

# 基于空间结构的杉木树冠生长可视化模拟

马载阳<sup>1</sup>, 张怀清<sup>1\*</sup>, 李永亮<sup>1</sup>, 杨廷栋<sup>1</sup>, 陈中良<sup>2</sup>, 李思佳<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 湖南省攸县黄丰桥国有林场, 湖南 株洲 412307)

**摘要:** [目的] 定量研究杉木林分中不同空间结构对林木冠形生长变化的影响, 实现基于空间结构的杉木树冠生长可视化模拟。 [方法] 以湖南省攸县黄丰桥国有林场为试验区, 在林分中选择并划分空间结构单元, 进行冠形和空间结构数据调查, 将林木东南西北 4 个方向的活枝下高、冠高、冠幅作为林木冠形描述因子, 将周围木影响距离、相对树高定义为水平空间结构参数  $Ph$  和垂直空间结构参数  $Pv$ , 使用多元逐步回归的分析方法, 分析冠形描述因子与年龄、水平、垂直空间结构参数的关系, 建立不同空间结构下杉木冠形的生长变化模型。基于 B 样条曲线模拟杉木冠形, 构建不同生长阶段的三维杉木模型, 结合三维动态渲染技术, 实现杉木树冠生长的可视化模拟。 [结果] 通过对年龄和水平、垂直空间结构参数的逐步回归分析, 结果表明: 林木活枝下高、冠高和年龄、垂直空间结构参数呈现显著相关关系, 模型决定系数  $R^2$  分别为 0.754 和 0.813; 林木各向冠幅和年龄、水平空间结构参数呈现极显著相关关系, 模型决定系数  $R^2$  为 0.623。基于杉木树冠生长模型和三维动态渲染技术, 实现了树冠在东南西北不同方向的生长可视化。 [结论] 通过划分空间结构单元的方法选择研究目标并进行数据调查, 使用逐步回归的方法, 分析杉木冠形数据和年龄与空间结构数据的关系, 建立树冠各方向活枝下高、冠高、冠幅的生长模型, 结合三维动态渲染技术, 使用 MOGRE 三维渲染引擎作为工具, 实现了基于空间结构的杉木树冠生长可视化模拟。

**关键词:** 空间结构; 冠形; 三维动态渲染; 生长可视化

中图分类号: S758

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)04-0150-08

## Visual Simulation of Chinese Fir Crown Growth Based on Spatial Structure

MA Zai-yang<sup>1</sup>, ZHANG Huai-qing<sup>1</sup>, LI Yong-liang<sup>1</sup>, YANG Ting-dong<sup>1</sup>, CHEN Zhong-liang<sup>2</sup>, LI Si-jia<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Huangfengqiao State-owned Forest Farm, Zhuzhou 412307, Hunan, China)

**Abstract:** [Objective] To quantitatively study the influences of spatial structure on the crown growth of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in order to realize the visual simulation of Chinese fir crown growth based on spatial structure. [Method] Selecting Huangfengqiao State-owned Forest Farm in Hunan Province as a trial plot, the data of crown shape and spatial structure were investigated after different spatial structure units were selected and divided in stand. The under living branch height, crown height and crown width in four cardinal directions were defined as crown shape description factors. Meanwhile, the affecting distance and relative tree height of surrounding trees were defined as horizontal spatial structure parameter and vertical spatial structure parameter. The stepwise regression analysis method was used to analyze the relationships among crown description factors, age, horizontal and vertical spatial structure parameters. As a result, the models of Chinese fir crown growth with different spatial structures were established. According to the fitting method of B-spline curve, the crown shape of Chinese fir was simulated, and 3D Chinese fir tree models in different growth stages were built. Based on the 3D dynamic rendering technolo-

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2017SZ005)、国家重点研发计划(2017YFD0600905)

作者简介: 马载阳(1994—), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 研究方向: 计算机可视化模拟技术。电话: 010-62888975, E-mail: zy\_ma327

@126.com

\* 通讯作者: 张怀清, 男, 研究员, 研究方向: 计算机可视化模拟技术。电话: 010-62888500, E-mail: zhang@ifrit.ac.cn

gy, the visual simulation of Chinese fir crown growth progress was realized. [Result] With the stepwise regression analysis on the variable of age, the horizontal and vertical spatial structure parameters, the results shows that there are significant correlations between under living branch height and variables of age and vertical spatial structure parameter. Also, there are significant correlations between crown height and variables of age and vertical spatial structure parameter. Coefficients of determination ( $R^2$ ) of both under living branch height model and crown height growth model are 0.754 and 0.813. It shows extremely significant correlations between crown width and variables of age and horizontal spatial structure parameter. And the  $R^2$  is 0.623. Based on the crown growth model of Chinese fir and 3D dynamic rendering technology, the crown growth visual simulation of four parts in the cardinal directions is achieved. [Conclusion] Using stepwise regression analysis method, the relationships between Chinese fir crown and age, the spatial structure data were analyzed and the growth models of under living branch height, crown height and crown width were built. Combined with 3D dynamic rendering technology and using MOGRE 3D rendering engine, the tree crown visual simulation of Chinese fir was realized based on spatial structure.

**Keyword:** spatial structure; crown shape; 3D dynamic rendering; growing visualization

在林木生长过程中,林木冠形特征除了由其自身的遗传特性决定,还会受到林木生长环境的影响<sup>[1]</sup>。林木周围的空间结构作为林木生长环境的重要属性之一,可以表明周围林木在空间上的分布格局和林木之间的相对位置关系,决定周围林木对中心林木的竞争状态<sup>[2]</sup>。空间结构的差异导致林木在生长过程中面对的生长空间、光照条件不同,林木冠形也会出现相应的差别,影响林木树枝生长和自然整枝,导致偏冠等现象<sup>[3-4]</sup>。分析林木周围的空间结构特征,对于研究林木生长过程中冠形的变化规律具有重要意义。

生长模型与可视化技术相结合,可以对林木的生长过程进行三维可视化模拟,直观的表现出林木生长过程的动态变化特征,是模拟和预测林木生长过程中冠形变化的重要手段<sup>[5]</sup>。雷相东等基于单木生长模型,计算年龄、胸径、树高等单木生长参数,使用三维编程工具实现单木生长可视化<sup>[6]</sup>。谢小华等基于本体规则和案例推理,实现了杉木生长的可视化模拟<sup>[7]</sup>。卢康宁等在分析了杉木形态结构特征的基础上,使用生长曲线控制下的迭代函数系统方法,实现了杉木单木的生长可视化<sup>[8]</sup>。唐丽玉等使用杉木直径生长模型和树高生长模型作为驱动模型,建立不同生长阶段的林木三维模型,利用参数曲线调整林木形态结构参数,实现林木生长可视化<sup>[9]</sup>。此类树木生长可视化模拟,主要将孤立木作为研究对象,很少研究空间结构对林木生长的影响,也没有对树冠进行具体分析,而是将树冠作为整体,对树冠各方向的冠形特征进行相似化处理。近年来,部分学者开始将空间结构作为研究对象,分析林分总体空

间结构特征对林木生长的影响规律,或者研究林木面对不同竞争强度的生长变化过程。霍艳玲、覃阳平等分别以杨桦次生林和杉木人工林为研究对象,分析了空间结构与竞争对林木和林分的影响<sup>[10-11]</sup>。但是,这些研究仍没有分析具体空间结构下,林木树冠不同方向的冠形在生长过程中的变化规律,无法模拟出林木树冠准确的生长状态,以及与环境的作用。针对当前研究中的局限性,需要充分考虑空间结构与林木生长的相互作用关系,定义具体的空间结构参数,按方向对林木树冠进行划分,建立详细的冠形描述因子,分析空间结构参数在林木生长中对冠形变化的影响。

本研究以杉木(*Cunninghamia lanceolata*(Lamb.) Hook.)为例,在杉木人工林中划分空间结构单元,分析单元的空间结构特征,研究面对不同空间结构时林木不同方向冠形的生长变化模型。结合三维动态可视化技术,实现杉木树冠生长的动态可视化模拟。

## 1 实验区与数据

### 1.1 实验区概况

以湖南省攸县黄丰桥国有林场为试验区。该林场位于113°04'~113°43' E,26°43'~27°06' N的带状区域内,横跨攸县东西部。该地年平均气温17.8℃,年均降水量为1410.8 mm,无霜期292 d,平均日照时间1612 h,属于亚热带季风湿润气候。地貌以中低山为主,森林覆盖率达90.07%,树种以杉木、松类为主。

### 1.2 数据获取

在林分中选择冠形特征良好的林木作为研究对

象,以相邻最近4株树为基础,划分林分空间结构单元<sup>[12]</sup>。单元划分过程中,首先将距离中心木最近的周围4株林木加入单元中,然后按东南西北方向划分4个象限,在缺少最近4株木的象限中,补充距离中心木最近的1株林木加入空间结构单元内,以测量和分析各方向周围木与中心木的空间结构关系<sup>[13]</sup>。在已划分的空间结构单元中,测量单元内林木东南西北4个方向的活枝下高、冠高、冠幅,以及周围木的方位角、周围木到中心木的距离等林木冠形数据和空间结构数据,并根据林场小班数据记录

年龄。如图1所示,图1a是垂直空间结构数据,图中H为树高, $D_g$ 为地面距离, $D_h$ 是水平距离;图1b是水平空间结构测量数据, $D_1$ 、 $D_2$ 为两株周围木到中心木的水平距离, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为周围木的方位角;图1c为冠形测量数据, $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 为树高、冠高、活枝下高, $C_r$ 为树冠在东、南、西、北任意方向的冠幅。

通过外业调查,在实验区不同年龄的林分中选择了39个空间结构单元,共210株杉木,其中中心木39株,周围木171株。测得树冠形态数据与空间结构数据如表1所示。

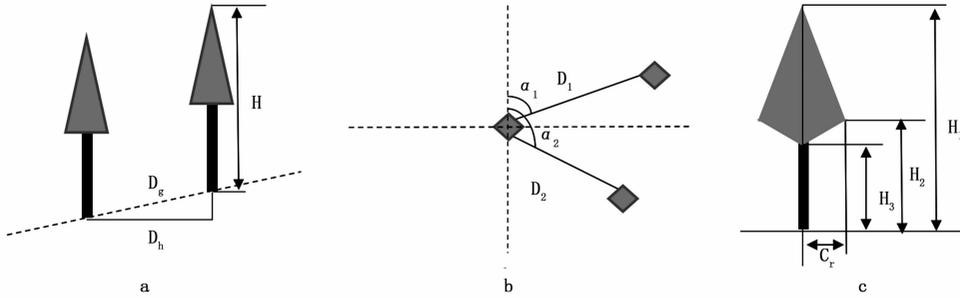


图1 空间结构数据与冠形数据测量方法

Fig. 1 Data measuring methods of spatial structure and crown shape

表1 树冠形态与空间结构数据基本信息

Table 1 General information of crown shape and spatial structure data

项目 Items	树高 Tree height/m	活枝下高 Under living branch height/m	冠高 Crown height /m	冠幅 Crown width/m	周围木方位角 Azimuth /°	水平距离 Distance/m
最大值 Maximum	23.5	15.70	16.80	3.60	358.0	5.63
最小值 Minimum	1.40	0.20	0.20	0.40	3.0	0.90
平均值 Average	12.5	5.97	7.18	1.60	184.7	2.72

## 2 研究方法

### 2.1 冠形描述因子与空间结构参数

活枝下高、冠高、冠幅作为描述林木冠形的常用特征参数,其变化趋势可以体现林木冠形在面对不同空间结构时出现的适应性变化<sup>[14-15]</sup>。本研究选取林木东南西北4个方向的活枝下高、冠高和冠幅作为冠形描述因子,定量描述树冠形态特征。

空间结构分为水平空间结构和垂直空间结构。水平方向,如图2a所示,定义周围木的影响距离为:将周围木到中心木的水平距离D和方位角 $\alpha$ 换算到中心木的东、南、西、北方向得到的等效距离。由于在同一方向上,可能会有多株周围木,会计算得到多个等效距离,本研究将最小的周围木等效距离作为影响距离。影响距离表达式为:

$$Dr = \min[D_i \div \cos(\frac{\pi}{2} \times n - \alpha_i)] \quad (1)$$

公式中, $n$ 的取值为1,2,3,4分别对应东、南、西、北4个方向。

影响距离的大小与周围木的夹角、周围木到中心木的距离有关,在水平方向上使用影响距离表示在东、南、西、北方向上周围木对中心木的影响程度,水平空间结构参数 $Ph = Dr$ 。

垂直方向,周围木的相对树高 $RHt$ 是指周围木相对于中心木的高低。其表达式分别为:

$$RHt = Avg(\frac{Ht_i}{Ht_c}) \quad (2)$$

公式中 $Ht_i$ 是周围木的树高, $Ht_c$ 为中心木的树高。 $RHt$ 大于1,表示周围木高于中心木; $RHt$ 小于1,表示周围木相对于中心木较矮; $RHt$ 等于1,即周围木与中心木高度相等。

以中心木的东向为例,如图 2b 所示,将空间结构单元第一象限和第四象限内多株周围木的相对树

高的平均值作为该方向的相对树高  $RHt$ 。垂直空间结构参数  $Pv = RHt$ 。

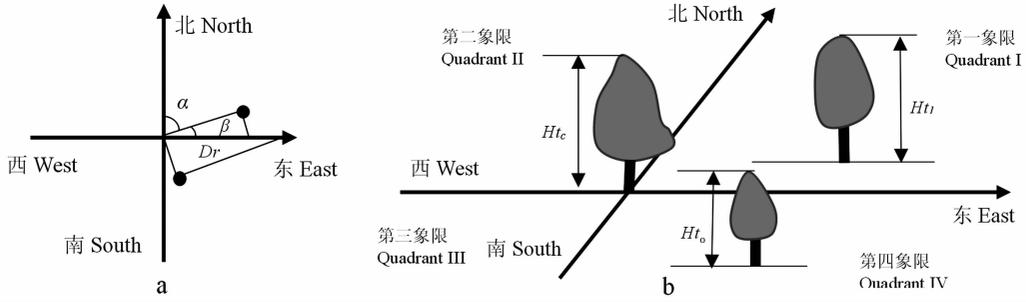


图 2 水平与垂直空间结构参数

Fig. 2 The horizontal and vertical spatial structure parameter

选取周围木的影响距离  $Dr$  作为水平空间结构参数  $Ph$ ,将周围木的相对树高  $RHt$  作为垂直空间结构参数  $Pv$ ,使用多元逐步回归分析方法,分析冠形结构因子和年龄、空间结构参数的关系,建立模型,研究不同空间结构下林木东南西北各方向的冠形在生长过程中的变化趋势。

### 2.2 基于 B 样条的杉木冠形曲线

冠形曲线是用一个经过树干的平面截取树冠得到的封闭相交线,可以对林木树冠形态特征进行描述<sup>[16]</sup>。在进行林木三维可视化时,通过对冠形曲线的模拟,实现对树冠三维形态的约束,得到逼真的可视化模拟效果。

使用具有良好局部特性的 B 样条曲线,构建杉木冠形曲线。如图 3 所示,使用活枝下高、冠高、冠幅和树高计算 B 样条曲线的型值点  $Q_i (i=0,1,2,3, \dots, n)$ ,用于构建基于 B 样条曲线的冠形曲线。型值点是描述曲线几何形态的数据点,通过型值点反求 B 样条曲线控制点  $P_i (i=0,1,2,3, \dots, n)$  坐标,求解控制点的方程组为<sup>[17]</sup>:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & & & 0 \\ 1 & 4 & 1 & & \\ & 1 & 4 & 1 & \\ & & \dots & & \\ & & & 1 & 4 & 1 \\ 0 & & & & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_n \\ P_{n+1} \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} \frac{(3Q_1 - Q'_1)}{12} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_{n-1} \\ \frac{(Q_{n-1} - Q_n)}{6} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据方程组(3)计算出控制点  $P_i$ ,利用得到的控制点计算树冠 B 样条曲线,表达式为:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i F_{i,n}(t), t \in [0,1] \quad (4)$$

对于三次均匀 B 样条曲线,基函数  $F_{i,3}(t)$  为:

$$\begin{cases} F_{0,3}(t) = \frac{1}{6}(-t^3 + 3t^2 - 3t + 1), \\ F_{1,3}(t) = \frac{1}{6}(3t^3 - 6t^2 + 4), \\ F_{2,3}(t) = \frac{1}{6}(-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1), \\ F_{3,3}(t) = \frac{1}{6}t^3, \end{cases} \quad t \in [0,1] \quad (5)$$

以活枝下高、冠高、冠幅数据为依据,基于 B 样条曲线模拟得到的冠形曲线可以很好地反映树冠东南西北方向的主要形态结构特征。

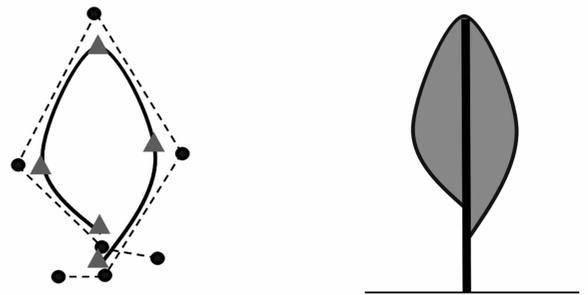


图 3 基于 B 样条曲线构建林木冠形曲线  
Fig. 3 Fitting curve equation of crown shape based on B spline curve

### 2.3 杉木树冠生长可视化

利用基于空间结构的活枝下高、冠高和冠幅生长模型,预测不同年龄,不同空间结构下的冠形特征,首先计算不同年龄阶段的冠形描述因子,结合林木树高,构建基于 B 样条的冠形曲线,使用 Direct 3D

三维图形 API 对不同年龄阶段杉木模型的构建,建立各阶段的杉木三维模型。

结合三维动态渲染技术,使用 MOGRE 三维渲染引擎对杉木动态过程进行三维渲染。MOGRE 提供了实现三维动态渲染的相关类,如:动画类(Animation)、动画轨迹类(Animation Track)、关键帧类(Key Frame)、动画状态类(Animation State)等,为杉木生长的可视化提供了工具。在 MOGRE 中,将各年龄阶段的杉木三维模型作为动画关键帧,将杉木生长过程作为动画轨迹,以动画的形式对杉木生长进行动态渲染,实现基于空间结构的杉木树冠生长可视化模拟。

表2 活枝下高、冠高、冠幅生长模型拟合结果

Table 2 Fitting results of under live branch height, crown height and crown width growth models

因变量 Independent variable	模型 Model	逐步回归入选变量 Selected variables by stepwise regression	决定系数 $R^2$	校正决定系数 $Rc^2$	标准估计误差 $SEE$
活枝下高 $Hb$ Under living branch height ( $Hb$ )	1	$Age$	0.747	0.745	2.209 6
	2	$Age, Pv$	0.754	0.751	2.184 5
冠高 $Hc$ Crown height ( $Hc$ )	3	$Age$	0.806	0.805	2.132 1
	4	$Age, Pv$	0.813	0.810	2.103 3
冠幅 $C$ Crown width ( $C$ )	5	$Age$	0.549	0.546	0.400 4
	6	$Age, Ph$	0.623	0.618	0.367 2

随着年龄( $Age$ )和垂直空间结构参数( $Pv$ )作为自变量被引入模型 1、2,模型拟合优度得到了提升,且模型的决定系数  $R^2$  从 0.747 提升到 0.754。结果表明,年龄( $Age$ )和垂直空间结构参数( $Pv$ )对中心木活枝下高的变化有较大的影响,选择校正决定系数  $Rc^2$  最大,标准估计误差  $SEE$  最小的模型作为最终模型。基于空间结构的冠高生长模型,随着变量:年龄( $Age$ )、垂直空间结构参数( $Pv$ )进入模型 3、4,模型的决定系数由 0.806 提升到 0.813,模型拟合优度提高,校正决定系数  $Rc^2$  从 0.805 上升到 0.810,标准估计误差  $SEE$  下降到 2.103 3。由逐步回归分析结果可得,年龄( $Age$ )和水平空间结构参数( $Ph$ )

### 3 结果与分析

#### 3.1 基于空间结构的杉木树冠生长模型

3.1.1 模型拟合与分析 在所有调查的空间结构单元中,随机选择 30 个单元,使用中心木的 4 个方向共 120 组冠形描述因子和空间结构数据进行建模。利用 SPSS 统计软件,使用多元逐步回归的方法,分别将中心木的活枝下高  $Hb$ 、冠高  $Hc$ 、冠幅  $C$  和年龄  $Age$ 、水平空间结构参数  $Ph$ (影响距离  $Dr$ )、垂直空间结构参数  $Pv$ (周围木相对树高  $RHt$ )进行回归分析,得到的结果如表 2 所示。

对中心木冠幅的变化有明显影响。当变量逐个进入模型 5 和模型 6,模型的决定系数  $R^2$  和校正决定系数  $Rc^2$  呈现上升趋势,标准估计误差  $SEE$  逐渐下降。当模型拟合优度最高时,决定系数  $R^2$  为 0.623,标准估计误差  $SEE$  为 0.367 2。

模型参数如表 3 所示,所有入选模型的变量都是显著的。对于活枝下高生长模型和冠高生长模型,变量年龄( $Age$ )具有极显著性差异,垂直空间结构参数( $Pv$ )的  $P$  值分别为 0.035 和 0.023,呈现显著性差异。所有进入冠幅生长模型的变量,  $P < 0.01$ ,都具有极显著性差异。

表3 活枝下高、冠高、冠幅生长模型统计量

Table 3 General information of data for under live branch height, crown height and crown width growth models

因变量 Independent variable	变量名 Variable	参数 Parameters	标准差 Standard deviation	$t$ 检验 $t$ -test	$P$ 值 $P$ -level
活枝下高 $Hb$ Under living branch height ( $Hb$ )	Intercept	-3.020	1.229	-2.457	0.015
	$Age$	0.409	0.019	21.642	0.000
	$Pv$	2.601	1.220	2.132	0.035
冠高 $Hc$ Crown height ( $Hc$ )	Intercept	-3.036	1.184	-2.565	0.011
	$Age$	0.469	0.018	25.774	0.000
	$Pv$	2.690	1.174	2.290	0.023
冠幅 $C$ Crown width ( $C$ )	Intercept	0.660	0.081	8.113	0.000
	$Age$	0.037	0.004	10.014	0.000
	$Ph$	0.160	0.029	5.487	0.000

经过分析最终确定,基于空间结构的活枝下高、冠高和冠幅的生长模型为:

$$Hb = -3.020 + 0.409 \times Age + 2.601 \times Pv \quad (6)$$

$$Hc = -3.036 + 0.469 \times Age + 2.690 \times Pv \quad (7)$$

$$C = 0.660 + 0.037 \times Age + 0.160 \times Ph \quad (8)$$

### 3.1.2 模型检验 使用建立生长模型时剩下的9

表4 活枝下高、冠高、冠幅生长模型结果 *t* 检验

Table 4 *T*-test for under live branch height, crown height and crown width growth models

因变量 Independent variable	变量 Variable	平均数 Mean value	标准差 Standard deviation	自由度 Degrees of freedom	<i>t</i> 检验 <i>t</i> -test	<i>P</i> 值 <i>P</i> -level
活枝下高 <i>Hb</i> Under living branch height ( <i>Hb</i> )	实测值 measured value	6.880	4.751	35	0.476	0.637
	预测值 predicted value	6.743	4.115			
冠高 <i>Hc</i> Crown height ( <i>Hc</i> )	实测值 measured value	7.811	5.251	35	-0.295	0.770
	预测值 predicted value	7.894	4.730			
冠幅 <i>C</i> Crown width ( <i>C</i> )	实测值 measured value	1.903	0.618	35	1.634	0.111
	预测值 predicted value	1.815	0.489			

检验结果表明,基于空间结构的活枝下高、冠高、冠幅生长模型拟合结果较好,数据沿对角线和对角线方向分布,残差满足正态性假设。模型可以预测中心木活枝下高、冠高、冠幅的生长变化趋势。

## 3.2 不同空间结构下的杉木冠形生长可视化模拟

3.2.1 杉木生长动画关键帧计算 以湖南省攸县黄丰桥国有林场的空间结构单元测量数据为基础,使用三维动态渲染的方式模拟空间结构影响下的杉木动态生长。以 MOGRE 为渲染引擎进行三维动态可视化渲染,对基于空间结构单元的杉木冠形生长变化过程进行三维可视化模拟。

首先使用动画关键帧(Key Frame)控制杉木在不同年龄阶段的树冠生长状态,利用生长模拟计算各关键帧的杉木冠形参数。依据野外调查数据,选择一个年龄为3年的空间结构单元,将3年作为初始年龄,使用结构单元的东、南、西、北方向的空间结构数据计算水平、垂直空间结构参数。基于杉木树高生长模型<sup>[9]</sup>,得出结构单元内所有树木各年龄阶段的树高,算出中心木周围各方向不同年龄阶段的垂直空间结构参数,假设生长过程中该结构单元内树木没有枯死和砍伐,则水平空间结构参数不变且与初始年龄的水平空间结构特征相同,各生长阶段的空间结构参数如表5所示。使用公式(6)(7)(8)计算出中心木各年的活枝下高、冠高和冠幅。

每隔3年设置一个生长动画关键帧,分别将对应年份的冠形描述因子计算结果载入关键帧。在每个生长动画的关键帧,基于B样条曲线依据冠形描述因子构建冠形曲线,建立杉木在每个年龄阶段的三维可视化模型。

个空间结构单元的36组数据,对得到的活枝下高、冠高、冠幅生长模型进行配对样本 *t* 检验,检验结果见表4。由表4可见,活枝下高、冠幅的预测值比实际值略小,冠高的预测值比实际值略大,且 *P* 值都大于0.05,表明活枝下高、冠高、冠幅的预测值与实际值之间无显著性差异。

表5 各生长阶段空间结构参数

Table 5 Spatial structure parameters at different growth stages

年龄 Age	东 East		南 South		西 West		北 North	
	<i>Ph</i>	<i>Pv</i>	<i>Ph</i>	<i>Pv</i>	<i>Ph</i>	<i>Pv</i>	<i>Ph</i>	<i>Pv</i>
3	3.57	0.79	2.76	0.89	4.10	1.22	3.01	1.07
6	3.57	0.85	2.76	0.92	4.10	1.21	3.01	0.91
9	3.57	0.82	2.76	0.89	4.10	1.19	3.01	0.94
12	3.57	0.90	2.76	0.89	4.10	1.14	3.01	0.90
15	3.57	0.92	2.76	0.89	4.10	1.12	3.01	0.95
18	3.57	0.95	2.76	0.95	4.10	1.10	3.01	0.99
21	3.57	0.93	2.76	0.93	4.10	1.06	3.01	1.05
24	3.57	0.93	2.76	0.92	4.10	1.04	3.01	1.01
27	3.57	0.90	2.76	0.93	4.10	1.02	3.01	0.92
30	3.57	0.91	2.76	0.95	4.10	1.03	3.01	0.96
33	3.57	0.92	2.76	0.97	4.10	0.99	3.01	0.91

3.2.2 杉木冠形生长过程动态可视化模拟 使用 MOGRE 的动画轨迹类(Animation Track)将每株杉木的生长动画关键帧(Key Frame)串联起来,利用线性插值函数,计算每个关键帧之间的杉木冠形状态,模拟出完整的单株杉木生长过程。使用一个动画类(Animation)将多个动画轨迹进行组合,实现同时对多株杉木的生长过程进行模拟,完成空间结构单元内所有杉木的生长可视化模拟。通过动画状态类(Animation State)对杉木动态生长过程进行控制,实现生长、暂停、还原等效果。

图4~7分别是杉木3年、10年、20年和30年的生长状态。在图4~7中,a是空间结构单元俯视图,b是倾斜视角下的空间结构单元,表现了中心木在空间结构单元中的生长状态;c表示从正南方向观察中心木得到的侧视图,d为从正西方向观察中心木得到的侧视图,体现了中心木东南西北4个方向不同的冠形特征(活枝下高、冠高及冠幅)。

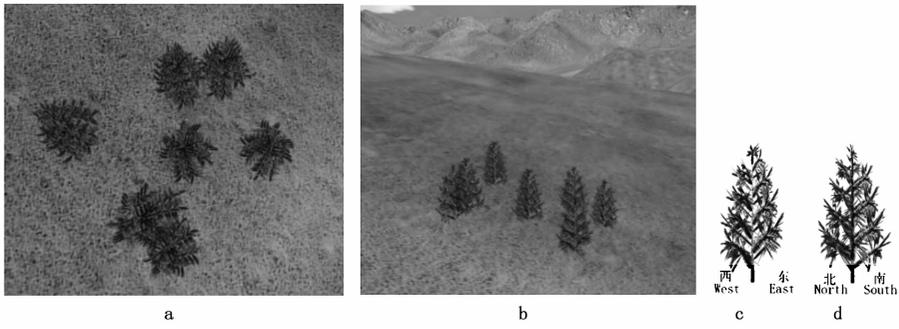


图 4 3 年生杉木模型和空间结构单元

Fig.4 The models and spatial structure unit of 3 year old Chinese fir

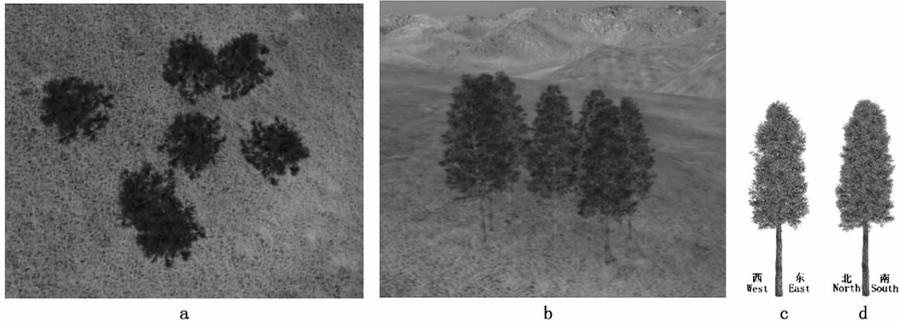


图 5 10 年生杉木模型和空间结构单元

Fig.5 The models and spatial structure unit of 10 year old Chinese fir

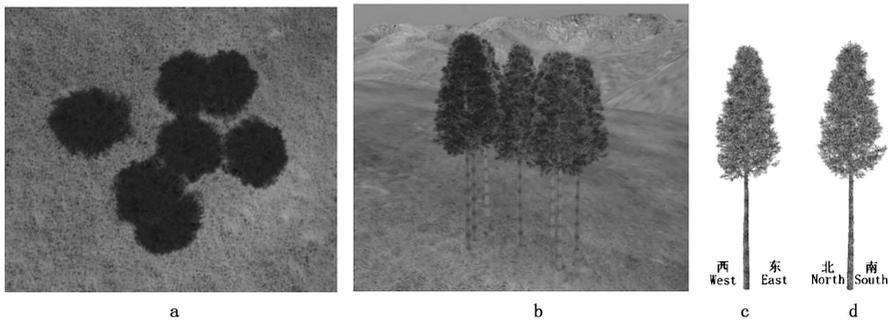


图 6 20 年生杉木模型和空间结构单元

Fig.6 The models and spatial structure unit of 20 year old Chinese fir

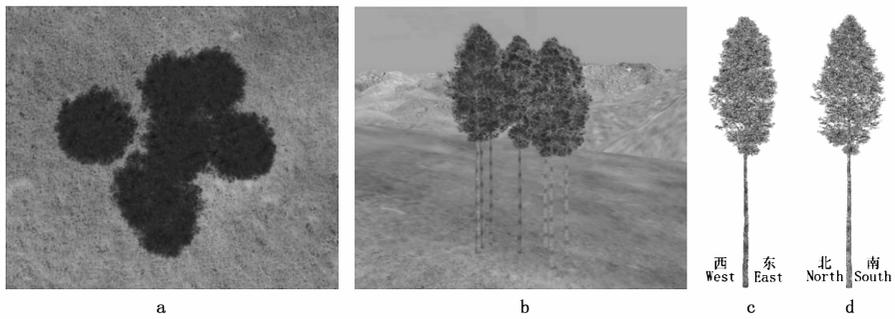


图 7 30 年生杉木模型和空间结构单元

Fig.7 The models and spatial structure unit of 30 year old Chinese fir

## 4 讨论

本研究在林木生长可视化模拟中引入了空间结构因素,并对林木树冠按东南西北4个方向进行划分,详细地分析了林木树冠不同方向的冠形变化。在研究中,定义了空间结构单元,使用东南西北4个方向的冠形描述因子对结构单元中的单株杉木冠形进行了定量化的描述;测量了中心杉木周围的水平和垂直空间结构数据,如周围木方位角、水平距离、周围木树高等,提出了水平空间结构参数和垂直空间结构参数,最终建立了杉木冠形描述因子与年龄、空间结构的关系模型,模拟杉木冠形在生长过程中的变化过程。其结果直接反映了杉木冠形在生长变化过程中与空间结构的关系。

本研究仍有不足,需要在下一步研究中进行完善:(1)本研究以空间结构单元为基础,以中心木为研究对象,分析了中心木的生长状态,而对周围木生长状态的分析较少,未能表现出周围木的生长过程,以及在周围木生长过程中空间结构的变化。(2)本研究重点研究了空间结构单位内的林木,并进行关系模型的分析 and 生长可视化的模拟,但是没有推及整个林分层面上。在今后的研究中,将会以林分中每株林木为中心木划分空间结构单元,使用基于空间结构的冠形生长模型,模拟不同林木的生长状态,实现林分层面上的林木差异化生长动态可视化模拟。本研究为今后更为深入的研究奠定了一个很好的基础。

## 5 结论

以湖南省攸县黄丰桥国有林场为例,通过划分空间结构单元的方法选择研究目标并进行数据调查,使用逐步回归的方法,分析杉木冠形数据和年龄与空间结构数据的关系,建立树冠各方向活枝下高、冠高、冠幅的生长模型,模型决定系数  $R^2$  分别达到 0.754、0.813 和 0.623。结合三维动态渲染技术,使用 MOGRE 三维渲染引擎作为工具,实现了基于空间结构的杉木树冠生长可视化模拟。模拟结果可以反映空间结构对林木树冠不同方向冠形的影响,模拟效果形象逼真,对林业可视化和信息化具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Oliver C D, Larson B C. Forest Stand Dynamics [M]. McGraw-Hill, 1990.
- [2] 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]. 林业科学研究, 2001, 14(1): 23-27.
- [3] Mizunaga H, Umeki T. The relationships between tree size and spatial distribution of foliage-mass within crowns of Japanese cedars (*Cryptomeria japonica*) in young plantations [J]. Forest Ecology & Management, 2001, 149(1): 129-140.
- [4] Ogawa K. Size dependence of leaf area and the mass of component organs during a course of self-thinning in a hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) seedling population [J]. Ecological Research, 2003, 18(5): 611-618.
- [5] 雷相东, 常敏, 陆元昌, 等. 虚拟树木生长建模及可视化研究综述 [J]. 林业科学, 2006, 42(11): 123-131.
- [6] 雷相东, 常敏, 陆元昌, 等. 长白落叶松单木生长可视化系统设计 with 实现 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(17): 180-183.
- [7] 谢小华, 唐丽玉, 邹杰, 等. 基于本体规则和案例推理相结合的树木生长模拟——以杉木为例 [J]. 林业科学, 2012, 48(9): 68-75.
- [8] 卢康宇, 张怀清, 刘闽, 等. 杉木单木生长可视化模拟系统设计与实现 [J]. 林业科学研究, 2012, 25(2): 207-211.
- [9] 唐丽玉, 王灵霞, 陈崇成, 等. 生长模型驱动的单株杉木三维动态模拟 [J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(6): 668-674.
- [10] 霍艳玲. 桃山林场杨桦次生林空间结构对生长的影响 [D]. 河北保定: 河北农业大学, 2014.
- [11] 覃阳平, 张怀清, 陈永富, 等. 改进的简单竞争指标在单木生长模型中的应用 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(12): 130-133.
- [12] 惠刚盈, Klausvon Gadow, Matthias Albert. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数 [J]. 林业科学, 1999, 35(1): 37-42.
- [13] Ma Z, Zhang H, Li Y, et al. 3D visual simulation of Chinese fir based on the influence of different stand spatial structures [C]. Image, Vision and Computing (ICIVC), 2017 2nd International Conference on. IEEE, Chengdu, China, 2017: 559-565.
- [14] Lu K, Zhang H, Ju H, et al. Visual simulation of trees' morphological structure based on crown shape [J]. Journal of Information & Computational Science, 2013, 10(6): 1623-1632.
- [15] 覃阳平, 张怀清, 陈永富, 等. 基于简单竞争指数的杉木人工林树冠形状模拟 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(3): 363-366.
- [16] 高慧淋, 李凤日, 董利虎. 基于分段回归的人工红松冠形预估模型 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 76-83.
- [17] 王小华, 吴光亚. 反求三次 B 样条曲线控制顶点的一种快速算法 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2005, 25(3): 64-66.

(责任编辑:彭南轩)