

夏玉米冠层光合有效辐射垂直分布模型

刘镛源^{1,2}, 黄文江^{1*}, 任华忠², 杨贵军¹, 谢东辉², 王纪华¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 遥感国家重点实验室,
北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 吸收光合有效辐射分量 (FPAR) 是研究植被群体光合作用和光能利用的重要参数, 弄清冠层内 FPAR 的垂直分布规律及其与冠层结构等参数之间的定量关系, 可以为遥感定量反演冠层 FPAR 提供模型基础。该文基于平均冠层的辐射传输过程, 结合冠层结构建立玉米冠层内 FPAR 垂直分布计算模型, 并就模型的参数如植被组分光学特性、株型、太阳高度角以及天空散射光比例等对 FPAR 垂直分布结果的影响进行了分析。利用实测结构参数模拟了玉米冠层内 FPAR, 并与 SUNSCAN 测量值进行了比较, 结果表明模型对封垄后的玉米冠层内 FPAR 垂直分布的模拟精度较高, RMSE 均小于 0.18, 并能较好地计算封垄前冠层内 FPAR 的垂直分布趋势。

关键词: 遥感, 模型, 玉米, PAR, FPAR, 垂直分布

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.021

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-09-0115-07

刘镛源, 黄文江, 任华忠, 等. 夏玉米冠层光合有效辐射垂直分布模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 115-121.

Liu Rongyuan, Huang Wenjiang, Ren Huazhong, et al. Photosynthetically active radiation vertical distribution model in maize canopy[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 115-121. (in Chinese with English abstract)

0 引言

光合有效辐射 (PAR, photosynthetically active radiation) 是植物进行光合作用的能量来源, 它制约着植物体内物质与能量的合成过程, 影响植物的生长、发育、产量和品质。吸收光合有效辐射分量 (FPAR, fraction of absorbed photosynthetically active radiation) 是植被吸收的光合有效辐射占入射光合有效辐射的比例。FPAR 反映了植被冠层对能量的利用率和吸收能力, 是遥感估算地面陆地生态系统的基本生理变量^[1]。弄清冠层内 FPAR 的垂直分布规律及其与冠层结构、入射角度与环境参数等之间的定量关系, 有助于定量解析冠层内能量利用情况, 不仅可为遥感定量反演冠层 FPAR 提供基础模型, 而且在农业生产和农田生态系统研究中也具有重要的指导意义。

国内外在植物冠层内 PAR 分布的研究方面已有很多工作, 主要集中在 2 个方面: 一是从遥感机理出发, 即基于辐射传输模型理论, 从机理上分析光在冠层内的削减规律, 建立了光垂直分布模型^[2-5]。二是从实测数据出发, 利用冠层分析仪、光量子传感器等仪器获取冠层内不同高度处直射辐射、散射辐射的比例, 利用比尔朗伯 (Beer-Lambert) 定律, 建立 PAR 随高度变化的关系^[6-7]。还有学者通过建立三维场景模拟冠层内辐射度或利用光

线追踪技术来计算 PAR, 例如左大康等利用不同模型分别对作物冠层内的 3 种辐射分量 (即直射辐射、天空散射辐射、补充辐射) 进行了精确模拟, 提出了植物冠层三维结构内光分布的简单模拟算法^[8]。王锡平等在左大康算法的基础上, 利用光线投放技术和深度排序法, 建立了模拟太阳直接辐射在玉米冠层内三维空间分布的模型^[9]。该模型优点在于能够用于任意三维结构可测且可进行面元划分的植物群体或个体, 但是由于其忽略了冠层内次级散射, 因此精度还需要进一步验证。谢东辉等利用辐射度模型 (RGM, radiosity-graphics combined model) 模拟玉米真实场景, 通过辐射度计算得到 FPAR 的垂直分布, 并与实测数据进行了比较^[10]。但 RGM 模型中真实场景的建立过程较为复杂, 计算机模拟模型不易于反演。目前大多数对光合有效辐射分布规律的研究仅限于冠层水平, 而且大多数忽略了多次散射, 对考虑多次散射的冠层内部 FPAR 垂直分布规律的研究则相对更少。本文基于平均冠层辐射传输模型, 综合考虑冠层结构特征、植被光学属性和辐射环境等因子以及冠层内组分、土壤间多次散射, 改进了冠层内 FPAR 垂直分布模型, 并初步分析了模型对各因子的敏感性。

1 冠层内 FPAR 垂直分布计算模型

以 Flerchinger 等提出的 SHAW (simultaneous heat and water) 农田小气候模型^[11]的辐射传输过程为基础, 考虑玉米冠层的垂直分布特征, 构建了估算冠层内 FPAR 垂直分布的数值模型, 该模型将植被冠层细分为若干层, 计算每一层的上行、下行直接辐射和多次散射辐射, 并同时考虑了在植被与土壤边界处的散射作用对冠层内辐射的贡献。

收稿日期: 2010-11-22 修订日期: 2011-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071276, 40901173); 农业部行业科技项目 (200903010)

作者简介: 刘镛源 (1986-), 女, 研究方向为定量遥感。北京 国家农业信息化工程技术研究中心, 100097。Email: liurongyuan@126.com.

*通信作者: 黄文江 (1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为农业遥感。北京 国家农业信息化工程技术研究中心, 100097。

Email: huangwj@nercita.org.cn

1.1 冠层内辐射传输过程

冠层内的辐射传输过程按传输方向分上行辐射传输和下行辐射传输。

1.1.1 上行辐射传输模型

冠层内某一层的上行辐射包括其下一层的向上辐射直接透过的部分及下一层向上辐射与本层叶片组分发生反射与透射后方向仍朝上的辐射，还包括向下的直射辐射与散射辐射与叶片组分发生作用后向上的辐射。借鉴 SHAW 模型，由上至下的第 i 层上行辐射可表示为^[11]

$$S_{u,i} = S_{u,i+1} \cdot \tau_{d,i+1} + S_{u,i+1}(1 - \tau_{d,i+1})(\rho_1 f_{d,\uparrow\uparrow} + \tau_1 f_{d,\downarrow\uparrow}) + S_{dd,i-1}(1 - \tau_{d,i})(\rho_1 f_{b,\downarrow\uparrow} + \tau_1 f_{b,\downarrow\downarrow}) + S_{db,i-1}(1 - \tau_{b,i})(\rho_1 f_{b,\downarrow\uparrow} + \tau_1 f_{b,\downarrow\downarrow}) \quad (1)$$

式中， $S_{u,i}$ 和 $S_{u,i+1}$ 分别为第 i ， $i+1$ 层的上行辐射， $S_{db,i}$ 是从冠层顶直接透射到第 i 层的直射辐射， $S_{dd,i-1}$ 为第 $i-1$ 层的向下散射辐射， ρ_1 是叶片的反射率， τ_1 是叶片的透射率， $\tau_{b,i}$ ， $\tau_{d,i}$ 分别是第 i 层的直射光、散射光透过率， $f_{d,\downarrow\downarrow}$ ($f_{d,\uparrow\uparrow}$) 是向下 (向上) 散射辐射经叶片反射后辐射方向向下 (向上) 的比例， $f_{b,\downarrow\downarrow}$ 为向下的直接辐射经叶片散射后辐射方向向下的比例； $f_{d,\downarrow\uparrow}$ ($f_{b,\downarrow\uparrow}$) 代表反射向下散射 (直接) 辐射后方向向上的散射 (直接) 辐射的比例。

1.1.2 下行辐射传输模型

借鉴 SHAW 模型上行辐射的建模思路，本文对冠层下行辐射模型进行了推导。将冠层分为若干层，从上至下第 i 层的下行辐射 $S_{dd,i}$ 由 4 部分组成：1) 第 $i-1$ 层的下行散射辐射直接透射到第 i 层的散射辐射 $S_{dd,i-1}\tau_{d,i}$ ；2) 经上层反射与透射后朝下的第 $i-1$ 层的散射辐射， $S_{dd,i-1} \cdot (1 - \tau_{d,i})(\rho_1 f_{d,\downarrow\downarrow} + \tau_1 f_{d,\downarrow\uparrow})$ ；3) 直射光入射到第 i 层与植被组分发生相互作用，被反射或透射后成为下行的散射辐射， $S_{db,i-1} \cdot (1 - \tau_{b,i})(\rho_1 f_{b,\downarrow\downarrow} + \tau_1 f_{b,\downarrow\uparrow})$ ；4) 下一层向上的散射辐射被截获后，经反射和透射向下的散射辐射，用 $S_{u,i-1} \cdot (1 - \tau_{d,i})(\rho_1 f_{d,\downarrow\uparrow} + \tau_1 f_{d,\uparrow\uparrow})$ 表示。综合以上各项，第 i 层的下行辐射可以写成

$$S_{db,i} = S_{db,i-1} \cdot \tau_{b,i}, S_{db,0} = I_b \quad (2)$$

$$S_{dd,i} = S_{dd,i-1} \cdot \tau_{d,i} + S_{dd,i-1} \cdot (1 - \tau_{d,i})(\rho_1 f_{d,\downarrow\downarrow} + \tau_1 f_{d,\downarrow\uparrow}) + S_{db,i-1} \cdot (1 - \tau_{b,i})(\rho_1 f_{b,\downarrow\downarrow} + \tau_1 f_{b,\downarrow\uparrow}) + S_{u,i-1} \cdot (1 - \tau_{d,i})(\rho_1 f_{d,\downarrow\uparrow} + \tau_1 f_{d,\uparrow\uparrow}) \quad (3)$$

其中， $S_{dd,i}$ 、 $S_{dd,i-1}$ 分别为第 i 、 $i-1$ 的上行辐射。 I_b 为冠层顶入射的直射辐射， $f_{d,\uparrow\downarrow}$ ($f_{b,\uparrow\downarrow}$) 为上行散射 (直接) 辐射被散射后成为向下的散射 (直接) 辐射的比例， $f_{d,\downarrow\uparrow}$ 为向上散射 (直接) 辐射后方向向下的散射辐射的比例。其他参数如前所述。

1.1.3 边界条件

冠层顶及土壤为模型的上下边界层。下行时，用 I_b ， I_d 来分别表示冠层顶入射总辐射中直接与散射辐射， $S_{db,i}$ 、 $S_{dd,i}$ 均表示第 i 层下边界的向下直接与反射辐射。上行时，初始边界为经土壤层反射的能量，本文简单认为其等于透射到土壤的直接辐射和散射辐射，经土壤反射的辐射，表示为 $S_{u,soil} = (I_b \cdot \tau_b + I_d \cdot \tau_d) \cdot \rho_s$ 。其中， ρ_s 为土壤的反射率， τ_b ，

τ_d 分别是整个冠层的直接辐射透过率及散射辐射透过率。

1.1.4 方向散射比例因子计算

Flerchinger 在 Norman 等的研究基础上，对椭圆形分布进行分析，得出了直射光、散射光的各种方向散射比例因子 f_b 、 f_d 与椭圆形叶角分布参数 x (ellipsoidal leaf angle distribution parameter, ELADP) 之间的转换关系，如式 (4)，式 (5) 所示^[12-13]

$$f_{b,\downarrow\uparrow} = f_{b,\uparrow\downarrow} = 1 - f_{b,\downarrow\downarrow} = 1 - f_{b,\uparrow\uparrow} = 0.5 + 0.5(2/\pi \cdot \arctan(x))^D x^{(\sin\beta)E+Fx} \cos\beta \quad (4)$$

$$f_{d,\downarrow\uparrow} = f_{d,\uparrow\downarrow} = 1 - f_{d,\downarrow\downarrow} = 1 - f_{d,\uparrow\uparrow} = 0.5 + 0.5((2/\pi) \cdot \arctan(x))^G \quad (5)$$

式中，D、E、F、G 为常数，对应值分别为 0.585，0.569，1.09，1.585。本文亦采用以上方式和系数计算了各个方向散射比例因子。

1.2 FPAR 垂直分布计算

FPAR 是冠层吸收光合有效辐射 APAR (Absorbed PAR) 占总入射 PAR 的比例，即被冠层所利用的光合有效辐射比率，对于植被可吸收的 400~700 nm 来说，冠层内第 i 层的 FPAR 可以表示为

$$FPAR_i = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=400}^{700} \frac{APAR_{i,\lambda}}{PAR_{\lambda}} = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=400}^{700} \frac{S_{db,i-1,\lambda} - S_{db,i,\lambda} + S_{dd,i-1,\lambda} + S_{u,i+1,\lambda} - S_{u,i,\lambda}}{I_{b,\lambda} + I_{d,\lambda}} \quad (6)$$

式中， λ 为波长，对应范围为 400~700 nm， N 为波长数，即 301。

1.3 模型模拟参数设置

模型的参数包括：

1) 冠层内各高度层的叶面积指数 LAI，可利用实测株型数据获得；

2) 椭圆形叶角分布参数 x ，利用平均叶倾角 ALA (average leaf inclination angle) 可计算得到。二者之间的转换关系可表示为^[14]： $ALA = 9.65(3+x)^{-1.65}$ ；

3) 叶片及土壤的光学属性参数。叶片的反射率与透射率来自于积分球测量，土壤反射率用光谱仪测量得到；

4) 天空光比例因子。

2 数据获取与处理

2.1 田间测量

试验于 2010 年在北京市昌平区小汤山国家农业精准实验基地 (40°11'N, 116°26'E) 进行。供试品种包括 2 个播期 (7 月 6 日种，7 月 23 日种) 的 2 个玉米品种：京科 25 (JK25) 和京单 28 (JD28)。每个品种种植一个小区，共 4 个小区。小区面积约为 30 m×30 m，玉米种植行距 70 cm，株距 30 cm。各小区统一管理，无肥水差异。

试验于 2010-08-29 开展，2 个播期对应玉米 2 个生长期，即第 1 个播期玉米对应生长期为大喇叭口期，表示为 JK25-I 和 JD28-I；第 2 个播期对应生长期为拔节期，表示为 JK25-II 和 JD28-II。试验的测量项目包括：

1) 玉米株型特征：包括株高、叶位、叶基距、面元

倾角、拐点位置、叶面积等，这些数据用于计算叶面积指数的垂直分布及平均叶倾角等。

2) 光合有效辐射：在各小区内选择长势较为均匀的区域，利用 SUNSCAN 冠层分析仪在顺垄和垂直垄方向从冠层顶到底每隔 20 cm 测量一次数据。从早上 9:00 至下午 4:00 每隔一个小时进行测量，每个时刻的所有 4 块小区的测量数据为一组数据集。

3) 天空散射光比例：利用 ASD FieldSpec 2500 光谱仪和参考灰板，将遮阴和非遮阴测量数据的比值作为天空光比例。

2.2 株型分析计算

利用实测株型特征测量数据，参照植株结构参数模拟算法^[15]，可计算得到株型分布特征，结果如表 1 所示。图 1 给出了 2 种玉米在不同生长期的各个高度层叶面积指数分布情况，其中植被高度从冠层底向上开始计算，即 0 cm 表示冠层底。

表 1 夏玉米不同品种不同生长期株型特征
Table 1 Structures for several kinds of maizes in different growth stages

| | JK25-I | JK25-II | JD28-I | JD28-II |
|---------------|--------|---------|--------|---------|
| 生长期 | 大喇叭口期 | 拔节期 | 大喇叭口期 | 拔节期 |
| 冠层高/cm | 190 | 112 | 134 | 106 |
| 平均叶倾角 ALA/° | 46.59 | 47.11 | 44.52 | 54.52 |
| 椭圆形叶角分布参数 x | 1.48 | 1.45 | 1.6 | 1.07 |

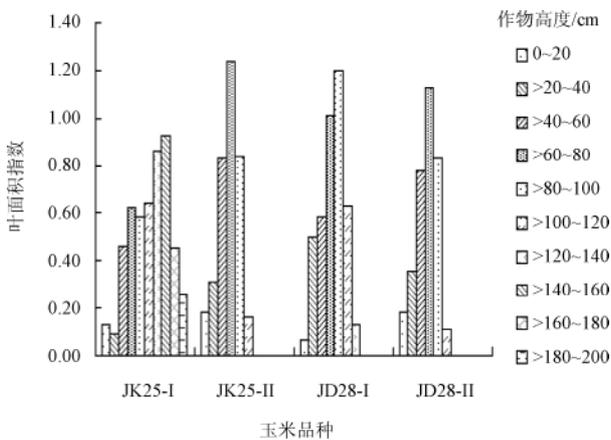


图 1 两个生长期的京科 25 和京科 28 玉米品种的叶面积指数的垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of LAI for JK25 and JD28 in two different growth stages

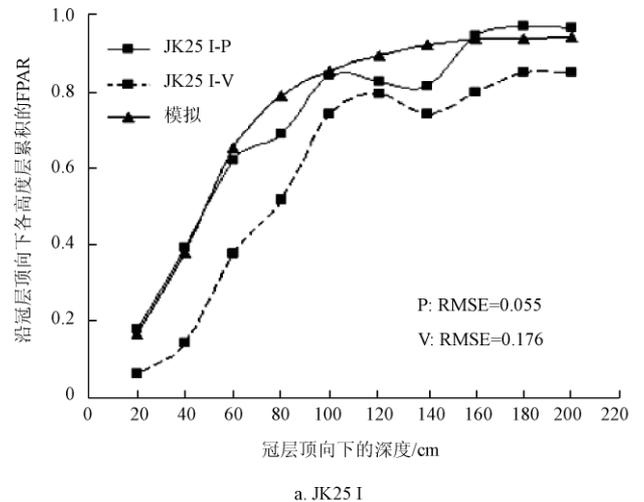
可以看出在拔节期 JD28 品种比 JK25 的平均叶倾角要大，株型更加紧凑，而生长到大喇叭口期时，2 个品种之间的倾角差异缩小，但均可认为它们的株型较为紧凑。这除了跟品种自身的株型生长有关，还可能与行垄间距大小限制叶片伸展等有关。从叶面积指数来看，2 个玉米品种的叶面积指数的垂直分布大致都呈现出中间大两头小的规律。

3 模型验证与敏感性分析

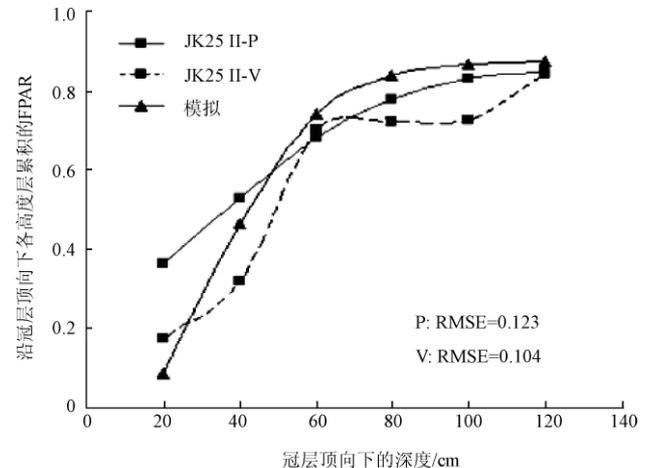
3.1 夏玉米冠层内 FPAR 垂直分布模拟与实测数据的比较
将通过实测株型数据计算得到的各高度层叶面积指

数、冠层椭圆形分布叶角参数 x ，叶片与土壤的光谱特性、天空光比例因子等输入模型，并与 SUNSCAN 实测的 FPAR 进行比较，结果如图 2 所示。

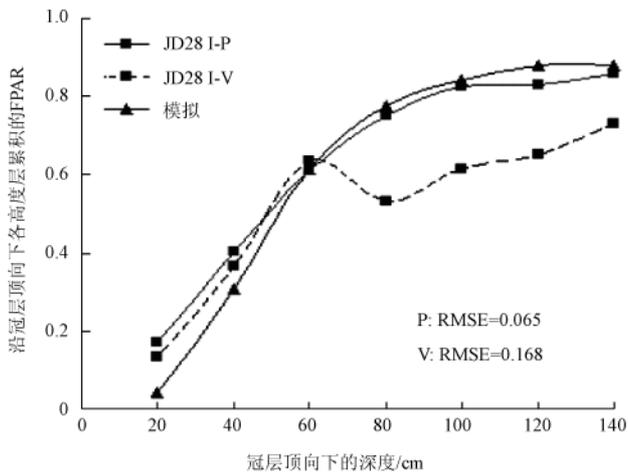
从图 2 中可以看出，模拟结果与实测数据保持了相似的趋势，整体来说与实测值也较为接近。从生长期来看，模型对大喇叭口期的 JD28-I 的 RMSE 为 0.065，对同时期的 JK25-I 的 RMSE 为 0.055，可以发现此时期的模拟结果优于拔节期，并且在平行于垄测量的结果更接近于实测值。这是由于大喇叭口期的玉米冠层已经封垄，且玉米叶片大多数向垄间伸展，这使得平行于垄的冠层比垂直于垄的遮蔽更大，实际情况更接近模型的假设，从而使得模型模拟值与测量值相当。而对于处于拔节期的玉米，模型的模拟结果与实测值偏差较为明显，这是由于处于拔节期的玉米冠层还未完全封垄，从而使得各层的冠层的光线透过率的规律性弱于封垄后的冠层。从图中还可以看出，冠层最上层 (0~20 cm 的深度) 的模型模拟值均偏小，其原因可能在于株型计算所选择的植株在该层的叶面积指数普遍较小，并且与 SUNSCAN 测量时冠层顶层叶面积指数有一定差异。但是，总的来说，本文建立的 FPAR 垂直分布计算模型较好地刻画了封垄后的玉米冠层内 FPAR 垂直分布情况以及封垄前的 FPAR 垂直分布的趋势，能够反映出整个冠层的 PAR 吸收比例。



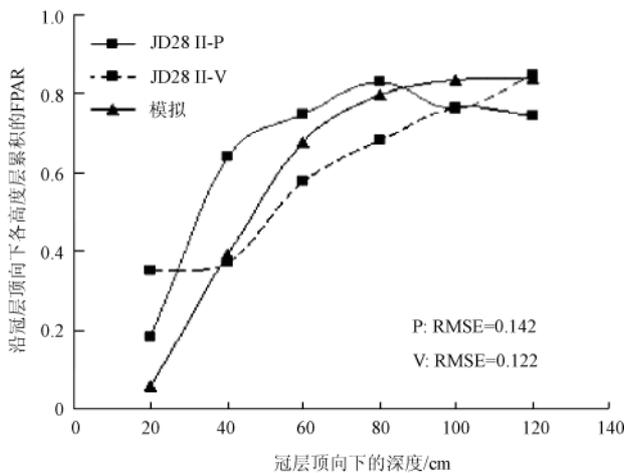
a. JK25 I



b. JK25 II



c. JD28 I



d. JD28 II

注：“XX I-P”表示大喇叭口期的 XX 品种平行于垄的测量结果，“XX II-V”表示拔节期的 XX 品种垂直于垄测量结果。P 表示平行于垄，V 表示垂直于垄。

图2 模型模拟的 FPAR 垂直分布与 SUNSCAN 测量值的比较
Fig.2 Comparison of the FPAR vertical distributions from simulation and SUNSCAN measurement

3.2 FPAR 垂直分布影响因子分析

影响冠层 FPAR 垂直分布的因素有很多。已有学者对 PAR 的垂直分布影响因子进行了研究。祁红彦等利用 Li-6400 光合作用测定仪测定玉米冠层内不同层次的 PAR，得出 PAR 主要被冠层 1/3 高度以上的叶片所截获，且直立的株型更有利于光的穿透与分布^[6]。王培娟等^[16]、杨飞等^[17]研究结果表明 LAI 与 APAR 的相关呈正相关关系。基于前人研究成果，本文分析研究了 FPAR 垂直分布模拟模型对组分光谱特性、LAI、冠层株型特征以及太阳高度角等因子的敏感性。

3.2.1 植被组分光学特性对冠层内 FPAR 垂直分布的影响

将冠层分为 10 层，各高度层叶面积指数均为 0.3，总叶面积指数为 3，并假设冠层叶倾角呈为球面型分布（平均叶倾角约为 56°）。模型采用的植被组分反射率、透射率及土壤的反射率如图 3 所示，其他输入参数固定。图 4 给出了冠层内各层 FPAR 随着波长的变化情况，图

中 L1~L10 表示层数，从冠层顶到底依次计数。

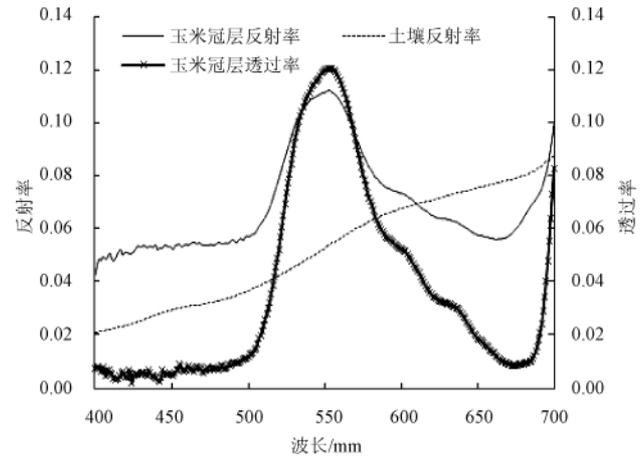


图3 实测植被组分及土壤光学特性

Fig.3 Measured spectral reflectance and transmittance of leaf and soil

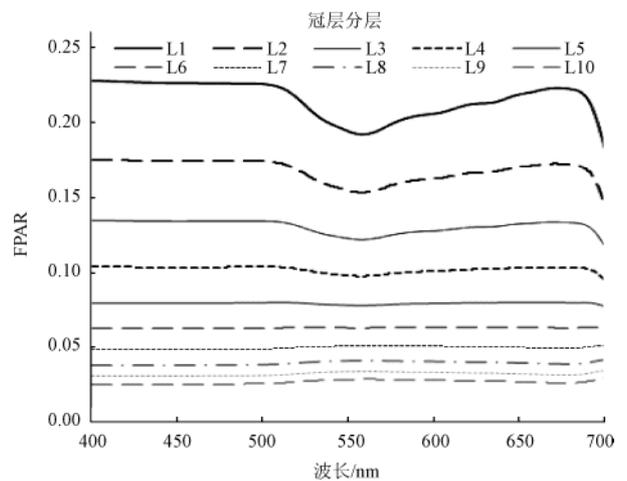


图4 模拟的冠层内各层各波长 FPAR 分布情况

Fig.4 Simulated spectral FPAR in different layers of the canopy

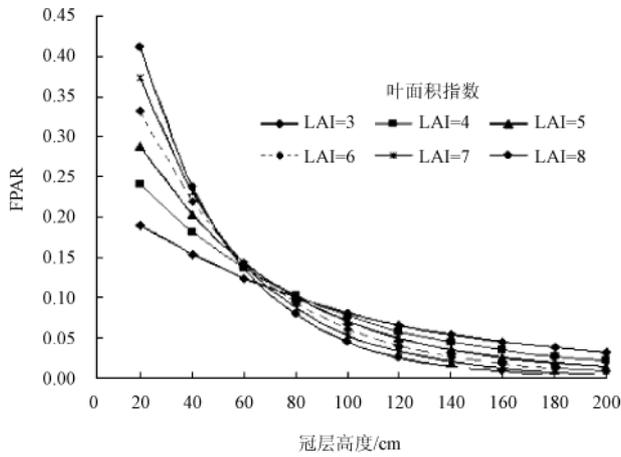
从图 4 可以看出，模拟的各层 FPAR 总体上呈现出从冠层顶向下逐层递减的趋势，且递减的速率随深度的变大而减小。分析各波长的 FPAR 值，可以看出上层的 FPAR 在叶片反射率较高的波段处存在明显的低谷，如 550 和 700 nm 附近。然而，随着冠层深度的增加，FPAR 在这些波长则不具备明显的波谷特征，反而呈现与反射率一致的趋势。这可能是由于冠层上层受直射光的影响大，叶片在反射率较高的波长处反射的能量多，而被吸收的能量比就相对小。而对于下层叶片，虽然在反射率较大的波长处反射的能量多，但受多次散射的影响，反射率越高的波长多次散射的能力也越强，增加了叶片对能量的吸收几率，最终使得下层的高反射率波长处的 FPAR 与其他吸收波长处的数值接近。此外，土壤反射对下层能量的补充也是一个重要因素。

3.2.2 LAI 对冠层内 FPAR 垂直分布的影响

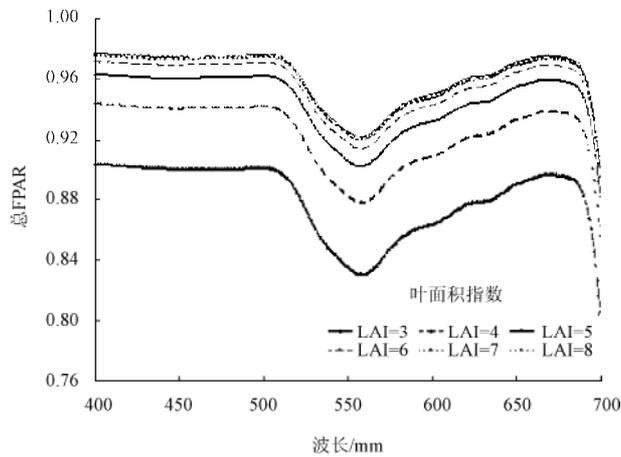
假设冠层叶面积指数分别从 3、4、5、6、7 变化到 8，且冠层内叶面积指数均匀分布，各层叶面积指数相等。设置太阳高度角为 60°，平均叶倾角为 50°，其他参数保

持一致。计算得到 LAI 变化时冠层内总 FPAR 及累积 FPAR 与 LAI 的关系。图 5 给出了冠层内各层 FPAR 随着冠层 LAI 的变化情况，图 6 给出了 400~700 nm 各波长处冠层总的 FPAR 随着冠层 LAI 的变化情况。

片越紧凑，平均叶倾角越小，表明叶片越披散。将冠层按高度平均分为 10 层，假设叶面积体积密度不随高度变化，模拟不同平均叶倾角条件下，冠层内 FPAR 的垂直分布和随波长的变化，如图 6 所示。



a. 不同LAI下，各层FPAR的垂直变化规律



b. 不同LAI下，冠层总的FPAR随波长的变化

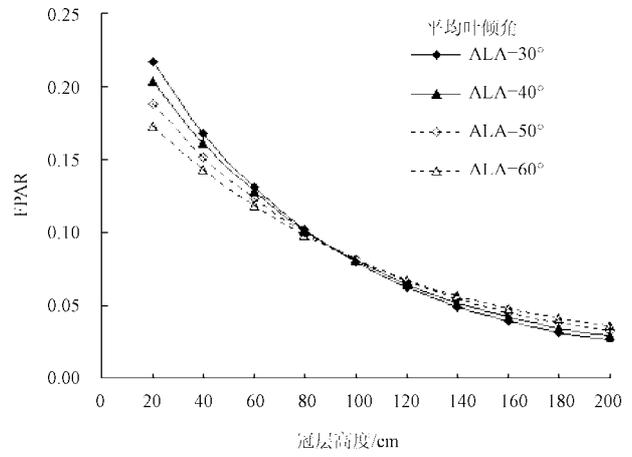
图 5 FPAR 随冠层 LAI 变化情况

Fig.5 Relationship between FPAR and LAI

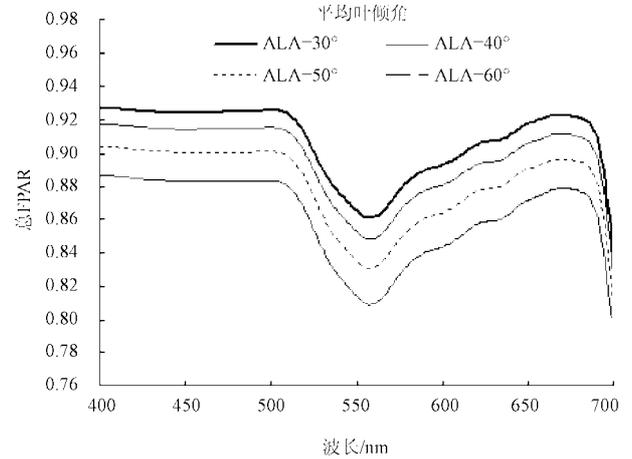
在图 5 a 中，玉米冠层内各层 FPAR 随着深度的增加均呈现指数型递减，与比尔朗伯（Beer-Lambert）定律的趋势一致，且递减的速率随着 LAI 的增大而增大。在冠层上部，LAI 越大的导致 FPAR 越大，而在冠层中下部，LAI 越大却导致 FPAR 越小。这是由于冠层的上方受直射光影响大，LAI 越大吸收直射辐射越多，FPAR 越大。而在冠层中下部，上层 LAI 越大的透到到下层直射光越小，使得 LAI 相对更小的反而能吸收到更多的辐射。图 5b 显示出随着 LAI 的增大会导致冠层对入射能量总的吸收比率增大，但是增大的趋势随着 LAI 的变大而逐渐减小。在 LAI 接近 7 时，冠层总的 FPAR 基本达到饱和，与周彬、陈良富等研究结果一致^[18]。

3. 2. 3 不同株型玉米对冠层内 FPAR 垂直分布的影响

在本文的 FPAR 模拟模型中，不同株型玉米对应着不同的平均叶倾角。平均叶倾角是反映作物群体叶片空间伸展角度的重要度量指标，平均叶倾角越大，表明叶



a. 不同ALA下，各层FPAR的垂直变化



b. 不同ALA下，冠层总的FPAR随波长的变化

图 6 FPAR 随冠层平均叶倾角变化情况

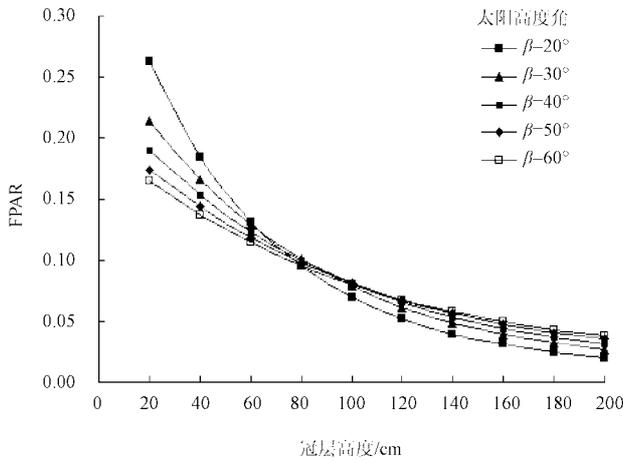
Fig.6 Relationship between FPAR and ALA

从图 6 可以看出，针对不同平均叶倾角的冠层，随着平均叶倾角的增大，整个冠层总 FPAR 呈现降低趋势，即越披散的株型冠层所截获能量的总量越高。不同株型玉米冠层在冠层的上下层 FPAR 呈现不同的规律：在中上部冠层内，平均叶倾角越小的，FPAR 越大；而在冠层的中下部，平均叶倾角越大的，FPAR 越大，即越披散型的株型在冠层上方对入射辐射的吸收比紧凑型的高，在中间层各株型差异不大，而在冠层中下部则是紧凑型株型对入射辐射的利用要高。这可能是由于在同样的叶面积密度下，紧凑型株型能够透过的直射光比例更大，造成冠层上层的吸收比披散型的小，而在冠层下部，主要受散射光的影响，紧凑型株型能够透射到下部的能量更多，经过土壤和叶片的多次散射使其吸收的光能较披散型的大。

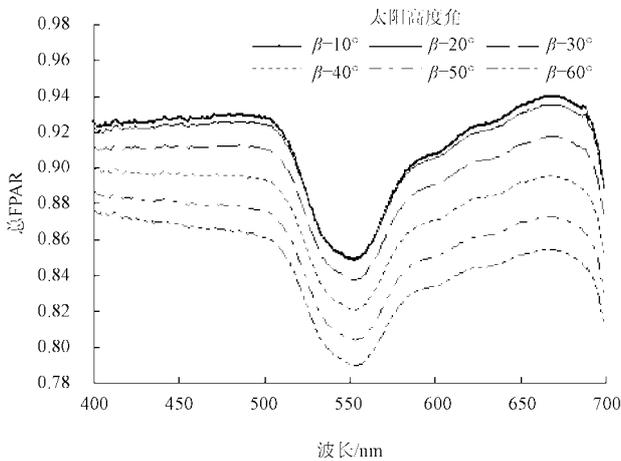
3. 2. 4 太阳高度角对冠层内 FPAR 垂直分布的影响

设置冠层叶片分布为球面型分布，且 LAI 为 3。并将

冠层按高度平均分为 10 层，各层 LAI 均为 0.3。保持其他条件不变，改变太阳高度角，模拟冠层内 FPAR 的变化，结果如图 7 所示。



a. 不同太阳高度角下，各层 FPAR 的垂直变化



b. 不同太阳高度角下，冠层总的 FPAR 随波长的变化

图 7 FPAR 随太阳高度角的变化情况

Fig.7 Relationship between FPAR and solar elevation angle

在图 7a 中，对各层的 FPAR 进行比较，可以看出太阳高度角越小，上层的 FPAR 越高，但沿着冠层往下 FPAR 的衰减也更快，最终太阳高度角越小的冠层下部的 FPAR 反而更高。这是由于冠层上部受直射光影响较大，太阳高度角越小，直射光入射所经过的路径越大，冠层截获的能量越多，而冠层下部受散射光影响更大；太阳高度角越大，冠层下方的散射光比例越高，FPAR 也相对较高。图 7b 可以看出随着太阳高度角增大，各个波长处的 FPAR 逐渐减小，但是这并不意味着冠层在较小的太阳高度角时吸收的总能量较多，这是因为太阳高度角较大时对应达到冠层顶的总辐射较太阳高度角较小时要大，所以植被冠层在大太阳高度角吸收的能量整体上往往高于小太阳高度角下的吸收。

3.2.5 天空光比例因子对冠层内 FPAR 垂直分布的影响

本文的 FPAR 垂直分布模型分别考虑各层对直射光和天空光的透射率，因此天空光比例是影响冠层内 FPAR 垂直分布的又一因素。本文通过设置不同阶梯天空光比

例，模拟在其他条件一致时，天空光比例变化导致的 FPAR 变化情况，分析了 FPAR 对天空光比例变化的敏感程度。

从图 8 可以看出，天空散射光比例越大，冠层 FPAR 越大，吸收比率越大。在天空光总量一定时，天空散射光的比例越大，整个冠层的 FPAR 越大，光能利用率越高。这是由于散射光比例越高，光线入射到冠层经多次散射作用的比例更高，被冠层所吸收的比例也越大。但是，需要强调的是 FPAR 越大，仅表示冠层对所入射到其中的能量吸收比例更大，并不代表冠层的吸收能能量的总量更大，这是因为冠层所吸收的能量取决于直射光和天空散射光的总和。

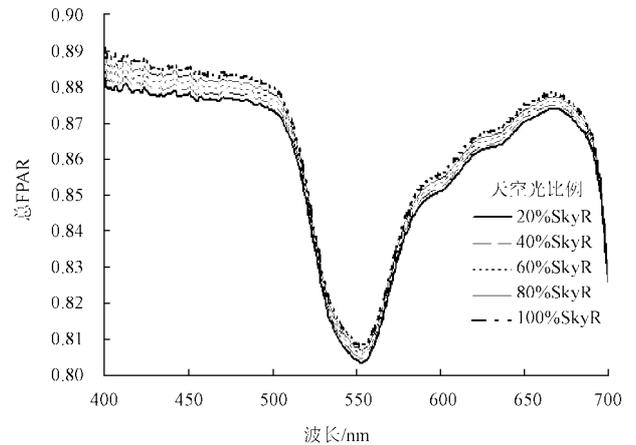


图 8 不同波长处 FPAR 随天空光比例的变化情况

Fig.8 Relationship between FPAR and sky scattering light ratio

4 结论与讨论

本文基于平均冠层内辐射传输过程模型，建立了考虑多次散射在内的 FPAR 垂直分布计算模型，并基于小汤山实测数据对模型进行了初步验证。验证结果表明，模型能很好的模拟出封垄后玉米冠层的 FPAR 垂直分布，对封垄前冠层 FPAR 的模拟存在相对较大的误差，但是仍能够较好地反映出封垄前冠层 FPAR 垂直分布的趋势。通过模拟，还研究了 FPAR 垂直分布模型对植被组分光学特性、LAI、株型、太阳高度角以及天空光比例等参数的敏感性。

然而，本文的 FPAR 垂直分布模型是基于平均冠层假设的计算模型，而模型在类似于玉米的禾本科作物封垄后的冠层 FPAR 计算的适用性有待进一步的研究。针对封垄前的玉米冠层，模型还需进一步研究，考虑玉米冠层行播特性的影响。此外，如何利用 FPAR 计算模型构建 FPAR 的定量反演模型，也是下一步需进行的工作。

致谢：感谢美国西北流域研究中心（Northwest Watershed Research Center）的 Flerchinger 教授在下行辐射模型推导中的指导。

[参考文献]

[1] 陶欣, 范闻捷, 王大成, 等. 植被 FAPAR 的遥感模型与

- 反演研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 741—747.
- Tao Xin, Fan Wenjie, Wang Dacheng, et al. Remote sensing retrieval of FPAR: model and analysis[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 741—747. (in Chinese with English abstract)
- [2] Allen L H. Model of Light Penetration into a Wide-row Crop [J]. *Agronomy Journal*, 1974, 66: 41—47.
- [3] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16: 125—141.
- [4] Gijzen H, Goudriaan J. A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989(48): 1—20.
- [5] Stewart D W, Costa C, Dwyer L M, et al. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize[J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95(6): 1465—1474.
- [6] 祁红彦, 周广胜, 许振柱. 北方玉米冠层光合有效辐射垂直分布及影响因子分析[J]. *气象与环境学报*, 2008, 24(1): 22—26.
- Qi Hongyan, Zhou Guangsheng, Xu Zhenzhu. Vertical distribution characteristics of photosynthetically active radiation in maize canopy and its controlling factors[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(1): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [7] 章家恩, 黄润, 饶卫民, 等. 玉米群体内太阳光辐射垂直分布规律研究[J]. *生态科学*, 2001, 20(4): 8—11.
- Zhang Jiaen, Huang Run, Rao Weimin, et al. Preliminary study on changes and vertical distribution of solar radiation at the different heights of maize canopy[J]. *Ecologic Science*, 2001, 20(4): 8—11. (in Chinese with English abstract)
- [8] 左大康, 周允华, 项月琴. 地球表面辐射研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991, 314—427.
- [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[J]. *作物学报*, 2004, 30(6): 568—576.
- Wang Xiping, Li Baoguo, Guo Yan, et al. Measurement and analysis of the 3D spatial distribution of photosynthetically active radiation in maize canopy[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(6): 568—576. (in Chinese with English abstract)
- [10] Xie Donghui, Wang Peijuan, Liu Rongyuan, et al. Research on PAR and FPAR of crop canopy based on RGM[J]. *IGARSS'2010, Hawaii, USA, 2010, 7: 25—30.*
- [11] Flerchinger G N, Xiao W, Sauer T J, et al. Simulation of within canopy radiation exchange[J]. *NJAS Wageningen Journal of Life Sciences*, 2009, 57(1): 5—15.
- [12] Norman J M, Welles J M. Radiative transfer in an array of canopies[J]. *Agron. J.* 1983, 75(3): 481—488.
- [13] Flerchinger G N, Yu Q. Simplified expressions for radiation scattering in canopies with ellipsoidal leaf angle distributions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2007, 144(3): 230—235.
- [14] Campbell G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies using an ellipsoidal inclination angle distribution[J]. *Agric. For. Meteorol.*, 1986, 36(4): 317—321.
- [15] 王纪华, 赵春江, 黄文江. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [16] 王培娟, 朱启疆, 吴门新, 等. 冬小麦冠层的 FAPAR、LAI、VIs 之间关系的研究[J]. *遥感信息*, 2003(3): 19—22.
- Wang PeiJuan, Zhu QiJiang, Wu Menxin, et al. Research on the relationships among FAPAR, LAI and VIs in the winter wheat canopy[J]. *Remote Sensing Information*, 2003(3): 19—22. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨飞, 张柏, 宋开山, 等. 玉米和大豆光合有效辐射吸收比例与植被指数和叶面积指数的关系[J]. *作物学报*, 2008, 34(11): 2046—2052.
- Yang Fei, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Relationship between fraction of photosynthetically active radiation and vegetation indices, leaf area index of corn and soybean[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(11): 2046—2052. (in Chinese with English abstract)
- [18] 周彬, 陈良富, 舒晓波. FPAR 的 Monte Carlo 模拟研究[J]. *遥感学报*, 2008, 12(3): 385—391.
- Zhou Bin, Chen Liangfu, Shu Xiaobo. The Monte Carlo study on FPAR[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 385—391. (in Chinese with English abstract)

Photosynthetically active radiation vertical distribution model in maize canopy

Liu Rongyuan^{1,2}, Huang Wenjiang^{1*}, Ren Huazhong², Yang Guijun¹, Xie Donghui², Wang Jihua¹

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: FPAR (fraction of absorbed photosynthetically active radiation) is an important parameter for estimating plants net primary productivity of land ecosystem from remotely sensed data, and is also crucial for calculating canopy APAR (absorbed PAR) and estimating canopy Photosynthesis and the utility rate of luminous energy. Based on the theory of radiation transfer model, this paper modified the Simultaneous Heat and Water model to calculate FPAR vertical distribution in maize canopy and analyzed the relationships between FPAR and some parameters like maize canopy structure, solar zenith, soil reflectance, etc. The validation results using field measurements prove the model to be accurate.

Key words: remote sensing, model, maize, PAR, FPAR, vertical distribution