

# 基于空间结构优化的采伐木确定方法研究

郝月兰, 张会儒\*, 唐守正

(中国林业科学研究院 资源信息研究所, 北京 100091)

**摘要:**以吉林省汪清林业局金沟岭林场天然云冷杉林标准地内 147 株树木为研究对象,选用最近邻木取 4 的传统方法和 Voronoi 图来确定每株树木的最近邻木株数和树号,对 2 种方法计算出的混交度、大小比数和角尺度进行比较,在调整角尺度的基础上调整混交度和大小比数并结合临界距离确定采伐木,并且对 Voronoi 图的适用性进行评价。结果表明,根据 2 种确定最近邻木的方法计算出的混交度和大小比数较为一致,同为有效数据,但是最近邻木取 4 计算出的混交度和大小比数偏小;基于 Voronoi 图确定最近邻木计算的角尺度与最近邻木取 4 计算出的角尺度相差较大。根据 Voronoi 图计算的角尺度、混交度和大小比数选择采伐木并结合临界距离确定采伐木,基于 Voronoi 图计算的采伐后的角尺度增大,林木聚集程度增大,其他指标均改善,按照最近邻木取 4 计算的空间结构参数均改善。因此,根据 Voronoi 图计算混交度和大小比数是比较合理的,但是计算角尺度时误差较大,必须结合应用较为普遍的指标进行验证。

**关键词:**混交度; 大小比数; 角尺度; 采伐木; Voronoi 图

**中图分类号:**S757.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2012)05-0163-06

Determination Method of Cutting Tree Based on Forest Stand Spatial Structure Optimization

HAO Yue-lan, ZHANG Hui-ru\*, TANG Shou-zheng

(Institute of Forest Resources Information Techniques, CAF, Beijing 100091, China)

**Abstract:**Based on the 147 trees within the sample plots of natural mixed spruce-fir forest which was located in Jingou Forestry Farm administrated by Wangqing Forestry Bureau in Jilin Province, China, this paper compared the outcomes of calculating the spatial structure indices based on Voronoi diagram (VD) and the outcomes of traditional method in which the number of the nearest neighbor trees was 4 (FT). Uniform angle index was taken as the first optimization target, mingling and neighborhood comparison were adjusted at the same time. Cutting trees were determined according to the spatial structure indices and critical distance, and the applicability of VD was evaluated. The results showed that mingling and neighborhood comparison calculated based on VD and FT were consistent, both belonged to effective data. However, mingling and neighborhood comparison calculated based on FT were lower than the outcomes of the VD, uniform angle index calculated based on VD differed significantly with those calculated based FT. Cutting trees determined according to spatial structure indices calculated based on VD and critical distance, mingling and neighborhood comparison were improved after thinning but uniform angle index was not. Spatial structure indices calculated based on FT were improved after thinning. Overall, mingling and neighborhood comparison calculated based on VD were reasonable while the error of uniform angle index was comparatively large. Therefore, when calculating the uniform angle index based on VD, other indices

收稿日期:2011-10-09 修回日期:2012-03-08

基金项目:林业公益性行业专项“我国典型森林类型健康经营关键技术研究”(201004002);“948”引进项目“森林多目标经营规划决策支持技术引进”(2008-4-60)。

作者简介:郝月兰,女,在读硕士,研究方向:森林资源管理与决策。E-mail:haoyuelan@163.com

\* 通讯作者:张会儒,男,研究员,博士生导师,主要研究方向:森林资源经营管理。E-mail:huiru@caf.ac.cn

which were used for spatial structure distribution evaluation were needed to confirm the result.

**Key words:** mingling; neighborhood comparison; uniform angle index; harvested wood; Voronoi diagram

空间结构是森林的重要特征,它反映了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。林木分布格局是种群生物学特性、种内与种间关系以及环境条件综合作用的结果,是种群空间属性的重要方面,也是种群的基本数量特征之一<sup>[1-2]</sup>。研究分析林分空间结构,常用的指标主要是惠刚盈等提出的混交度、大小比数和角尺度,计算空间结构指标最重要的是确定参照树的最近邻木。

但是一直以来对于最近邻木的确定都存在争议,在进行空间结构分析时大多数人指定研究区域的半径,将半径包围的树木作为最近邻木进行分析,半径过大可能把非最近邻木也包括在内,半径过小可能把最近邻木排除在外,因此确定合适的半径对空间结构参数的计算至关重要。K. Füldner<sup>[3]</sup>提出  $n=3$ ,但对于由 4 个树种以上组成的混交林而言显然是不够的,为了弥补这个问题,惠刚盈<sup>[4]</sup>等的研究指出  $n=4$  可以满足混交林中空间结构分析的要求,之后这一理论被广泛地应用到空间结构的计算中。最近几年,一些学者利用 Voronoi 图来确定参照树最近邻木分析林分空间结构。汤孟平<sup>[5]</sup>等根据 Voronoi 图确定最近邻木,利用大小比数分析了天目山优势树种种内种间的竞争强度,之后分析了混交度;赵春燕<sup>[10]</sup>等用 Voronoi 图结合 Delaunay 三角网确定最近邻木和各最近邻木之间的夹角,研究湛江红树林的空间结构。

择伐是对实施经营林地最重要的干扰<sup>[12]</sup>。合理的择伐是调整林分空间结构的手段。本研究即是根据 Voronoi 图和最近邻木取 4 的 2 种方法确定每株树的最近邻木的树号和株数,进而计算样地的混交度、大小比数和角尺度并将 2 种方法的计算结构进行比较,根据 Voronoi 图的计算结果提出林分空间择伐优化方案,分析林分空间结构优化效果并分析 Voronoi 图在林分空间结构计算方面的适用性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于吉林省汪清林业局金沟岭林场,坐标为  $130^{\circ}5' \sim 130^{\circ}20'E, 43^{\circ}17' \sim 43^{\circ}25'N$ 。地貌属低山丘陵地带,海拔  $550 \sim 1100\text{ m}$ ,平均坡度  $10 \sim 25^{\circ}$ ,个别地段在  $35^{\circ}$  以上。属季风型气候,气温以 1 月份最低,平均在零下  $32^{\circ}\text{C}$  左右,7 月份气温最高平均在  $32^{\circ}\text{C}$  左右,全年平均气温在  $4^{\circ}\text{C}$  左右。树种

组成 4 榆 3 臭 1 云 1 红 1 色,森林类型为天然云冷杉针阔混交林,简称天然云冷杉林。

样地内的主要树种有冷杉 (*Abies nephrolepis*)、云杉 (*Picea asperata*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、椴树 (*Tilia amurensis*)、柞树 (*Quercus mongolica*)。

### 1.2 数据收集与整理

在研究区内设置长方形样地,样地大小为  $40\text{ m} \times 50\text{ m}$ ,面积  $0.2\text{ hm}^2$ 。对样地进行每木调查,按西南角向东北角的方向,起测径阶为  $6\text{ cm}$ 。以西南角为坐标原点,用皮尺测量每株树木在样地内的坐标  $(x, y)$ 。记录每株树的树种,测量每株树的胸径、树高、东西南北冠幅等因子。

### 1.3 空间指数和计算方法

1.3.1 混交度 混交度用来说明混交林中树种空间隔离程度,它被定义为对象木的最近邻木与对象木不属同种的个体所占的比例<sup>[1]</sup>。用公式表示为:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (1)$$

式中:  $M_i$  表示林木  $i$  点的混交度;  $n$  表示最近邻木株数;

$$v_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当对象木 } i \text{ 与第 } j \text{ 株最近邻木属不同树种} \\ 0 & \text{当对象木 } i \text{ 与第 } j \text{ 株最近邻木属同一树种} \end{cases}$$

1.3.2 大小比数 大小比数被定义为大于对象木胸径的最近邻木株数占所考察的全部最近邻木的比例<sup>[1]</sup>,用公式表示为:

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_{ij} \quad (2)$$

式中:  $U_i$  表示第  $i$  株对象木的大小比数;  $n$  表示对象木  $i$  的最近邻木株数;

$$k_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{当相邻木 } j \text{ 胸径小于对象木 } i \text{ 的胸径} \\ 1 & \text{当相邻木 } j \text{ 胸径大于对象木 } i \text{ 的胸径} \end{cases}$$

1.3.3 角尺度 从参照树出发,任意 2 株最近相邻木的夹角有 2 个,令小角为  $\alpha$ ,大角为  $\beta$ , $\alpha + \beta = 360^{\circ}$ 。角尺度  $W_i$  被定义为  $\alpha$  角小于标准角  $\alpha_0$  ( $= 72^{\circ}$ ) 的个数占所考察的 4 个  $\alpha$  角的比例<sup>[1]</sup>。 $W_i$  用下式来表示:

$$W_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 z_{ij} \quad (3)$$

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

1.3.4 构建 Voronoi 图 在不同的领域,Voronoi 图有时也被称为 Thiessen 多边形、Dirichlet 网格或

Wigner-Seitz 区域, 它是关于空间邻近关系的一种基础数据结构<sup>[13]</sup>。

Voronoi 图(图 1)的数学定义: 设  $p_i (i=1, 2, \dots, n)$  为二维欧氏空间(平面)上的  $n$  个互不相同的点, 将由  $V_n(p_i) = \bigcap_{j \neq i} \{p | d(p, p_i) < d(p, p_j)\}$  所给出的对平面的分割, 称为以  $p_i (i=1, 2, \dots, n)$  为母点(或生成元)的 Voronoi 图。其中  $d(p, p_i)$  为  $p$  和  $p_i$  间的欧氏距离, 欧氏距离即平面上两点之间的直线距离。

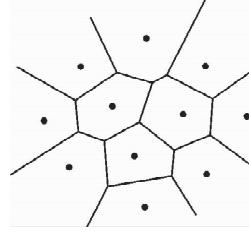


图 1 Voronoi 图

Fig. 1 Voronoi diagram

所有点目标的二维 Voronoi 区域的集合构成点集  $p$  的 Voronoi 图, 该图把平面划分成  $n$  个多边形域, 每个多边形域包含且只包含 1 个点  $p_i$ 。在本研究中, 每一个 Voronoi 单元都唯一包含 1 株树。Voronoi 图是按照对象集合中元素的最近属性将空间划分成许多单元区域。Voronoi 图中任一凸多边形所包围区域的点到该凸多边形的对象点的距离小于该点到其他任何对象点的距离。确定一个对象点后, 则根据包围该对象点的 Voronoi 单元的边确定最近邻木的树号和株数, 根据 Voronoi 图的最近性和邻接性特点, 进行林分空间结构的分析, 计算天然云冷杉林的混交度、大小比数和角尺度。

1.3.5 边缘校正 为了避免边缘效应, 采用缓冲区校正。将样地内距每条林分边线 5 m 之内的环形区设为缓冲区, 其中的标记林木只作为相邻木, 缓冲区环绕的区域为核心区, 其中所有的标记单木作为参照树, 计算空间结构参数<sup>[14]</sup>。

林分内任意一株单木和距离它最近的几株相邻木都可以构成林分空间结构单元, 结构单元核心的那株树叫参照树。空间结构单元的大小取决于在参照树的周围选取的相邻木的株数  $n$ <sup>[4]</sup>。将单株木视为平面上的离散点, 构建 Voronoi 图, 以此结构为依据确定每株参照树的最近邻木株数和最近邻木的树号, 计算混交度、大小比数和角尺度, 并把计算结果与传统方法的计算结果进行比较, 以此来探讨该方法在云冷杉林空间结构指数计算中的合理性和适用性, 并为林分空间结构优化确定采伐木提供依据。

1.3.6 优化林分空间结构方案 首先调整林木的

水平分布格局, 根据林分平均角尺度以及角尺度分布, 判读林木的水平分布格局。本研究中调查样地是聚集分布。一般认为, 林分如果不受严重干扰, 经过漫长的进展演替后, 水平分布格局应为随机分布<sup>[15]</sup>。因此, 在进行采伐时, 要先对林分的角尺度进行分析, 优先考虑将林分的水平分布格局从聚集分布向随机分布调整, 随机分布的角尺度取值范围是  $0.475 \leq W \leq 0.517$ 。

必要时, 可根据 Johann 提出的临界距离计算公式进一步计算。若参照树与备选采伐木的实际距离小于临界距离, 则根据采伐原则, 确定是否伐除。

临界距离计算公式是:

$$G_{iz} = \frac{h_z}{A} \cdot \frac{d_i}{d_z} \quad (4)$$

式中:  $G_{iz}$ —参照树到竞争树之间的临界距离;  $h_z$ —参照树的树高;  $d_i, d_z$ —竞争树  $i$  和参照树  $z$  的胸径;  $A$ —定义疏伐权重的参数。

1.3.7 确定采伐强度 为了使择伐的保留木生长良好, 并为更新幼苗幼树生长发育创造良好的生态环境, 采伐时必须掌握一定的采伐强度。根据永续利用的原则, 采伐总量不应超过该时期的林分的生长量。考虑到尽量减少对森林的干扰, 采伐强度应为弱度择伐, 每次采伐的蓄积量不超过总蓄积的 15%<sup>[12]</sup>。该样地共有 147 株树, 总蓄积为 105.2058 m<sup>3</sup>, 蓄积的 15% 是  $105.2058 \times 15\% = 15.78 \text{ m}^3$ , 即采伐木的蓄积不应超过 15.78 m<sup>3</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 2 种方法计算出的混交度、大小比数和角尺度的比较

图 2 为运用 ArcGIS 软件生成单株木的 Voronoi 图。表 1 为按照最近邻木株数取 4 计算的混交度、大小比数和角尺度值; 表 2 为基于 Voronoi 图计算的混交度、大小比数和角尺度值。

从表 1 可以看出, 最近邻木株数 = 4 时混交度、大小比数和角尺度只能取 0, 0.25, 0.5, 0.75 和 1 这 5 个值。从表 2 可以看出, 基于 Voronoi 图确定对象木的最近邻木时以包围对象木的 Voronoi 单元的边数来确定最近邻木株数, 所以最近邻木的株数有多个取值而不仅限于 4, 基于 Voronoi 图确定的最近邻木株数最少是 3 株, 最多是 11 株, 基于 Voronoi 图确定的最近邻木株数平均值为 6, 对应计算出的混交度、大小比数和角尺度也有多个取值。

2 种方法计算混交度和大小比数均采用缓冲区法进行边缘校正, 核心区林木株数均为 93 株。从表 3 可以看出, 基于 Voronoi 图计算出的混交度均值

为  $M_v = 0.8016$ , 最近邻木株数取 4 计算的混交度  $M = 0.7849$ , 两者相差 0.0167, 两者之间差异不显著。说明基于 Voronoi 图确定最近邻木计算出的混

交度和最近邻木取 4 计算出的混交度均为有效指数, 两者之间具有较高的相关性和一致性。

表 1 按照最近邻木取 4 计算的空间结构参数

Table 1 Spatial structure parameters calculated based on 4 trees

树号	角尺度	混交度	大小比数	树号	角尺度	混交度	大小比数
6	0.50	0.50	0.00	16	0.75	1.00	1.00
7	0.50	1.00	0.25	17	0.50	1.00	0.50
8	0.50	1.00	0.00	18	0.75	0.75	0.75
9	0.25	0.50	0.75	20	0.50	0.75	0.25
10	0.25	1.00	0.25	25	0.50	1.00	0.00
11	0.75	0.75	0.75	28	0.25	0.50	0.25
12	0.50	0.50	0.50	32	0.50	1.00	0.00
13	0.50	1.00	0.25	33	1.00	1.00	1.00
14	0.50	0.50	1.00	...	...	...	...
15	0.25	0.50	0.50	156	0.50	1.00	1.00

表 2 基于 Voronoi 图计算的空间结构参数

Table 2 Spatial structure parameters calculated based on Voronoi diagram

树号	角尺度	混交度	大小比数	树号	角尺度	混交度	大小比数
6	0.83	0.33	0.00	16	0.71	0.86	0.86
7	0.86	1.00	0.57	17	0.60	1.00	0.40
8	0.60	1.00	0.00	18	1.00	0.83	0.50
9	0.40	0.60	0.60	20	0.67	1.00	0.00
10	0.50	1.00	0.00	25	0.86	0.86	0.71
11	0.80	0.60	0.80	28	0.67	0.67	0.50
12	1.00	0.63	0.50	32	0.86	0.71	0.43
13	0.25	1.00	0.25	33	0.40	0.80	0.00
14	0.67	0.83	1.00	...	...	...	...
15	0.40	0.80	0.60	156	0.40	0.80	1.00

根据最近邻木取 4 计算的样地平均大小比数  $\bar{U} = 0.4919$ , 根据 Voronoi 图计算的样地的大小比数  $\bar{U}_v = 0.4977$ ,  $\bar{U}_v$  和  $\bar{U}$  非常接近, 两者相差 0.0058, 差异不显著。2 种方法计算出的大小比数值均为有效数据, 这说明 2 种方法计算出的大小比数具有较高的相关性和一致性, 但同时也表明, 由于传统最近邻木取 4 的方法不能比较全面灵活地确定最近邻木, 致使大小比数的计算结果和混交度一样被低估了。

根据最近邻木取 4 计算的样地核心区的林木平均角尺度  $\bar{W} = 0.5296$ , 根据 Voronoi 图计算的核心区林木的平均角尺度  $\bar{W}_v = 0.6279$ , 两者之间相差 0.0083, 相比较 2 种确定最近邻木的方法计算的混交度和大小比数的差异, 角尺度相差较大。但是 2 种计算结果均大于 0.517, 核心区树木属于聚集分布。

## 2.2 确定林分的水平空间分布

根据林分的平均角尺度计算结果, 样地属于聚集分布。根据林分空间结构优化的原则, 应将样地由聚集分布调整为随机分布。在本研究中根据 Voronoi 图的计算结果, 样地的平均角尺度是 0.6286, 所有角尺度  $> 0.6286$  的树均是潜在的调

整对象。角尺度  $> 0.6286$  的角尺度值是 0.67、0.71、0.75、0.78、0.80、0.83、0.86、0.88、0.89 和 1。

## 2.3 确定采伐木

根据空间结构优化的原则, 调整角尺度由聚集分布向随机分步发展, 扩大林分的树种混交程度, 减小林木间的竞争程度, 保证树种的生长空间。备选采伐木基于 Voronoi 图的混交度是 0.8026, 大小比数是 0.4997, 根据最近邻木取 4 计算的混交度是 0.7809, 大小比数是 0.5071。根据 Voronoi 图计算的角尺度进行空间分布调整, 所以在调整角尺度的基础上, 备选采伐木中根据 Voronoi 图计算的混交度  $< 0.8026$  和大小比数  $> 0.4997$  的树优先伐除。在衡量混交度、大小比数和树种等指标的同时, 必要时根据临界距离进一步确定采伐木。根据以上判定原则, 共确定采伐木 22 株, 采伐蓄积是 8.2051  $m^3$ (表 3)。

确定采伐木后, 调整了林分的空间结构。从表 4 可知, 采伐前根据 Voronoi 图和最近邻木取 4 方法计算的角尺度均表明样地核心区林木属于聚集分布, 混交度较高, 竞争程度属于中度竞争, 采伐后根据 Voronoi 图计算的角尺度增大, 据此判断样地的

聚集程度有所增强;根据最近邻木取4计算的角尺度减小,采伐后的角尺度值介于0.475~0.517之间,据此判断采伐后样地核心区林木是随机分布,采伐后混交度扩大,大小比数减小,根据最近邻木取4计算的大小比数略微增大,从最近邻木取4的计算结果分析达到了预期的调整效果。但是根据Voronoi图计算的结果分析,混交度增大,大小比数

减小,但是角尺度增大,仍未聚集分布,未达到调整效果,根据Voronoi图确定最近邻木与根据最近邻木取4计算的角尺度差距较大,两者之间在判断林分的水平分布状态方面结果不一致,这与Voronoi的成图原理有关,Voronoi图是根据林木的位置确定最近邻木,而最近邻木取4是提取距离参照树最近的4株邻近树的信息,并不一定是相邻的。

表3 采伐木统计

Table 3 Statistics of cutting trees

树号	混交度	大小比数	采伐原因	树号	混交度	大小比数	采伐原因
6	0.33	0.00	调整树种混交度	77	0.80	0.80	被邻近木挤压,与参照树相距0.82 m
9	0.60	0.75	调整树种混交度,伐除被压木	79	1.00	0.25	被邻近木挤压,与参照树相距0.70 m
15	0.80	0.60	挤压邻近木红松,同时被邻近木挤压	80	1.00	0.00	挤压参照树云杉,距离仅为0.86 m
37	0.67	0.50	调整混交度和大小比数	93	1.00	0.50	被邻近木挤压,与参照树距离仅为0.92 m
40	0.40	0.60	调整混交度和大小比数	96	1.00	0.25	挤压参照树柞木
42	0.67	0.75	被邻近木挤压	99	0.75	0.50	被邻近木挤压,与参照树距离0.85 m
46	0.50	0.50	混交度低	105	0.40	0.00	调整树种混交度
60	0.75	0.75	被邻近木挤压	120	0.67	0.83	被邻近木挤压,距参照树仅为0.58 m
63	1.00	0.80	被椴树和黄菠萝挤压	129	1.00	0.80	被邻近木挤压,距参照树仅为0.58 m
65	1.00	0.50	与参照树相距0.41 m,被挤压	138	0.57	1.00	调整混交度和大小比数,与参照树距离仅为0.86 m
70	0.40	0.80	混交度低,与参照树距离0.86 m	156	0.80	1.00	被邻近木挤压,与参照树距离仅为0.3 m

表4 采伐前后空间结构参数的变化统计

Table 4 Spatial structure parameters comparison of before and after cutting

时间	根据Voronoi图确定最近邻木			最近邻木取4		
	角尺度	混交度	大小比数	角尺度	混交度	大小比数
采伐前	0.627 9	0.801 6	0.497 7	0.529 6	0.784 9	0.491 9
采伐后	0.636 8	0.845 9	0.496 1	0.485 9	0.869 7	0.493 0

### 3 结论与讨论

根据Voronoi图确定最近邻木计算的混交度和大小比数与最近邻木取4计算的结果具有较高的一致性,说明2种方法得到的结果均为有效指数,根据Voronoi图确定最近邻木计算的角尺度和最近邻木取4计算的角尺度相差较大,但是根据两者判断样地核心区林木是聚集分布。

以调整林分的角尺度为首要目标,同时扩大林分的混交度减小林木间的竞争程度,最终共确定采伐木22株,采伐木蓄积8.2051m<sup>3</sup>,在采伐强度范围内。22株采伐木树号分别是6、9、15、37、40、42、46、60、63、65、70、77、79、80、93、96、99、105、120、

129、138、156。根据Voronoi图计算的角尺度、混交度和大小比数选择采伐木并结合临界距离确定最终采伐木,采伐后根据Voronoi图和最近邻木取4的2种方法计算林分的角尺度、混交度和大小比数,2种方法确定最近邻木计算的混交度均扩大,基于Voronoi图计算的大小比数略有减小,根据最近邻木取4计算的大小比数略有增大。基于Voronoi图确定最近邻木计算的角尺度相较于采伐前有所增大,即样地核心区林木的聚集程度较采伐前更强,而根据最近邻木取4计算的角尺度减小,其值表明采伐后的核心区林木是随机分布。

计算混交度、大小比数和角尺度时最重要的是确定最近邻木的株数和树号,以调用公式运算,最近

邻木取 4 法确定只固定取 4 株树,但是在研究区域内,不同样地内或同一样地不同空间位置林分空间结构不同,当确定对象木的最近邻木时,最近邻木株数不足 4 株时仍然按照 4 株计算,就会把没有干扰参照树的树木当做干扰树运算,这样就使结果偏大;当林木处于团状分布,这样林木的最近邻木就会大于 4 株,仍按 4 株计算就会使结果偏小,使用 Voronoi 图确定最近邻木则可以灵活处理这种情况,往往更能反映实际的空间结构<sup>[2]</sup>,因而计算结果更精确。

以 147 株林木为平面点生成 Voronoi 图分析其中 93 株的空间结构参数,根据 Voronoi 图确定最近邻木时参照树与最近邻木的距离最近是 0.45 m,距离最远是 9.66 m,差异比较大,然而在实际分析中,距离较远的林木可能并没有干扰参照树的生长空间,然而因为 Voronoi 图的成图特点周围的树一般都包含在参照树的最近邻木中,因此,在根据 Voronoi 图确定最近邻木计算角尺度、混交度和大小比数选择采伐木时必须结合临界距离,才能确定采伐木确实干扰参照树的生长。在采伐后分析采伐效果时,在根据 Voronoi 图确定最近邻木计算空间结构参数时,必须结合其他较普遍使用的指标同时评价采伐后的效果。

## 参考文献:

- [1] 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, 24(6): 1225-1229.  
HUI G Y, Gadow K V, HU Y B, et al. Characterizing forest spatial distribution pattern with the mean value of uniform angle index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1225-1229. (in Chinese)
- [2] 杨澄. 桥山天然栎林树种多样性及生态位分析[J]. 西北林学院学报, 1998, 13(4): 28-32.  
YANG C. An analysis on the diversity and ecological niche of oak forest in the Qiaoshan area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1998, 13(4): 28-32. (in Chinese)
- [3] FÜLDNER K. Strukturbeschreibung von buchen-edellaubholz-Mischwaldern[M]. Goettingen: Cuvillier Verlag: Göttingen, 1995.
- [4] 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 G Y, HU Y B. Measuring species spatial isolation in mixed forests[J]. Forest Research, 2001, 14(1): 23-27. (in Chinese)
- [5] 李展, 宋丁全, 王福升, 等. 三元地区毛竹林分空间结构分析[J]. 金陵科技学院学报, 2010, 26(3): 63-67.  
LI Z, SONG D Q, WANG F S, et al. The forest stand spatial structure of phyllostachys heterocycla in Sanyuan[J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2010, 26(3): 63-67. (in Chinese)
- [6] 邓送求, 闫家锋, 关庆伟. 南京紫金山枫香风景林空间结构分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(4): 117-122.  
DENG S Q, YAN J F, GUAN Q W. Spatial structure of scenic forest of *Liquidambar formosana* in Nanjing Zijin Mountain [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Nat. Sci. Ed., 2010, 34(4): 117-122. (in Chinese)
- [7] 邓送求, 闫家锋, 关庆伟. 宝华山紫楠风景林林分空间结构分析[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(4): 29-32.  
DENG S Q, YAN J F, GUAN Q W. Spatial structure of scenic of *Phoebe sheareri* in Baohuashan, Jiangsu Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(4): 29-32. (in Chinese)
- [8] 龚直文, 亢新刚, 顾丽, 等. 长白山云冷杉针阔混交林演替过程空间格局变化[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(1): 44-46, 53.  
GONG Z W, KANG X G, GU L, et al. Spatial pattern dynamics of forest succession in spruce-fir mixed stand in Changbai Mountain, Northeast China [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(1): 44-46, 53. (in Chinese)
- [9] 汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 基于 Voronoi 图的群落优势树种内种间竞争[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4707-4714.  
TANG M P, CHEN Y G, SHI Y J, et al. Intraspecific and interspecific competition analysis of community dominant plant populations based on Voronoi diagram[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4707-4716. (in Chinese)
- [10] 汤孟平, 周国模, 陈永刚, 等. 基于 Voronoi 图的天目山常绿阔叶林混交度[J]. 林业科学, 2009, 45(6): 1-5.  
TANG M P, ZHOU G M, CHEN Y G, et al. Mingling of evergreen broad-leaved forests in Tianmu Mountain based on Voronoi diagram[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(6): 1-5. (in Chinese)
- [11] 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.  
ZHAO C Y, LI J P, LI J J. Quantitative analysis of forest stand spatial structure based on Voronoi diagram & delaunay triangulated network [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(6): 78-84. (in Chinese)
- [12] 沈国舫. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [13] 刘金义, 刘爽. Voronoi 图应用综述[J]. 工程图学学报, 2004(2): 125-132.  
LIU J Y, LIU S. A survey on applications of voronoi diagrams [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004(2): 125-132. (in Chinese)
- [14] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波. 结构化森林经营技术指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [15] 张家城, 陈力, 郭泉水, 等. 演替顶极阶段森林群落优势树种分布的变化趋势研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(3): 256-268.  
ZHANG J C, CHEN L, GUO Q S, et al. Research on the change trend of dominant tree population distribution patterns during development process of climax forest communities [J]. Acta Phytogeographica Sinicae, 1999, 23(3): 256-268. (in Chinese)