

文章编号: 1001-8166(2009)07-0741-07

植被 FAPAR 的遥感模型与反演研究*

陶欣¹, 范闻捷^{1*}, 王大成², 闫彬彦¹, 徐希孺¹

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

2. 浙江大学农业遥感与信息工程研究所, 浙江 杭州 310029)

摘要: FAPAR 是遥感估算陆地生态系统植被净第一性生产力(NPP)的重要参数。FAPAR 模型是否能真实反映植被冠层吸收光合有效辐射状况, 将直接影响遥感估算植被 NPP 和碳循环的准确性。从 FAPAR 机理出发, 考虑土壤反射率、冠层结构、太阳入射角等多种因素, 构建了全新的定量 FAPAR 反演模型, 并分析了太阳天顶角、LAI、土壤背景等因素与 FAPAR 的关系。与蒙特卡罗模拟结果的对比和用地面实测数据的验证表明该模型拥有较高的精度。选择甘肃张掖盈科灌区为研究区, 利用 PROBA-CHRIS 高光谱多角度数据反演得到了 LAI 和 FAPAR, 并用同步观测数据验证了反演结果。

关键词: FAPAR; 定量模型; 遥感反演

中图分类号: TP79; P422 **文献标志码:** A

1 前言

FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation), 也作 FPAR 或 fAPAR, 是吸收光合有效辐射比例, 即植被吸收的光合有效辐射 (PAR) 在入射太阳辐射所占的比例。它表征了植被冠层的能量吸收能力, 是描述植被结构以及与之相关的物质与能量交换过程的基本生理变量, 也是遥感估算陆地生态系统植被净第一性生产力(NPP)的重要参数。FAPAR 模型是否能真实反映植被冠层吸收光合有效辐射状况, 将直接影响遥感估算植被 NPP 和碳循环的不确定性程度。

以往估算 FAPAR 往往是通过经验模型。研究表明 FAPAR 与 NDVI 存在线性关系^[1~9], 但是也有很多研究表明这种线性关系受到多种因素的影响。Dawson^[10]的研究表明, 在植被 NDVI 相同的情况下, 植被的叶绿素含量对遥感估算 FAPAR 影响很

大, 导致同样的 NDVI 值可以对应较宽范围的 FAPAR 值, 而且高叶绿素含量和林下植被的增加会导致遥感高估 FAPAR, 但是 FAPAR 的野外测量表明叶绿素含量及林下植被对 FAPAR 的影响不大。反演结果与野外测量的差异表明 NDVI 估算 FAPAR 会带来较大的误差。尤其是当 LAI 大于 3 时 NDVI 容易饱和。Myneni 等^[6]用辐射传输方法研究了 NDVI 和 FAPAR 随冠层、土壤及大气参数的变化情况, 并探讨了 NDVI 与 FAPAR 的关系, 发现 FAPAR 与 NDVI 的关系对土壤、大气和冠层双向反射特性比较敏感。FAPAR 与 NDVI 之间线性关系成立的条件是: 太阳天顶角小于 60°, 星下点附近小于 30° 角观测, 土壤背景中等亮度 (NDVI 大约为 0.12), 在 550 nm 处大气光学厚度小于 0.65。

FAPAR 也可以通过与叶面积指数建立经验关系得到。Wiegand 等^[11]得到 FAPAR 对 LAI 的指数经验关系式, $FAPAR = 1 - e^{-LAI}$ 。Casanova^[12]指出由

* 收稿日期: 2009-05-18; 修回日期: 2009-06-12.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“地表时空变化特征参数的遥感定量描述与尺度转换”(编号: 2007CB714402); 国家自然科学基金项目“基于尺度纠正的作物插种面积和叶面积指数同步反演”(编号: 40871186); 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号: KZCX2-XB2-09)资助。

作者简介: 陶欣(1985-), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事定量遥感模型与反演研究. E-mail: taoxin@pku.edu.cn

* 通讯作者: 范闻捷(1972-), 女, 山西祁县人, 副教授, 主要从事定量遥感研究. E-mail: fanwj@pku.edu.cn

于透过冠层的 PAR 对入射 PAR 的比例系数与 LAI 呈指数递减关系,所以被拦截的 PAR 的比例可以写为, $FAPAR = 1 - e^{-K \times LAI}$, K 为消光系数。但是由于 FAPAR 还受到许多因素影响,如太阳天顶角、LAD、土壤背景等,这样的经验关系还存在不少局限性。

2 FAPAR 反演模型

根据 FAPAR 的定义,它不包括被植被反射的入射太阳辐射和由背景(包括土壤、地衣和林下叶层)吸收的太阳辐射,但必须考虑由背景反射并且被植被吸收的部分。所以描述植被冠层的 FAPAR 就需要考虑太阳入射方向,冠层结构和土壤背景等多方面因素。

设太阳入射天顶角为 θ_s , 传感器观察天顶角为 θ_v , 土壤反射率为 ρ_g 。在太阳直射路径上,光子可能直接穿击冠层到达土壤、或与冠层叶子发生碰撞,发生吸收、反射或透射作用。令冠层透过率为 T_0 , 单波段方向性冠层反射用 $\rho_{\theta_v, \lambda}$ 表示。光子直接穿击冠层到达土壤的概率为冠层的透过率:

$$T_0 = e^{-\lambda_0 \frac{G_s}{\mu_s} LAI} \quad (1)$$

其中: λ_0 为考虑植被群聚效应的尼尔逊(Nilsson)参数, G_s 为单位面积内所有叶子在与太阳入射垂直平面的平均投影面积, μ_s 为太阳天顶角的余弦, LAI 为植被的叶面积指数。

入射路径冠层二向性反射率的表达式为^[13,14]:

$$\rho_{\theta_v, \lambda} = \beta \cdot \rho_{c, \lambda} [e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \Gamma(\phi) \cdot LAI} - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} LAI}] + \rho_{c, \lambda} (1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \Gamma(\phi) \cdot LAI}) \quad (2)$$

其中: $\rho_{\theta_v, \lambda}$ 代表冠层单波段方向反射率, β 为天空散射光比例, $\rho_{c, \lambda}$ 为冠层单波段反射率, G_v 为单位面积内所有叶子在与观察方向垂直平面的平均投影面积, μ_v 为视角天顶角的余弦, $\Gamma(\phi)$ 为关于太阳—目标—传感器角度 ϕ 的取值从 1 到 0 的单调递减函数: $\Gamma(\phi) = \exp\left(-\frac{\phi}{\pi - \phi}\right)$ 。

光线在冠层中的作用过程如图 1 所示。

考虑叶片反射率近似等于透过率,则入射路径冠层吸收可以近似写成:

$$FAPAR_{\theta_v, \lambda, 0} = 1 - T_0 - 2\rho_{\theta_v, \lambda} \quad (3)$$

土壤反射路径上的吸收为:

$$\begin{aligned} FAPAR_{\theta_v, \lambda, 1} &= T_0 \rho_g - T_0 \rho_g T_{\theta_v} - 2T_0 \rho_g \rho_{\theta_v, \lambda} \\ &= T_0 \rho_g (1 - T_{\theta_v} - 2\rho_{\theta_v, \lambda}) \end{aligned} \quad (4)$$

类似地,土壤二次反射路径上的吸收为:

$$FAPAR_{\theta_v, \lambda, 2} = T_0 \rho_g^2 \rho_{\theta_v, \lambda} (1 - T_{\theta_v} - 2\rho_{\theta_v, \lambda}) \quad (5)$$

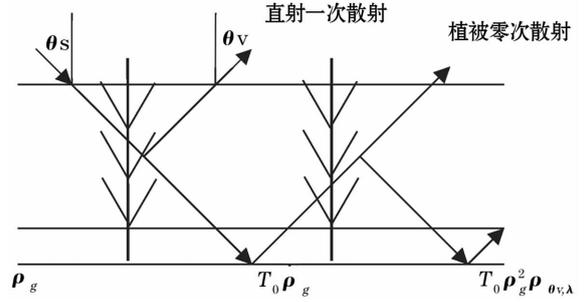


图 1 光子与冠层及土壤碰撞过程

Fig. 1 Interactions of photons with canopy and soil background

冠层单方向单波段总吸收为:

$$FAPAR'_{\theta_v, \lambda} = (1 - T_0 - 2\rho_{\theta_v, \lambda}) + (1 - T_{\theta_v} - 2\rho_{\theta_v, \lambda}) \frac{T_0 \rho_g}{1 - \rho_g \rho_{\theta_v, \lambda}} \quad (6)$$

令 $\alpha = \frac{1 - T_{\theta_v} - 2\rho_{\theta_v, \lambda}}{1 - T_0 - 2\rho_{\theta_v, \lambda}}$, 简化为:

$$FAPAR'_{\theta_v, \lambda} = FAPAR_{\theta_v, \lambda, 0} \left(1 + \alpha \cdot \frac{T_0 \rho_g}{1 - \rho_g \rho_{\theta_v, \lambda}}\right) \quad (7)$$

以 θ_v 为可变参数,对 θ_v 进行 2π 空间积分取平均,并对波长进行 400 ~ 700 nm 积分平均,得到 FAPAR 的计算公式为:

$$FAPAR' = \int_{0.4-0.7} d\lambda \int_{2\pi} FAPAR'_{\theta_v, \lambda} d\Omega_v \quad (8)$$

实际计算时,对立体角进行 2π 空间积分拆分成对天顶和方位角的二重积分,得到 2π 空间 FAPAR 积分平均值为:

$$\begin{aligned} FAPAR_{2\pi, \lambda} &= \frac{1}{\pi} \int FAPAR_{\theta_v, \lambda} \cos\theta d\Omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} FAPAR_{\theta_v, \lambda} \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (9)$$

对波长进行积分,最好使用高光谱数据,采用下式积分:

$$\begin{aligned} FAPAR' &= \frac{1}{700 - 400} \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{FAPAR_{\lambda_{i+1}} + FAPAR_{\lambda_i}}{2} \right. \\ &\quad \left. (\lambda_{i+1} - \lambda_i) + FAPAR_{\lambda_1} (\lambda_1 - 400) + \right. \\ &\quad \left. FAPAR_{\lambda_n} (700 - \lambda_n) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

其中 n 为波段数, $FAPAR'$ 为 400 ~ 700 nm FAPAR 的最终积分值, $FAPAR_{\lambda_i}$ 为第 i 个波段的 FAPAR 值。 λ_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 为以 nm 为单位的第 i 个波段的中心波长。方括号内后 2 个求和项是考虑起止波段中心波长不等于 400 nm 和 700 nm 而加入

的修正项。

公式(8)~(10)就是本文计算 FAPAR 的定量模型,它考虑了植被冠层间的多次散射,忽略了光子碰撞叶片后向下散射的透射作用,即植被内的 2 次以上散射,但保持了算法简单的优点,适用于连续植被 FAPAR 的反演。

3 与蒙特卡罗模拟结果对比分析

蒙特卡罗方法(Monte Carlo)是一种基于计算机模拟的数学统计方法,通过重复性地随机采样得到计算结果,可用于处理数学问题,如计算 π 、积分等,也可用于模拟自然系统,如粒子在介质中的传输、扩散等。周彬等^[15~17]对 FAPAR 进行了 Monte Carlo 模拟,分析了影响 FAPAR 的因素,如太阳天顶角和 LAI。为了验证 FAPAR 反演模型,本文在其研究基础上,考虑不同土壤反射率,进行 FAPAR 的 MC 模拟,比较了定量 FAPAR 模型模拟结果和 MC 模拟的结果,并分析了各类影响因素对 FAPAR 的影响。

为了验证模型的准确性,我们同时利用模型和 MC 模拟计算了在不同叶面积指数、叶倾角、太阳天顶角和土壤反射率情况下的 FAPAR。当保持太阳天顶角为 30° 、LAD 为喜平型、土壤反射率为 0.1181 时,FAPAR 随叶面积指数的变化如图 2 所示。从图中可以看出,模型模拟和 MC 模拟非常吻合:随叶面积指数的增加,FAPAR 显著增加,但当叶面积指数大于 3 后,增加速度较为缓慢;LAI = 5 后,FAPAR 值趋于饱和;模型模拟和 MC 模拟的趋势完全一致,仅误差稍大一些,二者之间的差异小于 3%。

图 3 为 LAI = 3.5、LAD 为喜平型、土壤反射率为 0.1181 时,模型模拟和 MC 模拟 FAPAR 随太阳天顶角的变化情况。从图中可以看出,随天顶角的增大,模型模拟和 MC 模拟结果趋势较为吻合,二者都有增加,但增加幅度小于 10%。这是由于入射天顶角增大时,光学路径增大,光子与叶片碰撞以致吸收的概率加大。由于忽略了植被内的 2 次以上散射项,模型模拟值要稍小一些,特别是在太阳天顶角较低时较低,但误差不超过 3%。数值模拟也表明太阳天顶角越大,FAPAR 对 LAI 越容易饱和,当太阳天顶角逐渐从 10° 、 30° 、 50° 增加到 70° 时,FAPAR 饱和值相应变为 6、5、3、2。

土壤背景对冠层 FAPAR 的贡献经常被忽略。模型模拟和 MC 模拟显示,当太阳天顶角为 30° ,LAI = 3.5,LAD 为喜平型时,随着土壤反射率的增加,土壤背景反射后又被冠层吸收部分的贡献也逐

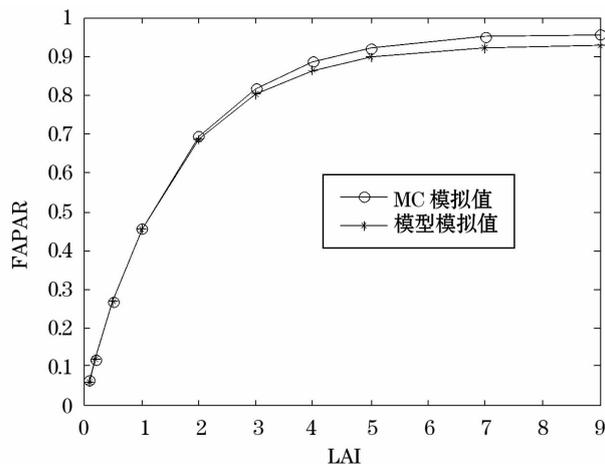


图 2 不同叶面积指数时 MC 和模型模拟 FAPAR 比较
Fig. 2 Relationships between FAPAR and LAI for MC and model

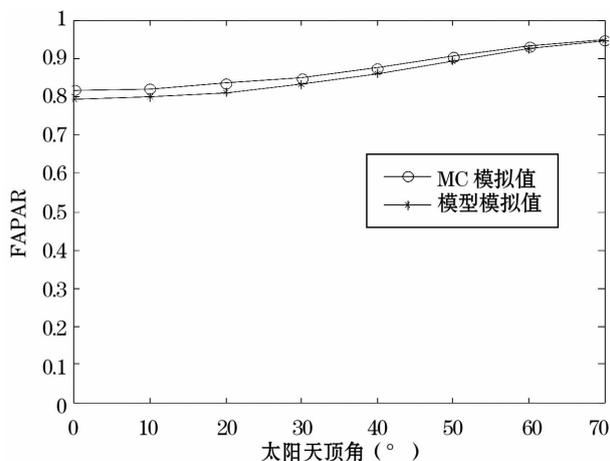


图 3 不同太阳天顶角时 MC 和模型模拟 FAPAR 比较
Fig. 3 Relationships between FAPAR and sun zenith angle for MC and model

渐增加。其他条件相同时,土壤反射率越高,植被 FAPAR 值也会增加。当土壤反射率高于 0.6 时,模型模拟的 FAPAR 明显小于 MC 模拟值。而当土壤反射率低于 0.4 时,模型的误差较低,可以忽略不计(图 4)。这就意味着此时土壤-冠层体系内部多次散射对 FAPAR 的贡献可以忽略不计。

表 1 和表 2 显示了太阳天顶角为 30° ,叶面积指数分别为 3.5 和 1 时,不同 LAD 类型植被模型模拟和 MC 模拟 FAPAR。水平型植被 FAPAR 最大,球面型次之,竖直型最小。当叶面积指数较高时(LAI = 3.5),模型模拟值与 MC 模拟值相比误差大约为 2%。而当模型忽略了由土壤背景反射并且被植被吸收的部分时,误差增加 3% 左右。当叶面积指数

较低时,模型模拟值与 MC 模拟值相比误差同样大约为 3%,但当模型忽略了土壤背景反射并且被植被吸收的部分时,误差上升至 7% 左右。可见本文的模型在不同叶倾角和叶面积指数情况,精度误差在 2% ~ 3% 左右。为了准确估算 FAPAR,模型中土壤和冠层间的多次散射不可不考虑,特别是在叶面积指数较低时,不能忽略土壤背景反射后被植被吸收部分的贡献。

4 地面实验验证

地面验证数据来源于黑河综合遥感联合观测试验的盈科绿洲加密观测试验区,该试验区位于我国第二大内陆河流域黑河流域中部,黑河流域(37°45'

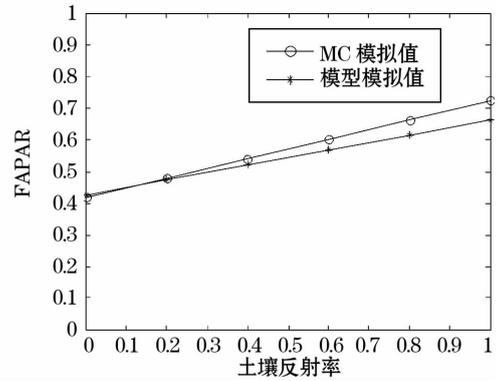


图 4 不同土壤反射率时 MC 和模型模拟 FAPAR 比较

Fig. 4 Relationships between FAPAR and supposed soil reflectance for MC and model

表 1 叶面积指数较大时,不同叶倾角情况 MC 和模型模拟 FAPAR 比较

Table 1 Comparisons of MC and model FAPAR for different LAD when LAI is large

	MC 模拟 FAPAR	模型模拟 FAPAR	模型 FAPAR *	误差 (%)	误差* (%)
水平型	0.9080	0.8940	0.8822	1.547	2.837
球面型	0.8511	0.8321	0.8191	2.239	3.764
竖直型	0.8297	0.8157	0.8011	1.685	3.445

LAI = 3.5, $\theta_s = 30^\circ$, $\rho_g = 0.1181$; * 表示忽略土壤背景反射并且被植被吸收的部分 FAPAR 值

表 2 叶面积指数较小时,不同叶倾角情况 MC 和模型模拟 FAPAR 比较

Table 2 Comparisons of MC and model FAPAR for different LAD when LAI is small

	MC 模拟 FAPAR	模型模拟 FAPAR	模型 FAPAR *	误差 (%)	误差* (%)
水平型	0.5517	0.5416	0.5212	1.834	5.526
球面型	0.4495	0.4458	0.4175	0.819	7.123
竖直型	0.4440	0.4242	0.3961	4.4481	0.780

LAI = 1, $\theta_s = 30^\circ$, $\rho_g = 0.1181$; * 表示忽略土壤背景反射并且被植被吸收的部分 FAPAR 值

~42°40'N, 97°42' ~ 102°04'E) 位于河西走廊中部,是我国西北地区第二大内陆流域,远离海洋,周围高山环绕,流域气候主要受中高纬度的西风带环流控制和极地冷气团影响,气候干燥,降水稀少而集中。中游山前冲积扇下部和河流冲积平原上分布有灌溉绿洲栽培农作物和林木。本研究区主要分布在中游绿洲区,主要植被以农作物如玉米、小麦、大麦、胡麻等为主。研究区景观分类、主要植被群落及其分布,请参考 <http://heihe.westgis.ac.cn/>。

地面小麦实验样地位于 38° 51' 26" N, 100° 24' 38" E, 光合有效辐射 (PAR) 的测量采用 SunScan probe v1.01。测量时间为 2008 年 6 月 16 日的早 8 点到晚 8 点。主要测量太阳入射辐射通量 $I_{\text{TOC}}^{\downarrow}$ 、到达地面的辐射通量 $I_{\text{Ground}}^{\downarrow}$ 、从地表反射的辐射通量 $I_{\text{Ground}}^{\uparrow}$ 以及冠层出射辐射通量 $I_{\text{TOC}}^{\uparrow}$ 。

利用公式 (9) 和 (10) 就可以计算出 APAR 和 FAPAR。

$$\text{APAR} = I_{\text{TOC}}^{\downarrow} - I_{\text{Ground}}^{\downarrow} + I_{\text{Ground}}^{\uparrow} - I_{\text{TOC}}^{\uparrow} \quad (9)$$

$$\text{FAPAR} = \text{APAR} / I_{\text{TOC}}^{\downarrow} \quad (10)$$

实测 APAR 的日变化如图 5 所示。APAR 在下午 1 点前后达到最大值。实测 FAPAR 的日变化如图 6 所示,其变化趋势与 FAPAR 正好相反。实测 FAPAR 与模型模拟值和 MC 模拟值总体一致,误差较小,验证了本文提出的定量 FAPAR 模型的可靠性。产生误差的原因主要在于叶片反射率、土壤反射率的测量误差。

进一步用 2008 年 6 月 4 ~ 24 日晴天 99 组小麦和 15 组油菜地面实测 FAPAR,验证用叶片反射率、透过率、土壤反射率、LAI 和 LAD 代入模型中计算所得的 FAPAR,实测结果与模型计算结果比较的误

差统计如表 3 所示。

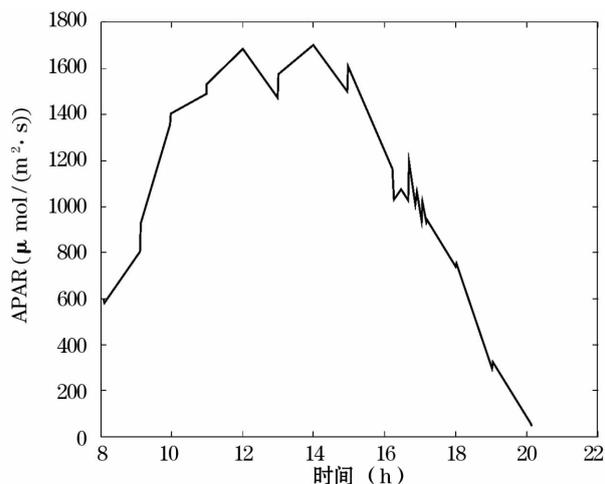


图 5 6月16日 APAR 日变化

Fig. 5 Daily change of APAR

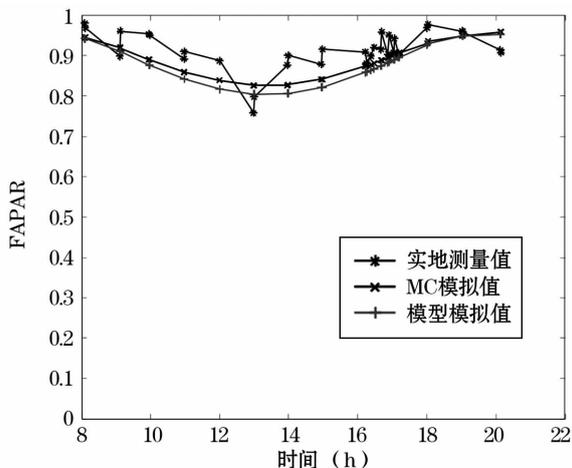


图 6 FAPAR 测量值、MC、模型模拟值比较

Fig. 6 Comparisons of daily changes of FAPAR from field, MC and model

表 3 模型计算 FAPAR 与地面实测数据相比的误差

Table 3 The error for the model validated by field measurement data

最大误差	最小误差	平均误差	误差标准差
0.1132	0.0002	0.0224	0.0422

在验证了模型的可靠性之后,我们利用 2008 年 6 月 4 日的 PROBA-CHRIS 高光谱多角度数据进行了 LAI 和 FAPAR 反演(图 7)。图像的几何纠正、辐射纠正、大气纠正和去噪方法见文献[13,14]。地面同步观测点(38° 51'27.59"N, 100° 24'35.39"E)的小麦 FAPAR 值为 0.8605,反演值 FPAR = 0.9006,二者较为一致。

5 结 论

为了提高 FAPAR 遥感反演精度,本文从 FAPAR 机理出发,考虑土壤反射率、冠层结构等多种因素,构建了全新的定量 FAPAR 反演模型。

为了验证模型精度,在不同参数取值条件下将模型模拟结果与蒙特卡罗模拟结果进行对比,表明模型与 MC 模拟结果较为一致。同时也分析了太阳天顶角、LAI、LAD、土壤背景等因素对 FAPAR 的影响,为准确反演 FAPAR 提供了依据。利用盈科灌区的地面实测数据对 FAPAR 定量模型进行验证,模型和 MC 模拟结果与地面实测结果较为一致。

基于 FAPAR 定量模型,利用 PROBA-CHRIS 高光谱多角度数据反演得到甘肃张掖盈科灌区的 FAPAR 分布图(图 8)。FAPAR 定量模型为定量遥感 FAPAR 提供了新的思路。

图 7 研究区几何纠正后 4 个角度 CHRIS 数据(从左至右角度分别是 55°,36°,0°, -36°)

Fig. 7 CHRIS data of the study area after geometric correction (The angles are 55°, 36°, 0°, -36° respectively from left to right)



图8 利用 PROBA-CHRIS 反演 FAPAR 分布图

Fig.8 The distribution of FAPAR retrieved from PROBA-CHRIS data

参考文献 (References):

- [1] Gao Yanhua, Chen Liangfu, Liu Qinhuo, *et al.* Research on remote sensing model for FPAR absorbed by chlorophyll [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 798-803. [高彦华, 陈良富, 柳钦火, 等. 叶绿素吸收的光合有效辐射比率的遥感估算模型研究[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 798-803.]
- [2] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 490-507.
- [3] Wu Bingfang, Zeng Yuan, Huang Jinliang. Overview of LAI/FPAR retrieval from remotely sensed data [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 585-590. [吴炳方, 曾源, 黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/ FPAR 的研究进展与应用[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 585-590.]
- [4] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, *et al.* Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(24): 32 257-32 276.
- [5] Myneni R B, Nemani R R, Running S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(6): 1 380-1 393.
- [6] Myneni R B, Williams D L. On the relationship between FAPAR and NDVI [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49: 200-211.
- [7] Goward S N, Huemmrich K F. Vegetation canopy PAR absorbance and the normalized difference vegetation index: An assessment using the SAIL model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39: 119-140.
- [8] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6: 1 335-1 372.
- [9] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E T, *et al.* Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat [J]. *Agronomy Journal*, 1984, 76: 300-306.
- [10] Dawson T P, North P R J, Plummer S E, *et al.* Forest ecosystem chlorophyll content: Implications for remotely sensed estimates of net primary productivity [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 611-617.
- [11] Wiegand C T, Maas S J, Aase J K, *et al.* Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42: 1-21.
- [12] Casanova D, Epema G F, Goudriaan J. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI [J]. *Field Crops Research*, 1998, 55: 83-92.
- [13] Xu Xiru, Fan Wenjie, Tao Xin. The spatial scaling effect of continuous canopy leaves area index retrieved by remote sensing [J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 39(1): 79-87. [徐希孺, 范闻捷, 陶欣. 遥感反演连续植被叶面积指数的空间尺度效应[J]. *中国科学: D 辑*, 2009, 39(1): 79-87.]
- [14] Jin Huiran, Tao Xin, Fan Wenjie, *et al.* Monitoring the spatial distribution of high-resolution leaf area index using DMC + 4 image [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17: 1 229-1 234. [金慧然, 陶欣, 范闻捷, 等. 应用北京一号卫星数据监测高分辨率叶面积指数的空间分布[J]. *自然科学进展*, 2007, 17: 1 229-1 234.]
- [15] Zhou Bin, Chen Liangfu, Shu Xiaobo. The Monte Carlo study on FPAR [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 385-391. [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.]
- [16] Huang Jianxi, Wu Bingfang, Zeng Yuan, *et al.* Forest canopy BRDF simulation using Monte Carlo method [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(6): 1 671-1 676. [黄健熙, 吴炳方, 曾源, 等. 基于蒙特卡罗方法的森林冠层 BRDF 模拟[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(6): 1 671-1 676.]
- [17] Chen Liangfu, Xu Xiru. The simulation using monte Carlo method in vegetation canopy remote sensing [J]. *Progress in Geogra-*

phy, 2000, 19(1): 25-34. [陈良富, 徐希甯. 植被遥感的 Monte Carlo 模拟研究[J]. 地理科学进展, 2000, 19(1): 25-34.]

Remote Sensing Retrieval of FAPAR: Model and Analysis

TAO Xin¹, FAN Wenjie¹, WANG Dacheng², YAN Binyan¹, XU Xirui¹

(1. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) is an important parameter for remote sensing monitoring plants net primary productivity (NPP) of land ecosystem. It is crucial that the calculated value approximates the actual value of canopy absorbed photosynthetically active radiation. The calculation accuracy directly influences the estimation of NPP and carbon cycle. The model in this paper is derived by analyzing the interaction processes between the photons and the canopy. It considers parameters like soil reflectance, canopy structure and solar zenith angle, etc. The relationship between these parameters and FAPAR is analyzed. The comparison results with Monte Carlo simulations and the validation results using field measurements prove the model to be accurate. We further choose Yingke, Zhangye City, Gansu province as study area, and retrieve LAI and FAPAR from hyperspectral and multi-angle PROBA-CHIRIS. Field data is also used to validate the retrieval result.

Key words: FAPAR; Quantitative model; Remote sensing retrieval.

《地球科学进展》期刊“IODP 研究”专栏征稿启事

2004年4月,我国以“参与成员”的身份加入 IODP,这对于我国地球科学研究早日整体上进入国际前沿、造就一批勇于承担推动地球科学发展重任的中国科学家来说,是一次难得的机遇。

为了推动我国在 IODP 研究中发挥更大的作用,展示国内学术界参与 ODP 及 IODP 相关研究所取得的科学成果,中国 IODP 办公室与《地球科学进展》达成协议,合作开辟“IODP 研究”专栏,目前已刊出多篇相关论文。

该专栏由中国 IODP 办公室负责组稿,并组织专家审稿,论文通过审稿后将以最快速度在《地球科学进展》上刊载。同时,中国 IODP 办公室为专栏论文支付出版补贴(版面费)。

欢迎国内从事相关研究的广大科研人员踊跃投稿,来稿应具有科学性、创新性,与 ODP/IODP 相关的研究性论文和综述论文均可,请参照《地球科学进展》杂志格式要求撰写。

有关投稿事宜请联系中国 IODP 办公室(<http://www.iodp-china.org>),本启事长期有效。

地址:上海市四平路 1239 号同济大学海洋地质国家重点实验室 邮政编码:200092

联系人:拓守廷 电话:021-65982198 E-mail: iodp_china@tongji.edu.cn