

文章编号: 1007-4619 (2005)01-0064-09

地面和机载多角度观测数据的反照率反演及对 MODIS 反照率产品的初步验证

焦子锑¹, 王锦地¹, 谢里欧¹, 张 颢¹, 阎广建¹, 何立明¹, 李小文^{1,2}

(1. 北京师范大学 资环系遥感与 GIS 研究中心, 北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: MODIS 的反照率产品采用半经验的二向性反射核驱动模型算法(AMBRALS), 对 16 天累积观测的多角度遥感数据进行反演。产品的应用需要相关研究的地面观测数据进行验证。主要研究基于地面气象站用反照率表观测的反照率数据、地面和机载多角度遥感数据通过 AMBRALS 算法反演得到的反照率, 与 MODIS 相应的地面反照率产品做比较的降尺度验证方法, 并提供对 MODIS 反照率产品的初步验证结果。

关键词: 反照率; 多角度遥感; 反演; 核驱动模型

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引言

地表反照率是监测地表能量交换的重要参数, 也是气候模型的一个基本参数。不同分辨率的全球陆地表面反照率产品对于全球和区域气候模型研究是非常有价值的。传统的反照率观测数据利用反照率表测得, 其中以气象台站观测的标准草坪的反照率最为常用。由于在实际应用中有些要求大范围的地表反照率数据, 而遥感数据具有提供区域和全球分布的优势, 因此, 利用不同分辨率的多角度遥感数据反演反照率将成为越来越有效的方法。

MODIS 的反照率产品算法中使用的是经过大气校正的 MODIS 和 MISR(多角度成像光谱辐射计)多天、多波段的反射率数据, 获得以 16 天为周期 1km 分辨率的 7 个光谱波段、9 个方向的二向反射(BRDF)数据, 以此为数据源, 提供以 16 天为周期的全球反照率和 BRDF 产品。数据处理的算法称为 AMBRALS (Algorithm for MODIS Bidirectional Reflectance Anisotropies of the Land Surface)。目前该产品已正式发布提供使用, Schaaf、Gao 等对 AMBRALS 算法反演反照率的 MODIS 产品作过检验^[1], 但如何将其与传统的地面点上观测的地表反照率数据相结合, 实现点面数据的应用转换, 有效地

用于相关的研究和应用领域, 是急需解决的问题, 其中重要的一步, 是对反照率产品的地面验证。梁顺林等对遥感反照率产品的验证和应用也做了大量的研究^[2]; 王锦地、项月琴、谢里欧等就如何应用 973 顺义遥感基础研究实验的数据验证 MODIS 产品的降尺度验证方法做了尝试, 重点解决验证中存在的观测目标空间尺度差异和观测仪器光谱分辨率和光谱范围差异两个方面的问题^[3,4]。本文以前期工作为基础, 讨论用地面和机载 BRDF 观测数据, 通过 AMBRALS 算法反演反照率, 并对 MODIS 反照率产品进行初步验证的方法研究, 其验证方法的基本思路如图 1。

(1) 用地面和机载 BRDF 观测数据通过 AMBRALS 算法反演反照率, 和同步进行、对相同地面目标的反照率表观测数据相比较, 验证用 BRDF 观测数据反演的反照率。此验证工作主要包括以下关键的几步: 第一, 使用 ASD 光谱仪(FieldSpec HandHeld Spectroradiometer)测量目标物小麦的多光谱 BRDF 数据, 可使用的波段范围为 0.4—1.0 μm , 然后用 AMBRALS 算法反演反照率, 并将其扩展到宽波段(0.4—2.5 μm), 并和反照率表 TR-21 同步观测的相同波段范围的反照率数据进行比较。第二, 对 AMTIS 可见光(0.44—0.69 μm)、近红外(0.70—

收稿日期: 2003-06-16; 修订日期: 2003-10-24

基金项目: 国家 973 项目(G2000077900)资助, 国家自然科学基金项目(40171068)的共同资助

作者简介: 焦子锑(1970—), 男, 讲师。1993—1999 年首钢集团公司工作, 工程师职称; 2002 年于北京师范大学获硕士学位。现在该校从事教学及科研工作, 主要研究方向为图像融合, 尺度效应及尺度转换等, 已公开发表第一作者论文 4 篇。

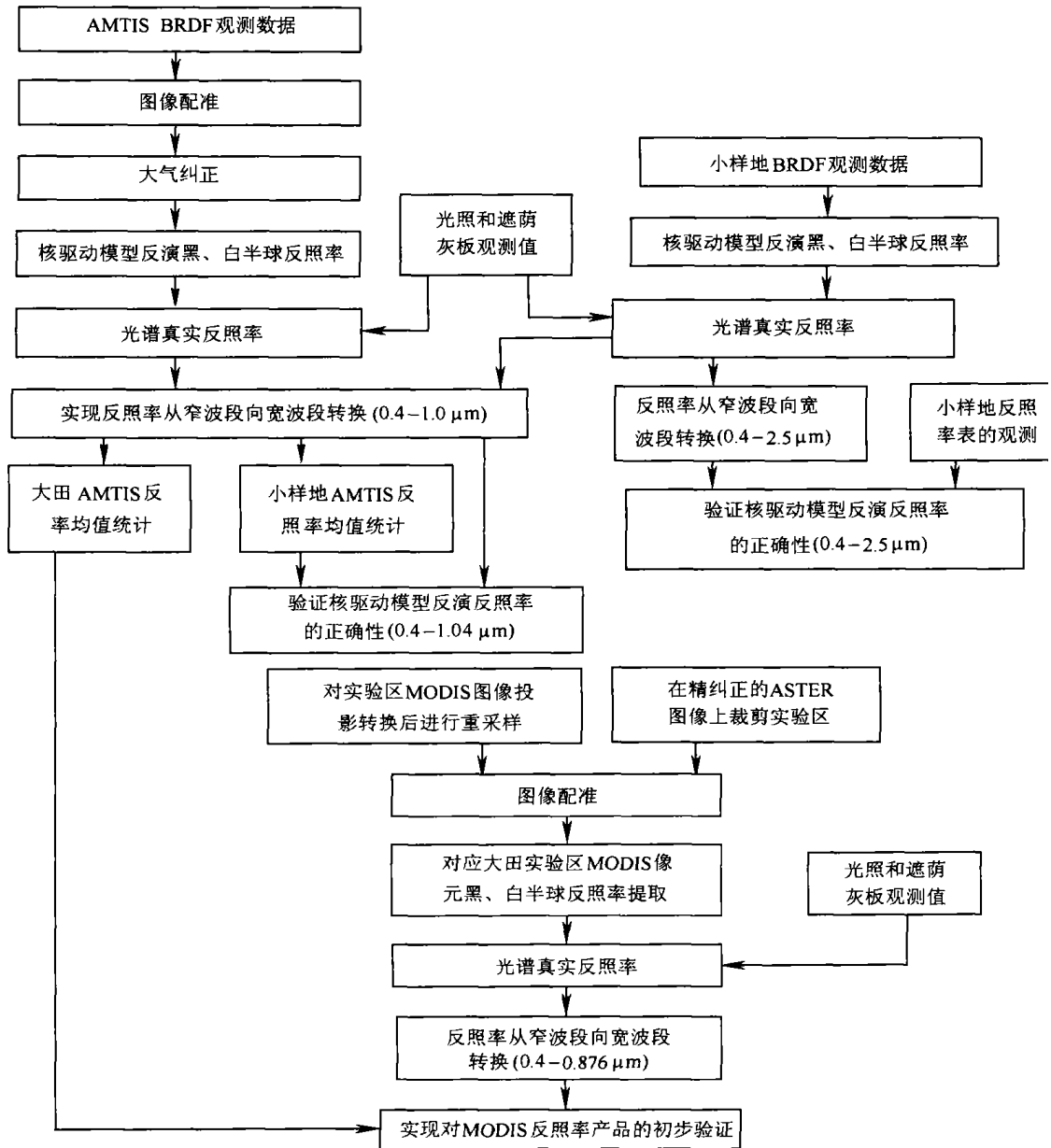


图 1 对 MODIS 反照率产品进行初步验证的流程图

Fig. 1 The flow chart of primary validation to MODIS albedo product

1.04 μm)波段的 BRDF 配准数据,通过 AMBRALS 算法反演反照率,然后转换为宽波段(0.44—1.04 μm)的反照率,用统计后的均值和反演 ASD 光谱仪的 BRDF/反照率相比较。这两步采用的是顺义小样地实验区,地面和机载 BRDF 观测数据及同步进行的反照率表的观测数据。ASD 光谱仪反演得到的是离散点的反照率数据,机械 AMTIS 反演得到的是对同一地区空间上连续的面状反照率信息,它们像元尺度差别不大(0.7m 和 1.34m),在假定地面为均匀目标物的条件下,这种比较和验证工作是合理的。

(2) 确定大田实验区所对应 MODIS 像元的位置,对相同位置机载 AMTIS 的 BRDF 数据反演的反照率聚合到 MODIS 像元尺度,并和 MODIS 反照率进行比较,以实现 MODIS 的反照率产品的初步验证。

我们在反演地面和机载 BRDF 观测数据时,采用和 MODIS 反照率产品相同的 AMBRALS 算法,在核的组合方面也保持一致,使不同平台观测的多角度数据在反演反照率时具有可比性,本文主要从数据获取、数据处理到验证的方法研究,并给出初步的验证结果。

2 遥感实验数据的获取

国家基础研究发展规划项目(973 项目)“地球表面时空多要素的定量遥感理论及应用”,按计划从 2001 年 3 月底到 6 月中,进行春季小麦返青后生长季节的星-机-地大型同步实验。观测试验场分为 3 个不同的尺度:航天遥感试验场(华北平原),航空遥感试验场(北京顺义),地面遥感试验场(分别在山东禹城、河北栾城和北京顺义布设地面定位观测点、气象站和定标观测点),以北京顺义为机载数据获取试验场和重点地面试验场,开展航空飞行试验,获取机载多角度多光谱数据和高光谱数据。航空遥感实验中使用了双水獭飞机,搭载多角度多光谱成像系统(AMTIS)。在地面同步观测中,在中央试验区设置一个模型模拟观测试验场,在定位观测点试验样地中设计 6 块小样地,大小为 $30\text{m} \times 30\text{m}$,分别对应裸土和不同种植密度、不同行距的小麦小样地,为各种模型研究提供观测试验场地。小样地实验主要是测量冬小麦作物的二向性反射率,模拟两个小样地的 BRDF 观测。在整个实验的强化观测实验期(2001-04-05 至 2001-04-25)获取地面的多角度高光谱观测数据,与高光谱航空飞行实验和多角度多光谱航空飞行实验数据相配套。飞行实验于 4 月 11、12 日进行,方向性观测在当天加密,实现了持续观

测。北京顺义实验场的布置及详细实验设计见参考文献[5]。

研究中使用了下列数据:

(1) 小样地实验区,反照率表 TR-21 实地观测的反照率数据,波段范围为 $0.3\text{--}2.5\mu\text{m}$ 。

(2) 小样地实验区,ASD 光谱仪实地观测的多角度、高光谱二向性反射数据,其波段范围为 $0.3\text{--}1.0\mu\text{m}$,测量采用转盘式观测架,仪器距地高度 1.6m ,视场角 25° ,观测视场约为 0.7m 。

(3) 机载多角度、多光谱 AMTIS 图像,其飞行方向垂直于小麦的行向,所用两个波段为可见光 $0.44\text{--}0.69\mu\text{m}$ 、近红外 $0.70\text{--}1.04\mu\text{m}$,视场角 0.5mrad ,飞行高度 4200m ,空间分辨率为 1.36m 。

(4) 同步实验收集的 MODIS BRDF/Albedo 产品,本文所用的 MOD43B3 反照率产品为 MODIS 1—7 个波段及 3 个宽波段 ($0.3\text{--}0.7$, $0.7\text{--}5.0$ 和 $0.3\text{--}5.0\mu\text{m}$),空间分辨率为 1km ,MODIS 前 7 个波段的波段范围如表 1。

(5) 做几何精纠正处理,该地区的 ASTER 标准假彩色图像,用于确定实验区所对应的 MODIS 纯像元。

(6) ASD 光谱仪垂直方向、高光谱的反射率数据,波段范围为 $0.3\text{--}2.5\mu\text{m}$,视场角 25° ,由农林科学院王纪华研究员提供。

表 1 MODIS 前 7 个波段的波段范围
Table 1 Band width of MODIS band 1—7

波段数	1	2	3	4	5	6	7
波段范围/ nm	620—670	841—876	459—479	545—565	1230—1250	1628—1652	2105—2155

3 实验数据的处理和验证方法

对 MODIS 反照率产品的验证一个简单的方法是寻找一块均匀的、足够大的地面实验场,在实验场中同时布置多个反照率表,然后用地面观测的反照率数据的均值对 MODIS 反照率产品进行比较和验证。这种验证方法一是很难找到一块能有几个 MODIS 像元大小的实验场,二是对于离散点观测数据的均值在多大程度上能代表遥感像元尺度也是一个值得探讨的问题。Liang^[2]等假定地表为朗伯体,则不同波段的光谱反射率等于其光谱反照率,基于这种假设,用大气纠正后的 ETM+ 影像作为过渡,

用地面测量的反照率数据来验证 MODIS 的反照率产品。在 973 项目顺义大型遥感实验数据的基础上,我们用机载 AMTIS 的 BRDF/反照率数据作为中间过渡,求得实验区中,对应于一个 MODIS 像元大小的机载 AMTIS 反照率数据的均值,然后用均值和 MODIS 的反照率产品进行比较和验证。这涉及到几个关键技术步骤,一是 AMTIS 多角度数据的配准和大气纠正,二是采用 AMBRALS 算法对地面和机载多角度、多光谱数据进行反照率反演,三是窄波段反照率到宽波段反照率的转换,四是利用 ASTER 的标准假彩色图像确定实验区 MODIS 像元的位置。Liu 等对机载 AMTIS 数据的配准已有专门的论述^[1],现在我们从以下几个方面,对 MODIS 反照率验证方法

做概要的论述。

3.1 机载 AMTIS 影像的大气纠正

基于地表朗伯的大气订正公式为:

$$\rho_{\text{toa}}(\mu_v) = \rho_a(\mu_s, \mu_v) + \frac{R}{1-RS} T(\mu_s) T(\mu_v) \quad (1)$$

式中, μ_s 和 μ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦, ρ_a 是阳光进入大气顶部后, 向传感器方向的路径散射的反射率, R 是地表反射率, S 是整层大气对地表上行辐射向下的反射率, $T(\mu_s)$ 和 $T(\mu_v)$ 分别为太阳入射方向和观测方向总的透过率, ρ_{toa} 是大气顶部的表观反射率。由上式, 要得到 R , 需要计算的参数为 ρ_a , $T = T(\mu_s) T(\mu_v)$, S 。因此, 需要为上面 3 个参数建立查找表。根据文献[7], 运行 3 次 MODTRAN, 地表反射率分别设为 0, 0.5, 0.8 来得到。

对于多角度遥感而言, 比起 TM 等单角度天顶观测的传感器, LUT 中多了观测天顶角和方位角两个变量, 创建 LUT 的工作量将增大两个数量级以上, 所以减小创建 LUT 的时间是非常重要的。仔细检查 3 个参数不难发现, S 是大气的固有性质, 在固定的大气和气溶胶类型下, 它仅是水平气象视距的函数(我们模拟的结果证明了这一点)。我们可以首先用天顶观测的 3 次 MODTRAN 运行得到 S , 单独为其创建 LUT。为了保持解的稳定性, 在创建 S 的 LUT 时, 可以运行多种反射率, 这样问题就变为从大于 3 个观测数中拟合 3 个参数, 在得到 S 随气溶胶的变化后, 再创建 ρ_a 和 T , 只要运行两次 MODTRAN 就足够了。由于创建 S 的 LUT 时间远远小于创建 ρ_a 和 T 的 LUT 时间(相差 2 个数量级), 可节约近似 1/3 的时间。

对于 ρ_a 和 T , 在固定的大气模式和气溶胶模式下, 是太阳天顶角、观测天顶角、相对方位角、水平气象视距、水汽含量等的函数。由于飞行当天水汽含量的时间变化非常小, 本文暂时将水汽含量固定为 $0.5\text{g}/\text{cm}^2$ 。最后, 创建 LUT 时参数设置的间隔为:

太阳天顶角: $32^\circ, 37^\circ, 42^\circ$, 共 3 个;

观测天顶角: $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ$, 共 10 个;

相对方位角: $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 170^\circ, 175^\circ, 180^\circ$, 共 20 个;

水平气象视距: $20\text{km}, 23\text{km}, 30\text{km}$ 。

根据以上参数间隔运行 MODTRAN, 创建 LUT。

当前 LUT 最大的维数为 4 维, 随着实际飞行次数的增大和飞行间相关参数的范围的扩大, 我们可以将逐次模拟创建的 LUT 添加到原来的 LUT 中。在得到 LUT 后, 3 个大气参数的值将由插值得到。

3.2 反照率表观测的标定和 BRDF 数据的反照率反演

3.2.1 线性核驱动模型

AMBRALS 算法的理论基础是核驱动的线性模型, 该模型用有一定物理意义的核的线性组合来拟合地表的二向性反射特征。简单地说, 核驱动模型可用下式表示^[8,9]:

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{geo}} k_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \phi) + f_{\text{vol}} k_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \phi) \quad (2)$$

其中, R 是二方向反射率, k_{geo} 为几何光学核, k_{vol} 为体散射核, 都是光线入射角和观察角的函数。 θ_i 为光线入射天顶角, θ_v 为观测天顶角, ϕ 为相对方位角。 f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} 为核系数, 分别表示各向均匀散射、几何光学散射、体散射这 3 部分所占权重。 AMBRALS 算法通过线性回归, 反演出拟合观测数据最优的 f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} , 然后通过核的外推可求出任意光线入射角和观察角的二向反射。计算反照率时, 因为核是与待反演参数无关的函数, 核的积分可预先求出, 只要把核的积分以 f_{iso} , f_{geo} 和 f_{vol} 为权重相加, 就得到相应的黑半球或白半球反照率。作为一种半经验模型, 核驱动模型具有经验模型的简洁、高速、数据拟合能力强等优点, 使之能够处理来自 EOS 的大量数据。同时, 几何光学核和体散射核有一定的物理意义, 这使得在外推模型到没有观测数据的方向时, 有希望能够解释和控制外推的结果, 关于模型反演和外推的误差已有专门论文分析^[10]。

3.2.2 反照率表观测的标定

在小样地实验区, 我们安装了反照率表 RT-21 进行实地的反照率观测, 架高 1.1m, 波段范围 $0.3\text{--}2.5\mu\text{m}$ 。反照率表测量的分别是上半球入射和下半球反射的电压值 V_q 和 V_r , 根据反照率表的标定系数对测量值进行标定, 经过(3)式换算, 可以将其标定为上半球的总入射辐射能量 Q 和下半球的总反射辐射能量 R :

$$\begin{aligned} Q &= (1.0248 * V_q + 0.0946) * 145.6 (\text{W}/\text{m}^2) \\ R &= (1.13928 * V_r + 0.032) * 152.4 (\text{W}/\text{m}^2) \end{aligned} \quad (3)$$

于是可以计算出小麦冠层的真实反照率: $\text{TureAlbedo} = R / Q$

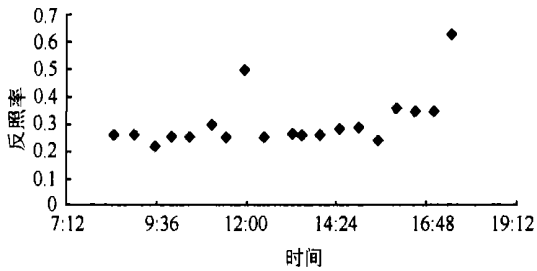


图 2 2001-04-12 反照率表实地观测值随时间的变化

Fig.2 Temporal variation of land-observed albedo on Apr. 12 2001

图 2 为 2001-04-12 从 8:30 到 17:27, 每隔约 30min, 用反照率表实地观测的反照率数据。从以上数据可以看出, 当天实地观测的反照率数据基本围绕在均值 0.25 左右波动, 但在 11:55 和 17:27 反照率突然高, 分别达到 0.496 和 0.629, 初步分析原因可能是由于观测误差所致, 所以剔除这两个时间的观测值, 取当天其余观测值的均值 0.25 作为当天实地观测的反照率。

3.2.3 用核驱动模型反演反照率

MODIS43B3 反照率产品采用的是线性核驱动模型, 核的组合为 RossThick 核和 Li-Sparse-Reciprocal 核。为了使地面和机载观测的 BRDF 数据反演的反照率和 MODIS 反照率产品具有可比性, 我们选择核驱动模型反演地面和机载反照率, 并采用了相同核的组合。

地面 ASD 光谱仪多角度、多光谱观测数据的反照率反演, 采用了程序包 Ambrals^{v3.3}, 观测的 BRDF 数据组织成一个给定格式的文本文件, 以此文件作为输入, 分别计算出不同波段白半球反照率和当时太阳天顶角的黑半球反照率, 以及太阳天顶角分别

为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时的黑半球反照率, 并将输出结果存贮在一个文本文件中, 然后再根据需要选择其中所需的结果进行后续计算。这种计算方法对于地面观测数据量不大时是可行的, 但对于计算已配准的 8 条航带的机载 AMTIS 多角度观测, 由于数据量巨大 (12GB 左右), 同时在 AMTIS 飞行过程中, 太阳高度角不断发生变化, 我们需要根据实时的太阳天顶角计算黑半球反照率, 该程序包的运算速度成为主要的瓶颈问题。为了提高运算速度, 我们对程序进行了初步的改进, 一是根据 AMTIS 的存贮格式, 使程序包可以直接读取 AMTIS 的数据文件; 二是根据 AMTIS 的飞行时间, 可以计算出任意像元点的太阳天顶角; 三是对于不同的几何光学核和体散射核, 按照太阳的天顶角从 $0^\circ-90^\circ$, 制作了一张查找表, 可以根据 AMTIS 在飞行期间太阳天顶角的变化, 进行实时的插值计算, 也可以尝试用不同的核进行反照率反演, 对不同核反演结果进行初步的比较和验证。反演地面和机载多角度、多光谱数据的光谱真实反照率, 可以分两步进行:

(1) 用核驱动模型分别反演实验区地面和机载 BRDF 观测数据, 在不同光谱波段的黑半球和白半球的光谱反照率 (图 3, 图 4)。

(2) 根据当天测量的光照灰板和遮荫灰板的数据, 计算出遮荫灰板占光照灰板的比例, 即为当时漫射辐射占总下行辐射的比值 D , 这也就是白半球反照率占真实反照率的比值, 根据这个比值由公式 (4), 分别计算出地面 ASD 光谱仪的光谱真实反照率 (图 5) 和机载 AMTIS 可见光波段和近红外波段的光谱真实反照率。

$$A = (1 - D)\alpha + D\beta \quad (4)$$

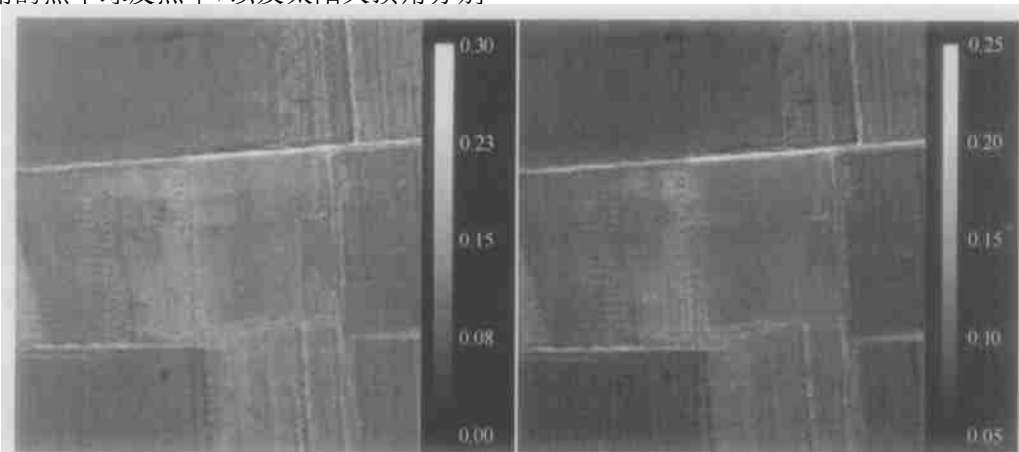


图 3 大田实验区可见光波段白半球和黑半球反照率

Fig.3 Black-sky and white-sky albedo of VIS band observed at Datian experiment field

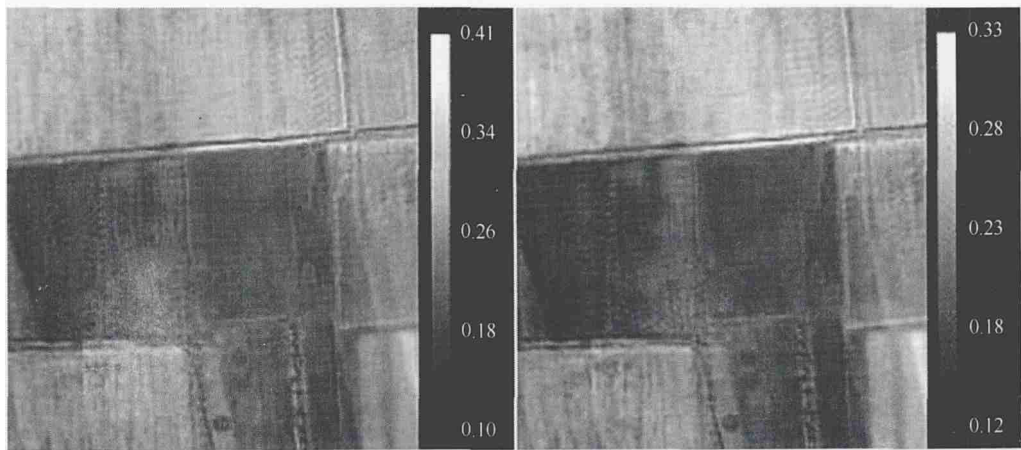


图4 大田实验区近红外波段白半球和黑半球反照率

Fig. 4 Black-sky and white-sky albedo of NIR band observed at Datian experiment field

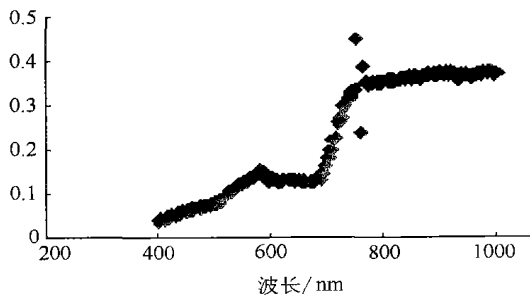


图5 ASD 光谱仪在观测波段的光谱真实反照率

Fig. 5 Land observed true spectral albedo by analytical spectral device

式中, A 是各个波段的真实光谱反照率, α 黑半球反照率, β 是白半球反照率, D 值则与当时的大气状况有关, 是当时天空光占总入射的比例。

3.2.4 反照率从窄波段向宽波段转换

要对 MODIS 反照率产品进行逐步验证, 必须解决不同传感器波段范围不一致的问题, 其中如何实现反照率从窄波段向宽波段转化是一个关键的技术问题, 关于这方面已有一些成功的算法^[11]。本文中主要涉及两个方面的内容: 一是将地面用 AMBRALS 算法反演的反照率从 0.4—1.0 μm 波段范围扩展到 0.4—2.5 μm 波段范围, 实现窄波段向宽波段的转化, 并和反照率表观测的真实反照率比较, 以验证 AMBRALS 反演反照率的正确性(表 2), 二是对机载 AMTIS 在可见光、近红外波段的反照率进行波段加权, 求得它在整个可见光、近红外波段(0.44—1.04 μm)的真实反照率, 以对 MODIS 的反照率产品进行初步的验证。其中, 将地面反演的反照率从窄波段转换为宽波段, 可以按下面几步进行:

(1) 根据已知当时观测的气溶胶的光学厚度、水汽含量和大气模式, 通过 MODTRAN 模拟出当时大气状况下的各波段的下行辐射值。根据反照率的定义, 将反演得到的 ASD 光谱仪的光谱真实反照率与相应波段的下行辐射相乘得出各波段的上行辐射值, 并将各波段的上行辐射值在 0.4—1.0 μm 波段范围(称窄波段)进行积分。

(2) 根据 MODTRAN 模拟出的窄波段和宽波段的下行辐射值及已知垂直方向、高光谱的反射率数据(在顺义同步实验中获得的观测数据, 因此具有可比性), 波段范围为 0.3—2.5 μm (称为宽波段), 求出不同地类窄波段的上行辐射占宽波段上行辐射的比例, 从而可以将 ASD 光谱仪窄波段的上行辐射订正到宽波段。

(3) 由于宽波段范围上各个波长的下行辐射值也可以通过 MODTRAN 模拟获得, 并可以积分得到整个宽波段的下行辐射值, 所以宽波段的真实反照率就可以通过两者的比值获得, 从而可以将窄波段反照率转换为宽波段的反照率。

对于 AMTIS 多角度数据, 由于已经得到了它在近红外波段(0.70—1.04 μm)和可见光波段(0.44—0.69 μm)的真实反照率(图 6), 先将用 MODTRAN 模拟出的下行辐射值分别积分到相应的近红外和可见光波段, 则整个波段(0.44—1.04 μm)的上行辐射积分就是: 近红外波段的下行辐射积分 * 近红外波段的真实反照率 + 可见光波段的下行辐射积分 * 可见光波段的真实反照率。这样, 整个波段的真实反照率就是整个波段的上行辐射积分和下行辐射积分的比值。同样, 对提取的 MODIS 黑半球和白半球反照率, 通过当天同步测定 ASD 光谱仪的遮阴灰板和光照灰板值, 计算出在可见光(0.3—0.7 μm)波段内漫

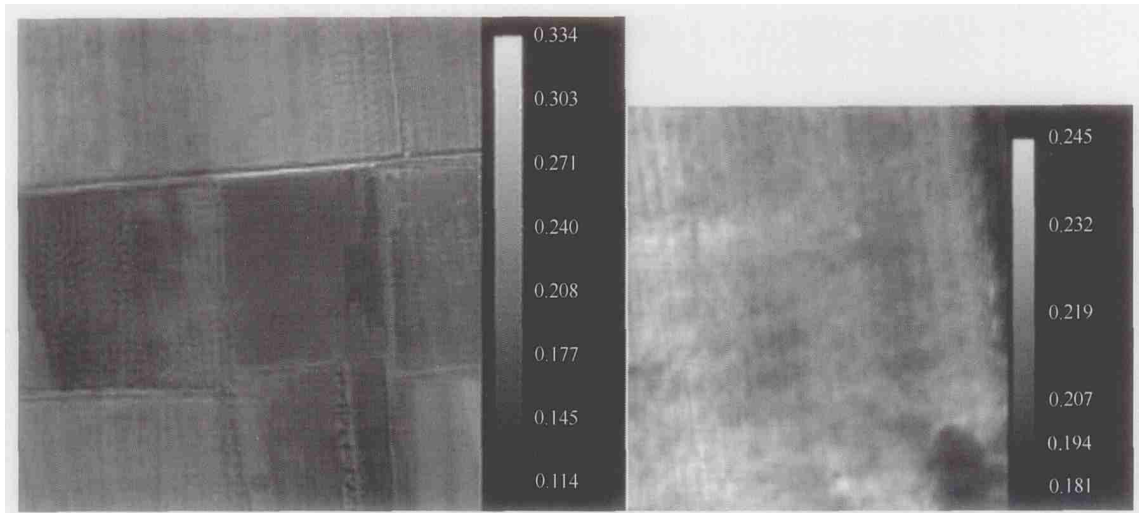


图 6 AMTIS 在大田和小样地实验区 $0.44-1.04\mu\text{m}$ 波段真实反照率

Fig. 6 True albedo of AMTIS at band of $0.44-1.04\mu\text{m}$ in Datian and small-sample-field

射辐射占总下行辐射的比值, 求出在此波段内的真实反照率(表 2)。

表 2 不同平台传感器获得的实验区的真实反照率比较

Table 2 Comparison the true albedo of experiment district got by different sensors

不同平台传感器	波段范围/ μm	真实反照率
反照率表观测	0.4-2.5	0.25
光谱仪反演反照率订正到宽波段	0.4-2.5	0.22
光谱仪反演反照率订正到宽波段	0.4-1.0	0.23
AMTIS 小样地实验区	0.4-1.04	0.22
AMTIS 大田实验区	0.4-1.04	0.21
MODIS 第 8 波段反照率产品	0.3-0.7	0.23

3.2.5 对应大田实验区的 MODIS 像元反照率提取

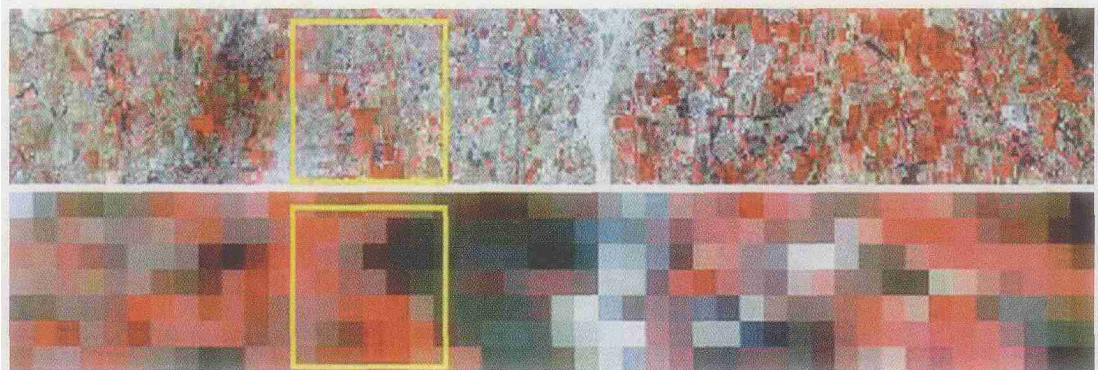
AMTIS 多角度遥感数据在配准时, 以 10m 分辨率全色波段的 SPOT 图像为底图, 通过 AMTIS 像元点的位置, 查找 SPOT 全色波段所对应的像元点, 从而可以找到相应像元点所对应的地理坐标^[3]。为了充分利用我们对该实验区的先验知识, 便于和

MODIS 图像的比较及目视解译, 我们在提取实验区所对应的 MODIS 像元时, 采用了 15m 分辨率经过精纠正的 ASTER 的标准假彩色图像作为底图, 寻找实验区所对应的 MODIS 像元, 采用的 MODIS 数据为 MOD43B3.A2001097.h26v04.003.2001238040619.hdf, 具体步骤如下:

(1) 对 ASTER 图像进行几何精纠正, 并在纠正后的标准假彩色图像上确定顺义飞行实验区的范围。

(2) 利用 MODIS Tool 将飞行实验区范围内的 MOD43B3 数据从 ISG 投影转换至 UTM 投影, 因为在飞行实验区中 ASTER 标准假彩色图像和 MODIS 图像采用的都是 UTM 投影, 所以它们的投影变形基本上保持一致。

(3) 在飞行实验区中, 将投影转换后的 MODIS 图像采用最近邻法进行重采样, 重采样的倍数为 MODIS 和 ASTER 像元分辨率之比, 即 $1000/15$ 倍, 此时可以保证 ASTER 标准假彩色图像与 MODIS 图像大小一致(如图 7、图 8)。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 7 顺义飞行实验区的 ASTER 标准假彩色图像和重采样后的 MODIS 标准假彩色图像

Fig. 7 Standard false color image of ASTER and re-sampled MODIS in Shunyi experiment field

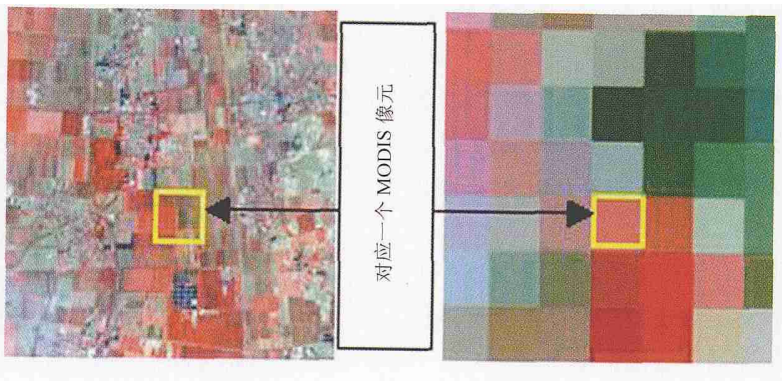


图 8 对应于一个 MODIS 像元的赵全营大田实验区

Fig. 8 Zhaoqanyin experiment field corresponding to one MODIS pixel

(4) 用 ENVI 的 LINK 功能, 根据已知的 ASTER 标准假彩色图像上大田实验区的位置, 寻找所对的 MODIS 纯像元的位置。

以上操作均在 ENVI 环境下并结合 MODIS Tool 投影转换工具实现。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文首先在小样地实验区, 用反照率表 TR-21 实地观测的反照率数据和 ASD 光谱仪反演并订正到宽波段的反照率数据相比较, 验证核驱动模型反演反照率的可行性。由于反演得到的反照率数据实现了窄波段向宽波段的转换, 所以它们在相同的波段, 相同空间分辨率对同一种目标物的比较是切实可行的。从表 2 中可以看出, 反照率表 TR-21 在 2001-04-12 实地观测的反照率均值为 0.25, 而用核驱动模型反演 ASD 光谱仪观测并订正到宽波段得到的反照率值为 0.22, 它们方差为 7.19×10^{-4} 。同样, 在小样地实验区, 反演机载 AMTIS 并订正到宽波段 0.4—1.04 μm 的真实反照率均值为 0.22, 而反演 ASD 光谱仪 BRDF 数据得到的反照率在 0.4—1.04 μm 波段为 0.23, 它们方差为 1.11×10^{-4} 。由于 AMTIS 星下点的空间分辨率约为 1.36m, 而 ASD 光谱仪在架高 1.6m 时, 垂直观测时的空间分辨率约为 0.7m, 它们的空间分辨率在一个量级上, 在假定地表为均匀目标的前提下(实际对于实验区的冬小麦而言, 此假定是成立的), 用 AMTIS 统计得到的反照率均值和反演光谱仪点测量 BRDF/反照率相比较是合理的。由此, 我们可以得到的第一个验

证结果: 用核驱动模型反演地面和机载 BRDF 观测的反照率是正确的。

然后, 我们利用 AMTIS 及 MODIS 同为空间连续观测的特点, 找到对应于 AMTIS 飞行实验区的 MODIS 像元。然后, 对该实验区的 AMTIS 反演得到的反照率聚合到 MODIS 像元尺度, 和 MODIS 提取的反照率信息进行比较。由表 3 可以看出, 对应于一个 MODIS 像元的大田实验区, 机载 AMTIS 反演得到的反照率均值为 0.209, 最大值为 0.334, 最小值为 0.114, 方差为 0.027, 而相应 MODIS 像元的反照率产品, 转换到宽波段 0.3—0.876 μm 后, 反照率为 0.23, 和 AMTIS 在该像元的反照率聚合值是很接近的。由此, 我们得到初步验证结果是 MODIS 所提供的 MOD43B3 反照率产品是可信的。

表 3 不同实验区 AMTIS 真实反照率统计

Table 3 Statistic of AMTIS true albedo at different experiment districts

实验区	最小值	最大值	均值	方差
大田	0.114	0.334	0.209	0.027
小样地	0.245	0.181	0.220	0.093

4.2 讨论

(1) 不同观测平台, 由于观测手段和像元大小不同, 地面测量得到的是典型目标物的离散值信息, 虽有其代表性, 但如何和遥感所获取空间上连续的面状信息进行比较是一个值得进一步深入探讨的尺度问题。

(2) 由于 MODIS 提供的是 1km 空间分辨率的产品, 我们用这种方法, 根据已有的实验数据对其所进行的初步验证, 只能在一个像元点的尺度上进行, 因此本验证工作只作为初步结论。对其全面的验证有

赖于实验数据在空间尺度上及时间序列上的获得,这将是本文的下一步工作。

(3) 由于受到 MODIS 数据质量的控制,我们在此只强调验证方法的可行性,对 MODIS 3 个参数的进一步验证依赖于 MODIS BRDF 数据的获取及先验知识的应用,这也是本文下一步的工作。

(4) 虽然对 3 种不同传感器的光谱范围进行了一致性处理,但不同传感器的反照率的比较及验证并没有完全严格纠正正在同一波段范围内。

致谢 感谢中国科学院地理科学与资源研究所项月琴研究员指导地面反照率测量并提供反照率表标定数据,感谢北京市农林科学院的王纪华研究员提供光谱数据,感谢美国波士顿大学地理系与遥感中心的高峰博士和美国马里兰大学地理系梁顺林教授在研究中给予的帮助。

参 考 文 献 (References)

- [1] Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, et al. First Operational BRDF, Albedo Nadir Reflectance Products from MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**:135—148.
- [2] Liang S L, Fang H L, Chen M Z, et al. Validating MODIS Land Surface Reflectance and Albedo Products: Methods and Preliminary Results [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**:149—162.
- [3] Wang J D, Jiao Z T, Gao F, et al. Validation of MODIS Albedo Product by Using Field Measurements and Airborne Multi-angular Remote Sensing Observations [A]. Proc. Int. Geosci. Remote Sensing Symp. [C]. 2002.
- [4] Xie L O, Wang J D, Li X W, et al. Approach and Validation on land Surface Albedo Retrieval Using Multiangular Remote Sensing Observations[A]. Proc. Int. Geosci. Remote Sensing Symp. [C]. 2002.
- [5] 973 项目“地球表面时空多要素的定量遥感理论及应用”(G20000779)应用驱动星-机-地遥感综合试验总体方案 [R]. (2000.10—2001.10)
- [6] Liu Q, Liu Q H, Xiao Q, et al. A Pyramidal Matching Method for Registration of Remote Sensing Imagery [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6** (Suppl.):100—103. [刘强,柳钦火,肖青等.用于遥感图像几何纠正的金字塔式配准算法[J].遥感学报,2002,6(增刊):100—103.]
- [7] Liang S, Fang H L, Chen M Z. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery: I. Methods [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 2001, **39**(11):2490—2498.
- [8] Wanner W, Li X, Strahler A. H. On the Derivation of Kernels and Kernel-driven Models of Bi-directional Reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D10):21077—21089.
- [9] Lucht W, Schaaf C B, Strahler A H. An Algorithm for the Retrieval of Albedo from Space Using Semiempirical BRDF Models [J]. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2000, **38**(2):977—998.
- [10] Li X W, Gao F, Wang J D, et al. Estimation of the Parameter Error Propagation in Inversion Based BRDF Observations at Single Sun Position [J]. *Science in China (Series E)*, 2000, **43**(Supp.): 9—16 [李小文,高峰,王锦地等.单一太阳角 BRDF 数据反演过程中误差传播的估计[J].中国科学(E辑),2000,30(增刊):6—11.]
- [11] Liang S., Narrowband to Broadband Conversions of Land Surface Albedo I Algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **76**: 213—238.

Initial Validation of MODIS Albedo Product by Using Field Measurements and Airborne Multiangular Remote Sensing Observations

JIAO Zi-ti¹, WANG Jin-di¹, XIE Li-ou¹, ZHANG Hao¹, YAN Guang-jian¹,
HE Li-ming¹, LI Xiao-wen^{1,2}

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: With the launch of NASA's Terra satellite and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), operational Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) and albedo products are now providing new opportunity to scientific community. The MODIS BRDF/Albedo algorithm makes use of a semiempirical kernel-driven bi-directional reflectance model to inverse the albedo by multiangle remote sensing data acquired within 16 days. These products include directional hemispherical albedo (black-sky albedo), bihemispherical albedo (white-sky albedo), Nadir BRDF-Adjusted surface Reflectance (NBAR), model parameters describing the BRDF, and extensive quality assurance information. There has been some validation result for this work, but further validation based on field measurement is also needed to widen application. This work aim to compare the albedo acquired by albedo meter in meteorological station and inverted by field measurement and air-borne MAR data using Kernel-driven model with that of MODIS. The initial validation result is also given in this paper.

Key words: albedo; multi-angle remote sensing; inversion; kernel-driven model