

基于光线跟踪的冠层光分布模型参数研究

黄帆 劳彩莲* 肖翠霞

(中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要 以烟草冠层为例,使用面向对象技术,设计虚拟传感器,以改进蒙特卡罗光线跟踪模型,获得冠层中任意位置的截光率,进而定量分析各参数对模拟结果的影响。试验结果表明:1)初始光线投放密度和冠层结构精度对模型计算结果影响较大;2)在其他参数条件不变时,增加模型跟踪深度,增大天空散射源分布密度将提高模型计算精度。最后,对比了相同时段同一烟草冠层的田间实验和模型计算得到的光合有效辐射三维空间分布,决定系数(R^2)达0.98。该研究结果可为蒙特卡罗光线跟踪模型在作物冠层光分布模拟应用中提供参考依据。

关键词 光合有效辐射;冠层光分布;光线跟踪;三维计算机图形;虚拟植物

中图分类号 S 126;TP 391.9

文章编号 1007-4333(2013)06-0096-06

文献标志码 A

Parameters in the model of canopy light distribution with ray tracing approach

HUANG Fan, LAO Cai-lian*, XIAO Cui-xia

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract The simulation in distribution of photosynthetically active radiation within plant canopy has a great significance in studying physiological and ecological processes of plant. Monte-Carlo Ray-tracing(MCRT) model is one of the most effective models which are based on computer science to simulate the distribution in virtual plant canopy. The settings of parameters in MCRT model are the key point to improve the reliability of simulation. In order to get the optimal parameters, we designed a kind of virtual sensor to get the interception ratio for validating the simulated 3D PAR distribution with MCRT approach. In this paper, we utilized MCRT model to simulate the distribution of photosynthetically active radiation within tobacco canopy for quantify the impacts of parameters on simulations. Finally, we compared the results between field measurements and simulations to verify the feasibility of MCRT model. The result of this research provided with a reference for MCRT's application in simulating the three-dimensional light distribution in crop canopy.

Key words photosynthetically active radiation, canopy light distribution, ray tracing, three dimensional computer graphic, virtual plant

光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)在植物冠层中的分布特性影响着植物的生理形态和生长过程。研究太阳光在植物冠层中的三维空间分布是模拟植物生理生态过程、作物株型优化和作物生长模型中最基本和最重要的内容之一^[1]。

近年来,国内外学者采用三维模型模拟方法对作物冠层 PAR 分布模拟展开研究,Chelle 等^[2]采用虚拟玉米模型和嵌套式辐射度方法对玉米冠层光分布进行模拟,实现了光线与冠层组分和土壤间的反

射、吸收及透射全过程,并与蒙特卡罗光线跟踪算法进行了比较;王锡平等^[3]则以三维数字化仪实测的田间玉米冠层三维结构模型为基础,使用投影、Z-Buffer和 Turtle 算法建立了玉米冠层光合有效辐射三维空间分布模型,发现模拟结果与 AccuPAR 实测值相关性较高;Sinoquet 等^[4]则将数字化仪采集的核桃树模型体元化,并采用混浊介质类推法计算冠层模型中各体元 PAR 和近红外辐射量;王占刚等^[5]在冠层组分光学特征分析基础上,应用正向

收稿日期:2013-05-07

基金项目:中国烟草总公司云南省公司项目(2011YN08);中国烟草总公司项目(110201102008)

第一作者:黄帆,硕士研究生,E-mail:huangfan1226@aliyun.com

通讯作者:劳彩莲,副教授,博士,主要从事光与植物相互作用关系研究,E-mail:wxyjlyh@126.com

光线跟踪算法模拟冠层入射光线传播全过程, 并采用递归算法实现光线与冠层间反射及透射过程。

与仪器测量法^[6]、数学模型法^[7-8]等方法相比, 三维模型模拟方法计算精度高, 其模拟结果可满足虚拟植物深入应用需求, 但同时也存在计算量和植物模型数据量大的缺陷。通过大量试验发现, 三维模型中的参数设定直接影响模型计算消耗资源与模拟效果, 因而研究三维模型中各参数对模拟结果的影响, 对于模拟结果的优化有着至关重要的意义。

不同于前人利用整体截光率评价植物冠层光分布模拟效果, 本研究在蒙特卡罗光线跟踪模型(以下简称 MCRT 模型)基础上, 使用面向对象技术设计虚拟传感器, 以获得冠层中任意位置的截光率, 从而提高模型精度。基于改进后的 MCRT 模型, 先后模拟不同参数条件下的烟草冠层截光率分布, 定量分析各参数对模拟结果的影响; 并与实测结果对比分析, 以验证 MCRT 模型中参数的优化对于提高植物冠层光分布模拟效果的有效性。

1 试验与方法

植物冠层内截光率的测定是研究冠层内辐射传输与分布规律的基础, 同时也是验证辐射模型的主要方法。在 MCRT 模型基础上, 采用面向对象方法设计虚拟传感器, 获得冠层中任意位置的截光率, 依次定量分析了各参数对模拟结果的影响。

对于同一植物冠层, 其辐射传输特征主要决定于以下 2 个因素: 光源的模拟和植物冠层的三维构建^[9]。而具体到 MCRT 模型计算中, 模拟结果主要受到光线投放密度、光线跟踪深度、天空模型以及冠层结构精度 4 个参数的影响。本研究的难点与关键点是模型的改进和参数设定的优化。

1.1 MCRT 模型

MCRT 模型是一种基于蒙特卡罗光线跟踪算法, 采用混合式二叉树空间剖分技术对植物冠层进行非均匀网格剖分^[10], 并基于此空间结构利用 MPI (Message passing interface) 并行编程^[11]实现的光合有效辐射三维分布模型。

其核心内容是在被模拟的植物冠层上方, 建立一个栅格化的光线投放平面^[12]。模型在每个栅格的交点处投放一条光线, 并依次跟踪每条光线在植物冠层中的传输轨迹。图 1 为模型的算法流程图。

1.2 太阳辐射模拟

在太阳辐射中, 同时存在直接辐射与散射辐

射^[13]。直接辐射是将从太阳直接到达地面的辐射模拟为均匀的平行光, 投放到冠层虚拟平面上; 散射辐射则是利用立体角对天空散射进行网格划分将天空划分为 n 个区域, 以它们的中心位置表示天空散射源的分布, 将每个散射源发出的光模拟为均匀的平行光, 投放到冠层虚拟平面上, 来模拟天空散射。

直接辐射与散射辐射所占比例因天气状况不同而有所不同, MCRT 模型模拟了全晴和全阴 2 种天气状况下的冠层辐射分布。其中根据国际照明委员会(CIE)推荐的全晴天天空亮度模型标准, 定义 CIE 全晴天空亮度分布为

$$\frac{L_d(\gamma_s, \gamma, \chi)}{L_{zd}(\gamma)} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(\gamma)}{f(\frac{\pi}{2} - \gamma_s) \cdot \varphi(\frac{\pi}{2})} \quad (1)$$

式中: χ 是太阳到天空元素之间的角距离, γ_s 为太阳高度角, γ 为天空元高度角。 $f(\chi)$ 为由 Kittler 提出的标准漫射指标函数, 且当在清洁乡村大气, Linke 浑浊度指标为 2.45 时

$$f(\chi) = 0.91 + 10e^{-3\chi} + 0.45\cos^2\chi \quad (2)$$

$\varphi(\gamma)$ 为由 Kittler 提出的标准吸收指标函数

$$\varphi(\gamma) = 1 - e^{-0.32/\sin\gamma} \quad (3)$$

CIE 全阴标准天空亮度分布为

$$L_\gamma/L_Z = 1 + 2\sin\gamma/3 = 1 + 2\cos Z/3 \quad (4)$$

式中: L_γ 为天空元素亮度, L_Z 为天顶亮度, γ 为天空元素高度角, Z 为天空元素和天顶之间角距离 ($Z=90^\circ-\gamma$)。

1.3 植物冠层三维构建

采用的植物冠层数据为烟草冠层, 于 2012 年 8 月在云南省玉溪市赵桅实验基地 ($24^\circ18'N, 102^\circ29'E$, 海拔: 1 642 m), 利用 Fastscan 三维数字化仪对冠层内实测域(行 2 棵 \times 列 2 棵)上的烟草叶片进行三维空间坐标测定获得, 最后通过沿行向和列向的连续复制构建虚拟冠层。

实测数据有 2 种: 叶片扫描三角面元数据和叶缘及中脉散点数据。这 2 种数据都无法直接使用, 其中, 叶片扫描数据因其大数量的三角面元, 将导致模型模拟时消耗巨大计算资源, 所以需要对其进行精简, 去除冗余部分, 只保留能够表达叶片结构特性的三角面元; 而叶缘及中脉散点数据则需要对散点集进行三角剖分, 连线构成叶片曲面。

分别对这 2 种冠层数据进行了预处理, 分别生成扫描精简冠层和直接连线冠层。扫描精简冠层是

利用三角形折叠方法^[14]对叶片扫描三角面元数据进行网格简化后的结果;直接连线冠层是基于叶缘

及中脉散点数据,利用 Delaunay 三角剖分算法^[15]构建成的三角面元集(图 2)。

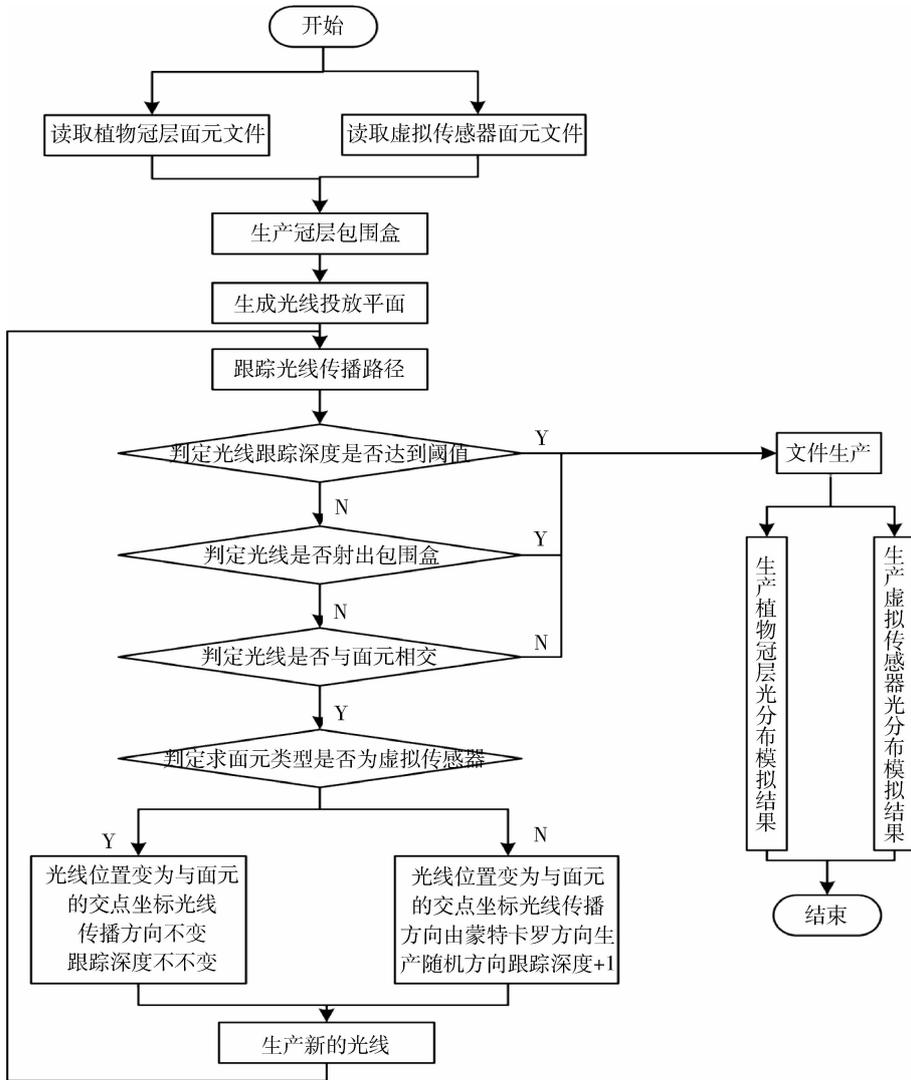


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

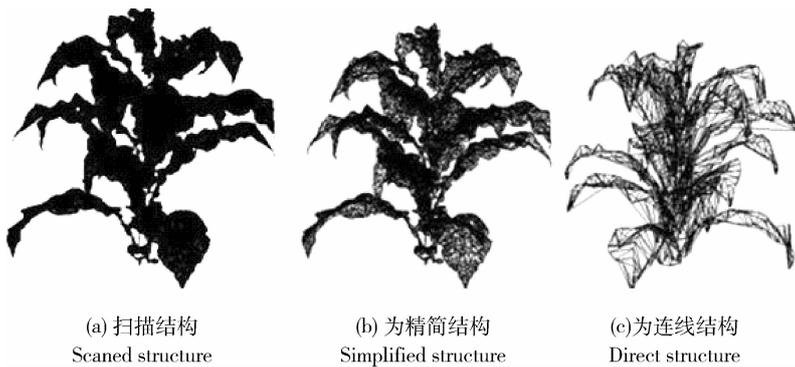


图 2 不同精度的烟草三维结构

Fig. 2 Tobacco structure within different accuracy

1.4 烟草冠层空间截光率测定

本研究采用 AccuPAR 冠层分析仪直接测量植物冠层顶部和内部的各个高度的 PAR 水平分布, 利用内部和顶部测定的 PPFD 比值获得冠层截光率。PAR 采集的三维空间范围: 沿列向 80 cm(东西向, 共 8 个测量单元), 行向 40 cm(南北向, 在贴近中心位置 7.5、27.5 和 47.5 cm 共 3 个位置上各采集一个记录, 分别用 A、B 和 C 来表示); 垂直方向 200 cm(距离土壤 0.5 cm, 以 20 cm 为间隔在冠层内测定 7 个高度, 在距离土壤 200 cm 处测量记录表示冠顶 PAR)。

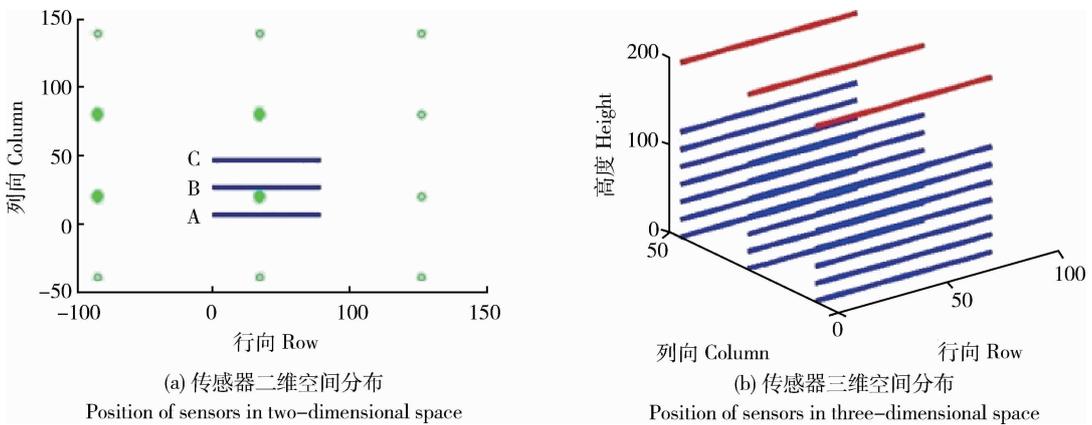


图 3 测量冠层光分布试验中传感器位置
Fig. 3 Position of sensors in experiment

2 结果与分析

2.1 光线投放密度对直接辐射结果的影响

MCRT 模型中光线投放密度是指投放平面上, 单位面积的光线投放数。对同一植物冠层, 其投放平面面积大小一定, 光线投放密度直接决定模型模拟精度和计算资源。

图 4 列出了 4 组不同光线投放密度(即每平方米的光线投放数分别为 10^2 、 10^4 、 10^6 和 10^8)下烟草冠层的截光率分布结果。在相同辐射强度下, 当投放密度设定大于 10^6 时, 继续增大投放密度, 对模拟结果的影响较小(投放密度 10^6 和 10^8 之间结果的相对误差为 0.046)。而当投放密度小于 10^4 时, 模型的精确度明显降低(投放密度 10^2 和 10^4 之间结果的相对误差为 0.455)。

2.2 光线跟踪深度对直接辐射结果的影响

MCRT 模型通过设定光线跟踪深度, 实现太阳辐射在植物冠层中叶片间的多级散射。跟踪深度决

传统 MCRT 模型中只能获得组成冠层叶片的光截获, 因而需要通过计算同一高度上所有叶片获得光强总和与冠顶投放光强的比值表示截光率, 这种方法获得的截光率精度不高。为了获得任意位置的截光率, 本研究文采用面向对象方法设计了虚拟传感器, 该传感器的主要功能是在不影响植物冠层光分布模拟的前提下, 获得不同空间位置光辐射。为了与田间测定条件相一致, 本研究依据测定仪器的形状大小和在冠层中的空间位置, 实现了线性虚拟传感器的构造(图 3)。

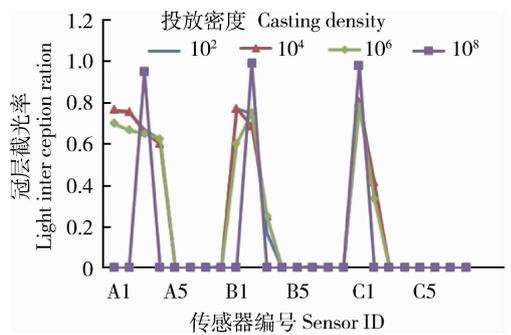


图 4 不同光线投放密度下的冠层截光率结果
Fig. 4 Light interception ratio within different density of light casting

定辐射在冠层中的散射级数: 当跟踪深度为 1 时, MCRT 模型忽略了辐射在冠层中的散射; 而当跟踪深度大于 1 时, 模型则根据 Lambert 原理计算出透射和反射的光线强度, 并采用蒙特卡罗随机抽样方法确定次级光线的方向。

图 5 列出了 3 组不同光线跟踪深度下的烟草冠

层的直射辐射截光率分布结果。在相同投放密度 (Step=0.1 cm)下,增加光线跟踪深度可以一定程度提高模拟精度,但对烟草冠层截光率的影响较小(跟踪深度1和2之间结果的相对误差为0.043)。

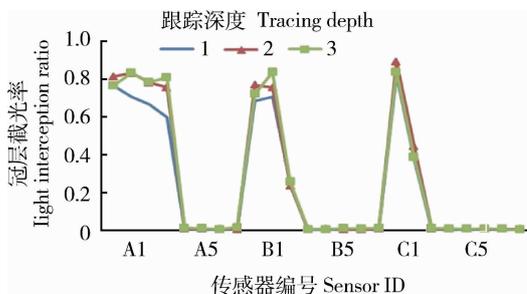


图5 不同光线跟踪深度下的光分布模拟结果

Fig. 5 Light interception ratio within different tracing depth

2.3 天空散射源分布对天空散射模拟的影响

本研究采取了基于 Hammersley 序列构建的天空半球^[16]下的太阳辐射模拟。其基本原理为:按一定的密度,将半球沿高度角方向($0 \sim \pi/2$)和方位角($0 \sim 2\pi$)方向划分成以球心为中心的立体角网格,则对应球面被划分成 N 个球面小三角形,这些小三角形的中心点即为天空半球的散射源。而基于 Hammersley 序列构建的天空半球的散射源参数则是根据 Hammersley 序列 H_N 确定, H_N 利用如下公式获得

$$H_N = \{X_i = \begin{pmatrix} i/N \\ \Phi_2(i) \end{pmatrix}, \text{ for } i = 0, \dots, N-1\} \quad (5)$$

其中

$$\Phi_2 = \frac{a_0}{2} + \frac{a_1}{2^2} + \dots + \frac{a_r}{2^{r+1}} \quad (6)$$

表1 2种冠层结构的模拟精度比较

Table 1 Accuracy of different canopy structure

项目 Item	面元数 Number of triangles	面元大小/mm ² Average area of triangles	决定系数(R ²) Determination coefficient
直接连线 Direct structure	6 866	1 600.0	0.720
扫描精简 Simplified structure	158 222	6.2	0.986

射分布,通过与田间实测冠层截光率比较,分析冠层结构对光合有效辐射分布的影响。图7为试验结果的散点图,其中横坐标为传感器的实测冠层截光率,

取 $x_i = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \in H_N$, 则有

$$\theta = \cos^{-1}(1-u) \quad (7)$$

$$\Phi = 2\pi v \quad (8)$$

其中: θ 和 Φ 分别为天空源的高度角和方位角。

图6为4组不同天空半球模型下的烟草冠层在标准阴天模型下太阳辐射的截光率分布结果对比。由试验结果可得:在相同参数条件下,增大天空散射源分布密度可以提高模拟精度(散射源64和96之间结果的相对误差为0.134),而当天空半球设定为96个散射源时,继续增大散射源个数,对模拟结果的影响较小(散射源96和128之间结果的相对误差为0.099)。

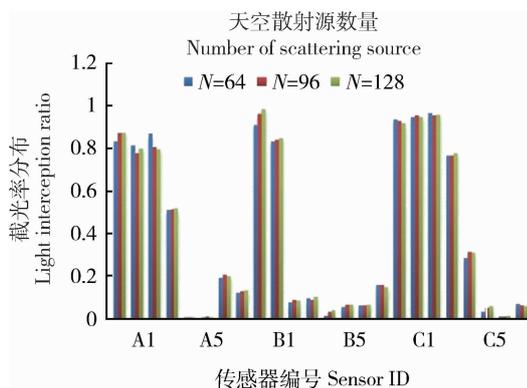


图6 不同天空半球模型下的标准阴天冠层光分布模拟结果

Fig. 6 Light interception ratio within different distribution of sky illuminant

2.4 冠层结构对结果的影响

本研究利用 MCRT 模型分别计算了相同参数(投放密度 10^6 、跟踪深度1、96个天空散射源)条件下,2种三维结构精度(表1)的烟草冠层光合有效辐

纵坐标为 MCRT 模型模拟结果。通过对比发现,直接连线构成的冠层结构因缺失信息较多,而不能很好的复现真实冠层对光合有效辐射的影响。

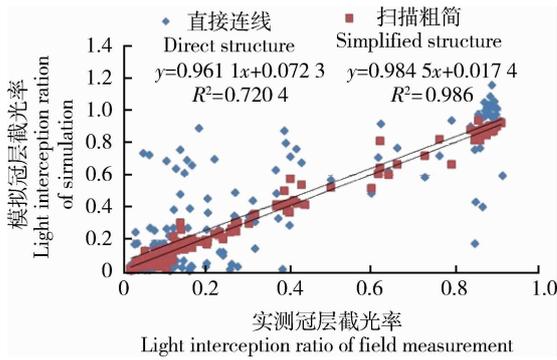


图7 2种冠层结构模拟与实测结果的对比

Fig. 7 Light interception ratio within different canopy structure

3 结论

通过模拟不同参数条件下的冠层光分布,得到如下结论:

1) MCRT模型中的光线投放密度直接影响光源的模拟,因而对冠层光合有效辐射分布计算结果的影响较大。在相同参数条件下,增加投放密度可以增大模型计算精度,当投放间隔达到0.1 cm,再继续增加投放密度,不仅对模型的结果影响较小,还会消耗较大的计算资源。

2) 烟草叶片在PAR波段的反射率和透射率(反射率0.09,透射率0.06)较小,增加光线跟踪深度对模拟精度的提高不大,因而在模拟冠层对光合有效辐射分布时可以忽略冠层内部散射。

3) 在相同参数条件下,增大天空散射源个数可以增大太阳辐射的模拟精度(建议散射源个数为96)。

4) 冠层结构精度直接影响MCRT模型的计算结果。当三角面元面积较大时,会丢失叶面结构信息而无法重现真实冠层的光合有效辐射分布。

综上所述,MCRT模型中不同参数对计算结果的影响不尽相同。其中,初始光线投放密度和冠层结构的描述精度对模型计算结果影响较大;而在其他参数条件不变时,增加模型跟踪深度,增大天空散射源分布密度将提高模型计算精度。适当的设定参数,可以提高模型的计算效率,有效模拟光合有效辐射在植物冠层中的真实光分布,为该模型在植物冠层三维空间光分布模拟中的应用提供参考依据。

参 考 文 献

- [1] 温维亮,郭新宇,王雪,等. 基于辐射照度的作物冠层光分布计算系统设计[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):190-193
- [2] Chelle M, Andrieu B. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies [J]. Ecol Model, 1998, 111(1): 75-91
- [3] 王锡平,郭焱,李保国,等. 玉米冠层内太阳直接辐射三维空间分布的模拟[J]. 生态学报,2005,25(1):7-12
- [4] Sinoquet H, Lerou X, Adam B, et al. RATP: A model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: Application to an isolated tree crown[J]. Plant Cell Environ, 2001, 24(4): 395-406
- [5] 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
- [6] 王锡平,李保国,郭焱,等. 玉米冠层内光合有效辐射三维空间分布的测定和分析[J]. 作物学报,2004,30(6):568-576
- [7] Sinoquet H, Bonhomme R. Modeling radiative transfer in mixed and row intercropping systems[J]. Agric For Meteorol, 1992, 62:219-240
- [8] Sinoquet H, Moulia B, Bonhomme R. Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: Comparison between three-dimensional digitizing and plant profiles[J]. Agric For Meteorol, 1991, 55:233-249
- [9] Abraha M G Savage, M J. Validation of a three-dimensional solar radiation interception model for tree crops [J]. Agric Ecosyst Environ, 2010, 139:636-652
- [10] 杨垠晖. 基于蒙特卡洛光线跟踪算法的植被冠层二向反射率模拟系统设计[D]. 北京:中国农业大学,2008
- [11] 肖强,劳彩莲,王春霞. 植物冠层光辐射分布的快速深度缓存算法[J]. 计算机工程,2010,36(15):288-290
- [12] 劳彩莲,李保国,郭焱. 基于光线跟踪技术的植物冠层内太阳辐射光空间分布模拟[C]//2005年中国数字农业与农村信息化学术研究研讨会论文集,北京:北京农业信息工程技术研究中心
- [13] 孔娅,劳彩莲,曹素云. 利用3D模型模拟天空与叶面散射对玉米冠层截光率的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(5):248-252
- [14] Isler V, Lau R, Mark G. Real-time Multi-resolution modeling for complex virtual environments[C]//In Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, HongKong: ACM SIGCHI & ACM SIGGRAPH, 1996: 11-20
- [15] 陈中贵,曹娟,杨晨晖. 构造最优Delaunay三角剖分的拓扑优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(12): 1967-1974
- [16] Frolov V, Vostryakov K, Kharlamov A, et al. Irradiance Cache for a GPU Ray Tracer[C]//The 22nd International Conference on Computer Graphics and Vision, Moscow: Graphics & Media Lab, 2012