

特大冰冻干扰后大明山常绿阔叶林冠层结构空间异质性动态*

Spatial Heterogeneity Dynamics of Canopy Structure in Evergreen Broadleaved Forest after a Severe Ice Storm Disturbance in Damingshan, Southern China

温远光^{1,2,3}, 卢文科¹, 周晓果^{1**}, 朱宏光^{1,2,3}, 李晓琼^{1,2,3}, 王磊^{1,2,3}

WEN Yuanguang^{1,2,3}, LU Wenke¹, ZHOU Xiaoguo¹, ZHU Hongguang^{1,2,3}, LI Xiaoqiong^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2,3}

(1. 广西大学林学院, 广西森林生态与保育重点实验室培育基地, 广西南宁 530004; 2. 广西大学林学院, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 广西凭祥 532600)

(1. Breeding Base of Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi, 532600, China)

摘要:【目的】揭示大明山常绿阔叶林灾后恢复中冠层结构的空变化规律及空间异质性动态, 为监测灾后受损森林生态系统的恢复能力及灾后管理提供理论依据。【方法】对 2008 年特大冰冻干扰后大明山常绿阔叶林的林冠结构进行了连续 4 年的监测, 采用半变异函数和 Moran's I 指数对其林冠开度(Canopy openness, CO)和叶面积指数(Leaf area index, LAI)进行空间异质性和空间自相关性分析。【结果】冰冻干扰后 4 年间, 大明山常绿阔叶林林冠开度的均值先减小后微弱增加, 叶面积指数的均值先增加后微弱减小, 2011 年林冠开度最小、叶面积指数最大。半变异函数的指数模型和球状模型可较好地描述各年度样地林冠开度和叶面积指数的空间异质性。2011 年和 2012 年林冠开度的空间变异程度大幅增加, 结构性因素引起的空间变异大于随机因素; 2010 年叶面积指数的空间异质性大幅度增加, 但随后两年其空间异质性大幅度降低并趋于稳定, 空间异质性尺度较小且主要由结构性因素引起。【结论】在灾后恢复的第 3~4 年间, 大明山常绿阔叶林冠层结构已有较大恢复, 但恢复程度在空间上的变异极大。随着恢复演替的进行, 大明山常绿阔叶林林冠结构在空间上向着越来越不均匀的方向发展, 而叶面积指数则逐渐趋于稳定。

关键词:常绿阔叶林 林冠结构 林冠开度 叶面积指数 空间异质性

中图分类号: S718.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2017)02-0150-09

Abstract:【Objective】The objective of this study was to reveal the dynamics of spatial change and heterogeneity of canopy structure after an ice storm disturbance in evergreen broadleaved forest in Damingshan. 【Methods】The spatial heterogeneity dynamics of canopy structure were suc-

收稿日期: 2016-10-24

作者简介: 温远光(1957—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事森林生态和森林培育学研究, E-mail: lxywenyg@163.com.

* 国家自然科学基金项目(31460121, 39460022, 30860059), 国家科技支撑计划项目(2011BAC09B02, 2012BAD22B01)和广西重大专项计划项目(1222005)资助。

** 通信作者: 周晓果(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事森林生态学研究, E-mail: xgzhou2014@126.com.

cessively investigated in evergreen broadleaved forest in Damingshan from 2008 to 2012 after a severe ice storm disturbance. Semivariogram function and Moran's I index were employed to analyze the spatial heterogeneity and autocorrelation of canopy openness (CO) and leaf area index (LAI). **【Results】** During the 4 years after the ice storm disturbance, canopy openness showed an initial decrease and a subsequent slightly increase, while LAI showed an initial increase and a subsequent slightly decrease. Canopy openness decreased to the lowest and LAI increased to the highest in 2011. Geostatistical analysis indicated that the semivariogram function of canopy openness fitted with exponent (from 2009 to 2011) and spherical (2012) models which demonstrated structure factors with high spatial autocorrelation at middle scale. The degrees of spatial variation of canopy openness significantly increased in 2011 and 2012 compared with that in 2009 and 2010. The semivariogram function of LAI fitted with spherical (2009 and 2010) and exponent (2011 and 2012) models which also significantly demonstrated structure factors with high spatial autocorrelation at small scale. The degrees of spatial variation of LAI markedly increased in 2010, but gradually decreased and plateaued thereafter. **【Conclusion】** The canopy structure of this evergreen broadleaved forest had recovered to some extent during the third to the fourth years after disturbance. However the recover degree exhibited great spatial heterogeneity. Consequently, the spatial distribution of canopy structure of the evergreen broadleaved forest in Damingshan could become more and more heterogeneous while LAI could tend to stabilize with the development of the restoring succession.

Key words: evergreen broadleaved forest, canopy structure, canopy openness, leaf area index, spatial heterogeneity

0 引言

【研究意义】冠层结构是森林生态系统的主要组成部分,影响着森林生态系统的微气候、养分循环、分解过程、碳固持和生物多样性。因林冠主要由冠层乔木的枝叶和林内空隙构成,其结构可由叶面积指数(Leaf area index, LAI)和林冠开度(Canopy openness, CO)来度量^[1-4]。LAI 为单位地表面积上的总叶表面积的一半^[5],是模拟许多重要的生态学过程如冠层光合作用及蒸散等的重要参数之一,也是决定冠层结构的重要指标,影响林木及冠层生物的生长^[6-7]。林冠开度或称孔隙度,是与冠层覆盖度互补的参数^[8-9]。冠层开度与林下光照直接相关,进而影响林下植物的生长和更新^[10]。森林生态系统是一个动态的空间异质体^[11],其异质性主要源于系统特性(System property, 如植物生物量、土壤养分、温度、地形等)所具有的复杂性(Complexity)及变异性(Variability)^[12]。复杂性是系统特性的定性或属性描述,表现在其组成与结构上;而变异性是系统特性的定量描述,指其包括各项特性的趋势、自相关及各向异性。森林冠层的空间异质性是林下光照环境差异的主要来源,在决定林下植被更新、组成及生产力中起着重要作用^[13-14]。**【前人研究进展】**2008年初发生在我国南方的特大雨雪冰冻干扰使广西大明山地区的常绿阔叶林遭受了严重破坏,受地形因素的影响,森林

冠层形成大量大小不一、分布不均的林隙,引起林冠结构的动态变化,大大增加了其空间异质性^[15-17]。

【本研究切入点】在灾后恢复的过程中,林隙或将因林木更新或枝叶扩展而逐渐闭合,也可能再次遭受自然干扰或病虫害而不断扩大,使得林冠结构的动态变化处在不断的动态变化之中。因此研究特大冰冻干扰后冠层结构参数的空间异质性动态对评价森林的抗干扰能力和恢复能力具有重要意义。**【拟解决的关键问题】**以广西大明山国家级自然保护区常绿阔叶林为对象,对2008年特大冰冻灾害后常绿阔叶林的林冠结构及动态变化特征进行了连续4年的监测,采用地统计学中的半变异函数和 Moran's I 指数对常绿阔叶林的林冠开度和 LAI 进行空间异质性分析,确定其空间异质性程度及变化尺度,揭示灾后恢复中冠层结构的动态变化规律及空间异质性动态,为监测灾后受损森林生态系统的恢复能力及灾后管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大明山国家级自然保护区位于广西中南部,地理坐标为 $23^{\circ}10' \sim 23^{\circ}38'N$, $108^{\circ}18' \sim 108^{\circ}45'E$,区内保存了较为完好的原生性森林,山地常绿阔叶林为其典型地带性植被,共有维管植物 234 科 918 属 2 374 种^[18]。本地区为北热带与南亚热带的分界,属南亚

热带季风气候区。年平均温度 15.1℃, 最高温度 28.6℃, 最低温度 -6.0℃; 日均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温为 5 047.7℃; 年平均降水量 2 630.3 mm^[19]。

1.2 数据采集

2009 年 5 月, 在广西大明山海拔 934~1 223 m、坡度 30~35° 的中山区选取一个斜坡水平长 200 m、宽 160 m 的典型坡面, 采用全站仪将坡面连续划分为 80 个 20 m×20 m 的样方, 再把每个样方划分成 4 个 10 m×10 m 和 16 个 5 m×5 m 的小样方, 在各 20 m×20 m 样方的 4 个角及中心点用 PVC 管作永久标记, 并标明样方号及相应的坐标。于 2009 年—2012 年生长季, 以 5 m×5 m 的小样方为基本调查单元, 对每个胸径 ≥ 1.0 cm 的木本植物挂铝牌标记, 记录树木的编号、物种名、坐标、胸径、树高、枝下高、冠幅等信息。同时采用 CI-110 型数字植物冠层图象分析仪(CID Inc., Camas, Washington, USA)在每个样方中心处采集冠层影像。采用冠层分析仪自带的冠层分析软件对冠层影像进行分析, 计算每个样方的叶面积指数(LAI)。

本研究样方的林冠开度 $\text{CO} = 100\% - (\text{CCA}/400) \times 100\%$, 式中 CCA 为林木树冠总覆盖面积。在 Arcgis10.0 中以林木坐标所在的点为中心点绘制林木树冠垂直投影面积的空间分布图, 在每个 20 m×20 m 样方中去除相互重叠的树冠覆盖部分, 获得每个样方林木树冠的总覆盖面积。

1.3 统计分析

采用地统计学中的半变异函数和 Moran's *I* 指数对 2009 年—2012 年样地林冠开度和叶面积指数的空间异质性和空间自相关性进行分析。

1.3.1 半变异函数

根据 Matheron^[20] 对半变异函数的定义, 若区域化变量满足本证假设, 则:

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

式中 $\gamma(h)$ 为半变异函数, $N(h)$ 为间隔距离为 h 时的采样点对数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为研究变量 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的值。

半变异函数模型中有 3 个重要参数, 即变程 (Range, a)、块金值 (Nugget, C_0) 及基台值 (Sill, $C_0 + C$)。变程为使半变异函数达到平稳时的空间距离, 是度量空间相关性的最大距离, 当 $h \geq a$, 则变量 Z 的空间相关性消失。块金值是不能被模型中参数解释的随机变量, 主要为变量在远小于抽样尺度上存在的差异或测量误差。基台值表示变量在系统中的最大变异, 其值越大总的空间异质性越高。 C_0/C

($C_0 + C$) 为随机部分引起的空间异质性。 $C/(C_0 + C)$ 为结构比, 其值越大表明空间自相关越强。

研究变量的空间异质性还与方向有关。各向异性比 $K(h)$ 可描述研究变量空间异质性的方向性:

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

式中 $\gamma(h, \theta_1)$ 和 $\gamma(h, \theta_2)$ 分别为方向 θ_1 和 θ_2 上的半变异函数。若 $K(h)$ 等于或接近 1, 则研究变量的空间异质性为各向同性, 否则为各向异性。 $K(h)$ 越高表示空间异质性越高。

1.3.2 Moran's *I* 指数

Moran's *I* 指数可度量研究变量的空间自相关性^[21]:

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j W_{ij} Z_i Z_j}{\sum_{i=1}^n Z_i^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}},$$

式中 W_{ij} 为研究范围内空间单元 i 与 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。

空间分布零假设中, I 的期望值 $E(I) = -1/(n-1)$, 当样本足够多时 $E(I)$ 接近于 0。 $I > E(I)$ 时为正空间自相关, 表示相邻空间具有相似的属性; $I = E(I)$ 时为无空间自相关, 表示空间格局是随机形成的; $I < E(I)$ 时为负空间自相关, 表示相邻空间具有不同的特征。当 $|I| > 0.3$ 时, 研究变量具有显著的空间自相关, 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^[22-23]。

1.4 数据处理与分析

半变异函数建模要求数据符合正态分布, 采用 R 3.2.3 的 shapiro.test() 函数^[24] 对数据进行正态检验, 对不符合正态分布的数据采用 Minitab17 进行 Box-Cox 转化使其符合正态分布。半变异函数和 Moran's *I* 指数的计算在 GS⁺ (Geostatistics for the Environment Sciences) 9.0 中进行。图形采用 Sigmaplot 11.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 林冠开度及叶面积指数的动态变化

冰冻干扰后, 2009 年到 2012 年间样地林冠开度的均值先减小后微弱增加, 2011 年和 2012 年的林冠开度均值显著小于 2009 年及 2010 年 (表 1)。从年度间的两两对比来看, 2009 年和 2010 年间林冠开度均值、标准差、最大值和最小值的变化均不大, 呈现缓慢降低的趋势。2010 年—2011 年间林冠开度的均值及最小值有较大幅度的降低。2011 年和 2012 年间林冠开度均值、标准差、最大值和最小值间的差值变化也不大, 呈现微弱增加的趋势。与 2009 年和 2010

年相比,2011年和2012年间林冠开度的变化范围增大,变异系数也随之增大,表明在灾后恢复的第3~4年间,林冠覆盖度虽有较大恢复,但恢复程度在空间上的变异极大。2009年到2012年间林冠开度的分布均为正偏,2009年偏度值最接近0,该年度样地林冠开度的分布最接近正态分布。2009年和2010年呈尖峰分布,2011年和2012年呈扁平分布。

冰冻干扰后,2009年到2012年间样地LAI的均值先增加后微弱减小,2011年样地LAI显著高于2009年(表1)。2011年样地LAI最大值和最小值间的差值及变异系数最大。2010年—2012年样地的LAI均不符合正态分布,需进行Box-Cox正态化转换。

2.2 林冠开度的空间分析

林冠开度的半变异函数拟合结果表明,指数模型

表1 2009年—2012年林冠开度及叶面积指数统计特征

Table 1 Statistical characteristics of canopy openness and LAI from 2009 to 2012

变量 Variable	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	p	p^*
CO	2009	46.45 ^b	12.93	0.28	19.30	77.11	0.07	-0.46	0.668	
	2010	44.90 ^b	12.80	0.29	19.04	76.94	0.19	-0.38	0.614	
	2011	33.08 ^a	13.62	0.41	6.71	78.19	0.72	0.88	0.039	0.962
	2012	35.98 ^a	14.40	0.40	5.87	82.07	0.54	0.14	0.805	
LAI	2009	1.88 ^a	0.41	0.22	1.06	2.93	0.091	-0.577	0.558	
	2010	1.93 ^{ab}	0.61	0.31	0.95	3.85	1.191	1.294	8.411e-06	0.083
	2011	2.15 ^b	0.86	0.40	1.30	6.04	2.749	8.883	2.282e-11	0.209
	2012	1.94 ^{ab}	0.49	0.25	1.09	3.12	0.557	-1.129	0.048	0.282

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$); p ,转换前正态检验概率值; p^* ,转换后正态检验概率值

Note:Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among treatments; p ,probability of normal distribution before transform; p^* ,probability of normal distribution after transform

表2 2009年—2012年林冠开度及叶面积指数的半变异函数模型参数

Table 2 Parameters of semivariogram models for canopy openness and LAI from 2009 to 2012

变量 Variable	年份 Year	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range (m)	结构比 $C/(C_0 + C)$ (%)	决定系数 R^2
CO	2009	指数 Exp.	0.391	0.993	90.0	60.6	0.914
	2010	指数 Exp.	0.120	0.975	61.8	87.7	0.887
	2011	指数 Exp.	0.488	1.783	183.6	72.6	0.955
	2012	球状 Sph.	0.740	1.592	100.0	53.0	0.881
LAI	2009	球状 Sph.	0.000 5	0.022 8	27.8	97.8	0.038
	2010	球状 Sph.	0.002 3	0.087 8	27.9	97.4	0.041
	2011	指数 Exp.	0.001 7	0.017 9	22.5	90.5	0.016
	2012	指数 Exp.	0.001 8	0.029 5	25.8	92.8	0.070

(2009年、2010年及2011年)和球状模型(2012年)可较好地描述各年度样地林冠开度的空间异质性,模型的决定系数为0.881~0.955(表2)。2009年及2010年样地林冠开度的空间变异程度均较低且相似,2011年和2012年的空间变异程度大大增加,2012年的变异略高于2011年(图1)。在灾后恢复的4年间,样地林冠开度由空间自相关引起的空间变异呈现先增加后降低的趋势,其中2010年样地林冠开度由空间自相关引起的空间变异达87.7%,各年结构比均超过50%,结构性因素引起的空间变异大于随机因素。而2012年由随机部分引起的空间变异高于灾后的第1年。各年度由随机部分引起的空间变异均体现在25 m以下的小尺度上。

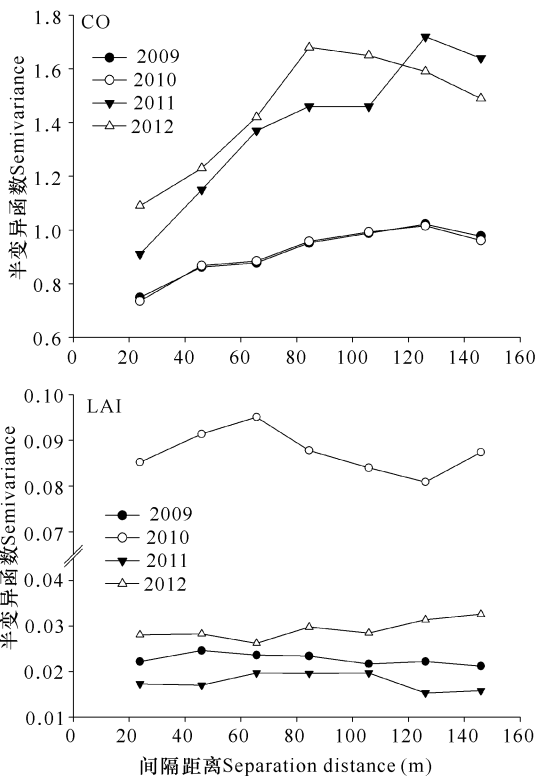


图1 2009年—2012年林冠开度及叶面积指数的半变异函数
Fig. 1 Semivariance of canopy openness and LAI from 2009 to 2012

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,各年度样地林冠开度的空间异质性均具有各向异性的特征(图2)。2009年和2010年,各间隔距离 $K(h) < 1$,东北-西南方向上的变异小于西北-东南方向。2011年,65~97 m及119~134 m范围内 $K(h) > 1$ 表现为东北-西南方向上的变异大于西北-东南方向,其余间隔距离中都为东北-西南方向上的变异小于西北-东南方向。2012年,在100 m范围内 $K(h) < 1$,东北-西南方向上的变异小于西北-东南方向;大于100 m的尺度上,东北-西南方向上的变异大于西北-东南方向。由此可见,2011年林冠开度不同尺度的各向异性最为复杂。

2009年及2010年由空间自相关引起的林冠开度变异范围依次为25~90.0 m及25~61.8 m,在此范围内,两年间的Moran's I 指数的变化趋势一致,林冠开度的变异为空间负相关,表现为相邻空间的林冠开度不同(图3)。2011年,林冠开度空间自相关的变程范围较大,为25~183.6 m,在25~46 m范围内,Moran's I 指数为空间正相关,46~120 m范围为负相关,之后又过渡为正相关,反映了林冠开度不同尺度上空间结构的复杂性。2012年,林冠开度空间自相关的变程范围为20~100 m,在此范围内,Mo-

ran's I 大于65 m时由空间正相关过渡为负相关,表明林冠开度由相邻相似的空间结构转变为了相邻相异的空間结构。

以上空间分析的结果说明灾后4年,干扰对林冠开度仍有较大影响,冠幅受光照、坡位的影响,其开展方向很不一致,林冠结构向着越来越不均匀的方向发展。

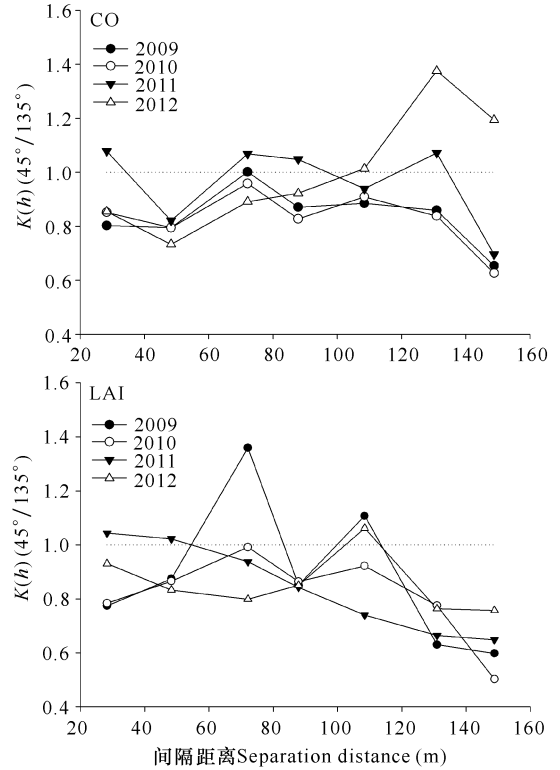


图2 2009年—2012年林冠开度及叶面积指数的各向异性比

Fig. 2 Anisotropic ratio of canopy openness and LAI from 2009 to 2012

2.3 LAI的空间分析

LAI拟合的最佳半变异函数模型为球状模型(2009年及2010年)及指数模型(2011年及2012年),各年度模型的决定系数为0.016~0.070(表2)。2010年样地LAI的空间变异程度最高,其余年度的空间变异程度均较低且表现为2012年>2009年>2011年(图1)。在灾后恢复的4年间,样地LAI的结构比为90.5%~97.8%,表明其空间变异主要由结构性因素引起。LAI半变异函数的变程均接近或稍大于本研究设定的采样距离20 m,表明该采样距离能够满足空间分析的研究需要。

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,各年度样地LAI的空间异质性均具有各向异性的特征(图2)。2010年各间隔距离 $K(h) < 1$,东北-西南方向上的变异小于西北-

东南方向。2009年 55~80 m 及 100~115 m 范围内,2011年 20~40 m 范围内,2012年 100~120 m 范围内, $K(h) > 1$,表现为东北-西南方向上的变异大于西北-东南方向,其余间隔距离中都为东北-西南方向上的变异小于西北-东南方向。

LAI的半变异函数模型显示,各年度模型的变程为 22.5~27.9 m,表明其具有强烈的空间自相关的

尺度较小,在变程范围内 4 年度的 LAI 空间自相关均表现为正相关,表明在小尺度范围内相邻空间具有相似的属性(图 4)。

由以上分析可知,灾后第 2 年(2010 年)LAI 的空间异质性大幅度增加,随后两年 LAI 的空间异质性却大幅度降低,各向异性也降低。这表明随着恢复演替的进行,LAI 在空间上的变化逐渐趋于稳定。

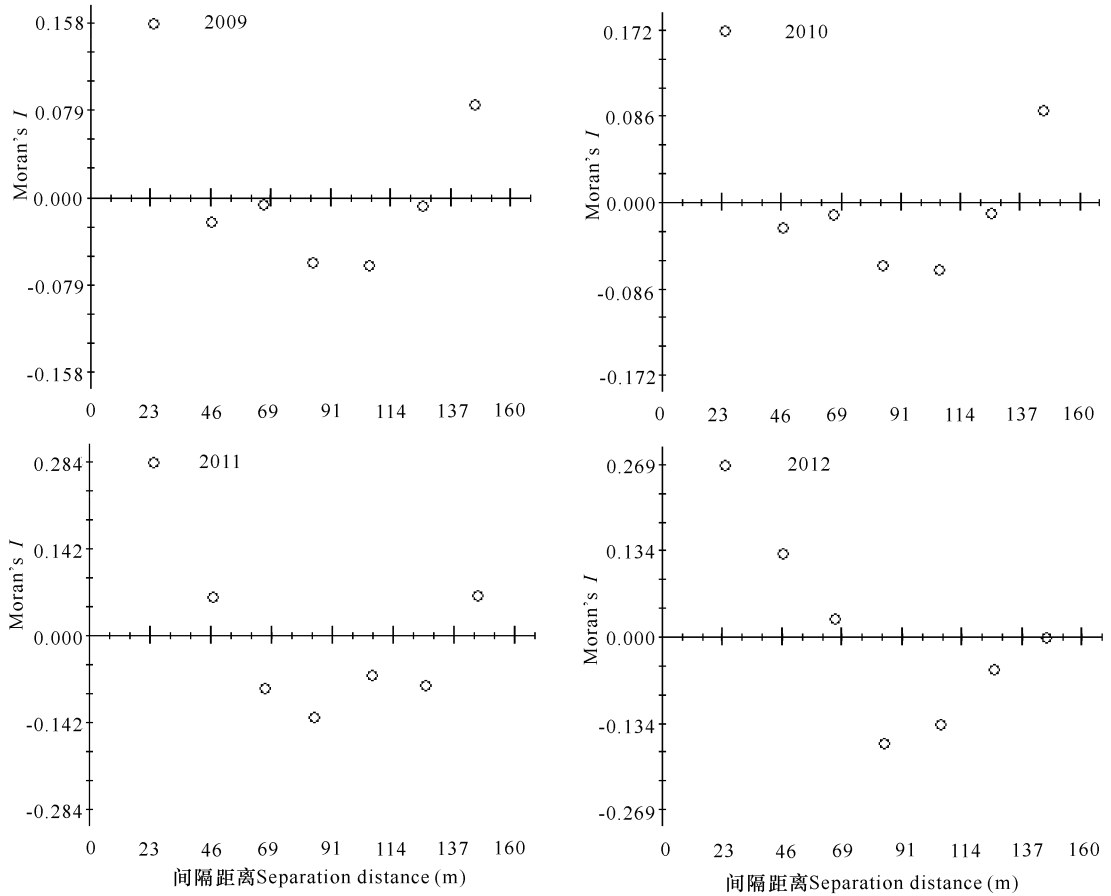


图 3 2009 年—2012 年林冠开度的空间自相关

Fig. 3 Spatial autocorrelation of canopy openness from 2009 to 2012

3 讨论

2008 年特大冰冻灾害使大明山常绿阔叶林不同坡位林木的树冠遭受不同程度的损伤,灾后两年林冠开度仍然很大,2010 年的林冠开度较 2009 年仅有小幅度降低、LAI 也仅小幅上升,这可能与 2009 年春西南持续干旱致使林木生长缓慢、树冠恢复较慢有关。在灾后恢复的第 3 年,随着恢复时间的延长,林冠开度大幅度降低,LAI 随之有明显升高。而随后 1 年,林冠开度略有增加、LAI 降低,这可能与 2012 年春季大明山常绿阔叶林又再次遭受较强的冰冻干扰致使部分林木受损有关。从林冠开度与 LAI 的分布来看,2011 年两个参数的分布范围最大、变异系数最高,偏离正态分布,表明 2010 年—2011 年,样地中不

同空间林木树冠的恢复状况不同。这与区余端和苏志尧^[15]对粤北山地常绿阔叶林灾后林冠开度变化的监测结果不同,这可能与不同地区的地形因素、土壤因素、林木不同树种抗干扰能力、林木受损及恢复状况等不同有关^[25-29]。

本研究发现,受损的大明山山地常绿阔叶林在灾后已有很程度的恢复,但由于山地常绿阔叶林时常遭受各种自然干扰,其林冠结构的异质性总是在不断变化之中。2011 年和 2012 年,林冠开度的空间变异远高于灾后的前两年;2011 年林冠开度不同尺度的各向异性最为复杂,2012 年林冠开度的各向异性也高于灾后的前两年;2011 年及 2012 年林冠开度空间自相关的变程范围也较灾后前两年大,出现林冠结构由相邻相似向相邻相异的空间结构转变。灾

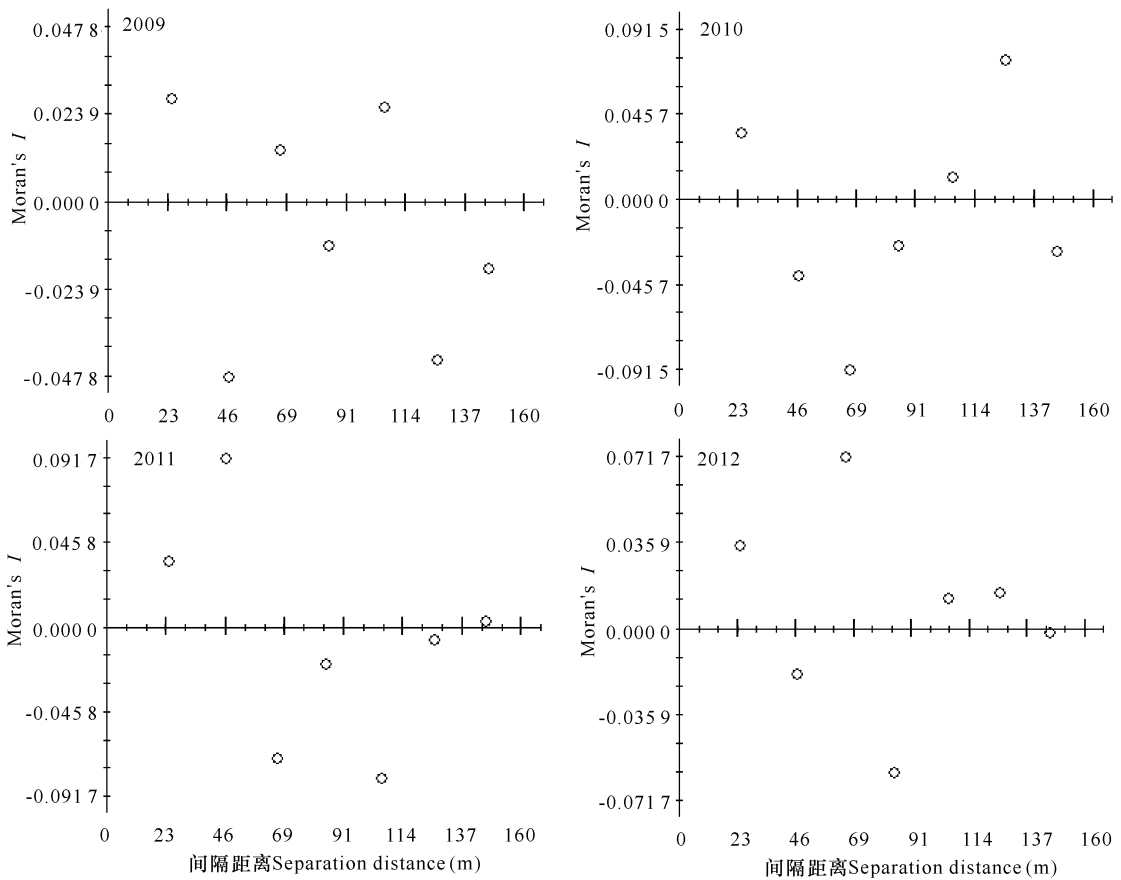


图4 2009年—2012年叶面积指数的空间自相关

Fig. 4 Spatial autocorrelation of LAI from 2009 to 2012

后林冠开度的动态变化决定着林下光照数量和质量的变化,影响林下植被的更新、恢复和演替^[17,30-31]。灾后大明山常绿阔叶林林冠开度空间异质性的增加将有利于林下植被的更新及恢复,促进其演替。

本研究对 LAI 的空间分析发现,各年度半变异函数模型的结构比均大于 90%,表明 LAI 的空间异质性主要由结构性因素引起,这与一些学者的研究结果一致^[16,32]。值得注意的是,大明山常绿阔叶林 LAI 的变程(22.5~27.9 m)较小,可能是受植被和样地小尺度范围内的地形条件影响所致^[33]。今后在 LAI 的空间分析中,可增加 LAI 与小样方小尺度范围内地形因子的关系分析,揭示 LAI 与地形因子的关系。

4 结论

冰冻干扰后,2009年到2012年间大明山常绿阔叶林林冠开度的均值先减小后微弱增加,LAI的均值先增加后微弱减小,2011年林冠开度最小、LAI最大。2011年和2012年林冠开度的空间变异程度较之2009年及2010年有大幅增加,各年间结构性因素引起的空间变异大于随机因素;灾后第2年 LAI 的

空间异质性大幅度增加,但随后两年其空间异质性大幅度降低并趋于稳定,LAI的空间异质性尺度较小且主要由结构性因素引起。在灾后恢复的第3~4年间,大明山常绿阔叶林冠层结构已有较大恢复,但恢复程度在空间上的变异极大。随着恢复演替的进行,林冠结构向着越来越不均匀的方向发展,而 LAI 在空间上的变化逐渐趋于稳定。

参考文献:

- [1] FRAZER G W, TROFYMOW J A, LERTZMAN K P. Canopy openness and leaf area in chronosequences of coastal temperate rainforests[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(2): 239-256.
- [2] 李根柱, 王贺新, 朱教君. 辽东次生林区主要阔叶林型叶面积指数季节动态[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2049-2055.
- LI G Z, WANG H X, ZHU J J. Seasonal dynamics of leaf area index of main broadleaf forest types in eastern Liaoning secondary forest zone[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(12): 2049-2055.
- [3] WOODGATE W, JONES S D, SUAREZ L, et al. Understanding the variability in ground-based methods for retrieving canopy openness, gap fraction, and leaf area in-

- dex in diverse forest systems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 205: 83-95.
- [4] SASAKI T, IMANISHI J, IOKI K, et al. Estimation of leaf area index and gap fraction in two broad-leaved forests by using small-footprint airborne LiDAR[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2016, 12(1): 117-127.
- [5] JONCKHEERE I, FLECK S, NACKAERTS K, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination; Part I. Theories, sensors and hemispherical photography[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 19-35.
- [6] WEISS M, BARET F, SMITH G J, et al. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination; Part II. Estimation of LAI, errors and sampling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1/2): 37-53.
- [7] HARDWICK S R, TOUMI R, PFEIFER M, et al. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation; Forest disturbance drives changes in microclimate[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201: 187-195.
- [8] 朱教君, 康宏樟, 胡理乐. 应用全天空照片估计林分透光孔隙度(郁闭度)[J]. *生态学报*, 2005, 24(10): 1234-1240.
- ZHU J J, KANG H Z, HU L L. Estimation on optical porosity or canopy closure for a forest stand with hemispherical images[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1234-1240.
- [9] SASAKI T, IMANISHI J, IOKI K, et al. Estimation of leaf area index and canopy openness in broad-leaved forest using an airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography[J]. *Landscape and Ecological Engineering*, 2008, 4(1): 47-55.
- [10] NAKAMURA A, MORIMOTO Y, MIZUTANI Y. Adaptive management approach to increasing the diversity of a 30-year-old planted forest in an urban area of Japan[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 70(3/4): 291-300.
- [11] PERRY G L W, ENRIGHT N J. Spatial modelling of landscape composition and pattern in a maquis-forest complex, Mont Do, New Caledonia[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 152(2/3): 279-302.
- [12] LI H, REYNOLDS J F. On definition and quantification of heterogeneity[J]. *Oikos*, 1995, 73(2): 280-284.
- [13] CANHAM C D, FINZI A C, PACALA S W, et al. Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: Interspecific variation in light transmission by canopy trees[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, 24(2): 337-349.
- [14] HANSEN A J, PHILLIPS L B, DUBAYAH R, et al. Regional-scale application of lidar: Variation in forest canopy structure across the southeastern US[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 329: 214-226.
- [15] 区余端, 苏志尧. 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[J]. *植物科学学报*, 2012, 30(3): 223-229.
- OU Y D, SU Z Y. Spatial heterogeneity dynamics of canopy structure in a Montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong[J]. *Plant Science Journal*, 2012, 30(3): 223-229.
- [16] 姚丹丹, 雷相东, 余黎, 等. 云冷杉针阔混交林叶面积指数的空间异质性[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 71-79.
- YAO D D, LEI X D, YU L, et al. Spatial heterogeneity of leaf area index of mixed spruce-fir-deciduous stands in Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(1): 71-79.
- [17] 区余端, 苏志尧. 粤北山地常绿阔叶林自然干扰后冠层结构与林下光照动态[J]. *生态学报*, 2012, 32(18): 5637-5645.
- OU Y D, SU Z Y. Dynamics of canopy structure and understory light in montane evergreen broadleaved forest following a natural disturbance in North Guangdong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(18): 5637-5645.
- [18] 温远光, 和太平, 谭伟福. 广西热带和亚热带山地的植物多样性及群落特征[M]. 北京: 中国气象出版社, 2004.
- WEN Y G, HE T P, TAN W F. Plant biodiversity and community characteristics in tropical and subtropical mountains in Guangxi[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.
- [19] 温远光, 李婉舒, 朱宏光, 等. 特大冰冻干扰对大明山常绿阔叶林树冠及林冠层状况的影响[J]. *广西科学*, 2014, 21(5): 454-462.
- WEN Y G, LI W S, ZHU H G, et al. Effects of a severe ice storm disturbance on crown and canopy condition of an evergreen broad-leaved forest in Damingshan national nature reserve of Guangxi Province[J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(5): 454-462.
- [20] MATHERON G. Principles of geostatistics[J]. *Economic Geology*, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [21] MORAN P A P. The interpretation of statistical maps[J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B: Methodological*, 1948, 10(2): 243-251.
- [22] LAUZON J D, O'HALLORAN I P, FALLOW D J, et al. Spatial variability of soil test phosphorus, potassium, and pH of Ontario soils[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(2): 524-532.

- [23] JUNG W K, KITCHEN N R, SUDDUTH K A, et al. Spatial characteristics of claypan soil properties in an agricultural field[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(4):1387-1397.
- [24] IHAKA R, GENTLEMAN R. R. A language for data analysis and graphics[J]. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1996, 5(3):299-314.
- [25] KENDERES K, ASZALÓS R, RUFF J, et al. Effects of topography and tree stand characteristics on susceptibility of forests to natural disturbances (ice and wind) in the Börzsöny Mountains (Hungary)[J]. *Community Ecology*, 2007, 8(2):209-220.
- [26] 潘百红, 刘克旺, 曹铁如, 等. 冰雪灾害对株洲市常绿木本园林植物的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(11):87-90.
PAN B H, LIU K W, CAO T R, et al. Effect of snow disasters to the garden evergreen woody plants in Zhuzhou[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(11):87-90.
- [27] 蔡子良, 钟秋平, 刘清元, 等. 广西主要树种冰雪灾害调查及恢复措施[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(6):837-841.
CAI Z L, ZHONG Q P, LIU Q Y, et al. Investigation on main trees species damaged by ice storm in Guangxi and the restoration measures [J]. *Forest Research*, 2008, 21(6):837-841.
- [28] 陈凤霞, 许松葵, 薛立, 等. 冰雪灾害对杉木林土壤特性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(20):5466-5474.
CHEN F X, XU S K, XUE L, et al. Effects of ice-snow damage on soil characteristics in a *Cunninghamia lanceolata* stand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20):5466-5474.
- [29] 张志祥, 刘鹏, 邱志军, 等. 浙江九龙山自然保护区黄山松种群冰雪灾害干扰及其受灾影响因子分析[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(2):223-232.
ZHANG Z X, LIU P, QIU Z J, et al. Factors influencing ice and snow damage to *Pinus taiwanensis* in Jiulongshan Nature Reserve, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2):223-232.
- [30] BEAUDET M, BRISSON J, MESSIER C, et al. Effect of a major ice storm on understory light conditions in an old-growth *Acer-Fagus* forest: Pattern of recovery over seven years[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3):553-557.
- [31] COVEY K R, BARRETT A L, ASHTON M S. Ice storms as a successional pathway for *Fagus grandifolia* advancement in *Quercus rubra* dominated forests of southern New England[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, 45(11):1628-1635.
- [32] 刘志理, 戚玉娇, 金光泽. 小兴安岭谷地云冷杉林叶面积指数的季节动态及空间格局[J]. *林业科学*, 2013, 49(8):58-64.
LIU Z L, QI Y J, JIN G Z. Seasonality and spatial pattern of leaf area index of a spruce-fir forest at the Valley in Xiaoxing'an Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49(8):58-64.
- [33] BURROWS S N, GOWER S T, CLAYTON M K, et al. Application of geostatistics to characterize leaf area index (LAI) from flux tower to landscape scales using a cyclic sampling design[J]. *Ecosystems*, 2002, 5(7):667-679.

(责任编辑:陆雁)