

文章编号: 1007-4619 (2001) 06-401-06

卫星遥感大气订正的参数化模式及其模拟应用

邱金桓

(中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 发展了一个用于卫星大气订正的参数化模式, 包括一个新的程辐射亮度模式和一个参数化的朗伯地表-大气辐射耦合引起的亮度增量模式。应用最小二乘法, 程辐射亮度被参数化为大气总光学厚度、一次散射反照率、太阳天顶角、视天顶角、方位角、大气不对称因子的函数。应用这一参数化的亮度模式进行大气订正应用的数值模拟, 即进行卫星遥感地表光谱反照率的模拟试验。数值检验结果表明: 对于 865 nm, 670 nm, 550nm 和 412nm 4 个 MODIS 通道, 在 0°-70° 的太阳天顶角、0°-60° 视观测角以及 0.05-0.8 的地表反照率条件下, 参数化的向上辐射亮度的标准差小于 4%, 由该参数化亮度模式引起的地表反照率解的标准差小于 0.03。

关键词: 辐射亮度; 参数化模式; 地表反照率

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引言

一个足够精确、快速、简便的向上太阳辐射亮度模式对于空间对地光学遥感应用是很有意义的。现在, 卫星遥感应用的大气辐射模式和软件系统中, 普遍采用数值方法求解辐射传输方程, 求得向上的辐射亮度, 用于大气订正等^[1-3]。辐射传输数值求解方法一般是很复杂的, 也是很费计算时间的。因此, 作者近年来寻求发展一种快速、简便、参数化的辐射亮度计算模式^[4-8]。在已有的参数化工作的基础上, 本文主要应用最小二乘法, 发展了一个更简单、更精确的参数化的程辐射亮度模式, 发展了一个新的地表-大气辐射耦合模式, 并应用这些模式进行大气订正应用的数值模拟。

2 参数化的辐射亮度模式及地表反照率的反演模式

2.1 参数化的辐射亮度模式

向上的太阳辐射亮度可表为:

$$I(\mu, \phi) = I_{\text{path}}(\mu, \phi) + \Delta I_{\text{Ref}}, \quad (1)$$

(1) 式中, μ 为天顶角余弦, ϕ 为方位角, $I_{\text{path}}(\mu, \phi)$ 为程辐射亮度, ΔI_{Ref} 为由地表反射引起的辐射增量。本文作者曾在光学上均一大气(即均一大气散射相函数)条件下发展了一个参数化的程辐射亮度模式, 但由于采用经验拟合方法, 该模式精度较低, 也较复杂。本文主要应用最小二乘法, 发展了一个新的参数化的程辐射亮度模式。一次散射亮度较强的地方, 多次散射贡献也应当较大。因此, 当地表反射率为零时, 本文选取关于大气顶向上天空亮度 $I(\mu, \phi)$ 的如下基本参数化模式:

$$I_{\text{path}}(\mu, \phi) = I_s(\mu, \phi) + I_m(\mu, \phi) = I_s(\mu, \phi) + [1 + X_1 I_s(\mu, \phi)] X_2 X_3, \quad (2)$$

上式中, $I_s(\mu, \phi)$ 和 $I_m(\mu, \phi)$ 分别为一次散射和多次散射亮度分量, X_1, X_2 和 X_3 为 3 个待定的变量。

假设 $X_3=1$, 则不难推出, X_1 和 X_2 值满足如下关系:

$$X_2 = \frac{F_U - F_{sU}}{\pi + X_1 F_{sU}}, \quad (3)$$

(3) 式中, F_U 为无地表反射时大气顶向上的辐射通量, F_{sU} 为其中的一次散射通量。

X_1 首先被经验地加以确定, X_2 是根据(3)式推出。然后, 应用最小二乘法, 建立 X_3 的参数化模式。

收稿日期: 2000-11-15; 修订日期: 2001-01-19

基金项目: 本研究为国家 863-308 主题资助项目。

作者简介: 邱金桓(1943-), 男, 研究员, 博士生导师。1968年毕业于北京大学地球物理系。1982年毕业于中国科学院获硕士学位。2000年3月于日本获博士学位。主要从事大气遥感和大气辐射传输研究, 在国内外学术刊物和国际学术会议上发表论文 110 多篇, 其中发表于 SCI 刊物的论文 11 篇。

X_3 的参数化过程分如下两步: 先对不同的散射相函数, 应用最小二乘法, 建立 X_3 与大气光学厚度 (τ), 太阳天顶角余弦 (μ_0), 视天顶角余弦 (μ) 与方位角 (ϕ) 的依赖关系; 再建立 X_3 与散射相函数特征量 (一次散射反照率, 不对称因子和后向散射相函数) 的依赖关系。这些依赖关系的形式是根据亮度的物理特性分析, 基于大量的太阳辐射亮度数值模拟计算资料, 反复试验和比较后确定的。显然, 参量 X_3 随 τ , μ_0 , μ , ϕ 和散射相函数的变化越平滑 (越小), 越有利于寻求一个简单而又高精度的参数化模式, 参量 X_1 的选取应使 X_3 随有关参数的变化尽可能平滑。一次散射对向上亮度的贡献随着光学厚度和太阳天顶角的增大而变小, 因此, 经反复尝试, 本文选择 X_1 正比于 $\exp(-0.5 \tau/\mu_0)$, 其值随 τ 的增大或 μ_0 的变小而趋于零, 比例系数是基于大量的亮度数值计算资料经验加以确定。

在朗伯地表反射条件下, 由地表反射引起的辐射增量 ΔI_{Ref} 可表为:

$$\Delta I_{\text{Ref}} = F_D(\mu_0) t_v(\mu) R / (1 - SR), \quad (4)$$

(4) 式中, R 为地表反射率, F_D 为无地表反射时地面上向下的辐射通量, μ_0 为太阳天顶角余弦, S 为大气的球反射率, t_v 为大气的透过率函数。问题的关键是如何确定 S 和 t_v 。本文应用最小二乘法建立了关于 S 和 t_v 的一个参数化模式。

向上太阳辐射亮度最终的参数化模式为:

$$I(\mu, \phi) = I_s(\mu, \phi) + [1 + X_1 I_s(\mu, \phi)] X_2 X_3 + F_D(\mu_0) t_v(\mu) R / (1 - SR), \quad (5)$$

$$X_1 = (5 + 126 g_0^3) \exp(-0.5 \tau / \mu_0), \quad (6)$$

$$x_2 = \frac{F_U - F_{sU}}{\pi + X_1 F_{sU}}, \quad (7)$$

$$X_3 = \sum_{k=0}^1 g_0^k \sum_{i=0}^3 \tau_s^i \sum_{j=0}^3 A_{k,i,j} (1 - \mu)^j + \sum_{m=0}^2 Z^m \sum_{n=0}^3 \cos^n(\phi) \sum_{k=1}^3 (1 - \mu_0)^k \sum_{i=0}^3 \tau_s^i \sum_{j=0}^3 B_{m,n,k,i,j} (1 - \mu)^j \quad (8)$$

$$Z = [1 - 0.33 g_0^3 \bar{\omega} / (1 + 35 p_b \bar{\omega})] g_0, \quad (9)$$

$$S = [(0.771 - 0.451 g_0 - 0.287 g_0^2) \tau + (-0.407 + 0.388 g_0 + 0.025 g_0^2) \tau^2 + (0.088 - 0.0903 g_0) \tau^3] \bar{\omega}^{2.6} \sqrt{\tau} \quad (10)$$

$$t_v(\mu) = x f / \pi \quad (11)$$

$$x = 1 + \exp(-\tau / \mu_0) - S \bar{\omega}^{1.97} \tau^{0.94}$$

$$- 2 \int_0^1 \mu \exp(-\tau / \mu) d\mu \quad (12)$$

$$f_v = 2.4 - 2.1 \tau + 0.568 \tau^2 + (-3.25 + 5.5 \tau - 1.63 \tau^2) \mu_v + (1.49 - 3 \tau + \tau^2) \mu_v^2, \quad (13)$$

上面表达式中, $\bar{\omega}$ 是大气一次散射反照率, p_b 为 180° 的散射相函数, g_0 是相函数不对称因子, $A_{k,i,j}$ 和 $B_{m,n,k,i,j}$ 为一些常数, τ_s 和 τ_i 分别为散射和总光学厚度。

2.2 地表反照率的反演模式

所谓的大气订正是扣除大气散射对向上亮度的影响, 以导出地表反照率解。由(5)式可以推出地表反照率 R 的解为:

$$R = \frac{I - I_{\text{path}}}{S(I - I_{\text{path}}) + F_D t_v(\mu)} \quad (14)$$

3 数值模拟试验

本文把参数化的辐射亮度与由双精度的 DISORT^[1,3] 计算的亮度作比较, 以检验参数化模式的精度。首先定义一个表征参数化辐射亮度的标准差 δ_{sd} 如下:

$$\delta_{\text{sd}} = \sqrt{\frac{1}{N_1 N_2 N_3} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \sum_{k=1}^{N_3} \frac{I_p(\mu_0^i, \mu^j, \phi^k)}{I_{\text{Disort}}(\mu_0^i, \mu^j, \phi^k)}} \times 100\% \quad (15)$$

上式中, I_p 是参数化的辐射亮度, I_{Disort} 是由 DISORT 计算的亮度。在模拟试验中, 太阳天顶角 θ_0 为 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° 和 70° , 因此 $N_1=8$ 。天顶角余弦 μ 在 $1-0.4$ 范围内变化 (相应的卫星视观测角在 $0^\circ-66^\circ$ 范围内变化), 步长为 0.02 , 共取 31 个值, $N_2=31$; ϕ 在 $0^\circ-180^\circ$ 范围内变化, 步长为 10° , $N_3=19$ 。考虑目前和近未来的空间成像光谱仪的扫描视角范围都在 60° 以内, 本文重点考察视观测角 $\theta_v \leq 66^\circ$ 条件下参数化亮度的精度。地表反照率解的标准差采用类似的定义。

数值模拟采用 412 nm , 550 nm , 670 nm 和 865 nm 4 个 MODIS 通道。分子的散射和吸收光学参数、气溶胶的垂直分布取自 LOWTRAN 7。

根据图 1—图 14 分析本文参数化亮度模式的精度。

图 1, 图 2 和图 3 表示在 LOWTRAN 的乡村气溶胶垂直分布与对数正态粒子谱分布、Junge 粒子谱分布与 LOWTRAN 的乡村气溶胶垂直分布、Diemenjian

海洋性气溶胶粒子谱分布(Gamma 谱)与 LOWTRAN 的 1 海洋气溶胶垂直分布 3 种情形下, 参数化的辐射

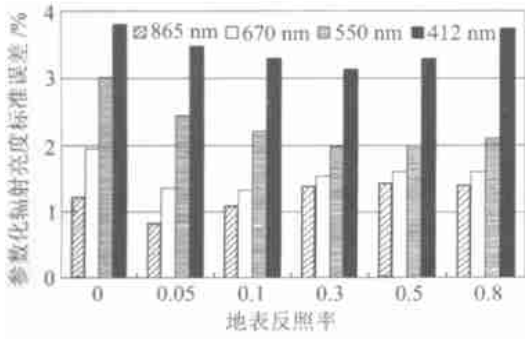


图 1 在 LOWTRAN 的乡村气溶胶垂直分布与对数正态粒子谱分布情形下参数化向上辐射亮度的标准误差

Fig. 1 Standard error of parameterized upwelling radiances in the case of LOWTRAN rural aerosol profile and log-normal aerosol size distribution

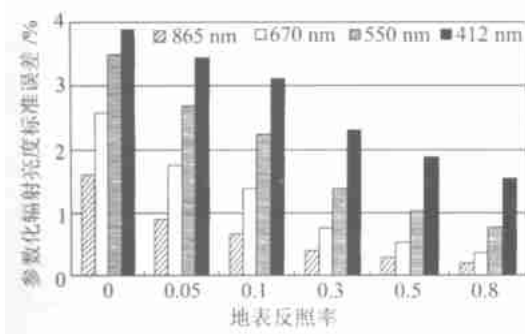


图 2 在 Junge 粒子谱分布与 LOWTRAN 的乡村气溶胶垂直分布情形下参数化向上辐射亮度的标准误差

Fig. 2 Standard error of parameterized upwelling radiances in the case of LOWTRAN rural aerosol profile and Junge aerosol size distribution

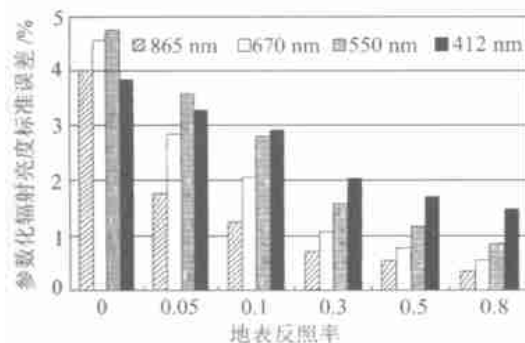


图 3 在 Diemenjian 海洋性气溶胶粒子谱与 LOWTRAN 的海洋气溶胶垂直分布情形下参数化辐射亮度的标准误差

Fig. 3 Standard error of parameterized upwelling radiances in the case of LOWTRAN maritime aerosol profile and Diemenjian marine aerosol size distribution

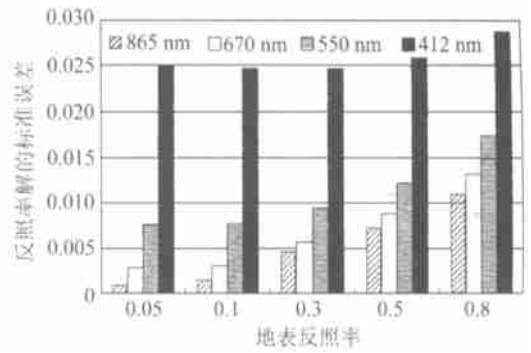


图 4 在 LOWTRAN 的乡村气溶胶垂直分布与对数正态粒子谱分布情形下地表反照率解的标准误差

Fig. 4 Standard error of surface reflectance solutions in the case of LOWTRAN rural aerosol profile and log-normal aerosol size distribution

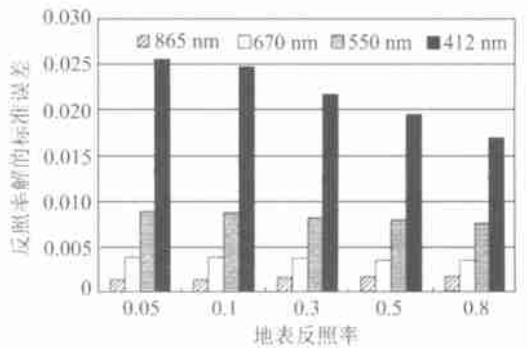


图 5 在 Junge 粒子谱分布与 LOWTRAN 的乡村气溶胶垂直分布情形下地表反照率解的标准误差

Fig. 5 Standard error of surface reflectance solutions in the case of LOWTRAN rural aerosol profile and Junge aerosol size distribution

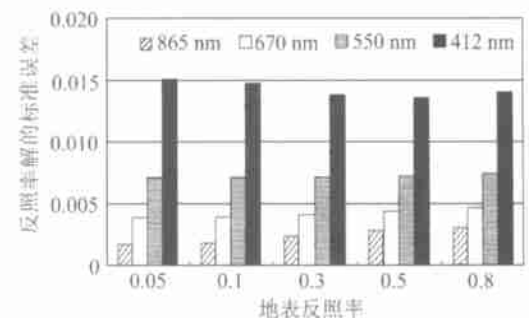


图 6 对 Diemenjian 海洋性气溶胶粒子谱与 LOWTRAN 的海洋气溶胶垂直分布的情形地表反照率解标准误差

Fig. 6 Standard error of surface reflectance solutions in the case of LOWTRAN maritime aerosol profile and Diemenjian marine aerosol size distribution

亮度的标准差, 图 4、图 5 和图 6 为相应的地表反照率的标准差。从这些图可以看出:

(1) 对于 865 nm, 670 nm, 550 nm 和 412 nm 4 个 MODIS 通道, 在 0° – 70° 的太阳天顶角、 0° – 66° 视观测角以及 0.05–0.8 的地表反照率条件下, 参数化的向上辐射亮度的标准差小于 4%, 由本参数化亮度模式引起的地表反照率解的标准差小于 0.03。

(2) MODIS 的通道波长越长, 参数化亮度和反照率解的精度越高。如对 865 nm 通道, 在 0.05–0.8 的地表反照率变化范围内, 参数化的向上辐射亮度的标准差小于 1.8%, 由本参数化亮度模式引起的地表反照率解的标准差小于 0.002。

(3) 地表反照率越大, 参数化的亮度的误差一般越小。

从图 7–图 14 进一步分析在不同的太阳天顶角、视观测角、地表反照率和卫星通道下参数化亮度与地表反照率解的精度。在这些图中, 均采用 LOWTRAN 的乡村气溶胶垂直分布与对数正态粒子谱分布。

图 7–图 10 为太阳天顶角等于 0° 的情形。对于 0, 0.05, 0.1, 0.5 四个地表反照率真值和 865 nm 与 412 nm 两个 MODIS 通道, 在 0° – 66° 视观测角范围内, 亮度的误差都小于 4%, 地表反照率解的误差都小于 0.02, 精度是好的。对 865 nm 通道, 精度更高, 辐射亮度和地表反照率解的误差分别小于 2.2% 和 0.011。随着视观测角的增大, 地表反照率解的误差趋向于变大, 这是由于向上的亮度对地表反照率的敏感性随视观测角的增大而变弱的缘故。

于 865nm 的通道, 亮度和反照率解仍然精度很好, 误差分别小于 5.2% 和 0.01。但对于 412 nm 的短波通道, 该误差可分别高达 10% 和 0.1, 视观测角越大, 误差越大, 如果观测角较小, 精度仍然是好的。太阳天顶角和视观测角越大, 向上的太阳辐射亮度对地表反照率的变化就越不敏感, 亮度误差对地表反照率解的影响也因此变大。

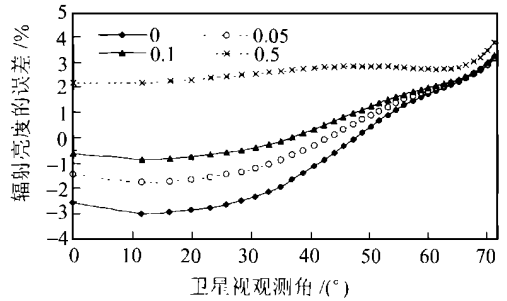


图 8 不同地表反照率下辐射亮度的误差 (412nm 通道, 0° 太阳天顶角)
Fig. 8 Errors of the parameterized radiances for different surface reflectances, the MODIS channels of 412nm and the solar zenith angle of 0° .

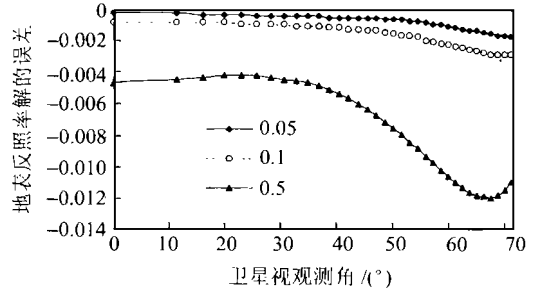


图 9 地表反照率解的误差 (图中数值为它的真值; 865 nm 通道, 0° 太阳天顶角)
Fig. 9 Errors of the surface reflectance solutions (digits in figure are true surface reflectance) for the MODIS channel of 865 nm and the solar zenith angle of 0°

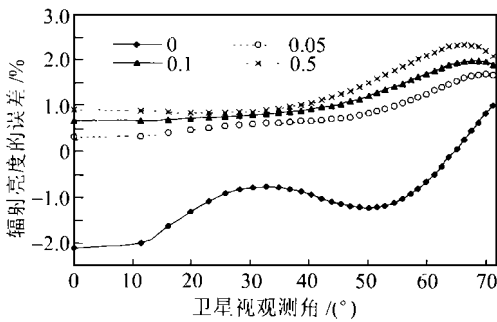


图 7 不同地表反照率下辐射亮度的误差 (865nm 通道, 0° 太阳天顶角)
Fig. 7 Errors of the parameterized radiances for different surface reflectances, the MODIS channels of 865nm and the solar zenith angle of 0°

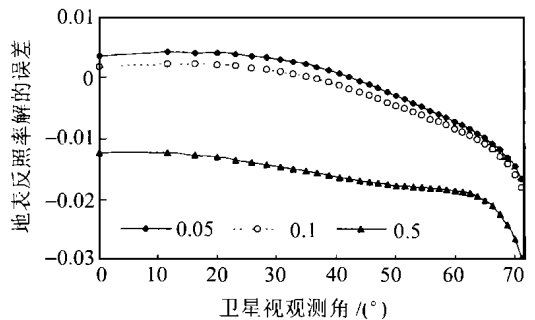


图 10 地表反照率解的误差 (图中数值为它的真值; 412 nm 通道, 0° 太阳天顶角)
Fig. 10 Errors of the surface reflectance solutions (digits in figure are true surface reflectance) for the MODIS channel of 412 nm and the solar zenith angle of 0°

图 11–图 14 为太阳天顶角等于 70° 的情形, 3 条辐射亮度或地表反照率解的误差曲线分别对应 0° , 90° 和 180° 的方位角 (由图例中数值表示)。如图所示, 当太阳天顶角变大时, 参数化辐射亮度和反照率解的精度变差, 特别对于 412 nm 的短波通道。对

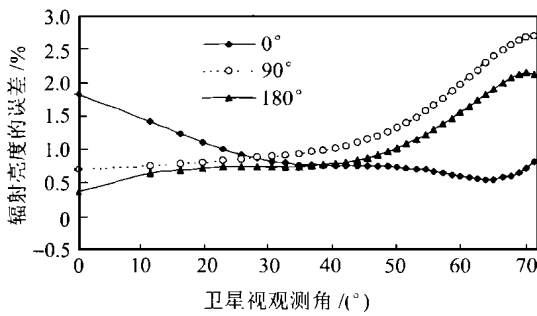


图 11 辐射亮度的误差(865 nm 通道; 70° 太阳天顶角; 0.05 的地表反照率真值; 0°, 90° 和 180° 方位角)
Fig. 11 Errors of the parameterized radiances for the MODIS channels of 865 nm, the solar zenith angle of 70°, the true surface reflectance of 0.05, three azimuth angles of 0°, 90° and 180°

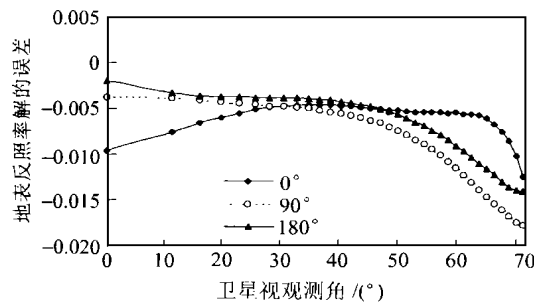


图 12 地表反照率解的误差(865 nm 通道; 70° 太阳天顶角; 0.05 的地表反照率真值; 0°, 90° 和 180° 方位角)

Fig. 12 Errors of the surface reflectance solutions for the MODIS channels of 865 nm, the solar zenith angle of 70°, the true surface reflectance of 0.05, three azimuth

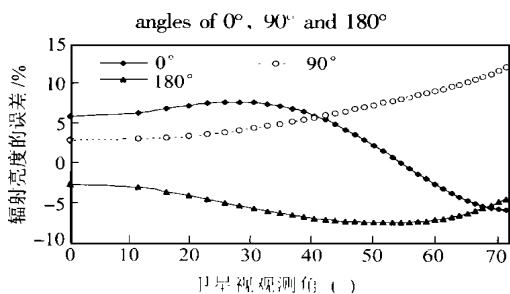


图 13 辐射亮度的误差(412 nm 通道; 70° 太阳天顶角; 0.05 的地表反照率真值; 0°, 90° 和 180° 方位角)

Fig. 13 Errors of the parameterized radiances for the MODIS channels of 412 nm, the solar zenith angle of 70°, the true surface reflectance of 0.05, three azimuth angles of 0°, 90° and 180°

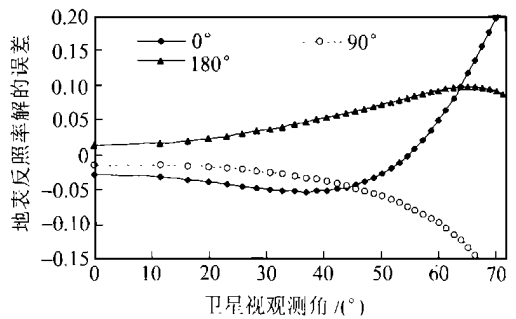


图 14 地表反照率解的误差(412 nm 通道; 70° 太阳天顶角; 0.05 的地表反照率真值; 0°, 90° 和 180° 方位角)

Fig. 14 Errors of the surface reflectance solutions for the MODIS channels of 412 nm, the solar zenith angle of 70°, the true surface reflectance of 0.05, three azimuth angles of 0°, 90° and 180°

5 结 论

本文发展了一个用于卫星光学遥感大气订正的参数化模式,包括一个新的程辐射亮度模式和一个参数化的地表-大气辐射耦合引起的亮度增量模式。数值检验结果表明:对于 865 nm, 670 nm, 550 nm 和 412 nm 四个 MODIS 通道,在 0°-70° 的太阳天顶角、0°-66° 视观测角以及 0.05-0.8 的地表反照率条件下,参数化的向上辐射亮度的 b 标准差小于 4%,由本参数化亮度模式引起的地表反照率解的标准差小于 0.03。对卫星的长波通道,参数化亮度和反照率解的精度更高。地表反照率越大,参数化的亮度的误差一般越小。太阳天顶角和视观测角越小,误差一般也越小。

参 考 文 献 (References)

[1] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W *et al.* Numerically stable algorithm for Discrete Ordinate Method Radiative Transfer in multiple scattering and emitting layered media [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(12): 2502-2509.

[2] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, *et al.* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview [J]. *IEEE trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**(3): 675-686.

[3] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN 7, GLTR-89-0122 (1989) [R]. Updated and commercialized by Ontar Corporation, 9 Village Way, North Andover, Mass, 1996, 101845.

[4] Qiu Jinhuan. A Parameterized Radiative Transfer Model for Spaceborne Remote Sensing Application [J]. *Chinese J. Atmos.*

- Sci.*, 1998, **22**(4): 649—658. [邱金桓. 用于空间对地遥感的一个参数化辐射传输计算模式[J]. 大气科学, 1998, **22**(4): 649—658.]
- [5] Qiu J. An Improved Model of Surface BRDF-Atmospheric Coupled Radiation [J]. *IEEE trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, **39**(1): 181—187.
- [6] Qiu Jinhuan. A New Model on Bidirectional Reflectance Surface-atmospheric Coupled Radiation. *Science in China*. 2001, **44**(4), 298—306. [邱金桓. 一个新的双向反射地表-大气辐射耦合模式[J]. 中国科学, 2000, **30**(6): 656—662.]
- [7] Qiu J, Takeuchi N, Kuze H. Two empirical methods for calculating atmospheric path radiance in the case of the inhomogeneous atmosphere [J]. submitted to “*J. Geophys. Res.*”.
- [8] Qiu J, Takeuchi N. Effects of aerosol inhomogeneity on satellite optical remote sensing [J]. *Adv. Atmos Sci* 2001, **18**(4): 539—553.

A Parameterized Atmospheric Correction Model and its Application Simulation for Satellite Remote Sensing

QIU Jin-huan

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: A simple but accurate model of the upwelling solar radiance is of great significance for the atmospheric correction in the case of satellite remote sensing of surface parameters. In this paper, a parameterized atmospheric correction model is developed for satellite remote sensing application, which includes two new parameterization models of the path radiance and Lambertian surface-atmospheric coupled radiation. By using least square technology, the parameterized path radiance is expressed in terms of atmospheric optical depth, single scattering albedo, solar zenith angle, viewing zenith angle, azimuth angle, atmospheric asymmetry factor. Furthermore, the model is used in retrieving surface reflectance from simulated satellite data. As shown in numerical simulations, for four MODIS channels of 865 nm, 670 nm, 550 nm and 412 nm, the solar zenith angle from 0° to 70° , the viewing zenith angle of 0° to 66° , and the surface reflectance of 0.05 to 0.8, standard errors of the parameterized upwelling radiance and the reflectance solutions are less than 4% and 0.03, respectively.

Key words: radiance; parameterization; surface reflectance