

大兴安岭林火发生的时空聚集性特征

李 顺^{1,2} 吴志伟^{1*} 梁 宇¹ 贺红士^{3,4}

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³东北师范大学, 长春 130000; ⁴美国密苏里大学, 哥伦比亚 65211)

摘 要 林火是大兴安岭林区重要的干扰因子之一, 揭示其发生的时空分布特征和规律, 对林火安全管理和未来气候变化下的林火预测具有重要作用。本文以大兴安岭 1967—2006 年发生的林火为研究对象, 将其视为一个在时间和空间上完全随机的点过程。采用时间点过程方法中的变异系数和阿伦因子及空间点格局分析中的 Ripley K 函数和 Kernel 空间密度函数等估算方法, 分别对大兴安岭林火时间和空间分布的聚集性范围和尺度进行分析。结果表明: 在较小的时间尺度上, 林火分布趋向随机过程, 随着观测时间长度增大, 分布的聚集性表现越显著; 空间分布上, 林火在一定距离尺度内表现为聚集分布, 超过该尺度则为随机泊松分布; 林火的分布往往聚集在某些特定区域, 存在明显的林火高发区。这些结果进一步揭示了大兴安岭林火时空的内在分布规律, 但对于导致这些林火时空分布格局的机制还有待进一步研究。

关键词 林火; 时空分布; 聚集性; 大兴安岭

The temporal and spatial clustering characteristics of forest fires in the Great Xing'an Mountains. LI Shun^{1,2}, WU Zhi-wei^{1*}, LIANG Yu¹, HE Hong-shi^{3,4} (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; ³*Northeast Normal University, Changchun 130000, China*; ⁴*University of Missouri, Columbia, 65211, USA*).

Abstract: Forest fire is one of the main disturbances in the Great Xing'an Mountains. Revealing temporal and spatial distribution characteristics of fire occurrence in this region was important for local fire management and fire prediction under climate change scenarios. Generally, distribution patterns of fire occurrence may vary at temporal and spatial scales. In this study, we used historical fire ignitions occurred between 1967 and 2006 to derive fire clustering characteristics at various spatial and temporal scales in the Great Xing'an Mountains. We employed the coefficient of variation and Allen Factor to derive the temporal clustering scope of fire occurrence, and used the Ripley's K function and Kernel density methods to estimate the spatial clustering characteristics of fire occurrence. The results showed that at a fine temporal scale, fire distribution was in a tendency of stochastic process. The time-clustering phenomenon was clearly visible as the observation time increased. Spatially, the fires showed aggregated distribution characteristics within certain distances. Exceeding these distances, fires showed stochastic Poisson distribution characteristics. The forest fires were located in certain areas, where there was a significant high occurrence density across the landscape. These results indicated temporal and spatial distribution patterns of forest fires in the Great Xing'an Mountains, yet lacked an in-depth research about the impact mechanism of the fire patterns, which remains to be solved.

Key words: forest fire; temporal and spatial distribution; clustering; Great Xing'an Mountains.

国家自然科学基金项目(41371199、31570462 和 31300404) 资助。

收稿日期: 2016-05-06 接受日期: 2016-11-02

* 通讯作者 E-mail: wuzhiwei@iae.ac.cn

林火干扰在北方针叶林森林生态系统中占据着重要的地位,对森林生态系统的过程和景观结构产生重要的影响(田晓瑞等 2006; Tymstra *et al.* 2007; Flannigan *et al.* 2009; 胡海清等, 2013)。中国大兴安岭地区是北方针叶林生态系统的重要组成部分之一,是森林火灾高发区域。据统计,1972—2006年间大兴安岭年平均火灾发生次数为80次,年均过火面积达 $18.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (王明玉, 2009)。林火作为大兴安岭森林生态系统的重要干扰因子之一,揭示其发生的时空分布特征和规律,既是该地区林火安全管理的需要,也是未来气候变化下林火预测的重要基础(舒立福等 2003)。

以往学者对大兴安岭林火发生时空分布规律做过较多的研究,主要涉及林火发生的时空动态和分布(邱雪颖等, 2008; 魏书精等, 2011; 吴志伟等, 2011)林火时空分布格局的影响因素(郭福涛等, 2009; 刘志华等 2011)林火时间序列分析等(寇晓军等, 1997; 金森等 2002; 田晓瑞等 2007)。这些研究对大兴安岭林火时空分布规律进行了较为深入的分析,但更多是立足于一个特定的时间尺度(如10年)或者空间尺度(如某一个林业局或省级区域尺度),分析林火发生的时空分布规律,缺乏从不同的尺度上对林火发生的时空聚集性特征进行深入分析。然而,有研究表明林火发生与蔓延过程具有明显的时空聚集性特征。在林分尺度上,单一次的林火可能被视为随机事件,但是在景观乃至区域尺度上林火的发生与分布并不是完全随机的,相反呈现一定的时空聚集性特征(Produr *et al.* 2003; Wu *et al.* 2014)。这是由于林火在不同的时空尺度上影响因子作用机制不同(Peters, 2004; Fang *et al.*, 2015)。因此,在研究林火干扰过程中,如何从随机的林火事件中,找出其时空分布的聚类性特征和范围,获得林火发生的时空分布规律十分重要,是实现有效分配林火管理资源的基础。

本文主要探讨大兴安岭林火发生次数的时空聚类特征及其聚类的尺度范围,包括林火发生时间点在不同时间尺度上的分布特征,并进一步分析火点聚类分布的时间尺度范围;林火在空间尺度上的聚类性及其聚类分布的空间尺度范围和空间密度分布。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国大兴安岭地区,东与小兴安岭

毗邻,西以大兴安岭山脉为界与内蒙古自治区接壤,南濒广阔的松嫩平原,北以黑龙江主航道中心线与俄罗斯为邻。经纬度范围为 $50^{\circ}10' \text{ N} - 53^{\circ}33' \text{ N}$, $121^{\circ}12' \text{ E} - 127^{\circ}00' \text{ E}$,面积约 $8.46 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大兴安岭平均海拔1200~1300 m,最高峰达2035 m。大兴安岭大部为火成岩,地形平滑,山顶浑圆,山坡较平缓,一般在 15° 以下,山脉东坡被嫩江及松花江的许多支流深深地切割,地势起伏大,局部地区可达到 35° 以上。该区为寒温带大陆性季风气候,冬季受蒙古西伯利亚高压影响,寒冷漫长,年均温为 $-6 \sim 1^{\circ} \text{ C}$,年降水量为240~442 mm。春秋季节常出现高温、大风、干旱天气,因此也是林火的高发期(徐化成, 1998)。大兴安岭是中国重要的林业基地之一。该区植被类型为寒温带针叶林,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为单优势树种。此外还有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、钻天柳(*Chosenia arbutifolia*)和偃松(*Pinus pumila*)等主要树种(周以良, 1991)。

1.2 数据预处理

林火数据来源于大兴安岭林业局防火办公室,为研究区1967—2006年火烧记录,包括火烧时间、火点坐标、火烧面积等。将第一个林火发生事件的时间作为起始点,按时间序列统计每个林火事件的时间点,为便于分析不同火源差异性,人为火和雷击火分开探讨。采用ArcGIS软件将火点数据空间化,

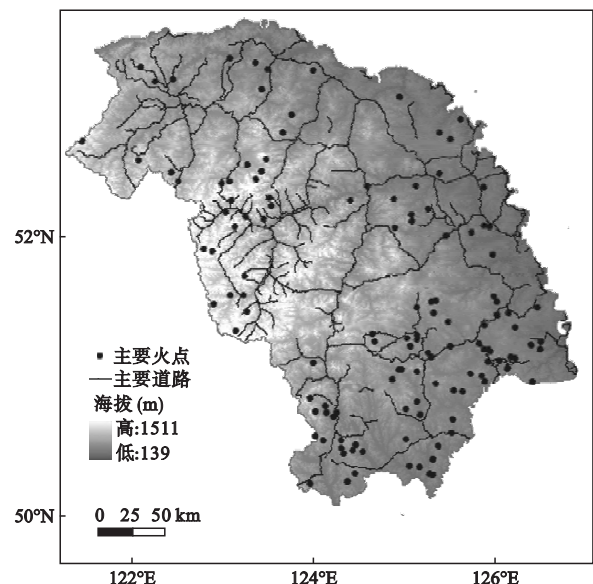


图1 大兴安岭地区1967—2006年火点分布
Fig.1 The distribution of fire location in the study area from 1967 to 2006

便于分析其空间分布格局。针对时间分布特征,拟采用变异系数法分析林火在时间分布上的聚集性,通过阿伦因子进一步分析不同时间尺度上火点(人为火、雷击火)过程分布特征。空间分布问题,采用 Ripley K 函数分析不同林火(人为火、雷击火)在空间上是否呈聚集性分布以及其聚集的尺度范围,通过 Kernel 密度进一步估算不同火源(雷击火、人为火)的空间密度分布,确定火点的高发区和低发区。

1.3 时间聚集特征

为探讨大兴安岭林火发生的时间聚类性,将其林火事件视为一个按时间排序的随机点过程。拟采用点过程序列分析方法中的变异系数分析林火发生时间点过程的聚集性特征。通过阿伦因子进一步确定不同尺度范围的时间过程特征和林火聚类特征明显的时间尺度。

1.3.1 变异系数 变异系数(coefficient of variance, C_v)是考察一组统计数据中各观测值相对变化程度的统计量。是衡量林火时间分布聚集性的重要指标,变异系数越大,说明林火时间分布的聚集性越明显。把每次林火事件按照时间先后顺序排列,按式(1)得到非连续的时间序列。

$$\delta_i = t_{i+1} - t_i \quad (1)$$

式中: t_i 为第 i 次林火发生时刻,为相邻两次林火发生的时间间隔。根据式(1)所得到的事件的时间间隔序列,对其公式定义如下:

$$C_v = \frac{\delta_i}{\langle t \rangle} \quad (2)$$

式中: C_v 为变异系数; δ_i 为统计量的标准偏差; $\langle t \rangle$ 为时间间隔的均值。当变异系数 $C_v = 1$ 时,表明各个事件之间相互独立,该过程为完全随机的泊松分布;当 $C_v > 1$ 时,说明该过程分布具有一定的聚集性,并非完全随机的泊松分布。 C_v 越大,表明聚集性越明显(Rosa et al., 2005)。

1.3.2 阿伦因子(Allan Factors, AF) 变异系数(C_v)能解释点序列在时间上的聚类现象,但不能得到点序列聚类的时间尺度范围。通过考虑阿伦因子,进一步分析林火发生时间点过程的聚类尺度范围,以及不同尺度范围内的点过程的分布特征。对阿伦因子(Allan, 1966)的定义如公式(3)所示:

$$AF(T) = \frac{\langle (N_{k+1}(T) - N_k(T))^2 \rangle}{2\langle N_k(T) \rangle} \quad (3)$$

首先对每次林火发生的时间进行预处理,将各个林火发生事件按照时间先后顺序排列,并将整个

时间轴长度以时间窗口 T 进行等分,计算每个区间林火发生的次数。若第 i 个时间窗口出现的火灾次数为 $N_k(T)$,则得到该时间窗口计数值序列 $\{N_k(T)\}$ 。时间窗口 T 的取值从 30 min 开始,每隔 30 min 计算一次,直到最大的时间窗口取整个时间长度的 $1/50$ 。 $\langle \dots \rangle$ 为组成序列的均值。

对于纯随机的泊松过程,两次火灾之间是相互独立的,对于所有时间窗口 T , $AF(T)$ 近似于 1。如果该火灾发生时间点过程具有标度行为,则 $AF(T)$ 满足:

$AF(T) \propto T^\alpha$, 其中,分形指数 $0 < \alpha \leq 3$ 。同时 α 也是用来度量聚类性的强度,具有聚类性的点过程,在统计上会表现出幂律分布(分形)的特点(Thurner et al., 1997)。当 $\alpha = 0$ 时,各林火发生事件之间不存在相关性,表现为泊松过程;当 $\alpha \neq 0$ 时,表明林火事件之间存在相关性。因阿伦因子考虑了相邻窗口时间发生次数的差,从而减小了点过程中可能存在的非平稳效应(Lowen et al., 1996)。

1.4 空间聚集特征

对于空间聚集性,将雷击火和人为火分开讨论,并视其为在空间上完全随机的分布过程。拟采用 Ripley K 函数确定这些火点是空间随机分布还是具有一定的聚集性,若具有聚集分布特征,则确定其聚集的空间尺度范围。最后通过 Kernel 空间密度估算各个林火的空间密度分布,确定哪些区域为林火高发地带。

1.4.1 Ripley K 函数 Ripley K 函数(Ripley K function)表示局部范围内空间点的个数,可以分析不同空间尺度下火点分布是否具有聚集特征。(Ripley, 1981)。Ripley K 公式如(4):

$$K(d) = A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{W_{ij}(d)}{n(n-1)} \quad (4)$$

式中: n 为点状地物个数, $w_{ij}(d)$ 为在距离 d 范围内点状地物 i 与点状地物 j 之间的距离; A 为区域面积。 $K(d)$ 表示真实情况下距离 d 内的样本点的平均数和区域内样本点密度之比。通过比较真实点的 Ripley K 值和空间随机点(complete spatial randomness; CSR)之间的 K 值($K^*(d) = \pi d^2$),判断实际观测的空间点格局分布的聚集程度,如果 $K(d) < K^*(d)$,说明空间点是离散分布;若 $K(d) > K^*(d)$,则表明空间点是聚集分布。

本文对 K 函数进行开方线性转换,使得转换后的 K 值与距离相等,如(5):

$$l(d) = \sqrt{\frac{K(d)}{\pi}} \quad (5)$$

因此,通过比较 $l(d)$ 与 d 之间的关系,可以判断空间点分布模式,当 $l(d) > d$ 时,表明点格局呈聚集分布,小于 d 则呈扩散分布。

1.4.2 Kernel 空间点密度估计 根据以上分析,林火在一定距离尺度范围上呈聚集分布,可通过 Kernel 密度对林火的空间密度进行估算(Bailey *et al.*, 1995),确定林火聚集分布地区,其定义如公式(6):

$$\lambda_b(s) = \frac{1}{c_b(s)} \sum_{i=1}^n k_{ib}(s - s_i) \quad (6)$$

式中: s_1, \dots, s_n 表示空间 n 个点的属性变量观测值; $\lambda_b(s)$ 为 s 点上空间密度; k_{ib} 表示 Kernel 强度; c_b 表示边缘改正因子。

2 结果与分析

2.1 时间聚集特征分析

2.1.1 变异系数 计算得到大兴安岭 1967—2006 年整个时间长度和各个年份林火发生时间间隔的变异系数,将人为火和雷击火分开考虑(图 2)。1967—2006 年整个点过程中,人为火的变异系数为 3.33,满足 $C_v > 1$,说明其整个时间序列过程聚集性分布十分显著。若考虑各年份变异系数,各个年份的变异系数值有很大差异,说明每个年份人为火的时间分布特征不同。如 1991 年和 1992 年由于林火发生次数少, $C_v < 1$,不具备聚集性分布特征。而 1993 年和 1999 年, C_v 接近于 1,说明这些年份人为火更多表现为随机的分布过程。而从 1981—1988 年,以及 1998 年和 2006 年, C_v 高于一般年份,说明这些年份人为火在时间分布上具有很高的聚集性。尤其在 1998 年,变异系数值最大,是人为火时间分布聚集性最强的年份。

在 1967—2006 年整个点过程中,雷击火的变异系数为 3.60,整体看时间序列过程聚集性分布十分显著。但从各个年份雷击火发生情况看,部分年份 C_v 值接近 1,表现为随机泊松过程。同时有些年份由于林火发生次数少或没有发生雷击火,导致 C_v 值为 0。因此满足 $C_v > 1$ 的年份只占到 22 个,聚集性分布明显的年份主要有 1975 年、1982 年、2000 年和 2002—2006 年,其中 2000 年为雷击火分布聚集性最强的一年。

2.1.2 阿伦因子 整个大兴安岭林火的时间长度为 20474100 min(14218 d)。 T 的取值从 30 min 开

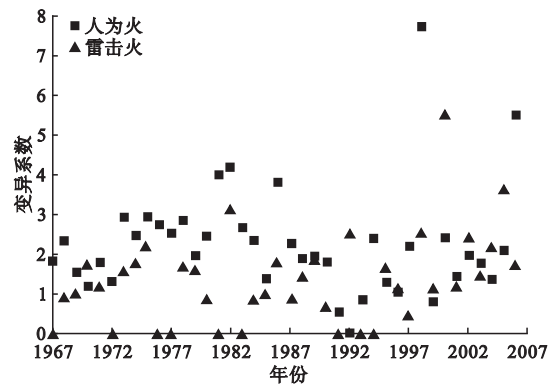


图 2 1967—2006 年不同林火时间间隔的变异系数
Fig.2 Variation coefficient of different time intervals for forest fires from 1967 to 2006

始,每隔 30 min 计算一次,直到整个时间长度的 1/50。利用阿伦因子计算公式分别得到林火一系列 AF 值。为了更直观呈现 AF 值随时间尺度 T 变化的规律,本文将 AF 值与 T 之间关系绘制成双对数坐标图。如图 3 和图 4。

(1) 人为火: 当时间尺度 $T < 16860$ min(12 d) 时,该范围内 AF 值趋近于 1,分形指数趋近于 0,人为火更多表现为泊松随机分布过程;而当 $T > 16860$ min 时, T 与 AF 因子基本呈现线性关系,说明该时间范围阿伦因子满足幂律分布,其拟合直线斜率为 0.71, $R^2 = 0.48$,具有明显的聚集性和分形特征。

(2) 雷击火: $T < 103890$ min(72 d) 时 AF 趋近于 1,该范围内雷击火为泊松分布过程;当 $T > 103890$ min 时, AF 值大于 1,且 T 与 AF 因子呈现近似的线性关系,具有幂律分布的特征,拟合直线斜率为 0.25, $R^2 = 0.14$,该林火时间序列存在聚集分布特征。

从以上结果分析得出,无论是人为火还是雷击火,从整体分布看具有明显的聚集分布特点。而从

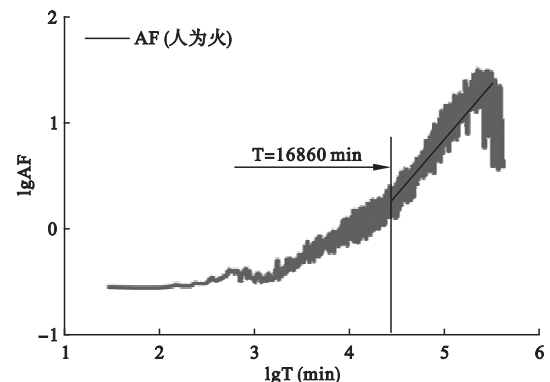


图 3 1967—2006 年人为火时间序列的 Allan 因子
Fig.3 Allan factors of human caused fires time series from 1967 to 2006

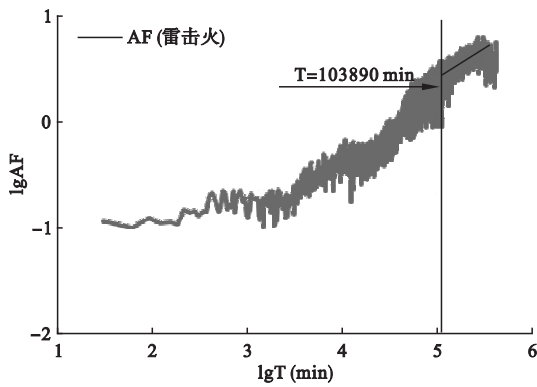


图 4 1967—2006 年雷击火时间序列的 Allan 因子
Fig.4 Allan factors of lightning fires time series from 1967 to 2006

各个年份看,其时间分布特征具有很大的差异。通过阿伦因子方法进一步分析得出,不同时间尺度上林火分布特点。其中人为火在 $T > 16860 \text{ min}$ (12 d) 时,雷击火在 $T > 103890 \text{ min}$ (72 d) 时,聚集分布显著。说明无论是人为火还是雷击火,在较小的时间尺度范围内,林火的时间分布趋向泊松过程。而在大的时间尺度上,其分布存在明显的聚集性,并且具有幂律分布特征。

2.2 空间聚类性分析

2.2.1 Ripley K 函数分析 空间点的分布模式可能随着空间尺度变化而改变。在不同空间尺度下,林火发生的空间异质性可能不同。通过 Ripley K 函数得到火烧点在不同空间尺度下的分布模式。考虑到大兴安岭面积较大,因此从 0 开始,每隔 5 km 计算空间点的 K 值,为减小边缘效应的影响,距离 h 的值最大设置为整个区域长度 1/2 的距离,大约为 300 km。分析结果如图 5 和图 6。图 5 显示,在空间尺度小于 210 km 时, L 函数的期望值小于观测值

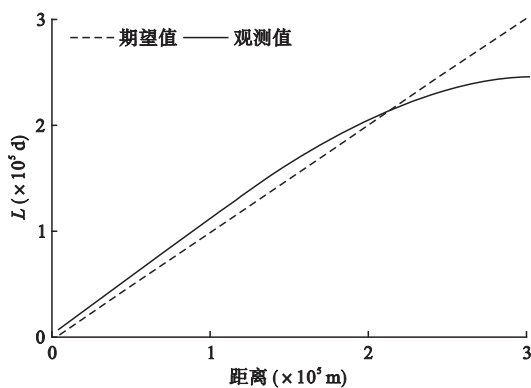


图 5 雷击火 L 函数分布曲线
Fig.5 L function distribution curve of lightning fires

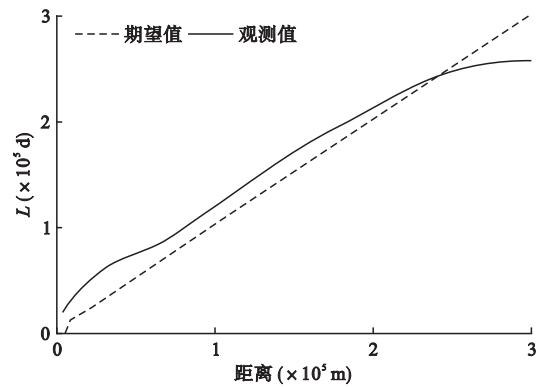


图 6 人为火 L 函数分布曲线
Fig.6 L function distribution curve of human-caused fires

值,说明在此空间尺度下雷击火呈聚集分布;当空间尺度大于 210 km 时, L 函数的期望值大于观测值,在该尺度下雷击火呈扩散分布。图 6 显示,在空间尺度小于 245 km 时,人为火点呈现聚集分布,大于 245 km 时为扩散分布。

用 Ripley K 函数对大兴安岭地区林火的分布格局进行计算时,当尺度范围小于 210 km 时,雷击火是呈聚集分布的,当尺度范围小于 245 km 时,人为火呈聚集分布。因此,当在较小空间尺度下,大兴安岭地区 1967—2006 年的林火空间分布形式为聚集分布。

2.2.2 空间密度估算结果 根据 Ripley K 函数计算得出的结果,人为火和雷击火在一定空间尺度上具有聚集分布特征,并非完全随机的分布。据此

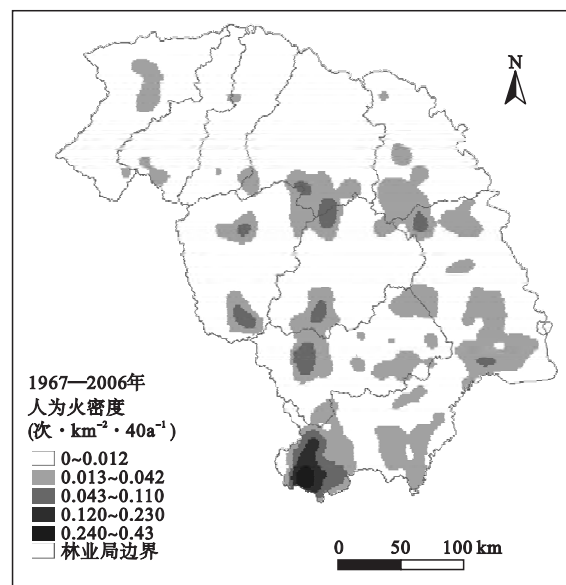


图 7 大兴安岭 1967—2006 年人为火密度
Fig.7 Density of human-caused fires in 1967—2006

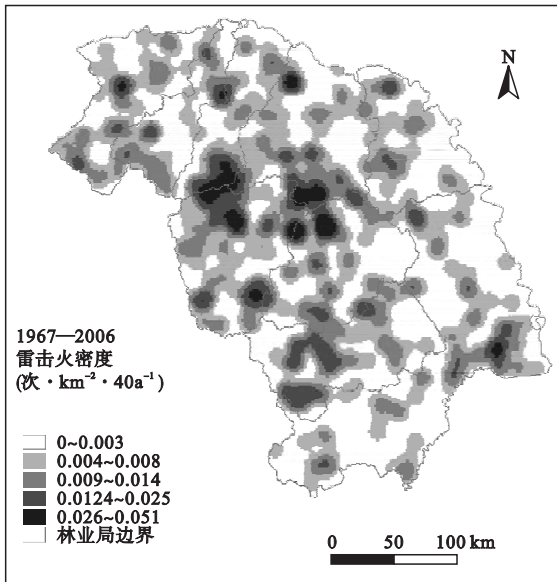


图8 大兴安岭1967—2006年雷击火密度
Fig.8 Density of lightning-caused fires in 1967—2006

采用 ArcGIS 中的空间分析工具对该区 1967—2006 年林火(人为火、雷击火)发生密度进行估算,分析出该区林火高发地区。通过 Kernel 空间点密度计算得出:人为火点密度范围在 $0 \sim 0.424$ 次 $\cdot \text{km}^{-2} \cdot 40 \text{ a}^{-1}$,火烧点分布趋势由北往南逐渐增多。南部地区是人为火的高发地区,对应的行政区在加格达奇林业局西南部,其次为松岭西北部和新林与塔河交界处。而研究区北部的西林、图强、阿木尔及塔河北部等林区人为火较少(图7)。

雷击火的密度分布范围在 $0 \sim 0.051$ 次 $\cdot \text{km}^{-2} \cdot 40 \text{ a}^{-1}$ 。图5显示雷击火虽然是呈聚集分布,但 L 函数分布的曲线弧度不大,说明聚集特征不是非常明显。总体来看,雷击火分布的热点地区主要在中部地区,对应行政区在呼中北部和阿木尔南部交界处,新林北部和塔河南部交界处(图8)。

3 讨论

本研究结果表明,虽然单次的林火发生具有随机性,但在一定的时间尺度上,林火的时间分布表现为聚集性,且具有幂律分布特征。一些学者对大兴安岭林火发生的时间分布特征研究也表明,林火发生存在明显的高发阶段和低发阶段,林火发生次数在年际和月际上都存在明显的聚集分布特征(魏书精 2013; 郑琼 2014)。Teresa 等(2010)也通过采用变异系数和阿伦因子方法对意大利森林火灾的研究结果表明,林火分布在时间序列上具有明显的丛集

性,当时间尺度大于 $10^{3.5} \text{ min}$ (2 d) 时,林火时间分布的聚集性更加显著。对本研究来说,当时间尺度大于 12 d(人为火)和 72 d(雷击火)时,林火分布具有显著的时间丛集性特征。

本研究结果表明,大兴安岭 1967—2006 年林火分布具有明显空间聚集性特点。王明玉(2009)研究结果也表明,1967—2006 年大兴安岭地区雷击火在空间尺度小于 150 km,人为火在空间尺度小于 225 km 时,呈空间聚集分布,与本文研究结果大体相似。本研究结果显示,人为火主要分布在南部地区,人为火的聚集范围主要在道路和居民点附近(郭福涛等,2015)。杜春英等(2010)研究结果表明,大兴安岭雷击火分布的火场质心呈显著的带状分布,且有向东南转移的趋势。张骞等(2014)研究发现,大兴安岭的雷击火分布沿林区呈南北向,与山脉的走向一致,且越往北火点分布越密集。这些研究结果均表明,林火的分布往往聚集在某些特定区域,存在明显的林火高发区。

目前对于林火时间特征研究,更多采用数理统计方法探讨其分布的规律性。而对于分布的机制研究较为缺乏,大多数学者多是采用基于与气象因子关联分析。如 Telesca 等(2006)利用意大利中部 1997—2003 年的火灾数据,通过 Allan 因子分析了火灾时间序列与气候周期的关系。秦凯伦(2014)选取最优模型对大兴安岭塔河地区林火发生次数与气象因子之间的关系进行拟合。这些研究结果进一步揭示了林火发生的时间分布机制,可以为建立大兴安岭火灾演化模型和林火预测模型提供理论支持。但森林火灾系统是一个涉及到诸多影响因素的复杂系统,受到天气、植被、地形和人为因子多重因素相互作用,火灾发生具有很大的随机性和不确定性。因此,从更深层次上探讨林火发生的时间分布机制问题,还需要进一步考虑对除气象因素以外的其他林火因子的作用。

选择的区域尺度不同,林火参数与影响因子之间的关系也不同。胡海清等(2002)对黑龙江林火空间尺度分布的影响机制做了进一步研究,对林火发生次数和面积与人为活动因子、气象及森林类型等因子的尺度关系做了较为详细的定量分析。秦凯伦等(2014)通过非线性方法对大兴安岭雷击火发生的驱动因子进行综合分析。郭福涛等(2015)采用回归分析方法建立了大兴安岭人为火与影响因子之间的相关关系,并建立了人为火的发生预测模型。

因此,未来研究需重点探讨如何确立时空明晰的林火参数与林火影响因子之间的关系,为进一步预测未来气候变化下的林火发生状况奠定基础(孙龙等,2014)。

参考文献

- 邱雪颖,孙希国,孙建. 2008. 大兴安岭塔河林业局林火时空动态研究. *森林防火*, **26**(3): 33-35.
- 杜春英,李帅,刘丹,等. 2010. 大兴安岭地区森林雷击火发生的时空分布. *自然灾害学报*, **19**(3): 72-76.
- 郭福涛,胡海清,张金辉. 2009. 塔河地区林火时空分布格局与影响因素. *自然灾害学报*, **18**(01): 204-208.
- 郭福涛,苏漳文,王光玉,等. 2015. 我国北方针叶林人为火发生的预测模型. *应用生态学报*, **26**(7): 2099-2106.
- 胡海清,金森. 2002. 黑龙江省林火规律研究. II. 林火动态与格局影响因素的分析. *林业科学*, **48**(2): 98-102.
- 胡海清,魏书精,孙龙,等. 2013. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. *干旱区地理*, **36**(1): 57-75.
- 金森,胡海清. 2002. 黑龙江省林火规律研究. I. 林火时空动态与分布. *林业科学*, **48**(1): 88-94.
- 寇晓军,冯玉芬,董俊华. 1997. 黑龙江省林火时空格局分析-时间分布. *森林防火*, **17**(4): 13-15.
- 刘志华,杨健,贺红土,等. 2011. 黑龙江大兴安岭呼中林区火烧点格局分析及影响因素. *生态学报*, **31**(6): 1669-1677.
- 秦凯伦. 2014. 大兴安岭塔河林火空间分布规律及对土壤理化性质的影响(博士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.
- 秦凯伦,郭福涛,邱雪颖,等. 2014. 大兴安岭塔河地区林火发生的优势预测模型选择. *应用生态学报*, **25**(3): 731-737.
- 舒立福,张小罗,戴兴安,等. 2003. 林火研究综述II——林火预测预报. *世界林业研究*, **16**(4): 34-37.
- 孙龙,王千雪,魏书精,等. 2014. 气候变化背景下我国森林火灾灾害的响应特征及展望. *灾害学*, **29**(1): 12-17.
- 田晓瑞,舒立福,王明玉,等. 2006. 林火与气候变化研究进展. *世界林业研究*, **19**(10): 38-42.
- 田晓瑞,李红,舒立福,等. 2007. 黑龙江省森林火灾年际变化的小波分析. *自然灾害学报*, **16**(2): 118-121.
- 王明玉. 2009. 气候变化背景下中国林火响应特征及趋势(博士学位论文). 北京: 中国林业科学研究院.
- 魏书精,胡海清,孙龙. 2011. 气候变化对我国林火发生规律的影响. *森林防火*, **29**(1): 30-34.
- 魏书精. 2013. 黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法研究(博士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.
- 吴志伟,常禹,贺红土,等. 2011. 大兴安岭呼中林区林火时空分布特征分析. *广东农业科学*, **47**(5): 189-193.
- 徐化成. 1998. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社.
- 张骞,胡先锋,杨传凤,等. 2014. 大兴安岭林区雷击火灾规律及概率分析. *东北林业大学学报*, **42**(5): 149-153.
- 郑琼. 2014. 黑龙江省森林火灾的时空分布规律及趋势预测(博士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.
- 周以良. 1991. 中国大兴安岭植被. 北京: 科学出版社.
- Allan DW. 1996. Statistics of atomic frequency standards. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, **54**: 221-230.
- Bailey TC, Gatrell AC. 1995. *Interactive Spatial Data Analysis*. England: Longman Group Limited & Essex.
- Fang L, Yang J, Zu JX, et al. 2015. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. *Forest Ecology and Management*, **356**: 2-12.
- Flannigan M, Stocks B, Turetsky M, et al. 2009. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, **15**: 549-560.
- Lowen SB, Teich MC. 1996. The periodogram and Allan variance reveal fractal exponents greater than unity in auditory-nerve spike trains. *Journal of the Acoustical Society of America*, **99**: 3585-3591.
- Peters DP, Pielke RA, Bestelmeyer BT, et al. 2004. Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **101**: 15130-15135.
- Produr J, Martell DL, Casilag F. 2003. Spatial patterns of lightning-caused forest fires in Ontario, 1976-1998. *Ecological Modelling*, **164**: 1-20.
- Ripley BD. 1981. *Spatial Statistics*. Chichester: John Wiley.
- Lasaponara R, Santulli A, Telesca L. 2005. Time-clustering and analysis of forest-fire sequences in Southern Italy. *Chaos, Solitons & Fractals*, **24**: 139-149.
- Telesca L, Lasaponara R. 2010. Analysis of time-scaling properties in forest-fire sequence observed in Italy. *Ecological Modelling*, **221**: 90-93.
- Telesca L, Lasaponara R. 2006. Emergence of temporal regimes in fire sequences. *Physica A: Statistic Mechanics and Its Applications*, **360**: 543-547.
- Thruner S, Lowen SB, Feurstein MC, et al. 1997. Analysis, synthesis, and estimation of fractal-rate stochastic point progress. *Fractals*, **5**: 565-596.
- Tymstra C, Flannigan M, Armitage O, et al. 2007. Impact of climate change on area burned in Alberta's boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, **16**: 153-160.
- Wu ZW, He HS, Yang J, et al. 2014. Relative effects of climatic and local factors on fire occurrence in boreal forest landscapes of northeastern China. *Science of the Total Environment*, **493**: 472-480.

作者简介 李顺女,1991年生,硕士研究生,主要从事景观生态学、林火干扰生态学方面的研究。E-mail: lishun1991@foxmail.com
责任编辑 张敏