

西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素

熊俊楠^{1,2}, 李进¹, 程维明², 周成虎², 郭良^{3,4}, 张晓蕾^{3,4}, 王楠², 李伟¹

(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)

摘要: 山洪灾害时空特征和影响因素是山洪评估与管理的重要内容。根据1960-2015年中国西南地区历史山洪资料, 采用线性回归、标准差椭圆、空间自相关和Logistic回归模型, 深入分析了西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素。结果表明: ①西南地区年度山洪灾害频次呈指数增长, 年际变化呈现出稳定(1960-1980年)、缓慢波动增加(1981-1998年)、快速增加(1999-2015年)3个阶段; 月际特征明显, 山洪主要发生在每年6-8月, 尤以7月频次最高; ②西南地区山洪灾害空间差异性显著, 灾害高密度区主要集中于滇中高原地区、四川盆地和周边山地单元, 山洪灾害数量分布呈显著的空间正相关, 空间集聚特征明显(Moran's I 指数为0.127、 $Z = 5.784$ 、 $P = 0.007$); ③西南地区历史灾害点的重心在年内存在明显的向正西方向移动的趋势, 年内标准差椭圆转角均逐渐弱化, 长轴逐渐变长, 短轴逐渐变短; ④降雨因子对山洪的影响度最高, 人类活动因子次之, 地表环境因子最低, 降雨因子中1 h降雨量对山洪的影响最强, 优势比值达到3.654。研究结果可为西南地区山洪灾害形成机理、监测预警研究, 实施防灾减灾措施等提供科技支撑。

关键词: 西南地区; 山洪灾害; 时空格局; Logistic回归

DOI: 10.11821/dlxb201907008

1 引言

山洪灾害是中国山丘区常见的自然灾害之一, 严重制约着中国经济、社会的可持续发展, 威胁人民生命财产^[1-3]。近年来, 中国政府愈发关注自然灾害问题。在2009年国务院颁布《中国的减灾行动》白皮书, 旨在建立较为完善的减灾工作管理体制和运行机制^[4]。中国于2013-2015年开展了全国性的山洪灾害调查评价工作, 调查统计结果显示, 1960-2015年间西南地区共发生山洪灾害7447次, 共计造成18257人死亡。其中, 1979年四川雅安市爆发泥石流, 死亡200余人; 1989年7月10日, 四川华蓥市溪口镇爆发滑坡型泥石流, 死亡221人; 2005年7月11日, 发生在著名风景区海螺沟内磨西河流域的特大山

收稿日期: 2018-10-15; 修订日期: 2019-05-19

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20030302); 水科院全国山洪灾害调查评价项目(SHZH-IWHR-57); 中国地质调查项目(DD20190637); 数字福建自然灾害监测大数据研究所开放课题(NDMBD2018003); 西南石油大学科技创新团队项目(2017CXTD09) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA20030302; National Mountain Flood Disaster Survey and Evaluation Project of IWHR, No.SHZH-IWHR-57; China Geological Survey Project, No.DD20190637; The Open Fund of Big Data Institute of Digital Natural Disaster Monitoring in Fujian, No.NDMBD2018003; Scientific and Technological Innovation Team Project of Southwest Petroleum University, No.2017CXTD09]

作者简介: 熊俊楠(1981-), 男, 四川南充人, 博士后, 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: 程维明(1973-), 男, 甘肃天水人, 博士, 研究员, 主要从事数字地形地貌研究。E-mail: chengwm@reis.ac.cn

洪泥石流灾害，冲毁大量房屋、公路、桥梁，造成直接经济损失1.7亿元^[5-6]。已有研究表明，中国山洪分布大体以大兴安岭—太行山—巫山—雪峰山为分界线，分界线东部主要分布在华南和东南的低山丘陵区，分界线西部主要分布在海拔2000 m的西南中低山高原盆地地区^[7]。西南地区由于受到地域和东亚季风的影响，加之地处亚欧板块和印度洋板块运动交界地带，新构造运动强烈，经常受到极端气候影响^[8]。近年来，随着人口、经济、城市化快速发展，使孕灾环境和承灾体格局变化加速，加剧了山洪灾害的发生^[7, 9-10]。因此，开展西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素的研究显得尤为必要。

随着遥感地理信息理论、灾害风险分析、灾害时空数据挖掘理论不断发展，针对山洪灾害时空特征^[9, 11-13]、成因分析^[14-16]、监测预警^[17-18]、风险评估^[17, 19]、防治措施^[20]等方面开展了大量的研究工作。目前，关于山洪灾害时空特征和成灾环境的研究主要集中在4个方面：① 21世纪以来，研究者多以省级区域为主，根据历史灾害特征来分析时空格局和影响因素^[21-22]；② 利用致灾因子的多样性、相对综合致灾强度，研究灾害时空格局和成因^[23-24]；③ 根据山洪灾害致灾因子、孕灾环境、承灾体特征进行山洪灾害风险评估^[17-18, 25]；④ 从山洪发生机理的角度，探讨流域、山洪沟灾害发生以及发展过程^[26]。以往山洪灾害分布特征的研究多以省市为研究区，研究方法以定性分析为主，缺乏客观的定量评价，对大区域尺度的研究仍显不足。受限于数据条件，基于详细历史山洪灾害数据尤其是长时间序列的山洪灾害时空格局的研究存在很大空白^[27-28]，加之西南地区历史资料缺乏，灾害时空数据分析理论尚不成熟，针对西南地区山洪灾害时空格局及其影响因素的研究尚不多见。

本文基于全国山洪灾害调查评价项目提供的西南地区（四川、云南、贵州和重庆）1960-2015年山洪历史灾害数据，以ArcGIS和GeoDa软件为平台，运用线性回归、标准差椭圆、空间自相关模型对西南地区山洪事件进行时空格局的研究，在此基础上，利用Logistic回归模型分析西南地区山洪时空分布影响因素，揭示其时空演变规律，挖掘灾害驱动因子，其结果可为西南地区开展山洪灾害监测预警、制定山洪灾害减灾规划等提供科学依据。

2 研究区概况和数据来源

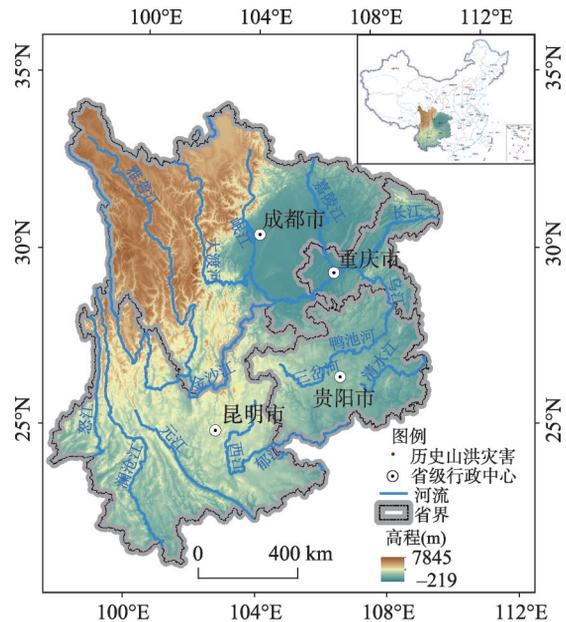
2.1 研究区概况

研究区位于中国西南部（97°21'E~110°11'E、21°8'N~34°19'N），包括3省1市（四川、云南、贵州和重庆），含47个地市级行政区、445个县级行政区，总面积 1.13×10^6 km²，总人口1.97亿，人口密度为174人/km²。东临湖北省、湖南省和广西壮族自治区，南接越南、老挝，西界西藏、缅甸，北连青海、甘肃和陕西。研究区地形以高原、山地、丘陵为主，平原面积狭小。西南地区是中国地形条件最为复杂的区域之一，地势自西向东横跨三级阶梯，其中包括一级阶梯的青藏高原、二级阶梯的四川盆地和三级阶梯的长江中下游过渡带，从川西青藏高原向东至长江中下游平原过渡带，海拔从7845 m下降至200 m以下。西南地区主要包括3个地形单元，分别是包含四川省中东部地区和重庆大部分地区的四川盆地及其周边山地单元，云南省的南部和中东部地区以及贵州全境的云贵高原中高山山地丘陵区单元，四川北部、西部、西南部和云南的西北部的青藏高原高山山地区单元^[3, 29-31]。西南地区受太平洋季风和印度洋季风的影响，属于典型的亚热带季风区，年均温度在15℃~20℃，气候类型属于亚热带季风气候，表现为雨热同期，年均降雨量一般在1100~1400 mm，且降雨集中在5-9月^[3, 29-31]。西南地区河网密度大，水系

结构复杂,各地区差异明显。研究区地势与水系情况如图1所示。

2.2 数据来源

研究数据包括山洪灾害、气象、高程(DEM)、基础地理信息和社会经济数据,数据来源及获取方法为:①历史山洪灾害数据,获取自《全国山洪灾害防治项目组》,包括1960-2015年西南地区历史山洪灾害发生位置、时间、经济损失、死亡人数等信息;②降雨数据,获取自《全国山洪灾害防治项目组》暴雨图集数据,包括10 min降雨量、1 h降雨量、6 h降雨量、24 h降雨量和年均降雨量等,分辨率为10 km×10 km;③高程(DEM)数据,获取自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供的ASTER GDEM V2数字高程模型(Digital Elevation Model),空间分辨率为30 m;④基础地理数据,获取自《全国山洪灾害防治项目组》,包括西南地区1:5万、1:25万行政区划、道路、水系等基础地理数据;⑤社会经济数据,获取自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),包括2000年人口和GDP数据,空间分辨率为1 km×1 km,栅格值分别代表每平方米内的人口数量(人)和GDP总量(万元)。



注:该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2884号的标准地图制作,底图无修改。

图1 研究区地势与水系图

Fig. 1 Topography and river system of southwest China

3 研究方法

根据史培军等^[32]、程维明等^[33]、刘宇等^[34]研究的地理事件空间分析方法,采用趋势分析、密度分析、空间自相关^[11-12]分析历史山洪时空格局,采用重力模型^[33, 35-36]、标准差椭圆^[29-30]和线性回归模型^[34, 38]分析演变规律。根据王瑛等^[2]对地理事件驱动力因素的研究,选取逻辑回归模型对西南地区山洪灾害时空分布差异的主导因素进行分析。

3.1 时空分布特征分析方法

3.1.1 重力模型 地理学认为地理事物或属性在空间分布上存在随机、规则和集聚3种分布特征^[35]。重心变化是研究海量时空数据演变趋势的有效手段^[36],定义西南地区山洪灾害重心的X和Y坐标分别表示为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i} \quad (1)$$

式中: \bar{X} 为西南地区山洪灾害重心的经度; \bar{Y} 为西南地区山洪灾害重心的纬度; n 表示研究范围内的栅格数量; i 为栅格序号; X_i 、 Y_i 分别为第 i 个栅格的几何中心经度及纬度; S_i 为第 i 个栅格的面积; W_i 为第 i 个栅格的山洪灾害核密度值。

3.1.2 标准差椭圆 标准差椭圆 (Standard Deviational Ellipse, SDE), 可用于汇总和表达地理要素的中心趋势、离散和方向趋势等空间特征^[29-30, 37]。利用标准差椭圆识别历史山洪灾害点的空间分布, 同时表示其中心位置变化以及移动趋势。具体公式定义为:

$$C = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 & \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \\ \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i & \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tilde{x}_i = (x_i - \bar{x}) \\ \tilde{y}_i = (y_i - \bar{y}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_i 和 y_i 是要素 i 的坐标; (\bar{x}, \bar{y}) 表示要素的平均中心; n 为要素总数。

3.1.3 线性回归模型 线性回归模型用于确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系^[34], 通过一元线性回归模型表征山洪灾害和时间的相互依赖关系, 计算公式定义为^[38]:

$$\beta = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4)$$

式中: β 为西南地区山洪灾害变化率; n 为西南地区研究总年数; x 为所对应年份; y 为对应年份的山洪灾害核密度值。

3.1.4 空间自相关分析 空间自相关是检验某一要素的属性值是否显著地与其相邻空间点上的属性值相关联的重要指标, 分为全局空间自相关和局部空间自相关^[11-12]。全局Moran's I 计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: I 为全局Moran指数; x_i 、 x_j 分别为县域 i 、 j 的山洪灾害数量; \bar{x} 为山洪灾害数量平均值; W_{ij} 是城市 i 和 j 的空间关系测度 (相邻为1, 不相邻为0)。全局空间自相关不能确切表示集聚或异常发生的具体空间位置, 为分析各县域山洪灾害与邻域县的空间关联及差异程度, 需要用局部空间自相关方法作进一步分析, 其表达式为:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

空间自相关显著性采用标准化统计量 Z (式(7))进行判断^[39], 计算公式为:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \quad (7)$$

式中: $E(I)$ 为 I 的期望值; $VAR(I)$ 为 I 的方差, 在0.05的显著性水平下 $|Z| = 1.96$, $|Z| > 1.96$ 表示空间自相关是显著的。根据 I 、 Z 结果, 可将第 i 个要素和相邻要素相关性划分为5类“高一高”聚集、“高一低”聚集、“低—低”聚集、“低—高”聚集和“不显著”。

3.2 影响因素分析方法

Logistic回归模型是一种概率型非线性回归模型, 是研究影响因素与因变量之间关系的常用方法^[40]。将各驱动因子指标进行空间化、无量纲化、共线性检验处理等, 利用二元Logistic回归方程定量分析西南地区山洪灾害影响因素:

$$P = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k)} \quad (8)$$

式中： P 为因变量，是自变量因子相对于某一事件的发生概率，取值范围为 $[0, 1]$ ； x_i 是自变量因子（ $i = 1, 2, \dots, k$ ），是影响事件发生的因素； k 为自变量个数； β_i 是偏回归系数，反映自变量因子 x_i 对 P 的影响程度大小。

4 结果与分析

4.1 西南地区山洪灾害的时间分布特征

4.1.1 年内变化特征 西南地区历史山洪灾害按发生月统计分析的结果如图2所示。西南地区山洪灾害主要集中在5-9月发生（图2）。从1960-2015年的西南地区山洪灾害历史资料看来，夏季（6-8月）发生山洪灾害数量最多，总共发生5335次，尤其7月为全年发生山洪灾害次数最多，发生灾害2458次，占全年总数的36.2%；春季（3-5月）和秋季（9-11月）也有少许山洪灾害发生，春季共发生山洪灾害588次，秋季共发生山洪灾害802次。

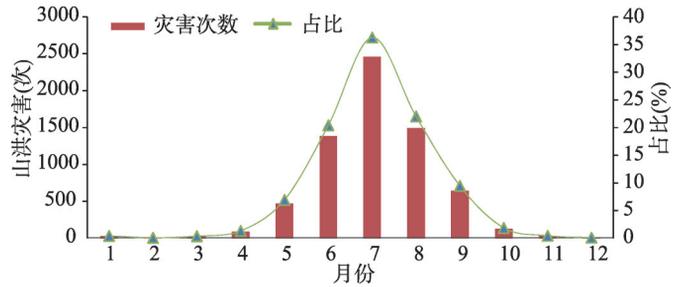


图2 西南地区山洪灾害年内变化特征
Fig. 2 Intra-annual variation of flash floods in southwest China

4.1.2 阶段性变化特征 以西南地区历史山洪灾害资料为基础，分析1960-2015年山洪灾害逐年变化趋势以及演化态势（图3）。西南地区山洪灾害阶段性变化特征为逐年波动上升，呈指数增长（图3）。西南地区山洪灾害发生频次按指数函数特征形成了1960-1980年、1981-1998年、1999-2015年3个阶段性变化过程。在1960-1980年处于稳定阶段，山洪灾害发生频次几乎不变，稳定在每年50次左右；在1981-1998年处于缓慢波动上升阶段，灾害发生频次逐年波动增加；在1999-2015年属于快速上升阶段，年均灾害频次变化率快速增加，最高达到450次/年。在1981年、1998年、2007年、2010年和2014年出现异常高值，分别发生山洪灾害126起、369起、356起、422起和466起，共计1739起，占总数的23.4%。西南地区历史降雨资料记载显示，出现山洪灾害数量异常的5个年份中均有大范围暴雨记录，如1981年7月四川爆发建国以来罕见的暴雨洪水^[41]、1998年全国

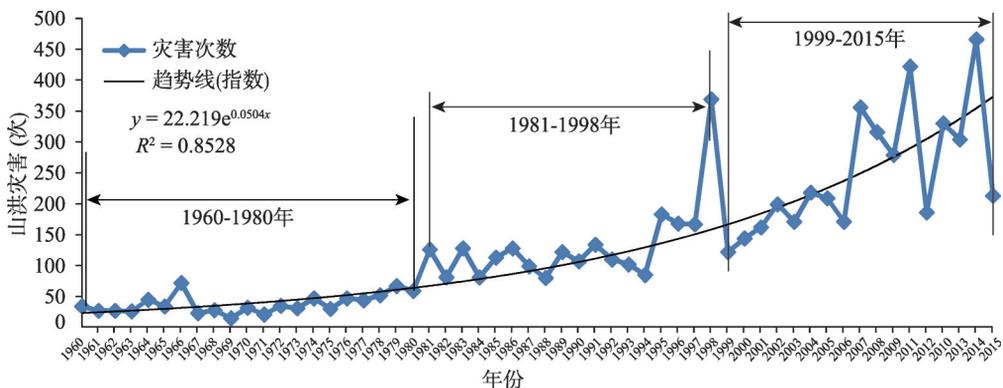


图3 西南地区山洪灾害阶段性变化特征
Fig. 3 Annual variability of flash floods in southwest China

爆发大范围特大洪涝灾害^[42]、2007年7月川东北连续3场大暴雨^[43]、2010年7月14-18日四川爆发大暴雨^[44]和2014年7月13-17日贵州持续性暴雨^[45]。

4.1.3 年代际变化特征 根据西南地区1960-2015年总计56年山洪灾害历史数据每10年一期数据进行统计分析，结果如图4和图5所示。

西南地区山洪灾害年代际变化整体呈线性增长（图4）。1960-2015年西南地区山洪灾害频次以平均398.2次/10a的速度升高，1990-2015年来山洪灾害增长速率更大，达到604次/10a的增长速率。在20世纪60-70年代期间，山洪灾害数量较少，且处于持续稳定状态；从20世纪80年代开始，灾害数量呈线性显著持续增长，每10年山洪灾害增长率分别为94.5%、65.1%、63.6%和92.1%（21世纪20年代灾害数量按2010-2015年灾害数量的

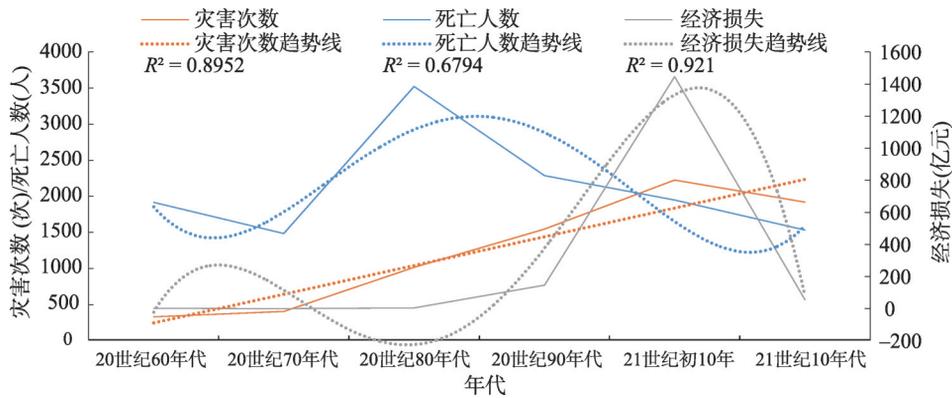


图4 西南地区山洪灾害年代际分布特征

Fig. 4 Interdecadal variability of flash floods in southwest China

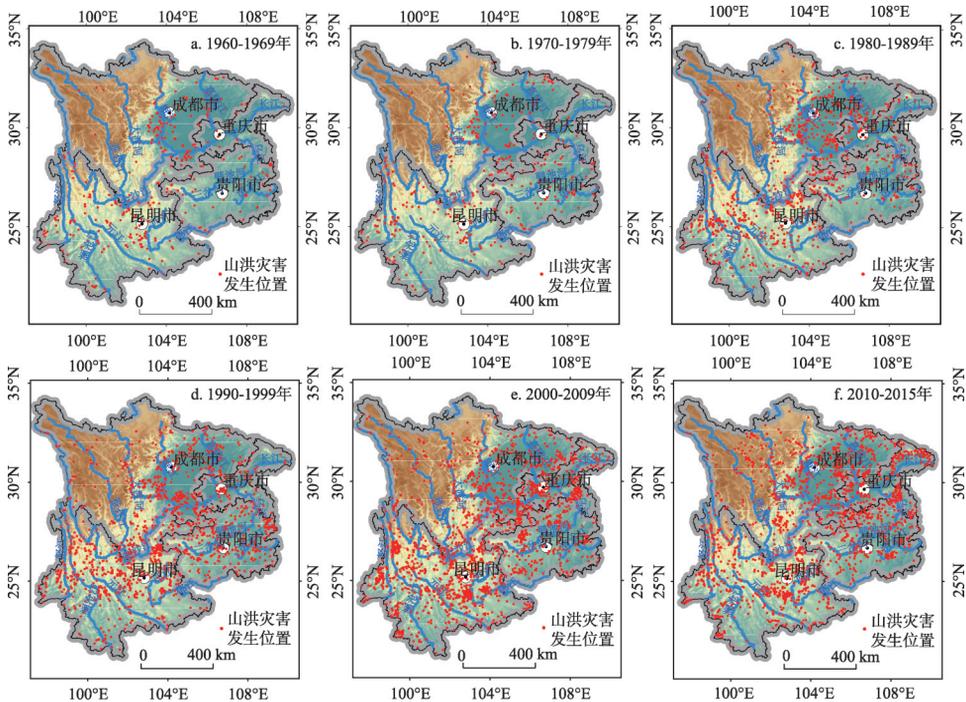


图5 1960-2015年西南地区历史山洪灾害各年代分布

Fig. 5 Spatial distribution of historic flash floods in southwest China during 1960-2015

两倍计算)。20世纪60-70年代期间,山洪死亡人数也处于稳定较少状态;20世纪80年代山洪死亡人数达3522人,为各年代最大值;从20世纪90年代开始,山洪死亡人数逐年代降低,山洪威胁人民生命情况逐渐转好。20世纪60-80年代,山洪经济损失处于稳定较低状态;从20世纪90年代开始,山洪经济损失出现快速增长,在21世纪初10年达到峰值;21世纪10年代,山洪灾害造成的经济损失明显降低。20世纪60-70年代山洪灾害发生数量较少,且在西南地区呈现均匀分布,川西高原几乎无山洪灾害发生;从20世纪90年代开始,山洪灾害发生数量开始增加,主要集中分布在四川盆地和滇中、滇东地区,川西高原山洪灾害发生次数明显增多(图5)。

4.2 西南地区山洪灾害的空间分布特征

4.2.1 山洪灾害密度、损失及危害程度分布特征 以研究区445个县域为评价单元,运用ArcGIS空间统计功能计算西南地区山洪灾害密度、经济损失和危害程度,危害程度由死亡人数、失踪人数、转移人数、损毁房屋数量、直接经济损失总量5个因子进行加权叠加,计算公式为:

$$impact = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i \tag{9}$$

式中: *impact*表示危害程度; ω_i 表示权重; x_i 为危害程度因子:死亡人数、失踪人数、转移人数、损毁房屋数量、直接经济损失总量。

借鉴万石云等^[46]在山洪研究中运用的自然间断点分级方法,对西南地区山洪灾害密度、经济损失和危害程度进行分级^[12, 46](图6)。研究区县域历史山洪灾害频次在空间分布上存在明显的差异,高密度区主要集中于滇中高原地区、四川盆地地区和周边山地单元(图6a)。1960-2015年,西南地区共计445个县发生过山洪灾害,占县级行政区总数的95.5%。其中,处于极高灾害密度(> 15.3次/km²)的县共有91个,占西南地区总数的20.4%,主要集中在四川的成都、绵阳、乐山、眉山和云南的昆明、曲靖、楚雄、玉溪。西南地区山洪灾害经济损失在空间上有着明显的差异,直接经济损失总量极高的县级行政区共计有77个,占西南地区总县数的17.3%,其中超过一半位于四川省境内(图6b)。从危害程度来看,极高危害程度的地区有13个区县,高危害程度的地区有29个区县,其中四川省越西县、南部县和云南省会泽县、腾冲县、兰坪白族普米族自治县是危害程度最高的5个区县(图6c)。将山洪灾害密度、经济损失和危害程度结果进行对比分析可知,西南地区山洪灾害密度、经济损失和危害程度在四川盆地和滇中地区高值较为集中,且有较好的对应关系。

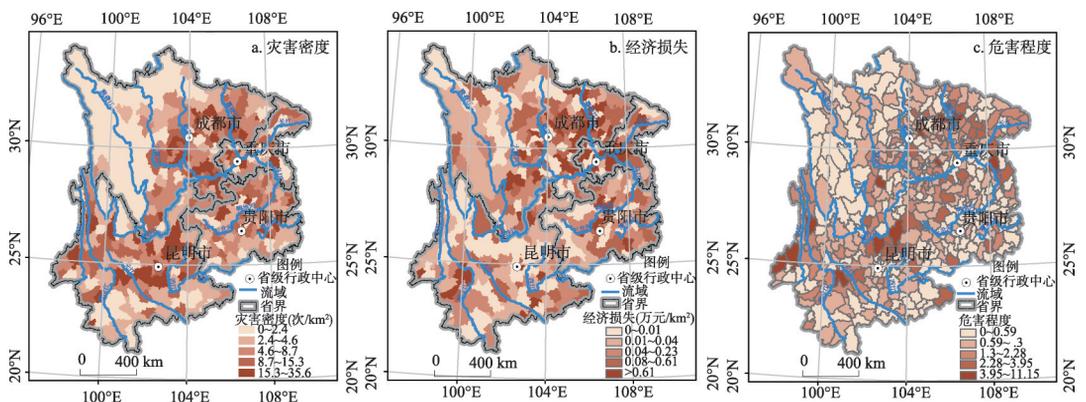


图6 西南地区山洪灾害密度(a)、经济损失(b)和危害程度(c)空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of flash flood density (a), economic loss (b) and damage degree (c) in southwest China

4.2.2 灾害重心以及灾害变化趋势 利用重力模型分析西南地区历史山洪灾害点5-9月逐月灾害重心移动轨迹和移动距离，利用标准差椭圆综合分析西南地区历史山洪灾害点5-9月逐月灾害方向及分布（图7）。西南地区历史山洪灾害5-9月的重心主要在102°41'E~105°23'E、27°14'N~28°16'N之间，位于云南省昭通市和四川省凉山彝族自治州，5-7月灾害重心由毕节市七星关区向彝良县、大关县移动，8月向西南方向的四川省凉山彝族自治州宁南县移动，9月向东北方向雷波县移动（图7），5-9月重心共移动439.7 km。

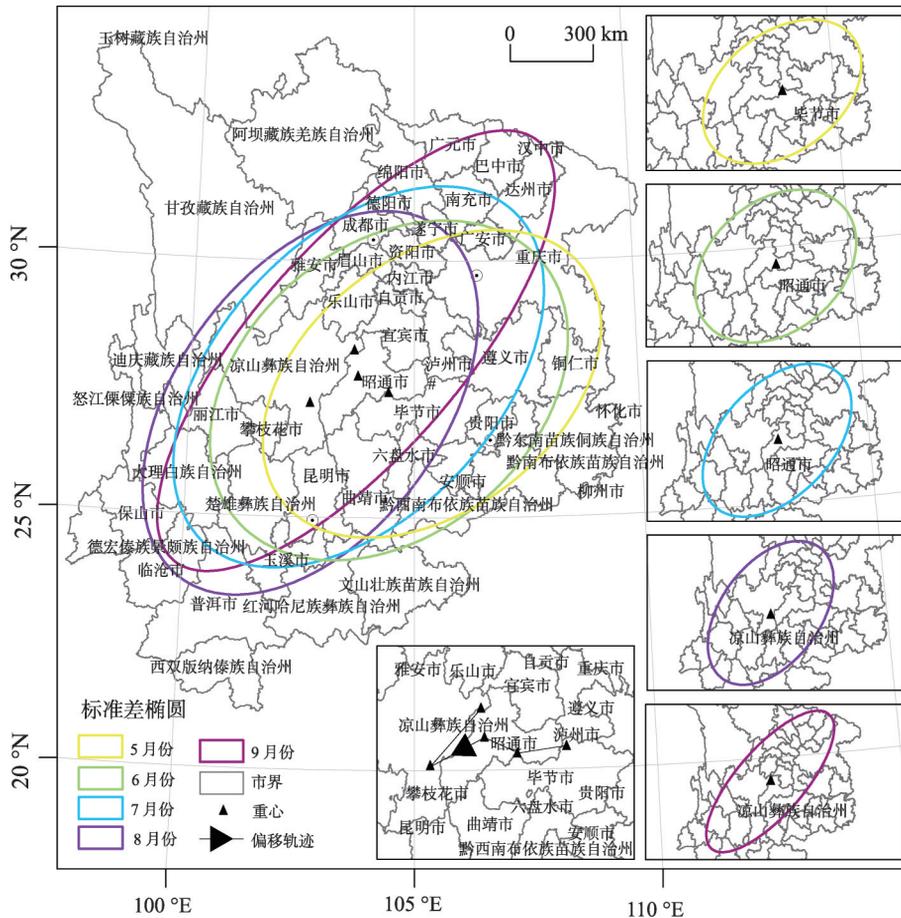


图7 西南地区历史山洪灾害重心及方向分布特征

Fig. 7 Spatial distribution of the center of gravity and direction of historic flash floods in southwest China

5-9月份标准差椭圆方向在36.972°~52.534°之间，西南地区历史山洪灾害的空间分布呈现出西南—东北格局，标准差椭圆方向5-8月的转角均逐渐弱化，转角分别由52.534°减弱至50.344°、43.683°、36.972°，9月份稍有上升趋势转变为41.331°。5-7月标准差椭圆长轴由415.530 km上升到494.478 km，8月略微有所降低，9月大幅上升到605.705 km，表明5-9月历史山洪灾害在主要方向分布上出现极化，整体表现为灾害空间分布方向性越来越明显；6月份短半轴最长为315.182 km，灾害的离散程度最高，9月份短半轴最短为227.662 km，灾害的聚集程度最强，灾害点相对集中，年内整体表现出分散到聚集（表1）。

4.2.3 西南地区山洪灾害空间关联特征分析 为了揭示西南地区历史山洪灾害空间关联特征，以1960-2015年西南地区县域山洪灾害数量为基础，利用ArcGIS和GeoDa平台运用

表1 西南地区历史山洪灾害5-9月标准差椭圆参数变化

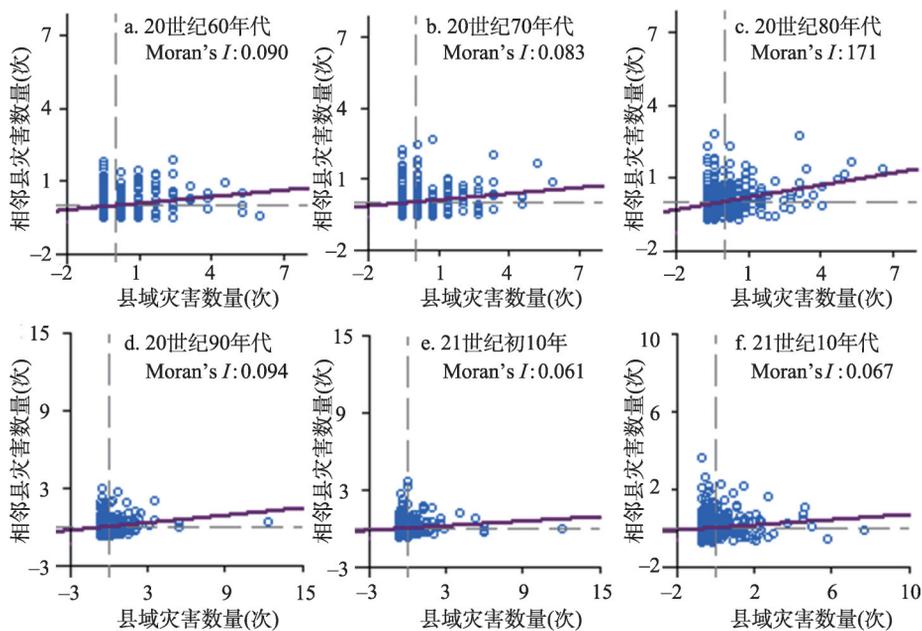
Tab. 1 Variation of SDE parameters of historic flash floods in southwest China from May to September

月份	5月	6月	7月	8月	9月
重心坐标	105°23'E	104°26'E,	103°45'E,	102°41'E	103°41'E
	27°37'N	27°30'N	27°45'N	27°14'N	28°16'N
移动方向	-	西	西	西南	东北
偏移距离(km)	0	95.5	72.9	120.2	151.1
方向角度(°)	52.534	50.344	43.683	36.972	41.331
长半轴(km)	415.530	436.380	494.478	474.403	605.705
短半轴(km)	275.807	315.182	302.194	288.856	227.662

空间自相关模型进行空间关联特征分析, 揭示西南地区县域山洪灾害与相邻县山洪灾害的关系。斜率Moran's I 值在 $-1\sim 1$ 之间, 越接近1, 正相关越强烈, 反之负相关越强烈, 接近0表明不存在空间聚集性, 西南地区空间关联特征分析结果如图8和图9所示。

1960-2015年西南地区山洪灾害数量Moran's I 指数为0.127、 $Z = 5.784$ 、 $P = 0.007$, 各年代Moran's I 均大于0, 表明西南地区山洪灾害在空间上总体存在正相关性(图8)。从20世纪60-80年代正相关集聚特征逐渐增强, Moran's I 指数由0.09上升至0.171, 说明西南地区各县整体表现为山洪灾害的聚集区, 其内部差异性较大, 外部差异性也较大。72.6%的点集聚在I、III象限, 表明西南地区山洪灾害高密度城市多呈现“高一高”和“低—低”集聚特征, 即山洪灾害密度高值城市与周边的高值城市发生空间聚集现象, 灾害密度低值城市与周边的低值城市发生空间聚集现象, 落在II、IV象限的点数相对较少, 说明较少城市出现周边城市与自身差异明显现象。

基于局部自相关的结果, 按照金贵等^[47]的研究成果将西南地区各县历史山洪灾害局部自相关结果分为“高一高”“高一低”“低—高”“低—低”和“不显著”5类(图9),

图8 1960-2015年西南地区历史山洪灾害Moran's I 散点图Fig. 8 Moran's I scatter diagram of historic flash floods in southwest China during 1960 to 2015

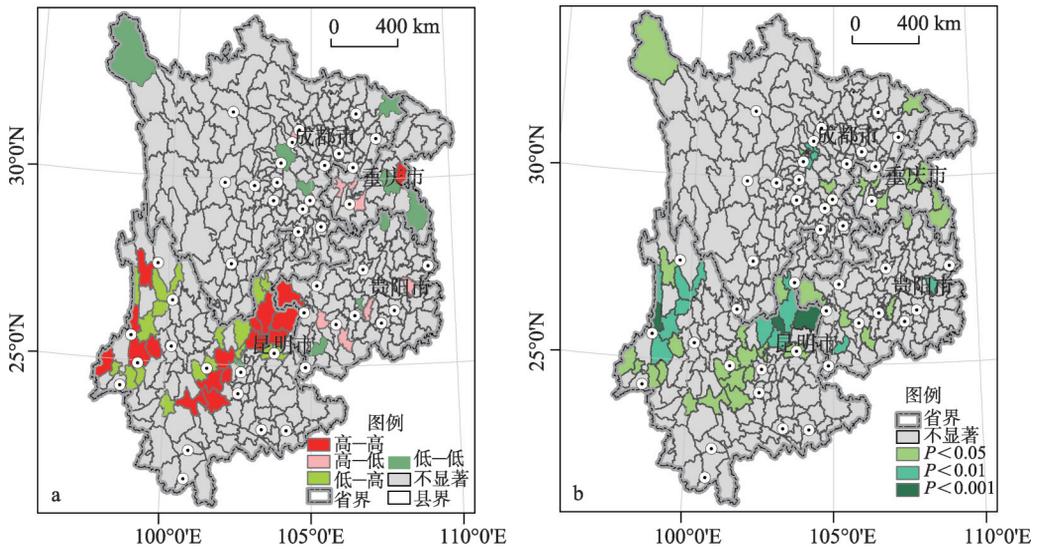


图9 西南地区历史山洪灾害局部空间自相关及显著性

Fig. 9 The spatial autocorrelation (a) and significance (b) analysis of historic flash floods in southwest China

其中山洪灾害呈现“高一高”聚集在镇沅彝族哈尼族拉祜族自治县、维西傈僳族自治县、泸水县、盈江县、隆阳区、双柏县、禄丰县、会泽县以及宣威市等。“低—低”聚集主要集中在兴仁县、酉阳土家族苗族自治县、黔江区、丰都县、万源市、资中县以及石渠县等，其中少数县未发生过山洪灾害。“高一低”聚集区域六枝特区、紫云苗族布依族自治县、龙里县、铜梁区以及巴南区等被灾害频次较低的县域环绕。“低—高”聚集区域在玉龙纳西族自治县、云龙县、龙陵县、楚雄市、禄劝彝族苗族自治县、巧家县等地区，周边有较高灾害频率的县区分布。其余县域均未呈现显著的局部空间自相关。

4.2.4 西南地区山洪灾害空间变化率

1960-1969年、1970-1979年、1980-1989年、1990-1999年、2000-2009年和2010-2015年6个时间段，运用ArcGIS的栅格计算器功能利用线性回归模型，计算西南地区山洪灾害密度变化率（图10）。

1960-2015年，西南地区山洪灾害密度空间变化率大小存在明显的空间分布差异（图10）。借鉴韩红珠等^[48]对变化率结果的分级方法，按照山洪灾害密度变化率 β 值的大小，将西南地区1960-2015年山洪灾害密度年代际变化率分为3种情况：①山洪灾害减弱趋势， $\beta < 0$ ；②山洪灾害缓慢增强趋势， $\beta > 0$ 且 $\beta < 0.67 \times 10^{-4}$ ；③山洪灾害快速增强

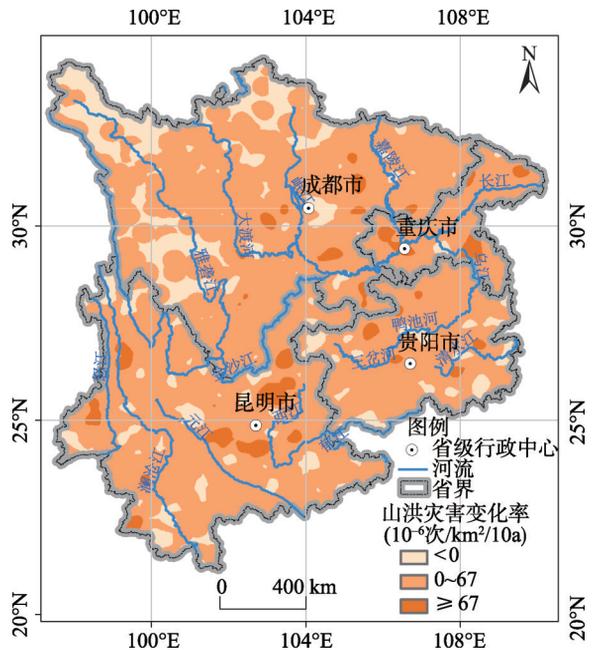


图10 西南地区历史山洪灾害空间变化率
Fig. 10 Spatial change rate of historic flash floods in southwest China from 1960 to 2015

趋势, $\beta > 0.67 \times 10^{-4}$ 。西南地区极少部分地区山洪灾害呈减弱趋势, 且减弱趋势地区主要集中分布在川西高原, 其他地区零星分布, 减弱趋势总面积有 $9.28 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占西南地区总面积的 8.3%; 大部分地区均表现为增强趋势, 其中缓慢增强趋势覆盖面积最广, 总面积有 $9.76 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占西南地区总面积的 87.4%; 山洪灾害快速增强趋势地区主要集中分布在四川盆地及其周边山地地区和滇中地区, 在其他地区存在少许点状快速增强趋势地区, 总面积有 $4.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占西南地区总面积的 4.3%。西南地区成都、雅安、绵阳、遂宁、昆明、玉溪、保山、怒江傈僳族自治州、贵阳、遵义以及重庆南部山洪灾害增强趋势最为明显 (图 10)。

4.3 西南地区历史山洪灾害影响因素

根据《全国山洪灾害防治项目数据库》中是否有山洪记录, 借鉴仇蕾等^[49]在极端洪水灾害评估中运用空间信息格网选取的研究成果, 在西南地区随机选取 3519 个 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 格网进行分类, 将有山洪灾害记录的单元, P 设置为 1, 无山洪灾害的单元, P 设置为 0。King 等^[50]认为在 Logistic 回归模型的应用中“1”样本过少, 会使得该类预测概率被严重低估, 建议将两者的比率控制在 0.2~1 之间, 文中选取的“1”的单元数为 1870 个, “0”的单元数为 1649 个, 0:1 的比率为 0.88。再通过影响因子的选取与量化分级, 利用 Logistic 回归模型, 分析影响因子对山洪灾害空间分布影响的解释力。

(1) 影响因子选取。已有研究表明, 山洪灾害是致灾因子、孕灾环境和承灾体共同作用的结果^[26], 短历时强降雨是山洪灾害的主要致灾因素^[3, 12, 51]。人类活动改变承灾体的分布特征, 同时也改变地表环境特征, 进而影响局部降雨特征^[27, 52]。下垫面条件是山洪灾害的必要条件, 为灾害发生提供物源条件, 同时地表环境变化引起降雨致灾力变化, 进而影响山洪灾害^[18]。本文主要从降雨、地表环境和人类活动三方面来选取西南地区山洪灾害影响因子^[27, 35]。

(2) 影响因素时空差异及其与山洪对应关系。① 地表环境因子。地表环境因子包括地形因子、植被因子、土壤因子等, 根据王瑛等^[2]对地质灾害影响因子的研究, 地形因子反映地形起伏变化、陡缓程度, 直接影响流域产汇流过程和时间, 是最重要的孕灾环境组成部分, 本文选择地形起伏度 (图 11a)、高程标准差 (图 11b)、坡度 (图 11c) 作为地表环境因子指标, 采用 30 m 分辨率 DEM 进行参数的提取。从地形起伏度因子来看, 山洪高密度点主要集中在地形起伏度低于 300 m 区域, 共发生 5954 次山洪灾害 (图 12a); 从高程标准差因子来看, 历史山洪点共有 90% 集中在高程标准差 100 m 以下区域 (图 12b); 从坡度因子来看, 历史山洪多发生在坡度较为平缓地区, 共有 84.6% 发生在坡度低于 20° 地区 (图 12c)。

② 降雨因子。降雨与山洪灾害发生具有极强相关性, 西南地区降雨量^[53]和山洪灾害 (图 3) 在 1998 年、2010 年和 2014 年都出现峰值。根据刘业森等^[26]对山洪受极端降雨的影响研究结果, 建立 5 个降雨因子: 年均降雨量 (图 11d)、10 min 降雨量 (M 10) (图 11e)、1 h 降雨量 (M 60) (图 11f)、6 h 降雨量 (H 6) (图 11g) 和 24 h 降雨量 (H 24) (图 11h)。西南地区降水总体呈现东—西和东南—西北方向的梯度变化特征, 川西高原、滇西北和滇西高原降水较少, 在成都盆地及其周边山地和贵州南部极端降水较为丰富。雅安市位于四川盆地和川西高原接壤地带, 属于年均降雨量高值地区 (图 11d), 同样雅安市历史山洪也属于高聚集区。对比图 11k, 西南地区山洪灾害高密度区与 1 h 降雨量 (图 11f) 高值区极为对应。

③ 人类活动因子。为充分体现人类活动对山洪灾害的影响, 选取人口密度 (图 11i) 和 GDP (图 11j) 为人类活动指标。人类活动体现区域内社会经济发展程度, 在 $1 \text{ km} \times 1$

km 格网单元内统计人口和经济的平均值，考虑到人类活动影响的滞后性，选择2000年的人口密度和GDP作为人类活动因子。西南地区人类活动整体呈现“西疏东密”的集疏格局，基本无人区主要分布在川西高原和横断山区，人口和GDP都集中分布在四川盆地地区。成都市区，绵阳涪城区，昆明官渡、盘龙、五花地区，贵阳白云、南明、花溪地区和重庆沙坪坝、江北、渝北、北碚地区都是人类活动复杂、社会经济较好地区，人类活动改变下垫面条件与降雨，人类活动频繁地区山洪灾害表现为高密度区（图11k）。

(3) 山洪灾害空间分布影响因素。图11所示10个影响因素均为连续变量，由于各影响因素的数值差别较大，因此首先进行标准离散化处理，将影响因素分为10级，再输入

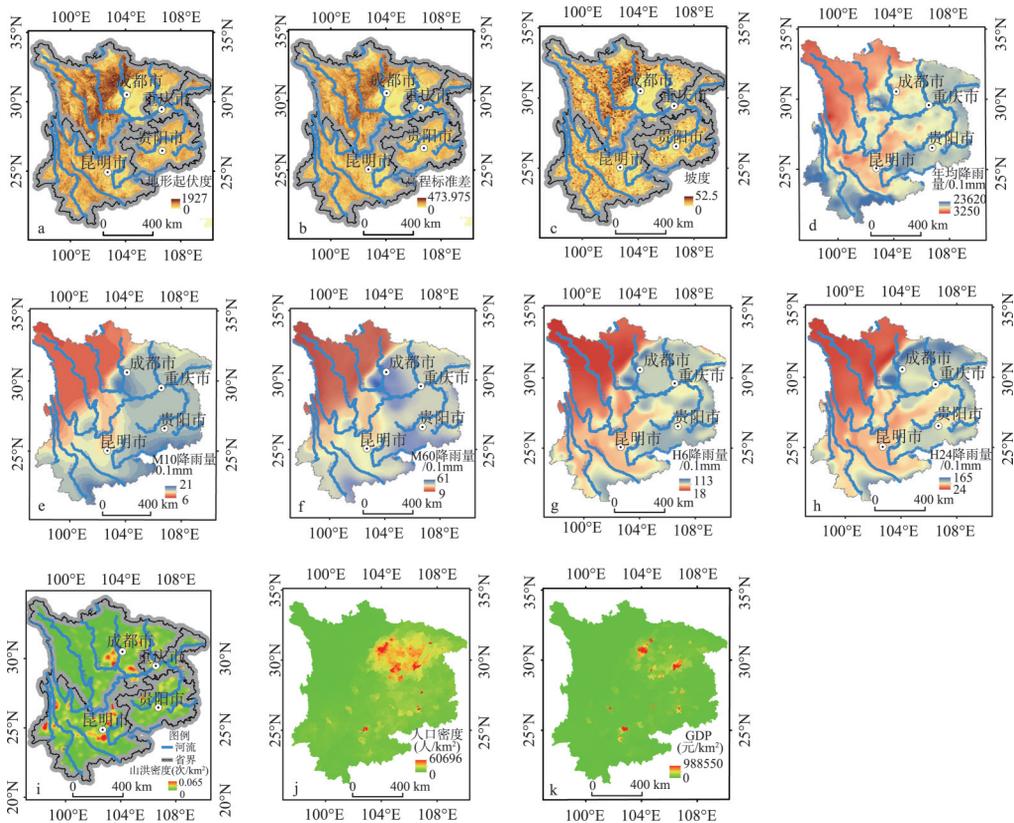


图11 西南地区地表环境(a~c)、降雨(d~h)、人类活动因子(i~j)和山洪密度(k)空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of surface environment (a-c), rainfall (d-h), human activity factors (i-j) and flash floods density (k) in southwest China

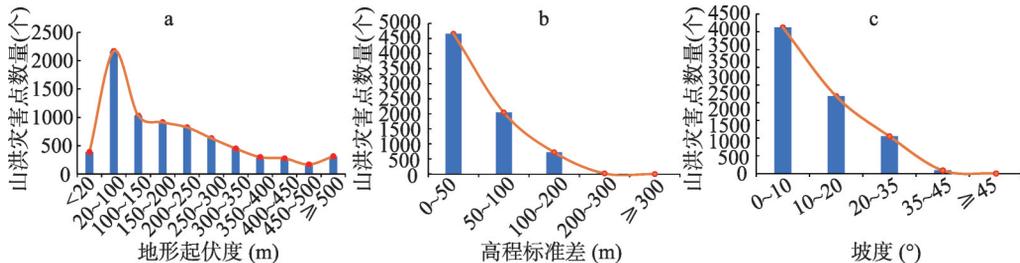


图12 西南地区各地表环境因子地区历史山洪数量分布直方图

Fig. 12 The frequency distribution histograms for historic flash floods in regions with different surface environmental factors

Logistic回归模型,得到各影响因子对山洪灾害空间分布影响的解释力如表2所示,表中 β 为偏回归系数, S.E.为标准差, sig.为显著性, $Exp(\beta)$ 是优势比(简称OR)。OR值大小表示影响程度的大小,大于1表示正向影响,小于1表示负向影响,优势比表示自变量每变化一个单位,引起山洪灾害事件发生概率相应变化的比例。

降雨因子的影响度最高,人类活动因子次之,地表环境因子最低(表2)。年平均降雨量、10 min降雨量、1 h降雨量、6 h降雨量、GDP和人口密度6个变量的 $Sig.< 0.05$,说明这些因素对西南地区山洪灾害空间分布都存在显著影响。表2中6 h降雨、1小时降雨量、人口密度、GDP对应的 $Exp(\beta)$ 值均大于1,表明这4个因子对山洪的发生是正向影响,这些因子增加都会导致西南地区山洪灾害发生的可能性增大。1小时降雨量对山洪灾害空间变化的解释力是最高的,优势比值达到3.654,表明1 h降雨量每增加1%,山洪灾害事件发生的概率变为原来的3.654倍,说明1 h降雨量是西南地区山洪灾害发生的主控因素。年均降雨量和10 min降雨的 $Exp(\beta)$ 值小于1,说明通过模型计算年均降雨量和10 min降雨对西南地区山洪灾害事件发生是负向影响的。

表2 Logistic回归模型各变量参数表

Tab. 2 The parameter table of each variable in the logistic regression model

类型	变量	β	S.E.	sig.	$Exp(\beta)$
地表环境因子	地形起伏度	-0.133	0.074	0.073	0.875
	坡度	-0.008	0.023	0.705	0.991
	高程标准差	0.102	0.066	0.120	1.108
降雨因子	年均降雨量	-0.104	0.035	0.003	0.901
	M10	-1.195	0.075	0.000	0.303
	M60	1.295	0.076	0.000	3.654
	H6	0.289	0.058	0.000	1.336
	H24	-0.095	0.058	0.102	0.909
人类活动因子	GDP	0.396	0.086	0.000	1.486
	人口密度	0.232	0.040	0.000	1.262
	Constant	-0.788	0.236	0.001	0.455

将表2中的 β 值带入式(8)中,结果为式(10)、(11):

$$Z = -0.788 - 0.133X_1 - 0.009X_2 - 0.104X_3 + 0.396X_4 + 0.233X_5 + 0.102X_6 - 1.196X_7 + 1.296X_8 + 0.290X_9 - 0.096X_{10} \quad (10)$$

$$P = \frac{Exp(Z)}{1 + Exp(Z)} \quad (11)$$

式中: Z 为中间变量,表示各变量叠加后的线性权重之和; P 为山洪灾害事件发生概率; X_1 为地形起伏度; X_2 为坡度; X_3 为年平均降雨量; X_4 为GDP; X_5 为人口密度; X_6 为高程标准差; X_7 为10 min降雨量; X_8 为1 h降雨量; X_9 为6 h降雨量; X_{10} 为24 h降雨量。上式即为西南地区山洪灾害发生概率模型(the Probability Model of Flash Floods in Southwest China, PMFFSC)。

(4) 精度分析。通过混淆矩阵和ROC(Receiver Operating Characteristic)曲线对PMFFSC模型的精度进行评估。表3为PMFFSC模型的预测混淆矩阵,即对是否发生山洪灾害两类情况的预测正确率,分割值为0.5, $P \geq 0.5$ 判断为发生山洪灾害, $P < 0.5$ 则判断为未发生山洪灾害。模型总的正确率为75.9%,其中未发生山洪灾害的正确率为70.7%,发生山洪灾害预测正确率为80.5%。

图13中蓝色线为PMFFSC模型的ROC曲线，对ROC曲线下的面积（AUC）进行统计， $AUC = 0.829$ ，标准误差0.007。根据Swets等^[54]的研究，ROC曲线下面积在0.5~0.7之间表示预测价值较低，在0.7~0.9之间表示预测价值中等，0.9以上表示预测价值高。因此，本模型具有相对较高的预测价值。

5 结论与讨论

基于1960-2015年西南地区历史山洪灾害数据，采用线性回归模型、标准差椭圆、空间自相关和Logistic回归模型，运用ArcGIS、GeoDa等平台对西南地区山洪灾害“空间格局”与“时空过程”进行研究，揭示了西南地区山洪灾害时空分异的影响因素。主要研究结论为：

(1) 1960-2015年，西南地区山洪灾害整体呈现上升趋势，尤其1990-2015年灾害上升幅度更大，灾害主要在夏季（6-8月）发生；西南地区历史山洪灾害存在明显的空间分异特征，空间上呈西北低—东南高整体格局特征，川西高原、滇西和滇西北地区山洪灾害密度普遍偏低，四川盆地及周边山地地区、滇中和滇东北地区山洪灾害密度普遍偏高，重庆地区、贵州地区山洪灾害密度呈中等水平。

(2) 区域内四川盆地地区极端降水较多、人口密度大、GDP快速发展，四川盆地表现为山洪灾害高密度区域。川西高原、滇西北地区、滇西地区和滇西南地区降雨较少，加之人口稀少、GDP发展缓慢，区域内山洪灾害表现为低密度区。在重庆地区、贵州地区和滇中、滇东北、滇东地区极端降水、人口密度和GDP都处于中间水平，因此这些区域山洪灾害的发生率也处于中间水平。

(3) 西南地区山洪灾害重心在年内存在明显的向正西方向移动的趋势；山洪灾害快速增强趋势地区主要集中分布在四川盆地及其周边山地地区和滇中地区，其余大部分地区都表现为缓慢增长趋势，只有川西高原、滇西和滇西北地区存在少许山洪灾害减弱趋势。此结果与袁文德等^[55]得出西南地区近50年极端降水沿东—西和东南—西北方向的梯度变化结果较为一致，也与王立涛等^[56]研究得出西南地区社会经济、人口发展研究相对较快相对应。

(4) 1960-2015年，各类因素对山洪灾害空间分布的影响大小依次为降雨因子、人类活动因子、地表环境因子，降雨因子中1h降雨量对山洪的影响最强，优势比值达到3.654。山洪灾害影响因素具有明显的空间差异性，历史山洪灾害在年内沿经度的变化强于沿纬度变化，同纬度不同经度地区气候差异特征最为明显。结论与刘业森等^[26]得出气候条件是山洪灾害发生的主控因素相一致。

山洪灾害的发生、发展过程极其复杂，在后续工作中需要加强西南地区流域下垫面

表3 PMFFSC模型的预测混淆矩阵

Tab. 3 Confusion matrix for the PMFFSC model

实际是否发生	模型预测		正确率 (%)
	是否发生		
	0	1	
0	1165	483	70.7
1	364	1504	80.5
总体百分比			75.9

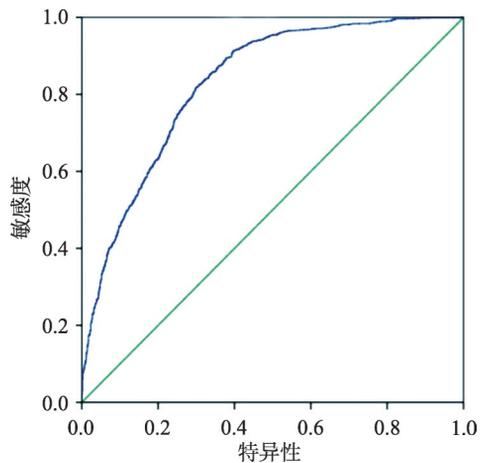


图13 西南地区山洪灾害事件发生概率模型ROC曲线

Fig. 13 ROC curve for probability model of flash floods in southwest China

特征发掘与产汇流研究, 结合流域下垫面和产汇流特征认清山洪形成机理, 制定相应的防治措施。同时需加强山洪灾害及其影响因素数据的时间和空间精度, 进一步提升数据时效性, 提高山洪时空特征与影响因素研究的可靠性。

参考文献(References)

- [1] Liu Xilin, Yu Chengjun, Shang Zhihai. Risk mapping and spatial pattern of debris flow and landslide hazards in China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(5): 721-731. [刘希林, 余承君, 尚志海. 中国泥石流滑坡灾害风险制图与空间格局研究. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(5): 721-731.]
- [2] Wang Ying, Lin Qigen, Shi Peijun. Spatial pattern and influencing factors of casualty events caused by landslides. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(5): 906-917. [王瑛, 林齐根, 史培军. 中国地质灾害伤亡事件的空间格局及影响因素. *地理学报*, 2017, 72(5): 906-917.]
- [3] Yang Hongjuan, Wei Fangqiang, Ma Zhenfeng, et al. Spatial-temporal distribution of debris flows in Sichuan province in China and the corresponding rainfall characteristics. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(4): 102-107. [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. *灾害学*, 2017, 32(4): 102-107.]
- [4] Guo Yue. Hazard paradigms and their historical evolution. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(6): 935-942. [郭跃. 灾害范式及其历史演进. *地理科学*, 2016, 36(6): 935-942.]
- [5] Gao Yanchao, He Jie, Chen Ningsheng, et al. Analysis of characters of torrent disasters in the towns of the mountain areas, Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 2006, 33(1): 88-93. [高延超, 何杰, 陈宁生, 等. 四川省山区城镇山洪灾害特征分析. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1): 88-93.]
- [6] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Chen Binru, et al. 050811 Large-scale debris flow in Hailuo valley and prevention countermeasures. *Bulletin of Soil & Water Conservation*, 2006, 26(3): 122-126. [陈晓清, 崔鹏, 陈斌如, 等. 海螺沟050811特大泥石流灾害及减灾对策. *水土保持通报*, 2006, 26(3): 122-126.]
- [7] Zhao Jian, Fan Beilin. Characteristics of temporal and spatial distribution of mountain flood in China. *China Water Resources*, 2006(13): 45-47. [赵健, 范北林. 全国山洪灾害时空分布特点研究. *中国水利*, 2006(13): 45-47.]
- [8] Liu Renyi, Liu Nan. Flood area and damage estimation in Zhejiang, China. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(1): 1-8.
- [9] Liu Qiangyi, Cheng Weiming, Sun Dongya, et al. Distribution characteristics of historical mountain flood in China. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(12): 1557-1566. [刘楠漪, 程维明, 孙东亚, 等. 中国历史山洪灾害分布特征研究. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1557-1566.]
- [10] Cui Peng. Progress and prospects in research on mountain hazards in China. *Progress in Geography*, 2014, 33(2): 145-152. [崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题. *地理科学进展*, 2014, 33(2): 145-152.]
- [11] Xiong Junnan, Gong Ying, Cheng Weiming, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of mountain floods in Tibet, China in recent 30 years. *Mountain Research*, 2018, 36(4): 557-570. [熊俊楠, 龚颖, 程维明, 等. 西藏自治区近30年山洪灾害时空分布特征. *山地学报*, 2018, 36(4): 557-570.]
- [12] Xiong Junnan, Zhao Yunliang, Cheng Weiming, et al. Temporal-spatial distribution and the influencing factors of mountain-flood disasters in Sichuan province. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(10): 1443-1456. [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. *地球信息科学学报*, 2018, 20(10): 1443-1456.]
- [13] Xiong Junnan, Liu Zhiqi, Fan Chunkun, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and changing trend of meteorologic disaster in Tibet Autonomous Region from 1983 through 2013. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1221-1231. [熊俊楠, 刘志奇, 范春捆, 等. 1983-2013年西藏自治区气象灾害时空分布特征与变化趋势. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1221-1231.]
- [14] Huang Guoru, Cheng Guodong, Xian Zuoyan, et al. Analysis of causes of mountain flood disaster at Yaoan small watershed of Qingyuan. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(3): 136-141. [黄国如, 成国栋, 洗卓雁, 等. 清远市瑶安小流域山洪灾害成因分析. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(3): 136-141.]
- [15] Li Xinghua, Li Zhangjun, Han Fang, et al. Regularity and cause of mountain torrents in Inner Mongolia in recent 50 years. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(6): 241-246. [李兴华, 李彰俊, 韩芳, 等. 近50年内蒙古山洪灾害的规律及成因. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 241-246.]
- [16] Li Jingbao, Mao Dehua, Xu Shuhui. The causes and features of mountain torrent disaster in Hunan province. *Mountain Research*, 2002, 20(3): 380-384. [李景保, 毛德华, 许树辉. 湖南省山洪灾害特征与成因分析. *山地学报*, 2002, 20(3):

- 380-384.]
- [17] Tang Chuan, Zhu Jing. A GIS based regional torrent risk zonation. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 87-94. [唐川, 朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划. *地理学报*, 2005, 60(1): 87-94.]
- [18] Zhao Gang, Pang Bo, Xu Zongxue, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(9): 1133-1142. [赵刚, 庞博, 徐宗学, 等. 中国山洪灾害危险性评价. *水利学报*, 2016, 47(9): 1133-1142.]
- [19] Ren Hongyu, Du Jun, Ding Wenfeng, et al. Risk assessment of mountain torrents disaster in China based on GIS. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(4): 86-92. [任洪玉, 杜俊, 丁文峰, 等. 基于GIS的全国山洪灾害风险评估. *灾害学*, 2018, 33(4): 86-92.]
- [20] Ma Meihong, He Bingshun, Liu Qi, et al. China's characteristics and countermeasures of flash flood disasters in 2014. *Yellow River*, 2017, 39(9): 24-27. [马美红, 何秉顺, 刘启, 等. 2014年中国山洪灾害特点及防御对策. *人民黄河*, 2017, 39(9): 24-27.]
- [21] Du Jun, Ding Wenfeng, Ren Hongyu, et al. Relationships between different types of flash flood disasters and their main impact factors in the Sichuan province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11): 1977-1983. [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. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1977-1983.]
- [22] Wan Shiyun, Zhao Ningkun, Duan Wei. Correlation and multi-timescale characteristics of strong precipitations and landslide debris flows in Yunnan province. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1): 45-50. [万石云, 赵宁坤, 段玮. 云南省滑坡泥石流与强降水的相关性和多时间尺度特征研究. *灾害学*, 2015, 30(1): 45-50.]
- [23] Qiu Yujun, Wang Jingai, Zou Xueyong. Regional disaster assessment model. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(3): 48-53. [邱玉珺, 王静爱, 邹学勇. 区域灾情评价模型. *自然灾害学报*, 2003, 12(3): 48-53.]
- [24] Wang Jingai, Shi Peijun, Zhu Li. A research on regional distribution of major natural hazards in China. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(1): 18-26. [王静爱, 史培军, 朱骊. 中国主要自然致灾因子的区域分异. *地理学报*, 1994, 49(1): 18-26.]
- [25] Xiong Junnan, Wei Fangqiang, Liu Zhiqi. Hazard assessment of debris flow in Sichuan province. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(12): 1604-1612. [熊俊楠, 韦方强, 刘志奇. 四川省小流域泥石流危险性评价. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1604-1612.]
- [26] Liu Yesen, Yang Zhenshan, Huang Yaohuan, et al. Spatial and temporal evolution patterns and driving factors of mountain flood disasters in China since the founding of the People's Republic of China. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, 49(2): 408-420. [刘业森, 杨振山, 黄耀欢, 等. 建国以来中国山洪灾害时空演变格局及驱动因素分析. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(2): 408-420.]
- [27] Liu Yi, Yang Yu. Major natural disasters and their spatio-temporal variation in the history of China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 291-300. [刘毅, 杨宇. 历史时期中国重大自然灾害时空分异特征. *地理学报*, 2012, 67(3): 291-300.]
- [28] Li Bingyuan, Li Juzhang, Wang Jianjun. Areal association of natural hazard in China. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(1): 1-11. [李炳元, 李矩章, 王建军. 中国自然灾害的区域组合规律. *地理学报*, 1996, 51(1): 1-11.]
- [29] Zhu Linfu, Xie Shiyong, Yang Hua, et al. The response of dynamic change in vegetation coverage to topography in Chongqing based on MODIS EVI. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 2023-2033. [朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于MODIS EVI的重庆植被覆盖变化的地形效应. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2023-2033.]
- [30] Zhang Shaoyun, Zhou Zhongfa, Xiong Kangning, et al. Spatial pattern of the caves in Guizhou province and their the influencing factors. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1998-2009. [张绍云, 周忠发, 熊康宁, 等. 贵州洞穴空间格局及影响因素分析. *地理学报*, 2016, 71(11): 1998-2009.]
- [31] Tao Yun, Tang Chuan, Duan Xu. Landslide and debris flow hazards in Yunnan and their relationship with precipitation characteristics. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(1): 180-186. [陶云, 唐川, 段旭. 云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系. *自然灾害学报*, 2009, 18(1): 180-186.]
- [32] Shi Peijun, Kong Feng, Fang Jiayi. Spatio-temporal patterns of China decadal storm rainfall. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11): 1281-1290. [史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局. *地理科学*, 2014, 34(11): 1281-1290.]
- [33] Cheng Weiming, Gao Xiaoyu, Zhou Chenghu, et al. Spatial-temporal distribution of cropland in China based on geomorphologic regionalization during 1990-2015. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1613-1629. [程维明, 高晓雨, 周成虎, 等. 基于地貌分区的1990-2015年中国耕地时空特征变化分析. *地理学报*, 2018, 73(9): 1613-1629.]
- [34] Liu Yu, Fu Bojie. Topographical variation of vegetation cover evolution and the impact of land use/cover change in the

- Loess Plateau. *Arid Land Geography*, 2013, 36(6): 1097-1102. [刘宇, 傅伯杰. 黄土高原植被覆盖度变化的地形分异及土地利用/覆被变化的影响. *干旱区地理*, 2013, 36(6): 1097-1102.]
- [35] Han Huiran, Yang Chengfeng, Song Jinping. Impact factors of location choice and spatial pattern evolution of wholesale enterprises in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 219-231. [韩会然, 杨成凤, 宋金平. 北京批发企业空间格局演化与区位选择因素. *地理学报*, 2018, 73(2): 219-231.]
- [36] Fan Jie, Tao Anjun, Lv Chen. The coupling mechanism of the centroids of economic gravity and population gravity and its effect on the regional gap in China. *Progress in Geography*, 2010, 29(1): 87-95. [樊杰, 陶岸君, 吕晨. 中国经济与人口重心的耦合态势及其对区域发展的影响. *地理科学进展*, 2010, 29(1): 87-95.]
- [37] Zhao Yuan, Yang Zuying, Hao Lisha, et al. The evolution of spatial displacement pattern of China's crude oil flow source-sink system. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(4): 455-466. [赵媛, 杨足膺, 郝丽莎, 等. 中国石油资源流动源—汇系统空间格局特征. *地理学报*, 2012, 67(4): 455-466.]
- [38] Chen Yefeng, Wang Yanhui, Zhao Wenji, et al. Contributing factors and classification of poor villages in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(10): 1827-1844. [陈烨烽, 王艳慧, 赵文吉, 等. 中国贫困村致贫因素分析及贫困类型划分. *地理学报*, 2017, 72(10): 1827-1844.]
- [39] Long Kaisheng, Zhao Yali, Zhang Honghui, et al. Spatial difference and its influencing factors in ecological land rent in China. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1125-1136. [龙开胜, 赵亚莉, 张鸿辉, 等. 中国生态地租空间分异及其影响因素分析. *地理学报*, 2012, 67(8): 1125-1136.]
- [40] Li Hong, Gong Zhaoning, Zhao Wenji, et al. Driving forces analysis of reservoir wetland evolution in Beijing based on logistic regression model. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 357-367. [李洪, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 基于 Logistic 回归模型的北京市水库湿地演变驱动力分析. *地理学报*, 2012, 67(3): 357-367.]
- [41] Qian Zhengan, Gu Hongdao, Yan Hong, et al. Numerical simulations of extremely intense rainstorm and southwest vortex over Sichuan in July of 1981. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, 48(4): 415-423. [钱正安, 顾弘道, 颜宏, 等. 四川“81.7”特大暴雨和西南涡的数值模拟. *气象学报*, 1990, 48(4): 415-423.]
- [42] Shen Huiying, Kuang Yiyu, Zi Li. Genesis of 2010 storm-flood in Yangtze river basin and its comparison with 1998 flood. *Yangtze River*, 2011, 42(6): 11-14. [沈浒英, 匡奕煜, 瞿丽. 2010年长江暴雨洪水成因及与1998年洪水比较. *人民长江*, 2011, 42(6): 11-14.]
- [43] Xiao Dixiang, Gu Qingyuan, Qi Shengxiu, et al. Diagnostic analysis of continuous heavy rainfall: 3 cases in northeastern Sichuan province in July, 2007. *Torrential Rain and Disasters*, 2008, 27(3): 231-236. [肖递祥, 顾清源, 祁生秀, 等. 2007年7月川东北连续3场大暴雨过程的诊断分析. *暴雨灾害*, 2008, 27(3): 231-236.]
- [44] He Guangbi, Tu Nini, Zhang Lihong, et al. Prediction capability analysis of limited-area numeric models on Sichuan heavy rainstorm process in Sichuan. *Plateau & Mountain Meteorology Research*, 2010, 30(4): 8-17. [何光碧, 屠妮妮, 张利红, 等. 2010年7月14-18日四川大暴雨过程区域模式预报性能分析. *高原山地气象研究*, 2010, 30(4): 8-17.]
- [45] Tang Haopeng, Wang Fen, Jin Qiangbin. Analysis on persistent heavy rainfall during July 13 to 17, 2014 over Guizhou. *Desert and Oasis Meteorology*, 2015, 9(6): 41-49. [唐浩鹏, 王芬, 金强兵. 2014年7月13-17日贵州持续性暴雨的分析. *沙漠与绿洲气象*, 2015, 9(6): 41-49.]
- [46] Wan Shiyun, Li Huahong, Hu Juan. Hazard zoning of landslide and debris flow disasters in Yunnan province. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(2): 60-64. [万石云, 李华宏, 胡娟. 云南省滑坡泥石流灾害危险区划. *灾害学*, 2013, 28(2): 60-64.]
- [47] Jin Gui, Deng Xiangzheng, Zhao Xiaodong, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze river economic zone during 2005-2014. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1242-1252. [金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005-2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征. *地理学报*, 2018, 73(7): 1242-1252.]
- [48] Han Hongzhu, Bai Jianjun, Zhang Bo, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation phenology in Shaanxi province based on MODIS time series. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(4): 125-131. [韩红珠, 白建军, 张波, 等. 基于MODIS时序的陕西省植被物候时空变化特征分析. *国土资源遥感*, 2018, 30(4): 125-131.]
- [49] Qiu Lei, Wang Huimin, Ma Shujian. Assessment method for extreme flood disaster losses and its application. *Advances in Water Science*, 2009, 20(6): 869-875. [仇蕾, 王慧敏, 马树建. 极端洪水灾害损失评估方法及应用. *水科学进展*, 2009, 20(6): 869-875.]
- [50] King G, Zeng L. Logistic regression in rare events data. *Political Analysis*, 2001, 9(2): 137-163.
- [51] Cui Yun, Kong Jiming, Tian Shujun, et al. The critical role for heavy rainfall in the evolution of the mountain hazards chains. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(1): 87-94. [崔云, 孔纪名, 田述军, 等. 强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键控制作用. *山地学报*, 2011, 29(1): 87-94.]
- [52] Maruša Špitalar, Jonathan J. Gourley, Celine Lutoff, et al. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the

- US from 2006 to 2012. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 863-870.
- [53] Zhou Lilei, Yang Hua, Liu Rui, et al. Spatial-temporal characteristics of annual precipitation in southwest China based on TRMM 3B43 V7 data. *Journal of Chongqing Normal University*, 2017, 34(1): 114-122. [周李磊, 杨华, 刘睿, 等. 基于TRMM数据的西南地区年降水时空特征研究. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 34(1): 114-122.]
- [54] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [55] Yuan Wende, Zheng Jiangkun, Dong Kui. Spatial and temporal variation in extreme precipitation events in southwestern China during 1962-2012. *Resources Science*, 2014, 36(4): 766-772. [袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962-2012年西南地区极端降水事件的时空变化特征. *资源科学*, 2014, 36(4): 766-772.]
- [56] Wang Litao, Wang Shixin, Zhou Yi, et al. Mapping population density in China between 1990 and 2010 using remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 269-281.

Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China

XIONG Junnan^{1,2}, LI Jin¹, CHENG Weiming², ZHOU Chenghu²,
GUO Liang^{3,4}, ZHANG Xiaolei^{3,4}, WANG Nan², LI Wei¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, SWPU, Chengdu 610500, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. China 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: Studies on spatial-temporal characteristics and influencing factors of flash floods are key contents to the assessment and management of flash flood. Based on the historic flash flood data in southwest China from 1960 to 2015, the spatial and temporal distribution of flash flood and its influencing factors were analyzed by using the linear regression model, standard deviation ellipse, spatial autocorrelation, and logistic regression model. The results show that: (1) The annual frequency of flash floods in southwest China shows an exponential growth trend, and the annual variation reveals a stable, slow and rapid increase fluctuation during 1960-1980, 1981-1998 and 1999-2015, respectively; the monthly characteristics are obvious and precipitation is mainly concentrated in June, July and August. (2) The obvious spatial difference of flash flood is observed in the study area, and the high-density areas are mainly concentrated in central Yunnan plateau, Sichuan Basin and their surrounding mountainous areas. The flash flood distribution has a significant spatial positive correlation and spatial agglomeration (Moran's I index is 0.127, $Z = 5.784$, $P = 0.007$). (3) The gravity center of historical disasters has a distinct trend of moving to the west during the year. The standard deviation ellipse angle gradually weakens, the long axis gradually lengthens, and the short axis gradually shortens. (4) Rainfall factors have the maximum impact on flash floods, followed by human activity factors, and the minimal is surface environmental factors. Among the rainfall factors, the one-hour rainfall has the strongest impact on flash floods, and its dominant ratio reached 3.654. The results can provide technical support for research on forming mechanism, monitoring and early warning, and implementation of disaster prevention and mitigation measures of flash floods.

Keywords: southwest China; flash flood; spatial-temporal pattern; logistic regression