

玉米冠层内太阳直接辐射三维空间分布的模拟

王锡平^{1, 2}, 郭 焱¹, 李保国^{1*}, 马韞韬¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 北京 100094;

2. 河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050016)

摘要: 太阳直接辐射在植物冠层内的空间分布特征影响植物生理生态功能, 是衡量植物群体结构是否合理的重要指标。利用田间实测的玉米冠层内植株各器官的三维空间坐标进行冠层结构分析, 将冠层内的植株器官表面划分成小面元; 根据几何光学中光的直线传播原理, 利用面元沿太阳光线的平行投影和投影深度排序(Z-buffer)算法计算冠层内面元受太阳光直接照射的情况, 建立了太阳直接辐射在玉米冠层内三维空间分布的模拟模型。模型可计算出作物冠层内任选植株的器官表面或冠层内地面上的太阳直射光斑(Sunflecks)分布, 也可输出选定空间位置或范围上的太阳直接辐射的分布, 同时可实现模拟结果的三维可视化。根据此模型的模拟结果可对太阳直接辐射在玉米冠层内的空间分布进行各种分析。利用玉米冠层内光斑的三维分布测定试验, 在光合有效辐射(PAR)波段对模型进行了检验。模型适用于任意三维结构可测并可进行面元化划分的植物群体或个体。

关键词: 植物冠层; 玉米; 辐射; 空间分布; 可视化; 模型

Modelling the three dimensional distribution of direct solar radiation in maize canopy

WANG Xi-Ping^{1, 2}, GUO Yan¹, LI Bao-Guo^{1*}, MA Yun-Tao¹ (1. Key Laboratory of Plant-Soil Interactions of MOE, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 7~12.

Abstract: The spatial distribution of solar radiation in a plant canopy influences eco-physiological functions and gives a measure of the light-interception efficiency of stand architecture. A simulation model of the three dimensional (3D) distribution of direct solar radiation in a real maize canopy was developed from precise measurements of 3D canopy structure. The plant organ surfaces in a real canopy were subdivided into multiple facets based on 3D coordinate data obtained by digitizing in the field. The model was based on geometrical optics assuming parallel rays of sunlight. A grid plane, S_{top} , was defined above the canopy of the measured plot assuming one ray of sunlight for every grid square on S_{top} . The parallel projection of all the canopy facets along the ray of sunlight onto S_{top} was then calculated. The closest facet to each grid square on S_{top} was found using a Z-buffer algorithm to sort the facet distances by projection depth. Because one facet could be projected onto a number of grid squares, the sunfleck intensity of every facet was defined as the ratio of its sunfleck grid number to its total projected grid number. The direct solar radiation intercepted by every facet was obtained from the sunfleck intensity multiplied by the direct solar radiation above canopy. From this model, the distribution of direct solar radiation in a maize canopy (i. e. sunfleck distribution) could be computed for anytime of day. The simulation results were output to data files and as 3D images for more advanced analysis of

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划资助项目(G1999011709); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2003AA209020); 国家农业部“948”资助项目(201069)

收稿日期: 2003-12-16; **修订日期:** 2004-09-19

作者简介: 王锡平(1964~), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事农业气象模型和系统分析研究。E-mail: wangxp@mail.hebtu.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: libg@cau.edu.cn

致谢: 澳大利亚昆士兰大学 Peter Room 教授对英文摘要作了详细的修改, 在此深表感谢

Foundation item: “973” National Basic Research Program of China (No. G1999011709); “863” Hi-Tech Research & Development Program of China (No. 2003AA209020); “948” Program Supported by Ministry of Agriculture of China (No. 201069)

Received date: 2003-12-16; **Accepted date:** 2004-09-19

Biography: WANG Xi-Ping, Ph. D., Senior engineer, mainly engaged in agrometeorological system and model. E-mail: wangxp@mail.hebtu.edu.cn.

the sunfleck distribution. A field experiment was carried out for model validation. The three dimensional distribution of PAR (Photosynthetic Active Radiation) in a maize canopy was measured using an AccuPAR (Decagon Inc. USA) and a custom machinery support system designed by us. The statistical results show that the simulated sunfleck ratios at different heights in the canopy were consistent with measured PAR. This model is suitable for applying the facet dividing method to any kind of 3D digitized plant stand.

Key words: plant canopy; maize; radiation; 3D distribution; visualization; model

文章编号:1000-0933(2005)01-0007-06 中图分类号:Q142,S314 文献标识码:A

太阳直接辐射是植物冠层内辐射的最主要组成部分,对植物生长发育有重要意义。植物冠层内直射光分布规律的研究一直受到人们的重视,如光斑形成与分布规律、半影与阴影的变化规律、光斑分布的统计表达模式等,是植物冠层内光分布研究的重要内容^[1]。

冠层结构的改变直接引起植物冠层内的光分布状况的改变,所以冠层结构的分析是进行植物冠层内光分布规律研究的基础。已有的作物冠层内直射光分布的模拟模型研究主要是在对冠层结构进行一定的简化假设基础上或者是以统计方法进行的,不能有效地表达真实的植物冠层结构对冠层内光分布变化的影响^[1,2]。例如用比尔指数定律描述光斑面积随累计叶面积深度的递减规律,只能在叶片随机分布的冠层内才能达到较理想的效果。Ross 首先提出的以叶片方位角分布函数(即 G-函数)为基础的光分布模型^[3],虽然能够对冠层结构进行更细致的分析,但与比尔定律一样,只能模拟出直射光在一维空间上变化的统计平均状况,不能确切反映三维空间上的光分布变化,而且没有考虑其它植物器官的影响。

随着植物结构与生理功能互作研究的深入,对植物冠层内光的空间分布状况的模拟技术提出越来越高的要求,如在植株形态发育与微环境条件、群体结构发育与产量形成的关系以及虚拟植物模型等研究中,不仅要求植物冠层内辐射强度或太阳直射光斑随冠层深度的变化特征,也要求在三维空间、在植株相应器官或位置上的变化特征作为条件^[4,5]。

近年来,随着植物三维结构模型研究的发展^[4,5],人们开始尝试作物冠层中光传播与分布的精确模拟模型研究,如辐射度模型和光线跟踪模型^[6,7]。这类模型在对植物冠层进行三维描述和分析的基础上,能够模拟冠层内光的三维分布状况,但计算量和数据存储量太大,对计算机和数值计算水平要求高,目前难以实现实际应用。

为了较容易实现植物冠层内光的三维空间分布的模拟,将进入冠层内的总辐射分解成太阳直接辐射和天空散射辐射,分别进行模拟计算。为了建立植物冠层内太阳直射光三维分布的模拟模型,引用计算机图形学中的投影和 Z-buffer(投影深度排序)算法^[8],对每一个小面元和光线进行一次计算就可搜索出光斑面元,是一种可行性方案^[7],只是目前还没有实现于真实植物冠层模拟的报道。

本文在田间实测的玉米冠层三维结构基础上,建立了基于投影和 Z-buffer 算法的直射光分布模型,并设计了玉米冠层内光合有效辐射(PAR, 400~700nm)三维空间分布的测定试验,对模型进行了验证。

1 材料与方法

1.1 田间试验

1.1.1 试验地及测定内容 田间试验的目的是为了取得玉米植株的三维结构数据和进行模拟结果验证,在中国农业大学西区科学园的大田试验地里进行,土质为壤土,水肥适宜、人工除草管理。玉米生长良好,两种密度处理,其中稀植处理的株行距为 60 cm×60 cm、常规密度处理的株行距为 30 cm×60 cm,均为南北行向。玉米播种期为 2002 年 5 月 8 日,在 2002 年 8 月 7~9 日(天气为晴天偶有薄云、静风)进行不同时刻的冠层内 PAR 测定,2002 年 8 月 12~15 日进行植株三维坐标测定。这时冠顶高度约 220 cm(稀植)和 240 cm(常规密度),为灌浆中期,植株营养生长已停止,测定期间玉米植株各器官的形态和空间分布变化很少,这里予以忽略。

1.1.2 实测区域选择 在试验地内选择有代表性的地块作为实测区域,包括其范围内的玉米植株及地面区域,称为实测域(Measured plot)。试验选取的实测区域为:稀植处理包括玉米 12 株(3 株×4 行),区域大小为(3×60 cm)×(4×60 cm)=180cm×240 cm;常规密度处理包括玉米 20 株(5 株×4 行),区域大小为(5×30 cm)×(4×60 cm)=150cm×240 cm。对实测域上所有植株器官进行三维空间坐标采集,其将是本文进行太阳直射光分布模拟的主体。

1.1.3 玉米冠层三维空间坐标采集 用美国 Polhemus 公司的 3Space Fastrak 三维数字化仪(精度为 0.08 cm)完成所有植株三维空间坐标采集。测定内容为:沿每个叶片的两侧叶缘(选测点时注意反映出叶缘的波动)和叶中脉上选择足够点、雌穗上缘和下缘各沿一条线选择足够点、雄穗穗枝的上下端点(将其视为空间直线)测定三维坐标,以确定各器官轮廓及其在三维空间中的位置。在植株基部测定每株玉米在实测域上的位置。进行三维坐标测定时每株玉米具有单独的坐标系,进入模型之前须将所有植株平移,统一到实测域坐标系。这里采用右手坐标系,X 轴向南为正,Y 轴向上为正,Z 轴向西为正。原点在实测域东北角。

1.1.4 玉米冠层内 PAR 光斑的测定 在实测域中间的行间进行玉米冠层内 PAR 三维分布的测定。测定覆盖的地面范围为行间 $60 \times 80 \text{ cm}^2$, 用美国 Decagon 仪器公司的 AccuPAR 冠层分析仪实现(仪器感应波段在 $400 \sim 700 \text{ nm}$)。测定在白天不同时间(太阳入射角)进行^[9], 每次测定包括从地面到冠顶的 12 个平面, 高度分别为 11、26、46、66、86、106、126、146、166、186、206、226 cm; 每个平面上有 5 个位置, 分别在行间贴近东侧玉米行、距东侧玉米行 15、30、45 cm 和贴近西侧玉米行; 利用 AccuPAR 的探头编组功能可以测取探棒上每个探头的 PAR 光量子通量密度 (PPFD), 探棒上共 80 个探头(间隔 1 cm), 所以每个 AccuPAR 放置位置上测取 80 个探头值, 称为一个记录。这样每个测定平面上有 $5 \times 80 = 400$ 个测点, 同时利用外接 LI-190SA 探头进行冠层外 PPFD 的测定。

每个测点的 PPFD 与冠顶 PPFD 的比值为 PAR 透光率。因为散射辐射在同一水平上的变化比直射辐射小得多, 所以在每一个记录上透光率陡然升高的位置可认为是光斑。每个高度平面上的光斑点数与总采样点数(这里实测总采样点数为 400)的比值称为该高度上的光斑率。

1.2 模型的建立

利用实测的玉米植株器官的三维空间坐标, 将各器官表面划分成很多连续的三维空间小三角形, 这些小三角形的划分尺度足够小, 使其可以近似地作为植株器官表面的基本组成单元, 称为小面元 (Facet)。植物冠层内太阳直接辐射的三维分布模型就是最终模拟出太阳直射光在这些小面元上的分布。在 WINDOWS 操作平台上利用 Visual C++ 实现模型主体, 并调用 OpenGL 图形库实现三维可视化。

1.2.1 作物冠层内各种表面元预处理 进行叶片面元划分时, 首先利用田间实测的叶缘和叶中脉点坐标进行线性插值和 B 样条插值, 根据一定的划分尺度将叶脉和两叶缘平均划分成数量相同的空间线段(线段长度小于或等于划分尺度)。然后从叶基部开始, 根据叶脉线段及其两侧叶缘线段将叶片分割成一些横向小段, 这里称为一行, 每一行具有以叶脉为中心的左右两片段。根据划分尺度将每行左右两侧片段的上下边划分成一个个小线段。于是每行上同序号的上下小线段之间形成了一个空间小四边形(在边缘可能直接形成三角形); 对每个小四边形按顺序沿同向对角线划分成两个小三角形, 这些小三角形构成最终的叶片面元(图 1a)。

进行雌穗小面元划分时, 假设雌穗由两个对接到一起的小圆台组成, 根据沿雌穗表面的上、下轮廓线实测到的空间坐标点, 求出小圆台的圆周边上的空间方程, 在其表面上进行纵横向划分, 得到雌穗的小面元(图 1b)。

进行茎的小面元划分时, 将玉米的茎假设为细高的椭圆台, 沿整个茎高横切, 得到一个个小椭圆台片段; 将每个小圆台上下底的圆周边按一定距离划分成小弧段, 上下对应的小圆弧组成近似小四边形; 每个小四边形沿对角线划分成两个小三角形(图 1c), 即为茎的小面元。

地面面元的划分方法为: 将实测域范围的地面按要求尺度纵、横向划分成小四边形, 再沿对角线划分出三角形(图 1d), 即为地面面元。为了模拟冠层内任意高度上的光分布, 可以在一高度上假设虚拟的水平面, 与地面一样划分其面元, 该高度上的面元代替地面面元进入光模型进行计算。

1.2.2 从实测域拓展产生虚拟冠层 实测域只包括了水平方向有限的冠层信息。为了实现实际冠层的光分布模拟, 途径之一

是扩大实测域范围, 但这样会加大三维坐标测量的田间工作量以及计算机的数据存储和计算量。本研究采取复制实测域、建立虚拟冠层的方法达到近似实际冠层的效果: 假设实测域对冠层具有代表性, 将实测域(包括实测域上所有的植株)进行多次水平方向复制(这里称每一次复制为一个复制域), 并以盖章方式各向排列, 构成以实测域为单元的虚拟冠层(图 2)。复制域不改变实测域内部植株或小面元的相对位置和拓扑关系, 只是将各面元的水平坐标平移到相应的复制域。

1.2.3 模型的建立和算法 逆向考虑太阳光线进入冠层与小面元相交的过程, 在冠层顶部设一投影平面, 假设太阳光线从此平面投放进冠层。将冠层内小面元沿太阳光线方向往该平面投影, 某一个小面元与其投影位置发出的光线相遇; 在与同一条光线相遇的多个小面元中, 距离太阳(投影平面)最近的面元为太阳直接照射的光斑面元, 其它面元则为阴影。利用计算机图形学中的 Z-buffer(投影深度排序)算法^[8], 计算面元投影并记录小面元到投影平面的距离(称为投影深度), 对该距离排序, 然后搜索出距离最小的面元为光斑面元。该方法的核心为小面元的投影和 Z-buffer 计算, 所以简称为投影 Z-buffer 模型。

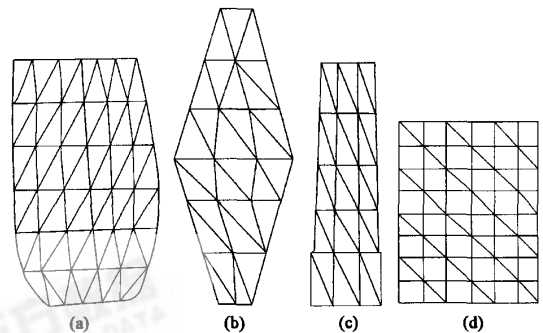


图 1 模型中玉米植株器官表面和地面小面元划分方法示意图

Fig.1 The facet method applied to maize organs and the ground plane in a measured plot in the Projected Z-buffer model

(a) 叶片的一部分 a segment of leaf blade, (b) 雌穗 an ear, (c) 茎 a stem (d) 实测域地面 the ground plane within the measured plot

(1) 定义实测域空间 实测域所处的地面为长方形, 记为 S_{soil} 。整个实测域的空间形状则为以 S_{soil} 为底的长方体, 其高度为冠顶高, 记为 Y_{top} , S_{soil} 所对应的冠顶长方形为 S_{top} (见图 3)。

(2) 定义投影平面 将冠顶平面 S_{top} 设为投影平面, 根据精度要求将其二维(纵向和横向)网格化, 其意义相当于从 S_{top} 上的每个小网格上有一条太阳光线投射进入冠层, 认为太阳光线为平行直线, 方向由太阳位置决定。网格划分得越密, 表示太阳光线投放密度越大, 模型的计算精度就越高。为了便于搜索和管理, 建立投影平面小网格的二维数据结构, 存储小网格的位置、投影到小网格上的小面元的数量、标号和投影深度:

struct XYStruct

{

int N //投影到该网格上的小面元数目

int WhichFacet[MaxPerPixel]; //投影到该网格上的小面元的标号

double Y[MaxPerPixel]; //投影到该网格上的每个小面元的投影深度(相当于 Z-buffer 中的 Z 值)

} XYStr[XNumPixel][ZNumPixel]; //数据结构名称和网格维数

(3) 根据太阳方向计算小面元投影 根据当地的地理经纬度和时间计算太阳高度角和方位角^[10]。对冠层内每个小面元进行沿太阳光线方向到 S_{top} 上的平行投影计算时, 须对小面元 3 个顶点逐一投影, 投影后的 3 个顶点在投影平面上组成一个新的三角形。

设某一小面元的某个顶点坐标为 (x, y, z) , 则其在 S_{top} 平面上的投影坐标为:

$$\begin{cases} pX = x + \frac{(Y_{top} - y) \cdot \cos(\text{SunAzimuth})}{\tan(\text{SunH})} \\ pZ = z + \frac{(Y_{top} - y) \cdot \sin(\text{SunAzimuth})}{\tan(\text{SunH})} \end{cases} \quad (1)$$

式中, pX 、 pZ 为 X 、 Z 方向的坐标值, SunH 为太阳高度角; SunAzimuth 为太阳方位角。太阳方位角以正南为 0° , 向西为正, 向东为负。

(4) 判断各面元投影所处的网格顺序 根据小面元在投影平面上产生的投影三角形的顶点位置, 搜索出其所包容的投影平面网格, 并将其面元序号存放到这些网格的 XYStr 结构中。

进行投影计算时, 需按照实测域复制原则产生虚拟冠层(图 2)。如果按公式(1)计算的某一面元的投影三角形超出了投影平面 S_{top} 的范围, 说明该面元的投影沿太阳光线方向逃逸出实测域, 则将其所包容的投影平面小网格的网格序号用相应方向(X 或 Z)上 S_{top} 划分网格总数整除, 余数即为该面元在 S_{top} 上的投影网格序号, 相当于把投影超出 S_{top} 范围内的相应复制域内的相同面元取代(如图 3 中的 B 替代 A)。有如下公式计算:

$$\begin{cases} dX = \text{mod}((pX - X_{\min}) \cdot D_x, (X_{\max} - X_{\min}) \cdot D_x) \\ dZ = \text{mod}((pZ - Z_{\min}) \cdot D_z, (Z_{\max} - Z_{\min}) \cdot D_z) \end{cases} \quad (2)$$

式中, dX 、 dZ 分别为投影平面的网格序号; D_x 、 D_z 为投影平面划分网格数; $X_{\max}$ 、 $Z_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 、 $Z_{\min}$ 为投影平面上的最大和最小坐标, 相当于实测域顶点的水平坐标。

同时计算各小面元到投影平面的垂直距离 Yd :

$$Yd = Y_{top} - y \quad (3)$$

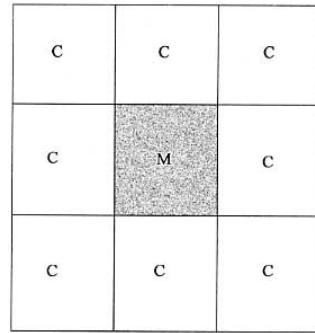


图 2 由 8 个复制域和实测域构成的虚拟冠层平面图 (C 为复制域; M 为实测域)

Fig. 2 A virtual plot composed of 8 copied plots (C) and the measured plot (M)

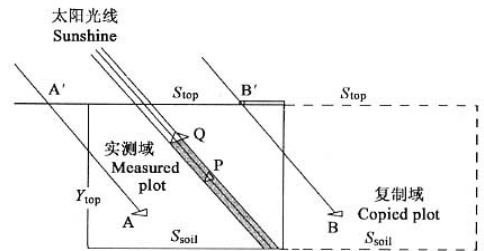


图 3 玉米冠层内太阳直射光分布的投影-Zbuffer 模型示意图

Fig. 3 The parallel rays of sunlight principle used in the Projected-Z-buffer model of 3D direct solar radiation distribution

图中 Q、P 同属于一个投影网格, 但 P 距 S_{top} 较远, 受 Q 遮挡而成为阴影, Q 为光斑; A' 为 A 面元投影, 超出 S_{top} 界限, 所以做平移, A' 平移至 B', 相当于相应复制域上与 A 同位置面元 B 位置处的面元的投影 Facet P and Q belong to the same grid square in S_{top} ; P is shaded because it is below Q; So Q is the sunfleck to receive direct sunlight; Facet A is projected outside of S_{top} and is replaced by virtual facet B of the corresponding position in a copied plot as A in the measured plot

式中, Y_d 为小面元距投影平面的距离; y 为小面元的中心高度; Y_{top} 为投影平面高度, 相当于冠顶高度。

(5) 在投影平面网格上查寻光斑面元 因为都是直线计算, 所以 Y_d 与面元的投影深度一一对应。 Y_d 越小则投影深度也越小, 所以 Y_d 最小的面元距太阳光线的出发点也最近, 在该面元上形成光斑(图 3)。逐个检查投影平面上的小网格, 有 3 种情况: 投影网格上只有 1 个小面元, 则该小网格在此小面元上增加一个光斑网格数; 没有小面元投影到该网格, 这种情况不存在, 因为至少被划分成连续无隙小面元的地面或某高度水平面会覆盖投影平面; 投影网格上有 2 个或 2 以上的小面元, 则对于这些小面元的 Y_d 进行从小向大排序, Y_d 最小的面元增加一个光斑网格数, 其它小面元在此小网格处形成阴影。

每个小面元的光斑情况由其光斑网格数与其投影小三角形覆盖的总网格数的比决定, 称为光斑强度。光斑强度越大, 说明面元的光斑网格比例越大, 完全处于光斑下面元的光斑强度为 1, 完全处于阴影下面的元的光斑强度为 0。至此, 可以判断出作物冠层内每个小面元是光斑还是阴影, 连同小面元的空间属性, 可以得到冠层内光斑和阴影的分布。

(6) 辐射强度的方向订正 某一个表面的直射辐射强度还与该表面的方向有关, 所以为了得到每个面元上的直射辐射强度, 须进行方向订正:

$$Q_{dir} = FD_r \cdot Q_0 \cdot \cos\theta \quad (4)$$

式中, Q_{dir} 为某面元上的直射光强度; FD_r 为该面元的光斑强度; θ 为面元法线与太阳光线方向的夹角; Q_0 为与太阳光线垂直的平面上的直射光强度。

2 结果与讨论

2.1 模拟结果

投影 Z-buffer 模型可以计算出任意时间(太阳位置)整个实测域上太阳直射光的空间分布, 包括所有植株器官及地表面上(或任意高度平面上)的光斑与阴影分布, 有文件输出和图像输出两种形式。文件输出包括所有小面元的光斑、阴影属性及其三维空间位置和归属信息, 如面元顶点坐标、所属植株号、器官类别等。可视化输出模块读取结果文件中的面元属性信息, 用不同颜色表示面元的直射光斑和阴影, 将模拟结果显示到三维图像窗口, 实现三维可视化, 可以制作各种可视化图, 如任意植株或器官、任意高度平面或空间位置、任意视角的光斑分布图。如彩版 I、彩版 II 及图 4 所示的实测域内共 12 株玉米, 小面元划分尺度为 2 cm, 从图中可以直观、方便地观察不同时间、不同高度上的光斑分布情况。

2.2 PAR 直接辐射在玉米冠层内的垂直变化分析

在冠层内设定一系列不同高度的水平面, 可以模拟、分析这些平面上的光斑量, 得到与传统方法类似的光斑垂直分布规律, 并通过与各高度上实测结果的对比进行模拟效果检验。如图 4 中不同高度上光斑率(某一高度平面上光斑点数与总统计点数的比值, 反映光斑面积的多少)分析, 可以看出模拟结果与实测结果一致: 冠层中下部光斑率很低, 且随高度增加缓慢, 尤其是常规密度处理的玉米冠层中下部光斑率更明显偏低, 直到冠层顶部才迅速升高。稀植玉米冠层中下部光斑率比常规密度明显偏高。

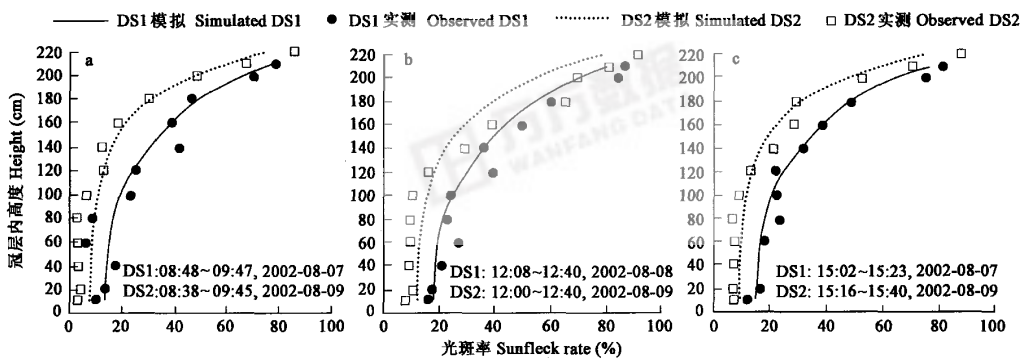


图 4 不同时间稀植(DS1)与常规密度(DS2)玉米冠层内各高度平面上光斑率的变化(各高度上模拟与实测时间相同)

Fig. 4 The sunfleck rate at different heights in a lower density(DS1) and a regular density(DS2) canopy at different times. The time for simulation is the same as for measurement at every height

2.3 光斑模拟误差分析

从图 4 可看出, 模拟光斑率在冠层内较低层次一般稍高于实测值, 而冠层上部却低于实测值。与此一致, 从模拟光斑率与实测光斑率的关系中可以看出(图 5), 在光斑率较低时, 模拟光斑率稍高于实测值, 样本点多分布在 1:1 直线的上侧。而在光斑率较高时则相反。虽然与 1:1 直线稍有偏差, 但模拟值与实测值之间存在非常好的正相关关系。

上述模拟与实测结果中采样点的空间密度不同, PAR 实测范围内的 $4\ 800\text{ cm}^2$ ($60\text{ cm} \times 80\text{ cm}$) 平面上, 实测样点间隔为 15 cm^2 ($15\text{ cm} \times 1\text{ cm}$), 共 320 个采样点; 而模拟样点的间隔约为 2 cm^2 ($2\text{ cm} \times 2\text{ cm}/2$, 小面元分割边长为 2 cm), 共约 2 400 个小面元。因为冠层下部的光斑较小, 而冠层上部的阴影较小, 所以分辨率低的实测采样容易在冠层底部漏掉面积较小的光斑、而在冠层上部漏掉面积较小的阴影, 从而产生图 4 和图 5 中模拟值与实测结果的偏离。

用复制域方法产生的虚拟冠层与实际冠层之间存在一定的差异, 当太阳光线穿过的路径超出实测域范围时, 这种差异易导致光线截获位置的计算结果的误差。

另外就是测定误差, 如冠层内 PAR 测定和三维坐标测定过程中(共 7d), 仪器操作(如 AccuPAR 探棒的反复升降)造成的对玉米群体的扰动或个别叶片损坏, 以及仪器操作本身的(如 AccuPAR 放置位置)误差等, 都有可能影响实测与模拟结果的对比检验效果。

3 结语

本研究中作物冠层内太阳直接辐射的三维模拟模型基于光的直线传播原理, 其过程和输入输出均为确定性的。在模型的普适性方面, 只要有了某一种植物的三维冠层结构数据, 就可以进行植株器官的表面元划分, 然后利用该模型进行直射光空间分布的三维模拟。

基于三维结构的冠层内光分布模型对三维测定技术和三维结构描述模型具有很强的依赖性。尤其是目前作物冠层内光的三维精确测定技术比较欠缺, 模型的验证受到一定的限制。但这种模型以确定性物理原理和数学计算为基础, 具有较强的可靠性, 其三维的模拟结果恰恰可以弥补三维测定方面的不足, 作为植物冠层内光的三维空间变化规律研究的有效手段。

这种冠层内太阳直射辐射的三维模拟模型可以为各种植物冠层内光斑分布规律的分析提供准确依据, 为作物生产的植株形态及群体结构的优化设计提供定量的数据支持。还可以与散射辐射的精确模拟相结合, 为作物冠层内总辐射分布的模型建立和实施提供基础参数, 在作物生长的机理模拟、精确农业、场景设计等研究和实践中发挥重要作用^[7,11]。

References:

- [1] Ross J, Möttus M. Statistical treatment of sunfleck length inside willow coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **104**:215~231.
- [2] Ross J, Sulev M, Saarelaid P. Statistical treatment of the PAR variability and its application to willow coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **91**:1~21.
- [3] Ross J. *The Radiation regime & architecture of plant stands*. Dr. W Junk Publishers, The Hague, The Netherlands, 1981.
- [4] Guo Y, Li B G. New advances in virtual plant research. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46** (11): 888~894.
- [5] de Reffye Ph, Houllier F. Modelling plant growth and architecture: some recent advances and applications to agronomy and forestry. *Current Science*, 1997, **73** (11): 984~992.
- [6] Chelle M, Andrieu B. The nested radiosity model for the distribution of light within plant canopies. *Ecological Modelling*, 1998, **111**: 75~91.
- [7] Chelle M, Andrieu B. Radiative models for architectural modeling. *Agronomie*, 1999, **19**: 225~240.
- [8] Hearn D, Pauline M B. *Computer Graphics-C Version*, Tsinghua University Press-Prentice Hall, 1998. 438~446, 472~475.
- [9] Wang X P, Li B G, Guo Y, et al. Measurement and analysis of the 3D spatial distribution of photosynthetic active radiation in maize canopy. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, **30** (6): 568~576.
- [10] Zuo D K, Zhou Y H, Xiang Y Q. *Studies on Radiation in the Epigeosphere*. Beijing: Science Press, 1991. 314~427.
- [11] Maddonni G A, Chelle M, Drouet J L, et al. Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: simulations and crop measurements. *Field Crop Research*, 2001, **70**:1~13.

参考文献:

- [4] 郭焱, 李保国. 虚拟植物的研究进展. 科学通报, 2001, **46**(4):273~280.
- [9] 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. 作物学报, 2004, **30**(6):568~576.
- [10] 左大康, 周允华, 项月琴, 等著. 地球表面辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991. 314~427.

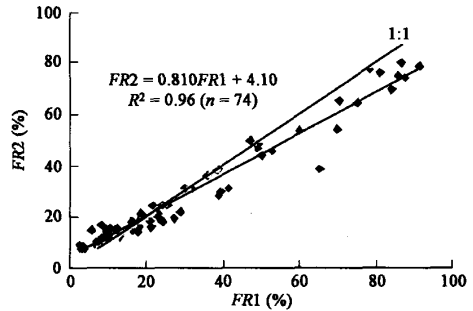
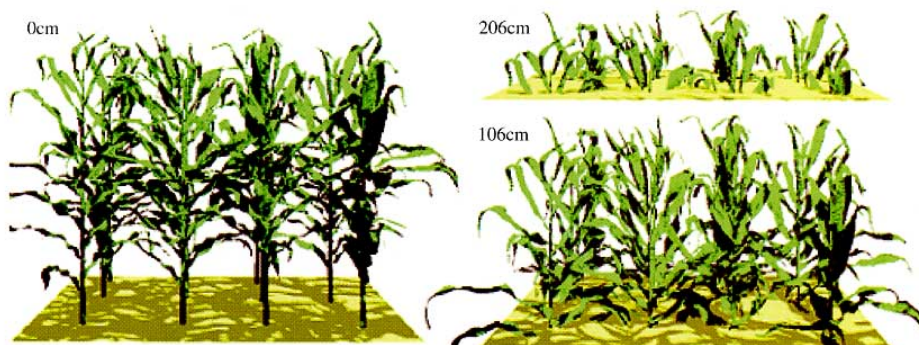


图 5 实测光斑率($FR1$)与模拟光斑率($FR2$)的关系

Fig. 5 The relationship between measured ($FR1$) and simulated sunfleck rate ($FR2$)

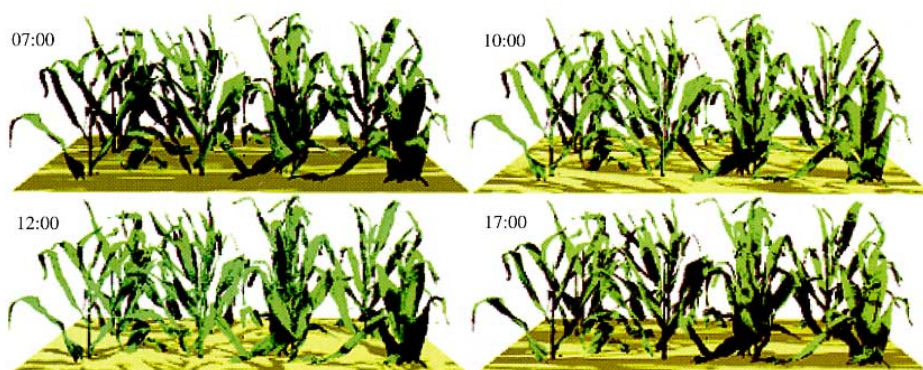
王锡平，等：玉米冠层内太阳直接辐射三维空间分布模拟

WANG Xi-Ping,*et al* : Modelling the three dimensional distribution of direct solar radiation in maize canopy



图版 I 2002 年 8 月 8 日正午时太阳直射光斑在稀植玉米冠层内地面及 106cm、206cm 高度水平面和叶片上分布的模拟结果显示；叶片上黑色区域为阴影

Plate I 3D visualization of simulated sunfleck distribution on the ground and at 106 cm and 206 cm high planes in a lower density maize canopy at noon, Aug. 8, 2002; Black areas on leaves are shadows



图版 II 2002 年 8 月 8 日不同时间太阳直射光斑在稀植玉米冠层内 150 cm 高度水平面及以上叶片上分布的模拟结果显示；叶片上黑色为阴影

Plate II 3D visualization of simulated sunfleck distributions above the 150 cm high plane in a lower density maize canopy at different times of day on Aug. 8, 2002; Black areas on leaves are shadows