

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-18

# 甘肃定西地区地质灾害危险性评价

沈迪, 郭进京, 陈俊合

(天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384)

**摘要:** 识别地质灾害聚集的热点区及驱动力对于区域灾害预警具有重要意义。以甘肃定西地区为研究区, 选取坡度、坡向、土地利用等 7 个评价因子, 利用确定系数与逻辑回归耦合模型、空间自相关方法分析地质灾害的空间集聚特征及驱动因素。结果表明: 定西地区地质灾害危险性呈现中部高, 南北两侧低的特征, 其主要受降水、坡向、工程岩组等因子的影响; 地质灾害与降水、坡向和工程岩组的空间关系为高高聚集; 地质灾害危险性存在较强的空间自相关性, 在 3 km 的空间尺度上呈显著正相关, 且随距离阈值增加而降低; 距离阈值为 5 km 时, 正相关高高聚集与低低聚集以团块的形式存在, 而高低聚集与低高聚集多以零星状分布。研究可为区域地质灾害监测与防控提供参考。

**关键词:** 地质灾害; 确定系数法; 逻辑回归模型; 空间自相关分析

**中图分类号:** P694      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1003-8035(2021)04-0134-09

## Risk assessment of geological hazards in Dingxi region of Gansu Province

SHEN Di, GUO Jinjing, CHEN Junhe

(School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** It is of great significance to identify the hot spots and driving forces of geological hazard gathering for regional disaster early warning. Dingxi region of Gansu Province is taken as a the study area. Seven factors such as slope, aspect, land use, engineering rock group and so on are selected to analyze the spatial agglomeration characteristics and driving factors of geological hazards by using coupling model of determining coefficient and logical regression and spatial autocorrelation. The results show that the sensitivity of geological hazards in Dingxi region is high in the middle region and low in the north and south region. The spatial relationship between geological hazards and precipitation, aspect and engineering rock group is high accumulation. Geological hazard sensitivity has strong spatial autocorrelation, which is significantly positive correlation in 3 km scale, and decreases with the increase of distance threshold. When the distance threshold is 5 km, the high and low aggregation areas are clustered and distributed in the form of clumps, while the high and low aggregation areas and the low and high aggregation areas are mostly scattered. The research can provide reference for regional geological hazard monitoring and control.

**Keywords:** geological hazard; determination coefficient method; logical regression model; spatial autocorrelation analysis

## 0 引言

甘肃定西地区滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害多发, 严重制约了当地社会经济的发展, 对该地区地质灾

害敏感性进行研究, 有利于实现区域可持续发展<sup>[1-2]</sup>。目前, 常用的地质灾害危险性评价方法包括层次分析法<sup>[3]</sup>、人工神经网络<sup>[4]</sup>、信息量法<sup>[5]</sup>与确定系数法<sup>[6]</sup>等。确定系数法在解决多因子内部不同特征区间对地质灾

收稿日期: 2020-05-26; 修订日期: 2020-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772215)

第一作者: 沈迪(1995-), 女, 山西大同人, 硕士, 主要从事地质灾害防治方面的研究。E-mail: shendid@126.com

通讯作者: 郭进京(1962-), 男, 河南洛阳人, 博士, 教授, 主要从事工程地质环境与地质灾害方面的研究。E-mail: gjj@tcu.edu.cn

害危险性的影响上具有显著优势<sup>[7]</sup>,但对于确定单因子之间的相对权重较为困难,而逻辑回归模型能够通过单因子和历史灾害点之间的关系确定影响因子的权重<sup>[8]</sup>。因此,结合确定系数法和逻辑回归模型既可以揭示地质灾害的空间分布特征,又能判断地质灾害发生的主要驱动因子。

现有地质灾害危险性的研究主要聚焦于不同地质灾害危险性分区的空间分布模式,对于地质灾害空间集聚特征以及内在驱动力的探讨相对欠缺。空间自相关是用来检验在空间上具有一定规律性的空间变量在不同空间位置上的相关性,现在已在经济发展、疾病传播、土地利用<sup>[9-10]</sup>等领域中应用。其中,已有部分研究将空间自相关应用在地质灾害的评价过程中<sup>[11]</sup>。

空间自相关包括全局自相关与局部自相关,全局自相关可以分析判断地质灾害在空间分布上是否存在空间自相关特性,并揭示这种相关特性的强弱程度,局部空间自相关则可以识别地质灾害在局部区域上是否存在集聚特征以及其集聚模式。为此,本文以甘肃定西地区为研究区,基于确定系数与逻辑回归耦合模型,分析地质灾害的空间分布特征及驱动因素,利用空间自相关分析探讨在不同尺度下地质灾害的空间集聚特征,以期区域地质灾害监测与防治提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

甘肃省定西地区位于青藏高原东北缘、黄土高原和西秦岭交汇地带。研究区断裂构造发育,新构造活动强烈,特别是地震活动频繁,地表岩土体类型复杂,构造活动造成岩体破碎,新近系-第四系固结-半固结,甚至为固结的地层发育,地壳隆升和河流侵蚀造成许多沟壑,斜坡上表层黄土分布广泛,地质灾害多发。同时,人类工程活动对环境的破坏和气候变化等因素影响加剧了地质灾害(图1)。

近年来,受极端天气、地震和人类活动等多重因素叠加的影响,定西地区地质灾害发生频率明显上升。地质灾害具有分布范围广、密度大、活动频繁、规模大的特点。“十二五”期间,先后发生了与定西地区毗邻的东乡县“3·2”特大滑坡灾害、定西地区内的岷县“5·10”特大冰雹山洪泥石流灾害和岷县漳县6.6级地震引发的群体性滑坡灾害。造成的人员伤亡和财产损失十分严重。据调查,已查明地质灾害隐患点418处,滑坡118处,其中,陇西县、渭源县和通渭县分别为31,21和22处;崩塌81处,其中通渭县和陇西县分别为35和

31处;泥石流219处,其中,岷县和漳县分别为83和50处(表1)。

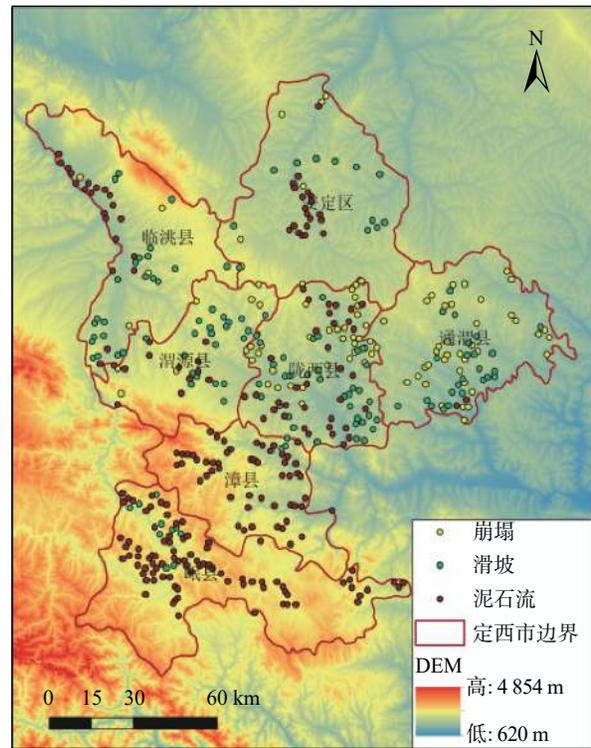


图1 研究区位置

Fig. 1 Geographic position of study area

表1 定西地区各个县地质灾害点数量  
Table 1 Dingxi region each county geological disaster point number

	滑坡/处	崩塌/处	泥石流/处
安定区	10	6	19
通渭县	22	35	2
陇西县	31	31	34
漳县	2	0	50
临洮县	23	3	20
渭源县	21	6	11
岷县	9	0	83

### 1.2 数据来源

本文研究数据主要包括DEM、土地利用以及地质灾害调查数据等。其中,DEM数据来源于地理空间数据云,空间分辨率为30m。土地利用数据主要通过目视解译的方法,并根据中科院土地利用分类体系将定西地区土地覆盖类型分为林地、草地、湿地、耕地、人工表面和未利用地6类。降水数据,来源于中国气象数据网,通过空间数据插值获取。地质灾害调查数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=290>),同时,结合《中国典型县(市)地质灾害

易发程度分区图集》的结果进行几何校正,得到甘肃定西地区的地质灾害点分布图<sup>[12]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 评价模型构建

#### 2.1.1 确定系数与逻辑回归耦合模型

确定性系数法(CF)基本原理是假设将来发生地质灾害的条件与之前相比是不变的。在已知的地质灾害点前提下,利用CF方法计算各个因子类型量的危险性值<sup>[8]</sup>,计算公式为:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} PP_a \geq PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} PP_a < PP_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $PP_a$ ——某一评价因子的类型量中已发生地质灾害面积与该类型量所占面积的比值;

$PP_s$ ——区域内已发生地质灾害的面积与区域内总面积的比值。

由式(1)可知,CF值的区间为[-1,1]。CF值为正值时,表明在该地质环境下发生地质灾害的可能性越大;CF值为负值时,表明地质灾害在该环境下不易发生。

逻辑回归模型(LR)是通过分析因变量与自变量的多元回归关系来预测某一事件发生的概率。在逻辑回归分析中,因变量Y为二分类变量,取值Y=0与Y=1,分别表示灾害不发生与灾害发生,自变量则为单因子的CF值。函数如下式:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{1 + e^{-Y}} \\ Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 \cdots + B_nx_n \end{cases} \quad (2)$$

式中:P——滑坡可能发生概率;

$B_0, B_1, \dots, B_n$ ——逻辑回归系数。

CF-LR耦合模型是利用确定系数法求取影响因子中类型量的CF值,将其作为逻辑回归模型的指标值,同时提取研究区地质灾害点与非地质灾害点的CF值,建立逻辑回归方程,计算回归系数,根据结果评估研究区的地质灾害危险性。

#### 2.1.2 全局空间自相关

莫兰指数(Moran's I)是全局空间自相关的一种判断指标,用来度量空间单元聚集程度。其值分布在[-1.1]之间,大于0一般表示空间正相关,小于0表示空间负相关,在本文中值越趋近于1,区域与其周边地区地质灾害危险性的空间相关性越大;越趋近于-1,则空间差异性越大。在定西地区地质灾害危险性评价结果的基础上,选择不同空间尺度的评价单元,求取每个评

价单元的地质灾害危险性均值,并通过Moran's I指数分析该区域地质灾害的空间分布模式,公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: $x_i, x_j$ ——第*i*个、第*j*个评价单元格地质灾害危险性均值;

$\bar{x}$ ——全部评价单元格地质灾害危险性均值;

$w_{ij}$ ——空间权重矩阵;

$n$ ——评价单元格个数。

#### 2.1.3 局部空间自相关

局部空间自相关分析可以更加准确地把握空间异质性。文章采用空间联系区域指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)来判断区域内的局部空间自相关类型,在Moran's I计算结果基础上获取LISA聚类图,以分析区域内部地质灾害的空间集聚特征。计算公式为:

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

式中: $s$ ——空间权重矩阵各元素之和;

其余变量的含义同式(3)。

### 2.2 评价因子的选取

研究区深处内陆腹地,区内地势起伏较大,总体上西高东低,地貌类型复杂,丘陵起伏,沟壑纵横。气象水文条件差异很大,降水集中、局地性暴雨频繁,随着降水的增加,特别是强降雨的发生,更容易诱发地质灾害<sup>[13]</sup>。同时,人类活动的范围和强度迅速增加,加速了地质环境的退化。不仅如此,该区域植被稀疏、生态环境脆弱,受区域构造控制,特殊的地层岩性组合及新构造运动是地质灾害发育的地质基础。区内河流属于渭河水系,受河流侵蚀冲刷作用,减弱了坡体的抗滑能力,易诱发地质灾害。此外,区域内各级道路在建设过程中会对斜坡造成破坏,使得坡体内的应力发生一定变化,进而导致地质灾害的发生<sup>[14]</sup>。当前,由于这些因素的综合影响,使得定西地区成为地质灾害的多发区。因此,结合前人研究成果以及相关文献资料,选取与区域地质灾害发育相关性较大的坡度、坡向、降水、土地利用、工程岩组、距河流距离、距道路距离作为地质灾害危险性评价的指标因子(图2)。

## 3 实验过程及结果分析

### 3.1 地质灾害危险性分析

将CF值作为自变量(表2),将是否发生地质灾害

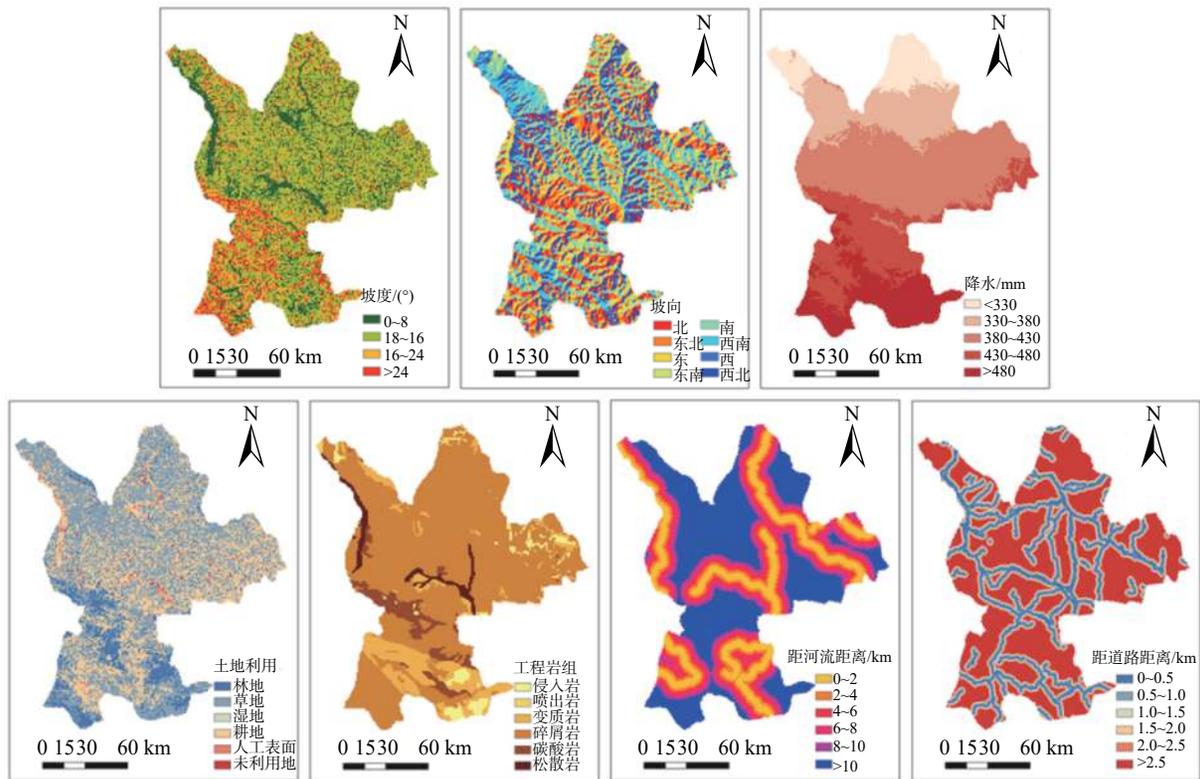


图2 地质灾害危险性评价因子空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution pattern of geological hazard sensitivity assessment factors

作为因变量(1代表曾发生过地质灾害,0代表没有发生过地质灾害),利用SPSS软件进行二元逻辑回归, $B$ 值代表了各因子的回归系数,Wals值代表了各孕灾因子的重要程度,发现主要驱动因子为降水、坡向、工程岩组、土地利用类型与距道路距离(表3)。根据回归系数,结合式(2)得到逻辑回归方程:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{1 + e^{-Y}} \\ Y = 0.66 - 3.284x_1 + 1.506x_2 + 1.766x_3 + 1.305x_4 + 2.458x_5 + 0.940x_6 + 1.110x_7 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P$ ——地质灾害发生的概率;

$x_1 \sim x_7$ ——坡度、坡向、降水、土地利用、工程岩组、距河流距离、距道路距离的CF值。

根据式(5)算出地质灾害发生的概率 $P$ ,利用自然间断点法,将定西地区地质灾害危险性分区分为5类(图3):极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区与极低危险区,面积比例分别为15.98%、22.02%、23.74%、22.59%、15.67%(表4)。地质灾害危险性呈现中部高,南北两侧较低的特征。极高与高危险区主要分布在临洮县西部与岷县西北部的洮河两岸、漳县漳河两岸、通渭县南部与北部、陇西县中部、渭源县东部地区与安定区关川河下游两岸。该区域内岩石破碎,土质疏松,水

系较为发育,受到人类工程活动影响,地质灾害频发。中危险区沿着极高与高危险区的外围分布,该区域降水量集中,植被覆盖率低。极低与低危险区主要分布在定西地区北部与南部,在此区域内地势相对和缓,构造裂隙不发育,地质灾害发生频率较低。

### 3.2 模型评价精度验证

利用ROC曲线对CF-LR耦合模型进行精度验证<sup>[15]</sup>,ROC曲线与横纵轴所围成的面积为AUC,其范围介于0~1之间,越接近1,模型模拟效果越好。将研究区80%的地质灾害点应用于地质灾害危险性评价,将剩余的20%的点应用于结果验证,在选取方式方面,必须保证80%的样本点和20%的检验点都均匀分布在整个研究区内。在选取非地质灾害检验点方面,为了尽可能地保证选取结果的合理性和客观性,忽略人为因素的主观影响,主要通过ArcGIS中的Create random Points工具,选取与地质灾害检验点同等数量的非地质灾害检验点(图4),所选取的地质灾害检验点与非地质灾害检验点均匀的分布在研究区内,并且在整个研究区各个区域基本都有分布,可用于检验整个研究区域的地质灾害危险性。在此基础上,基于ArcGIS中的Zonal Statistics工具,分别统计地质灾害检验点与非地质灾害检验点的危险性值,同时将地质灾害检验点与非地质灾害检验点分

表 2 各因子 *CF* 值计算结果  
Table 2 Calculation result of *CF* value of each factor

评价因子	类别量	灾害点数	<i>CF</i>	评价因子	类别量	灾害点数	<i>CF</i>
坡度/(°)	0~8	108	0.124	坡向	北	31	-0.472
	8~16	162	-0.051		东北	48	-0.277
	16~24	103	-0.023		东	45	-0.175
	>24	45	-0.050		东南	69	0.331
降水量/mm	<330	26	-0.327		南	66	0.219
	330~380	43	-0.420		西南	77	0.320
	380~430	193	0.193		西	44	-0.000
	430~480	125	0.315		西北	38	-0.140
	>480	31	-0.514	0~2 000	84	0.243	
	土地利用	林地	20	-0.535	2 000~4 000	63	0.208
草地		194	-0.086	4 000~6 000	61	0.177	
湿地		5	0.655	6 000~8 000	49	0.108	
耕地		179	0.148	8 000~10 000	37	-0.141	
人工表面		17	0.559	>10 000	131	-0.250	
未利用地		4	0.498	<500	79	0.337	
工程岩组		侵入岩	3	-0.805	500~1 000	81	0.242
		喷出岩	1	-0.378	1 000~1 500	23	-0.027
		变质岩	63	0.188	1 500~2 000	28	-0.129
		碎屑岩	311	-0.007	2 000~2 500	30	0.218
	碳酸岩	19	-0.250	>2 500	184	-0.207	
	松散岩	22	0.439				

表 3 逻辑回归分析结果  
Table 3 Results of logical regression analysis

	<i>B</i>	<i>SE</i>	<i>Wals</i>	<i>df</i>	<i>sig</i>
坡度	-3.284	1.255	6.852	1	0.009
坡向	1.506	0.313	23.199	1	0.000
降水	1.766	0.267	43.704	1	0.000
土地利用	1.305	0.433	9.092	1	0.003
工程岩组	2.458	0.606	16.444	1	0.000
距河流距离	0.940	0.940	5.368	1	0.021
距道路距离	1.110	0.393	7.981	1	0.005
常数项	0.066	0.086	0.593	1	0.441

注: *B*代表各因子的回归系数, *SE*为标准误差, *Wals*为卡方值, *df*为自由度, *sig*表示显著性。

布赋值为 1 和 0, 导入 SPSS 中进行 ROC 曲线的计算, 得出 *AUC* 值为 0.824(图 5), 说明 *CF-LR* 耦合模型能够客观准确的对定西地区地质灾害危险性进行预测。

### 3.3 地质灾害的空间自相关分析

#### 3.3.1 不同空间尺度上地质灾害的 Moran's *I* 指数

为了刻画在不同空间尺度下地质灾害的空间集聚特征, 以 1 km×1 km、2 km×2 km、3 km×3 km、4 km×4 km、5 km×5 km 为基本空间尺度, 探讨地质灾害的空间自相关格局。

随着空间尺度的不断增大, 地质灾害空间自相关性呈现先增大后减小的趋势(图 6)。其原因主要包括空

间尺度的由低到高, 数据得到平滑处理以及由于 Moran's *I* 指数对距离呈现非线性特征的影响。

在 3 km×3 km 的空间尺度上, 定西地区地质灾害危险性的空间自相关值达到最大。以 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 km 为距离阈值构造空间权重矩阵(图 7)。

综上, 地质灾害危险性在 3 km×3 km 的空间尺度下, 5 km 的距离阈值内空间自相关值达到最大, Moran's *I* 指数为 0.739。同时, Moran's *I* 指数全部为正值, *Z* 值检验结果显著, 说明地质灾害在空间上并非随机发生的, 而是存在显著的空间正相关。

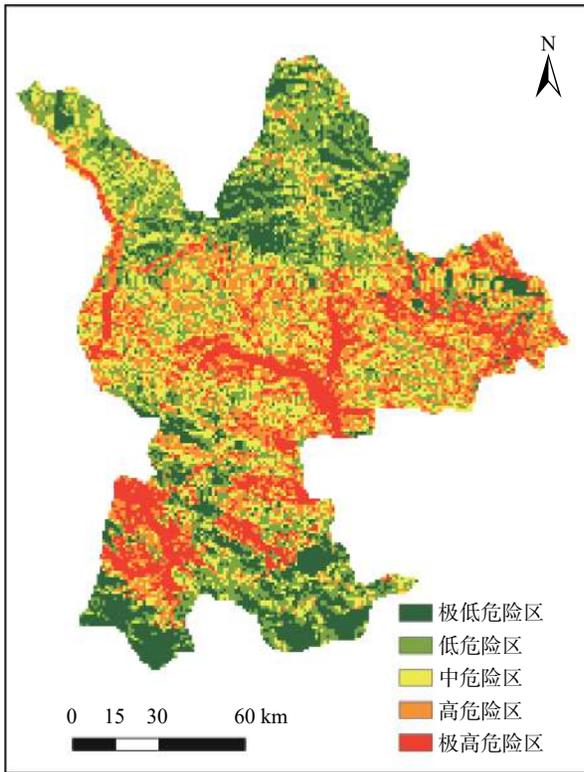


图3 地质灾害危险性评价分区图

Fig. 3 Geological hazard distribution map

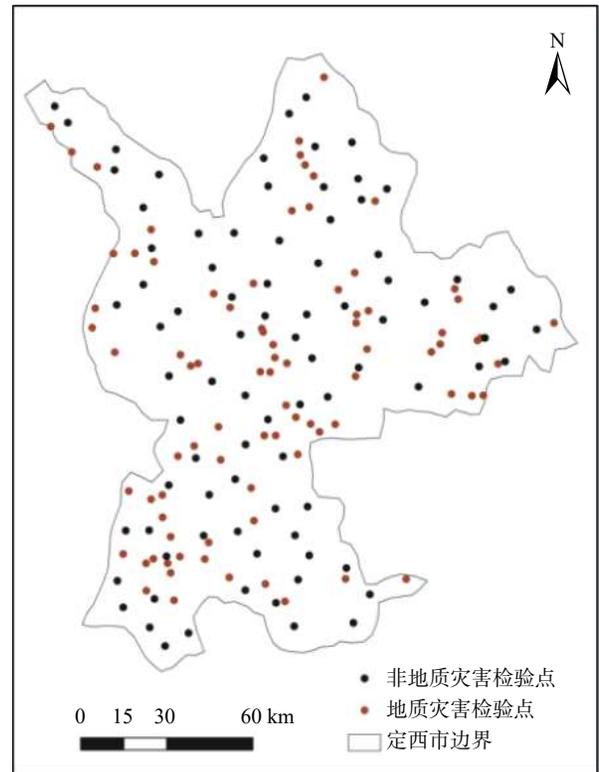


图4 地质灾害检验点与地质灾害非检验点空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of geological hazard inspection points and non-geological hazard inspection points

表4 地质灾害危险性分区统计表

Table 4 Zonal statistical table of geological hazard

敏感性等级	极高危险区	高危险区	中危险区	低危险区	极低危险区
该级别区域面积/km <sup>2</sup>	3 089	4 258	4 590	4 368	3 030
占研究区面积比/%	15.98	22.02	23.74	22.59	15.67
灾害点个数	135	124	100	47	12
占灾害样本点总数比/%	32.30	29.67	23.92	11.24	2.87

### 3.3.2 地质灾害危险性的局部空间自相关

地质灾害危险性表现出显著的局部空间集聚特征,并且以高高集聚与低低集聚为主。高高集聚主要以团块的形式分布在临洮县西部、岷县西北部、漳县县城两岸、通渭县南部,陇西县中部与渭源县东部;而在岷县的东部与南部、安定区的东部与西部和临洮县的东部则表现出低低集聚的特征。其余高低集聚与低高集聚大多零星分布,无明显集中(图8)。

## 4 讨论

通过确定系数与 logistic 回归分析发现,地质灾害危险性呈现中部高,南北两侧较低的特征。这与裴惠娟等<sup>[6]</sup>的结论基本一致。甘肃定西地区具有黄土高原丘

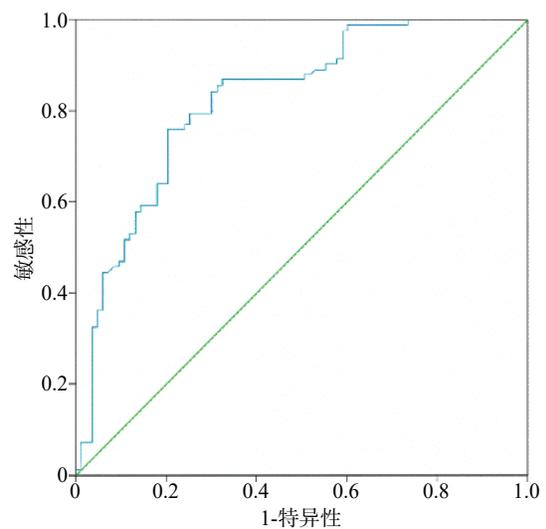


图5 ROC 曲线

Fig. 5 ROC curve

陵沟壑区的典型地貌特征,区内地形复杂、沟壑纵横,地势起伏显著,为地质灾害的发育创造了条件。研究区地质灾害主要分布在坡度为 8°~16°的区间范围内,地质灾害点的个数为 162 个,占研究区地质灾害总数的 39%。坡度在 0°~8°和 16°~24°区间内的地质灾害点数量分别占总数的 26% 和 25%,这些坡度多分布在研

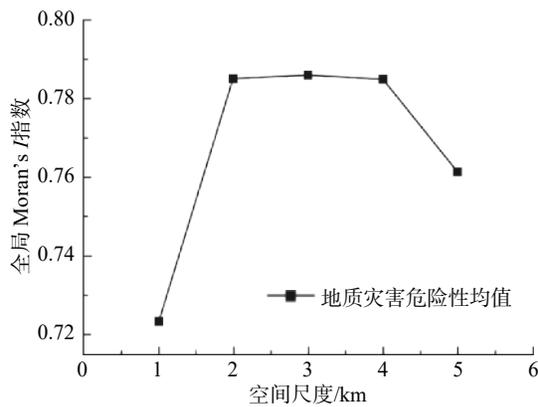


图 6 不同空间尺度上定西地区地质灾害的 Moran's I 指数图

Fig. 6 Global Moran's I index map of geological hazards in Dingxi region on different spatial scales

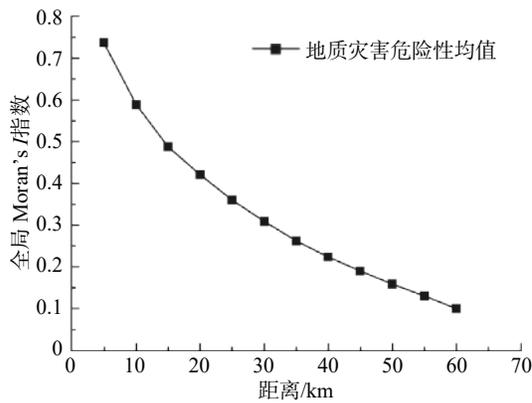


图 7 3 km x 3 km 空间尺度上定西地区地质灾害的 Moran's I 指数图

Fig. 7 3 km x 3 km Global Moran's I index of geological disasters in Dingxi region on a spatial scale

究区的中南部区域,坡度大于 24°的地区地质灾害相对较少,基本不发育。研究区的不同坡向在区域内呈错综分布,其中,南坡和北坡的地质灾害点个数分别为 66 和 31 个,东南坡和东北坡的地质灾害点个数分别为 69 和 48 个,西南和西北坡的地质灾害点个数分别为 77 和 38 个,通过对比发现研究区南坡相比较于北坡更容易发生地质灾害。这主要是因为阳坡和阴坡的地质灾害危险性差异与热量和水分的分异作用有关<sup>[17]</sup>。降水主要呈现南高北低的空间分布特征,研究区域在 380 ~ 430 mm、430 ~ 480 mm 的降水区间范围内的地质灾害个数相对较多,多集中在南部区域,分别为 193 和 125 个,占总地质灾害个数的比率分别为 46% 和 30%。研究区的土地利用类型多为耕地和草地,主要分布在研究区的南部和中北部区域,这些区域的地质灾害点个数相对较多,分别占总地质灾害点个数的 43% 和 46%。根据研究区岩性和第四系松散沉积物的分布、厚度、物理力学性质等,将研究区的工程岩组分为侵入岩、喷出

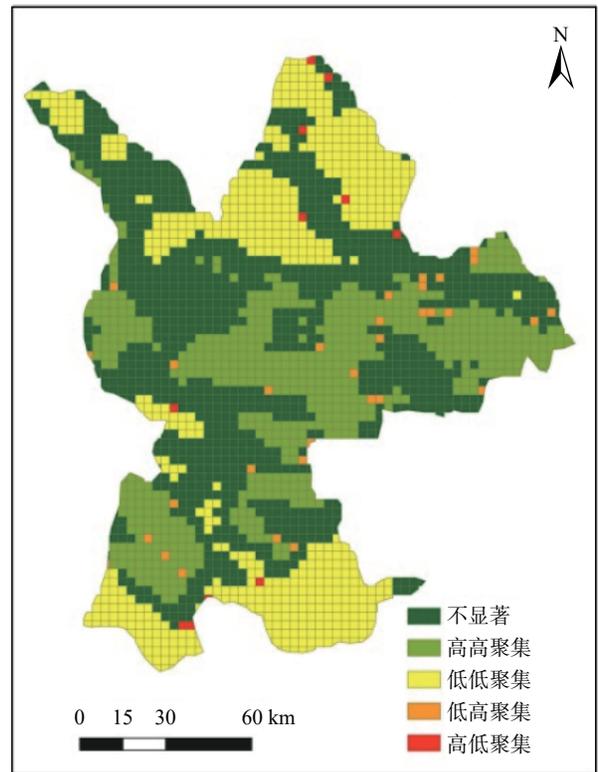


图 8 定西地区地质灾害的 LISA 图

Fig. 8 LISA map of geological hazards in Dingxi region

岩、变质岩、碎屑岩、碳酸岩和松散岩。研究区的松散岩多集中分布在研究区的西部和中东部区域,其分布的地质灾害点个数分别占总地质灾害点个数的 74%,由于其稳定性较差,在外力作用下极易发生滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害。区域内的河流主要分布在南部和中东部区域,在距离河流 2 000 ~ 4 000 m 的范围内,研究区相对更容易发生地质灾害,其占地质灾害的总数为 15%。道路网贯穿整个区域,在距离道路中心 1 000 m 的范围内,相对易发生地质灾害,其地质灾害点数占总地质灾害点个数的 19%。

为了探讨驱动因子与地质灾害危险性之间的相关关系,采用双变量空间自相关模型进行分析。由于降水、坡向和工程对地质灾害的影响相对较大(表 3),因此,主要探讨地质灾害危险性、降水、坡向和工程岩组的自相关特性,发现三者与地质灾害危险性的空间自相关 Moran's I 指数分别为 0.655、0.154 与 0.265,表明地质灾害与三个驱动因子呈显著的空间正相关。地质灾害危险性、降水、坡向以高高聚集为主,分布区域包括渭源县、陇西县、通渭县与漳县,这些地区降水季节性较强,易引发地质灾害,见图 9(a)。地质灾害危险性、坡向以高高聚集和低低聚集为主,高高聚集发生在阳坡,低低聚集发生在阴坡,见图 9(b)。地质灾害

危险性与工程岩组以高高聚集与低低聚集为主,高高聚集发生在碳酸岩与松散岩分布的区域,这两类岩石岩性松软,易发生崩塌、滑坡等灾害,而低低聚集分布的区域以侵入岩与喷出岩为主,岩性坚硬,地质灾害发生的频率较小,见图9(c)。

甘肃省定西地区的地质灾害类型在不同区域表现不同,在利用空间自相关进行分析时,主要是基于研究区的区域地质灾害危险性进行评价,即我们不是针对原始的地质灾害点,例如滑坡、崩塌、泥石流进行单独评

价,而是将它们作为一个整体,对栅格尺度的地质灾害危险性评价,主要侧重于探讨整个区域的地质灾害危险性空间聚集特征。然而,由于灾害点类型自身的属性,例如,在定西地区的大部分区域主要以浅层滑坡为主,而定西地区南部主要以深层滑坡为主,这可能会对评估结果产生一些影响,在下一步的研究中,我们将针对地质灾害类型,分别探究不同地质灾害类型即滑坡、崩塌和泥石流各自的空间聚集特征,以及同一灾害类型下比如深层滑坡和浅层滑坡各自的空间聚集特征。

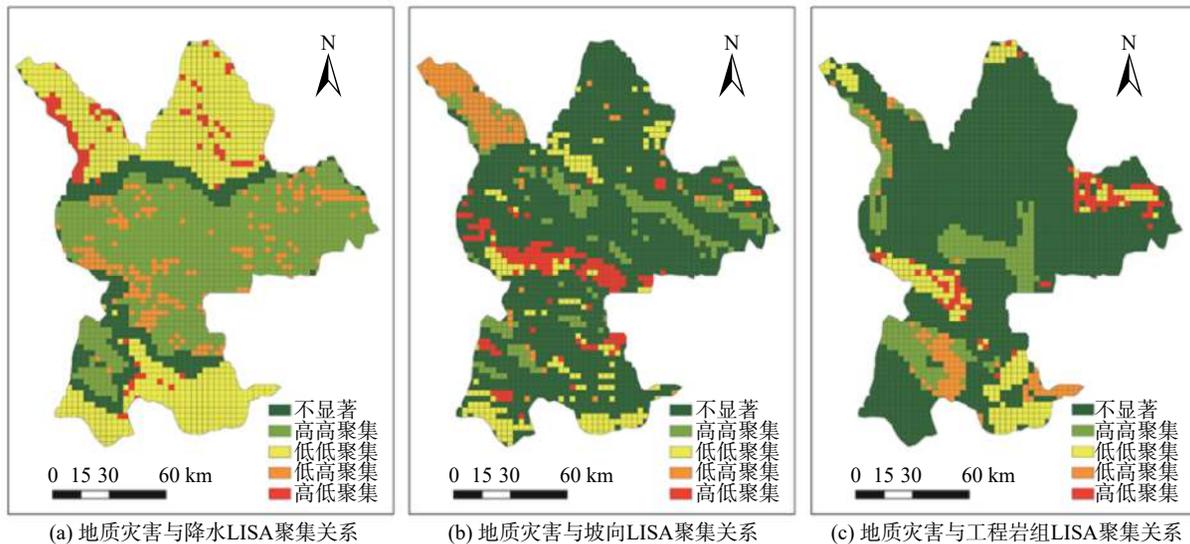


图9 地质灾害与驱动因子 LISA 聚集关系

Fig. 9 The LISA aggregation between geological disaster and driving factors

## 5 结论

基于定西地区地质环境特征,选取7个地质灾害危险性评价因子,利用CF-LR耦合模型获取定西地区地质灾害空间分布格局,在此基础上利用空间自相关分析探讨不同尺度上地质灾害危险性的空间集聚模式,结果表明:

(1)地质灾害危险性呈现中部高,南北两侧低的特征,其主要驱动因子为降水、坡向、工程岩组、土地利用与距道路距离,其中,地质灾害与降水、坡向和工程岩组的空间关系主要为高高聚集。

(2)ROC曲线的AUC值为0.824,说明CF-LR耦合模型能够客观准确的对定西地区地质灾害危险性进行预测。

(3)地质灾害危险性存在尺度依赖性,在3 km×3 km的空间尺度上呈显著正相关,且随距离阈值增加而降低。当距离阈值为5 km时,地质灾害危险性值高高聚集与低低聚集区以团块的形式聚集分布,而高低聚集与

低高聚集区多以零星状分布。

## 参考文献 (References):

- [1] 唐川,马国超.基于地貌单元的小区域地质灾害易发性分区方法研究[J].地理科学,2015,35(1):91-98. [TANG Chuan, MA Guochao. Small regional geohazards susceptibility mapping based on geomorphic unit [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1): 91-98. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 牛全福,陆铭,李月锋,等.基于灰色关联与粗糙依赖度的甘肃兰州市区泥石流危险性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(5):48-56. [NIU Quanfu, LU Ming, LI Yuefeng, et al. Hazard assessment of debris flow in Lanzhou City of Gansu Province based on methods of grey relation and rough dependence [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 48-56. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等.基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价[J].国土资源遥感,2019,31(3):183-193. [ZHANG Xiaodong, LIU Xiangnan, ZHAO

- Zhipeng, et al. Geological disaster hazard assessment in Yanchi County based on AHP [ J ] . *Remote Sensing for Land Resources*, 2019, 31(3): 183 - 193. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 孙长明, 马润勇, 尚合欣, 等. 基于滑坡分类的西宁市滑坡易发性评价 [ J ] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 173 - 181. [ SUN Changming, MA Runyong, SHANG Hexin, et al. Landslide susceptibility assessment in Xining based on landslide classification [ J ] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 173 - 181. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 宁娜, 马金珠, 张鹏, 等. 基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价 [ J ] . *资源科学*, 2013, 35(4): 892 - 899. [ NING Na, MA Jinzhu, ZHANG Peng, et al. Debris flow hazard assessment for the Bailongjiang river, southern Gansu [ J ] . *Resources Science*, 2013, 35(4): 892 - 899. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 刘明学, 陈祥, 杨珊妮. 基于逻辑回归模型和确定性系数的崩滑流危险性区划 [ J ] . *工程地质学报*, 2014, 22(6): 1250 - 1256. [ LIU Mingxue, CHEN Xiang, YANG Shanni. Zonation of landslide risk with logistic regression model and certainty factor [ J ] . *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1250 - 1256. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. 基于GIS与确定性系数分析方法的汶川地震滑坡易发性评价 [ J ] . *工程地质学报*, 2010, 18(1): 15 - 26. [ XU Chong, DAI Fuchu, YAO Xin, et al. GIS platform and certainty factor analysis method based Wenchuan earthquake-induced landslide susceptibility evaluation [ J ] . *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1): 15 - 26. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 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) ]
- [ 9 ] 李慧, 王云鹏, 李岩, 等. 珠江三角洲土地利用变化空间自相关分析 [ J ] . *生态环境学报*, 2011, 20(12): 1879 - 1885. [ LI Hui, WANG Yunpeng, LI Yan, et al. A spatial autocorrelation analysis of land use change in Pearl River Delta [ J ] . *Ecology and Environment*, 2011, 20(12): 1879 - 1885. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 刘金雅, 汪东川, 孙然好, 等. 基于变化轨迹分析方法的生态用地流失空间关联研究 [ J ] . *地理研究*, 2020, 39(1): 103 - 114. [ LIU Jinya, WANG Dongchuan, SUN Ranhao, et al. Study on spatial relevance of ecological-land loss based on change trajectory analysis method [ J ] . *Geographical Research*, 2020, 39(1): 103 - 114. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 林金煌, 张岸, 邓超, 等. 闽三角城市群地质灾害敏感性评价 [ J ] . *地球信息科学学报*, 2018, 20(9): 1286 - 1297. [ LIN Jinhuang, ZHANG An, DENG Chao, et al. Sensitivity assessment of geological hazards in urban agglomeration of Fujian delta region [ J ] . *Geo-Information Science*, 2018, 20(9): 1286 - 1297. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 中国地质环境监测院编制. 中国典型县(市)地质灾害易发程度分区图集 [ M ] . 北京: 科学出版社, 2011. [ China Institute of Geological Environment Monitoring. Atlas of geological hazard susceptibility in typical counties (cities) in China [ M ] . Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese) ]
- [ 13 ] 覃伟, 徐智彬, 李东林. 渗透性与降雨强度对堆积层滑坡稳定性的影响 [ J ] . *地质与勘探*, 2016, 52(4): 743 - 750. [ QIN Wei, XU Zhibin, LI Donglin. Controls of permeability and rainfall intensity on accumulation landslide stability [ J ] . *Geology and Prospecting*, 2016, 52(4): 743 - 750. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 张欣, 王运生, 梁瑞锋. 基于GIS的小江断裂中北段滑坡灾害危险性评价 [ J ] . *地质与勘探*, 2018, 54(3): 623 - 633. [ ZHANG Xin, WANG Yunsheng, LIANG Ruifeng. Assessment of landslide hazard in the middle and northern Xiaojiang fault zone based on GIS [ J ] . *Geology and Prospecting*, 2018, 54(3): 623 - 633. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 谭玉敏, 郭栋, 白冰心, 等. 基于信息量模型的涪陵区地质灾害易发性评价 [ J ] . *地球信息科学学报*, 2015, 17(12): 1554 - 1562. [ TAN Yumin, GUO Dong, BAI Bingxin, et al. Geological hazard risk assessment based on information quantity model in Fuling district, Chongqing City, China [ J ] . *Geo-Information Science*, 2015, 17(12): 1554 - 1562. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 裴惠娟, 陈晋, 李雯, 等. 甘肃省地质灾害风险评估 [ J ] . *灾害学*, 2017, 32(2): 97 - 102. [ PEI Huijuan, CHEN Jin, LI Wen, et al. Geological disaster risk assessment in Gansu Province [ J ] . *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2): 97 - 102. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 冯磊, 孙保平, 康苗. 甘肃省定西市安定区土壤侵蚀潜在危险度评价及侵蚀背景空间分析 [ J ] . *吉林农业科学*, 2012, 37(4): 25 - 29. [ FENG Lei, SUN Baoping, KANG Miao. Appraisal and study on potential danger of soil erosion and spatial analysis on erosion background in Anding region, Dingxi City of Gansu Province [ J ] . *Jilin Agricultural Sciences*, 2012, 37(4): 25 - 29. (in Chinese with English abstract) ]