

随机分布的角尺度置信区间及其应用

胡艳波¹, 惠刚盈^{1*}, 王宏翔¹, 李远发¹, 赵中华¹, 刘文桢²

(1. 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;

2. 甘肃省小陇山林业试验局, 甘肃 天水 741020)

摘要:角尺度通过描述相邻木围绕参照树的均匀性来进行林木水平分布格局的判定。研究分析 80 000 个模拟随机分布林分的角尺度均值的标准差($\sigma_{\bar{W}}$)发现:随机分布林分的角尺度均值的标准差主要受模拟株数(N)的影响,模拟窗口的大小对其的影响可以忽略不计;模拟株数与角尺度均值的标准差关系极为紧密,表现为模拟株数越少,标准差越大,且标准差随着模拟株数的增加而变小,这种关系用幂函数 $\sigma_{\bar{W}} = 0.21034N^{-0.48872}$ 能够很好地表达,相关指数 R^2 高达 0.998;研究基于统计学正态分布原理建立了随机分布林分角尺度均值置信区间,95% 的置信限为 $0.5 \pm 1.96\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 1.96 \times 0.21034N^{-0.48872}$;99% 的置信限为 $0.5 \pm 2.58\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 2.58 \times 0.21034N^{-0.48872}$;并有当林分或某一种群的林木分布的角尺度均值 \bar{W} 在所建立的置信区间 $[\bar{W}_{Ld}, \bar{W}_{Lu}]$ 内,即在相应的置信水平上判断为随机,若 $\bar{W} > \bar{W}_{Lu}$ 时为团状分布, $\bar{W} < \bar{W}_{Ld}$ 时为均匀分布。这个与调查株数有关的判定标准的提出进一步完善了角尺度理论,并为林分空间结构参数角尺度在实践中的应用提供了简洁方法。

关键词:林分结构;空间结构参数;角尺度;置信区间;格局检验方法

中图分类号:S718.54

文献标识码:A

Uniform Angle Index(\bar{W}) Confidence Interval of the Random Distribution and Its Application

HU Yan-bo¹, HUI Gang-ying¹, WANG Hong-xiang¹, LI Yuan-fa¹, ZHAO Zhong-hua¹, LIU Wen-zhen²

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration,

Beijing 100091, China; 2. Xiaolongshan Forest Experiment Bureau of Gansu Province, Tianshui 741020, Gansu, China)

Abstract: The Uniform angle index(\bar{W}) method is a parameter analyzing forest spatial structure through describing the evenness of neighboring trees around reference tree to judge the distribution pattern of trees. 80 000 simulated randomly distributed stands were analyzed, and it was found that the standard deviation of the mean value of the \bar{W} (\bar{W}) of those stands was mainly influenced by the tree number of simulation (N), while the simulation window size was not so important for the result. The tree number of simulation related closely to the standard deviation of \bar{W} , the fewer the former are, the larger the latter will be. Moreover, the standard deviation decreased with the tree number of simulation. Such relationship can be well expressed by the power function $\sigma_{\bar{W}} = 0.21034N^{-0.48872}$, and the correlation index R^2 was up to 0.998. Based on the normal distribution principle in statistics, a confidence interval was established for the \bar{W} of the Random Distribution stands, and the 95% confidence limit is $0.5 \pm 1.96\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 1.96 \times 0.21034N^{-0.48872}$, while the 99% confidence limit is $0.5 \pm 2.58\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 2.58 \times 0.21034N^{-0.48872}$. When the \bar{W} of a stand or a specific population is within the established confidence interval $[\bar{W}_{Ld}, \bar{W}_{Lu}]$, then it should be described as a random distribution on relevant confidence level, and clustered distribution should be judged if $\bar{W} > \bar{W}_{Lu}$, while uniform distribution if $\bar{W} < \bar{W}_{Ld}$.

收稿日期:2012-09-12

基金项目:国家自然科学基金“基于相邻木关系的混交林树种分布格局测度方法研究”(31370638)

作者简介:胡艳波(1975—),女,辽宁宽甸人,助理研究员,博士. Email:hyanbo@caf.ac.cn

* 通讯作者:研究员,博士,博士生导师. Email:hui@caf.ac.cn

Key words: stand structure; spatial structure parameter; uniform angle index; confidence interval; pattern testing method

林分结构研究始终是林学学科研究的核心^[1]。林分结构是其功能的决定因素,它体现了林木个体(结构要素)及其属性(种类、大小、分布)的连接方式,是林分动态变化过程中测度时点的林分状态的高度概括和度量,因此,它既是林分现状的具体表达,也是林分未来发展的基石。林分结构由空间结构和非空间结构构成,林分密度、树种组成、直径分布、树高分布、树种多样性及林分活力等即为林分的非空间结构;林木的点格局及其属性的空间分布即为林分的空间结构。空间结构已被用于界定野生动植物生境的需求,监测林下植被空间异质性及其动态,解释微气候变化规律和预测木材产量^[2]以及实现森林经营管理目标和洞察水文过程^[3]等诸多方面。研究森林结构有助于了解森林的发展历史、功能和生态系统将来的发展方向^[3-4]。

森林作为典型的三维空间结构体系^[4],林木的分布格局是林分空间结构的重要组成部分,一般分为随机、聚集(团状)和规则(均匀)3种分布形式。对林木空间分布格局的研究有助于深化对群落结构的认识,解决营造林中的树种配置和采伐木的选择问题。根据前人的研究,格局研究有多种方法,如样方法、距离法和角尺度法等。样方法是一种经典的空间格局分析方法,由于它存在基本样方大小和初始样方位置的确定等一些问题,影响了研究结果的准确性。目前,国际上分析林木空间分布格局主要采用的是距离法,包括聚集指数(R)^[5]、双相关函数^[6-7]和 Ripley 函数^[8]。距离法的根本问题是野外需要耗时费力的林木位置坐标测定。近年来出现了角尺度方法^[9-11],其优点除了直观的图形表达^[12](与距离法中双相关函数和 Ripley 函数一样)外,还可用均值表达,更重要的是所用的数据可通过抽样调查直接获得^[13-14]。目前,利用角尺度进行分布格局检验时采用了以 $\pm 3\sigma$ (3倍标准差)为标准所确定的置信区间 $[0.475, 0.517]$ 进行林木分布格局检验^[15-16],这一标准适合调查株数在 $1\ 000$ 株 \cdot hm⁻²左右的森林群落^[17]。由于置信区间与样本大小有直接关系^[18],所以,采用与调查株数无关的、统一的置信区间显然不适用于评判森林群落中数量较少的种群的分布格局。本文试图给出随机分布林分的角尺度置信区间,以进一步完善林分空间结构参数角

尺度的均值检验方法。

1 材料

1.1 模拟林分

用林分空间结构分析软件 Winkelmass 进行随机分布林分点格局模拟与分析^[15-17]。分4个方形模拟窗口,即 $70\text{ m} \times 70\text{ m}$ 、 $80\text{ m} \times 80\text{ m}$ 、 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 、 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$,每个窗口下模拟林分的株数分别为50、100、150、……、950、1 000株,各1 000次重复,共模拟随机分布林分 $4 \times 20 \times 1\ 000 = 80\ 000$ 个。

1.2 实测林分

试验地位于我国西北甘肃小陇山林业实验局林区百花林场曼坪工区($33^{\circ}30' \sim 34^{\circ}49'N$, $104^{\circ}22' \sim 106^{\circ}43'E$),海拔1 700 m,该区属暖温带向北亚热带过渡地带。年均气温 $10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量800 mm,年平均蒸发量1 420 mm,相对湿度69%,无霜期184.8 d,土壤以山地棕壤和山地褐土为主。树种数量30种以上,主要有锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata* Maxim.)、太白槭(*Acer giraldii* Pax)、茶条槭(*Acer ginnala* maxim.)、山榆(*Ulmus glabra* Huds.)、华山松(*Pinus armandii* Franch.)、白檀(*Symplocos paniculata* (Thunb.) Miq.)、甘肃山楂(*Crataegus kansuensis* Wils.)和多毛樱桃(*Cerasus polytricha* (Koehne) Yü et Li)等。

研究林分共2块,面积都是 $70\text{ m} \times 70\text{ m}$,属于长期监测试验样地。调查内容为:样地内所有胸径 $D \geq 5\text{ cm}$ 的林木树种、胸径、树高和相对坐标,为消除边缘效应设置5 m的缓冲区,其中的林木只做相邻木,缓冲区环绕的为样地核心区,其中的林木作为参照树计算角尺度。调查显示林分类型为松栎针阔混交林,林分密度为 $888\text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均胸径19.5 cm,平均树高14 m。研究分析了2林分的林木水平分布格局和林分中主要树种(株数 > 30 株)的林木分布格局即种群分布格局(图1、2)。

2 研究方法

将上述模拟数据用于建立随机分布林分的角尺度置信区间,并将其应用于实测林分的林木或种群的分布格局检验。

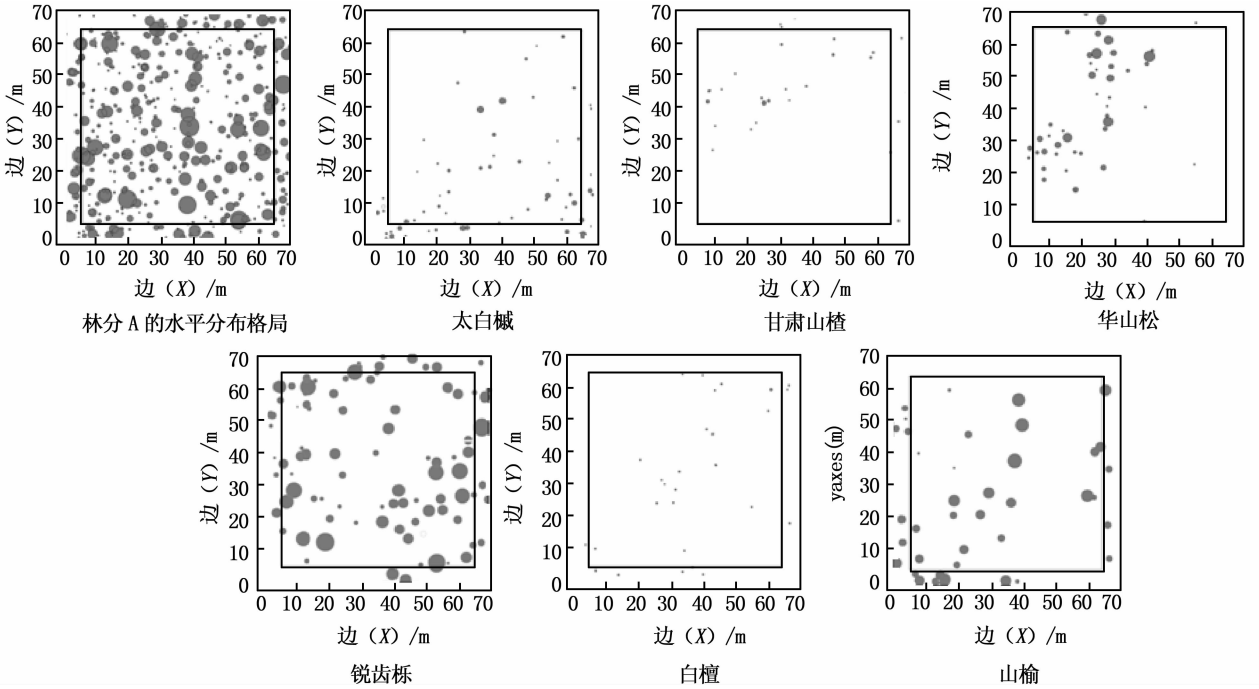


图1 实测林分 A 全林和其中各树种的林木水平分布格局

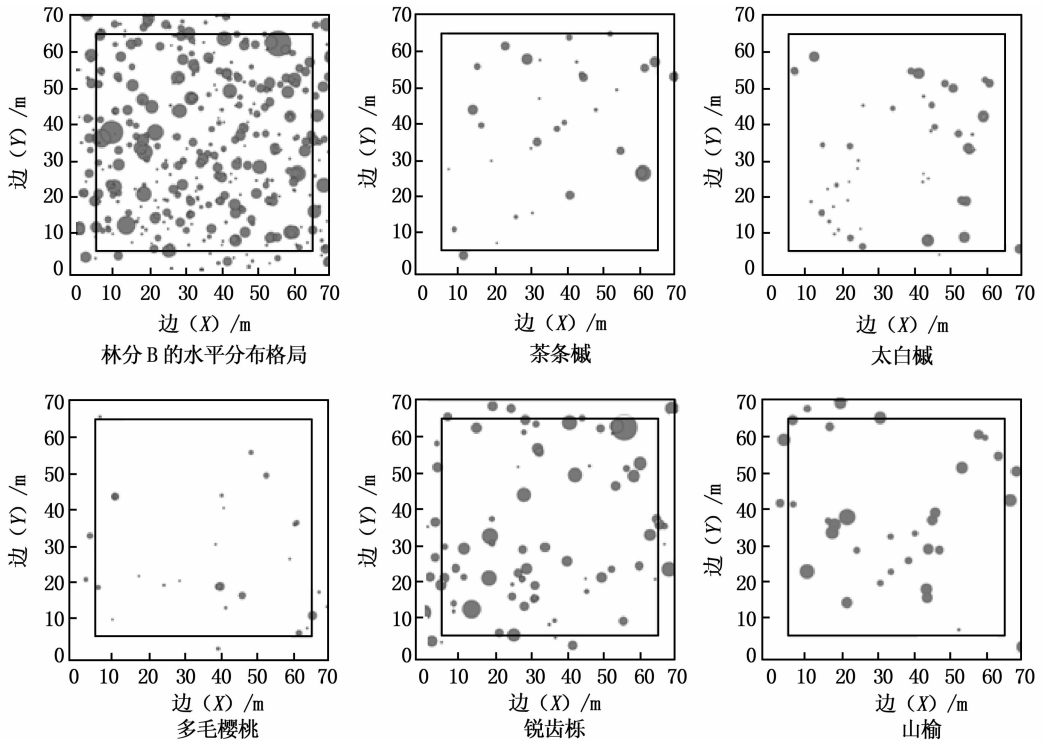


图2 实测林分 B 全林和其中各树种的林木水平分布格局

2.1 置信区间的确定

随机分布林分的角尺度均值(\bar{W})的频率分布遵从正态分布, \bar{W} 的期望值为 $0.5^{[10,15,17]}$ 。由正态分布理论可知^[19],在 $\pm 1\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$ (不同倍数标准差)的范围内包含的变数个数(即面积)分别为

68.13%、95.46%、99.74%。因此,随机分布林分的角尺度的置信限(95%): $0.5 \pm 1.96\sigma_w$;99%的置信限: $0.5 \pm 2.58\sigma_w$ 。

2.2 林木分布格局的检验

用角尺度均值进行格局判定,为检验该方法的

有效性,特将其与聚集指数 R 进行对比。

角尺度 (W_i) 是描述 4 株最近相邻木围绕参照树 i 的均匀性^[10-11,20]。参照树与最近相邻木构成的夹角为 α , 均匀分布时的期望夹角——标准角 α_0 为 72° , 角尺度通过比较 α 与 α_0 来分析林木的分布状况, 其定义为 $\alpha < \alpha_0$ 的个数占所考察的最近相邻木的比例。公式如下:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij}$$

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

$W_i = 0$ 表示 4 株最近相邻木特别均匀地分布在参照树周围; 而 $W_i = 1$ 则表示 4 株最近相邻木在参照树周围分布是特别不均匀的或聚集的。图 3 进一步明确给出了角尺度 (W_i) 的可能取值和意义。

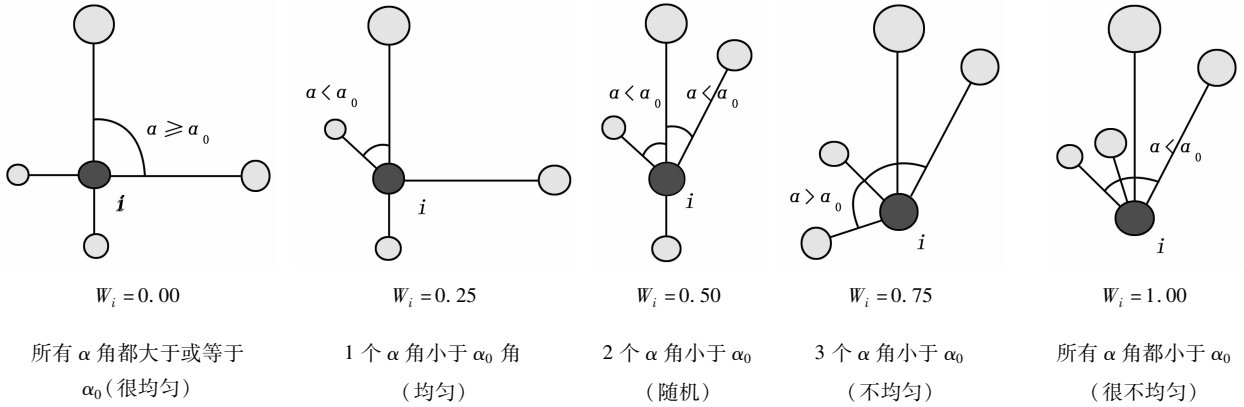


图3 角尺度的取值及意义

角尺度均值 (\bar{W}) 的计算公式:

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

式中: N 为林分总株数, W_i 为第 i 株单木的角尺度值。

随机分布的林分平均角尺度取值应介于均匀和团状分布之间^[15,17], 即 $\bar{W}_{\text{均匀}} < \bar{W}_{\text{随机}} < \bar{W}_{\text{团状}}$ 。如果林分或某一种群的林木分布的角尺度均值 \bar{W} 在所建立的置信区间 $[\bar{W}_{Ld}, \bar{W}_{Lu}]$ 内即可认为在相应的置信水平上, 判断为随机, $\bar{W} > \bar{W}_{Lu}$ 时为团状分布, $\bar{W} < \bar{W}_{Ld}$ 时为均匀分布。

聚集指数 (R) 是相邻最近林木距离的平均值与随机分布下期望值的平均距离之比, 通常也被称为最近邻体分析方法 (Nearest neighbor analysis, NNA)。聚集指数 (R) 的计算公式为^[5]:

$$R = \frac{\bar{r}_A}{r_E} \quad (3)$$

式中: \bar{r}_A 为观察到的相邻单株之间的平均距离; r_E 为期望的相邻单株之间的平均距离。

$$\bar{r}_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad \bar{r}_E = \frac{1}{2\sqrt{\rho}} \quad (4)$$

式中: n 为面积为 A 平方米的样地内的树木个体数; $\rho = \frac{n}{A}$ 为每平方米的个体数; r_i 为第 i 个个体

与其最近邻体间的距离。

若 $R = 1$, 则林木为随机分布; 若 $R < 1$, 则林木为均匀分布, 最大值可以达到 2.149 1; 若 $R > 1$, 则林木为聚集分布, R 趋向于 0, 表明树木之间的距离越来越密集。

实测与预测的偏离程度可利用正态分布进行检验^[21]:

$$u = \frac{\bar{r}_A - \bar{r}_E}{\sigma_E} \quad (5)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{4 - \pi}{4\pi\rho n}} = \frac{0.261\ 36}{\sqrt{\rho n}} = \frac{0.261\ 36}{\sqrt{\frac{n^2}{A}}} \quad (6)$$

式中: σ_E 是一个密度为 ρ 符合 Poisson 分布的 \bar{r}_E 标准差。

按照正态分布检验的原则: 若 $|u| < 1.96$, 则可判断为随机分布; 若实际 $|u| > 1.96$, 当 $R < 1$ 时, 判断为聚集; 当 $R > 1$ 时, 判断为均匀分布。

3 结果与分析

通过对模拟随机分布林分的角尺度均值 (\bar{W}) 的统计特征研究可知: 本研究中 80 000 个模拟随机分布林分的角尺度均值 (\bar{W}) 的最小值为 0.412 5, 最大值为 0.625 0。 \bar{W} 均值为 0.495 6 ~ 0.522 6, 标

准差最小为 0.006 9,最大为 0.031 8(表 1)。研究还发现,相同的模拟株数不同的模拟窗口大小对 \bar{W} 计算结果的千分位即小数点后的第 3 位有一定的影响,而相同的模拟窗口不同的模拟株数对计算结果的百分位即小数点后的第 2 位就有明显的影响。二者对计算结果的影响有着量级的差异,可见,模拟株数的多少是影响计算结果的关键因素。相比之下,模拟窗口大小的影响可以忽略不计。此外,模拟株数与角尺度均值的标准差关系极为紧密,表现为模拟株

数越少,标准差越大,且标准差随着模拟株数的增加而变小(图 4)。模拟株数(N)与角尺度均值标准差($\sigma_{\bar{W}}$)的关系用幂函数能够很好地表达,相关指数(R)² 高达 0.998。

$$\sigma_{\bar{W}} = 0.210\ 34N^{-0.488\ 72} \quad (7)$$

95% 的置信限为: $0.5 \pm 1.96\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 1.96 \times 0.210\ 34N^{-0.488\ 72}$

99% 的置信限为: $0.5 \pm 2.58\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 2.58 \times 0.210\ 34N^{-0.488\ 72}$

表 1 80 000 个模拟的随机分布林分的角尺度均值(\bar{W})的统计特征

N	模拟窗口/(m × m)															
	70 × 70				80 × 80				90 × 90				100 × 100			
	min	max	ave	$\sigma_{\bar{W}}$	min	max	ave	$\sigma_{\bar{W}}$	min	max	ave	$\sigma_{\bar{W}}$	min	max	ave	$\sigma_{\bar{W}}$
50	0.412 5	0.622 3	0.515 4	0.031 2	0.420 7	0.622 2	0.519 1	0.031 8	0.431 2	0.608 7	0.519 5	0.029 9	0.424 4	0.625 0	0.522 6	0.030 6
100	0.432 4	0.578 3	0.504 1	0.022 6	0.428 6	0.573 0	0.506 3	0.022 1	0.439 8	0.584 3	0.508 4	0.022 6	0.438 2	0.576 5	0.509 6	0.022 2
150	0.439 5	0.562 5	0.500 4	0.018 5	0.451 1	0.559 7	0.500 8	0.018 0	0.443 5	0.574 6	0.504 0	0.018 4	0.440 8	0.563 4	0.504 1	0.018 5
200	0.450 9	0.550 3	0.497 5	0.015 8	0.447 1	0.555 9	0.499 7	0.016 0	0.447 7	0.557 7	0.501 5	0.016 0	0.450 6	0.568 1	0.500 5	0.015 7
250	0.452 2	0.542 1	0.497 6	0.014 6	0.455 3	0.541 1	0.498 4	0.013 9	0.453 6	0.548 6	0.498 6	0.014 0	0.459 3	0.546 3	0.500 4	0.014 2
300	0.456 6	0.539 8	0.497 2	0.013 2	0.455 8	0.548 6	0.497 8	0.013 2	0.459 5	0.549 4	0.498 5	0.013 0	0.458 8	0.543 6	0.498 1	0.013 0
350	0.450 7	0.533 6	0.496 1	0.012 3	0.464 2	0.543 9	0.497 2	0.011 9	0.459 2	0.537 8	0.497 7	0.011 7	0.465 7	0.536 3	0.498 3	0.011 4
400	0.451 5	0.537 5	0.496 8	0.011 5	0.465 0	0.535 9	0.496 7	0.011 4	0.461 9	0.532 2	0.497 0	0.011 3	0.464 0	0.531 2	0.497 9	0.011 1
450	0.467 7	0.535 2	0.496 1	0.011 2	0.466 8	0.534 6	0.497 0	0.010 4	0.466 1	0.531 6	0.496 6	0.010 4	0.466 4	0.528 7	0.498 1	0.010 7
500	0.456 3	0.534 2	0.496 2	0.010 3	0.468 5	0.527 7	0.496 3	0.010 2	0.463 0	0.526 3	0.496 4	0.009 7	0.464 9	0.529 0	0.497 2	0.010 1
550	0.467 2	0.531 5	0.495 9	0.009 7	0.465 3	0.526 0	0.496 1	0.009 6	0.467 6	0.529 2	0.496 7	0.009 7	0.466 0	0.526 2	0.496 8	0.009 5
600	0.463 6	0.526 7	0.496 4	0.009 5	0.466 0	0.530 3	0.496 4	0.009 0	0.470 0	0.528 9	0.496 3	0.009 1	0.467 5	0.525 7	0.496 2	0.009 0
650	0.468 1	0.527 2	0.495 6	0.008 7	0.462 6	0.522 0	0.496 1	0.009 2	0.461 7	0.521 8	0.496 0	0.009 0	0.464 5	0.527 1	0.496 3	0.009 1
700	0.463 9	0.530 3	0.496 0	0.008 6	0.468 4	0.524 6	0.496 0	0.008 8	0.466 5	0.523 7	0.496 6	0.008 5	0.474 3	0.522 5	0.496 6	0.008 2
750	0.469 3	0.522 0	0.496 0	0.008 3	0.472 9	0.518 0	0.496 3	0.007 9	0.471 0	0.519 1	0.496 0	0.008 2	0.472 7	0.522 3	0.496 4	0.007 7
800	0.466 9	0.521 6	0.495 9	0.008 2	0.471 5	0.520 4	0.495 9	0.008 0	0.473 3	0.515 6	0.495 9	0.007 7	0.471 1	0.519 7	0.496 2	0.007 8
850	0.473 4	0.517 3	0.496 0	0.008 0	0.470 0	0.520 2	0.495 9	0.007 9	0.470 3	0.517 8	0.495 9	0.007 5	0.471 0	0.519 4	0.496 5	0.007 4
900	0.471 9	0.524 1	0.495 9	0.008 0	0.473 4	0.519 9	0.496 0	0.007 5	0.471 6	0.517 9	0.496 2	0.007 5	0.473 4	0.521 4	0.496 3	0.007 7
950	0.473 7	0.520 1	0.495 6	0.007 6	0.471 0	0.515 9	0.495 8	0.007 0	0.473 0	0.518 6	0.496 1	0.007 2	0.472 7	0.519 3	0.496 1	0.006 9
1 000	0.472 2	0.521 9	0.495 8	0.007 2	0.474 4	0.520 0	0.496 0	0.007 2	0.474 3	0.517 0	0.495 8	0.007 2	0.468 8	0.523 7	0.496 2	0.007 3

注: N :模拟株数, min、max、ave、 $\sigma_{\bar{W}}$ 分别为林分角尺度均值的最小值、最大值、平均值和标准差。

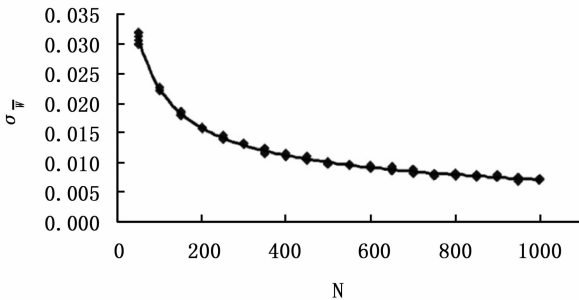


图 4 \bar{W} 的标准差($\sigma_{\bar{W}}$)与模拟株数(N)的关系

到 200 株以上时变幅逐渐减少。这种变化趋势与一般的统计规律相符。

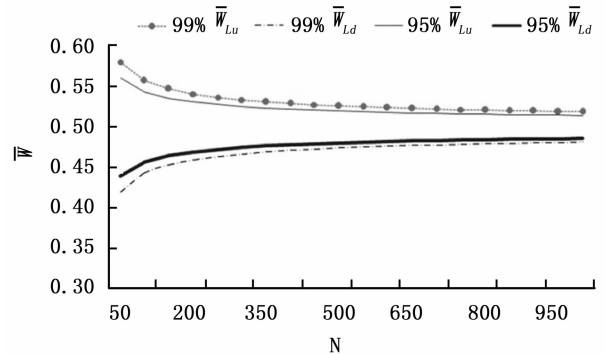


图 5 随机分布林分平均角尺度(\bar{W})的 95%、99% 置信区间与模拟株数(N)的关系

图 5 展示出 2 种置信水平即 95% 和 99% 的 \bar{W} 上限(\bar{W}_{Lu})、 \bar{W} 下限(\bar{W}_{Ld})随模拟株数的变动情况。可见,调查株数越少,变化幅度愈大,当调查株数达

表2给出了2种方法(角尺度均值(\bar{W})和聚集指数(R))对实测林分林木分布格局的检验结果(95%显著水平)。结果显示:在调查株数较多(株数 ≥ 50 株)时,2种格局检验方法对格局的检验结果是一致的;只有在调查株数少于50株时才会出现不一致的情况,如样地1中华山松种群和样地2中多毛樱桃种群。实际上,林分A中,华山松种群直观看

的确为团状分布(图2),角尺度方法判定为团状,而聚集指数 R 则表明为随机,明显误判,这正好也体现了聚集指数的理论缺陷,即树木最近相邻木几乎总是在树木组(团)内^[22-23];相反,在林分B中,多毛樱桃种群角尺度也出现令人不能满意的结果,改善的有效途径是增加调查株数。总体来看,2种方法的符合率达85%,准确率高达93%。

表2 实测林分的林木水平分布格局及检验结果

样地代码	群落或种群	核心区株数	\bar{W} /格局类型	\bar{W}_{Ld}	\bar{W}_{Lu}	R /格局类型	u	是或否
A	锐齿栎天然混交林	324	0.492/随机	0.476	0.524	0.970/随机	-1.034	是
	锐齿栎	73	0.493/随机	0.449	0.551	0.884/随机	-1.899	是
	太白槭	41	0.445/随机	0.433	0.567	1.036/随机	0.437	是
	华山松	41	0.579/团状	0.433	0.567	0.895/随机	-1.291	否
	山榆	22	0.511/随机	0.409	0.591	0.976/随机	-0.217	是
	甘肃山楂	24	0.615/团状	0.413	0.587	0.511/团状	-4.579	是
	白檀	24	0.635/团状	0.413	0.587	0.585/团状	-3.886	是
B	锐齿栎天然混交林	323	0.535/团状	0.476	0.524	0.866/团状	-4.619	是
	锐齿栎	59	0.504/随机	0.444	0.556	0.925/随机	-1.103	是
	太白槭	63	0.579/团状	0.446	0.554	0.497/团状	-7.641	是
	山榆	26	0.539/随机	0.416	0.584	0.821/随机	-1.749	是
	茶条槭	30	0.475/随机	0.422	0.578	1.028/随机	0.289	是
	多毛樱桃	23	0.576/随机	0.411	0.589	0.635/团状	-3.353	否

4 结论

研究分析了80000个模拟随机分布林分的角尺度均值的标准差,按统计学正态分布原理,建立了随机分布林分角尺度均值置信区间,将这一标准应用于2块每木定位试验样地天然混交林及其树种的水平格局检验,并用距离法中的聚集指数作为格局检验的比照。研究发现:(1)随机分布林分的角尺度均值的标准差主要受模拟株数多少的影响,模拟窗口的大小对其的影响可以忽略不计;(2)模拟株数与角尺度均值的标准差关系极为紧密,表现为模拟株数越少,标准差越大,且标准差随着模拟株数的增加而变小,这种关系用幂函数 $\sigma_{\bar{W}} = 0.21034N^{-0.48872}$ 能够很好地表达,相关指数 R^2 高达0.998;(3)随机分布林分的平均角尺度95%的置信限为: $0.5 \pm 1.96\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 1.96 \times 0.21034N^{-0.48872}$;99%的置信限为: $0.5 \pm 2.58\sigma_{\bar{W}} = 0.5 \pm 2.58 \times 0.21034N^{-0.48872}$;并有当林分或某一种群的林木分布的角尺度均值 \bar{W} 在所建立的置信区间 $[\bar{W}_{Ld}, \bar{W}_{Lu}]$ 内,即在相应的置信水平上判断为随机,若 $\bar{W} > \bar{W}_{Lu}$ 时为团状分布, $\bar{W} < \bar{W}_{Ld}$ 时为均匀分布。这一与调查株数有关的判定标准的提出进一步完善了角尺度理论,并为林分空间结构参数角尺度在实践中的应用提供了简洁方法;(4)

角尺度和聚集指数方法在锐齿栎天然混交林中林木格局检验的准确率高达93%,2种方法的符合率达85%。

参考文献:

- [1] Pukkala T, Gadov K V. Continuous Cover Forestry. Book Series Managing Forest Ecosystems Vol 24 [M]. Netherlands: Springer Science Business Media B. V., 2011
- [2] Zenner, E K, Hibbs D E. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure[J]. For Ecol Manage, 2000, 129: 75-87
- [3] Franklin J F, Spies T A, Robert V P, et al. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example [J]. For Ecol Manage, 2002, 155: 399-423
- [4] Spies T A. Forest Structure: A Key to the Ecosystem [J]. Northwest sci, 1998, 72: 34-36
- [5] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbor as measure of spatial relationships in populations [J]. Ecology, 1954, 35: 445-453
- [6] Stoyan D, Stoyan, H, Fraktale Formen Punktfelder. Methodender Geometrie-Statistik [M]. Berlin: Akademie-Verlag, 1992: 394S
- [7] Pommerening A. Approaches to quantifying forest structures [J]. Forestry, 2002, 75: 305-324
- [8] Ripley B D. Modeling spatial patterns [M]. J R Stat Soc Series B, 1977, 39: 172-179
- [9] Gadov K V, Hui G Y, Albert M. Das Winkelmaß-ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen

- [J]. *Cbl f d ges Forstw*, 1998, 115. Jg. , Heft1 : S. 1 – 10
- [10] Hui G Y, Gadow K V. Das Winkelmass-Theoretische überlegungen zum optimalen Standardwinkel [J]. *Allg Forst-u J-Ztg*, 2002, 173: 173 – 177
- [11] Aguirre O, Hui G Y, Gadow K V, Jiménez J. An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 183: 137 – 145
- [12] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 224: 266 – 277
- [13] Hui G Y, Albert M. Stichprobensimulationen zur Schätzung nachbarschaftsbezogener Strukturparameter in Waldbeständen [J]. *Allg Forst-u J-Ztg*, 2004, 175: 199 – 209
- [14] Hui G Y, Zhao X H, Zhao Z H, *et al.* Evaluating tree species diversity based on neighborhood relationships [J]. *Forest Science*, 2011, 57: 292 – 300
- [15] Gadow K V, Hui G Y. Characterizing forest spatial structure and diversity [C]. “Sustainable Forestry in Temperate Regions” Proceedings of the SUFOR International Workshop, University of Lund, Sweden, 2002: 7 – 9
- [16] Hui G Y, Albert M, Chen B W, Reproduktion der Baumverteilung im Bestand unter Verwendung des Strukturparameters Winkelmaß [J]. *Allg Forst-u J-Ztg*, 2003, 174: 109 – 116
- [17] 惠刚盈, Gadow K V, 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, 4(6): 1225 – 1229
- [18] Sachs L. *Angewandte Statistik* [M]. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York. 1992: 51 – 197
- [19] 童一中. 作物育种常用的统计分析法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979: 60 – 61
- [20] 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: 1180 – 1190
- [21] Kint V, Lust N, Ferris R, Olsthoorn A F M. Quantification of forest stand structure applied to Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests [J]. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, Fuera de serie, 2000, 1: 147 – 163
- [22] Cox F. Dichtebestimmung und Strukturanalyse von Pflanzenpopulationen mit Hilfe von Abstandsmessungen. Dissertation Forstl [M]. Germany: Fak Goettingen, 1971
- [23] Fuldner K. Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern [M]. Dissertation Universität Göttingen. Germany: Cuvillier Verlag, 1995, 146