

# 辐射特性测量大气传输修正研究:大气传输修正系统

魏合理<sup>1,2</sup>, 戴聪明<sup>1</sup>

- (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. 中国科学技术大学 环境光学学院, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 大气传输修正是目标辐射特性测量的一个重要环节。介绍了研制的目标辐射特性测量大气传输修正系统和分辨率通用辐射大气传输计算软件(CART),展示了大气传输修正结果和外场实际水平距离测量结果的部分对比,定量评估了目标探测常用的中波和长波红外波段大气传输修正精度。

**关键词:** 大气传输修正系统; CART; 精度

中图分类号: P407.6 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)04-1019-06

## Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric transfer correction system

Wei Heli<sup>1,2</sup>, Dai Congming<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Atmospheric transfer correction is important to the measurement of target's radiation characteristic. Following the former paper, an atmospheric transfer correction system and the moderate-spectral-resolution combined atmospheric radiative transfer (CART) code were introduced. The comparisons of atmospheric correction and horizontal measurement results were presented. The precision of the atmospheric correction system on middle and long wavelength infrared was evaluated.

**Key words:** atmospheric transfer correction system; CART; precision

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(61077081); 国家高技术项目

作者简介: 魏合理(1965-), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要从事大气辐射传输研究、卷云辐射传输特性方面的研究。

Email: hlwei@aiofm.ac.cn

## 0 引言

在大气中进行的辐射特性测量,要获得目标本身的辐射特性就必须定量地扣除大气传输的影响。参考文献[1]分析了大气水汽含量和气溶胶是影响红外大气传输的重要参数,并且在大气中的时空变化非常大,在实际应用中需实际测量。为了定量获得目标辐射特性测量的大气传输修正特性,实时实地的大气参数探测、当地的大气参数模式和适当的辐射传输模式在目标辐射测量大气修正中起着重要的作用。

近年来,建立了目标辐射特性测量大气传输修正系统,研制了通用辐射大气传输软件(CART)<sup>[2-3]</sup>,根据当时实际测量的大气参数用 CART 软件计算得到光电设备波段的大气透过率,对测量结果进行大气修正,得到扣除大气影响的目标本征辐射特征。文中介绍了研制的目标辐射特性测量大气传输修正系统和和中分辨率通用辐射大气传输计算软件(CART),展示了大气传输修正结果和外场实际水平距离测量结果的部分对比,定量评估了目标探测常用的中波和长波红外波段大气传输修正精度。

## 1 目标辐射特性测量大气传输修正系统

### 1.1 大气传输修正系统

为了定量获得光电设备测量时刻的大气衰减效应,研制了一套包括大气光学参数实时测量系统、大气透过率计算软件及用于大气透过率计算的当地大气参数数据库模式在内的目标辐射特性测量大气传输修正系统。该系统根据包含斜距、高度角和方位角的目标位置信息和探测系统光谱响应函数,采用大气光学参数探测设备实时测量的大气光学参数,利用大气透过率计算软件计算测量设备各个波段的平均大气透过率,对测量的目标表观辐射进行定量大气传输修正,得到扣除大气影响的目标本征辐射特性参数。在窗口波段晴朗大气条件下,该系统得到的大气透过率的不确定度小于 15%。该套系统应用于空间目标红外辐射特性测量的大气影响修正。

图 1 为目标辐射特性测量大气传输修正系统原理框图。该系统的硬件部分包括大气水汽、温度廓线测量仪、测量大气气溶胶消光廓线的微脉冲激光雷达和测量地面温度、湿度、气压和能见度的地面大气

参数测量系统。根据参考文献[1]分析,在这套系统中仅实时观测影响大气传输的重要大气参数,包括大气水汽、温度和气溶胶消光廓线,地面大气温度、湿度、气压和能见度。采用多频段地基微波辐射计实时观测反演得到大气温度和水汽廓线。经检验大气水汽总量的测量误差小于 10%,对流层下部温度测量偏差小于 3 K。采用微脉冲雷达观测地面到 5 km 高度的气溶胶消光廓线。采用自动气象站观测地面温度、相对湿度和气压,采用能见度仪观测地面能见度。

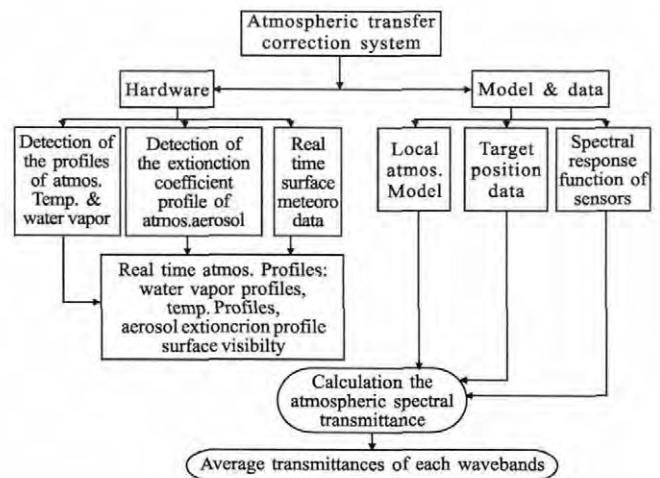


图 1 目标辐射特性测量大气传输修正系统原理框图

Fig.1 Elements graph of atmospheric transfer correction system in measurement radiance characteristic of target

用笔者研制的通用辐射大气传输计算软件 CART,调用硬件系统实时测量的大气水汽、温度、气溶胶消光廓线和地面大气温度、湿度、气压和能见度,以及当地的大气参数模式,按  $1\text{ cm}^{-1}$  的光谱分辨率计算目标在不同位置处到传感器的大气光谱透过率。再根据仪器各个波段的光谱响应函数得到仪器工作波段的平均大气透过率。

当地的大气参数模式是根据当地附件气象探空台站近 20 年的历史数据,统计平均得到逐日和逐月平均大气温度、湿度和气压廓线,再结合地面实际测量的数据和同纬度高层大气参数廓线,构建接近当时情况的近似的地面到大气顶(0~120 km 高度)大气参数廓线<sup>[4]</sup>,在超过实际测量的高度范围内或无法进行实际测量时,供 CART 在计算大气透过率和大气背景辐射时调用。大气微量气体成分(包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ )廓线采用同纬度标准大气模式。

## 1.2 通用辐射大气传输计算软件 CART

笔者研制了通用辐射大气传输计算软件(CART)来计算大气透过率背景辐射。在 CART 模式中,笔者提出了一个基于逐线积分拟合的中等分辨率(光谱分辨率  $1\text{ cm}^{-1}$ )的大气分子吸收透过率计算模型<sup>[5]</sup>,在保持逐线积分法计算的精度的同时,可快速计算各个波长处各种大气分子吸收的衰减;分子连续吸收采用 MT\_CKD1.2 方法计算;还提出了一个根据气溶胶种类(或气溶胶复折射率)、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 散射公式快速计算气溶胶衰减的模式<sup>[6]</sup>。其中近低层气溶胶高度分布可采用指数衰减(标高)模式、实际激光雷达测量或 MODTRAN 的依赖地面能见度的气溶胶高度分布模式。在考虑大气多次散射的背景辐射计算时,提出了采用分段拟合离散坐标法(DISORT)计算结果的方法建立多次散射快速计算模式<sup>[7]</sup>,该快速算法的计算误差(均方根误差)相对直接逐点调用 DISORT 可以达到 2%以内,而计算速度最快却快两百多倍。在 CART 中,还包括了大气和地表的热辐射、太阳直接辐照度的计算模式。除了直接采用 6 种标准大气模式外,在 CART 还统计了国内不同地区逐月平均的大气参数模式,可以根据具体情况,输入不同地方的大气模式,供计算时方便地调用。

根据上述模型,编制了实用的大气辐射传输软件 CART,编制了方便易用的 CART 界面输入输出菜单,包括大气模式的选择和输入、气溶胶模式(种类选择)及其有关参数(地面能见度、荣格指数、复折射率选择、气溶胶标高或高度分布廓线)的输入、太阳方位和观测空间几何位置的输入、环境参数(地表反照率、温度等)、光谱范围和仪器函数的输入、输出结果的查看绘图等。CART 的主要功能包括:大气水平和斜程光谱透过率计算、大气散射太阳辐射(包括单次散射和多次散射及地表反射)计算、大气热辐射(包括大气程辐射和地表热辐射)计算、太阳直接辐照度计算。光谱波段:  $1\sim 25\,000\text{ cm}^{-1}$ (0.4-远红外波段),光谱分辨率  $1\text{ cm}^{-1}$ 。

戴聪明等比较了 CART 计算的大气透过率与 LBLRTM 和 MODTRAN 的计算精度,发觉相对于精确的 LBLRTM, CART 计算大气透过率的精度略高于 MODTRAN<sup>[8]</sup>,散射辐射和大气热辐射计算精度与 MODTRAN 相当<sup>[8-9]</sup>。笔者曾在水平 1 000 m 的距离上用傅里叶变换红外光谱仪和高温黑体和平行光

管组成的系统实际测量红外大气光谱透过率,在 2~5  $\mu\text{m}$  波段,与用 CART 模式计算的大气光谱透过率均方根偏差小于 0.04<sup>[10]</sup>。图 2 是水平 1 km 距离上测量和根据实际大气参数用 CART 计算的大气光谱透过率的比较,两者吻合很好。

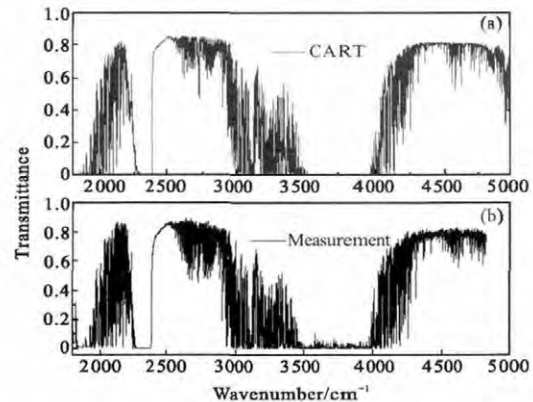


图 2 水平 1km 距离上 FTIR 测量和 CART 计算的大气光谱透过率的比较

Fig.2 Comparison of atmospheric spectral transmittance measured by FTIR and calculated by CART on 1km horizontal path

曾在地面用傅里叶变换红外光谱辐射计测量了天空红外背景光谱辐射,与 CART 计算的大气背景辐射相比<sup>[11]</sup>,两者平均偏差仅 0.8 K。在第一次北极云实验(FIRE-ACE)<sup>[16]</sup>中,在 20 km 高度的 ER2 飞机上用高分辨率干涉仪(HIS)测量了地表和大气向上的背景辐射。HIS 的光谱分辨率大约为  $1\text{ cm}^{-1}$  与 CART 软件计算的光谱分辨率相近。根据当时记录的大气参数廓线,用 CART 计算了地表和大气向上背景辐射,并与测量值比较(见图 3)。在该波段范围内的测量值和计算值的均方根差为 1.1 K,可见测量值和根据实际大气参数计算的大气背景辐射值非常一致。

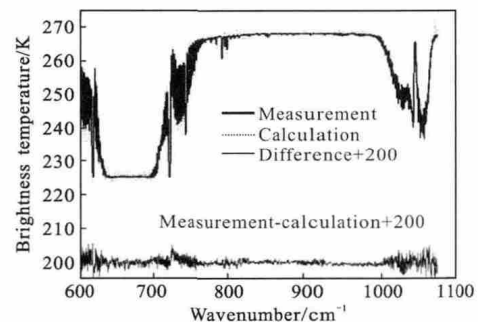


图 3 机载 HIS 测量的大气背景辐射与 CART 计算结果的比较  
Fig.3 Comparison of atmospheric background radiance measured by HIS and calculated by CART



### 1.3 大气传输修正精度分析

大气修正误差主要来源于光波传输路径的大气参数的测量误差。根据目前的大气参数探测水平,我们估计大气参数的测量误差:根据上述分析,用实时的探空廓线、微波辐射计测量的水汽廓线或太阳辐射计实时测量水汽含量,整层大气的水汽测量误差小于 10%。而采用历史探空资料模式和近地面大气参数构建获得的水汽廓线,水汽总量的误差一般在 20%左右,最大不超过 30%。CO<sub>2</sub> 含量年变化一般不超过 10 ppm,误差小于 3%,考虑季节变化,采用同纬度的平均模式,误差最大不超过 10%;其他微量气体成分误差估计 10%。气溶胶消光廓线:用 Mie 散射激光雷达测量气溶胶消光廓线的精度估计在 20%以内。地面能见度测量误差一般误差一般在 10%以内。采用探空或模式大气温度廓线误差小于 3 K。

笔者以西北某地区(海拔 1.49 km)的平均大气模式,分析常用的中波和长波波段大气修正精度。假设目标在大气外,用沙漠型气溶胶模式,计算该地区历年平均大气,晴天,地面能见度为 23 km 时。分两种情况:(1) 以历史探空数据廓线模式和近地面实测数据,水汽总量误差 30%,气溶胶消光误差 30%,微量气体误差 10%。(2) 采用微波辐射计或气象探空实测温度和水汽廓线水汽测量误差 10%,采用激光雷达测量大气气溶胶消光廓线误差 20%。水汽、大气气溶胶和各种微量气体成分含量变化在一定范围引起的中波 3~5 μm 波段和长波 8~12 μm 两个波段的平均大气透过率的相对变化作为各个参数的测量精度引起的大气透过率修正误差,假设大气水汽总量变化引起的大气透过率误差  $\epsilon_{a1}$ ,大气气溶胶消光变化引起的误差  $\epsilon_{a2}$ 、大气温度廓线变化引起的误差  $\epsilon_{a3}$ 、CO<sub>2</sub> 气体含量变化引起的误差  $\epsilon_{a4}$ 、O<sub>3</sub> 气体含量变化引起的误差  $\epsilon_{a5}$ 、其他微量气体含量变化引起的误差  $\epsilon_{a6}$ 、和计算误差  $\epsilon_{a7}$ (将模式计算误差固定为 3%)。大气透过率总的修正误差为的平方和的根,即:

$$\epsilon_T = \sqrt{\epsilon_{a1}^2 + \epsilon_{a2}^2 + \epsilon_{a3}^2 + \epsilon_{a4}^2 + \epsilon_{a5}^2 + \epsilon_{a6}^2 + \epsilon_{a7}^2}$$

名义上中波 3~5 μm 和长波 8~12 μm 两个波段的仪器响应函数实际上有一定的变化。图 4 为用西北地区平均大气模式计算的整层大气光谱透过率和两个常用的中波 3~5 μm 和长波 8~12 μm 波段的传感器响应函数。计算的大气透过率和仪器响应函数卷积得到这两个波段的平均大气透过率。计算分析了三个天顶角下上述大气参数误差范围内引起的大

气平均透过率变化如表 1 所示。从中可以看出:以历史探空数据廓线模式及近地面实测数据,对该地区平均大气模式,在仰角大于 10°时,大气修正误差为 13.18%,小于 15%;而采用大气温、湿度廓线测量和激光雷达气溶胶消光测量时,大气修正误差为 6.63%,小于 10%。当然,该大气透过率修正误差与很多因素有关,特别是大气透过率本身。在低能见度、高水汽含量、低仰角的低大气透过率的情况下大气修正误差增大,反之大气修正误差减小。

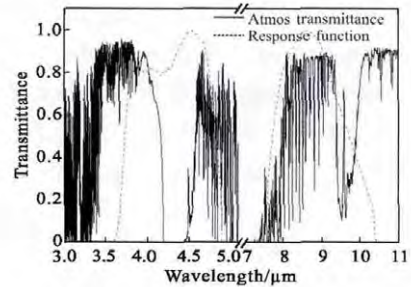


图 4 西北地区平均大气模式计算的整层大气光谱透过率和两个波段的响应函数

Fig.4 Atmospheric spectral transmittance calculated by model on North-west region and response functions on two bands

表 1 中波 (3~5 mm) 和长波 (8~12 mm) 两个波段大气透过率修正误差

Tab.1 Error of atmospheric transmittance correction on 3~5 mm and 8~12 mm band

Observation angle / (°)	Band / μm	$\epsilon_{a1}$	$\epsilon_{a2}$	$\epsilon_{a3}$	$\epsilon_{a4}$	$\epsilon_{a5}$	$\epsilon_{a6}$	Total error / %
		$\Delta_{H_2O}30\%$	$\Delta_{A}30\%$	$\Delta_{R}3\text{ K}$	$\Delta_{CO_2}30\%$	$\Delta_{O_3}30\%$	$\Delta_{M}30\%$	
90	3-5	1.39	0.53	0.05	0.33	0.14	0.76	3.45
	8-12	3.23	1.10	0.08	0.06	0.54	0.35	4.59
30	3-5	2.13	1.06	0.10	0.42	0.19	0.93	3.97
	8-12	5.05	2.24	0.09	0.11	0.70	0.44	6.34
10	3-5	3.86	3.10	0.16	0.57	0.25	1.43	6.00
	8-12	10.90	6.69	0.10	0.30	0.75	0.71	13.18
Observation angle / (°)	Band / μm	$\epsilon_{a1}$	$\epsilon_{a2}$	$\epsilon_{a3}$	$\epsilon_{a4}$	$\epsilon_{a5}$	$\epsilon_{a6}$	Total error / %
		$\Delta_{H_2O}30\%$	$\Delta_{A}30\%$	$\Delta_{R}3\text{ K}$	$\Delta_{CO_2}30\%$	$\Delta_{O_3}30\%$	$\Delta_{M}30\%$	
90	3-5	0.48	0.35	0.05	0.33	0.14	0.76	3.17
	8-12	1.09	0.74	0.08	0.06	0.54	0.35	3.34
30	3-5	0.74	0.71	0.10	0.42	0.19	0.93	3.34
	8-12	1.69	1.50	0.09	0.11	0.70	0.44	3.85
10	3-5	1.35	2.08	0.16	0.57	0.25	1.43	4.20
	8-12	3.65	4.52	0.10	0.30	0.75	0.71	6.63

### 1.4 大气修正精度实际测量验证

双波段红外热像仪广泛地用于目标的辐射量和

温度的遥测。用标准面源黑体作为光源,先在近距离对热像仪进行标定后,在一定的距离上测量相同黑体的不同温度的辐射量,可以较准确地推算大气透过率。试验前先用一均匀的面源黑体做热像仪各像元非均匀校正。因为在远距离和近距离都采用的是同一黑体,因此,黑体辐射源本身的不确定度和非线性对大气透过率测量结果影响较小。用大气修正系统实际测量地面大气参数计算得到该波段的大气透过率,与热像仪测量的大气透过率比较,初步验证大气修正精度。表2和表3是在外场1000m的距离上,实际测量的3种黑体温度的表观温度。测量时地面大气温度31.9℃,相对湿度10.5%,能见度35.8km。计算得到中波的大气透过率0.679,长波的大气透过率0.844。经过大气修正后的测量温度和实际测量的大气透过率见表2和表3。除了中波在160℃饱和外,中波和长波水平近距离大气透过率修正误差都在5%以内。

表2 中波(3~5 μm)测量的黑体温度和大气修正误差

**Tab.2 Detected black body temperature and atmospheric correction error on 3-5 μm band**

Setting temp /℃	Apparent calculated atmos/℃	Calculation of atmospheric transmittance	After atmospheric correction of temperature/℃	Corrected measured atmospheric transmittance	Error of atmospheric transmittance
80.0	65	0.679	81	0.661	2.7%
120.0	99	0.679	118	0.707	-4.2%
160.0	Saturation	0.679	-	-	-

表3 长波(8~12 μm)测量的黑体温度和大气修正误差

**Tab.3 Detected black body temperature and atmospheric correction error on 8-12 μm band**

Setting temp /℃	Apparent calculated atmos/℃	Calculation of atmospheric transmittance	After atmospheric correction of temperature/℃	Corrected measured atmospheric transmittance	Error of atmospheric transmittance
80.0	71	0.844	83	0.836	-1.0%
120.0	106	0.844	121	0.836	-1.0%
160.0	139	0.844	157	0.852	0.97%

## 2 结论

在目标红外辐射特性测量时,大气传输修正是必要的环节。研制了目标辐射特性测量大气传输修正系统和通用辐射大气传输计算软件CART,根据实时探测的影响红外辐射传输重要的大气参数,计算得到测量系统波段的大气透过率,对测量结果进行大气修正,得到扣除大气影响的目标的本征辐射特征。分析和部分实际测量验证表明:对西北地区晴天,在仰角大于10°时常用的中波和长波波段,大气修正不确定度小于15%。

## 参考文献:

- [1] Wei Heli, Dai Congming. The research of atmospheric transfer correction in radiance measurement -Part 1: Atmospheric transfer correction system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 884-890. (in Chinese)  
魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 1. 大气辐射传输模式和关键大气参数分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 884-890.
- [2] Wei Heli, Chen Xiuhong, Dai Congming. Combined atmospheric radiative transfer (CART) model and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3060-3066. (in Chinese)  
魏合理, 陈秀红, 戴聪明. 通用大气辐射传输软件(CART)及其应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3060-3066.
- [3] 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.
- [4] Qin Qibing, Wei Heli. Construction of real-time atmospheric parameter profiles based on average radiosonde profiles and surface meteorological datas [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(3): 161-168. (in Chinese)  
秦琦冰, 魏合理. 基于平均探空廓线和地表实测数据构建大气参数廓线的方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(3): 161-168.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of atmospheric molecular absorption and thermal radiance calculated by combined atmospheric radiance transfer(CART) code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 174–180. (in Chinese)  
戴聪明, 魏合理, 陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)分子吸收和热辐射模块计算精度验证 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 174–180.
- [9] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of atmospheric scattering radiance calculated by combined atmospheric radiance transfer(CART) code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1575–1581. (in Chinese)  
戴聪明, 魏合理, 陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)大气散射辐射计算精度验证 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1575–1581.
- [10] Chen Xiuhong, Wei Heli, Lv Weiyi, et al. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 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] 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.