

# Regional Seismic-Flood Disaster Integrated Risk Assessment Based on Dynamic Spatial Panel

Shanshan Du, Ye Xue, Yaolong Liu, Chenchen Song

College of Economics and Management, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, China

## 基于动态空间面板的区域地震-洪涝灾害综合风险评估研究

杜姗姗, 薛晔, 刘耀龙, 宋晨晨

太原理工大学经济管理学院, 太原 030600, 中国

### Abstract

This paper comprehensively analyzes the hazards and vulnerability of natural disasters, applies Matlab and GIS tools, deeply analyzes the spatial-temporal characteristics of the comprehensive risk of earthquake-flood disasters, and further builds a dynamic spatial panel model based on different spatial weight matrixes, and further analyzes them. The spatial correlation and agglomeration characteristics of comprehensive earthquake-flood hazards in Lijiang City, Chuxiong Prefecture, and Pu'er City in Yunnan Province were carried out, and comprehensive risk assessments for two types of disasters were conducted. The results show that there is a significant positive spatial correlation between the comprehensive risk of earthquake-flood disasters, and the spatial spillover effect of disaster risk will decrease with the increase of inter-regional distance, and a high-risk area of risk will be formed in Pu'er City; the spatial and temporal distribution of disasters will be uneven and the earthquake. There is a big difference between disasters caused by floods and floods. Therefore, the coordination of regional disaster risk management can

effectively improve disaster prevention and reduction capabilities.

**Keywords:** earthquake disaster; flood disaster; comprehensive risk assessment; dynamic spatial panel model

### 摘要

本文从综合分析自然灾害的危险性和脆弱性角度,应用 Matlab 和 GIS 工具,深入分析了地震-洪涝灾害综合风险的时空特征,进一步构建了基于不同空间权重矩阵的动态空间面板模型,并深入分析了云南地区的丽江市、楚雄州以及普洱市地震-洪涝灾害综合风险的空间相关与聚集特征,开展了两类灾害的综合风险评估。结果表明:地震-洪涝灾害综合风险存在显著的正向空间相关性,灾害风险的空间溢出效应会随地区间距离的增长而减弱,且在普洱市形成了风险高危区;灾情时空分布不均衡,地震和洪涝灾害灾损差异大。因此,各地协同应对灾害风险,可有效提高防灾减灾能力。

**关键词:** 地震灾害; 洪涝灾害; 综合风险评估; 动态空间面板模型

### 1. 引言

自然因素和人为因素的共同作用导致多种灾害的威胁越来越严重。据世界经济论坛 2018 年 1 月 17 日发布的《2018 年全球风险报告》可知,全球风险将进一步加剧,其

中环境风险居首位，且对其产生影响的五项因素排名靠前<sup>[1]</sup>。因此，仅仅对单灾种风险评估的研究已不能满足综合灾害风险管理的需求，调查发现近年来灾害史研究呈现出明显的时空簇集现象，以揭示灾害的时空分布特征<sup>[2]</sup>，为了进一步提升防灾减灾能力及实现经济的可持续发展，本文对多灾种风险评估进行了深入的时空研究。

从分析方法上来说，对多灾种综合风险评估的研究，最初大多数学者选择概率论与数理统计方法对单灾种简单相加<sup>[3][4][5]</sup>。随着对灾害风险认识的不断深入，多灾种综合风险并不是单个灾害风险独立作用的过程，各种灾害风险间存在着相互关系，研究者开始将这种相互关系考虑在内，其中以耦合灾害理论和方法为主要的研究<sup>[6][7][8][9]</sup>。事实上，灾害的发生在时间和强度上都有很大的不确定性，这种不确定性既有不分明的部分，也有偶然的偶然部分，分别对应了灾害的模糊性和随机性，而以模糊集理论和方法为基础建立的模糊风险评估模型就具有一定的现实意义<sup>[10][11][12][13]</sup>。开展风险的空间差异性研究提供了不同的角度<sup>[14]</sup>。这些方法很好地描述了灾害风险的随机不确定性和模糊不确定性，在不考虑较长的时间尺度和空间影响的前提下，结果具有较高的可靠性，为人们开展减灾工作提供了重要的帮助。但是基本忽略灾害样本数据的空间属性，没有考虑地理空间效应对区域综合风险的影响，造成多灾种综合风险的评估结果与实际有较大偏差。一种优化方法就是 Anselin (1997) 提出的面板数据空间计量分析<sup>[15]</sup>，Elhorst (2005) 在非空间动态面板数据模型的基础上，提出用无条件极大似然方法估计空间动态面板自回归模型<sup>[16]</sup>。

因此，本文根据 Elhorst 的研究，通过构建不同形式的空间权重矩阵，建立动态空间面板模型考察丽江市、楚雄州和普洱市地震-洪涝灾害综合风险的空间相关和聚集现象，利用 Matlab 和 GIS 工具分别从时间和空间两个方面考证地震-洪涝灾害综合风险。

## 2. 材料和方法

### 2.1 研究区选择

在“一带一路”倡议下，云南省作为面向南亚、东南亚的辐射中心，具有重要的战略地位。由于地理、地震地质条件及自然因素影响，云南省频发地震和洪涝灾害。对云南省地震和洪涝灾害发生情况进行统计，灾害空间分布特征显著，丽江市、楚雄州和普洱市遭受地震和洪涝灾害较为严重，尤其频发洪涝灾害。本文研究区选择了地震和洪涝灾害数据比较丰富、发生时间覆盖比较广（1991-2015）的丽江市、楚雄州和普洱市。

### 2.2 指标体系与样本数据

本文基于区域灾害系统论，从危险性和脆弱性方面构建指标体系。地震-洪涝灾害综合风险用死亡人数、受伤人数、受影响人口数、人员伤亡和受影响的面积表征，从不同侧面反映灾害风险的严重程度；综合危险性的影响因素分为震级（地震）和降雨量（洪涝），表示灾害发生的强度；综合脆弱性指标包括人口密度、粮食种植密度和地均 GDP，其中人口密度用该地区的人口数与该地区土地面积的比值表示，粮食种植密度用该地区的粮食种植面积与该地区土地面积的比值表示，地均 GDP 用该地区的 GDP 总额与该地区土地面积的比值表示。

本文地震和洪涝灾害资料选 1991-2015 年，数据来源于《云南减灾年鉴》、《云南年鉴》、《云南统计年鉴》、《丽江年鉴》、《普洱年鉴》（2007 年 1 月 21 日，思茅市更名为普洱市）、《楚雄年鉴》，丽江市国民经济和社会发展统计公报、（思茅市）普洱市国民经济和社会发展统计公报、楚雄州国民经济和社会发展统计公报等。

采用熵权法确定地震-洪涝灾害综合风险评估指标体系中各指标权重  $w_i$ （表 1 和表 2），利用加权综合逐级计算各评价对象的评估指数  $\lambda_i$ ：

$$\lambda_i = \sum_{i=1}^m w_i P_i \quad (1)$$

其中， $P_i$  为指标标准化值， $m$  是评价指标数。

根据评价目的确立各评价指标的分级标准，将地震-洪涝灾害风险及因子等级进行划分。基于以上各指标的影响权重，进行加

表 1 地震-洪涝灾害综合风险指标权重值

地区	地震-洪涝灾害综合风险			
	综合危险性	综合脆弱性		
	震级/降雨量	地均 GDP	人口密度	粮食种植密度
楚雄州	1	0.48	0.22	0.30
丽江市	1	0.48	0.30	0.22
普洱市	1	0.44	0.35	0.22

表 2 地震-洪涝灾害综合风险标准化评估指数

指标	地震-洪涝灾害综合风险					
	地震灾害			洪涝灾害		
	楚雄州	丽江市	普洱市	楚雄州	丽江市	普洱市
受影响的面积	0.16	0.18	0.19	0.19	0.18	0.15
受影响的人口数	0.16	0.17	0.17	0.18	0.14	0.17
死亡人数	0.17	0.17	0.24	0.24	0.22	0.17
受伤人数	0.24	0.25	0.23	0.17	0.19	0.19
当年直接经济损失	0.28	0.22	0.18	0.22	0.26	0.32

权叠加获取危险性、脆弱性和风险评估结果,运用 GIS 空间分析功能,利用自然断点法将各指标数值分级。由表 3 所示,研究区地震-洪涝灾害综合危险性、综合脆弱性和综合风险划分为四个等级,分别表示为高、中等、较低、低。这样,评估结果和等级之间就建立了相对应的关系。

邻接矩阵 ( $W_1$ ) 表示不同相邻空间单元的危害风险具有相同的影响程度,实际上灾害风险在不同空间的影响程度存在差异,考虑区域特征对灾害风险的影响,进一步考察风险随距离衰减的速度,用距离空间权重矩阵进行模型对比。距离空间权重矩阵 ( $W_2$ ) 表示不同距离空间单元灾害风险的影响程度不同。

表 3 评价结果与等级之间的对应关系

等级	评价结果		
	综合危险性	综合脆弱性	综合风险
低	<=5	<=5.5	<=0.5
较低	5-5.5	5.5-6	0.5-1.5
中等	5.5-6	6-6.5	1.5-4.5
高	>=6	>=7	>=4.5

### 2.3 动态空间面板模型

#### (1) 空间权重矩阵

本文从地理特征角度建立空间权重矩阵,以刻画地震-洪涝灾害风险的空间效应。设定邻接权重矩阵表达空间单元的相互邻接关系,其中主对角线上的元素设为 0,其他元素满足:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{地区 } i \text{ 和地区 } j \text{ 相邻} \\ 0 & \text{地区 } i \text{ 和地区 } j \text{ 不相邻} \end{cases} \quad i \neq j$$

$$W_{2ij} = \begin{cases} 1/d_{ij}^2 & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases}$$

其中  $d_{ij}$  为地区  $i$  和地区  $j$  地理中心位置之间的距离。

#### (2) 空间相关性检验

为了利用动态空间面板模型解释区域地震-洪涝灾害风险及其所处空间的联系与影响,首先需要了解灾害风险的空间相关性和相关程度。本文采用 Moran's I 指数检验灾

害风险的全局空间相关性。定义如下：

$$Moran'I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (2)$$

其中  $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$ ,  $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$

式中,  $Y_i$  表示第  $i$  个地区观测值,  $n$  为个数,  $W_{ij}$  为空间权重矩阵。 $Moran'I$  指数取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $Moran'I > 0$  表示灾害风险存在空间正相关;  $Moran'I < 0$  表示灾害风险存在空间负相关, 绝对值越大空间相关程度越大;  $Moran'I = 0$  表示灾害风险无空间关联性。为确保本文全局空间相关性检验结论的稳健性, 用公式 (2) 计算  $Moran'I$  时空间权重矩阵分别选取邻接权重矩阵和距离权重矩阵, 用以检验地震-洪涝灾害综合风险的空间相关性, 结果见表 4。

表 4 全局  $Moran'I$  指数

变量	邻接权重矩阵	距离权重矩阵
$Moran'I$	0.112*	0.090*

注: \*\*\*, \*\*和\*分别表示在 1%、5%和 10%的显著性水平下显著。下同。

由表 4 可知,  $Moran'I$  均通过了 10% 的显著性检验, 表明地震-洪涝灾害风险在空间分布上具有显著的相关性, 即临近空间的灾害风险相互影响。因此, 应将空间因素纳入计量模型。为了进一步分析综合风险的空间相关性和集聚现象, 需要确定模型的具体形式。首先, 利用 LR 方法进行假设检验, 可得似然比检验显著性水平, 见表 5。由表 5 知, 动态空间面板模型 F 检验统计量的伴随概率  $P = 0.2547 (> 0.05 = \alpha)$ , 表明在 5% 的显著性水平下, 动态空间自相关模型优于动态空间杜宾模型。因此, 本文建立动态空间自相关面板模型。

为消除各变量之间的异方差性, 对标准化后的数据进行对数化处理。基于邻接权重矩阵和距离权重矩阵构建的动态空间计量模型分别记为模型 1 和模型 2, 最终建立如下模型:

模型 1:

$$\ln R_{it} = \theta \ln R_{it-1} + \rho W_{1ij} \ln R_{it} + \beta_1 \ln H + \beta_2 \ln V + \mu_{it} \quad (3)$$

模型 2:

$$\ln R_{it} = \theta \ln R_{it-1} + \rho W_{2ij} \ln R_{it} + \beta_1 \ln H + \beta_2 \ln V + \mu_{it} \quad (4)$$

其中:  $\ln R$ 、 $\ln H$  和  $\ln V$  分别表示地震-洪涝灾害综合风险对数、综合危险性对数和综合脆弱性对数;  $i$ 、 $j$  表示地区;  $t$  表示时间;  $\rho$  和  $\theta$  分别表示空间滞后弹性系数和时间滞后弹性系数;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别表示综合危险性弹性系数和综合脆弱性弹性系数;  $W$  为空间权重矩阵。

表 5 模型形式设定检验结果

检验对象	检验方法	P 值
动态空间面板模型	LR	0.2547

### 3. 结果和分析

#### 3.1 动态空间分析

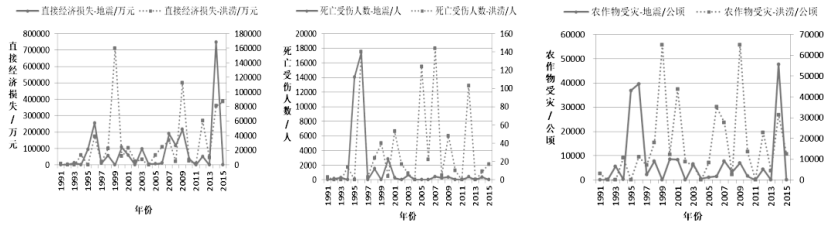
##### (1) 动态特征分析

时间上, 基于灾情视角。为把握地震和洪涝灾害对经济社会影响的动态性, 对 1991-2015 年研究区主要灾情指标 (直接经济损失、死亡受伤人数和农作物受灾) 分灾种进行统计。由图 1 可知, 1995-1997 年、2007 年和 2012 年研究区灾情较其他年份明显偏重, 1991-1994 年和 2003 年研究区灾情较其他年份偏轻, 地震和洪涝灾害损失差异大。

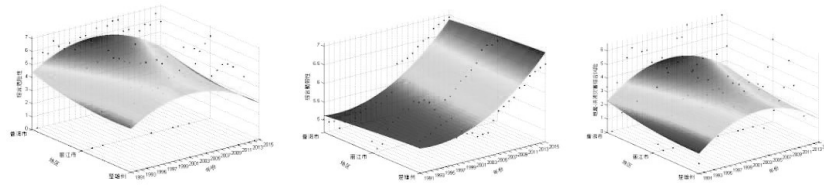
时间上, 基于灾害风险视角。1991-2015 年研究区地震-洪涝灾害综合危险性、综合风险大致呈现先升再降的态势, 综合脆弱性逐年递增。具体来看, 在 1996 年前和 2011 年后, 综合危险性较小, 1991-2011 年危险性逐年递增, 2005 年达到高值 (图 2a); 1991-2005 年研究区综合脆弱性水平低, 2005 年后脆弱性明显增大, 地区稳定性受到很大威胁, 自身抗干扰性变差 (图 2b); 1991-2011 年综合风险不断增大 (图 2c)。

##### (2) 空间特征分析

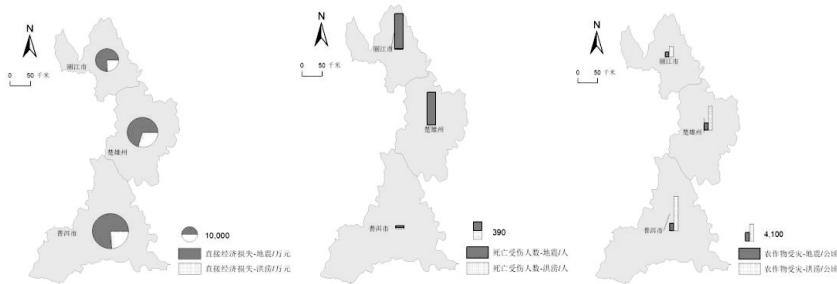
空间上, 基于灾情视角。由图 3 分地区分灾种从空间上深入分析灾害的经济社会



(a) 直接经济损失 (b) 死亡受伤人数 (c) 农作物受灾  
图 1. 1991-2015 年研究区主要灾情指标分灾种统计



(a) 综合危险性 (b) 综合脆弱性 (c) 综合风险  
图 2 地震-洪涝灾害综合危险性、综合脆弱性和综合风险的动态表达



(a) 直接经济损失 (b) 死亡受伤人数 (c) 农作物受灾  
图 3 1991-2015 年主要灾情指标分地

影响可知，地震和洪涝灾情呈现空间分布不均衡、灾损差异大等特点，具体来看，地震灾害造成的直接经济损失和死亡受伤人数最严重，洪涝灾害的农作物受灾明显高于地震灾害。

空间上，基于灾害风险视角。统计研究区地震-洪涝灾害综合危险性、综合脆弱性、综合风险空间的等级频率，结果表明，研究区空间差异性较小，均以较高危险性和较高风险为主，综合脆弱性偏低（图 4）。

### 3.2 动态空间面板模型估计及结果分析

将数据代入式 (3) - (4)，利用 stata 软件得到估计结果见表 6。首先，模型 1 中

$\theta = 0.0466$  和模型 2 中  $\theta = 0.0271$ ，说明地震-洪涝灾害综合风险存在动态性。表明灾害风险一旦形成，不仅对当期社会和自然造成极大的损害，对未来一期灾害风险水平也有很强的影响。其次，模型 1 中  $\rho = 0.0382$  和模型 2 中  $\rho = 0.0884$ ，表明正向空间溢出效应明显，某一地区发生自然灾害，会使邻近地区灾害风险水平的提高。模型 2 中  $\rho$  通过了 10% 的显著性检验，即基于距离空间权重矩阵具有显著的空间相关性，说明地震-洪涝灾害风险的空间传递效应随着地理距离发生衰减。最后， $\beta_1 > 0$  和  $\beta_2 > 0$  表明危险性和脆弱性均与综合风险成正相关，模型 1 中  $\beta_1 = 0.7183$ 、 $\beta_2 = 0.1998$  和模型 2 中

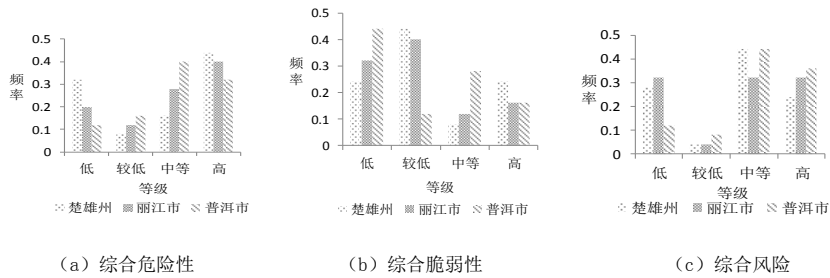


图 4 等级频率统计

$\beta_1 = 0.7198$ 、 $\beta_2 = 0.1959$ ，均有  $\beta_1 > \beta_2$ ，表明综合危险性影响强度更大。

表 6 地震-洪涝灾害综合风险的估计结果

变量	模型 1	模型 2
$\theta$	0.0466	0.0271
$\rho$	0.0382	0.0884*
$\beta_1$	0.7183***	0.7198***
$\beta_2$	0.1998	0.1959
_cons	-1.6181	-1.6998

#### 4. 结论

区域之间地震-洪涝灾害综合风险存在显著的正向空间相关性，危险性显著地促进了地区风险水平的提高。地震-洪涝灾害综合风险从北向南呈递增趋势，普洱市风险水平最高，研究区中等以上风险频率接近 1。进入 21 世纪以来，由于灾害发生次数增多和脆弱性增大，风险水平有明显提高。地震和洪涝灾情时空分布不均衡，这与地区的空间关联有关。

#### 参考文献

[1] [http://wap.eastmoney.cn/3g/news/article,0\\_0,1,20180118823168965.shtml?from=groupmessage&isappinstalled=0](http://wap.eastmoney.cn/3g/news/article,0_0,1,20180118823168965.shtml?from=groupmessage&isappinstalled=0).

[2] 卜风贤, 历史灾害研究中的若干前沿问题, 中国史研究动态, 2017, (06): 27-35.

[3] Bell R, Glade T. Multi-hazard analysis in natural risk assessment, Risk Analysis, 2004, 9: 197-206.

[4] Dilley M, Chen R S, Deichmann U, et al. Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis, Washington DC: Hazard

Management Unit, World Bank, 2005, 1-132.

[5] 魏一鸣, 范英, 金菊良, 洪涝灾害风险分析的系统理论, 管理科学学报, 2001, (3): 1-5.

[6] Havenith H B, Strom A, Torgoev I, et al. A.Tien Shan Geohazards Database: Earthquakes and landslides, Geomorphology, 2015, 249: 16-31.

[7] Wu Y A. Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River basin, China, Nat Hazards, 2015, 78(4): 635-651.

[8] 崔云, 孔纪名, 吴文平, 汶川地震次生山地灾害链成灾特点与防治对策, 自然灾害学报, 2012, (01): 109-116.

[9] 薛晔, 刘耀龙, 张涛涛, 耦合灾害风险的形成机理研究, 自然灾害学报, 2013, (02): 44-50.

[10] 何耀耀, 宋晓晨, 万金红, 杨善林, 考虑决策者偏好的洪涝灾害模糊聚类迭代评估模型, 系统工程理论与实践, 2016, 04: 33-38.

[11] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于可变模糊集理论的洪水灾害风险分析, 农业工程学报, 2012, (3): 126-132.

[12] 邹强, 周建中, 周超, 等. 基于最大熵原理和属性区间识别理论的洪水灾害风险分析, 水科学进展, 2012, (3): 323-333.

[13] 薛晔, 陈报章, 黄崇福, 严建武, 多灾种综合风险评估软层次模型, 地理科学进展, 2012, (03): 353-360.

- [14] Zhao S J, Zhang Q. Risk assessment of crops induced by flood in the three northeastern provinces of China on small space-and-time scales. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2012, 2(3): 201-208.
- [15] Anselin L, Varga A, Acs Z. Local Geographic Spillovers Between University Research and High Technology Innovations. *Journal of Urban Economics*, 1997, 42: 422-448.
- [16] Elhorst J P. Unconditional maximum likelihood estimation of linear and log-linear dynamic models for spatial panels. *Geographical Analysis*, 2005, 1: 85-106.