doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.031

基于 L-系统的 3D 虚拟植物冠层光合作用模拟模型

陈　刚[1,2]　陈　斌[2,3]　林郁欣[4]　钱基德[1,2]

(1. 中国科学院成都计算机应用研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院广州电子技术研究所, 广州 510070; 4. 福建网龙网络公司研发中心, 福州 350001)

摘要: 为定量分析植物冠层结构与光分布及光合作用之间的关系,模拟实际环境中植物冠层的实时光合速率,为诸如作物模型中产量估测提供一种植物冠层尺度光合生产力计算方法,本文构建了基于 L-系统的 3D 虚拟植物冠层光合作用模拟模型。模型主要分为 3 部分:基于 L-迭代文法系统与三维图形绘制技术构建 3D 虚拟植物冠层结构,利用正向光线跟踪及天空可见率算法模拟虚拟冠层内光辐射(Photosynthetically active radiation,PAR)传输,基于太阳几何参数、大气影响参数及地理位置等参数计算真实环境中虚拟冠层顶部实时 PAR 强度。利用此模型,直接输入或插值处理光合环境因子数值,采用单叶光合作用模型和相关呼吸作用模型,可计算冠层内净光合作用速率并进行周期内植物体生物量的积累估算。以实测的幼龄杉木为模拟对象,计算其冠层内净光合作用速率及周期内生物量积累,模拟结果表明,基于虚拟冠层的 PAR 分布模拟及其冠层光合作用速率计算,是一种对植株光合生产力估算的有效方法。

关键词: 虚拟植物; 冠层光合作用; 模拟模型; L-系统; 辐射传输

中图分类号: TP391.9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)10-0275-09

3D Virtual Plant Photosynthesis Simulation Model Based on L-system

CHEN Gang[1,2]　CHEN Bin[2,3]　LIN Yuxin[4]　QIAN Jide[1,2]

(1. *Chengdu Institute of Computer Application*, *Chinese Academy of Sciences*, *Chengdu* 610041, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*
3. *Guangzhou Institute of Electric Technology*, *Chinese Academy of Science*, *Guangzhou* 510070, *China*
4. *R&D Center*, *Net Dragon Websoft Inc.*, *Fuzhou* 350001, *China*)

Abstract: To quantitatively analyze the relationship between plant canopy structure and light distribution and photosynthesis, simulate real time photosynthetic rate of plant canopy in actual environments, and prove a plant canopy scale photosynthetic productivity calculation method for crop yield estimation, a 3D virtual plant canopy photosynthesis simulation model was constructed based on L-system. The model was divided into three contents. The first sub-model was the 3D virtual canopy based on L-iterative grammar system and 3D graphic rendering technology. The second sub-model was that the photosynthetically active radiation (PAR) transformation in the virtual canopy was simulated by using forward ray tracing and sky visibility algorithm. The third sub-model was that the real-time PAR intensity at the top of a virtual canopy based on parameters such as the sun's geometric parameters, atmospheric influence parameters and geographic location. After the photosynthetic environmental factors were directly or through interpolated way to input to the sub-models, by using the single leaf photosynthesis model and related respiration models, the net photosynthesis rate within the canopy and the accumulation of plant biomass accumulation during the model simulation cycle can be calculated. The simulation results of Chinese fir showed that the simulation of the PAR distribution based on the virtual canopy and the canopy photosynthesis rate calculation was an effective method for estimating photosynthetic productivity of plants.

Key words: virtual plant; canopy photosynthesis; simulation model; L-system; radiation transmission

收稿日期: 2018-04-08　修回日期: 2018-04-30

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2014CC0043)、广东省产学研合作项目(2017B090901040)、广东省重大科技专项(2017B030306017)和广州市产学研协同创新重大专项(201704030138)

作者简介: 陈刚(1984—),男,博士生,主要从事计算机图像学、机器学习与图像分析研究,E-mail: chengang@casit.com.cn

通信作者: 陈斌(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事机器学习与图像分析研究,E-mail: chenbin306@sohu.com

0 引言

植物冠层光合作用理论是作物生长动力学模型建立的基础。由于植物冠层内叶片遮挡,导致光辐射(PAR)分布难以直接计算。JOHNSON 等[1]采用 Monsi - Saeki 理论对冠层内叶片对光截获进行计算,结合光合环境因子完成冠层内光合作用逐日同化物累积量估算;于强等[2]、李艳大等[3]采用经验统计公式对作物的冠层进行描述;李绪孟等[4]基于数学方法进行水稻虚拟切层的构建,建立了水稻群体冠层内光分布及光合作用速率模型。

随着虚拟植物技术的发展,基于 L-系统[5]、参考轴 Amap[6]、双尺度自动机[7]等能够直观生成 3D 植物模型。在准确模拟植物叶片数量、叶片倾角和方位角分布规律基础上,可构建特定种类、大小的植物虚拟冠层,将其用于植物冠层 PAR 分布及光合速率研究。一般采用计算机光线跟踪和辐射度算法模拟 PAR 在冠层内的分布。中国农业大学研究人员马韫韬、劳彩莲[8]、王锡平[9]在植株测量的 3D 结构体中,基于光线跟踪、天空可见率的方法进行冠层内的 PAR 传输模拟,并在仪器研制、算法设计、实验验证等方面做了较为完整的工作。近年来,曹秉帅[10]通过构建水稻功能-结构耦合模型 G - ORY,研究了两个不同地理位置的 3 个水稻株型冠层的 PAR 分布差异;石佩[11]利用三维数字化仪器构建不同冠层形状的桃树模型,分析测定了纺锤形和开心形桃树冠层内不同区位的 PAR、冠层净光合作用速率,得到若干桃树冠层光合作用规律;李艳大等[3]以双季稻为研究对象,假设冠层内同一水平面辐射强度相同,构建水稻冠层光合作用速率与干物质积累模型,并基于实测数据验证了模型精度。当前,基于虚拟植物光合作用模型的研究现状及不足在于:①以虚拟植物技术代替三维数字化仪,在满足结构模型精度条件下,可通过快速改变植物结构模型,进行冠层光合作用能力变动估测。②已有研究关注虚拟植物 PAR 分布模拟较多,较少研究关注对植物进行长时间内多次冠层 PAR 分布模拟,结合实测的光合环境因子(CO_2浓度、大气湿度)计算冠层光合作用速率,以及周期内干物质积累模型。③基于虚拟冠层的光合作用模型,较少研究将真实环境的实时光照强度、光合环境因子(气温、湿度、CO_2浓度)作为输入,进行冠层光合作用速率计算。

本文采用 L-系统构建 3D 虚拟植物拓扑结构,基于概率分布曲线动态调整冠层内叶片分布。基于 OpenGL 图形库绘制虚拟植物冠层模型,利用 GPU 加速算法对冠层内的 PAR 辐射传输及分布模拟进行快速计算,同时进行太阳光角度、CO_2 浓度、空气湿度等光合因子的逐时模拟,计算虚拟冠层光合作用速率,进行模拟周期内生物量积累的估算。

1 3D 虚拟冠层构建

植物冠层结构是影响冠层内太阳光合有效辐射分布的最重要因素。虚拟植物技术能较好地刻画重建植物 3D 虚拟冠层结构,刘刚等[12]对农林作物三维重建方法进行了研究综述。虚拟植物结构模型包括拓扑模型和几何结构模型。拓扑结构模型主要用于描述植物离散结构单元之间的连接关系,并可以通过抽象的语言反映出植物的生长阶段,经典方法包括 L-系统、参考轴、双尺度自动机等方法。几何结构模型是对虚拟植物模型基本组成单元的三维信息描述,包括冠层叶片的密度及分布(倾角、方位角)。中国科学院自动化所中法实验室、中国农业大学资源环境学院开展了大量虚拟植物建模、植物环境交互模拟、植物功能-结构模型的研究,研制出了 GreenLab[13],开展了多种林木、农作物的模拟研究[14-16]。构建一个高精度的 3D 植物冠层,主要是枝干拓扑构建和叶片分布模拟。本文选取针叶型杉木冠层作为模拟对象。

1.1 枝干模拟

依据杉木枝干特征,利用 L-系统规则构建各个生长阶段的幼龄杉木型枝干模型。基于 L-系统的拓扑结构模型构建流程为:①依据杉木生长过程中拓扑变化规律,设计公理和产生式算法。②设计各分枝产生式符号、分枝角度、长度、半径、产生概率等。③设计产生式约束条件。④程序对规则进行解析、字符迭代、绘制,生成三维树木模型。

幼龄杉木 3D 虚拟冠层生成对应的 L-系统规则如图 1 所示。规则解释为:由产生式 $A(l,w)$ 开始推导,主轴 A 的顶点在每一步的推导中产生 1 个节间 F 和 4 个侧枝 B。4 个侧枝为杉木的一轮模拟枝条。产生式 $B(l,w)$ 表示侧轴 B 的顶点产生 1 个节间 F 和两个侧枝 C。两个侧枝之间有一个节间 F,为模拟侧枝上的不严格轮生(轮生枝条的着生点不

```
STEP= 18
@!(0.10)F(0.2)A(1.88,0.09,x)
A(l,w,x)-->!(w)F(1*0.25,300,5)[&(x*80)B(l*0.5,w*0.45,y)][/(80)&(x*80)B(l*0.5,
w*0.45,y)][/(-70)&(x*80)B(l*0.5,w*0.45,y)][/(-170)&(x*80)B(l*0.5,w*0.45,y)]/
(d)A(l*0.89,w*0.75,x*0.91)B(l,w,y)-->!(w*0.55)F(l*0.3,100*y,3)[+(50)C(l*0.99,
w*0.55,y)]F(0.05,100*y,3)[-(50)C(l*0.99,w*0.55,y)]B(l*0.6,w*0.85,y*0.6)
C(l,w,y)-->!(w*0.75)F(l*0.55,200*y,5)[+(70)]
```

图 1 用于幼龄杉木虚拟冠层构建的 L-系统规则

Fig. 1 L-system rules for generating virtual canopy of young Chinese fir

在主干的同一高度)。侧枝 C 为一个节间 F,迭代步长设置 12。

1.2　叶片分布模拟

叶子是光合作用的主要器官,叶子的位置和方向是影响光分布的主要因素。杉木叶片呈线状披针形。为了真实地表示叶片,采用 3DS MAX 建模软件进行单叶曲面建模,获得叶片骨架点的坐标和点位间的构网索引。在 L-系统解析软件中读取点位坐标和索引,绘制出精细单叶模型。单叶大小可在规则中交互输入数值进行控制。叶片在枝干上的分布参数包括叶片的密度、叶片倾角、叶片方位角。根据观测数据,确定杉木的叶倾角分布范围,使叶片随机分布于该角度范围内。单叶和叶片在枝干上的分布模拟如图 2 所示。

(a) 杉木单叶格网　(b) 渲染出的杉木单叶　(c) 叶片在枝段上分布　(d) 野外拍摄照片

图 2　幼龄杉木针形叶片及其在枝干上的分布模拟

Fig. 2　Simulation of young Chinese fir needles and their distribution on branches

1.3　3D 杉木虚拟冠层模型描述

以图 3b 中 5 年生杉木为研究对象,按照 1.1 节与 1.2 节的虚拟冠层生成方法,模拟生成 3D 虚拟杉木冠层结构:模型高度为 3.30 m,冠幅为 1.73 m,模型中单叶面积为 2.25 cm^2,整个虚拟冠层叶片个数为 32 081,叶总面积为 7.21 m^2。

(a) 幼龄杉木模型　(b) 杉木照片

图 3　杉木模型与杉木照片对比

Fig. 3　Comparison between Chinese fir model and actual picture

2　基于虚拟冠层模型的 PAR 辐射传输模拟

2.1　虚拟冠层顶部太阳光直射方向与强度模拟

真实世界植物冠层顶部太阳直射方向和太阳光强度随地理位置、时间、天气状况而变化。根据天文学、大气相关公式和模型,分别对冠顶太阳直射光的方向、冠顶 PAR 强度进行模拟。

2.1.1　太阳光直射方向计算

根据文献[17],经纬度地理位置不同时刻太阳光直射方向(高度角和方位角)的计算流程如图 4 所示,三维可视化模拟结果如图 5 所示。

2.1.2　太阳直射和散射光强计算

到达植物冠顶的辐射包括太阳直射和天空散射两部分。

2.1.2.1　直射光强模拟

太阳光的传输过程分为 2 个阶段:从太阳到达

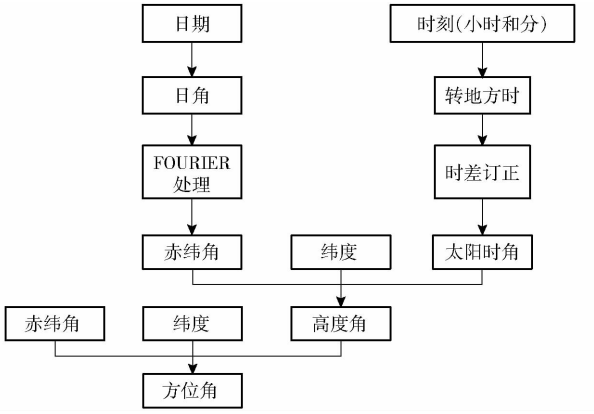


图 4　太阳光直射方向模拟流程

Fig. 4　Flow chart of sun direct radiation

地球大气层上界面和太阳光在大气层中的传输。

(1)太阳光到达地球大气层上界面的传输过程

太阳到达地球大气层上界面的太阳光强与日地距离成反比。对于垂直于太阳光线的平面,其辐射强度计算公式为

$$E = E_0 (r_0/r)^2 \tag{1}$$

式中　E_0——太阳辐射强度常数,世界气象组织推荐值为 1 367 W/m^2

$(r_0/r)^2$——日地距离订正系数

r_0——日地平均距离

r——当前日地距离

(2)太阳光在大气层中传输

垂直于太阳光线方向的太阳直射辐射强度与其穿过大气层的路径和大气透明度有关。大气量与太阳高度角和当地的地形高度以及大气压有关。一定地形高度下的大气量计算公式与海平面大气量的计算公式为

$$M_h = M_0 p_h / p_0 \tag{2}$$

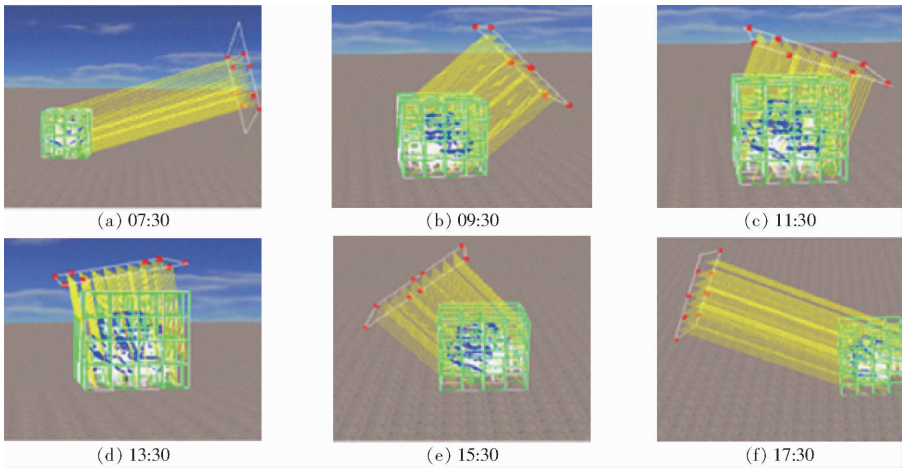


图 5 不同时刻太阳直射三维可视化模拟结果

Fig. 5 Direct sun direction simulation results

其中 $M_0 = [1\ 229 + (614\sin\delta)^2]^{1/2} - 614\sin\delta$ (3)

$$p_h/p_0 = [(288 - 0.006\ 5h)/288]^{5.256} \quad (4)$$

式中 M_h——一定地形高度下的大气量

M_0——海平面上大气量

δ——太阳高度角

p_h/p_0——大气压修正系数

p_h——一定海拔高度下大气压

p_0——标准大气压

h——地形高度

根据文献[17]提出的晴朗无云条件下的太阳直射大气透明系数计算公式为

$$\tau_b = 0.56(e^{-0.56M_h} + e^{-0.095M_h}) \quad (5)$$

式中 τ_b——太阳直射大气透明系数

在考虑大气衰减情况下,垂直到达地表的太阳直射光强计算公式为

$$I_b = E_0(r_0/r)^2\tau_b\sin\delta \quad (6)$$

式中 I_b——太阳辐射到达地表的太阳直射光强

2.1.2.2 散射光强模拟

在晴朗无云条件下天空散射是一个均匀散射,在直接辐射和散射辐射之间存在线性关系[18]。散射光强计算公式为

$$I_s = E(r_0/r)^2\tau_d \quad (7)$$

其中 $$\tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b \quad (8)$$

式中 τ_d——散射辐射透明系数

I_s——太阳辐射到达地表的天空散射光强

2.1.2.3 光合有效辐射 PAR 计算

光合有效辐射(PAR)部分的光能约占太阳总辐射的 40%,单位为 μmol/(m²·s),其同太阳光强(单位:W/m²)的换算系数随光强不同而改变。根据文献[19]将单位 W/m²转换到单位 μmol/(m²·s)的转换系数设为 4.6。

2.2 虚拟冠层光合有效辐射传输模拟

采用光线跟踪算法和天空可见率算法分别计算太阳直射 PAR 和散射 PAR 在虚拟冠层内的空间分布,精确获取某一时刻虚拟冠层内叶片上每一个三角面元的光强,用于植物叶片光合作用速率的计算。

2.2.1 太阳直射 PAR 在虚拟冠层内的分布模拟

采用正向光线跟踪算法,从光源向场景发射足够数量的光线,让光线与虚拟植物冠层相交,并继续跟踪光线与冠层组分相交后产生的反射和投射光线,直至光线的光强足够小或者逸出场景为止。为提高光线跟踪算法效率,将虚拟冠层进行空间剖分,建立几何包围盒包围叶片,使用八叉树进行空间索引。根据太阳方位角、高度角、太阳直射能量等确定光线跟踪投射的光线方向,单条光线携带的能量等;采用递归方法实现跟踪光线同叶片是否相交的计算。根据直射光线与叶片所在包围盒相交后,按设定的投射和反射能量分量,进行正向光线跟踪,直到光线能量衰减到设定阈值内。技术流程图如图 6 示,3D 模拟结果如图 7 所示。

2.2.2 太阳散射 PAR 在冠层内分布模拟

采用龟形算法来计算虚拟冠层中每个叶片对天空散射的透过率。叶片的天空透过率可表示为以叶片上的三角面元的中心点向该点上半球空间望去,不受虚拟冠层内部其他结构组分遮挡,而可以直接可视到天空的立体角范围所占整个上半球天穹的比例。对虚拟冠层中的一个叶片,计算其天空散射透过率的流程图如图 8 所示。

虚拟半球天穹被投影三角形遮挡的计算流程为:计算出投影三角形 3 个顶点在半球穹顶上所处的高度角和方位角,这 3 组高度角和方位角可确定一个经度方向和纬度方向上的跨度范围,可缩小覆盖格网的范围,加快遍历。其中,若已知投影三角形某个顶点坐标为(x,y,z),则可以计算该顶点所处位置的高度角 α 为

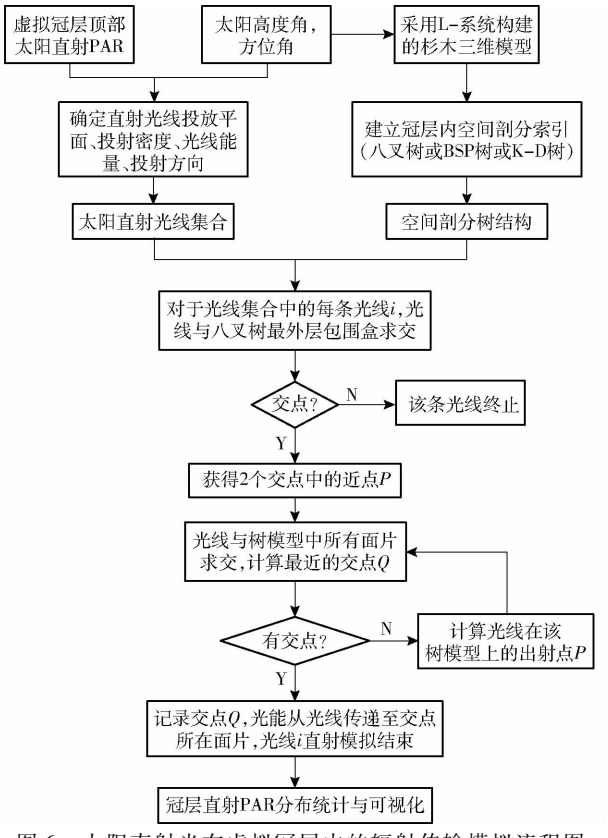


图 6　太阳直射光在虚拟冠层内的辐射传输模拟流程图

Fig. 6　Simulation flowchart of radiation transmission of direct radiation in virtual canopy

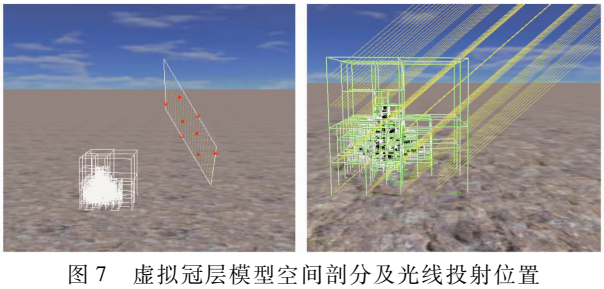


图 7　虚拟冠层模型空间剖分及光线投射位置

Fig. 7　Space segmentation of virtual canopy and ray plane location

$$\alpha = \arcsin \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \tag{9}$$

方位角 β 计算公式为

$$\beta = \arcsin \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \tag{10}$$

依据式(10)求得 β 位于 $-90° \sim 90°$ 范围内，根据 x 和 z 的正负确定 β 所在的象限，计算出方位角。求出实际的高度角 α 和方位角 β 后，即可确定 3 对高度角、方位角中的最大、最小值，将这组最大值和最小值作为查询的区间对相应高度角和方位角范围内的格网进行遮挡判断。大大减少了不必要的遮挡判断。图 9 为某面元天空可见率的模拟结果示意图。

图 9 中亮黄色三角形为计算天空可见率的三角面元，中间红色三角形为虚拟冠层中某个遮挡三角形，顶部红色三角形为遮挡三角形在穹顶上的投影。半球天穹上被遮挡区域的天穹格网点不予以绘制，白色格网点代表天空立体角可见部分。由此，计算天空可见立体角格网占总格网数量的百分比，即天空散射 PAR 的三角形面元上的天空可见率。

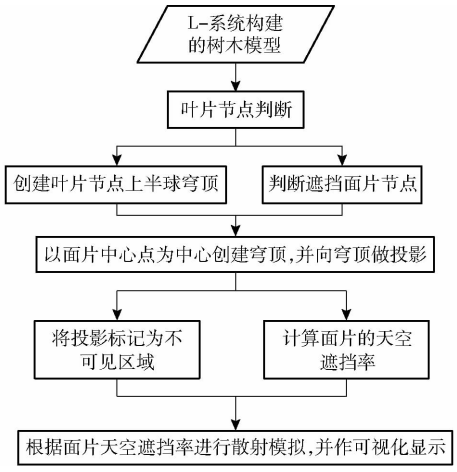


图 8　基于虚拟冠层的 PAR 散射模拟技术流程图

Fig. 8　Flow chart of PAR scattering simulation based on virtual canopy

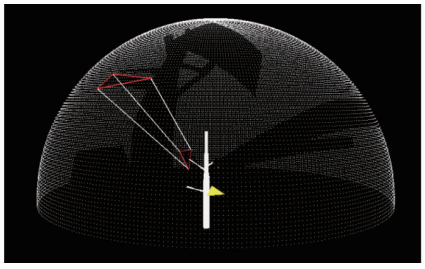


图 9　天空可见率模拟结果示意图

Fig. 9　Sketch of sky visibility calculation

某一地理位置的经纬度根据某一时刻可计算冠层顶部太阳光方向和 PAR 值，经上述模拟流程可知虚拟冠层内每个三角面元的 PAR 值。使用颜色梯度代表 PAR 值。对上文所建的幼龄杉木进行 PAR 辐射传输模拟，模拟结果如图 10 所示。

3　虚拟冠层光合作用模型

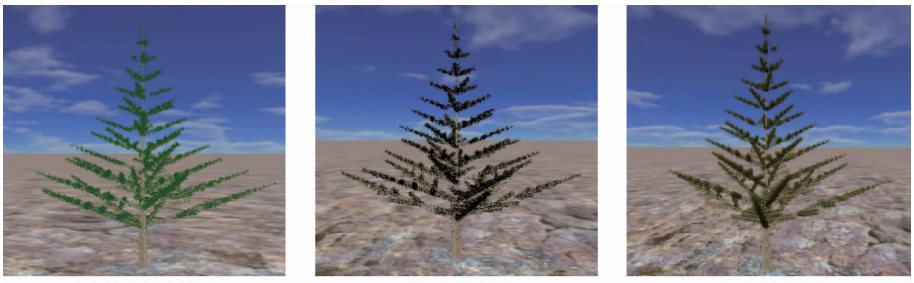
植物光合作用模型根据尺度可分为单叶尺度模型、冠层尺度模型、群体和区域尺度模型。上文模型可模拟计算冠层内每一个三角面元的 PAR 值，根据其他光合因子，可以累积冠层内每一个三角面元光合速率得到冠层光合作用模型。采用 LEUNING[20] 建立的光合速率与光强之间的非直角双曲线关系为

$$\theta P_g^2 - P(\partial_i P_{AR} + P_{max}) + \partial_i P_{AR} P_{max} = 0 \tag{11}$$

式中　∂_i——初始量子效率

P——最大光合速率

θ——曲线凸度



(a) 幼龄杉木模型 (b) 太阳直射 (c) 天空散射

图 10 5 年生幼龄杉木太阳直射和散射辐射结果

Fig. 10 Direct and scattered radiation results from five-year-old Chinese fir

P_g——总光合速率

P_{AR}——光合有限辐射强度

P_{max}——最大光合速率

冠层光合作用计算流程图如图 11 所示。

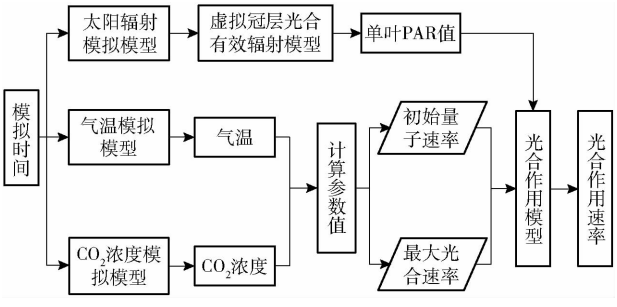


图 11 逐时光合速率计算流程图

Fig. 11 Flow chart of time-lapse photosynthetic environment factor simulation and canopy photosynthetic rate calculation

虚拟冠层的光合作用速率可视为冠层内所有叶片光合作用速率之和。冠层平均光合速率计算公式为

$$P_n = \sum_{i=1}^{n} P_i S_i \tag{12}$$

式中 P_n——冠层光合作用速率

P_i——第 i 片叶光合作用速率

S_i——第 i 片叶的叶表面积

n——叶片数量

量子效率是植物光响应特征的重要指标。其受细胞间隙的 CO_2 浓度的影响比较明显,其计算公式为

$$\partial_i = \partial_{i0}(C_i - T)/(C_i + 2T) \tag{13}$$

式中 ∂_{i0}——植物叶片 CO_2 同化的内禀量子效率,其与植物叶片自身光合特性相关

C_i——叶肉细胞 CO_2 浓度,本文将叶肉细胞 CO_2 浓度等同于叶片空气中的 CO_2 浓度

T——温度

根据文献[21],最大光合速率计算公式为

$$P_{max} = V_{m0}(P_i - G)/[P_i + K_c(1 + P_{O_2}/K_o)] \tag{14}$$

式中 V_{m0}——单位面积上 Rubisco 酶最大羧化能力

K_c、K_o——Rubisco 酶反应中的 CO_2 和 O_2 米氏反应常数

P_{O_2}——叶内 O_2 分压

4 模拟实验

4.1 光合同化物积累估算

对幼龄杉木模型分别进行太阳光直射和天空散射模拟计算,获取冠层内叶片三角面元的 PAR 值。设模拟周期为 7 月 1 日—12 月 30 日。根据 2.1 节所述虚拟冠层太阳辐射时刻点计算方法求得各辐射点的时刻值,模拟尺度为日尺度内每隔 6 h,在中间正点时刻设置一个辐射点;在周期尺度内将每月的第 15 天设置为该月的一个辐射模拟日期。冠层光合作用生产力含义为 1 h 内虚拟冠层进行光合作用同化的 CO_2 质量。模拟实验结果如表 1 所示。

4.2 单叶光合特性参数选取

光合作用曲线方程中曲线凸度 θ 的值位于[0,1]之间,当 θ 为 0 时,光合作用曲线为一条直线,当 θ 为 1 时,光合作用曲线为一条直角曲线。根据文献[22]中对不同叶龄针叶光响应曲线的描述,将 θ 设为 0.3。内禀量子效率 ∂_{i0} 是模型中表示植物叶片光合特性的参数。根据文献[22]中对内禀量子效率的测定,将幼龄杉木叶片内禀量子效率设为 0.03。CO_2 补偿点为当植物叶片光合作用吸收 CO_2 和呼吸作用释放 CO_2 相等,即净光合速率为零时,外界 CO_2 的浓度。根据文献[23]中对不同种源杉木光合特性的比较中列出的 CO_2 补偿点的描述,将幼龄杉木的 CO_2 补偿点确定为 150 μL/L。根据文献[24]中相关描述,当温度为 25℃时,Rubisco 酶的最大羧化能力 V_{m0} 为 100 μmol/(m²·s),Rubisco 反应中,CO_2 米氏反应常数 K_c 为 63 Pa,O_2 米氏反应常数 K_o 为36 000 Pa。

4.3 生物量估算结果分析

已知虚拟冠层光合作用速率 p,根据生物量累积算法,该正点时刻的光合作用速率被视作前后各

表 1　部分辐射点时刻值、环境因子、冠层光合生产力、净光合生产力模拟结果

Tab. 1　Simulation results of radiation, environmental factors, canopy photosynthetic productivity and net photosynthetic productivity at some radiation point

日期（周日尺度）	辐射正点时刻（日尺度）	冠顶直射辐射光强/（W·m^{-2}）	天空散射光强/（W·m^{-2}）	气温/℃	CO_2浓度	冠层光合生产力/（mg·h^{-1}）	冠层净光合生产力/（mg·h^{-1}）
7 月 15 日	09:00	704.66	45.86	30.80	$5.977\,2\times10^{-4}$	3 006.30	1 883.00
	15:00	764.31	44.15	37.70	$5.013\,0\times10^{-4}$	3 276.90	1 989.09
8 月 15 日	09:00	647.31	47.76	31.30	$5.977\,2\times10^{-4}$	1 139.11	715.00
	15:00	734.95	45.96	37.70	$5.013\,1\times10^{-4}$	3 276.97	2 093.00
9 月 15 日	09:00	647.31	50.09	29.22	$5.977\,2\times10^{-4}$	2 020.21	1 257.00
	15:00	633.39	50.38	34.75	$5.013\,1\times10^{-4}$	2 864.83	1 817.00
10 月 15 日	09:00	575.50	53.73	24.00	$5.977\,2\times10^{-4}$	1 714.54	1 049.00
	15:00	492.14	54.91	27.00	$5.013\,1\times10^{-4}$	2 002.84	1 250.00
11 月 15 日	09:00	568.71	57.09	17.00	$5.977\,2\times10^{-4}$	1 428.57	794.00
	15:00	374.04	57.05	21.00	$5.013\,1\times10^{-4}$	1 390.97	820.00
12 月 15 日	09:00	359.63	58.00	9.67	$5.977\,2\times10^{-4}$	754.43	328.00
	15:00	347.35	57.87	11.85	$5.013\,1\times10^{-4}$	782.21	375.00

3 h 的平均光合速率，生物累积量为

$$q = 21\,600kp \qquad (15)$$

式中　k——CO_2量转换为生物量的质量转化系数，取 30

由葡萄糖到碳水化合物的转化系数取为 0.72，生物量中的矿物质含量设为 5%。按模拟周期内计算的各个辐射时刻，依次进行辐射模拟计算瞬时冠层光合速率，经系数转换可得到周期内生物累积量。每月的生物累积量、生长周期内的生物累积量和模拟周期内总的生物累积量如表 2 所示。

表 3 中列出了不同种源杉木的光合生产力[23]。从表中可知，光合作用生产力同单株叶面积呈显著正相关，各种种源的杉木光合生产力同单株叶面积之比位于[367,639]之间。其中福建沙县种源杉木的比例为 428.15。由表 3 结合辐射幼龄杉木模型的几何结构参数可知，7—10 月，各个辐射点上的虚拟冠层光合作用生产力同单株叶面积之比位于[397,454]之间。由于表 3 中数值测定的季节、光照条件、杉木冠层形状、立地条件等因素均不统一，故无法作出精确的比较，但估算值接近于实测值，具有一定的可信度。其具体的精度，有待进一步的实测验证。其次，表 1 模拟结果显示了冠层光合作用速率随季节变化，从夏季到冬季，冠层生产力呈递减趋势，与实际情况相符。

表 2　幼龄杉木冠层生物量累积量估算

Tab. 2　Estimation of biomass accumulation for young Chinese fir　　g

月份	月生物累积量	生长周期生物累积量	模拟周期生物累积量
7	372.12		
8	269.87	931.790	
9	289.62		
10	220.95		1 324.96
11	106.77	393.176	
12	65.38		

表 3　不同种源杉木光合生产力的比较

Tab. 3　Comparison of photosynthetic productivity for different provenances Chinese fir

种源	广西梧州	广东信宜	广西贺县	贵州锦屏	湖南会同	福建沙县	安徽休宁	湖北咸宁
单株叶面积/m^2	116.29	50.82	73.82	122.75	110.4	163.32	71.59	108.42
光合生产力/（mg·h^{-1}·株$^{-1}$）	60 587	32 489	39 309	72 115	61 331	69 927	26 280	41 427

5　模拟软件程序

模拟结果的准确性取决于 PAR 强度、CO_2浓度等光合因子的瞬时数值。该模型支持多种参数交互输入，软件界面如图 12 所示。

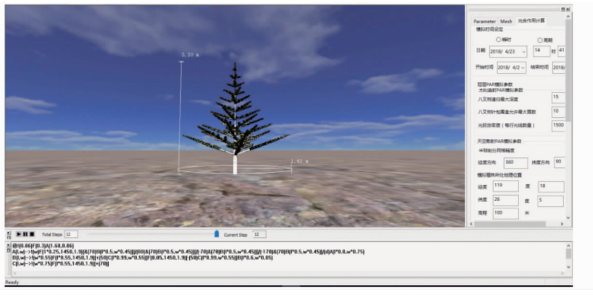


图 12　模拟程序软件界面

Fig. 12　Simulation program software interface

以计算虚拟杉木冠层瞬时光合速率为例,设定时间为 2018 年 4 月 23 日 14 时,地理位置为 119°18′E,26°5′N,海拔为 100 m。其他参数不变,改变 CO_2 浓度,图 13 中 CO_2 浓度从 3×10^{-4} 改为 4.5×10^{-4}。虚拟冠层光合作用生产力从 2 188.39 mg/(h·株)提高为 2 566.82 mg/(h·株),符合植物光合作用特性。

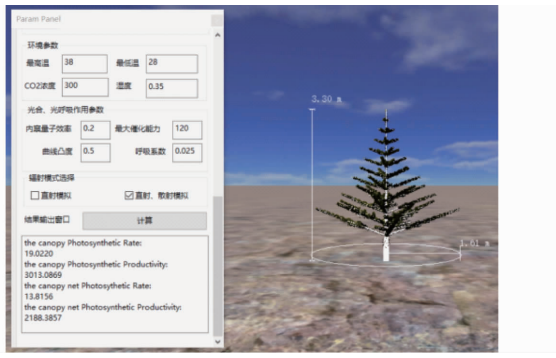


图 13 模拟程序示例

Fig. 13 Simulator usage example

6 结束语

光辐射(PAR)传输模型可以准确模拟某一位置、某一时刻冠层顶部太阳直射光照的入射方向;根据大气透明系数,模拟冠顶的太阳直射、散射光强;结合 CO_2 浓度、空气湿度等因子,进行冠层尺度光合速率的计算。该模型可以准确模拟冠层内的光照辐射传输,在已知其他光合作用环境因子情况下,理论上给出一个准确冠层尺度光合作用模型。对 5 年生幼龄杉木进行三维建模,再进行光合作用环境因子模拟,在此基础上完成太阳直射和天空散射在虚拟冠层内传输模拟与光合速率计算,在考虑呼吸作用的基础上,完成一定周期内生物量累积量估算。估算结果在一定范围内与实际相符。

参 考 文 献

1 JOHNSON I R, THORNLEY J H M. A model of instantaneous and daily canopy photosynthesis [J]. Journal of Theoretical Biology, 1984, 107(4): 531 – 545.

2 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.
YU Qiang, WANG Tianduo, LIU Jiandong, et al. Mathematical simulation of photosynthesis of plant type and canopy in maize I. model and validation[J]. Acta Agronomica Sinica, 1998, 24(1): 7 – 15. (in Chinese)

3 李艳大, 朱相成, 汤亮, 等. 基于株型的水稻冠层光合生产模拟[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 868 – 875.
LI Yanda, ZHU Xiangcheng, TANG Liang, et al. Simulation of rice canopy photosynthetic production based on plant type[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(5): 868 – 875. (in Chinese)

4 李绪孟, 王小卉, 郑华斌, 等. 水稻群体冠层光分布及光合作用模型[J]. 生物数学学报, 2014(1): 87 – 98.
LI Xumeng, WANG Xiaohui, ZHENG Huabin, et al. Canopy light distribution and photosynthesis in rice populations[J]. Chinese Journal of Biomathematics, 2014(1): 87 – 98. (in Chinese)

5 LINDENMAYER A. Mathematical models for cellular interactions in development I. filaments with one-sided inputs[J]. Journal of Theoretical Biology, 1968, 18(3): 280 – 299.

6 REFFYE P D, EDELIN C, JAEGER M, et al. Plant models faithful to botanical structure and development[J]. Acm Siggraph Computer Graphics, 1988, 22(4): 151 – 158.

7 REFFYE P D, HU B G. Relevant qualitative and quantitative choices for building an efficient dynamic plant growth model: greenlab case[J]. Plant Growth Modeling and Applications, 2003: 87 – 107.

8 劳彩莲. 基于蒙特卡罗光线跟踪方法的植物三维冠层辐射传输模型[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
LAO Cailian. Three-dimensional canopy radiation transfer model based on Monte Carlo ray tracing method[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)

9 王锡平. 玉米冠层光合有效辐射三维空间分布模型的构建与验证[D]. 北京:中国农业大学, 2004.
WANG Xiping. Construction and verification of three-dimensional spatial distribution model of photosynthetically active radiation in maize canopies[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

10 曹秉帅. 水稻功能——结构耦合模型 G – ORY 构建及应用[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
CAO Bingshuai. Construction and application of rice functional—structure coupling Model G – ORY [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

11 石佩. 桃不同树形 3D 冠层模拟光截获与果实品质相关性分析及光合特性测定[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
SHI Pei. Correlation analysis and photosynthetic characteristics of simulated light interception of different tree shaped 3D canopy and fruit quality[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2016. (in Chinese)

12 刘刚, 司永胜, 冯娟. 农林作物三维重建方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 38 – 46, 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140607&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.007.
LIU Gang, SI Yongsheng, FENG Juan. Research progress on the method of 3D reconstruction of agriculture and forestry crops[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 38 – 46, 19. (in Chinese)

13 KANG M Z, REFFLE P D, AUCLAIR D, et al. Analytical study of a stochastic plant growth model: application to the GreenLab model[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2008, 78(1): 57 - 75.

14 MA Y, CHEN Y, ZHU J, et al. Coupling individual kernel-filling processes with source-sink interactions into GREENLAB - Maize[J]. Global Change Biology, 2018,121(5):961 - 973.

15 徐照丽，孙艳，吴茜，等. 烟草功能-结构模型 GreenLab - Tobacco 的构建[J]. 中国烟草学报，2016，22(3)：52 - 59.
XU Zhaoli, SUN Yan, WU Qian, et al. Construction of the functional and structural model GreenLab - Tobacco for tobacco[J]. Chinese Journal of China Tobacco, 2016, 22(3): 52 - 59. (in Chinese)

16 WANG Feng, KANG Mengzhen, LU Qi, et al. Calibration of topological development in the procedure of parametric identification: application of the stochastic GreenLab model for *Pinus sylvestris* var. mongolica[J]. International Symposium on Plant Growth Modeling,2010, 26(5): 26 - 33.

17 王炳忠. 第一讲太阳能中天文参数的计算[J]. 太阳能，1999(2):8 - 10.
WANG Bingzhong. The first lecture: calculation of astronomical parameters in solar energy [J]. Solar Energy, 1999(2): 8 - 10. (in Chinese)

18 左大康，弓冉. 中国太阳直接辐射、散射辐射和太阳总辐射间的关系[J]. 地理学报，1962,29(3)：175 - 186.
ZUO Dakang, GONG Ran. Relationship among direct solar radiation, scattered radiation and total solar radiation in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1962,29(3): 175 - 186. (in Chinese)

19 聂修和，聂宜茂. 光合有效辐射测量原理及其单位换算[J]. 山东农业大学学报(自然科学版)，1992，23(3)：247 - 253.
NIE Xiuhe, NIE Yimao. Photosynthesis effective radiation measurement principle and unit conversion[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Sciences), 1992, 23(3): 247 - 253. (in Chinese)

20 LEUNING R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants[J]. Plant, Cell and Environment, 1995,18: 339 - 355.

21 FARQUHAR G D, CAEMMERER S, BERRY J A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C3 species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78 - 90.

22 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.
ZHANG Xiaoquan, XU Deying. Diurnal and seasonal changes of photosynthetic characteristics of different positions and leaf-aged needles of middle-aged Chinese fir plantation[J]. Forestry Science, 2000,36(3): 19 - 26. (in Chinese)

23 俞新妥. 杉木栽培学[M]. 福州：福建科学技术出版社，1997：394 - 398.

24 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.
ZHANG Jiahua, YAO Fengmei. Numerical simulation experiment and analysis of photosynthetic physiology of plant leaves with land surface model[J]. Meteorological Science, 2007, 27(4): 419 - 424. (in Chinese)

(上接第 274 页)

13 JIANG J H, BERRY R J, SIESLER H W, et al. Wavelength interval selection in multicomponent spectral analysis by moving window partial least-squares regression with applications to mid-infrared and near-infrared spectroscopic data[J]. Analytical Chemistry, 2002, 74(14): 3555 - 3565.

14 PAN T, LIU J, CHEN J, et al. Rapid determination of preliminary thalassaemia screening indicators based on near-infrared spectroscopy with wavelength selection stability[J]. Analytical Methods, 2013, 5(17): 4355 - 4362.

15 陈国良，孙广中，徐云，等. 并行计算的一体化研究现状与发展趋势[J]. 科学通报，2009,54(8):1043 - 1049.
CHEN Guoliang, SUN Guangzhong, XU Yun, et al. Integrated research of parallel computing: status and future[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(8): 1043 - 1049. (in Chinese)

16 XIA J, YANG Y W, CAO H X, et al. Visible-near infrared spectrum-based classification of apple chilling injury on cloud computing platform[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 145: 27 - 34.

17 黄华，祝诗平，刘碧贞. 近红外光谱云计算分析系统构架与实现[J/OL]. 农业机械学报，2014，45(8):294 - 298,327. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140847&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.047.
HUANG Hua, ZHU Shiping, LIU Bizhen. Architecture and implementation of NIR analysis system based on cloud computing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):294 - 298,327. (in Chinese)

18 SHARMA G, MARTIN J. Matlab: a language for parallel computing[J]. International Journal of Parallel Programming, 2009, 37(1): 3 - 36.

19 KASEMSUMRAN S, KEERATINIJAKAL V, THANAPASE W, et al. Near infrared quantitative analysis of total curcuminoids in rhizomes of curcuma longa by moving window partial least squares regression[J]. Journal Near Infrared Spectroscopy, 2010, 18(4):263 - 269.

20 LIU J, CHEN D S, SHEN J F. Development of self-validating soft sensors using fast moving window partial least squares[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 49(22):11530 - 11546.