

林分空间结构参数——角尺度的研究进展

王宏翔, 胡艳波*, 赵中华, 李远发

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:角尺度作为测度林木空间分布格局的林分空间结构参数之一, 具有检验能力强, 调查简单易行等优点, 现已得到了广泛应用。目前, 有很多研究对这一参数应用不当并因此得出不合理的结论, 究其原因是对角尺度理论基础缺乏了解。本文从角尺度概念的提出、相邻木个数的选择、标准角和随机分布阈值的确定、角尺度的应用等几个方面作详细阐述与总结, 并指出目前的研究方向为空间结构单元大小对角尺度分析的影响及如何利用点抽样调查数据对种群分布格局进行检验等。

关键词:林分空间结构; 林木分布格局; 角尺度; 相邻木个数; 标准角

中图分类号: S750

文献标识码: A

Progress in Stand Spatial Structure Parameter: The Uniform Angle Index

WANG Hong-xiang, HU Yan-bo, ZHAO Zhong-hua, LI Yuan-fa

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: As one of the stand spatial structure parameters, the uniform angle index is a measure of tree spatial distribution patterns. It has the advantages of excellent testing capabilities, simple survey method and has been widely applied. Because of lack of understanding about the theoretical basis, there are lots of researches on the improper application of this parameter and therefore draw unreasonable conclusions. This article elaborates and summarizes the proposal of the concept of the uniform angle index, choice of number of neighbors, determination of the standard angle and threshold value of random distribution and so on, and then points out that the directions of the current study are the influence on analysis of the uniform angle index by the changes of structure unit size and how to test population distribution pattern using point sampling data.

Key words: stand spatial structure; tree distribution patterns; uniform angle index; number of neighbors; standard angle

林分空间结构在很大程度上决定着林分当前的健康状态和未来的发展方向。随着近自然森林经营研究的深入和发展, 通过调整森林结构达到发挥森林多功能的理念越来越得到大家的认可^[1]。林木的空间分布格局作为森林空间结构的一个重要方面,

影响着林木之间的竞争、大小差异、更新、生长及死亡^[2-5], 因此, 描述及分析林木的水平分布格局状态也被认为是生态学的核心问题^[6]。

目前, 已发展了许多数量化表达林木分布格局状态的指数, 这些方法从不同的分析角度表达了林

收稿日期: 2013-01-29

基金项目: “十二·五”国家科技攻关计划(2012BAD22B03)

作者简介: 王宏翔(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向: 森林生长模拟. E-mail: wanghongxiang168@126.com

* 通讯作者: 博士, 助研, 研究方向: 森林经营. E-mail: hyanbo@caf.ac.cn

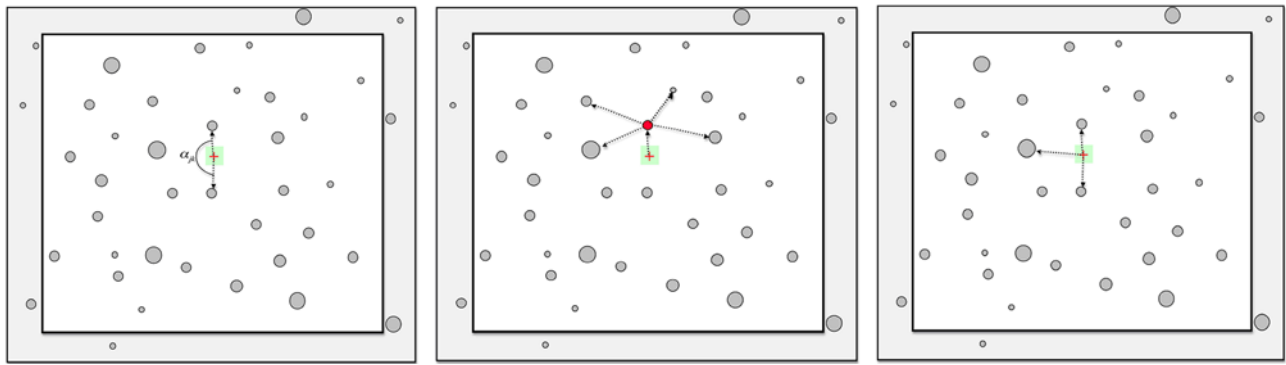
木的分布格局。大致可将这些研究方法分为样方法、距离法和角度法3类^[7]。最为经典的传统方法是样方法,如方差均值比率法、负二项参数、扩散型指数等,这些指数在具体的森林调查中容易获取,但是研究结果会随着样方大小的变化而变化。目前,国际上应用比较广泛的是距离法,如 Clark-Evans 指数、Ripley's $K(d)$ 函数(包括 O-ring 统计)、双相关函数等,这些方法消除了样方大小对检测结果的影响,但需要确定林木的具体位置或者测量参照树(参照点)与最近相邻木的距离,因此,调查工作比较复杂,增加了森林调查的成本。近年来,随着研究的深入,既不用测距又不需准确度量角度的角尺度方法逐步用于格局分布研究中,角尺度对复杂森林的空间结构有很强的解析能力,已经成为刻画森林空间结构的重要参数^[8-12],其优点除了直观的图形表达(与距离法中双相关函数和 Ripley 函数一样)外,还可用数值表达^[13-14]。角尺度操作方便、计算简单,同时它能够容易地融入到传统的森林调查中,因此,其应用前景广阔。

角尺度概念中涉及两个重要参数值的确定,即空间结构单元大小(参照树周围相邻木个数的多少)及判断参照树周围相邻木是否分布均匀的标准角的值,不同大小的结构单元都对应应有自己确定的标准角。惠刚盈等^[15]曾提出选取参照树及其周围4株最近相邻木(对应标准角为 72°)能够满足林分空间结构的分析,这一方法现在已成功应用于林分角尺度分析当中;然而,有学者认为,选取固定4株最近相邻木的分析方法并不是最合理的,如何选取合适相邻木仍需深入研究^[16]。由此,目前也出现了许多选取最近相邻木的不同方法来分析角尺度的研究^[17-22],其计算结果与之前选取固定4株相邻木的方法进行对比,发现二者计算的角尺度值之间并不一致,这也使对角尺度的应用陷入了混乱状态。究其原因,这些研究并未深入了解角尺度理论,当选取相邻木个数变化时标准角也在变化,把 72° 的标准角一成不变的应用于其他相邻木个数分析时并不能合理说明问题;再者,当相邻木为4株、标准角等于 72° 时,完全随机分布的林分角尺度值应该在0.5附近,选取其他个数的相邻木时计算的随机分布均值是否也在0.5左右,选取不同相邻木个数分析的角尺度值之间是否具有可比性目前并未有研究证实。本文

旨在对角尺度理论进行完整的梳理,包括理论基础、目前的应用和今后的发展,希望能够有助于人们恰当地应用角尺度方法。

1 角尺度概念的提出

人们通常将林木在二维空间中的分布抽象为点过程,或者说林木的空间分布位置可理解为具有 X、Y 坐标的点在笛卡尔坐标系中的分布。将这些点的分布格局可以简单的分为3种情况,即均匀分布、随机分布及团状分布。这样的分类同时也被认为过于简单,尤其在判定一些介于2种分布状态之间的现实林分时,应用不同的分析格局方法会产生不同的判定结果。因此,寻找一个具有优良性能的测度方法显得尤为重要^[14]。比较准确的方法是测量林分中所有林木的坐标后进行点格局分析,这种方法的缺点是调查成本昂贵,结合在日常的森林调查中不太合理^[23];另一类方法是通过测量参照点与周围最近相邻木间的距离来分析林木分布格局,其中的 T^2 法^[24]和其一些变型已被发现在检验林木分布是否符合随机分布时是一种良好的方法。Assunção^[25-26]认为,上述方法在调查过程中仍然需要花费大量的时间,尤其在一些地形陡峭的天然林中人为移动测量并不是很方便,因此,曾尝试不需要测量点与树之间的距离仅通过判断参照点与其最近2株相邻木之间的构成的夹角的大小是否在随机分布范围内来判断林分的分布格局,并将这种方法与距离法进行比较研究,并未发现有特别明显的优势,也始终没有将这一方法成功应用于林木分布格局判定中。Gadow 等^[27]提出了判断参照树和相邻木构成的夹角来分析分布格局的方法,并将最近相邻木增加至3株和4株,这样增加了更多的相邻木以及角度信息量,因此,在描述林木间的分布格局时准确性明显提高。此方法并非和 Assunção^[25]之前描述基于参照点与相邻木的关系的方法一样,该方法描述的是参照树与其周围相邻木间的关系(图1),Staupendahl 等^[23]曾对2种描述方法的不同之处作了详细的探讨,他认为基于参照点的方法在无样地抽样中描述更精确一些,但 Gadow 等^[28]同时也指出,基于参照树的描述方法能够体现出某一树种或具体每一棵树周围相邻木的分布信息,这在森林经营过程中更具有实践意义。



(a) Assunção^[25] (b) Gadow^[27] (c) Staupendahl^[23]
 (a)表示参照点与其最近 2 株相邻木构成的夹角;(b)表示距离抽样点最近的参照树与其周围最近 4 株相邻木构成的分析单元;
 (c)表示抽样点与其周围最近 3 株树构成的夹角。

图 1 参照点或参照树与其最近 n 株相邻木构成的分析单元

惠刚盈^[29]定义了标准角后提出了角尺度判断格局方法,他认为不需要准确测量相邻木间具体的角度,在实际调查中只需判断相邻木间的夹角与标准角的关系,统计相邻木间的夹角有多少比标准角小来定义该参照树的均匀性。通过对所有参照树的均匀性分析来评价全林分的林木分布特征。角尺度不需要具体的角度测量,使判断林木分布格局时更简洁,调查费用更低。当相邻木选择 4 株时角尺度的表达式为:

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (1)$$

式(1)中: $z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当第 } j \text{ 个 } \alpha \text{ 角小于标准角 } \alpha_0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

$W_i = 0$ 表示 4 株最近相林木在参照数周围分布特别均匀;而 $W_i = 1$ 则表示 4 株最近相林木在参照树周围分布特别不均匀或聚集。图 2 进一步明确给出了角尺度(W_i)的可能取值和意义。

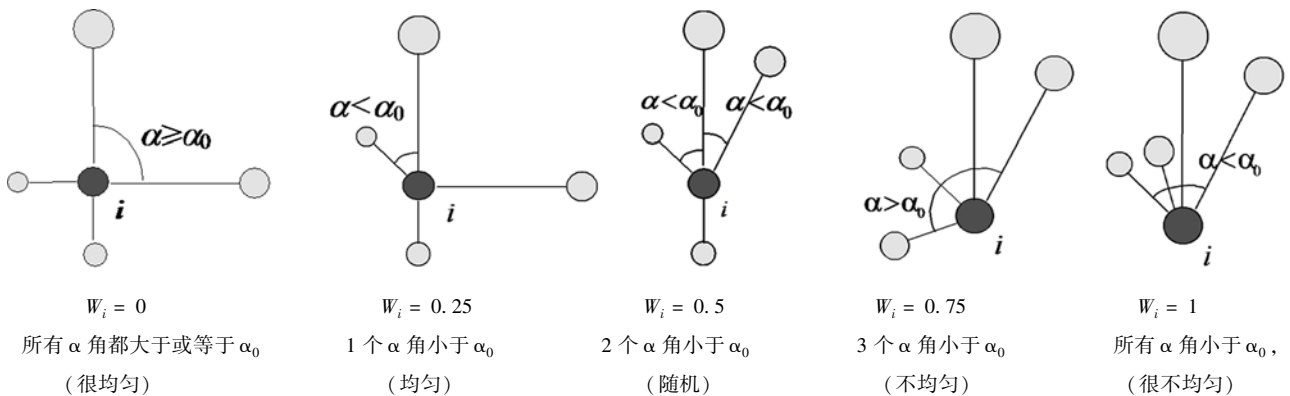


图 2 角尺度的可能取值及意义

W_i 值的分布能反映出—个林分中林木个体的分布格局,其分布的特征值,即均值(\bar{W})也就反映了一个林分的整体分布情况。均值(\bar{W})的计算公式为:

$$\bar{W} = \frac{1}{N} \sum_i^N W_i \quad (2)$$

2 角尺度中相邻木个数的选择问题

类似于单木竞争分析,在描述林分空间结构分析之前,首先要确定参照树或参照点周围相邻木的

个数。关于相邻木的选择已有许多方法,如固定半径法、胸高断面积法、狄利克雷单元法、影响域法等,上述几种方法中大多是根据不同参照树自身不同属性确定出不定的相邻木个数,因此,更适合于对林木的竞争分析,如距离法^[30]、胸高断面积法^[31]等已成功应用于单木竞争的分析中;但对于林分结构分析,其所选 n 株相邻木对所有参照树是固定的,因为相对于竞争分析,林分空间结构参数常常描述的是整体统计的特征(结构参数的均值或概率密度分布),

而非注重每一个个体的特征^[32];再者,在实际抽样调查中,不同调查者选取相邻木的看法及标准不同,应用固定的 n 值可以避免人为主观因素的差异。关于确定合理的 n 值应该从以下 2 个方面考虑:(1) n 的取值要能合理的表达出林分的空间结构状态;(2) n 取值过大将会增加林分结构调查的费用,因为 n 值过多时人们无法仅凭视觉确定出参照树周围最近的 n 株相邻木,在地形复杂的天然林中更是如此,任何通过测距判断最近相邻木都会增加调查的费用,一味地追求精确度而忽视调查费用的方法现实意义并不大,对于这一问题 Assunção^[26]也曾有过详细的分析。

目前,如何选取相邻木在林分空间结构中的应用研究并不多见。在分析混交林树种隔离程度时,Füldner^[33]曾指出, $n=3$ 可以进行合理的描述;在研究分布格局时,Clark 等^[34]提出的 R 指数选取了参照树最近 1 株相邻木,即 $n=1$;基于角度法描述林木分布格局时,Assunção^[25]提出了参照点及其周围 2 株相邻木构成分析单元;Staupendahl 等^[23]提出了基于参照点及其周围 3 株相邻木组成分析单元(图 1)。Davies 等^[35]分别选取参照树周围 3、4、5、7 株相邻木计算了参照树的空间结构参数,并分析了空间结构及非空间结构参数与树木树冠大小的相关性。惠刚盈等^[15]提出的角尺度在分析林木空间格局时采用了 $n=4$,并提出林分中参照树以及它的 4 株最近相邻木构成了分析林分空间结构的最佳空间结构单元。当 $n=4$ 在描述林木的分布格局时有 5 种情况,即很均匀、均匀、随机、不均匀、很不均匀,这 5 种情况对林木空间分布格局的描述很详细,相较于 $n=3$ 或 $n=5$ 时具有中间过度状态,生物学意义明显,在具体森林调查时,符合人对 4 个方位的理性判断方式。近年来,一些学者利用 Voronoi 图法、距离法等灵活确定最近相邻木株数分析林分空间结构参数^[17-22],并与 $n=4$ 时的固定值作比较,发现二者在计算混交度、大小比数时结果有较高的相关性和一致性,但在分析角尺度时有所差异。究其原因忽略了选取相邻木株数不同时所对应的标准角也在变化,而且选用不同相邻木株数计算的角尺度值间是否具有可比性无从得知(选取相邻木个数不同,判别随机分布标准是否相同),因此,不能在同一林分中将选取不定相邻木方法计算出的角尺度值进行随意的加和。

3 角尺度中标准角和随机分布阈值的确定

标准角是参照树周围几株最近相邻木分布均匀性的衡量标准,是 n 株相邻木均匀分布时构成的夹角,通常用 α_0 表示。若相邻木间的夹角 α 大于或等于 α_0 ,则视为均匀分布。对于整个林分的分布格局判断而言,所有参照树分布均匀性的平均值就是整个林分的分布格局状态。随机分布介于均匀和团状分布之间,因此,只要界定了随机分布的角尺度值范围,均匀和团状分布的判定将一目了然。相较于其他指数,如 Clark-Evans 指数等,角尺度描述的林分随机分布状态是一段区间并非一个特定的值。当选取参照树周围 4 株最近相邻木时,它们绝对均匀分布在参照树周围时的相邻木间的夹角应该是 $360^\circ/4$,这一标准角在角尺度起初应用时期曾在一些欧洲文献中出现过,如 Albert^[36]分别模拟了 10 块随机、均匀以及团状分布的林分,并应用这一标准角确定出了随机分布范围为 0.5~0.6;但惠刚盈等^[29]后来指出,自然界中绝对均匀的分布状态无法达到,偏离期望角的 10% 以内亦为均匀范畴。这样,均匀分布角的范围应是 $(360^\circ/n \pm 360^\circ/(10n))$,并以此确定出均匀分布与随机分布之间的临界值为 0.5,随机分布与团状分布之间的临界值为 0.6。为进一步完善角尺度理论,惠刚盈等^[37]通过严格的理论推导出,当选择 4 株相邻木时,标准角应该为 72° ,对计算机模拟出来完全随机分布的 2 000 块林分的角尺度计算发现,当 $\alpha_0 = 72^\circ$, $n=4$ 时,随机分布的林分角尺度值应该在 0.5 附近,角尺度值分布在 $[0.475, 0.517]$ 之间可视为随机分布;但应该注意的是,当 n 值变化后所对应的标准角以及随机分布范围都在发生变化,应用同一标准角 72° 分析不同 n 值情况时往往会得到不恰当的结论,因此,在 n 取值变化后必须明确标准角的大小以及随机分布的区间,然而,目前对于这一工作并没有相关的文献。

4 角尺度的应用

自从惠刚盈等^[15]相继提出并完善了描述林分空间结构的 3 个参数(描述林木水平分布格局的角尺度、树种空间隔离程度的混交度和林木分化程度的大小比数),为量化分析森林空间结构打下了坚实的基础之后,国内外已有大量文献应用这 3 个结构参数开展了相关的研究。林分角尺度主要应用于 3

个方面:(1)描述林木水平分布格局,表达林分空间结构特征。已有研究对角尺度在判断林分空间分布格局准确性与灵敏度方面做了详细分析,如惠刚盈等^[10]用 RipleyK-函数的 L-函数、双相关函数这些比较准确的方法与角尺度方法对比分析发现,双相关函数和角尺度在判断的准确性方面优于 L-函数;角尺度在有效性和可行性方面比 L-函数和双相关函数更强,并且它能利用角尺度分布图和均值同时作定性和定量分析。Corral-Rivas 等^[14]细致比较分析了 Clark and Evans 指数、平均方位角指数、Ripley's L 检验及角尺度等几种方法的性能,发现角尺度方法的分析灵敏度与 Ripley's L 检验相似。国内外对这一方法在现实林分中的应用也在逐年增多,如 Pommerening^[38]应用角尺度和双相关函数等方法分析了 3 块具有不同特征林分;Graz^[39]应用角尺度、混交度和大小比数分析了纳米比亚北部干旱草原森林的林分空间结构特征;Aguirre 等^[9]分析了墨西哥天然林的结构特征;胡艳波等^[40]分析了吉林蛟河天然红松阔叶林的空间结构;赵中华等^[41]分析了小陇山锐齿栎天然林空间结构特征;赵洋毅等^[42]分析了西南亚热带典型天然常绿阔叶林的空间结构特征;张会儒等^[43]比较分析了金沟岭天然和半天然混交林之间的林分空间结构差异等等。以上这些研究均采用角尺度并结合其他空间结构参数描述了各参数独立的一元分布及其均值,展示出不同气候带如寒温带、温带、暖温带、亚热带及热带及其不同森林类型的空间结构特征。Li 等^[12]首次将这 3 个结构参数即角

尺度、混交度和大小比数进行了两两联合,得到角尺度-混交度、角尺度-大小比数和混交度-大小比数 3 种不同的组合的频率分布,即 3 种二元分布。这样可以直观地看出林分水平分布格局与树种隔离程度或大小分化程度之间的关系(图 3),这在描述森林空间结构发展过程中具有重要意义,而对于其他一些指数来讲,它们之间并不能进行有效联合。(2)林分空间结构的调整。在森林经营活动中,对林分格局的调整是群落空间行为调整的基础。根据对现有林分格局分析的结果,要实现向预期目标的调整,角尺度具有明确涵义的单个值分布,其可释性强、描述细致,可通过对群落中一些重要树种周围相邻木的调节达到目的。惠刚盈等^[44]详细介绍了角尺度在林分空间结构调整中的应用;胡艳波等^[45]探讨了利用林分空间结构参数来指导森林经营的方法;刘春起^[46]探讨了应用角尺度法如何确定森林采伐木。(3)林分空间结构的重建与可视化模拟。林分及森林可视化作为森林经营管理周期长的问题提供了解决方法,它以更直观、更形象、更真实地反映现实林分的生长状况、空间结构以及预测林分未来的发展趋势,为科学管理和决策提供参考,因此,也越来越受到人们的热切关注。目前,越来越多的研究也将林分空间结构列入到了林分可视化模拟研究中^[47-49]。角尺度作为描述林分空间结构的一个参数,在林分可视化模拟^[50]以及可视化经营中^[51-52]发挥着重要角色。

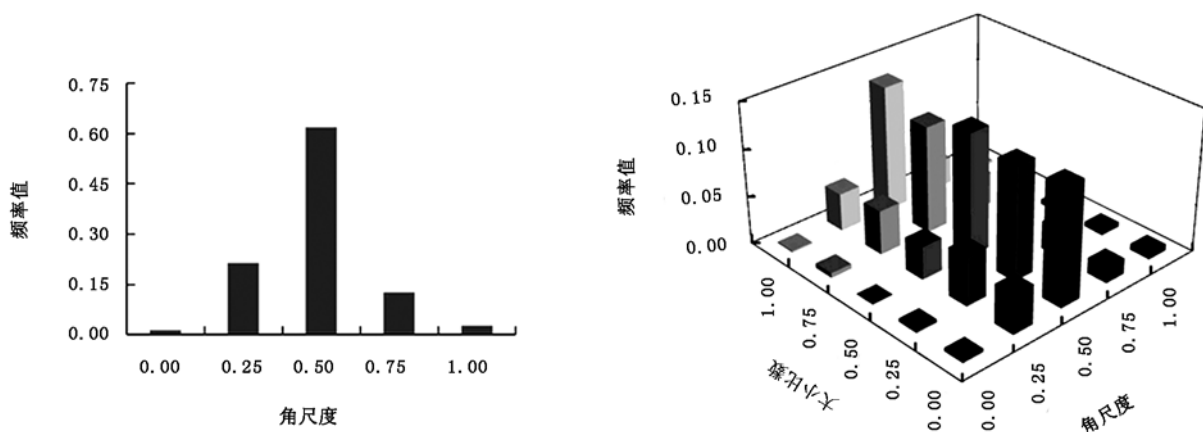


图3 林分随机分布状态下角尺度的一元分布(左)及角尺度与大小比数二元联合分布(右)

5 讨论与展望

角尺度作为一个测度林木空间分布格局的林分结构参数具有良好的判别能力,相较于其他方法,它既不需要调查者在地形复杂的山林中跑动测量林木间的距离,又不需要费时地精确测量相邻木间的夹角,只需判断参照树与周围相邻木间的夹角是否大于标准角即可,这样的测量方法对于我国广大基层林业调查人员的专业素质并无特殊要求,不需要培训即可立即展开调查工作,因此,在森林调查中,结合其他林分空间结构参数进行林分空间结构综合分析,不仅花费较小而且还能得到翔实的林分空间结构信息,应用前景非常广泛。另外,以后对林木空间分布格局的研究不仅局限于分布格局状态的描述,而是围绕森林经营、创建森林最佳空间结构状态以及林分可视化模拟等方面展开^[53]。基于相邻木的空间关系的角尺度研究使森林经营中采伐木的选择精准而简单,有助于森林经营实现真正意义上的量化经营和评价,因此,具有很重要的应用价值。

在角尺度的分析中涉及2个重要值的确定,即参照树相邻木株数 n 的选择以及标准角的确定。这2个值中任何一个改变将会导致角尺度判定阈值的变化,因此,在应用过程中必须了解角尺度的概念,正确应用角尺度方法,否则会得出不合理的结论。可见,对应不同 n 时的标准角的给出以及提出相应的角尺度的显著性检验标准,是当务之急。另一方面,虽然角尺度已在进行林木格局分析中得到广泛应用,但如何对混交林中某一种群分布格局分析有待深入探讨,尤其是如何利用点抽样调查数据对种群分布格局进行检验应该是以后需要解决的技术问题。

参考文献:

- [1] 惠刚盈, Klaus von Gadow, 胡艳波, 等. 结构化森林经营[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [2] Kuuluvainen T, Pukkala T. Effect of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade[J]. *Agric For Met*, 1987, 40: 215 - 231.
- [3] Pretzsch H. Zum Einfluss des Baumverteilungsmusters auf den Bestandszuwachs[J]. *AllgForst-Jagd*, 1995, 166: 190 - 201.
- [4] Moer M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data[J]. *For Sci*, 1993, 39: 756 - 775.
- [5] Newton P F, Jolliffe P A. Assessing processes of intraspecific competition within spatially heterogeneous black spruce stands[J]. *CanJ-ForRes*, 1998, 28: 259 - 275.
- [6] Levin S A. The problem of pattern and scale in ecology[J]. *Ecology*, 1992, 73(6): 1943 - 1967.
- [7] 李 丽. 天然林林木分布格局分析方法的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [8] Hui G Y, Gadow K V. Das Winkelmass-Theoretische Überlegungen zum optimalen Standardwinkel[J]. *Allgemeine Forst- Und Jagdzeitung*, 2002, 173: 173 - 177.
- [9] Aguirre O, Hui G Y, Gadow K V, et al. An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables[J]. *For Ecol Manage*, 2003, 183: 137 - 145.
- [10] 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.
- [11] 禄树晖, 潘朝晖. 藏东南高山松种群分布格局[J]. *东北林业大学学报*, 2008, 36(11): 22 - 24.
- [12] LI Y F, HUI G Y, ZHAO Z H, et al. The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(6): 1180 - 1190.
- [13] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 224: 266 - 277.
- [14] Corral-Rivas J J, Wehenkel C, Castellanos-Bocaz H A, et al. A permutation test of spatial randomness: application to nearest neighbour indices in forest stands[J]. *Journal of Forest Research*, 2010, 15(4): 218 - 225.
- [15] 惠刚盈, 克劳斯·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.
- [16] 汤孟平. 森林空间结构研究现状与发展趋势[J]. *林业科学*, 2010, 46(1): 117 - 122.
- [17] 赵春燕, 李际平, 李建军. 基于 Voronoi 图和 Delaunay 三角网的林分空间结构量化分析[J]. *林业科学*, 2010, 46(6): 78 - 84.
- [18] 李 俊. 南方集体林区典型林分类型结构特征及生长模型研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [19] 郝月兰, 张会儒, 唐守正. 基于空间结构优化的采伐木确定方法研究[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(5): 163 - 168.
- [20] 武爱彬. 基于高分辨率遥感图像获取与优化林分空间结构研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [21] 安慧君. 阔叶红松林空间结构研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2003.
- [22] 刘彦君. 应用三维模拟进行林分空间结构及竞争的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [23] Staupendahl K, Zucchini W. Estimating the spatial distribution in forest stands by counting small angles between nearest neighbours[J]. *Allgemeine Forst Und Jagdzeitung*, 2006, 177: 160 - 168.
- [24] Besag J E, Gleaves J T. On the detection of spatial pattern in plant communities[J]. *Bulletin of the International Statistical Institute*, 2007, 45: 153 - 158.
- [25] Assunção R. Testing spatial randomness by means of angles[J]. *Biometrics*, 1994, 50: 513 - 537.
- [26] Assunção R. Testing spatial randomness: a comparison between T^2 methods and modifications of the angle test[J]. *Brazilian Journal of Probability and Statistics*, 2000, 14: 71 - 86.

- [27] v Gadow K, Hui G Y, Albert M. Das Winkelmaß - ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen [J]. Centralblatt für das Gesamte Forstwesen, 1998, 115: 1 - 10.
- [28] v Gadow K, Zhang C Y, Wehenkel C, et al. Continuous cover forestry [M]. 2nd edition. Springer; Dordrecht, 2012: 29 - 83.
- [29] 惠刚盈. 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.
- [30] Hegyi F. A simulation model for managing jack-pine stands [M]// Fries J. Growth models for tree and stand simulation. Sweden: Royal College of Forestry, Stockholm, 1974: 74 - 90.
- [31] 孜来比·买买提名, 杨华, 赵广亮, 等. 单木竞争指标的研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 152 - 158.
- [32] Pommerening A. Analysing and modelling spatial woodland structure [D]. Vienna: University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2008.
- [33] Földner K. Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern [D]. Göttingen: University of Göttingen, 1995.
- [34] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations [J]. Ecology, 1954, 35: 445 - 453.
- [35] Davies O, Pommerening A. The contribution of structural indices to the modelling of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) and birch (*Betula* spp.) crowns [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256: 68 - 77.
- [36] Albert M. Analyse der eingriffsbedingten Strukturveränderung und Durchforstungsmodellierung in Mischbeständen [D]. Göttingen: University of Göttingen, 1999.
- [37] 惠刚盈, Klaus von Gadow, 胡艳波, 等. 林木分布格局类型的角尺度均值分析方法 [J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1225 - 1229.
- [38] Pommerening A. Approaches to quantifying forest structures [J]. Forestry, 2002, 75(3): 305 - 324.
- [39] Graz F P. Spatial diversity of dry savanna woodlands—assessing the spatial diversity of a dry savanna woodland stand in northern Namibia using neighborhood-based measures [J]. Biodivers, Conserv, 2006, 15: 1143 - 1157.
- [40] 胡艳波, 惠刚盈, 戚继忠, 等. 吉林蛟河天然红松阔叶林的空间结构分析 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 523 - 530.
- [41] 赵中华, 惠刚盈, 袁士云, 等. 小陇山锐齿栎天然林空间结构特征 [J]. 林业科学, 2009, 45(3): 1 - 6.
- [42] 赵洋毅, 王克勤, 陈奇伯. 西南亚热带典型天然常绿阔叶林的空间结构特征 [J]. 西北植物学报, 2012, 32(1): 187 - 192.
- [43] 张会儒, 李春明, 武纪成. 金沟岭天然和半天然混交林林分空间结构比较 [J]. 科技导报, 2009, 27(19): 79 - 84.
- [44] 惠刚盈, 胡艳波. 角尺度在林分空间结构调整中的应用 [J]. 林业资源管理, 2006(2): 31 - 35.
- [45] 胡艳波, 惠刚盈. 优化林分空间结构的森林经营方法探讨 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 1 - 8.
- [46] 刘春起. 基于林分空间格局的森林采伐树木确定方案的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- [47] 贺姗姗, 彭道黎. 林分空间结构可视化方法研究 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24(2): 157 - 161.
- [48] 朱磊, 张怀清, 林辉, 等. 基于 GDI+ 技术的林分结构可视化技术研究 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(9): 5566 - 5569.
- [49] 高广磊, 丁国栋, 张佳音, 等. 林分结构可视化模型的原理及应用与展望 [J]. 世界林业研究, 2011, 24(3): 42 - 46.
- [50] 匡一龙, 谭骏珊, 张怀清. 基于空间结构的林分模拟方法研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(10): 40 - 44.
- [51] 徐海. 天然红松阔叶林经营可视化研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [52] 董灵波, 刘兆刚. 樟子松人工林空间结构优化及可视化模拟 [J]. 林业科学, 2012, 48(10): 77 - 85.
- [53] 孔雷, 杨华, 亢新刚, 等. 林木空间分布格局研究方法综述 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(5): 119 - 125.