

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2019.06.002

基于点模式法的四川省林火时空分布特征研究

刘倩,覃先林*,李晓彤,侯亚男

(中国林业科学研究院资源信息研究所,国家林业局林业遥感与信息技术实验室,北京 100091)

摘要:林火是干扰森林正常生长的重要因子之一,四川省位于林火高发区的西南林区;研究四川省林火发生规律有助于该省森林防火工作的开展。本研究基于MODIS火产品数据(MOD14A2/MYD14A2),采用Ripley K函数、中心点和标准差椭圆法、核密度分析法等空间统计方法并利用数据圆环图显示,对四川省2001—2012年林火时间和空间分布特征进行了分析。结果表明:2001—2012年四川省林火发生年际波动较大,林火高峰期出现在1、2、3、4、5月份,且林火发生数逐年增加;在较小空间尺度下(小于528 km)林火空间格局为聚集分布;12年间林火发生的中位数中心处于攀枝花市,它也是火点最密集区,高发区还包括凉山彝族自治州和甘孜藏族自治州,四川省林火总体分布趋势是向西北的甘孜藏族自治州方向扩展。

关键词:MODIS火产品;时空特征;聚集分布;密度分析;四川省

中图分类号:S762 **文献标识码:**A

文章编号:1003-5508(2019)06-0006-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A Study of Spatiotemporal Characteristics of Forest Fires in Sichuan Province Based on Point Pattern's Method

LIU Qian QIN Xian-lin* LI Xiao-tong HOU Ya-nan

(Research Institute of Forest Resource Information Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100084, China)

Abstract: The forest fire is an important factor of disturbing forest growth. Sichuan province was located in the southwest forest area with a high occurrence density area of forest fires. It could contribute to the forest fire prevention work by analyzing the distribution characteristics of fire occurrence in Sichuan province. Based on the MODIS fire product (MOD14A2/MYD14A2), Ripley K function, center point, standard deviational ellipse method and Kernel Density method were employed and the data clock was used to explore the spatial-temporal distribution of forest fires in Sichuan province from 2001 to 2012. The results showed that the annual forest fires fluctuated greatly in Sichuan province. The peak periods of forest fires were in January, February, March, April and May, and the number of forest fires continued to rise every year. On smaller spatial scale (less than 528 km), the spatial pattern of forest fires was clustering. The median center of forest fires occurred in Panzhihua city in 12 years, which was the area with highest fire density. The hot spots of forest fires were also located at Liangshan Yi Autonomous Prefecture and Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture. The overall spread trend was to extend northwest to Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture.

收稿日期:2019-09-04

基金项目:机载光学全谱段数据处理及林火预警技术研究(CAFYBB2018SZ009);民用航天预研项目(D040402);高分森林灾害监测应用示范子系统(二期)

作者简介:刘倩(1996-),女,硕士研究生,主要从事森林灾害遥感监测,e-mail:olivia250864095@163.com。

*通讯作者:覃先林(1969-),男,研究员,博士,主要从事林火卫星遥感预警监测技术,e-mail:noaags@ifrit.ac.cn。

Key words: MODIS fire product, Spatial-temporal characteristics, Clustering distribution, Density analysis, Sichuan Province

作为森林扰动的一个重要影响因子,森林火灾直接影响森林覆盖,改变森林生态系统物种多样性,在不同时空尺度对生态系统生产力水平及资源可用性造成很大破坏^[1]。位于我国西南地区的四川省内由于西南高山林区的存在,林火频发且危害严重,是卫星林火监测的重点区域^[2-3]。因此在景观或区域尺度上研究四川省林火时空分布规律,既是该地区森林火灾区划、火源安全管理的需要,也为进一步开展森林火险预报和林火预防工作提供帮助。

历史森林火灾统计数据是用来研究林火时空分布的重要数据源^[4-11],如杨广斌等^[6]根据 1986—2006 年北京市森林火灾统计数据,对北京市林火时空发生规律进行了分析。Vega 等^[7]利用 1969—2008 年林火统计数据对瑞士提契诺州森林火灾分布进行了分析。但随着卫星遥感数据源的增加、卫星传感器性能的不断优化,许多高时间、空间分辨率的遥感数据如 AVHRR^[12-13]、MODIS^[14-16]、HJ^[17-18]等早已广泛用于林火研究,其中,MODIS 卫星数据因其光谱范围广、一天可覆盖同一区域 4 次、时间分辨率高等特点被广泛用于火点检测、过火面积评估、林火发生时空规律研究等^[19-20],且 Qin 等发现对于中国典型森林火灾案例,从 MODIS 中获得的火灾数据比从国家收集的统计火灾数据更准确、空间精确性更好^[21]。

近年来,国内对于林火发生时空研究主要是在时间尺度和空间尺度上找到其分布特征规律。时间尺度上李顺等^[22]采用变异系数和阿伦因子对兴安岭林火时间分布的聚集性范围和尺度进行了分析;空间尺度上邓忠坚等^[23]采用核密度法分析了云南省 2007—2013 年卫星检测热点与林火数据,顾先丽等^[16]采用 Getis-Ord-Gi* 热点分析工具和信息熵理论研究了江西省 2001—2015 年林火发生时空分布特征,阙华斐等^[24]借助时空立方体热点分析模型分析了湖南省近 10 年林火时空分布规律和发展趋势。

四川省是我国林业资源大省,也是我国林火的多发区和重灾区,以往针对四川省林火时空分布规律的研究较少,利用不同的分析方法对其多个林火高风险区进行针对性分析更是稀少。因此本研究基于 MODIS 火产品数据,提取了四川省 2001—2012 年 12 年时间序列信息,在时间和空间尺度上运用不同的空间分析方法对该区域林火点模式分布规律

进行探究,以期为该地区森林防火安全管理工作提供帮助。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区概况

四川省位于中国西南地区内陆,地理位置东经 92° 21' ~ 108° 12' 和北纬 26° 03' ~ 34° 19',地处长江上游。四川省总面积达 48.6 万 km²,居全国第五位。据第八次全国森林资源清查结果显示,四川省森林面积达 1 703.74 万 hm²,仅次于内蒙古、黑龙江和云南。森林覆盖率为 35.22%,活立木总蓄积量为 177 576.04 万 m³,居全国第 2 位。全省主要由四川盆地、川西北高原和川西南山地 3 部分组成。东部四川盆地是我国四大盆地之一,面积 16.5 万 km²,气候温暖湿润,冬暖夏热,年降水量可达 1 000 mm ~ 1 300 mm,属于亚热带湿润季风气候,植被为亚热带常绿阔叶林。川西高原则以寒温带气候为主,气候垂直变化显著,冬寒夏凉,日照充足,年降水量 500 mm ~ 900 mm,主要分布高山稀疏植被和嵩草高寒草甸。川西南山地四季不明显,日照充足,年降水量 900 mm ~ 1 200 mm,属于亚热带半湿润气候。由于独特的气候和地理条件,且少数民族居住分散,火源管理较难,四川省森林火灾频发,造成巨大损失^[25]。如 2019 年 3 月 30 日凉山州木里县境内发生的火灾,由于林火爆燃导致 30 名扑火人员牺牲。

1.2 数据来源

选取四川省 2001—2012 年 MODIS 火产品数据 MOD14A2/MYD14A2 (a Daily Level 2 Gridded 1Km Fire Active Product),来源于网络共享 (<http://earthdata.nasa.gov/data/nrt-data/firms/>)。该火产品数据空间分辨率为 1 km,记录了火点时间、经纬度、可信度等信息。为减少误差,本研究选取了可信度 ≥ 75% 的火点。

中国 1:100 万植被图由中国科学院于 2001 年根据全国植被调查结果、航空遥感和卫星图像以及地质、土壤学和气候学的数据得出,它涵盖了整个中国领土,全面展示了 11 组植被类型的地理分布。

1.3 数据处理

对 MODIS 火产品数据进行投影转换等处理,采

用 ArcGIS 空间分析技术,建立四川省 2001—2012 年火点状图层,将其与中国 1:100 万植被图叠加获得每个火点对应的地物类型。然后仅提取出植被类型为针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌木林、高山植被、草的火点得到四川省林火点数据。与具有相同投影坐标系的四川省行政区划图叠加,提取出分布在不同市区、不同植被类型的火点,再根据年份进行重分类,得到各年份的林火位置。

1.4 研究方法

从时间和空间两个尺度对四川省 2001—2012 年林火时空特征分布进行分析。

利用 ArcGIS10.5 中 Tracking Analyst 下的数据圆环图对四川省 2001—2012 年林火数据年际、月份分布特征进行统计分析。数据圆环图是一种二维圆形图表,多个同心圆和径线的组合将图分为若干个单元,每个单元的颜色表示单元内事件的数量,能以两种不同频率分析数据时间分布规律。

空间统计点模式研究方法主要有中心点法、标准差椭圆法、核密度估算法、热点分析等^[26],本研究首先采用基于 Ripley K 函数的多距离空间聚类分析确定这些火点是否具有聚集性,若有则确定其聚集的空间尺度范围。然后通过中心点法和标准差椭圆法确定四川省林火的总体聚集与蔓延方向,以及 12 年来每年林火分布的平均中心和趋势。最后采用核密度估算进一步具体表现林火空间分布规律。

1.4.1 Ripley K 函数

Ripley K 函数(Ripley K function)是点格局分析的常用方法,可分析要素质心随邻域大小变化时空聚集或空间扩散的变化过程,确定不同空间尺度下的火点分布是否聚集^[27]。Besag^[28]将 K 函数进行开方线性转化以保持其方差稳定,转化后的公式如下:

$$L(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{ij}(d)}{\pi n(n-1)}} \quad (1)$$

式中, d 是距离, n 为点要素的总个数, A 为要素区域总面积, $k_{ij}(d) = 0(d_{ij} > d)$ 或 $k_{ij}(d) = 1(d_{ij} \leq d)$ 。

通过比较真实点的 $L(d)$ 和空间随机点(complete spatial random-ness; CSR)之间的 d ,判断实际观测的空间点格局分布模式;如果 $L(d) < d$,表明空间点格局是离散分布,如果 $L(d) > d$,则表明空间点格局呈聚集分布,如果 $L(d) = d$,则表明空间点格局呈完全随机分布。

1.4.2 中心点法和标准差椭圆法

进行点模式统计分析时第一步往往是进行中心

点分析,中心点主要包括中心要素、平均中心和中位数中心三种,其中中位数中心是一种对异常值反应较为稳健的中心趋势度量,适合用于不能被少数外围火灾影响火灾核心区的林火发生方位分析。中位数中心算法是由 Kuhn 和 Kuenne^[29]首次提出,Burt 和 Barber^[30]进一步总结归纳,得到优化算法如下:

$$d'_i = \sqrt{(X_i - X')^2 + (Y_i - Y')^2} \quad (2)$$

式中, t 为计算次数,都会找到一个候选“中位数中心” (X', Y') ,然后对其进行优化,直到其表示的位置距数据集中的所有要素 i 的“欧式距离” d 最小。

标准差椭圆也称点集的有向分布,能直观有效地表达点集空间分布^[31]。通过标准差椭圆,可查看四川省 2001—2012 年林火分布是否具有一定方向偏离,椭圆长轴表示林火扩散的方向,短轴反映林火聚集程度的高低。标准差椭圆算法首先确定圆心 (\bar{X}, \bar{Y}) ,公式见(3);然后确定旋转角度 θ ,公式见(4);最后计算沿 x 轴和 y 轴的标准差 σ_x, σ_y 。

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}, \tilde{x}_i = x_i - \bar{X}, \tilde{y}_i = y_i - \bar{Y} \quad (3)$$

$$\theta = \text{ARCTAN} \left\{ \left[\left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \right)^2} \right] / \left(2 \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \right) \right\} \quad (4)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \cos \theta - \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{n}} \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \sin \theta + \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{n}} \quad (6)$$

式中, x_i 和 y_i 是点要素 i 的坐标, n 为点要素总个数。

1.4.3 核密度分析法

在以上分析的基础上,可通过密度分析进一步对该研究区林火空间密度进行估算。密度分析根据输入的离散点或线要素数据内插计算整个区域数据聚集状况,根据插值原理不同主要分为核密度分析和普通的点/线密度分析。在核密度分析中落入搜索区的点具有不同的权重,靠近搜索中心的点或线会被赋予较大的权重,反之远离搜索中心的点或线则权重较小,它的计算结果分布较平滑。根据空间自相关性选择核密度分析对四川省林火空间密度进

行计算。对于空间上点要素 x_1, x_2, \dots, x_n 中任意一点 x_k 的空间密度为:

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^n K\left(\frac{x_k - x_i}{h}\right) \quad (7)$$

式中, K 为高斯正态分布函数, h 为核函数的带宽。当 h 越大时, 所能表现出来的结论越粗略、抽象, 越能表现出整体性的趋势; 反之 h 越小细节程度越高, 越能显示出局部性的趋势。

2 结果与分析

2.1 四川省林火格局时间尺度分析

同心圆以年份划分、径线以月份划分数据得到林火发生次数的数据圆环图见图 1, 另外以月份划分同心圆、以日期划分径线统计林火发生次数见图 2。由图 1 可知四川省 2001—2012 年林火高峰期在 1、2、3、4、5 月份, 而 9、10、11 月、12 月属于林火低发期, 且能看出 2004 年以后林火发生数逐年增多。而从图 2 中可发现四川省这 12 年间 3 月 21 日、4 月 3 日和 7 日林火发生数最高, 其次 2 月 10 日至 16 日、3 月 11 日至 22 日、4 月和 5 月初林火发生频繁, 8 月 20 日、10 月 26 日、12 月 4 日、5 日和 24 日这几天也需重视。

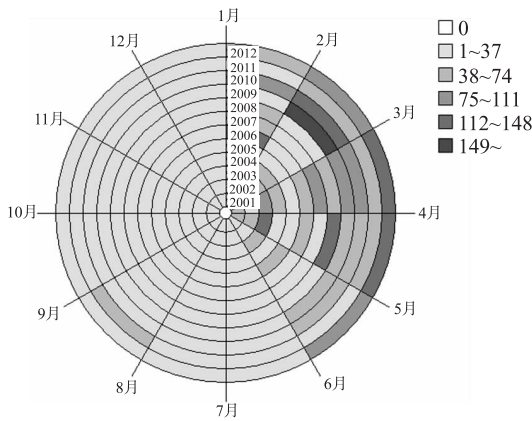


图 1 四川省林火年 - 月发生次数

Fig. 1 Yearly-Monthly occurrences of forest fires in Sichuan province

2.2 四川省林火格局空间尺度分析

2.2.1 Ripley K 函数分析

通过 Ripley K 函数得到不同空间尺度下四川省林火分布模式, 由于四川省面积大, 故起算距离设为 0, 递增步长设为 6 000 m, 即每隔 6 km 计算空间点的 L 值, 递增次数设为 100, 最终分析结果见图 3。由图 3 可知, 在空间尺度小于 528 km 时 L 函数观测

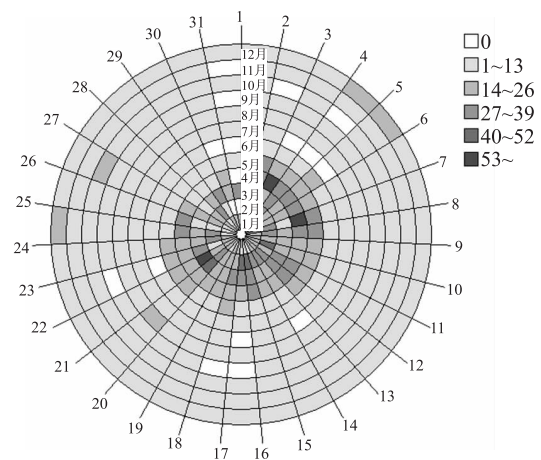


图 2 四川省林火月 - 天发生次数

Fig. 2 Monthly-daily occurrences of forest fires in Sichuan province

值大于期望值, 林火呈聚集分布; 当空间尺度大于 528 km 时, L 函数观测值小于期望值, 林火呈离散分布。因此, 在较小空间尺度下四川省 2001—2012 年林火空间格局为聚集分布, 可进一步进行点模式聚集分析。

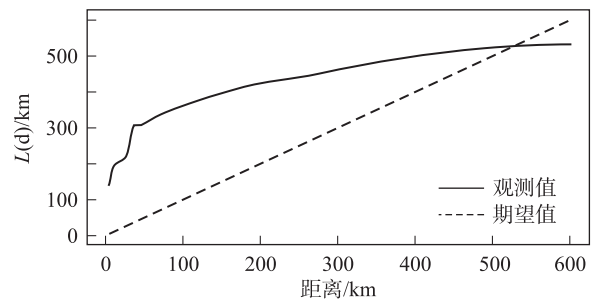


图 3 四川省林火 L 函数分布曲线

Fig. 3 L function distribution curve of forest fires in Sichuan province

2.2.2 点模式聚集分析

通过 Ripley K 函数已计算出较小空间尺度下四川省 2001—2012 年林火属于聚集分布, 基于此, 根据四川省这 12 年的林火点集数据, 在 ArcGIS 10.5 图层上计算中位数中心并绘制标准差椭圆。通过计算可知, 林火发生的中位数中心位于攀枝花市, 林火聚集区为凉山州, 其总体蔓延趋势是向西北甘孜藏族自治州方向延伸。采用 ArcGIS 10.5 空间分析工具中的核密度分析, 以 4 000 m 核密度分析, 以, 其为空间栅格单元, 50 km 为统计半径, 对这 12 年林火发生总密度进行计算, 结果为 $0 \sim 0.887$ 次/($\text{km}^2 \cdot 12\text{a}$), 同时可发现火点密度最高范围为整个攀枝花市, 其次凉山彝族自治州、甘孜藏族自治州和阿

坝藏族羌族自治州也偶有火灾发生(见图4)。

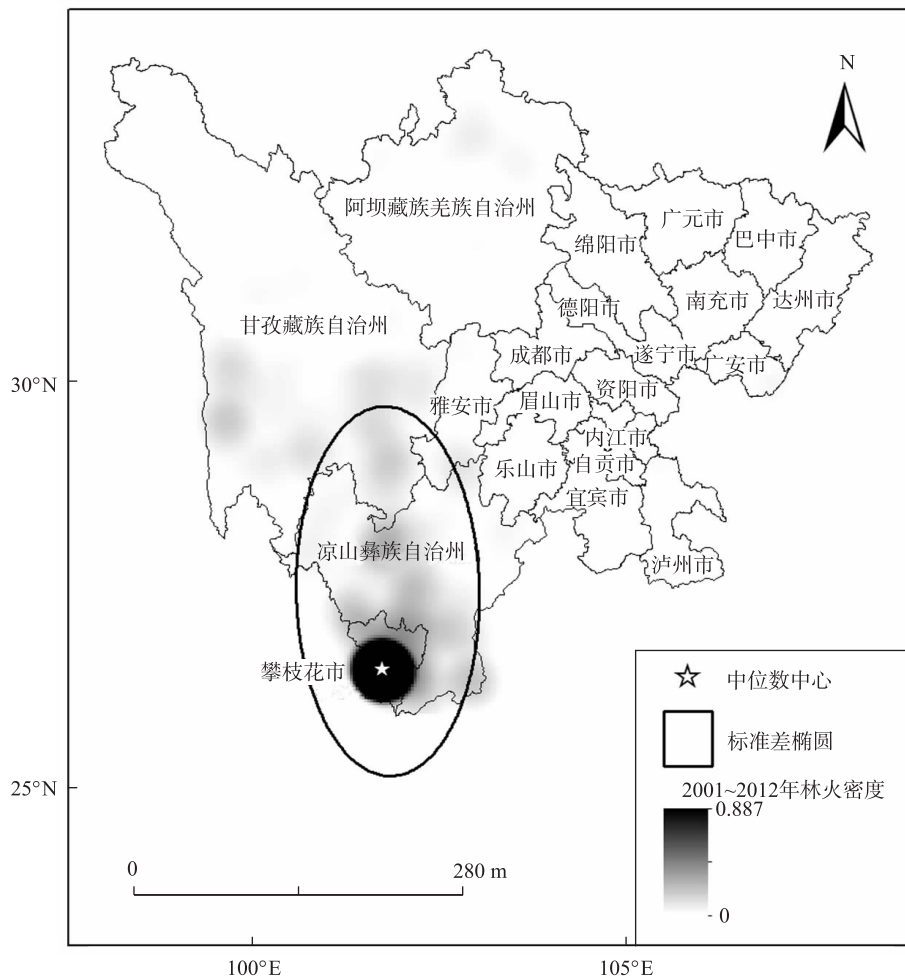


图4 四川省2001—2012年林火空间分析

Fig. 4 Spatial analysis of forest fires in Sichuan province from 2001 to 2012

但上述分析未能结合时间尺度,为找到每个年份林火聚集区域进一步分析,利用核密度分析方法对2001—2012年火点数据按年份顺序进行分析,同样按照50 km的统计半径,4 000 m×4 000 m的空间栅格单元,依次计算每年四川省林火发生密度,并按照自然间断点法将每年火点密度分为0~0.003次·km⁻²、0.003次·km⁻²~0.015次·km⁻²、0.015次·km⁻²~0.033次·km⁻²、0.033次·km⁻²~0.053次·km⁻²和0.053次·km⁻²~0.107次·km⁻²共5个等级。从图5可知,2001—2012年攀枝花市一直都是林火密度最高的地区;其次凉山彝族自治州从2003年开始林火发生数也逐渐增多,主要发生在与攀枝花市毗邻的西南部,2006年以后凉山州中部林火发生数增多;甘孜藏族自治州南部和西部局部地区从2009年开始林火发生数增多。

3 结果与讨论

本研究结果表明,四川省2001—2012年林火高峰期在1—5月,从自然因素分析,四川气候区域表现差异明显,四川东部盆地和川西北高原冬季由于草木枯萎,落叶枯草等易燃物堆积,而冬天过后3~5月气温逐渐上升,在干季气温高更易于燃烧而导致林火多发。四川西南山地降水差异明显,每年5月—9月为雨季,10月至次年4月为旱季,空气干燥,容易发生火灾。另一方面从人为因素考虑,2月是中国新年,人为鞭炮等可能造成火灾,而4月清明时节四川省人民普遍有上坟祭祖的习俗,伴随上香烧纸钱,冬季堆积的枯草在上坟时容易被点燃;另外3月—5月正是春耕时节,容易产生人为火源。而2009年以后每年林火发生数有明显增加,这可能

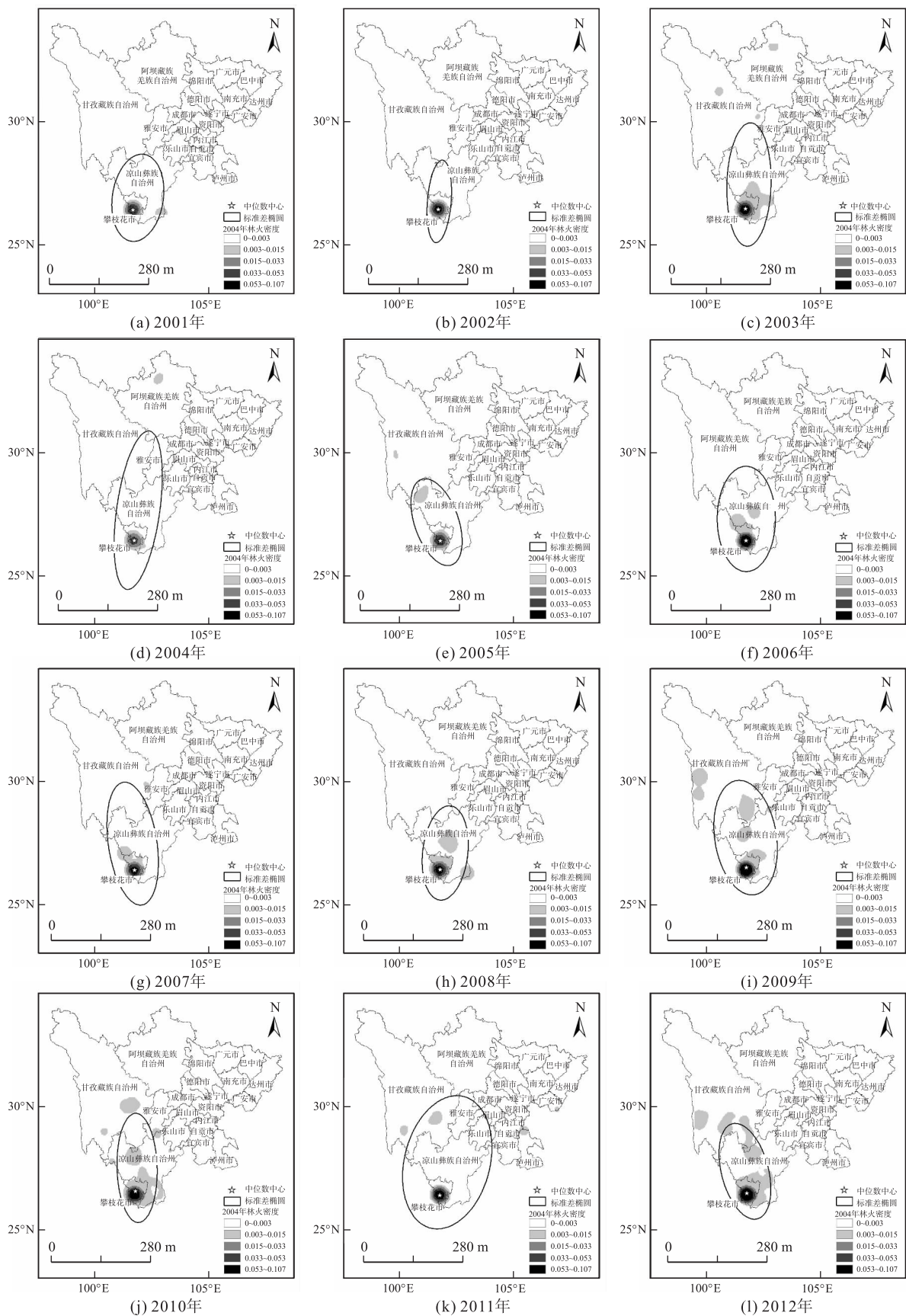


图5 四川省林火空间分析时序图

Fig. 5 Time series graph of spatial analysis based on forest fires in Sichuan province

与 2008 年四川发生汶川大地震并遭受冰雪冻害有关。雪灾过后会导致森林火灾集中暴发,且冰冻雪害会极大损坏林区道路和瞭望台、通讯设施等森林防火设施^[32]。

本研究结果表明,四川省 2001—2012 年林火分布具有明显空间聚集性,存在明显的林火高发区。火点最密集中心位于攀枝花市,其次火点高发区是凉山彝族自治州和甘孜藏族自治州,林火分布呈西北向,从攀枝花市中心向西北的甘孜藏族自治州扩展。攀枝花市火点主要集中在 3 月、4 月、5 月份,但从 2006 年开始 1 月、2 月的火点数目比往年增加明显,由于地势地形复杂,一旦发生火灾,不容易即时进行扑救,故应将其作为该省每年 1—5 月防治林火的重点区域。甘孜藏族自治州地处青藏高原,天然草原面积占总面积的 61.7%,森林面积占四川森林总面积的 20%,该区域林火发生时间是每年 11 月至次年的 5 月,正是旱季时间,而每年进入雨季后该地区林火发生概率大大降低,因此甘孜州林火高风险区域应作为每年 11 月至次年 5 月林火防治重点区域。而凉山彝族自治州情况与其相似,火点主要发生在每年 12 月下旬至次年 5 月,该州靠近林火最密集区攀枝花市,是全省三大林区、三大牧区之一,作为一个多民族地区,少数民族居住分散,生产、生活用火频繁,故而火源管理较难^[25],凉山州防火时间需引起关注。不同的地区不仅林火高峰期有很大区别,林火成因也不尽相同,因此,在林火防治方面需要因地制宜,对于不同地区,应该结合当地的地形地貌、植被特征、气候条件以及土地利用类型和人类活动进行重点分析,才能为林火防治工作提供可靠的决策。

目前采用空间统计方法分析关于四川省林火空间特征研究并不太多,本研究通过空间点模式统计法可分析出四川省林火发生聚集区域,为四川省林火防治工作提供科学依据和有针对性地决策,可尝试将其扩展到更大空间尺度如全国进行林火空间分析。本文数据源为卫星检测热点数据,但缺乏实地核查数据,可能存在热点错判的情况,为更精细地研究四川省林火分布并结合地形、气象、可燃物等因子类型建立林火预报模型,未来还需要结合地面核查数据进行进一步分析。

参考文献:

[1] 丁青. 基于遥感的欧亚北方森林林火扰动变化分析[D]. 北

京:中国科学院大学,2013.

- [2] 徐盛基. 南方十省区卫星林火监测热点趋势分析[J]. 森林防火, 2011(1).
- [3] 王鑫,王锐婷. 四川省林火的时空分布特征及其气候背景分析[J]. 中国农学通报, 2014, (29): 155 ~ 160.
- [4] 王明玉,孙龙,舒立福,等. 林火在空间上的波动性及其区域化行为[J]. 林业科学, 2006, 42(5): 98 ~ 103.
- [5] 田晓瑞,舒立福,王明玉,等. 西藏森林火灾时空分布规律研究[J]. 火灾科学, 2007(1): 10 ~ 14.
- [6] 杨广斌,唐小明,宁晋杰,等. 北京市 1986—2006 年森林火灾的时空分布规律[J]. 林业科学, 2009, 45(7): 90 ~ 95.
- [7] Orozco C D V. Point Pattern Analysis of forest fires occurrences in Canton Ticino (Switzerland)[A]. ICFBR 2011 International Conference on forest fire behaviour and risk focus on wildland urban interface[C]. Alghero (Sardinia), 2011.
- [8] 胡海清,李楠,孙龙,等. 伊春地区森林火灾时空分布格局[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 67 ~ 70.
- [9] Seol A, Lee B, Chung J. Analysis of the seasonal characteristics of forest fires in South Korea using the multivariate analysis approach[J]. Journal of Forest Research, 2012, 17(1): 45 ~ 50.
- [10] 郑琼,邸雪颖,金森. 伊春地区 1980—2010 年森林火灾时空格局及影响因子[J]. 林业科学, 2013, 49(4): 157 ~ 163.
- [11] 苏立娟,何友均,陈绍志. 1950—2010 年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 88 ~ 96.
- [12] Zhu Q J, Rong T Z, Sun R. A case study on fractal simulation of forest fire spread[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2000, 43(S1): 104 ~ 112.
- [13] Tian X R, Mcrae D J, Shu L F, et al. Satellite remote - sensing technologies used in forest fire management[J]. Journal of Forestry Research, 2005, 16(1): 73 ~ 78.
- [14] 高懋芳,覃志豪,刘三超. MODIS 数据在林火监测中的应用研究[J]. 国土资源遥感, 2005, 16(2): 60 ~ 63.
- [15] 胡庆华,李兵. 基于 MODIS 卫星数据的黑龙江省生物质燃烧火点时空分布[J]. 草业科学, 2018, 35(8): 2049 ~ 2057.
- [16] 顾先丽,吴志伟,张宇婧,等. 基于 MODIS 数据的 2001 - 2015 年江西省林火时空特征分析[J]. 广东农业科学, 2018, 45(6): 129 ~ 134.
- [17] 贺宝华,陈良富,陶金花,等. 基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2): 104 ~ 108.
- [18] Liu W L, Wang L T, Zhou Y, et al. A comparison of forest fire burned area indices based on HJ satellite data[J]. Natural Hazards, 2016, 81(2): 971 ~ 980.
- [19] 崔学明,王林和,周梅,等. MODIS 及 ASTER 卫星数据在林火面积估算中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(1): 198 ~ 200.
- [20] 贾旭,高永,齐呼格金,等. 基于 MODIS 数据的内蒙古野火时空变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 127 ~ 135.

(下转第 18 页)

- ~363.
- [5] 张志祥,刘鹏,蔡妙珍,等. 九龙山珍稀濒危植物南方铁杉种群数量动态[J]. 植物生态学报, 2008 (05): 1146~1156.
- [6] 《国家重点保护野生植物名录(第一批)》1999年8月4日国务院批准[J]. 环境教育, 2008, (8): 80.
- [7] 李文英,李欣,甘小洪. 濒危植物水青树的种群结构与数量动态[J]. 亚热带植物科学, 2018, 47 (03): 222~228.
- [8] 马宇飞,李俊清. 湖北七姊妹山珙桐种群结构研究[J]. 北京林业大学学报, 2005 (03): 12~16.
- [9] 梁宏伟,黄光强,王玉兵,等. 湖北长阳光叶珙桐群落结构研究[J]. 生态科学, 2011, 30 (03): 250~256.
- [10] 罗世家,包满珠,赵善雄,等. 大相岭龙苍沟珙桐种群空间分布格局研究[J]. 生物数学学报, 2009, 24 (03): 531~536.
- [11] 雷妮娅,陈勇,李俊清,等. 四川小凉山珙桐更新及种群稳定性研究[J]. 北京林业大学学报, 2007 (01): 26~30.
- [12] 关萍,张玉晶,石建明,等. 濒危植物珙桐种群遗传多样性分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37 (09): 71~76.
- [13] 张望,操国兴,刘光华,等. 四川省喇叭河自然保护区珙桐种群结构与分布格局[J]. 浙江林学院学报, 2008 (04): 451~457.
- [14] 杨心兵,刘胜祥,杨福生. 湖北省后河自然保护区光叶珙桐种群结构的研究[J]. 生物学杂志, 2000 (01): 16~18.
- [15] 沈泽昊,林洁,陈伟烈,等. 四川卧龙地区珙桐群落的结构与更新研究[J]. 植物生态学报, 1999 (06): 562~567.
- [16] 焦健,田波生,孙学刚. 甘肃文县珙桐群落优势种群分布格局及动态变化趋势[J]. 甘肃农业大学学报, 1998 (03): 58~63.
- [17] 李江陵,舒光明,何明友. 峨边黑竹沟药用植物资源及可持续利用的研究[J]. 中国中药杂志, 2000 (01): 16~18.
- [18] 何亚平,费世民,蒋俊明,等. 不同龄级划分方法对种群存活分析的影响——以水灾迹地油松和华山松种群生存分析为例[J]. 植物生态学报, 2008 (02): 448~455.
- [19] 闫桂琴,赵桂仿,胡正海,等. 秦岭太白红杉种群结构与动态的研究[J]. 应用生态学报, 2001 (06): 824~828.
- [20] 赵阳,齐瑞,焦健,等. 杂海-则岔地区紫果云杉种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, 38 (20): 7447~7457.
- [21] 肖宜安,肖南,胡文海,等. 濒危植物长柄双花木自然种群年龄结构及其生态对策[J]. 广西植物, 2007(06): 850~854.
- [22] 卢杰,郭其强,郑维列,等. 藏东南高山松种群结构及动态特征[J]. 林业科学, 2013, 49 (08): 154~160.
- [23] Deevey ES Jr. Life tables for natural populations of animals [J]. The Quarterly Review of Biology, 1947, 22 (4): 283~314.
- [24] 李娟,林建勇,何应会,等. 广西崇左叉叶苏铁种群结构与分布格局研究[J]. 广东农业科学, 2016, 43 (12): 25~29.
- [25] 张文辉,许晓波,周建云,等. 濒危植物秦岭冷杉种群数量动态[J]. 应用生态学报, 2005 (10): 1799~1804.
- [26] 苏瑞军,苏智先. 珙桐种子散布、萌发及其种群龄级分配的关系研究[J]. 林业科学, 2005 (03): 192~195.
- [27] 金雅琴,李冬林,孙晓龙,等. 南京方山朴树种群结构与分布格局研究[J]. 植物研究, 2011, 31(05): 603~609.
- [28] 李辛雷,孙振元,李纪元,等. 濒危植物杜鹃红山茶种群结构和动态变化[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27 (02): 17~23.
- [29] 谢宗强,陈伟烈,路鹏,等. 濒危植物银杉的种群统计与年龄结构[J]. 生态学报, 1999 (04): 523~528.

(上接第12页)

- [21] Qin X L, Yan H, Zhan Z H, et al. Characterising vegetative biomass burning in China using MODIS data[J]. International Journal of Wildland Fire, 2014, 23(1): 69~77.
- [22] 李顺,吴志伟,梁宇,等. 大兴安岭林火发生的时空聚集性特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 198~204.
- [23] 邓忠坚,李晓娜,周汝良,等. 云南省卫星热点与林火格局的关系研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4): 132~137.
- [24] 阙华斐,谭三清,周瑾,等. 基于卫星监测的湖南省林火时空分布规律研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(6): 61~65.
- [25] 覃先林. 林火卫星遥感监测[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 7.
- [26] 吴升,黄智函. 基于点模式的盗窃犯罪空间分布规律分析——以福州市主城区为例[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2015(5): 631~635.
- [27] Ripley BD. 1981. Spatial Statistics. Chichester: John Wiley.
- [28] Besag J E. Comments on Ripley's paper. Journal of Royal Statistical Society: Series B, 1977, 39: 193~195.
- [29] Kuhn H W, Kuenne R E. An efficient algorithm for the numerical solution of the Generalized Weber Problem in spatial economics. Journal of Regional Science, 1962, 4(2): 21~33.
- [30] Burt J E, Barber G. 1996. Elementary statistics for geographers. Guilford, New York.
- [31] Eck J, Chainey S, Cameron J, et al. Mapping crime: understanding hotspots[M]. Washington D C: National Institute of Justice, 2005.
- [32] 肖金香,叶蕾,叶清,等. 冰雪冻害对森林火灾的影响及防御措施[J]. 江西农业大学学报, 2005, 31(3): 433~436.