

CART 软件计算的红外大气透过率和实测值比较

陈秀红, 魏合理, 吕炜煜, 朱文越

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 230031)

摘要:初步完成了一套通用大气辐射传输软件的研制,它是一套基于我国大气模式的采用独特算法的大气辐射传输软件,可用来较快速地计算大气光谱透过率、大气热辐射、大气散射辐射和太阳直接辐照度,光谱分辨率为 1cm^{-1} 。利用中近红外傅里叶光谱辐射计 FTIR 测得的水平红外大气透过率来验证 CART 软件计算水平路径上红外大气透过率的精度。比较结果表明:CART 软件计算的红外大气透过率和实测值的误差最大小于 0.1,均方根大约为 0.04。这可以说明 CART 软件计算水平红外大气透过率是可靠的。

关键词:CART; 红外大气透过率; FTIR; 实测值

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Comparison of Infrared Atmospheric Transmittance Calculated by CART Software with Measured Values

CHEN Xiu-hong, WEI He-li, LÜ Wei-yu, ZHU Wen-yue

(Center of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract:The combined atmospheric radiative transfer (CART) has been developed primarily, it is an atmospheric transfer radiative software based on the atmospheric model in regions of China and using particular arithmetic, and can be used to calculate atmospheric spectral transmittance, thermal radiance, scattering radiance and solar direct irradiance quickly, its spectral resolution is 1cm^{-1} . This paper tests CART's calculating precision on horizontal path condition by comparing with the horizontal infrared transmittance measured by Fourier Transform mid- and near- Infrared (FTIR). The compared results show that the maximum errors between CART's calculating horizontal infrared atmospheric transmittance and measured values are less than 0.1, and the standard error is about 0.04. This illustrates that the horizontal infrared atmospheric transmittance calculated by CART is reliable.

Key words:CART; infrared atmospheric transmittance; FTIR; measured values

1 引言

在国家有关项目的支持下,我们初步研制了一套辐射传输软件,命名为通用大气辐射传输软件(combined atmospheric radiative transfer, CART)^[1-2],可用来快速计算空间任意两点之间的大气光谱透过率、散射以及地表反射的太阳辐射、地表和大气的热辐射等,光谱范围为可见光到远红外($1\sim 25000\text{cm}^{-1}$)。与国际上流行的辐射传输软件(如 LOWTRAN^[3]、MODTRAN^[4])相比,CART 软件有其

独特的几点:①该软件的光谱分辨率为 1cm^{-1} ;②软件的大气分子吸收部分是采用基于 LBLRTM^[5]逐线积分计算而提出的一种非线性拟合算法,分子吸收线数据库采用最新的 HITRAN04 数据库;③除了 6

基金项目:中国科学院方向性创新项目(No. KKGX2-SW-413);中国科学院物质科学研究院人才青年基金资助。

作者简介:陈秀红(1980-),女,硕士,助理研究员,2005年毕业于中科院安徽光学精密机械研究所,现主要从事大气辐射传输模式研究及云辐射传输模式研究。E-mail: xhchen@aiofm.ac.cn

收稿日期:2008-10-12

种 AFGL 大气模式外,还提供了我国典型地区的大气模式^[6]、我国典型地表的地表反照率值;④提供了一种根据实测尺度谱分布和气溶胶高度分布计算的气溶胶消光模式^[7]。

然而,作为实用的大气辐射传输软件,人们非常关注的是该软件的计算结果是否可靠。关于 CART 软件的理论验证,即和 LBLRTM 软件计算结果的比较,以及亮温计算的实验验证在 Wei^[1] 等的论文中已有一些报道。但为了更好地说明软件计算结果的可靠性,须对软件进行多方面多角度的验证。本文利用中近红外傅里叶光谱辐射计 FTIR 测得的水平红外大气透过率,来验证 CART 软件计算水平大气透过率的计算精度,从而在实验上进一步验证该软件计算结果的可靠性。

验证之后的 CART 软件可作为一套工具软件,供从事大气遥感、目标辐射测量和红外工程的设计与性能评估等方面的人员使用。

2 CART 软件计算大气透过率简介

大气透过率计算包括大气分子的吸收、分子连续吸收和散射、气溶胶的衰减(吸收与散射)三部分的计算。CART 软件中各个模块计算分别采用下面的方法:

(1)大气分子的吸收考虑 7 种主要吸收气体: H_2O , CO_2 , O_3 , CO , N_2O , CH_4 , O_2 。对每种分子用 LBLRTM 逐线积分法计算可见光到远红外波段单色的分子吸收光学厚度,平滑到 1cm^{-1} 的光谱分辨率:

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

其中, $k_v(t, p)$ 为温度为 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。 $\Delta v/2$ 固定为 0.5cm^{-1} 。计算选取 9 个参考温度下 9 个参考气压,在每种气压和温度下,计算 50 种气体含量下的值,然后采用基于逐线积分法计算的 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,计算结果可得到 5 个拟合系数:

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

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; $c_{i(t,p)}$, ($i=0, \dots, 4$) 是给定波数 v , 温度 t , 气压 p 下拟合得到的 5 个系数。这样,每个波数点上共有 $9 \times 9 \times 5 = 405$ 个系数可供使用。在实际计算时,我们可以用插值法得到任意温度和气压的吸收系数。对于斜程路径大气传输时,考虑大气的非均匀性,通常采用 Curtis -

Godson(CG) 近似,拟合系数在传输路径上按含量加权平均。

大气分子连续吸收采用国际上目前比较公认的 MT_CKD 方法,可计算 H_2O , CO_2 , O_2 , N_2 和 O_3 五种分子的连续吸收,分子散射则用瑞利散射公式进行计算,由于其算法比较成熟,这里就不作介绍。

(2)气溶胶的衰减(吸收和散射)计算除了采用 MODTRAN 中的气溶胶模式外,还增加了一种根据实测气溶胶尺度谱分布计算的气溶胶模式。现在,实际的气溶胶尺度谱分布已经可以由仪器(如中科院安徽光学精密机械研究所研制的光学粒子计数器 OPC)测得,并按下式拟合成 Junge 谱而提供实时的 Junge 指数 v :

$$\frac{dN}{dr} = N_0 \cdot r^{(-v-1)} \quad (3)$$

给定气溶胶复折射率 m 及其随波长变化,用 Mie 程序计算气溶胶衰减效率因子 Q_e ,得到地面上 (0km) 归一化到 $0.55\mu\text{m}$ 波长气溶胶的相对衰减系数 $\sigma_e^1(\lambda, 0)$:

$$\sigma_e(\lambda, 0) = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(\lambda, m) \frac{dN}{dr} dr \quad (4)$$

$$\sigma_e^1(\lambda, 0) = \frac{\sigma_e(\lambda, 0)}{\sigma_e(0.55, 0)} \quad (5)$$

给定地面能见度 vis ,则其他波长上的绝对气溶胶衰减系数为:

$$\beta(\lambda, 0) = \sigma_e^1(\lambda, 0) \cdot \left(\frac{3.912}{\text{vis}} - \beta_M\right) \quad (6)$$

式中, β_M 表示近地面分子衰减,在海平面一般近似取 0.001159km^{-1} 。

根据实测的气溶胶高度分布,如激光雷达测量的衰减系数廓线,归一化到近地面的消光系数,得到雷达波长上、地面到雷达测量高度区间各个高度上的相对消光系数 $N(h)$ 。雷达测量高度以上至 30km ,则直接用 MODTRAN 给出的高度分布 $N(h)$, 30km 以上可以不考虑气溶胶的衰减。

任意波长和任意高度的消光系数为地面消光系数 $\beta(\lambda, 0)$ 乘以高度分布 $N(h)$, 即:

$$\beta(\lambda, h) = \beta(\lambda, 0) \cdot N(h) \quad (7)$$

从而,地面到 H 高度上气溶胶的衰减为:

$$T_{\text{aer}} = \exp\left[-\int_0^H \beta(\lambda, h) \cdot dh\right] \quad (8)$$

最后得到的总透过率为各部分透过率的乘积。

3 中近红外傅里叶光谱辐射计测量水平大气透过率介绍

中红外傅里叶光谱辐射计(Fourier transform mid-infrared, FTIR),可测量 $1 \sim 15\mu\text{m}$ 的红外光谱透过率和辐射强度。但由于受实验场地和实验条件

的限制,目前我们能测到的是近距离水平大气透过率。

FTIR 测量水平大气透过率的实验装置如图 1 所示,发射系统通常采用高温标准黑体(1000℃)作为辐射光源。该光源通过一小孔光阑,经一离轴抛物物准直镜准直后,平行地发射出去,接收系统主要由一台干涉型 Mechelson 红外光谱辐射计构成,光谱分辨率可以达到 1cm^{-1} 。FTIR 有两个探测器 A: MCT 和 B: InSb,两个探测器的响应波段各不相同。通过比较一定距离上测量的信号与出口处信号得到大气的光谱透过率。

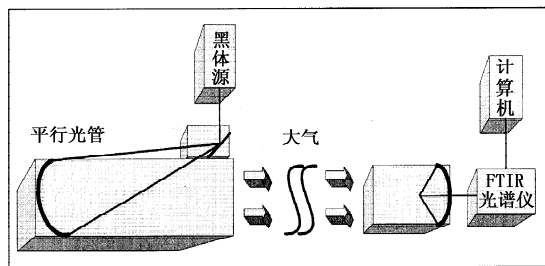


图1 水平大气透过率测量装置

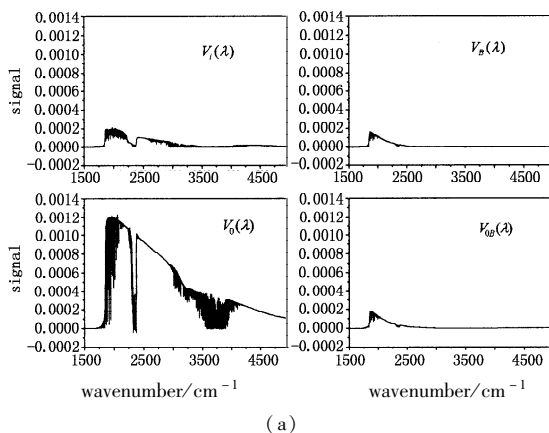
设用傅里叶光谱辐射计在近距离上测得黑体的信号为 $V_0(\lambda)$,背景信号为 $V_{0B}(\lambda)$;在连续观测第 i 个实验时间内一定距离上测得黑体的信号为 $V_i(\lambda)$,背景信号为 $V_{iB}(\lambda)$ 。则傅里叶光谱辐射计在第 i 个时刻测得该距离上的水平透过率为:

$$T_i(\lambda) = k \frac{V_i(\lambda) - V_{iB}(\lambda)}{V_0(\lambda) - V_{0B}(\lambda)} \quad (9)$$

式中, k 为仪器的响应系数。实际上背景信号随时间变化非常小,故实验时间内该距离上背景信号 $V_{iB}(\lambda)$ 可用初始背景信号 $V_B(\lambda)$ 代替。这样,每次只要在实验前后测一下背景信号即可,操作起来方便些,则式(9)可改为:

$$T_i(\lambda) = k \frac{V_i(\lambda) - V_B(\lambda)}{V_0(\lambda) - V_{0B}(\lambda)} \quad (10)$$

图2为仪器测量得到的各部分信号强度(a)和最终得到的透过率(b)。



(a)

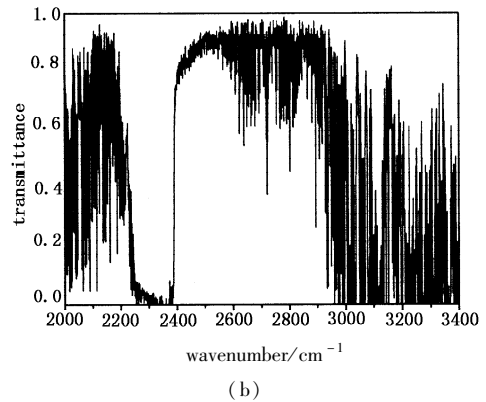


图2 仪器测得各部分信号强度(a)及透过率(b)

4 CART 软件水平透过率计算和实测结果比较

从大气透过率的理论计算可知,大气透过率的大小与观测距离、各种分子含量、气压、温度、地面能见度和相对湿度有关。大气分子中,水汽和二氧化碳的含量随时间、地点的不同变化较大,因而影响大气透过率较大,其他分子含量随时间、地点变化不大,可根据不同时间和地点选择不同的标准模式进行计算。所以,在用 FTIR 测得红外大气透过率的同时,为了便于比较,还须测得对应时间和地点的各种大气参数。

本文选取了三组大气条件对 CART 软件计算结果进行验证,如表 1 所示。a 组属于热带地区冬季; b 组属于大陆地区春季; c 组属于大陆地区夏季。从三组大气参数可以看出,水汽含量、二氧化碳含量、相对湿度和能见度的参数值变化非常大。

表 1 三组大气参数

	a 组	b 组	c 组
Time	2006/12/19	2007/04/27	2007/07/18
Station	XIAMEN(厦门)	HEFEI(合肥)	HEFEI(合肥)
Range/m	166	1000	1000
H ₂ O density/ppmv	15883.4	22380.53	17186.9
CO ₂ density/ppmv	681	385	380
Pressure/hPa	1024	1014.4	1017
Temperature/K	286.5	297.6	291
Relative humidity/%	66	90	85
Surface visibility/km	26.4	7.02	3.6

利用 CART 软件计算这三组条件下的水平大气透过率,和对应时间、地点的实测大气透过率进行比较。由于 FTIR 测得的大气透过率光谱间隔和 CART 软件计算输出的光谱间隔不一致,为了便于比较,把测量值和计算值的分辨率同时降低到 5cm^{-1} 分辨率,然后计算两者的差别,三组大气条件

下的比较结果如图3所示,各个图的下面表示计算值与实验值的差。

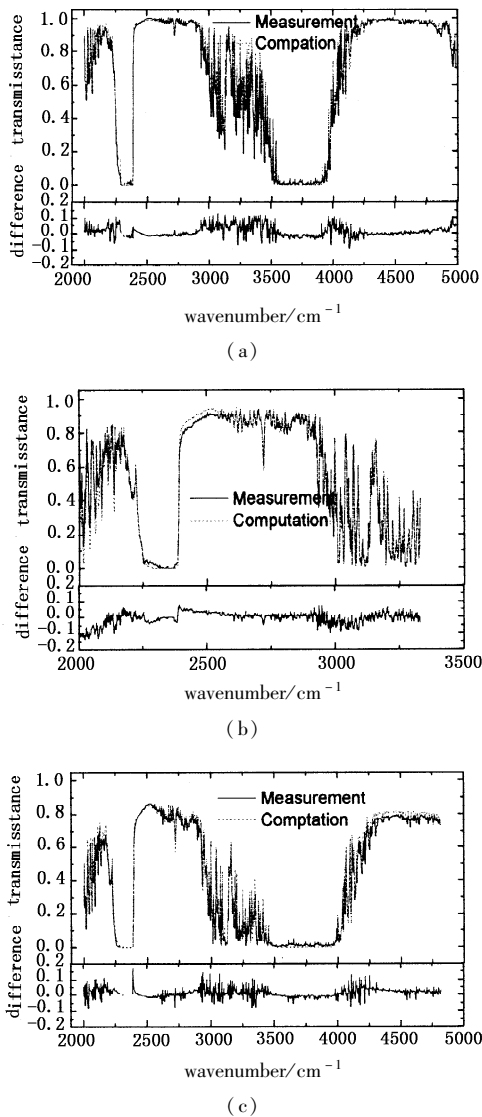


图3 CART计算值与FTIR实测值的比较

表2是三组大气条件下,CART软件计算结果与实测值的差的标准偏差。可以看出,在各种大气条件下,两者的差的标准偏差均在0.04左右,而且从图上也可以看出,CART软件计算结果与实测值的最大值大约为0.1,这一般是仪器本身测量的噪声造成的。另外,从图上还可以看出,CART软件计算结果的波数和实测的波数非常一致,几乎没有光谱偏差。所以从这些结果可以看出,CART软件计算水平大气透过率是可靠的。

表2 三组大气条件下计算值与实测值的差的标准偏差

	a	b	c
Standard error	0.037	0.036	0.035

5 小结

初步研制完成的通用大气辐射传输(CART)软件,可以计算空间任意两点之间的大气光谱透过率、散射和透射以及地表反射的太阳辐射、地表和大气的热辐射等。和国际上流行的辐射传输软件相比,有自己鲜明的特点,是国内首次开发的一套辐射传输软件。然而,软件的开发成功与否很大程度上还取决于软件的计算结果的可靠性。本文选取不同的时间和地点利用中红外傅里叶光谱辐射计FTIR实测水平红外大气透过率来验证CART软件计算水平大气透过率结果的可靠性。比较结果显示,在各种大气条件下,近距离的测量显示,CART软件计算水平大气透过率结果和实测结果之间的误差最大小于0.1,标准偏差在0.04左右,而且两者分子吸收线或吸收带的波长位置几乎没有偏差。这就说明CART软件计算水平大气透过率是可靠的。

虽然在已发表过的相关文献上对CART计算精度在理论上的验证有一些介绍,但更系统、更全面(包括理论和实验)的验证将在后续文章中介绍,用来全面评估我们研制的通用大气辐射传输计算软件。

参考文献:

- [1] Heli Wei, Xiuhong Chen, Ruizhong Rao, et al. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation [J]. Optics Express, 2007, 15: 8360 - 8370.
- [2] 魏合理,陈秀红,饶瑞中. 通用大气辐射传输(CART)软件介绍[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 446 - 450.
- [3] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Users Guide to Lowtran 7[R]. AFGL - TR - 88 - 0177, 1988.
- [4] 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, 01731 - 3010, 1997.
- [5] AER's Radiative Transfer Working Group, AER's Public Release Radiative Transfer Models and Databases [OL]. 2002, <http://www.rtweb.aer.com>.
- [6] 陈秀红,魏合理. 基于中国典型地区大气模式的红外大气透过率变化特征[J]. 激光与红外, 2008, 38(11): 1090 - 1093.
- [7] 陈秀红,魏合理,等. 可见光到远红外段气溶胶衰减计算模式[J]. 强激光与粒子束, 待发表.