

第 12 章 吸收光合有效辐射比例^{*}

FAPAR 表征了植被冠层能量的吸收能力,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。本章首先在 12.1 节给出一些相关概念的定义。12.2 节将简单介绍 FAPAR 的野外测量方法。12.3 节将通过 MC 模拟方法分析影响植被 FAPAR 的主要因素,为遥感建模反演提供依据。目前利用遥感来估算 FAPAR 的方法可以分为两类。在 12.4 节中讨论第一类方法,经验反演方法。12.5 节和 12.6 节中将介绍利用辐射传输模型或其他物理模型进行 FAPAR 反演的方法,主要包括 MODIS 的 LAI/FPAR 产品算法和 JRC_FPAR 反演算法,以及基于混合植被光谱模型的 FAPAR 反演模型。12.7 节将给出以黑河流域为研究区的案例研究。

12.1 FAPAR 及相关概念

吸收光合有效辐射比例(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FAPAR)是指植被吸收的光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)占入射太阳辐射的比例。作为植被的基本生物物理参数,FAPAR 可用于估计植被的初级生产力和二氧化碳吸收,是作物生长模型、净初级生产力模型、气候模型、生态模型、水循环模型、碳循环模型等的重要陆地特征参量(Liu et al., 1997, Reich et al., 1999, Cramer et al., 1999, Scurlock et al., 1999, Liang, 2004, 吴炳方等, 2004)。FAPAR 也可表征植被的生长状况和演化过程,而且从理论上讲应该比 NDVI 等植被指数起到更好的指示作用。目前国际社会已经认识到了 FAPAR 的重要性。FAPAR 已成为联合国全球气候观测系统(GCOS)公认的气候参数。遥感能在瞬时获取地表的面状分布信息,能够提供更广泛的空间区域和更高时间频率的 FAPAR 数据等植被参数。某些传感器,如“植被”传感器(VEGETATION, VGT),甚高分辨率辐射计(Advanced very High Resolution Radiometer, AVHRR)和中分辨率成像光谱仪(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)已经可以提供全球和区域尺度的 LAI/FPAR 数据产品。

PAR 是指陆地植被光合作用所能吸收的从 400~700 nm 的太阳光谱能量。绿 PAR (Green PAR)是指去除木质材料由绿叶所吸收的 PAR。在 PAR 区间叶绿素 a、b 和类胡萝卜素的吸收率和总的光合作用效率如图 12.1 所示。

APAR,植被冠层吸收的参与光合生物量累积的光合有效辐射部分。FAPAR,也作 FPAR 或 fAPAR,吸收光合有效辐射比例,是指植被吸收的光合有效辐射(PAR)在入射太阳辐射所占的比例。FAPAR 与 PAR 和 APAR 之间的联系是 $APAR = FAPAR \times PAR$ 。

^{*} 本章作者:范闯捷. 北京大学遥感与地理信息系统研究所;陶欣. 美国马里兰大学帕克分校地理系

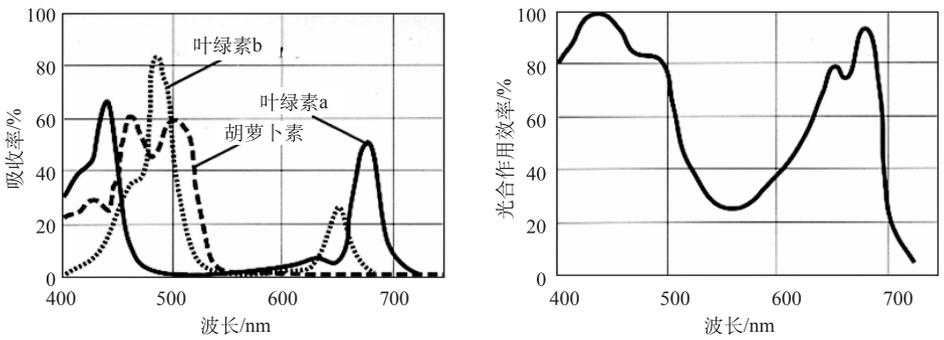


图 12.1 在 PAR 区间叶绿素 a、b 和类胡萝卜素的吸收率和总的光合作用效率

FAPAR 的定义是针对植被提出的,它不包括被植被反射的入射太阳辐射和由背景(包括土壤、地衣和林下枯枝落叶层)吸收的太阳辐射,但必须包括由背景反射并且被植被吸收的部分。设植被(Vegetation)与大气(Atmosphere)和土壤(Soil)分界明显,出入冠层的太阳辐射包括:入射太阳辐射(Incoming Solar Flux) $I_{\text{TOC}}^{\downarrow}$,到达地面的辐射(Flux to the Ground) $I_{\text{Ground}}^{\downarrow}$,从地面反射的辐射(Flux From the Ground) $I_{\text{Ground}}^{\uparrow}$ 以及出射太阳辐射(Outgoing Solar Flux) $I_{\text{TOC}}^{\uparrow}$ (Gobron et al, 2006),如图 12.2 所示。因此,FAPAR 的计算公式为

$$\text{FAPAR} = \frac{(I_{\text{TOC}}^{\downarrow} - I_{\text{Ground}}^{\downarrow} + I_{\text{Ground}}^{\uparrow} - I_{\text{TOC}}^{\uparrow})}{I_{\text{TOC}}^{\downarrow}} \quad (12.1)$$

当场景中植被比例趋于 0 时,入射太阳辐射 $I_{\text{TOC}}^{\downarrow}$ 等于到达地面的辐射 $I_{\text{Ground}}^{\downarrow}$,从地面反射的辐射 $I_{\text{Ground}}^{\uparrow}$ 等于出射太阳辐射 $I_{\text{TOC}}^{\uparrow}$,由式(12.1)知 FAPAR 等于 0。该推导也证明了纯土壤不存在植被吸收的 FAPAR,与 FAPAR 的定义相符。

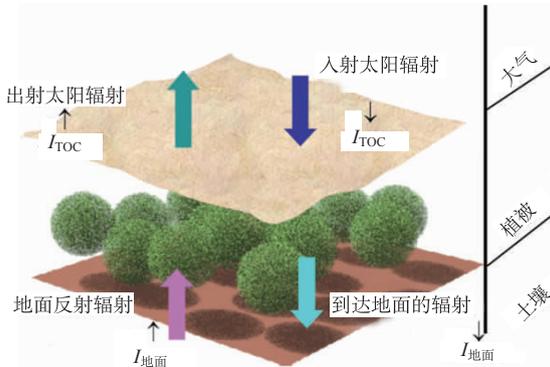


图 12.2 出入冠层的太阳能组成

瞬时 FAPAR(Instantaneous FAPAR),指一天中某一时刻的 FAPAR。遥感监测的 FAPAR 都是瞬时 FAPAR,日 FAPAR 是对瞬时 FAPAR 以太阳天顶角的余弦为权重积分得到。

12.2 FAPAR 野外测量方法

在野外通过直接测量 APAR 估测 FAPAR 有一定难度。但可以根据连续测定的冠层上及冠层下 PAR 值来间接估测 APAR。这样, FAPAR 可以通过对植物冠层上方的人射量、冠层反射量及透射量的测量来间接测定。

早期的入射 PAR 数据都是通过计算求得。直到 20 世纪 70~80 年代, 有学者开始采用点状仪表对其进行地面测量, 如天空辐射表、光量子仪等。但在进行冠层内光合有效辐射观测时, 该类仪表就很难保证观测样点的代表性及仪器每次都处于水平状态, 从而导致观测误差较大。此后, 项月琴、周允华等则提出用管状辐射表测量到达植物冠层内的 PAR, 但管状表外部是玻璃管, 具有反光性, 灵敏度不稳定, 也有一定的仪器误差(Xiang, 1989)。

目前, 国内外较常用的测量 FAPAR 仪器是几种条形仪器, 如 ACCUPAR 植物群体分析仪(Kiniry, 1995), SUNSCAN 冠层分析系统等。其中, 应用较多的仪器有以下几种:

PAR/Sunfleck 光合有效辐射仪, 美国 Decagon 设备公司生产, 在 $12\text{mm} \times 0.8\text{m}$ 的感光区域内嵌 100 个传感器, 可以灵活地测定冠层上、下的瞬时光合有效辐射量。该仪器较好地解决了管状辐射表的反光性问题, 且易保持水平, 提高了观测精度及效率。但为了获得较精确的 FAPAR 观测值, 一般需要快速地观测冠层上下的光合有效辐射量, 重复劳动量大。在多云情况下, 由于太阳辐射变化剧烈, 会有较大的观测误差。

SUNSCAN 冠层分析系统(SUNSCAN Canopy Analysis System), 英国 Delta 公司生产, 可同时观测入射 PAR(包括直射 PAR 和散射 PAR)和 TPAR、LAI 等多项生态指标, 从而解决了冠层上下观测的同步性问题, 还可以自动记录观测数据, 是一种很有使用潜力的农田生态指标观测工具。也是目前用于 FAPAR 测量的最常用仪器。SUNSCAN 冠层分析系统主要由四部分组成: SUNSCAN 探测器, 漫射系数传感器(Beam Fraction Sen-



图 12.3 SUNSCAN 野外测量图

sor, BFS), DCT1 型掌上电脑(The Work-about)和一个三脚支架。SUNSCAN 探测器主要用来测量冠层底部透过的 PAR。它由探测杆和手柄两部分组成。探测杆长 1 m, 内嵌 64 个 PAR 传感器, 沿探测杆均匀分布。根据式(12.1), 进行 FAPAR 野外测量时, 就需要测量出 $I_{\text{TOC}}^{\downarrow}$, $I_{\text{Ground}}^{\downarrow}$, $I_{\text{Ground}}^{\uparrow}$ 以及 $I_{\text{TOC}}^{\uparrow}$ 四部分的量, 从而计算得到地面 FAPAR 值(图 12.3)。

12.3 冠层 FAPAR 的 Monte Carlo 模拟

由式(12.1)可知, FAPAR 可以根据入射太阳辐射、到达地面的辐射, 地面反射的辐射和出射太阳辐射计算得到。入射太阳辐射通量主要受太阳入射方向和大气的影响, 到达地面辐射则主要受冠层结构如 LAI、LAD、和叶片单次散射反照率的影响。地面反射辐射也会受到土壤反射率的影响。这些因素对冠层 FAPAR 的影响机制各不相同, 而且互相制约。为了能够建立植被冠层 FAPAR 反演模型, 准确反演 FAPAR, 有必要通过计算机模拟分析研究各种因素对 FAPAR 的影响机制。本节将在已有研究基础上, 介绍 FAPAR 的 MC 模拟过程, 分析众多因素对 FAPAR 的影响, 为 FAPAR 的反演提供理论依据。

12.3.1 MC 模拟原理

蒙特卡罗方法(Monte Carlo, MC)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, 可以描述光子在冠层中的辐射传输过程, 很多已有研究都从 MC 模拟入手进行冠层反射和辐射 BRDF 研究。Govaerts 等(1998)描述了计算冠层内辐射传输的四个步骤: 产生射线(光源)、确定射线和物体作用处的参数(场景)、作用类型和散射方向、从射线路径中提取相关信息(统计)。陈良富和徐希孺(2000)的 MC 模拟采用植被冠层的结构参数, 包括叶面积指数、叶倾角分布、G 函数、冠层孔隙率, 表述了光子随机过程模型, 包括光子自由路程及散射相位函数。黄健熙等(2006)模拟了森林冠层 BRDF, 绘制了随机过程流程图, 并详细描述了关键技术, 如叶倾角、G 函数、光子自由路程、光子散射方向确定、热点效应纠正、光子能量收集。由于 MC 模拟能对冠层中光子的传输过程进行清晰的描述, 也有很多研究利用 MC 模拟进行了 FAPAR 模型与反演。周彬等(2008)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, 但未分析土壤背景和叶倾角分布函数的影响。

植被冠层 FAPAR 的 MC 模拟基本思想是重复性进行光子在冠层内传输的随机过程, 并对结果进行统计。对于光子在冠层内传输的模拟, 主要分四步进行:

- (1) 光源: 确定入射天顶角 θ_s 和方位角 φ_s 。
- (2) 场景: 冠层内叶倾角分布类型、叶面积指数、叶片反射、吸收透过率及土壤反射率。
- (3) 作用类型和散射方向: 确定光子是被吸收、反射还是透射。发生散射的话, 根据 BRDF 模型确认散射方向。
- (4) 统计: 跟踪光子路径, 统计某些参数, 如冠层吸收率、反射率、透过率、BRDF、FAPAR(吸收光合有效辐射比例)等。

图 12.4 为模拟光子在冠层内作用过程的流程图。

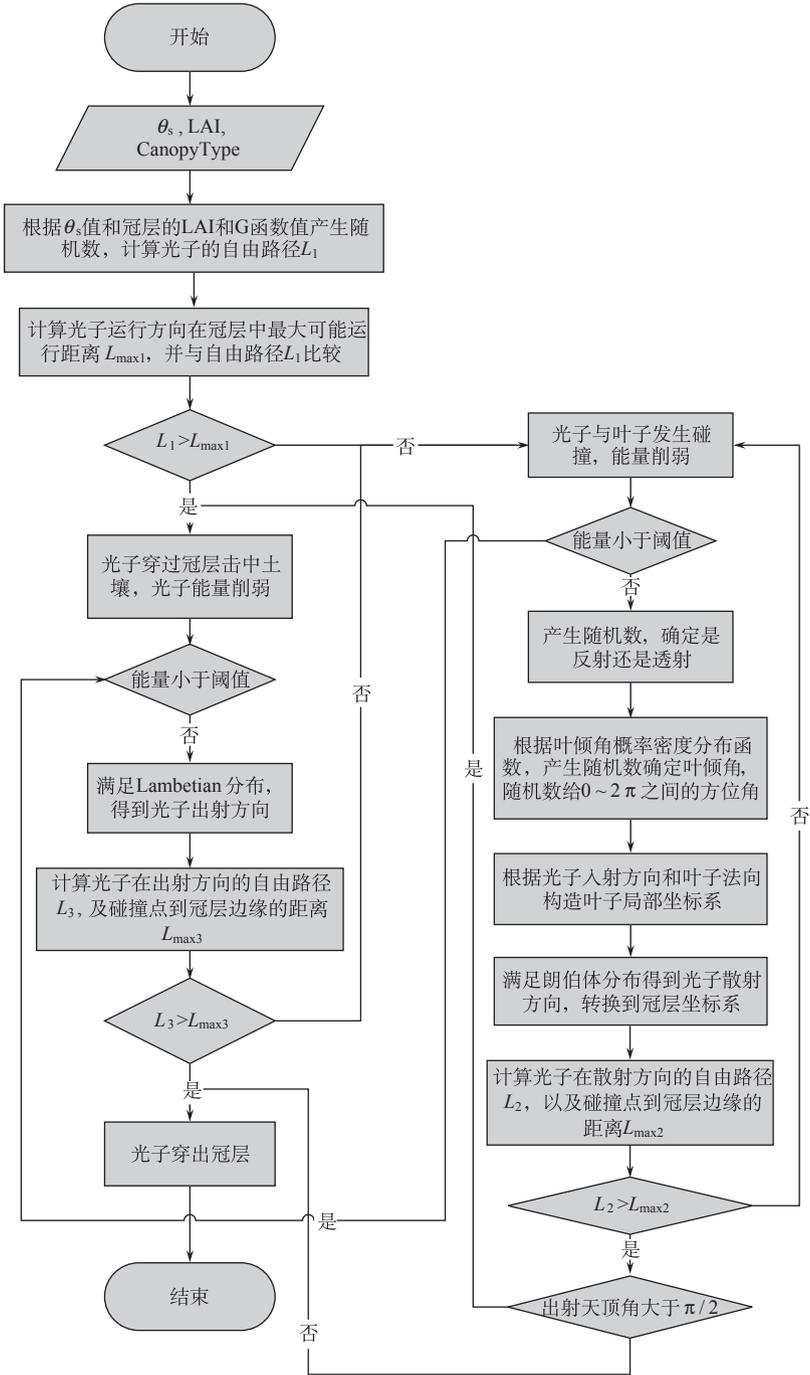


图 12.4 冠层 FAPAR MC 模拟流程图

12.3.2 数据准备

蒙特卡罗模拟用到的参数、取值范围和实例取值如下：

光子入射天顶角： $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ；

光子入射方位角： $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ；

叶倾角分布类型：喜平、喜直、倾斜、极端、均匀、球面；

冠层叶面积指数： $0\sim 10$ ；

光子终止能量阈值：小于 0.001 的数，本节取 0.001；

光子数：大于 10^6 个，本文取 1×10^6 ；

400~700nm 波段叶子的半球反射率和半球透过率及土壤反射率。

模拟中使用的叶片反射率和透过率及土壤反射率值源自于 LOPEX93(Leaf Optical Properties Experiment 93)数据库。在 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 波段，考虑光谱曲线特征，非均匀采样选择 18 个点，其光谱曲线如图 12.5 所示。

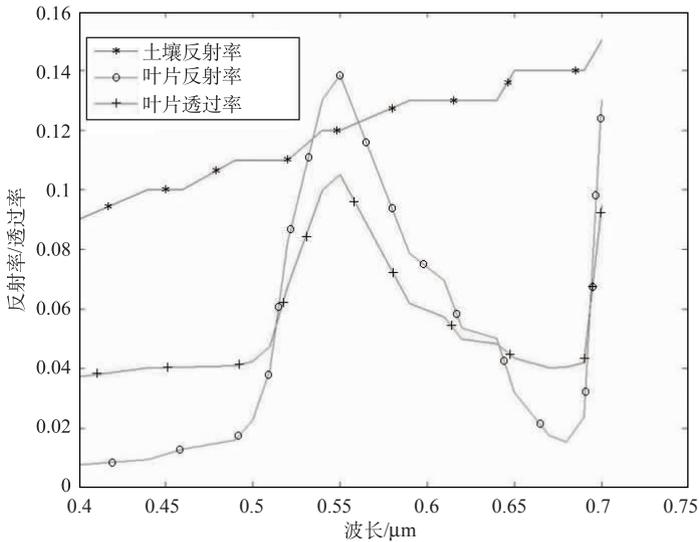


图 12.5 土壤反射率和叶片反射率及透过率在 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 波段采样后的光谱曲线

利用 MC 程序模拟出单波段的光合有效辐射比例 FAPAR_λ ，再对其进行 18 点的平均，得到冠层 FAPAR [见式(12.2)]。

$$\text{FAPAR} = \frac{\sum \text{FAPAR}_\lambda}{18} \quad (12.2)$$

12.3.3 MC 模拟结果分析

分别改变 MC 模拟程序中叶面积指数、太阳天顶角及叶倾角分布类型等输入参数值，得到冠层单波段的光合有效辐射比例和冠层 FAPAR ，分析不同输入参数对冠层 FAPAR 的影响。

1. 不同波段冠层反射率、吸收率随波段变化规律及影响因素

冠层的反射率和吸收率变化是决定 FAPAR 变化的主要因素,因此应首先模拟分析冠层反射率和吸收率随波段的变化规律。选取不同的叶倾角分布类型,给定太阳入射方向,通过蒙特卡罗模拟可以得到冠层在 400~700nm 的反射率光谱曲线,如图 12.6 所示。

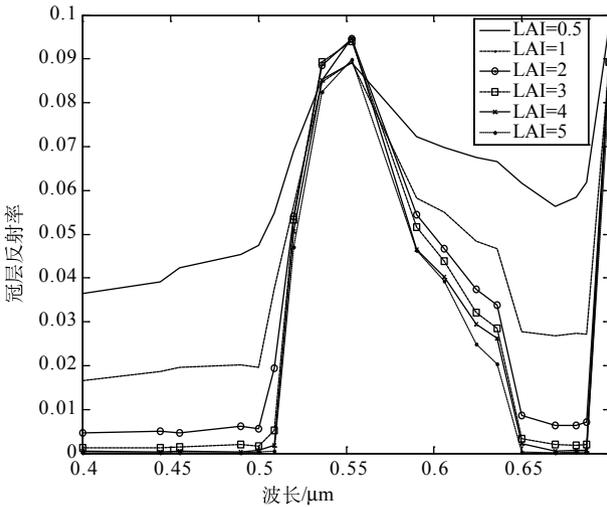


图 12.6 LAI 变化时冠层反射率光谱曲线(考虑土壤反射)

由于叶子主要吸收红色(中心波长 $0.65\mu\text{m}$)和蓝色(中心波长 $0.45\mu\text{m}$)光,在绿色(中心波长 $0.55\mu\text{m}$)波段的反射率较强,冠层吸收率随波长的变化呈现先下降后上升的趋势;叶子在近红外波段存在强反射,因此冠层吸收率在接近 $0.7\mu\text{m}$ 时开始下降;冠层吸收率在 $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ 波段总的变化趋势是先下降后上升再下降。

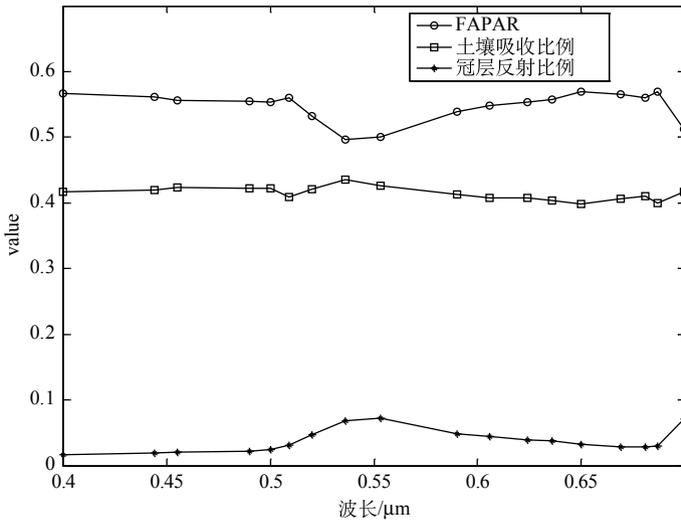
可以看出,如果忽略土壤反射率,则植被冠层反射率降低,土壤吸收率增加,冠层吸收率下降(图 12.7)。这是由于土壤的黑体假设意味着忽略了光子在土壤和植被冠层之间的多次反弹,土壤吸收率为 1 也意味着土壤吸收率的增加,冠层吸收率自然下降。

保持植被类型为喜平型,入射天顶角为 30° , LAI=1, MC 模拟得到的土壤吸收率、冠层反射率和冠层吸收率光谱曲线如图 12.7(a)所示。

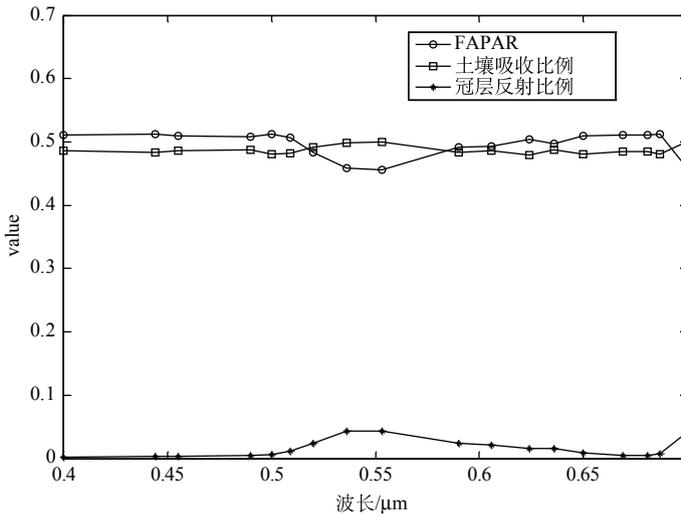
保持太阳入射天顶角为 30° , LAD 为喜平型,改变叶面积指数为 0.5、3、5,冠层吸收率光谱曲线如图 12.8(a)所示。随叶面积指数的增加,冠层吸收逐渐增加,但增加的趋势变缓。改变植被类型为喜直型,冠层吸收率光谱曲线如图 12.8(b)所示,由于太阳天顶角较小,喜直型植被的冠层吸收率要低于喜平型的冠层吸收率。

2. FAPAR 与冠层 LAI、叶倾角分布函数的关系

对单波段冠层吸收率进行波段积分得到冠层 FAPAR。当入射天顶角为 30° ,对于喜平型植被,令叶面积指数从 0.2、0.5、1~9 变化,FAPAR 随 LAI 的变化如图 12.9(a)所示。明显可见 FAPAR 随 LAI 增大而增大,但趋势变缓,在 LAI=5 后趋于饱和。曲线和土壤为黑体情形对比如图 12.9(b)所示,可见土壤反射造成 FAPAR 的上升,增加幅度在



(a)



(b)

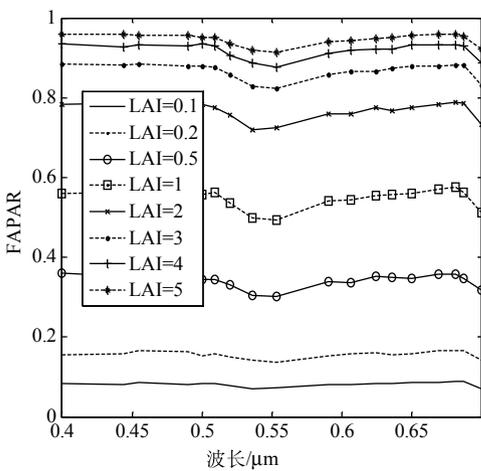
图 12.7 土壤吸收率、冠层反射率和植被冠层吸收率光谱曲线

(a)考虑土壤反射;(b)假设土壤为黑体(LAD为喜平型,LAI = 1)

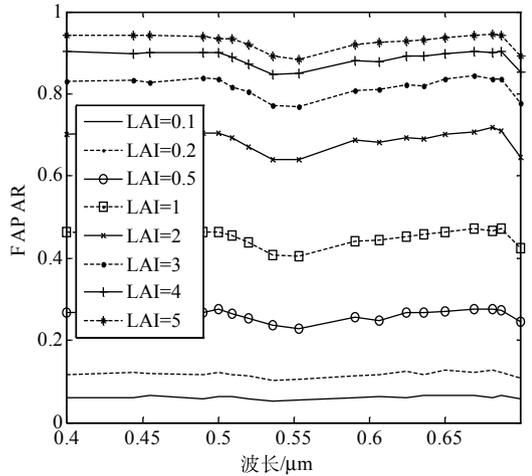
LAI 较小和较大时都不明显,在 LAI 值在 1~5 时,上升幅度最大,比如 LAI = 1 时, FAPAR 上升了 0.04。

3. 不同太阳天顶角时,FAPAR 与 LAI 的关系

不同太阳天顶角时 FAPAR 对 LAI 的关系,如图 12.10 所示。可见在同样的 LAI 下,太阳天顶角越大,FAPAR 越大。分析其物理原因是太阳天顶角越大,光子在冠层中行进的有效路径越长,与叶子碰撞被吸收的概率越大,FAPAR 也越大。另外,太阳天顶角越大,FAPAR 对 LAI 越容易饱和,当太阳天顶角从 10° 、 30° 、 50° ,到 70° 时,FAPAR 对

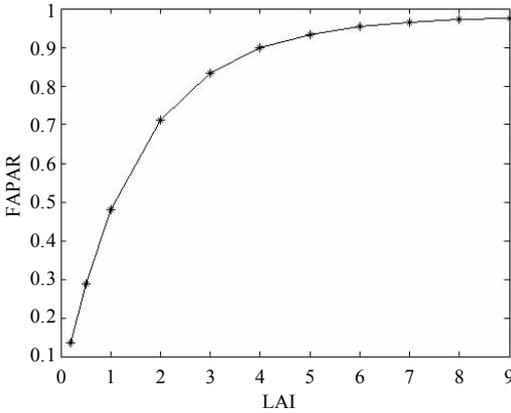


(a) 入射天顶角 30° ，喜平型植被

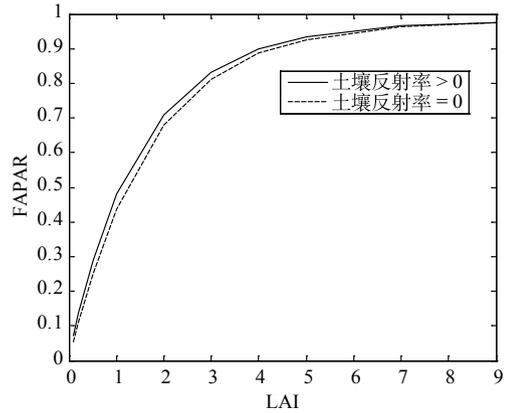


(b) 入射天顶角 30° ，喜直型植被

图 12.8 不同叶倾角时，冠层冠层吸收率光谱曲线



(a) 考虑土壤真实反射时FAPAR随LAI变化



(b) 土壤为黑体与考虑土壤反射率的对比

图 12.9 冠层 FAPAR 随 LAI 变化

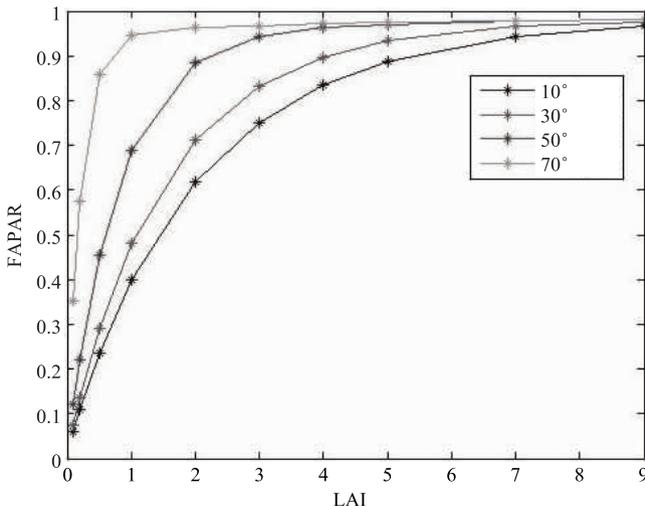


图 12.10 不同太阳天顶角下的 FAPAR 与 LAI 的关系

LAI 饱和的 LAI 值相应变为 6、5、3、2。

改变 LAI, FAPAR 随太阳天顶角的变化如图 12.11 所示。从图中可以看出,不同叶面积指数下, FAPAR 随太阳天顶角增加的快慢不一致, 表现为 LAI 越大, FAPAR 越容易随太阳天顶角的增大而饱和。另外在中等叶面积指数值 0.5~3 时, FAPAR 随太阳天顶角的增大而增加的值较多, 比如当 LAI=1 时, FAPAR 从初始的 0° 太阳天顶角下的 0.39 变到 70° 太阳天顶角下的 0.95, 增加了 0.56, 而叶面积指数过低或者过高时增加幅度则不明显。这是因为, 当 LAI 值过高, FAPAR 初始值就接近 0.9, 容许增加的范围本来就不多; LAI 过低, 叶片很少, 吸收作用弱, FAPAR 的基数小, 也不可能增加得多。

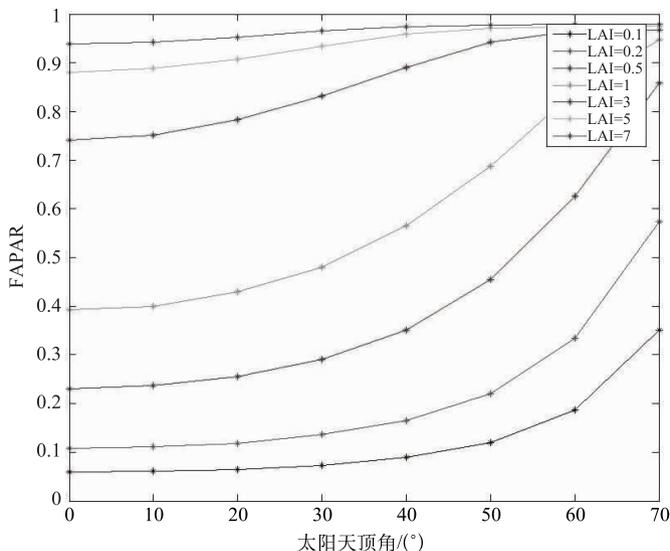


图 12.11 不同 LAI, FAPAR 随太阳天顶角变化图

从以上模拟结果可以看出,冠层 FAPAR 受到冠层 LAI、LAD、太阳入射天顶角、土壤反射率等因素的共同影响,而 LAI 的影响最为显著。而因此 LAI 与 FAPAR 在不同情况下有不同的经验关系,但简单的经验反演方法适用性有限。在一般情况下,入射角度对 FAPAR 的影响非常大,在太阳高度角较大时必须要考虑光子在冠层中的多次散射作用。

12.4 FAPAR 经验反演方法

从上节的 MC 模拟结果可以看出, FAPAR 与 LAI 等植被冠层结构密切相关,也受到太阳和观测角度的影响。迄今为止,已经有很多研究提出了各种经验和模型算法用于该参数估算。由于 FAPAR 与 LAI 之间具有很好的相关关系,在一些生物地球化学的过程模型中, FAPAR 是作为 LAI 和消光系数的函数来计算的(Ruimy et al., 1999)。而在很多遥感研究中,冠层吸收的 PAR 通常通过与 NDVI 的线性或非线性关系计算(Prince and Goward, 1995; Tucker, 1979)。LAI-FAPAR 以及 NDVI-FAPAR 的关系是在估算各种空间尺度的 GPP 和 NPP 的文献中应用较广的主要方法(Field et al., 1995; Running et al., 2004)。本节主要介绍经验反演算法。

12.4.1 基于 LAI 的经验算法

FAPAR 可以通过与叶面积指数建立经验关系估算得到。Wiegand 等(1992)得到 FAPAR 与 LAI 的指数经验关系式为

$$FAPAR = 1 - e^{-LAI}, R^2 = 0.952, RMSE = 0.054 \quad (12.3)$$

Casanova 等(1998)也提到:由于透过冠层的 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

$$FAPAR = 1 - e^{-K \times LAI}, K \text{ 为消光系数} \quad (12.4)$$

但是由于这类方法需要先得到叶面积指数,而且还需要确定冠层的消光系数,所以在遥感反演中并不常用。

12.4.2 基于植被指数的经验算法

FAPAR 还可以通过与植被指数建立经验关系反演得到,可以通过原始影像、反射率影像、大气校正后的影像计算出的 NDVI 等植被指数与地面实测 FAPAR 建立回归方程,以此来反演 FAPAR。此方法虽然方便灵活,但是由于植物对光的吸收随植物对光反射的季相变化而变化,易受植被类型、生长阶段、立地环境等多种因子影响,模型的应用有较大的局限性。

研究表明,在一定条件下,FAPAR 与 NDVI 存在线性关系(Hatfield et al., 1984; Sellers 1985; Goward and Huemmrich, 1992)。Myneni 等(1994)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 FAPAR 与 NDVI 的关系,发现 FAPAR 与 NDVI 的关系对背景、大气和冠层双向反射特性比较敏感,如果研究局限于星下点附近,大气和双向反射特性的影响可以忽略,在土壤是中等反射率的情况下,背景的影响也可以忽略。因此,Myneni 等认为,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° 观测,土壤背景中等亮度(NDVI 大约为 0.12),在 550nm 处大气光学厚度小于 0.65。

Roujean 和 Breon(1995)使用 SAIL 模型模拟冠层内部的辐射传输以及表面的反射,研究了不同太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角下 FAPAR 和 NDVI 的关系,结果发现两者的关系在太阳天顶角或观测天顶角增加时会有所改善,分析其原因是斜视时光线路径增加,背景影响减小,但是也随之带来 NDVI 对较高 LAI 的饱和问题。

Myneni 等在 NASA 的 FAPAR 产品算法(1999)中采用的备用方案也是基于 NDVI 的经验算法。VPM 模型中的 FAPAR 是 MODIS 增强植被指数 EVI(Enhanced Vegetation Index)(Huete and Liu, 1996)的函数,EVI 和 NDVI 的区别就是在 NDVI 的基础上增加了蓝光波段的反射率。

CASA 模型(Potter, 1993)中 FAPAR 算法也采用了归一化植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)的线性拉伸模式,即比值植被指数, $(1 + NDVI)/(1 - NDVI)$ (Sellers, 1985, 1994), FAPAR 的计算如下式所示:

$$FAPAR = \min((SR - SR_{min}) / (SR_{max} - SR_{min}), 0.95)$$

其中,SR 为比值植被指数, $SR = (1 + NDVI)/(1 - NDVI)$ 。Glo-PEM 模型中的 FAPAR 是

SR 的线性函数(Prince and Goward, 1995):

$$FAPAR = (SR - SR_{min})(FPAR_{max} - FPAR_{min}) / (SR_{max} - SR_{min})$$

相比 NDVI 和 SR 而言, 差值植被指数 DVI [式(12.5)] 能最大限度消除土壤背景影响, 植被稀疏时的效果明显改善, 但它受光谱和方向性冠层特性影响很大, 因为当可见光和近红外反射以同样比例增加时, NDVI 不变, 但 DVI 会改变; DVI 适用于植被稀疏的情形, NDVI 适用于植被浓密的情形。作者们提出的复归一化植被指数 RDVI [式(12.6)] 则在任何植被覆盖的状况下, 都与 FAPAR 具有近似线性相关关系。但这种关系在太阳或传感器垂直向下观测时, 受土壤背景反射影响较大, 很多研究还分析了土壤可调植被指数 [式(12.8)] (Soil-adjusted Vegetation Index, SAVI) (Huete, 1988) 与 NDVI、DVI 和 RDVI 的关系, 当 C 取较小值 (< 0.15) 时, SAVI 与 NDVI 效果近似, C 取较大值 (> 0.85) 时, SAVI 与 DVI 效果近似, 当 $C = \sqrt{NIR + VIS}$ 时, 与 RDVI 等效。

$$DVI = NIR - VIS \quad (12.5)$$

$$RDVI = (NDVI \cdot DVI)^{\frac{1}{2}} = \frac{NIR - VIS}{\sqrt{NIR + VIS}} \quad (12.6)$$

$$SAVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS + C} (1 + C) \quad (12.7)$$

其中, C 为 0~1 之间变化的常数, 越趋近于 1, 土壤影响越小, 但受方向性的影响增加。NIR 为近红外波段的反射率, VIS 为可见光波段的反射率。

王培娟等(2003)用冬小麦生长期内的 LAI 和 FAPAR 数据, 研究 FAPAR 与植被指数(VI)之间的关系, 也发现 RDVI 与 FAPAR 和 LAI 之间的相关性要比 NDVI 好, 相关性分别达到 0.9752 和 0.9784。

NDVI 等植被指数只是部分决定 FAPAR 值, FAPAR 还受叶片内部组分, 特别是叶绿素含量的影响。但不同研究得出的结论并不一致。Dawson 等(2003)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, 表现为 NDVI 值相同时, 叶绿素含量越高, 遥感估算 FAPAR 值显著减小, 也就是说, 高叶绿素含量和林下植被的增加会导致遥感高估 FAPAR。而有些 FAPAR 野外测量结果显示, 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。因此在估算 FAPAR 时必须加入其他因素的影响, 如太阳天顶角、LAD、土壤背景等, 并且必须区分 FAPAR 和 FIPAR(冠层光能截获效率)。

表 12.1 对目前基于植被指数或 LAI 的 FAPAR 不同算法进行了总结。

表 12.1 基于植被指数或 LAI 的 FAPAR 不同算法(高彦华, 2007)

算法	R^2	取得经验值方法	植被类型	参考文献
$FAPAR = 1.2 \times NDVI - 0.18$	0.974	PAR 测量	春小麦, 生长阶段	Hatfield et al., 1984
$FAPAR = 0.6 - (2.2 \times NDVI) + (2.9 \times NDVI^2)$	—	PAR 测量	玉米, 生长阶段	Gallo et al., 1985
$FAPAR = 1.408 \times NDVI - 0.396$	0.92	PAR 测量	Alfalfa	Pinter, 1993
$FAPAR = 1.25 \times NDVI - 0.025$	—	Max/Min	热带雨林/沙漠	Ruimy et al., 1994

算法	R^2	取得经验值方法	植被类型	参考文献
$FAPAR=0.279 \times SR - 0.294$	—	Max/Min	冬季 Alaska/理论最大值	Heimann and Keeling, 1989
$FAPAR=0.171 \times SR - 0.186$	—	Max/Min	高植被/沙漠	Sellers et al., 1994
$FAPAR=0.248 \times SR - 0.268$	—	Max/Min	矮植被/沙漠	Sellers et al., 1994
$FAPAR=1.24 \times NDVI - 0.23$	—	1D 辐射传输方程	—	Bret et al., 1989
$FAPAR=1.164 \times NDVI - 0.143$	0.92	1D 辐射传输方程	—	Myneni and Williams, 1994
$FAPAR=1.21 \times NDVI - 0.04$	0.99	1D 辐射传输方程	—	Goward et al., 1994
$FAPAR=1.67 \times NDVI - 0.08$	—	1D 辐射传输方程	—	Prince and Goward, 1995
$FAPAR = 0.105 - (0.323 \times NDVI) + (1.168 \times NDVI^2)$	0.85	1D 辐射传输方程	—	Moreau and Li, 1996
$FAPAR=3.257 \times SAVI - 0.07$	0.86	1D 辐射传输方程	—	Moreau and Li, 1996
$FAPAR=0.846 \times NDVI - 0.08$	0.92	3D 辐射传输方程	稀疏植被	Myneni et al., 1992
$FAPAR = 1.723 \times MSAVI - 0.137$	0.968	3D 辐射传输方程	热带稀疏草原植被	Begue and Myneni, 1996
$FAPAR=2.213 \times (\Delta MSAVI) **$	0.931	3D 辐射传输方程	热带稀疏草原植被	Begue and Myneni, 1996
$FAPAR=1.71 \times (\Delta NDVI) **$	0.931	3D 辐射传输方程	热带稀疏草原植被	Begue and Myneni, 1996
$FAPAR=1 - e^{(LAI(-K))}$	—	比尔朗伯定律	—	Gower et al., 1999
$FAPAR = \min\left(\frac{SR - SR_{min}}{SR_{max} - SR_{min}}, 0.95\right)$	—	CASA 模型	—	Potter et al., 1993
其中: $SR = (1 + NDVI) / (1 - NDVI)$				

** i 为初始和最终植被指数之差。

12.5 已有遥感 FAPAR 产品模型反演算法简介

目前,应用最广泛的 FAPAR 产品是 1km 分辨率的 AVHRR 和 MODIS 全球 LAI 和 FAPAR 产品。除此之外,加拿大遥感中心采用光谱植被指数建立 FAPAR 的计算模型,利用 AVHRR 生成了自 1993 年以来的全国 FAPAR 图,每旬一次,1km 分辨率(Chen, 1996)。欧委会联合研究中心(European Commission Joint Research Center)开发了针对欧洲的植被状况的 JRC_FPAR 产品。JRC_FPAR 针对全球的 FAPAR 产品分辨率为 10km,对欧洲分辨率为 2km。其中,MODIS LAI\FPAR 和 JRC_FPAR 产品生产主算法都是基于辐射传输模型开发的模型反演算法,经验算法只作为主算法失效时的备用算法。辐射传输模型是目前相对成熟的基于物理光学基础的模型,利用辐射传输模型的方法反演 FAPAR 具有普适性,被广泛应用于大尺度的 FAPAR 反演。下面将简要介绍 MODIS

LAI\FPAR 和 JRC_FPAR 产品定量算法,读者也可以从中了解基于辐射传输模型计算 FAPAR 的主要原理和反演方法。

12.5.1 MODIS FAPAR 反演算法

目前对地观测领域中,中分辨率成像光谱仪(MODIS)是搭载 EOS-AM1 系列卫星的主要传感器之一,具有较高的时间分辨率,每 1~2 天获取一次全球的综合信息;MODIS 具有 36 个光谱波段,空间分辨率包括 250 m, 500 m 及 1000 m 三种,每天上午、下午分别过境。MODIS 提供的长期对地观测数据有助于监测地球表层的全球动态和过程,并可获得底层大气的信息。MODIS 的全球覆盖,多空间分辨率、多光谱以及免费产品服务政策,使得它成为目前研究全球尺度下大气、海洋和陆地生化过程的重要信息源。

MODIS LAI\FPAR 主算法的基本原理是,用三维(3D)辐射传输(RT)模型描述冠层的光谱和方向特性,然后依据给定生物类型的冠层结构和土壤特征建立查找表,比较观测的 BRDF 和查找表中存储的模型 BRDF,当观测的 BRDF 和模型 BRDF 相差某个阈值时,所得到的 LAI 和 FAPAR 就认为是可能的解(Myneni et al., 1997, Knyazikhin et al., 1998)。

冠层结构是 3D 辐射传输模型在植被冠层中最重要的决定变量,不同植被的冠层差异较大,因此,估算冠层辐射时,需要认真考虑三个方面:①个体植被、树木或群落冠层的结构;②植被元素(叶子、茎)及地面背景的光学特性,前者依赖于植被的水分及色素含量等;③大气状况,对太阳瞬时辐射影响较大。最初的 MODIS 的 LAI\FPAR 算法中,根据冠层结构,将全球陆地植被分为 6 类(表 12.2)。

表 12.2 辐射传输模型角度全球陆地植被中的冠层结构分布(Knyazikhin et al., 1998)

项目	草地和谷类作物	灌木类	阔叶作物	草原	阔叶林	针叶林
水平均一	否	是	不确定	是	是	是
地面覆盖度	100%	20%~60%	10%~100%	20%~40%	>70%	>70%
竖直均一(叶子光谱和叶倾角)	否	否	否	是	是	是
茎/树干	否	否	否	绿色茎	是	是
下层植被	否	否	否	草地	是	是
植被群聚	轻度	随机	中度	轻度	重度	重度
冠层阴影	无	部分	无	无	有	有
背景亮度	中度	亮	暗	中度	暗	暗

MODIS 算法利用 3D 辐射传输(RT)模型描述冠层的光谱和方向特性,考虑到植被冠层内辐射传输的特殊性,把三维辐射传输模型分解为两个子模型:①考虑冠层内辐射场为黑体背景时的辐射(黑土壤问题),②单独考虑冠层底各向异性发射源的辐射(S 问题),而冠层反射率和吸收率认为是两者的加权平均。据此,FAPAR 在波长 λ 处的计算公式可以表达为

$$a_{\lambda}(\Omega_0) = a_{\text{bs},\lambda}(\Omega_0) + a_{\text{S},\lambda} \frac{\rho_{\text{eff}}(\lambda)}{1 - \rho_{\text{eff}}(\lambda) \cdot r_{\text{S},\lambda}} t_{\text{bs},\lambda}(\Omega_0) \quad (12.8)$$

其中, $a_{\lambda}(\Omega_0)$ 为冠层在波长 λ 处的吸收率, Ω_0 为太阳入射方向; $a_{\text{bs},\lambda}(\Omega_0)$ 和 $t_{\text{bs},\lambda}(\Omega_0)$ 为黑土壤的冠层方向性吸收率和方向性透射率; $a_{\text{S},\lambda}$ 和 $r_{\text{S},\lambda}$ 为冠层底部各向异性发射源造成的冠层吸收率和冠层反射率; $\rho_{\text{eff}}(\lambda)$ 为地表在波长 λ 处的有效反射率。

植被冠层瞬时吸收的 PAR 的比例可以用下式估算:

$$\text{FPAR}(\text{bio}, p) = \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} a_{\lambda}^{\text{hem}}(\Omega_0) e(\lambda) d\lambda = Q_{\text{bs}}(\text{bio}, \text{LAI}, \Omega_0) + Q^q(\text{bio}, p, \Omega_0)$$

其中

$$\begin{aligned} Q_{\text{bs}}(\text{bio}, \text{LAI}, \Omega_0) &= \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} a_{\text{bs},\lambda}^{\text{hem}}(\Omega_0) e(\lambda) d\lambda \\ Q^q(\text{bio}, p, \Omega_0) &= \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} a_{q,\lambda}(\Omega_0) \frac{\rho_{q,\text{eff}}(\lambda)}{1 - \rho_{q,\text{eff}}(\lambda) r_{q,\lambda}} t_{\text{bs},\lambda}^{\text{hem},q} e(\lambda) d\lambda \\ &= \int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} \frac{a_{q,\lambda}(\Omega_0)}{t_{q,\lambda}(\Omega_0)} [\tilde{A}_{\lambda}^{\text{hem}}(\Omega_0) - r_{\text{bs},\lambda}^{\text{hem}}(\Omega_0)] e(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

其中, Q_{bs} 项为黑体土壤条件下在冠层内的吸收情况; Q^q 为由于冠层与地面(土壤或者林下叶层之间)的相互作用额外吸收的光, 其中 $p \in P_{\text{bio}}$, bio 代表生物量; e 为瞬时冠层顶部的单色光通量占总 PAR 通量的比例, 用下式表示:

$$e(\lambda) = \frac{E_{0,\lambda} e_{\lambda}^{\text{hem}}(\Omega_0)}{\int_{400\text{nm}}^{700\text{nm}} E_{0,\lambda} e_{\lambda}^{\text{hem}}(\Omega_0) d\lambda}$$

其中, $E_{0,\lambda}$ 为 λ 波段太阳入射辐射光谱的辐射通量密度值; e_{λ}^{hem} 为标准化的瞬时辐射占表面瞬时总辐射 $E_{0,\lambda}$ 比例; 所有值平均值 $p \in P_{\text{bio}}$ 经过 $(p)h$ 检验, 此时就可以作为估算的 FAPAR 值。如

$$\text{FPAR}_{\text{bio}} = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} \text{FPAR}(\text{bio}, p)$$

其中, N_p 为经过检验的 $p \in P_{\text{bio}}$ 数目。当该方程没有解时(如 $F_{\text{bio}} = 0$), 就利用上面提到的 NDVI-FAPAR 回归关系来得到 FAPAR 估算值(Myneni et al., 1997, Knyazikhin et al., 1998)。

MODIS 的 LAI/FPAR 查找表算法流程图见图 12.12。

Tian 等(2000)在不同地域和不同情形下, 探讨了三维辐射传输模型失效的原因, 发现只有当像元的光谱信息落在查找表所建立的光谱和角度区间时, 反演的 LAI 和 FAPAR 才是有效的; 可以用饱和频率(Saturation Frequency)和变差系数(Coefficient of Variation)(标准差除以平均值)衡量反演结果的质量, 饱和频率和变差系数越小, 结果质量越高; 比如森林拥有高的饱和频率, 但其变差系数不高, 因此其数据质量可以满足要求。

基于 RT 的算法得到的结果, 当 $\text{LAI} > 5$ 时, 由于 LAI 饱和原因, 地表反射率对 LAI/FPAR 不敏感, 此时只能用该算法。当输入反射率数据的不确定性过大或由于模型构建

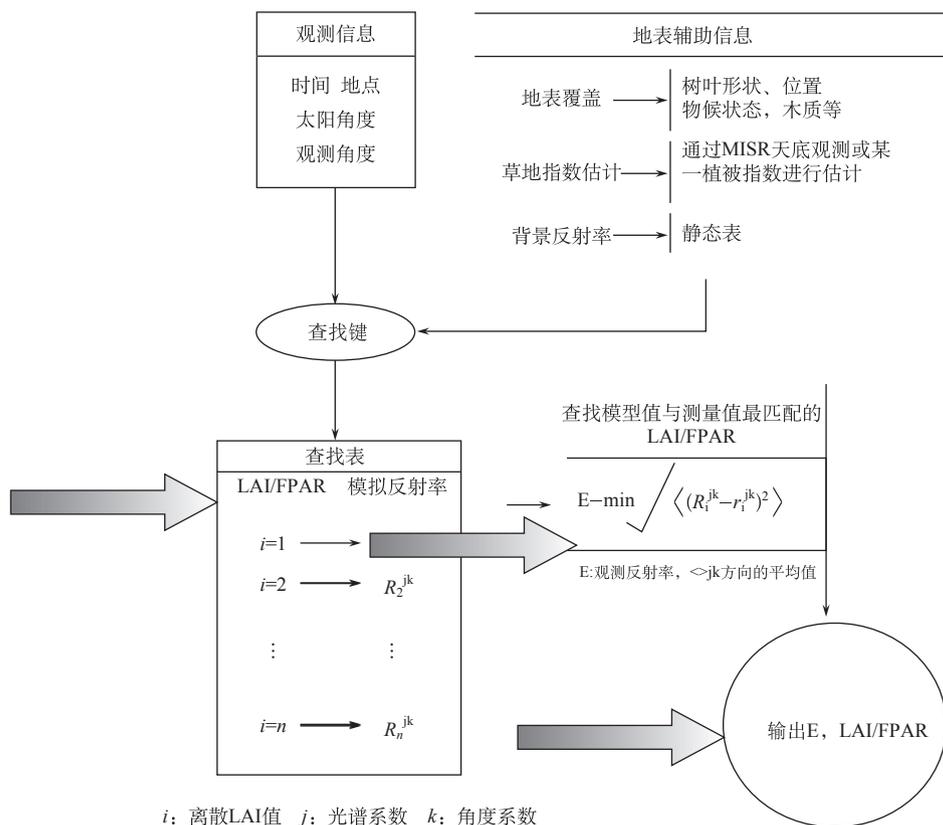


图 12.12 MODIS LAI/FPAR 算法中查找表算法流程(Myneni et al., 1992)

错误导致不正确的模型 BRDF 时, 三维辐射传输模型算法失效, 采用备份算法 (LAI/FPAR-NDVI 经验关系)。

最新的 Collection 5 LAI/FPAR 产品对算法进行细化, 以改进 LAI/FPAR 反演的质量。用新的 (C4, C5) 8 种植被类型图替换原来的 (C3) 产品 6 种 LAI/FPAR 植被类型图, C3 中的阔叶林和针叶林类被分为落叶和常绿两个亚类。同时也对 8 种植被类型的 LAI/FPAR 的 LUT 算法进行了细化。利用新的随机 RT 模型, 可以更好地表达或展示冠层结构以及木本植被类型固有的空间异质性。

新的查找表的参数设定将保持模型模拟与实测的 MODIS 地表反射率一致, 以尽量减少 LAI 反演异常 (LAI 高估并且在中等或稠密植被区反演算法失败), 以及 LAI 和 FAPAR 反演的不一致 (在稀疏植被区, LAI 反演正确但 FAPAR 高估)。

12.5.2 JRC_FPAR 反演方法

JRC_FPAR 是欧委会联合研究中心 (European Commission Joint Research Center) 开发的针对欧洲的植被状况的 FAPAR 产品算法。JRC_FPAR 针对全球的 FAPAR 产

品分辨率为10km,对欧洲分辨率为2km。JRC_FPAR 算法也是基于物理模型来反演 FAPAR(图 12.13)。

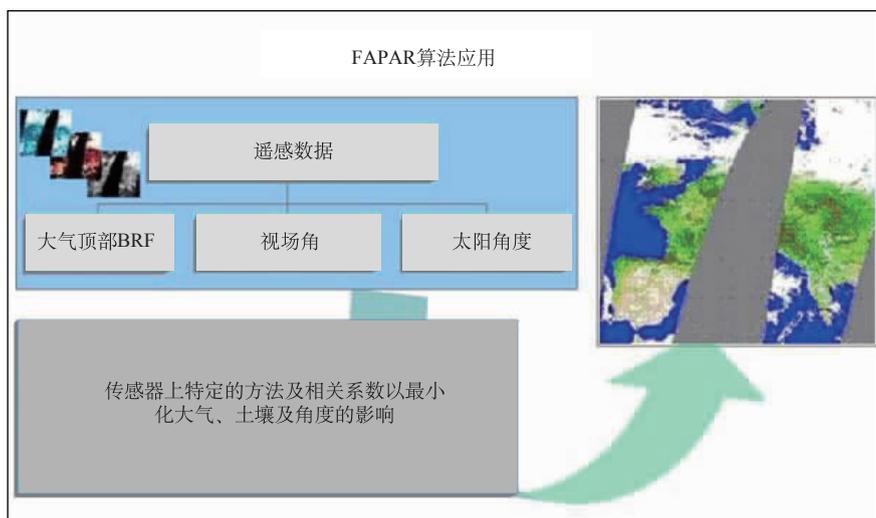


图 12.13 FAPAR 遥感反演示意图

(http://fapar.jrc.ec.europa.eu/WWW/Data/Pages/FAPAR_Algorithms/FAPAR_Algorithms_Fapar.php, 2012)

FAPAR 值的模拟主要针对光合有效辐射(400~700nm)区域。因此,利用连续植被冠层模型(Gobron et al., 1997),并引入 6S 模型模拟陆地表面特征(Vermote et al., 1997)模拟 FAPAR 值。

FAPAR 算法分两个步骤:

- 第一,进行大气校正以保证可以消除大气及角度的影响;
- 第二,与数学方法相结合,计算 FAPAR 值。

JRC_FPAR 算法基于校正后的各波段光谱值计算 FAPAR,计算公式为

$$g_0 = (\rho_{Rred}, \rho_{Rnir}) = \frac{l_{01}\rho_{Rnir} - l_{01}\rho_{Rred} - l_{03}}{(l_{04} - \rho_{Rred})^2 + (l_{05} - \rho_{Rnir})^2 + l_{06}}$$

其中,多项式 g_0 的相关系数 l_{0m} 是经过优化形成一个先验值,从而使 $g_0(\rho_{Rred}, \rho_{Rnir})$ 值尽可能地接近利用训练数据优化得到的对某一特定的传感器测得的冠层 FAPAR 值。然后,将蓝光波段、红光、近红外波段及不同视角的亮度等值作为双向反射率因子输入反演算法中。

12.6 基于混合植被光谱模型的 FAPAR 反演方法

从上面两节可以看出,目前遥感反演 FAPAR 的主要方法是经验公式法和基于辐射传输模型所建立的查找表法。基于经验关系的算法考虑的因素包括 NDVI、LAI、叶绿素等,并建立它们与 FAPAR 之间的经验关系式。但 FAPAR 还受到包括太阳等因素的影响(周彬等,2008),因此经验关系的缺点是经验关系的系数甚至会随影像成像时间而变。基于辐射传输模型建立的查找表反演 FAPAR 的方法也经常面临失效的风险,有时必须

用经验关系替代,并且所建立的查找表只存储单波段的吸收率和透过率等,波段间的转换用公式换算,换算过程也不可避免造成误差。

通过深入分析植被辐射传输机理,基于结合几何光学模型和辐射传输模型优点的混合模型,本节将介绍一种定量反演 FAPAR 的模型,既考虑了冠层和土壤的光照面及阴影面,也考虑了光子在冠层内和冠层与土壤间的多次散射,能较准确地计算植被冠层的 FAPAR。

12.6.1 出发方程

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。作用过程如图 12.14 所示。

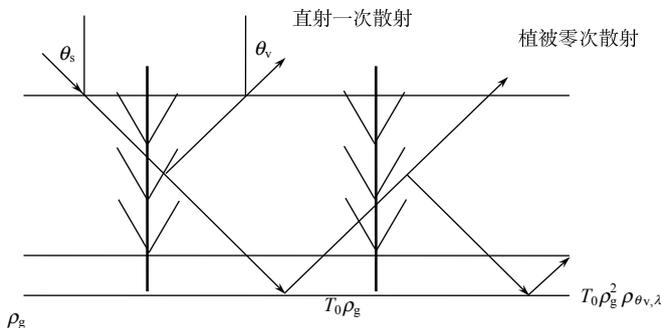


图 12.14 光子与冠层及土壤碰撞过程

光子直接穿击冠层到达土壤的概率为冠层的透过率,

$$T_0 = e^{-\lambda_0 \cdot \frac{G_s}{\mu_s} \cdot \text{LAI}} \quad (12.9)$$

其中,LAI 为植被的叶面积指数; λ_0 为考虑植被群聚效应的尼尔逊(Nilson)参数; G_s 为单位面积叶子在与太阳入射垂直平面的平均投影; μ_s 为太阳天顶角的余弦。入射路径冠层二向性反射率的表达式为(金慧然等,2007)

$$\rho_{\theta_v,\lambda} = \beta \cdot \rho_{c,\lambda} [e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \cdot \Gamma(\phi) \cdot \text{LAI}} - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \cdot \text{LAI}}] + \rho_{c,\lambda} (1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \cdot \Gamma(\phi) \cdot \text{LAI}}) \quad (12.10)$$

其中, $\rho_{\theta_v,\lambda}$ 为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 1~0 的单调递减函数; $\Gamma(\phi) = \exp\left(-\frac{\phi}{\pi - \phi}\right)$ 。以 θ_v 为可变参数,对 θ_v 进行 2π 空间积分取平均,代表直射一次散射在 2π 空间的平均效应。

考虑叶片反射率近似等于透过率,则入射路径冠层吸收为

$$\text{FAPAR}_{\theta_v, \lambda, 0} = 1 - T_0 - 2\rho_{\theta_v, \lambda} \quad (12.11)$$

土壤反射路径上的吸收为

$$\text{FAPAR}_{\theta_v, \lambda, 1} = T_0 \rho_g - T_0 \rho_g T_{\theta_v} - 2T_0 \rho_g \rho_{\theta_v, \lambda} = T_0 \rho_g (1 - T_{\theta_v} - 2\rho_{\theta_v, \lambda})$$

类似地,土壤二次反射路径上的吸收为

$$\text{FAPAR}_{\theta_v, \lambda, 2} = T_0 \rho_g^2 \rho_{\theta_v, \lambda} (1 - T_{\theta_v} - 2\rho_{\theta_v, \lambda})$$

冠层单方向单波段总吸收

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

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

$$\text{FAPAR}'_{\theta_v, \lambda} = \text{FAPAR}_{\theta_v, \lambda, 0} \left(1 + \alpha \cdot \frac{T_0 \rho_g}{1 - \rho_g \rho_{\theta_v, \lambda}} \right) \quad (12.12)$$

以 θ_v 为可变参数,对 θ_v 进行 2π 空间积分取平均,代表直射一次散射在 2π 空间的平均效应。

400~700nm 的 2π 空间瞬时吸收为

$$\text{FAPAR}' = \int_{0.4 \sim 0.7} d\lambda \int_{2\pi} \text{FAPAR}'_{\theta_v, \lambda} d\Omega \quad (12.13)$$

日 FAPAR 是对瞬时 FAPAR 以太阳天顶角的余弦为权重积分得到:

$$\text{FAPAR}^d = \frac{\int \text{FAPAR}' \cdot \cos\theta d\theta}{\int \cos\theta d\theta} \quad (12.14)$$

12.6.2 与蒙特卡罗模拟结果对比分析

为了验证该 FAPAR 反演模型,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,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 12.15 所示。从图中可以看出,模型模拟和 MC 模拟非常吻合。模型模拟和 MC 模拟的趋势完全一致,二者的差异在叶面积指数大时稍大一些,但均小于 3%。

图 12.16 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的原因。由于忽略了多次散射项,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%。

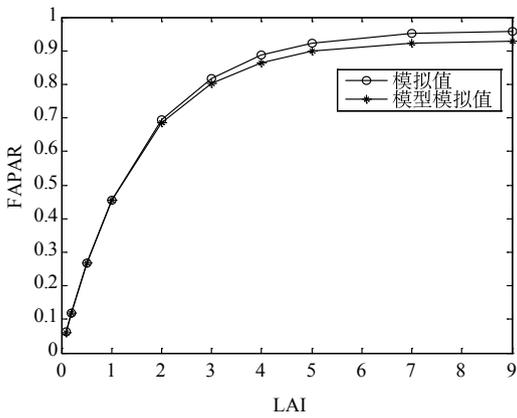


图 12.15 不同 LAI 时 MC 和模型模拟 FAPAR 比较

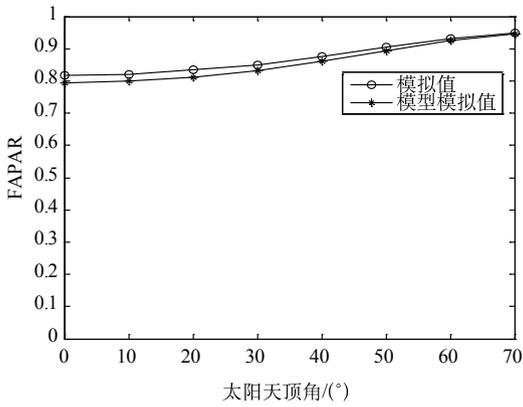


图 12.16 不同太阳天顶角时 MC 和模型模拟 FAPAR 比较

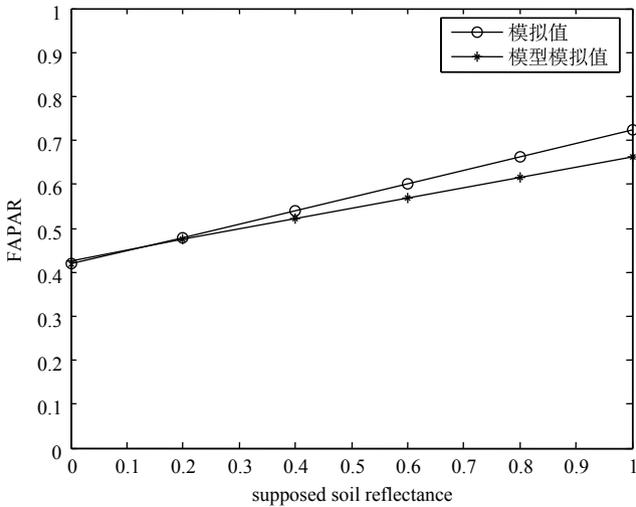


图 12.17 MC 和模型模拟 FAPAR 与不同土壤反射率的关系

同时分析了土壤背景反射率对冠层 FAPAR 的贡献量。随着土壤反射率的增加,从土壤背景反射出来的光子路径上的冠层吸收也随之增加,因此土壤反射率高就意味着高植被 FAPAR 值。假设土壤反射率超过 0.6 时,模型值远低于 MC 值;然而土壤反射在 PAR 区间(400~700nm)通常小于 0.4,实际情况模型误差其实很小。模拟结果也意味着出射路径的冠层吸收不可忽略(图 12.17)。

对不同叶倾角分布,模型和 MC 结果如表 12.3(LAI=3.5)和表 12.4(LAI=1)所示。由于实验设定了一个较小的太阳天顶角(小于 45°),喜平型植被的 FAPAR 值最大,球面型其次,喜直型最小。模型值稍小于 MC 值,误差大约为 2%(表第四列)。当忽略从土壤背景反射出来的光子路径上的冠层吸收时,模型 FAPAR 值列在表第三列,相应的误差列在最后一列;显然这种情形下的平均误差较大,当 LAI 较低时甚至超过 7%。另一方面,由于提出的模型由于考虑了从土壤背景反射出来的光子路径上的冠层吸收,误差与 MC 模拟结果相比仅为大约 2%。

表 12.3 当 LAI 较大时,模型和 MC 的 FAPAR 与 LAD 的关系

项目	MC FAPAR	模型 FAPAR	模型 FAPAR*	误差/%	误差*/%
喜平型	0.9080	0.8940	0.8822	1.547	2.837
球面型	0.8511	0.8321	0.8191	2.239	3.764
喜直型	0.8297	0.8157	0.8011	1.685	3.445

注:该实验设定参数 LAI = 3.5, $\theta_s = 30^\circ$, $\rho_g = 0.1181$ 。

* 表示当忽略从土壤背景反射出来的光子路径上的冠层吸收时的情形。

表 12.4 当 LAI 较小时,模型和 MC 的 FAPAR 与 LAD 的关系

项目	MC FAPAR	模型 FAPAR	模型 FAPAR*	误差/%	误差*/%
喜平型	0.5517	0.5416	0.5212	1.834	5.526
球面型	0.4495	0.4458	0.4175	0.819	7.123
喜直型	0.4440	0.4242	0.3961	4.448	10.780

注:该实验设定参数 LAI = 1, $\theta_s = 30^\circ$, $\rho_g = 0.1181$ 。

* 表示当忽略从土壤背景反射出来的光子路径上的冠层吸收时的情形。

12.6.3 地面实验验证

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 2008 年 6 月 16 日,早 8 点到晚 8 点。主要测量入射太阳辐射通量 $I_{\text{TOC}}^{\downarrow}$, 地面辐射通量 $I_{\text{Ground}}^{\downarrow}$ 、地表反射辐射通量 $I_{\text{Ground}}^{\uparrow}$ 和出射冠层辐射通量 $I_{\text{TOC}}^{\uparrow}$ 。

利用式(12.15)可以计算出 APAR 和 FAPAR。

$$\text{APAR} = I_{\text{TOC}}^{\downarrow} - I_{\text{Ground}}^{\downarrow} + I_{\text{Ground}}^{\uparrow} - I_{\text{TOC}}^{\uparrow} \quad (12.15)$$

实测 APAR 的日变化如图 12.18 所示。APAR 在下午一点达到最大值。实测 FAPAR 的日变化如图 12.19 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,进一步验证了定量 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。

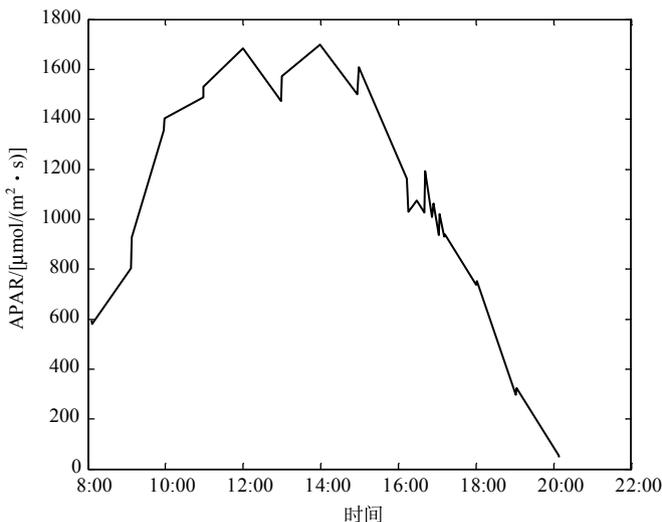


图 12.18 6月16日 APAR 日变化

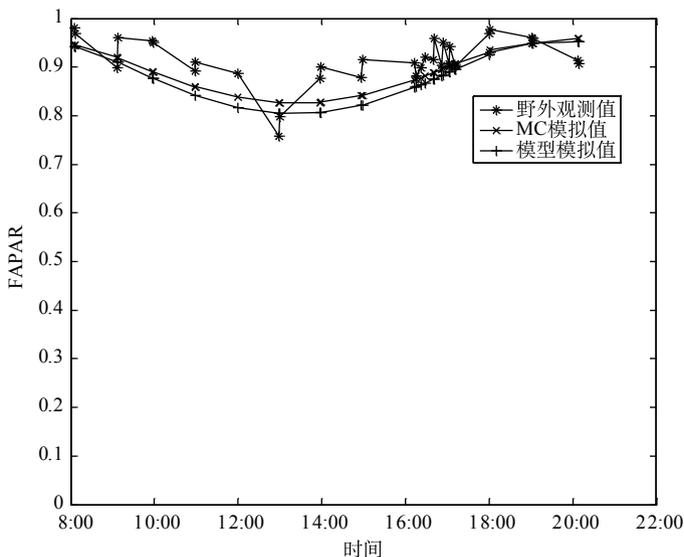


图 12.19 FAPAR 测量值、MC、模型模拟值比较

12.6.4 FAPAR 反演算法

由 12.6.1 节对 FAPAR 出发方程的分析可知, FAPAR 反演的输入参数包括叶面积指数(LAI)、尼尔逊(Nilson)参数、G 函数(G_s , G_v)、叶片反射率($\rho_{c,\lambda}$)、土壤背景反射率(ρ_g)、太阳天顶角(θ_s)、太阳-目标-传感器角度(ϕ), 用函数形式表达为

$$FAPAR = F(LAI, \lambda_0, G_s, G_v, \rho_{c,\lambda}, \rho_g, \theta_s, \phi)$$

其中, LAI 为冠层基本参数, 从反射率影像反演获得; λ_0 、 G_s 、 G_v 取决于植被类型, 应用地面实测的先验知识获取; $\rho_{c,\lambda}$ 、 ρ_g 从标准光谱库或地面实测的光谱中提取, 也可用遥感影像的纯像元光谱替代; θ_s 用成像时间和地点输入天文软件计算, 遥感影像的头文件也有提供; ϕ 取决于太阳和视线方向的夹角以及冠层的叶倾角, 从影像反演中获得。

FAPAR 的最终计算式为

$$FAPAR^t = \int_{0.4 \sim 0.7} d\lambda \int_{2\pi} FAPAR'_{\theta_v, \lambda} d\Omega$$

对立体角进行 2π 空间积分时, 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

$$\begin{aligned} FAPAR_{2\pi, \lambda} &= \frac{1}{\pi} \int FAPAR_{\theta_v, \lambda} \cos\theta d\Omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} FAPAR_{\theta_v, \lambda} \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \end{aligned} \quad (12.16)$$

其中

$$\begin{aligned} FAPAR_{\theta_v, \lambda} &= FPAR_{\theta_v, \lambda, 0} \left(1 + \alpha \cdot \frac{T_0 \rho_g}{1 - \rho_g \rho_{\theta_v, \lambda}} \right) \\ &= (1 - T_0 - 2\rho_{\theta_v, \lambda}) \left(1 + \alpha \cdot \frac{T_0 \rho_g}{1 - \rho_g \rho_{\theta_v, \lambda}} \right), \end{aligned}$$

其中, $\alpha = \frac{1 - T_{\theta_v} - 2\rho_{\theta_v, \lambda}}{1 - T_0 - 2\rho_{\theta_v, \lambda}}$, $T_{0, \theta_v} = e^{-\lambda_0 \frac{G_s, \theta_v}{\mu_s, \theta_v} \cdot LAI}$,

$$\begin{aligned} \rho_{\theta_v, \lambda} &= \rho_{c, \lambda} \left(1 - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \cdot \Gamma(\phi) \cdot LAI} \right) + \beta \cdot \rho_{c, \lambda} \left(e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \cdot \Gamma(\phi) \cdot LAI} - e^{-\lambda_0 \frac{G_v}{\mu_v} \cdot LAI} \right), \\ \Gamma(\phi) &= \exp\left(-\frac{\phi}{\pi - \phi}\right) \end{aligned}$$

对波长进行积分, 当 400~700nm 波长区间的单波段 FAPAR 数据较多时, 采用下式:

$$FAPAR^t = \frac{1}{700 - 400} \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{FAPAR_{\lambda_{i+1}} + FAPAR_{\lambda_i}}{2} (\lambda_{i+1} - \lambda_i) + FAPAR_{\lambda_1} (\lambda_1 - 400) + FAPAR_{\lambda_n} (700 - \lambda_n) \right] \quad (12.17)$$

其中, n 为波段数; FAPAR' 为 400~700nm FAPAR 的最终积分值; FAPAR $_{\lambda_i}$ 为第 i 个波段的 FAPAR 值。 λ_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) 为以纳米为单位的第 i 个波段的中心波长。方括号内后两个求和项是考虑起止波段中心波长不等于 400nm 和 700nm 而加入的修正项。

实际多光谱遥感影像一般只有三、四个波段, 采用下式:

$$FAPAR^t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n FAPAR_{\lambda_i} \frac{FAPAR'}{FAPAR'_{\lambda_i}} \quad (12.18)$$

其中, FAPAR' 为 400~700nm 积分平均的 FAPAR 参考值; FAPAR' $_{\lambda_i}$ 为第 i 个波段的 FAPAR 参考值。

概括利用本节提出的模型 FAPAR 反演基本流程如图 12.20 所示。

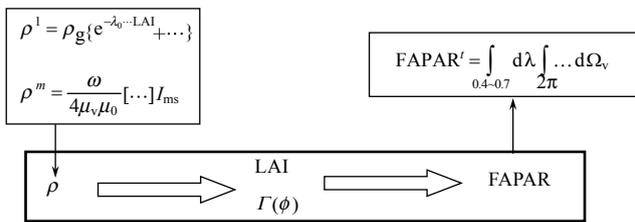


图 12.20 FAPAR 模型反演基本流程

本节在考虑由太阳入射方向、冠层结构和土壤背景,以及也考虑了光子在冠层内和冠层与土壤间的多次散射等多种因素情况下,基于植被混合模型建立了新的 FAPAR 反演模型,并进行了数值模拟和野外验证,并建立了利用该模型进行 FAPAR 反演的基本流程。

12.7 案例研究

12.7.1 研究区与数据

作为基于植被混合模型反演 FAPAR 的案例,将 12.6 节所述算法进一步应用于实际遥感影像的 FAPAR 反演。研究区选择我国第二大内陆河流域黑河流域中部的张掖市临泽和盈科灌区为试验区,黑河流域 ($37^{\circ}45' \sim 42^{\circ}40'N$, $97^{\circ}42' \sim 102^{\circ}04'E$) 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。属典型的大陆性荒漠草原气候。全年日照时间为 3053.9h,年总辐射量 $146.2\text{kcal}/\text{cm}^2$ 。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。研究区景观分类及主要植被群落及其分布请参考 <http://heihe.westgis.ac.cn/>。

12.7.2 基于多角度高光谱数据的 FAPAR 反演

1. CHRIS 数据预处理

在验证了模型的可靠性之后,利用 2008 年 6 月 4 日的 PROBE-CHRIS 高光谱多角度数据(图 12.21)进行了 FAPAR 反演。

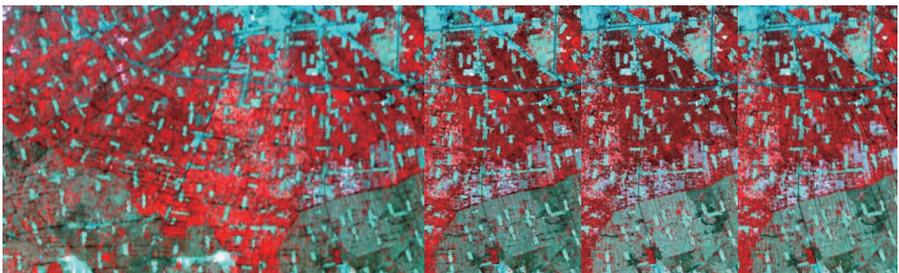


图 12.21 研究区几何纠正后 4 个角度 CHRIS 数据(从左至右角度分别是 55° , 36° , 0° , -36°)

CHRIS 是欧洲空间局与 2001 年 10 月 22 日成功发射的 PROBA 卫星上搭载的紧凑型高分辨率成像光谱仪,为紧凑型高分辨率成像分光计,可获取可见光至近红外的高空间、高光谱数据,共有五个成像模式:3,4,5 模式主要为陆地成像,模式 2 为水成像,模式 1 则包括陆地与水成像。其光谱范围从 400~1010nm,光谱间隔约为 10nm,光谱波段依成像模式从 18~62 个波段数不等;空间分辨率达 17m(模式 1 为 34m),从而有利于观测地物环境的细节信息。更为重要的是可以获取地面同一点的五个天顶角形态的影像,在 2.5min 内它可以获取 5 个不同的观测角度(-55°、-36°、0°、36°和 55°)获取 5 幅影像。本研究采用的 CHRIS 数据为模式 3,传感器包括 18 个波段(中心波长分别为:442、490、530、551、570、631、661、674、697、706、712、741、751、780、872、895、905、1018 nm)。图像的几何纠正、辐射纠正、大气纠正和去噪方法见 Govaerts 和 Verstraete 文献(1998)。

大气纠正是高光谱图像预处理中必不可少的一环。本研究采用了大气探空数据和 ACORN 1.5 模式对 CHRIS 影像进行大气订正。ACORN 是一个定量高光谱图像大气纠正软件,能够精确地消除大气造成的模糊效应,可以用来从高光谱影像得到光谱反射率。图 12.22 显示了大气校正前后植被光谱的变化情况。

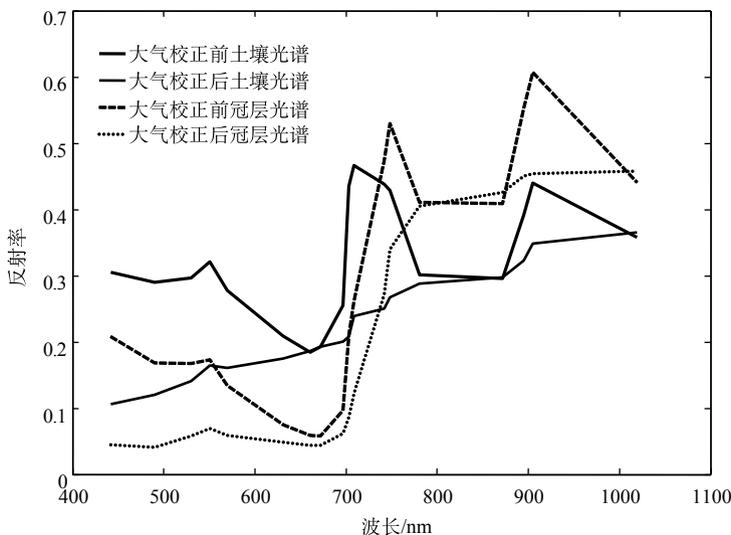


图 12.22 大气校正前后 CHRIS 图像的土壤和植被光谱

采用空间维与光谱维滤波相结合的综合滤波方法。首先对影像采用通用的 MNF 方法进行空间维去噪。然后选用傅里叶变换(FFT)在频率域内对光谱进行滤波处理。对信息和噪声的频谱分析表明,有用的信息往往具有低频特征,而噪声主要位于高频部分,所以选取巴特沃斯低通滤波器对数据进行处理,滤除无用的高频噪声。

为了准确识别叶面积指数与叶绿素变化所对应的频率范围,需选定不含噪声的冠层反射率光谱作为基准光谱。为此采用 PROSAIL 模型模拟的数据来进行对比实验,假定该模拟光谱不含噪声,通过改变模型中相应的参数值来获得不同条件下的植被冠层光谱。然后将冠层光谱进行傅里叶变换,根据光谱变化所能影响的频率范围来选定高频的截止

频率。目前 CHRIS 数据只有 18 个通道,在进行 FFT 变换前首先将 18 个通道插值为 180 个。选择巴特沃斯低通滤波器,并参考模拟数据傅里叶谱的高频信息,将巴特沃斯函数的最小值设为 0.012 83。图 12.23 表明了研究区 CHRIS 图像在滤波前和滤波后的效果对比。

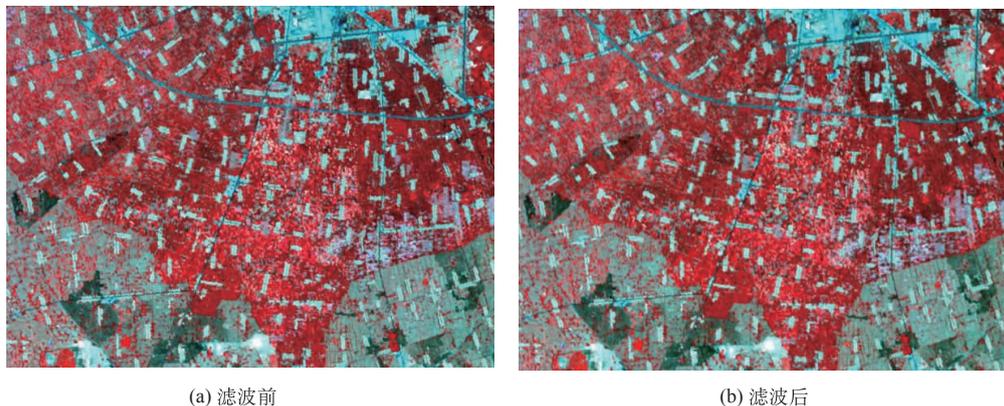


图 12.23 研究区 CHRIS 图像在滤波前和滤波后的效果对比(R: 872 nm, G: 661 nm, B: 551)

2. FAPAR 反演

模型反演 FAPAR 所需参数包括: LAI、尼尔逊(Nilson)参数、G 函数、叶片反射率、土壤反射率、太阳天顶角、观测天顶角、 $\Gamma(\phi)$ 。反演中应用地面实测的先验知识包括,玉米冠层在观测方向的 G 函数 $G_v = 0.6$, 尼尔逊参数 $\lambda_0 = 0.6$, 小麦冠层的 $G_v = 0.1$, $\lambda_0 = 0.97$ 。实测纯土壤和纯植被及影像植被像元的反射率光谱如图 12.24 所示。由天文软件计算得成像时刻太阳天顶角 $\theta_s = 24.97^\circ$, 太阳方位角 $\varphi_s = 137.00^\circ$ 。对 CHRIS 数据进行

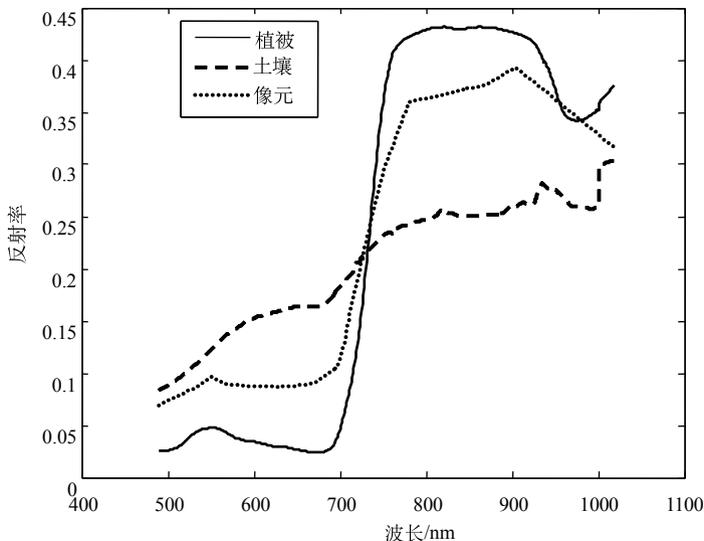


图 12.24 纯植被和纯土壤的反射率实测光谱及与影像植被像元对比

分类,分离出植被(小麦和玉米),然后对多光谱影像利用最小二乘(LSE)法则进行植被像元的 LAI 反演,并同步得到 $\Gamma(\phi)$ 。

首先利用式(12.12)计算得到单波段单一角度的农田 FAPAR,然后再利用式(12.17)进行角度积分,得到单波段半球空间积分的 FAPAR。由于 CHRIS 数据光谱分辨率比较高,在 400~700nm 有九个波段,因此利用式(12.18)反演得到 FAPAR,反演结果如图 12.25 所示。

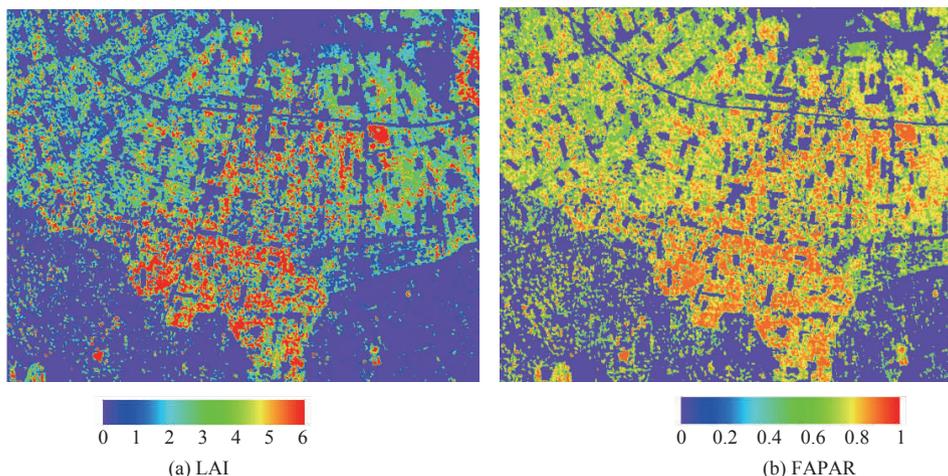


图 12.25 LAI 和 FAPAR 反演结果

3. 反演结果验证

为了验证反演结果,在影像成像前后的几分钟内对研究区的小麦地进行了 PAR 的同步测量,实测数据如表 12.5 所示。测量地点位于(38° 51' 27.59" N, 100° 24' 35.39" E)。观测作物为小麦,选择长势较为均一的盈科 5、6 号样地为主要观测点。反演 LAI = 6,实测 = 6.1,反演 FAPAR = 0.900 63,实测 = 0.8605,反演值和实测值很接近,表明该算法的有效性。

表 12.5 地表实测数据及 FAPAR 计算值

观测时分	上层光照*	冠层反射*	下层光照*	spread	地表反射*	APAR*	FAPAR
11:51:40	1711.6	56.9	191.7	1.13	9.8	1472.8	0.860 481 4

* 上层光照、冠层反射、下层光照、地表反射、APAR 的单位为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

12.7.3 基于多波段数据 FAPAR 遥感反演

多波段可见光—近红外数据是目前最常用于 FAPAR 反演的数据,本节也将以 SPOT 为例进行多波段数据的 FAPAR 反演。与 CHRIS 高光谱多角度数据不同,SPOT 只有三个波段,一个角度的数据,也只能反演得到单一角度的 3 个波段 FAPAR 值,需要通过波段和方向积分得到植被的 FAPAR 值。

遥感影像采用 2008 年 7 月 4 号格林尼治时间 4:23:26, 由 SPOT 卫星获得的全色 2.5 m 分辨率及多光谱 10m 分辨率影像, 影像范围在甘肃省张掖市临泽县中心平原区, 经纬度是: 39°6′~39°22′ N, 99°53′~100°18′ E。

SPOT-5 数据为 1A 级产品, 需要对其进行几何校正、大气纠正、辐射定标及交叉辐射纠正。在进行预处理之后才能进行 FAPAR 反演。

1. 数据预处理

由于所采用的 SPOT-5 数据为 1A 产品, 没有经过几何校正, 因此需要对其进行该操作。从 1:1 万地形图上选取地面控制点, 利用 ENVI 软件的提供 wrap from GCPs 功能对 SPOT-5 图像进行几何校正, 校正精度控制在 1 个像元以内。几何校正之后, 在 10m 分辨率图像上截出大小为 3500×2700 的区域, 利用地理坐标在 2.5 m 分辨率图像上找到大致对应的区域。将 10m 分辨率图像插值成 2.5m 分辨率, 用相关系数法, 找到精确匹配的区域。经过几何校正并截取的全色和多光谱影像如图 12.26 所示。

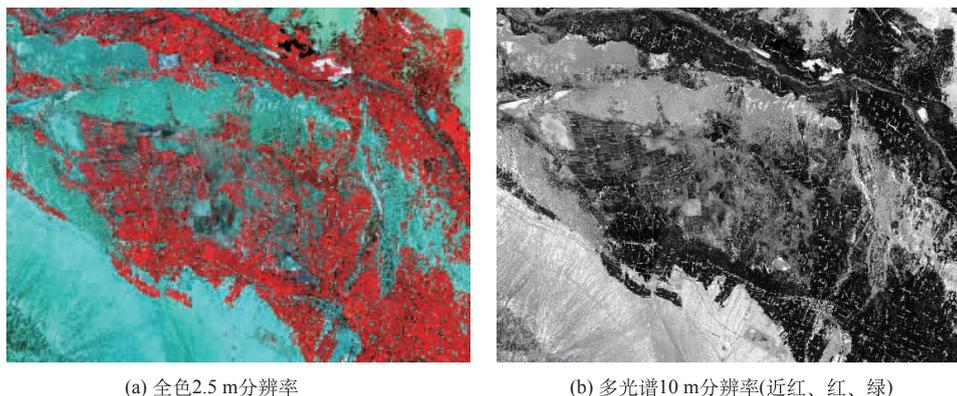


图 12.26 研究区 SPOT-5 影像

对以 SPOT1A 级产品, 直接进行定标处理后即可得到地物的辐射亮度值:

$$L = X/A + B$$

其中, L 为从像元值计算得到的地物在传感器瞳处的辐射亮度, 或称等效射亮度, 单位是 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; 参数 A 为 A_k, G_m, g, γ 等参数的综合处理值, 称作辐射校正后图像产品绝对定标增益, 单位是 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; 参数 B 则为图像产品的定标偏置, 单位是 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。SPOT-5 辐亮度定标系数见表 12.6。

表 12.6 SPOT-5 辐亮度定标系数

波段	绿	红	近红	短波红外	全色
增益/ $[W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)]$	1.677 074	1.225 02	1.738 55	6.332	1.388 448
偏置/ $[W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)]$	0	0	0	0	0

采用 6S (the Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum), version 4.1 (Vermote et al., 1997) 对 SPOT-5 进行大气纠正。并采用维纳滤波(刘正军等, 2004)进行交叉辐射项纠正。

利用最大似然法对遥感影像进行监督分类,影像中的地物主要包括玉米、小麦等植被、道路、城市、水体、水渠、荒漠。分类的主要目的是从遥感影像中区分植被和背景地物。2.5 m 分辨率的 SPOT-5 全色影像只包括一个波段,不便于进行分类,先把它与 10 m 分辨率 SPOT-5 多光谱影像进行融合,这里采用 ENVI 软件提供的格拉母-斯密特(Gram-Schmidt)光谱增强方法。融合后的 2.5 m 分辨率影像拥有多光谱信息,利用近红波段能很好地区分植被和背景。

2. FAPAR 反演

模型 FAPAR 反演所需参数包括:LAI、尼尔逊(Nilson)参数、G 函数、叶片反射率、土壤反射率、太阳天顶角、观测天顶角、 $\Gamma(\phi)$ 。应用地面实测的先验知识,玉米冠层的在观测方向的 G 函数 $G_v=0.6$, 尼尔逊参数 $\lambda_0=0.6$, 小麦冠层的 $G_v=0.1, \lambda_0=0.97$ 。利用 METADATA.DIM 文件的 SUN_ELEVATION 和 SUN_AZIMUTH 标签标识的太阳高度角和方位角,计算得成像时刻太阳天顶角 $\theta_s=20.79^\circ$, 太阳方位角 $\varphi_s=137.36^\circ$ 。对多光谱影像利用最小二乘法进行植被像元的 LAI 反演,并同步得到 $\Gamma(\phi)$ 。在此基础上利用式(12.16)和式(12.18)进一步计算得到 FAPAR。

利用 SPOT 数据的 FAPAR 反演结果如图 12.27 所示。

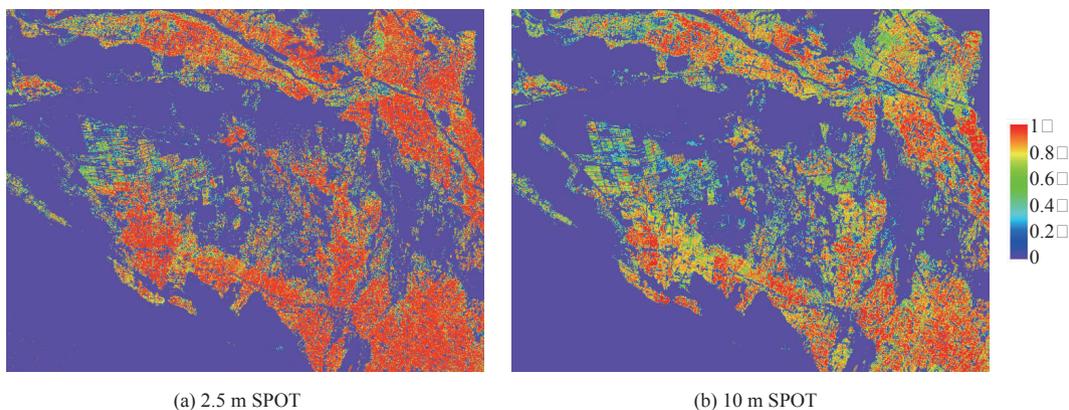


图 12.27 SPOT 数据 FAPAR 反演结果

由 12.7.2 节和 12.7.3 节可以看出,利用 12.6 节提出的 FAPAR 反演模型可以利用多光谱或高光谱可见光数据进行 FAPAR 的反演,但是由于模型的限制,都需要首先反演得到冠层 LAI。

12.8 本章小结

本章分别介绍了 FAPAR 的相关概念、目前测量 FAPAR 的仪器和地面测量方法、

FAPAR 的 MC 模拟方法、主要的 FAPAR 经验模型、基于辐射传输机理的定量模型和反演方法,并以黑河流域实验区为例,给出了利用定量模型反演 FAPAR 的案例研究。从本节中可以看出,遥感反演 FAPAR 已经有了长足的发展,并已经有了成熟的遥感产品。经验反演算法简单易行,但是应用范围有局限性,而定量反演方法从植被辐射传输机理出发,更具普适性,能够描述太阳光在冠层中的多次散射的定量反演模型具有很好的应用前景。

为了能够准确地计算光能利用率等关键参数,为陆地表面过程模型提供输入参数,必须要实现在有云条件下的 FAPAR 反演。太阳辐射经过大气传输会被大气分子分割成太阳直射辐射与散射辐射,它们在植被内部传输也有所不同,那么在利用辐射传输模型来描述 FAPAR 时,表达式也应不同。目前大多数 FAPAR 反演算法并未将太阳直射与散射部分分开,这必然会低估散射辐射对 FAPAR 的影响。如何提高有云条件下 FAPAR 建模与反演精度,也是 FAPAR 遥感反演研究的努力方向。

参 考 文 献

- 陈良富,高彦华,程宇,等. 2005. 基于 CBERS-02 卫星数据和地面测量的生物量估算及其影响因素分析. 中国科学 E 辑信息科学, 35(增刊 1): 113-124
- 陈良富,徐希孺. 2000. 植被遥感的 Monte Carlo 模拟研究. 地理科学进展, 19(1): 25-34
- 高彦华,陈良富,柳钦火,等. 2006. 叶绿素吸收的光合有效辐射比率的遥感估算模型研究. 遥感学报, 10(5): 798-803
- 高彦华. 2007. FPAR 遥感模型与 NPP 估算研究. 中国科学院遥感应用研究所理学博士学位论文
- 黄健熙,吴炳方,曾源,等. 2006. 基于蒙特卡罗方法的森林冠层 BRDF 模拟. 系统仿真学报, 18(6): 1671-1676
- 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. 自然科学进展, 17: 1229-1234
- 李刚. 2009. 呼伦贝尔温带草地 FPAR/LAI 遥感估算方法研究,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所博士学位论文
- 刘正军,王长耀,骆成凤. 2004. CBERS-1 PSF 估计与图像复原. 遥感学报, 03: 234-238
- 陶欣,范闻捷,王大成,等. 2009. 植被 FAPAR 的遥感模型与反演研究. 地球科学进展, 24(7): 741-747
- 王培娟,朱启疆,吴门新,等. 2003. 冬小麦冠层的 FAPAR、LAI、VIs 之间关系的研究. 遥感信息, 3: 19-22
- 吴炳方,曾源,黄进良. 2004. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用. 地球科学进展, 19(4): 585-590
- 项月琴,周允华. 1989. 管状辐射表对植物冠层辐射透过率的测量. 中国农业气象, 10(1): 62-64
- 徐希孺. 2005. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 47-49
- 周彬,陈良富,舒晓波. 2008. FPAR 的 Monte Carlo 模拟研究. 遥感学报, 12(3): 385-391
- 周晓东,朱启疆,王锦地,等. 2002. 夏玉米冠层内 PAR 截获及 FPAR 与 LAI 的关系. 自然资源学报, 17(1): 110-116
- Baret F, Olioso A. 1989. Photosynthetically absorbed radiation by a wheat canopy estimated from spectral reflectance. Agronomie, 9, 885-895
- Begue A, Myneni R. 1996. Operational relationships between NOAA-advanced very high resolution radiometer vegetation indices and daily fraction of absorbed photosynthetically active radiation, established for sahelian vegetation canopies. Journal of geophysical research. Atmospheres, 101 (D16) : 275-289
- Casanova D, Epema G F, Goudriaan J. 1998. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI. Field Crops Research, 55(1-2): 83-92
- Chen J M. 1996. Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation in boreal conifer stands. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34: 1353-1368

- Chen L F, Gao Y H, Cheng Y, et al. 2005. Biomass Estimation and Influencing Factors Analysis based on CBERS-02 satellite data and field observations. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 35(supplement D): 113-124. (in Chinese)
- Chen L F, Xu X R. 2000. The Simulation Using Monte Carlo Method in Vegetation Canopy Remote Sensing. *Progress in Geography*, 19(1): 25-34 (in Chinese)
- Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5: 1-15
- Dawson T P, North P R J, Plummer S E et al. 2003. Forest ecosystem chlorophyll, content; implications for remotely sensed estimates of net primary productivity. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3) :611 - 617
- Fan W J, Xu X R, Liu X C, et al. 2010. Accurate LAI retrieval method based on PROBA/CHRIS data, *Hydrology and Earth System Science*, 14: 1-9
- Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91: 490-507
- Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1):75-88
- Gallo KP, Daughtry CST, Bauer ME. 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sensing of Environment*, 17:221-232
- Gao Y H, Chen L F, Liu Q H, et al. 2006. Research on Remote Sensing Model for FPAR Absorbed by Chlorophyll. *Journal of Remote Sensing*, 10(5): 798-803(in Chinese)
- Gao Y H. 2007. Research on FPAR Remote Sensing Models and NPP Estimation. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Science PhD dissertation(in Chinese)
- Gobron N, Pinty B, Taberner M, et al. 2006. Monitoring the photosynthetic activity of vegetation from remote sensing data. *Advances in Space Research*, 38(10): 2196-2202
- Gobron N, Pinty B, Verstraete M M, et al. 2002. Uniqueness of multiangular measurements-Part II: Joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(7): 1574-1592
- Gobron N, Pinty B, Verstraete M M. 1997. Theoretical limits to the estimation of the Leaf Area Index on the basis of visible and near-infrared remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(6): 1438-1445
- Govaerts Y M, Verstraete M M. 1998. Raytran; A Monte Carlo Ray-Tracing Model to Compute Light Scattering in Three-Dimensional Heterogeneous Media. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36: 493-505
- Goward S N, Huemmrich K F. 1992. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index; An assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 39: 119-140
- Goward SN, Huemmrich KF, Waring RH. 1994. Visible-Near-Infrared Spectral Reflectance of Landscape Components in Western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 47(2): 190-203
- Gower S T, Kucharik C J, Norman J M, et al. 1999. Direct and indirect estimation of Leaf Area Index, FAPAR and Net Primary Production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70: 29-51
- Hapke B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1 Theory. *Journal of Geophysical Research*, 86: 3039-3054
- Hatfield J L, Asrar G, Kanemasu E T. 1984. Intercepted Photosynthetically Active Radiation Estimated by Spectral Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 14(1-3): 65-75
- Heimann M, Keeling C D. 1989. A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds. 2. Model description and simulated tracer experiments. *Geophysical Monograph Series*, 55, 237-275
- Huang J X, Wu B F, Zeng Y, et al. 2006. Forest Canopy BRDF Simulation Using Monte Carlo Method. *Journal of System Simulation*, 18(6): 1671-1676 (in Chinese)
- Huete A R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 295-309
- Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. 1996. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for

- Kiniry J R, Kniviel D P. 1995. Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. *Agronomy Journal*, 87(2): 228-234
- Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, et al. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research*, 103: 32257-32276
- Lacaze R, Roujean J L. 2001. G-function and Hot Spot (GHOST) reflectance model Application to multi-scale airborne POLDER measurements. *Remote Sensing of Environment*, 76: 67-80
- Li X, Strahler A H. 1986. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a coniferous forest canopy. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 24: 906-919
- Li Z, Leighton H G, Masuda K, et al. 1993. Estimation of SW flux absorbed at the surface from TOA reflected flux. *Journal of Climate*, 6: 317-330
- Li Z, Moreau L. 1996. A New Approach for Remote Sensing of Canopy-Absorbed Photosynthetically Active Radiation. I; Total Surface Absorption. *Remote Sens Environ*, 55: 175-191
- Liang S. 2004. *Quantitative remote sensing of land surfaces (New Jersey; Wiley-Interscience)*, 77
- Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. 1997. A process based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62: 158-175
- Monteith J L, Unsworth M H. 2008. *Principles of environmental physics (3rd edition)*. Amsterdam, Boston, USA
- Moreau L, Li Z. 1996. A New Approach for Remote Sensing of Canopy Absorbed Photosynthetically Active Radiation. II; Proportion of Canopy Absorption. *Remote Sens Environ*, 55: 192-204
- Myneni R B, Asrar G, Hall F G. 1992. A three-dimensional transfer model for optical remote sensing of vegetated land surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 42: 105-121
- Myneni R B, Hall F G, Sellers P J, et al. 1995. The interpretation of spectral vegetation indices. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 33: 481-486
- Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, et al. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens Environ*, 83: 214-231
- Myneni R B, Nemani R R, Running S W. 1997. Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed Par Using Radiative Transfer Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 1380-1393
- Myneni R B, Tucker C J, Asrar G, et al. 1998. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *J Geophys Res*, 103(D6): 6145-6160
- Myneni R B, Williams D L. 1994. On the Relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49: 200-211.
- Myneni R B. 1991. Modeling radiative transfer and photosynthesis in three-dimensional vegetation canopies. *Agric. For. Meteorol*, 55: 323-344
- Pinter P J. 1993. Solar angle independence in the relationship between absorbed PAR and remotely sensed data for alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, 46: 19-25
- Potter CS, Randerson J T, Field C B, et al. 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7:811-841.
- Prince S D, Goward S N. 1995. Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22: 815-835
- Reich P B, Turner D P, Bolstad P. 1999. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products. *Remote Sensing of Environment*, 70: 69-81
- Roujean J L, Breon F M. 1995. Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51: 375-384
- Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from re-

- motely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 99: 5263-5283
- Scurlock J M O, Cramer W, Olson R J, et al. 1999. Terrestrial NPP; Toward a consistent data set for global model evaluation. *Ecological Applications*, 9(3): 913-919
- Sellers P J, Los S O, Tucher C J, et al. 1994. A global 1 * 1 NDVI data set for climate studies. Part 2; The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *Int. J. Remote Sens.*, 17: 3519-3545
- Sellers P J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.*, 6: 1335-1372
- Shabanov N V, Wang Y, Buermann W, et al. 2003. Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 85: 410-423
- Tao X, Fan W J, Wang D C, et al. 2009. Remote Sensing Retrieval of FAPAR: Model and Analysis. *Advances in Earth Science*, 24(7): 741-747(in Chinese)
- Ruimy A, Kergoat L, Bondeau A. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity(NPP): Analysis of differences in Light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology*, 5:56-64
- Tian Y, Zhang Y, Knyazikhin Y, et al. 2000. Prototyping of MODIS LAI and FPAR algorithm with LASUR and LANDSAT Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2387-2401
- Tian Y. 2002. Evaluation of the Performance of the MODIS LAI and FPAR Algorithm with Multi-resolution Satellite Data. Boston Univ. PhD dissertation
- Tucker, Compton J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150
- Vermote EF, Tanre D, Deuze JL, et al. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 675-686
- Wang P J, Zhu Q J, Wu M X, et al. 2003. Research on the Relationships among FAPAR, LAI and VIs in the Winter Wheat Canopy. *Remote Sensing Information*, 3: 19-22(in Chinese)
- Wiegand C L, Richardson A J. 1992. Relating Spectral Observations of the Agricultural Landscape to Crop Yield. *Food Structure*, 11(3): 249-258
- Wu B F, Zeng Y, Huang J L. 2004. Overview of LAI/FPAR Retrieval from Remotely Sensed Data. *Advances in Earth Science*, 19(4): 585-590(in Chinese)
- Xiang Y Q, Zhou Y H. 1989. Transmittance Measurement of Vegetation Canopy using Tubular Radiometer. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 10(1): 62-64(in Chinese)
- Xu X R. 2005. *Remote Sensing Physics*. Beijing: Peking University Press, 47-49(in Chinese)
- Zhou B, Chen L F, Shu X B. 2008. The Monte Carlo Study on FPAR. *Journal of Remote Sensing*, 12(3): 385-391(in Chinese)
- Zhou X D, Zhu Q J, Wang J D, et al. 2002. Interception of PAR, relationship between FPAR and LAI in summer maize canopy. *Journal of Natural Resources*, 17(1): 110-116(in Chinese)