

引用格式:熊俊楠,赵云亮,程维明,等.四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1443-1456. [ Xiong J N, Zhao Y L, Cheng W M, et al . Temporal-spatial distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(10):1443-1456. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180193

# 四川省山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究

熊俊楠<sup>1,2</sup>, 赵云亮<sup>1</sup>, 程维明<sup>2</sup>, 郭良<sup>3,4\*</sup>, 王楠<sup>2</sup>, 李伟<sup>1</sup>

1. 西南石油大学土木工程与建筑学院, 成都 610500; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 4. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038

## Temporal-spatial Distribution and the Influencing Factors of Mountain-Flood Disasters in Sichuan Province

XIONG Junnan<sup>1,2</sup>, ZHAO Yunliang<sup>1</sup>, CHENG Weiming<sup>2</sup>, GUO Liang<sup>3,4\*</sup>, WANG Nan<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Chinese Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China

**Abstract:** The temporal-spatial distribution and influencing factors of mountain-flood disaster are a key issue in the disaster data mining. Using the historical mountain-flood catastrophe data that is learned from the National Mountain Flood Disaster Investigation Project from 1950 to 2015 in the Sichuan Province, and employing the methods in geo-statistics, geographic detector and geo-spatial analysis, this paper systematically analyzed the temporal-spatial distribution of historical mountain-flood disaster and the influencing factors in Sichuan Province. The main findings are the following : (1) The total amount of mountain-flood disasters in the Sichuan Province, from 1950 to 2015, remained stable and then increased rapidly. In addition, the catastrophe mainly occurred from May to September, especially in July every year. (2) The frequency of county disasters over Sichuan showed a decreasing trend from south to north. The average rainfall during historical mountain-flood disaster (ARD) increased exponentially from east to west, and decreased from middle to north. (3) From May to September each year and from 1950s to 2010s, the center of gravity and the elliptical center of each standard deviation of the accumulated mountain-flood disaster are concentrated in the central part of Sichuan, moving to the northeast. The accumulated disaster points emerged in a pattern of southwest-northeast. (4) The spatial autocorrelation analysis indicates a positive spatial correlation between the amount of mountain-flood disaster and ARD in county area. (5) The geographic detector analysis indicates that natural factors, rainfall, human activity and other factors have a

收稿日期:2018-04-16;修回日期:2018-06-22.

基金项目:中国水利水电科学研究院全国山洪灾害调查评价项目(SHZH-IWHR-57);国家自然科学基金项目(51774250);西藏自治区科技支撑计划项目(省 809);西南石油大学科技创新团队项目(2017CXTD09). [ **Foundation items:** IWHR (China Institute of Water Resources and Hydropower Research) National Mountain Flood Disaster Investigation Project, No.SHZH-IWHR-57; National Natural Science Foundation of China, No.51774250; The Tibet Autonomous Region Science and Technology Support Project, No.809; Southwest Petroleum University of Science And Technology Innovation Team Projects, No.2017CXTD09. ]

作者简介:熊俊楠(1981-),男,四川南充人,副教授,主要从事地理信息系统与灾害风险分析方面的研究。

E-mail: neu\_xjn@163.com

\*通讯作者:郭良(1960-),男,教授级高工,主要从事山洪灾害防治研究。E-mail: guol@iwhr.com

great influence on the temporal-spatial distribution of mountain-flood disaster. In particular, the main driving factors are the rainfall index, standard deviation of elevation and slope. The results provide a theoretical basis, scientific and technological support for the investigation of the temporal-spatial distribution characteristics of mountain-flood disaster in the Sichuan Province, which can also benefit the monitoring and early warning, the risk assessment, the prevention and control of mountain-flood disaster in small watersheds.

**Key words:** mountain flood disaster; spatial and temporal distribution; spatial autocorrelation; geographic detector

**\*Corresponding author:** GUO Liang, E-mail: guol@iwhr.com

**摘要:**山洪灾害时空分布规律及其影响因素,是灾害时空数据挖掘领域所关注的重点问题。本研究采用1950–2015年四川省历史山洪灾害事件数据,结合地统计、地理探测器、空间分析等方法,系统地分析了四川省1950–2015年历史山洪灾害的时空分布规律及其影响因素。结果表明:① 1950–2015年四川省山洪灾害数量整体呈先稳定后增长的趋势;山洪灾害主要集中在5–9月,7月覆盖率100%。② 县域灾害频次在南–北方向呈递减分布趋势;平均降雨量(历史山洪灾害过程降雨的平均值)在东–西方向呈指数型增长趋势,南–北方向由中部向南北递减。③ 1950s–2010s和5–9月历史累计山洪灾害重心及各标准差椭圆中心集中在四川中部地区,向东北方向移动,累计灾害点空间分布呈西南–东北格局。④ 县域山洪灾害数量及平均降雨量呈空间正自相关。⑤ 地理探测器分析表明自然因素、降雨、人类活动等因素对山洪灾害时空分布影响较大,其中不同降雨指标、高程标准差、坡度是山洪灾害时空分布规律的主要驱动因素。研究结果对查清四川省山洪灾害时空分布特征及小流域山洪监测预警、风险评价、防治区划等提供坚实的理论基础和科技支撑。

**关键词:**山洪灾害;时空分布规律;标准差椭圆;空间自相关;地理探测器

## 1 引言

山洪灾害是众多地质灾害灾种之一,具有隐蔽性高、破坏性强、持续性长以及规模巨大等特点<sup>[1–2]</sup>。四川省地处中国西南地区,降雨分布差异明显,地形地貌复杂,山洪灾害屡屡发生。据已有统计数据显示,四川省山洪灾害平均成灾频次居全国首位,历史山洪灾害数量约占全国总数的1/3。四川省现有153个市、区、县,2364个乡镇、4042家企业面临山洪的直接威胁<sup>[3]</sup>,近年来,随着山区社会经济的发展,山洪灾害已经成为制约山区社会经济发展的主要灾害之一。

近年来,中国有不少学者针对四川省或省局部地区山洪、泥石流、滑坡等的易损性、危险性和风险评估与区划<sup>[4–5]</sup>等进行了大量研究,一部分对四川省山洪泥石流灾害的监测预警系统<sup>[6–8]</sup>和典型区域泥石流灾害与其相关的单因素等进行研究<sup>[9–11]</sup>,少部分人员对山洪灾害的时空分进行研究,刘檣漪等<sup>[12]</sup>对中国历史山洪灾害的分布分析表明,全国3/5的山洪灾害集中在东南低山丘陵平原地区、西南中低山高原盆地大区;杨红娟等<sup>[13]</sup>研究表明四川省泥石流分布范围和高发区主要集中在大的断裂带附近,与暴雨雨量的关系密切,且多以群发性泥石流为主,灾害发生时降雨量未达到大雨水平;郁淑华等<sup>[14]</sup>研

究表明四川盆地泥石流、滑坡均多发于5–8月份,由盆地西南向西北推进,气象成因为盆地多暴雨;张乾柱等<sup>[15]</sup>研究指出重庆山洪灾害高发区主要集中在降雨量为1000~1300 mm、海拔200 m及坡度15°以下的山丘地区;高延超等<sup>[3]</sup>研究表明溪河洪水、泥石流以及滑坡综合灾害造成的灾损最为严重。目前针对四川省山洪灾害的相关研究,主要集中在危险性评价、风险区划等方面,而针对四川省山洪灾害时空分布规律,各县级行政区内山洪灾害数量、人员损失、直接经济损失、过程平均降雨量等因素的自相关性,山洪灾害空间分布的影响因素等方面的研究还比较缺乏。

本文以四川省1950–2015年历史山洪灾害数据为基础,从年际、月份、年代际、分析了四川省历史山洪灾害的时间变化特征,通过空间中心、空间聚类等方法,分析了四川省历史山洪灾害的空间分布特征。采用空间自相关的方法从县域灾害点、人员损失、直接经济损失以及过程平均降雨进行自相关的分析,阐明了相邻县域内灾害相似程度、聚集程度。在此基础上,以地理探测器方法,进一步分析了自然、降雨、人类活动等因素对四川省历史山洪灾害时空分布规律的影响。其结果可为小流域山洪监测预警、风险评价、防治区划等提供坚实的理论基础和科技支撑。

## 2 研究区概况

四川省位于东经 $97^{\circ}21' \sim 108^{\circ}31'$ , 北纬 $26^{\circ}03' \sim 34^{\circ}19'$ , 是长江上游地区的省份之一, 占地面积 $48.6$ 万 $\text{km}^2$ , 位居全国第五, 下辖 $21$ 个市(州)。四川地处中国第一阶梯与第二阶梯的过渡区, 跨越青藏高原、横断山脉、云贵高原、秦巴山地以及四川盆地, 地势由西北向东南倾斜, 地形起伏大, 山区面积占 $2/3$ 以上。四川西部的川西地区以山原地貌和高山峡谷区为主, 西南为次高山和中山峡谷区; 东部的四川盆地以平原、丘陵地貌为主, 盆缘山地地区以中低山为主, 平原、丘陵零星分布于山地之间<sup>[13]</sup>。地形高程及地形变化程度是地形的集中体现, 地形高程越低, 地形变化越小, 越容易引发洪水<sup>[16]</sup>。研究区地处青藏高原与扬子地块挤压拼接的交汇部位之一, 地质构造复杂多样, 地震活动频繁而强烈, 区内地层发育齐全, 第四系分布广泛, 成因类型众多<sup>[17]</sup>。四川省位于亚热带范围内, 气候类型独特, 降水区域性差异大, 变化复杂, 盆地区域属于亚热带湿润季风气候, 降雨频繁, 年均降雨量达 $800 \sim 1600$  mm, 从年降水量来看, 盆地内部山区降雨多于丘陵地区, 盆地西部降水大于东部, 川西北高原属亚热带, 是典型的高原大陆性气候, 大部分区域年降雨量在 $600 \sim 800$  mm, 川西南的凉山州与攀枝花地区属于亚热带季风气候, 降水差异较大,  $5 \sim 9$ 月为雨季, 大部分区域降水达 $800 \sim 1200$  mm<sup>[2]</sup>。区域性的降雨差异, 形成快速、强大的地表径流, 使得流域面积较小的溪沟或周期性流水的荒溪中山洪灾害频发, 同时小流域的泥石流、滑坡等屡屡发生<sup>[18]</sup>。研究区地势及历史山洪灾点分布如图1所示。

## 3 数据源与研究方法

### 3.1 数据源

本文所用到的数据主要有基础地理信息数据、历史山洪灾害点矢量数据、高程数据、降雨数据、植被覆盖度、土壤类型、GDP数据以及人口数据, 数据来源如下:

(1) 基础地理信息数据和降雨数据。来自全国山洪灾害调查评价项目, 主要包括四川省的行政区划和四川省暴雨图集。四川省行政区划详细至县级行政单元, 暴雨图集中依据小流域山洪灾害与降雨密切相关的指标选取原则, 选取 $10$ 年一遇 $10$  min

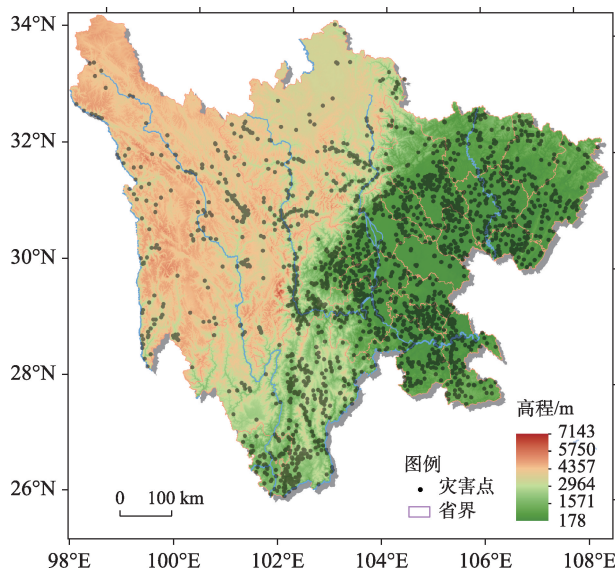


图1 四川省历史山洪灾害点分布

Fig. 1 Distribution of historical mountain torrents in Sichuan Province

降雨、 $20$ 年一遇 $6$  h降雨、 $100$ 年一遇 $6$  h降雨及 $100$ 年一遇 $24$  h降雨指标作为降雨因素。

(2) 历史山洪灾害点矢量数据。来自全国山洪灾害调查评价项目, 该项目按全国山洪灾害调查技术, 以县级行政区划为工作单元, 调查汇总 $1660$ 个防治县级单元自建国以来发生的历史山洪灾害, 共计汇总全国历史山洪灾害点 $59\,256$ 个。主要包括灾害点发生时间、灾害发生地点、灾害点经纬度坐标、过程降雨量(降雨开始形成到结束全过程的总降雨量)、直接经济损失、人员伤亡(含失踪人员、死亡人员)。本文中选取四川省历史山洪灾害点共计 $3006$ 起, 其中 $1950$ 年以前共计 $60$ 起,  $2016$ 年 $1$ 起, 为保证时间的连续性和数据的完整性, 剔除 $61$ 起, 符合本文需要且时间在 $1950 \sim 2015$ 年共计 $2945$ 起(图1)。

(3) 高程数据。来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)平台。根据研究区范围, 下载SRTM3地形数据, 分辨率精度为 $90$  m。SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)地形数据由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量。 $2000$ 年由美国“奋进”号航天飞机搭载SRTM系统, 获取覆盖地球 $80\%$ 以上的陆地表面。DEM数据用于作为研究区概况底图以及计算高程标准差、用于提取坡度坡向。高程标准差用于描述地形起伏程度, 作为地形因子; 提取坡度坡向分别作为坡度因子和坡向因子。

(4) 其他数据。植被覆盖度、土壤类型、土地利



用类型、GDP数据和人口数据均来源于地球系统科学数据共享平台 (<http://www.geodata.cn/>) 下载, 其中数据空间尺度不同, 对以上不同分辨率数据进行重采样, 大小为  $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 。其中, 土壤类型按照中国土壤质地分类标准, 根据砂粒、粉粒、黏粒含量进行土壤质地划分。土地利用类型按照土地利用分类体系, 划分至二级分类。GDP数据格式为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  栅格, 栅格值代表每平方公里内的GDP总量(万元), 空间化GDP数据的相对误差在  $6\% \sim 17\%$  之间。人口数据数据格式为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  栅格, 栅格值代表每平方公里的总人口数(万人)空间化人口数据的相对误差在  $4.5\% \sim 13.6\%$  之间, 而且大部分样本的相对误差小于  $10\%$ 。

### 3.2 研究方法

#### 3.2.1 空间分布

##### (1) 平均中心

平均中心是描述空间分布的主要方法, 通过空间对象的几何坐标平均值来表示(式(1))。基本计算公式为:

$$\begin{cases} \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N} \\ \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{N} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N$  为空间对象的总数量;  $n$  为不同年份和不同月份的空间对象数量;  $X_i$  和  $Y_i$  是第  $i$  个空间对象的坐标值;  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  是平均中心的坐标。

##### (2) 标准差椭圆

利用标准差椭圆识别历史山洪灾害点的空间分布, 同时表示灾害中心的位置变化以及移动趋势。标准差椭圆长轴方向表示灾害点在空间分布上的方向性, 短轴表示灾害空间分布的分散程度。

##### (3) 趋势分析

趋势分析是GIS平台上数据的三维透视图方法, 其揭示的是不同县域单元内灾害总数、平均降雨量、伤亡总人数及直接经济损失总量等在空间总体的变化趋势。本文将县域的位置绘制在  $x, y$  平面上,  $x$  表示四川省正东方向,  $y$  表示四川省正北方向,  $z$  维中的杆的高度表示不同县域内灾害总数、平均降雨量、伤亡总人数及直接经济损失总量, 并将  $z$  值作为散点图投影到  $x, z$  平面和  $y, z$  平面, 将根据投影所得散点图进行二阶多项式拟合。

#### 3.3.2 空间自相关方法

全域空间自相关: 全域 Moran's  $I$  指数表征历史

山洪灾点及其相关的属性的全域空间自相关性。全局 Moran's  $I$  指数(式(2))取值在  $[-1, 1]$ , 全局 Moran's  $I$  指数大于  $0$ , 表明研究对象呈空间正自相关, 值越大, 山洪灾害点的空间聚集性越强; 全局 Moran's  $I$  指数小于  $0$ , 表明研究对象呈空间负自相关, 值越小, 表明山洪灾害点的空间离散性较强。

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (2)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j \quad (3)$$

式中:  $n$  为历史山洪灾害点的总数(本文以县域为单元);  $S_0$  为所有空间权重的聚合(式(3));  $z_i$  为要素  $i$  的属性与其平均值  $(x_i - \bar{x})$  的偏差;  $w_{ij}$  是要素  $i$  和  $j$  之间的空间权重, 若  $i, j$  相邻, 则  $w_{ij}=1$ , 否则,  $w_{ij}=0$ 。

局域空间自相关: 局域 Moran's  $I$  指数表征局部以县域山洪灾点及其相关的属性的局域空间自相关, 识别空间聚集程度和空间异质性(式(4))。其计算如下定义:

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

空间自相关显著性采用标准化统计量  $Z$ (式(5))进行判断<sup>[19-21]</sup>, 计算公式为:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \quad (5)$$

式中:  $E(I)$  为  $I$  的期望值;  $VAR(I)$  为  $I$  的方差, 在  $0.05$  的置信水平下  $|Z|=1.96$ ,  $|Z|>1.96$  表示空间自相关是显著的。根据  $I, Z$  和显著性检验的结果, 可将第  $i$  个要素和相邻要素相关性划分为五类“高-高类型”、“高-低类型”、“低-低类型”、“低-高类型”以及“不显著”。

#### 3.3.3 空间聚类分析

为揭示历史山洪灾害点分布以及变化特征, 以空间聚类分析方法对灾害点的空间数据进行挖掘, 所得结果可以反映灾害空间分布特征, 还可以反映出山洪灾害的空间分布趋势<sup>[22]</sup>。其中定义山洪灾害相对危险度如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left( \sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2}{n-1}}} \quad (6)$$



$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right)^2} \quad (8)$$

式中:  $G_i^*$  表示格网  $i$  的历史山洪统计量(式(6));  $x_j$  表示的是格网  $j$  所统计的历史山洪灾害数量,  $w_{ij}$  是  $i, j$  格网的空间权重; 将式(6)的  $G_i^*$  值标准化之后, 即所得  $Z$  得分。  $Z$  得分越高, 表示四川省的历史山洪灾害点的高值区域越密集; 反之则表明历史山洪灾害点的低值区域越密集。

### 3.3.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性及解释背后驱动力因素的一种统计方法。用于量化自变量对因变量的贡献程度, 贡献程度大, 自变量与因变量在空间上具有强的相似性, 则自变量是造成因变量空间分布的驱动因素, 还可以探测多个自变量之间交互作用对因变量的解释程度<sup>[23-25]</sup>。用  $Q$  值衡量各种影响因子对山洪灾害空间分异性的解释力大小(式(9)), 表达式为:

$$Q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^n N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

式中:  $Q$  为山洪灾害空间分布影响因素解释力;  $h$  为山洪灾害空间分布影响因子;  $N_h$  和  $N$  分别为  $h$  影响因子的总数、研究区样本量总数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  为  $h$  影响因子的方差、研究区样本总量的方差。  $Q$  的取值在  $[0, 1]$  之间, 数值越大, 则说明影响因子对山洪灾害的空间分异性的解释力越强。

## 4 山洪灾害的时空分布规律分析

### 4.1 时间变化特征

#### 4.1.1 年际变化

结合时间序列分析, 1950–2015 年山洪灾害数量呈先稳定后增长的指数增长趋势(图2)。历史山洪灾害发生频次呈不均匀分布, 每年平均发生约 40 起。整体上可以划分为 1950–1981、1982–1998、1999–2015 年 3 个阶段, 频次由 1950 年 3 起增加至 1981 年 110 起, 年均发生 16 起, 灾害发生次数较为稳定。1982–1998 年均发生频次 48 起, 1999–2015 年平均灾害发生频次 93 起, 数量呈上升态势。表明 1981 年是四川省山洪灾害平均频次的突变点, 1950–2015 年, 共有 5 次灾害异常值致使灾害数量急剧上升, 分别发生在 1981、1998、2010、2012 和 2013 年, 共计 864 起, 占四川省山洪总量 1/3。1981 年共计发生山洪事件约 110 起, 其中 1981 年 7 月四川省发生建国以来罕见的暴雨洪水, 降雨持续 6 d, 雨区集中于长江中下游的嘉陵江干流中游、涪江中下游、沱江上中游以及岷江与渠江中游部分。1998、2010、2012 和 2013 年分别发生山洪灾害事件 168、192、208 和 186 起, 其中 1998 年长江流域特大洪水、2010 年四川绵竹“8.13”特大山洪泥石流灾害、2012 年四川宁南 6.28 特大山洪泥石流以及“2013.7.9”四川省特大暴雨洪灾均造成不同程度人员财产损失, 是拉升 1981–2015 年山洪灾害频次上升的主要原因。1950–1980 年每起历史山洪灾害平均降雨量约 87 mm, 1981–2015 年每起山洪灾害平均降雨量约 82 mm, 同等历史山洪灾害平均降雨量变

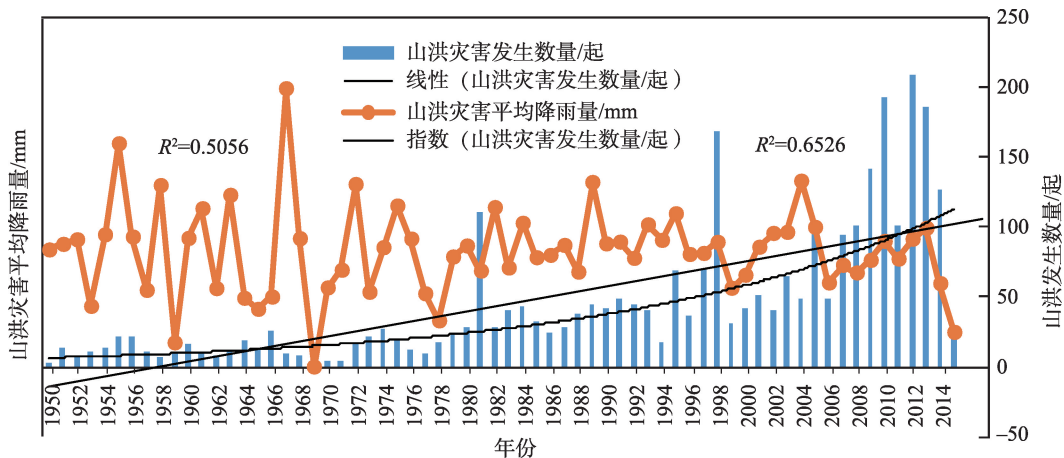


图2 四川省历史山洪事件数量及平均降雨量

Fig. 2 The number and average rainfall of historical mountain-flood disaster events in Sichuan Province

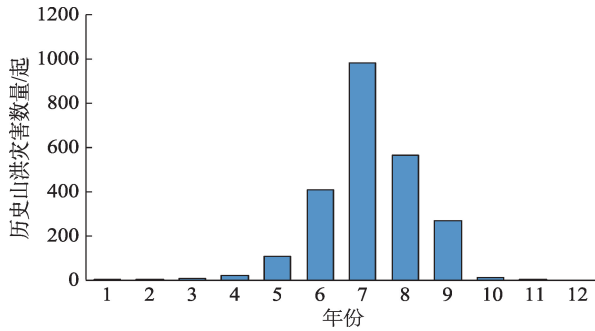


图3 各月份历史山洪灾害数量

Fig. 3 The number of historical mountain-flood disaster in each month

化不大,山洪事件的数量呈增长态势,除降雨因素之外,与社会经济发展、人类活动等因素有密切关系。

#### 4.1.2 月际变化

根据已有数据统计得出,已有记录1950–2015年每月累计历史山洪灾害数量结果如图3所示,共计2945起。历史山洪灾害主要集中在5–9月,占总山洪灾害数量的88.6%,其中7月占比最大,共计981起,占总山洪数量的36.4%,数据中发现7月山洪事件的覆盖年份达100%,即每年的7月是山洪频发的季节,灾害发生的平均过降雨达86.8 mm。其次,6、8、9月占山洪灾害总数的47.1%。每年1–4月、10–12月灾害发生占比较少。

#### 4.1.3 年代变化

以10年为间隔,统计1950 s–2010 s历史山洪事件主要集中在1980s–2010s,平均降雨变化幅度不大(图4)。1950s–1970s之间,历史山洪事件共计393起,占总数的13.3%。1980s–2010s历史山洪灾害数量迅速攀升,上升比例较大。在1980s至今共发生山洪灾害2552起,占总量的86.7%。统计每10年灾害发生过程平均降雨量低于100 mm/10年,每

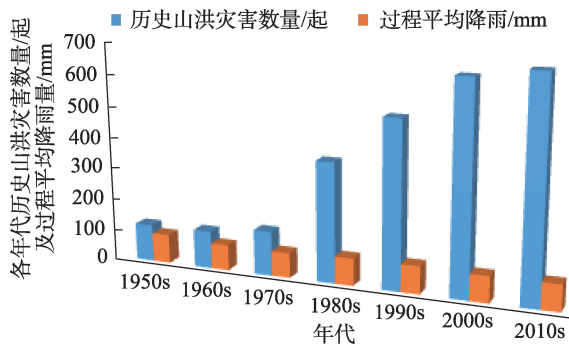


图4 各年代历史山洪灾害数量及平均降雨量

Fig. 4 The number and average rainfall of mountain-flood disaster in different periods

10年降雨量变化不大,累计灾害数量不断上升。

## 4.2 山洪灾害的空间分布特征

### 4.2.1 县域灾害数量、过程平均降雨以及灾害损失空间趋势变化

采用趋势分析法, $x$ 、 $y$ 轴表示正东、正北,以不同县域统计灾害数量、平均降雨、经济损失总量、人员伤亡为 $z$ 轴,制作三维透视图,分别揭示它们在空间上的变化趋势特征(图5)。

图5(a)为县域历史山洪灾害频次在空间分布趋势,灾害频次在东–西方向基本持平,南–北方向小幅度减弱。经查明灾害主要分布于汶川县、米易县、古蔺县、名山县、泸县、汉源县、江安县、仪陇县、宁南县、安县、喜德县、富顺县、巴州县、泸定县、丹巴县、梓潼县,南江县、邛崃县、石棉县、盐亭县、峨眉山市、宜宾县、叙永县以及会理县等地等区域,主要分布在四川中部、南部地区,灾害发生频数均高于20起。图5(b)所示的山洪灾害过程平均降雨量在东–西方向呈指数型增长趋势,由中部向南北方向递减。这些区域主要集中在宜汉县、通川区、江油市、万源市、安居区、安县、丹棱县、射洪县、中江县以及南江县等。

图5(c)和图5(d)所示为经济损失和人员伤亡在县域上的分布趋势,空间上无明显的趋势分布,现有数据得出直接经济损失总量较高的地区分布在巴州市、达州区、渠县、华蓥市,凉山彝族自治州越西县损失最为严重,直接经济损失总量达787.26亿元,1996年和1998年山洪发生造成的直接经济损失较为严重,全县受灾。人员伤亡情况主要集中在四川省南部县、华蓥市、雨城区以及宜宾县,其中宜宾县人员伤亡最为严重,人员伤亡达7738人。发现这些地区的人员伤亡均发生于1998年,长江流域上游地区强降雨,岷江洪峰通过,全县多数人受灾。

整体来看,山洪多发地区主要集中在四川省中部地区,其空间分布与灾害人员伤亡空间分布并非一致,四川省人口分布主要集中在东部地区,而西部地区人口分布较少。山洪灾害发生时,高爆发区域人们在建设规划中加以认识躲避,人员有可能在受灾的第一时间安全撤离,从而人员伤亡相对较低。

### 4.2.2 平均中心及标准差椭圆分析

利用平均中心(重心),系统的分析四川省1950–2015年历史山洪灾害点按年代纪、5–9月的灾害重心移动轨迹、移动距离,同时结合标准差椭圆对灾害点的方向及分布进行分析。

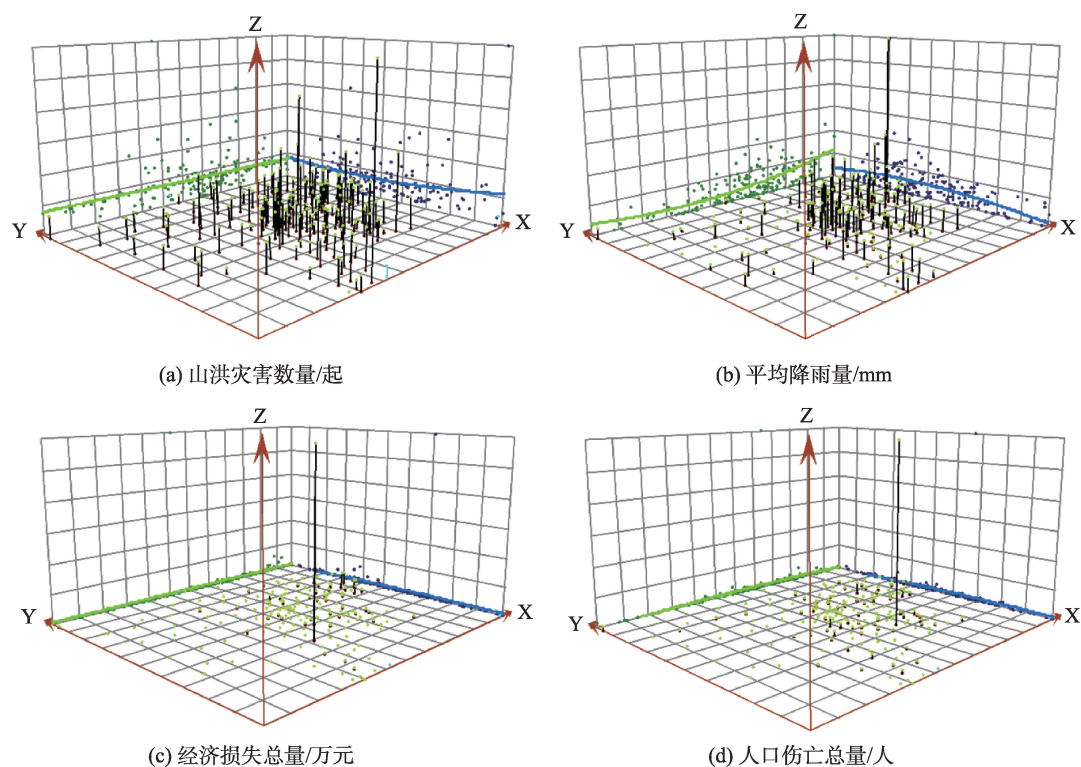


图5 县域灾害数量、平均降雨、经济损失、人员伤亡空间趋势分析

Fig. 5 Spatial trend analysis of disaster quantity, average rainfall, economic loss and casualty in county area

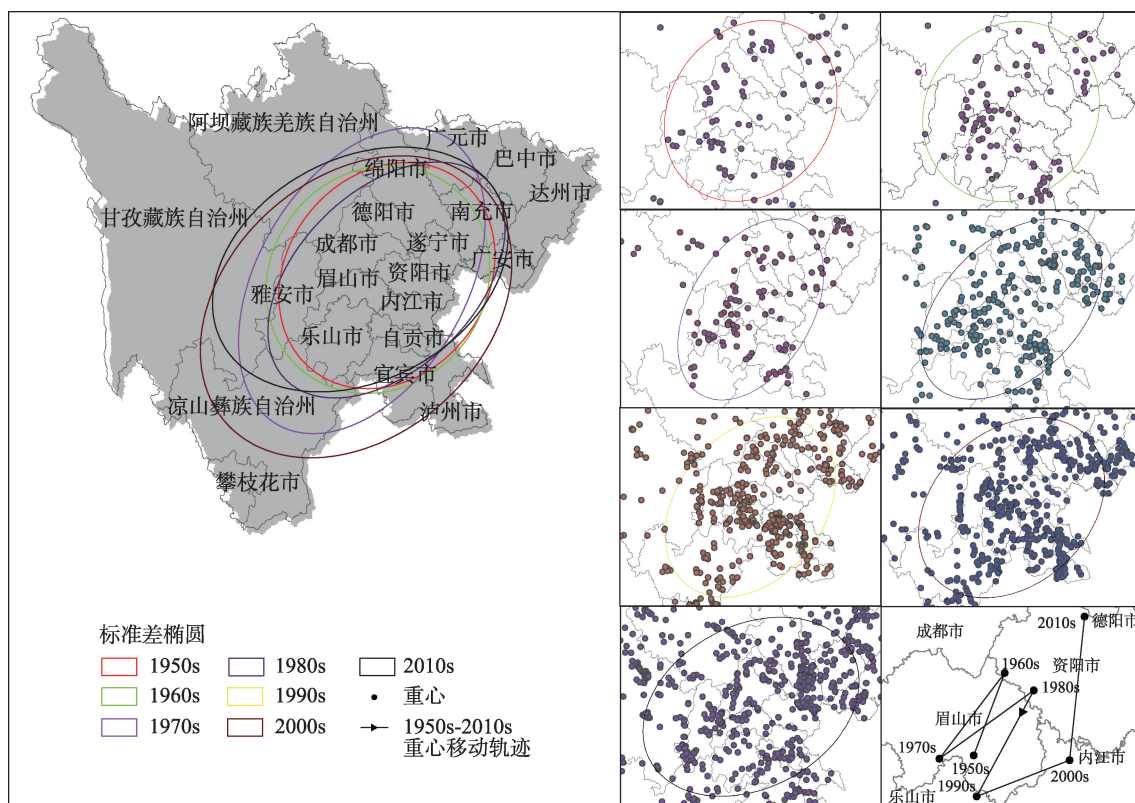


图6 1950s-2010s历史山洪灾害重心移动轨迹及标准差椭圆

Fig. 6 Moving track of the center of gravity and standard deviation ellipse of historical mountain-flood disaster from 1950s to 2010s



表1 历史山洪灾害点重心及标准差椭圆参数变化

Tab.1 Variation of gravity center and standard deviation of elliptical parameters in historical mountain-flood disaster

年代(s)	(x,y)	S/(km)	R/(°)	X(std/km)	Y(std/km)
1950	(104°06'E 29°52'N)	0	31.286	165.428	131.502
1960	(104°16'E 30°15'N)	44.957	27.733	214.612	120.166
1970	(103°55'E 29°51'N)	54.981	30.037	326.437	151.235
1980	(104°26'E 30°10'N)	59.511	45.449	258.547	161.959
1990	(104°07'E 29°41'N)	61.440	39.051	281.271	181.354
2000	(104°37'E 29°51'N)	50.985	45.945	358.121	205.776
2010	(104°42'E 30°30'N)	73.633	51.348	281.190	157.570

注:(x,y):重心点坐标;S/(km):重心点的移动距离;R/(°):标准差椭圆中,椭圆的方向角度;X:沿x轴的长半轴长度;Y:沿Y轴的短半轴长度

(1) 年代际平均中心及标准差椭圆分析

① 1950s–2010s重心集中在103°42′~105°00′E, 29°40′~30°30′N之间,位于眉山市、乐山市、内江市,到2010s重心向资阳北部移动(图6);② 1950s–2010s平均移动近距离约50 km,整体移动幅度较小。1990s、2010s移动距离61.44 km、73.633 km(表1),其

余年代纪重心移动距离变化不大;③ 1950s–2010s的转角变化处于27.733°~51.348°,灾害点呈现出西南–东北格局,这种格局变化依次呈现出弱化、增强、增强、弱化、增强、增强的趋势;④ 1950s–2010s x轴方向上半轴长度整体上呈增加趋势,数据呈现低–高–低的波动,表明山洪灾害在空间上分布的方向性得以加强,西南–东北格局明显。1950s–1970s的灾害空间分布的方向性加强,1970s以后长半轴的距离有波动,总体距离增加,灾害点的空间分布方向性在2000s最为显著;⑤ 1950s–2010s的y轴移动的距离平均为158.51 km,在2000s的短半轴移动距离达到最大,表明此时灾害点分布的向心力较弱,灾害点离散程度较大

(2) 5–9月际平均中心及标准差椭圆分析

① 5–9月重心主要在103°37′~105°00′E, 29°40′~30°49′N之间,位于四川省中部偏东地区,5–8月由东部的威远县向中部的仁寿县、青神县、夹江县移动,9月向东北方向三台县(图7)移动;② 5–7月重心移动距离58.187 km,变化较大,8–9月的移

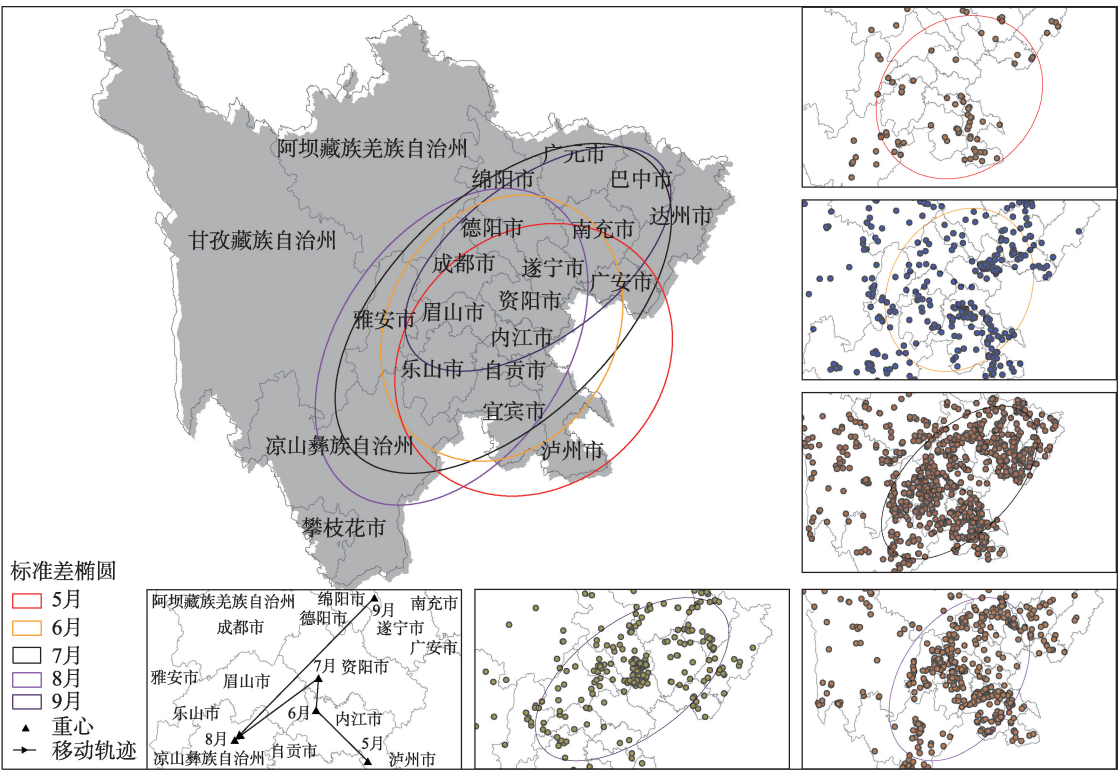


图7 5–9月历史山洪灾害重心移动轨迹及标准差椭圆

Fig. 7 Movement track of the center of gravity and standard deviation ellipse of historical mountain-flood disaster from May to September

表2 历史山洪灾害点重心及标准差椭圆参数变化

Tab.2 Variation of gravity center and standard deviation of elliptical parameters in historical mountain-flood disaster

	5月	6月	7月	8月	9月
(x,y)	(104°28'E 29°40'N)	(103°59'E 30°00'N)	(103°56'E 29°53'N)	(103°37'E 29°46'N)	(105°00'E 30°49'N)
S/km	0	58.187	14.495	32.020	174.55
R/°	48.450	31.187	46.040	34.488	53.282
X(std/km)	239.183	225.783	335.372	284.142	251.181
Y(std/km)	204.515	183.707	181.039	183.186	127.615

注：(x,y)：重心点坐标；S/(km)：重心点的移动距离；R/(°)：标准差椭圆中，椭圆的方向角度；X：沿x轴的长半轴长度；Y：沿Y轴的短半轴长度

动幅度较大(表2),整体上南北方向移动距离大于东西方向;③ 5-9月转角变化区间在31.187°~53.282°之间,表明5-9月山洪灾害的空间分布呈现出西南—东北格局,并且这种格局有向正北正南转变的趋势,5-6月、7-8月的转角出现弱化,转角分别由48.450°减弱至31.187°,46.040°减弱至34.488°。8-9月由34.488°增强至53.282°,表明西南—东北格局进一步加强;⑤ 5-9月,长轴由5月的239.183 km上升到7月的335.372 km,到9月下降到251.181 km,表明5-9月历史山洪灾害在主要方向分布上出现极化,极化差值先增加后减少并且在7月灾害空间分布方向性最为明显。5-9月依次出现极化、分散、极化的现象,7月的距离最小,此时数据的向心力最强,灾害点相对集中。

总体上,灾害点的重心移动在空间上明显的有向东北方向移动的趋势,这种变化趋势与降雨特征有着密切的联系,与周长艳等对四川省的近50年降雨特征研究中指出,四川省1961-2008年年均大雨日数和强度由东向西主要呈现“增-减-增”的总体变化趋势,盆地东北部呈现增加、增强的趋势基本符合,进一步验证了灾害重心的移动呈现东北方向的走势。

4.2.3 空间自相关性分析结果

系统分析1950-2015年县域山洪灾害数量及相关属性的全局Moran's I指数发现:县域内山洪灾害数量(0.1169,P=0.007)和过程平均降雨量(0.2765,P=0.001)Moran's I指数为正(表3),且通过显著性检验,表明山洪灾害的数量和过程平均降雨呈现显著的空间正相关,空间集聚特征明显。各县直接经济损失总量和人员伤亡Moran's I指数为负值且P值大于0.05,无明显的空间自相关性,呈现无序性。

基于全域自相关的结果,将呈现空间正相关的历史山洪灾害数量(A)和平均降雨量(B)划分为5类(图8),其中山洪灾害“高-高”类型梓潼县、古蔺

表3 全局空间自相关性Moran's I指数与P值

Tab. 3 Moran's I index and P value of Global spatial autocorrelation

各项指标	各县山洪 总数/起	死亡人员 总数/人	过程平均 降雨/mm	直接经济 损失/万元
Moran's I指数	0.1169	-0.0151	0.2765	-0.00527
P值	0.007	0.054	0.001	0.305

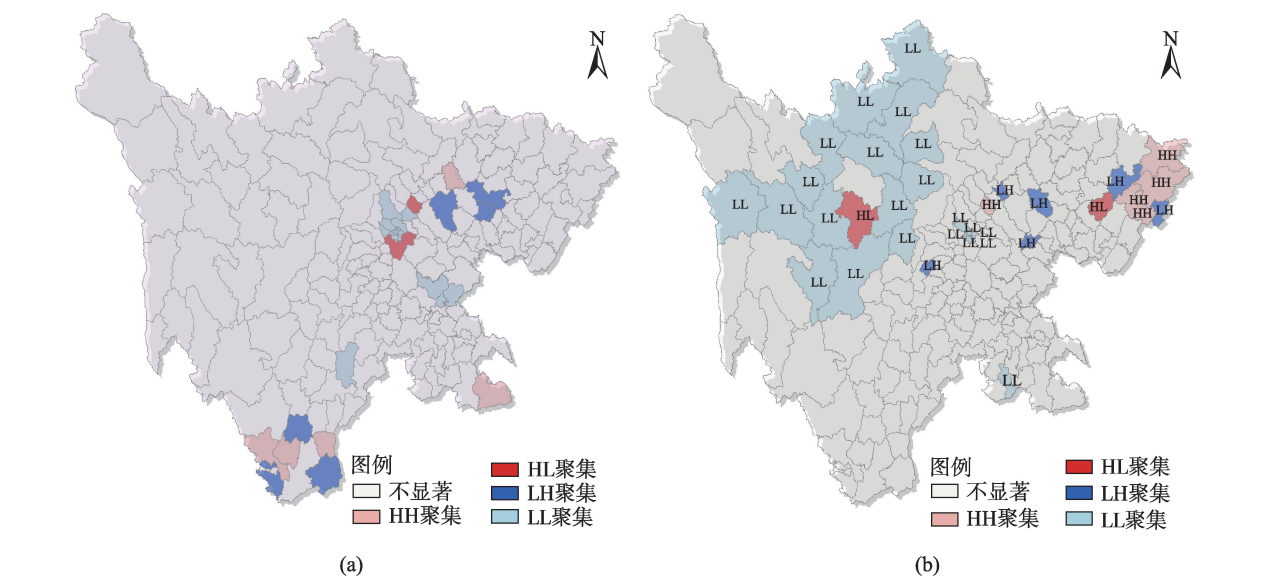


图8 县域历史山洪灾害数量以及平均降雨量局部空间自相关分析

Fig. 8 Regional spatial autocorrelation of the number of historical mountain-flood disasters and average rainfall

县、合江县、米易县以及盐边县;“低-低”类型主要集中在成都市区,其中有10区未发生过山洪灾害,而在内江市中区及资中县、德阳、广汉及凉山彝族自治州发生的次数较少;“高-低”类型区域旌阳县、双流县、龙泉驿等被灾害频次较低的县域围绕;“低-高”类型区域在会东县、德昌县、三台县、南部县、西充县、仁和区等地区,周边有较高频率的县区分布;其余县域均未呈现显著的局部空间自相关。

平均降雨量(B)的“高-高”类型区域主要集中在万源市、达川、通川、宣汉、广汉、旌阳以及夹江等地区;“低-低”类型区域主要集中在甘孜州与阿坝州区域,受气候的影响年平均降水较少,其过程平均降雨量不超过80 mm;“高-低”类型区域在丹巴县、营山县等地,与周边县区的降雨差异较大,呈现出高值区域围绕低值的降雨区域;“低-高”类型区域包括平昌县、大英县、涪城区、盐亭县、开江县以及绵竹市等地,呈现低值围绕高值的现象。

4.2.4 空间聚类分析结果

基于 ArcGIS 中优化的热点工具对四川省1950–2015年的历史山洪灾害点进行空间聚类分析共生成5118个渔网面格网,最优的固定距离阈值为10 092 m,生成的格网大小为33.24 km×33.24 km,由于自动生成的最优固定距离较大,将所得格网的z值转化为大小为5 km×5 km的格网作为栅格单元的z值,以此z值作为整个研究区域的山洪灾害危险度,评价山洪灾害发生的几率大小。其中历史山洪灾害危险性分布如图9所示。

通过分析得出其中z值较大的地区主要集中在

在成都市的邛崃县、蒲江县,乐山市的峨眉山、夹江县以及市中区,眉山市的洪雅县、丹棱县、东坡区,雅安市的雨城区、名山区、芦山县,自贡市的大安区、富顺区、沿滩区、自流井区,以及泸州市、绵阳市、南充市、内江市、宜宾市、攀枝花等区域均有散落的灾害几率高发区。整个的山洪灾害危险性分布主要集中在四川省地区,西部地区的灾害危险性明显低于东部。

5 历史山洪灾害时空分布规律及影响因素研究

5.1 时空分布规律影响因子选取

四川省历史山洪灾害时空分布差异显著,成因复杂,影响因素多样(表4)。根据山洪灾害的形成机理及前人研究的成果<sup>[15,26]</sup>,首先选取降雨指标(不考虑冰雪消融引发的洪水),它是发生山洪灾害的重要因子,特别是暴雨,根据不同的降雨强度选取4个指标。其次,高程标准差及坡度亦是作为成灾的重要诱因,发生在山丘区的灾害,地形起伏变化较大是诱发山洪发生的前提,平原低丘地区发生的洪水不被称为山洪;最后,选取其他一些影响因素如坡向、土壤质地、土地利用、植被覆盖、GDP和人口增速等因素都与山洪灾害有直接或者间接的关联,对灾害发生的早晚、规模起到一定的控制作用。

总结发现影响历史山洪时空分布的因素主要可以从人类活动、自然因素、降雨3个方面综合分析山洪灾害影响因素强度及交互影响程度。利用热

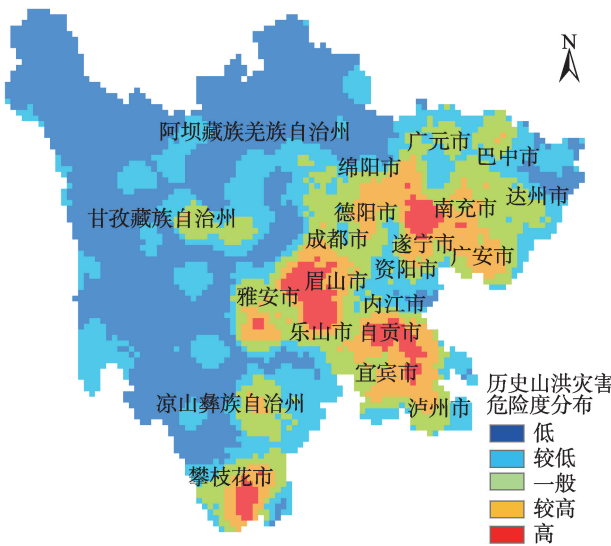


图9 四川省历史山洪灾害危险度分布  
Fig. 9 Hazard distribution of historical mountain-flood in Sichuan Province

表4 影响因素地理探测分析表			
Tab. 4 Geographical detection and analysis table of influence factors			
探测指标	Q	P	排序(从大到小)
高程标准差( $X_1$ )	0.1780	0.0000	6
坡度因子( $X_2$ )	0.1781	0.0000	5
坡向因子( $X_3$ )	0.0020	0.0000	12
植被覆盖度( $X_4$ )	0.0176	0.0000	7
10年一遇10 min降雨( $X_5$ )	0.5773	0.0000	1
20年一遇6 h降雨( $X_6$ )	0.5341	0.0000	2
100年一遇6 h降雨( $X_7$ )	0.5288	0.0000	3
100年一遇24 h降雨( $X_8$ )	0.5103	0.0000	4
土壤类型( $X_9$ )	0.1055	0.0000	8
土地利用类型( $X_{10}$ )	0.0790	0.0000	10
GDP增速( $X_{11}$ )	0.0687	0.0000	11
人口增速( $X_{12}$ )	0.0938	0.0000	9



点分析工具获取到四川省山洪灾害危险度,共计19 003个样本,利用地理探测器探测空间分异特征与规律的优势,对四川省历史山洪灾害的时空分布规律影响因素进行细致的分析。

选取出对整个区域山洪灾害危险度贡献较大的高程标准差( $X_1$ )、坡度因子( $X_2$ )、坡向因子( $X_3$ )、植被覆盖度( $X_4$ )、降雨指标采用暴雨图集中降雨的重现周期和降雨历时划分为:10年一遇10 min降雨( $X_5$ )、20年一遇6h降雨( $X_6$ )、100年一遇6h降雨( $X_7$ )、100年一遇24h降雨( $X_8$ )、土壤类型( $X_9$ )、土地利用类型( $X_{10}$ )、GDP增速( $X_{11}$ )、人口增速( $X_{12}$ )对历史山洪灾害危险度进行计算。

## 5.2 时空分布规律影响因素分析

### 5.2.1 时空分布特征的降雨因素

(1)地理探测器分析表明历史山洪灾害时空分

布规律与降雨因素密切相关,其他影响因素同时具有极强的显著性,尤以降雨因素对分布规律的影响最为显著(图10)。对应探测解释力 $q$ 分别为0.5773、0.5341、0.5288、0.5103,充分表明降雨对历史山洪灾害形成机制具有重要的影响作用,降雨指标中降雨的重现周期以及降雨历时,符合山洪暴发历时短、强降雨的特征。

(2)局部空间自相关分析中识别出灾害频次最高的地区位于凉山州南部、攀枝花、泸州、绵阳、成都等局部县级地区,这些地区的灾害数量与暴雨关系密切。四川省近50年的暴雨日数在东-西方向呈现“增-减-增”的整体变化趋势。其中特别指出凉山州南部、攀枝花等地区呈现较弱增长趋势,盆地东北部加强趋势明显<sup>[2]</sup>。同时,四川省历史山洪灾害聚集程度与近50年的暴雨日数的总体变化趋势呈现空间耦合。位于四川盆地的东部和东北部地

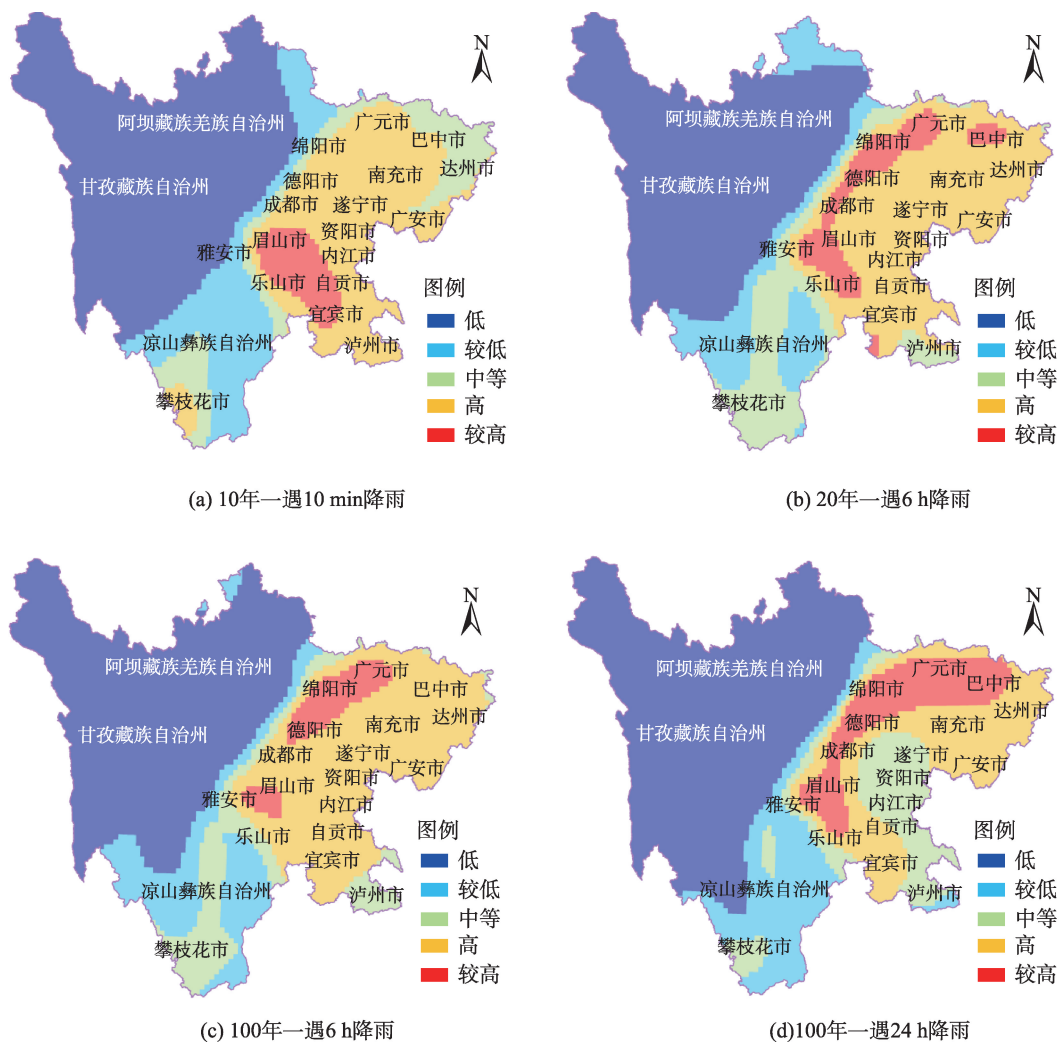


图10 不同降雨指标空间分布图

Fig.10 Spatial distribution of different rainfall and rainfall index

区的达州、德阳,过程平均降雨量较高区域与总体的暴雨日数增加地区耦合。

(3)山洪灾害危险度不仅表明山洪灾害空间的危险级别,同时又表征灾害空间的聚集程度,灾害点高值聚集地区亦是暴雨日数集中分布地区。

(4)10年一遇10 min降雨量、20年一遇6 h降雨量、100年一遇6 h降雨量以及100年一遇24 h降雨量的 $q$ 排前四位,说明它们对四川省历史山洪灾害的时空分布的影响较大,说明了关联性较强。

(5)山洪灾害的发生在一定程度上是多种降雨类型共同作用的结果,地理探测器中的交互探测对选取的降雨影响指标进行探测分析,并且获得交互作用之后对小流域山洪灾害危险性的影响模式。从表5得知:①4种降雨指标的两两交互作用对山洪灾害的危险性的影响都起到了协同增强的作用;②10年一遇10 min、100年一遇24 h的交互作用最为显著,2种降雨指标具有较强的解释力,且大于单个的降雨指标,表明四川省历史山洪灾害时空分布的区域性差异受这2种降雨的影响最大,所以一定程度上可以作为四川省山洪灾害的时空分布的影响因素。③结合图10中的不同降雨指标的分布看出,整体的四川省的降雨分布呈现东西部的明显差异。自西向东降雨逐步增强,呈条带状。

表5 各降雨指标之间的交互作用

Tab. 5 Interaction between rainfall indices

降雨因素交互指标	$q$	影响模式
100_24 $\cap$ 100_6	0.5387	双线性增强
100_24 $\cap$ 20_6	0.5528	双线性增强
100_24 $\cap$ 10_10	0.6585	双线性增强
100_6 $\cap$ 20_6	0.5410	双线性增强
100_6 $\cap$ 10_10	0.640	双线性增强
20_6 $\cap$ 10_10	0.6337	双线性增强

5.2.2 时空分布规律的自然因素

山洪灾害大部分高值聚集在四川盆地西部、南部以及东北部地区,少部分位于四川省南部攀枝花、凉山州等局部地区。高程标准差、坡度、植被覆盖、坡向及土壤质地等自然因素也影响山洪灾害时空分布规律,为山洪灾害的发生提供条件。地理探测器研究表明除降雨外,这些因素对山洪灾害空间分布起到较弱的解释作用。

(1)高程标准差、坡度。地理探测表明地形起伏对山洪的分布规律有影响,是仅次于降雨指标的两大影响因素,对应探测解释力为0.1780、0.1781。

山洪灾害高值聚集地区高程标准差在100 m左右,坡度3°左右。已有研究表明地形高程越低、地形变化越小,越易引发山洪,地形起伏程度在一定程度上控制区域汇流和排水条件。四川省甘孜阿坝地区灾害聚集程度较低,绝对高程较大,高程标准差相对较大,主要原因是该地区降雨较少。

(2)土壤类型、植被覆盖度、坡向等因子解释力较为显著,但是 $q$ 值很小,分别为0.1055、0.0176、0.0020,说明解释能力较弱,但是对山洪灾害发生有着一定的控制作用。灾害高发区土壤质地以砂粘土为主,土壤颗粒间孔隙大,小孔隙小,保水性差。土壤岩石的透水性强,则降水会下渗,地下水得以补充,此时地表径流会减弱对山洪形成也起一定抑制作用。高植被覆盖能够阻滞地表的流水,在根系的作用下使土壤容易吸水,加大降水的下渗。此外植被的变化会延缓径流过程,使地表径流趋于稳定。坡向则对降水的影响较为明显,往往由于一山之隔,降水量可相差几倍。在受到光照、温度、雨量、土壤质地等综合作用,坡向同时又会对植被发生影响,使得植被与环境的生态关系发生变化,通过降水间接的影响山洪灾害的产生。

5.2.3 时空分布规律的人类活动因素

(1)土地利用类型也具有较弱的解释力,表明人类对土地的利用也会影响到山洪灾害的时空分布,也可以作为山洪灾害时空分布差异的影响因子,合理的土地利用也会降低山洪灾害发生的频次。土地利用类型的转变是人类对自然的干预。在山区、丘陵区人民生活取暖依赖于当地的林木,就会造成不合理的砍伐树木,使得地面的保水能力极大下降,受到强降雨容易引发山洪灾害。

(2)GDP增速、人口增速等影响因素的具有显著性,但其解释力不强。发现灾害严重的地区其对应的GDP增速、人口增速等有一定的增长趋势,这些因子对山洪灾害起着一定的辅助作用。GDP增速、人口增速作为人类活动主要方面的综合量化评价。通过对这些地区的GDP、人口等变化同样也能解释山洪灾害的时空分布差异,亦能作为影响因子。

6 结论

研究结果表明:

(1)1950–2015年四川省历史山洪灾害发生频数呈现稳定后增长的指数趋势。灾害集中在每年

5-9月,7月100%覆盖。1980s以后灾害年均发生频次增长迅速,5次峰值均为特大山洪。

(2)趋势分析表明县域内山洪灾害频次在南-北方向递减;平均降雨量在东-西方向呈指数型增长趋势;经济损失和人员伤亡空间分布无明显的趋势。灾害发生频率、平均降雨、人员伤亡、直接经济损失空间分布差异明显。

(3)重心分析表明1950s-2010s灾害重心、5-9月重心主要集中在盆地中部,呈现东北方向移动趋势。标准差椭圆分析1950s-2010s、每年5-9月灾害点覆盖区域集中在四川中部地区,空间呈西南-东北格局分布。

(4)空间自相关性分析表明县域山洪灾害点、过程平均降雨量空间上呈现正自相关,直接经济损失总量和人员伤亡总量则呈现不相关。

(5)影响因素解析表明自然因素、降雨、人类活动共同对山洪灾害空间分布规律产生影响,多种降雨指标协同作用对山洪分布规律的影响因素最显著,高达0.6585;另外,高程标准差、坡度、植被覆盖也是山洪灾害频发的影响因素。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵健,范北林.全国山洪灾害时空分布特点研究[J].中国水利,2006(13):45-47. [Zhao J, Fan B L. Characteristics of temporal and spatial distribution of mountain flood in China[J]. China Water Resources, 2006(13):45-47. ]
- [2] 周长艳,岑思弦,李跃清,等.四川省近50年降水的变化特征及影响[J].地理学报,2011,66(5):619-630. [Zhou C Y, Cen S X, Li Y Q, et al. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(5):619-630. ]
- [3] 高延超,何杰,陈宁生,等.四川省山区城镇山洪灾害特征分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),2006,33(1):84-89. [Gao Y C, He J, Chen N S, et al. Analysis of characters of torrent disasters in the towns of the mountain areas, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Natural science Edition), 2006,33(1):84-89. ]
- [4] 丁文峰,杜俊,陈小平,等.四川省山洪灾害风险评估与区划[J].长江科学院院报,2015,32(12):41-45. [Ding W F, Du J, Chen X P, et al. Risk assessment and regionalization of mountain torrent disaster in Sichuan Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(12):41-45. ]
- [5] 刘丽,王建中,王士革.四川省泥石流灾害保险的风险分析与区划[J].自然灾害学报,2003,12(1):103-108. [Liu L, Wang J Z, Wang S G. Risk analysis and regionalization for the insurance of debris-flow disaster in Sichuan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2003,12(1):103-108. ]
- [6] 刘敦龙,张少杰,杨红娟.四川省区域泥石流预报系统的构建与应用[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):47-58. [Liu D L, Zhang S J, Yang H J. Construction and Application of debris-flow forecasting system for Sichuan Province[J]. Journal of Basic Science & Engineering, 2016,24(1):47-58. ]
- [7] 王增武,柳锦宝,刘志红,等.四川省山洪地质灾害气象预警系统的设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2013(S1):197-200. [Wang Z W, Liu J B, Liu Z H, et al. The designing and implementation of mountain flood geological hazard meteorological warning system in Sichuan Province[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013(S1):197-200. ]
- [8] 郁淑华,何光碧,徐会明,等.泥石流滑坡发生的降水预报方法与雨量标准——以四川省盆地地区为例[J].山地学报,2005,23(2):158-164. [Yu S H, He G B, Xu H M, et al. A precipitation forecast method and rainfall standard of debris flow and landslides happening: Exemplar as Sihuan Basin[J]. Journal of Mountain Science, 2005,23(2):158-164. ]
- [9] 刘海知,马振峰,范广洲.四川省典型区域滑坡泥石流与降水的关系[J].水土保持通报,2016,36(6):73-77. [Liu H Z, Ma Z F, Fan G Z. Relationship between landslide/debris flow and rainfall in typical region of Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(6):73-77. ]
- [10] 铁永波,周洪福,倪化勇.西南山区短时强降雨诱发型低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J].灾害学,2013,28(4):110-113. [Tie Y B, Zhou H F, Ni H Y. Formation of low frequency debris flow induced by short-time heavy rainfall in mountain area of Southwest China: Take Lengmu debris flow as an example, Baoxing, Sichuan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2013,28(4):110-103. ]
- [11] 胡桂胜,陈宁生,杨成林.成都市灾害性山洪泥石流临界降雨量特征[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(1):95-101. [Hu G S, Chen N S, Yang C L. Critical rainfall characteristics for torrents and debris flows in Chengdu[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural science edition), 2011,30(1):95-101. ]
- [12] 刘檣漪,程维明,孙东亚,等.中国历史山洪灾害分布特征研究[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1557-1566. [Liu Q Y, Cheng W M, Sun D Y, et al. Distribution characteristics of historical mountain flood in china[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017,19(12):1557-1566. ]
- [13] 杨红娟,韦方强,马振峰,等.四川省泥石流灾害的时空分



- 布规律和降水特征[J].灾害学,2017,32(4):102-107. [ Yang H J, Wei F Q, Ma Z F, et al. Spatial-temporal distribution of debris flows in Sichuan Province in China and the corresponding rainfall characteristics[J]. Journal of Catastrophology, 2017,32(4):102-107. ]
- [14] 郁淑华.四川盆地泥石流、滑坡的时空分布特征及其气象成因分析[J].高原气象,2003,22(S1):83-89. [ Yu S H. Analyses on spatial-temporal characteristics of mud-rock flow and landslide in Sichuan basin and its meteorological cause[J]. Plateau Meteorology, 2003,22(S1):83-89. ]
- [15] 张乾柱,卢阳,秦维,等.重庆市山洪灾害空间分布规律及影响因素研究[J].人民长江,2018,49(1):13-18. [ Zhang Q Z, Lu Y, Qin W, et al. Spatial distribution pattern and impacting factor of mountain torrent disasters in Chongqing [J]. Yangtze River, 2018,49(1):13-18. ]
- [16] 周成虎,万庆,黄诗峰,等.基于GIS的洪水灾害风险区划研究[J].地理学报,2000,55(1):15-24. [ Zhou C H, Wan Q, Huang S F, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation[J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(1):15-24. ]
- [17] 熊俊楠,韦方强,刘志奇.四川省小流域泥石流危险性评价[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1604-1612. [ Xiong J N, Wei F Q, Liu Z Q. Hazard assessment of debris flow in Sichuan Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(12):1604-1612. ]
- [18] 叶超凡,张一驰,熊俊楠,等.湖南省山丘区小流域山洪灾害危险性评价[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1593-1603. [ Ye C F, Zhang Y C, Xiong J N, et al. Hazard assessment of mountain torrent disaster in small watersheds of the hilly areas of Hunan Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(12):1593-1603. ]
- [19] 谢花林,刘黎明,李波,等.土地利用变化的多尺度空间自相关分析——以内蒙古翁牛特旗为例[J].地理学报,2006,61(4):389-400. [ Xie H L, Liu L M, Li B, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land-use changes:a case study in Ongniud Banner,Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(4):389-400. ]
- [20] 万鲁河,王绍巍,陈晓红.基于GeoDA的哈大齐工业走廊GDP空间关联性[J].地理研究,2011,30(6):977-984. [ Wan L H, Wang S W, Chen X H. GeoDA-based spatial correlation analysis of GDP in Hadaqi industrial corridor[J]. Geographical Research, 2011,30(6):977-984. ]
- [21] 李少英,吴志峰,李碧莹,等.基于互联网房产数据的住宅容积率多尺度时空特征——以广州市为例[J].地理研究,2016,35(4):770-780. [ Li S Y, Wu Z F, Li B Y, et al. The spatial and temporal characteristics of residential floor area ratio in metropolitan at multi-scales based on internet real estate data: A case study of Guangzhou[J]. Geographical Research, 2016,35(4):770-780. ]
- [22] 李华威,万庆.小流域山洪灾害危险性分析之降雨指标选取的初步研究[J].地球信息科学学报,2017,19(3):425-435. [ Li H W, Wan Q. Study on rainfall index selection for hazard analysis of mountain torrents disaster of small watersheds[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(3):425-435 ]
- [23] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134. [ Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134. ]
- [24] 周亮,周成虎,杨帆,等.2000-2011年中国PM<sub>2.5</sub>时空演化特征及驱动因素解析[J].地理学报,2017,72(11):1-14. [ Zhou L, Zhou C H, Yang F, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in China between 2000 and 2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(11):1-14. ]
- [25] 王劲峰,葛咏,李连发,等.地理学时空数据分析方法[J].地理学报,2014,69(9):1326-1345. [ Wang J F, Ge Y, Li L F, et al. Spatiotemporal data analysis in geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(9):1326-1345. ]
- [26] 杜俊,丁文峰,任洪玉,等.四川省不同类型山洪灾害与主要影响因素的关系[J].长江流域资源与环境,2015,24(11):1977-1983. [ Du J, Ding W F, Ren H Y. Relationships between different types of flash flood disasters and their main impact factors in the Sichuan Province[J]. Resources And Environment in the Yangtze Basin, 2015,24(11):1977-1983. ]