

# 基于竞争指数的杉木林分生长可视化模拟研究

张宁<sup>1,2</sup>, 张怀清<sup>2\*</sup>, 林辉<sup>1</sup>, 蒋娴<sup>2</sup>

(1. 中南林业科技大学林业遥感信息工程研究中心, 湖南长沙 410004; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

**摘要:**以我国南方速生丰产林——杉木纯林为研究对象,采用改进过的 Hegyi 的简单竞争指数模型对杉木纯林间的竞争强度进行定量分析,并建立单木生长模型,再通过径阶模型将其应用于全林分,将单木生长模型研究扩展到全林分生长模型研究。同时,通过可视化模拟技术,为更加逼真的恢复和重建林分空间结构提供理论依据。

**关键词:**竞争指数;径阶;可视化模拟;杉木林

中图分类号:S711 S791.27

文献标识码:A

## Visual Simulation of Growth Process in *Cunninghamia lanceolata* Based on Competition Index

ZHANG Ning<sup>1,2</sup>, ZHANG Huai-qing<sup>2</sup>, LIN Hui<sup>1</sup>, JIANG Xian<sup>2</sup>

(1. Research Center of Forestry Remote Sensing & Information Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The fast-growing and high-yielding *Cunninghamia lanceolata* pure stands in south China were used to analyze quantitatively the competition intensity among *C. lanceolata* stands by adopting improved Hegyi's simple competition index model, and the individual tree growth model was built. Then the Hegyi's simple competition index model was used for whole stand by diameter class model, in order to broaden individual tree growth model to whole stand growth model. Meanwhile, the visual simulation technique could provide a theoretical basis for restoring and rebuilding the stand spatial structure more realistically.

**Key words:** competition index; diameter class; visual simulation; *Cunninghamia lanceolata* plantation

随着近年来计算机技术的飞速发展,以及对树木的生长机理、森林生态系统的模拟与预测研究的日益重视,采用更加完美的三维图像及其他可视化工具来对林分的生长动态进行实时仿真及模拟显得更为迫切。所以,探讨林分中林木间的竞争关系可以更好的把握林木的生长动态,更加便于对其进行模拟<sup>[1]</sup>。特别是对于了解森林生态系统的结构与功能,预测林分未来的发展动态,进而采取必要的人工

管理措施,以促进森林生态系统功能的完善,具有十分重要的理论和现实意义。

### 1 研究区概况

本文以湖南省株洲市攸县黄丰桥国有林场为研究区。地处 113.04'~113.43'E,27.06'~27.04'N,东西长约 60 km,南北宽约 40 km,呈带状横跨攸县东西部。林场境内地貌以中低山为主,最高海拔

收稿日期:2012-12-18

基金项目:国家 863 计划课题“数字化森林模型与可视化模拟技术研究(2012AA102002)”、林业公益性行业科研专项“林分结构与生长模拟技术研究(201104028)”、国家自然科学基金“杉木林分环境与生长交互性建模与可视化模拟(31170590)”。

作者简介:张宁(1986—),男,甘肃临洮人,硕士研究生,主要从事 GIS 及林业可视化模拟系统研究。E-mail:msnzhangning@hotmail.com

\* 通讯作者:研究员,硕士生导师,主要从事林业可视化模拟技术研究。E-mail:zhang@caf.ac.cn

1 270 m。全场现有林地面积 10 122.6 hm<sup>2</sup>,树种主要以杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、松类 (*Pinus* spp.) 为主。

## 2 研究方法

### 2.1 数据采集

本研究所用的杉木人工纯林固定实验标准样地,主要分布于黄丰桥林场广黄分场。标准地立地条件基本一致,均属中等类型。复查时,严格按照固定标准地的测设要求进行测设,每年复查1次,连续进行了5年。调查主要测定并记录了标准地内每一株树木的位置坐标(用全站仪进行相对位置的测量)、树高(运用激光测距仪进行测量)、胸径、树龄,以及东、西、南、北4个方向的冠幅和每块样地内 10 m × 10 m 的小样方内的树木株数,并绘出了每块标准地内的样木分布图。标准地内主要测树因子的统计信息如下表 1。

表 1 样地测树因子统计信息

树龄/a	平均冠幅 /m	平均胸径 /cm	胸径年生 长量/cm	株数
13~47	2.91~3.49	17.3~22.7	0.32~0.7	121~362

### 2.2 竞争指数的选取

虽然竞争指数在形式上反映的是树木个体生长与生存空间的关系,但其实质则是反映树木对环境资源的需求与现实生境下树木对环境资源占有量之间的关系<sup>[2]</sup>,因而可将其作为研究种内和种间竞争的理想指标。

选择一个适宜的竞争指标对林分竞争生长模型的建立起着至关重要的作用。从理论上,一个好的竞争指标不但要反映出林木之间所有的竞争信息(即包括全部竞争木),而且要排除一切干扰信息(即排除每一株非竞争木)<sup>[3]</sup>。迄今为止,在众多学者相继提出的,并用于单木生长模型的所有竞争指数中,以 Hegyi 提出的与距离有关的竞争指数模型能较好地反映这种种间和种内的需求与占有量之间的关系,且最有效地描述林木生长与生存空间的关系,并得到了广泛的应用。其指数模型为:

$$CI = \sum_{i=1}^n (D_i/D_j) \times \frac{1}{L_{ij}}$$

这一指数为树种间的竞争提供了一个很好的量化指标,且具有操作简便、数据可靠等优点<sup>[4]</sup>。对于

定量描述树种间的竞争强度有着十分重要的意义。

在实际中,竞争指标的选择却很难完全满足以上提到的要求,由于研究目的和应用环境的差异,而且竞争指标种类繁多,要逐一比较它们对杉木人工林的适用性,困难很大且无多大必要。因此,从实际应用出发,将易测且与其它测树因子关系密切的林木胸径,和对象木树冠面积及对象木与竞争木树冠重叠面积结合起来综合考虑。因为树冠重叠面积越大,林木之间争夺阳光、养分的程度就越激烈,可见冠幅大小与林木的生长关系密切。另外,林木胸径大小与其枝下高、叶、枝及根部都有密切的相关关系,且林木胸径是一个易测的测树因子。因此,在 Hegyi 简单竞争指数的基础上,结合用树冠重叠面积表示的竞争指数,才能比较客观的反映杉木林木之间的竞争关系。因此,本研究采用的竞争指数模型如下:

$$CI = \sum_{p=1}^m \left( \frac{O_{pi}}{A_i} \right) + \sum_{q=m+1}^n \left( \frac{D_q}{D_j} \times \frac{1}{L_{qj}} \right)$$

式中,CI 为竞争指数,CI 越大,表明树种之间的竞争越激烈。 $n$  为竞争木的总株数,当对象木与其邻近的  $m$  棵竞争木存在树冠重叠时,则上式加号右边的部分为零,只利用加号左边的部分对这  $m$  棵竞争木计算竞争指数并求和。然后,再利用加号右边的式子计算剩余的  $n - m$  棵竞争木的竞争指数。最后,将二者相加作为该对象木的竞争指数;相反,亦是如此。式中其它的字母分别表示: $O_{pi}$  为第  $p$  棵竞争木和第  $i$  棵对象木的树冠重叠面积; $A_i$  为第  $i$  棵对象木的树冠面积; $D_q$  和  $D_j$  分别表示第  $q$  棵竞争木和第  $j$  棵对象木的胸径; $L_{qj}$  则表示相应的竞争木和对象木之间的距离。

2.2.1 对象木和竞争木的选取 对象木即本文研究的对象,竞争木即分布在其周围的存在竞争关系的树木。关于他们的确定,遵循以下原则:①凡是处于标准地边缘的林木,不能作为对象木,只能作为竞争木。因为它们会受到标准地外其它林木的影响;②若有与对象木存在树冠重叠的林木,则均将其作为竞争木。

2.2.2 样圆半径的确定 通常 Hegyi 把竞争木株数定义为半径 3.05 m (10 英尺) 范围内的所有林木<sup>[5]</sup>。为了选取更多的竞争木,国内也有采用 5 m<sup>[6]</sup> 或 6 m 半径<sup>[7-8]</sup> 的。本文确定以对象木为圆心 6 m 为样圆半径,主要根据有以下几点理由:①惠刚

盈等<sup>[9]</sup>提出的最佳空间结构单元;②老龄林内对象木的选取可选择半径为8 m的样圆<sup>[7]</sup>;③杉木纯林中对象木树冠所能影响的范围。样地内杉木高度多在15 m以上,树冠半径一般为2~4 m,因此就光及水分等生态条件的竞争,样圆半径至少为8 m。林内竞争木株数较多,因此采用半径为6 m的样圆进行计算较为合理;④本文研究样地内杉木纯林林窗半径为6 m左右。

2.2.3 竞争指数的验证 林木竞争主要影响直径生长。所以,胸径生长量会随着竞争指数的增大而减小<sup>[10]</sup>。为了验证本文建立的竞争指数对杉木人工林的适用性,绘出了每块标准地内每木的胸径生长量与其相对应的竞争指数的相关散点图。以样地内每木4年内的胸径年生长量为纵坐标,取4年内5次采集到的数据计算得到的竞争指数的平均值为横坐标,绘图如图1。

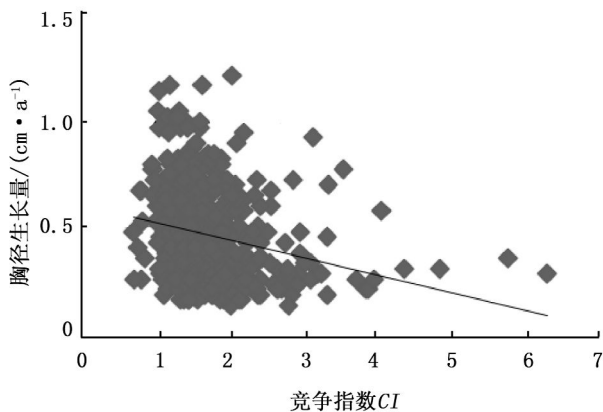


图1 胸径生长量与竞争指数相关散点图

从图1中可以看到,胸径生长量随着竞争指数的增大而逐渐减小,其变化趋势符合生长与竞争的关系。这说明用本文建立的竞争指数模型在反应杉木人工纯林中林木间的竞争关系是合适的。

### 2.3 林分生长模型的建立

径阶模型作为一种比全林分模型复杂,但比单木模型简单的过渡模型。主要以林木级作为其模拟的基本单元。因此,本研究试图将某一个径阶内所有树木的生长模拟,抽象为某一棵树木的生长模拟。通过本文建立的竞争指数模型计算得到每个径阶内树木的平均竞争指数,而后将其应用于枯死模型和林分生长模型,分别计算与之相对应的径阶内林木的枯死概率和胸径年均生长量。然后参照这棵抽象的树计算得到的信息,和通过Weibull分布模型计算

得到每个径阶内的林木总株数,据此对与之相对应的径阶内的所有树木进行随机分布,从而完成该径阶内所有树木的生长模拟。

以此类推,逐个实现林分中所有径阶内树木的生长模拟。由此,通过径阶模型将本文中建立的单木生长模型以径阶分布的方式推广到全林分级别的应用,实现全林分的生长模拟。

2.3.1 Weibull分布模型 实验证明Weibull分布在拟合林分直径分布中具有较大的适应性<sup>[11-12]</sup>。因此,本文结合Weibull分布模型对各径阶内的林木株数进行了计算。采用如下公式:

$$n_i = N \times K \times f(x_i)$$

式中, $n_i$ 为各径阶内的林木株数, $N$ 为样地树木总数, $K$ 为径阶距, $f(x_i)$ 为Weibull分布的分布密度函数。首先根据林分株数密度、平均胸径求解Weibull分布的分布密度函数,然后计算得到各径阶的林木株数。

2.3.2 径阶内单木生长模型的建立 单木生长收获模型是以林分中的林木个体作为研究的对象,从林木生长的竞争机制出发,模拟林分内单株林木胸径、树高、死亡率等因子变化过程的一类模型<sup>[13]</sup>。其中,与距离相关的单木生长模型都需要表示树木生长位置的相对位置坐标信息。因此,在此类单木生长模型中,考虑相邻竞争木大小和位置信息的竞争指标构建是至关重要的。

此外,林分生长除了受到林木竞争影响外,还受到林分平均年龄( $A$ )、林分平均胸径( $D$ )、林分拥挤度( $M = \sum x_i^2 / \sum x_i - 1$ ,  $x_i$ 为每个小样方的株数)的影响<sup>[14]</sup>。所以,在建立单木生长模型时,必须考虑林分平均年龄、林分平均胸径,以及林分拥挤度等因子对林木生长的影响。

另外,欲以径阶分布为基础建立生长模型,须先对径阶内的树木测树因子,以及它们相互间的变化关系进行分析。因此,本研究以2 cm为径阶距,以0.5为竞争指数间距,将标准地内的所有对象木按胸径和竞争指数分组统计。

#### (1) 同一标准地内竞争指数的变化特点

在同一标准地内,用竞争指数分布曲线表示如图2,基本上呈单峰山状曲线。从图中可看出林分平均竞争指数所在的竞争指数阶的林木株数最多,并向两端逐渐减少,这一变化特点与整个林分基本一致。

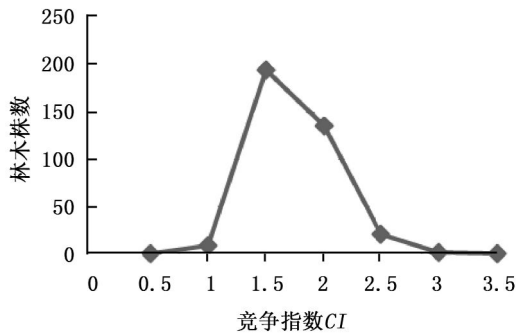


图 2 竞争指数分布曲线图

(2) 同一径阶内竞争指数的变化特点

同一径阶内,竞争指数也有一定的变动范围。一般是以小径阶的林木对应于大的竞争指数阶,大径阶的林木对应于小的竞争指数阶。从图 3 中可以看到,径阶平均竞争指数随径阶平均胸径的增加而减小。林分平均竞争指数所在的竞争指数阶的平均胸径接近于林分的平均胸径。

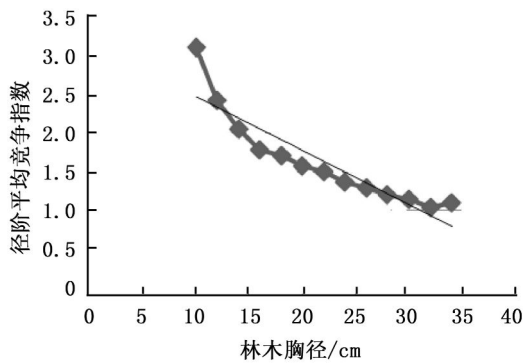


图 3 林木胸径与竞争指数相关变化曲线图

以上分析表明,以径阶内的平均竞争指数来反应径阶内林木的竞争平均水平,有实际意义且切实可行。因此,根据收集到的样地数据资料,整理得到林分内各个径阶的年胸径平均增长量、平均胸径、平均竞争指数,以及林分年龄和林分拥挤度,经过计算处理,拟合得到径阶内林分的生长模型如下:

$$\Delta Z_D = -0.035 + 0.938 \lg D - 0.844 \lg A + 0.112 CI + 0.022 M$$

公式中参数分别表示: $\Delta Z_D$  为某一径阶内的林分年胸径平均生长量、 $D$  为某一径阶内林分的径阶中值、 $A$  为平均年龄、 $M$  为林分平均拥挤度。模型的复相关系数为  $R = 0.879$ 。分别用  $F$  检验和  $t$  检验对生长模型方程进行显著性和偏回归系数的显性检验。检验结果如表 2、表 3。

表 2 生长模型  $F$  检验

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$	显著性
回归	0.724	4	0.181	23.713	显著
残差	0.214	28	0.008		
总和	0.937	32			

查  $F$  分布表,得到  $F_{0.05}(4, 28) = 2.71 < F = 23.713$ 。所以,本文建立的林分生长模型回归效果十分显著。

表 3 生长模型偏回归系数显著性检验

变量	偏回归系数	标准误差	$t$	$T_{0.05}(28)$
$\lg D$	0.938	0.255	3.683	2.048
$\lg A$	-0.844	0.099	-8.532	
$CI$	0.112	0.040	2.806	
$M$	0.022	0.009	2.609	

由于考虑到林分拥挤度计算的复杂性,本文根据 Iwao 和 Kuno 的计算平均拥挤度估计值的公式:  $M = \bar{X} + (S^2/\bar{X} - 1)$  和 Iwao 的  $M$  与  $\bar{X}$  的回归式:  $M = a + b\bar{X}^{[15]}$ , 对平均拥挤度和林分密度进行回归,以上公式中  $\bar{X}$  为样本平均值,  $S^2$  为样本方差。经计算分析选优得下式:

$$M = 8.369 + \frac{491.342}{N}, R = 0.963$$

式中,  $N$  为林分的立木株数。

2.3.3 枯死模型 随着林木间竞争的不断激烈化,一些处于劣势地位的林木,由于生长空间的缩小,环境因子的改变,便会使得它们枯死。所以,可以认为林木枯死的可能性随其竞争指数的增大而增大。

本文将对象木依竞争指数进行分组,共 4 组,每组内枯死木株数与总株数之比为该组的林木枯死率。采用如下的经验模型为本文的枯死模型方程:

$$P = \begin{cases} 0.008 CI^{0.296} & 0 \leq CI < CI_0 \\ 1 & CI \geq CI_0 \end{cases}$$

公式中,  $P$  表示某林木的枯死概率,  $CI$  表示该林木的竞争指数,  $CI_0$  表示竞争指数的临界值。相关系数  $R = -0.887$ 。竞争指数越大,林木的枯死率也越大,极值为 1.0。

3 模拟实例及分析

基于以上计算结果,针对本课题组建立的 13 年生杉木人工纯林样地,进行模拟实验。样地位于湖南省株洲市攸县黄丰桥林场,大小为 30 m × 30 m,去掉枯立木等杂木,取整共计 120 株杉木。本研究将通过以上公式计算得到的林木属性信息,汇总如表 4。

表4 模拟实例样地统计信息

变量	径阶中值/cm						
	10	12	14	16	18	20	22
平均竞争指数	3.126	2.534	2.059	1.679	1.552	1.434	1.243
胸径年生长量/m	0.587	0.595	0.605	0.617	0.650	0.680	0.697
径阶内株数	4	6	16	26	32	23	13
枯死率/%	1.121	1.054	0.991	0.933	0.911	0.890	0.853
林分拥挤度	12.464						

通过上表取得属性信息,在其对应的径阶上下限范围内,将该径阶的胸径生长量和平均竞争指数加一个随机抖动值,对该径阶内的所有树木进行随机分配,以此得到每棵树木的属性信息。然后,将之与每一个坐标信息进行对应。

如何将属性信息合理分配使之与坐标信息,形成符合林木生长规律的一一对应关系,是林分模拟中的关键一步。本文拟采用随机分配的方式,生成符合林分空间格局分布特征的坐标数据,并将其逐一转化成屏幕坐标。然后,通过属性信息随机选取位置信息,组成一条完整的记录,最后在屏幕上生成相对应的二维散点图。通过使用 C#编程语言和 GDI+ 技术实现林分结构数据到屏幕图像的转换工作。模拟效果图如图 4、图 5。

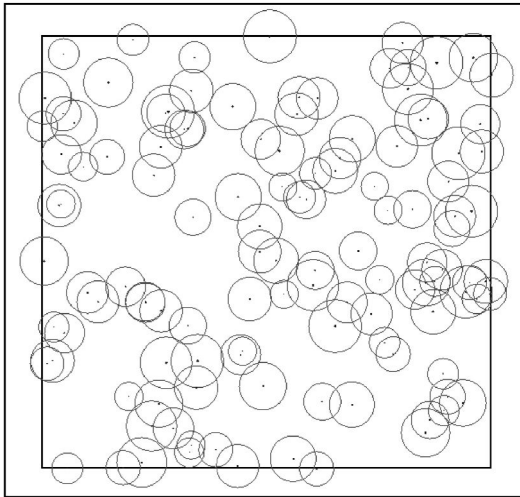


图4 模拟样地二维模拟效果图

上图中分别使用空心椭圆和黑点来绘制表示样地内每木的冠幅轮廓和胸径,以更加逼真地反映该林分的空间分布情况。同时,可直观地看到林分密度、郁闭度和空间分布格局等信息。

显然,模拟得到的林分与现实林分拥有类似或一致的林分结构分布特征。但是,林分结构分布特征一致并不表示模拟林分中每一株林木都与现实林分中每一株林木的地理空间坐标、胸径、树高、冠幅

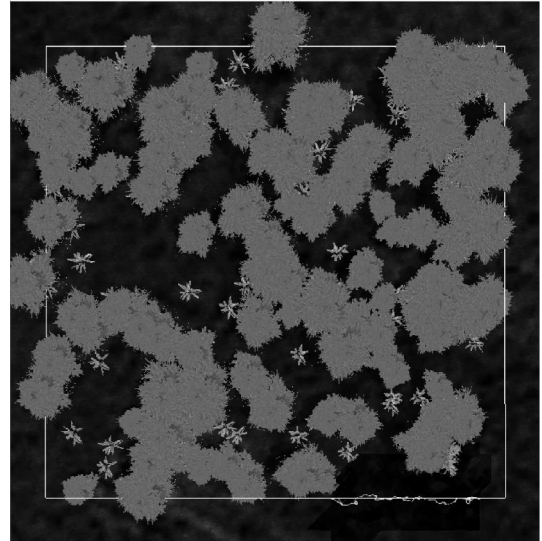


图5 模拟样地三维模拟效果图

等属性信息,以及空间信息完全相同。

#### 4 讨论

林分可视化技术经过学者们多年的研究,已取得了巨大的进步。有一些成果已被广泛的应用于林业生产和研究,如简单的规则几何体表示到复杂的树木三维模型建立,可视化模拟软件等。但是,就目前而言,还存在诸多问题,许多方面还不够完善和准确,与真实再现还原林分还有一定距离。从本文上述的研究中不难发现,林木属性信息和空间位置信息的对应匹配,就是一个亟待解决的大难题。

随着计算机技术的飞速发展,这一领域将会有更大的突破空间。在未来的研究中,以更加准确、真实的还原林分原貌为中心,建立更加符合林木生长规律,或者更加接近林木实际生长状况的模型理论,将是今后工作的重点之一,也是这一研究领域的重要议题。

#### 参考文献:

- [1] 喻泓, 杨晓晖, 慈龙骏. 内蒙古呼伦贝尔沙地不同樟子松林竞争强度的比较[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 250-255
- [2] 张思玉, 郑世群. 永定桫欏群落的结构特征[J]. 植物资源与环境

- 境学报, 2001, 10(3) : 30 - 44
- [3] 邵国凡. 红松人工林单木生长模型的研究[J]. 东北林业大学学报, 1985, 13(3) : 38 - 45
- [4] 邹春静, 韩士杰, 张军辉. 阔叶红松林树种间竞争关系及其营林意义[J]. 生态学杂志, 2001, 20(4) : 35 - 38
- [5] 李建军, 李际平, 刘素青, 等. 基于 Hegyi 改进模型的红树林空间结构竞争分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 30(12) : 23 - 27
- [6] 张思玉, 郑世群. 笔架山常绿阔叶林优势种群种内种间竞争的数量研究[J]. 林业科学, 2001, 37(1) : 185 - 188
- [7] 邹春静, 王庆礼, 韩士杰. 长白山暗针叶林建群种竞争关系的研究[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2) : 101 - 105
- [8] 张 琼, 洪 伟, 吴承祯, 等. 长苞铁杉天然林群落种内及种间竞争关系研究[J]. 广西植物, 2005, 25(1) : 14 - 17
- [9] 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
- [10] 邱学清, 江希钿, 黄健儿, 等. 杉木人工林竞争指数及单木生长模型的研究[J]. 福建林学院学报, 1992, 12(3) : 309 - 316
- [11] 黄庆丰. 马尾松林分直径分布收获模型的研究[J]. 林业资源管理, 1998(6) : 42 - 44
- [12] 惠淑荣, 吕永震. Weibull 分布函数在林分直径结构预测模型中的应用研究[J]. 北华大学学报:自然科学版, 2003, 4(2) : 101 - 104
- [13] Cao Q V. Predictions of individual tree and whole stand attributes for loblolly pine plantations [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 236(2) : 342 - 347
- [14] 吴承祯, 洪 伟, 廖金兰. 马尾松人工林种内竞争规律研究[J]. 福建林学院学报, 1997, 17(4) : 289 - 292
- [15] 王立如, 徐永江, 徐绍清, 等. 中国梨木虱在梨树上的序贯抽样技术研究[J]. 浙江农业学报, 2004, 16(6) : 364 - 367