

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

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 分子吸收和热辐射的计算精度, 利用精确的逐线积分法(LBLRTM)和广泛使用的中分辨率大气传输模式(MODTRAN4.0), 就 CART 软件计算的晴空大气分子吸收透过率和热辐射进行对比验证。模拟了水平距离、观测天顶角和观测点高度对光电工程各观测波段内平均大气透过率和积分辐射的影响特性。结果表明: CART 软件分子吸收的计算精度优于 MODTRAN4.0 软件, 大气热辐射的计算精度和 MODTRAN4.0 相当。

关键词: CART; 大气分子吸收; 热辐射; 计算精度

中图分类号: P407.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0174-07

Validation of the precision of atmospheric molecular absorption and thermal radiance calculated by combined atmospheric radiative 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 precision of atmospheric molecular absorption and thermal radiance calculated by combined atmospheric radiative transfer (CART) code, using the accurate line-by-line atmospheric transfer model (LBLRTM) and moderate resolution atmospheric transmission (MODTRAN4.0), the atmospheric molecular absorption spectral transmittance and infrared spectral radiance calculated by these codes were compared under clear-sky conditions. Then the horizontal path lengths, observation zenith angles and observation altitudes impacting on average atmospheric transmittance and integrated infrared radiance in several spectral bands were simulated on electro-optical engineering region. The results show that the precision of atmospheric molecular absorption calculated by CART is better than MODTRAN4.0, and calculation precision of the atmospheric thermal radiation is equivalent to MODTRAN4.0.

Key word: CART; atmospheric molecular absorption; thermal radiance; calculating precision

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2012-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(F050407); 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方面的研究。Email: dcm3918@163.com

导师简介: 魏合理(1965-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事大气和卷云红外辐射传输方面的研究。Email: hlwei@aiofm.ac.cn

0 引言

光波辐射通过大气传输时,要受到大气的吸收与散射^[1]。大气衰减来自目标的本征辐射,使信号减弱。大气及地表的热辐射是大气红外背景辐射的重要部分。在实际大气中进行目标辐射特性测量研究中,不同的大气传输特性条件,测得的目标光学特性有不同的表现结果。因此,为获取目标的本征辐射特性,必须考虑大气的吸收作用;在评估仪器性能(如对比度、作用距离等)时,必须研究大气环境的背景辐射^[2]。一般情况下,大气透过率难于实时测量,而大气红外背景辐射又随大气条件变化较大。因此,为适用于各种光电工程需求,构建精确的大气辐射传输模型,快速计算各种大气环境条件下的大气透过率及热辐射显得非常有必要。

目前,国际上存在着各种计算大气透过率的辐射传输模型,如低分辨率大气透过率计算软件 LOWTRAN7^[3],中分辨率大气透过率计算软件 MODTRAN4.0^[4]和逐线积分辐射传输模式 LBLRTM^[5]。其中,后两者的光谱分辨率较高,应用更为广泛。MODTRAN4.0是由美国空军地球物理实验室开发研制的中光谱分辨率大气辐射和透过率软件,可计算多种大气环境条件下的透过率。MODTRAN4.0使用1996年版高分辨率分子吸收参数 HITRAN 数据库,采用带模式方法进行计算,光谱分辨率可达 2.0cm^{-1} 。LBLRTM软件采用逐线积分法计算大气分子吸收,融合了最新的 MK_CKD 模式计算大气分子连续吸收,其计算精度可达 0.5% ^[6]。LBLRTM目前被业界认为是最精确的辐射传输计算模式,几乎所有发展的大气辐射传输模式都是以 LBLRTM 为基准来检验其计算精度。但是,由于逐线积分法海量的计算量,LBLRTM只在科学研究中有广泛的应用,在工程上因其计算速度的限制应用不多。

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(1cm^{-1})的通用大气辐射传输软件,命名为 CART^[7-8]。它基于 LBLRTM 逐线积分线性拟合算法来计算分子吸收,采用2004年版 HITRAN 光谱数据库,可快速计算空间任意两点间的大气光谱透过率和大气热辐射。参考文献[9]把 CART 软件计算的大气透过率和傅里叶变换光谱仪实测值相比较,验证了其部分可靠性。为了更全面验证该软件计算大气透过率和热辐射的可靠性及精确度,文中模拟

计算了晴空大气条件下的分子吸收和连续吸收特性,并与 LBLRTM、MODTRAN4.0 的计算结果相比较。计算采用的版本:LBLRTM,MODTRAN4.0。

1 CART 基本原理

计算大气中某种分子的单色吸收截面,经过平均后得到其平均透过率为:

$$\bar{T}_v(t, p, u) = \frac{\int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} \exp[-k_v(t, p)u] dv}{\int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} dv} \quad (1)$$

式中: $k_v(t, p)$ 为温度 t 、气压 p 时用 LBLRTM 计算的某种气体在波数 v 处的吸收截面, u 为吸收气体含量。 $\Delta v/2=0.5\text{cm}^{-1}$,其平均透过率的光谱分辨率为 1.0cm^{-1} 。

考虑大气中吸收气体主要为水汽、二氧化碳、臭氧、一氧化碳、氧化二氮、甲烷和氧气这七种气体分子,提出了基于逐线积分拟合的快速计算模式^[5],即采用4阶非线性拟合算法来拟合大气吸收随吸收气体含量的关系,得到5个拟合系数为:

$$\bar{T}_v(t, p, u) = \exp\left\{-u \cdot \exp\left(\sum_{i=0}^M c_i(t, p) [\log(u)]^i\right)\right\} \quad (2)$$

式中: $T_v(t, p, u)$ 为给定波数 v 、温度 t 、气压 p 和吸收含量 u 下的透过率; $M=4$,代表4阶; $c_i(t, p)$, ($i=0\sim 4$)是给定波数 v 、温度 t 、气压 p 下的5个拟合系数。预先计算各种吸收气体 $1\sim 25\,000\text{cm}^{-1}$ ($0.4\sim$ 远红外)、 $200\sim 320\text{K}$ 9种温度、 $0.05\sim 1\,100\text{hPa}$ 9种气压下的拟合系数数据库,其他温度下的拟合系数通过快速插值获得。对于非均匀大气,采用 C-G 近似,获得路径等效拟合系数。这样,给定大气参数(温度、气压和吸收气体含量的路径分布)就可快速计算各个波长处的大气透过率。

大气透过率的大小与表征各种吸收分子含量、气压和温度等参数的大气模式有关。文中采用1976年美国标准大气模式作为以上三种辐射传输模型的输入大气参数,计算了 $0.4\sim 1\,000\mu\text{m}$ 的光谱透过率,就光电工程上常用的可见光、近红外、中红外和长波红外的大气窗口区,深入分析了水平传输距离、观测天顶角和观测源点高度对 CART 软件计算透过率的影响特性,并与 LBLRTM、MODTRAN4.0 的计算结果相比较。

2 大气透过率计算精度验证

均匀大气中的分子吸收是温度、气压和吸收气体含量的函数。在无云和气溶胶散射的干燥晴空条

件下,采用 CART,LBLRTM 和 MODTRAN4.0 分别计算 0.4~1 000 μm 波段内,水平传输 10 km 的大气光谱透过率。其中,美国标准大气模式中的近地面气压为 1 013.25 hPa,温度为 288.1 K。

由于 CART 的光谱分辨率为 1cm^{-1} ,MODTRAN4.0 的光谱分辨率为 2cm^{-1} ,文中将 LBLRTM 计算的单色透过率按 2cm^{-1} 带宽平滑,并按 1cm^{-1} 的光谱间隔输出用来比较其计算精度。图 1(a)为 3 种辐射传输模型计算的水平大气光谱透过率,图 1(b)为 MODTRAN4.0、CART 与 LBLRTM 间的大气光谱透过率偏差。相比精确的 LBLRTM 软件,CART 软件平均绝对偏差为 0.001 8,而 MODTRAN4.0 为 0.009 6,CART 软件计算水平大气分子吸收的精度优于 MODTRAN4.0 软件。深入分析发现大气透过率偏差主要是由于 CART 和 MODTRAN4.0 采用不同版本 HITRAN 数据库引起的。MODTRAN4.0 采用的 HITRAN1996 光谱数据库,而 CART 和 LBLRTM 均采用 HITRAN2004 光谱数据。而 HITRAN2004 数据库的精度显著高于 HITRAN2000 和 HITRAN1996^[10],相对后者来说,前者一些谱线吸收线强和线宽发生变化,有时还伴随着谱线的漂移、谱线忽略和谱线多余的情况,且增加了许多弱的吸收谱线。

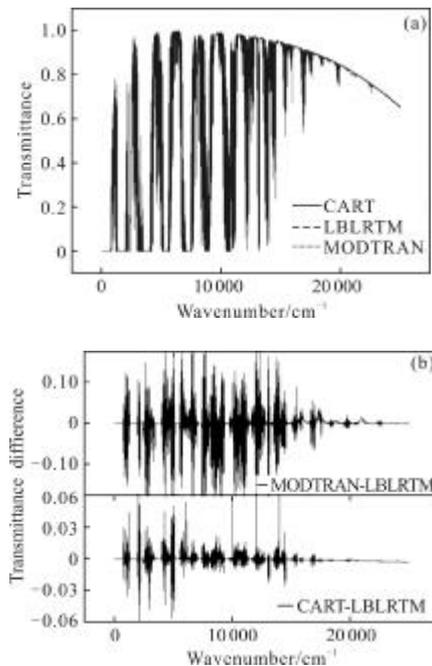


图 1 水平路径大气光谱透过率的比较

Fig.1 Comparisons of atmospheric spectral transmittance along the horizontal path

2.1 水平距离对大气透过率的影响

大气分子吸收和连续吸收是晴空无云大气中辐射衰减的主要影响因素,其吸收强弱严重影响着光传输的水平距离。在近地面上,模拟了可见光和近红外(0.4~1 μm)、短波红外(1~3 μm)、中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12 μm)水平传输不同距离后的平均大气透过率,结果如图 2 所示。

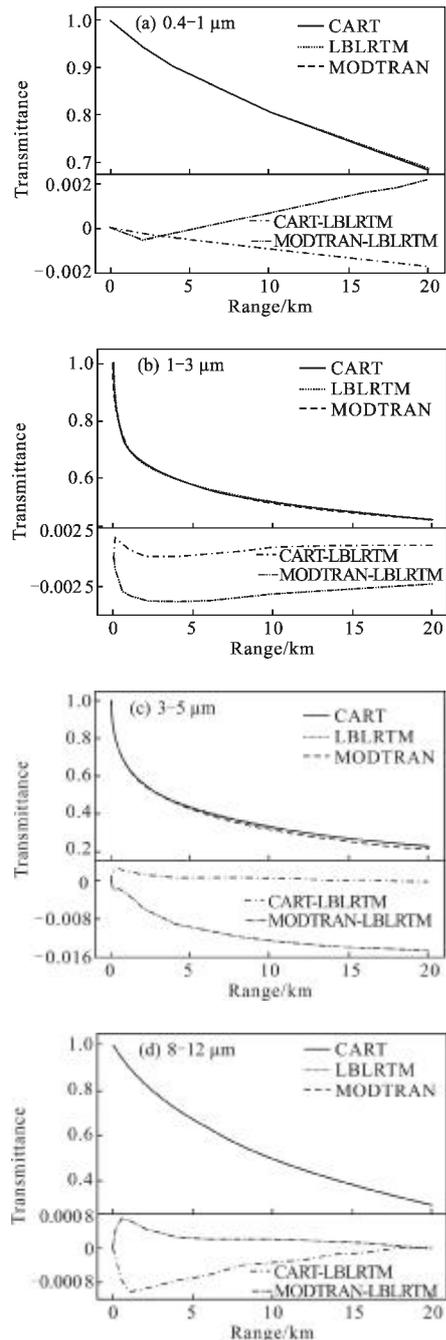


图 2 平均大气透过率随水平距离的变化

Fig.2 Average atmospheric transmittance as a function of horizontal length

图2显示CART、LBLRTM和MODTRAN4.0计算的各波段内平均大气透过率均随水平传输距离的增加而减小。图2(a)表明在0.4~1 μm 波段,平均大气透过率随水平距离近似呈线性递减关系。其中,0.4~0.7 μm 可见光内气体分子吸收比较弱(仅有弱的臭氧吸收,见图1),0.7~1 μm 低透过率区域包含了水汽的吸收。在近地面,温度和气压可近似认为是恒定的,吸收气体分子柱含量取决于路径长度,影响吸收辐射。图2(b)、(c)说明当水平距离小于4 km时,1~3 μm 和3~5 μm 波段内平均大气透过率随传输距离的增加急剧减少。当水平距离大于4 km时,平均大气透过率随传输距离缓慢减少。由大气透过率偏差曲线可知,CART软件计算的平均大气透过率比MODTRAN4.0更接近于LBLRTM数值。平均大气透过率随水平距离的衰减特性在8~12 μm 波段内表现同样明显(见图2(d))。因此,在计算由大气分子吸收及连续吸收造成水平路径辐射衰减时,CART软件的计算精度优于MODTRAN4.0软件。

2.2 观测天顶角对大气透过率的影响

倾斜观测天顶角的大小决定了整层大气的气体分子含量、温度和气压,影响着大气透过率。图3为三种辐射传输模型计算的4个波段内的平均大气透过率随观测天顶角的变化。

图3表明在各计算波段内,3种辐射传输模型计算的平均大气透过率均随观测天顶角的增大而减

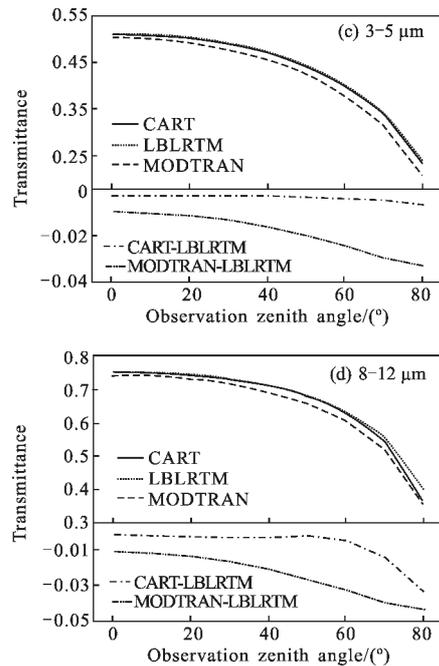
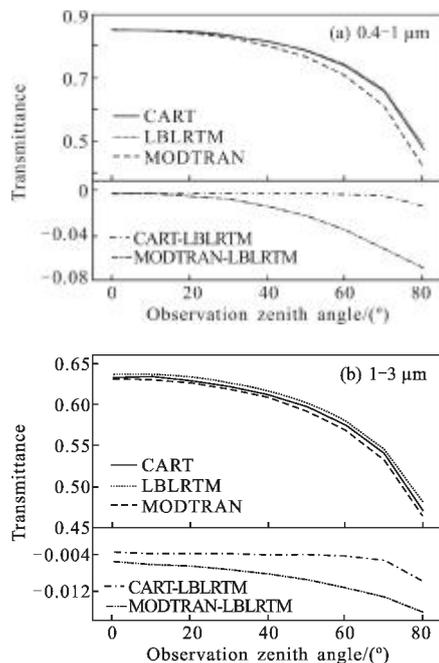


图3 平均大气透过率随观测天顶角的变化

Fig.3 Average atmospheric transmittance as a function of observation zenith angle

小。观测天顶角越大,固定高度上两点间等效气体分子含量越大,对辐射的吸收越强。由LBLRTM与CART及MODTRAN4.0间的相对偏差曲线可知,随着观测天顶角的增大,CART与MODTRAN4.0计算的平均大气透过率偏差均呈现增大趋势,这在观测天顶角60°以上的低仰角区域表现比较明显。但在整个观测天顶角范围内,CART软件计算的各波段平均大气透过率较MODTRAN4.0软件更接近于LBLRTM数值。因此,CART软件大气透过率计算精度高于MODTRAN4.0软件。

2.3 观测点高度对大气透过率的影响

图4为晴空无云大气条件下,不同观测点高度到大气层顶(100 km)的平均大气透过率,观测天顶角为30°。图中显示,观测点高度越低,各计算波段内的平均大气透过率越小,这在10 km以下稠密大气表现较为明显。由各计算波段平均大气透过率的偏差曲线可知,整个观测高度区域内,CART软件计算的平均大气透过率较MODTRAN4.0更接近于LBLRTM数值。4个计算波段内,CART与LBLRTM软件计算整层平均大气透过率的相对偏差分别为0.05%、0.53%、0.38%和0.34%,而MODTRAN4.0与LBLRTM间的这一相对偏差为0.88%、1.15%、2.72%

和 2.94%。显然,在观测点高度变化范围内,CART 软件计算的平均大气透过率比 MODTRAN4.0 更为精确,可信度更高。

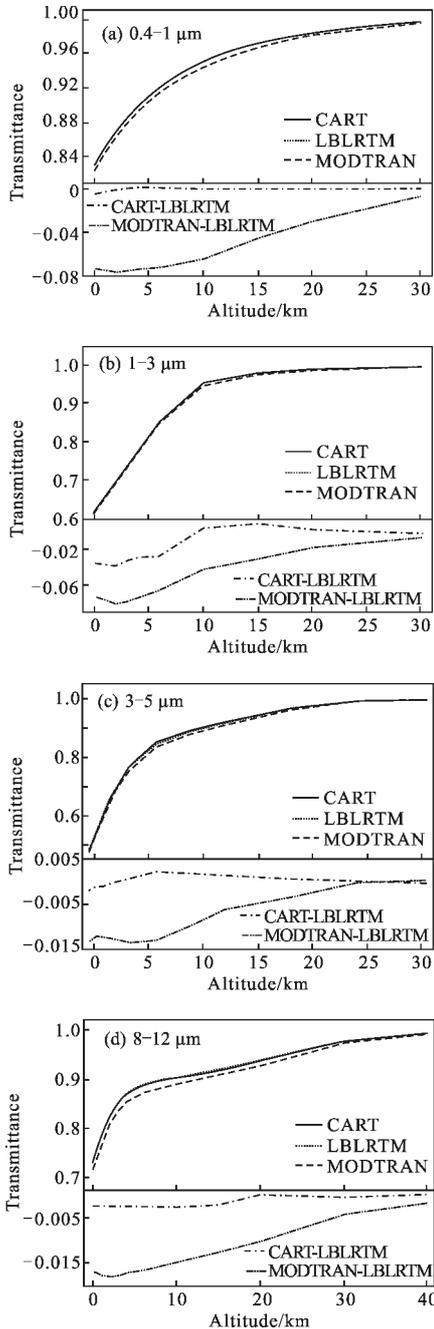


图 4 平均大气透过率随观测点高度的变化
Fig.4 Average atmospheric transmittance as a function of observation altitude

3 热辐射计算精度验证

大气向上热辐射通常由大气程辐射和地表发射辐射两部分组成,大气程辐射为非灰体辐射类型,包

括地表透过大气和大气各层的热辐射的累加。

$$I_{\text{therm}}^{\uparrow} = \varepsilon B_v(t_s) \tau + \int B_v(t_i) d\tau \quad (3)$$

式中: ε 为地表发射率; t_s 为地表温度; t_i 为第 i 层大气温度; τ 为整层大气透过率。对于大气向下热辐射,为各层大气温度引起辐射的叠加。

$$I_{\text{therm}}^{\downarrow} = \int B_v(t_i) d\tau \quad (4)$$

图 5 是 3 种辐射传输模型计算的 $5 \mu\text{m}$ 到远红外波段地面大气向下和大气顶向上热辐射。计算参数为:中纬度夏季模式大气,海水地表,温度为 294.2 K ,观测天顶角分别为 30° (地面斜向上观测)和 150° (大气顶斜向下观测)。如未作特殊声明,以下算例均是在以上计算参数下进行的。图(a)显示 3 种辐射传输模型计算的地面大气向下热辐射谱分布基本一致。

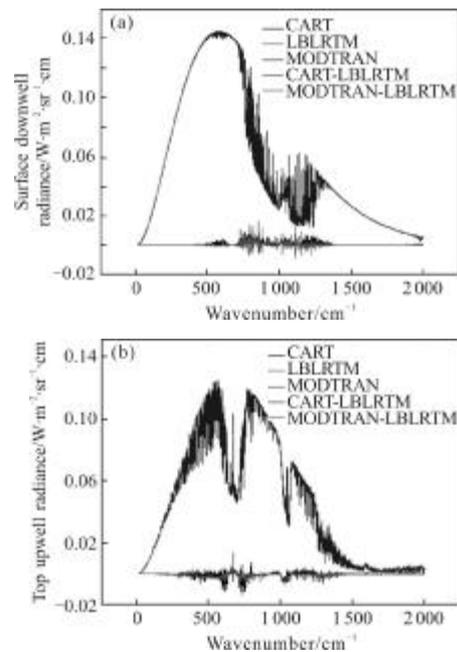


图 5 $5 \mu\text{m}$ -远红外区域内大气向下和向上光谱辐射
Fig.5 Downwell and upwell atmospheric spectral radiance over the $5 \mu\text{m}$ to far infrared region

CART 与 LBLRTM 间平均绝对偏差为 2.11%, 均方根误差为 $8.09 \text{ E}-4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, 而 MODTRAN4.0 与 LBLRTM 间平均绝对偏差为 1.20%, 均方根误差为 $5.2 \text{ E}-4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ 。对于大气顶向上辐射, CART 与 LBLRTM 间平均绝对偏差为 3.43%, 均方根误差为 $8.24 \text{ E}-4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$, MODTRAN4.0 与 LBLRTM 间平均绝对偏差为 2.85%, 均方根误差为 $8.95 \text{ E}-4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{cm}$ 。因此,相对于 LBLRTM, CART

软件计算大气热辐射的精度与 MODTRAN4.0 相当。

为全面检测 CART 软件计算大气热辐射的准确度,模拟各种因素对不同辐射传输模型计算热辐射的影响特性。图 6 为 3 种辐射传输模型计算不同观测点高度上的大气垂直向上热辐射。由图可知,观测源点高度越高,地表及低层大气向上辐射越弱,这在 0~20 km 低大气区域表现最为明显。左图是 CART 软件计算不同高度层观测到的 3-5 μm 中波红外辐射。由相对辐射偏差曲线可知,相对于 LBLRTM,CART 软件计算中波红外辐射的精度与 MODTRAN4.0 相当。在 8-12 μm 长波红外区域(见图(b)),各观测高度层上,CART 软件计算的长波红外辐射较 MODTRAN4.0 更接近于 LBLRTM 的结果,即其计算精度高于 MODTRAN4.0 软件。

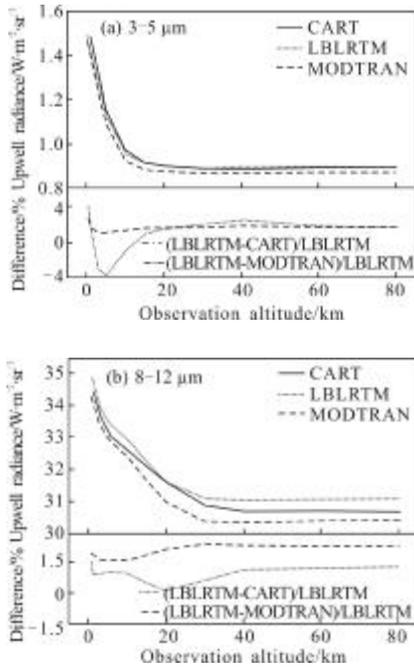


图 6 不同观测点高度上大气向上热辐射

Fig.6 Upwell thermal radiance as a function of observation altitude

图 7 是不同观测天顶角下的地面大气向下和大气顶向上热辐射。相同波段内,3 种辐射传输模型计算的大气热辐射随观测天顶角的变化趋势基本一致。对于地面大气向下热辐射(见图 7(a)和(b)),各个观测天顶角下,CART 与 LBLRTM 间的相对偏差均在 4%以内,尤其是观测天顶角在 0~40°范围内,CART 软件计算的地面大气向下中波红外辐射的精度与 MODTRAN4.0 软件相当,长波红外的计算精度优于

MODTRAN4.0。图 7(c)和(d)为大气顶向上热辐射,其中的相对辐射偏差曲线显示,在各观测天顶角下,CART 与 LBLRTM 间的相对偏差均小于 MODTRAN4.0 与 LBLRTM 软件,尤其是当观测天顶角大于 110°时,CART 与 LBLRTM 间的相对辐射偏差小于 2%,表明 CART 软件计算结果更接近于 LBLRTM 软件,其计算大气向上热辐射的精度优于 MODTRAN4.0 软件。

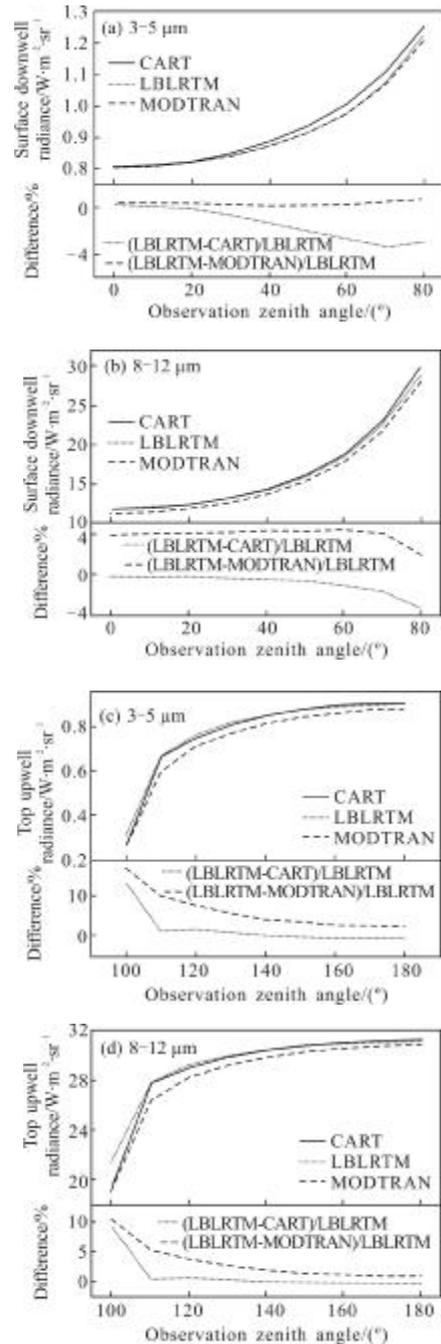


图 7 大气向下和向上热辐射随观测天顶角的变化

Fig.7 Downwell and upwell thermal radiance as a function of observation zenith angle

5 结 论

文中利用我国自主研制的通用大气辐射传输软件 CART 计算了晴空大气条件下由大气分子吸收和连续吸收造成的大气衰减和热辐射。详细分析了水平距离、观测天顶角和观测源点高度对光电工程常用观测波段的平均大气透过率及积分辐射的影响特性,并与国际上通用辐射传输软件 LBLRTM 和 MODTRAN4.0 的计算结果相比较。结果表明:与精确的逐线积分 LBLRTM 软件相比,CART 软件计算的大气分子吸收的透过率精度高于 MODTRAN4.0,热辐射的计算精度与 MODTRAN4.0 相当或略高于 MODTRAN4.0。由于 CART 软件的计算速度更快,且包括了我国若干地区的平均大气模式,在我国未来光电工程的大气透过率计算方面将有着广泛的应用。

参考文献:

- [1] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2002.
- [2] Gao Sifeng, Wu Ping, He Manli, et al. Estimation on the operating range of infrared system under complex atmosphere condition [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 941-944. (in Chinese)
高思峰, 吴平, 何曼丽, 等. 复杂大气条件下红外系统作用距离估算[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 941-944.
- [3] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Users guide to lowtran7[R]. AFGL-TR-88-0177, ADA206773, 1988.
- [4] Anderson G P, Berk A, Acharya P K, et al. MODTRAN4.0 User's Manual [M]. Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Materiel Command Hanscom AFB MA, 1997, 01731-3010.
- [5] AER's Radiative Transfer Working Group. AER's Public Release Radiative Transfer Models and Databases[OL]. 2002, <http://www.rtweb.aer.com>.
- [6] www.rtweb.aer.com/lblrtm
- [7] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation [J]. Optics Express, 2007, 15(13): 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, Lv 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. 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.
- [10] Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan. Infrared atmospheric transmittance calculation model [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 811-816. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理, 徐青山. 红外大气透过率的计算模式[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 811-816.