

通用大气辐射传输软件(CART)大气散射辐射计算精度验证

戴聪明^{1,2}, 魏合理¹, 陈秀红¹

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为检验通用大气辐射传输软件(CART)计算大气分子、气溶胶散射辐射的计算精度, 在大观测天顶角、太阳天顶角、观测与太阳方位角之差、散射相函数不对称因子变化范围内, 就 CART 软件模拟的单次散射辐射和多次散射辐射, 分别与 MODTRAN5.0 计算的单次散射辐射和离散坐标辐射传输软件(DISORT)计算的多次散射辐射进行比较分析。结果表明: CART 软件计算的单次散射辐射与 MODTRAN5.0 的相对偏差一般小于 10%, 最大相对偏差为 15%; CART 计算的多次散射辐射与精确的 DISORT 算法的相对相差小于 2.5%。CART 在包括多次散射在内的大气背景辐射计算方面具有较高的计算精度和效率。

关键词: 大气散射; CART; 计算精度

中图分类号: P407.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1575-07

Validation of atmospheric scattering radiance caculated by combined atmospheric radiance transfer (CART) code

Dai Congming^{1,2}, Wei Heli¹, Chen Xiuhong¹

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To validate the combined atmospheric radiative transfer model(CART) code on calculating the scattering of atmospheric molecules and aerosol particles, comparisons of CART scattering results (including the single scattering radiance and multiple scattering radiance) to the moderate resolution atmospheric transmittance and radiance code (MODTRAN5.0) and discrete ordinate radiative transfer (DISORT) model were made, respectively, on the wide range of observation zenith angle, solar zenith angle, the differ of observation and solar azimuth angle, the asymmetry factor of scattering phase function. The results show that the relative percent difference is less than 10% mostly, 15% at maxmium on single scattering radiance, and less than 2.5% on multiple scattering radiance. CART have a good calculation precision and efficiency on atmospheric background radiance calculation including multiple scattering.

Key words: atmospheric scattering; CART; calculation precision

收稿日期: 2012-12-08; 修订日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61077081); 国家“863”计划

作者简介: 戴聪明(1987-), 男, 博士生, 主要从事大气红外辐射传输模式方面的研究。Email: dcm3918@163.com

导师简介: 魏合理(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外辐射大气传输和卷云红外辐射特性等方面的研究。

Email: hlwei@aiofm.ac.cn

0 引言

大气辐射传输是大气能量循环、气候模式研究的基本问题,也是空中目标光电观测必须考虑的背景环境因素^[1]。通常采用不同的积分方程来表述大气辐射传输中的各物理过程。在散射和吸收介质中,精确求解辐射传输方程非常困难,不易实现。为此,常采用近似方法对包含大气分子、气溶胶等微粒的散射辐射进行求解,因而计算精度和效率成为大气散射辐射传输计算研究的核心内容。Chandrasekhar^[2]和 Liou^[3]先后给出离散坐标法一般表达式。由于其数值求解的困难,Stamnes 等人^[4]解决了离散坐标法矩阵形式中的特征值、特征矢量及积分常数的求解问题,同时公布了离散坐标法的辐射传输软件包 DISORT。目前可广泛应用的是 DISORT 版。应用更为广泛的 MODTRAN^[5]中分辨率大气辐射传输软件适合于单次散射辐射的计算,最新版本为 MODTRAN5.0^[6]。

中国科学院安徽光学精密机械研究所研发了中光谱分辨率(1 cm^{-1})的通用大气辐射传输软件,命名为 CART^[7-9]。对于散射部分的考虑,CART 建立了一个单次散射的模型;对多次散射,提出了采用分段拟合 DISORT 计算结果的方法建立多次散射快速计算模式,计算速度比直接调用 DISORT 提高 200 多倍^[9]。该算法可快速计算空间任意两点间(包含多次散射在内)的大气散射辐射,光谱分辨率为 1 cm^{-1} 。参考文献^[10-11]采用实际测量数据证实了其计算水平大气透过率和亮温的可靠性和稳定性。为进一步验证 CART 软件计算大气散射辐射的精度,文中根据 CART 计算各种观测条件下的大气单次散射辐射和多次散射辐射,分别与 MODTRAN5.0 计算的单次散射辐射和 DISORT 计算的多次散射辐射进行对比,并详细分析其产生差异的原因。

1 单次散射辐射的对比分析

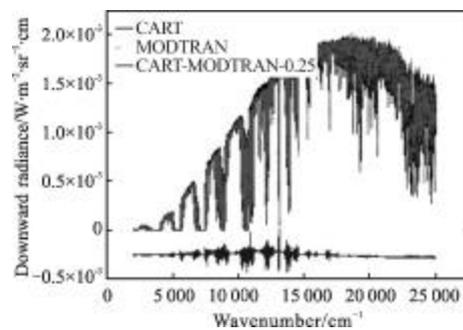
在光学厚度较小的卷云和气溶胶大气中,直接太阳光束的单次散射起主导作用^[12]。单次散射辐射计算模式中的源函数表达式为:

$$J(\tau; \mu, \phi) \approx \frac{\bar{\omega}}{4\pi} \text{FP}(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \quad (1)$$

式中: \bar{F} 为大气顶太阳辐照度; $\bar{\omega}$ 为单次散射反照率;

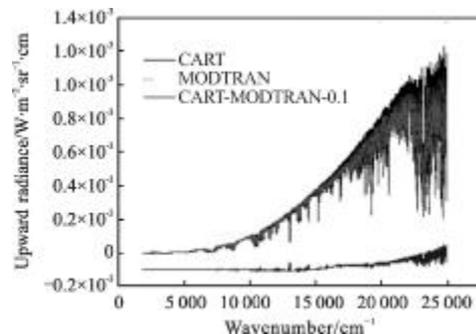
P 为散射相函数; μ, μ_0 分别表示观测点和太阳的天顶角的余弦; ϕ, ϕ_0 分别表示观测点和太阳的方位角。

图 1 为 CART 和 MODTRAN 计算观测天顶角分别为 30° 和 150° 时的地面大气向下和大气顶向上的单次散射辐射。所采取计算参数为:中纬度夏季大气模式,太阳天顶角 0° ,乡村型气溶胶,能见度为 23 km ,取 Henyey-Greenstein(H-G) 散射相函数,不对称因子为 0.9 ,相对观测方位角之差为 0° (向下)和 180° (向上), $0.4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 计算波段,海水下垫面(以下单次散射辐射计算算例,若未作特殊声明,则输入计算参数不变)。



(a) 地面大气向下的单次散射辐射

(a) Downward scattering radiance at the surface



(b) 大气顶向上的包括地表和大气的单次散射辐射

(b) Upward scattering radiance at TOA including the radiance from the surface and the atmosphere

图 1 单次散射辐射随波数的分布特性

Fig.1 Single scattering radiance as a function of wavenumber

大气向下单次散射光谱辐射(图 1(a))表明,CART 模拟的单次散射和 MODTRAN 计算结果基本吻合,其中一些波段上的差异是由于两者内部大气分子吸收算法不一致造成的。整个计算波段内,CART 计算的单次散射与 MODTRAN 的均方根偏差为 1.57% 。其中,均方根误差的定义为:

$$\text{SD} = \frac{\text{RMS}(\Delta R)}{\langle R_D \rangle} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMS(\Delta R) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [R_c(i) - R_D(i)]^2}{N-1}} \quad (3)$$

式中： N 表示波数个数； R_c 和 R_D 分别为 CART 和 MODTRAN 计算的该波段积分辐亮度； $\langle R_D \rangle$ 表示 MODTRAN 该波段范围的平均辐亮度； RMS 表示均方根偏差。图 1(b) 表明两辐射传输模型计算大气顶向上单次散射辐射的均方根偏差为 4.01%，差异主要在于可见光区域，可能是两辐射传输模型的地表反照率的光谱分布不完全一致造成的。由此可见，在 0.4~5 μm 区域上，CART 计算单次散射辐射的精度和 MODTRAN 相当。此外，3~5 μm 波段内，大气分子瑞利散射很弱，同时气溶胶粒子尺度参数较小，单次散射较可见光波段小近两个数量级。因此，文中仅在 0.4~1 μm 、1~3 μm 两个波段内，在不同观测天顶角、太阳天顶角和散射相函数的不对称因子等影响因子下，就 CART 软件模拟的单次散射与 MODTRAN 计算值进行对比，并详细分析差异产生的原因。

1.1 观测天顶角的影响

图 2 为在不同观测天顶角下，CART 和 MODTRAN

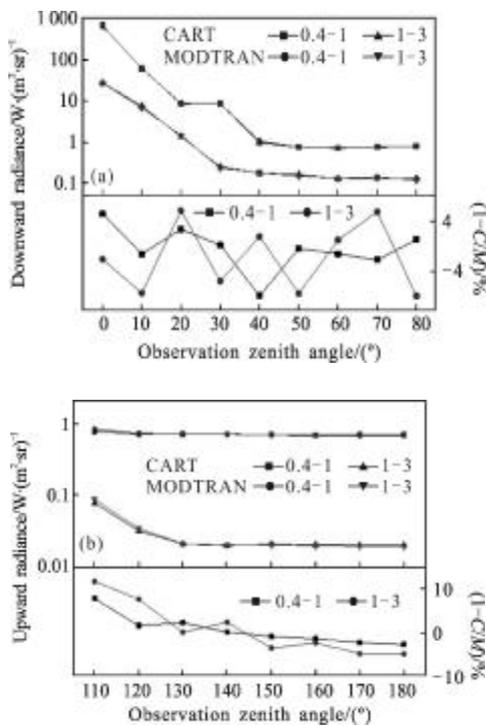


图 2 观测天顶角对单次散射计算精度的影响
Fig.2 Calculation precision of single scattering radiance as a function of observation zenith angle

模拟的 0.4~1 μm 和 1~3 μm 单次散射积分辐射。图 2(a) 表明，两辐射传输软件计算的地面大气向下单次散射随观测天顶角的增大而减小。当观测天顶角为 0° 时，分子对非偏振入射太阳光在前向的散射最强，此时气溶胶的米散射相函数亦最大。随着观测天顶角的增大，气溶胶散射相函数随散射角急剧减少，单次散射急剧减弱。观测天顶角 0°~180° 范围内，两计算波段内两辐射传输模型计算的单次散射相对偏差均小于 10%。图 2(b) 表明，当观测天顶角大于 125° 时，CART 和 MODTRAN 计算的大气向上单次散射相对偏差小于 10%。

1.2 太阳天顶角的影响

太阳入射方向的变化会导致散射体在某一方向上的散射太阳辐射产生较大差异。图 3 为地面大气向下和大气顶向上单次散射随太阳天顶角的变化特性。图 3(a) 显示，30° 太阳天顶角时，CART 和 MODTRAN 计算的单次散射均为最大值，为正对太阳的前向散射。当太阳入射方向逐渐偏离观测方向时（太阳天顶角偏离 30°），单次散射逐渐减弱。整个太阳天顶角范围内，两辐射传输模型模拟的单次散射相对偏差小于 13%。图 3(b) 显示两辐射传输模型计算大气顶

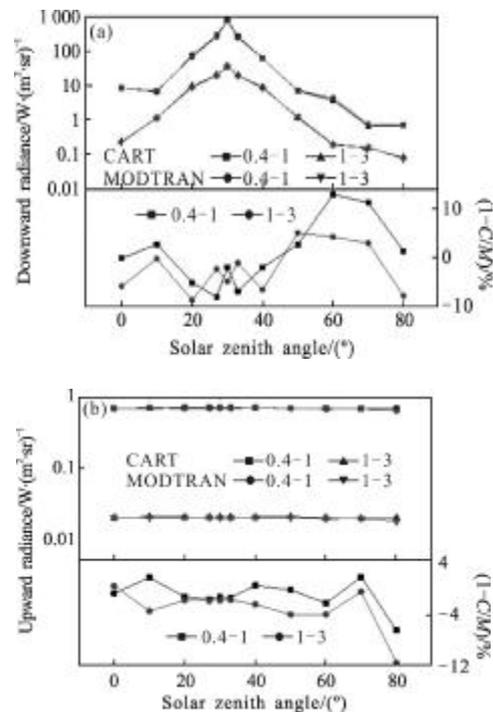


图 3 太阳天顶角对单次散射辐射计算精度的影响
Fig.3 Calculation precision of single scattering radiance as a function of solar zenith angle

向上的单次散射随太阳天顶角变化不大。当太阳天顶角小于 70°时, 两辐射传输模型计算大气顶向上的单次散射相对偏差在 5%以内。

1.3 观测与太阳方位角之差的影响

图 4 为观测方向与太阳入射方向的相对变化对单次散射的影响特性,其中,太阳天顶角为 30°。图 4(a) 显示随着散射方向逐渐偏离入射太阳方向, 各波段内的地面大气向下单次散射逐渐减小。方位角之差为 180°时,大气向下单次散射最强,属前向散射。图 4(b) 显示大气顶向上单次散射随太阳方位角变化不敏感。整个观测与太阳方位角之差范围内,CART 与 MODTRAN 计算的单次散射相对偏差在 8%以内。

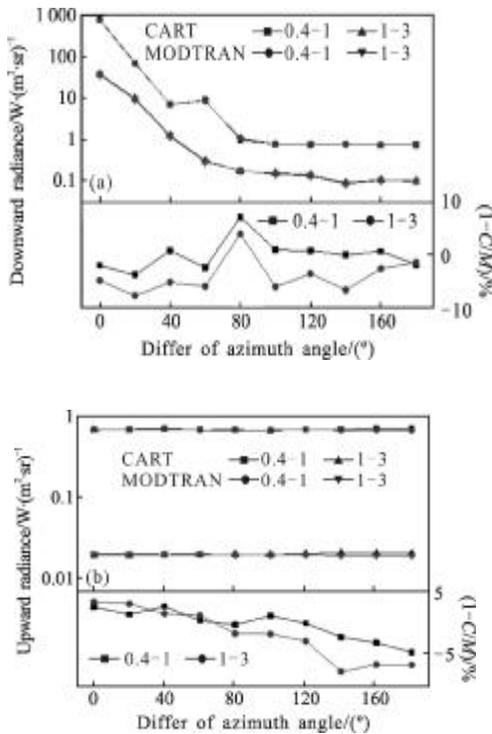


图 4 观测与太阳方位角之差对单次散射辐射计算精度的影响
Fig.4 Calculation precision of single scattering radiance as a function of the difference of observation and sun azimuth angle

1.3 不对称因子的影响

散射相函数反映了散射强度的角分布特性,不对称因子作为散射相函数的一阶矩,影响散射强度的前后向分布。图 5 给出了大气向上及向下单次散射辐射随不对称因子的变化特性。图中曲线表明,在不对称因子 0~0.9 变化范围内,CART 和MODTRAN 计算单次散射随不对称因子的变化趋势基本一致。

对于地面大气向下单次散射,两辐射传输模型间的相对偏差在 8%以内,而地面大气向上的单次散射相对偏差小于 15%,表明 CART 和 MODTRAN 计算的单次散射基本一致。

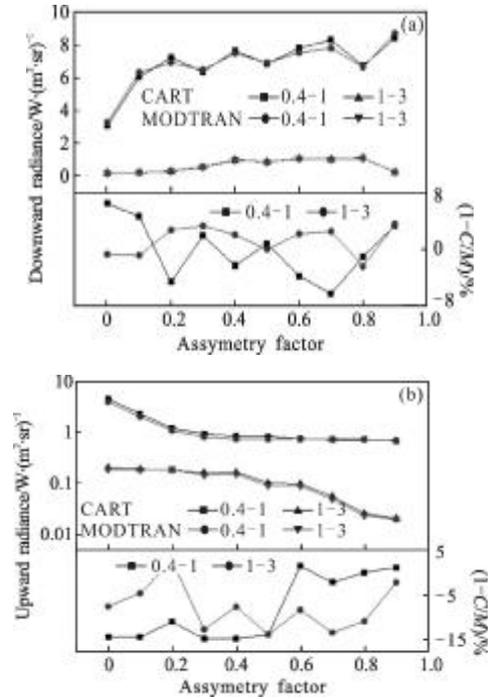


图 5 不对称因子对单次散射辐射计算精度的影响
Fig.5 Calculation precision of single scattering radiance as a function of the asymmetry factor

2 多次散射辐射的比较分析

离散坐标法辐射传输软件(DISORT)^[1]通常被用来求解大气中包括多次散射的辐射传输问题,DISORT 被公认为精确的多次散射算法。多次散射可根据每个高度层大气介质的光学厚度、单次散射反照率和单次散射相函数采用 DISORT 计算,但在每个波长上执行 DISORT 计算特别费时。在 CART 中提出了采用分段拟合 DISORT 计算结果的方法建立多次散射快速计算模式。在该算法中发现多次散射是介质吸收光学厚度、散射光学厚度和地表反照率组合的光滑单值函数。因此,在一定带宽范围内,只要计算几个采样波数处的多次散射即可快速得到几千个波数范围的多次散射结果^[9],计算速度比直接调用 DISORT 提高 200 多倍。

为检验 CART 软件的多次散射计算精度,选取计算参数为:中纬度夏季大气模式,乡村型气溶胶,

能见度为 23 km, 相对湿度为 53%, 陆地型地表, H-G 散射相函数, 不对称因子为 0.8, 流数为 16, 30° 太阳天顶角, 观测和太阳方位角之差为 0° 和 180° , 计算 $0.4\sim 14\ \mu\text{m}$ ($714\sim 25\ 000\ \text{cm}^{-1}$) 波段内观测天顶角分别为 30° (地面大气向下) 和 150° (大气顶向上) 下的多次散射辐射 (如未作特别声明, 以下多次散射辐射计算算例的输入参数不变), 结果如图 6 所示。

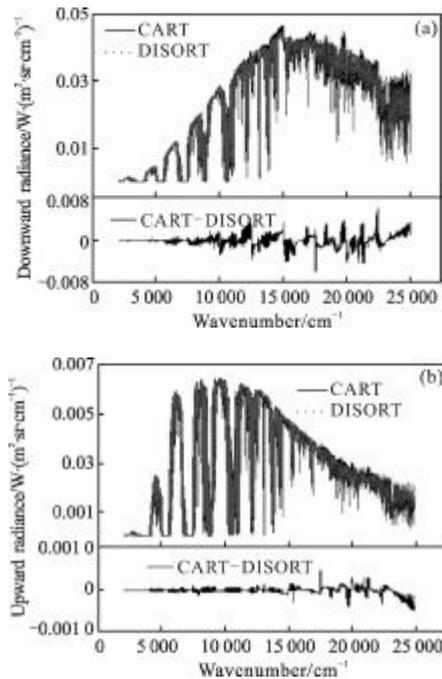


图 6 地面大气向下和大气顶向上的多次散射辐射强度

Fig.6 Atmospheric downward and upward multiple scattering radiance

由多次散射辐射谱分布可知, CART 和 DISORT 计算的多次散射光谱辐射吻合较好。在大于 $10\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 的短波区域, 两辐射传输模型计算的地面大气向下多次散射差异较大 (图 6(a))。此时, 大气分子瑞利散射和气溶胶米散射成为多次散射的主体。图 6(b) 显示大气顶向上多次散射偏差表现出同样的谱分布特性。两种情况下, CART 快速算法与 DISORT 算法计算的多次散射均方根误差分别为 2.67% 和 2.34%。

为全面验证 CART 软件模拟多次散射的计算精度, 下面分别就不同观测天顶角、太阳天顶角、相函数不对称因子、观测与太阳方位角之差, 对 CART 和 DISORT 计算的多次散射进行对比分析。计算波段为 $0.4\sim 1\ \mu\text{m}$, $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。

2.1 观测天顶角的影响

图 7 为不同观测天顶角下, CART 和 DISORT

模拟地面大气向下和大气顶向上多次散射。从图中可知, 两个辐射模型计算的多次散射积分辐射随观测天顶角的变化趋势基本一致。在整个观测天顶角范围内, 其计算的地面大气向下、大气顶向上的多次散射最大偏差分别小于 2.5% 和 2%, 当观测天顶角小于 60° 时, 两辐射传输模型计算的多次散射相对偏差小于 2%。

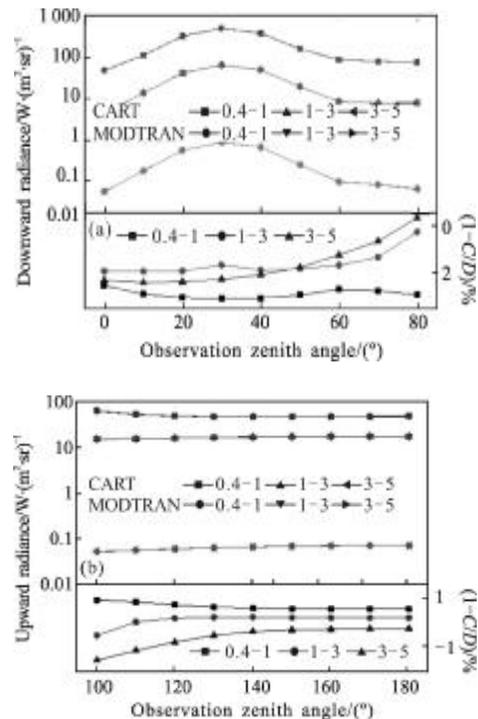


图 7 观测天顶角对多次散射辐射强度计算精度的影响

Fig.7 Calculation precision of multiple scattering radiance as a function of observation zenith angle

2.2 太阳天顶角的影响

不同方向入射太阳光, 粒子对其散射特性不一致。为检验 CART 计算的多次散射对太阳天顶角的依赖特性, 分析不同太阳天顶角下的地面大气向下和大气顶向上的多次散射, 结果如图 8 所示。图 8(a) 显示在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 的太阳天顶角范围内, 地面大气向下多次散射随太阳天顶角呈现先增大后减小的趋势。 30° 太阳天顶角下的多次散射最大, 属于前向散射。随着太阳入射方向逐渐偏离观测方向 (太阳天顶角小于或大于 30°), 前向多次散射逐渐减小, 表明陆地型气溶胶粒子满足米散射分布特性。图 8(b) 显示大气顶向上的多次散射随太阳天顶角的增大而减小。整个太阳天顶角范围内, 大气向下和向上的多次散

射,CART 和 DISORT 计算结果相对偏差均在 2%以内。

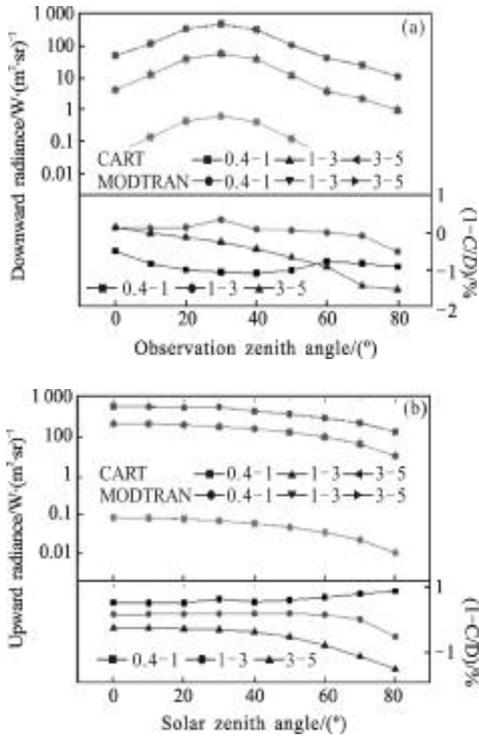


图 8 太阳天顶角对多次散射辐射计算精度的影响
Fig.8 Calculation precision of multiple scattering radiance as a function of solar zenith angle

2.3 观测与太阳方位角之差的影响

对于气溶胶存在的真实大气,光子经过大气分子及气溶胶粒子的多次散射之后到达观测点的散射辐射不可忽略。为说明 CART 计算多次散射随观测方位角变化的可靠性,在观测与太阳方位角之差 0°~180°的范围内模拟了地面大气向下和大气顶向上的多次散射,并与 DISORT 计算值相比较。图 9(a)显示大气向下多次散射随观测与太阳方位角之差的增大而逐渐减小。当观测与太阳方位角之差为 180°

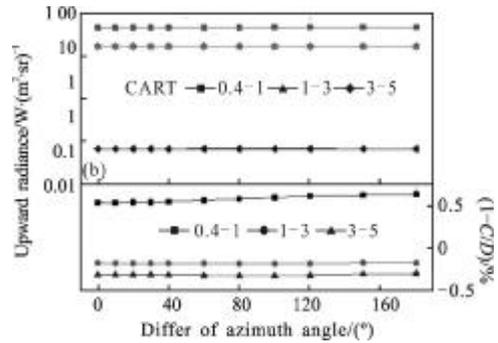
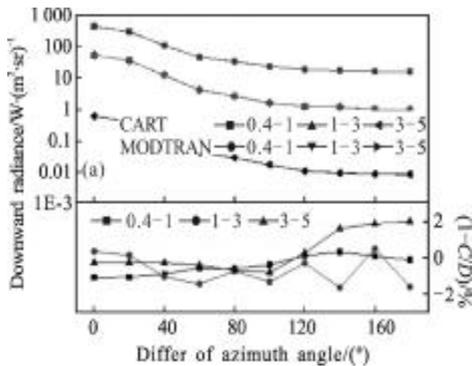


图 9 观测与太阳方位角之差对多次散射辐射计算精度的影响
Fig.9 Calculation precision of multiple scattering radiance as a function of the differ observation and sun azimuth angle

时,向下多次散射最弱。整个相对方位角范围内,CART 与 DISORT 计算的近地面大气向下多次散射相对偏差小于 2.5%。9(b)给出两辐射传输软件计算的大气顶向上多次散射相对偏差小于 0.7%。

2.4 散射相函数不对称因子的影响

为验证 CART 软件模拟多次散射随散射相函数变化的可靠性,选取 H-G 相函数,其不对称因子分别为 0,0.1,0.2, ..., 0.9,计算地面大气向下和大气顶向上的多次散射辐射,结果如图 10 所示。图 10(a)表明,

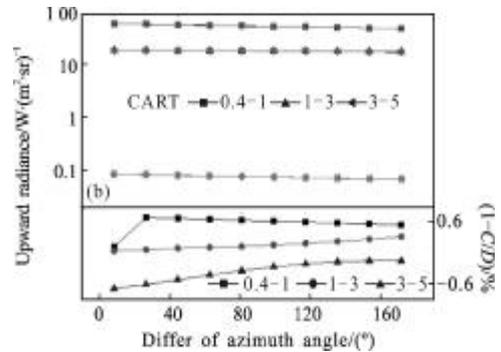
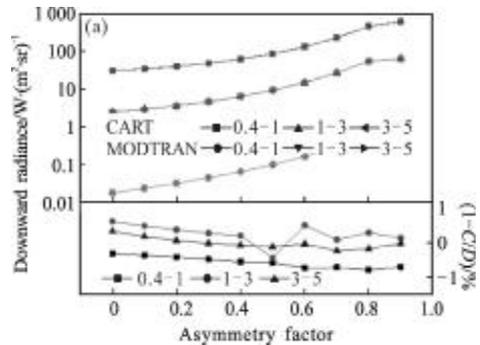


图 10 不对称因子对多次散射辐射的影响特性
Fig.10 Multiple scattering radiance as a function of asymmetry factor

CART 和 DISORT 计算的大气向下多次散射随不对称因子均呈现增大的趋势,但二者的相对偏差均小于 2%。图 10(b)显示随着不对称因子的增加,CART 和 DISORT 计算的大气向上多次散射均呈现减小趋势,3个计算波段内,二者的相对偏差均小于 1.2%。

3 结 论

文中利用常用的单次散射计算软件 MODTRAN5.0 对所研制的通用大气辐射传输软件 CART 的单次散射辐射计算模块进行了多种条件下的对比验证。结果表明:CART 计算的单次散射辐射与 MODTRAN5.0 相对偏差一般小于 10%,最大相对偏差为 15%。利用精确的离散坐标法多次散射计算软件 DISORT 对 CART 的多次散射辐射计算模块进行了多种条件下的对比验证。结果表明:CART 多次散射辐射的计算精度与 DISORT 相差小于 2.5%。因此,通用大气辐射传输软件 CART 计算大气分子、气溶胶颗粒产生的散射辐射精度高。由于,其多次散射辐射计算效率高,CART 在包括多次散射在内的大气背景辐射计算方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] Chen Yuheng, Zhou Jiankang, Chen Xinhua, et al. Calculation of SNR of a satellite CCD camera based on MODTRAN[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 910-914. (in Chinese)
陈宇恒, 周健康, 陈新华, 等. 基于 MODTRAN 模型计算星载 CCD 相机信噪比 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 910-914.
- [2] Chandrasekhar S. *Radiative Transfer* [M]. New York: Dover, 1960.
- [3] Liou K N. A numerical experiment on chandrasekhar's discrete-ordinate method for radiative transfer: applications to cloudy and hazy atmosphere[J]. *J Atmos Sci*, 1973, 30: 1303.
- [4] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W J, et al. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. *Appl Opt*, 1988, 27: 2502-2509.
- [5] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 User S Manual [M]. Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command Hanscom AFB MA, 1997: 01731-3010.
- [6] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN5: a reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options[C]//SPIE, 2004, 10: 5425-5571.
- [7] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. A moderate spectral resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation[J]. *Optics Express*, 2007, 15: 8360-8370.
- [8] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 446-450. (in Chinese)
魏合理, 陈秀红, 饶瑞中. 通用大气辐射传输软件(CART)介绍[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 446-450.
- [9] Chen Xiuhong, Wei Heli, Yang Ping, et al. An efficient method for computing atmospheric radiances in clear-sky and cloudy conditions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, 112(1): 109-118.
- [10] Chen Xiuhong, Wei Heli, Lü Weiyi, et al. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART software with measured values [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 403-406. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理, 吕炜煜, 等. CART 软件计算的红外大气透过率和实测值比较 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(4): 403-406.
- [11] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of the precision of atmospheric molecular absorption and thermal radiance calculated by combined atmospheric radiative transfer (CART) code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 174-180. (in Chinese)
戴聪明, 魏合理, 陈秀仁. 通用大气辐射传输软件(CART)分子吸收和热辐射计算精度验证 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 174-180.
- [12] Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation* [M]. 2nd ed. Guo Caili, Zhou Shijian translated. Beijing: Meteorological Science Press, 2004. (in Chinese)
Liou K N. *大气辐射导论* [M]. 2 版. 郭彩丽, 周诗健译. 北京: 气象科学出版社, 2004.