

利用 MODIS 数据进行海岸带卫星图像大气校正

彭妮娜, 易维宁, 方勇华

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 提出一种利用同步 MODIS 图像的水体像元反演出混浊水域上空气溶胶光学特性的算法。在晴空无云的条件下, 假设一定范围内的海岸带上空的大气和水体上空的大气一致, 借助 6S 辐射传输模型, 并考虑临近像元效应, 利用反演出的气溶胶光学特性对卫星海岸带图像进行大气校正的方法, 给出了应用该方法对我国沿海地区 QuickBird-2 卫星图像和 CBERS-02 卫星图像进行大气订正的结果, 并对反演结果进行了比较分析。实验证明, 利用 MODIS 图像进行海岸带卫星图像大气校正取得了很好的效果, 该方法无需地面实测数据, 具有很高的适用性。

关键词: 气溶胶特性反演; 二类水; 大气订正; 临近效应

中图分类号: P407

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2007)06-0504-05

Atmospheric Correction of Satellite Imagery for Coastal Areas Using MODIS Data

PENG Ni-na, YI Wei-ning, FANG Yong-hua

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: An atmospheric correction algorithm of satellite image for turbid water of coastal areas is put forward using synchronous measuring MODIS data. Supposed that the atmospheric condition above the turbid water and the coastal areas is identical in a certain space range, this algorithm is to use the atmospheric properties retrieved by the turbid water coastal areas based on MODIS water pixel to make atmospheric correction by using the 6S radiation transfer model and taking account of the adjacency effect. Atmospheric correction was applied to QuickBird-2 imagery and CBERS-02 imagery for turbid water of coastal areas. The atmospheric correction results and the analysis of retrieval errors were given. The experiment proves that atmospheric correction of satellite imagery for turbid water coastal areas using MODIS data is efficient and adaptive without need of ground data.

Key words: retrieval of aerosol properties; case II water; atmospheric correction; adjacency effect

1 引言

传统的大气订正方法是在卫星过境时在地面

同步测量实验区的大气参数, 然后利用大气辐射传输模型对卫星数据进行大气订正。显然, 这种方法只适用于少量的实验区, 无法用于大量卫星数据的

大气订正; 业务化运行的大气订正算法要求从遥感数据本身来反演大气参数, 进而完成大气订正, 这就需要针对大气辐射特性设置用于反演大气参数的波段, 而很多卫星缺乏用于反演大气参数的波段, 给卫星图像数据的大气订正带来了困难。而信噪比和光谱分辨率很高而且波段丰富的 MODIS 数据, 不仅可以免费获取, 而且, 总能找到与其同步的、覆盖同一地区的卫星数据, 因此, 本文提出基于同步 MODIS 数据反演出气溶胶光学特性从而进行卫星图像大气校正的算法, 该算法无需地面实测数据, 具有很高的适用性。另外, 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到总信号的 90% 以上, 所以, 目前海洋上空的气溶胶反演精度远高于陆地上空气溶胶反演的精度, 但是, 对于海岸带, 环境和海水受到人类活动的影响比较大, 故海岸带的水大多都是浑浊的水, 针对目前混浊水域上空气溶胶光学特性反演方法还不成熟的特点^[1-3], 给出了基于 MODIS 图像混浊水域上空气溶胶光学特性反演的方法^[4], 在晴空无云的条件下, 假设一定范围内的海岸带上空的大气和水体上空的大气一致。在借助 6S 辐射传输模型进行大气订正时, 首先在朗伯假设条件下, 计算出地表反射率, 最后扣除临近像元的影响得到真实的地表反射率。通过我国沿海地区 QuickBird-2 卫星图像和 CBERS-02 卫星图像的大气订正的前后图像对比, 可以看出, 大气订正消除了大气程辐射和临近像元的影响, 增强了对比度, 边缘等细节部分变得更加清晰。

2 混浊水域上空气溶胶光学特性反演

我们知道利用 MODIS 图像反演海洋上空气溶胶的光学特性算法中^[5], 所用 MODIS 的 6 个通道, 其中心波长分别是 $0.55 \mu\text{m}$ 、 $0.66 \mu\text{m}$ 、 $0.86 \mu\text{m}$ 、 $1.24 \mu\text{m}$ 、 $1.64 \mu\text{m}$ 和 $2.13 \mu\text{m}$ 。在此算法中其离水辐射在 $0.86 \mu\text{m}$ 、 $1.24 \mu\text{m}$ 、 $1.64 \mu\text{m}$ 和 $2.13 \mu\text{m}$ 处被看作零, 而在 $0.55 \mu\text{m}$ 、 $0.66 \mu\text{m}$ 被当作干净的海水 (I 类水) 来计算。由于海岸带的水大多是 II 类水体, 很显然这种反演气溶胶光学特性的方法不适用于海岸带。图 1 是 2000 年 4 月,

NASA 中心在 Honolulu 机场附近的航空遥感实验中用 AVIRIS 测量出的 I 类水和 II 类水表现反射率的结果比较图。从图中我们可以看出在 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 范围内, I 类水比 II 类水的表现反射率小, 其它波

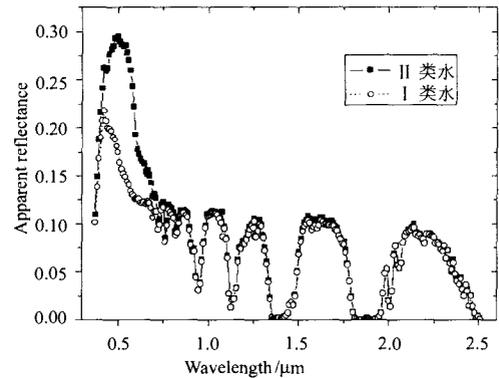


图 1 I 类水和 II 类水表现反射率对比图

Fig.1 Comparison of the case I and case II water apparent reflectivity

段内两者的表现反射率几乎相同。因而, 对于 MODIS 我们选择 5、6、7 波段, 采用基于暗目标的查找表方法来反演大气气溶胶光学特性。但是由于这 3 个通道对于气溶胶的散射特性不是很敏感, 定义了两个新的函数分别来反演气溶胶的光学厚度和模式

$$\gamma_{\text{diff}}(\lambda_1, \lambda_2) = \gamma(\lambda_1) - \gamma(\lambda_2), \quad (1)$$

$$\xi_{\text{ms}}(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\rho_{\text{atm}}(\lambda_1) - \rho_{\text{ray}}(\lambda_1)}{\rho_{\text{atm}}(\lambda_2) - \rho_{\text{ray}}(\lambda_2)}, \quad (2)$$

其中 $\gamma(\lambda) = 100\rho_{\text{atm}}(\lambda)/\rho_{\text{ray}}(\lambda)$, $\rho_{\text{atm}}(\lambda)$ 和 $\rho_{\text{ray}}(\lambda)$ 分别是波长为 λ 时的大气的表现反射率和大气分子的瑞利表现反射率。 $\gamma_{\text{diff}}(\lambda_1, \lambda_2)$ 用来反演气溶胶光学厚度, $\xi_{\text{ms}}(\lambda_1, \lambda_2)$ 用来判断气溶胶模式。利用这两个函数, 对于假定的气溶胶模式和光学厚度计算的查找表和 MODIS 图像, 可以反演出气溶胶光学特性^[6]。

3 大气订正原理

在辐射传输过程中到达地面的总辐射能量主要是经过大气衰减的太阳直接辐射 E_s 和下行天空漫射光 E_d 之和。其中, $E_s = (E_0/D^2) \cos \theta \times \exp(-\tau \sec \theta)$, E_0 为太阳常数; D 为日地距离; τ 为光学厚度; θ 为太阳天顶角。假设天空辐照度各

向同性和地面朗伯面反射，且天空晴朗无云，忽略大气的折射、湍流和偏振，则地物表面反射辐亮度

$$L_{r\lambda} = \frac{R_{g\lambda}[E_0(\lambda) \cos \theta_z \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_z) + E_{d\lambda}]}{\pi}, \quad (3)$$

式中， $R_{g\lambda}$ 为地物表面反射率； τ_λ 为光学厚度； θ_z 为太阳天顶角； $E_{d\lambda}$ 为天空光漫射到地表面的光谱辐照度。

由卫星传感器接收到的光谱辐亮度 $L_{i\lambda}$ 是经过大气衰减后的地面辐亮度和大气本身的程辐射 L_p 之和，即 $L_{i\lambda} = [L_{i\lambda} \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_v) + L_p]$ ，式中 θ_v 为卫星传感器观测角，则地物表面反射率

$$R_{g\lambda} = \frac{\pi}{T_{u\lambda}} \frac{L_{i\lambda} - L_p}{E_0(\lambda) \cos \theta_z T_{d\lambda} + E_{d\lambda}}, \quad (4)$$

其中 $T_{d\lambda} = \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_z)$ ，
 $T_{u\lambda} = \exp(-\tau_\lambda \sec \theta_v)$ 。

1) 遥感数据的定标

遥感数据定标是大气校正的前提，遥感器入口处波段 i 的辐射度 L_i 和遥感器输出的亮度值 DN_i 之间存在线性关系

$$DN_i = A_i L_i + C_i, \quad (5)$$

式中， L_i 是遥感器入瞳处波段 i 的等效辐射度 (单位： $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)； DN_i 是遥感器波段 i 输出亮度值或经过相对校正后的亮度值 (单位：DN)； A_i 为波段 i 的绝对辐射定标增益系数 (单位：DN/($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$))； C_i 为波段 i 的绝对辐射定标偏移量 (单位：DN)。

2) 不考虑周围邻近像元的影响进行大气订正

首先忽略临近像元影响，朗伯假设条件下

$$L = L_p(\theta_v, \theta_s, \phi) + \tau_v(\theta_v) \frac{\rho_1}{\pi} \frac{E_g(0)}{(1 - \rho_1 S)}, \quad (6)$$

式中， L_p 为大气程辐射； $\tau_v(\theta_v)$ 为地 - 遥感器总大气透过率； ρ_1 为朗伯假设条件下目标反射率 (背景反射率视为与目标反射率相同)； E_g 为地面总辐照度； S 为大气球面反照率； θ_s 为太阳天顶角； θ_v 为观测天顶角； ϕ 为相对方位角。

3) 考虑临近效应

ρ_s 为真实地面反射率， $\tilde{\rho}_s$ 为临近像元反射率加权平均值， $T(\mu_v)$ (其中 $\mu_v = \cos \theta_v$) 为大气向上的总的透过率， $t_d(\mu_v)$ 为漫射透过率， $e^{-\tau/\mu_v}$ 为直射透过率， $f[r(x, y)]$ 为大气点扩散函数。

$$\rho_1 = \rho_s \frac{e^{-\tau/\mu_v}}{T(\mu_v)} + \tilde{\rho}_s \frac{t_d(\mu_v)}{T(\mu_v)}, \quad (7)$$

$$\rho_s = \frac{\rho_1 T(\mu_v) - \tilde{\rho}_s t_d(\mu_v)}{e^{-\tau/\mu_v}}. \quad (8)$$

其中 $t_d(\mu_v) = T(\mu_v) - e^{-\tau/\mu_v}$ ，
 $\tilde{\rho}_s = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f[r(x, y)] \rho(x, y) dx dy$ ，取校正像元为中心的 $2N \times 2N$ 区域的离散形式

$$\tilde{\rho}_s = \sum_{j=-N}^N \sum_{i=-N}^N f[r(i, j)] \rho_1(i, j). \quad (9)$$

4 卫星图像大气订正结果

利用 MODIS 数据对 QuickBird-2 卫星在 2005 年 4 月 4 日 03:01:48~03:01:55 我国沿海地区成像的图像进行大气订正。首先，找到与 QuickBird-2 卫星图像同步的 (成像时间相差半小时以内)、覆盖同一地区的 MODIS 数据 (2005 年 4 月 4 日 02:25~02:32)，可以假设这两种遥感器在同一地区成像时的大气状况是一致的。利用 MODIS 数据反演大气参数，然后将反演的大气参数代入大气辐射传输方程，从而完成 QuickBird-2 卫星图像的大气订正。图 2、图 3 显示了大气订正前和大气订正后的 QuickBird-2 卫星 band 1、band 2 图像的比较。

利用与 CBERS-02 卫星图像同步的、覆盖同一地区的 MODIS 数据 (2006 年 12 月 8 日 10:40) 对 CBERS-02 卫星在 2006 年 12 月 8 日 10:30 我国沿海地区成像的图像进行大气订正。图 4、图 5 显示了大气订正前和大气订正后的 CBERS-02 卫星 band 2、band 3 图像的比较。

从实验我们可以看出，原先因大气程辐射和临近像元的影响模糊的细节显现出来，消除了邻近像元影响的大气订正图像其对比度增强，边缘等细节部分更加清晰，整体效果好，图像质量有明显改善。

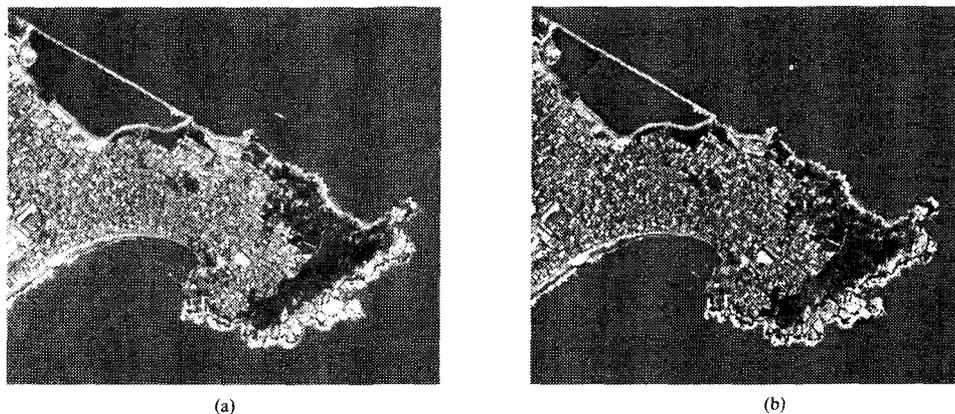


图 2 大气订正前和大气订正后的 QuickBird-2 卫星 band 1 图像比较 (a) 大气订正前 (b) 大气订正后
 Fig.2 QuickBird-2 band 1 imagery in southern China coastal areas (a) before atmospheric correction
 (b) after atmospheric correction

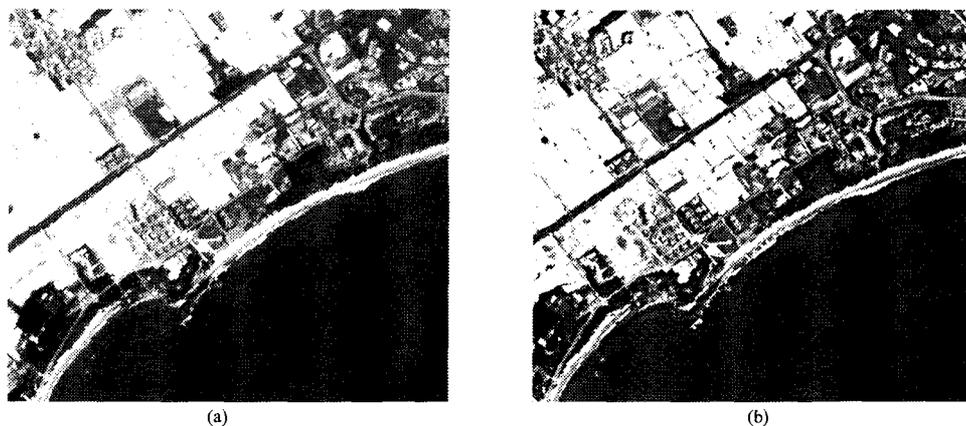


图 3 大气订正前和大气订正后的 QuickBird-2 卫星 band 2 图像比较 (a) 大气订正前 (b) 大气订正后
 Fig.3 QuickBird-2 band 2 imagery in southern China coastal areas (a) before atmospheric correction
 (b) after atmospheric correction

5 结 论

大气订正是遥感信息定量化过程的一个重要环节,而在大气校正中起关键作用的是气溶胶光学厚度、气溶胶的模式和大气漫射透过率;但在浑浊的水体上空,这些参数很难用卫星图像反演得到。本文提出了基于同步 MODIS 图像的水体像元反演出浑浊水域上空气溶胶光学特性,借助 6S 辐射传输

模型,并考虑临近像元效应,利用反演出的气溶胶光学特性对卫星海岸带图像进行大气校正的方法。通过对 QuickBird-2 卫星图像和 CBERS-02 卫星图像进行大气订正,消除了遥感图像中的非目标地物成像信息,取得了一定的效果;在此基础上又考虑了目标所在背景的贡献,消除邻近像元的交叉辐射影响,从而更好地还原了地表的真实面目。

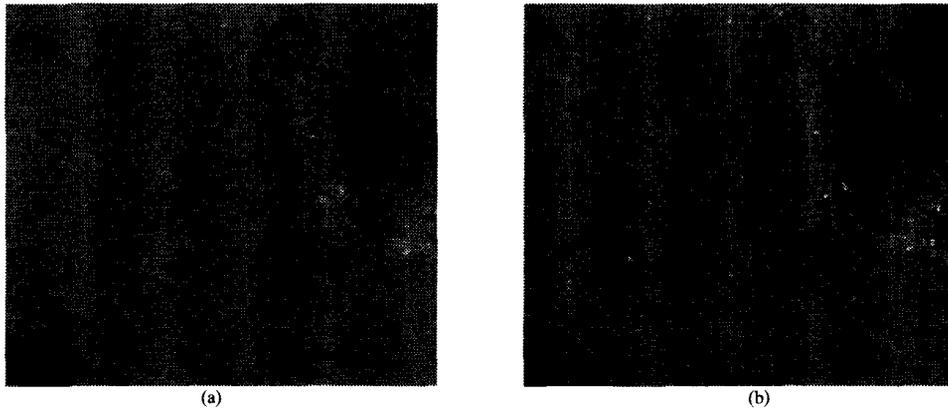


图 4 大气订正前和大气订正后的 CBERS-02 卫星 band 2 图像比较 (a) 大气订正前 (b) 大气订正后
Fig.4 CBERS-02 band 2 imagery in southern China coastal areas (a) before atmospheric correction
(b) after atmospheric correction

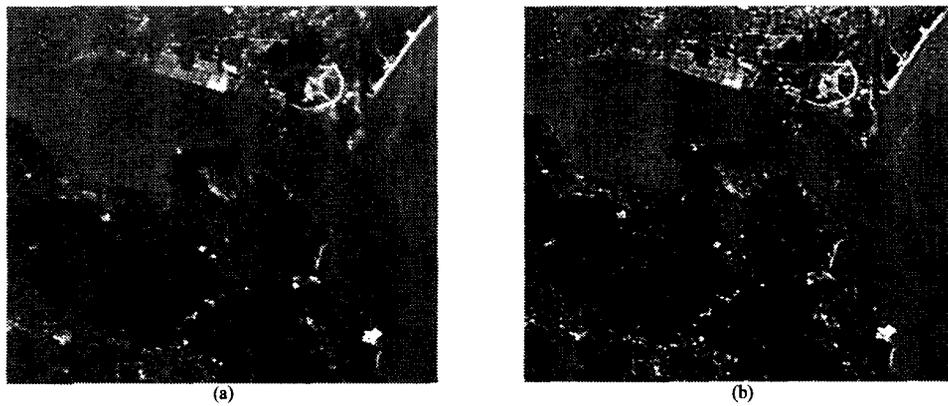


图 5 大气订正前和大气订正后的 CBERS-02 卫星 band 3 图像比较 (a) 大气订正前 (b) 大气订正后
Fig.5 CBERS-02 band 3 imagery in southern China coastal areas (a) before atmospheric
correction (b) after atmospheric correction

参考文献:

- [1] King M D, Kaufman Y J, Menzel W P, et al. Remote sensing of cloud, aerosol and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS)[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1992, **30**: 2-7.
- [2] Gordon H R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the earth observing system era[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 17081-17106.
- [3] Qiu Jinhuan, Zhou Xiuji. Simultaneous determination of aerosol size distribution and refractive index and surface albedo from radiance-part 1: theory[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1986, **3**(2):162-171.
- [4] Hu Chuanmin, Carder K L, et al. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters: a practical method[J]. *Remote Sens. Environ.*, 2000, **74**:195-206.
- [5] Remer L A, Tanré D, Kaufman Y J, et al. Validation of MODIS aerosol retrieval over ocean[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(12): 1-4.
- [6] Chen Jin, Ma Jinji, Wang Jiacheng. Atmospheric correction of MODIS image for turbid coastal waters[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(4): 306-311(in Chinese).
陈瑾, 麻金继, 王家成. 海岸带混浊水域 MODIS 图像的大气校正 [J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(4): 306-311.