

水稻群丛结构和辐射传输分析*

申广荣# 王人潮 李云梅 王秀珍 沈掌泉

(浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江杭州 310029)

提 要 为以遥感信息更精确地反演水稻冠层更丰富的结构参数, 建立水稻多组分双向反射模型, 本文计算并详细分析了水稻群丛结构特征和太阳辐射在水稻群丛内的辐射传输特性。研究表明: 其叶倾角分布可用双参数椭圆函数模拟, 影响太阳辐射在水稻群丛内传输的重要特征量: 水稻各组分的投影函数和消光系数通过叶倾角分布函数计算是可行的; 太阳直接辐射在水稻群丛的透过率可用负二项函数来描述, 从而为更进一步的研究水稻的双向反射特性奠定了基础。

关键词 水稻群丛结构; 投影函数; 叶角分布函数; 消光系数

Study on Rice Cluster Architecture and Radiation Transfer

SHEN Guang-Rong WANG Ren-Chao LI Yun-Mei WANG Xiu-Zhen
SHEN Zhang-Quan

(Inst. of Agric. Remote Sensing & Infom. Appli, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract In order to inverse accurately more rice canopy structure parameters with remote sensing information and construct rice multi-component bi-directional reflectance model, the characteristic of rice cluster structure and the feature of solar radiation transfer in rice cluster are calculated and analysed in detail based on measured data. The results show the mean projection function G on the plane perpendicular to photo exit direction (r) and extinction coefficient for radiation at direction r in the cluster can be calculated by the angular distribution function $g(\theta)$, which can be modeled by the two-parameters elliptical distribution function; the transmission for direct solar radiation in rice cluster could be modeled using negative binomial function. These lay down a foundation for further developing the rice multi-component bi-directional reflectance model.

Key words Rice cluster architecture; Projection function; Leaf angular; Orientation distribution function; Extinction coefficient

水稻是我国的主要粮食作物之一, 其光谱反射特性是区别不同品种水稻及水稻和其它农作物, 掌握水稻的生长发育过程, 进行产量预报和成熟期预报的重要依据。而水稻的反射光谱与其群丛几何结构及群丛中的太阳辐射传输密切相关, 特别是在多角度遥感研究, 建立水

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49771056)

联系人, E-mail: Shenguang_gong@163.net

** 作者简介: 申广荣(1965-), 女, 山西太谷人, 副教授, 博士研究生, 主要从事农业资源与信息技术及遥感光谱特性的研究。

收稿日期: 2000-09-25, 接受日期: 2001-09-25

Received on: 2000-09-25, Accepted on: 2001-09-25

稻双向反射模型即:考虑太阳光入射角度和观测角度的影响因素时,水稻的反射光谱不仅随着两种角度的变化而变化,而且随着群丛(冠层)结构要素变化而变化。从逆过程分析,通过这种变化可以获得更丰富的冠层结构信息。因而,水稻群丛结构和辐射传输分析是水稻双向反射研究的重要基础,对于进行农业遥感也是十分重要的。

本文根据1999和2000年8~11月在浙江杭州浙江大学华家池校区实验农场对晚稻的实测资料,计算并详细分析了水稻主要发育阶段不同倾角下相对叶面积分布函数的分布特点、水稻群丛的单位叶层面积在与太阳光线垂直平面内的平均投影和消光系数随太阳天顶角的变化以及群丛内太阳直接辐射透过率随叶层的变化。为进一步建立多组分水稻双向反射模型提供了基础。

1 材料和方法

本文的试验数据由1999年和2000年的大田晚稻试验获得。试验地点为浙江大学试验场,试验地为一 $4\text{m} \times 5\text{m}$ 的小区,行株距为 $0.14\text{m} \times 0.17\text{m}$ 。测量时间为分蘖期(1999年8月19日,2000年8月7日)、二次枝梗分化期(1999年,2000年8月28日)、孕穗期(1999年9月3日)、乳熟期(2000年10月9日)、成熟期(1999年10月18日)。供试品种为秀水63(由浙大试验场提供)。试验测量了水稻冠层的叶倾角、叶长、叶宽、冠层高度及叶面积指数。叶倾角、叶长、叶宽、冠层高度的测量在田间进行,测量在小区中任选20个茎,用量角器悬挂一小锤量取叶脉与茎干的夹角 α ,叶倾角为 $\theta = 90^\circ - \alpha$ 。对弯曲度大的叶片,分成2~3个部分进行测量,方法详见参考文献^[1]。由于该水稻品种株型挺立,叶片几乎没有披垂,因此,在测量叶倾角时,只测量出叶处叶脉与茎秆的夹角。叶长及叶宽用直尺量取,叶宽为叶的最宽处的宽度值。同时量取每个茎的高度。叶面积指数用叶片干重与叶面积的比例关系测定。叶面积=叶长 \times 叶宽 $\times 0.83$,系数0.83是任选的50片叶的实际测量的叶面积与叶长 \times 叶宽的比值。另外通过将叶片形状扫描输入计算机,借助于地理信息系统工具求得图斑面积得到叶面积,结合小区面积计算叶面积指数。两种方法相互验证以提高叶面积指数的计算精度。最后,以叶面积为权重,得到以每 $10^\circ(5^\circ)$ 为一间隔的各倾角下叶片面积的频率分布。

2 结果与分析

2.1 群丛几何结构特征分析

群丛结构是指叶层元素或植物元素的密度,它们的空间取向(倾角和方位角)和在群丛内的散布状态^[2]。实际的群丛结构是很复杂的。通常在辐射传输理论中假定叶层元素在水平方向上的分布是均匀的,即群丛的几何结构和辐射特征在同一水平层次上是不变的,仅随高度而变化。叶面积指数,叶面积随高度的分布,叶倾角及叶片面积随方位的分布是描述群丛结构的常用参量。

2.1.1 叶层倾角的变化特征

在点P处叶片倾角和方位角的分布用 $g(p, \theta, \varphi)$ 表示; g 为叶面积法线在 (θ, φ) 方向上单位立体角内的份数, θ 为叶倾角,即叶片法线与垂直方向间的夹角, φ 为方位角,由北算起,顺时针方向为正。如果叶片在各方位上的分布是均匀的,且 $g(p, \theta, \varphi)$ 也不随高度变化,则

$$g(p, \theta, \varphi) = g(\theta)$$

根据1999~2000年实测资料计算了水稻主要发育阶段不同倾角下相对叶面积分布函数 $g(\theta)$ 并绘制成图,图1是1999年实测数据计算结果。水稻的叶片比较直立,由计算及图1可

知, 在分蘖期, 叶片的 $g(\theta)$ 的峰值区位于倾角 θ 为 $75^\circ \sim 80^\circ$ 的间隔内, 这是因为群丛上部是不断分蘖出来的比较直立的新叶。在孕穗期, 叶片的 $g(\theta)$ 的峰值区范围逐渐变宽, 在 $75^\circ \sim 90^\circ$ 之间。在成熟期, 群丛中下部叶片开始逐渐由下向上变黄, 枯死, 仅剩中上部分的叶片, 且这部分叶片也变得平缓或弯曲, 因此, $g(\theta)$ 峰值区仅在 $70^\circ \sim 75^\circ$ 间隔内。总之, 无论在哪个发育阶段, 叶片的 $g(\theta)$ 函数峰值区均位于 $\theta = 70^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

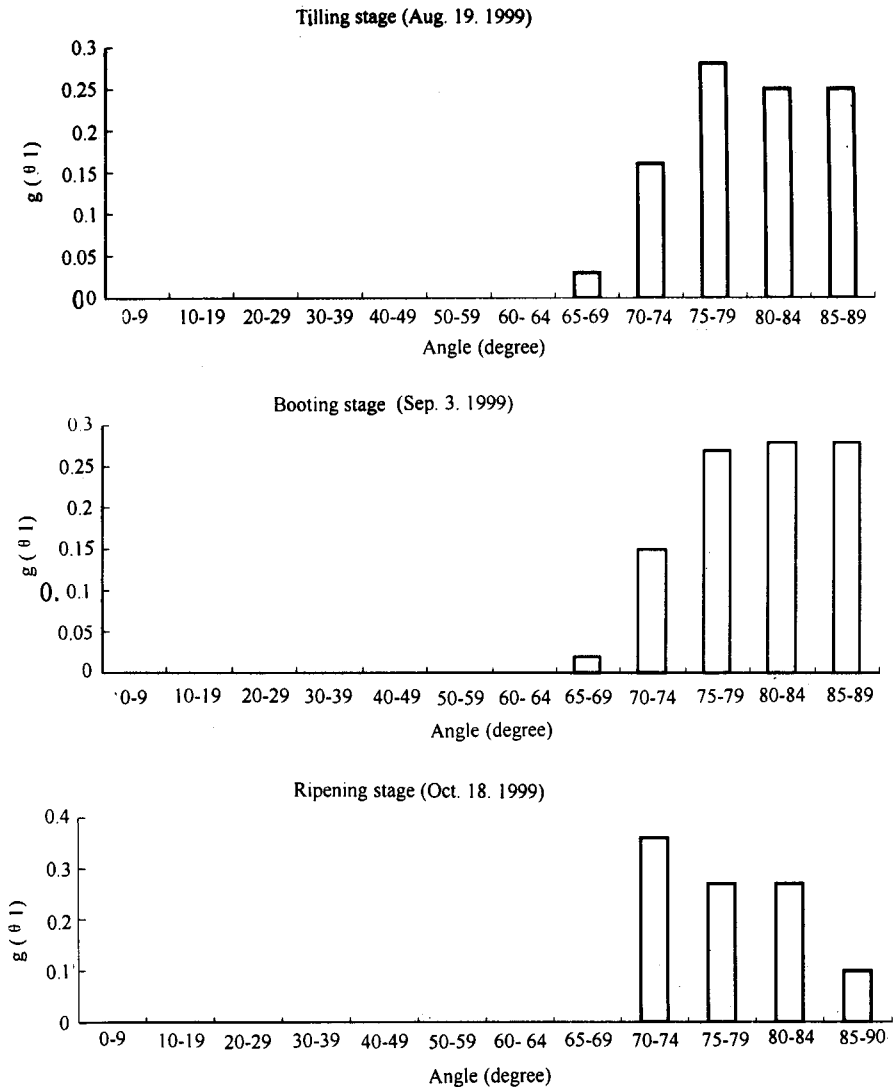


图1 水稻主要发育阶段不同倾角下叶倾角分布函数 $g(\theta)$

Fig. 1 The leaf angle s distribution $g(\theta)$ of rice canopy in its main growing stage

2.1.2 叶倾角分布的模拟 不同倾角下叶面积频率分布的模拟是水稻群丛辐射传输和多角度遥感研究中必不可少的内容。叶倾角的分布, 一般的分为五类 (deWit, 1965) 或六类 (Goel 和 Strebel, 1984)^[3]。无论按哪种分类, 水稻都属喜直型, 也大体符合其分布函数的分布。但根据 Goel 和 Strebel, 喜直型作物的平均叶面倾角是 63.24° , 与水稻还有一些差别。用双参数椭圆分布函数 (附录) 模拟水稻冠层叶倾角分布, 可更完全地反映水稻的叶倾角分布规

律。图2是双参数椭圆分布函数模拟水稻冠层叶倾角分布与实测值的比较。

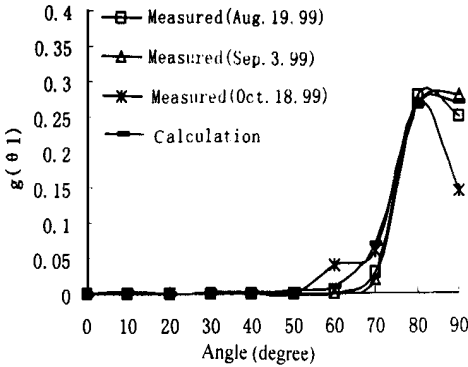


图2 双参数椭圆分布函数模拟水稻冠层叶倾角分布与实测值比较

Fig. 2 Measured and calculated leaf angle s inclination distribution of rice canopy

稻叶是稻的主要光合器官，是各部器官形成，生长，发育的有机养分供给者，是产量形成的重要物质基础。稻叶的出生，消亡伴随着各部器官的相继生长而进行，不同时期生长的叶片对稻体各部器官生长发育的营养供给，具有明显的“职能分工”，不同生育阶段生长的叶片在形态特征上具有明显的区别^[4]。同时，叶片作为水稻中辐射的主要散射体，通常具有有限尺度，加之其倾角，能产生阴影及相关遮蔽，使得沿入射和观测方向冠层的间隙率在统计上互相相关。这种相关性就导致所谓的“热点”效应的出现，即当观测方向与入射光方向完全重合时，目标物的阴影将从仪器的观测视场中完全消失，所测的反射辐射达到最大。由于“热点”效应明显地改变了植被反

射光谱的角度分布特征，它的精确模拟已成为提高水稻双向反射模型精度的关键所在^[5, 6]。因此，叶片的形态特征(形状，长，宽，单茎总叶数等)特别是叶角分布，作为水稻群丛结构的主要参量是研究光在水稻群丛中的辐射传输的主要指标，对 $g(\theta)$ 的分析计算及模拟也是进行水稻多组分双向反射研究的重要内容。

2.2 太阳辐射在水稻群丛内的传输 由于稻田是一个群体，太阳光照下来，有些照到稻株上，有些漏到田面上，有直射的，也有漫射的。太阳辐射在群丛内的传输特征主要取决于叶片和叶层元素的数量，他们的大小，空间取向以及在群丛内的散布状态，即取决于群丛的结构特征，详细描述群丛的结构特征是复杂的。而对群丛结构特征的一个公认的简化是假设群丛内叶层元素在水平方向上的分布是均匀的即群丛结构和辐射特征在同一水平层次中不变，仅随高度而变化。群丛单位叶层面积在与太阳光线垂直平面内的平均投影和消光系数是研究太阳辐射在群丛内减弱的重要特征量，也是在水稻多组分双向反射模型中计算水稻各组分任意空间取向的冠层重叠函数，从而准确地模拟不同取向的多组分冠层“热点”效应的必不可少的参量，因为在植被“热点”效应的模型中，仅考虑植被组分的尺度和形状还是不够的，植被组分的空间取向对冠层“热点”效应的强度及其分布均有显著影响。

2.2.1 平均投影函数 假设群丛内叶片在水平方向为连续均匀分布，叶片不透明，无反射和透射，而且叶片的中心在垂直于光线的平面内随机分布。在研究太阳光从方向 (θ, ϕ_1) 照射到植物群丛内在点P附近可能遇到的植物元素的次数，即接触频率时，首先要考虑单位叶面积在与太阳光方向垂直平面内的平均投影，用 $G(p, \theta, \phi_1)$ 表示：

$$G(p, \theta, \phi_1) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos(\vartheta) g(p, \theta, \vartheta) \sin(\theta) d\phi d\theta$$

式中 ϕ 为方向 (θ, ϕ_1) 和 (θ, ϕ) 间的夹角， $g(p, \theta, \vartheta)$ 为叶片法线的概率密度函数。

假定叶片法线的概率密度函数在各方位 ϕ_1 上均匀分布，则有

$$G(p, \theta, \phi_1) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \cos(\vartheta) g(p, \theta, \vartheta) \sin(\theta) d\phi d\theta$$

$$= \int_0^{2\pi} A(\theta, \theta) g(p, \theta) \sin(\theta) d\theta$$

式中 $g(p, \theta) \sin(\theta)$ 为天顶角 θ 下叶片法线的概率密度函数。

对 $g(p, \theta) \sin(\theta)$ 归一化有:

$$\int_0^{\pi/2} g(p, \theta) \sin(\theta) d\theta = 1$$

$A(\theta, \theta)$ 为一已知的三角函数, 其表达式为

当 $\theta + \theta < \pi/2$ 时

$$A(\theta, \theta) = \cos\theta \cos\theta$$

当 $\theta + \theta > \pi/2$ 时

$$A(\theta, \theta) = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \beta_0 \right) \cos\theta + \sin\theta \tan\theta \sin\beta_0 \right] \cos\theta$$

2.2.2 消光系数 消光系数 $K_s(\theta, \theta)$ 用来表征植物群丛对太阳辐射的减弱特征^[2]。 $K_s(\theta, \theta)$ 值受很多因素影响, 如植株密度, 叶片数量, 叶片排列方式, 叶面积大小, 叶厚薄, 叶绿体含量, 叶绿体排列以及叶片表面的光滑程度。它不同于在理想介质中的情况, 即 K 值决定于介质中吸收光物质的浓度和吸光系数, $K_s(\theta, \theta)$ 值还受入射光的方向和成分, 太阳的直射和散射, 各方向和各个角度来的光强度不同, 叶子吸光的反射, 透射等因素影响^[7]。根据太阳辐射传输原理, 实际中它的表达式可表示为

$$K_s(\theta, \theta) = G(\theta, \theta) / \cos\theta$$

其中 θ 为太阳天顶角, θ 为叶倾角。

根据上面公式, 计算了 1999 8 19, 9 03, 9 24, 10 18 以及 2000 8 07, 8 28, 9 18 的 $G(\theta, \theta)$ 值和 $K_s(\theta, \theta)$ 值, 并将其值分别合在一起, 点绘了 $G(\theta, \theta)$ 和 $K_s(\theta, \theta)$ 随太阳天顶角 θ 的变化曲线(图 3)。结果表明, 这些不同时期的 $G(\theta, \theta)$ 和 $K_s(\theta, \theta)$ 值随 θ 的变化均能分别统一在同一变化规律下, 即 $K_s(\theta, \theta)$ 值随 θ 的增加呈非线性递减, 当 θ 变化在 $80^\circ \sim 30^\circ$ 之间(即杭州 9 月上旬上午 7 点左右~ 中午 12 点之间) $G(\theta, \theta)$ 的变化范围为 0.21~ 0.37, $K_s(\theta, \theta)$ 为 0.92~ 0.43。前者比后者的变化范围小, 一天中的变化 $G(\theta, \theta)$ 是早晚低, 上午 10 点至下午 3 点基本保持平稳, 中午 12 点左右略低一些, $K_s(\theta, \theta)$ 值早晚高中午低。另外计算比较了 1999 和 2000 水稻各生育期(1999 8 19, 分蘖期; 8 28, 二次枝梗期; 9 11, 孕穗期; 9 24, 抽穗期; 9 29, 灌浆期; 10 18, 成熟期) G 和 K_s 值的变化(图 4)。总的来看, 整个生长期 G 和 K_s 值呈不同程度的增长趋势, 但到灌浆期后, G 和 K_s 值骤然减小。这是因为 G 和 K_s 除与水稻群体结构密度密切相关外, 还会受株型、叶片角度、茎叶穗数量的影响。在成熟期, 群丛中叶片开始逐渐由下向上变黄, 枯死, 仅剩中上部分的叶片, 且这部分叶片也变得平缓或弯曲, 这样叶倾角变小加上其它等综合因素导致了 G 和 K_s 不同程度的减小。这意味着 G 特别是 K_s , 是作物群体的一个重要特征, 由此方法计算的 $G(\theta, \theta)$ 和 $K_s(\theta, \theta)$ 在研究所允许的精度范围内能基本真实地反映水稻群丛结构的几何特征, 通过叶倾角分布函数计算水稻各组分的投影函数和消光系数是可行的。

2.3 太阳直接辐射透过率 研究太阳直接辐射在植物群丛内的传输有重要的意义, 从能量学的观点看, 群丛中的叶片所获得的太阳辐射主要是直接透入群丛内的太阳直接辐射, 它是叶片进行光合作用的主要能量来源, 也是根据群丛内实测的太阳直接辐射和双向反射, 进

而利用卫星遥感数据反演叶面积指数和叶片的角度分布的基础。

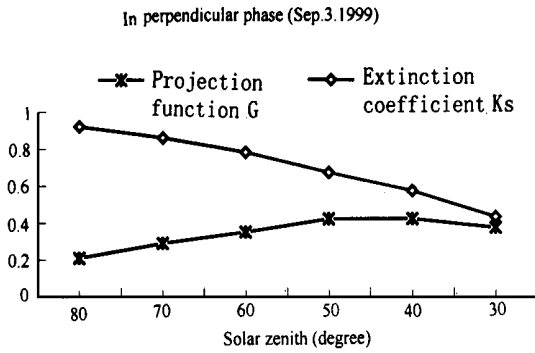


图3 水稻群丛投影函数和消光系数随太阳天顶角的变化

Fig. 3 The mean projection function and extinction coefficient under different solar zenith angle

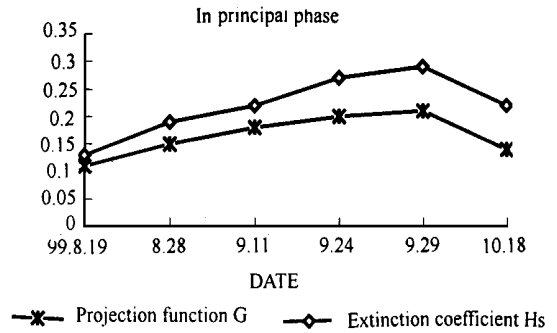


图4 水稻群丛投影函数和消光系数在不同生长期的变化

Fig. 4 The mean projection function and extinction coefficient in different growth stage

作物群体截获直接和间接的太阳光及散射光，上位叶接受直射和散射辐射能，而冠层下的底部接受直接辐射部分比较少，主要接受间接辐射，这是由于辐射透射叶片，在从植株下部的土壤表面反射过来，所以太阳直接辐射透过率主要取决于水稻的群丛结构特征即：叶片或叶层元素的数量，它们的大小、空间取向以及在群丛内的散布状态。

$T_s(\theta) = \exp(-LG(\theta, \theta)/\cos\theta)L$ 为叶面积指数

根据上面对投影函数的计算，即可求得到太阳直接辐射透过率。另外，太阳直接辐射在叶片为丛生分布群丛内的透过率可用负的二项函数描述^[8]即：如果将一个群丛分成N个有限层次 $N = L/\Delta L$ ，L为整层的叶面积指数， ΔL 为每层的叶面积指数，这N层在统计上是相互独立的，则太阳直接辐射在群丛内透过率可用下列二项式表示

$T_s = (1 + K_s \Delta L)^{-L/\Delta L}$ ，其中 K_s 是消光系数。

基于水稻为丛生分布即叶片在群丛内呈成簇分布，用上面两种方法，对1999~2000年两季晚稻的观测结果计算分析表明：水稻群丛内透过率随相对高度的变化具有大致相同的特点。在群丛上层和下层太阳直接透过率小，中层的太阳直接透过率大，这种分布特性显然是由于水稻叶子集中分布在群丛中层缘故，符合作物群体的光强分布规律。两种方法得到的 T_s 的计算值，平均相对误差为3%。因而太阳直接辐射在叶片为丛生分布的水稻(本研究品种及亲缘相近品种)群丛内的透过率可用负二项函数来描述。图5是2000.8.7太阳直接透过率的计算结果。其中太阳高度角从高到低分别对应的是北京时间7~13点。

3 讨论

水稻群丛几何结构与由太阳辐射在水稻群丛内的传输形成的农田辐射场和作物生长、产量形成间的关系极为密切。不同结构的群丛形成不同的农田辐射场和农田小气候环境，反过来对作物生长发育产生不同影响，进而又在一定程度上改变和调节着作物群丛的几何结构。研究基于水稻群丛几何结构和辐射传输模型的多组分双向反射模型的目的就是要以遥感信息

更精确地反演植被冠层更丰富的结构参数。本研究作为基础,以实测资料计算并详细分析了水稻的群丛几何结构和太阳直接辐射透过率随叶层的变化,结果表明:水稻作为在空间上连续分布,水平均匀的植被冠层(农作物),在它的整个发育阶段,其叶角分布函数 $g(\theta)$

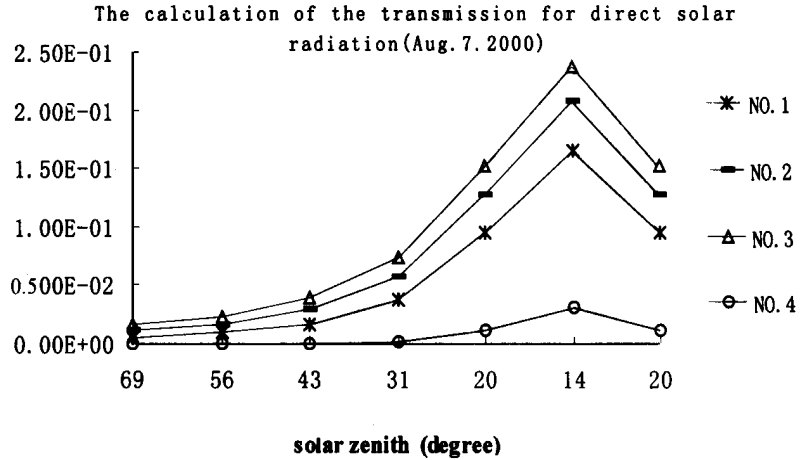


图5 太阳直接辐射透过率随叶层的分布

的峰值区均位于 $70^\circ \sim 90^\circ$ 之间,适合于用双椭圆函数模型模拟(见附录^[21]); 太阳辐射在水稻群丛内传输的重要参量: 投影函数和消光系数均分别具有统一的规律,表明通过 $g(\theta)$ 计算水稻的多组分任意取向的投影函数和消光系数是可行的; 太阳直接辐射在叶片为丛生分布的水稻群丛内的透过率可用负二项函数来描述。这些都为建立水稻多组分双向反射模型奠定了基础。

附录^[21]:

双参数椭圆分布函数为:

$$g_i(\theta) = \beta / \sqrt{1 - \epsilon^2 \cos^2(\theta - \theta_i)}$$

式中 θ 和 ϵ 是椭圆分布的两个参数, θ_i 是模型倾角(即最大数目的叶角), ϵ 是偏心率。

$$\epsilon = \sqrt{1 - a^2/b^2}$$

其中 a 是椭圆分布的纵半轴, b 是横半轴, β 因子由归一化条件确定:

$$\beta = \epsilon / (\cos \theta_i \ln((\cos \eta_+ \sin \gamma) / (\cos \eta_- \sin \gamma)) - \sin \theta_i (\eta_- - \gamma))$$

其中

$$\eta_+ = \sin^{-1}(\epsilon \cos \theta_i), \quad \gamma = \sin^{-1}(\epsilon \sin \theta_i)$$

参 考 文 献

- 1 张仁华 实验遥感模型及地面基础 北京: 科学出版社, 1996 129~ 131
- 2 左大康等 地球表层辐射研究 北京: 科学出版社, 1991. 358~ 370
- 3 李小文, 王锦地 植被光学遥感模型与植被结构参数化 北京: 科学出版社, 1995, 93
- 4 凌启鸿等 稻作新理论——水稻叶龄模式 北京: 科学出版社, 1994 20~ 25
- 5 覃文汉, 项月琴 多组分植被方向反射系数的解析计算模型 中国科学 1996 26(6), 542~ 551
- 6 Q in Wenhan and N S Goel An evaluation of hotspot models for vegetation canopies Remote Sensing Reviews 1995 13: 121~ 159
- 7 王永锐 作物高产群体生理 北京: 科学技术文献出版社, 1991. 12~ 15
- 8 Mototani, I Horizontal Distribution of Light Intensity in Plant Communities Photosynthesis and Utilization of Solar Energy, Level III Experiments, 1966~ 1967. Tokyo, 1968 25~ 28