

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.041

# 基于竞争指数的水陆交错带枫杨生长模型

王春玲<sup>1</sup> 蒋麒<sup>1</sup> 王冬梅<sup>2</sup> 卢洋<sup>2</sup>

(1.北京林业大学信息学院,北京 100083; 2.北京林业大学水土保持学院,北京 100083)

**摘要:**为进行河岸流域水陆交错带植被生长的可视化模拟研究,以漓江流域枫杨树种为模拟对象,基于改进的Hegyi简单竞争指数建立了枫杨树种的单木生长模型,通过将直径分布模型和随机算法运用于全林分,利用C#编程语言、3D Max建模工具、Virtools平台等可视化相关技术,实现了漓江流域枫杨树种在不同全氮含量土壤的生长可视化模拟。研究表明,枫杨胸径年生长量与土壤全氮含量呈显著正相关,相关系数为0.749;竞争指数模型改进前和改进后的竞争指数与胸径年生长量均呈显著负相关,相关系数分别为-0.621和-0.657;模拟过程中,拟合2块样地内枫杨阶分布时误差率分别为6.25%和11.9%,枫杨树高与胸径模型拟合决定系数为0.703,冠幅与胸径模型拟合决定系数为0.612,枫杨胸径生长模型拟合决定系数为0.734。改进的竞争指数模型和随机算法对构建水陆交错带枫杨树种的生长模拟具有较强的适用性和较高的逼真度。该研究为漓江流域植被恢复和演替模拟提供理论依据和参考。

**关键词:**枫杨;生长模型;水陆交错带;竞争指数;可视化

**中图分类号:** S7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0301-08

## Pterocarya Stenoptera Growth Model in Aquatic – Terrestrial Ecotones Based on Competitiveness Index

Wang Chunling<sup>1</sup> Jiang Qi<sup>1</sup> Wang Dongmei<sup>2</sup> Lu Yang<sup>2</sup>

(1. School of Information Science &amp; Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In recent years, the phenomenon of the landscape degradation in the river basin has been more and more serious because of over ecotourism, and the forestry visualization technology provides important reference for ecosystem restoration and landscape optimization decision, therefore, it is necessary and practically significant to research the visual simulation of vegetation growth in the river basin. This paper presented the case of pterocarya stenoptera in aquatic – terrestrial ecotones in Lijiang River, and found that total nitrogen content of soil plays a critical role during its growth after analyzing the correlation between soil sample and growth data. Based on this finding, the modified Hegyi's simple competition index model with added nitrogen factors was adopted to the single tree growth model for pterocarya stenoptera stands built in Lijiang River, then diameter distribution model and random algorithm were applied to whole stand model. In the process of simulation, the information of location and diameter at breast height distribution of pterocarya stenoptera in the plot was confirmed by the trees distribution model first; the next step, the height and the crown of each pterocarya stenoptera were simulated according to the fitting relationship between tree height and diameter at breast height, crowns with diameter at breast height and the diameter at breast height of each pterocarya stenoptera were measured, and then, the growth of pterocarya stenoptera was simulated by iterative execution of the growth model using the data got before; after that two-dimensional simulation with different soil nitrogen contents was achieved by

收稿日期: 2015-12-22 修回日期: 2016-03-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC16B03)和北京林业大学科技创新计划项目(YX2013-38)

作者简介: 王春玲(1975—),女,副教授,主要从事数据库技术、林业信息技术研究,E-mail: wangchl@bjfu.edu.cn

implementing C# programming language and GDI+ technology, and then the dot and the circle in two-dimensional simulation would be mapped into specific pterocarya stenoptera model on 3D Max; finally the three-dimensional visual simulation of the growth of pterocarya stenoptera in Virtools platform was achieved. The result showed that a significantly positive relationship existed between diameter at breast height growth and soil total nitrogen content of pterocarya stenoptera, and the correlation coefficient was 0.749; a significantly negative relationship exists between competition index and diameter at breast height growth, and the correlation coefficient improved from  $-0.621$  to  $-0.657$  with the competition index model improved; the error rates were 6.25% and 11.9% respectively when fitting the diameter distribution of pterocarya stenoptera in the simulation and the decision coefficient of diameter at breast height growth model reached 0.734. It's found that adopting modified Hegyi's simple competition index model and random algorithm had strong applicability and higher fidelity for pterocarya stenoptera growth simulation in aquatic-terrestrial ecotone. The originality of this paper is to adopt modified Hegyi's simple competition index model with added nitrogen factors, with the help of Virtools platform, to lay the foundation for further development of human-computer interaction and real time walkthrough. In this article, it provides theoretical basis and reference for the vegetation restoration and succession simulation in Lijiang River watershed, and presents a feasible research idea and implementation method for the forestry visualization research by visualization simulation of pterocarya stenoptera growth in the Lijiang River watershed.

**Key words:** pterocarya stenoptera; growth model; aquatic-terrestrial ecotones; competition index; visualization

## 引言

近年来,随着生态旅游业快速兴起和过度开发影响,桂林漓江流域出现了水资源短缺、湿地萎缩、植被退化等生态问题,景观退化现象呈加剧趋势<sup>[1-2]</sup>,因此,对漓江流域水陆退化生态系统进行恢复和景观优化显得极为迫切。同时,随着林业信息化、数字林业等概念的提出,将可视化技术与林木生长、林业生态系统相结合的林业可视化技术日渐成熟。林业可视化已成为生态系统恢复和景观优化的重要参考决策手段之一<sup>[3-5]</sup>。为提高林业可视化模拟效果的适用性和逼真度,本文选取和构建合适的林分结构模型和林分生长模型,然后采用相关可视化工具进行模拟研究。

在林分结构研究中,李毅等<sup>[6]</sup>采用树种、株数、胸径以及树木高度分布状态描述林分结构。贺姗姗<sup>[7]</sup>将树种组成、个体数、直径分布、年龄分布、树高分布和空间配置的规律性定义为林分结构。周红敏等<sup>[8]</sup>认为林分结构包括空间结构和非空间结构,非空间结构包括直径结构、生长量和树种多样性等,而空间结构用混交度、角尺度和大小比数3个指标描述。关于林分生长模型的研究,文献<sup>[9]</sup>中将森林生长模型分为全林生长模型、径级模型和单株木模型3类,其中,单株木生长模型与其他2种模型相比,能更详细、准确地预测不同立地与林分条件下林

分内每株林木的生长状况,而且能够更好地预测天然林、混交林、纯林等林分生长过程,因而单株木生长模型广泛应用于林分生长状况的评价和动态变化规律预测。单株木生长模型又被分为与距离有关和与距离无关两类<sup>[10-11]</sup>,在与距离有关的单木生长模型中,相邻竞争木的属性和位置信息指标是此类模型的研究重点。

在林分结构和林分生长的研究中,与本研究关系最密切的是非空间结构中的直径结构模型和与距离有关的单木生长模型,其中,直径结构模型中的Weibull分布具有较大灵活性和适用性,且参数容易求解,因而常用于拟合林分直径分布<sup>[12-13]</sup>,同时,单木生长模型中的Hegyi简单竞争指数模型具有操作简便、数据可靠等优点,也被广泛运用<sup>[14-15]</sup>。相对于一般林地生长环境,漓江水陆交错带具有土层薄、石砾含量高、土壤湿度较大等特点,植被生长状况将有所不同,但树木生长规律和形态特征保持一致。考虑到漓江流域水陆交错带乔木以马尾松(*pinus massoniana* Lamb.)和枫杨(*pterocarya stenoptera* C. DC)为主,且目前对枫杨的生长模拟研究较少,本文以枫杨树种为研究对象,采用林分直径结构模型和随机算法,生成林木直径和位置分布信息,并结合单木生长模型中改进的Hegyi简单竞争模型,采用3D Max建模工具建立枫杨单木模型,在Virtools平台上实现对漓江流域枫杨树种生长的可视化模拟,以期

为漓江流域水陆交错带的植被恢复、景观优化和其他类型林地生长模拟研究提供理论依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据采集

本研究的数据来源于广西省桂林市漓江水陆交错带,包括净瓶山、潜经村、冠岩等地,其地处北回归线以北低纬度区,属湿热多雨的亚热带季风气候,年均气温 17.8℃,降雨量丰富,数据采集的地理位置分布如图 1 所示。

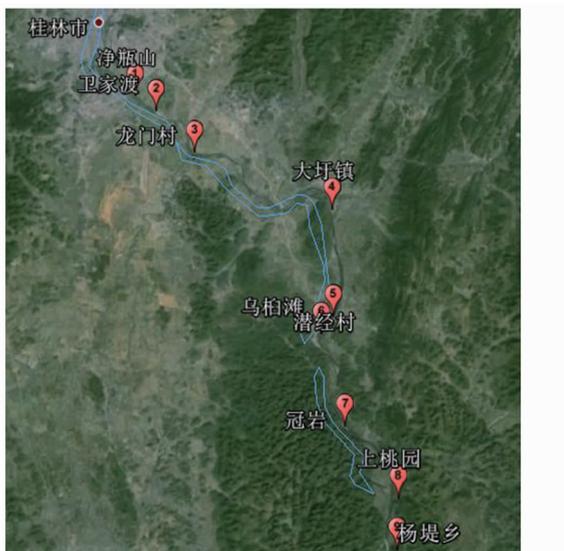


图 1 数据采集的地理位置分布图

Fig. 1 Distribution map of data collection location

漓江流域地带性植被为常绿阔叶林,乔木主要为马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.)、枫杨 (*Pterocarya stenoptera* C. DC) 等<sup>[16-17]</sup>。因不同样地全氮含量差异对枫杨生长有一定影响,本研究主要采集疏林地梯度带 10 个样地数据,其中包含样地土壤全氮含量、全磷含量等土壤信息以及枫杨冠幅、胸径等林木信息,部分土壤及枫杨树种统计数据如表 1 所示。

表 1 土壤及枫杨树种统计数据

Tab. 1 Statistical data of soil and pterocarya species

	指标	数值
土壤	土壤全氮质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.03 ~ 1.52
	土壤全磷质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.37 ~ 0.61
	土壤全钾质量比/(g·kg <sup>-1</sup> )	19.40 ~ 25.96
枫杨树	平均冠幅/m	5.29 ~ 10.44
	平均胸径/cm	13.03 ~ 29.55
	平均高度/m	6.50 ~ 19.50
	胸径平均年生长量/cm	0.62 ~ 1.49

### 1.2 林木分布模型

在理想状况下,如果能够确定研究区域所有单木的具体地理位置信息和相关属性信息,研究将更

具有针对性和可靠性。但是因林业数据采集工作需消耗大量人力、物力和财力,实际操作十分困难,基本难以准确采集所有树木的上述信息。而如果采用随机分布方式人为生成林木分布信息和林木属性信息,研究成果的可信度和可靠性必定有所下降,因此,在林业可视化研究过程中,一般采用具备宏观性和统计性的“森林空间数据”对区域林木分布和生长情况进行整体性描述<sup>[18]</sup>,通过将整体数据和随机分布算法相结合方式模拟林木分布,可使研究成果更接近真实情况。

本研究根据研究区域内的枫杨胸径、株数等数据将区域内枫杨的最小胸径至最大胸径分若干范围段,此范围段为径阶,采用 Weibull 分布计算出各径阶的枫杨株数,函数为

$$n_i = SKf(x_i) \quad (1)$$

其中

$$f(x_i) = \frac{c}{b} \left( \frac{x_i - a}{b} \right)^{c-1} \exp \left( - \left( \frac{x_i - a}{b} \right)^c \right) \quad (2)$$

式中  $n_i$ ——第  $i$  个径阶枫杨的株数

$S$ ——样地枫杨总数

$K$ ——径阶距  $x_i$ ——径阶中值

$a, b, c$ ——待求参数

参数  $a$  取林分直径的最小径阶值,然后根据林分密度和平均胸径等数据,采用最大似然法计算参数  $b$  和参数  $c$  值,最后结合式(1)和式(2)计算得出各径阶枫杨株数。

在确立各径阶枫杨株数后,采用 dart-throwing 随机算法<sup>[19]</sup>对枫杨地理位置信息分布进行模拟,具体过程为:在区域内周期性生成随机点,即代表样地中的一棵独立枫杨,若生成的随机点与已存在的点距离过近,则将该点舍弃,反之则予以保留,此目的在于减少生成过程中林木位置过近的情况,更接近林木的真实分布状况。在随机生成树木地理位置过程中,按照各径阶枫杨株数计算结果确定该树木的胸径,这样对研究区域枫杨进行整体模拟,既改善了采集每棵枫杨详细地理位置信息的局限性,又提高了模拟研究的适用度。

### 1.3 土壤全氮含量对枫杨生长影响的分析

因土壤营养度、土壤湿度等因素对林木的生长和演替有一定影响,本文依据漓江水陆交错带的土壤特点和实际情况采集相关土壤数据,考虑到本研究中相关拟合模型需定量分析,本文具体研究土壤全氮、全磷、全钾等对枫杨生长的影响。在运用 Excel 软件对采集的枫杨数据和土壤数据进行初步统计和处理后,采用 SPSS 19.0 软件对其进行相关性分析,得到枫杨胸径年生长量与土壤全氮、全磷、

全钾含量均呈正相关关系,相关系数分别为 0.749、0.461、0.346,其中胸径年生长量与土壤全氮含量在 0.05 水平上呈显著正相关。说明胸径增长量与土壤中的全氮、全磷、全钾含量都有一定关系,但土壤全氮含量对水陆交错带枫杨生长影响最大,因此与土壤全氮含量较低样地枫杨相比,土壤全氮含量较高样地枫杨更具竞争性。这与文献[16]的结论相符。

#### 1.4 竞争指数模型的建立

竞争是生物间相互作用的一个重要表现方式,是指 2 个或多个生物体对同一环境内的资源和能量进行争夺过程中所发生的相互作用,竞争结果产生了生物个体生长发育差异<sup>[20]</sup>。对林木竞争状况的评价多采用竞争指数模型,可分为与距离有关和与距离无关两大类,在各类竞争模型<sup>[21]</sup>中,本文选用与距离有关的 Hegyi 简单竞争指数模型为基础模型,以对象木和竞争木之间的距离及胸径为参数进行计算,其模型为

$$I_{Cl} = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{D_j} \frac{1}{L_{ij}} \quad (3)$$

式中  $I_{Cl}$ ——竞争指数

$n$ ——竞争木总株数

$D_i, D_j$ ——第  $i$  棵竞争木和第  $j$  棵对象木胸径

$L_{ij}$ ——树木间距离

其中,选取非区域边缘林木为对象木,此外,由于考虑到采用“高度角法”(也称“反向搜索锥法”)<sup>[22-23]</sup>比较复杂且在本研究中不易实现等因素,本文选取与对象木存在冠幅重叠或处于对象木竞争样圆范围内的林木统一为竞争木,同时结合样地内枫杨存在冠幅超过 4 m 的实际情况,将竞争样圆半径设为 8 m,且当某棵对象木的竞争木株数超过 8 株时,取 8 株最邻近的枫杨竞争木代替所有竞争木计算该对象木竞争指数。

由于全氮含量较高区域枫杨更具竞争优势,本研究在 Hegyi 简单竞争模型基础上,加入枫杨所处区域土壤全氮含量参数进行模型改进,改进后的 Hegyi 简单竞争模型为

$$I_{Cl} = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{D_j} \frac{1}{L_{ij}} \frac{C_{TN_i}}{C_{TN_j}} \quad (4)$$

式中,  $C_{TN_i}$  和  $C_{TN_j}$  分别为第  $i$  棵竞争木和第  $j$  棵对象木各自所处区域土壤全氮含量。对象木和竞争木均为枫杨树种,当对象木和竞争木处于同一样地或土壤全氮含量相同的相邻样地时,改进后的 Hegyi 简单竞争指数模型计算结果将和原 Hegyi 简单竞争指数模型计算结果一致。根据同样地土壤全氮含量数据分析,相邻样地土壤全氮含量均有不同。因此

当对象木和竞争木处于相邻但全氮含量不同的 2 块样地时,含氮因子将作用于竞争指数,相邻样地林木竞争示意图如图 2 所示,图中实线圆圈表示林木冠幅;虚线圆圈表示林木竞争影响范围;虚直线表示 2 块样地边界; $m, n, k$  表示枫杨林木。

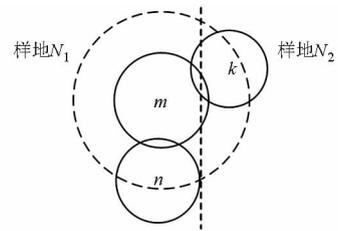


图 2 相邻样地林木的竞争示意图

Fig. 2 Schematic diagram of competition between trees on adjacent sample plot

图 2 中,由于林木  $n$  和  $k$  都处于林木  $m$  竞争范围,可认为林木  $m$  同时受到林木  $n$  和林木  $k$  的竞争。林木  $m$  和林木  $n$  位于样地  $N_1$ ,林木  $k$  位于样地  $N_2$ ,2 块样地全氮含量分别为  $C_{TN_1}$  和  $C_{TN_2}$ ,此时林木  $k$  对林木  $m$  的竞争指数除了受到二者距离和各自胸径影响外,还会受到 2 块样地全氮含量不同的影响。

#### 1.5 枫杨生长过程模拟

本研究在二维模拟过程中采用以年为单位不断迭代计算的方式模拟枫杨生长变化,每次迭代计算过程都将遍历 2 块样地所有枫杨个体,一次遍历结束意味着林中所有枫杨都完成一个生长过程。

在确立模拟样地枫杨初始分布状态时,通过 dart-throwing 随机算法生成符合林分空间分布特征的坐标,将其转为屏幕坐标,再随机从模拟样地统计信息中按径阶选取枫杨的属性信息,这样可确定每株枫杨的分布位置、胸径和冠幅等属性信息,然后采用改进后的竞争指数模型计算每株对象木的竞争指数,并进行相应生长和死亡及新增的迭代模拟,模拟样地中每棵树执行具体流程为:①如果当前树木树龄大于或等于 60 a(枫杨开始衰败时间)则按一定概率死亡。②如果当前树木为对象木且竞争指数超过 5.5(本研究竞争指数最大值)则按一定概率死亡,若在指标范围,则进行下一步。③根据林分竞争胸径生长模型重新确立树木胸径,并根据树高曲线模型和冠幅胸径回归方程式确立其树高和冠幅。④在竞争指数较小的对象木周围随机新增枫杨树苗,并重新计算对象木竞争指数。

二维可视化模拟之后,将二维模拟结果的圆心加圆圈对应独立的三维枫杨树木模型,实现枫杨生长的三维可视化模拟。具体实现过程为将二维可视化模拟中的每个圆点存储的坐标及半径等信息按各自的比例缩放后映射成三维模拟中枫杨的地理位

置、冠幅等信息,从而实现从二维模拟至三维模拟的转换工作。为了提高生长模拟结果的仿真度和有效性,本研究依据实地枫杨的树高、冠幅、胸径等测树信息和树皮、树叶、树干等形态特征,在3D Max中建立包含整体形态和相关细节属性的枫杨模型,同时根据冠幅和胸径及树高和胸径的拟合关系,建立不同径阶下对应树高和冠幅的多个树木模型,最后将制作好的模型导入Virtools进行模拟。

## 2 结果与分析

### 2.1 竞争指数与胸径生长模型

#### 2.1.1 竞争指数与枫杨胸径增长相关性分析

林木间的相互竞争会导致林木胸径生长量相应减少,甚至可能导致部分林木直接死亡,此外由于林木高度、冠幅和胸径存在一定正相关性,林木高度增长和冠幅延伸会随着竞争强度增加而迟缓。为了说明本文建立的竞争指数模型对漓江水陆交错带枫杨生长模拟的适用性,在相邻样地的相邻区域处各取36 m × 45 m的样方,其枫杨株数分别为38、42株,通过3 a内枫杨胸径数据得到胸径年平均增长量分别为0.27 ~ 1.30 cm和0.38 ~ 1.37 cm,然后采用改进的Hegyi简单竞争指数模型对此数据进行计算和处理,得枫杨年平均胸径生长量和竞争指数散点图如图3所示。

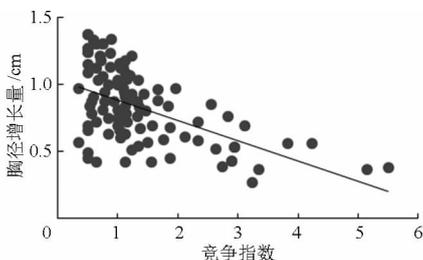


图3 枫杨年平均胸径生长量-竞争指数散点图

Fig.3 Scatterplot of average diameter at breast height against competition index for pterocarya annual growth

由图3可知,水陆交错带样地枫杨胸径年生长量随着竞争指数增大逐渐减小,其变化趋势符合生长与竞争关系。这充分说明本文研究建立的竞争指数模型在反映漓江水陆交错带枫杨树种竞争关系时是合理和适用的。

为确立改进后的Hegyi简单竞争指数模型与枫杨胸径增长之间的负相关关系,采用SPSS 19.0软件对图3中胸径年增长量和竞争指数数据进行相关性分析,得到改进前与改进后的Hegyi简单竞争指数与胸径年增长量相关系数分别为-0.621和-0.657,相关性验证结果为: $P$ 值均小于0.01,说明二者在0.01水平上呈极显著负相关,但是由于二者决定系数 $R^2$ 都较低,因此在拟合枫杨胸径生长过

程中,将枫杨的初始胸径、林分密度等影响因子加入枫杨生长模型中具有一定的合理性和必要性。

#### 2.1.2 枫杨胸径生长模型

分析采集的样地枫杨数据,当样地枫杨林分密度为250株/hm<sup>2</sup>和300株/hm<sup>2</sup>时,其平均胸径分别为20.40 cm和18.75 cm,表明枫杨胸径随着林分密度的增大逐渐减小,其生长差异可能是因林分密度不同导致竞争强度不同造成。为确立样地中枫杨年胸径增长量以模拟树木生长,参考其他研究者对其他树种胸径增长的回归方程<sup>[21]</sup>,采用包含枫杨胸径、竞争指数等变量的回归方程进行拟合。

$$\Delta Z_D = a_0 + b_0 \lg D - c_0 I_{CI} - d_0 M \quad (5)$$

式中  $\Delta Z_D$ ——枫杨年胸径增长量,cm/a

$D$ ——枫杨胸径,cm

$M$ ——林分拥挤度,株/hm<sup>2</sup>

$a_0, b_0, c_0, d_0$ ——系数

其胸径生长模型拟合结果如表2所示。

表2 胸径生长模型拟合结果

Tab.2 Fitting results of DBH growth model

$R^2$	RMSE/cm	参数	估计值	$P$
0.734	0.135	$a_0$	0.524	0.021
		$b_0$	0.643	<0.001
		$c_0$	-0.136	0.024
		$d_0$	-0.032	0.043

最终得到漓江水陆交错带枫杨的胸径生长模型

$$\Delta Z_D = 0.524 + 0.643 \lg D - 0.136 I_{CI} - 0.032 M$$

$$(R^2 = 0.734; P < 0.05) \quad (6)$$

根据表2可知,式(6)各系数所对应的 $P$ 值均小于0.05,通过0.05水平显著性验证。模型整体回归显著性检验结果:式(6)中 $P < 0.05$ ,达显著水平。故本文建立的枫杨胸径生长模型回归结果达显著水平。将模型中的竞争指数的计算改为改进前的竞争指数模型重新拟合后,各系数对应的 $P$ 值也均小于0.05,且模型整体回归显著性检验 $P$ 值小于0.05,回归结果也达显著水平,其决定系数 $R^2$ 为0.712,改进后竞争指数的胸径生长模型较改进前竞争指数的胸径生长模型决定系数 $R^2$ 大,说明改进后的竞争指数模型较改进前更适用于枫杨胸径生长模型。

### 2.2 枫杨树高与胸径、冠幅与胸径的拟合关系

对枫杨生长进行可视化模拟时,除了需要枫杨胸径和分布位置信息,还需要确立其树高与冠幅数据。在林分研究中,树高和冠幅及胸径会随着林木生长而相应增长,一般林木树高与胸径、冠幅与胸径都呈一定正相关性。本文对从10块样地随机抽取的62株枫杨的树高、冠幅、胸径等数据进行分析和研究,模型取决定系数 $R^2$ 较大、均方根误差RMSE

较小者为最优拟合。

采用不同树高曲线方程<sup>[24-26]</sup>进行拟合比较分析后,取2个相对最优拟合结果进行分析:

$$\text{模型 1} \quad H = a_1 D^{b_1} \quad (7)$$

$$\text{模型 2} \quad H = a_2 e^{b_2 D} \quad (8)$$

其树高曲线拟合结果如表3所示。

表3 树高曲线拟合结果

Tab.3 Curve fitting results of tree height

模型	$R^2$	RMSE/m	参数	估计值	$P$
1	0.699	0.272	$a_1$	1.206	1.206
			$b_1$	0.784	<0.001
2	0.703	0.270	$a_2$	4.665	<0.001
			$b_2$	0.045	<0.001

由表3可知,式(7)、(8)各系数所对应的 $P$ 值均小于0.01,通过0.01水平显著性检验,式(8) $R^2$ 较大且RMSE较小,故取式(8)为拟合度最优的树高曲线方程,加入拟合系数后最终得到漓江水陆交错带枫杨的树高曲线模型

$$H = 4.665e^{0.045D} \quad (R^2 = 0.703; P < 0.001) \quad (9)$$

式中  $H$ ——枫杨的树高,m

模型回归显著性检验结果表明,式(9)中 $P < 0.001$ ,达极显著水平,从而构成了树高胸径预估模型,所以可用此树高曲线方程预估枫杨树高。

采用不同冠幅和胸径回归模型<sup>[27-28]</sup>拟合比较分析后,取2个相对最优拟合结果进行分析:

$$\text{模型 3} \quad C_{CW} = a_3 + b_3 D \quad (10)$$

$$\text{模型 4} \quad C_{CW} = a_4 + b_4 D + c_4 D^2 \quad (11)$$

式中  $C_{CW}$ ——枫杨的冠幅长度,m

其冠幅与胸径拟合结果如表4所示。

表4 冠幅与胸径拟合结果

Tab.4 Fitting results of crown width and DBH

模型	$R^2$	RMSE/m	参数	估计值	$P$
3	0.604	1.779	$a_3$	2.176	<0.001
			$b_3$	0.238	<0.001
			$a_4$	1.046	0.002
4	0.612	1.776	$b_4$	0.372	<0.001
			$c_4$	-0.003	<0.001

由表4可知,式(10)、(11)各系数所对应的 $P$ 值均小于0.01,通过0.01水平显著性检验,且式(11)中 $R^2$ 较大、RMSE较小,故取式(11)为拟合度最优的冠幅和胸径的估算模型,加入拟合系数后最终得到漓江水陆交错带枫杨的冠幅与胸径最佳回归方程式

$$C_{CW} = 1.046 + 0.372D - 0.003D^2 \quad (R^2 = 0.612; P < 0.001) \quad (12)$$

模型回归显著性检验结果:式(11)中 $P < 0.001$ ,达极显著水平,从而构成了冠幅胸径预估模型,所以可用此冠幅胸径拟合方程预估枫杨冠幅。

### 2.3 水陆交错带枫杨生长模拟

为提高枫杨生长模拟研究适用性,采用Weibull分布拟合样地内枫杨径阶分布情况,与实际样地枫杨株数进行对比,2块样地内枫杨分别有3株和5株被拟合到不对应的径阶上,误差率为6.25%和11.9%。模拟样地内不同径阶下枫杨株数统计信息如表5所示。

表5 模拟样地内不同径阶下枫杨株数统计信息

Tab.5 Statistics of pterocarya number under different diameters on simulation sample plot

径阶中值	样地 $N_1$ 径阶株数	样地 $N_2$ 径阶株数
12	2	1
14	2	2
16	7	5
18	14	9
20	8	17
22	3	7
24	1	1
26	1	0
28	0	0
30	0	0

在确立模拟样地内各径阶枫杨株数后,结合dart-throwing随机算法在屏幕坐标系中对枫杨地理位置信息进行模拟,最后采用C#编程语言和GDI+技术实现枫杨二维模拟,相邻样地内枫杨二维结果如图4a~4c所示,图中圆心坐标代表枫杨所处位置,圆圈大小代表枫杨的树冠投影。在三维可视化模拟实现过程中,有研究者分别采用World Construction Set software (3D Nature LLC公司)<sup>[29]</sup>或TRAGIC++软件<sup>[30]</sup>进行林地植被模拟。本文通过把3D Max枫杨模型导入到Virtools平台,既提供较好的可视化效果,又为进一步实现三维模拟的人机交互、实时漫游等提供基础。同时,为进一步提高渲染效率并取得更好的可视化效果,本研究还基于Progressive Mesh和Patch Mesh网格模型实现Virtools的细节层次技术。相邻样地内枫杨三维模拟结果如图4d~4f所示。

### 3 结论

(1)漓江流域水陆交错带样地内枫杨生长受到土壤全氮、全磷、全钾等因素影响,均呈正相关关系且与全氮含量显著相关,相关系数分别为0.749、0.461、0.346。因此水陆交错带枫杨生长影响最大的土壤因子为全氮含量。因此,将含氮因子加入竞争指数模型中进行改进具有其理论依据,并且为竞争指数模型的改进提供了新思路。

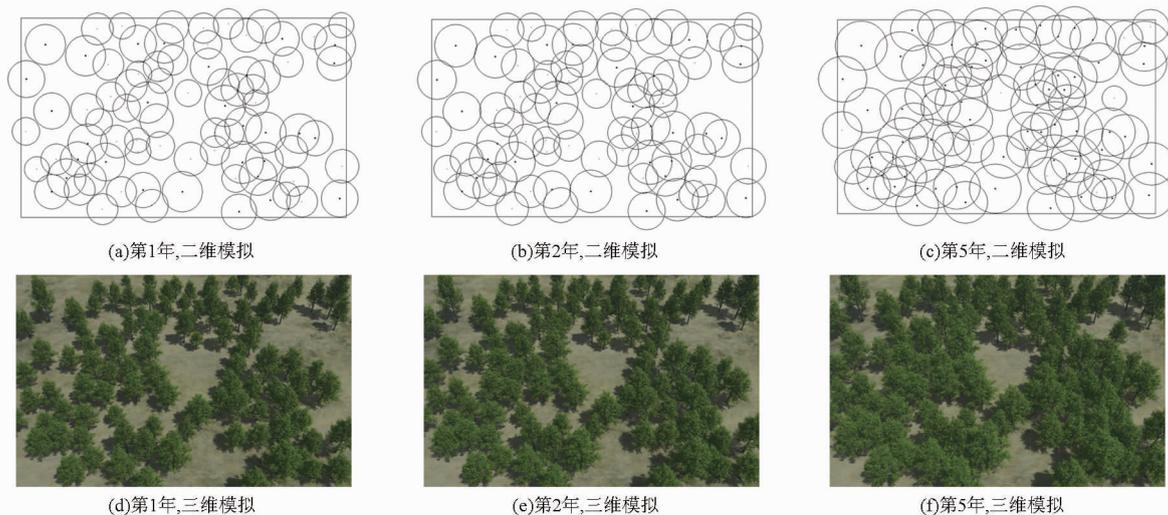


图4 样地内枫杨二维和三维模拟效果图

Fig. 4 2D and 3D simulation effect diagrams of pterocarya on sample plot

(2) 采用 dart-throwing 随机算法模拟枫杨地理位置分布,然后利用 Weibull 分布建立直径分布模型,最终确立模拟样地内枫杨的分布状况,这种方式可克服采集每棵枫杨详细地理位置信息的局限性和提高模拟研究适用性。模拟径阶分布数据与实际统计数据对比,相对误差为 6.25% 和 11.9%,径阶分布结果较为理想。由于处于相邻径阶的枫杨被统一划分到距离最近的径阶上,要减少此类误差以提高模拟精确度和可靠性,可以考虑对枫杨径阶进一步细分及结合更大量林业统计分析来建立枫杨径阶分布模型。

(3) 二维模拟过程中,由枫杨胸径确立树高和

冠幅,漓江水陆交错带内枫杨的树高曲线方程以指数型树高曲线拟合度最高,决定系数  $R^2$  为 0.703。冠幅与胸径方程以多项式方程为拟合度最高,决定系数  $R^2$  为 0.612。在确立枫杨胸径生长模型中,加入含氮因子改进的竞争指数比改进前的竞争指数在拟合枫杨胸径生长模型中拟合度高,决定系数  $R^2$  分别为 0.734 和 0.712,仍有近 30% 不能被解释,其原因可能是一些影响枫杨生长的其他因素未被考虑到模型中,如光照、风速等气象因子和土壤湿度、立地条件等环境因子,在未来的研究中如何将这些因素考虑到竞争指数模型和枫杨胸径生长模型中需要做进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 王修信,付洁,王培娟,等. 漓江上游山区水源林叶面积指数变化的遥感监测[J]. 农业工程学报,2014,30(2):139-145.  
WANG Xiuxin, FU Jie, WANG Peijuan, et al. Remote monitoring of leaf area index changes for water source forest over mountain areas in upper reaches of Lijiang River[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2):139-145. (in Chinese)
- 2 蔡德所,马祖陆. 漓江流域的主要生态环境问题研究[J]. 广西师范大学学报:自然科学版,2008,26(1):110-112.  
CAI Desuo, MA Zulu. Main ecological problems in Lijiang River watershed[J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2008, 26(1):110-112. (in Chinese)
- 3 张新,赵燕东,郑力嘉,等. 基于三维机器视觉的植物叶片萎蔫预测模型[J]. 农业机械学报,2014,45(9):260-267.  
ZHANG Xin, ZHAO Yandong, ZHENG Lijia, et al. Prediction model of plant leaf wilting using 3-D machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):260-267. (in Chinese)
- 4 方慧,杜朋朋,胡令潮,等. 基于可视化类库的植株三维形态配准方法及点云可视化[J]. 农业工程学报,2013,29(22):180-188.  
FANG Hui, DU Pengpeng, HU Lingchao, et al. VTK-based plant 3D morphological visualization and registration[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):180-188. (in Chinese)
- 5 李永亮,鞠洪波,张怀清,等. 基于林分特征的林木个体信息估算可视化模拟技术[J]. 林业科学,2013,49(7):99-105.  
LI Yongliang, JU Hongbo, ZHANG Huaqing, et al. Visual simulation of individual tree information estimation based on stand characteristics[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(7):99-105. (in Chinese)
- 6 李毅,孙雪新,康向阳. 甘肃胡杨林分结构的研究[J]. 干旱区资源与环境,1994,8(3):88-95.  
LI Yi, SUN Xuexin, KANG Xiangyang. Studies on stand structure of diversiform-leaved poplar in Gansu[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 1994, 8(3):88-95. (in Chinese)
- 7 贺姗姗. 北京山区油松人工林林分结构与生长模拟研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.  
HE Shanshan. Research on structure and growth of *Pinus tabulaeformis* stand simulation in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009. (in Chinese)
- 8 周红敏,惠刚盈,赵中华,等. 林分空间结构分析中样地边界木的处理方法[J]. 林业科学,2009,45(2):1-5.

- ZHOU Hongmin, HUI Gangying, ZHAO Zhonghua, et al. Treatment methods of plot boundary trees in spatial forest structure analysis[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(2): 1-5. (in Chinese)
- 9 唐守正,李希菲,孟昭和. 林分生长模型研究的进展[J]. *林业科学研究*, 1993, 6(6): 672-679.  
TANG Shouzheng, LI Xifei, MENG Zhaohe. The development of studies on stand growth models[J]. *Forest Research*, 1993, 6(6): 672-679. (in Chinese)
- 10 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社, 2008: 83-86.
- 11 舒娱琴,祝国瑞,陈崇成. 虚拟森林场景的构建[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2004, 29(6): 540-543.  
SHU Yuqin, ZHU Guorui, CHEN Chongcheng. Generation of virtual forest[J]. *Geomatics & Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(6): 540-543. (in Chinese)
- 12 白竣文,王吉亮,肖红伟,等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 278-285.  
BAI Junwen, WANG Jiliang, XIAO Hongwei, et al. Weibull distribution for modeling drying of grapes and its application[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(16): 278-285. (in Chinese)
- 13 郑建祥,高翔,周明锋. 基于分段 Weibull 分布的使用可靠性统计模型[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(6): 50-53.  
ZHENG Jianxiang, GAO Xiang, ZHOU Mingfeng. Statistical distribution model of field reliability based on phased Weibull distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6): 50-53. (in Chinese)
- 14 HEGYI F. A simulation model for managing jack-pine stands[M] // Fries J. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*, 1974: 74-90.
- 15 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*, 2010, 30(12): 23-27.  
LI Jianjun, LI Jiping, LIU Suqing, et al. The Mangrove spatial structure competitive analysis based on Hegyi improved model[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2010, 30(12): 23-27. (in Chinese)
- 16 李扬,王冬梅,信忠保. 漓江水陆交错带植被与土壤空间分异规律[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 121-128.  
LI Yang, WANG Dongmei, XIN Zhongbao. Spatial distribution of vegetation and soil in aquatic-terrestrial ecotone, Li River[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(6): 121-128. (in Chinese)
- 17 李青山,王冬梅,信忠保,等. 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系[J]. *生态学报*, 2014, 34(8): 2003-2011.  
LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al. Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8): 2003-2011. (in Chinese)
- 18 宋铁英,王凌. 森林空间数据的统计与仿真[J]. *北京林业大学学报*, 1997, 19(3): 74-78.  
SONG Tiewing, WANG Ling. Statistics and simulation of forest spatial data[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1997, 19(3): 74-78. (in Chinese)
- 19 COOK R L. Stochastic sampling in computer graphics[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1986, 5(1): 51-72.
- 20 张宁,张怀清,林辉,等. 基于竞争指数的杉木林分生长可视化模拟研究[J]. *林业科学研究*, 2013, 26(6): 692-697.  
ZHANG Ning, ZHANG Huaiqing, LIN Hui, et al. Visual simulation of growth process in *Cunninghamia lanceolata* based on competition index[J]. *Forestry Science Research*, 2013, 26(6): 692-697. (in Chinese)
- 21 RIVAS J J C, GONZÁLEZ J G A, AGUIRRE O, et al. The effect of competition on individual tree basal area growth in mature stands of *Pinus cooperi* Blanco in Durango (Mexico)[J]. *European Journal of Forest Research*, 2005, 124(2): 133-142.
- 22 PRETZSCH H. Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model[M]. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 291-310.
- 23 OHEIMB G V, LANG A C, BRUELHEIDE H, et al. Individual-tree radial growth in a subtropical broad-leaved forest: the role of local neighbourhood competition[J]. *Forest Ecology & Management*, 2011, 261(3): 499-507.
- 24 赵俊卉,亢新刚,刘燕. 长白山主要针叶树种最优树高曲线研究[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(4): 13-18.  
ZHAO Junhui, HANG Xin'gang, LIU Yan. Optimal height-diameter models for dominant coniferous species in Changbai Mountain, northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(4): 13-18. (in Chinese)
- 25 李海奎,法蕾. 基于分级的全国主要树种树高-胸径曲线模型[J]. *林业科学*, 2011, 47(10): 83-90.  
LI Haikui, FA Lei. Height-diameter model for major tree species in China using the classified height method[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(10): 83-90. (in Chinese)
- 26 TEMESGEN H, ZHANG C H, ZHAO X H. Modelling tree height-diameter relationships in multi-species and multi-layered forests: a large observational study from northeast China[J]. *Forest Ecology & Management*, 2014, 316(2): 78-89.
- 27 唐守正,杜纪山. 利用树冠竞争因子确定同龄间伐林分的断面积生长过程[J]. *林业科学*, 1999, 35(6): 35-41.  
TANG Shouzheng, DU Jishan. Determining basal area growth process of thinned even-aged stands by crown competition factor[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(6): 35-41. (in Chinese)
- 28 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.  
QIN Yangping, ZHANG Huaiqing, CHEN Yongfu, et al. Canopy shape simulation of Chinese fir plantation based on simple competition index[J]. *Forest Research*, 2014, 27(3): 363-366. (in Chinese)
- 29 STOLTMAN A, RADELOFF V, MLADENOFF D. Computer visualization of pre-settlement and current forests in Wisconsin[J]. *Forest Ecology & Management*, 2007, 246(2): 135-143.
- 30 PARROTT L, LANGE H. Use of interactive forest growth simulation to characterise spatial stand structure[J]. *Forest Ecology & Management*, 2004, 194(1): 29-47.