

辐射特性测量大气传输修正研究:大气辐射传输模式和关键大气参数分析

魏合理^{1,2}, 戴聪明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. 中国科学技术大学 环境光学学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 工作于大气中的光电测量(或遥感)设备接收的目标辐射信号受大气衰减和大气背景辐射影响。大气传输修正是目标辐射特性测量的一个重要环节。介绍了目前国际上实用的大气辐射传输计算模式及影响大气传输的重要大气光学参数的探测方法。对影响红外波段大气传输的重要大气光学参数作了分析,论证了辐射测量大气传输修正系统必须测量的大气参数。

关键词: 大气传输修正; 大气辐射传输模式; 大气参数; 测量

中图分类号: P407.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0884-07

Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters

Wei Heli^{1,2}, Dai Congming¹

(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: The signal of a target measured by electro-optics detector is attenuated by the atmosphere and affected by atmospheric background radiance. Atmospheric transfer correction is important to the measurement of target's radiation characteristic. The commonly-used atmospheric radiative transfer models and the detecting methods of important atmospheric optics parameters affecting atmospheric radiative transfer were introduced. The atmospheric parameters affecting infrared radiative transfer were analyzed, the analyzed results indict those key atmospheric optics parameters must be measured in the atmospheric transfer correction system.

Key words: atmospheric transfer correction; atmospheric radiative transfer model; atmospheric parameter; measurement.

收稿日期:2013-07-05; 修订日期:2013-08-03

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,研究员,博士生导师,博士,现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

工作于大气中的光电测量(或遥感)设备接收的来自目标的辐射信号是经过大气调制的,该信号即包括经过大气传输衰减后的目标信号,也包括大气背景辐射(大气和地表散射的太阳辐射及其热辐射)。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。辐射大气传输研究的主要目的就是为定量地获得光辐射经过大气的传输特性。

目标辐射测量大气传输修正目前有实际测量法和用实际测量的大气参数的大气辐射传输模式算法。实际测量法需要有目标附近(或大气外)已知的辐射源,如在同一平台上放置一参考黑体,测量已知参考辐射源的辐射可以扣除大气传输的影响^[1]。但绝大多数情况无法在目标附近放置已知辐射的参考光源。因此,一般采用辐射传输模式算法进行大气修正,即根据实际观测的大气参数结合大气辐射传输模式,定量获得光电设备工作波段的大气传输特性和大气背景辐射特性。大气传输修正是目标辐射特性测量的一个重要环节,其修正精度直接影响目标辐射特性的测量精度。

近年来笔者所在课题组研制了通用辐射大气传输软件(CART)^[2-3],建立了目标辐射特性测量大气修正系统,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。文中简述笔者在目标辐射特性测量的大气传输修正研究进展。文中是第一部分,主要介绍目前国际上实用的大气辐射传输计算模式及影响大气传输的重要大气光学参数的探测方法。对影响红外波段大气传输的重要大气光学参数作分析,论证了辐射测量大气传输修正系统必须关注的重要的大气参数。

1 大气辐射传输模式和计算软件

大气是一个非常复杂的系统,在不同的地区、环境、季节等条件下其差别非常大,导致光在大气中的传输有显著不同。自上个世纪四十年代开始,红外辐射大气传输的研究得到了长足的发展,主要表现在大气分子吸收的理论和实验的进步,集全世界分子光谱学家的努力,目前已公开发布了7版高分辨率

大气分子吸收数据库 HITRAN (High-resolution TRANsmiission molecular absorption database,1986-2012版)^[4],分子吸收线参数已日臻精确,据此可较准确地计算大气分子的吸收(包括线吸收和连续吸收);随着气溶胶的大量观测,已建立若干气溶胶模式。应对各种需求,目前国际上已建立了多种大气辐射传输计算模式和软件。根据实际观测的大气参数,使用这些辐射传输模式可以定量地计算光电设备工作波段的大气传输特性和大气背景辐射特性。该节主要介绍与大气透过率和背景辐射计算有关的高光谱分辨率逐线积分法和工程上常用的低、中分辨率大气透过率计算模式和软件。

1.1 逐线积分大气分子吸收计算模式(LBLRTM)和快速大气信息程序 FASCODE

逐线积分法是计算大气气体分子吸收最精确的方法,即在不同高度采用不同的吸收线型逐条计入对某频率处有贡献的所有大气气体分子吸收谱线的贡献,累加得到该频率处大气分子的吸收。LBLRTM (line-by-line radiative transfer model)是国际上公认的精确逐线积分计算程序^[5],是由美国大气和环境研究公司自20世纪80年代开始发展起来的一种高效、精确的辐射传输算法。它以高分辨率、高精度地计算大气光谱透过率、大气热辐射,光谱范围覆盖紫外到亚毫米波段。LBLRTM源程序可以从<http://rtweb.aer.com>网站上下载,目前最新(2013年)的版本为Ver12.2,并在不断修改和更新中。作者只推荐在UNIX,LINUX,SOLARIS,OS X和IRS X等平台上运行,源程序中包括了这些操作系统下的版本。在这些版本中没有能够在PC机操作系统上运行的版本。作者声称不正式地支持在Windows环境下运行。随着计算机技术的飞速发展,PC机的计算能力已能与昔日的小型甚至中型计算机相媲美,并且拥有广大的Windows操作系统用户。笔者等曾将从该软件工作站移植到PC机上^[6],供相关人员使用。

LBLRTM本身的计算精度可达0.5%,其计算误差主要来源于大气吸收线参数的不确定性。LBLRTM适用于很窄光谱波段的大气分子吸收计算。对于宽波段的实际工程应用,因为吸收线密集,即使在 0.01 cm^{-1} 间隔内有时也需分成几十个间隔,每个计算点需计及邻近有影响的几百到上千甚至更多条谱线的贡献。除了需考虑每条吸收线的参

数(谱线位置、线型、强度、半宽度等)随大气环境参数(温度、气压等)的变化,还需考虑不同吸收气体含量的路径变化,计算量十分巨大,不满足工程上对计算速度的要求。因此,对于中低光谱分辨率的大气透过率计算,业界发展了许多工程上常用大气辐射传输模式,比如带模式、K 分布、经验公式等的快速大气分子吸收计算方法,如低分辨率大气透过率计算软件 LOWTRAN^[7]和中分辨率大气透过率计算软件 MODTRAN^[8],以及笔者所在课题组研制的通用大气辐射传输软件(CART)^[2-3]等。这些计算大气辐射传输的工程应用软件在各自的领域有不同的应用,其大气分子吸收部分的计算精度一般都是以 LBLRTM 的计算结果作为基准来校验的。

FASCOD^[9]是快速大气信息程序(Fast Atmospheric Signature CODE)的简称,是一个以逐线积分法精确计算大气透过率和背景辐射的软件。它最先由美国空军地球物理实验室(AFGL)提供。鉴于逐线积分法计算量十分巨大,AFGL 提出一种把洛伦兹(Lorentz)线型函数分解成容易计算且计算效率很高的 4 个子函数,在基本保持计算精度的情况下,计算速度提高 16~100 倍,这是 FASCOD 的核心所在。FASCOD 读入高分辨率大气分子吸收数据库 HITRAN^[5]中的各种大气分子吸收线参数,采用上述快速的逐线积分法计,以高光谱分辨率计算紫外、可见光、红外到微波波段(0~50 000 cm^{-1})的大气透过率和背景辐射,并且考虑了非局地热力平衡状态的影响。

1.2 LOWTRAN 和 MODTRAN

在中低分辨率的大气透过率计算模式研究中,经过几十年的大气参数测量和数据积累分析,AFGL 于上个世纪 70 年代开始开发低分辨率大气透过率计算软件 LOWTRAN^[7](最后的版本为 1989 年的 LOWTRAN7)。九十年代后升级为中分辨率大气透过率计算程序 MODTRAN,并根据最新资料不断升级,最新版本为 MODTRAN5^[8]。

LOWTRAN 采用单参数带模式计算大气透过率及背景辐射,其中 LOWTRAN7 的带模式经过逐线积分的 FASCOD 程序校验。LOWTRAN 光谱分辨率为 20 cm^{-1} ,满足低光谱分辨率的要求,程序考虑了大气分子连续吸收,大气分子、气溶胶、云、雨的散射和吸收,地球曲率及折射对路径及吸收物质的影响。内置了 6 种标准大气模式(热带、中纬度夏季和

冬季、亚北极夏季和冬季以及 1976 年美国标准大气模式),在近地面有 7 种气溶胶模式(乡村型、城市型、海洋型、沙漠型、海军海洋型、对流层型、辐射雾和对流雾型)可以选用。可以用来计算 $0.2 \mu\text{m}$ ~远红外到微波波段($0\sim 50\,000 \text{ cm}^{-1}$)的大气透过率和背景辐射。

MODTRAN 的气溶胶模式与 LOWTRAN 相同,采用新的中分辨率大气分子吸收快速算法,MODTRAN4 以前的版本光谱分辨率为 2 cm^{-1} ,MODTRAN5 的版本中可达到 0.1 cm^{-1} ,但在紫外和可见光波段仍保持 20 cm^{-1} 的光谱分辨率,满足工程上从低到中高光谱分辨率的要求。MODTRAN 是目前最完整的一种计算大气光谱透过率和背景辐射的软件,在光学工程中得到广泛的应用。

国内在目标辐射测量大气传输修正时,早期计算大气透过率的方法主要是采用查表法。即从国外有关的光学手册中查表得到所关心波段的大气透过率。这种方法对大气传输模型做了大量简化,精度较差,现在已经很少使用。后来一般是采用 LOWTRAN 或 MODTRAN 计算软件和相近地域的标准大气模式,或依据 LOWTRAN、MODTRAN 模式拟合得到经验公式法计算得到大气透过率。由于现有经验公式未能综合考虑大气衰减的精细光谱变化以及大气参数的变化,在实际应用中,用标准大气模式和经验方法得到的大气透过率精度不高。

自上个世纪 90 年代后,替代 LOWTRAN,MODTRAN 在光学工程中有着广泛的应用。MODTRAN 计算大气透过率本身的计算精度一般能优于 10%。但由于有些重要大气参数的廓线分布不能实时探测或探测精度不够,只能采用标准大气模式或根据地表的常规地面大气参数来推算,大气透过率的修正精度不高,笔者的分析表明^[10]:采用相近地域的标准大气模式,在我国西北地区、沿海地区和内陆地区,中波红外 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 和长波红外 $8\sim 12 \mu\text{m}$,月平均大气透过率大气修正误差可以超过 50%。因此,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。

2 影响大气传输的重要大气参数及其探测研究

为了定量地获得大气传输特性,在该节中分析

影响大气传输的重要大气参数,并对其观测方法做简单介绍。

2.1 影响红外大气传输的重要大气参数分析

图1是用CART软件^[2-3]计算的按合肥地区平均大气、中等晴朗天气(能见度23 km)仰角30°、地面到大气顶大气各种分子的吸收和水汽的连续吸收、分子散射和气溶胶消光的大气透过率,光谱范围0.4~15 μm ,光谱分辨率 1 cm^{-1} 。从中可以看出上述每种大气成分的光谱吸收特征和波段范围。

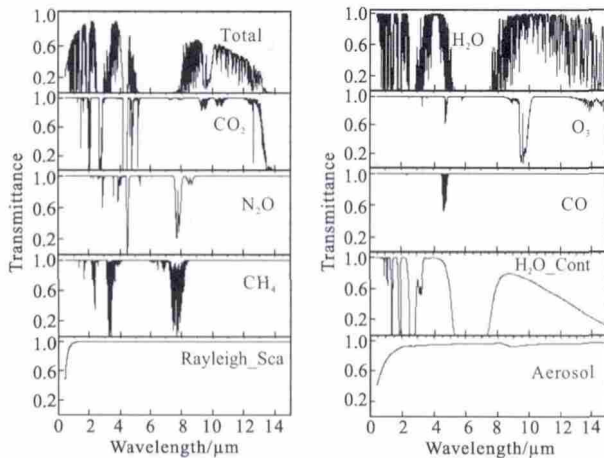


图1 大气主要吸收气体成分的光谱透过率

Fig.1 Spectral transmittance of major atmospheric absorption molecular

从图1中可以看出水汽分子线吸收和水汽连续吸收几乎覆盖整个红外波段,即使通常所指的大气窗口波段也受到水汽的影响。当然,如果用很高的光谱分辨率可能找到受水汽影响较小的适合激光传输的微“窗口”波段。二氧化碳和其它4种微量气体成分(O_3 、 N_2O 、 CH_4 和 CO)在某些特定波段有较强的吸收。大气分子散射(也称Rayleigh散射)只在波长小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时才显示出作用,且波长越短起的作用越大。气溶胶衰减遍及所有波段,波长越短衰减越大。

表1列出了常用的1~3、3~5和8~12 μm 大气窗口波段各主要大气成分引起的大气透过率。从中可以看出:在短波1~3 μm 波段,影响大气衰减重要的因子为水汽和气溶胶;中波3~5 μm 波段,影响大气衰减重要的因子为水汽、二氧化碳及其它微量气体成分(N_2O 和 CH_4)及气溶胶;长波8~12 μm 波段,影响大气衰减重要的因子为水汽、臭氧和气溶胶。

表1 不同大气成分在三个大气窗口波段的平均大气透过率

Tab.1 Atmospheric average transmittance of different species on three atmospheric bands

Wavebands/ μm	1-3	3-5	8-12
Total	0.445	0.326	0.432
H_2O	0.574	0.617	0.809
CO_2	0.937	0.851	0.979
O_3	1.000	0.986	0.873
N_2O	0.997	0.934	0.988
CO	1.000	0.988	1.000
CH_4	0.991	0.934	0.982
$\text{H}_2\text{O}_{\text{cont}}$	0.753	0.867	0.697
M_{Sca}	0.995	1.000	1.000
Aero	0.858	0.950	0.954

从上面分析可以看出:水汽含量是红外波段影响大气透过率最重要的因子,并且同一个地区水汽含量在不同季节存在很大的变化,同一季节水汽含量的统计方差有可能超过其平均值。因此,在红外大气传输计算时水汽含量及其高度分布是首先要考虑的大气参数。其次是气溶胶的消光。气溶胶是大气中的悬浮颗粒,其含量在大气中的时空变化很大。全面描述气溶胶的衰减特征参数包括气溶胶粒子的浓度和尺度谱分布、复折射率及其波长分布。一般来说假定气溶胶粒子的形状为球形。在近地面用能见度近似地表征气溶胶在可见光波段的衰减。

大气微量气体成分(包括 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、 N_2O 、 CO)尽管在某些波段有重要的影响,但其含量在一年内的变化范围有限,用同纬度的平均大气模式中微量气体成分含量分布廓线的在宽波段平均大气透过率计算中不会产生很大的误差。另外,大气分子的吸收截面与温度、气压密切相关,同样吸收物质的含量在

不同的气压、温度下产生的吸收是不一样的,因此需要这些大气成分含量的高度分布廓线而不仅仅是吸收气体总量。同时,大气温度廓线分布在大气分子吸收计算中也起重要作用。

2.2 重要大气参数探测方法

以上分析了影响红外大气传输并且时空变化较大的重要大气参数包括水汽含量、气溶胶消光。该节简单介绍这两种大气参数的测量方法。

(1) 大气水汽廓线探测方法

(a) 气象探空法:传统的大气温度、湿度和气压廓线的探测方法是采用无线电探空气球的直接测量方法。该方法目前被认为是测量大气水汽和温度最精确的方法,其水汽廓线测量精度可达到5%左右。但在测量的时间分辨率和实时性、测量路径不受控制等方面不能满足某些情况的需要。

(b) 遥感方法:目前被动遥感大气水汽和温度的方法有观测大气红外高分辨率发射背景辐射的红外光谱反演法、测量多通道微波大气背景辐射反演大气温度和湿度廓线的微波辐射反演法。图2为笔者等在合肥地区用多通道微波辐射计(MWP)反演的水汽密度廓线与无线电探空测量结果的比较。这些方法实时性好,能得到较高精度的水汽总量。但测量温度和湿度的高度分辨率和测量高度方面受到一定的限制。主动遥感法采用拉曼激光雷达测量温度和水汽高度分布廓线,测量精度也较高,空间分辨率高。图3为笔者用Raman激光雷达夜晚探测的水汽混合比垂直廓线及其与探空测量的比较,激光雷达能以更高的空间分辨率和时间分辨率揭示水汽廓线的变化。但设备比较昂贵,使用和维护代价较高。

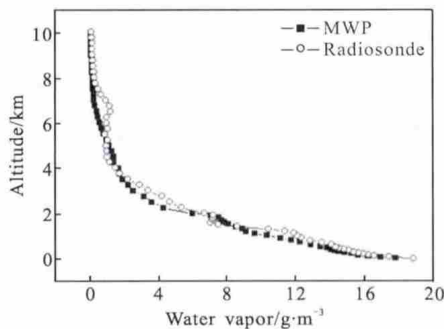


图2 微波辐射计(MWP)反演的大气水汽密度与无线电探空结果的比较

Fig.2 Comparison of atmospheric water density detected by MWP and radiosonde

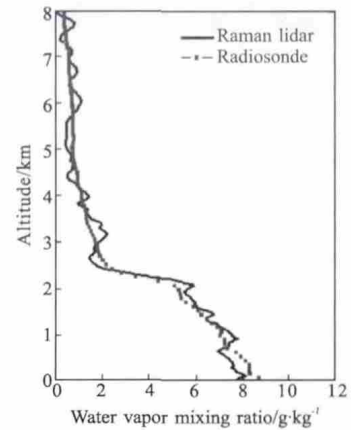


图3 Raman激光雷达探测的水汽混合比垂直廓线及其与无线电探空的比较

Fig.3 Comparison of water vapor mixing rate profile measured by Raman lidar and radiosonde

另外,地基太阳光度计以太阳做光源,采用940nm波段水汽的差分吸收来遥感整层大气水汽总量^[11-12]。图4是合肥地区2008年10月~2009年4月半年期间晴天太阳光度计和微波辐射计测量的整层大气水汽总量的对比,一致性较好,平均偏差不大于10%。用地基遥感法实时反演水汽总量的误差一般能达到小于10%的精度,因此在红外大气传输修正中得到应用。

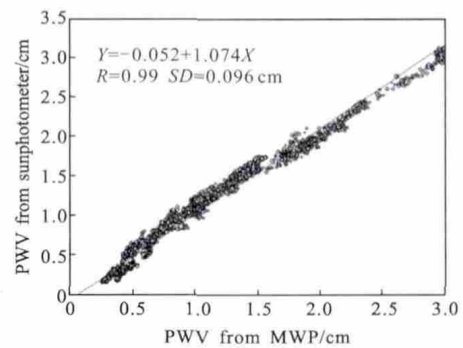


图4 太阳光度计遥测的大气水汽总量与地基微波辐射计测量结果的比较

Fig.4 Comparison of the precipitable water vapor measured by sun-photometer and the ground microwave radiometer

(c) 地面常规气象参数测量+历史探空资料:很多情况下无法实际测量当时、当地的大气温湿度廓线。气象部门每天在不间断地对大气进行观测,积累了大量的观测数据,包括地面大气参数、高空大气参数廓线和卫星遥感的大气参数。因此,结合不同地点历史上多年探空资料和实时的地面常规气象参数,

构建近似实时的大气参数廓线,在一定得精度范围内有重要的应用。笔者曾根据我国若干个探空站点的气象探空资料得到20年的历史温度、气压、水汽密度平均模式廓线,结合实时测量的地表大气参数,得到近似的实时的地面到30 km的温度廓线、地面到12 km高度的水汽密度廓线^[13]。该方法得到的水汽总量误差在20%以内,温度在对流层小于2.5 K,比用同纬度标准大气模式廓线的精度有很大提高。

(2) 大气气溶胶消光廓线测量

采用激光雷达测量气溶胶粒子的后向回波信号反演得到大气气溶胶粒子的消光系数高度分布廓线是目前测量大气气溶胶消光廓线可靠的方法。常用的波长是532 nm和1 064 nm以及其它少数几个波长,得到的气溶胶消光廓线的精度大约为20%左右。图5为激光雷达观测的532 nm和1 064 nm大气气溶胶高度分布廓线。532 nm的消光系数显然大于1 064 nm。

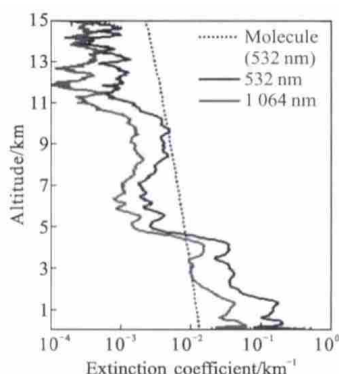


图5 米散射激光雷达测量的气溶胶消光廓线

Fig.5 Extinction profile of aerosol measured by Mie-scattering lidar

多波段太阳光度计跟踪太阳,测量不同天顶角下的太阳辐射强度,用Langly-Plot方法定标,可以以较高的精度得到整层大气气溶胶的光学厚度。目前可用的波段包括可见光到近红外的400 nm、500 nm、610 nm、670 nm、780 nm、860 nm、940 nm和1 050 nm,带宽10 nm。有些太阳辐射计还可以扩展到红外1.63 μm 和2.2 μm 波段。经过精确定标,这些波段的透过率测量误差小于5%。利用测量的各个波段的光学厚度随波长的变化关系,可以粗略地得到气溶胶粒子谱分布的信息(Anstrong指数或荣格指数)。图6为太阳辐射计测量的8个波段气溶胶光学厚度在一天中的变化,其中940 nm是测量的大气光学厚度扣除水汽衰减的光学厚度后的值。

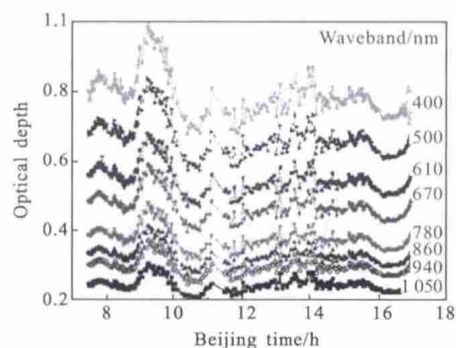


图6 太阳辐射计测量的8个波段气溶胶光学厚度在一天中的变化

Fig.6 Variance of 8 aerosol optical depths measured by sun-photometer with daytime

3 小结

在目标红外辐射特性测量时,大气传输修正是必要的环节。为了定量获得目标辐射特性测量的大气传输修特性,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。其中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,在实际应用中应实际测量。

关于目标辐射特性测量的大气修正系统和笔者研制的通用辐射大气传输计算软件将在之后的文章中予以介绍。

参考文献:

- [1] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(6): 284-289. (in Chinese)
杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(6): 284-289.
- [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] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database, JQSRT (in press) (2013).DOI:10.1016/j.jqsrt, 2013, 07: 002.
- [5] Clough S A, Tacono M J, Moncet J L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: application to water vapor [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(15): 761-785.
- [6] Chen Xiuhong, Wei Heli. Transplantation of LBLRTM from Workstation to PC [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(2): 99-103. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理. LBLRTM 从工作站到 PC 机的移植[J]. 大气环境光学学报, 2007, 2(2): 99-103.
- [7] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Users Guide to Lowtran7[M]. AFGL-TR-88-0177, 1988.
- [8] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN 5.2.0.0 USER's Manual[M]. Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command, Hanscom AFB MA, 01731-3010, 2008.
- [9] Anderson G P, Clough S A, Kneizys F X, et al. FASCOD3: Spectral Simulation [C]//I.R.S. International Symposium, 1988: 372-375.
- [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.
- [11] Thome K J, Herman B M, Reagan J A. Determination of precipitable water from solar transmission[J]. *J Appl Meteor*, 1992, 31: 154-165.
- [12] Qie Lili, Wei Heli, Xu Qingshan, et al. Parameterization of total atmospheric absorbing transmittances by water vapor at 940 nm in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 204-217. (in Chinese)
伽丽丽, 魏合理, 徐青山, 等. 中国区域 940 nm 带整层大气水汽透过率的参数化模式 [J]. 武汉大学学报, 2011, 36(2): 204-217.
- [13] 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.