

MISR 宽波段反照率反演及其与大气关系研究

冯晓明^{1 2}, 赵英时¹, 陈永康^{1 2}
(1. 中国科学院研究生院地球科学学院 ,北京 100039 ;2. 中国科学院遥感所 ,北京 100101)

摘要 :以星载多角度传感器 MISR 为数据源反演宽波段反照率 ;根据入射辐射情况的不同(即是否考虑大气影响) ,将反照率分为理论反照率(Inherent albedo)和实际反照率(Apparent albedo)分别进行计算 ,并建立它们与大气状况的函数关系式 ,检验结果表明 ,该函数关系可靠。
关键词 :MISR ;宽波段反照率 ;理论反照率 ;实际反照率
中图分类号 :TP 75 文献标识码 :A 文章编号 :1001 - 070X(2003)04 - 0022 - 04

0 引言

反照率是指物体表面各个方向反射的全部光通量占入射总光通量的百分比 ,是表征地面物体辐射特性的重要参数之一。对于生态环境比较脆弱的半干旱地区 ,反照率的计算对于了解该地区生态环境的现状 ,指导环境的改善有重要意义。

星载传感器为全球范围的实时地表辐射探测提供了一种有效手段。传统的星载传感器从一个方向(通常是天底方向)对地表进行观测 ,在此基础上 ,主要有两种方法求算反照率^[1] ,一是假设地表是朗伯体 ,其反射各向同性 ;二是根据理想试验数据 ,寻找传感器探测的有限波段和角度反射率与宽波段反照率的线性关系。事实上 ,地表的反射各向异性 ,可以表示为二向性反射分布函数(BRDF) ,上述两种方法在数据获取的硬件受限制时不失为解决问题的办法 ,但显然会产生较大的误差 ,从而影响对反照率的深入研究。美国 NASA 研制的多角度成像光谱仪(MISR)首次提供了星载多角度观测的地物反射数据^[2] ,为反照率的精确计算提供了条件。

本文以地物的各向异性反射特性为基础 ,利用 MISR 提供的多角度、多波段数据进行宽波段反照率的计算。根据入射辐射条件的不同 ,反照率分为半球入射的实际反照率和单方向入射的理论反照率^[3] ,并进一步研究了两者之间的关系 ,以及反照率与大气状况的关系。这为区域范围内不同大气条件下地表反照率的反演提供借鉴。

1 数据简介

MISR 是 1999 年 12 月发射的 Terra 极轨飞行器所搭载的 5 个探测器之一。该新型探测器可从 9 个方向 ,分 4 个波段观测地球 ,以进行月、季及长周期的变化监测。9 个角度分别为 0°、±26.1°、±45.6°、±60.0°和 ±70.5° ,4 个波段分布在可见光到近红外光谱范围内 ,其中心波长分别为 446 nm、558 nm、672 nm 及 867 nm。^[2]

本文所选用的 MISR 数据为经系统辐射纠正、几何纠正和大气纠正环进行大气纠正的二级产品半球方向反射因子(HDRF)和双向反射因子(BRF) ,数据存储采用 1.1 km 和 17.6 km 两种空间分辨率。其中 ,HDRF 被定义为在太阳光和天空光照射下 ,地表出射辐射与相同入射条件下的朗伯体出射辐射之比 ;地表的 BRF 被定义为在特定辐照与观测条件下 ,地表的出射辐射与相同辐照与观测条件的朗伯体的出射辐射之比。

对 2π 空间的 HDRF 和 BRF 分别进行观测天顶角和观测方位角的积分 ,则得不同入射条件下地表的窄波段反照率双半球反射率(BHR)和方向半球反射率(DHR) ,分别表示为

$$BHR(\mu_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{1/2\pi} \int_0^{2\pi} HDRF(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) \mu d\mu d\phi \quad (1)$$
$$DHR(\mu_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{1/2\pi} \int_0^{2\pi} BRF(\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) \mu d\mu d\phi \quad (2)$$

式中 μ_0 、 ϕ 分别表示观测天顶角和方位角； μ_0 、 ϕ_0 分别表示太阳天顶角和方位角。地表的双半球反射率 BHR,即自然状态下(太阳光和天空光共同照射下)的窄波段反照率,也称实际反照率；地表的方向-半球反射率 DHR,即只有太阳直射光,已消除天空散射光条件下的窄波段反照率,也称理论反照率^[3]。

研究区位于内蒙古半干旱地带(N42° ~ N46° , E114° ~ E117°)。在 2001 年 7 月实地考察中,对研究区内沙、草地及湖等几种典型地物进行了与卫星同步的多角度观测,获得了主平面和垂直主平面的观测天顶角分别为 30°、45°、60°、75°和 90°的地面反射率数据,该反射率在 400 ~ 900 nm 之间分 316 个波段记载(图 1)。

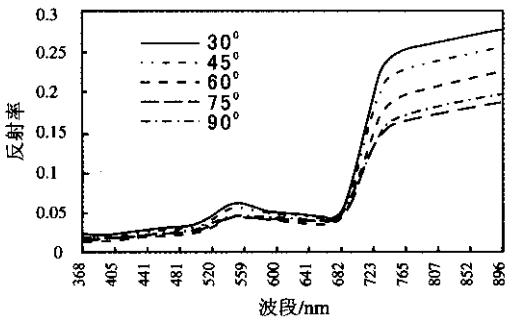


图 1 实测不同观测角的草地反射率

2 宽波段反照率的计算

由上可知,MISR 数据所提供的双半球反射率 BHR、方向-半球反射率 DHR 为不同光照条件下的地表窄波段反照率,但对地表物质能量交换相关的

研究来说,人们更关心的是太阳短波辐射的地表宽波段反照率。本文利用 MISR 所提供的可见光—近红外 4 波段反照率,计算宽波段(400 ~ 900 nm)的反照率 $\alpha(\mu_0)$ 。从反照率的定义出发,可得公式(3)

$$\alpha(\mu_0) = \int_{400}^{900} M_{\lambda}(\mu_0) d\lambda / \int_{400}^{900} E_{\lambda}(\mu_0) d\lambda \quad (3)$$

式中 λ 为波段； $M_{\lambda}(\mu_0)$ 为地表的辐射出射度； $E_{\lambda}(\mu_0)$ 为地表的入射辐射度。用太阳入射波谱 $E_{(0,\lambda)}$ (大气顶层的太阳辐照度)对两者进行归一化,分别得到 $m_{\lambda}(\mu_0)$ 和 $e_{\lambda}(\mu_0)$,两者的值可以从 MISR 提供的算法和数据中直接计算出来。

对于大气底部实际地表的入射辐射 $e_{\lambda}(\mu_0)$,其表达式为^[2]

$$e_{\lambda}(\mu_0) = (\mu_0 e^{-\tau_{\lambda}/\mu_0} + e_{(b,\lambda)}^{diff}(\mu_0)) / (1 - BHR(\mu_0) \cdot s_{\lambda}) \quad (4)$$

式中 $\mu_0 e^{-\tau_{\lambda}/\mu_0}$ 和 $e_{(b,\lambda)}^{diff}(\mu_0)$ 表示地表反射率为零时的直接入射和天空散射入射； s_{λ} 为大气底层向下的半球向反射率； $m_{\lambda}(\mu_0) = BHR(\mu_0) \cdot e_{\lambda}(\mu_0)$ 。

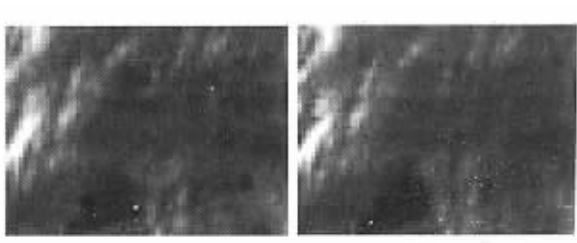
对已经消除了大气散射影响,入射光仅有太阳直射光的情况,地表入射辐射可以表示为 $e_{\lambda}(\mu_0) = \mu_0$, $m_{\lambda}(\mu_0) = DHR(\mu_0) \cdot e_{\lambda}(\mu_0)$ 。

为了得到一定波段范围内任意波长的反照率,以 Wehrli 太阳入射波谱(1985 年)和 MISR 所提供的 4 波段反照率为基础,在宽波段范围内(400 ~ 900 nm)作分段线性插值,则得

$$\alpha(\mu_0) = \frac{\int_{400}^{\lambda_1} m_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} m_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} m_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} m_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_4}^{900} m_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda}{\int_{400}^{\lambda_1} e_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_2}^{\lambda_3} e_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} e_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda_4}^{900} e_{\lambda} E_{(0,\lambda)} d\lambda} = \frac{0.24m_1 + 0.272m_2 + 0.294m_3 + 0.188m_4}{0.246e_1 + 0.272e_2 + 0.294e_3 + 0.188e_4} \quad (5)$$

式中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 分别表示 MISR 的 4 个中心波段； m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 分别表示归一化后的 4 个中心波段的地表辐射出射度； e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 分别表示归一化后 4 个中心波段的地表入射辐射度。由式(5)计算了研究区 1.1 km 分辨率的地表宽波段反照率(图 2)。

根据 NDVI 和实地考察的先验信息,区分图像上的沙、草地及湖所在的区域,取各区域内反照率的平均值作为该地类的双半球反照率(宽波段 BHR),同



(a) 双半球反照率(BHR) (b) 方向-半球反照率(DHR)
图 2 地表宽波段反照率

时根据野外同步测量的多角度光谱数据,计算出地表实测的宽波段反照率^[1]。把由公式(5)得到的双半球反照率和实测反照率作比较,并进行误差分析,结果如表1所示。

表1 宽波段反照率反演误差分析

项 目	沙	草 地	湖
双半球反照率	0.245 23	0.151 994	0.060 174 1
实测反照率	0.254 989	0.153 852	0.061 630
精度误差/%	3.83	1.21	2.36

从表1可见,该方法所计算的宽波段反照率精度较高,可作为 MISR 数据反演宽波段反照率的一种简便实用方法。

3 反照率与大气条件的关系

Shunlin Liang 等(2000 年)提出^[4]：“理论反照率是物体的固有属性,表征了地表反射只随物体的物质组成与结构的变化而变化;物体的实际反照率则随不同时空条件下大气状况的变化和不同地物固有反照率的变化而变化。如果能以某种方式(图/表/公式)把实际反照率和理论反照率联系起来,则用户可以直接从卫星观测数据中得到理论反照率”。同时,由于 MISR 卫星数据的采集受到一定时间周期的限制(9~16 d),若能找出两种反照率与大气状态参数之间的关系,则当已知某一地区、某一时刻的大

气状况和该地区地物的理论反照率,就可以计算出该大气条件下的地物实际反照率。

图3 为上述计算所得的不同像元点两种宽波段

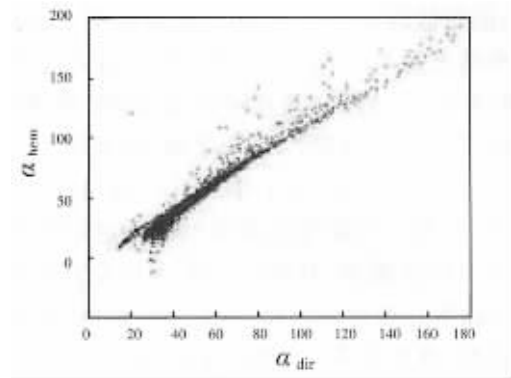


图3 400~900 nm 两种宽波段反照率之间的关系

反照率在二维空间分布的散点图。从图中可见,两者之间线性关系明显,相关系数高达0.978 8,偏离较远的点多为薄云覆盖的像元。实际反照率 α_{hem} 与理论反照率 α_{dir} 的线性相关关系可以表达为

$$\alpha_{hem} = a \cdot \alpha_{dir} + b \tag{6}$$

其中 a 、 b 为与大气条件有密切相关的系数。

实际上 α_{hem} 与 α_{dir} 间的差异在于是否有天空光的参与,而天空散射辐射主要取决于太阳天顶角与大气气溶胶散射的影响。因此,引入参数 τ/μ_0 作为表征大气、光照条件的函数,其中 τ 为大气气溶胶的光学厚度 μ_0 为太阳天顶角的余弦。经多次试验,最终建立了 a 、 b 与 τ/μ_0 之间的3次函数关系式

$$\begin{aligned} a &= -1e + 6(\tau/\mu_0)^3 + 621\,263(\tau/\mu_0)^2 - 97\,302(\tau/\mu_0) + 5\,073.4 \\ b &= 8e + 7(\tau/\mu_0)^3 - 4e + 7(\tau/\mu_0)^2 + 6e + 6(\tau/\mu_0) - 292\,341 \end{aligned} \tag{7}$$

表2 列出了部分计算结果：

表2 部分像元点的 a 、 b 及 τ/μ_0 值

像元号	参 数				
	a	b	τ	μ_0	τ/μ_0
1	1.059 3	0.326 3	0.138 5	0.880 6	0.157 27
2	1.060 2	-0.238 8	0.138 5	0.879 5	0.157 48
3	1.061 5	0.237 5	0.138 5	0.880 3	0.157 23
4	1.111 4	-2.847 6	0.138 5	0.881 2	0.157 17
5	1.035 7	2.621 3	0.138 5	0.880 5	0.157 29
6	1.012 3	4.653 5	0.138 5	0.882 2	0.156 99

$$\begin{aligned} a_{558} &= 6\,944.9(\tau_{558}/\mu_0)^3 - 3\,487.6(\tau_{558}/\mu_0)^2 + 577.85(\tau_{558}/\mu_0) - 30.551 \\ b_{558} &= -313\,881(\tau_{558}/\mu_0)^3 + 157\,452(\tau_{558}/\mu_0)^2 - 26\,063(\tau_{558}/\mu_0) + 1\,423.6 \end{aligned} \tag{8}$$

式中, τ_{558} 为 558 nm 处大气气溶胶光学厚度; MISR 数据集提供了 τ_λ 与 μ_0 , 将通过式(8)可求出 a_λ 、 b_λ 代入式(6),实现由已知理论反照率求解不同大气条件下的实际反照率。选取时、空分布不相同的3 072个像元数据参与验证,其误差分析如表3所示。

实际上,反照率和大气光学厚度都是与波长有关的参数,分波段寻找反照率与大气条件的关系可以避免波段积分带来的误差,因此,本文以 MISR 第2波段(中心波段558 nm)为例,进一步研究反照率与大气条件的关系。波段2两种反照率的相关系数提高到0.989 5。同样,用3次多项式较好地反映了 a_{558} 、 b_{558} 与 τ_{558}/μ_0 之间的关系

表3 误差分析

误差绝对值/%	>10	10~5	<5
像元/个	8	1 107	1 957
所占百分比/%	0.26	36	63.7

验证结果表明,计算所得的实际反照率 BHR 与地面同步实际测量值之间的误差绝对值最大达到 18.33%,主要受薄云覆盖的影响,最小为 0.085%,平均为 4.17%,中值为 4.19%。这说明,上述所表达的反照率与大气条件的关系是有价值的。

4 结论与讨论

(1) MISR 宽波段反照率的计算利用了多角度多波段数据,以地物的反射各向异性为基础,对宽波段的地表入射与反射能作分段线性插值。经验证,此法精度较高,是 MISR 数据反演宽波段反照率的一种简便实用的方法。

(2) 本文解决了一种求解区域范围内任意大气条件下地物反照率的新思路:地物的理论反照率是地物的固有属性,可作为实际反照率求解的一种先验知识,并建立了求解的函数关系式。验证表明,此方法简便可行,这为区域范围内不同大气条件下的地表反照率反演提供借鉴。应该说明的是,文中具体的关系式是针对半干旱的研究区,以及 MISR 大气纠正环算法,对于雨水丰富的湿润地区,还必须考虑大气中的水汽含量变化引起的大气状况的变化;采用不同的大气纠正算法其函数表达式会有差异。另外,在条件许可的情况下,提高参与表达式拟合的数据量,利于改进该项工作。

(3) 在用理论反照率求算一定大气条件下的反照率时,首先要消除云的影响,即作去云处理,因为云处于对流层的上层,大气对云的入射能的削减与对地面物体入射能的削减存在差异,这也是图 3 中

偏离的像元大多是有云覆盖像元的原因。

致谢: 本文所用的数据从 NASA 的 Langley 研究中心大气科学数据中心获得,在此表示感谢!

参考文献

[1] Grover K D, Steven M D, Rondeaux G, et al. Estimating albedo from limited spectral and angular data[J]. *INT. J. Remote Sensing*, 2000, 21(1): 155 - 165.

[2] David J Diner, John V Martonchik, Christoph Borel, et al. Level 2 Surface Retrieval Algorithm Theoretical Basis[EB/OL]. <http://www-misr.jpl.nasa.gov>.

[3] Shunlin Liang, Alan H Strahler, Charles Walthall. Retrieval of Land Surface Albedo from Satellite Observations: A Simulation Study[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38: 712 - 725.

[4] Shunlin Liang. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76: 213 - 238.

[5] Wolfgang Lucht, Crystal Barker Schaaf, Alan H Strahler. An Algorithm for the Retrieval of Albedo from Space Using Semiempirical BRDF Models[J]. *IEEE Transaction on Geos. and Res.*, 2000, 38(2): 977 - 998.

[6] Li Xiaowen, Gao Feng, Liu Qiang, et al. Validation of a New GO Kernel and Inverse of Land Surface Albedo by Kernel-Driven Model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(Suppl.): 1 - 12.

[7] Wolfgang Wanner, Alan H Strahler, Baoxin Hu, et al. Global BRDF and Albedo from the EOS MODIS and MISR Sensors[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(Suppl.): 143 - 148.

[8] 龙飞, 赵英时, 徐建春. 多角度 NOAA 数据方向信息提取的方法研究[J]. *遥感学报*, 2000, 4(增刊): 212 - 216.

[9] 杨华, 李小文, 高峰. 新几何光学核驱动 BRDF 模型反演地表反照率的算法[J]. *遥感学报*, 2000, 4(4): 246 - 251.

[10] 龙飞, 赵英时. 多角度 NOAA 卫星数据地面 BRDF 反射率的大气校正[J]. *遥感学报*, 2002, 6(3): 173 - 178.

[11] 郁凡. 多光谱卫星图像反演云空湿度场方法的改进[J]. *国土资源遥感*, 2003, 1(1): 38 - 42.

INVERSION OF MISR BROADBAND ALBEDO AND ITS RELATIONSHIP WITH ATMOSPHERIC CONDITION

FENG Xiao-ming^{1,2}, ZHAO Ying-shi¹, CHEN Yong-kang^{1,2}

(1. The Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 2. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the multi-angle remote sensing data from MISR, the broadband albedo is calculated. According to the assumption of different incident condition(whether there is influence from the atmosphere or not), it can be classified into inherent albedo and apparent albedo, then calculated separately. A function between the two albedos and the atmospheric condition is founded. After the test, it is shown that the function is robust and confident. It will be helpful to the calculation of apparent albedo of the concerned area at different atmospheric condition.

Key words: MISR; Broadband albedo; Inherent albedo; Apparent albedo

第一作者简介:冯晓明(1980-),女,中国科学院遥感应用研究所硕博研究生,主要从事多角度遥感的研

万方数据

(责任编辑:刁淑娟)