油松人工林单木邻体竞争模型

刘宪钊[1*] 陆元昌[1] 任云卯[2]

([1]中国林业科学研究院资源信息所, 北京 100091; [2]北京市西山试验林场, 北京 100029)

摘 要 研究林木个体间竞争关系,建立以保留木为对象的单木邻体竞争模型对于人工林的抚育经营具有重要的作用。本研究以北京西山试验林场油松人工林为研究对象,采用改进的 Hegyi 竞争指数分析林木的竞争强度;以对象木胸径和空间相对位置为参数构造加权 Voronoi 图,选择 $S_i = \sum_{j=1}^{n} \lambda \frac{(\alpha_{ij} - \alpha_i)^a}{L^b}$ 作为模型表达式,分析对象木与邻近的少数林木(3 株或 4 株)之间的竞争关系并建立邻体竞争模型。结果表明,油松人工林林木间竞争较剧烈,密度越大、坡位越低的林分中林木间的竞争越强。以胸径和冠幅作为自变量构造的单木竞争模型具有较低的标准误,3-邻体竞争模型和 4-邻体竞争模型的相关性分别为 0.83 和 0.84。本研究基于 Voronoi 图和林冠面积建立单木邻体竞争模型,为优化林分空间结构、提高森林质量的单株木抚育择伐经营技术提供参考。

关键词 营养面积; 竞争指数; 油松人工林; 模型

Individual adjacent competition model of *Pinus tabuliformis* plantation. LIU Xian-zhao[1*], LU Yuan-chang[1], REN Yun-mao[2] ([1]*Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*; [2]*Beijing Xishan Experimental Forest Farm, Beijing* 100029, *China*).

Abstract: Understanding and modeling the competition relationships of individual trees play an important role in tending of forest plantation. A study was performed to calculate the competition of individual trees of *Pinus tabuliformis* plantation in Xishan Experiment Forest Farm, Beijing. The competitive intensity was analyzed by modified Hegyi index, and the weighted Voronoi diagram of objective trees was mapped by DBH and relative spatial position in order to determine its competition unit. Take formula $S_i = \sum_{j=1}^{n} \lambda \frac{(\alpha_{ij} - \alpha_i)^a}{L^b}$ as reference to model the competition relationship between an objective tree and other 3 or 4 nearest trees. The results showed that the competition of individual trees was high, especially in plantation with high density and lower slope position. Model combining with the DBH and crown diameter had a lower standard error, with the estimation effects (R^2) of 0.83 and 0.84 for 3- and 4-neighborhood competition model, respectively. Based on the analysis of overlapping area of Voronoi diagram and crown canopy, the adjacent competition model of individuals provided a reference for stand structure optimizing and thinning in forest management.

Key words: nutrient area; competition index; *Pinus tabuliformis* plantation; model.

竞争是塑造植物形态、生活史以及植物群落结构和动态的主要动力之一,植物个体营固着生长的特性决定了其在生长过程中不是和种群内的所有个体争夺资源,而是和它的邻近个体相互作用(Pacala *et al.*,1985)。森林演替过程中,活力强的林木通过竞争逐渐淘汰那些位于林木之间、距离较近、空间营养面积重叠的竞争木。竞争是林木生长、林分结构变化和森林群落演替的一个主要影响因素,同时也是森林抚育经营中林分空间结构调整和优化的一个

北京市自然科学基金项目(8152033)和国家林业局造林绿化管理司委托项目(1692016-02)资助。
收稿日期: 2016-01-20 接受日期: 2016-08-10
*通讯作者 E-mail: lxz9179@163.com

重要标准(Bélanda *et al*.,2003;汤孟平,2010)。

同一树种具有相似的生态习性,生长发育过程中对资源和空间需求而产生的竞争较种间竞争激烈。林木所承受的竞争压力主要通过竞争指数来表达,取决于与个体大小有关的胸径、树高、冠幅和林木所处的局部环境(Li *et al*,2014a,2014b)。竞争指数包括与距离有关的竞争指数和与距离无关的竞争指数,前者考虑到对象木和其环境信息,涵盖了对象木、竞争木以及树木的位置这些决定竞争状态的因素,在调整林分结构时运用比较广泛,适用于不同类型林分的动态模拟(段仁燕,2005;汤孟平,2007;惠刚盈,2010,2013)。传统竞争模型研究中对于竞争对象的选择主要通过固定距离和可变距离的方法进行获取,即选择对象木周围固定半径和可变半径范围内的林木,研究这些林木对于对象木的竞争情况。该研究方法存在 2 个缺点:一是圆半径尺寸不统一;二是确定的邻近木不准确(汤孟平,2007)。针对这两个问题,一些学者提出采用加权 Voronoi 图确定对象木的空间结构单元和邻近木个数,选择结构单元周围最近的少数几株林木,研究对象木所受邻近木的竞争压力,这种方法能够有效地判断对象木在林分中受到邻近木的压迫和竞争强度,为森林抚育中的干扰树采伐提供理论依据(李际平等,2014)。

油松(*Pinus tabuliformis*)耐干旱、耐瘠薄,成活率高,是华北地区最主要的人工林造林树种之一。据北京市森林资源清查资料显示,油松人工林面积、蓄积分别占该区人工林总量的 22%和 17%,对维护区内生态安全,改善环境质量起到了重要作用(段劼等,2012)。由于地理区位的局限性,油松人工林抚育经营主要采用低强度的单株择伐经营,研究保留木的周围固定数量(3 株或 4 株)邻近木对其的竞争干扰,便于基层营林者对干扰木的判断和抚育措施的实施。本文以北京西山试验林场油松人工中龄林为研究对象,基于加权 Voronoi 图确定对象木的竞争单元,选取胸径、树高和冠幅 3 个指标建立与距离有关的竞争模型,为油松人工林的抚育经营提供参考。

1 研究区概况

西山试验林场位于北京西北部,属太行山余脉,中心地理坐标为 116°28′ E,39°54′ N,总面积 8000 hm^2。西山林场属低海拔山区,为典型的华北石质山区,平均海拔 300~400 m,平均坡度 15°~35°,阳坡较缓,阴坡陡峭。林场属暖温带大陆性季风气候类型,年平均降雨量 630 mm,平均气温 22 ℃。林场地带性植被分区属温带落叶阔叶林,气候顶极群落为松栎混交林,人工种植的树种主要以油松、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)等为主。

2 研究方法

2.1 调查方法

2015 年 8 月在西山试验林场魏家村分场 42 年生油松人工林内分别设置 30 m×30 m 的方形样地 4 块(样地范围:39° 58′ 10.0″ N—39° 58′ 11.4″ N,116°11′11″ E—116°11′14.2″ E),对样地内胸径大于 5 cm 的油松进行每木检尺:胸径采用围尺测量,精确到 0.01 cm,树高采用超声波测高仪(Vertex Iv),精确到 0.1 m,冠幅用皮尺测量,精确到 0.1 m,并记录了每株油松的空间相对坐标位置,精确到 0.1 m。此外还调查了海拔、坡向、坡位、坡度等立地环境因子,样地信息见表 1。

经统计,4 个样地林木共计 365 株,拟选取建模林木样本 300 株,模型检验数据 65 株。

2.2 数据分析方法

2.2.1 林分竞争指数 针对 Hegyi 竞争指数计算过程中分母可能为 0 值的情况,本研究采用改进的竞争指数计算公式(汪大雄等,2004):

$$CI_j = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{D_i}{D_j}\times\frac{1}{L_{ij}+1}\right]$$

式中:CI_j为第j株林木的竞争指数,D_i为竞争林木i

表 1 样地基本信息

Table 1 Information of sample plots

样地号	海拔(m)	坡向	坡位	坡度(°)	密度(株×hm^{-2})	平均胸径(cm)	平均树高(m)	平均冠幅(m)
1	253	东北	下	8	1025	17.72 (3.33)	12.74 (1.26)	1.65 (0.20)
2	257	东北	中下	10	1072	18.74 (3.80)	12.93 (1.43)	1.58 (0.27)
3	262	东	中上	10	984	19.77 (3.43)	13.14 (1.48)	1.66 (0.35)
4	272	东北	上	15	975	17.38 (2.64)	13.03 (0.95)	1.62 (0.24)

括号内为标准差。

的胸径，D_j 为保留木的胸径，L_{ij}为保留木与竞争木之间距离，n 为样地内林木数量。

2.2.2 林木竞争单元(加权 Voronoi 图)确定 设 p_i ($i=1,2$,为二维欧氏空间(平面)上的 n 个互不相同的点，λ_i($i=1,2,\cdots,n$)是给定的 n 个正实数，称

$$V_n(p_i,\lambda_i)=\bigcap_{j\neq i}\left\{p\left|\frac{d(p,p_i)}{\lambda_i}<\frac{d(p,p_j)}{\lambda_j}\right.\right\} \quad (2)$$

式(2)为点 p_i 的权重为 λ_i 的 Voronoi 区域，其中 $d(p,p_i)$为 p 和 p_i 间的欧氏距离。如果 $i\neq j$ 时，$\overline{V_n(p_i,\lambda_i}\cap\overline{V_n(p_j,\lambda_j)}$ 非空且非单点集，则称 $\overline{V_n(p_i,\lambda_i)}\cap\overline{V_n(p_j,\lambda_j)}$是 p_i 和 p_j 之间的加权 Voronoi 边，其中，$\overline{V_n(p_i,\lambda_i)}$ 为的闭包。两条以上加权 Voronoi 边的交点称为加权 Voronoi 区域的顶点。将 $V_n(p_i,\lambda_i)$($i=1,2,\cdots,n$)及其边界称为以 p($i=1,2,\cdots,n$)为母点(或生成元)，λ_i($i=1,2,\cdots,n$)为权重的 Voronoi 图，图形面积即为竞争单元面积(周恩辉等，2010)。

本研究将对象木的竞争单元面积视为林木的实际营养面积，其林冠面积视为林木理论营养面积，理论营养面积与实际营养面积的差值作为该林木受邻近木的竞争压迫数值。

2.2.3 基于营养面积重叠分析的邻体竞争模型研究 Canham 等(2004)以冠幅投影面积(NCI)作为应变量构造了包含对象木信息和不包含对象木信息的邻体竞争模型。

$$NCI_i=\sum_{j=1}^{n}\lambda_i\left(\frac{(DBH_{ij}-DBH_i)^a}{L^b}\right) \quad (3)$$

根据该经验模型式，本研究将应变量替换为理论营养面积和实际营养面积的差值作为对象木所受的竞争压迫，作为模型应变量，选取对象木与邻近木的胸径、冠幅、树高及距离作为模型自变量构造模型。通过建模数据的初选，将树高参数剔除，得到：

$$S_i=\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{(DBH_{ij}-DBH_i)^a}{L^b}+\frac{(CW_{ij}-CW_i)^a}{L^b}\right) \quad (4)$$

其中，DBH_{ij}为邻近木胸径，CW_{ij}为邻近木冠幅，DBH_i为对象木胸径，CW_i 为对象木冠幅，L 为邻近木与对象木之间的距离，S 为冠幅的理论面积与实际面积的重叠面积，代表对象木与邻近木之间的竞争情况。考虑到林木所受的竞争主要来自最近邻的少数几株林木，选取与对象木最近的 3 株和 4 株林木，分别建立对象木的 3-邻体和 4-邻体竞争模型。

3 结果与分析

3.1 油松人工林 Hegyi 竞争指数及营养面积

由于林木个体大小及分布的差异，样地内不同林木之间、不同样地林分间竞争差异均不相同(表 2)，2 号样地林木平均竞争指数最大，4 号样地林木平均竞争指数最小，样地间林木竞争指数差距不大，平均竞争指数均高于 0.30，表明林分中林木间的竞争较大。

结合表 1 样地基本信息可知，竞争指数与林分密度有较好的一致性，表现为林分密度越大其林木平均竞争指数越大。其中，林木株数密度最大的 2 号样地林木平均竞争指数最大，达到 0.63，而林木株数密度小的 4 号样地其林木平均竞争指数最小(0.49)。此外，从空间分布上看，位于研究区域中、上部的林分(3 号、4 号样地)其林木平均竞争指数小于研究区域下部的林分。

表 2 给出了林木的 2 种营养面积分析，根据冠幅信息求算的林冠面积作为林木实际的营养面积，根据加权 Voronoi 图获取的林木竞争单元面积作为理论的营养面积，两者的差值可视为林分由于竞争造成的营养面积的缺失。从结果上来看，样地 2 中林木间竞争造成的实际营养面积减少最多(2.49)，大于其他样地。

3.2 油松单木邻体竞争模型

考虑到样地的边缘效应，剔除边界林木后共选取 225 株林木进行 3-邻体竞争模型构建，选取 188 株林木进行 4-邻体竞争模型的构建，检验数据数量不变。

表 2 竞争指数和营养面积信息

Table 2 Information of Hegyi index and nutrient area

样地号	竞争指数(Hegyi)			实际营养面积均值 (m^2)	理论营养面积均值 (m^2)	营养面积差值 (m^2)
	最大值	最小值	平均值			
1	1.65	0.11	0.57(0.22)	8.55 (1.71)	10.39(2.28)	1.84
2	1.96	0.08	0.63(0.31)	7.84 (1.35)	10.33(3.21)	2.49
3	1.51	0.07	0.51(0.18)	8.65 (1.16)	10.55 (2.78)	1.90
4	1.88	0.06	0.49(0.25)	8.24 (2.01)	9.40 (2.28)	1.16

括号内为标准差。

表 3 邻体竞争模型参数及检验

Table 3 Parameter and test of adjacent individual competition model

模型类型	估计值 a	标准误	估计值 b	标准误	R^2
3-邻体	0.03	0.23	1.00	0.20	0.83
4-邻体	0.11	0.36	1.34	0.36	0.84

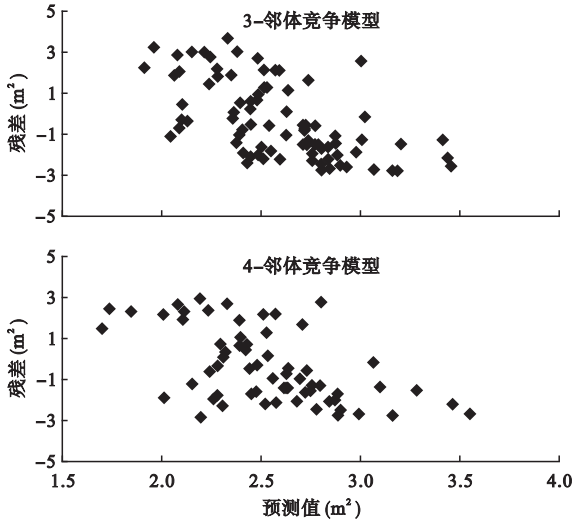


图 1 邻体竞争模型预测残差图

Fig. 1 Residual plot of adjacent individual competition model

表 3 和图 1 分别给出对象木周围最近邻 3 株树和 4 株树对其竞争干扰的影响模型参数、检验及残差情况,2 个模型拟合的可靠性均达到 0.83 及以上,拟合效果较好。

此外,本研究还以单一胸径、冠幅和树高变量下的邻体竞争模型进行拟合研究,拟合效果(R^2)分别为 0.362、0.512 和 0.137,均不及模型 4 的效果。

4 结论与讨论

在温带森林里竞争压力通常是造成树木生长衰退甚至死亡的主要因素(Temesgen *et al.*, 2005)。华北石质山地贫瘠的土壤立地条件和干燥的气候环境进一步加剧了林木间竞争生长的差异性。本研究中位于山地中下坡土壤和水湿条件较好的油松林保留株数和生长状况均优于上坡油松林分,林分竞争指数高于上坡林分,说明在进行小班林分抚育间伐计划时应考虑小地形对于林木竞争形成的影响,而不应采用同一间伐强度进行抚育经营(陆元昌 等 2016)。

目前,很多学者通过加权 Voronoi 图确定对象木的空间竞争单元和邻近木的数量,并以此解决传统竞争模型中采用固定半径和可变半径选择竞争对象的不确定性(汤孟平等,2007;李际平等,2014)。然而,考虑到生产实践中营林工作者的理解和接受水平,将加权 Voronoi 图确定的邻近木数量固定化,更易被营林工作者接受并在生产实践中采用。本研究选取与对象木邻近的 3 株和 4 株林木作为竞争对象并建立竞争模型,以预测少数邻近木与对象木之间的竞争关系。本研究中,油松人工林个体间高度差异不明显,采用单一指标(胸径、冠幅或树高)进行竞争模型拟合结果显示,树高对于林木间竞争的影响不大。由于林冠是接受光照和进行光合作用的主体,冠幅的大小对林木个体间竞争的影响在人工同龄纯林里表现更为明显。

由于研究数据所限,研究中没有将用于构建竞争模型的营养面积重叠值与林木竞争压力指数(CSI)建立关系,后续的研究中需要进一步开展该方向的工作,以实现根据营养面积的压迫状态判断林木所受的竞争等级(如 Hegyi>0.3,表明林木所受竞争剧烈),为以目标树为培育对象的单株择伐抚育经营提供理论参考。

参考文献

段 劼, 马履一, 贾黎明, 等. 2012. 北京地区油松人工林树冠竞争因子的测算预分析. 东北林业大学学报, **40**(3): 14-18.

段仁燕. 2005. 太白红杉邻体干扰与竞争特性的研究(硕士学位论文). 西安: 陕西师范大学.

惠刚盈, 胡艳波, 赵中华, 等. 2013. 基于交角的林木竞争研究. 林业科学, **49**(6): 68-73.

惠刚盈, 赵中华, 胡艳波. 2010. 结构化森林经营技术指南. 北京: 中国林业出版社.

李际平, 封 尧, 赵春燕, 等. 2014. 基于 Voronoi 图的杉木生态公益林空间结构量化分析. 北京林业大学学报, **36**(4): 1-7

陆元昌, 蒋三乃, 雷相东, 等. 2016. 森林抚育规程解读. 北京: 中国林业出版社.

汤孟平, 陈永刚, 施拥军, 等. 2007. 基于 Voronoi 图的群落优势树种种内种间竞争. 生态学报, **27**(11): 4707-4716.

汤孟平. 2007. 森林空间经营理论与实践. 北京: 中国林业出版社.

汤孟平. 2010. 森林空间结构研究现状与发展趋势. 林业科学, **46**(1): 117-120.

汪大雄, 王兆桓, 高毓斌, 等. 2004. 多纳地区台湾杉与台湾赤杨人工混交林生长竞争之研究. 台湾林业科学, **19**(4): 337-351.

周恩辉, 刘淑娟, 张有会. 2010. 加权 Voronoi 区域面积的计算方法. 河北师范大学学报: 自然科学版, **34**(5): 524

-533.

Bélanda M, Lussierb J M, Bergerona Y, *et al*. 2003. Structure, spatial distribution and competition in mixed jack pine (*Pinus banksiana*) stands on clay soils of eastern Canada. *Annals of Forest Science*, **60**: 609-617.

Canham CD, LePage PT, Coates KD. 2004. A neighborhood analysis of canopy tree competition: Effects of shading versus crowding. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**: 778-787.

Li YF, Hui GY, Zhao ZH, *et al*. 2014a. Spatial structural characteristics of three hardwood species in Korean pine broad-leaved forest-Validating the bivariate distribution of structural parameters from the point of tree population. *Forest Ecology and Management*, **314**: 17-25.

Li YF, Ye SM, Hui GY, *et al*. 2014b. Spatial structure of timber harvested according to structure-based forest management. *Forest Ecology and Management*, **322**: 106-116.

Pacala SW, Silander J. 1985. A neighborhood models of plant population dynamics. 1. Single-species models of annuals. *American Naturalist*, **125**: 385-411.

Temesgen H, Mitchell SJ. 2005. An individual-tree mortality model for complex stands of southeastern British Columbia. *Western Journal of Applied Forestry*, **20**: 101-109.

作者简介 刘宪钊,男,1981年生,博士,助理研究员,主要从事多功能近自然森林经营理论和技术研究。E-mail: lxz9179@163.com

责任编辑 张 敏