

森林采伐格局控制的 $\sqrt{2}$ 原则

罗传文

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 森林生产力可以由独占圆推导的原则所优化, 独占圆是以林木为圆心, 以其邻体距离的 $1/2$ 为半径所画的圆。已经证明独占圆有如下 3 个特性: (1) 独占圆之间不会重叠, 最近的关系是相切; (2) 完全均匀分布格局的独占圆总面积与植物株数无关, 而且是样地总面积的 $\sqrt{2}$ 倍; (3) 从样地上去掉一株植物, 只会增大某些独占圆的面积, 而不会减少其它独占圆的面积。定义均匀度 (L) 为: 样地上的独占圆总面积除以完全均匀格局的相同样地上的独占圆总面积。均匀度 (L) 服从分布: $L \sim x^2(2n)/2\pi n$, 且有 $E(L) = 1/\pi = 0.318$, L 的方差 $D(L) = 1/n\pi^2$, 可见 $E(L)$ 与 n 和样地面积均无关, L 是一个相对指标。 L 可以用于对格局类型的检验。

“增面积林木”定义为: 去掉它可以增加独占圆总面积的林木。第二邻体距离大于第一邻体距离 $\sqrt{2}$ 倍的林木就是增面积林木, 这就是所谓 $\sqrt{2}$ 原则。在所调查的样地上, 随意性地将样地分成 6 块, 在每块样地上其增面积林木的比例均约为 $1/2$, 无一例外。在随机格局的假设下, 推导了 6 块分割样地的增面积林木的期望比例, 其值为 $0.35 \sim 0.44$ 。显然, 期望值与抽样值的差异明显, 而引起差的原因尚难以解释, 有待进一步研究。提出了在择伐中增加林地均匀度的两条原则: (1) 独占圆面积偏小; (2) 增面积林木, 它可以用 $\sqrt{2}$ 原则来找到。

关键词: 独占圆; 空间格局; 泊松分布; 格局控制; 均匀度

The $\sqrt{2}$ rule for controlling the tree pattern in forest cutting

LUO Chuan-Wen (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 135 ~ 140.

Abstract: A forest's productivity can be optimized by the application of rules derived from monopolized circles. A monopolized circle is defined as the circle whose center is a tree and radius is half of the distance between the tree itself and its nearest neighbor. Three characteristics of monopolized circle were proved. (1) Monopolized circles don't overlay each other, so the nearest relationship is tangent. (2) "Full uniform pattern" means that the grid of $a \times b = N$ trees cover the whole plot, so that the distance between each tree in a row is the same as the row spacing. The total monopolized circle area with full uniform pattern is independent on the number of trees and $\frac{\pi}{4}$ times the plot area. (3) if a tree is removed, and the area of some trees' monopolized circles will be increased without decreasing the monopolized circle area of the other trees. According to the above three characteristics, "uniform index" is defined as the total area of monopolized circles in a plot divided by the total area of the monopolized circles, arranged in a uniform pattern in the same shaped plot.

According to the definition of monopolized circle, the distribution of uniform index (L) is $\frac{x^2(2n)}{2\pi n}$ for a random pattern, $E(L) = \frac{1}{\pi}$, the variance of L is $D(L) = \frac{1}{n\pi^2}$. It is evident that $E(L)$ is independent on n and the plot area, so L is a relative index. L can be used to compare the uniformity among plots with different area and numbers of trees. In a random pattern,

基金项目: 国家“十五”攻关课题资助项目 (2001BA510-07-02)

收稿日期: 2003-10-07; **修订日期:** 2004-01-15

作者简介: 罗传文 (1962~), 男, 博士, 教授, 主要从事数学生态学和空间信息学研究。E-mail: luocw-cf@nefu.edu.cn

Foundation item: National tenth 5-year project (2001BA510-07-02)

Received date: 2003-10-07; **Accepted date:** 2004-01-15

Biography: LUO Chuan-Wen, Ph. D., Professor, mainly engaged in mathematical ecology and geomatics. E-mail: luocw-cf@nefu.edu.cn

where L is equivalent to the tree density of the plot in which the number of trees is one and the area is π , the influence of tree number and plot area to L was eliminated. When $n \rightarrow \infty$, $D(L) \rightarrow 0$ and $L \rightarrow \frac{1}{\pi} = 0.318$, which indicates that the greater the number of tree is in the plots, the smaller the difference between the uniform indices will be.

There are three pattern types for describing tree distribution: aggregated, random and uniform. Since the distribution of L in the random pattern was derived, L can be used to test the pattern types.

A 1.3 hm² plot, located in Moarshan National Forest Park, was investigated by precision measuring instruments. The whole plot for which the uniform index was calculated was separated into 6 parts whose uniform index were respectively calculated. It was concluded that the whole plot was aggregated pattern, the 1st, 3rd and 6th parts were aggregated pattern, and the 2nd, 4th and 5th parts were random pattern. None of the uniform indices preponderate over $\frac{1}{\pi} = 0.318$, which indicates that uniform patterns are rare in natural forests.

The rules of uniform index can be applied to forest thinning. if you want to increase the value of uniform index, you must increase the total area of monopolized circles, which is done by removing select trees. "Increasing area trees" are the trees which being removed can increase the value of the uniform index. The tree that the distance between the tree itself and its second nearest neighbor is greater than $\sqrt{2}$ times the distance between the tree itself and its first nearest neighbor is a increasing area tree, which is called as $\sqrt{2}$ rule.

It was very interesting to find that when 6 plots were randomly separated from the original plot, the proportion of increasing area trees in each plot was always about 0.5 without exception. In random pattern the expectation proportion of increasing area trees was derived as 0.35~0.44, which is different from the sampling value of 0.5, the cause is very difficulty to explain and awaiting further study.

Two criteria can be used to identify which trees should be removed to increase the uniform index during forest thinning. Those trees should be (1) trees whose monopolized circle areas are on the small side, and (2) increasing area trees, which are found with the $\sqrt{2}$ rule.

Key words: monopolized circle; pattern; Poisson distribution; pattern control; uniform index

文章编号:1000-0933(2005)01-0135-06 中图分类号:S718.5,S757.2 文献标识码:A

最早对群落中植物种群个体分布的随机性进行研究的学者是 Gleason 和 Svedburg^[1]。Svedburg 通过实测频度与 Poisson 分布的理论频度进行比较来检验分布的随机性,并用方差/均值作为随机性的度量^[1]。Moore, Moristita 在此基础上发展出更多的随机性指数^[1],而 Lloyd 提出了平均拥挤指数 m^* 和聚块指数^[2~4], Moristita 提出了分散指数^[3]。Hopkins 1954 年提出了通过与随机格局进行比较的格局检验方法^[5]。Clark 和 Evens 提出了基于随机的植物到其最近邻体的距离的格局检验方法^[6],这一方法由 Donnelly 所修改^[7]。对这一方法进行过应用和发展的还有 Smaltschinski, Pielou, Gleichmar, Fuldner, Kint 等^[8~12]。

在国内有关格局的研究中,对于 Moristita 指数,方差均值比的应用较广^[13~15]。毛乌素沙地中飞播产生的种群格局与流沙状态和植物生态习性有关^[16]。陈学林等对沙棘的分布格局研究表明,在生态条件严酷的地段总是呈现不连续集聚分布^[17]。张金屯等对点格局的研究与本文的抽样方法相似^[18],但统计方法不同。

对于种群格局一直有两种抽样方法,其一是对个体较小且数量较大的种群进行样方抽样,在样方中调查个体数量。其二是象林木这样个体较大数量较小的种群,更适合于用距离抽样来进行研究。本文正是对后者发展了“独占圆”概念,提出了均匀度对格局的均匀性进行度量和检验的方法。

本研究的实例来于帽儿山国家森林公园,该公园座落于长白山系张广才岭西坡帽儿山地区,位于东经 127°28'~127°43',北纬 45°14'~45°29',在黑龙江省尚志市西部。全场地貌属典型低山丘陵,由南向北逐渐抬高,平均海拔 300m,最高峰帽儿山海拔 805m。该地区以次生林为主,有散生野生红松个体,但没有连片的天然阔叶红松林,通过虚拟林相可以对整个帽儿山地区的森林特征深刻了解^[19];该地区河流沟系较为密集,可以分成多种类型^[20],沟系系统对森林宏观格局有很大影响。对帽儿山国家森林公园内白桦种群的空间格局的研究表明:在幼苗和幼树阶段是集聚分布的,在成年大树则是随机分布的^[21]。

1 有关独占圆的几个引理及均匀度定义

1.1 第 n 邻体的定义

离一株林木 A 最近的林木 A_1 称为林木 A 的第 1 邻体,离林木 A 第 2 近的林木 A_2 称为林木 A 的第 2 邻体,依此类推,离

林木 A 第 n 近的林木 A_n 称为林木 A 的第 n 邻体。

最近邻体 离林木 A 最近的邻体 A_1 称为最近邻体;即第 1 邻体与最近邻体是等价的。

独占圆 以一个植物个体为圆心,以最近邻体距离的一半为半径所画的圆称为独占圆。

第 n 独占圆 以一个植物体为圆心,以第 n 邻体距离的一半为半径所画的圆称为第 n 独占圆。显然第 1 独占圆即是独占圆。

引理 1 在一定的地段上,在没有新加入植物体的情况下,植物体之间的独占圆是不会重叠的。

证明 用反证法,假设有两个独占圆重叠,且不是相切,设其圆心分别是 A、B;半径分别为 R_A 、 R_B ,且设: $R_A \geq R_B$

因为 A、B 重叠且不相切,由圆的性质有: $R_A + R_B > AB$

由独占圆的定义,A 与最近邻体的距离为 $2R_A$,而 $2R_A \geq R_A + R_B > AB$,这说明 A 与 B 的距离比 A 的最近邻体的距离更近,这与假设矛盾,结论得证。

引理 2 设在一块长方形样地上有 $a \times b = n$ 个均匀分布的植物体,植物体与最近邻体之间的距离均为 s ,这样的格局称为完全均匀格局。则当样地的上的植物株数为 $n, 4n, \dots, 4^k n$ 时,独占圆面积的总和保持不变。

证明 由假设可知,以任一植物体为圆心,以 $s/2$ 为半径的圆是上述植物体的独占圆,在独占圆外有一个唯一的外接正方形,其边长为 s 。显然,所有的外接正方形覆盖整块样地。所以,样地总面积为 ns^2 。而,独占圆的总面积为 $n \times \pi s^2 / 4$ 。

若将每一个外接正方形均匀分割成 4 份,在每一个小正方形的中心放一株植物,这时样地总面积为 $4n(s/2)^2 = ns^2$,独占圆的总面积为 $4n\pi(s/4)^2 = \pi \times ns^2 / 4$,这时的植物株数为 $4n$ 。所以,对于上述完全均匀格局而言,当株数为 $n, 4n, \dots, 4^k n$ 时,独占圆总面积保持不变,且是样地总面积的 $\pi/4$ 倍,结论得证。

1.2 均匀度的定义

根据引理 1,独占圆是不重叠的,独占圆面积的总和被格局唯一确定。

根据引理 2,对于均匀分布而言,独占圆面积的总和与株数无关,它是样地总面积的 $\pi/4$ 倍。

基于上述两个引理,可以引入以下均匀度定义:

在一定地段上,植物个体的总独占圆面积与地段总面积的 $\pi/4$ 倍之比称做均匀度(当样地形状不是长方形时也使用这个定义)。

设 a 为植物个体的总独占圆面积, A 为样地总面积,令 $L = 4a/\pi A$ 为均匀度,则: $a = \pi AL/a$

设 $\bar{\omega} = \sum_i d_i^2 / n$ 为植物体最近邻体的距离平方的平均数,则: $a = \pi / 4n\bar{\omega}$

$$\bar{\omega} = 4a/\pi n = (4/\pi n)(\pi AL/4) = AL/n$$

当格局为随机格局时,根据 Pielou^[10,22]的证明, $\bar{\omega}$ 有密度函数:

$$f(\bar{\omega}) = \frac{(n\lambda)n\bar{\omega}^{n-1}e^{-n\lambda\bar{\omega}}}{\Gamma(n)}$$

$2n\lambda\bar{\omega}$ 服从 χ^2 分布, λ 为每单位半径圆内的平均个体数,即 $\lambda = \pi n/A$,则有 $2n\lambda\bar{\omega} = 2n(\pi n/A)(AL/n) = 2\pi nL$ 服从自由度为 $2n$ 的 χ^2 分布。则 $L \sim \chi^2(2n)/2\pi n$,且有 $E(L) = 1/\pi$, L 的方差 $D(L) = D(\chi^2(2n))/4\pi^2 n^2 = 4n/4\pi^2 n^2 = 1/n\pi^2$,可见 $E(L)$ 与株数和样地面积均无关,它是一个相对指标,它可以在不同株数和不同面积的样地之间比较其均匀性。它相当于,在随机格局的假设下,每单位半径的圆的面积内正好有一株树时的林木密度指标,这是一个标准的密度指标,它剔除了株数与样地面积对均匀性的影响。但,当 $n \rightarrow \infty$ 时, $D(L) \rightarrow 0$,这预示着在个体充分多的情况下,均匀度的差别会变小,所以,应避免株数悬殊太大的样地间进行比较。由于 L 的近似分布已经获得, L 可以用于格局类型检验。

引理 3 任意去掉一株林木 A,以 A 为最近邻体的林木 B 的最近邻体的距离将增大,A 的最近邻体 C 的最近邻体距离不会减少。

证明 因为 A 是 B 的最近邻体,去掉 A 后,B 将以第 2 最近邻体 D 为最近邻体,所以 $BD \geq AB$ 。

由假设 C 是 A 的最近邻体,设 E 为 C 的最近邻体;

若 $E = C$,则从本引理的上述证明可知:

去掉 A 后,C 将以第 2 最近邻体为最近邻体,即 C 的最近邻体距离增大。

若 $E \neq C$ 则从引理 1 的证明可知:

有 $AC > CE$,这说明去除 A 不会改变 C 的最近邻体,结论得证。

引理 3 是独占圆的第 3 个特征,它还可以表述为:从样地上去掉一株植物,只会增大某些独占圆的面积,而不会减少其它独占圆的面积。

2 均匀度的应用—— $\sqrt{2}$ 原则

根据孙冰等的研究结果证实^[21], 林木空间格局的发展过程是从集聚到随机的过程, 所以, 择伐应增加均匀度。增加均匀度归结为增加总独占圆面积, 并且需要采伐(包括间伐和择伐)那些独占圆太小的林木, 因为独占圆太小意味着生存空间太小。为此, 称伐掉后能增加独占圆总面积的林木为增面积林木。随后将证明, 满足 $\sqrt{2}$ 原则的林木就是增面积林木。

林木采伐的 $\sqrt{2}$ 原则: 设林木 A 的第 1 邻体为 A_1 , 第 2 邻体为 A_2 , 若有 $AA_2 \geq \sqrt{2} AA_1$, 则伐掉 A_1 将增加总独占圆面积, 从而增加均匀度。所以, A_1 即为增面积林木。

证明 设 A_1 的最近邻体为 B, 根据引理 1, 有 $AA_1 \geq A_1B$ 。

又根据引理 3, 当 A_1 被伐掉后, 以 A_1 为邻体的林木独占圆面积不会减少。所以, 去掉 A_1 仅相当于去掉了以 $A_1B/2$ 为半径的独占圆。即整个样地上少了一个独占圆。然而, A 的第 2 独占圆伐替了第 1 独占圆, 如果 A 的第 2 独占圆大于第 1 独占圆的 2 倍, 那么, 总独占圆面积就会增加。

所以, 当 $\pi(\frac{AA_2}{2})^2 \geq 2\pi(\frac{AA_1}{2})^2$ 时, 伐掉 A_1 将增加总独占圆面积, 上式可改写为: $AA_2 \geq \sqrt{2} AA_1$

结论得证。

显然, 满足上述原则的林木很多, 上述原则不能唯一确定采伐木。而且, 如果第 1 独占圆面积已经很大, 尽管第 2 独占圆满足上述原则, 也不能采伐这样的林木, 而应该采伐那些第 1 独占圆面积很小且满足上述条件的林木。

所以, 采伐的格局控制原则应为: 第 1 独占圆面积偏小, 且第 2 独占圆面积大于第 1 独占圆面积 2 倍的林木($\sqrt{2}$ 原则)。

显然, 当伐掉一株林木后, 可以重新计算第 1 独占圆和第 2 独占圆, 所以, 上述原则可以重复使用。

3 有关增面积林木比例数的一个现象

为了对林木空间格局的控制进行实验性的研究, 笔者进行了野外调查。样地设在帽儿山实验林场中林施业区 13 林班 20 小班和 14 林班 5 小班之间, 坡度 13° 。

在本次调查中使用了工程测量中使用的红外测距仪和经纬仪, 这种测量仪器能达到毫米级的精度。

使用红外测距仪(RED2L)测量测站与林木之间的距离, 测量必须最少 2 人进行。一人操作测量仪器, 另一人将一个棱镜安放在高度为 1.3m 的支架上, 将支架贴树放在正对观测仪器的方向上; 并测量对应林木的胸径和树高。测站上测得的距离是测站对林木的 1.3m 处的距离。在测量距离的同时, 用经纬仪(误差 $2''$)测量树的方位角和俯仰角, 通常在大地测量中使用方向观测法或全圆方向观测法, 要使用两个半个测回来进行测量。在本次测量中, 由于由两个人组成测量组, 对每株林木使用了两个半个测回来进行, 即对每一株数, 先用盘左方式照准目标并读数, 然后纵转望远镜(盘右)照准目标并读数。根据立体几何原理, 上述 3 个参数可以唯一确定林木的 (x, y, h) 。

如上所述, 满足 $\sqrt{2}$ 原则的林木就是增面积林木。非常有趣的是, 图 1 所示的整块样地的增面积林木的比例约 0.5, 并从中任取一个子集, 增面积林木的比例仍约为 0.5 (详见表 1)。现在在随机格局的假设下, 推算增面积林木的期望比例数。

在随机格局的假设下, 第 1 最近邻体的距离为 r_1 的概率为:

$$F(r_1) = P(s_1 \leq r_1) = 1 - e^{-\lambda r_1^2}$$

概率密度为:

$$f(r_1) = F'(r_1) = 2\lambda r_1 e^{-\lambda r_1^2}$$

第 2 邻体的距离为 r_2 的概率为:

$$F(r_2) = P(s_2 \leq r_2) = 1 - e^{-\lambda r_2^2} - \lambda r_2^2 e^{-\lambda r_2^2}$$

概率密度为:

$$F(r_2) = F'(r_2) = 2\lambda r_2 e^{-\lambda r_2^2} - 2\lambda r_2 e^{-\lambda r_2^2} + \lambda r_2^2 \cdot 2\lambda r_2 e^{-\lambda r_2^2} = 2\lambda^2 r_2^3 e^{-\lambda r_2^2}$$

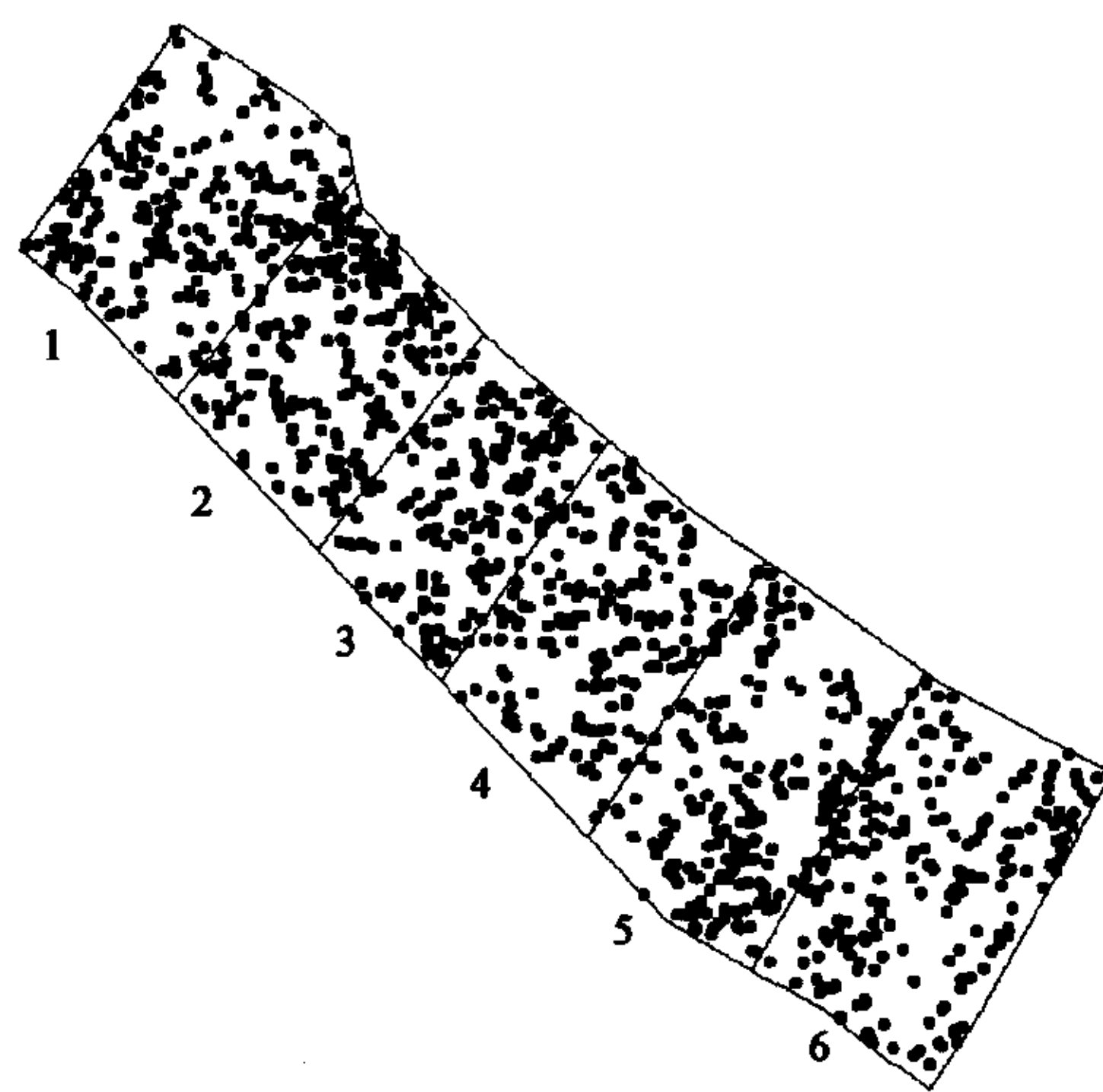


图 1 样地调查结果

Fig. 1 The surveying result of the plot

所以有:

$$P(r_2 \geq \sqrt{2} r_1 | r_1) = 2\lambda^2 \int_{\sqrt{2} r_1}^{\infty} r_2^3 e^{-\lambda r_2^2} dr_2 = \int_{\sqrt{2} r_1}^{\infty} (\lambda r_2^2) e^{-\lambda r_2^2} d(\lambda r_2^2) = Q(2, \sqrt{2} r_1)$$

其中:
$$Q(\alpha x) = \int_x^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt = \Gamma(\alpha)(1 - \Gamma(\alpha, x))$$

$$\lambda = \pi n / A$$

式中, n 为样地上的林木株数, A 为样地面积。
 $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数, $\Gamma(\alpha, x)$ 为不完全 Gamma 函数:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt$$

$$\Gamma(\alpha, x) = P(\alpha, x) / \Gamma(\alpha)$$

对不完全 Gamma 函数有:
$$\Gamma(\alpha, 0) = 0, \Gamma(\alpha, \infty) = 1$$

$$P(\alpha, x) = \int_0^x e^{-t} t^{\alpha-1} dt$$

$$\Gamma(\alpha, x) = 1 - Q(\alpha, x) / \Gamma(\alpha)$$

则增面积林木的期望比例为:

$$p = \int_0^{\infty} P(r_2 \geq \sqrt{2} r_1 | r_1) 2\lambda r_1 e^{-\lambda r_1^2} dr_1 = 2\lambda \int_0^{\infty} Q(2, \sqrt{2} r_1) r_1 e^{-\lambda r_1^2} dr_1$$

从 p 的计算公式可见, 满足 $\sqrt{2}$ 原则的林木的期望比例受 λ 的影响很大, 而抽样的比例与 λ 的关系并不明显, 关于这一问题还有待进一步研究。

表 1 样地内增面积林木株数的期望比例与抽样比例的比较

Table 1 The compare between the expectation proportion and sample proportion of increasing area trees

样地号 Plot No.	样地 面积 Plot area (m ²)	总株数 Total of trees	增面积 林木株数 Number of increasing area trees	增面积林 木的比率 Proportion of increasing area trees	λ	p	总独占 圆面积 Total mono- polized circle area(m ²)	均匀度 Uniform index	下限 Lower limit	上限 Uper limit	格局类型 Pattern type
整体 Whole	13597	1198	620	0.51	0.276	0.391	2945	0.2757	0.3005	0.3365	集聚 Aggregated
1	2351	213	116	0.54	0.284	0.397	576	0.3121	0.2769	0.3624	随机 Random
2	1989	219	116	0.52	0.345	0.437	393	0.2520	0.2762	0.3601	随机集聚 Aggregated
3	1736	167	85	0.50	0.302	0.409	388	0.2847	0.2718	0.3683	随机 Random
4	2262	190	97	0.51	0.263	0.381	420	0.2365	0.2746	0.3651	集聚 Aggregated
5	2512	209	110	0.52	0.261	0.379	465	0.2358	0.2762	0.3628	集聚 Aggregated
6	2743	199	96	0.48	0.227	0.352	697	0.2975	0.2756	0.3640	随机 Random

4 结论与讨论

- (1) 均匀度的定义有效地将格局的定性分析和定量分析统一起来, 计算和操作均比较方便。
- (2) 在森林择伐作业中, 均匀度可以用于比较同一块样地在择伐过程中均匀性的变化。在择伐中, 均匀度应控制在什么范围才合理仍没有定论, 但, $L=0, L=1$ 是两个极端, 这两个极端均意味着距离分布的单一性, 随着均匀度 L 的变化, 显然距离分布逐步进入多样性。从生态的角度考虑, 林木间的距离应有一定的多样性, 对于人工林而言均匀度一定较高, 所以距离多样性较低, 林内生物多样性和抗逆性均较低, 容易出现病害和虫害的冲击。所以, 只有适当的均匀度 L 才能保持林木间距离的多样性。
- (3) 从表 1 可见, 总样地的均匀度为 0.2757, 它是由各样地的均匀度对面积的加权平均。但, 很明显, 它并不因为样地内株数的增多而趋于 0.318, 这说明, 样地内有较大的异质性。可见, 均匀度随株数的变化趋势可以用于评价样地异质性。
- (4) 林木采伐的格局控制的操作原则应为: 第 1 邻体距离偏小, 且第 2 邻体距离大于第 1 邻体距离的 $\sqrt{2}$ 倍的林木。
- (5) 满足 $\sqrt{2}$ 原则的实际林木比例(抽样比例)约为 1/2, 它与期望比例不符, 此问题有待进一步研究。

References:

- [1] Li H T. Introduction to studies of the pattern of plant population. *Chinese Bulletin of Botany*, 1995, **12**(2):19~26.
- [2] Lloyd M. Mean Crowding. *J. Anim. Ecol.*, 1967, **36**:1~30.
- [3] Moristita J. Measuring of the dispersion of individuals and analysis of the distributional patterns. *Mem. Fao. Sci.*, Kyushu University Der. E., 1959. 380~385.
- [4] Moore P G. Spacing in plant populations. *Ecology*, 1954, **35**:222~227.
- [5] Hopkins B, Skellam J G. A new method for determining the type of distribution of tree individuals. *Ann. Bot. Lond. N. S.*, 1954, **18**:213~227.
- [6] Clark P J, Evans F C. Distance to nearest neighbour as a measure of spatial Relationships in populations. *Ecology*, 1954, **35**:445~453.
- [7] Donnelly K P. Simulation to determine the variance and edge-effects of total nearest Neighbor distance. In: Hodder, I. R. ed. *Simulation methods in archaeology*. London, United Kingdom: Cambridge University Press. 1978. 91~95.
- [8] Smaltschinski T. Charakterisierung von Baumverteilungen. *Forstwiss. Cent. Bl.*, 1998, **117**:355~363.
- [9] Pielou E C. *Mathematical Ecology*. Wiley, Oxford, United Kingdom, 1977. 385.
- [10] Fuldner K. Zur Strukturbeschreibung in Mischbeständen. *Forstarchiv*, 1995, **66**:235~240.
- [11] Gleichmar W and Gerold D. Indizes zur Charakterisierung der Horizontalen Baumverteilung. *Forstwiss. Cent. Bl.*, 1998, **117**:69~80.
- [12] Kint V, Meirvenne M V, Nachtergale L, et al. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: a comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis. *For. Sci.*, 2003, **49**(1):36~49.
- [13] Wang W Y, Wang Q J, Deng Z F. Communities structural characteristic and plant distribution pattern in alpine *kobresia* meadow, Haibei Region of Qinghai Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(4):336~343.
- [14] Chen G Z, Miu S Y. Studies on the species diversity and the population patterns of mangrove community in Aotou of Guangdong Province. *J. Ecology*, 1994, **13**(2):34~35.
- [15] Zhang Q G, Xu L, Zou Y D, et al. Spatial pattern of hawthorn spider mite population and its application I. Synthetical estimation of population density of adult mites and its sampling technique. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, **5**(2):163~166.
- [16] Shen W S. Distribution patterns of three main air-seeding plant populations in Muus sandy land. *Journal of Desert Research*, 1998, **18**(4):372~378.
- [17] Chen X L, Lian Y S. The geographical distribution patterns and its formative factors on the *Genus hippophare* L. *Acta Bot. Boreal*, 1994, **14**(6):105~110.
- [18] Zhang J T. Analysis of spatial point patterns for plant species. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(4):344~349.
- [19] Luo C W. Moarshan's forest virtual. *J. Northeast Forestry University*, 2002, **30**(5):40~43.
- [20] Luo C W, Si F S, Gao L. Moarshan's potential systema canale analyst and its utility. *J. Northeast Forestry University*, 2002, **30**(6):50~53.
- [21] Sun B, Yang G T, Cei F C, et al. Study on the spatial pattern of *betula platyphylla* population. *Bulletin of Botanical Research*, 1994, **14**(2):201~207.

参考文献:

- [1] 李海涛. 植物种群分布格局研究概况. 植物学通报, 1995, **12**(2):19~25.
- [13] 王文颖, 王启基, 邓自发. 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落的结构特征及其分布格局. 植物生态学报, 1998, **22**(4):336~343.
- [14] 陈桂珠, 缪绅裕. 广东漠头红树植物群落的物种多样性与种群分布格局研究. 生态学杂志, 1994, **13**(2):34~35.
- [15] 张庆国, 徐丽, 邹运鼎. 山楂叶螨种群空间格局及其应用的研究 II. 成螨种群密度综合估计及其抽样技术. 应用生态学报, 1994, **5**(2):163~166.
- [16] 沈渭寿. 毛乌素沙地 3 种飞播植物种群分布格局的研究. 中国沙漠, 1998, **18**(4):372~378.
- [17] 陈学林, 廉永善. 沙棘属植物的分布格局及其成因. 西北植物学报, 1994, **14**(6):105~110.
- [18] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析. 植物生态学报, 1998, **22**(4):344~349.
- [19] 罗传文. 帽儿山虚拟林相的构建. 东北林业大学学报, 2002, **30**(5):40~43.
- [20] 罗传文, 石福生, 高利. 帽儿山的潜在沟系分析及其应用. 东北林业大学学报, 2002, **30**(6):50~53.
- [21] 孙冰, 杨国亭, 迟福昌, 等. 白桦种群空间分布格局的研究. 植物研究, 1994, **14**(2):201~207.