

## 杉木人工林空间分布格局时空变化分析

杨子清<sup>1,2</sup>, 陈平留<sup>2</sup>, 刘健<sup>1,2,3</sup>, 余坤勇<sup>1,2</sup>, 廖晓丽<sup>1</sup>, 游浩辰<sup>1</sup>, 龚从宏<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学 3S技术应用研究所, 福建福州 350002; 2. 福建农林大学 林学院, 福建福州 350002;  
3. 三明学院 化学与生物工程系, 福建三明 365004)

**摘要:** 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国南方主要用材树种, 研究其空间分布变化规律对杉木生产经营具有重要意义。在福建顺昌县选择 3 块立地条件基本一致的杉木人工纯林的(国家森林资源连续清查)固定样地(分别位于低、中、高海拔), 将杉木生长分为 2 个阶段: 幼树( $5 \text{ cm} \leq \text{胸径} < 10 \text{ cm}$ )和成年树( $\text{胸径} \geq 10 \text{ cm}$ ), 于 2003 年和 2008 年调查了样地内杉木( $\text{胸径} \geq 5 \text{ cm}$ )的胸径并记录其坐标。采用 Ripley's  $K(r)$  函数改进的  $L(r)$  函数, 双相关函数  $g(r)$  和角尺度  $W_i$  分析杉木空间分布格局的时空变化。3 块样地角尺度分析  $\bar{W}$  分别为  $0.494 \sim 0.578$ ,  $0.465 \sim 0.477$ ,  $0.426 \sim 0.601$ 。研究表明: 海拔对杉木林的空间分布格局无影响。从  $L(r)$  和  $g(r)$  函数曲线可看出, 成年树普遍低于幼树, 也即更趋于随机或均匀分布, 因此, 不论初始分布如何, 随着时间的推移都有聚集分布向随机分布转变、随机分布向均匀分布转变的趋势。图 3 表 2 参 24

**关键词:** 森林生态学; 杉木; 空间分布格局; 时空变化; 人工林

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2012)03-0374-09

### Spatio-temporal variation of distribution patterns in *Cunninghamia lanceolata* plantations

YANG Zi-qing<sup>1,2</sup>, CHEN Ping-liu<sup>2</sup>, LIU Jian<sup>1,2,3</sup>, YU Kun-yong<sup>1,2</sup>,  
LIAO Xiao-li<sup>1</sup>, YOU Hao-chen<sup>1</sup>, GONG Cong-hong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geomatics Application, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;  
2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 3. Chemical and  
Biological Engineering Faculty, Sanming University, Sanming 365004, Fujian, China)

**Abstract:** To aid in management of *Cunninghamia lanceolata*, the main timber species in southern China, its variation of spatial distribution pattern was analyzed. Three permanent plots of *C. lanceolata* plantations with approximately the same site conditions, set by China continuous forest inventory in Shunchang, Fujian, were selected. *C. lanceolata* growth was divided into two stages: young trees ( $5 \text{ cm} \leq \text{diameter at breast height (DBH)} < 10 \text{ cm}$ ) and mature trees ( $\text{DBH} \geq 10 \text{ cm}$ ). The DBH and coordinates of every tree ( $\text{DBH} \geq 5 \text{ cm}$ ) in the permanent plots were recorded in 2003 and 2008. The function  $L(r)$ , improvement of Ripley's  $K(r)$ , the pair-correlation function  $g(r)$ , and the uniform angle index ( $W_i$ ) were used to analyze the spatio-temporal variation of spatial distribution patterns. The three permanent plots had mean uniform angle index ( $\bar{W}$ ) between 0.494–0.578 in low altitudes, 0.465–0.477 in medium altitudes, and 0.426–0.601 in high altitudes. Results showed that altitude did not affect the spatial distribution pattern. The  $L(r)$  and  $g(r)$  function curves of mature trees were generally lower than young trees', i.e. tend to be more random or uniform distribution. So regardless of the initial distribution of young or mature trees, with the passage of time, there was a tendency for the aggregated

收稿日期: 2011-09-21; 修回日期: 2011-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40971043)

作者简介: 杨子清, 博士研究生, 从事 3S 技术应用、森林资源评价等研究。E-mail: hellomryang@qq.com。通

信作者: 刘健, 教授, 博士生导师, 从事 3S 技术应用、森林资源资产评估等研究。E-mail: fjliujian@126.com

distribution to change to a random distribution, and a random distribution to change to a uniform distribution. [Ch., 3 fig. 2 tab. 24 ref.]

**Key words:** forest ecology; *Cunninghamia lanceolata*; spatial distribution pattern; spatio-temporal variation; plantation

空间分布格局分析起源于植物生态学研究<sup>[1]</sup>, 分析生物种群的空间分布格局的时空变化是研究生态系统的基础。从多尺度上分析种群的生态学过程及空间分布格局或空间关联性, 目前已有研究<sup>[2-4]</sup>。中国学者张金屯教授<sup>[5]</sup>最早向国内生态学界介绍了 Ripley 提出的  $K(r)$  函数<sup>[6]</sup>。Besag 对 Ripley 的  $K(r)$  函数进行改进, 提出  $L(r)$  函数, 目前已广泛运用于各个科学领域<sup>[3,7-8]</sup>。从  $K(r)$  函数发展衍生出来的双相关函数  $g(r)$  和  $L(r)$  函数常一起作为空间分布格局的分析方法。宋于洋等<sup>[8]</sup>采用  $L(r)$  和  $g(r)$  函数分析梭梭 *Haloxylon ammodendron* 种群不同发育阶段的空间格局及其关联性。喻泓等<sup>[4]</sup>采用双相关  $g(r)$  函数研究受地表火干扰 1 a 后的樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 林的林分结构特征和空间格局。近年来, 由惠刚盈等<sup>[7,9]</sup>提出的角尺度  $W_i$  具有直观简捷和易于操作(外业调查)的优点而倍受重视。陈新美等<sup>[10]</sup>运用角尺度对 2 块蒙古栎 *Quercus mongolica* 林标准地的林分结构进行分析评价。王蕾等<sup>[11]</sup>运用均匀度、 $L(r)$  函数和角尺度 3 种方法研究长白山阔叶红松 *Pinus koraiensis* 林的空间分布格局。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国南方的主要用材树种, 其生长快, 材质好, 病虫害少, 是一种速生丰产, 经济价值高的珍贵树种。对于杉木的林分结构已有研究, 但研究其空间分布格局的时空变化, 尚未见报道。为此, 本研究在中国“杉木之乡”福建省顺昌县选择 3 块样地, 采用  $L(r)$  函数、 $g(r)$  函数和角尺度  $W_i$  等 3 种判别函数(指标), 研究杉木林空间分布格局的时空变化, 以期为杉木造林和抚育间伐提供参考。

## 1 资料收集与整理

本研究选择 3 个海拔高度不同而立地条件基本一致的国家森林资源连续清查固定样地(俗称一类样地, 以下简称样地), 分析杉木林的空间分布格局变化规律, 各杉木林样地的样地因子如表 1。样地大小为 25.82 m × 25.82 m(东南西北各打 1 个角桩), 在 2003 和 2008 年(第 6 次和第 7 次全国森林资源清查)对样地内胸径 ≥ 5 cm 的杉木定牌、涂红漆, 调查胸径、树高和林分基本信息, 通过测量样地杉木方位角和其与临近角桩的水平距离, 确定样地每株杉木的坐标并绘制分布图。通过 ArcGIS 软件建立样地杉木数据库, 包含横坐标、纵坐标、胸径、树高等主要字段, 并生成各个样地的杉木分布 shp 图层。

本研究以树木的胸径大小作为表征树木的指标。因所调查样地属中幼林, 胸径较小, 故将它划分为 2 个生长阶段: 幼树, 5 cm ≤ 胸径 < 10 cm; 成年树, 胸径 ≥ 10 cm。

表 1 杉木人工林的样地情况

Table 1 Status of three *Cunninghamia lanceolata* permanent plots

样地序号	地貌	海拔/m	坡向	坡度/(°)	土壤	龄组	幼树/株		成年树/株		林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	枯枝落叶厚度/cm	腐殖质层厚度/cm	土层厚度/cm	
							2003	2008	2003	2008					
A	丘陵	205	西(阴坡)	22	红壤	中龄	45	16	58	88	1 545	1 560	5	15	100
B	丘陵	371	东北(阴坡)	22	红壤	幼龄	104	64	0	41	1 560	1 575	2	10	100
C	低山	598	西(阴坡)	20	红壤	幼龄	65	29	24	60	1 335	1 335	2	5	70

## 2 研究方法

### 2.1 $L(r)$ 函数

点格局分析的统计学理论是 Ripley 首先提出来的, 经 Diggle 等人发展, 详细的数学原理可参见文献[12-14]。Ripley 的  $K(r)$  函数是分析研究区(样方)内以某点为圆心, 以一定长度  $r$  为半径的圆内植物个体数目的函数。本研究采用由 Ripley 的  $K(r)$  函数改进的  $L(r)$  函数分析杉木林空间分布格局。通过 ArcGIS 9.3 的 spatial statistical 模块可计算  $\hat{L}(r)$ :

$$\hat{L}(r) = \sqrt{\frac{A}{\pi n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n I_r(u_{ij})}。 \quad (1)$$

式(1)中:  $A$  为研究区面积(即为样地大小,  $667 \text{ m}^2$ );  $n$  为样木株数;  $u_{ij}$  为 2 个点  $i$  和  $j$  之间的距离;  $r$  为空间尺度;  $I_r(u_{ij})$  为指示函数, 当  $u_{ij} \leq r$  时,  $I_r(u_{ij})=1$ , 当  $u_{ij} > r$  时,  $I_r(u_{ij})=0$ 。

$$L(r) = \hat{L}(r) - r。 \quad (2)$$

式(2)即为本研究采用的  $L(r)$  函数的计算公式。通过 Monte-Carlo 拟合检验绘制上下包迹线也即  $L(r)$  的置信区间, 拟合次数 999 次, 置信水平达到 99.9%。若在上下包迹线以内,  $L(r) < 0$ , 则均匀分布的可能性大于随机分布;  $L(r)=0$ , 则为随机分布;  $L(r) > 0$ , 则聚集分布的可能性大于随机分布。若在包迹线以外, 在上包迹线上则为显著聚集分布, 在下包迹线以下则为显著均匀分布。

## 2.2 $g(r)$ 函数

双相关函数<sup>[7]</sup>是一种通过图形函数来表达的格局判定方法。双相关函数  $g(r)$  是以特定空间尺度  $r$  为半径的圆环上的数据来进行空间点格局分析的, 因此, 它是一个概率密度函数, 无量纲, 其数学期望值应为 1。它与 Ripley 的  $K(r)$  函数之间存在着函数关系<sup>[8]</sup>:

$$g(r) = \frac{dK(r)}{2\pi r dr}; \quad (3)$$

$$K(r) = \sqrt{\hat{L}(r)\pi}。 \quad (4)$$

式(3)和式(4)中各式的参数含义同式(1)。

在一个纯随机分布的林分中任意距离  $r$  都会得出  $g(r)=1$ 。如果树木位置有均匀分布的趋势, 那么对于小的  $r$  来讲就有  $g(r)=0$ ; 对于较大的  $r$  值就有  $g(r)>0$ , 并且随着  $r$  的增大  $g(r)$  的值趋于 1。如果是聚集分布, 则对于小的  $r$  就有  $g(r)>1$ 。 $g(r)$  函数的计算通过 Crancod 软件<sup>[15]</sup>实现。

## 2.3 角尺度 $W_i$

角尺度  $W_i$  是惠刚盈和 Gadow 于 1998 年提出的。从参照树出发, 任意 2 个最近相邻木的夹角有 2 个, 令小角为  $\alpha$ , 角尺度被定义为  $\alpha$  角小于标准角  $\alpha_0$  的个数占所考察的最近 4 株相邻木的比例, 详细计算见文献[9]。因而  $W_i$  的取值有 5 种情况分别为: 0(分布很均匀), 0.25(均匀), 0.50(随机), 0.75(不均匀), 1.00(很不均匀)。之后, 惠刚盈对标准角  $\alpha_0$  的取值进行了探讨, 认为  $\alpha_0=72^\circ$  对反映林分空间分布格局更为准确。随机分布时  $\bar{W}$  取值范围为 [0.475, 0.517];  $\bar{W}>0.517$  时为聚集分布;  $\bar{W}<0.475$  时为均匀分布。角尺度  $W_i$  的计算通过 Crancod 软件<sup>[15]</sup>实现。

本研究在 ArcGIS 9.3 和 Crancod 软件的支持下, 计算  $L(r)$  函数、 $g(r)$  函数和角尺度  $W_i$ , 以此作为空间分布格局的判别函数(指标), 研究海拔对杉木林总体及其幼树、成年树空间分布格局的影响, 通过 2 期(2003 年和 2008 年)数据, 研究时间对其空间分布格局的影响, 从而分析杉木林空间分布格局的时空变化趋势。 $L(r)$ 、 $g(r)$  函数和角尺度  $W_i$  的结果制图在 Excel 2007 下完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同海拔杉木林空间分布格局

海拔高度对杉木林的空间格局有所影响但无显著差异。由图 1 可知:  $L(r)$  函数分析可见, 低海拔杉木林(图 1-A)呈随机分布; 中海拔杉木林(图 1-B)呈随机分布但有聚集分布的趋势; 高海拔杉木林(图 1-C)呈随机分布, 但随空间尺度  $r$  增大先后有聚集、随机、均为分布的趋势。 $g(r)$  函数分析结果与  $L(r)$  函数基本一致, 低海拔杉木林  $g(r)$  函数曲线接近于 1, 即呈随机分布; 中海拔杉木林随着空间尺度的增大,  $g(r)$  逐渐接近于 1, 即有聚集分布向随机分布转变的趋势。角尺度  $W_i$  分析表明: 低中高海拔的  $\bar{W}$  值分别为 0.512, 0.477 和 0.552, 即低中海拔总体呈现随机分布, 高海拔为聚集分布。从  $W_i$  直方图亦可看出: 中低海拔的杉木林以  $W_i=0.5$  为轴成对称分布, 而高海拔区  $W_i$  分布明显右偏。

### 3.2 前期幼树、成年树的空间分布格局

不管低海拔还是高海拔杉木林幼树的空间格局以聚集分布为主, 成年树以随机分布为主, 说明海拔

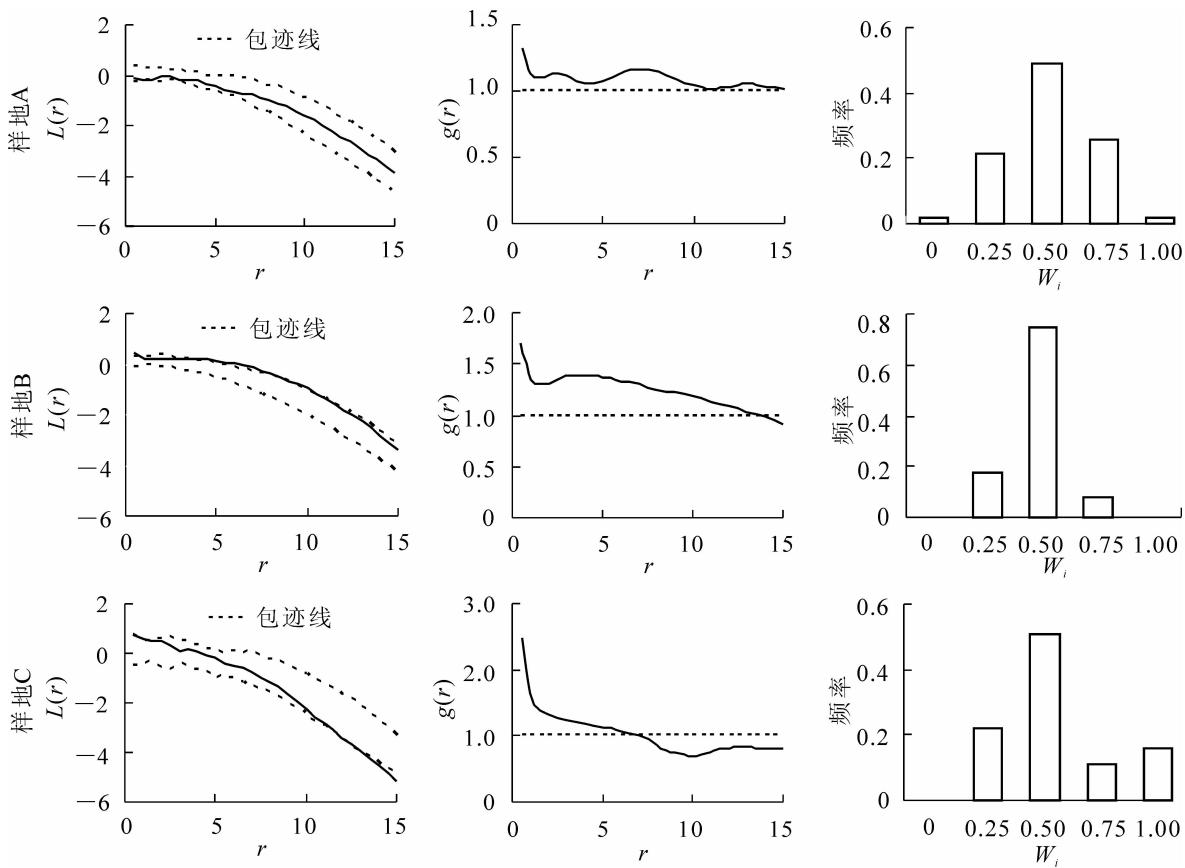


图 1 不同海拔高度上杉木林空间分布格局

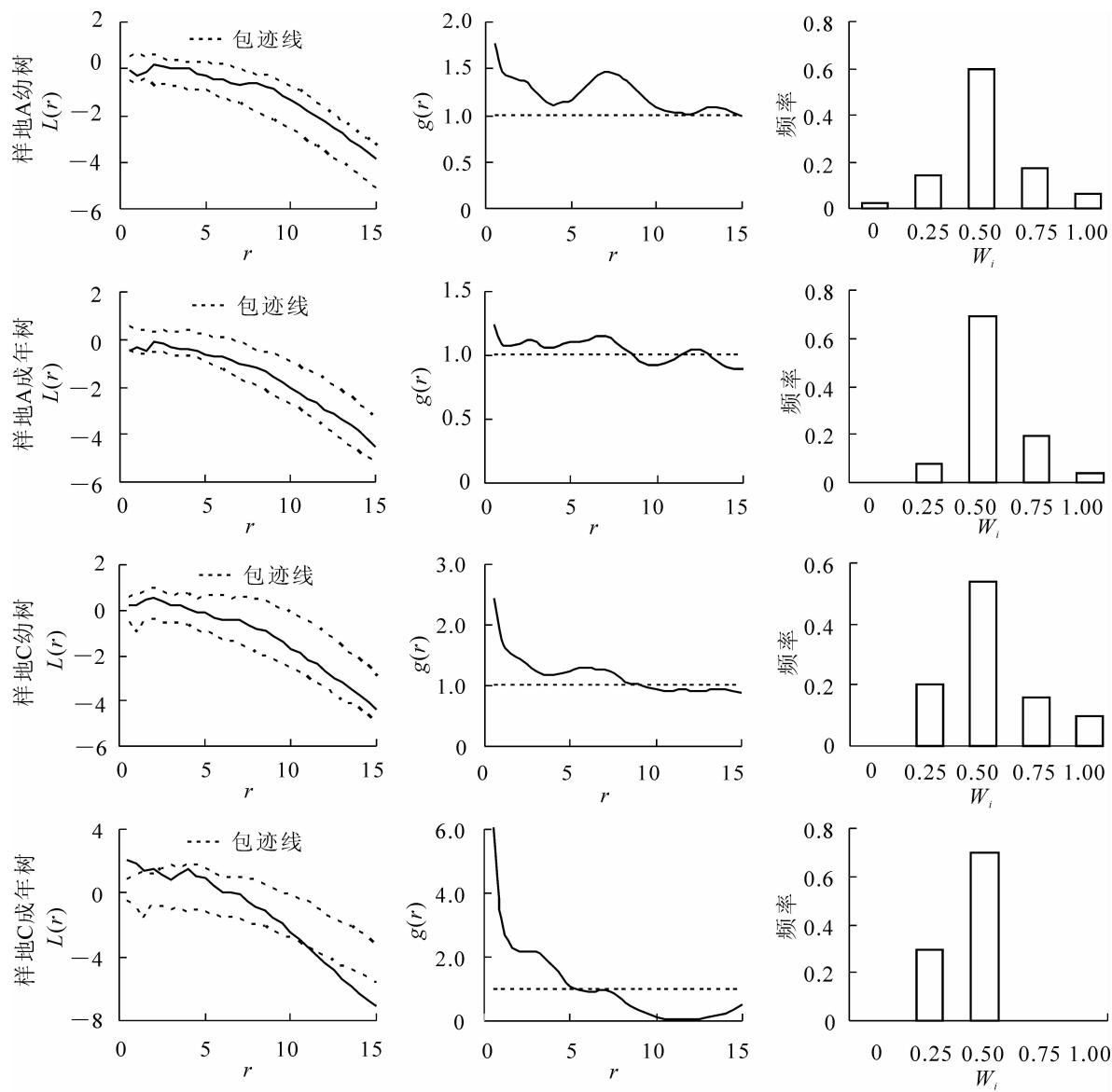
Figure 1 Spatial distribution pattern of *Cunninghamia lanceolata* in different altitudes

高度对杉木林的幼树、成年树空间格局分布无显著影响。由图 2 可知:  $L(r)$  函数分析可见, 低海拔的杉木林幼树、成年树的空间分布格局相同均呈随机分布, 高海拔杉木林幼树呈随机分布, 而成年树随着空间尺度的增大, 其空间分布格局表现为由聚集分布向随机分布再向均匀分布变化的特征。 $g(r)$  函数分析显示, 低海拔杉木林幼树呈聚集分布, 特别是在空间尺度为 7 m 时最为明显; 成年树  $g(r)$  曲线在各空间尺度上均接近于 1, 即空间分布格局呈明显的随机分布。高海拔杉木林幼树总体呈聚集分布, 但随着空间尺度  $r$  的增大,  $g(r)$  函数值随着空间尺度  $r$  的增大逐渐减小, 空间分布格局由聚集分布转变为随机分布。角尺度  $W_i$  分析表明, 低海拔杉木林幼树和成年树的  $\bar{W}$  值分别为 0.526 和 0.549; 高海拔为 0.537 和 0.426, 整体空间分布格局上低海拔幼树、成年树、高海拔幼树呈聚集分布, 高海拔成年树呈均匀分布。

$L(r)$  函数、 $g(r)$  函数和角尺度  $W_i$  三者的分析结果存在个别差异, 究其原因主要是: ①3 种判别函数(指标)的分析角度不同。 $L(r)$  函数和  $g(r)$  函数均有考虑空间尺度的影响, 前者反映的是以  $r$  为半径的圆环内的空间分布格局, 后者反映的是此圆环圈上(不考虑内部)的空间分布格局。角尺度  $W_i$  则没考虑空间尺度的影响, 它以参照树周围最邻近的 4 株树之间的夹角大小来研究总体的空间分布。②3 种判别函数(指标)都有难以克服的不足之处。空间尺度  $r$  和步长大小直接影响了  $L(r)$  和  $g(r)$  函数的分析结果。角尺度  $W_i$  虽然不受尺度和步长影响, 但是对于样地大、株数少的情况, 其分析结果往往会出现较大的偏差。因而, 空间分布格局的研究往往需要将三者的分析结果综合起来判断, 才能较好地保证结果不出现偏差。

### 3.3 后期幼树、成年树的空间分布格局

经过 5 a 的生长, 杉木林幼树、成年树空间分布格局发生了明显变化且变化趋势较为一致。对比图 2 和图 3 可以明显看出: 不同海拔高度的杉木林幼树、成年树  $L(r)$  函数和  $g(r)$  函数的曲线均有下移的趋势, 即有聚集分布向随机分布转变, 随机分布向均匀分布转变的趋势。说明不论杉木林的初始分布如



样地B无成年树，其幼树分布同图1

图2 2003年(前期)杉木林幼树、成年树空间分布格局

Figure 2 Spatial distribution pattern of *Cunninghamia lanceolata* young and mature trees in 2003

何，通过种内竞争、自我稀疏最终都将趋于稳定。

由图3可知： $L(r)$ 函数显示，低海拔杉木林幼树在不同尺度上主要呈均匀分布，成年树在0~5 m呈随机分布，之后逐渐朝均匀分布转变。经5 a生长，中海拔样地B已出现部分成年树，呈显著均匀分布，因幼树仍占大多数其分布较前期没有明显变化仍为随机分布。高海拔杉木林分布格局幼树呈随机分布，成年树随空间尺度 $r$ 增加由随机分布向均匀分布( $r>9$  m)转变。 $g(r)$ 函数分析显示，低海拔杉木林幼树空间格局分布变幅较大，这是后期样地A幼树明显减少的结果；而成年树呈显著的随机分布。中海拔杉木林幼树、成年树分别呈聚集、均匀分布。高海拔杉木林幼树、成年树随空间尺度的增大先后呈聚集、随机、均匀分布，但总体上以随机分布为主。角尺度 $W_i$ 分析表明：低中高海拔杉木林幼树、成年树的 $\bar{W}$ 值分别为：0.578(聚集)，0.494(随机)；0.465(均匀)，0.466(均匀)；0.549(聚集)，0.601(聚集)。

## 4 结论与讨论

### 4.1 杉木人工林空间格局的时空变化趋势

由于 $L(r)$ 函数、 $g(r)$ 函数和角尺度 $W_i$ 的结果表现形式不同，难以直接比较，本研究在分析不同空间

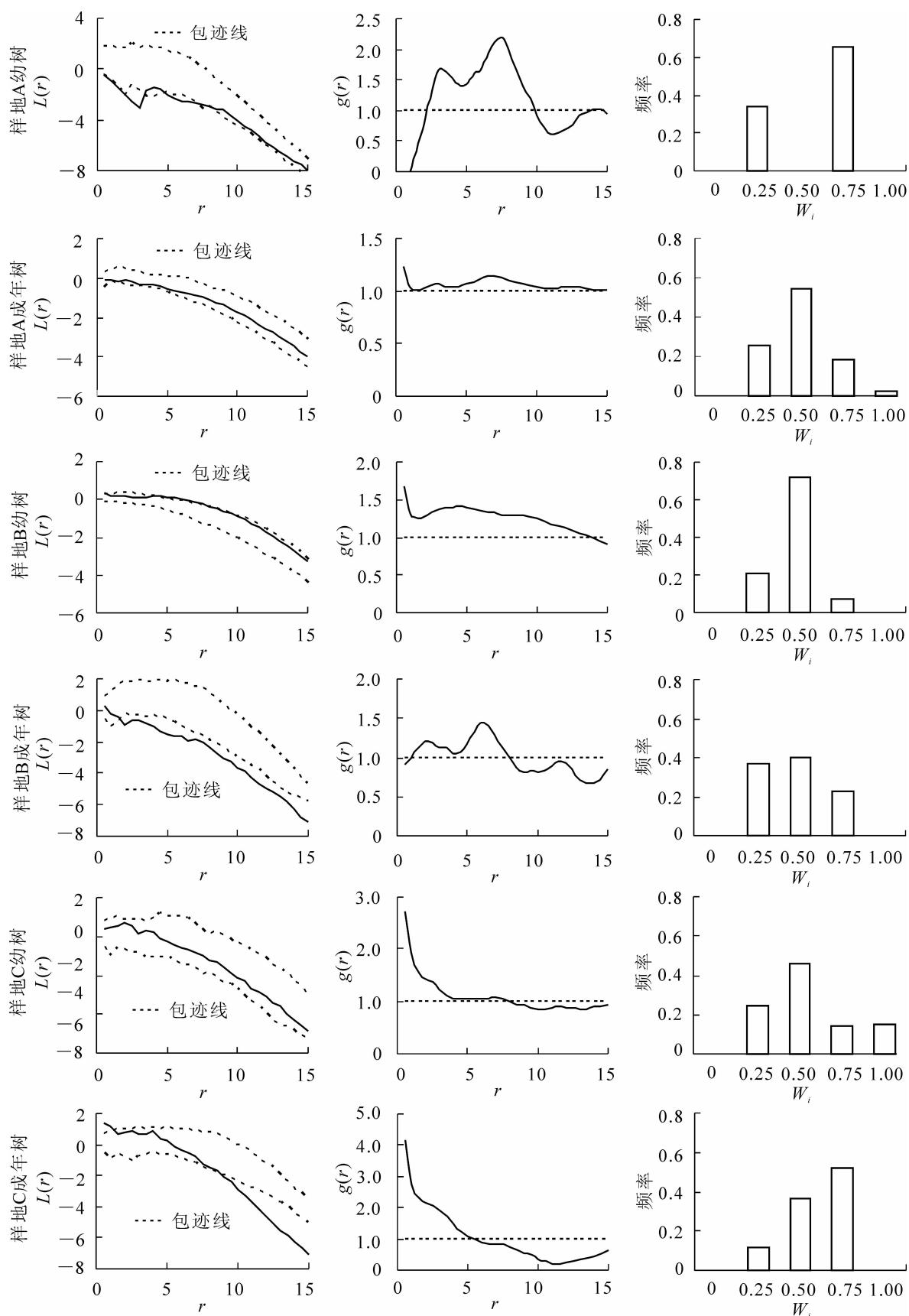


图3 2008年(后期)杉木林幼树、成年树空间分布格局

Figure 3 Spatial distribution pattern of *Cunninghamia lanceolata* young and mature trees in 2008

尺度  $r$  上  $L(r)$  函数和  $g(r)$  函数的变化后, 对两者所反映的总体空间分布格局分别作出判断, 使  $L(r)$ ,  $g(r)$ ,  $W_i$  的分析结果可直接比较, 将三者的众数作为空间分布格局的综合判断结果(表 2)。

表 2 杉木人工林空间分布格局判别结果

Table 2 Discrimination results of spatial distribution pattern of *Cunninghamia lanceolata* plantation

样地	海拔				2003 年(前期)				2008 年(后期)			
	$L(r)$	$g(r)$	$W_i$	综合判断	$L(r)$	$g(r)$	$W_i$	综合判断	$L(r)$	$g(r)$	$W_i$	综合判断
样地 A 幼树	随机	随机	随机	随机	随机	聚集	聚集	聚集	随机*	随机*	聚集	随机
样地 A 成年树	随机	随机	随机	随机	随机	随机	聚集	随机	随机	随机	随机	随机
样地 B 幼树	随机	聚集	随机	随机	随机	聚集	随机	随机	随机	聚集	随机	随机
样地 B 成年树	随机	聚集	随机	随机					均匀	均匀	均匀	均匀
样地 C 幼树	随机	随机	聚集	随机	随机	聚集	聚集	聚集	随机	随机*	聚集	随机
样地 C 成年树	随机	随机	聚集	随机	随机*	随机*	均匀	随机	均匀*	均匀*	聚集	均匀

说明: \* 表示无明显空间分布格局。

从表 2 中可知: 海拔对杉木林整体(幼树+成年树)的空间分布格局的影响不显著。低中高海拔杉木林总体均以随机分布为主, 虽然中、高海拔杉木林各有聚集和随机分布的趋势。海拔对杉木林幼树和成年树空间分布格局影响也不显著, 即不同海拔高度的杉木林幼树之间和成年树之间的空间分布格局基本一致。具体表现为: 前期幼树呈聚集分布, 成年树呈随机分布, 后期幼树呈随机分布, 成年树呈均匀分布(样地 A 成年树例外, 呈随机分布)。另外, 从  $L(r)$  和  $g(r)$  函数图也看出: 后期的函数曲线相对前期有明显的下移迹象(朝均匀分布方向), 印证了前者的结论。综上所述: 海拔对杉木林的空间分布格局影响不显著, 但杉木林幼树、成年树不论初始分布如何, 随着时间的推移都有聚集分布向随机分布转变、随机分布向均匀分布转变的趋势。曹光球等<sup>[16]</sup>对半天然杉阔混交林杉木的空间格局进行分析, 结果表明: 不同立木级杉木的空间分布基本呈聚集分布, 但随着立木级的增大, 扩散趋势越来越明显, 聚集强度表现为由大变小的趋势。其他树种的相关研究<sup>[17-20]</sup>亦有相似结论。杨心兵等<sup>[21]</sup>研究表明, 马尾松 *Pinus massoniana* 在不同发育阶段, 种群分布格局不同, 随种群年龄的增加和径级的增大, 分布格局由集群分布变为随机分布, 这主要由种内和种间竞争引起的种群数量动态变化所致。李立等<sup>[22]</sup>研究古田山常绿阔叶林优势树种甜槠 *Castanopsis eyrei* 和木荷 *Schima superba* 的空间格局表明, 2 个优势树种在总体上及不同年龄阶段主要呈聚集分布, 且随年龄阶段的增加, 聚集程度有降低的趋势。

#### 4.2 判别函数(指标)对空间分布格局结果的影响

$L(r)$  函数和  $g(r)$  函数能够反映尺度对空间分布格局的影响, 其中步长大小和最大空间尺度  $r$  对分析结果有重要影响。不同之处在于  $L(r)$  函数属累积分布函数, 而  $g(r)$  函数属概率密度函数。角尺度  $W_i$  不能反映尺度的影响, 通过平均值  $\bar{W}$  可直接判断空间分布。但是, 对于样地大而林木株数少的情况易出现偏差, 如一块样地平均分为 4 个象限, 假使只有第 I 象限有样本且呈均匀分布, 则  $W_i$  分析将显示为均匀分布, 显然是不合理的。从本研究分析结果来看,  $L(r)$  函数效果最好基本与综合判断结果一致,  $g(r)$  函数和  $W_i$  相比较不“稳定”。这是由于  $g(r)$  函数反映的是以尺度  $r$  为半径的圆环上杉木的空间分布格局, 随着  $r$  的增加而浮动变化;  $W_i$  指标对样地内的林木株数有所要求, 株数较少易造成  $W_i$  结果偏差, 有意思的是  $L(r)$  和  $g(r)$  函数对此的分析结果却比较好, 如 2003 年的样地 C 成年树和 2008 年的样地 A 幼树、样地 C 幼树。判别函数(指标)的差异是由计算方法的不同造成的, 并没有好坏之分, 要根据研究目的和研究对象进行选择。王蕾等<sup>[11]</sup>在使用这三者分析长白山阔叶林空间分布格局后表明, 虽然这 3 种判别函数(指标)在格局不太明显的种群分布上存在一定的差异, 但是它们在格局检验上各有优势。

另外,  $L(r)$  和  $g(r)$  函数均由 Ripley 的  $K(r)$  函数发展而来, 它们在植物种群多尺度空间分布格局的研究中得到了广泛应用<sup>[23-24]</sup>。 $L(r)$  和  $g(r)$  函数和角尺度  $W_i$  三者共同存在“边缘效应”的问题, 由于没有记录样地边缘外的林木, 在分析处于样地边缘内的林木的空间分布格局时会存在一定的误差。目前, 对“边缘效应”不同的分析软件有不同的修正方法, 由于本研究采用不同的软件分析, 为保证分析结果的

可比性均未修正“边缘效应”的影响。

### 参考文献:

- [1] GATRELL A C, BAILEY T C, DIGGLE P J, et al. Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology [J]. *Trans Inst Br Geogr*, 1996, **21** (1): 256 – 274.
- [2] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. Ripley's  $K(d)$  函数分析种群空间分布格局的边缘校正[J]. 生态学报, 2003, **23** (8): 1533 – 1538.  
TANG Mengping, TANG Shouzheng, LEI Xiangdong, et al. Edge correction of Ripley's  $K(d)$  function on population spatial pattern analysis [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (8): 1533 – 1538.
- [3] 葛宏立, 周元中, 汤孟平, 等. Ripley's 指数的一个新变形  $G(d)$ [J]. 生态学报, 2008, **28** (4): 1491 – 1497.  
GE Hongli, ZHOU Yuanzhong, TANG Mengping, et al. A modified Ripley's index [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (4): 1491 – 1497.
- [4] 喻泓, 杨晓晖, 慈龙骏. 地表火对红花尔基沙地樟子松种群空间分布格局的影响[J]. 植物生态学报, 2009, **33** (1): 71 – 80.  
YU Hong, YANG Xiaohui, CI Longjun. Variations of spatial pattern in fire-mediated mongolian pine forest, hulun buir sand region, Inner Mongolia, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33** (1): 71 – 80.
- [5] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析[J]. 植物生态学报, 1998, **22** (4): 344 – 349.  
ZHANG Jintun. Analysis of spatial point pattern for plant species [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1998, **22** (4): 344 – 349.
- [6] RIPLEY B D. Modelling spatial patterns (with discussion) [J]. *J Royal Stat Soc, Series B*, 1977, **39** (2): 172 – 212.
- [7] 惠刚盈, 李丽, 赵中华, 等. 林木空间分布格局分析方法[J]. 生态学报, 2007, **27** (11): 4717 – 4728.  
HUI Gangying, LI Li, ZHAO Zhonghua, et al. The comparison of methods in analysis of the tree spatial distribution pattern [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007, **27** (11): 4717 – 4728.
- [8] 宋于洋, 李园园, 张文辉. 梭梭种群不同发育阶段的空间格局与关联性分析[J]. 生态学报, 2010, **30** (16): 4317 – 4327.  
SONG Yuyang, LI Yuanyuan, ZHANG Wenhui. Analysis of spatial pattern and spatial association of *Haloxylon ammodendron* population in different developmental stages [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (16): 4317 – 4327.
- [9] 惠刚盈, von GADOW K, 胡艳波. 林分空间结构参数角尺度的标准角选择[J]. 林业科学研究, 2004, **17** (6): 687 – 692.  
HUI Gangying, von GADOW K, HU Yanbo. The optimum standard angle of the uniform single index [J]. *For Res*, 2004, **17** (6): 687 – 692.
- [10] 陈新美, 张会儒, 姜慧泉. 东北过伐林区蒙古栎林空间结构分析与评价[J]. 西南林学院学报, 2010, **30** (6): 20 – 24.  
CHEN Xinmei, ZHANG Huiru, JIANG Huiquan. Analysis and evaluation on spatial structure of *Quercus mongolica* forests in over-logged region in Northeast China [J]. *J Southwest For Univ*, 2010, **30** (6): 20 – 24.
- [11] 王蕾, 张春雨, 赵秀海. 长白山阔叶红松林的空间分布格局[J]. 林业科学, 2009, **45** (5): 54 – 59.  
WANG Lei, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai. Spatial pattern of Korean pine broadleaved forests in Changbai Mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (5): 54 – 59.
- [12] RIPLEY B D. *Spatial Statistics* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1981: 172 – 212.
- [13] DIGGLE P. *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns* [M]. New York: Academic Press, 1983: 83 – 121.
- [14] STOYAN D, STOYAN H. *Fractals, Random Shapes and Point Fields: Methods of Geometrical Statistics* [M]. New York: Wiley, 1994: 249 – 289.
- [15] POMMERENING A. Approaches to quantifying forest structures [J]. *Forestry*, 2002, **75**: 306 – 324.
- [16] 曹光球, 林思祖, 曹子林, 等. 半天然杉阔混交林杉木及其伴生树种种群空间格局[J]. 浙江林学院学报, 2002, **19** (2): 148 – 152.  
CAO Guangqiu, LIN Sizhu, CAO Zilin, et al. Spatial distribution pattern of Chinese fir and its associated tree species in Mount Hutuo [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2002, **19** (2): 148 – 152.
- [17] 刘健, 陈平留, 林银森. 天然针阔混交林中马尾松种群的空间分布格局[J]. 福建林学院学报, 1996, **16** (3): 229 – 233.

- LIU Jian, CHEN Pingliu, LIN Yinsen. Spatial distribution pattern of masson pine population in natural forest mixed with conifer and broad-leaved tree [J]. *J Fujian Coll For*, 1996, **16** (3): 229 – 233.
- [18] 马旭东, 区余端, 刘刚, 等. 粤北常绿阔叶林乔木优势种群结构与格局动态[J]. 华南农业大学学报, 2010, **31** (2): 72 – 77.
- MA Xudong, OU Yuduan, LIU Gang, et al. Structure and distribution patterns of dominant populations in an evergreen broadleaved forest in north Guangdong Province [J]. *J South China Agric Univ*, 2010, **31** (2): 72 – 77.
- [19] 汤孟平, 周国模, 施拥军, 等. 天目山常绿阔叶林优势种群及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2006, **30** (5): 743 – 752.
- TANG Mengping, ZHOU Guomo, SHI Yongjun, et al. Study of dominant plant populations and their spatial patterns in evergreen broadleaved forest in Tianmu Mountain, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2006, **30** (5): 743 – 752.
- [20] 金则新. 浙江天台山落叶阔叶林优势种群结构与动态分析[J]. 浙江林学院学报, 2001, **18** (3): 245 – 251.
- JIN Zexin. Dominant population structure and trend of deciduous broad-leaved forest in the Tiantai Mountains of Zhejiang [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2001, **18** (3): 245 – 251.
- [21] 杨心兵, 覃逸明, 刘胜祥. 武汉市马鞍山森林公园马尾松年龄种群结构与分布格局[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2001, **35** (2): 209 – 213.
- YANG Xinbing, QIN Yiming, LIU Shengxiang. Age structure and distribution pattern of *Pinus massoniana* population in Wuhan Ma'an Mountain Forest Park [J]. *J Central China Norm Univ Nat Sci*, 2001, **35** (2): 209 – 213.
- [22] 李立, 陈建华, 任海保, 等. 古田山常绿阔叶林优势树种甜槠和木荷的空间格局分析[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (3): 241 – 252.
- LI Li, CHEN Jianhua, REN Haibao, et al. Spatial patterns of *Castanopsis eyrei* and *Schima superba* in mid-subtropical broad-leaved evergreen forest in Gutianshan National Reserve, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (3): 241 – 252.
- [23] FAJARDO A, GOODBUM J M, GRAHAM J. Spatial pattern of regeneration in managed uneven-aged ponderosa pine/douglas-fir forests of Western Montana, USA [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **231** (1/3): 255 – 266.
- [24] SALAS C, LEMAY V, NÚÑEZ P, et al. Spatial patterns in all old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **231** (1/3): 38 – 46.