

基于虚拟植物的幼龄杉木生长模拟

唐丽玉, 林 定, 黄洪宇, 邹 杰, 陈崇成, 杜云虎

(福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室 福建省空间信息工程研究中心, 福州 350002)

摘要: 为估算树木在不同生长环境下的生长量及评价树木与环境之间的相互关系, 本文以幼龄杉木为对象, 从个体尺度上, 根据形态结构生长发育规律, 定义了幼龄杉木生长的基本单元, 耦合用于表达树木形态发育的 L-系统和生理生态模型, 形成了 L-系统的杉木结构-功能模型。在 LSTree 软件基础上, 集成光合作用、生物量分配等模型, 扩展了冠层光合有效辐射(PAR)的空间分布模拟, 计算每个叶片上分布的 PAR 值, 为光合作用模型提供核心参数。以福州 3-4 年生杉木的生长盛期为例, 计算不同时刻净光合速率, 从而计算各生长阶段的生物量, 再把生物量分配到各器官。在生物量驱动下, 树木形态结构发生变化, 通过迭代, 实现生物量驱动下的树木动态生长模拟。净光合速率估算结果与已有相关研究对比, 比较合理。这种方法可定量分析、解释植物与环境之间关系。

关键词: 虚拟地理环境; 虚拟植物; 杉木; L-系统; 生长模拟

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00569

1 引言

森林生态系统是一个复杂的巨系统, 从组成对象上可分为几个层次, 如个体、种群、群落和生态系统。森林与环境因子存在互反馈作用。森林的生长周期长, 造成田间实验成本高, 费时又费力。采用虚拟地理环境分析植物与环境间相互关系是一种新途径^[1]。光是植物光合作用的基础, 有些学者已采用虚拟植物模拟冠层内的光分布^[1-2], 为定量分析冠层光合作用提供新方法。随着计算机软硬件技术的发展及其在农林信息化领域的不断交叉、渗透, 虚拟植物生长模拟已把植物的结构与功能模型耦合起来。这样有利于研究植物与环境之间的交互作用。比较成熟的结构-功能模型有 GreenLab、LIGNUM、L-PEACH 等。GreenLab 模型是基于双尺度自动机的一个较为完整的虚拟植物结构-功能模型, 实现植物生长的可视化模拟^[3]。该模型已应用于小麦^[4]、油松^[5]等模拟研究。L-PEACH 模型^[6]是基于 L-系统的结构-功能模型。其定义了芽产生新的枝段、叶子、果等, 而器官形态变化是根据植物生长量驱动的。LIGNUM 模型重

点强调了整个树体内的碳循环过程。碳循环的核心过程是光合作用对碳的同化, 呼吸作用对碳的分解^[7]。结构-功能模型中基本生长单元定义的合理性是很重要的, 目前大部分基本生长单元假定为 1 年^[5,7]。结构-功能模型研究主要集中在农作物方面, 林木结构-功能模型的研究还不多见。

本文以植物个体为对象, 根据幼龄杉木枝条轮生的形态结构生长发育规律, 定义生长的基本单元, 采用虚拟植物方法估算生长量, 并模拟其生长。

2 基于 L-系统的树木结构-功能模型

L-系统是以植物形态结构自相似性定义的, 通过字符重写、规则的海龟几何解译(Turtle Interpretation), 形成三维模型。只要找出自相似性的基本单元与生长的基本单元的映射关系, 就容易实现植物生长的动态模拟。

2.1 基于 L-系统的树木结构模型

L-系统是一个并行模型, 有利于模拟植物的生长发育过程。它能较准确地表达植物形态建成, 比

收稿日期: 2012-06-26; 修回日期: 2012-09-10.

基金项目: 国家“863”计划课题(2012AA102002); 国家自然科学基金项目(30972299, 41001203); 福建省产学研重大项目(2012N5006); 福建省自然科学基金项目(2012J0505)。

作者简介: 唐丽玉(1972-), 女, 福建人, 博士, 副研究员, 主要从事地学可视化与虚拟地理环境、虚拟植物方面的研究。

E-mail: tangly@fzu.edu.cn

如规则中拓扑结构信息表明树木的分枝规律。下面为 L-系统字符规则:

p1: A(L, w) \rightarrow !(w)F(L)[&(a0)B(L * r2, w * wr)]
 [/(a1)B(L * r2, w * wr)][&(a0)B(L * r2, w * wr)]
 [&(a1)B(L * r2, w * wr)]

此规则表示主轴 A 的顶点在每一步推导中产生一个向上主干节间 F 和 4 个侧枝顶点 B。

L-系统字符规则使用海龟几何解译理论,通过迭代生成三维模型。在迭代过程即生长发育过程中,分枝角度和枝干长度、枝干半径都可随迭代次数发生变化,能比较逼真地表达树木形态结构。确定性上下无关 L-系统,可以充分表达树木的分枝结构和器官的三维模型,但未充分表达树木生理生态特性。

2.2 树木的功能模型

功能模型主要包括光合作用、呼吸作用,以及生物量运转、分配等生理生态过程模型。为了使功能与结构模型相耦合,将 L-系统规则中的迭代步长间隔时间同实际生长周期时间相关联。

2.2.1 生物量估算

树木生物量累积量多少直接影响树木的长势。光合有效辐射(PAR)是影响植物产量的重要因子。本文采用光线跟踪算法模拟太阳直射 PAR 在树木冠层的空间分布,采用龟形算法(Turtle Algorithms)模拟天空散射 PAR 在冠层的分布;计算每个叶子获得 PAR 值^[2]。结合单叶光合作用模型,计算某时刻冠层总光合速率。从而可以估算一定周期一定环境下单株木生物量累积量。

为了估算一段时间冠层生物量积累量,将时间分为日尺度和周期尺度。在日尺度内,可以设置时间间隔长度,每隔多长时间(如 1 小时)计算一次;同理,周期尺度内,也可以设置周期时间间隔长度,每隔几日计算一次。根据环境因子和树木光合作用生理生态参数,计算多个离散时刻点的虚拟冠层 PAR 值,再计算各离散时刻点虚拟冠层光合作用速率,通过积分计算一周期的生物量。光合作用模型采用非直角双曲线数学模型^[8]:

$$\theta P_g^2 - P(\partial_i \text{PAR} + P_{\max}) + \partial_i \text{PAR} P_{\max} = 0 \quad (1)$$

式中, ∂_i 为量子速率, P_{\max} 为最大光合速率, θ 为曲线凸度。

P_{\max} 受 Rubisco 限制,其大小为:

$$P_{\max} = V_{m0}(C_i - \Gamma)/(C_i + K_c(1 + \text{PO}_2/K_o)) \quad (2)$$

式中, V_{m0} 为一定温度条件下,单位面积上 Rubisco 的最大催化能力, K_c 为 Rubisco 反应中的 CO_2 米氏常数, K_o 为 Rubisco 反应中的 O_2 米氏常数, C_i 为叶内 CO_2 分压, C_3 植物一般取值为 34, Γ 为 CO_2 补偿点(Pa), PO_2 为冠层空气 O_2 分压。各参数计算使用文献[9]公式。

2.2.2 生物量分配

生物量的分配过程是植物生长的关键环节。源汇模型是最具有机理性,可以模拟任何器官的同化物分配,已得到较为广泛应用的生物量分配模型,如 GreenLab^[3]、L-PEACH^[6]模型等。

本文以源汇模型为基础,把整个树体累积的生物量分配到树体不同部位。生物量分配量直接同树体内各种类型器官的生长强度和汇强相关联。分配模型做了以下假设:(1)先在 L-系统规则 F 字符表示的基本单元中分配,再在这个基本单元中不同器官间分配;(2)不考虑果实和花,假定叶片数量同叶片所在枝干的长度呈比例关系;(3)分配模型中的器官类型为:根部、叶、枝干(忽略了花、果实),这三种器官类型相互影响。根系与叶片对生物量的需求存在一定比例关系。

本模型中不同生长年龄器官的扩展率采用整数型 Beta 分布概率密度函数^[10]。汇强为植物体内各器官获得植物体内生物量能力的大小。在 GreenLab 中,其被表达为一个无量纲,如幼龄油松生理年龄为 1 时,其第 i 个生长周期新梢上针叶的汇强为 1,则节间汇强为 0.65^[5]。在本模型中,器官的汇强根据它们干物质的质量比。

某一生长周期内各类型器官生物分配量按以下两种方式分配:

①生长周期内,若树体内生物量供给量 Q 大于树体的需求量 D ,则各器官的生物分配量即为其潜在需求量。

②生长周期内,若树体内生物量供给量 Q 小于树体的需求量 D ,则每个节点单元的生物量分配量为:

$$Q(i, j) = (d(i, j)/D(i) \times Q(i)) \quad (3)$$

式中, $Q(i, j)$ 为第 i 个生长周期第 j 个节点的生物分配量, $d(i, j)$ 为该节点单元的生物量潜在需求量。 $D(i)$ 为第 i 个生长周期全部潜在需求量, $Q(i)$ 为该生长周期内生物量的供应量。

生物量分配至节点之后,再在节点单元中按器官类型分配,分配方法与公式(3)类似。

2.2.3 器官形态几何参数变化

在生物量驱动下,树木形态结构不断生长变化。可由生物量、密度推算器官几何参数。

(1) 叶片几何变化模型

假设叶片密度为 ρ , 叶片厚度为 d , 叶片最大扩展面积为 S 。若第 K 个生长周期内, 树木上某一叶片获得的生物分配量为 Q , 则叶片变化的比例系数 N 为:

$$N = \frac{Q}{\rho \times d \times S} \quad (4)$$

(2) 节间几何变化模型

采用圆柱体表达节间模型, 假设当前节点表达的圆柱体半径为 R , 长度为 H 。该生长周期结束之后, 节点半径变为 $(R+r)$, 若生长周期内, 该节点生物量分配量为 m , 节间干物质密度为 ρ , 该生长周期结束时节间长度增加值为:

$$\Delta H = \frac{\pi R^2 H \rho + m}{\pi \rho (R+r)^2} - H \quad (5)$$

2.3 基本生长单元

定义合理的基本生长单元是建立结构-功能模型的核心问题, 是联接结构与功能的桥梁和纽带。Sievänen 等^[11]提出了理想化基本单元 (Idealized Elementary Unit, IEU) 的概念, 认为 IEU 既能表达三维形态结构, 又能表达生理生态过程。一个成功的 IEU 定义应是现实生理生态过程的简化和抽象, 同时能满足树木形态结构建模需求。

本文以 L-系统规则字符 F 所代表的枝条节间为基本生长单元。在 L-系统字符规则中, 定义了两种基本结构单元, 即芽、节间两种类型, 芽发育成节间和叶片, 节间可包括带叶和不带叶的。节间的信息包括: ①节间直径, ②节间长度, ③生理年龄, ④叶片大小、分布密度。经过几何图形解译, 生成单个节间的几何三维图形如图 1 所示。

当迭代步长为 3 时生成图 2 的模型, 其 L-系统规则如下:

@A(1.3, 0.0050)

A(1, w) → !(w)F(1 * 0.05)[&(65)]

[/(60)&(65)B(1 * 0.25, w * 0.75)]

[/(-70)&(65)B(1 * 0.25, w * 0.75)]

[/(-170)&(65)B(1 * 0.25, w * 0.75)]/

(d)A(1 * 0.8, w * 0.92)

B(1, w) → !(w)F(1 * 0.05)[+(50)C(1 * 0.99, w)]

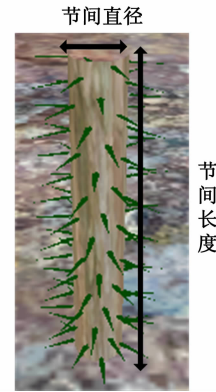


图 1 单个节间几何三维图形(叶片附着于枝干之上)

Fig. 1 3D geometric model of segment (with leaves)

F(0.015)[-(50)C(1 * 0.99, w)]B(1 * 0.65, w * 0.95)
C(1, w) → !(w)F(1 * 0.1)
!(w)F → !(w * 1.08)

树木三维模型的各部分生长年龄和生理年龄如图 2 所示。

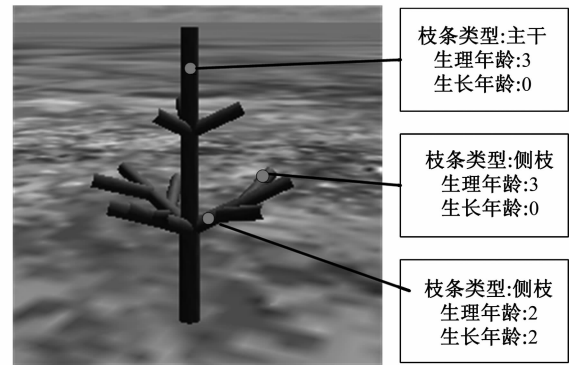


图 2 L-系统生成树木模型几何与生理特征(迭代周期:3)

Fig. 2 L-systems based tree geometric model and physiological features (3 iteration times)

2.4 结构-功能模型的耦合

本文将树木的主要生理生态过程同树木的结构模型相结合。这两者之间结合的思路如图 3 所示。

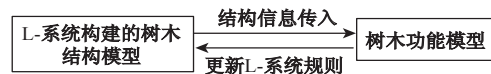


图 3 虚拟树木结构与功能模型耦合示意图

Fig. 3 Schematic representation of linking tree structure and function

一方面, 由树木的功能模型计算出生物累积量、树木各类型器官的数量、几何参数等信息, 用于更新 L-系统规则, 生成具有几何信息的树木模型,

实现生物量驱动下形态结构的变化;另一方面,树木形态结构影响冠层内微环境变化,特别是光环境,从而影响着功能模型。这样,形成一个结构与功能模型互反馈的框架模型。

此框架模型有几个假定条件:(1)树木主要的生理生态过程以树体内碳循环为核心,包括光合作用、物质分配等;(2)树体结构更新变化的时间间隔为生长周期时长;(3)光合作用的生物量先聚为一处,再按各器官的汇强进行分配。

L-系统是一个过程式语言,规则中某一迭代步长下的字符规则集可解析生成某一生长周期下的植物结构模型。迭代步长的增大能表达实际生长过程中树木形态结构变化。将L-系统规则迭代步长间的时间间隔同实际时间相映射,步长间的时间间隔即为生长周期时长,迭代步长数即生长周期数。器官生长年龄对应于其所经历的生长周期个数与每个周期时间的乘积。以每一个迭代步长作为结构-功能模型耦合的一个离散区间,即生长周期。在每个离散区间内进行一次结构信息获取与L-系统字符串参数更新。耦合过程中,规则中的F为树木结构模型的基本生长单元。结构参数信息的获取与反馈都以字符F所代表的结构作为基本操作对象。

3 幼龄杉木生长的模拟

在LSTree单树建模工具软件^[12-13]基础上,采用VC++和OpenGL图形标准,开发集成冠顶PAR计算模块、生物累积量计算和生物量在不同器官中分配模块,实现树木在结构-功能互反馈作用下的动态生长模拟。下面以幼龄杉木为例,模拟其生长。

3.1 幼龄杉木生长特征

杉木个体生长过程规律为:苗木定植后1-2年,地下部生长快,地上部生长较慢;3-10年株高生长迅速,处于速生期。幼龄速生阶段杉木,其树冠形成许多层次明显的枝盘,年生长5-8轮侧枝或更多^[14]。杉木一级分枝角位于50°-80°的分枝个数最多,二级分枝角位于50°-100°最多^[15]。本文以此为基础,不同幼龄杉木分枝角度用随机变量控制,使模型更自然。从物候现象看,杉木在生长盛期的生长量约占全年的80%。福州杉木生长盛期为5-

10月^[14]。杉木叶片在开始展叶后一个月左右长成,以后叶面积不再增加,而且,针叶在枝条上按一定距离排列,此距离随枝条年龄增加和直径增粗变化很小,不同年龄枝条相同长度枝条的叶量基本接近,如7cm长枝条,叶片数大致50片左右,总叶面积51cm²左右^[16]。本文选择福州(119°18',26°5')3-4年生的杉木,模拟其生长盛期的动态生长。

3.2 幼龄杉木生物量估算

根据幼龄杉木的生长发育特征,模拟虚拟冠层每个叶片截获的PAR值,再根据环境条件,利用单叶光合作用模型,估算每个阶段的生物量。

(1)幼龄杉木的形态结构建模

根据3-4年生的杉木形态结构发育特征和野外实地调查,3年生的杉木高一般为3m。本模拟假设3-4年生杉木生长盛期生长5盘侧枝。采用LSTree单树建模工具软件^[12-13],建立3年生5月份杉木三维形态结构模型。该模型株高3.55m,冠幅3.32m,冠层叶面积13.84m²,叶子的数量总计为113974片,单叶面积为1.22cm²。

(2)环境因子的确定

天气既影响冠顶太阳辐射强度,又影响植物光合作用。本文以福州2010年5-10月的气温参数为例(<http://www.cnlsjm.com/post/727.html>)。日出和日落时间由中国科学院国家授时中心日出日没时刻网站(<http://www.time.ac.cn/serve/sunriset/>)获取。

(3)幼龄杉木单叶光合作用参数确定

①根据文献^[17]对不同叶龄针叶光响应曲线的描述,将 θ 值设为0.3。

②杉木不同部位和叶龄针叶光响应曲线拟合的参数表观量子效率取值范围为0.0282至0.0458^[18]。根据其分布特征,将幼龄杉木叶片内禀量子效率的值假设为0.035。

③根据文献^[14]对不同种源杉木光合特性的比较中得出的CO₂补偿点的描述,将幼龄杉木的CO₂补偿点假定为150 μ L/L。

④根据文献^[9],当温度为25℃时,Rubisco酶的最大羧化能力 V_{m0} 值为100 μ mol \cdot m⁻² \cdot s⁻¹。根据文献^[9],计算 K_c 和 K_o 。

(4)虚拟冠层单叶PAR计算

单叶PAR计算是为了获取每个叶片上分布的PAR的值,这利于与单叶光合作用模型结合。日尺

度内每隔 2 小时,在中间正点时刻设置一个辐射点,以 7:00 开始,17:00 结束;以半月为周期尺度,将每月的第 15、30 日设置为该月的一个辐射模拟日期,假设天气均为晴朗。首先,根据天文计算公式计算各时刻冠顶辐射强度,然后,采用光线跟踪算法和龟形算法模拟各时刻虚拟冠层的 PAR 空间分布,计算每个叶片上分布的 PAR 值^[2]。图 4 为虚拟冠层光分布效果图,不同颜色代表不同辐射强度。

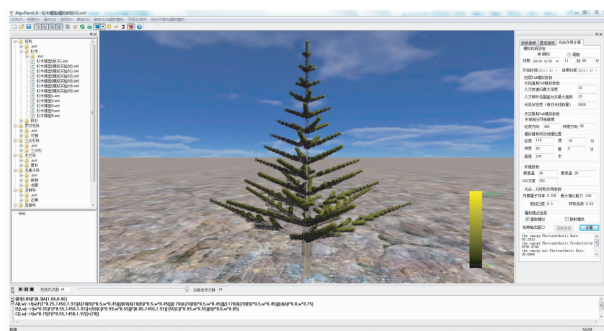


图 4 幼龄杉木虚拟冠层太阳直射三维分布效果图
(2010 年 6 月 30 日 11 时)

Fig. 4 Screenshot of direct solar radiation distribution in virtual young Chinese fir canopy
(11:00 pm, June 30, 2010)

(5) 生物量计算

根据模拟周期内各时刻虚拟冠层太阳 PAR、环境因子和杉木光合作用参数,计算冠层净光合作用生产率,再乘以时间长度,得出生物量累积量。

5 月 15 日,冠层净光合率从早到晚依次为: $1.9874 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $3.5423 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $3.9173 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $3.9236 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $3.5524 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.9558 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,一天中的平均净光合速率为 $3.1439 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。文献

[19]对浙江横贩公社林场 6 年生杉木光合作用强度测定,I 级、II 级、III 级的杉木光合作用强度,分别为 $2.9293 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.6010 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.9066 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在 $618 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 固定光照下,幼龄 3-4 年生的光合作用强度为 $3.7753 \text{ CO}_2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从平均值可以看出,这个估算值比较合理,具有一定的可信度。

3.3 生物量分配及形态参数计算

若估测的生物量大于潜在需求量,则模型按潜在生长速率生长,即模型随迭代步长增大而生长;若估测的生物量小于潜在需求量,则将 L-系统规则链表节点中的几何参数(长度)按比例缩小。杉木器官的密度采用油松测定参数,叶比重设为 0.08 g/cm^2 ,枝干干重密度为 0.475 g/cm^3 ^[5]。

3.4 幼龄杉木动态生长的模拟

将几何大小比例作为修正值,在下步迭代的 L-系统规则解析链表节点中,逐一将新生节点长度值乘以修正值,完成模型修正。修正后的结果即为已考虑生物积累量之后的杉木生长发育模型。每个生长周期模拟完成之后,用新的冠层模拟 PAR 分布、计算每个叶片上分布的 PAR 值、估算下一生长周期的生物量并分配到各器官,最后计算形态结构的几何尺度变化,更新模型,如此循环,完成幼龄杉木的动态生长模拟。图 5 为 3-4 年生的杉木生长盛期的生长过程的序列图,即为 2010 年 5、6、7、8、9、10 各月中旬的形态结构大致生长状况。

4 结论

根据幼龄杉木生长发育规律,不考虑地下部

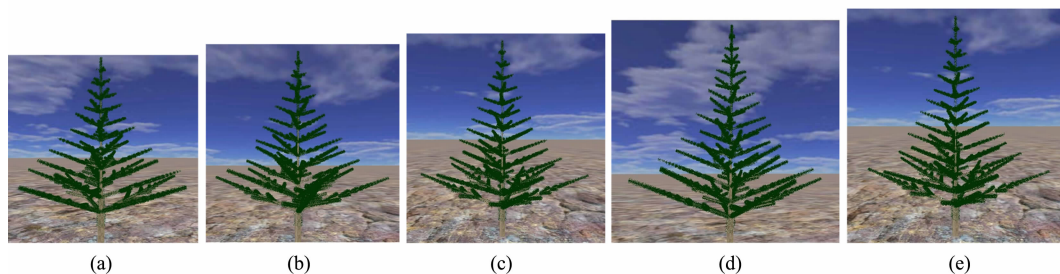


图 5 3-4 年生幼龄杉木生长模型序列图((a):11 盘轮枝;(b):12 盘轮枝;(c):13 盘轮枝;(d):14 盘轮枝;(e):15 盘轮枝)

Fig. 5 Serial simulation of 3- to 4-year-old Chinese fir

((a):11 round branches; (b):12 round branches; (c):13 round branches; (d):14 round branches; and (e):15 round branches)

分,把杉木基本生长单元定义为 1 轮生。基本生长单元分为节间和芽 2 种。节间分带叶的和不带叶的。芽发育成节间或叶。以基本生长单元为连接树木结构与功能的桥梁纽带,在 L-系统基础上,耦合生理生态模型,形成了基于 L-系统的杉木结构—功能模型,模拟了幼龄杉木生长盛期的动态生长过程。在 LSTree 单株木三维建模工具软件的基础上,扩展了虚拟冠层 PAR 三维空间模拟,计算每个叶片上分布的 PAR 值并作为单叶光合作用模型的核心参数,估算植物生长量;集成了植物光合作用、物质分配等生理生态模型。以福州 3-4 年生幼龄杉木为模拟对象,估算了不同时刻杉木的净光合速率,与相关文献研究相比,估算结果比较合理。本方法可为估算不同生长环境下的人工林生长量提供一种新方法,同时可模拟植物与环境之间互反馈过程,从机理上解释植物与环境之间的相互关系。LSTree 系统具有较好的扩展性,根据不同植物形态结构发育特征、生理生态学参数、生境特征和地理位置,调整这些参数,可估算不同环境下植物生长量和动态模拟生长过程。

参考文献:

- [1] 王占刚, 庄大方, 明涛. 林木冠层光合有效辐射分布模拟的研究[J]. 地球信息科学, 2008, 10(6): 697-702.
- [2] 邹杰, 林郁欣, 陈崇成, 等. 基于虚拟植物冠层的直射光合有效辐射三维分布模拟研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 838-844.
- [3] Hu B G, de Reffye P, Zhao X, *et al.* GreenLab: towards a new methodology towards plant functional-structural model-structural aspect [C]. International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, Chinese Agricultural University, Beijing, 2003: 21-35.
- [4] Kang M Z, Evers J B, Vos J, *et al.* The derivation of sink functions of wheat organs using the GreenLab model [J]. Annals of Botany, 2008, 101: 1099-1108.
- [5] 国红, 雷相东, Letort V, 等. 基于 GreenLab 的油松结构—功能模型[J]. 植物生态学报, 2009, 33(5): 950-957.
- [6] Allen M T, Prusinkiewicz P, Dejong T M. Using L-systems for modeling source-sink interactions, architecture and physiology of growing trees: the L-PEACH model [J]. New Phytologist, 2005, 166: 869-880.
- [7] Perttunen J, Sievänen R, Nikinmaa E. LIGNUM: a model combining the structure and the functioning of trees[J]. Ecological Modeling, 1998(108): 189-198.
- [8] 于强, 王天铎, 刘建栋, 等. 玉米株型与冠层光合作用的数学模拟研究 I. 模型与验证[J]. 作物学报, 1998, 24(1): 7-15.
- [9] 张佳华, 姚凤梅. 陆面模式的植物叶光合生理的数值模拟试验及分析[J]. 气象科学, 2007, 27(4): 419-424.
- [10] de Reffye P, Blaise F. Calibration of a hydraulic architecture-based growth model of cotton plants [J]. Agronomie, 2009(19): 265-280.
- [11] Sievänen R, Nikinmaa E, Nygren P, *et al.* Components of functional-structural tree models[J]. Annals of Forest Science, 2000, 57(5-6): 399-412.
- [12] 林郁欣, 唐丽玉, 陈崇成, 等. 基于组合型 L-系统的单树建模工具的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 185-190.
- [13] 陈刚, 唐丽玉, 陈崇成, 等. 基于 L-系统物幼龄杉木形态建模[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 375-379.
- [14] 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1997, 394-398.
- [15] 卢康宁, 张怀清, 刘闽. 基于实测数据的杉木构筑型研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(1): 132-136.
- [16] 温远光. 利用枝长与叶面积的关系估测杉木叶面积[J]. 林业实用技术, 1985(9): 15-17.
- [17] 张小全, 徐德应. 杉木中龄林不同部位和叶龄针叶光合特性的日变化和季节变化[J]. 林业科学, 2000, 36(3): 19-26.
- [18] 张小全, 徐德应. 18 年生杉木不同部位和叶龄针叶光响应研究[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 409-414.
- [19] 陈福明, 朱杭瑞. 杉木光合性状研究初报[J]. 浙江省林业科技, 1983(3): 4-7.

Growth Simulation of Young Chinese Fir Based on Virtual Plant

TANG Liyu, LIN Ding, HUANG Hongyu, ZOU Jie, CHEN Chongcheng and DU Yunhu

(*Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Spatial Information Research Center of Fujian Province, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: Energy fixation and organic matter production of forest ecosystem were dominated by plants, which are impacted by their growth environment. The forest ecosystem has the characteristic of long life-span, which makes its research laborious and costly using field experiment. The virtual geographical environment can provide a new way for its research due to its character of trying to exceed the limit of time and space. In order to estimate the biomass and evaluate relationships among tree and environments, an L-systems based functional-structural model was developed for simulating the development of tree architecture, taking into account tree physiology and environment. The L-systems was used to represent the morphological development of tree. The basic growth unit was described in line with the development of young Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). LSTree system integrated the photosynthesis, photosynthates allocation and morphogenesis models. The spatial distribution of solar radiation in tree canopy was simulated for calculating photosynthetically active radiation (PAR) of each leaf obtained. PAR is a key parameter for photosynthesis model to estimate biomass. The dynamic growth of an individual 3-to-4-year-old Chinese fir in Fuzhou was simulated in growing season. Based on the 2010 Fuzhou weather and Chinese fir photosynthetic characteristic, net photosynthesis rate and product were calculated for each stage. The amount of photosynthates allocated to the growth of new segments and leaves or branches and leave amplification are based on source-sink theory. The growth of tree is driven by available photosynthetic products after respiration losses were accounted for. The morphogenesis change in the young Chinese fir in response to environment was simulated dynamically in three dimensional representations. The result of net photosynthesis was compared to the previous field observation research, and it showed the simulation result was reasonable. The methodology has promising benefits to depicting the interaction of plant and environment, which will be valuable for estimation of organic matter production too.

Key words: virtual geographical environment; virtual plant; Chinese fir; L-systems; growth simulation