

利用 MODIS 图像反演海岸与 海岛的地物光谱反射率

麻金继^{1,2} 杨世植¹ 王先兵¹ 王家成¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所,合肥市 1125 信箱,230031)

(2 安徽师范大学物理与电子信息学院,芜湖市北京路 1 号,241000)

摘要:提出一种利用 MODIS 图像,用查找表反演海岸与海岛地物光谱反射率的方法。该方法首先借助 AHMAD 辐射传输模型,由 MODIS 图像的水体像元反演出气溶胶的光学特性;在所选影像为晴空无云条件下,假设一定范围内的海岛与海岸上空的大气和水体上空的大气一样,借助 6S 辐射传输模型计算基于地物光谱反射率的查找表,然后由 MODIS 图像的陆地像元的反射率和几何条件加上反演的气溶胶光学厚度,用插值法可求得地物光谱反射率。还给出了厦门地区实际卫星图像的反演结果,并就反演误差进行了分析。

关键词:MODIS 图像;反射率;光学厚度;气溶胶;遥感

中图分类号:TP751; TP237.9

在定量遥感初期,人们试图通过植被指数 NDVI 方法——归一化 NDVI 和时间序列 NDVI 最大值合成^[2]等方法绕开大气校正问题^[1]。目前,大气校正主要采用依据大气参数进行辐射传输计算的方法^[3],如在陆地上使用暗目标方法^[4]反演气溶胶光学特性,还有暗体减法^[5];这些校正方法的目的是为了减小地面反射率不确定度产生的误差。

由于海洋表面相对陆地表面来说要简单得多,而且在对水体观测时,大气信号所占比重更可达总信号的 90%以上^[6],故海洋表面的反射率变化对大气光学特性的影响较小。本文基于这一性质,首先借助 AHMAD 辐射传输模型^[7],用 MODIS 图像基于查找表的方法^[8]反演出海洋上空的气溶胶的光学特性。若在所选影像为晴空无云条件下,假设一定范围内(中心点 15 km 为半径的圆内)的海岛与海岸上空的大气和水体上空的大气一样,然后借助 6S 辐射传输模型^[9]和反演出的气溶胶模式,计算基于地物光谱反射率的查找表,再由 MODIS 图像的陆地像元和反演出的气溶胶光学厚度,最后用插值法即可得到地物光谱反射率。

1 反演方法

1.1 利用 MODIS 图像反演气溶胶光学特性

利用 MODIS 图像反演气溶胶光学特性,分为陆地与海洋两种反演方法。陆地上空气溶胶的反演是基于暗目标的方法;海洋上空气溶胶的反演是基于查找表的方法。

1.1.1 查找表的计算

Tanré 等人提出了利用 MODIS 图像,基于查找表的方法来反演海洋上空气溶胶的光学性质^[10]。查找表是基于大小粒子模式,用 AHMAD 辐射传输模型计算大气顶层表观反射率的表。本文采用 Leavy 等提出的气溶胶模式^[11],即 5 种大粒子和 4 种小粒子模式。海洋上空气溶胶光学特性的反演误差,主要来源于气溶胶粒子的大小与谱分布^[12],因而气溶胶粒子的模型设定有重要的意义。近海的海水辐射变化较大,Leavy 等人^[11]已经给予讨论,故海洋表面反射模型采用 Cox 的海浪模型^[13]。把 9 个粒子模式分别当作 9 种气溶胶模式,对每一种气溶胶模式,用 AHMAD 辐射传输模型分别计算在 550 nm 处,6 个气溶胶光

学厚度($\tau_a = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$), 16个观察天顶角($\theta_v = 1.5^\circ \sim 88.5^\circ$, 间隔 6°), 16个相对方位角($\phi_v = 0^\circ \sim 180^\circ$, 间隔 12°)和9个太阳天顶角($1.5^\circ, 12^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 54^\circ, 60^\circ, 66^\circ$ 和 72°)在MODIS前7个波段下的表观反射率的值。

1.1.2 反演方法和原理

计算生成查找表的方法和利用它们进行反演的基础是Wang和Gordon(1994)提出的简化方法, 即按双对数正态模式分布的粒子多次散射, 由同样光学厚度下每一个模式粒子产生的辐射加权平均近似计算。当两个模式具有不同的吸收特性时, 简化就会遇到困难, 但对这里的简化概念是很合适的。这种简化的优点是仅需考虑9种气溶胶模式, 而不是所有 $4 \times 5 \times 11$ 组合(11是表示模式间的相对浓度有11种可能值, 即 η 的所有可能的取值类)。

如果卫星观测的总反射率可表示为:

$$\rho_\lambda(\mu_s, \mu_v, \phi_v) = \eta \rho_\lambda^s(\mu_s, \mu_v, \phi_v) + (1 - \eta) \rho_\lambda^l(\mu_s, \mu_v, \phi_v) \quad (1)$$

式中, $\rho_\lambda^s(\mu_s, \mu_v, \phi_v)$ 和 $\rho_\lambda^l(\mu_s, \mu_v, \phi_v)$ 分别是小模式和大模式反射率的值(查找表中已经计算出), η 是大小模式之间的比值(分别取 $0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$); 上标 s, l 分别表示计算、小模式和大模式, 下标 λ 表示中心波长。气溶胶模式的选择和光学厚度的确定是通过 ϵ_{sl} 取最小值来实现的:

$$\epsilon_{sl} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\lambda=1}^n \left(\frac{\rho_\lambda^m - \rho_\lambda^{sl}}{\rho_\lambda^{sl} + 0.01} \right)^2} \quad (2)$$

式中, $\rho_\lambda^s(\mu_s, \mu_v, \phi_v)$ 和 $\rho_\lambda^m(\mu_s, \mu_v, \phi_v)$ 分别是中心波长为 λ 时, 计算与测量表观反射率的值。对于海洋上空气溶胶的反演, MODIS的前7个通道能用, 但第三通道(470 nm)对海洋表面的变化有很大的起伏, 而且它会导致在确定还不完全清楚的气溶胶贡献时产生误差, 故在反演中没有使用此通道。对于任何 η 值上的大粒子和小粒子模式的合成, 利用式(1)计算550 nm通道总的表观反射率($\rho_{550 \text{ nm}}^s(\mu_s, \mu_v, \phi_v)$), 利用550 nm通道观测的表观反射率($\rho_{550 \text{ nm}}^m(\mu_s, \mu_v, \phi_v)$)通过在这6个光学厚度下所有大粒子和小粒子模式的组合进行线性内插获得光学厚度, 然后在相应的气溶胶模式下用此光学厚度计算其他5个通道的表观反射率。通过式(2)对所有可能的气溶胶模式($4 \times 5 \times 11$)计算, 当 ϵ_{sl} 取最小值时, 就可以得到最佳气溶胶的模式和气溶胶在550 nm处的光学厚度。

1.2 地物光谱反射率的反演

1.2.1 6S辐射传输

6S是Vermote等人提出的解辐射传输方程

的模型^[9], 只要给定几何条件、大气模式、气溶胶模式、光学厚度以及地面反射率情况, 利用6S就可以计算大气顶层的表观反射率和大气的其他性质, 如大气透过率等。

假设地面为朗伯面, 则地物光谱反射率为^[9]:

$$\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_{sv}) = \left[\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_{sv}) + \frac{\rho_c}{1 - \rho_c} \cdot T(\theta_s) \cdot T(\theta_v) \right] \times T_{\text{gas}}(\theta_s, \theta_v, \phi_{sv}) \quad (3)$$

式中, $\rho^*(\theta_s, \theta_v, \phi_{sv})$ 是表观反射率; $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \phi_{sv})$ 是大气反射率; ρ_c 是下垫面反射率; $T(\theta_s)$ 是太阳到地面总的透射率; $T_{\text{gas}}(\theta_s, \theta_v, \phi_{sv})$ 是太阳-地面-遥感器总的气体透射率; s 是大气半球反照率。

1.2.2 利用6S计算查找表

由6S计算所需的参数, 大气模式选择中纬度夏季(根据反演的图像确定); 气溶胶模式用 § 1.1 反演的最佳结果; 海拔高度为零; 下垫面取朗伯面(反射率分别取 0.02 到 0.18 每隔 0.02 的所有值)。借助6S辐射传输模型, 计算在550 nm处, 6个气溶胶光学厚度($\tau_a = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0$), 6个太阳天顶角($\theta_s = 18.2^\circ \sim 21.2^\circ$, 间隔 0.5°), 6个相对方位角($\phi_v = 0^\circ \sim 30^\circ$, 间隔 5°)和5个观察天顶角($\theta_v = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$)下的在MODIS7个波段处的大气顶层表观反射率, 用于反演地物光谱反射率的查找表。查找表在670 nm处的结构如表1所示(部分)。

表1 计算地物光谱反射率的查找表

Tab.1 Lookup Table for Using to Calculate the Reflectance of the Ground

太阳天顶角/(°)	观测天顶角/(°)	相对观测方位角/(°)	气溶胶光学厚度	表观反射率	地表反射率
...
19.2	25.0	2.0	0.27	0.154 5	0.140 0
19.2	25.0	2.0	0.27	0.171 3	0.160 0
19.2	25.0	2.0	0.27	0.188 2	0.180 0
19.2	25.0	2.0	0.28	0.055 7	0.020 0
19.2	25.0	2.0	0.28	0.080 2	0.050 0
...

1.2.3 地物光谱反射率的反演

由MODIS图像, 可以读出像元的几何条件即太阳天顶角、观测天顶角、相对观测方位角和表观反射率, 再加上 § 1.1 反演出的最佳气溶胶模式和光学厚度, 基于表1, 利用线性插值法可以求出地物光谱反射率。

1.3 反演的流程

基于查找表反演地物光谱反射率的方法, 是建立在海洋表面反射率已知的基础上以及海洋上空的气溶胶模式和海岸上空气溶胶模式相同的条件下。当条件满足时, 就可以从MODIS图像反

演出地物光谱反射率,其步骤如下。

1) 假设 9 种粒子模式,其中 4 种小粒子和 5 种大粒子;

2) 用 Cox 的海浪模型计算海洋表面反射率;

3) 由式 1)和式 2),借助 AHMAD 辐射传输模型计算用于反演气溶胶光学特性的查找表 A;

4) 选出晴空的 MODIS 图,读出海洋部分像元的反射率值,利用式(1)和式(2)可以反演出大气气溶胶的模式和光学厚度;

5) 由反演出的气溶胶模式和 6S 辐射传输模型计算用于反演地物光谱反射率的查找表 B;

6) 从 MODIS 图中读出海岸和海岛部分像元的反射率值和几何条件,基于查找表 B 和步骤 4)反演的气溶胶光学厚度,利用插值法反演得到地物光谱反射率。

1.4 反演误差的模拟估测

为了验证气溶胶光学厚度的改变对地物光谱反射率的影响,进行如下模拟计算。取太阳天顶角与方位角分别为 19°和 95°,观测天顶角与方位角分别为 28°和 90°,气溶胶光学厚度在 550 nm 处的真值为 0.28,对查找表 B 进行插值。

表 2 模拟了 550 nm 波段气溶胶光学厚度增大 10%或减小 10%等情况下,对反演地面反射率的影响。从表 2 中可以看出,随着气溶胶光学厚度误差的加大,对可见光波段的反射率反演影响加大,而对近红外波段的影响相对较小,气溶胶光学厚度变化 10%对反演地面各波段光谱反射率产生的误差均在 5%以内。如果再考虑插值误差,则总的误差不会超过 10%。

表 2 气溶胶光学厚度的不确定度给地物反射率反演带来的误差/%

Tab. 2 Error in Retrieved of the Ground Surface Reflectance with the Aerosol Optical Thickness of the Relative Error

波长/ μm	光学厚度 (550 nm)			
	增加 10%	增加 5%	减小 5%	减小 10%
0.47	2.60	1.10	0.90	1.86
0.55	1.30	0.45	0.39	1.20
0.66	1.50	0.84	0.67	1.45
误差	0.86	1.41	0.76	0.78
	1.24	1.20	0.47	0.59
	1.64	0.80	0.45	0.30
	2.13	0.49	0.29	0.50

通常情况下,陆地空气溶胶光学厚度总是大于海洋上空的气溶胶光学厚度。本算法中对气溶胶光学厚度的反演误差可能来源于水体、风速和风向的选取,它们带来的误差使气溶胶光学厚

度计算值产生偏差;而在一定范围内,认为陆地上空与海洋上空大气条件相同的假设,有可能造成气溶胶光学厚度比真实值小。故气溶胶光学厚度在计算中可能出现偏小,而产生的误差是地面光谱反射率的反演误差的主要来源。

2 MODIS 图像的应用与分析

笔者选用的 MODIS 图像是中国东南海域 2003-05-28 卫图,所取范围为晴空无云的 30 像元 \times 30 像元(已经归化 1 km 分辨率图,图 1(a)圈内的部分)。4 个顶点的经纬度坐标为:(24.682 0,118.199 0),(24.637 0,118.563 0),(24.414 0,118.142 0),(24.369 0,118.505 0)。根据暗目标法,提取图 1(b)中的所有水像元,用于反演气溶胶的光学厚度和气溶胶的模式。反演出的气溶胶最佳模式是第三小粒子与第一大粒子按 4 : 1 比例,以双模谱的形式组成;气溶胶光学厚度每行的平均值如图 2(a)所示。将每行海水像元计算的气溶胶光学厚度取平均用于该行陆地像元反射率的反演,被海岛隔开的取两个值。

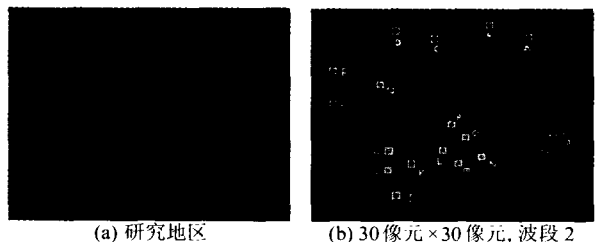


图 1 MODIS 图
Fig. 1 MODIS Image

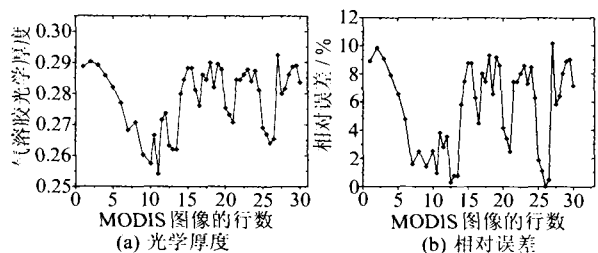


图 2 MODIS 图像中每行气溶胶的结果
Fig. 2 Result of the Row of MODIS Image

图 2(a)给出了图像中每行气溶胶平均光学厚度(有海岛的分为两个),图 2(b)给出气溶胶每行平均光学厚度的相对误差,标准值($\tau_a(550 \text{ nm})$)等于 0.264)选自该地区的地面对大气的同步测量。从图 2 中可以看出该处的大气气溶胶随空间变化很小,所研究范围内的大气均匀状况良好。

图3和图4给出了图1(b)中任意标注的各像元反射率曲线。图3中曲线是海水的光谱曲线,在870 nm到近红外波段的反射率近似为零。 T_1 和 T_2 都是把海平面看作朗伯面采用同陆地一样的方法反演出来的反射率, T 是用海浪模型^[13]计算出来用于反演海洋上空气溶胶光学特性的反射率(风速用6 m/s,叶绿素含量用0.5 mg/m³,盐份35 ppt)。从这三条曲线可以看出,反演的结果与模型计算的结果符合得较好。

图4中4个图的曲线是近海岸地物反射率的曲线。这些光谱曲线较为符合植被的光谱特点,在可见光波段反射很小,在670 nm~1 240 nm反射迅速增加,红外波段渐渐减小。

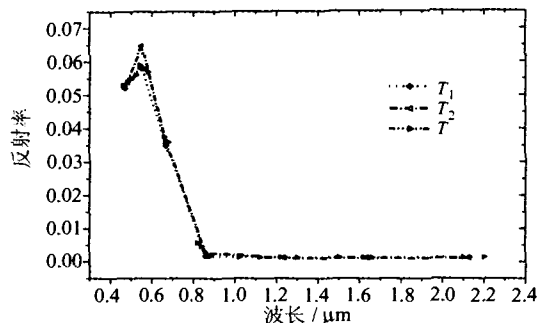


图3 图2(a)中所示海洋像元在MODIS 7个波段的反射率曲线

Fig. 3 Reflectance Curve of the Ocean Water as Fig. 2(a) Mark

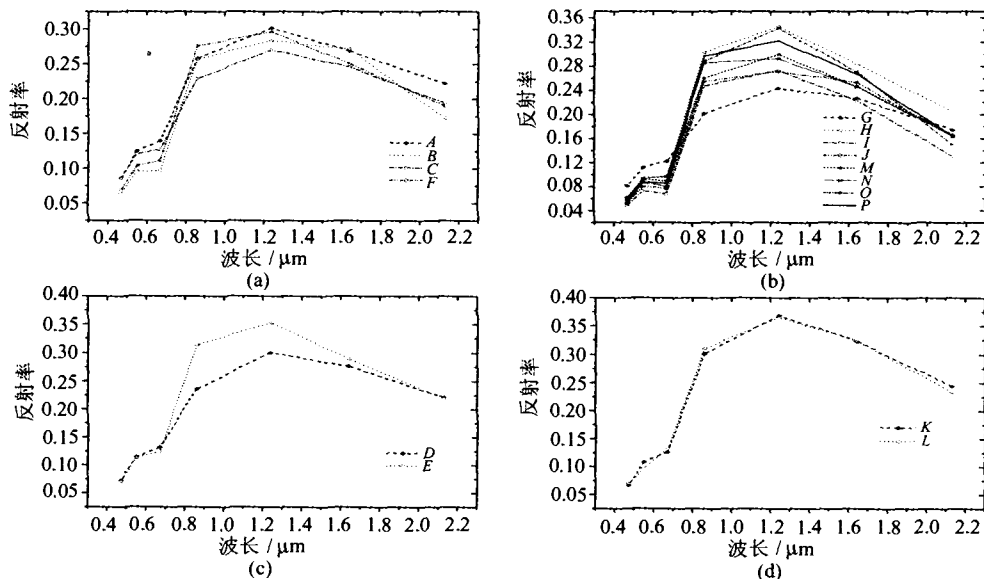


图4 图1(b)中所示各像元在MODIS 7个波段的反射率曲线图

Fig. 4 Reflectance Curve of the Land as Fig. 1(b) Mark

图4(a)中条曲线是大陆沿岸的地物光谱反射曲线,曲线B、F可能含有水像元;图4(b)8条曲线是海岛沿岸地物光谱曲线;曲线G可能是海洋与陆地的复合像元;曲线O是典型的绿色植被反射率曲线;图4(c)、4(d)图中的曲线分别是离海岸较远的内陆与海岛内的地物光谱反射率,从中可以看出内陆的地物较复杂,海岛内的地物较为单一。

3 结论与展望

根据海岸地物近水的特点,本文采用海洋上空反演的气溶胶光学厚度用于地面反射率的反演,对每一个地面像元由卫星接收时的太阳天顶角、方位角,观测天顶角、方位角和反演的大气气溶胶光学厚度,在6S辐射传输模型基于反演的气

溶胶模式计算的查找表中,用插值法即可反演出地物光谱反射率。数值模拟显示,在反演地物光谱反射率时气溶胶光学厚度的误差在10%以内,则对地面光谱反射率的反演误差均在10%以内。

该方法利用了实时反演的气溶胶模式,反演速度快,反演误差小。但此法仅仅适用于近海岸和小的海岛,对离海洋较远(30 km)的陆地反演的结果有待进一步研究。近海岸的水体是II类水体,目前对II类水体没有好模型计算其反射率,它对气溶胶反演的精度有影响,从而影响地面反射率的精度。下一步工作的主要任务是改进II类水体的反射率模型,并用ASD实测卫星过顶时地物反射率数值与反演结果作对比分析。

致谢:作者对朱永豪研究员提供的修改意见表示感谢!

参 考 文 献

- 1 Tucker C J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations Monitoring Vegetation. *Remote Sensing Environment*, 1979(8):127~150
- 2 Holben B N. Characteristics of Maximum-value Composite Images for Temporal AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986(7):1 435~1 445
- 3 Moran M S, Jackson R D, Hart G F, et al. Obtaining Surface Reflectance Factors from Atmospheric and View Angle Corrected SPOT-1 HRV Data. *Remote Sensing Environment*, 1990,32:203~214
- 4 Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-IR Satellite Imagery. *Int. J. Remote Sens.*, 1998, 9(8):1 357~1 381
- 5 Chavez P S J. An Improved Dark-object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environ.*, 1988,24(3):459~479
- 6 Gordon H R. Phytoplankton Pigment Concentration in the Middle Atlantic Bight: Comparison of Ship Determinations and CZCS Estimates. *Appl. Opt.*, 1983, 22:20~36
- 7 Ahmad Z, Fraser R. An Iterative Radiative Transfer Code For Ocean—Atmosphere Systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982,32:656~665
- 8 Kaufman Y J, Tanré D. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS. *MODIS ATBD MOD02*, 1998.1~85
- 9 Vermote E, Tanré D J, DeuzéL, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). *Lieil University, Lieil*, 1997
- 10 Tanré D, Kaufman Y J, Herman M, et al. Remote Sensing of Aerosol Properties Over Oceans Using the MODIS/EOS Spectral Radiances. *J. Geophys. Res.*, 1997,102(D14):19 043~19 060
- 11 Levy R C, Remer L A, Tanré D, et al. Valuation of the MODIS Retrievals of Dust Aerosol Over the Ocean During PRIDE. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108 (D14):10~14
- 12 Kaufman Y J, Haywood J M, Hobbs P V, et al. Remote Sensing of Vertical Distributions of Smoke Aerosol off the Coast. *Geophysical Research Letters*, 2003,30:2~4
- 13 Cox C, Munk W H. The Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun Glitter. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1954, 44:838~850

第一作者简介:麻金继,讲师,博士生,主要从事遥感技术应用的研究。

E-mail:jijin_ma@yahoo.com.cn

Retrieval of the Reflectance Along Coast Zone and Island with MODIS Image

MA Jinji^{1,2} YANG Shizhi¹ WANG Xianbing¹ WANG Jiacheng¹

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. Q. Box 1125, Hefei 230031, China)

(2 College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, 1 Beijing Road, Wuhu 241000, China)

Abstract: The paper describes a LUT method for retrieval of the ground surface reflectance along coast zone and island with MODIS image. Simulation of the AHMAD radiative transfer model on determination of the aerosol optical character with water pixel of MODIS image. Simulation the aerosol optical character and the 6S model on computing of the LUT about the ground surface reflectance. Using the interpolate method to retrieval of the ground surface reflectance along coast zone and island with the LUT, aerosol optical character and the MODIS image. The LUT method is applied to determine the ground surface reflectance in XI-MEN'S zone from the MODIS image. We analyzed the determination of result and found its expectation error.

Key words: MODIS image; reflectance; optical thickness; aerosol; remote sensing