

基于夏玉米冠层内辐射分布的不同层叶面积指数模拟

汪涛^{1,2}, 黄文江^{1*}, 董斌², 刘镛源³, 杨贵军³

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036; 3. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 为了模拟夏玉米冠层内各层叶面积指数垂直分布, 光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 是研究作物群体光合作用和长势的重要特征参数, 阐明冠层内 PAR 的垂直分布规律与冠层结构等参数之间的相关关系, 可为遥感定量反演冠层结构参数提供模型基础。该文基于 PAR 在冠层内的辐射传输规律结合冠层结构模拟不同太阳高度角的 PAR 透过率垂直分布模型, 并用地面冠层分析仪测量值进行验证, 结果表明模型对封垄前玉米抽雄期冠层内 PAR 透过率垂直分布模拟精度较高。通过不同太阳高度角 PAR 透过率的垂直分布模型结合消光系数运用不同算法分别反演层叶面积指数 (leaf area index, LAI), 并与不同高度层 LAI 实测值进行比较。结果显示: Bonhomme& Chartier 算法反演不同高度层 LAI 精度较高, 上层均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.18, 中层 RMSE 为 0.55, 下层 RMSE 为 0.09。不同太阳高度角反演结果存在差异, 30°和 45°高度角均能较好地反演下层 LAI, RMSE 分别为 0.11 与 0.09; 30°高度角反演中层 LAI 精度较高, RMSE 为 0.30; 45°高度角反演上层 LAI 精度较高, RMSE 为 0.18。结果表明基于不同太阳高度角构建的层 LAI 反演模型更适于实现夏玉米不同高度层 LAI 的遥感估算。该研究可为模拟垄行结构冠层内 LAI 垂直分布提供参考。

关键词: 遥感; 农作物; 辐射; 夏玉米; 光合有效辐射透过率; 垂直分布; 层叶面积指数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.z1.026

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-Supp.1-0221-09

汪涛, 黄文江, 董斌, 等. 基于夏玉米冠层内辐射分布的不同层叶面积指数模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 221-229.

Wang Tao, Huang Wenjiang, Dong Bin, et al. Leaf area index simulation of different layers in summer maize canopy based on photosynthetically active radiation vertical distribution model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 221-229. (in Chinese with English abstract)

0 引言

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 是一个重要的植被冠层结构参数, 是单位地表面积上的叶面积^[1-2]。叶面积指数受植物大小、年龄、株行距和其他因子的影响, 控制着植被的生物物理过程, 如植被冠层光线的截获, 作物冠层内光合有效辐射分布等^[3-4]。

目前冠层叶面积指数的遥感反演方法比较成熟, 主要有 2 类: 经验模型法和物理模型法^[5-8]。经验模型法是对观测获取的数据做经验性的统计分析, 简单易

行而被广泛使用, 但由于植被类型和土壤背景敏感性受到制约。物理模型法建立在辐射传输模型基础上, 不依赖植被具体类型或背景的变化, 模拟光辐射在植被和土壤中的传输过程, 具有普适性。

但针对冠层内叶面积指数垂直分布的遥感反演研究欠成熟, 章家恩等^[9]在试验观测的基础上对玉米冠层内光分布随高度及叶面积指数的变化规律进行分析探讨, 得出玉米群体内辐射透过率与叶面积指数之间呈现负指数相关关系。晁海等^[10]测定了光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR), 研究了杏树冠层内透光率随树龄和叶面积指数的变化, 得出冠层内部平均 PAR 的垂直分布具有向下累积叶面积指数的增加而递减的趋势。张艳敏等^[11]对根据透光率求叶面积的垂直分布进行试验。这类方法的局限性在于运用实测数据进行统计分析, 不能从机理上进行解释, 受植被类型和土壤背景限制明显, 不具有普适性。目前, 国内对从物理模型反演冠层内叶面积指数垂直分布研究尚无报道。本文考虑冠层内光分布随高度及叶面积指数变化规律, 使用物理模型法从机理上解释反演叶面积指数

收稿日期: 2014-03-27 修订日期: 2014-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271412); 中国科学院百人计划项目“植被定量遥感参数反演与真实性检验”(黄文江); 安徽省高校省级自然科学基金项目 (KJ2012Z108)。

作者简介: 汪涛, 男, 安徽安庆人, 主要从事植被定量遥感研究。北京 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 100094。Email: tollywang@foxmail.com

*通信作者: 黄文江, 男, 安徽安庆人, 博士, 博士生导师, 主要从事定量遥感方面研究。北京 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 100094。

Email: huangwenjiang@gmail.com

的垂直分布, 提高反演精度。

国内外已有多位学者对作物冠层内光分布开展了一系列研究。谢东辉等^[12]利用辐射度方法模拟了小麦冠层内 PAR 和吸收光合有效辐射 (fraction of absorbed photosynthetically active radiation, FPAR) 随高度的变化, 模拟结果较好。Allen、Norman 等^[13-15]在将 Beer 定律用于描述冠层内光辐射的传输和分布研究的基础上进行大量补充修改研究, 发展了基于冠层随机分布假设的指数递减光分布模型。刘安国^[16]提出了以叶倾角分布函数 (G 函数) 为特征的作物冠层结构分析和描述方法, 发展了基于叶倾角分布函数的光分布模型。Ganis 等、Chen 等将 G 函数和消光系数结合起来发展自己的辐射传输模型^[17-20]。刘镛源等^[21]利用实测结构参数模拟了封垄后均匀玉米冠层内 FPAR, 并与 SUNSCAN 冠层分析仪测量值进行了比较, 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。

目前, 考虑行播作物封垄前行垄结构冠层内光分布垂直分布规律的研究较少。本文以北京农科院农场为研究区域, 结合地面测量, 基于 PAR 在垄行结构冠层内的辐射传输规律模拟玉米封垄前抽雄期冠层内 PAR 透过率垂直分布。为了反演层 LAI, 结合指数递减光分布模型, 考虑 LAI 与群体内光分布的关系, 运用 Bonhomme& Chartier 算法和 Campbell 椭球分布算法 2 种算法计算不同高度层 LAI, 并用实测数据验证, 以期为模拟垄行结构冠层内 LAI 垂直分布研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2003 年在北京农科院农场 (40°12'N, 116°36'E) 内开展。试验区地势平坦, 土壤类型为壤土, 全年均气温 14.0°C, 年降水量 480 mm 左右, 气候类型为典型的暖温带半湿润大陆季风气候。试验选取 6 月 15 日播期的半紧凑型夏玉米品种京玉 7 号 (JY7), 玉米种植行距 70 cm, 株距 30 cm。在抽雄期 8 月 11 日开始试验, 分 11 个样区采集试验数据, 试验点的数据采集内容包括玉米结构参数、植被组分光谱数据、光合有效辐射、天空散射光比例。

1.2 数据采集

玉米结构参数: 株高、冠层平均叶倾角、垄宽、垄间距等。在各小区内选择有代表性的植株 3~5 株, 手工测量株高, 取其平均值; 叶面积指数: 选取 11 个样区的 32 个样点, 测定样方内 1 株玉米, 及其四周的 4 株玉米, 采用 CI-203 型激光叶面积仪进行田间不离体测定, 取其平均值, 干重法进行校

正, 并计算上中下 3 层叶面积指数。

植被组分光谱数据: 各小区内采用美国 LI-Cor1800 积分球与 ASD Fieldspec (FR350-2500nm) 光谱仪耦合, 分别测定叶片反射率、透射率等光谱特性, 重复测定 5 次, 取其平均值作为此样区组分光谱。

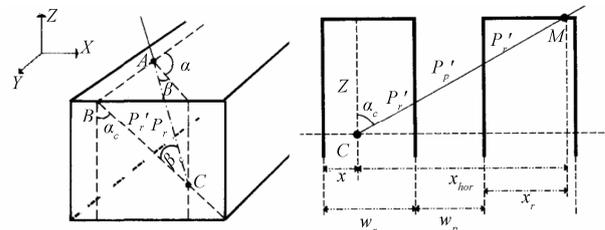
光合有效辐射: 选择晴朗无云, 风力较小的天气开展测量。在研究区内选择长势较均匀的区域, 利用 SUNSCAN 冠层层析仪在顺垄和垂直垄方向从冠层顶到底每隔 20 cm 探头朝上及朝下各测量一次数据, 从早上 9 点到下午 4 点每隔 1 h 测量一次。选取 30°、45°、60° 太阳高度角的数据为 3 组数据集。

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

1.3 研究方法

1.3.1 垄行结构冠层内 PAR 垂直分布模拟

以 Goudriaan 等提出的垄行截面为矩形计算行作物的光分布模型为基础, 由于垄行之间的相互作用, 考虑了植被结构参数 (光线入射角度、叶面积密度分布, 叶角分布, 行几何等), Gijzen 等^[22]提出冠层结构与入射方向的几何关系 (图 1)。如图 1 所示, 光线入射单垄 (左图) 与多垄 (右图) 垄行结构冠层内路径简图。



注: 光线从 A 点入射到 C 点, BC 为光线 AC 在 XZ 平面的投影; α 为光线与垄向的夹角, ($^{\circ}$), β 为高度角, ($^{\circ}$); P_r 为有效路径, P_r' 为 P_r 在 XZ 平面的投影; α_c , β_c 分别为光线与 XZ 平面、YZ 平面的夹角, ($^{\circ}$); 如右图, 光线从 M 点入射到 C 点, 经过路径为 MC, α_c 为光线 MC 与 XZ 平面的夹角, ($^{\circ}$); Z 为 C 点离垄行顶部的距离, cm; w_r 为垄宽, cm; w_p 为行距, cm; x 为 C 点距垄行左侧起点的距离, cm; x_r 为 M 点距垄起点的距离, cm; x_{hor} 为 C 点与 M 点的水平距离, cm。

Note: Light incident from point A to point C; BC is light AC in XZ plane projection; α is the angle between light and ridge direction, ($^{\circ}$); β is the height angle, ($^{\circ}$); P_r is valid path; P_r' is P_r in XZ plane projection; α_c , β_c are the angles between light and XZ plane, YZ plane respectively, ($^{\circ}$); As the right image in Fig.1 shows, Light incident from point M to point C and the route is MC; α_c is the angle between light MC and XZ plane, ($^{\circ}$); Z is the distance between point C and the top of the ridge, cm; w_r is the ridge width and w_p is the line spacing, cm; x is the distance between point C and the starting point of the left of the ridge, cm; x_r is the distance between M and the starting point of the ridge, cm; x_{hor} is the horizontal distance between point C and point M, cm.

图 1 垄行冠层结构与入射光的几何关系

Fig.1 Geometric relationship between row canopy structure and incident light

光线投影到垄行所在 XZ 平面和 YZ 平面, 角度之间有如下关系:

$$\sin\beta = \cos\alpha_c \cos\beta_c \quad (1)$$

$$\sin\beta_c = \cos\alpha \cos\beta$$

$$x_{hor} = Z \tan\alpha_c, x_r = |(x_{hor} + x) / (w_p + w_r)| \quad (2)$$

式中： β 为高度角，(°)； α_c 为光线与 XZ 平面的夹角，(°)； β_c 为光线与 YZ 平面的夹角，(°)； α 为光线与垄向的夹角，(°)； x_{hor} 为 C 点与 M 点的水平距离，cm；Z 为 C 点离垄行顶部的距离，cm； x_r 为 M 点距垄起点的距离，cm； x 为 C 点距垄行左侧起点的距离，cm； w_r 为垄宽，cm； w_p 为行距，cm。

光线穿过冠层时，可能穿过多个垄行。所经过的完整垄行数 N_u 计算式为：

$$N_u = (x_{hor} + x - x_r) / (w_p + w_r) \quad (3)$$

P_r 为光有效路径，通过垄行的有效光路径长度为

$$P_r' = \begin{cases} (N_u w_r - x + x_r) / \sin\alpha_c, x_r \leq w_r \\ ((N_u + 1)w_r - x) / \sin\alpha_c, x_r > w_r \end{cases} \quad (4)$$

$$P_r = P_r' / \cos\beta_c \quad (5)$$

L_t 为光穿过从上到下的累积叶面积指数， L_d 为垄行叶面积体密度分布。冠层内辐射传输透过率计算公式为

$$L_t = P_r \cdot L_d \quad (6)$$

叶面积体密度分布函数 $u(z)$ 描述了植被叶面积密度的分布状况，定义为某高度 z 处单位体积内，叶子单面面积之和^[23]。根据其定义，可计算任意两个高度 z_1, z_2 间的 LAI。其中 $u(z)$ 采用指数函数型分布： h 为冠层高度， Z_m 为体密度最大时所对应的高度^[23]。

$$L_d = \text{LAI}(z_1, z_2) \int_{z_1}^{z_2} u(z) dz \quad (7)$$

$$u(z) = \frac{\text{LAI} n a^2}{s} e^{-na^2} \quad (8)$$

$$a = \frac{z}{h}, n = \left(\frac{h}{Z_m}\right)^2, s = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{n}} \text{erf}(\sqrt{n}) - e^{-n} \right] \quad (9)$$

GIJZEN^[22]等采用透过率来描述光线射入冠层时受作物组分散射吸收等作用时的衰减程度，透过率包括直射光与散射光透过率。 x, z 分别为冠层内点的横坐标及高度， λ 是波长，nm； ρ 为叶片的反射率， σ 为散射系数， k 为消光系数。直射光的透过率和散射光的透过率分别表示为：

$$\tau_b(x, z, \lambda) = \exp(-(1 - \sigma(\lambda))^{1/2} L_t(x, z) k) \quad (10)$$

$$\tau_d(x, z, \lambda) = (1 - \rho) \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \exp(-(1 - \sigma(\lambda))^{1/2} L_t(x, z) k) \sin\beta \cos\beta_c d\beta_c d\alpha_c \quad (11)$$

1.3.2 不同高度层叶面积指数的计算

Monsi 等^[24]最早将比尔定律用于描述植被冠层内辐射的传输和分布研究，假设植被冠层是均一整体。透射率与 LAI 等冠层结构有一定的定量关系，因此可通过测量入射辐射和到达冠层内任意位置的透射辐射进一步反演层 LAI^[19]。 L 为累积叶面积指数， T_p 为光辐射的透射率， K 为消光系数，与叶角分布和截获光有关。

$$T_p = e^{-KL} \quad (12)$$

$$L = -\ln(T_p) / K \quad (13)$$

由于实际植物群体的叶片分布状况与均一分布的假设不完全相符，本文为封垄前抽雄期垄行结构冠层的玉米，按一定间隔平行排列且具有规则的几何形态，在垄间具有离散特点，在垄内具有连续特点。Allen^[13]将垄行结构作物群体假设成垄内随机分布，本文在此基础上，把水平分布较均匀的玉米冠层沿垂直方向分若干个层次，且假设每个层次群体水平方向随机分布。

目前已提出的 LAI 反演方法主要由 Beer-Lambert 模型和一维反演模型发展而来。本研究利用数据反演 LAI 运用 2 种算法：一种是基于 Beer-Lambert 的 Bonhomme & Chartier 算法，该算法将消光系数定为 0.91。另一种算法由一维反演模型演化而来，为 Campbell 椭球分布算法，提出了一个用于计算以相同的比例和对称面分布在以纵轴为轴心的椭圆旋转体表面的叶片消光系数 K 的方法^[25-27]。椭圆旋转体的垂直半轴为 a ，水平半轴为 b ，椭圆叶角分布参数 $x = b/a$ ， θ 为入射角的垂直角度，(°)。

$$K(x, \theta) = \frac{\sqrt{x^2 + \tan^2(\theta)}}{x + 1.702(x + 1.12)^{-0.708}} \quad (14)$$

2 结果与分析

2.1 模型模拟

模型的输入参数包括

1) 行垄几何参数：包括垄宽 W ，行间距 D ，垄行方位角 AR ；

2) 光线几何参数：包括太阳方位角 AS ，太阳高度角 β ；

3) 叶面积体密度垂直分布函数 $u(z)$ ，冠层的叶面积指数，最大体密度对应高度，冠层的平均叶倾角，植被组分光学属性，散射光比例因子。

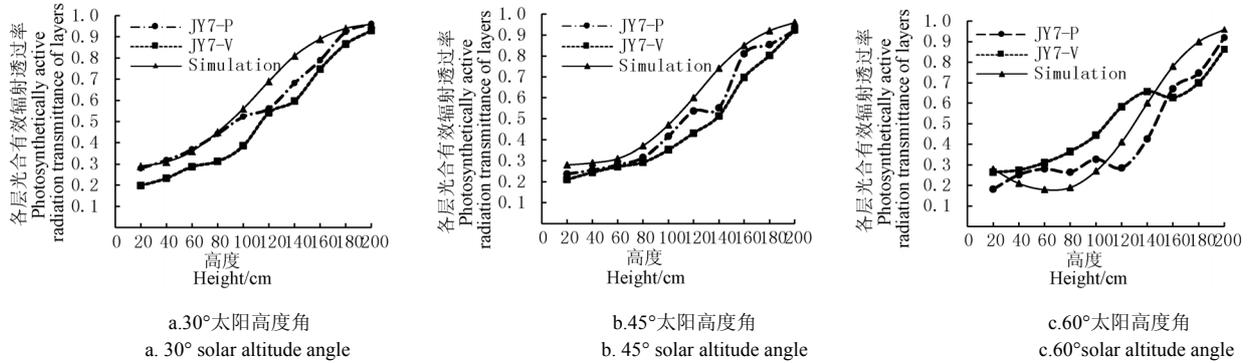
模拟最大体密度高度为 80 cm，冠层内平均叶倾角为 57°，太阳高度角分别为 30°、45°、60° 入射时，玉米抽雄期冠层内各处的透过率的大小。

2.2 夏玉米冠层内光合有效辐射透过率垂直分布模拟与实测数据的比较

将实测株型行垄几何等数据输入模型，冠层自上到下平均分 10 层计算各高度层的 PAR 透过率(模拟值 S)，并与 SUNSCAN 实测(顺垄方向 P 与垂

直于垄方向 V) 计算的 PAR 透过率分不同太阳高度角进行比较(如图 2 所示)。

从图 2 和表 1 可以看出，光在冠层内传输，从上到下透过率呈减小趋势，冠层内的 PAR 透过率沿光路径呈递减的规律，与比尔朗伯定律基本一致。



注: JY7-P, JY7-V, Simulation 分别为京玉 7 号顺垄方向实测值、京玉 7 号垂直于垄方向实测值和京玉 7 号模拟值。
 Note: JY7-P, JY7-V, Simulation are measured values of JingYu jade 7 parallel to the ridge direction, measured values of JingYu jade 7 vertical to the ridge and simulated values of JingYu jade 7 respectively.

图 2 冠层内不同太阳高度角光合有效辐射透过率模拟值与实测值的比较
 Fig.2 Comparison of simulated and measured values of different altitude angle canopy photosynthetically active radiation transmittance

模拟结果与实测结果保持了相似的趋势，整体来说与实测值也较为接近。从不同高度角的模拟结果来看，30°高度角的 RMSE 为 0.07 和 45°高度角的 RMSE 为 0.08，对同时期同株型的 60°高度角的 RMSE 为 0.11，可以发现 30°与 45°高度角模拟结果稍优于 60°高度角，并且平行于垄行测量结果更接近于模拟值。不同高度角 PAR 透过率垂直分布不尽相同，60°高度角下层透光率随高度层的增加并不呈正相关性增加，而是呈先减小趋于平缓趋势后逐步增大。随高度角的增加，冠层下部 PAR 透光率趋势趋于平缓，这是由于透过率的大小分布受太阳高度角

与垄行结构间距的相对关系的影响。林忠辉等^[20]认为冠层对 PAR 透过率的变化由冠层本身的几何结构、叶片光学特性、太阳高度角和天气等决定，与本文研究一致。刘镛源等^[21]基于封垄后平均冠层内辐射传输过程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，RMSE 分别为 0.055 与 0.123，与本文研究一致。因此对于均匀冠层或垄行结构冠层类型，需构建不同的辐射传输模型，对于垄行结构需分不同太阳高度角模拟冠层内 PAR 透过率垂直分布，以达到更好的模拟结果。

表 1 光合有效辐射模拟值与实测值的均方根误差

Table 1 Root mean square error(RMSE) of photosynthetically active radiation simulated values and measured values

高度角 Altitude angle	类别 Category	高度 Height/cm										均方根误差 Root mean square error
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
30度 30 degrees	P	0.28	0.32	0.37	0.44	0.52	0.56	0.68	0.79	0.92	0.96	0.07
	V	0.20	0.23	0.29	0.31	0.38	0.54	0.60	0.75	0.87	0.93	0.13
	S	0.29	0.31	0.36	0.45	0.56	0.69	0.81	0.89	0.94	0.96	
45度 45 degrees	P	0.24	0.26	0.28	0.32	0.42	0.54	0.55	0.81	0.85	0.92	0.08
	V	0.21	0.24	0.27	0.29	0.35	0.43	0.51	0.70	0.80	0.92	0.12
	S	0.28	0.29	0.31	0.37	0.47	0.6	0.74	0.85	0.92	0.96	
60度 60 degrees	P	0.18	0.25	0.28	0.26	0.33	0.29	0.42	0.67	0.75	0.92	0.11
	V	0.26	0.28	0.31	0.36	0.44	0.58	0.66	0.63	0.70	0.86	0.14
	S	0.28	0.21	0.18	0.19	0.27	0.41	0.6	0.78	0.9	0.96	

注: P, V, S 分别为平行于垄方向实测值，垂直于垄方向实测值和模拟值
 Note: P, V, S are the measured values parallel to the ridge direction, the measured values vertical to the ridge direction and simulated values.

2.3 夏玉米冠层内叶面积指数垂直分布模拟与实测数据的比较

2.3.1 不同算法计算冠层内叶面积指数垂直分布模拟与实测值比较

周晓东等^[28]通过对夏玉米冠层内光合有效辐射的观测,发现从拔节期到灌浆期冠层内光分布与叶面积指数之间有很好的线性关系。为进一步直观的观察不同算法模型对研究区样本的适应性,本文以下使用统计方法,采用 11 个样区 32 个样本数据,

将 2 种算法预测的 LAI 与实测 LAI 均分为上、中、下 3 层(上层为 136~200 cm,中层为 66~135 cm,下层为 0~65 cm)分别进行回归拟合比较不同算法的层叶面积指数垂直分布情况。图 3 结果表明:不同算法反演精度有一定差距, Bonhomme& Chartier 算法各层反演 LAI 精度均较高,均方根误差(RMSE)值较小。2 种算法反演中层 LAI 结果均不理想, RMSE 分别为 0.55 及 1.46。由此,本文考虑不同太阳高度角反演不同层次 LAI 并进行模拟值与实测值比较及精度比较。

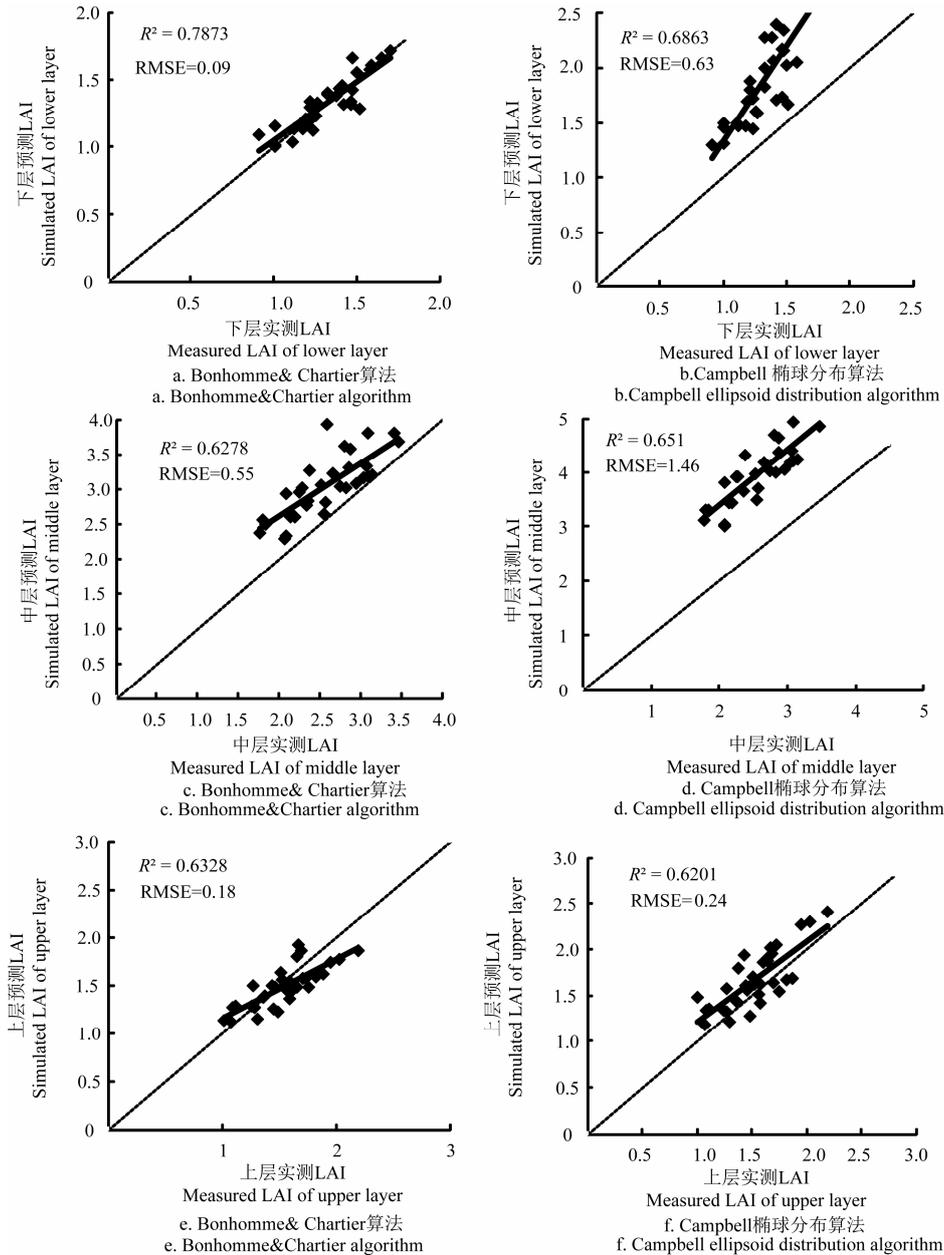


图 3 不同算法层叶面积指数模型拟合

Fig.3 Fitted model of layer leaf area index (LAI) of different algorithms

2.3.2 不同高度角计算冠层内 LAI 垂直分布模拟与实测值比较

由于 Bonhomme& Chartier 算法各层反演 LAI 精度较高,且 60°高度角时 PAR 透过率模拟值与实

测值 RMSE 较大,不能反演层 LAI。因此本文运用 Bonhomme& Chartier 算法将不同太阳高度角(30°和 45°) LAI 的模拟值与实测值分层进行比较(如图 4)。30°和 45°高度角均能较好地反演下层 LAI,均方根误差 RMSE 分别为 0.11 和 0.09;中上层反演精

度相差较大,中层 30°高度角时反演精度较高, RMSE 为 0.30;上层 45°高度角时反演精度较高, RMSE 为 0.18。相比同一太阳高度角反演层 LAI 精度提高很多,验证了不同太阳高度角构建的层 LAI 反演模型反演层 LAI 具有更好的拟合效果。

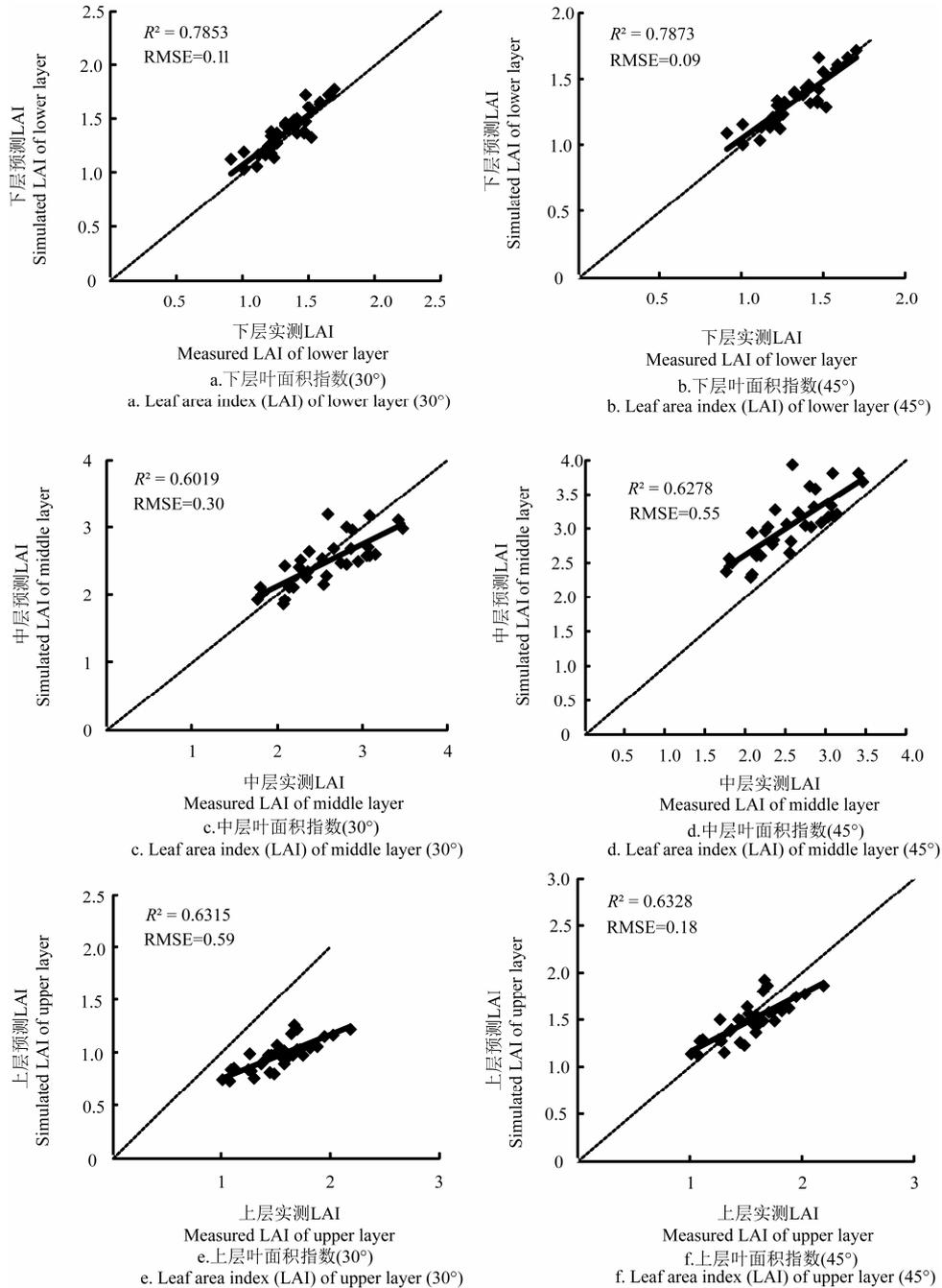


图 4 不同太阳高度角层叶面积指数模型拟合

Fig.4 Fitted model of layer leaf area index(LAI)of different altitude angles

3 结论与讨论

本文基于考虑行垄结构关系、叶倾角分布函数、叶面积体密度分布函数等构建冠层内光辐射传输模型,模拟玉米封垄前抽雄期冠层内光合有效辐射透

过率垂直分布。通过不同太阳高度角光合有效辐射透过率的垂直分布模型结合消光系数运用不同算法分别反演层叶面积指数,并用实测数据进行验证,结果表明:模型能很好地模拟封垄前抽雄期玉米冠层内光合有效辐射透过率垂直分布,受垄行结构的

影响, 30°与 45°高度角模拟结果稍优于 60°高度角。层叶面积指数反演中, Bonhomme& Chartier 算法反演各层叶面积指数精度较高。分不同太阳高度角能较好地模拟冠层内层叶面积指数。30°和 45°高度角均能较好地反演下层叶面积指数,均方根误差分别为 0.11 和 0.09; 30°高度角较 60°高度角反演中层叶面积指数精度较高,均方根误差为 0.30; 45°高度角反演上层叶面积指数精度较高,均方根误差为 0.18。

本文的光合有效辐射垂直分布模型构建时假定封垄前垄行结构玉米冠层内每个层次群体水平方向随机分布。假定冠层下方的地面反射光可以忽略不计,未考虑土壤反射和叶片反射在内的多次散射过程。针对垄行结构冠层考虑土壤和叶片反射系数的多次散射辐射传输模型,还需进一步研究。针对不同特定作物的建模和参数化方法也有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 刘晓臣, 范闻捷, 田庆久, 等. 不同叶面积指数反演方法比较研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 827—834.
Liu Xiaochen, Fan Wenjie, Tian Qingjiu, et al. Comparative analysis among different methods of leaf area index inversion[J]. Journal of Peking University :Natural Science Edition, 2008, 44(5): 827—834. (in Chinese with English abstract)
- [2] Zhiqiang Xiao, Shunlin Liang, Jindi Wang. Real-time retrieval of leaf area index from MODIS time series data[J]. Remote sensing of environment, 2011, 115(1): 97—106.
- [3] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537—541.
Wang Xiqun, Ma Lüyi, Jia Zhongkui, et al. Research and application advances in leaf area index (LAI)[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5): 537—541. (in Chinese with English abstract)
- [4] 赵娟, 黄文江, 张耀鸿, 等. 冬小麦不同生育时期叶面积指数反演方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2546—2552.
Zhao Juan, Huang Wenjiang, Zhang Yaohong, et al. Inversion of leaf area index during different growth stages in winter wheat[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2013, 33(9): 2546—2552. (in Chinese with English abstract)
- [5] Vuolo F, Dini L, D'urso G. Retrieval of leaf area index from CHRIS/PROBA data: An analysis of the directional and spectral information content[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17-18): 5063—5072.
- [6] 梁栋, 管青松, 黄文江, 等. 基于支持向量机回归的冬小麦叶面积指数遥感反演[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 117—123.
Liang Dong, Guan Qingsong, Huang Wenjiang, et al. Remote sensing inversion of leaf area index based on support vector machine regression in winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(7): 117—123. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邢著荣. 基于辐射传输模型和 CHRIS 数据反演春小麦 LAI[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
Xin Zhurong. Inversion Spring Wheat LAI Based on Radiative Transfer Model and CHRIS Data[D]. Qindao: Shandong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [8] 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感, 2003, 14(3): 58—62.
Fang Xiuqin, Zhang Wanchang. The Application of remotely sensed data to the estimation of the leaf area index[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2003, 14(3): 58—62. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 Jia'en, 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)
- [10] 晁海, 张大海, 徐麟, 等. 杏树冠层内光合有效辐射(PAR)分布规律及结构优化初探[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(1): 31—37.
Chao Hai, Zhang Dahai, Xu Lin, et al. Preliminary studies on distribution law of photosynthetically active radiation in apricot canopy and its structural optimization[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(1): 31—37. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张艳敏, 钱维朴. 小麦冠层结构与分光分布研究[J]. 华北农学报, 1996, 11(1): 54—58.
Zhang Yanmin, Qian Weipu. Canopy structure and light distribution in winter wheat[J]. Acta Agriculture Boreali-Sinica, 1996, 11(1): 54—58. (in Chinese with English abstract)
- [12] Donghui Xie, Peijuan Wang, Rongyuan Liu, et al. Research on PAR and FPAR of crop canopies based on RGM[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International. IEEE, 2010: 1493—1496.

- [13] Allen L H. Model of light penetration into a wide-row crop[J]. *Agronomy Journal*, 1974, 66(1): 41—47.
- [14] Norman J M, Wells J M. Radioactive transfer in an array of canopies[J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75(3):481—488.
- [15] Ouaidrari H, Begue A, Imbernon J, et al. Extraction of the pure spectral response of the landscape components in NOAA-AVHRR mixed pixels—application to the HAPEX-Sahel degree square[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(12): 2259—2280.
- [16] 刘安国. 作物叶面积指数和倾角分布函数的一种推算方法[J]. *中国农业气象*, 1994, 15(6): 11—15.
Liu Anguo. A method of estimating crop leaf area index and leaf angle distribution[J]. *Agricultural meteorological China*, 1994, 15(6): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [17] Ganis A. Radiation transfer estimate in a row canopy: a simple procedure[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1997, 88(1-4):67—76.
- [18] Chen J M, Blanken P D, Black T A, et al. Radiation regime and canopy architecture in a boreal aspen forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 86(1—2): 107—125.
- [19] 周允华, 项月琴, 林忠辉. 紧凑型夏玉米群体的辐射截获[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(1): 21—25.
Zhou Yunhua, Xiang Yueqin, Lin Zhonghui. Radiation interception by erectophile maize colony[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(1): 21—25. (in Chinese with English abstract)
- [20] 林忠辉, 周允华. 青藏高原冬小麦冠层几何结构、光截获及其对光合潜能的影响[J]. *生态学报*, 1998, 18(4): 392—398.
Lin Zhonghui, Zhou Yunhua. Canopy geometrical structure, interception of photosynthetically active radiation and their effects on potential productivity of winter wheat in TIBET plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 392—398. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(9): 115—121. (in Chinese with English abstract)
- [22] Gijzen H, Goudriaan J. A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1989, 48(1-2): 1—20.
- [23] 刘镛源. 作物冠层内光合有效辐射垂直分布模拟研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2011.
Liu Rongyuan. The Simulation of Vertical Distribution of PAR in Crop Canopy [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [24] Monsi M, Saeki T. Ueber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion[J]. *Japanese Journal of Botany*, 1953, 14: 22—52.
- [25] Bonhomme R. The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency[J]. *Israel J Agric Res*, 1972, 22: 53—61.
- [26] Campbell G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1986, 36(4): 317—321.
- [27] 吴彤, 倪绍祥, 李云梅, 等. 由冠层孔隙度反演植被叶面积指数的算法比较[J]. *南京师大学报: 自然科学版*, 2006, 29(1): 111—115.
Wu Tong, Ni Shaoxiang, Li Yunmei, et al. A comparison on the algorithms for retrieval of LAI based on gap fraction of vegetation canopy[J]. *Journal of Nanjing Normal University :Natural Science*, 2006, 29(1): 111—115. (in Chinese with English abstract)
- [28] 周晓东, 朱启疆, 王锦地, 等. 夏玉米冠层内 PAR 截获及 FPAR 与 LAI 的关系[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(1): 110—116.
Zhou Xiaodong, Zhu Qijiang, Wang Jindi, et al. Interception of PAR, relationship between FPAR and LAI in summer maize canopy[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(1): 110—116. (in Chinese with English abstract)

Leaf area index simulation of different layers in summer maize canopy based on photosynthetically active radiation vertical distribution model

Wang Tao^{1,2}, Huang Wenjiang^{1*}, Dong Bin², Liu Rongyuan³, Yang Guijun³

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. College of Science, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China; 3. Beijing Agriculture Information Technology Research Center, Beijing 100097, China)

Abstract: Photosynthetically active radiation (PAR) is an important parameter in agricultural applications. Some researchers showed that many parameters, such as leaf area index (LAI), leaf angle distribution (LAD) and the heterogeneity of vegetation, were concerned with the distribution of PAR. Many models were used to simulate the distribution of PAR effectors, such as the structure of canopy and sun zenith angle. This paper simulated the vertical distribution of PAR in the canopy and analyzed the relationships between PAR and some parameters, such as solar zenith angle, LAD, LAI, maize canopy structure, special for the heterogeneous canopies such as that crop with width and narrow ridges. It took account the effects of structural features of different type canopies. In this study, the distributions of solar radiation at different heights in maize canopy were simulated based on the radiation transfer model. The row structure model was used to simulate the vertical distribution of PAR in canopies. It accounted for direct radiation including radiation paths going through one or more rows. Leaf angle distribution was generated by using this model to measure leaf angle distributions in canopies. Intensive investigation was made on the effect of these canopy architecture on the penetration of total visible radiation into the canopy at various solar zenith angle. The simulation result of PAR in maize canopy was validated with the measured data, and it appeared good accuracy. By simulation with box model, the regularity of vertical distribution of PAR in the canopy showed that: 1) the transmittance of solar incidence was affected by the effective light path; 2) the attenuation of light in the canopy was diminishing exponentially along the light path. It could be reflected by the vertical distribution of light extinction coefficient (K); 3) the solar altitude angle varying from 60° to 45° or 30° solar altitude angle with the RMSE value of 0.07 or 0.08, it could improve PAR estimation accuracy. The vertical distribution of leaf area was affected by the light attenuation through the canopy. In this paper, we proposed the method based on the regularity of vertical distribution of PAR by using Beer-Lambert law for inversion of the vertical distribution of LAI in maize canopy. The relationships between the vertical distribution of the leaf area index and solar zenith angle was analyzed, and the results were validated with the measured data. Results showed that the algorithm of Bonhomme&Chartier was proved to be effective for inversion of the vertical distribution of LAI. There were differences in inversion results with different solar zenith angles. In the upper canopy, the solar altitude angle varying from 30° to 45° solar altitude angle could improve LAI estimation accuracy with the RMSE of 0.18, and from 45 to 30 solar altitude angle with the RMSE of 0.30 in the middle canopy, 30° and 45° with the RMSE value of 0.11 and 0.09 in the under canopy. The result showed that it had a fairly good agreement between calculated and observed data, which proved the validity of the theoretical model.

Key words: remote sensing; crops; radiation; maize; photosynthetically active radiation (PAR); vertical distribution; layer leaf area index (LAI)