划分。

#### 4.1.1 评价方法介绍

TOPSIS法是根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的方法,是在现有的对象中进行相对优劣的评价,是多目标决策分析中一种常用的有效方法,又称为优劣解距离法,避免了易损性评价中人为因素对结果的影响<sup>[31]</sup>。计算过程如下:

(1)构造 $n$ 行 $m$ 列的原始数据矩阵 $X$ :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(2)数据标准化:

$$y_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij}^2)}; \quad (8)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, m$ 。

(3)确定最优解向量和最劣解向量。每一列中最大的数,构成理想最优解向量,取每一列中最小的数计算理想最劣解向量:

$$z_j^+ = \max\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\}; \quad (10)$$

$$z_j^- = \min\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\}; \quad (11)$$

$$Z^+ = [z_1^+, z_2^+, \dots, z_m^+]; \quad (12)$$

$$Z^- = [z_1^-, z_2^-, \dots, z_m^-]。 \quad (13)$$

式中: $j=1, 2, 3, \dots, m$ 。

(4)计算欧氏距离。分别计算各评价对象与最优解向量和最劣解向量的欧氏距离:

$$S^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^- - Z_{ij}^-)^2}; \quad (14)$$

$$S^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - Z_{ij}^+)^2}。 \quad (15)$$

(5)计算各评价对象与最优方案的接近程度 $C_i$ :

$$C_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-)。 \quad (16)$$

式中: $0 \leq C_i \leq 1, C_i \rightarrow 1$ ,表明评价对象越优。

#### 4.1.2 评价结果

以斜坡单元为评价对象,构建1494行10列易损性原始数据集,基于RStudio结合TOPSIS法开展易损性评价,并结合ArcGIS中自然断点法完成易损性分区(图7)。官元镇极高、高易损区斜坡沿道路集中分布,主要分布于研究区中部、北部低山区,原因为中部是镇政府所在地,村民聚集,人口密度大,道路、输电线密度大,故易损性极高;北部低山区为村民聚集区,人口密度相对较大,居民屋后

主要为耕地, 道路、输电线密度大, 故易损性高。北部中山区及南部中山区, 村民房屋零星分布, 主要为林地, 人口密度小, 故表现为较低的易损性。

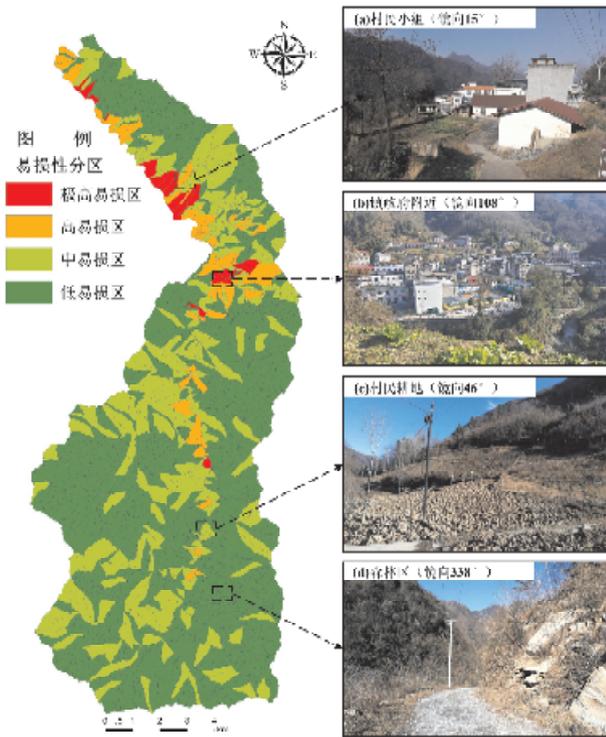


图7 易损性分区图及不同分区实物照片对比

#### 4.2 地质灾害风险性区划

分别对斜坡单元危险性指数和易损性指数进行标准化, 在 ArcGIS 中采用风险性评价模型“风险性( $R$ ) = 危险性( $H$ ) × 易损性( $V$ )”<sup>[32]</sup> 计算研究区风险性指数, 采用自然断点法划分地质灾害风险分区(图 8), 计算并统计各风险分区面积(表 6)。官元镇极高、高风险区沿官元 - 大北河公路两侧分布, 主要分布于区内北部、中部低山区; 中风险区分布于区内中山区, 主要分布于北部、中部中山区和南部官元 - 大北河公路两侧, 主要为林地, 局部为耕地; 低风险区分布于区内北部中山区和南部中高山区的林地区域, 区内无人居住。

#### 4.3 讨论

(1) 本文以斜坡单元为评价单元, 构建了基于 IV - SVM 耦合模型、极值降雨假设法和 TOPSIS 法的地质灾害风险性评价模型, 不仅解决了研究区由于灾害数目少且影响因素复杂导致地质灾害易发性评价结果精度不高的问题, 还综合考虑了以极端降雨为诱发因素的山区城镇地质灾害特征, 体现了降雨因素的变化对区域地质灾害风险评价结果的动态改变。

(2) 本文是以降雨等级(大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨)区分不同降雨工况, 并非以降雨重现期(10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇)区分, 评价结果具有一定的片面性, 后续将基于此继续展开研究。

表 6 4 种降雨工况的官元镇地质灾害风险分区统计表

风险等级	大雨工况		暴雨工况		大暴雨工况		特大暴雨工况	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%						
极高风险区	0.00	0.0	0.69	0.5	1.98	1.4	5.67	4.0
高风险区	1.46	1.0	2.35	1.6	8.74	6.1	7.45	5.2
中风险区	9.07	6.4	11.39	8.0	11.13	7.8	12.85	9.0
低风险区	131.93	92.6	128.03	89.9	120.61	84.7	116.49	81.8

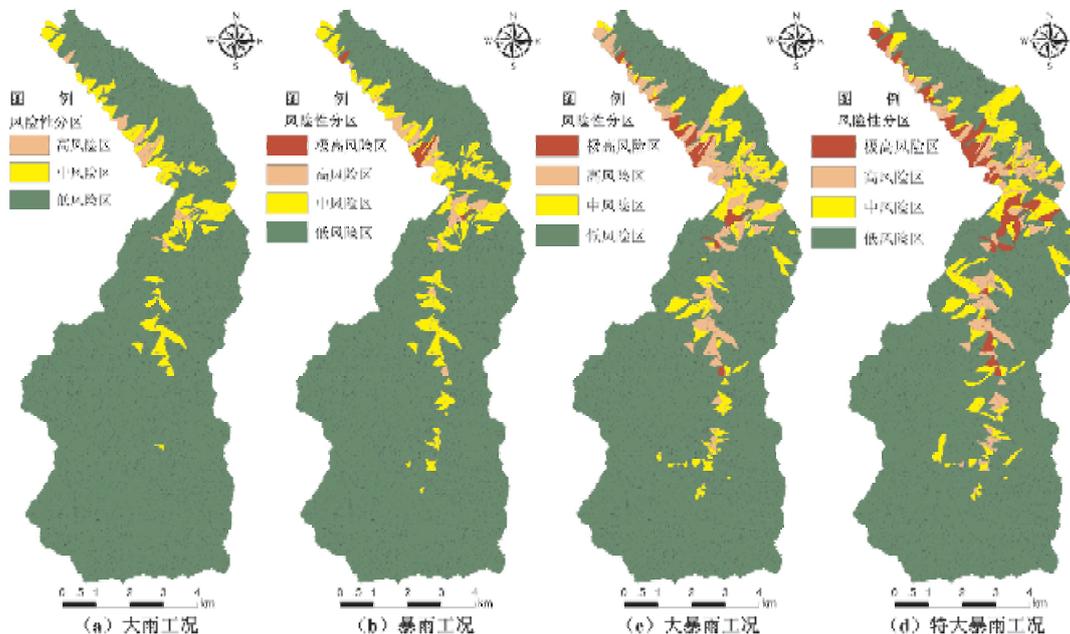


图 8 4 种降雨工况的官元镇地质灾害风险性分区图

## 5 结论

(1)以斜坡单元为评价单元,选取坡高、坡度、坡向、坡型、斜坡结构、NDVI、地层岩性、距构造距离、距河流距离、距道路距离10个指标作为地质灾害易发性评价指标;基于RStudio软件构建地质灾害易发性信息量-支持向量机(IV-SVM)耦合模型,采用ROC曲线对模型进行精度检验,其AUC值为0.895,表明该模型的分类效果较好。

(2)基于极值降雨假设法构建地质灾害危险性评价模型,计算了大雨(35 mm/24 h)、暴雨(75 mm/24 h)、大暴雨(175 mm/24 h)和特大暴雨(250 mm/24 h)4种工况下斜坡单元的危险性指数,完成了研究区危险性分区。

(3)选取人口密度、14岁及以下人数、15~59岁人数、60岁及以上人数、房屋间数、重要建筑、道路长度、输电线长度、耕地面积及林地面积10个指标作为易损性评价指标,采用TOPSIS法构建了地质灾害易损性评价模型,获得区内斜坡单元的易损性指数,完成了研究区易损性分区。

(4)综合采用信息量-支持向量机耦合模型、极值降雨假设和TOPSIS法构建了研究区风险性评价耦合模型,结合危险性评价和易损性评价结果,根据自然断点法完成4种降雨工况的地质灾害风险性分区。结果表明,区内极高、高风险区沿官元-大北河公路两侧分布,主要分布于区内北部、中部低山区;中风险区分布于区内中山区,主要分布于北部、中部和南部官元-大北河公路两侧,区域内居民较少,主要为林地,局部为耕地;低风险区主要分布于研究区北部中山区和南部中高山区的林地区域。通过模型精度检测、评价结果的合理性检验以及现场核查,表明评价结果较好,可为官元镇的风险管控和其他同类地区的小区域、大比例尺风险评价提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] 徐继维,张茂省,范文. 地质灾害风险评估综述[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 130-134.
- [2] 王瑜. 我国“十四五”地质灾害防治明确六大目标[N]. 中国自然资源报, 2023-01-09(1).
- [3] 王哲,易发成. 基于层次分析法的绵阳市地质灾害易发性评价[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 14-23.
- [4] 刘邵晨,胡春生,胡晨琦,等. 基于CF模型-AHP的地质灾害易发性评价[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(6): 575-582.
- [5] 李光辉,铁永波. 基于信息量模型的综合地质灾害易发性建模方法对比研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 212-221.
- [6] KAYASTHA P, DHITAL M R, DE SMEDT F. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 398-408.
- [7] 谢婉丽,滕宏泉,杜蕾,等. 基于GIS结合模糊信息方法在灾害危险性区划中的应用:以大西安地区崩滑地质灾害为例[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 111-116.
- [8] 王绅皓,谢婉丽,奚家米,等. 基于GIS与BP神经网络的矿区塌陷易发性预测[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 218-223, 230.
- [9] 穆柯,谢婉丽,刘琦琦,等. 基于LR-RF模型的滑坡易发性评价—以铜川市耀州区为例[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 212-218.
- [10] 李嘉昊,谢婉丽,严明,等. 基于PCA与改进AHP-CRITIC法的地质灾害风险评价研究——以神木市为例[J/OL]. 地球环境学报: 1-24[2023-05-05].
- [11] 黄煜,谢婉丽,刘琦琦,等. 基于GIS与MaxEnt模型的滑坡易发性评价—以铜川市中部城区为例[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 266-275.
- [12] 林荣福,刘纪平,徐胜华,等. 随机森林赋权信息量的滑坡易发性评价方法[J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 131-138.
- [13] 樊芷吟,苟晓峰,秦明月,等. 基于信息量模型与Logistic回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340-347.
- [14] 张文龙,张振凯,杨帅. 勉略宁地区地质灾害危险性智能评价和区划研究[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 276-283.
- [15] 易靖松,王峰,程英建,等. 高山峡谷区地质灾害危险性评价—以四川省阿坝县为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(3): 134-142.
- [16] 赵晓燕,谈树成,李永平. 基于斜坡单元与组合赋权法的东川区地质灾害危险性评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 299-305.
- [17] 姬永涛,王鲜,郝业,等. 基于斜坡单元的陕西省城镇地质灾害风险调查评价—以西安市蒋村街道为例[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 211-219.
- [18] WANG K, ZHANG S. Rainfall-induced landslides assessment in the Fengjie County, Three-Gorge reservoir area, China[J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 451-478.
- [19] 吴润霖,党星海,周兆叶,等. 岷县地质灾害易损性模糊综合评价[J]. 地理空间信息, 2021, 19(3): 86-89, 108, 7.
- [20] 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.
- [21] MEJIA-NAVARRO M, WOHL E E, OAKS S D. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado[M]//Geomorphology and Natural Hazards. Amsterdam; Elsevier, 1994: 331-354.
- [22] 朱静,唐川. 城市山洪灾害易损性的RS和GIS分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008(1): 61-67.
- [23] 许强,张一凡,陈伟. 西南山区城镇地质灾害易损性评价方法—以四川省丹巴县城为例[J]. 地质通报, 2010, 29(5): 729-738.
- [24] 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.
- [25] 焦伟之,张明,谢鑫鹏,等. 基于GIS与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价——以大新镇为例[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(4): 119-128.
- [26] 王凯,张少杰,韦方强. 斜坡单元提取方法研究进展和展望[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(6): 85-93.
- [27] 陈立华,李立丰,吴福,等. 基于GIS与信息量法的北流市地质灾害易发性评价[J]. 地球与环境, 2020, 48(4): 471-479.
- [28] 袁颖,张天亮. 基于主成分分析和支持向量机的苏锡常地区地裂缝危险性预测[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 57-63.
- [29] MOHAMMADY M, POURGHASEMI H R, AMIRI M. Assessment of land subsidence susceptibility in Semnan plain (Iran): a comparison of support vector machine and weights of evidence data mining algorithms[J]. Natural Hazards, 2019, 99(2): 951-971.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 降水量等级: GB/T 28592—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [31] 刘正源,那仁满都拉,郭恩亮,等. 基于熵权-TOPSIS模型的雷电灾害风险评估研究: 以内蒙古自治区为例[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 129-135.
- [32] UNDHA. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[R]. United Nations Department of Humanitarian Affairs, Geneva, 1992.

# Research on the Coupling Model of Urban Geological Hazard Risk Assessment Based on the Assumption of Extreme Rainfall —A Case Study of Guanyuan Town, Langao County, Ankang City

YAN Ming<sup>1,2</sup>, XIE Wanli<sup>1,2</sup>, HE Yanan<sup>3</sup>, LIU Qiqi<sup>1,2</sup>, HE Gaorui<sup>1,2</sup>, YANG Hui<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. Langao County Natural Resources Bureau, Ankang 725400, China)

Abstract: The geological hazard susceptibility of the Guanyuan town was evaluated using the information val-

ue – support vector machine coupling model, with slope units as evaluation units. The susceptibility was classified into different zones based on natural breakpoints. The hazard index of the slope was calculated using the extreme rainfall hypothesis method for four different working conditions: heavy rain (35 mm/24 h), rainstorm (75 mm/24 h), heavy rainstorm (175 mm/24 h), and extreme rainstorm (250 mm/24 h). And the corresponding hazard zoning was then conducted. The vulnerability index was calculated using the TOPSIS method, and the susceptibility zoning of geological hazards was carried out accordingly. A coupling model for risk assessment was constructed by integrating the information value – support vector machine model, extreme rainfall hypothesis method, and TOPSIS method. The geological hazard risk zoning was divided into four categories, namely extremely high risk, high risk, moderate risk, and low risk, for the four different rainfall working conditions based on natural breakpoints.

**Keywords:** geological disaster; coupling model; extreme rainfall assumption; TOPSIS method; risk assessment; Guanyuan Town Langao County

(上接第 93 页)

## 参考文献:

- [1] 孙继松. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(6): 498–506.
- [2] ZRNIC D S, KIMPEL J F, FORSYTH D, et al. Agile – beam phased array radar for weather observations [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(11): 1753–1766.
- [3] 尹丽云, 梅寒, 张腾飞, 等. 云南省精细化冰雹灾害危险性区划分析[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 99–105.
- [4] 王丽荣, 李姣, 张素云, 等. 雷达对冰雹灾害落区的跟踪及鉴定[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 66–70.
- [5] 蒋瑛, 朱克云, 张杰. 贵州地区冰雹云微物理过程及发展机制数值模拟研究[J]. 气象, 2016, 42(8): 920–933.
- [6] 陶玥, 洪延超. 云中粒子谱形状因子变化对云及降水影响的数值研究[J]. 气象学报, 2007(2): 221–230.
- [7] 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究[J]. 大气科学, 2002, 26(6): 761–772.
- [8] 张小娟, 张诚忠, 齐大鹏, 等. 雷达资料在一次大范围冰雹天气过程中的同化试验分析[J]. 气象, 2022, 48(1): 61–72.
- [9] GAO S, ZHU S, LIU J, et al. Comparison of severe convection forecasts over China from assimilating Doppler radar observations using 4DEnKF and EnKF approaches[J]. Atmospheric Research, 2022, 279: 106376.
- [10] CZERNECKI B, TASZAREK M, MAROSZ M, et al. Application of machine learning to large hail prediction – The importance of radar reflectivity, lightning occurrence and convective parameters derived from ERA5[J]. Atmospheric research, 2019, 227: 249–262.
- [11] CAPOZZI V, PICCIOTTI E, MAZZARELLA V, et al. Fuzzy – logic detection and probability of hail exploiting short – range X – band weather radar[J]. Atmospheric Research, 2018, 201: 17–33.
- [12] BLUESTEIN H B, FRENCH M M, POPSTEFANIJA I, et al. A mobile, phased – array doppler radar for the study of severe convective storms [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(5): 579–600.
- [13] HEINSELMAN P L, PRIEGNITZ D L, MANROSS K L, et al. Rapid sampling of severe storms by the national weather radar test-bed phased array radar[J]. Weather and Forecasting, 2008, 23(5): 808–824.
- [14] 肖靖宇, 杨玲, 俞小鼎, 等. 佛山相控阵阵列雷达探测 2020 年 9 月 4 日短时强降水天气过程的分析[J]. 气象, 2022, 48(7): 826–839.
- [15] 刘黎平, 吴林林, 吴翀, 等. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J]. 大气科学, 2014, 38(6): 1079–1094.
- [16] 于明慧, 刘黎平, 吴翀, 等. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. 气象, 2019, 45(3): 330–344.
- [17] 杨通晓, 袁招洪. 多波段双偏振天气雷达识别降水类型的模拟研究[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 241–255.
- [18] 马建立, 苏德斌, 金永利, 等. X 波段双线性偏振雷达电磁波衰减对冰雹识别的影响[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 825–835.

## Analysis of Phased Array Radar Characteristics of a Hail Process in the Southwest Low Latitude Plateau

ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, XU Balin<sup>2</sup>, HE Qian<sup>2</sup>, MA Fang<sup>2</sup>, WEN Yanhe<sup>3</sup>, LI Chengpeng<sup>4</sup>

(1. Key Open Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China;

2. Yunnan Atmospheric Detection Technology Support Center, Kunming 650034, China;

3. Anning Meteorological Bureau, Kunming 650300, China;

4. Yunnan Provincial Center for Artificial Weather Modification, Kunming 650034, China)

**Abstract:** Based on the X – band dual – polarization phased array weather radar data of a hailstorm process in Kunming in July 2022, and by using a three – dimensional variational assimilation algorithm, the characteristics of its evolution process are analyzed, and the combined reflectivity and double polarization of hail in the initial development, gestation maturity, hail dissipation stage, etc. are obtained. The research results show that X – band phased array radar has the characteristics of high spatiotemporal resolution, and the microscopic characteristics of particles in the cloud obtained through polarization information is of great help to the fine detection of small – scale weather in the low – latitude plateau.

**Keywords:** phased array radar; hail; double polarization; jump increase; low – latitude plateau; southwest China