

引用格式:熊俊楠,李进,朱吉龙,等.重庆市山洪灾害时空格局及影响因素研究[J].地球信息科学学报,2019,21(10):1550-1564. [Xiong J N, Li J, Zhu J L, et al Spatial-temporal distribution and the influencing factors of Mountain Torrent Disasters in Chongqing[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(10):1550-1564.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180442

重庆市山洪灾害时空格局及影响因素研究

熊俊楠^{1,2}, 李进¹, 朱吉龙¹, 程维明^{2*}, 郭良^{3,4}, 王楠², 张晓蕾^{3,4}

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

Spatial-temporal Distribution and the Influencing Factors of Mountain Torrent Disasters in Chongqing

XIONG Junnan^{1,2}, LI Jin¹, ZHU Jilong¹, CHENG Weiming^{2*}, GUO Liang^{3,4}, WANG Nan², ZHANG Xiaolei^{3,4}

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, Chinese Academy Sciences, 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: The spatiotemporal distribution of mountain torrents and its influencing factors are the key issues for disaster research. Based on the historical torrent disaster data of Chongqing from 1950 to 2015, the spatiotemporal distribution of torrential disasters in Chongqing was analyzed by mean center, standard deviation ellipse, kernel density estimation, and M-K mutation detection. Subsequently, the correlation between mountain torrents and various influencing factors were quantified. Results show that: (1) From 1950 to 2015, the occurrence frequency of the historic mountain torrents in Chongqing presented a trend of stabilization at first and then increase. Mountain torrents mainly occurred from May to September. The occurrence frequency of mountain torrents presented an exponential growth trend on the whole according to the interdecadal trend. (2) The occurrence of mountain torrents in Chongqing had an obvious agglomeration, and the frequency of mountain torrents in adjacent counties was similar. The density of mountain torrents in Jiulongpo, Nanan, Beibei, and Bishan was more than 50 times per 1000 km², which belonged to high risk regions. (3) The spatial distribution pattern of mountain torrent disasters was "scattered in southwest- northeast and concentrated in northwest- southeast." Before 2010, the gravity center of mountain torrents mainly concentrated in the vicinity of Fuling; After 2010, the distribution of mountain torrent disasters inclined to northwest, the heart moved to Zhongxian county, the

收稿日期:2018-09-06;修回日期:2019-05-20.

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“测绘遥感”(2017CXTD09)。[**Foundation items:** Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20030302; National Mountain Flood Disaster Survey and Evaluation Project of Chinese Academy of Water Sciences, No.SHZH-IWHR-57; China Geological Survey Project, No.DD20190637; Open Topic of Digital Fujian Institute of Large Data for Natural Disaster Monitoring, 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,副教授,主要从事遥感地理信息系统理论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,甘肃甘谷人,博士,研究员,主要从事数字地形地貌研究。E-mail: chengwm@reis.ac.cn

degree of accumulation decreases, and the occurrence of mountain torrents increased randomly; (4) 2002 was the year of a sudden change of mountain torrents in Chongqing, which mainly increased in Tongliang, Bishan, Jiulongpo, Banan, Pengshui Miao Autonomous County, and Kai County. (5) Both the elevation and the density of river networks were positively correlated with the density of mountain torrents, while vegetation coverage was negatively correlated. Short-duration heavy rainfall can stimulate the occurrence of mountain torrents. Our findings are of great significance for flood prevention and disaster mitigation in Chongqing.

Key words: Chongqing; mountain torrents disaster; spatial-temporal distribution; Standard Deviation Ellipse (SDE); influencing factors; flood control and disaster reduction

***Corresponding author:** CHENG Weiming, E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

摘要:山洪灾害时空分布规律及其影响因素研究,是山洪灾害研究领域中重点关注的问题。本文利用重庆市1950–2015年历史山洪灾害数据,采用平均中心、标准差椭圆、核密度分析和M-K突变检测等方法分析了重庆市历史山洪灾害时空分布规律,并在此基础上分析了山洪与各影响因素的相关性。结果表明:①1950–2015年重庆市历史山洪灾害发生频次总体呈先稳定后上升的趋势,山洪灾害主要集中在5–9月发生,山洪灾害发生频次按年代际整体上呈指数增长趋势;②重庆市山洪灾害发生具有明显的集聚性,相邻县域山洪发生频次较为相近,其中九龙坡区、南岸区、北碚区、璧山区山洪灾害密度均超过50次/1000 km²,属于山洪灾害高发区域;③山洪灾害整体呈“西南–东北”分散,“西北–东南”聚集的空间分布格局。2010年前,山洪重心主要集中在涪陵区一带;2010年后山洪灾害分布方向向西北倾斜,重心移至忠县,聚集程度降低,山洪发生随机性变强;④2002年是重庆市山洪灾害突变的年份,突变以增多为主,主要集中在铜梁区、璧山区、九龙坡区、巴南区、彭水苗族土家族自治县和开县;⑤山洪影响因素探究表明高程和河网密度与山洪灾害密度呈正相关关系,而植被覆盖度与山洪灾害密度呈负相关关系,短历时的强降雨对山洪的发生有激发作用。研究结果对重庆市山洪防灾减灾具有重要意义。

关键词:重庆市;山洪灾害;时空分布;标准差椭圆;影响因素;防洪减灾

1 引言

山洪,是指发生在山区流域面积较小的溪沟或周期性流水的荒溪水中,历时较短,暴涨暴落的地表径流^[1]。山洪灾害因其突发性强、破坏力大及预警困难等特点,给国民经济和人民生命财产造成了严重危害。由于中国地处东亚季风区的特殊位置,短时间强降雨频发,加之地质条件复杂,人类活动频繁,境内山洪灾害频发,是世界上山洪灾害最严重的国家之一^[2–5]。据不完全统计,1949–2012年中国因洪涝灾害死亡约27万余人,其中有19万余人因山丘区暴发山洪灾害造成死亡^[6]。重庆市位于中国西南部和长江上游地区,境内山地、丘陵面积占94%,水系发达,河流稠密,受地理条件限制,山洪灾害频发,严重制约了当地的经济发展。过去山洪灾害研究与防治工作表明,摸清山洪灾害的发育特点、分布规律及成因是进行灾害损失评估及风险图区划等工作的前提^[7–10]。

近年来,随着山洪灾害的频繁发生,造成的危害日益严重,国内众多学者对山洪灾害的发育特点、分布规律、形成机理、危险区划和防治措施进行了大量的研究。其中,部分学者对于灾害空间分布

规律及驱动因素的分析也进行了研究。刘业森等^[11]利用重心对比方法,从灾害点的重心地理位置、聚集程度、移动趋势3方面,揭示1951–2015年全国的山洪灾害时空演变特征,同时基于自然流域单元,构建降雨、人类活动、地表环境相关的因子,采用地理探测器分析方法探究影响历史山洪灾害的空间分布的驱动因素。熊俊楠等^[12–13]利用空间重心、误差椭圆以及空间聚类方法对四川省的历史灾害点进行时空分异研究,并根据人类活动、降雨以及自然因素3方面采用地理探测器对形成这种灾害点空间异质性的驱动因素进行探究。王英等^[14]对甘肃黄土高原区的历史灾害点从时间尺度上分析了变化特征,并且从地形地貌、水文气象、河流水系、社会经济的基础上选取9项指标作为影响因子,通过熵权法进行山洪灾害风险区划的等级划分。熊俊楠等^[13]利用地理信息空间统计、数据挖掘分析等方法对西藏山洪灾害的时空分布特征及突变情况进行分析,探讨了山洪灾害与不同降水指标的分布关系。刘檣漪等^[15]对中国历史山洪灾害分布按地貌单元进行分析,结果表明,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;赵刚等^[16]采用可变模糊集法对中国山洪灾害进

行危险性评价,结果表明,中国约2/3的国土面积可能受到山洪灾害威胁,山洪极高和高危险性区域占国土面积的23.87%。唐川等^[17]基于GIS平台,对影响山洪形成的地形坡度、暴雨天数、河网缓冲区、标准面积洪峰流量、泥石流分布密度和洪灾历史统计6项因子进行了分析和叠合评价,完成了红河流域的山洪灾害危险评价图。崔鹏等^[18]通过研究山洪泥石流形成机理,重点讨论了包括灾害风险预测、临灾预案、灾害防治工程方案等内容风险处置对策,并形成一套基于山洪泥石流动力过程的风险评估与风险管理理论与方法体系。而目前针对重庆的山洪灾害研究,主要集中在小区域的山洪危险性评价^[5,16]、防治措施^[4-5,18]等方面,对重庆市的灾害空间分布及其影响因素较少涉及。张乾柱等^[19]研究了2013-2015年重庆市山洪灾害详查点与灾害点的空间分布差异,并选取不同的地形、地貌因子分析山洪灾害详查点的合理性,但由于山洪灾害点高发区详查点数据量较少,对山洪灾害的预防工作的指导作用不够显著。加之历史资料缺乏,灾害时空数据分析理论上不成熟,针对重庆市山洪灾害时空格局及其影响因素的研究涉及较少。

通过对前人对历史山洪灾害时空格局与驱动因素的研究,本文以重庆市1950-2015年历史山洪灾害数据为基础,分析了重庆市历史山洪灾害在年际、月际、年代际3个时间尺度上的变化特征。以ArcGIS和MATLAB为平台,通过运用平均中心、标准差椭圆、核密度分析和M-K突变检测等方法探究了重庆市历史山洪灾害在各级行政区的分布及其密度特征,各时期山洪灾害中心、方向趋势等空间特征以及突变特征,在此基础上,探究地形地貌、降雨、人类活动等因素对山洪分布的关系。本文研究成果对于认清重庆市山洪灾害分布规律、减轻山洪灾害损失以及促进重庆市经济发展具有一定的理论和现实意义。

2 研究区概况及数据源

2.1 研究区概况

重庆市位于中国内陆西南部(105°11'E-110°11'E, 28°10'N-32°13'N),是四川盆地与长江中下游平原的过渡地带。辖区南北长450 km,东西宽470 km,总面积约8万 km²,下辖26个区、8个县和4个自治县。地界渝西、渝北连四川,渝南临贵州,渝东北与陕西、湖北相连,渝东、渝东南接湖北和湖南,全境轮廓近似“人”字形。重庆因地处青藏高原大地形

东侧,山地和丘陵面积占总面积的94%,因而有“山城”之称。重庆市地处中纬度地区,属典型的亚热带湿润性季风气候,降水充沛,夏热冬暖,热量充足。同时,重庆位于四川盆地东部,东南西北四个方向分别与江汉平原、四川盆地、云贵高原和秦巴山地毗邻相接,多年平均降水量达1148.4 mm,降水时空分布不均,主要集中在5-9月,占全年总量的69%,冬季较少,但冬夏干湿差别不大。从降雨的地区分布来看,渝东北和渝东南降水较多,中西部相对降水较少;区域内昼夜降水不均,夜雨量和夜雨率较高,尤以春季夜雨最多。总之,重庆市地理环境复杂,气候变化多样,生态环境脆弱,地表环境受人类活动影响剧烈,导致境内山洪频发,重庆市1950-2015年历史山洪灾害空间分布如图1所示。

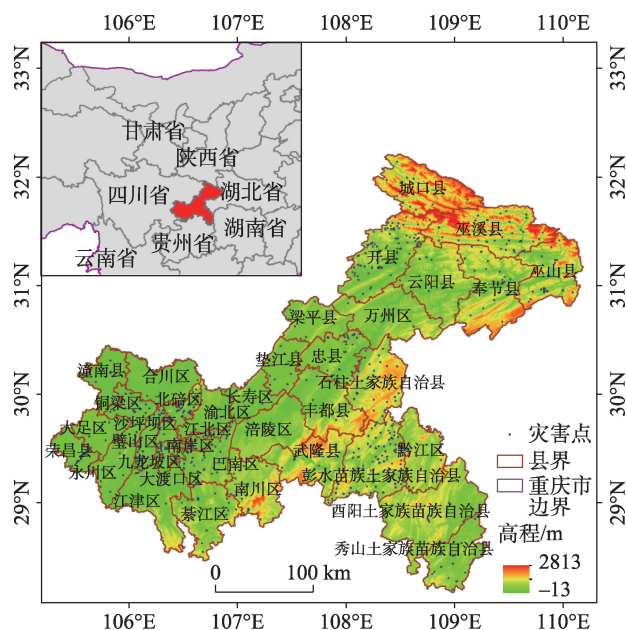


图1 重庆市1950-2015年历史山洪灾害点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the historical mountain torrents in Chongqing from 1950 to 2015

2.2 数据源

本文采用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、土地利用类型。

(1)基础地理信息数据。来源于全国山洪灾害调查评价项目,主要包括重庆市1:5万、1:25万的县级行政区划数据、道路、河流等基础地理数据。

(2)历史山洪灾害点矢量数据。来源于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,主要包括山洪灾害发生时间、地点、过程降雨量(降雨开始形成到结束全过程的总降雨量)、经济损失、人员伤亡(含失踪人员、死亡人员)等信息。本文选取重庆市历史山洪灾害点共计 824 起,其中 1950 年以前共计 4 起,缺失发生日期 1 起,为保证时间的连续性和数据的完整性,剔除 5 起,符合文章需要且时间在 1950–2015 年共计 819 起。

(3) 高程数据。来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)平台。下载研究区范围内 DEM 数据,分辨率为 30 m。

(4) 降雨数据。来源于全国山洪灾害调查评价项目组的全国暴雨图集。全国暴雨图集是 2013–2015 年由水利部水利水电科学研究院制作。

(5) 社会经济数据。来源于地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>),包括 2000 年人口和 GDP 数据,分辨率为 1 km×1 km。

(6) 其他数据。来源于地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>),包括 2010 年植被覆盖度(1 km×1 km)和 2010 年土地利用类型(100 m×100 m)数据。

3 技术路线和研究方法

3.1 技术路线

重庆市历史山洪灾害时空分析技术路线如下:首先通过年际、月际、年代际分析重庆市山洪灾害在各个时间尺度上的时间分布特征,然后基于 MATLAB 平台用 M-K 突变检验来分析山洪灾害的突变时间节点,并对比分析突变前后山洪灾害变化情况。基于 ArcGIS 平台利用平均中心、标准差椭圆、核密度估计 3 种空间分析方法来探究山洪灾害在空间上的分布特征:平均中心可以分析重庆市山洪灾害在空间上的迁移变化过程;标准差椭圆可以分析山洪灾害在空间方向上的变化趋势;核密度估计来分析山洪灾害密度在空间上连续变化趋势。本文技术路线图如图 2 所示。

3.2 研究方法

(1) 平均中心

地理学第一定律认为地理事物或属性在空间分布上互为相关,存在集聚(Clustering)、随机(Random)、规则(Regularity)分布,且相关性随距离增大而减

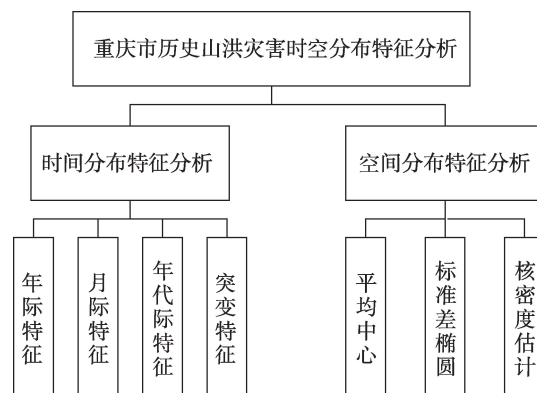


图2 重庆市山洪时空分析技术路线图

Fig. 2 Road map of spatio-temporal analysis of mountain floods in Chongqing

少,该现象称为空间自相关。因此,为了更为深入分析重庆市历史山洪灾害的空间分布格局,引入平均中心来解释重庆山洪灾害在空间上的迁移过程。平均中心是研究区域中所有要素的平均 x 坐标和 y 坐标。平均中心对于分析追踪分布的变化非常有用,是描述空间分布的常用方法。其基本计算公式为^[20]:

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

式中: (\bar{X}, \bar{Y}) 表示重庆山洪灾害平均中心的经纬度; x_i 和 y_i 是灾害点 i 的经纬度坐标; i 为灾害点序号; n 为研究范围内的灾害点数量; N 为灾害点总数。

(2) 标准差椭圆分析

为了分析重庆市山洪灾害在方向上的分布情况,本文引入标准差椭圆概念,利用标准差椭圆来揭示重庆市历史山洪灾害空间形态变化特征。标准差椭圆^[21](Standard Deviation Ellipse, SDE),是通过创建标准差椭圆来汇总地理要素的中心趋势、离散和方向趋势等空间特征。工作原理是以平均中心为起点,对一组要素的 x 坐标和 y 坐标的标准差进行计算,从而定义椭圆的轴。标准差椭圆可以使得山洪分布的范围和方向的趋向变得更为明确。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 是山洪点 i 的坐标; (\bar{x}, \bar{y}) 表示山洪的平

均中心; i 为山洪序号; n 为山洪点总数; x_i 和 y_i 分别为山洪点 i 的横坐标和纵坐标与平均中心的差值; C 为标准差椭圆的扁率。

(3)核密度分析

为了深层次地揭示山洪灾害空间分布特征,本文通过核密度估计法来分析重庆市历史山洪密度空间连续变化趋势,以便清晰地了解重庆各个区域所受山洪威胁情况。核密度估计^[12](Kernel Density Estimation, KDE),用于估计每个输出栅格像元周围的点或线要素的密度。通过对山洪密度计算结果的二维灰度表达或三维曲面表达,可以简单直观地获取山洪点群的聚集或离散等分布特征。估计某点处的密度值通过核估计量计算:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (4)$$

式中: n 为带宽范围内像元数; K 为核函数; h 为带宽; $x - X_i$ 为估计点到样本 X_i 处的距离。

(4)Mann-Kendall(M-K)法

时间突变分析可以更好地揭示重庆市山洪灾害在时间上的变化趋势,为了分析重庆市山洪灾害的时间突变特征,本文选择 Mann-Kendall 法来分析重庆市山洪灾害的突变时间节点。Mann-Kendall 法^[22]是一种非参数统计检验方法,其优点是不需要遵从一定的分布。在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: UF_k 为标准正态分布,它是按时间序列(x_1, x_2, \dots, x_n)计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,若 $|UF_k| > \alpha$,则表明序列存在着明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序(x_n, \dots, x_2, x_1),再重复上述过程,同时使 $UF_k = -UB_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。分析绘出的 UF_k, UB_k 曲线,当它们超过临界线时,表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k, UB_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,且交点在临界线之间,那么交点对应的值便是突变开始的时间。

4 重庆市历史山洪灾害时空分布规律分析

4.1 时间分布特征

4.1.1 年际特征

重庆市 1950–2015 年总共发生山洪灾害 819 起,平均每年发生约 12.4 起。山洪灾害每年发生频

次及逐年变化趋势如图 3 所示。山洪灾害数量大体上呈先稳定后增长的趋势,对研究时段内每年山洪频次进行多次项拟合,发现重庆历史山洪灾害呈 $y = 0.0007x^3 - 0.0471x^2 + 0.9124x - 3.0758$ 三次函数式增长, $R^2 = 0.4883$ 。整体上可以划分为稳定(1950–1977年)、缓慢增长(1978–2002年)、快速增长(2003–2015年)3个阶段:① 1950–1977年共发生 22 起,平均 0.79 次/年,各年均未超过 5 次,该阶段属于山洪灾害低发期;② 1978–2002年共发生 198 起,平均 7.9 次/年,其中 1978、1982、1989 年和 1998 年山洪发生频次异常高,共计发生 105 次,占该阶段山洪总量 53%。其中 1998 年长江流域特大洪水导致该年重庆地区发生 45 次山洪,受灾十分严重;③ 2003–2015 年共发生 599 次,平均 46.1 次/年,这一阶段是山洪灾害高发期,比前一个阶段平均每年多发生 37.9 次,且每年发生山洪的次数均大于 10 次。其中,2007 年和 2014 年分别发生山洪 138 次、105 次,是研究时间段内重庆历史山洪发生最多的 2 个年份(图 3)。

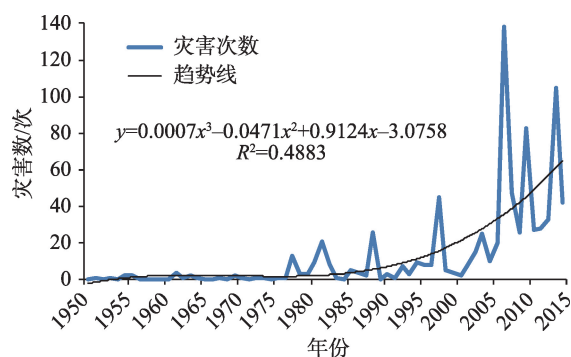


图3 重庆市历史山洪灾害年际分布

Fig. 3 Interannual distribution of the historical mountain torrents in Chongqing

4.1.2 月际特征

根据重庆市历史山洪灾害点数据,剔除 90 起未统计月份山洪灾害,共计 729 起。统计分析重庆市各个月份历史山洪灾害发生频次,结果如图 4 所示。重庆市历史山洪灾害主要发生在 5–9 月,共计 714 起,占山洪灾害总数量的 97.9%。一年中 6 月和 7 月是发生山洪最为频繁的月份,其中 7 月份发生山洪次数最多,共计 290 次,占总山洪灾害数量的 39.8%,6 月次之,共计 83 次,占比 19.8%。3 月和 4 月发生次数均未超过 10 次,是一年中发生山洪相对较少的时期。而 10 月至次年 2 月无山洪发生记录。分析表明,山洪发生与季节有明显的相关关系,冬春季几乎不会发生山洪灾害,山洪灾害主要

是集中在夏秋两季发生(图4)。

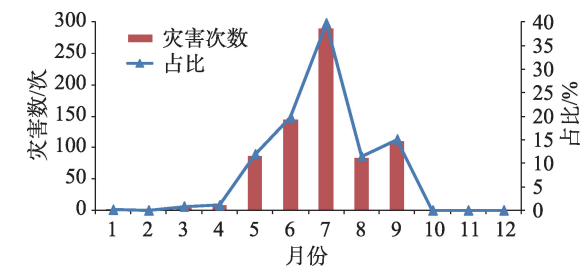


图4 重庆市1950–2015年历史山洪灾害月际分布
Fig. 4 Monthly distribution of the historical mountain torrents in Chongqing from 1950 to 2015

4.1.3 年代际特征

以10年为间隔,统计分析1950–2015年重庆市历史山洪灾害发生情况,结果如图5所示。对图5分析可知,重庆市山洪灾害发生频次按年代际整体上呈指数增长,增长趋势附和指数方程 $y=2.792e^{0.723x}$, $R^2=0.966$ 。1950s–1970s,共计发生灾害38次,占总山洪数量的4.6%,平均每10年发生山洪12.7次,山洪灾害处在一个较低发生的水平。1980s–1990s,共计发生灾害168次,平均每十年发生山洪84次,处于灾害发生频率中等的时期。2010s以后,山洪灾害发生频次大幅度增加,其中2010s代共计发生295次,2010–2015年发生318次,而1950–1990年仅发生灾害206次,可见从2000年起,山洪灾害的增长是显而易见的(图5)。

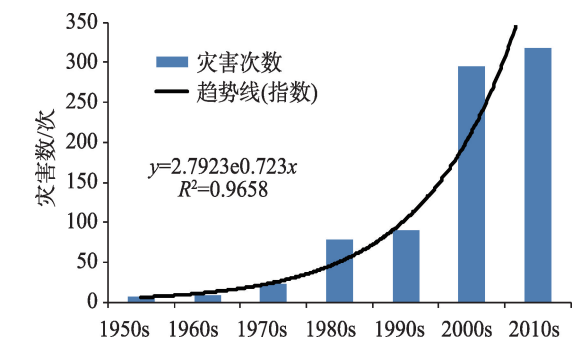


图5 重庆市1950–2015年历史山洪灾害年代际分布
Fig. 5 Interdecadal distribution of the historical mountain torrents in Chongqing from 1950 to 2015

4.2 空间分布特征

4.2.1 各区县山洪灾害分布

以县域为行政单元,统计重庆市历史山洪灾害在各县域发生的情况,结果如表1所示。由表1可知,从1950–2015年,重庆市38个区县除渝中区从

未发生过山洪灾害外,其余各区县均有山洪发生。其中,彭水苗族土家族自治县和开县发生山洪次数最多,分别为116次和112次,年均发生率分别为2.07次/年和2次/年,共占重庆市总山洪数量的

表1 重庆市各区县历史山洪灾害分布表
Tab. 1 Distribution of historical mountain torrents in districts and counties of Chongqing

区县	灾害次数 /次	占比 /%	密度 /(次/1000 km ²)
大足区	8	0.97	5.6
綦江区	16	1.95	5.8
合川区	4	0.49	1.7
潼南县	5	0.61	3.1
巴南区	51	6.23	28.0
北碚区	46	5.62	61.2
长寿区	7	0.85	4.9
大渡口区	4	0.49	38.5
涪陵区	4	0.49	1.4
江北区	5	0.61	22.5
江津区	7	0.85	2.2
九龙坡区	31	3.79	71.8
南岸区	16	1.95	60.9
南川区	17	2.08	6.6
黔江区	5	0.61	2.1
沙坪坝区	4	0.49	10.1
万州区	8	0.98	2.3
永川区	5	0.61	3.2
渝北区	5	0.61	3.4
渝中区	0	0	0
城口县	14	1.71	4.2
垫江县	10	1.22	6.6
丰都县	5	0.61	1.7
奉节县	21	2.56	5.1
开县	112	13.68	28.2
梁平县	7	0.85	3.7
彭水苗族土家族自治县	116	14.16	29.7
荣昌县	21	2.56	19.5
石柱土家族自治县	38	4.64	12.6
铜梁区	36	4.40	26.9
巫山县	32	3.91	10.8
巫溪县	41	5.01	10.1
武隆县	9	1.10	3.1
秀山土家族苗族自治县	17	2.08	6.9
酉阳土家族苗族自治县	6	0.73	1.2
云阳县	7	0.85	1.9
忠县	31	3.79	14.2
璧山区	48	5.86	52.5

27.84%,其余各区县山洪数量均在100次以下,超过10次的有17个区县,占总山洪数量的59.10%。从山洪的密度分布来看,重庆市山洪密度平均值为9.92次/1000 km²,超过重庆市山洪密度平均值的县域有20个,其中九龙坡区、南岸区、北碚区、璧山区山洪灾害密度都超过了50次/1000 km²,远远高于其他县域山洪密度,属于山洪灾害高发区域。

基于ArcGIS平台,利用其自带的自然间断点分级方法,根据重庆市历史山洪数据做出了重庆市各区县历史山洪灾害发生频次图(图6),自然间断法是ArcGIS软件自带的一种数据分类方法,它的的原则是保持同一类别中的数据差异度最小,不同类别之间的数据差异程度最大,此种分类方法保持了类别的一致性^[23],是一种比较客观的分类方法,因此危险性分级结果可靠度较高。通过图6发现按县域单元山洪发生具有明显的集聚性,相邻的县域往往山洪发生频次较为相近。位于重庆市北部相邻的城口县、巫溪县、巫山县、开县、奉节县相较于其他地区明显受山洪威胁更为严重,位于重庆市西南部的潼南县、合川区和东南部的酉阳土家族苗族自治县、黔江区受山洪威胁较小。

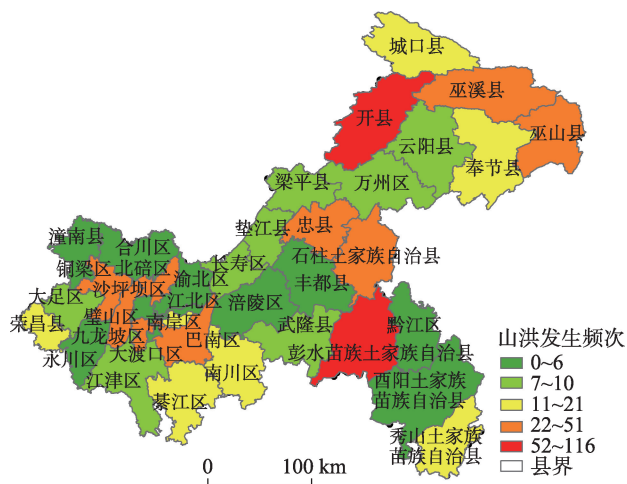


图6 重庆市1950–2015年各区县历史山洪灾害发生频次

Fig. 6 Frequency map of the historical mountain torrents in each district/county of Chongqing from 1950 to 2015

4.2.2 方向分布特征

山洪灾害点的空间分布在各个方向上的离散程度明显不同,通过引入标准差椭圆可以较好地解释灾害点事件中心趋势、离散趋势和方向趋势等的空间特征^[24]。由于1950s–1970s仅发生山洪38次,故将此时段归为一个阶段。通过标准差椭圆分析,得到1950s–1970s、1980s、1990s、2000s、2010s共5个

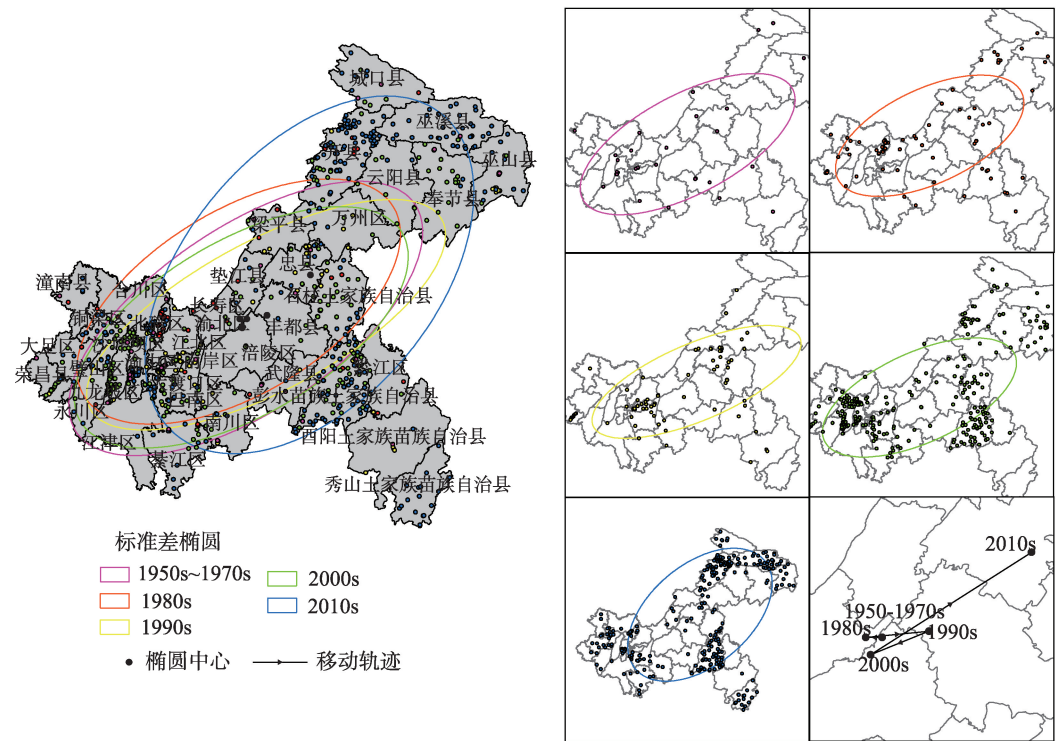
阶段的标准差椭圆分布、灾害重心移动轨迹和移动距离,结果如图7和表2所示。

由图7可以看出,1950s至2010s山洪灾害的方向整体呈“西南–东北分散,西北–东南聚集”的空间分布格局,其中2010年之前的4个阶段的椭圆方向角在62°–67°之间,变化十分微小,且4个阶段的椭圆长轴和短轴均相差不大,说明在2010年前山洪灾害分布在方向和聚集程度上均无太大变化,但2010s的椭圆方位角则由2000s的65.651°变为49.986°,椭圆的长轴和短轴分别比2000s增加了20.185 km和34.739 km,说明2010年后山洪灾害分布方向一定程度上向西北倾斜,分布范围变广,聚集程度降低,即山洪发生随机性变强。由表2可知,1950s–2010s山洪的重心在107°20'E–108°01'E,29°52'N–30°17'N间变化,位于长寿区、涪陵区、丰都县、忠县。重庆市山洪灾害56年来总的中心移动距离为136.786 km,其中2010年前4个阶段的山洪灾害平均中心互相不超过30 km,最近的仅相距6.344 km,而2000s–2010s重心偏移距离最大为79.589 km,这一现象说明2010年前重庆市山洪灾害分布中心趋势变化不大,2010年后山洪灾害平均中心发生较大的偏移,即向东北方向偏移至忠县。山洪灾害平均中心经度的变化范围是41',纬度的变化范围是25',表明重庆市山洪灾害受经度变化的影响强于纬度变化的影响(图7)。

4.2.3 核密度分析

由于山洪灾害数据是典型的点状数据,最常用的方式是采用空间平滑处理来分析山洪灾害的空间分布规律,最常用的平滑处理方法是制作核密度估计图^[12]。根据重庆市山洪灾害历史灾害点数据得到重庆市山洪灾害核密度图空间分布(图8)。

应用核密度分析方法对历史山洪灾害点进行分析(图8)。重庆市每100 km²山洪灾害发生次数在0~0.2次之间,重庆市山洪灾害分布大致以长江为分界线,长江以北共发生山洪490次,长江以南共发生山洪329次,长江以北山洪灾害密度明显高于南部,长江以南除郁江附近区域大部分地区都属于山洪灾害低发区。长江上游地区山洪灾害密度明显高于下游地区。按县级行政单元来看,璧山区、九龙坡区、南岸区和开县山洪灾害最为严重,北碚区、彭水苗族土家族自治县、荣昌县和巫山县山洪灾害次之,其他大部分地区山洪灾害密度较低。按水系分布情况来看,嘉陵江与长江交汇区、璧南河两岸、小江中游、江里河和小江交汇附近地区是整个



注:标准差椭圆长半轴表示数据的分布方向,短半轴表示数据分布范围,椭圆方向角表示从N方向开始按顺时针进行测量的长轴夹角。

图7 重庆市1950–2015年历史山洪灾害重心移动轨迹及标准差椭圆分析
Fig. 7 Movement track of the gravity center and standard deviation ellipse of the historical mountain torrents from 1950 to 2015 in Chongqing

表2 重庆市1950–2010年历史山洪灾害点重心及标准差椭圆参数变化
Tab. 2 Variations of the gravity center and standard deviation of elliptical parameters in historical mountain-flood disasters from 1950 to 2010 in Chongqing

时间	经纬度(x,y)	S/km	R/°	X(std)/km	Y(std)/km
1950s–1970s	107°24'E, 29°56'N	0	62.325	85.433	187.938
1980s	107°20'E, 29°56'N	6.344	64.966	84.821	167.073
1990s	107°36'E, 29°58'N	25.103	66.967	69.296	184.208
2000s	107°21'E, 29°52'N	25.654	65.651	81.233	171.872
2010s	108°01'E, 30°17'N	79.589	49.986	115.972	192.057

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(std):沿x轴的短半轴长度;Y(std):沿Y轴的长半轴长度。

重庆市受山洪灾害威胁最大的区域,嘉陵江、濑溪河、江里河、汝溪河和郁江附近山洪灾害较为严重。从整体来看,山洪灾害密度高的区域距离河流都比较近,且大部分山洪灾害高密度区都是位于河流的交汇处,表明距离河流较近且是河流交会处的区域更容易发生山洪(图8)。

4.2.4 突变特征分析

为了分析重庆市山洪灾害的时间突变特征,基于MATLAB平台,采用M-K检验对重庆市1950–2015年山洪灾害时间分布特征进行突变分析。结果

显示:在 $\alpha=0.001$ 显著性水平下,UF和UB两条线在2002年出现交汇点,说明2002年是重庆市山洪灾害频次发生突变的年份(图9)。对突变前后山洪灾害发生频次进行统计拟合,2002年前52年共发生山洪灾害220次,平均4.23次/年,拟合曲线为 $y=0.215x-420.78$,2002–2015年共14年发生山洪灾害599次,平均42.79次/年,比2002年前多发生379次,拟合曲线为 $y=2.7033x-5384.8$,由突变前后拟合曲线可知2002年之后山洪灾害增长速度明显加快(图10)。

为了更进一步分析突变前后重庆市山洪的变

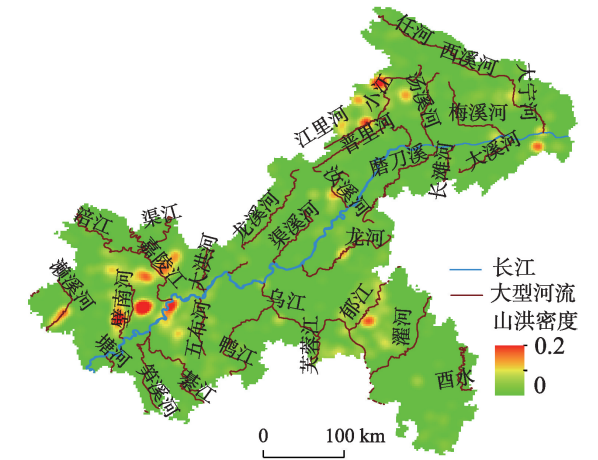


图8 重庆市1950–2010年历史山洪灾害密度分布
Fig. 8 Density distribution of the historical mountain torrents from 1950 to 2010 in Chongqing

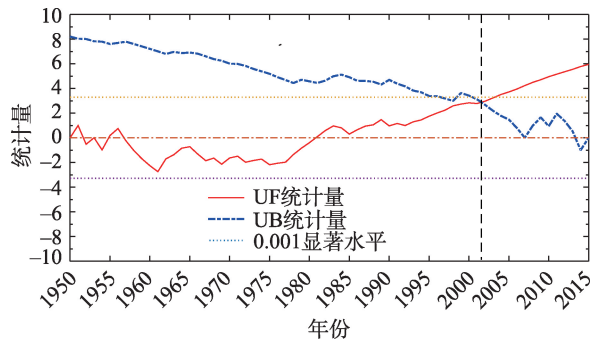


图9 重庆山洪突变检测结果
Fig. 9 Change-point detection of the mountain torrents in Chongqing

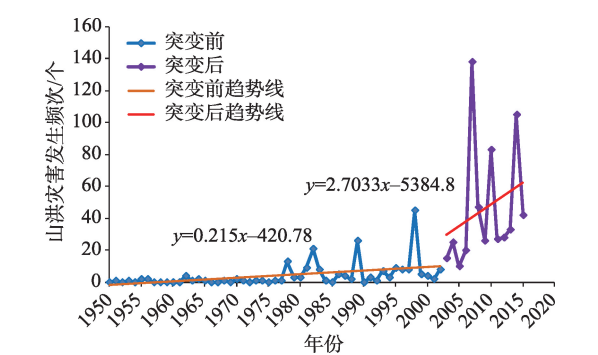


图10 突变前后山洪统计结果
Fig. 10 Statistical comparison of mountain torrents before and after the detected mutation

化情况,利用核密度分析法对突变前后重庆市山洪密度分布情况进行分析,得到突变前山洪密度分布(图11(a))、突变后山洪密度分布(图11(b))和突变

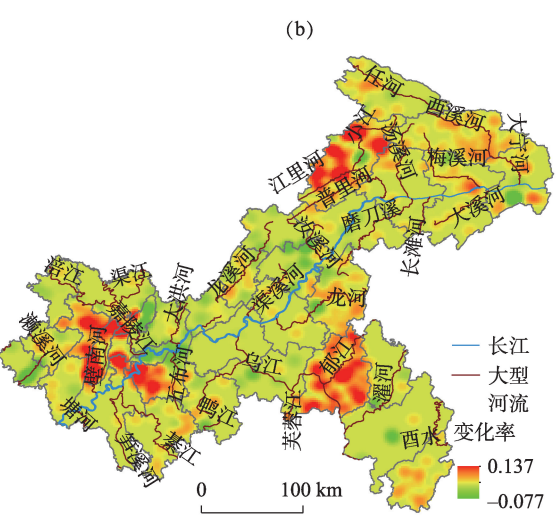
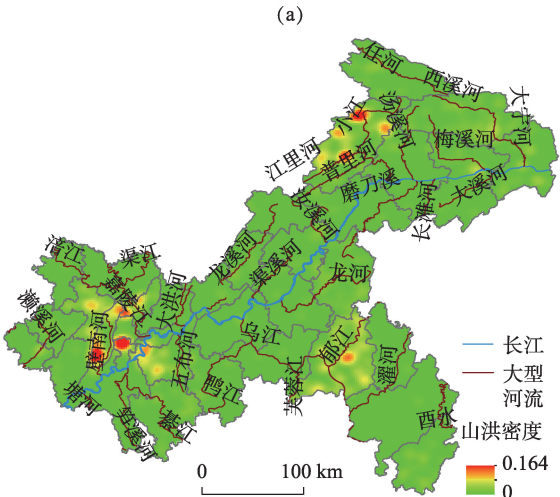
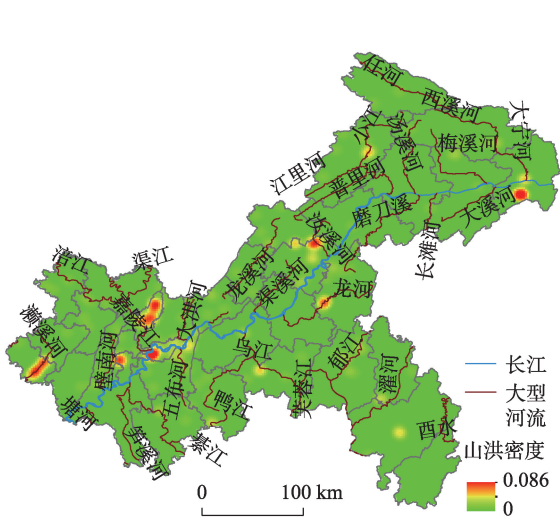


图11 重庆市1950–2015年突变前后山洪密度及其变化
Fig. 11 Density and its change map of the mountain torrents before and after the detected mutation from 1950 to 2015 in Chongqing

前后山洪密度的变化情况(图11(c))。

由图11(a)和图11(b)分析可知,2002年突变之前重庆市山洪密度是每100 km²发生0~0.086次,总体来说,突变前山洪密度都较低,相对密度较高的红色区域有6处,位于北碚区的嘉陵江北部、九龙坡区西北部、南岸区的嘉陵江和长江交汇区、荣昌县的濑溪河附近区域、忠县的汝溪河附近区域和巫山县的南部区域。2002年突变后重庆市山洪密度是每100 km²发生0~0.164次,山洪灾害高密度区域发生了变化,除了九龙坡区西北部仍然是山洪高密度区外,其他突变前是高密度区的突变后都不再是高密度区,璧山区的璧南河西部、开县的江里河与小江交汇区附近区域和小江中游区域则成为了山洪灾害高密度区。山洪分布的变化情况是突变后山洪密度减去突变前山洪密度得到,红色区域表示升高,绿色区域表示降低。由图11(c)可知,重庆市突变前后山洪密度在0.077~0.137次/100km²之间变化,山洪密度增加的区域要多于山洪密度降低的区域且比较集中,山洪密度增高的区域主要分布在重庆市西部的铜梁区、璧山区、九龙坡区、巴南区,东南部的彭水苗族土家族苗族自治县和北部的开县。山洪密度减少的区域相对较少,主要零散地分布在荣昌县东部、北碚区北部、南岸区、忠县的汝溪河附近、巫山县南部等区域。

5 重庆市历史山洪灾害分布影响因素

5.1 影响因子的选取

重庆市历史山洪灾害时空分布差异明显,受区域环境条件差异影响,山洪灾害成因复杂。总体而言,地形地貌、河网水系、植被覆盖等下垫面条件为灾害的发生提供了孕育环境^[25-27],区域内降雨是引发山洪灾害的直接因素,特别是短历时强降雨更会激发山洪的发生^[28]。不合理的人类活动影响气候、改变自然地理环境,造成山体失稳、影响河道行洪等,对山洪灾害的爆发产生一定的影响。因此,本文主要从降雨因子、地表环境因子和人类活动因子3个方面共选取高程、坡度、坡向、植被覆盖、土壤类型、100年一遇24 h降雨量、50年一遇6 h降雨量、20年一遇1 h降雨量、10年一遇10 min降雨量、5年一遇1 h降雨量、土地利用、人口增速和GDP增速共13个影响因子来探究重庆山洪灾害影响因素。

5.2 山洪发育规律影响因素分析

重庆市山洪灾害主要分为稳定(1950-1977年)、缓慢增长(1978-2002年)、快速增长(2003-2015年)3个阶段。为了发现重庆市山洪形成规律及发育特征,本文按照1950-1977年、1978-2002年、2003-2015年的3个时间段进行山洪影响因素分析。利用ArcGIS中的空间叠加分析功能,利用自然间断点法对各影响因素进行分级,并统计分析各个类别中山洪灾害的密度。通过各影响因子的空间分异和变化及其与历史山洪灾害点的关联程度,分析该现象(稳定、缓慢增长、快速增长3个阶段)背后产生的机理,从而探讨该现象起决定性作用的影响因子。

5.2.1 降雨因子

为了发现重庆山洪灾害受短历时强降雨影响规律,选取了5个因子:100年一遇24 h降雨量(图12(a)-(c))、50年一遇6 h降雨(图12(d)-(f))、20年一遇1 h降雨(图12(g)-(i))、10年一遇10 min降雨(图12(j)-(l))和5年一遇1 h降雨(图12(m)-(o))。从山洪灾害高密度集中区来看,1950-1977年历史山洪灾害主要集中在196~222 mm区间(100年一遇24 h降雨)和222~224 mm区间(50年一遇6 h)且密度保持在较低水平分别为0.07个/100 km²和0.045个/100 km²(图12(a)、(d)),1978-2002年和2003-2015年历史山洪灾害主要集中在136~149 mm区间(100年一遇24 h降雨)和149~161 mm区间(50年一遇6 h)且山洪密度明显升高,2003-2015年山洪灾害高密度集中区达到0.8个/100 km²(图12(b)-(c),图12(e)-(f)),说明重庆市气候变化导致极端降雨日趋严重,山洪灾害发生频次逐年增加。从变化趋势来看,1950-2002年重庆市山洪密度与20年一遇(图12(g)-(h))和5年一遇(图12(m)-(n))1 h降雨量呈正相关关系,2003-2015年山洪密度与降雨量呈负相关关系且山洪密度明显增加(图12(i)、(o)),说明随着极端气候增加和不合理的人类活动加剧了重庆山洪灾害的发生。

5.2.2 地表环境因子

本文将高程(图13(a)-(c))、坡度(图13(d)-(f))、坡向图(13(g)-(i))、植被(图13(j)-(l))和土壤类型(图13(m)-(o))5个指标作为地表环境因素指标。重庆市山洪灾害高密度区主要集中在高程低于440 m(图13(a)-(c)),坡度小于8.8°(图13(d)-(f)),坡向为东、东南方向地区(图13(g)-(i))。

1950-1977年山洪灾害主要发生在植被覆盖率较低(NDVI 0.296~0.5)、土壤类型为城镇地区(图13(j)和图13(m)),1978-2002年山洪灾害在植被

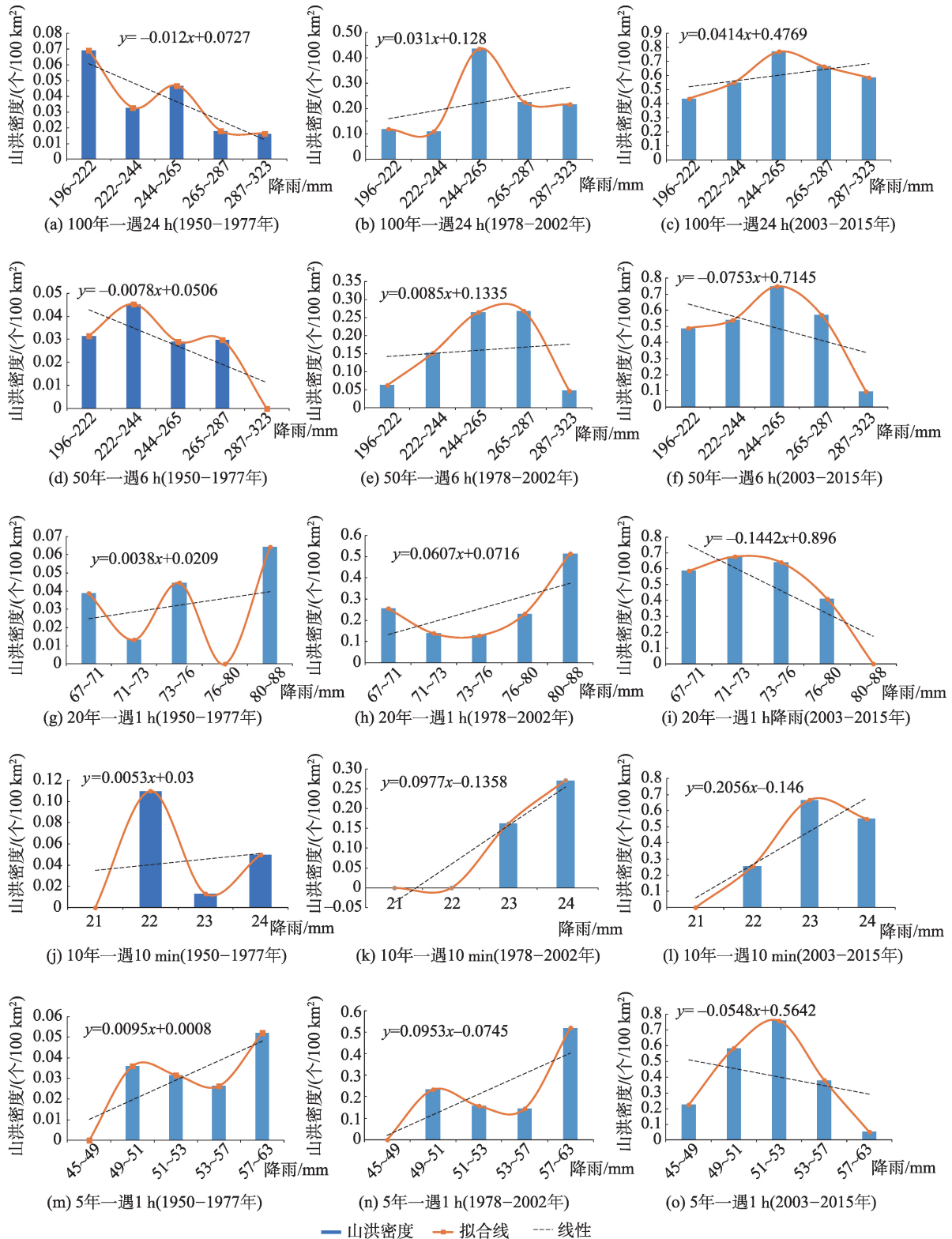


图 12 重庆市历史山洪灾害点与降雨因子对应关系

Fig. 12 Relationship between the historical mountain torrents and rainfall factors in Chongqing

覆盖率高地区和各土壤类型地区逐渐增加,2003–2015年山洪密度在各区明显增加,其中在0.296–0.500区间(NDVI)和砂壤土区间(土地利用类型)

分别达到1.4个/km²和0.95个/km²。

5.2.3 人类活动因子

为充分反映人类活动对山洪灾害的影响,本文

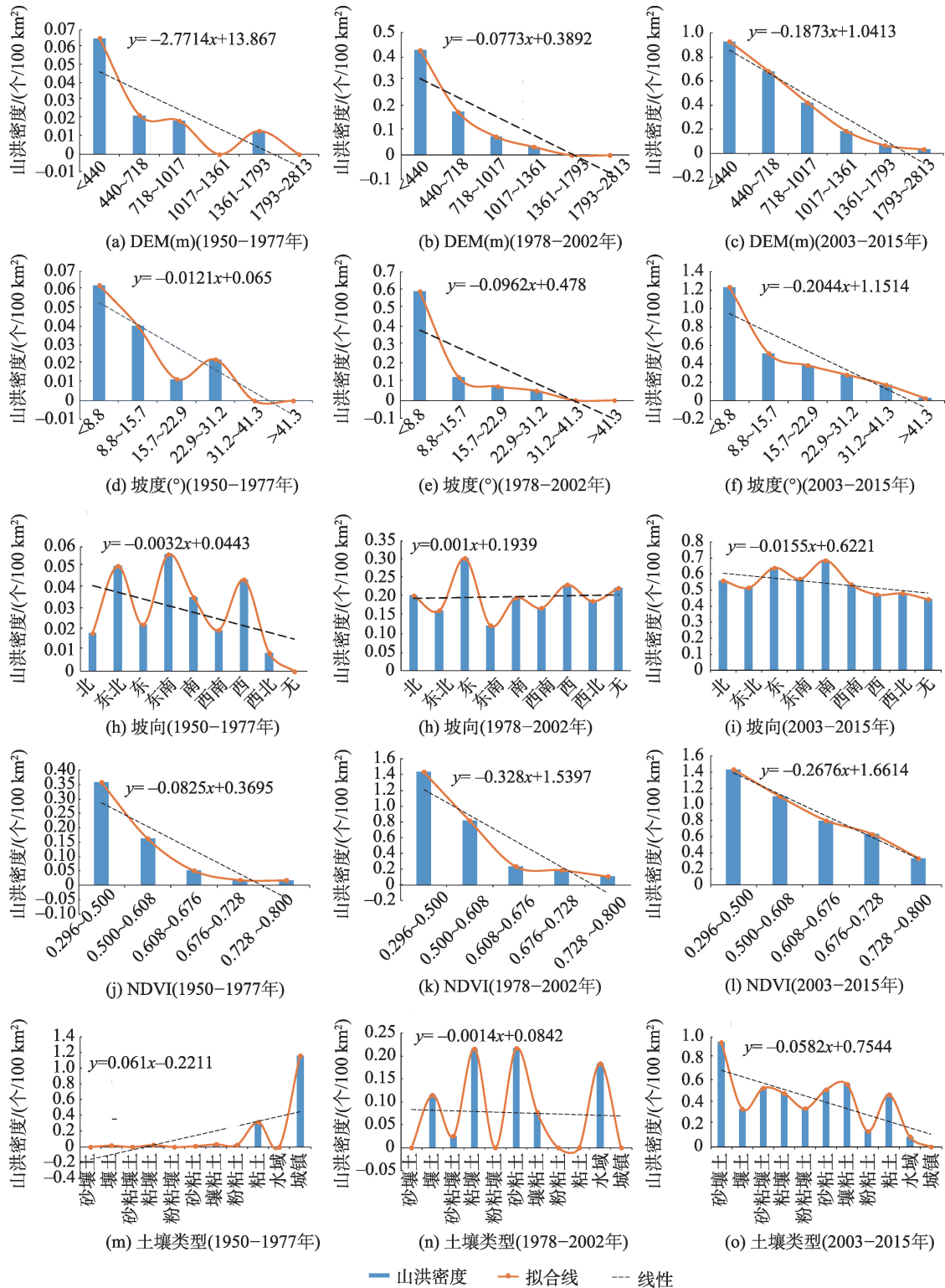


图13 重庆市历史山洪灾害点与地表环境因子对应关系

Fig. 13 Relationship between the historical mountain torrents and Surface environmental factors in Chongqing

选取人口增速(图14(a)-(c)), GDP增速(图14(d)-(f))和土地利用(图14(g)-(i))3个指标作为人类活动指标。从人口增速与灾害密度对应关系来看,1950-1977年重庆市山洪灾害主要发生在人

口迅速减少和人口迅速增加的 <-18 和 >52 区间且山洪密度较低分别为 0.16 个/ km^2 和 0.12 个/ km^2 , 1978-2002年山洪高密度区主要集中在人口快速增长区域,山洪密度增加到 1.8 个/ km^2 ,2003-2015年

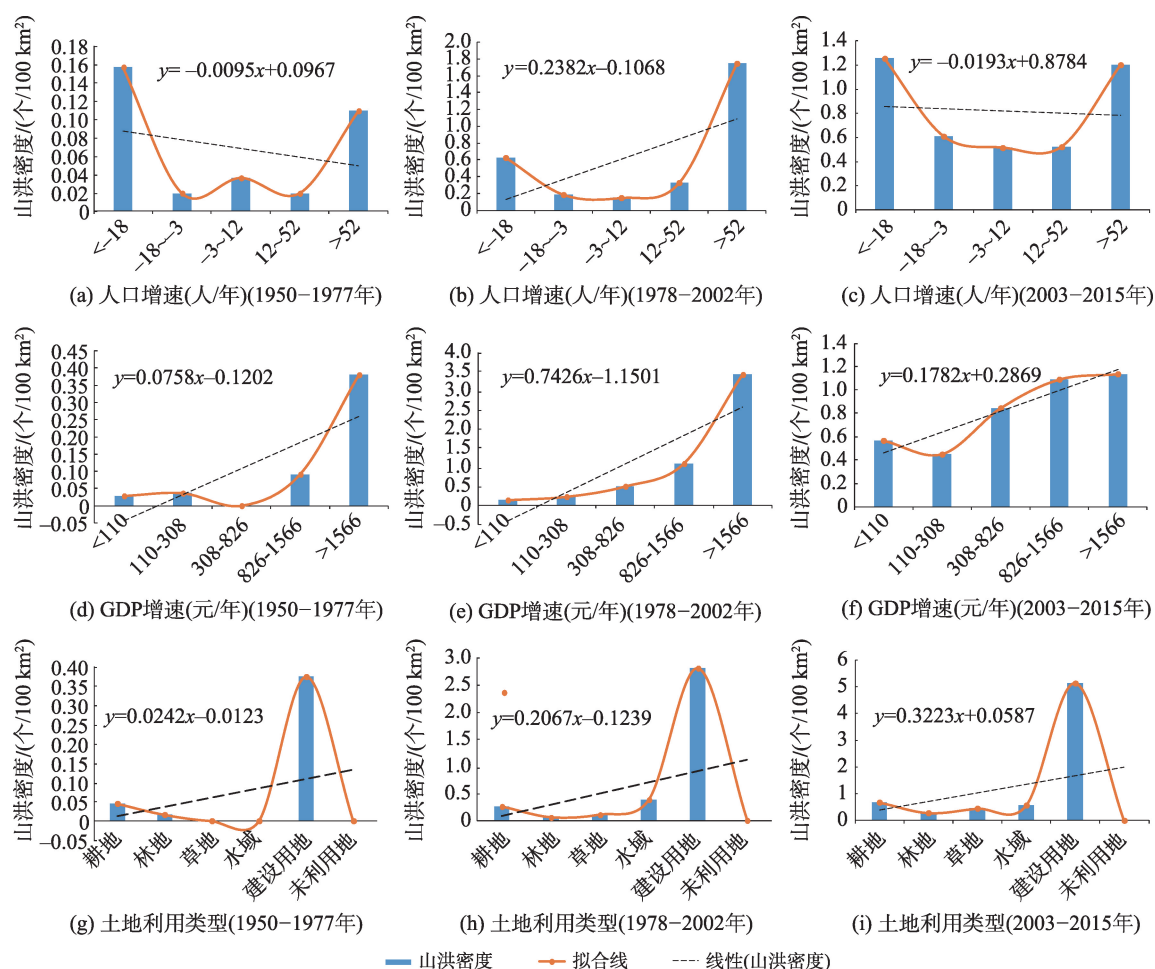


图14 重庆市历史山洪灾害点与人类活动因子对应关系

Fig. 14 Relationship between the historical mountain torrents and human activity factors in Chongqing

山洪灾害密度在全区都明显增加,在每个区间山洪密度都高于0.5个/km²。从GDP增速与灾害密度对应关系来看,山洪灾害密度在3个时段都随着GDP增速的增加而升高,且山洪密度逐年升高,在2003-2015年重庆市山洪灾害密度在每个区间都明显升高(图14(f))。从土地利用类型与山洪灾害对应关系来看,3个阶段山洪高密度区都集中在建设用地区间。说明重庆市经济越发达的地区受山洪威胁越严重。

6 结论

本文基于1950-2015年全国历史山洪灾害数据,采用平均中心、标准差椭圆、核密度分析和M-K突变检测并结合ArcGIS空间分析对重庆市山洪灾害时空分布特征进行研究,以及探究了重庆市山洪灾害与影响因素的关系。主要研究结论如下:

(1)1950-2015年重庆市历史山洪灾害发生频次

总体呈先稳定(1950-1980年),后快速上升(1980-2015年)的趋势,山洪集中在5-9月发生,尤其7月发生山洪最多,秋冬季(12月-次年4月)几乎不发生山洪灾害。重庆市山洪灾害发生频次按年代际整体上呈指数增长,增长趋势附和指数方程 $y=2.7923e^{0.723x}$,进入21世纪以来,山洪灾害增长趋势显著。

(2)重庆市山洪灾害空间分布不均,按行政区域来看,除渝中区从未发生过山洪外,其余各区县均有山洪发生。山洪发生具有明显的集聚性,相邻的县域往往山洪发生频次较为相近。九龙坡区、南岸区、北碚区、璧山区山洪灾害密度均超过50次/1000 km²,远远高于其他县域山洪密度,属于山洪灾害高发区域。嘉陵江与长江交汇区、璧南河两岸、小江中游、江里河和小江交汇附近地区是整个重庆市受山洪灾害威胁最大的区域。此结论与刘业森^[11]得出长江中下游距离河流较近或者与河流交会处的区域山洪风险度更高相一致。

(3)重庆市1950s-2010s山洪灾害的方向整体

呈“西南-东北”分散,“西北-东南”聚集的空间分布格局,标准差椭圆方向逐渐弱化,由1950s的 62.325° 弱化至2010s的 49.986° 。2000年前山洪灾害中心主要集中在涪陵区一带,2000年后向东北方向偏移至忠县。

(4)采用M-K检验对1950-2015年山洪灾害时间分布特征进行突变分析表明:2002年是重庆市山洪灾害频次发生突变的年份,2002年之后山洪灾害发生频次比2002年之前多发生379次,2002年之后山洪灾害增长速度明显加快,主要集中在重庆市西部的铜梁区、璧山区、九龙坡区、巴南区,东南部的彭水苗族土家族苗族自治县和北部的开县。

(5)由于极端气候增加、下垫面不断变化以及不合理的人类活动等因素的综合影响,导致重庆市山洪灾害发生频次逐年上升。此结论与刘业森^[11]得出山洪灾害是由降雨因子、地表环境因子和人类活动因子共同影响的结果相一致。

参考文献(References):

- [1] 赵士鹏.中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究[J].自然灾害学报,1996,5(3):93-99. [Zhao S P. An elementary study on whole characteristics of mountain torrents disaster system in china and its hazard regionalization[J]. Journal of Natural Disasters, 1996,5(3): 93-99.]
- [2] 任洪玉,邹翔,张平仓.我国山洪灾害成因分析[J].中国水利,2007,2007(14):18-20. [Ren H Y, Zhou X, Zhang P C. An elementary study on causing factors of Chinese mountain torrents disaster[J]. China Water Resources, 2007, 2007(14):18-20.]
- [3] 张平仓,任洪玉,胡维忠,等.中国山洪灾害区域特征及防治对策[J].长江科学院院报,2007,24(2):9-12. [Zhang P C, Ren H Y, Hu W Z, et al. Zone characteristics of Chinese mountain torrent disasters and counter-measures[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007,24(2):9-12.]
- [4] 李中平,张明波.全国山洪灾害防治规划降雨区划研究[J].水资源研究,2005,26(2):32-34. [Li Z P, Zhang M B. Study on national precipitation area delination for mountainous flood disaster prevention planning[J]. Journal of Water Resources Research, 2005,26(2):32-34.]
- [5] 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.]
- [6] 何秉顺,黄先龙,郭良.我国山洪灾害防治路线与核心建设内容[J].中国防汛抗旱,2012,22(5):19-22. [He B S, Huang X L, Guo L. The route and core contents of torrential flood prevention and control in China[J]. China Flood & Drought Management, 2012,22(5):19-22.]
- [7] 孙莉英,葛浩,庞占龙,等.长江流域不同类型山洪灾害受自然因素影响分析[J].人民长江,2016,46(14):1-6. [Sun L Y, Ge H, Pang Z L, et al. Analysis on influence of natural factors on different types of mountain torrent hazards in Yangtze River Basin[J]. Yangtze River, 2016,46(14):1-6.]
- [8] 高煜中,邢俊江,王春丽,等.暴雨山洪灾害成因及预报方法[J].自然灾害学报,2006,15(4):65-70. [Gao Y Z, Xing J J, Wang C L, et al. Cause and forecast of mountain flood from rainstorm[J]. Journal of Natural Disasters, 2006,15(4):65-70.]
- [9] 赵健,范北林.全国山洪灾害时空分布特点研究[J].中国水利,2006,2006(13):45-47. [Zhao J, Fan B L. Characteristics of temporal and spatial distribution of mountain flood in China[J]. China Water Resources, 2006,2006(13): 45-47.]
- [10] 孙厚才,沙耘,黄志鹏.山洪灾害研究现状综述[J].长江科学院院报,2004,21(6):77-80. [Sun H C, Sha G, Huang Z P. Review of present situation in studying mountain torrent disaster[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004,21(6):77-80.]
- [11] 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[J].中国科学:地球科学,2019,49(2):408-420. [Liu Y S, Yang Z S, Huang Y H, 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[J]. Scientia Sinica Terrae, 2019,49(2):408-420.]
- [12] 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[J].山地学报,2018,36(4):557-70. [Xiong J N, Gong Y, Cheng W M, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of mountain floods in Tibet, China in recent 30 years[J]. Mountain Research, 2018,36(4):557-70.]
- [13] 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):1443-56. [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.]
- [14] 王英.甘肃黄土高原区山洪灾害时空分布特征研究[J].甘肃水利水电技术,2018,54(9):23-7. [Wang Y. Temporal and spatial distribution characteristics of mountain floods in loess plateau of gansu province[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2018,54(9): 23-7.]
- [15] 刘槁漪,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.]
- [16] 赵刚,庞博,徐宗学,等.中国山洪灾害危险性评价[J].水利学报,2016,47(9):1133-1142,1152. [Zhao G, Pang B, Xu Z X, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9):1133-1142,1152.]
- [17] 唐川,朱静.基于GIS的山洪灾害风险区划[J].地理学报, 2005,60(1):87-94. [Tang C, Zhu J. A GIS based regional torrent risk zonation[J]. Acta Geographica Sinica, 2005,60 (1):87-94.]
- [18] 崔鹏,邹强.山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J].地理科学进展,2016,35(2):137-147. [Cui P, Zou Q. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods[J]. Progress in Geography, 2016,35(2):137-147.]
- [19] 张乾柱,卢阳,秦维,等.重庆市山洪灾害详查点空间分布合理性研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2018, 35(1):56-65. [Zhang Q Z, Lu Y, Qin W, et al. The study on spatial rationalities of detailed mountain torrent disaster survey points in Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 2018,35(1):56-65.]
- [20] 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[J].地理科学进展,2010,29(1):87-95. [Fan J, Tao A J, Lv C. The coupling mechanism of the centroids of economic gravity and population gravity and its effect on the regional gap in China[J]. Progress in Geography, 2010,29(1):87-95.]
- [21] 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[J].地理学报,2016,71(11):1998-2009. [Zhang S Y, Zhou Z F, Xiong K N, et al. Spatial pattern of the caves in Guizhou province and their the influencing factors[J]. Acta Geographica Sinica, 2016,71(11):1998-2009.]
- [22] 李芬,张建新,武永利,等.近50年山西终霜冻的时空分布及其影响因素[J].地理学报,2013,68(11):1472-1480. [Li F, Zhang J X, Wu Y L, et al. Spatial and temporal distribution and its impact factors of the last frost over Shanxi Province from 1961 to 2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2013,68(11):1472-1480.]
- [23] 冯杭建.浙西淳安降雨型滑坡发育规律及危险性评价研究[D].武汉:中国地质大学,2016. [Feng H J. Rainfall-triggered landslide development regularity analysis and hazard assessment in Chun an of Zhejiang[D]. Wuhan: China university of geosciences, 2016.]
- [24] 关颖,朱翊.基于空间分析的区域地质灾害点的分布特征研究——以新疆为例[J].测绘工程,2016,25(9):15-19. [Guan Y, Zhu Y. A study of the distribution characteristics of regional geological hazards based on spatial analysis: A case of Xinjiang[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016,25(9):15-19.]
- [25] 熊俊楠,李进,程维明,等.西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J].地理学报,2019,74(7):1374-1391. [Xiong J N, Li J, Cheng W M, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019,74(7):1374-1391.]
- [26] 杜俊,丁文峰,任洪玉.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]. Journal of Geo-information Science, 2015,24(11):1977-1983.]
- [27] 郭良,张晓蕾,刘荣华,等.全国山洪灾害调查评价成果及规律初探[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1548-1556. [Guo L, Zhang X L, Liu R H, et al. Achievements and preliminary analysis on China national flash flood disasters investigation and evaluation[J]. Journal of Geo-information Science, 2017,19(12):1548-1556.]
- [28] 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.]