

更新升级的通用大气辐射传输软件 CART2(特约)

魏合理^{1,2}, 戴聪明^{1,2}, 武鹏飞^{1,2}, 唐超礼^{3,4}, 赵凤美^{3,4}, 吴欣^{3,4}, 饶瑞中^{1,2}, 王英俭^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 2300373;
3. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽合肥 230026;
4. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽淮南 232001)

摘要: 采用 HITRAN2016 数据库, 研制了新的大气分子吸收系数数据库, 应用于更新的第二版通用辐射大气传输软件 CART2。增加了光谱分辨率为 0.1 cm^{-1} 的 CART2P1 程序模块。相对于 CART1.0, 大气分子吸收考虑了更多的分子弱谱线的吸收, 扩展了计算波段。计算结果与 LBLRTM 和 MODTRAN5 对比表明, CART2 能够精确地模拟大气分子的吸收; 计算结果与地基实际测量的红外高分辨率太阳光谱吻合的非常好。具备 0.1 cm^{-1} 光谱分辨率的 CART2 计算的大气透过率和环境背景辐射可以分辨出分立的大气分子吸收谱线, 能够在中高光谱分辨率的光学工程和有些激光工程的大气传输计算中得到应用。

关键词: CART; 升级; 光谱分辨率

中图分类号: P40 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20201024

An upgraded combined atmospheric radiative transfer CART2(*Invited*)

Wei Heli^{1,2}, Dai Congming^{1,2}, Wu Pengfei^{1,2}, Tang Chaoli^{3,4}, Zhao Fengmei^{3,4}, Wu Xing^{3,4},
Rao Ruizhong^{1,2}, Wang Yingjian^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui, Hefei 230037, China;
3. China Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
4. Institute of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Using the HITRAN2016 database, a new database of atmospheric molecular absorption coefficients was obtained by recalculating and fitting, which was applied to the upgraded 2nd edition of the Combined Atmospheric Radiative Transfer (CART2). A CART2P1 program module with a spectral resolution of 0.1 cm^{-1} has been added. Compared to CART 1.0, atmospheric molecular absorption takes into account weaker molecular absorption lines. The comparisons to LBLRTM between the calculated results of MODTRAN5 and CART showed that CART2 can accurately simulate the absorption of atmospheric molecules; the calculated results agree well with the real measured ground-based infrared high-resolution solar spectrum. The atmospheric transmittance and environmental background radiation calculated by CART2 with a finer 0.1 cm^{-1} spectral resolution can distinguish discrete atmospheric molecular absorption lines, which can be applied to radiative transfer calculations

收稿日期: 2020-02-05; 修订日期: 2020-03-10

基金项目: 国防基础科研项目计划项目 (JCKY2016204C602); 装备预先研究项目 (41416020204)

作者简介: 魏合理 (1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事红外辐射大气传输、卷云红外辐射特性的研究工作。Email: hlwei@aiofm.ac.cn

for medium-to-high spectral resolution optical engineering or some laser engineering.

Key words: CART2; upgrade; spectral resolution

0 引言

在大气遥感、目标辐射测量等红外工程的设计、使用与性能评估等方面都必须考虑大气和环境的影响,需要大气透过率、大气背景辐射等参数。根据已有的大气辐射传输知识和测量的大气参数,建立精确而快速的辐射传输计算模式和软件,快速获得大气光谱透过率和环境背景辐射,是工程上特别关注的问题。

笔者已开展实用的通用大气辐射传输软件模式的研究工作,初步建立了中分辨率(1 cm⁻¹)大气光谱透过率和辐射量(包括散射辐射和热辐射)的计算软件,定名为通用大气辐射传输软件(Combined Atmospheric Radiative Transfer,简称 CART)^[1-3]。在 CART 中,笔者提出基于逐线积分的中分辨率(1 cm⁻¹)大气分子吸收算法^[2],考虑大气分子和气溶胶粒子的吸收^[4]、散射、热辐射效应以及地表的反射和辐射效应,建立了通用大气辐射传输计算软件 CART^[1,3],用来快速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,光谱分辨率为 1 cm⁻¹,光谱波段为可见光到远红外波段(1~25 000 cm⁻¹),并且带有我国若干个地区的逐月平均的大气模式。

随着人们关于分子光谱认识的提高,HITRAN 数据库中分子吸收参数数据库得到不断改进,自 1992 年起,每 4 年发布一个升级的版本,目前,最新的是 HITRAN2016^[5],其中,增加了很多新的吸收线参数,因此,有必要根据最新的 HITRAN 数据库,对 CART 计算软件中的分子吸收系数做一些更新修正。

目前,红外光学工程多数是采用宽波段的工作模式,对光谱分辨率的要求不高,CART 中 1 cm⁻¹的光谱分辨率对多数情况下的应用是足够的。但随着高光谱遥感技术和激光工程的发展,高光谱的大气传输模式在有些情况下有重要的应用,因此,发展高光谱分辨率的大气传输模式具有重要的应用价值。

笔者在原有的 CART 的基础上,采用 2016 年版 HITRAN 数据库,更新了大气分子吸收拟合系数数据库,并研制了光谱分辨率为 0.1 cm⁻¹的新版本 CART2P1。文中报道了更新版的 CART2,并展示了

CART2 计算结果与精确的逐线积分法(LBLRTM)、广泛使用的 MODTRAN 以及与实际测量的高分辨率太阳光谱的比较。

1 CART 主要算法

CART 的主要功能包括计算大气透过率(大气衰减)、大气背景辐射(大气、地表的热辐射及其散射太阳的辐射)和透过大气的太阳直接辐射。大气衰减包括大气中各种分子和气溶胶粒子的吸收和散射。CART 主要算法如下:

(1) 大气分子吸收计算模型

在 CART 模式中,提出了一个基于逐线积分拟合的大气分子吸收透过率计算模型。考虑大气中主要的吸收气体分子,针对每一种分子,提出了基于逐线积分拟合的快速计算模式^[2],用逐线积分计算程序计算给定带宽内的平均大气透过率 $\bar{T}_v(t, p, u)$, 将该平均大气透过率表示为指数上 4 阶非线性拟合的关系式:

$$\bar{T}_v(t, p, u) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu-\Delta\nu/2}^{\nu+\Delta\nu/2} \exp[-k_v(t, p)u] d\nu = \exp\{-u \cdot \exp(\sum_{i=0}^4 c_{vi}(t, p)[\log(u)^i])\} \quad (1)$$

式中: $T_v(t, p, u)$ 为某种大气份在给定波数 ν 处、带宽 $\Delta\nu$ 范围内、温度 t 、气压 p 和吸收含量 u 下的平均透过率; $c_{vi}(t, p)$ ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 为拟和系数。预先用精确的逐线积分法(LBLRTM)^[6] 计算各种吸收气体从 1~25 000 cm⁻¹(0.4 μm-远红外)、200~320 K 温度范围内、0.05~1 100 hPa 气压范围内的吸收系数 $k_v(t, p)$ 。然后,通过公式(1)让吸收气体含量 u 变化达 7 个数量级,从 $\bar{T}_v(t, p, u)$ 和 u 的变化曲线中拟合出得到该气体成分在温度 t 、气压 p 、波数 ν 处的拟合系数 $c_{vi}(t, p)$ 。参考气压、参考温度和气体含量变化范围涵盖了实际大气中所有可能出现的情况。形成大气主要吸收气体在各种温度、气压、和波数网格点上的拟合参数数据库。参考文献[2]已经说明,该拟合系数 $c_{vi}(t, p)$ 随温度和气压光滑地变化,因此,在计算时可根据实际情况快速插值得到任何给定温度 t 、气压 p 下的拟合系数,进而根据公式(1)快速得到均匀路径含量为 u 时的大气透过率。对于非均匀大气,采用 C-G 近似,获得路径

等效拟合系数 \bar{C}_i , 根据路径积分的含量 $U = \int du(t, p)$, 利用下式快速计算得到整过路径的大气透过率:

$$\bar{T}_v = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu-\Delta\nu/2}^{\nu+\Delta\nu/2} \exp\left[-\int k_\nu(t, p) du\right] dv = \exp\left\{-U \cdot \exp\left(\sum_{i=0}^4 \bar{C}_i [\log(U)]^i\right)\right\} \quad (2)$$

这样, 给定大气参数 (温度、气压和各种吸收气体含量的路径分布) 就可以快速计算各个波长处、空间任意两点之间路径的各种大气分子吸收的衰减。

在新的版本中, 设定带宽 (即光谱分辨率) $\Delta\nu$ 分别为 0.1 和 1 cm^{-1} , 分别研制了光谱分辨率为 0.1 cm^{-1} 和 1 cm^{-1} 两套拟合系数数据库。因此, 在新版本中即保留了原 CART1 中的 1 cm^{-1} 分辨率的快速计算版本, 也发展了可以计算精细光谱结构的 0.1 cm^{-1} 光谱分辨率的新版本 (CART2p1)。图 1 是在 2355 cm^{-1} 处 CO_2 不同气压和温度下用公式 (1) 快速拟合和 LBLRTM 计算结果的对比。可以看出, 无论在高低气压和高温下、在吸收气体含量超过 7 个量级的大动态范围

内, 我快速拟合方法和 LBLRTM 精确计算的结果都吻合得非常好, 这种拟合保证了 CART 中分子吸收计算的高精度。

由于占用庞大的内存, 在新的 CART2P1 版本中, 高分辨率计算模块目前仅限于波长大于 $1 \mu\text{m}$ 的波段, 即 $1\sim 10\,000 \text{ cm}^{-1}$ (或 $1\sim 10\,000 \mu\text{m}$)。为了减小内存的开支, 加快计算速度, 笔者在新的 CART2 中采用了动态内存分配的方法调用拟合系数。

分子连续吸收采用 MT_CKD1.2^[6] 方法计算。

(2) 大气气溶胶衰减计算模型^[4]

笔者在 CART 模式中提出了一个根据气溶胶种类 (或提供气溶胶复折射率)、地面能见度、实测气溶胶尺度谱分布、消光高度分布廓线、用 Mie 散射公式计算气溶胶衰减的模式^[4]。

除了选用自定义的以荣格指数表示的气溶胶粒子尺度谱分布和自定义的气溶胶介质的复折射率的气溶胶种类外, 还可以选用 MODTRAN 的乡村型、城市型、海洋型、沙漠气溶胶类型。同时还集成了广泛使用的 OPAC 的气溶胶种类 (干净大陆型、城市型、海洋型、沙漠型) 供计算时选用。

在低对流层 $0\sim 10 \text{ km}$ 高度范围内, CART 模式中的气溶胶消光高度分布廓线具有标高选项 (假定气溶胶随高度分布近似按指数形式近似衰减, 需要输入气溶胶消光廓线的标高), 也可以采用实际测量 (如用激光雷达测量的气溶胶消光系数的高度分布廓线) 的结果, 另外, 还可以选用 MODTRAN 中气溶胶消光的高度分布模式 (由地面能见度决定气溶胶随高度分布)。 $10\sim 30 \text{ km}$ 上的气溶胶衰减提供三种选择: 背景平流层型、中等火山型和强火山型模式。 30 km 以上高度暂时忽略了气溶胶的衰减。

(3) 大气单次散射和多次散射快速计算方法^[7]

大气气溶胶和分子的单次散射有分析解, 根据太阳位置、观测几何位置和大气介质的散射相函数可以直接计算大气散射太阳的单次散射辐射, 笔者据此建立了一个单次散射的辐射传输计算模式。考虑到多次散射的计算复杂性, 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^[7], 计算精度 (均方根误差) 与直接用 DISORT 计算的偏差小于 2%, 计算速度比直接调用 DISORT 提高两百多倍。在计算中考虑了草地、海水、雪地等几种郎伯型

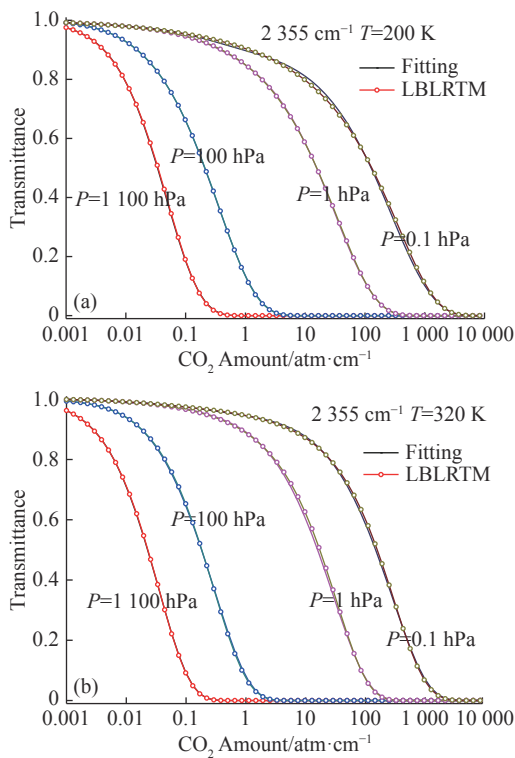


图 1 在各种温度、气压下, 用快速拟合法和 LBLRTM 计算的 CO_2 透过率随 CO_2 的含量变化

Fig.1 CO_2 transmittance computed with the LBLRTM and fast fitting method vs CO_2 content at various temperatures, pressures

地表类型的反照率及其随波长的变化。

(4) 大气热辐射和太阳直接辐照度计算模型

CART 中还建立了大气和地表的热辐射、太阳直接辐照度的计算模式。在热辐射计算时,假定地表的反射率和发射率之和为 1。

(5) 我国若干地区的大气平均模式

我国幅员辽阔,大气条件千差万别,直接采用标准大气模式,与实际情况可能有很大差别。在 CART 模式中,除了六种标准大气模式(美国标准大气、副极地夏季、副极地冬季、中纬度夏季、中纬度冬季、热带)外,还嵌入的我国典型地区大气模式,包括东南沿海、内陆地区、和西北地区逐月平均的大气参数模式,供计算时方便调用。还可以根据具体情况,输入我国不同地区的逐月平均的大气模式。

2 CART 主要功能的升级

2.1 基于 HITRAN2016 的分子吸收系数更新

高分辨率大气分子吸收数据库 HITRAN 在不断地更新,2004 年以后分别有如下版本:2004,2008,2012 和目前最新的 2016 版^[5]。表 1 和 2 分别是 HITRAN 各版本中大气 7 种主要吸收分子的在 0.4 μm 到远红外波段的吸收线数和 296 K 温度下的吸收总强度。可以看出:随着时间的推移,不同版本中吸收线数量显著地增加,如水汽在 2016 版本 HITRAN 数据库中水汽有 280445 根吸收线,相对于 2004 年的 63 142 根吸收线增加了 3 倍多。其他 6 种气体情况类似,都是吸收线的数量随着时间的推移显著地增多。有些分子的弱吸收带,在早期的 HITRAN 版本中没有吸收线参数。而在 HITRAN2016 中显著地增加和扩展了这些弱吸收带的吸收线参数,如 CH₄ 在波数大于 10 000 cm⁻¹ 的近红外区,HITRAN2016 增加很多吸收带的谱线参数。

表 2 是 7 种分子 (0-25 000 cm⁻¹) 的积分吸收强度,可以看出:各种分子的积分吸收强度变化不大,CO 和 CH₄ 的线强度略微增加,其他 5 种分子的积分强度变化都小于 1%,说明在 HITRAN 数据库中新版本增加的谱线主要是弱的吸收谱线。弱谱线在总的强度中占的权重很小,所以,积分吸收强度变化不大。

用最新的 HITRAN2016 大气分子吸收参数数据库,按公式 (1) 重新计算拟合得到了新的大气分子吸

表 1 HITRAN 数据库 2004~2016 版本中 7 种主要大气吸收分子的吸收谱线数 (0~25 000 cm⁻¹)

Tab.1 Number of absorption lines for 7 main gases in HITRAN database in 2004-2016(0-25 000 cm⁻¹)

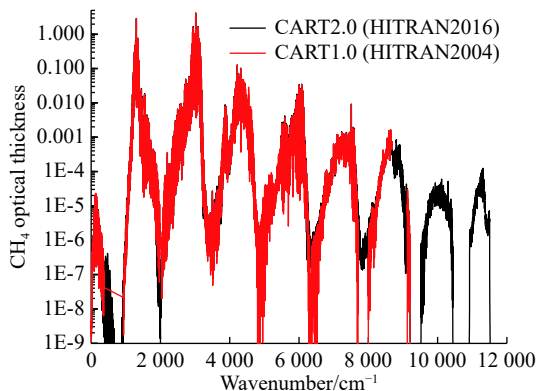
	2004	2008	2012	2016
H ₂ O	63 142	69 140	224 259	280 445
CO ₂	62 913	314 750	471 847	553 410
O ₃	311 481	409 686	422 116	449 570
N ₂ O	47 835	47 843	47 843	141 697
CO	4 477	4 477	4 606	5 381
CH ₄	251 440	290 091	468 013	437 868
O ₂	6 428	6 428	13 975	14 026

表 2 HITRAN 数据库 2004-2016 版本中 7 种主要大气吸收分子积分吸收强度 (0~25 000 cm⁻¹)(单位: cm⁻¹/(mole·cm⁻²))

Tab.2 Total strength of absorption lines for 7 main gases in HITRAN database in 2004-2016 (Unit:cm⁻¹/(mole·cm⁻²))

	2004	2008	2012	2016
H ₂ O	9.0576E-19	9.0606E-19	8.9887E-19	9.0298E-19
CO ₂	5.7891E-20	5.7890E-20	5.8136E-20	5.8090E-20
O ₃	7.7918E-20	7.7924E-20	7.7924E-20	7.7922E-20
N ₂ O	4.2665E-20	4.2666E-20	4.2666E-20	4.2677E-20
CO	7.3883E-21	7.3883E-21	7.4120E-21	7.5052E-21
CH ₄	8.0356E-21	8.0524E-21	8.0608E-21	8.0930E-21
O ₂	1.9135E-22	1.9135E-22	1.9260E-22	1.9260E-22

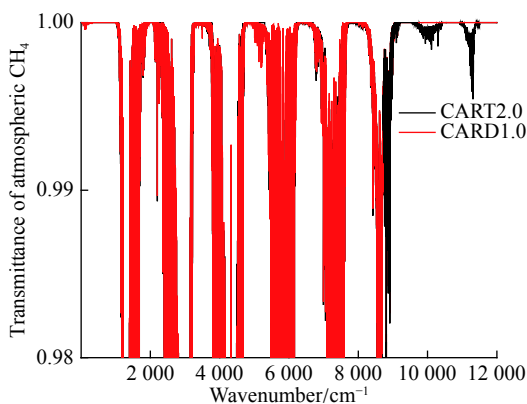
收系数数据库,应用于 CART2。以 CH₄ 为例,图 2 和图 3 给出了基于 HITRAN2004(CART1.0) 和 HITRAN 2016(CART2.0) 拟合得到水平均匀大气 CH₄ 的光学厚度和美国标准大气天顶角 80°时地面到大气层外 CH₄ 透过率。可以看出,在强吸收带上,基于 HITRAN 2016 的 CART2.0 计算的 CH₄ 的光学厚度或透过率与基于 HITRAN2004 的结果相差无几;但在一些弱吸收的波段上,如 9 500~11 800 cm⁻¹ 波段,基于 HITRAN 2016 的 CART2.0 CH₄ 有明显的吸收,而 CART1.0 在这个波段无 CH₄ 的吸收,这是因为 HITRAN2004 数据库中,该波段缺失 CH₄ 分子的吸收参数,在 HITRAN 2012 以后的版本中该波段才增加了 CH₄ 的这些弱谱线的参数。



($T=200\text{ K}, P=1\ 100\ \text{hPa}, \text{CH}_4\ \text{abundance } U=0.28\ \text{atm cm}$)

图 2 CART1.0 和 CART2.0 计算的水平均匀路径 CH_4 的光学厚度

Fig.2 Horizontal optical depth of CH_4 calculated by CART1.0 and CART2.0



($H_1=0\ \text{km}, H_2=100\ \text{km}, \text{Zenith}=80^\circ, \text{US standard atmosphere}$)

图 3 CART 计算的整层大气 CH_4 的透过率

Fig.3 Slant path transmittance of whole atmospheric CH_4 calculated by CART1.0 and CART2.0

为了比较新版本增加的这些弱线对计算结果的影响,笔者分别用 CART1.0 和更新后的 CART2.0 软件计算了大气 CH_4 的透过率,计算条件为:美国标准大气,地面到大气顶,天顶角 80° (对应仰角 10° ,大气质量 $m \approx 5.8$,即大约穿过了 5.8 倍的地面垂直到大气顶的整层大气的路径),结果如图 3。可以看出: $1\sim 9\ 000\ \text{cm}^{-1}$ 范围, CART1.0 和 CART2.0 计算的大气 CH_4 的透过率相差不大,而 $9\ 500\sim 11\ 800\ \text{cm}^{-1}$ 波段有明显的差异。但是, $9\ 500\sim 11\ 800\ \text{cm}^{-1}$ 波段的大气吸收很少(注意图中的纵坐标下限为 0.98)不足 0.004,透过率大于 0.996,相对于水汽等气体在红外波段的吸收,甲烷在 $9\ 500\sim 11\ 800\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收可以忽略,就是说 CART 以前的版本计算宽波段的大气吸收精度

足够了。只是在某些吸收较弱的波段,新改进的 CART2 计算精度有一定的提高。

对于其他成分的大气成分类似,在更新的 CART2.0 中,大气吸收相对于 CART1.0 只在某些波段有微小的变化。

2.2 中高光谱分辨率计算模块

随着高光谱遥感技术和激光工程的发展,高光谱的大气传输模式在有些情况下有重要的应用,因此,发展高光谱分辨率的大气传输模式具有重要的应用价值。笔者在原有的 CART 的基础上,采用 2016 年版 HITRAN 数据库,研制了光谱分辨率为 $0.1\ \text{cm}^{-1}$ 的新的 CART2P1 计算模块。在公式 (1) 和 (2) 中,设定平均带宽为 $\Delta\nu$ 为 $0.1\ \text{cm}^{-1}$,重新计算拟合出一套吸收系数,研制新的光谱分辨率为 $0.1\ \text{cm}^{-1}$ 的大气分子吸收模块。在新的分辨率辐射传输计算中,因为大气分子连续吸收、大气气溶胶吸收和散射、分子散射、地表反射等参数随波长变化缓慢,可简单地认为在 $1\ \text{cm}^{-1}$ 间隔内恒定不变,因此,原先 CART 的这些参数的算法不变,可直接移植。至于大气多次散射的快速算法,算法依然不变,只是排序内的分子吸收计算点数是 CART1.0 的 10 倍,而调用 DISORT 计算波数点数不变,总的计算时间增加不多。

在更新的 CART 模式中,大气顶的太阳光谱辐照度采用光谱分辨率为 $0.1\ \text{cm}^{-1}$ 的新数据,它是由高分辨率地外太阳光谱数据经过平滑得到的。主要数据来自 <http://kurucz.harvard.edu/>,长波波段参考了 MODTRAN 大气顶的太阳光谱。

图 4 是分别用 CART2.0($1\ \text{cm}^{-1}$ 光谱分辨率)和 CART2P1($0.1\ \text{cm}^{-1}$ 光谱分辨率)计算的地面水平传输 $1\ \text{km}$ 不同光谱分辨率的大气透过率,为了清楚展示不同光谱分辨率的结果,图 4 只展示了 $2\ \mu\text{m}$ 附近 $20\ \text{cm}^{-1}$ 间隔的结果。可以看出: $0.1\ \text{cm}^{-1}$ 光谱分辨率的大气透过率谱可以清晰地分辨出大气分子主要吸收线的结构,而 $1\ \text{cm}^{-1}$ 光谱分辨率的大气透过率谱将这些吸收线的细节结构平滑了。

由于 CART2P1 占内存较多,目前 CART2P1 波长范围限定在红外波段 ($1\sim 10\ 000\ \text{cm}^{-1}$, 或 $1.0\sim 10\ 000\ \mu\text{m}$ 的范围内)。CART2.0 波长范围仍然是可见光到远红外波段 ($1\sim 25\ 000\ \text{cm}^{-1}$, 或 $0.4\sim 10\ 000\ \mu\text{m}$ 的范围内)。

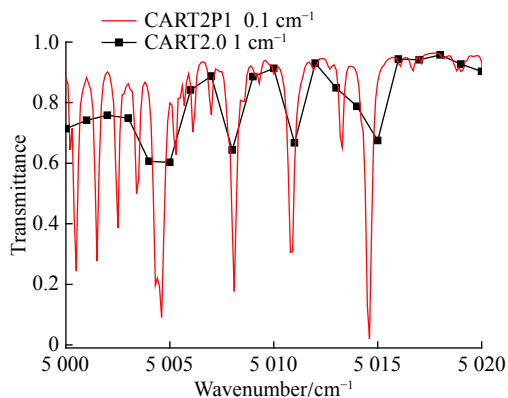


图 4 CART2 计算的 0.1 cm⁻¹ 和 1 cm⁻¹ 光谱分辨率的大气透过率
Fig.4 Atmospheric transmittance with spectral resolution of 1 cm⁻¹ and 0.1 cm⁻¹ by CART2

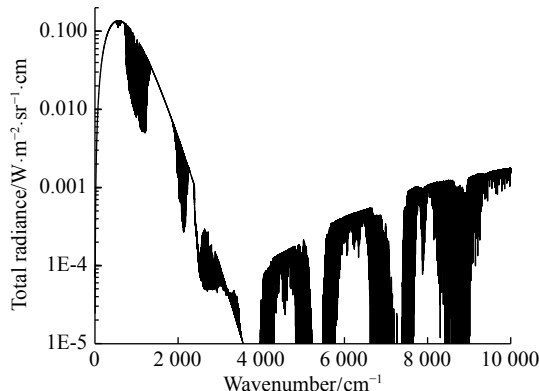
2.3 用户界面程序提供输入输出接口

提供了输入输出接口界面和一些应用实例, 简单易用。可以根据需要输入和选择大气模式、气溶胶模式、环境参数、观测路径、光谱范围、光谱平均宽度等, 并以绘图和数据形式显示计算结果。在新的版本中, 还增加了等波段间隔平均的功能, 可以分别以波数为单位和波长为单位, 给定步长间隔, 输出为步长间隔内的平均结果。当然, 步长间隔不能小于光谱分辨率 (1 cm⁻¹, CART2.0) 或 0.1 cm⁻¹(CART2P1)。

2.4 计算实例

通用大气辐射传输软件 CART 可用来快速计算空间任意两点之间的大气光谱透过率、大气和地表散射和反射的太阳辐射、地表和大气热辐射、太阳直射辐射等。图 5 为 CART2P1 计算的大气向下的背景辐射, 包括多次散射和大气热辐射。其中 2 000 cm⁻¹

以下 (5 μm 以上波长) 主要为大气的热辐射, 而 5 000 cm⁻¹ 以上 (2 μm 以下波长) 主要为大气散射的太阳辐射, 而在 2~5 μm 之间, 既有大气的热辐射, 也包括散射的太阳辐射的贡献。



(US standard atmospheric model, zenith:30°, rural aerosol, visibility 23 km)
图 5 CART 计算的大气向下的背景辐射 (包括多次散射和热辐射)
Fig.5 An example of calculated downward atmospheric background spectral radiance (including multiple scattering and thermal radiance) by CART

图 6 为 CART2P1 计算的在地面大气向下 (左) 和在大气顶地表和大气向上 (右) 的红外背景辐射。参考文献^[8]比较了在 800~1 500 cm⁻¹ 波段内, 用地基红外傅里叶变换光谱仪实际测量的 1 cm⁻¹ 光谱分辨率的大气光谱背景辐射, 除了少数点因为计算和软件的光谱分辨率的差别外, 计算值和测量值符合得非常好, 平均误差小于 0.8 K。因为光谱分辨率的提高, CART2P1 计算的大气背景辐射与 CART1.0 比较具有更丰富的大气辐射光谱细节。

图 7 为 CART2P1 计算的在地面和大气顶的太阳

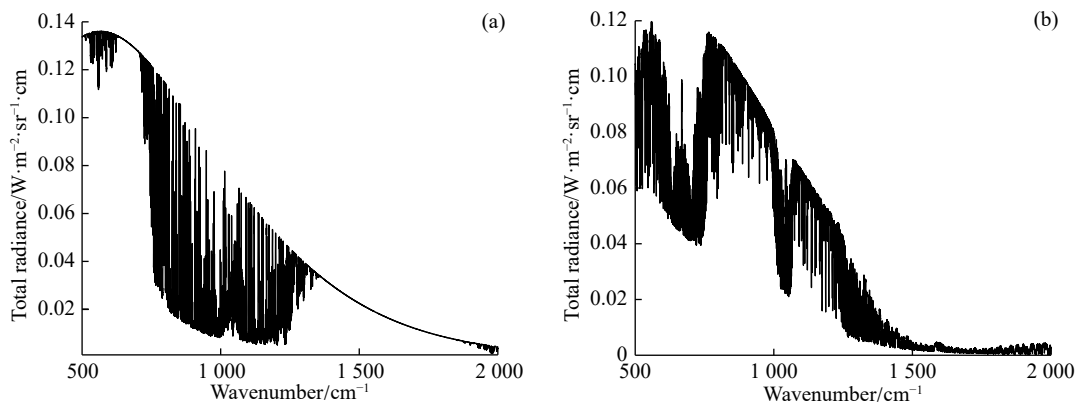


图 6 CAR2P1 计算的在地面 (左) 和大气顶 (右) 的背景热辐射
Fig.6 Background thermal radiance at the surface(left) and TOA upward(right) by CART2P1

直接辐照度。可以看出:在大气顶短波段有很多细密的太阳的弗朗禾费(Fraunhofer)线。经过大气后,到达地面的太阳辐射中,有很多波段被大气分子完全吸收。

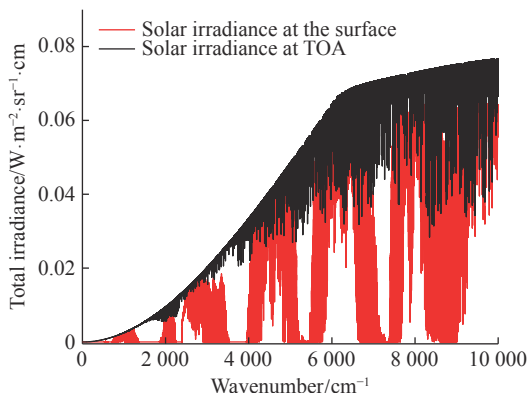
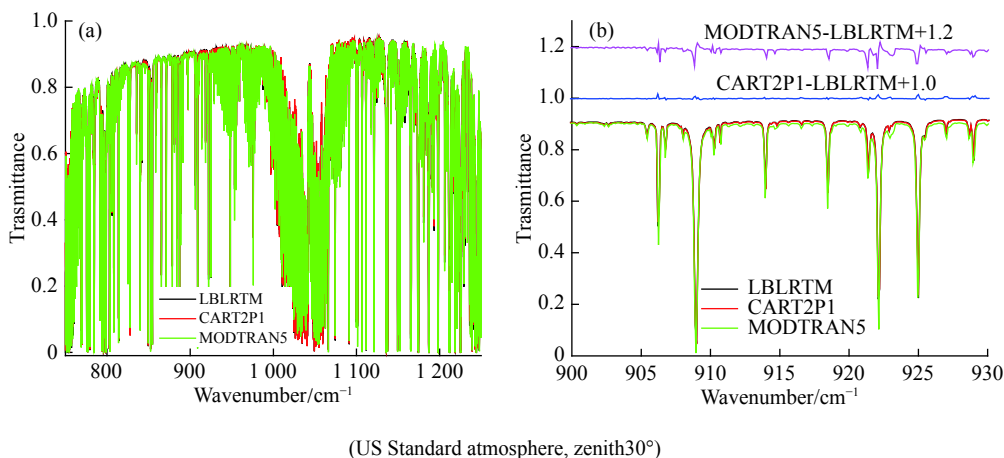


图 7 CART2P1 计算的在地面和大气顶的太阳直接辐照度

Fig.7 Solar direct irradiance at the surface and TOA by CART2P1

3 CART2 计算结果的比较

LBLRTM^[6] 用来精确计算大气分子吸收。在光



(US Standard atmosphere, zenith30°)

图 8 CART2P1, MODTRAN5 与 LBLRTM 计算的大气透过率的比较

Fig.8 Comparisons of calculated transmittance among CART2P1, MODTRAN5 and LBLRTM

限于篇幅,这里仅展示 CART2P1 中高分辨率大气吸收计算模块的精度,将在以后的文章中详细地比较 CART2P1 和 LBLRTM 大气分子吸收计算结果的差别。

4 CART2 计算与地基高分辨率大气光谱测量结果的对比

合肥西郊科学岛中国科学院安徽光学精密机械研究所实验综合观测场建设有地基高分辨率傅里叶

学工程中广泛使用美国空军研究实验室(AFRL)研制的低分辨率大气透过率计算程序 LOWTRAN^[9]和中分辨率大气透过率计算程序 MODTRAN 计算辐射大气传输。目前常用的 MODTRAN5^[10]的光谱分辨率是 0.2 cm^{-1} 。为了比较 CART2P1 的计算精度,笔者用精确的逐线积分法(LBLRTM)计算了地面到大气顶大气分子吸收的大气光谱透过率,并分别平滑到与 CART2P1 和 MODTRAN5 匹配的光谱分辨率 0.1 cm^{-1} 和 0.2 cm^{-1} 。计算中采用美国标准大气模式,分别用 CART2P1 和 MODTRAN5 计算了长波红外 $8\sim 13 \mu\text{m}$ 波段整层大气的透过率,比较 LBLRTM, MODTRAN5 和 CART2P1 的结果见图 8(a)。可见, CART 和 MODTRAN5 计算的大气光谱透过率与精确的 LBLRTM 方法都很一致,都能很好地模拟大气分子的吸收。为了更清楚显示结果,图 8(b)中,笔者仅显示了 30 cm^{-1} 间隔范围内的计算结果及其与 LBLRTM 的差,从中可以看出:这个波段 CART2P1 的大气分子吸收的计算精度明显高于 MODTRAN5。

变换光谱仪 IFS125HR,结合太阳跟踪系统获得地基高分辨率大气红外吸收光谱^[11],光谱分辨率优于 0.02 cm^{-1} ,测量地点经度: 117.170°E ,纬度: 31.904°N ,海拔 29 m 。测量时间为 2017 年 2 月 10 日。取离合肥不远安庆地区 1 月的平均大气模式,用 0.52 cm 水汽总量归一化得到水汽高度分布廓线。用 CART2P1 计算了大气顶到地面 $2.5 \mu\text{m}$ 附近 50 cm^{-1} 间隔的大气光谱透过率。把 IFS125HR 测量的经大气吸收的太阳高分辨率红外光谱平滑到 0.1 cm^{-1} 光谱分辨率,并把

该波段的最大值按计算的大气透过率的最大值归一化,结果见图 9。从图中可以看出:计算和测量的所有大气吸收线的峰谷位置都吻合得非常好,峰谷相对深度也很一致。经查,这个波段主要是水汽的吸收,4 028.1 和 4 042.7 cm^{-1} 附近的差别是太阳的 Fraunhofer 线造成的。总的说来,这个波段范围内 CART2P1 计算和测量结果吻合得非常好,说明 CART2P1 可以较好地模拟中高光谱分辨率的大气分子吸收。

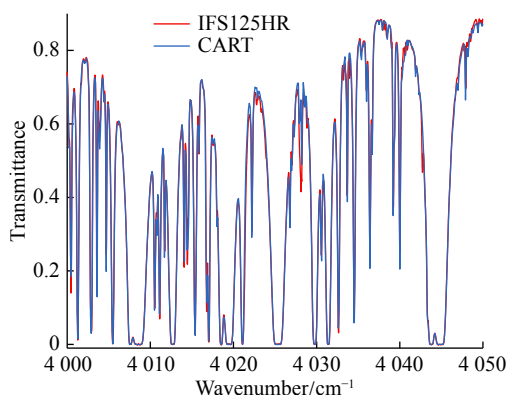


图 9 CART2P1 模拟计算结果与地基高分辨率傅里叶变换光谱仪实际测量结果的比较

Fig.9 Comparisons of the results between the observed high spectral resolution solar spectra by IFS125HR and calculated transmittance by CART2P1

5 结论

采用 HITRAN2016 数据库,更新了通用大气辐射传输计算软件 CART,增加了光谱分辨率为 0.1 cm^{-1} 的大气分子吸收计算模块,形成了版本 CART2。相对于 CART1.0,大气分子吸收考虑了更多的分子弱谱线的吸收,扩展了大气分子吸收的计算波段。 0.1 cm^{-1} 光谱分辨率的大气透过率和环境背景辐射可以分辨出多数分立的大气分子吸收谱线,可以在中高光谱分辨率的光学工程和有些激光工程的大气传输计算中具有重要的应用。

致谢 感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室的孙有文博士,为此论文提供了实际测量的地基高分辨率太阳红外光谱。

参考文献:

[1] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming. Combined

atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3360–3366. (in Chinese)

魏合理, 陈秀红, 戴聪明. 通用大气辐射传输软件(CART)及其在目标辐射特性测量中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3360–3366.

[2] 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(13): 8360–8370.

[3] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. 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, 等. 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.

[4] Chen Xiuhong, Wei Heli, Li Xuebin, et al. Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 183–189. (in Chinese)

陈秀红, 魏合理, 李学彬, 等. 可见光到远红外波段气溶胶衰减计算模式[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(2): 183–189.

[5] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2017, 203: 3–69.

[6] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, 91: 233–244.

[7] Chen Xiuhong, Wei Heli, Yang Ping, et al. An efficient method for computing atmospheric radiances in clear –sky and cloudy conditions [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2011, 112(1): 109–118.

[8] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming, et al. The ground-based measurements of Infrared atmospheric background spectral radiances [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 284–290. (in Chinese)

魏合理, 陈秀红, 戴聪明, 等. 地基大气背景红外光谱辐射特性测量[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 284–290.

[9] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Users Guide to LOWTRAN7[Z]. AFGL2TR 28820177, 1988.

[10] 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]//Proc of SPIE, 2005, 5655: 88–95.

[11] Tian Yuan, Sun Youwen, Xie Pinhua, et al. Observation of ambient CH_4 variations using ground-based high resolution Fourier transform solar spectrometry [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64: 070704. (in Chinese)

田园, 孙友文, 谢品华, 等. 地基高分辨率傅里叶变换红外光谱反演环境大气中的 CH_4 浓度变化[J]. *物理学报*, 2015, 64: 070704.