

粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构空间异质性动态

区余端^{1*}, 苏志尧²

(1. 广东海洋大学农学院, 广东湛江 524088; 2. 华南农业大学林学院, 广州 510642)

摘 要: 以受 2008 年冰灾破坏的广东始兴车八岭山地常绿阔叶林为研究对象, 采用半球面影像技术、地统计学的空间异质性和空间自相关分析方法, 连续 3 年(2008–2010 年)对林冠结构空间异质性动态进行了检测研究。结果表明: (1) 从 2008 到 2010 年, 林冠开度的平均值、标准差、变异系数、最大值、最小值和最小值的差值以及林冠结构的异质性均在逐渐减小, 且后两年较为接近; (2) 受灾当年冠层结构由随机因素造成, 其半方差拟合函数属纯块金模型, 后两年冠层结构则由结构性因素引起, 其半方差拟合函数属球状模型; (3) 受灾当年冠层结构不存在空间自相关; 随着时间推移其空间自相关越来越强。说明冰灾后常绿阔叶林冠层结构在没有人为干预的情况下会逐渐恢复到灾前水平, 体现出天然的空间分布状况。

关键词: 冰灾; 林冠开度; 半方差函数; 空间自相关

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2012)03-0223-07

Spatial Heterogeneity Dynamics of Canopy Structure in a Montane Evergreen Broadleaved Forest Following a Natural Disturbance in North Guangdong

OU Yu-Duan^{1*}, SU Zhi-Yao²

(1. College of Agriculture, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China;

2. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The spatial heterogeneity dynamics of canopy structure were successively investigated (from 2008 to 2010) in Chebaling montane evergreen broadleaved forest following an ice storm in 2008. We used hemispherical photography to acquire canopy pictures and geostatistics to analyze the spatial heterogeneity and spatial autocorrelation of canopy structure. The mean, standard deviation, variation coefficient, minimum and maximum of canopy openness, and spatial heterogeneity of canopy structure decreased from 2008 to 2010, and the values were more similar to each other in 2009 and 2010. Geostatistical analysis indicated that semivariance function of the 2008 canopy structure fitted with the pure nugget model and demonstrated stochastic factors in interpreting canopy structure, while 2009 and 2010 fitted with the spherical model and demonstrated structural factors, especially in 2010. No spatial autocorrelation was found in the canopy structure of 2008, while spatial autocorrelation became stronger with time. Our results indicated that canopy structure could recover to its pre-disaster level gradually without human intervention and reflect spatial distribution in natural state conditions.

Key words: Ice storm; Canopy openness; Semi-variance; Spatial autocorrelation

收稿日期: 2011-12-06, 修回日期: 2012-02-22。

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2008A020100013)。

作者简介: 区余端(1983–), 女, 广东肇庆人, 博士, 主要从事植物生态学研究。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: ouyudian@126.com)。

森林生态系统是一个具有镶嵌性质的异质体,而植物演替与各种干扰则是造成这种异质性的主要原因^[1,2]。空间异质性始终同森林的抗干扰能力、恢复能力、系统稳定性和生物多样性有着密切关系,并且影响着森林生态系统的功能和过程^[3,4]。研究森林生态系统成分的空间组成、空间构型和空间关联性是揭示空间格局对生态学过程影响和控制的重要途径,因此探讨森林中研究变量的空间异质性成为学术界关注的焦点^[5,6]。

干扰会改变森林冠层原有的结构,增加冠层结构的空間异质性;干扰过后森林在恢复过程中冠层结构的空間异质性还在不断地变化,并对森林的格局与生态学过程有决定作用^[7-9]。2008年中国南方冰灾使该地区森林冠层被大面积损毁,形成众多大小不一分布不均的林冠空隙,增加了森林冠层结构的空間异质性^[10-13]。林冠空隙一旦形成有可能不断扩大,那是因为靠近林冠空隙的树木很容易遭受暴风的袭击和病虫害的侵害;也可能逐渐闭合,那是乔木枝叶的扩展会填充没被利用上的生长空间^[13]。森林中林冠空隙的形成方式、大小、形状不同导致了它们变化趋势的不同,这使冠层的空間异质性处于不断变化的过程。

地统计学方法是一个定量研究生态学中变量空間异质性的有力工具,它可以同时解决森林冠层结构空間异质性动态的三个主要问题:(1)森林冠层结构随时序变化的范围;(2)空间因素占总变异的比列;(3)特定的空間格局所对应的尺度。林冠是森林与外界环境最直接的接触界面,不仅能影响林内光、温、水的再分配,还能调节植物与环境的相互作用^[14],与生物多样性、全球气候变化等热点问题密切相关^[15-17]。本研究旨在探讨灾后森林冠层结构的空間异质性动态,揭示灾后冠层结构空間变化规律,监测灾后受损森林生态系统的恢复能力,有助于了解亚热带山地阔叶林自然干扰后群落的生态过程,为人工干预退化生境恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

车八岭国家级自然保护区地处广东省东北部的韶关市始兴县境内,位于北纬 $24^{\circ}40'29''\sim$

$24^{\circ}46'21''$,东经 $114^{\circ}09'04''\sim 114^{\circ}16'46''$,总面积 7545 hm^2 ^[18]。该保护区始建于1981年,主要保护对象为中亚热带常绿阔叶林及野生动物^[18]。区内地质构造属华南褶皱系,地势东南低西北高,最低处樟栋水(海拔330 m),最高峰天平架(海拔1256 m)^[18]。区内的土壤形态和结构较为完整,山地草甸土、山地表潜黄壤、山地黄壤、山地黄红壤、山地暗红壤、山地红壤、低地坡积物和谷地水稻土随海拔从高到低呈垂直分布^[18]。本区属于亚热带季风型气候区,最高温度 38.4°C ,最低温度 -5.5°C ,年平均温度 19.5°C ;年平均相对湿度79.7%,年平均降水量1468.0 mm,年平均蒸发量1356.1 mm^[18]。

1.2 取样方法

2008年8月在车八岭国家级自然保护区一片受冰灾严重干扰的山地常绿阔叶林(森林冠层被大面积损毁,形成大量分布不均的林窗)内建立 2 hm^2 长期固定样地(海拔343~475 m,坡度 $12^{\circ}\sim 44.3^{\circ}$,坡向东偏北 $30^{\circ}\sim$ 东偏南 21°),用于研究和监测冠层结构的空間异质性动态。在固定样地内设置50个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的连续样方,并用PVC管在每个样方的四角和中心点做标记。用Nikon 4500 CoolPix®数码相机外接Nikkor FC-E8鱼眼镜头转换器在每个样方中心和対角线四分位处获取半球面林冠影像照片。由于半球面影像技术具有方便快捷、灵活、成本低以及适合大范围使用的特点,因此目前国外已经广泛将其应用于冠层分析。往后两年(2009和2010年)的7-8月在该固定样地内半球面林冠影像照片的获取均采用上述方法。

1.3 半球面林冠影像分析

半球面林冠影像照片用Gap Light Analyzer 2.0图像处理软件进行分析,并用其输出的林冠开度(Canopy Openness, CO)指标作进一步的冠层结构空間异质性分析^[19]。

1.4 地统计学

2008、2009和2010年样地冠层结构的空間异质性利用林冠开度通过地统计学中的变异函数和Moran's I指数进行分析^[20-22]。

1.4.1 变异函数

变异函数也称为半方差函数,能揭示整个尺度上的空間变异,计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2。$$

式中 $\gamma(h)$ 为变异函数, $N(h)$ 是取样间隔为 h 时的点对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为随机变量 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的值。以变异函数 $\gamma(h)$ 为 y 轴, 取样间隔 h 为 x 轴, 绘制变异函数散点图, 并确定理论模型曲线, 得到变异函数图 (Semivariogram)。本研究中变异函数的拟合主要是纯块金效应模型 (pure nugget effect model) (表示研究变量为随机分布, 不存在空间相关) 和球状模型 (Exponential model), 其公式分别为:

$$\text{纯块金效应模型 } \gamma(h) = \begin{cases} 0, & h=0; \\ C_0, & h>0。 \end{cases}$$

$$\text{球状模型 } \gamma(h) = \begin{cases} 0, & h=0; \\ C_0 + C \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h \leq a; \\ C + C_0, & h > a。 \end{cases}$$

通过变异函数理论模型可以得到 3 个重要的参数, 即块金值 (Nugget, C_0)、基台值 (Sill, $C_0 + C$) 和变程 (Range, a)。 C_0 反映随机部分的变异; C 表示空间变异的自相关部分; $C_0 + C$ 表示研究变量在系统中的最大变异, 该值越大总的空间异质性越高。研究变量的空间总变异主要由随机部分和自相关部分组成^[2,23]。 $C/C_0 + C$ 为结构比, 该值越大空间相关性越强。 $C_0/C_0 + C$ 反映随机部分引起的空间异质性。

分维数 (Fractal dimension, D) 为双对数直线回归方程中的斜率, 由变异函数 $\gamma(h)$ 和间隔距离 h 的关系来确定, 用于表示变异函数的特性, 公式为:

$$2\gamma(h) = h^{(4-2D)}。$$

D 的大小可以作为研究变量随机变异的量度。

研究变量的空间异质性, 不仅与间隔距离 h 有关, 还与方向有关。当变异函数是由某一个特殊方向造成时称为各向异性变异函数 (Anisotropy semivariogram); 否则, 称为各向同性变异函数 (Isotropy semivariogram)。因此可用各向异性比 $k(h)$ (Anisotropic ratio) 来描述研究变量空间异质性的特点, 即:

$$K(h) = \gamma(h, \theta_1) / \gamma(h, \theta_2)。$$

式中 $\gamma(h, \theta_1)$ 和 $\gamma(h, \theta_2)$ 分别为方向 θ_1 和 θ_2

上的变异函数。如果 $K(h)$ 等于或接近 1, 那么研究变量的空间异质性为各向同性, 否则为各向异性。各向异性越高, 空间异质性也越高。本研究中方向的选择根据间隔距离中半方差函数值的有效性来决定。

1.4.2 Moran's I

采用 Moran's I 指数来反映样地林冠开度的空间自相关变化。Moran's I 指数可用如下公式进行计算:

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j W_{ij} Z_i Z_j}{\sum_i Z_i^2 \sum_i \sum_j W_{ij}}。$$

式中 W_{ij} 为研究范围内空间单元 i 和 j 的相对位置的权重, Z_i 和 Z_j 分别为空间单元 i 和 j 的数值。

在空间随机分布零假设下, I 的预期值 $E(I) = -1/(n-1)$, 当被检测样本本足够多时 $E(I)$ 接近于 0。 $I > E(I)$ 为正空间自相关, 表示相邻空间具有相似的特征; $I = E(I)$ 为无空间自相关, 表示空间格局是随机形成的; $I < E(I)$ 为负空间自相关, 表示相邻空间具有不同的属性。当 $|I| > 0.3$ 时, 研究变量具有显著的空间自相关^[20], 显著的正空间自相关代表聚集性分布, 显著的负空间自相关代表均匀性分布^[24]。

变异函数和 Moran's I 指数的计算均在 GS + (Geostatistics for the Environmental Sciences) 环境科学的统计软件中进行。

2 结果与分析

2.1 林冠开度的分布特征

从表 1 可看出, 2008 到 2010 年间林冠开度的平均值、最大值以及最大值和最小值的差值在逐渐减小, 表明样地林冠空隙的总体面积在逐年缩小; 标准差和变异系数都随着年份的增加而降低, 说明林冠开度的离散程度越来越低, 变异程度越来越小, 平均值的代表性越来越高。从两两对比看, 2009 和 2010 年的平均值、标准差、变异系数、最小值、最大值以及最大值和最小值的差值都相对较为接近, 表示 2008 和 2009 年间样地林冠开度变化幅度较大, 2009 和 2010 年间样地林冠开度的变化幅度较小。2010 年偏度值最接近 0, 表示该年样地林冠开度的

分布最接近正态分布,最能体现自然分布的状况。2008 年峰度值最小,表示该年样地林冠开度的分布最平缓。

2008 年样地林冠开度在 12.77%~33.20% 的范围内变动,56% 的样方林冠开度在 15.04%~17.31% 之间;2009 年的变动范围为 12.01%~24.39%,62% 的样方林冠开度在 14.76%~16.14% 之间;2010 年为 11.02%~20.09%,54% 的样方林冠开度在 14.04%~15.05% 之间(图 1)。随着年份的增加样地林冠开度的变动范围不仅在逐渐缩小,而且还有往林冠开度较小的方向发展的趋势。三年样地林冠开度都被分为 10 组,2008 年每级相差 2.27%,2009 年 1.38%,2010 年 1.01% (图 1)。每级相差的数值在逐年降低,这反映了样

方间林冠开度的差距在逐年缩小,其中 2009 和 2010 相差较小。

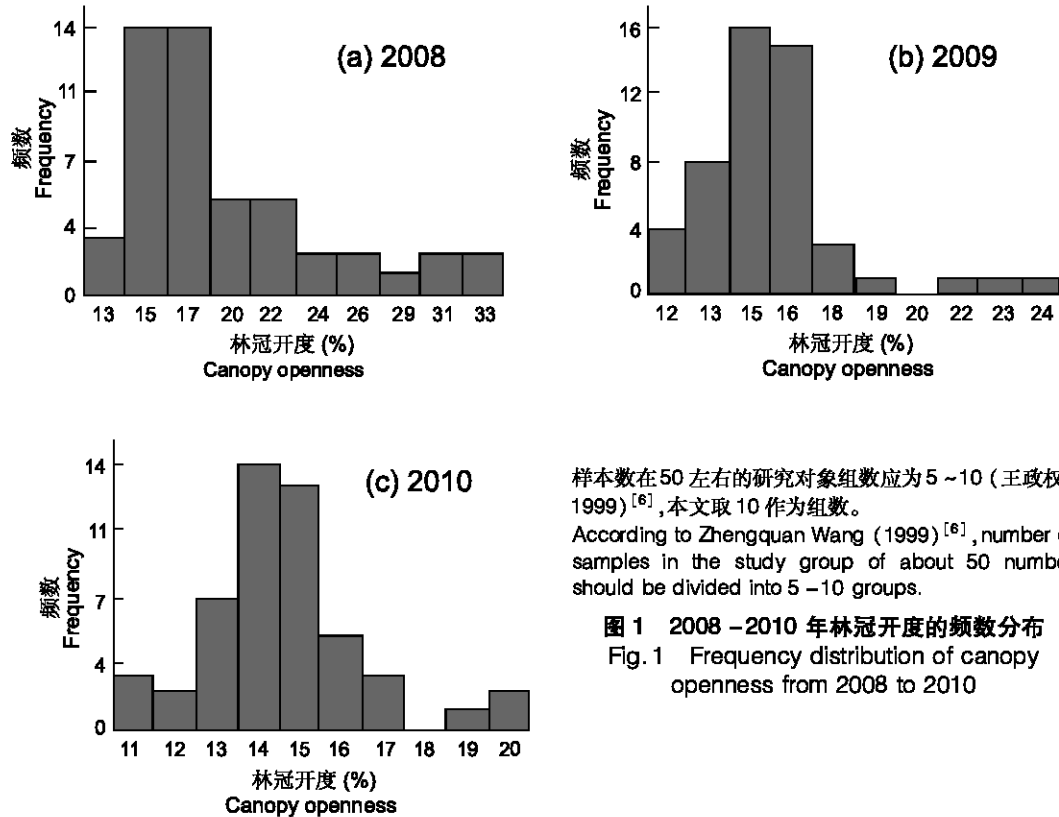
2.2 林冠开度的空间异质性

半方差函数曲线表明,2008 年样地林冠开度的空间变异程度远高于 2009 和 2010 年(图 2)。2008 年的半方差函数最符合线性模型(表 2),在本研究中也属于纯块金效应模型;2009 和 2010 年则为球状模型(表 2),这表明 2009 和 2010 年变异函数曲线的相似性较大。从 2008 到 2010 年,拟合模型的决定系数越来越大(表 2),说明理论模型与实际半方差函数拟合得越来越好;基台值越来越小,表示样地林冠开度总的空间异质性越来越小。

2008 年样地林冠开度的空间变异 100% 都是由随机部分造成的(表 2),说明该年样地林冠开度

表 1 2008–2010 年林冠开度的统计特征数
Table 1 Statistical characteristics of canopy openness from 2008 to 2010

年份 Year	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient	最小值 Minimum	最大值 Maximum	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
2008	19.13	5.10	0.27	12.77	33.20	1.34	0.99
2009	15.54	2.46	0.16	12.01	24.39	1.84	4.27
2010	14.60	1.87	0.13	11.02	20.09	0.82	1.22



样本数在 50 左右的研究对象组数应为 5~10 (王政权, 1999)^[6], 本文取 10 作为组数。According to Zhengquan Wang (1999)^[6], number of samples in the study group of about 50 number should be divided into 5–10 groups.

图 1 2008–2010 年林冠开度的频数分布
Fig. 1 Frequency distribution of canopy openness from 2008 to 2010

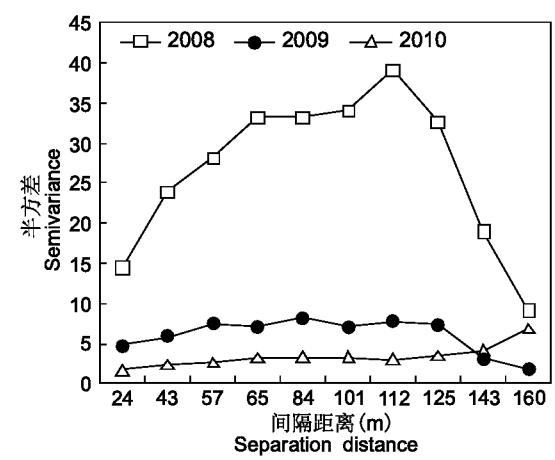


图2 2008-2010年林冠开度半方差图
Fig. 2 Semivariogram of canopy openness from 2008 to 2010

的空间异质性与空间变化无关。2009年样地林冠开度的空间变异中,34.9%是由随机部分引起的,体现在20 m以下的小尺度上;60.6%是由结构原因引起的,体现在20~52.2 m之间的中尺度上。2010年样地林冠开度的空间变异中,13.1%是由随机部分引起的,体现在20 m以下的小尺度上;86.9%是由结构原因造成的,体现在20~404 m的中尺度上。说明从2008到2010年样地林冠开度由随机部分所引起的空间变异在减少,由空间自相关所引起的空间变异在增多。从分维数来看,2008年样地林冠开度的空间格局最强,2009年的次之,2010年的最弱;随机部分所引起的林冠开度空间变异逐年减小。

从东北-西南(45°)和西北-东南(135°)两个方向上变异函数的比值来看,各年样地林冠开度的空间异质性都具有各向异性的特征(图3)。2008年,57~100 m范围内 $K(h)$ 接近1,说明在这段间隔距离中林冠开度的空间变异是各向同性的;其他间隔距离 $K(h) < 1$,林冠开度的空间变异表现为各向异性(图3)。2009年,林冠开度空间异质性除了在间隔距离88 m和155 m附近表现为各向同性以外,

在其它的间隔距离中都表现为各向异性;其中林冠开度的空间变异在100 m和143 m附近东北-西南方向上的变异远远大于西北-东南方向上的变异,有很强的各向异性(图3)。2010年,在155 m范围内 $K(h) < 1$,样地林冠开度的空间变异具有各向异性,在东北-西南方向上的变异小于西北-东南方向上的变异(图3)。

2.3 林冠开度的空间自相关

由于变异函数分析表明2008年样地林冠开度的空间变异与空间自相关无关,因此不对它做空间自相关的分析。以下讨论的空间相关距离均结合两年林冠开度的自相关范围,即20 m到各自的变程。

两年的间隔距离在20~42.99 m之间,Moran's I大于期望值(-0.020),林冠开度的变异为空间正相关,说明相邻空间的林冠开度相似,这种相似的特征会随间隔距离的增加而减弱,2010年的相关性比2009年强;2010年间隔距离在125.25~142.63 m之间,Moran's I大于期望值,林冠开度的变异为空间正相关,说明相邻空间的林冠开度相似,这种相似的特征会随间隔距离的增加而增加;2009年间隔距离在52 m附近,2010年间隔距离在56.57 m和111.7 m附近,Moran's I接近期望值,林冠开度的变异无空间相关性;2010年间隔距离在65.41 m和100.81 m之间及159.86 m附近,Moran's I小于期望值,林冠开度为空间负相关,说明相邻空间的林冠开度不同(图4)。Moran's I由空间正相关过渡到负相关反映了林冠开度由相邻相似的空间结构向相邻相异的空间结构过渡,这些间隔距离之间会出现林冠开度随机形成的格局。

3 讨论

3.1 冠层结构空间变化

冰灾使森林林冠空隙的数量和面积增加,直接体现在林冠开度上,因此冰灾发生当年样地林冠开

表2 2008-2010年林冠开度的半方差函数模型参数
Table 2 Parameter of semivariogram model for canopy openness from 2008 to 2010

年份 Year	模型 Model	r^2	C_0	$C_0 + C$	a	$C_0 / (C_0 + C)$	D
2008	线性 Linear	0.009	26.707	26.707	159.855	1.000	1.985
2009	球状 Spherical	0.039	2.170	6.220	52.200	0.349	1.875
2010	球状 Spherical	0.701	1.070	8.149	404.000	0.131	1.729

注： r^2 -决定系数； C_0 -块金值； $(C_0 + C)$ -基台值； a -变程； D -分维数。
Notes: r^2 -Coefficient of determination; C_0 -Nugget; $(C_0 + C)$ -Sill; a -Range; D -Fractal dimension.

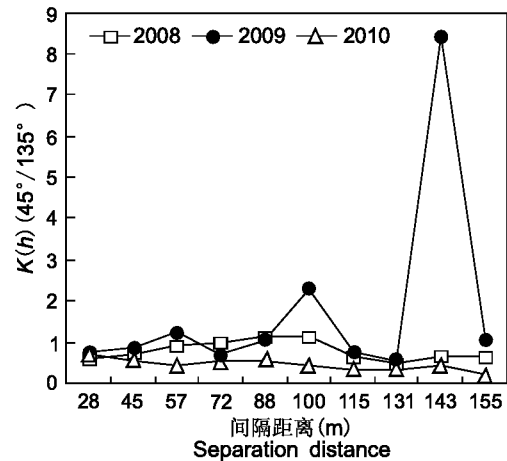


图 3 2008 – 2010 年林冠开度在两个方向上的各向异性比较
Fig.3 Anisotropic ratio of canopy openness at two directions from 2008 to 2010

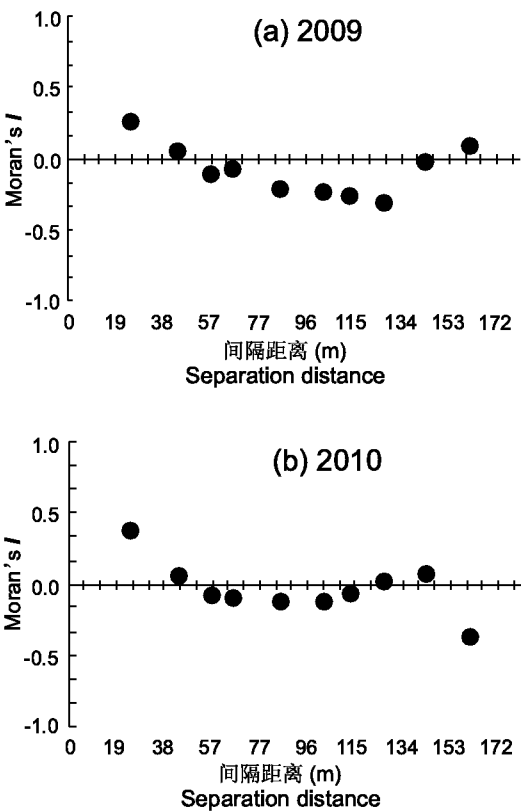


图 4 2009 和 2010 年冠层开度空间自相关
Fig.4 Spatial autocorrelation of canopy openness in 2009 and 2010

度很大。灾后森林恢复初期样地林冠开度的总体面积在逐年缩小,森林郁闭度越来越高。从 2008 到 2010 年林冠开度的分布范围越来越集中,样方间林冠开度的差距也在缩小,说明森林冠层结构的空

间变异在慢慢降低。灾后一年内(2008 – 2009 年)样地林冠开度总体水平迅速减小,随后一年内(2009 – 2010 年)样地林冠开度的减小幅度较往年同期小。这是由于没受灾或受灾较轻的乔木在灾后会不断扩展其枝叶或重新生长,逐渐填补在冰灾中被打开的林冠空隙或原来没被利用上的生存空间,森林冠层结构会慢慢恢复到灾前的水平^[13],且越来越接近正态分布,体现出自然分布的状况。

3.2 空间变异的特点

从 2008 到 2010 年样地林冠开度的空间变异越来越小,2008 年样地林冠开度的空间变异远高于 2009 和 2010 年。2008 年样地林冠开度的空间变异完全是由随机因素引起的;2009 年结构性因素对样地林冠开度空间变异的影响比随机因素大;2010 年样地林冠开度的结构比为 86.9%, Cambardella 等^[25]研究认为当系统结构比 >75% 时,系统具有强烈的空间相关性,说明该年样地林冠结构具有强烈的空间相关性。冰灾发生当年样地林冠结构存在很大的空间异质性,这是由冰灾破坏所引起的。随着灾后森林的恢复,冰灾对森林的影响也逐年减小,林冠结构的空

3.3 空间格局的尺度

2010 年样地林冠结构空间变异的自相关范围远远大于 2009 年。在两年共同的自相关范围(20 ~ 52.2 m)内林冠开度的空间变异情况相似,即森林冠层由相邻相似逐渐减弱的空间结构向相邻相异的空间结构过渡。2010 年在 52.2 ~ 159.86 m 的空间自相关范围中,森林冠层由相邻相异逐渐减弱的空间结构向相邻相似逐渐增强的空间结构发展,再由相邻相似逐渐减弱的空间结构过渡到相邻相异逐渐增强的空间结构。这些过渡距离之间会出现冠层结构与空间无关且随机形成的格局。

致谢:项目野外考察中得到了华南农业大学林学院李镇魁副教授、柯炳氨、孙东等研究生的参与以及车八岭国家

级自然保护区管理局的支持,特此致谢!

参考文献:

- [1] 李哈滨,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.
- [2] Li H, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity[J]. *Oikos*, 1995, 73(2): 280-284.
- [3] Krummel J P, Gardner R H, Sugihara G, Sugihara G, O'Neill R V, Coleman P R. Landscape patterns in a disturbed environment[J]. *Oikos*, 1987, 48: 321-324.
- [4] Robertson G P, Huston M A, Evans F C, Tiedje J M. Spatial variability in a successional plant community: patterns of nitrogen availability[J]. *Ecology*, 1988, 69: 1517-1524.
- [5] Pickett S T A, Canham C D. Landscape ecology, spatial heterogeneity in ecological system[J]. *Science*, 1995, 269(21): 331-334.
- [6] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 8-98.
- [7] Bragg D C, Shelton M G, Zeide B. Impacts and management implications of ice storms on forests in the southern United States[J]. *Forest Ecol Manag*, 2003, 186: 99-123.
- [8] Brommit A G, Charbonneau N, Contreras T A, Fahrig L. Crown loss and subsequent branch sprouting of forest trees in response to a major ice storm[J]. *J Torrey Bot Soc*, 2004, 13: 169-176.
- [9] 谭辉, 朱教君, 康宏樟, 胡理乐. 林窗干扰研究[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 587-594.
- [10] 祝列克. 特大雨雪灾害对林业的影响及恢复重建思路[J]. 林业经济, 2008, 3: 3-7.
- [11] 苏志尧, 刘刚, 区余端, 戴朝晖, 李镇魁. 车八岭山地常绿阔叶林冰灾后林木受损的生态学评估[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 213-222.
- [12] Hubbell S P, Foster R B, O'Brian S T, Harms K E, Condit R, Wechsler B, Wright S J, Loo de Lao S. Light gap disturbance, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest[J]. *Science*, 1999, 283: 554-557.
- [13] Irland L C. Ice storms and forest impacts[J]. *Sci Total Environ*, 2000, 262: 231-242.
- [14] 方升佐, 徐锡增, 吕士行, 唐罗忠, 曹福亮. 中短轮伐期杨树纸浆林 LAI 及生物生产力的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(3)B: 225-230.
- [15] Ozanne C M P, Anhuf D, Boulter S L, Keller M, Kitching R L, Korner C, Meinzer F C, Mitchell A W, Nakashizuka T, Dias S, Stork N E, Wright S J, Yoshimura M. Biodiversity meets the atmosphere: A global view of forest canopies[J]. *Science*, 2003, 301: 183-186.
- [16] 郭明春, 于澎涛, 王彦辉, 沈振西, 时忠杰, 杜阿朋, 何常清. 林冠截持降雨模型的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1633-1633.
- [17] 杨弘, 李忠, 裴铁璠, 王安志, 金昌杰, 朱教君. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水分物理性质[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 272-276.
- [18] 徐燕千. 车八岭国家级自然保护区调查研究综合报告[C]//徐燕千主编. 车八岭国家级自然保护区调查研究论文集. 广州: 广东科技出版社, 1993: 1-8.
- [19] Frazer G W, Canham C D, Lertzman K P. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation[CP]. Millbrook, New York: Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia and the Institute of Ecosystem Studies, 1999.
- [20] Jung W K, Kitchen N R, Sudduth K A, Anderson S H. Spatial characteristics of claypan soil properties in an agricultural field[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70(4): 1387-1397.
- [21] Liu D W, Wang Z M, Zhang B, Song K S, Li X Y, Li J P, Li F, Duan H T. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in crop lands of the black soil region, Northeast China[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2006, 113: 73-81.
- [22] Zhao Y, Peth S, Krümmelbein J, Horn R, Wang Z Y, Steffens M, Hoffmann C, Peng X H. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland[J]. *Ecol Model*, 2007, 205: 241-254.
- [23] Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation[M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [24] 张春雨, 赵秀海, 夏富才. 长白山次生林树种空间分布及环境解释[J]. 林业科学, 2008, 44(8): 1-8.
- [25] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Konopka A E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1994, 58: 1501-1511.

(责任编辑: 王豫鄂)