

天然林林分结构研究方法综述

龚直文¹, 兮新刚¹, 顾丽¹, 赵俊卉¹, 郑焰峰², 杨华¹

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 国家林业局 调查规划设计院
北京 100714)

摘要: 森林结构对于森林经营管理者具有重要的参考意义。森林结构分为空间结构和非空间结构 2 个部分, 其相应的方法有①非空间方法: 用来描述林分平均特征, 不受林分相对位置的约束。②空间方法: 描述林分结构时都把林木位置考虑进去。重点归纳总结了 q 值理论、常用林分直径结构模型研究进展以及距离指数法和空间统计方法, 它们反映了林分直径结构特征和树木位置、大小、树木水平分布格局、树种间隔离程度和空间结构关系等。还讨论了未来需要进一步研究的问题。表 3 参 68

关键词: 森林计测学; 林分结构; 综述; q 值法则; 空间分析; 方差图; 距离指数; 点格局; 地统计学

中图分类号: S758.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2009)03-0434-10

Research methods on natural forest stand structure: a review

GONG Zhi-wen¹, KANG Xin-gang¹, GU Li¹, ZHAO Jun-hui¹, ZHENG Yan-feng², YANG Hua¹

(1. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Academy of Inventory and Planning, State Forestry Administration, P. R. China, Beijing 100714, China)

Abstract: For the forest manager, forest structure, composed of spatial and non-spatial structures, is an important frame of reference. Each structural type has its own operational method. When used to describe the average characteristics of a stand, the non-spatial method is not bound by the relative location of the trees, whereas the spatial method must take the location of trees into account. In the article the q ratio, development of a stand structural model using diameter, nearest-neighbor indices, and spatial statistical methods are summarized. These methods determine stand structure using diameter, location and size, distribution pattern, species isolation level, relationships between spatial structures, and so on. Finally, issues needing further study were discussed. [Ch, 3 tab. 68 ref.]

Key words: forest mensuration; forest structure; review; q ratio; spatial analysis; variogram; nearest-neighbor indices; point pattern; geostatistics

随着森林经营水平的逐步提高, 生产实践中更加需要全面的林分大小和空间分布信息。林分的直径结构、树种组成和林木间的空间位置与林分的结构和功能有着很大的关系。合理的林分结构是充分发挥森林多种功能的基础^[1]。林木结构的研究对于森林经营和优化决策都具有重要的理论和实际意义。林分结构包括空间结构和非空间结构。非空间结构包括直径结构、生长量和树种多样性等, 空间结构包括林木空间分布格局、混交、大小分化等 3 个方面^[2]。林分结构是个外在的空间概念。目前, 已经提出很多量化林分结构的方法, 主要分为 2 类: ①非空间方法: 非空间方法是用来描述林分平均

收稿日期: 2008-09-16; 修回日期: 2008-11-14

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A08); 国家自然科学基金资助项目(30671667)

作者简介: 龚直文, 博士研究生, 从事天然林可持续经营和森林植被恢复研究。E-mail: gozewe@126.com。通信

作者: 兮新刚, 教授, 博士生导师, 从事森林可持续经营研究。E-mail: xingangk@163.com

特征, 不受林分相对位置的约束。非空间指数可以量化垂直结构、水平结构和物种多样性^[3], 如Shammon-Wiener 指数^[4-5]、Simpson 指数^[6]、植物高指数、垂直物种层面和林分内多样性指数^[7-8]等。
②空间方法: 空间方法又可分为用空间指数表达的方法和建立在空间统计技术基础上的方法^[3,9]。这些方法在描述林分结构时都把林木位置考虑进去。文章重点介绍非空间结构方法中林分直径结构模型研究方法、*q* 值方法和空间结构中的空间距离指数法和空间统计方法。

1 林分直径结构与分布研究进展

1.1 *q* 值理论研究进展

法国的德莱奥古(F. de Liocourt, 1898)和 Meyer(1952)研究发现, 在未受到干扰的天然异龄林林分中连续 2 个胸径级间林木株数的比例趋向于一个常数(*q*)。在典型的异龄林林分内, 相邻径阶的立木株数比率趋向于一个常数, 其林分径级分布可由下列关系式来表达^[10]:

$$x_{td} = \frac{x_{td} - 1}{q}。 \quad (1)$$

式(1)中, *x* 为在 *t* 时刻中径级 *d* 的立木株数, *q* 为其值是一个递减系数或常数。

q 为某一径级的株数与相邻较大径级株数之比, *q* 值的序列和均值可以表达林分的径级株数分布状况^[11]。*q* 值越小, 直径分布曲线越平缓; *q* 值越大, 曲线越陡峭。*q* 的取值在于经营者的目 标, 一般情况下, *q* 值小, 生产大径材数量多; *q* 值大, 小径材数量就多。

q 值长期以来就被用于描述异龄林林分的理想胸径分布。Meyer(1953)定义了一个法正的异龄林为“目前的生长能被定期地伐去, 同时又能保持林分结构分布和原始的森林蓄积。”他指出描述这种“法正”异龄林就可以用 *q* 值来表示。Meyer(1952)利用 *q* 值法则, 研究美国宾夕法尼亚州地区高山橡树 *Quercus* sp. 林分的 *q* 值为 1.2 ~ 2.0, 此外, 还有其他的森林类型 *q* 值也处于此区间之内, 如北方硬阔叶树(northern hardwoods), 英国针枞林(Engelmann spruce-subalpine fir)和火炬松 *Pinus taeda*-萌芽松 *Pinus echinata* 林。*q* 值较小表明胸径频数分布曲线较为缓和, 林分在较大径阶部分占相对高的比例^[12]。Goodburn^[13]研究指出早期对于人工经营的异龄林和非经营老龄林林分在经营时都以接近于平衡状态的 *q* 值为目标。在美国, 广泛地用保留林木直径分布符合常数 *q* 值来明确地指导异龄林经营活动。Liocourt De(1899)认为, *q* 值一般为 1.2 ~ 1.5; Moore(1964)研究犹他州恩氏云杉 *Picea engelmannii*-亚高山冷杉 *Abies faxoniana* 林的 *q* 值为 1.24 ~ 1.54; Alexander(1977)研究落基山脉恩氏云杉-亚高山冷杉林的 *q* 值为 1.3 ~ 1.5; H. Biolley 认为欧洲云杉 *Picea excelsa* 的 *q* 值为 1.3 时最好; Garcia 等(1999)研究认为, *q* 值为 1.3 ~ 1.7^[11]。亢新刚等^[11]以长白山金沟岭林场的云杉 *Picea* spp. 臭冷杉 *Abies nephrolepis* 针阔混交林为研究对象, 分析了该林场始于 1987 年的检查法经营下连续 14 a 的森林资源调查数据, 其结果表明, 金沟岭林场 2 个经营小区云冷杉林分的 *q* 值分别为 1.32 和 1.35, 经营后蓄积结构比实验前更加合理。郝清玉^[14]以红石林业局为研究对象, 通过建立长白山林区阔叶林高产大径木收获量和净收益优化模型, 模拟结果显示高产大径木的林分结构参数 *q* 值为 1.2。因此, 可以根据林分径阶 *q* 值法则来经营天然异龄林, 能够使林分接近于天然林的理想结构倒“J”型。

1.2 常用直径结构模型研究进展

直径大小通过径阶形式表达, 其大小分布对于林分特征表达至关重要, 如蓄积、断面积和林分株数等。直径大小和径阶分布范围与林分蓄积密切相关, 因此, 直径分布模拟对于预测未来林分的收获和对比不同的森林经营方案所产生的结果具有重要意义。准确描述林分结构模拟林分发展对于制定森林管理计划显得很重要^[15], 并且一定时期直径大小径阶、林分密度、胸径、树高和材积等林分结构特征信息对于森林管理者具有重要参考价值。因此, 林分直径结构模型历来就成为国内外林学家关注和研究的重点。直径分布模型用来提供胸高直径的频率分布信息^[16], 有许多不同的理论概率密度方程都被用来描述森林的直径分布, 如正态分布^[17]、对数正态分布^[18]、Jonson's S B^[19-20]和 Weibull 分布^[21-22], 表 1 列出了常见的直径结构模型方程及其扩展模型。

近年来, Weibull 分布用的最为普遍^[23-28], 如 Sarkkola^[29]用 Weibull 方程来分析欧洲赤松 *Pinus*

表1 林分直径结构模型

Table 1 Structure of the stands in diameter

概率密度函数	说明
正态分布函数 $F(x) = 1/(\sqrt{2\pi} \cdot \delta) \exp(-((x - \bar{x})^2)/(2\delta^2))$	x 和 \bar{x} 为直径实测值与平均值。 δ 为直径 x 的标准差。
β 分布函数(Zohrer, 1972) $F(x) = x^{a-1}(1-x)^{b-1}/\beta(a,b)$	a, b 为形状参数, $0 \leq x \leq 1$ 。
Weibull 分布函数(Bailey, 1973) $F(x) = 1 - \exp(-(\frac{x-a}{b})^c)$	$a \geq 0$; $b, c > 0$; a 为位置参数 (直径分布最小径阶下限值); b 为尺度参数; c 为形状参数。
对数正态分布函数(Bliss and Reinker, 1964) $F(x) = 1/(\sqrt{2\pi} c) \exp(-(\log(x) - b)^2/(2c^2))$	b 为变量 $\log(x)$ 的数学期望值, c 为随机变量 $\log(x)$ 的标准差。
负指数分布函数(Meyer H A, 1952) $Y = ke^{-ax}$	Y 为每个径阶的林木株数, x 为径阶, e 为自然对数的底, a 和 K 为表示直径分布特征的常数, 其中 a 为林木株数在连续的径阶中减小的速率, K 为林分的相对密度。
倒 J 形对数函数(陆元昌, 2005) $N = \exp(a \cdot e^{(-bD)})$	N 为株数·hm ⁻² , D 是林木胸径; a 和 b 为模型参数; 对大径阶株数估计精确, 但径阶间隔需大到至少包含 1 株林木。
限定线函数(Reineke, 陆元昌) $N_{\max} = \alpha_0 D_g^{\alpha_1}$	N_{\max} 是活立木的最大株数·hm ⁻² , D_g 是平方平均直径, α_0 和 α_1 是模型参数。
Logistic 方程(Verhulst; 惠刚盈, 盛炜彤, 1995) $F(x) = C/(1 + e^{p-qx})$	设株数相对累积频率为 F , x 为直径, a, b, c 为参数, $C, P > 0$, C 为 $F(x)$ 的上渐近值, P 为与 $F(x)$ 初值有关的参数, q 指内秉生长率。
Gompertz 方程(Benjamin Gompertz, 1825; 吴承祯, 1998) $F(x) = K \exp(-e^{a-bx})$	$K, a, b (K > 0, b > 0)$; 其中 K 为 $F(x)$ 的上渐近值, a 为与 $F(x)$ 初值有关的参数, b 指内秉生长率。
Richards 方程(Richards, 1959) $F(x) = A [(1-b)e^{kx}]^{\frac{1}{1-m}}$	$A, b, k, m; A, k, m > 0$; A 为 $F(x)$ 的最终值, 即上渐近值; b 决定 $x=0$ 时的生长因子的大小, 参数 m 决定曲线形状及拐点的位置, 参数 k 则与生长速度有关。适合描述林分整个生命过程。
史纳德生长模型(Schnute, 1981) $Y_t = [y_1^b + (y_2^b - y_1^b)(1 - e^{-a(t-T_1)}) / (1 - e^{-a(T_2-T_1)})]^{1/b}$	T_1 为生长期间的初始年龄; T_2 为生长期间结束时的年龄; y_1 为年龄为 T_1 时的生物体大小; y_2 为年龄为 T_2 时的生物体大小; a 为生长速率的加速度常数; b 为生长速率的加速度生长参数。

sylvestris 生长在泥炭地中的林分, 描述其 29~66 年生的林分中, 林分结构的变化情况。这主要是因为 Weibull 分布函数能清楚直观地解释其参数意义, 灵活地适应各种形状和偏斜度, 参数预估相对简单以及它的累积分布函数的闭合性^[21]。亢新刚等^[11]针对长白山金沟岭林场的云杉冷杉针阔混交林为研究对象, 表明 Weibull 分布与负指数分布均能较好描述过伐林区针阔混交林的直径结构。Gul 等^[12]则用负指数直径分布和 Sterba's 修正竞争密度原则对异龄林林分直径分布进行计算研究。然而, 目前这么多情况, 没有一个明确的解决办法来说明哪一个模型最适合于林木分布模型。可能的情况就是经验上存在某一个最优模型能给出最大的适应度。因此, 通过比较大量的分布模型, 根据它们在林分直径分布中所代表的分布形式来选择最佳的分布方程或者针对已有方程进行一些参数上的改进, 有助于提高模型模拟的精度水平。如毕晓丽等^[30]提出用改进单纯形法估计 Weibull 分布及其变型模型的参数, 其拟合效果优于传统的拟合方法, 说明拟合方法的选择比改变其形式更重要, 改进单纯形法, 丰富了 Weibull 分布参数估计方法, 提高了其拟合效果。

1.3 其他拟合方法

此外, 除了概率密度函数和理论生长方法, 还有联立方程组法和最相似回归法等均被用来描述林分直径结构模型。这些方法各有其优缺点, 在不同的林分类型和立地条件下有其适用的地方。近年来, 随着相关边缘学科的发展及对模型适应性需求的提高, 不同的数学建模方法正在运用到林分直径

分布模拟研究之中, 使得林分直径结构模型呈现出多样化的发展趋势。

Liu 等^[31]和 Zasada 等^[32]提出有限混合模型, 对于 Weibull 分布具有一定的补充作用。有限混合模型用来描述混交林分直径分布, Liu 等的研究表明, 有限混合模型是模拟多树种混交林分的一种可选择的方法。Zhang 等^[33]采用两参数 Weibull 分布建立了有限混合分布模型研究了旋转“S”形直径分布的异龄老龄林直径分布特征。旋转“S”形就是树干密度与直径曲线, 从中部位置平滑过来后, 在大径阶部分有个陡峭下降过程。王顺忠等^[34]也成功应用 Weibull 混合模型模拟长白山阔叶红松 *Pinus koraiensis* 林“S”型径级分布。未来的林分模型将向混合模型的方向发展, 用以解决森林生产经营实践中的问题^[35]。随着相关学科的发展以及对模型适应性需求的提高, 林木直径分布模拟预测模型正呈多样化发展趋势。

2 林分空间结构研究进展

非空间指数从林分水平结构、垂直结构和物种多样性来描述传统的森林生长与收获模型, 如林分直径结构充分反映了林分的特征, 然而它们忽略了林分内树种的大小和空间分布等参数变量^[3], 不能提供精确的空间信息而存在缺陷。林分空间结构则能提供与林木空间位置有关的空间信息特征。森林空间结构指的是同一森林群落内物种的空间关系, 即林木的分布格局及其属性在空间上的排列方式^[36]。林分空间结构决定了树木之间的竞争优势及其空间生态位, 在很大程度上影响着林分生长、发育和稳定性, 同时它也决定林分非空间结构。林分空间结构也被认为是决定生境和物种多样性的重要因子, 比非空间结构更重要。因此, 林分空间结构分析已成为目前国际上天然林经营模拟技术的主要研究内容。所有描述林分空间结构的方法都把林木位置考虑进来。如用于描述空间指数的指标有象限数和距离指数。近来, 一些新的指数的发展也都是基于最近邻体数学方法而提出来的。这些指数描述了每个森林林分的结构特征——如位置、混交和相互独立性, 并且这些指标还深入表达了林分结构的发展动态变化过程。针对林分分布格局的调查方法大致有 3 类: 统计调查样地内小样方的株数分布; 量测任意树木到其最近邻体的距离; 每木定位林分内林木坐标位置点图。与调查方法相应的方法有样方法^[37]、距离法和角度法^[36-39]。现在还有人用地统计学方差图(variogram)方法^[9]来研究空间格局分布。

2.1 样方法

其中, 样方法中又有频次检验法(包括泊松分布, 负二项分布)^[40-41], 方差均值比率法, 负二项参数 K 值, 丛生指标, 扩散型指数 I_s , 平均拥挤度和聚块性指标, Cassie 指标, 分布型指数法(单指标方法, 多指标回归分析法)等。关玉秀等^[41]研究了样方法在林分空间格局研究中的应用。利用定位标准地的资料, 对非自然样方下测定空间格局的小样方面积进行了比较试验, 提出了测定空间格局效果最好的小样方面积。应用样方法中的 9 种常用分布型和 7 种分布型指数, 研究了大兴安岭林区落叶松天然林的林分空间格局, 选出了适合此项研究范围的理论分布型, 用扩散型指数 I_s 、聚块性指数 G 和 Iwao 指数研究了林分空间格局的个体聚集规模、个体群的分布规律、林分空间格局的时间动态以及林分空间格局变化与其他林分结构因子之间的关系等。样方法只能分析一种尺度(样方大小一致)下的分布格局, 所得出的结果与实际的群落结构偏差较大。

2.2 最近距离指数方法

林分空间结构指数即为描述林分空间结构的数量指标, 如竞争指数、空间分布格局指数, 混交度等。距离法中有 T 型距离取样法, 中心点四分法检验, 独占圆、均匀度和角尺度等。距离指数更适合于描述(相对)空间格局。一些常见的距离指数列于表 2, 计算分隔指数的基本变量见表 3^[3,38,42]。

最近邻体指数的主要优势在于能够检测出林分结构的微小变化, 对于定量化 3 种林分结构格局随机分布、聚集分布和均匀分布, 计算容易并易于解释。另外, 惠刚盈等^[38,43-44]提出角尺度、大小比数和混交度后, 对于定量地描述林分的空间结构, 借以进行林地的可持续经营和生态管护无疑起到了很好的作用。许多学者对此方法进行了不同的应用研究, 角尺度参数能量化林木分布的均匀性(即空间分布格局), 大小比数能测度树木间的优势度分化, 也为种群在林分中的相对地位提供了有益的信

表2 距离分布格局指数

Table 2 Nearest-neighbor indices of distribution patterns

分布格局指数	说明
位置指数(Clark and Evans, 1954)	
位置指数 = $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$ $0.5(\frac{A}{N})^{1/2} + 0.0514 \frac{P}{N} + 0.041 \frac{P}{N^{3/2}}$	r_i 为树 i 和与其相邻最近的树 j 的距离, N 为样地内总株数; A 为样地面积(单位 m^2), P 为样地周长(单位 m); 位置指数 < 1 为集群分布; 位置指数 > 1 为均匀分布; 位置指数最大值为 2.149 1。
空间分隔指数(Pielou, 1977)	空间分隔指数 > 0 时表示出现空间分隔; 空间分隔指数 $= 0$ 时表示 2 个物种相互独立; 空间分隔指数 < 0 时表示物种间相互吸引。表 4 中概括了树种和其最近木间的变量关系。
混交度(Von Gadow, 1993)	当树 i 与之相邻树 j 为同一树种时 $V_{ij} = 0$; 反之 $V_{ij} = 1$ 。
树高差异指数(Von Gadow, 1993)	H_j 为树 j 的树高; H_i 为树 i 的树高。
树高差异指数 = $\frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 [1 - \frac{\min(H_i, H_j)}{\max(H_i, H_j)}]$	
角尺度(惠刚盈等, 1999)	N 为样地内树木株数; n 为相邻木的株数; 当第 i 株树的第 j 个 a_i 角小于标准角 a_0 时, $Z_{ij} = 1$; 否则 $Z_{ij} = 0$ 。对于人工林, $n = 4$, 角尺度 ≥ 0.6 为集群分布, 角尺度 < 0.5 为均匀分布。
角尺度 = $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n Z_{ij}$	

息, 而混交度则通过参照树周围最近的几株相邻木与其不同种个体所占的比例, 来表征林分的物种多样性。近年来针对角尺度、大小比数和混交度在现实森林经营实践中的应用越来越广泛^[45-46]。角尺度与其他指数相比, 它的主要优点是不用测距离, 采用样线法即仅需调查样线上或距样线最近的角尺度就可以获得分布信息, 从而得到林木在地域上的分布格局, 但它不能准确地说明均匀、随机或集群的程度。

2.3 空间统计方法

深入了解森林林分结构是理解森林生态系统结构和功能的首要任务。比起最近距离指数, 地统计学方法方差图分析对于数据的存在与否要求更复杂, 并且要求更多的输入数据, 但是在数字、影响和结构幅度上提供了额外的信息, 如结构幅度竞争和管理等。基于空间统计方法的林分直径结构描述可以分为 2 类^[3]: ①点格局分析; ②表面格局分析或地统计学。前者直接用于空间点格局过程, 因此经常在林分中讨论^[47-50]。大部分的点格局分析结果都能用地统计技术进行分析, 该方法有其优越性, 如极大可能地使模型适应经验第二排序特征、克里格、或随机模拟。

2.3.1 空间点格局分析 植物种群在群落中的分布格局与空间尺度有密切关系, 传统的样方取样及其格局分析方法只能分析一种尺度下的格局, 而点格局分析方法, 它是以种群空间分布的坐标点图为基础, 分析各种尺度下的种群格局和种间关系。在对样地内每木定位后, 可以用 Ripley's $K(t)$ 点格局分析其空间自相关性^[51]。Ripley's $K(t)$ 函数定义为:

$$K(t) = A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\delta_{ij}(t)}{n^2}; i \neq j. \quad (2)$$

式(2)中 A 是样地面积, t 是距离尺度, n 为树木株数, δ_{ij} 为树 i 与树 j 间的距离。我们使用平方根转换 $L(t)$, 它能使 $K(t)$ 函数线性化并使变量保持稳定性, 并在随机分布下使假设接近于 0^[51]:

表3 计算分隔指数的基本变量

Table 3 Contingency table, defining values for calculation of segregation index of Pielou(S) for the tree species A and B

		最近相邻木株数		
		树种 A	树种 B	合计
树种 A	a	b	m	
树种 B	c	d	n	
合计	v	w	N	

$$L(t) = \sqrt{\frac{K(t)}{\pi}} - t \quad (3)$$

因此，用 Monte-Carl 检验拟合上下包迹线(envelopes)。对于聚集分布， $L(t)$ 大于包迹线；对于随机格局， $L(t)$ 在包迹线内；规则分布在包迹线之下。对于林分空间格局的研究，应用 Kipley's 点格局分析方法，国内外开展的较多^[52-54]。因它能更好地说明森林林分的动态变化及其相互影响。如日本很多学者就对林分的空间格局进行了各个方法的研究，Yasuhiro 等^[55]就用单变量和双变量空间分析方法，其中主要是 Kipley's 点格局分析方法，研究了日本北部北海道针叶林和落叶阔叶林的 10 a 间 的空间格局动态变化。Motta 和 Edouard^[50]用空间格局分析研究意大利皮德蒙特高原(美国阿巴拉契亚与大西洋沿岸平坦的高原地带)苏萨山谷上部混交复层森林分结构和动态，其研究结果表明所有林木都呈聚集分布，包括全林分和分树种的挪威云杉 *Picea abies* 和欧洲冷杉 *Abies alba* 分布。Youngblood 等^[56]利用 Ripley's $K(d)$ 函数对北部加利福尼亚州和俄勒冈州松树老生长(old-growth)林分的结构研究，用水平和垂直结构属性的量化评价，以此作为该地区森林恢复的指导原则。李法胜^[57]在其博士论文中利用点格局研究了美国缅因州西北部云杉冷杉林分空间结构，最后把空间模型与传统的生长收获模型相结合起来，使得更新后的生长与收获模型能为森林经营研究者提供更有效的空间信息。侯向阳等^[58]应用 Ripley's $K(t)$ 函数研究了长白山红松林主要树种以及不同年龄级格局分布的动态。张春雨等^[59]对长白山红松阔叶林群落分别树种、幼树、大树及其相互间的空间格局进行分析。吕林昭等^[60]用点格局分布，分析了长白山落叶松 *Larix olgensis* 人工林与天然林木混交的林分空间结构，表明入侵的天然树种呈现明显的聚集分布，落叶松除 15 m 时的聚集分布外，均呈现显著的随机分布，林分整体呈现小尺度的聚集分布，在大尺度下呈随机分布。因此，研究认为空间点格局方法是一种研究空间格局比较好的方法。按照种群内个体的聚集程度和方式，种群分布格局一般可分为随机分布、均匀分布和集群分布 3 种分布型。种群空间分布格局与尺度紧密相关。传统的格局分析方法^[61]：如方差均值比率法、负二项参数 K 值、丛生指标、扩散型指数 I_8 等，一般只能分析一种尺度(样方大小一致)下的分布格局，所得出的结果与实际的群落结构偏差较大。点格局分析法能够分析各种尺度的种群格局，在很大程度上克服了传统样方法中不能全面反映种群的分布类型与空间尺度之间关系的不足，在拟合分析的过程中检验能力较强，因此，目前点格局分析法已成为分析种群的分布格局最常用的分析方法。

2.3.2 空间统计方差图分析 地统计学方法(geostatistic)是一系列检测、模拟和估计变量在空间上的相关关系和格局的统计方法。它被用来研究空间上分布连续的变量，也叫做区域性变量。地统计的基本原理是区域变量 Z 随着样点间距离的增加，区域变量间 Z 值间的关系将降低。方差图^[62](variogram，又叫变异函数、变异距或变异函数分析)是地统计学中的一个重要组成部分。其主要用途之一就是描述和识别空间格局的空间结构。它以区域化变量理论为基础，分析自然现象空间变异和空间相关的地统计学方法，它的相关参数具有明确的生态学意义，可以用于分析生物特征的空间异质性尺度。大量生态学研究证明，变异函数是描述空间数据的有效方法。其定义为：设 $Z(x)$ 为区域化随机变量，满足二阶平稳条件^[63]， h 为 2 个样本点间分隔距离或滞后距离， $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 的观测值 [$i = 1, 2, \dots, N(h)$]，则变异函数的计算公式为：

$$r(h) = \frac{1}{2} \text{var}[Z(x) - Z(x_i + h)] = \frac{1}{2} E[\{Z(x) - Z(x_i + h)\}^2] \quad (4)$$

其估计值为：

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_j) - Z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

式(4)(5)中， $N(h)$ 是分隔距离为 h 时的样本对总数， $r(h)$ 有 4 个特征参数：基台值 s (sil1)、变程 a (range)、块金值 C_0 (nugget) 和 分维数 D (fractaldimension)。对于不同的空间分隔距离 h ，计算出相应的 $r(h)$ 值来，再分别以 h 为横坐标， $r(h)$ 为纵坐标，画出变异函数曲线图，变异函数图拟合模型可以定量地确定出研究对象的空间自相关性，也即反映出统计意义上某个变量在不同尺度上的异质性，如林分内不同大小树木间相互关系。Kuuluvainen 等^[64]就分析老龄林和经营林分中林木大小间的方

差图。Biondi 等^[65]研究全天然状况下森林方差图的长期变化过程。Grushechy 等^[66]通过方格上统计得来的林冠覆盖和更新数据，计算了方差图指标。近年来，方差图分析已经被用来描述植被、土壤养分、生物量分布及其他林学特征的空间格局，并且检测和定量化这些格局出现的尺度^[67]，如王政权等^[68]用地统计学理论和方法分析东北红松老龄林中主要树种空间异质性与格局在一定尺度上的差异，反映了紫椴 *Tilia amurensis*，云杉、冷杉和枫桦 *Betula castana* 等树种在生态系统中不同的生态学功能和过程。

3 讨论

不同的模型其拟合参数求解不一样会导致模型拟合精度产生差异。比如正态分布的拟合参数求解是精确的，而 Weibull 分布的参数估计是近似的，并且其参数估计方法很多，如最大似然法、矩法、百分位法、回归法和遗传算法等，都是为了实现参数的最优拟合。目前林分直径结构模拟研究工作已取得重大进展，许多林学家也应用新的理论和方法，对原有经典模型做了一些参数改进或提出新的模拟方程。这些研究工作都为了寻求描述林分直径分布的最佳方法，但目前还没有一个林分结构模型或指标能包括所有成分。各种林分结构模型的拟合结果都会差不多，只要是适合的模型就可以表达数据的统计分布特征，但是模型精度高低关键在于材料，突破在于不同的拟合方法之间的组合。今后的直径结构模型将向综合性、混合模型方向发展，达到使模型的适用范围更加广泛，因此，模型和指标的研究仍需继续。

另一方面，虽然林分空间分布格局的表达方式较多，存在着混交、竞争和林分水平分布格局等指数，且林分空间结构指数的研究已十分广泛，但多数研究把林分空间结构指数用于描述林分空间结构状况或进行不同指数的比较。事实上，研究林分空间结构的最终目的是在森林经营中，未来研究把林分空间结构信息和林分直径模拟研究相结合起来，采取合理经营措施调控林分结构，使之趋于理想结构状态，以充分发挥森林的多种功能。

参考文献：

- [1] 张建国, 段爱国, 童书振. 林分直径结构模拟与预测研究概述[J]. 林业科学, 2004, 17 (6): 787 - 795.
ZHANG Jianguo, DUAN Aiguo, TONG Shuzhen. Review on the modeling and prediction of stand diameter structure[J]. *For Res*, 2004, 17 (6): 787 - 795.
- [2] 惠刚盈, 克劳斯·冯佳多. 德国现代森林经营技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 119 - 134.
- [3] KINT V, MEIRVENNE M V, NACHTERGAELE L, et al. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: a comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis [J]. *For Sci*, 2003, 49 (1): 36 - 49.
- [4] 李贵祥, 施海静, 孟广涛, 等. 云南松原始林群落结构特征及物种多样性分析[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24 (4): 396 - 400.
LI Guixiang, SHI Haijing, MENG Guangtao, et al. Community structural properties and species diversity in primary *Pinus yunnanensis* forest [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2007, 24 (4): 396 - 400.
- [5] 沈琪, 张骏, 朱锦茹, 等. 浙江省生态公益林植被恢复过程中物种组成及多样性的变化[J]. 生态学报, 2005, 25 (9): 2131 - 2138.
SHEN Qi, ZHANG Jun, ZHU Jinru, et al. Changes of species composition and diversity in the restoration processes of ecological public-welfare forests in Zhejiang, East China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25 (9): 2131 - 2138.
- [6] 雷相东, 张会儒, 李冬兰, 等. 东北过伐林四种森林类型的物种多样性比较研究[J]. 生态学杂志, 2003, 22 (5): 47 - 50.
LEI Xiangdong, ZHANG Huiru, LI Donglan, et al. Comparison of plant species diversity of four forest types in overlogged forest area in Northeastern China [J]. *Chin J Ecol*, 2003, 22 (5): 47 - 50.
- [7] LEXEROD N L, EID T. An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning [J]. *For Ecol Manage*, 2006, 222: 17 - 28.
- [8] SOLOMON D S, GROVE J H. Effects of uneven-aged management intensity on structural diversity in two major forest types in New England [J]. *For Ecol Manage*, 1999, 114: 265 - 274

- [9] 张治国. 生态学空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] 于政中. 森林经理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 48 – 52.
- [11] 亢新刚, 胡文力, 董景林, 等. 过伐林区检查法经营针阔混交林林分结构动态 [J]. 北京林业大学学报, 2003, **25** (6): 1 – 5.
KANG Xingang, HU Wenli, DONG Jinglin, et al. Forest structure dynamics of coniferous-broad leaved mixed forests by management of control method in over-logged forest region [J]. *J Beijing For Univ*, 2003, **25** (6): 1 – 5.
- [12] GUL A U, MISIR M, MISIR N, et al. Calculation of uneven-aged stand structures with the negative exponential diameter distribution and Sterba's modified competition density rule [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **214**: 212 – 220.
- [13] GOODBURN J M, LORIMER C G. Population structure in old-growth and managed northern hardwoods: an examination of the balanced diameter distribution concept [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **118**: 11 – 29.
- [14] HAO Qingyu, ZHOU Yuping, WANG Lihai, et al. Optimization models of stand structure and selective cutting cycle for large diameter trees of broadleaved forest in Changbai Mountain [J]. *J For Res*, 2006, **17** (2): 135 – 140.
- [15] LAURI M. An algorithm for ensuring compatibility between estimated percentiles of diameter distribution and measured stand variables [J]. *For Sci*, 2004, **50** (1): 20 – 32.
- [16] LIU Chuangmin, ZHANG S Y, LEI Yuancai, et al. Evaluation of three methods for predicting diameter distributions of black spruce (*Picea mariana*) plantations in central Canada [J]. *Can J For Res*, 2004, **34** (12): 2424 – 2432.
- [17] 韩东锋, 钱拴提, 孙丙寅, 等. 油松飞播林直径结构规律研究[J]. 西北林学院学报, 2008, **23** (5): 182 – 187.
HAN Dongfeng, QIAN Shuanti, SUN Bingyin, et al. Regularities of diameter structure of aerial *Pinus tabulaeformis* afforestation[J]. *J Northwest For Univ*, 2008, **23** (5): 182 – 187.
- [18] BLISS C I, REINKER K A. A lognormal approach to diameter distributions in even-aged stands[J]. *For Sci*, 1964, **10** (3): 350 – 360.
- [19] HAFLEY W L, SCHREUDER H T. Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands [J]. *Can J For Res*, 1977, **7**: 481 – 487.
- [20] WANG Mingliang, RENNOLLS K. Tree diameter distribution modelling: introducing the logit-logistic distribution [J]. *Can J For Res*, 2005, **35**: 1305 – 1313.
- [21] BAILEY R L, DELL T R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function [J]. *For Sci*, 1973, **19** (2): 97 – 104.
- [22] 姜磊, 陆元昌, 廖声熙, 等. 滇中高原云南松林分直径结构研究[J]. 林业科学研究, 2008, **21** (1): 126 – 130.
JIANG Lei, LU Yuanchang, LIAO Shengxi, et al. A study on diameter structure of Yunnan pine forest in the plateaus of mid-Yunnan Province [J]. *For Res*, 2008, **21** (1): 126 – 130.
- [23] 孟宪宇. 测树学[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 1996: 74 – 80.
- [24] 孟宪宇. 使用 Weibull 函数对树高分布和直径分布的研究[J]. 北京林业大学学报, 1988, **10** (1): 40 – 48.
MENG Xianyu. A study of the relation between D and H distribution by using the Weibull function [J]. *J Beijing For Univ*, 1988, **10** (1): 40 – 48.
- [25] 洪利兴, 杜国坚, 张庆荣, 等. 天然常绿阔叶异龄幼林胸径的 Weibull 分布及动态预测[J]. 植物生态学报, 1995, **19** (1): 29 – 42.
HONG Lixing, DU Guojian, ZHANG Qingrong, et al. Weibull DBH. distribution and their dynamic predictions in the natural uneven-aged evergreen broad-leaf juvenile forests [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1995, **19** (1): 29 – 42.
- [26] 刘君然, 赵东方. 落叶松人工林威布尔分布参数与林分因子模型的研究[J]. 林业科学, 1997, **33** (5): 412 – 417.
LIU Junran, ZHAO Dongfang. Weibull distribution parameters and stand factor model of larix plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 1997, **33** (5): 412 – 417.
- [27] 周春国, 余光辉, 吴富桢, 等. 用变型 Weibull 分布对热带雨林结构规律的研究[J]. 南京林业大学学报, 1998, **22** (4): 14 – 18.
ZHOU Chunguo, SHE Guanghui, WU Fuzhen. A study on the tropical rain forest stand structure with improved Weibull function [J]. *J Nanjing For Univ*, 1998, **22** (4): 14 – 18.
- [28] 周国模, 刘恩斌, 刘安兴, 等. Weibull 分布参数辨识改进及对浙江毛竹林胸径年龄分布的测度[J]. 生态学报, 2006, **26** (9): 148 – 156.
ZHOU Guomo, LIU Enbin, LIU Anxing, et al. The algorithm update of Weibull distribution parametric identification and its application on measuring the distribution of diameter and age of Moso bamboo forests in Zhejiang Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (9): 148 – 156.

- [29] SARKKOLA S, HOKKA H, PENTTILA T. Natural development of stand structure in peatland Scots pine following drainage: Results based on long-term monitoring of permanent sample plots [J]. *Silv Fennica*, 2004, **38** (4): 405–412.
- [30] 毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 等. 改进单纯形法在林分结构规律研究中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2002, **24** (1): 94–98.
- BI Xiaoli, HONG Wei, WU Chengzhen, et al. The application of modified simplex method in the study on stand structure [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2002, **24** (1): 94–98.
- [31] LIU Chuangmin, ZHANG Lianjun, DAVIS C J, et al. A finite mixture model for characterizing the diameter distributions of mixed species forest stands [J]. *For Sci*, 2002, **48** (4): 653–661.
- [32] ZASADA M, CIESZEWSKI C J. A finite mixture distribution approach for characterizing tree diameter distribution by natural social class in pure even-aged Scots pine stands in Poland [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **204** (2–3): 145–158.
- [33] ZHANG Lianjun, GOVE J H, LIU Chuangmin, et al. A finite mixture of two Weibull distributions for modeling the diameter distributions of rotated-sigmoid, uneven-aged stands [J]. *Can J For Res*, 2001, **31** (9): 1654–1659.
- [34] 王顺忠, 王飞, 张恒明, 等. 长白山阔叶红松林径级模拟研究——林分模拟[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28** (5): 22–27.
- WANG Shunzhong, WANG Fei, ZHANG Hengming, et al. Modeling the diameter distribution of forest stands of broadleaved-Korean pine mixed forests on the Changbaishan Mountain Forest stand modeling [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (5): 22–27.
- [35] MATHIEU F, CHHUN U, LOUIS A, et al. Calibrating a generalized diameter distribution model with mixed effects [J]. *For Sci*, 2006, **52** (6): 650–658.
- [36] 惠刚盈, 冯佳多. 森林空间结构量化分析方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 170–173.
- [37] 孙洪志, 石丽艳. 沙地樟子松的空间分布格局[J]. 东北林业大学学报, 2005, **33** (1): 93–94.
- SUN Hongzhi, SHI Liyan. Spatial distribution pattern of scotch pine in sandy area [J]. *J Northeast For Univ*, 2005, **33** (1): 93–94.
- [38] 惠刚盈, Von GADOW K, ALBERT M. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数 [J]. 林业科学, 1999, **35** (1): 37–42.
- HUI Gangying, Von GADOW K, ALBERT M. The neighbourhood pattern—a new structure parameter for describing distribution of forest tree position [J]. *Sci Silv Sin*, 1999, **35** (1): 37–42.
- [39] 李明辉, 何风华, 刘云, 等. 林分空间格局的研究方法[J]. 生态科学, 2003, **22** (1): 77–81.
- LI Minghui, HE Fenghua, LIU Yun, et al. Analysis methods of stand spatial distribution pattern [J]. *Ecol Sci*, 2003, **22** (1): 77–81.
- [40] 李俊清. 阔叶红松林中红松的分布格局及其动态[J]. 东北林业大学学报, 1986, **14** (1): 33–38.
- LI Junqing. The pattern and dynamics of *Pinus koraiensis* population [J]. *J Northeast For Univ*, 1986, **14** (1): 33–38.
- [41] 关玉秀, 张守攻. 样方法及其在林分空间格局研究中的应用[J]. 北京林业大学学报, 1992, **14** (2): 1–10.
- GUAN Yuxiu, ZHANG Shougong. Plot method and its application in stand spatial distribution patterns [J]. *J Beijing For Univ*, 1992, **14** (2): 1–10.
- [42] CLARK J, EVANS F C. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations [J]. *Ecology*, 1954, **35**: 445–453.
- [43] 惠刚盈, Von GADOW K, ALBERT M. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学, 1999, **12** (1): 1–6.
- HUI Gangying, Von GADOW K, ALBERT M. A new parameter for stand spatial structure—neighbourhood comparison [J]. *For Res*, 1999, **12** (1): 1–6.
- [44] 惠刚盈, 胡艳波. 混交林树种空间隔离程度表达方式的研究[J]. 林业科学, 2001, **14** (1): 23–27.
- HUI Gangying, HU Yanbo. Measuring species spatial isolation in mixed forests [J]. *For Res*, 2001, **14** (1): 23–27.
- [45] 范少辉, 张群, 沈海龙. 次生林内红松幼树的恢复及其状况的量化表达[J]. 林业科学, 2005, **41** (1): 71–77.
- FAN Shaohui, ZHANG Qun, SHEN Hailong. Recovery and its quantitative expression of the planted young trees of *Pinus koraiensis* under natural secondary forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41** (1): 71–77.
- [46] 郑丽凤, 周新年, 江希钿, 等. 松阔混交林林分空间结构分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, **14** (4): 275–280.
- ZHENG Lifeng, ZHOU Xinnian, JIANG Xidian, et al. Analysis of the stand spatial structure of *Pinus massoniana* – broadleaved mixed forest [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2006, **14** (4): 275–280.

- [47] FAJARDO A, GOODBURN J M, GRAHAM J. Spatial patterns of regeneration in managed uneven-aged Ponderosa pine/Douglas-fir forests of Western Montana, USA [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **223**: 255 – 266.
- [48] CHEN Jiquan, BRADSHAW G A. Forest structure in space: a case study of an old growth spruce-fir forest in Changbaishan Natural Reserve, P. R. China [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **120**: 219 – 233.
- [49] ANTOS J, PARISH R. Dynamics of an old-growth, fire-initiated, subalpine forest in southern interior British Columbia: tree size, age, and spatial structure [J]. *Canadian J For Res*, 2002, **32**: 1935 – 1946.
- [50] MOTTA R, EDOUARD J L. Stand structure and dynamics in a mixed and multilayered forest in the upper Susa Valley, Piedmont, Italy [J]. *Canadian J For Res*, 2005, **35** (1): 21 – 36.
- [51] RIPLEY B D. Modelling spatial patterns [J]. *J Royal Statist Soc: B*, 1977, **39**: 17 – 21.
- [52] 汤孟平. 森林空间经营理论与实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [53] 张赟, 张春雨, 赵秀海, 等. 长白山次生林乔木树种空间分布格局[J]. 生态学杂志, 2008, **27** (10): 1639 – 1646. ZHANG Yun, ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai, et al. Spatial distribution pattern of tree species in a secondary forest in Changbai Mountain [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27** (10): 1639 – 1646.
- [54] 牛丽丽, 余新晓, 岳永杰. 北京松山自然保护区天然油松林不同龄级立木的空间点格局[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (7): 1414 – 1418. NIU Lili, YU Xinxiao, YUE Yongjie. Spatial patterns of different age-class individuals in *Pinus tabulaeformis* forest in Songshan Nature Reserve of Beijing, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (7): 1414 – 1418.
- [55] YASUHIRO K, HIROYUKI K, KENICHIRO S. Spatial pattern dynamics over 10 years in a conifer/broadleaved forest, northern Japan [J]. *Plant Ecol*, 2007, **190**: 143 – 157.
- [56] YOUNGBLOOD A, MAX T, COE K. Stand structure in eastside old-growth ponderosa pine forests of Oregon and northern California [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **199**: 191 – 217.
- [57] LI F. *Analysis on the Spatial Structures of Spruce-fir Stands in Northwest Maine* [D]. New York: State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, 2004.
- [58] 侯向阳, 韩进轩. 长白山红松林主要树种空间格局的模拟分析[J]. 植物生态学报, 1997, **21** (3): 242 – 249. HOU Xiangyang, HAN Jinxuan. Simulation analysis of spatial patterns of main species in the Korean-pine broadleaved forest in Changbai Mountains [J]. *Acta Phytocol Sin*, 1997, **21** (3): 242 – 249.
- [59] 张春雨, 赵秀海, 王新怡, 等. 长白山自然保护区红松阔叶林空间格局研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(增2): 45 – 51. ZHANG Chunyu, ZHAO Xiuhai, WANG Xinyi, et al. Spatial pattern and canopy structure of Korean pine broadleaved forests in Changbaishan Mountains [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (supp 2): 45 – 51.
- [60] 吕林昭, 亢新刚, 甘敬. 长白山落叶松人工林天然化空间格局变化[J]. 东北林业大学学报, 2008, **36** (3): 12 – 16. LÜ Linzhao, KANG Xingang, GAN Jing. Change in naturally spatial pattern of larch plantation in Changbai Mountains [J]. *J Northeast For Univ*, 2008, **36** (3): 12 – 16.
- [61] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [62] 李哈滨, 王政权. 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. LI Habin, WANG Zhengquan. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1998, **9** (6): 651 – 657.
- [63] 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.
- [64] KUULUVAINEN T, JARVINEN E, HOKKANEN T J, et al. Structure heterogeneity and spatial autocorrelation in a natural mature *Pinus sylvestris* dominated forest [J]. *Ecography*, 1998, **21**: 159 – 174.
- [65] BIONDI F, MYERS D F, AVERY C C. Geostatistically modelling stem size and increment in an old-growth forest [J]. *Can J For Res*, 1994, **24**: 1354 – 1368.
- [66] GRUSHECHY S T, FAJVAN M A. Comparison of hardwood stand structure after partial harvesting using intensive canopy maps and geostatistical techniques [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **114**: 421 – 432.
- [67] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 123 – 131.
- [68] 王政权, 王庆成, 李哈滨. 红松老龄林主要树种的空间异质特征与比较的定量研究[J]. 植物生态学报, 2000, **24** (6): 718 – 723. WANG Zhengquan, WANG Qingcheng, LI Habin. Characteristics and comparison of spatial heterogeneity of the main species of Korean pine in old growth forests [J]. *Acta Phytocol Sin*, 2000, **24** (6): 718 – 723.