

整层大气透过率获取方法研究进展及相关问题探讨

曹振松, 黄印博, 魏合理, 朱文越, 饶瑞中, 王英俭

(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)

摘要: 整层大气透过率是反映大气光学特性的一个重要参量, 在大气辐射、地球资源遥感、空气质量监测、特别是光电工程等领域, 都需要对大气透过率进行深入的研究。文中详细讨论了整层大气透过率的获取原理和方法, 分析了不同获取方法的最新进展和存在的相关问题, 对比分析了软件仿真计算和直接测量的优缺点, 并对后续的研究工作进行了展望。

关键词: 整层大气透过率; MODTRAN; CART; 太阳辐射计; 激光外差

中图分类号: P421.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1203004

Research progress and related problems on the acquisition method of total atmospheric transmittance

Cao Zhensong, Huang Yinbo, Wei Heli, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong, Wang Yingjian

(Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The total atmospheric transmittance is an important parameter reflecting the optical properties of the atmosphere. In the fields of atmospheric radiation, remote sensing, air quality monitoring and optoelectronic engineering, it is necessary to make a deep study on the atmospheric transmittance. In this paper, the methods of acquiring atmospheric transmittance were discussed in detail, and the latest progress and related problems of different acquisition methods were analyzed. The characteristics of software based simulation and direct measurement were compared and analyzed, and at the last, the future research was also prospected.

Key words: total atmospheric transmittance; MODTRAN; CART; solar radiometer; laser heterodyne

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-01

作者简介: 曹振松(1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事红外高分辨率高灵敏度激光吸收光谱及其应用方面的研究。

Email: zscas@aiofm.ac.cn

0 引言

整层大气通常是指从大气层顶到地基观测位置这段路径之间的大气,而整层大气透过率是反映整层大气光学特性的一个非常重要的参数,在大气辐射、环境遥感、空气质量监测、空间目标监测以及光电工程应用等领域,都具有重要的参考价值^[1-3]。整层大气透过率的高低取决于光在大气中传输时与大气发生相互作用的强弱,包括大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射而导致光辐射强度的衰减。大气系统复杂多变,在不同的经纬度、海拔高度、季节和时间等条件下,差异非常明显,使得光在大气中传输时的透过率也存在着巨大的差异。透过率的高低与辐射波长、光谱带宽、传输角度、探测路径、气压、气温和大气成分的路径分布等均有密切的关系。为了获取整层大气透过率,相关领域的研究人员开展了大量的研究工作。在理论研究和辐射传输模式算法方面,目前国际上形成了多个比较成熟的大气传输软件;在直接测量方面,经过多年的发展,也研制成功了一系列的测量仪器和装置。文中对整层大气透过率获取的原理、方法、测量装置和适用范围等进行了简要综述,对比分析了各种方法的特点,并初步进行了总结和展望。

1 原理

大气中各种分子和气溶胶对光的吸收和散射造成光强衰减,故在获取大气透过率时需要评估这些因素的影响,特别是在仿真分析整层大气透过率时,需要对整个传输路径上的大气分子和气溶胶的吸收和散射效应进行分析计算。对于大气透过率的直接测量,则需要关注测量仪器的准确标定和测量数据的反演。

1.1 软件计算

当特定波长的光穿过大气时,大气中的成分会对光产生消光。为了计算消光系数 σ_{ext} ,可将消光系数分为两个部分,吸收引起的消光 σ_{abs} 和散射引起的消光 σ_{sca} :

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{sca}} \quad (1)$$

此外,还可将消光系数分成气体分子消光 σ_{gas} 和气溶胶粒子消光 σ_{aerosol} :

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{gas}} + \sigma_{\text{aerosol}} \quad (2)$$

将上述两式结合,可得:

$$\sigma_{\text{ext}} = \sigma_{\text{gas,abs}} + \sigma_{\text{gas,sca}} + \sigma_{\text{aerosol,abs}} + \sigma_{\text{aerosol,sca}} \quad (3)$$

式中: $\sigma_{\text{gas,abs}}$ 、 $\sigma_{\text{gas,sca}}$ 、 $\sigma_{\text{aerosol,abs}}$ 、 $\sigma_{\text{aerosol,sca}}$ 分别为气体吸收、气体散射、气溶胶吸收和气溶胶散射。如果知道光束穿过一定距离 L 时的大气消光系数,即可获得此种情况下的大气透过率 T :

$$T = \exp(-\sigma_{\text{ext}} \cdot L) \quad (4)$$

需要说明的是,利用上式得到透过率时, σ_{ext} 是与传输路径上的分子数密度、波长、温度和压力等参数相关的函数;而气溶胶的吸收和散射是与传输路径上的气溶胶成分、形态、粒子数浓度、粒径分布等参数相关的函数。

对于分子的吸收,早期由于计算速度的限制,常用带模式计算法计算大气分子吸收^[4],该方法假定大气均匀吸收,大气分子的吸收谱线强度和位置按照某种规律分布,然后利用模型和实验数据对大气分子的吸收进行理论计算。目前,常用的高光谱分辨率的计算方法是利用逐线积分法^[5],该方法根据光谱线参数,在一定波数宽度内逐条进行计算,并将所有对吸收有贡献的谱线进行累加。对于粒子的散射^[6],通常是根据散射粒子尺度大小可分为 Rayleigh 散射、米散射和几何散射,并对这几类散射进行理论计算。对于气溶胶的吸收和散射^[7],受其化学成分及其粒径分布的影响非常复杂,目前,尚未被充分理解。理论上,根据气溶胶粒子的粒度参数和形态(粒子形状,内部折射率分布)上的不同,其吸收和散射可以通过米散射理论(可用于均质球形粒子、核壳粒子或可近似的聚集体)或其他手段,如 T 型矩阵、离散偶极子等方法进行数值计算。若气溶胶尺度分布满足荣格分布,其消光(吸收和散射之和)系数可以用相对简单的公式进行计算,即: $\sigma_{\text{aerosol}} = b\lambda - a$, a 是 Angström 系数, b 是气溶胶在 $1 \mu\text{m}$ 处的消光系数。

1.2 直接测量

对整层大气透过率进行直接测量时,常见的是利用大气层外恒定的光源(如太阳或恒星)作为辐射源,测量辐射源经过地球大气后到达观测位置处剩余的辐射强度。利用仪器对该辐射强度进行测量时,一般都需要对测量仪器进行标定,如利用 Langley-Plot 标定方法^[8],或是针对有大气分子吸收的波段利用改进的 Langley-Plot 标定方法^[9]。该方法假设大气沿着海拔高度由若干平行平面层组成,每个层内的大气成分均匀分布,在太阳运行到任一位置时(假设此时天顶角为 θ),根据光的吸收定律(Beer-Lambert

law)可知,在地面上测量仪器接收到的波长为 λ 的太阳光的响应 $P(\lambda)$ 可表示为:

$$P(\lambda)=P_0(\lambda)\exp[-m(\theta)\tau(\lambda)] \quad (5)$$

式中: $P_0(\lambda)$ 为对应于大气层顶的太阳辐照度的仪器响应值; $m(\theta)$ 为天顶角为 θ 时,传输光路上对应的大气质量; $\tau(\lambda)$ 为波长为 λ 时,指向天顶角(θ)方向的大气光学厚度。此时,测量得到的该天顶方向整层大气透过率为:

$$T=P(\lambda)/P_0(\lambda) \quad (6)$$

选择稳定的大气条件,通过标定可以外推得到大气层顶的仪器响应值 $P_0(\lambda)$,实际测量时,只要将那一刻的测量值 $P(\lambda)$ 代入上式,即可获取整层大气透过率。

2 软件计算

早期计算大气透过率的常用方法是查表法,由于计算速度的限制,该方法对大气传输模型做了大量简化,提高了计算速度,但降低了计算精度,目前已很少使用。后来随着计算速度的提升以及算法的改进,计算精度得到了很大的提高。目前常用的大气透过率计算软件主要有如下几种。

2.1 LOWTRAN

低分辨率大气传输计算软件 LOWTRAN(LOW resolution TRANsmission)系列^[10-13]是由美国空军地球物理实验室(Air Force Geophysics Laboratory, AFGL)用 Fortran 语言编写用来计算大气透过率及辐射的软件。最后的版本是 1989 年 2 月发布的 LOWTRAN7,此后升级为中分辨率大气透过率计算程序 MODTRAN。该计算软件的光谱分辨率为 20 cm^{-1} ,光谱覆盖范围是 $0\sim 50\,000\text{ cm}^{-1}$ ($0.2\ \mu\text{m}\sim\infty$),以单参数带模式仿真计算多个参数,包括大气背景辐射、大气透过率、阳光和月光辐射亮度、太阳直射辐照度以及多次散射的太阳和热辐射等,同时还考虑了云、分子、气溶胶、连续吸收、雨的吸收和散射、地球曲率及折射对路径及总吸收物质含量计算的影响。软件集成了美国空军地球物理实验室(AFGL)的 6 种标准大气模式,包括大气温度、气压、密度的垂直廓线, H_2O 、 O_3 、 CH_4 、 CO 和 N_2O 的混合比垂直廓线及其他 13 种痕量气体的垂直廓线。近地层大气气溶胶模式分为乡村型、城市型、海洋型、沙漠型等。

LOWTRAN 的主要优点是计算迅速,结构灵活多变,可根据用户需要,设置水平倾斜和垂直传输路

径,地对空、空对地等不同探测形式,适用对象广泛。

2.2 MODTRAN

中分辨率大气透过率计算程序 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission)^[14-15]是由光谱科学公司(Spectral Sciences, Inc. SSI)和美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)在 LOWTRAN 基础上开发的。MODTRAN 拥有超过 30 年的历史,是目前应用广泛的大气透过率计算软件,该软件用 Fortran 语言开发,是对 LOWTRAN 模型的改进,目前已更新到 MODTRAN6 版本。该代码被嵌入在多种不同处理系统中,特别是那些涉及遥感多光谱和高光谱成像中消除大气效应(通常称为大气校正)的系统。

MODTRAN 软件计算紫外到长波红外光谱范围($0\sim 50\,000\text{ cm}^{-1}$;大于 $0.2\ \mu\text{m}$)内的大气透射率和背景辐射。相对于 LOWTRAN,MODTRAN 辐射传输物理模型的核心改进是分子吸收采用新的大气“窄带模型”算法,MODTRAN 早期的版本光谱分辨率为 2 cm^{-1} ,后来的 MODTRAN5 提高到 0.2 cm^{-1} ,最新的 MODTRAN6 中还集成了逐线积分大气分子吸收计算模块,可以提供高光谱分辨率的计算结果。

2.3 FASCODE

FASCODE(Fast Atmospheric Signature CODE)^[16-18]是快速大气信息程序的简称,用 FORTRAN 语言编写,最先由 AFGL 研发并提供 FASCODE 程序。该程序对于非局部热力学平衡进行了充分考虑,在仿真计算时可予以选用,可以对波段范围更宽的气溶胶粒子的散射进行处理计算。同时,软件还建立了大气分层模型,通过对每一层分子吸收、散射效应(分子和气溶胶)及一些连续吸收的计算,FASCODE 提供了“精确”透过率仿真计算的处理方法。

在软件计算过程中采用了两种处理方法:(1)采用完全的逐线积分法,将 Lorentz 函数分解为若干个不同的子函数,然后用相同的采样点数进行计算;(2)对于不同高度的大气参数,用不同的波数间隔进行计算,可以达到辐射出射度和透过率计算的特定精度。因为该软件在处理的过程中是逐根光谱进行计算,所以,特别适合仿真计算高光谱分辨率(如单色波长和激光等)的整层大气透过率。

2.4 LBLRTM

LBLRTM(the Line-by-Line Radiative Model)^[19-22]

是由美国大气和环境研究公司开发的一种软件。该软件是从 AFGL 开发的 FASCODE 上发展起来的一种高效、精确的辐射传输算法,光谱范围覆盖紫外到亚毫米波,光谱分辨率和计算精度高,可仿真计算大气光谱透过率、大气加热率和大气辐射量。该软件主要有以下两个特点:

(1) 利用总分配函数计算温度有关的线强,根据温度相关的交叉吸收截面对分子吸收进行处理。在计算速度方面得到了很大的提高,同时采用线性代数的方法减轻计算负担,使其计算速度可以提高 20 倍。对不同高度上的大气,用 Voigt 线型计算大气分子吸收。大气连续吸收采用 MT-CKD 算法,计算 H₂O 和 CO₂ 的连续吸收以及其他气体在某些波段的连续吸收^[19]。

(2) 嵌套了红外波段的海洋表面发射模式。可计算多个参量,包括透过率、光学厚度、辐射率和辐射等效亮温等;输入的大气模式廓线不仅可以采用高度坐标,也可采用气压坐标;该软件包含有两个部分:Line file-用于大气分子吸收谱线参数文件制作和 LBLRTM-用于计算辐射传输;且此软件可以与各种版本 HITRAN 数据库兼容。

除此以外,LBLRTM 还拓展了可应用于其他星球的版本:P-LBLRTM(Planetary-LBLRTM)^[23],该版本软件具有模拟火星和早期地球大气层的能力。由于这些星球的大气不是由 N₂ 和 O₂ 主导,而是具有高浓度的 CO₂,因此 CO₂ 对透过率的影响变得特别重要。

2.5 CART

CART (Combined Atmospheric Radiative

Transfer)^[24-27] 大气辐射传输计算软件是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制开发的,该软件可用来快速计算空间任意两点之间的多个参量,包括大气透过率、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。光谱波段为可见光到远红外波段(1~25 000 cm⁻¹),光谱分辨率早期为 1 cm⁻¹,经过多年的改进完善,目前光谱分辨率为 0.2 cm⁻¹。相比于 MODTRAN 软件,CART 软件计算效率更高,且计算精度有所提高。

该软件在计算大气透过率时,分别对大气分子的吸收、散射和气溶胶的吸收与散射进行计算:(1) 分子散射。利用瑞利散射公式进行计算;(2) 分子吸收。提出了一种基于逐线积分拟合的大气分子吸收的光谱透过率快速计算方法^[24];对于连续吸收,采用国际上公认的 MK-CKD 算法;(3) 气溶胶的吸收和散射。部分采用 MODTRAN 中的几种气溶胶衰减计算模式外,还包括用 OPAC 软件计算的几种气溶胶模式^[28]。同时增加了一种根据实际测量气溶胶尺度谱和气溶胶消光高度分布计算气溶胶衰减的模式,使气溶胶的吸收和散射计算更准确。除此以外,该软件还嵌入了我国典型地区的逐月平均大气模式,使其更适用于国内的实际应用场景。

需要说明的是,LOWTRAN,MODTRAN,FASCODE 采用相同的气溶胶衰减模式,只是大气分子吸收计算根据光谱分辨率的不同采用不同的模式,表 1 总结并给出了上述各个计算软件的特点。

除了上述几种较为常见的软件算法,研究人员

表 1 几种常见的仿真计算软件

Tab.1 Several common used simulation software

Software	Research unit	Wavelength	Resolution	Aerosol extinction	Molecular extinction
LOWTRAN	AFGL	0.2 μm~∞	20 cm ⁻¹	Aerosol extinction profile depending on ground visibility in rural, urban, marine, desert and other types	Single parameter mode
MODTRAN	SSI, AFRL	0.2 μm~∞	0.2 cm ⁻¹	The same as LOWTRAN	Improved single parameter mode
FASCODE	AFGL	0.2 μm~∞	Monochromatic	The same as LOWTRAN	Line-by-line
LBLRTM	AER	0.2 μm~∞	Monochromatic	The same as LOWTRAN	Line-by-line, covering continuum absorption of molecules
CART	Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences	0.4 μm~∞	1 cm ⁻¹ ,0.1 cm ⁻¹	Covering the aerosol models of rural, cities, ocean, desert and OPAC in LOWTRAN. Aerosol spectral distribution model based on measured aerosol extinction height profile and Jung index was added	Line-by-line based fast algorithm, covering continuum absorption of atmospheric molecules

还根据具体的任务开发并建立了多种辐射传输软件,如 6S^[29]、AER^[30]、libRadtran^[31]、ARTS^[32]等,这些模式高度模块化,包含了辐射传输的各个过程及多种观测方法,被用于特定工程条件下的整层大气透过率仿真计算。

3 直接测量

无论是理论计算还是基于大气模式仿真分析,获取的透过率都是一定模式条件下的结果,与实际大气中不断变化的整层大气透过率存在差异,特别是极端天气,如降雨、降雪、雾霾等,计算值和实际值差别更大。对于复杂的大气系统来说,较为准确的结果需要通过直接测量获得。

整层大气透过率是通过整层大气介质后出射辐射和入射辐射的比值。因此,大气透过率的直接测量需要获取地基观测位置处的辐射强度和大气层顶的辐射强度。通常利用辐射恒定的恒星(如太阳)作为辐射源,采用一定的分光手段(如滤光片、光栅、傅里叶变换光谱、外差光谱等),将恒星的辐射光分波段来进行探测,最后经过定标,得到整层大气透过率。目前常用的直接测量方法主要有如下几种。

3.1 太阳辐射计(恒星辐射计)

太阳辐射计又称太阳光度计,可用于测量白天的整层大气透过率。第一台太阳光度计是由 Volz 等^[33]研制的手持式光度计,该光度计的分光滤光片采用干涉滤光片,结构较为简单,但灵敏度不足。从此之后,涌现出一批新型的太阳辐射计。在国内也有部分大学和科研单位在进行太阳辐射计的研制和外场测量工作。目前商用和科研中使用的太阳辐射计种类繁多,大多为通用产品,仅有部分为具有特殊功能的太阳辐射计,这里选择有代表性的太阳辐射计进行介绍。

国外具有代表性的太阳辐射计是日本 PREDE 公司研制的全自动太阳光度计,该光度计内置 11 个波段的滤光片,可测量 315~2 200 nm 波段范围内的 11 个波段的太阳辐射强度。法国 CIMEL 公司生产的太阳辐射计带有防雨设计,工作可靠,环境适应性强,在可见到近红外波段有 8 个测量波段,标定后可直接获得 8 个波段的整层大气透过率。该辐射计能够自动跟踪太阳做直射辐射测量,还包含有多种测量模式,如太阳等高角度的天空扫描、太阳主平面扫描和极化通道天空扫描等。该辐射计自动化程度高,可

实现无人管理自动测量、采集和远程数据传输。此外,美国的 SOLAR Light 公司和 Yankee Environmental Systems, Inc.,意大利的大气和海洋研究所和 Middleton Solar 公司也有多款商用的太阳辐射计。

上述仪器均为国外产品,价格较为昂贵,同时由于这些太阳辐射计采用滤光片进行测量,带宽较宽,只能得到有限几个波段的大气透过率,无法得到连续精细的光谱特征,且测量精度可能会受到机械零件误差导致测量误差,从而使得测量的精度降低。为使太阳辐射计能够满足使用需求并降低实验成本,国内的多个单位开展了太阳辐射计的研制。在 20 世纪 80 年代早期,北京大学开展了多波段太阳辐射计的研制并进行了系统的观测实验工作,还通过试验对辐射计的标定精度和仪器稳定度进行了专门的研究工作^[34]。中国科学院安徽光学精密机械研究所在 1989 年研制成功太阳光度计,该仪器是国内第一台具有自动跟踪和分光功能的太阳光度计^[35],可用于直接测量太阳辐射和天空散射辐射,仪器的总体设计以及在精确测量气溶胶光学特性方面达到当时的国际先进水平;1999 年又研制了 DTF-3 型便携式自动太阳光度计^[36],在测量精度、结构设计上对 DTF-1 型太阳光度计基础重新进行了设计完善,进一步提高了辐射计的控制灵活性,整套仪器更小型化,便于野外实验,成本也降低许多,目前最新的型号是 DTF-6 型。除此以外,该单位还将太阳辐射计与小型光栅光谱仪结合,研发了可以覆盖紫外到近红外波段的宽波段分光型太阳辐射计^[37],获得了整层大气透过率的光谱特征,典型测量结果如图 1 所

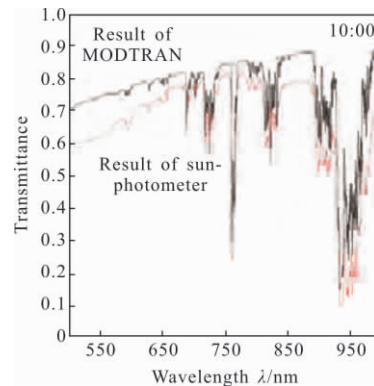


图 1 测量结果与 MODTRAN 模拟结果对比^[37]
Fig.1 Comparison of measured results and calculated results based on MODTRAN software^[37]

示。由于采用了许多新技术,仪器性能和易用性都得到了提高,产品性能与国外的同类产品相当,是国内具有代表性的太阳辐射计。

太阳辐射计可以很好地完成白天整层大气透过率测量,对于夜间的整层大气透过率就无能为力了。针对该问题,中国科学院安徽光学精密机械研究所的相关科研人员经过长期探索,在前期研制太阳辐射计的基础上,利用望远镜结合恒星跟踪装置研制成功了多波段昼夜兼用型恒星辐射计,可以测量可见光范围内多个波段的整层大气透过率^[38-39],见图 2。

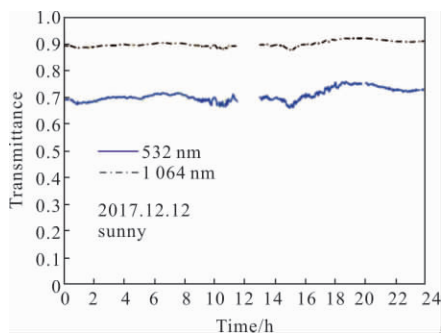


图 2 昼夜整层大气透过率实测结果^[39]

Fig.2 Measured results of total atmospheric transmittance during day and night^[39]

3.2 傅里叶变换光谱仪

傅里叶变换光谱仪(FTIR)具有扫描快、信息量大、精度高等特点。利用傅里叶变换光谱仪测量整层大气透过率时,通常需要将傅里叶变换光谱仪和太阳跟踪装置联用,将太阳跟踪装置捕获的太阳光导入傅里叶变换光谱仪进行测量。同时,选择稳定的大气条件,利用前述的 Langley-plot 方法或其改进方法对测量得到的光谱进行标定,可获取感兴趣波段大气顶层的太阳辐照强度,将实测的近地面辐照强度与大气顶层的辐照强度相比,即可得到整层大气透过率。利用傅里叶变换光谱仪进行整层大气透过率测量时,可以满足高光谱分辨率和宽测量谱段的要求,通过选择合适的探测波段,还可以测量得到气溶胶的消光厚度和各种大气分子的柱浓度甚至廓线浓度。

使用傅里叶变换光谱仪测量大气透过率可以避免间接测量或是模式计算带来的误差,达到直接、实时、准确、分辨率高的要求。目前,利用傅里叶变换光谱仪进行水平大气透过率已经有过成功的经验^[40-41],并与仿真分析的结果进行比对,一致性较

高,如图 3 所示。

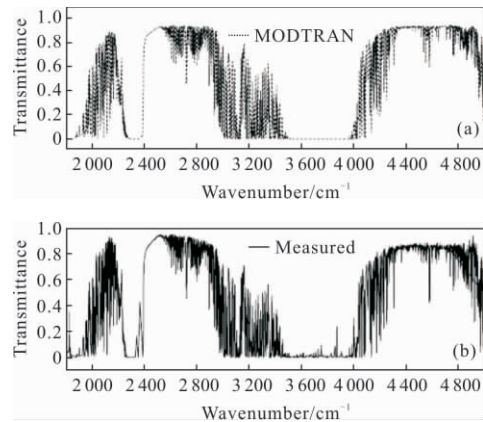


图 3 实测合肥地区 2007 年 4 月 27 日 1 000 m 大气透过率^[41]

Fig.3 Measured atmospheric transmittance of 1 000 m distance on April 27, 2007 in Hefei area^[41]

利用 FTIR 进行整层大气透过率测量的相关报道相对较少^[42],目前查到的文献仅展示了毫米波波段的测量结果。笔者所在实验室利用带有太阳跟踪的高分辨率傅里叶变换光谱仪(光谱分辨率 0.2 cm^{-1})正在开展相关的研究工作,目前已经取得较好的实验结果,成功获取了 $2.2\sim 14.5 \mu\text{m}$ 波段范围内多个感兴趣波段的整层大气透过率实测数据。

3.3 激光外差辐射计

激光外差探测又称为光的相干探测,是利用信号光与本振光在快响应探测器光敏面上进行光学混频,混频信号中包含有和频和差频信号,和频频率太高,难以探测,一般只能探测到差频信号,该差频信号含有信号光的振幅、相位和频率等信息。由于可以预先测量本振光的性能,比如频率、功率、偏振状态等,从而可以获取信号光所携带的信息,实现探测信号光有关信息的目的。

激光外差探测技术在 20 世纪 70 年代首先被应用在天体物理学和天文研究中。后来由于激光技术的局限使得激光外差技术发展缓慢。在过去的十几年里,随着红外激光技术(如带间级联激光器、量子级联激光器)、光子技术(如光纤)的快速发展,使得激光外差探测技术又重新活跃起来。近年来,基于激光外差技术的应用引起了相关研究人员的兴趣。该技术可以获取高灵敏度、高分辨率的光谱信号,并可利用高分辨率光谱数据反演被测气体的廓线分布^[43-44]和整层大气透过率^[45]。中国科学院安徽光学精密机

械研究所报道了以宽带黑体辐射作为信号源,窄线宽 $4.4\ \mu\text{m}$ 外腔量子级联激光器作为本地振荡光源的激光外差光谱测量装置,并利用样品池获得了 CO_2 的该波段的高分辨光谱信号;在此基础上,还利用自行研制的高精度太阳跟踪装置搭建了整层大气透过率测量装置,获得了高光谱分辨率($0.006\ \text{cm}^{-1}$)的外差信号^[46]。同时,利用建立的激光外差装置开展了 $4.5\ \mu\text{m}$ 波段整层大气透过率的实时测量,获得了良好的整层大气透过率直接测量数据(图 4),并与 MODTRAN5.0 软件结合观测站点大气参数(气溶胶消光、水汽高度廓线等)的计算结果进行了对比分析,变化趋势一致,偏差较小,具有很好的一致性^[47]。与此同时,还成功将探测波段进行扩展,实现了其他波段整层大气透过率的高光谱分辨率测量,并对激光外差辐射计仪器性能(如仪器线型函数)进行了深入的研究。

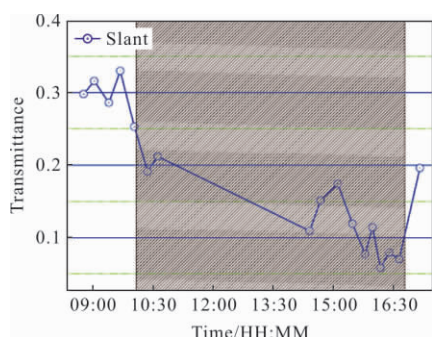


图 4 实测有云天气条件下的整层大气透过率^[47]

Fig.4 Measured total atmospheric transmittance in cloudy weather^[47]

除了上述几种较为常见的直接测量算法,近年来相关领域的科研工作者还进一步拓展了整层大气透过率的测量方法,均取得了较好的测量结果。如李洪文等^[48]搭建了基于地基光电望远镜标准红外自然星的大气透过率的测量试验系统。许方宇等^[49]利用中波红外辐射亮度测量装置结合大气辐射传输方程,获得了红外大气透过率的测量数据并加以对比验证。

4 需要注意的几个方面

4.1 软件计算

利用软件计算整层大气透过率时,如利用标准大气模式,获取的是典型大气条件下的整层大气传输效率,并不是实际情况下实时的整层大气透过率,只能大致反映一个地区一定时间内的平均情况。而对于实际光电系统的应用而言,需要实时获取整层

大气透过率,考虑到实际大气复杂多变,这就需要实时准确获取大气光学参数,包括大气气体分子的浓度廓线、气象参数廓线和气溶胶消光廓线等。此外,软件计算还需要准确的分子吸收谱线参数,并将这些参数耦合于软件中进行仿真分析。因此,实时准确获取整层大气透过率需要考虑如下几个方面的问题。

4.1.1 大气分子吸收谱线参数

利用软件计算整层大气透过率时,除了需要知道大气分子的浓度、状态和气溶胶的消光信息,还需要准确的分子吸收谱线参数数据库,这是所有大气辐射传输计算模式的基础数据。常用的谱线数据库是 HITRAN 数据库^[50]。该数据库对分子吸收和发射等相关研究领域有着不可替代的作用,但也存在一些问题,如部分谱线参数冗余以及部分谱线参数缺失,特别是低温、低压下的谱线参数大多为理论计算结果,使得基于谱线参数结合模式仿真计算的结果存在不确定性。例如,在中红外波段,利用不同数据库版本计算的初始高度为 $1\ \text{km}$ 时的整层大气透过率,在部分波段的最大偏差高达 40% ^[51]。所以,为了准确获取整层大气透过率,需要对待测波段的大气分子吸收谱线参数进行验证确认,如不加以验证即直接使用,可能会给后续的工程应用带来不可预知的风险。

对于谱线参数的验证,常规的方法是利用直接吸收光谱技术^[52]或腔衰荡吸收光谱技术^[53]对目标波段一定范围内的谱线参数进行测量。由于整层大气的温度变化是从常温到约零下 $90\ ^\circ\text{C}$,所以除了常温光谱参数测量,还需要对低温状态下的分子吸收谱线参数进行测量^[54]。除此以为,部分波段的分子连续吸收(如 $4.3\ \mu\text{m}$ 波段的 N_2 连续吸收)以及碰撞诱导吸收^[55]也都需要加以测量验证。

4.1.2 大气分子浓度廓线

光波在大气中传输,传输路径上的分子吸收和散射会产生衰减。分子的散射,如前所述,可以用 Rayleigh 散射公式较为准确地计算;而分子的吸收,除了需要有准确的谱线参数,还需要测量获得整个传输路径上的吸收分子浓度廓线。

举例来说,假如需要获得 $2\ \mu\text{m}$ 波段的整层大气透过率,通过分析可以知道,在该波段影响整层大气透过率的主要大气分子是 H_2O 和 CO_2 ,在这种情况下,需要对这两种温室气体的廓线进行测量并代入

软件中进行大气分子吸收的计算。对于 H_2O 的浓度廓线测量,常用的方法是利用探空气球^[56]直接测量和微波辐射计^[57]等设备进行遥感测量。探空气球利用氢气(或氦气)球挂载探空仪进行水汽廓线浓度直接测量,结果准确,但耗时较长,一般需要数 10 min 才能获得一组数据,且不能沿固定的路径进行测量;微波辐射计是利用被动接收各个高度大气的微波辐射信号,通过神经网络算法来反演大气 H_2O 浓度廓线,时间分辨率高,且能全天候、全天时工作。但由于反演算法依赖于神经网络对探空数据的训练,其廓线反演精度相对于实际探空结果还有待于提高。需要注意的是,上述测量设备的测量高度无法覆盖整层大气(探空仪约 30 km,微波辐射计约 10 km),但考虑到 H_2O 的浓度主要分布在 5 km 以下的近地面区域,故测量到的高度范围已经包含有超过 99% 的 H_2O 总量,故更高范围内的 H_2O 浓度可以按照模式进行计算,即可满足一般的精度要求。对于 CO_2 的廓线浓度测量,一般是将其作为均匀混合气体进行计算,认为其在整个高度上浓度不变,所以可以利用太阳光谱对其柱浓度进行测量。虽然近地面的 CO_2 浓度受人类活动和植被影响较大,但对整层的柱浓度来说,影响不大。此外,考虑到 CO_2 浓度具有季节性变化,所以在长时间周期的分析计算中,需要考虑 CO_2 浓度随季节变化的影响。

在计算分子吸收时,还需要有气象参数,如大气压力廓线和温度廓线信息等,探空仪和微波辐射计都可以直接测量地面至 10~30 km 高度的温度和压力廓线,整层大气的压力和温度廓线可用低层测量结果结合高层的大气模式获取。

4.1.3 气溶胶消光测量

气溶胶消光是分析计算整层大气透过率时需要考虑的又一个重要问题,特别是目前极端气象现象频发,雾霾天气时有发生,导致气溶胶的消光测量在整层大气透过率测量中受到了更多的重视。常用激光雷达^[58-59]和太阳辐射计^[60]测量某几个波长的气溶胶消光廓线和整层大气气溶胶光学厚度。气溶胶激光雷达属于主动探测方法,可根据需要对目标方位进行昼夜连续观测,然而雷达测量气溶胶消光存在盲区,且测量高度受限于雷达的发射能量,一般测量高度约为 10 km,大型雷达可达平流层甚至中高层大气,典型测量结果如图 5 所示。

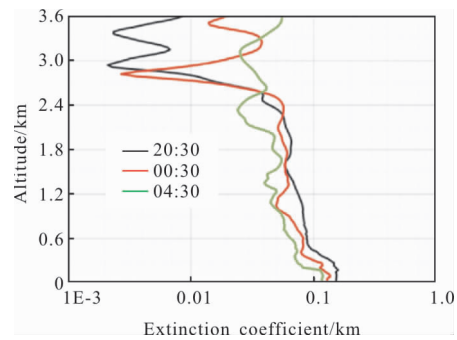


图 5 实测的三组气溶胶消光系数廓线^[58]

Fig.5 Three aerosol extinction coefficient profiles^[58]

太阳辐射计测量气溶胶消光属于被动测量方法,利用无大气分子吸收的波段对气溶胶消光进行直接观测,可以满足实时测量的需要,且测量的是整层大气中的所有气溶胶的消光,然而由于该方法是被动观测方法,无法在夜间或在无太阳的情况下进行测量。所以在进行气溶胶消光测量时,需要综合考虑测量设备的特点进行选用。云会严重影响光学观测,云层较厚时会使得光波无法穿过,因此,在厚云情况下光学系统无法观测。但在有高层薄卷云(有时是肉眼不可见的薄卷云)的情况下,需要知道卷云的光学厚度和空间分布才能得到较准确的大气透过率,而卷云的空间分布探测目前只能依赖于卫星观测。

4.2 直接测量

利用直接测量方法获取整层大气透过率时,如利用恒星辐射计,傅里叶变换光谱仪或者激光外差光谱仪,获取的是测量时刻和测量方位条件下目标波段的辐射值,并不是实时的整层大气透过率。要将测量到的辐射值转化为整层大气透过率,需要对测量装置进行标定。直接测量中常见的标定方法有传递定标法、实验室标准光源法、Langley-Plot 标定方法及其若干改进方法。常用的 Langley-Plot 标定方法适用的前提条件是,标定时段天气晴好,大气状态稳定,且被测的辐射目标,如太阳或其他恒星辐射稳定。除此以外,直接测量时,还需要考虑测量设备的各种误差,如指向误差,定位误差和跟踪误差等^[61]。因此,实时准确测量整层大气透过率需要考虑如下几个方面的问题。

4.2.1 仪器定标

利用传递定标法和实验室标准光源法对仪器进行定标时,由于存在传递误差,和标准光源也存在

5%~10%的相对误差,使得利用这两种方法进行定标时存在一定的不确定性^[62-63]。

Langley-Plot 方法对测量仪器进行定标测量时,需要选择大气情况稳定、天气晴朗、能见度高且背景光弱(若恒星方向有月光,测量的数据也会受影响)的条件。在这样的大气条件下,定标结果较好,因此定标时需要考虑选择合适的地点和定标时的大气的稳定性,同时还需要考虑大气边界层的影响,因为随着太阳的升高,大气和地表吸收阳光导致边界层会不断发展,空气中湍流的作用使得大气中气溶胶粒子增加,气溶胶光学厚度变大,从而导致近地面的吸收在整个标定时间段内会存在较大变化。研究表明:理想的定标地点相对高度应该在 1 km 以上^[64],可以很大程度降低边界层的影响。

常规的 Langley 法定标仅适用于透过率遵从 Beer-Lambert 定律的谱区,对于含有气体分子强吸收线的光谱区域,则需要利用改进的 Langley 法,这种方法的重点在于确定给定波长处透过率与吸收气体含量的关系。国内外的研究都表明^[65-66]:在大气吸收波段(如水汽的 940 nm 波段)采用改进的 Langley 法能给出更好的定标和反演精度。

4.2.2 仪器误差

仪器定标时,在满足上述地点和天气条件的基础上,仪器测量的误差源则属于测量仪器固有的误差。测量仪器的固有误差,常见的有视场角内杂散光的误差,进入仪器的辐射除去太阳直接辐射外,还有来自天空的部分散射光;其次是仪器光学滤波宽度的影响,由于 Beer-Lambert 定律只能在单色光的情况下成立,但是仪器有一定的滤波宽度,这会利用 Langley 法对仪器标定时带来误差,从而引起测量误差;再者是温度响应误差,作为外场试验测量设备,不可避免的会面临环境温度变化,温度变化影响的对象主要是光电探测器和电子电路系统,包括系统中的各个元器件,一般来说可通过主动控温的方法或者对探测器进行温度响应修正的方法来降低温度响应误差对测量结果的影响。此外,利用辐射计进行测量时,还需要考虑指向误差,定位误差和跟踪误差等。

4.2.3 长期测量稳定性

利用辐射计测量整层大气透过率时,测量设备会随着时间推移和仪器损耗发生变化。一般来说,主要有如下几个因素影响仪器测量稳定性:(1) 光电探

测器的响应,该响应随着时间的推移,探测器光敏材料会发生变性,导致响应产生改变(一般是变低);(2) 滤波带宽,这里指的是滤光片的滤波带宽,长期使用后滤光能力会降低,透光范围可能会发生变化;(3) 电子元件和光学元件性能退化。所以每隔一段时间对辐射计进行重新标定,可以提高所获得探测数据的准确性和有效性。

4.3 光谱分辨率

对整层大气透过率进行直接测量时,光谱分辨率是一个重要的指标,分辨率越高,对测量设备分光能力的要求就越高,在该光谱分辨率范围内供探测器探测的能量就越低,这就要求探测器的响应度足够高,因此,在对整层大气透过率进行直接测量时,不宜一味的追求高光谱透过率。对光谱分辨率的需求需要分析待测波段的精细吸收情况进行确定,如果待测波段透过率随波长变化缓慢或几乎不变(无分子吸收或分子吸收较弱),则对于分辨率的要求可以适当降低;如测量波段透过率变化较快(分子吸收密集区域或是处于分子吸收峰内),则在该测量波段需要较高的光谱分辨率。

5 结论

近年来,随着大气光学研究的发展,特别是现代先进光电技术的发展,整层大气透过率的准确获取受到了更多的关注,对整层大气透过率的光谱分辨率和时间分辨率的要求也越来越高。通过科研人员不断的努力,整层大气透过率的获取方法得到了极大的完善和改进,然而由于实际大气成分复杂多变,气象条件时刻变化,极端天气屡屡出现,使得准确快速测量大气透过率难度加大,导致大气辐射传输软件在不同地域、不同地理环境条件下的通用性也受到较大限制。因此,需要在以下几个方面继续加强研究:

(1) 在算法和模型方面,进一步研究更加高效的算法和更完善的通用性更强的大气辐射传输计算模型;

(2) 在分子吸收谱线参数测量方面,对影响大气透过率的各种气体分子的吸收光谱参数及其温度、压力依赖系数开展研究;

(3) 在气溶胶消光特性测量方面,需要结合主被动测量方法,测量气溶胶成分、尺度谱分布以及气溶

胶的复折射指数。关于气溶胶的复折射指数,特别是气溶胶的吸收部分,目前还没有满意的测量手段;

(4) 在大气模式方面,测量并建立适合我国气候条件的标准大气模式,并开展时效性、实用性更强的大气参数(温度、湿度、压力、大气成分等)廓线测量技术研究;

(5) 在直接测量方面,还需要进一步研究小型化高光谱分辨率整层大气透过率直接测量技术。

参考文献:

[1] Tai Hongda, Zhuang Zibo, Jiang Lihui, et al. Multi-point mobile measurement of atmospheric transmittance [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (8): 1894–1901. (in Chinese)
台宏达, 庄子波, 蒋立辉, 等. 大气透过率的多点移动测量 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 1894–1901.

[2] Gong Shaoqi, Sun Haibo, Wang Shaofeng, et al. Study on atmospheric transmittance of thermal infrared remote sensing (I): derivation of atmospheric transmittance model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (6): 1692–1698. (in Chinese)
龚绍琦, 孙海波, 王少峰, 等. 热红外遥感中大气透过率的研究 (一): 大气透过率模式的构建 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1692–1698.

[3] Zang Shouhong, Bai Yunta, Ouyang Yi. Research on atmospheric transmittance measuring method [J]. *Infrared*, 2009, 30(3): 26–29. (in Chinese)
臧寿洪, 白云塔, 欧阳艺. 大气透过率测量方法的研究 [J]. *红外*, 2009, 30(3): 26–29.

[4] Goody R M, Yung Y L. Atmospheric Radiation: Theoretical Basis[M]. Oxford: Oxford University Press, 1989: 125–181.

[5] Clough S A, Iacono M J. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Part II: Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide, and the halocarbons [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1995, 100 (8): 16519–16535.

[6] Witschas B. Light Scattering on Molecules in the Atmosphere [M]//Schumann U. Atmospheric Physics. Research Topics in Aerospace, Berlin: Springer, 2012.

[7] Kokhanovsky A. Aerosol Optics: Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere [M]. Berlin: Springer, 2008.

[8] Zhan Jie, Guo RuiPeng, Huang Honghua, et al. Measurement of total atmospheric transmittance with stellar irradiance [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19 (11): 1761–1765. (in Chinese)
詹杰, 郭瑞鹏, 黄宏华, 等. 利用恒星测量整层大气透过率 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(11): 1761–1765.

[9] Adler-Golden S M, Slusser J R. Comparison of plotting methods for solar radiometer calibration [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24 (5): 935–938.

[10] Selby J E A, McClatchey R A. Atmospheric transmittance from 0.25 to 28.5 μm : Computer Code LOWTRAN 3 [S]. 1975.

[11] Haught K M, Cordray D M. Long-path high-resolution atmospheric transmission measurements: comparison with LOWTRAN 3B predictions [J]. *Applied Optics*, 1978, 17 (17): 2668–2670.

[12] Kneizys, F X, Shettle E, Abreu L W, et al. User guide to LOWTRAN 7 [Z]. 1988.

[13] Meng Fanbin, Zheng Li. LOWTRAN 7-based calculation method of IR transmittance in the atmosphere [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(3): 29–32. (in Chinese)
孟凡斌, 郑丽. 基于 LOWTRAN 7 的红外大气透过率计算方法 [J]. *光电技术应用*, 2009, 24(3): 29–32.

[14] Berk A, Conforti P, Kennett R. MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code [C]//SPIE, 2014, 9088: 10.1117/12.2050433.

[15] Berk A, Conforti P, Hawes F. An accelerated line-by-line option for MODTRAN combining on-the-fly generation of line center absorption with 0.1 cm^{-1} bins and pre-computed line tails [C]//SPIE, 2015, 9471: 10.1117/12.2177444.

[16] Clough S A, Kneizys F X, Shettle E P, et al. Atmospheric radiance and transmittance: FASCOD2 [C]//Proceedings of the Sixth Conference on Atmospheric Radiation, American Meteorological Society, 1986: 141–144.

[17] Zhou Fengxian, Wang Luyi. Fast and accurate software for atmospheric transmittance calculation—FASCODE [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 1991, 10(5): 398–400. (in Chinese)
周凤仙, 王路易. 快速精确计算大气透过率的微机软件包—FASCODE [J]. *红外与毫米波学报*, 1991, 10(5): 398–400.

[18] Isaacs R G, Wang W C, Worsham R D, et al. Multiple scattering LOWTRAN and FASCODE models [J]. *Applied Optics*, 1987, 26 (7): 1272–1281.

[19] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the

- AER codes [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, 91(2): 233–244.
- [20] Alvarado M J, Payne V, Mlawer E J, et al. Performance of the line-by-line radiative transfer model (LBLRTM) for temperature, water vapor, and trace gas retrievals: recent updates evaluated with IASI case studies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(14): 6687–6711.
- [21] 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]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(2): 99–103.
- [22] 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.
- [23] Lamouroux J, Gamache R R, Laraia A L, et al. Semiclassical calculations of half-widths and line shifts for transitions in the 30012←00001 and 30013←00001 bands of CO₂. III: Self collisions [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113(12): 1536–1546.
- [24] Wei H, Chen X, Rao R, et al. A Moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation [J]. *Optics Express*, 2007, 15 (13): 8360–8370.
- [25] Chen X H, Wei H L, Wei Y L, et al. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART software with measured values [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 403–406.
- [26] 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) 及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3360–3366.
- [27] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of the precision of atmospheric molecular absorption and thermal radiance calculated by combined atmospheric radiative 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.
- [28] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(5): 831–844.
- [29] Kotchenova S Y, Vermote E F. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II: homogeneous lambertian and anisotropic surfaces [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(20): 4455–4464.
- [30] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, D13103: 10.1029/2008JD009944.
- [31] Emde C, Buras–Schnell R, Kylling A, et al. The libradtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1647–1672.
- [32] Li Shulei, Liu Lei, Gao Taichang. Introduction of atmospheric radiative transfer simulator software [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11 (4): 241–248. (in Chinese)
李书磊, 刘磊, 高太长. 大气辐射传输模拟器(ARTS)软件的介绍[J]. *大气与环境光学学报*, 2016, 11(4): 241–248.
- [33] Volz F E. Photometer mit Selen-photoelement zur spektralen Messung de Sonnenstrahlung und zer Bestimmung der Wallenlangenabhängigkeit der Dunstrubun [J]. *Arch Meteor Geophys Bioklim*, 1959, B10: 100–131.
- [34] Mao Jietai, Li Jianguo. Visibility and telephotometer [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1984, 8(2): 170–177. (in Chinese)
毛节泰, 李建国. 气象能见度与望远光度计[J]. *大气科学*, 1984, 8(2): 170–177.
- [35] Tan Kun, Wang Jie, Tu Chuanfang, et al. Multi-purpose solar photometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(5): 448–452. (in Chinese)
谭锬, 王洁, 屠传芳, 等. 多功能太阳辐射计[J]. *光学学报*, 1991, 11(5): 448–452.
- [36] Zhan Jie, Tan Kun, Shao Shisheng, et al. Portable autocontrol solar photometer [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(6): 551–555. (in Chinese)
詹杰, 谭锬, 邵石生, 等. 便携式自动太阳辐射计[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(6): 551–555.
- [37] Huang Sheng, Jing Xu, Tan Fengfu, et al. Measurement and calibration methods for total atmospheric continuous

- transmittance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0710001. (in Chinese)
- 黄晟, 靖旭, 谭逢富, 等. 整层大气连续透过率的测量与标定方法[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0710001.
- [38] Zhan Jie, Guo Ruipeng, Rao Ruizhong. Measurement of atmospheric transmittance in the visible and near infrared [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(3): 179–183. (in Chinese)
- 詹杰, 郭瑞鹏, 饶瑞中. 可见到近红外波段整层大气透过率的测量 [J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(3): 179–183.
- [39] Wang Hao, He Feng, Jing Xu, et al. Study on measurement of total atmospheric transmittance in daytime and night observation stars [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(3): 0311001. (in Chinese)
- 王浩, 何枫, 靖旭, 等. 昼夜观测恒星整层大气透过率测量研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(3): 0311001.
- [40] Roney P L, Reid F, Theriault J M. Transmission window near $2\ 400\ \text{cm}^{-1}$: An experimental and modeling study [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 1995–2004.
- [41] Lü Weiyu, Zhu Wenyue, Li Zhichao, et al. Measurements of atmospheric transmittance based on fourier transform infrared spectrometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(1): 26–31. (in Chinese)
- 吕炜煜, 朱文越, 李志朝, 等. 基于傅立叶变换红外光谱仪的水平大气透过率测量研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(1): 26–31.
- [42] Paine S, Blundell R, Cosmo Papa D, et al. A Fourier transform spectrometer for measurement of atmospheric transmission at submillimeter wavelengths [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2000, 112: 108–118.
- [43] Weidmann D, Reburn W J, Smith K M. Retrieval of atmospheric ozone profiles from an infrared quantum cascade laser heterodyne radiometer: results and analysis [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7162–7171.
- [44] Wilson E L, McLinden M L, Miller J H, et al. Miniaturized laser heterodyne radiometer for measurements of CO_2 in the atmospheric column [J]. *Applied Physics B*, 2014, 114(3): 385–393.
- [45] Peyton B, DiNardo A, Cohen S, et al. An infrared heterodyne radiometer for high-resolution measurements of solar radiation and atmospheric transmission [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1975, 11: 569–574.
- [46] Tan Tu, Cao Zhensong, Wang Guishi, et al. Study on the technology of the $4.4\ \mu\text{m}$ mid-infrared laser heterodyne spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(6): 1516–1519. (in Chinese)
- 谈图, 曹振松, 王贵师, 等. $4.4\ \mu\text{m}$ 中红外激光外差光谱探测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6): 1516–1519.
- [47] Wu Qingchuan, Huang Yinbo, Tan Tu, et al. High-resolution atmospheric-transmission measurement using a laser heterodyne radiometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(6): 1678–1682. (in Chinese)
- 吴庆川, 黄印博, 谈图, 等. 基于激光外差技术的高分辨率整层大气透过率测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6): 1678–1682.
- [48] Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1547–1557. (in Chinese)
- 刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1547–1557.
- [49] Zhao Zhijun, Xu Fangyu, Wei Chaoqun, et al. Study on measurement method for total infrared atmospheric transmittance [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(7): 718–722. (in Chinese)
- 赵志军, 许方宇, 魏超群, 等. 红外整层大气透过率测量方法研究[J]. 红外技术, 2018, 40(7): 718–722.
- [50] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 203: 3–69.
- [51] Liu Dandan, Huang Yinbo, Dai Congming, et al. Effect of changes of HITRAN database on transmittance calculation in mid-infrared region along vertical uplink [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1776–1782. (in Chinese)
- 刘丹丹, 黄印博, 戴聪明, 等. 不同版本 HITRAN 数据库中红外波段上行传输透过率的计算 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1776–1782.
- [52] Sun Mingguo, Ma Hongliang, Cao Zhensong, et al. Measurement and application of CO_2 spectroscopic parameters near $2.0\ \mu\text{m}$ [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 2881–2886. (in Chinese)
- 孙明国, 马宏亮, 曹振松, 等. $2\ \mu\text{m}$ 附近 CO_2 谱线参数测量及应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 2881–2886.
- [53] Liu G L, Wang J, Tan Y, et al. Line positions and N_2 -induced line parameters of the $00^{\circ}3-00^{\circ}0$ band of $14\text{N}216\text{O}$ by comb-assisted cavity ring-down spectroscopy [J]. *Journal*

- of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 229: 17–22.
- [54] Ma H, Liu Q, Cao Z, et al. Temperature dependences for N_2 –and air –broadened Lorentz half-width coefficients of methane transitions around 3.38 μm [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 171: 50–56.
- [55] Richard C, Gordon I E, Rothman L S, et al. New section of the HITRAN database: Collision –induced absorption (CIA) [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113: 1276–1285.
- [56] Liu Kai, Wei Lixin, Chen Zhikun, et al. Radiosonde observations at the southwest continent and analysis of atmospheric vertical structure characteristics if the Antarctic [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2019, 31 (1): 13–24. (in Chinese)
刘凯, 魏立新, 陈志昆, 等. 夏季西南极探空观测以及南极大陆大气垂直结构特征分析 [J]. 极地研究, 2019, 31(1): 13–24.
- [57] Wang Yuxun, Wang Rui, Yan Wei, et al. Data simulation and parameter inversion based on microwave hyperspectral technology [J]. *Journal of Microwaves*, 2019, 35 (2): 75–80. (in Chinese)
王玉训, 王蕊, 严卫, 等. 基于微波高光谱技术的数据仿真及参数反演研究[J]. 微波学报, 2019, 35(2): 75–80.
- [58] Tao Zongming, Shi Qibing, Xie Chenbo, et al. Precise detection of near ground aerosol extinction coefficient profile based on CCD and backscattering lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S106007. (in Chinese)
陶宗明, 施奇兵, 谢晨波, 等. 利用 CCD 和后向散射激光雷达精确探测近地面气溶胶消光系数廓线 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S1): S106007.
- [59] Ma Xiaomin, Tao Zongming, Zhang Lulu, et al. Ground layer aerosol detection technology during daytime based on side-scattering lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401005. (in Chinese)
麻晓敏, 陶宗明, 张璐璐, 等. 侧向散射激光雷达探测白天近地面气溶胶探测技术 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0401005.
- [60] Liu Zeyang, Li Xuebin, Sun Gang, et al. Analysis of seasonal change characteristics of aerosol optical depth in Delingha and Hefei [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2018, 13(3): 185–192. (in Chinese)
刘泽阳, 李学彬, 孙刚, 等. 德令哈和合肥地区气溶胶光学厚度季节变化特征分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(3): 185–192.
- [61] Huang Sheng. The design and related data analysis of solar spectral radiometer from visible to near infrared bands [D]. Changsha: University of Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
黄晟. 可见到近红外太阳光谱辐射计的研制与相关数据分析[D]. 长沙: 中国科学技术大学, 2018.
- [62] Shaw G E. Error analysis of multi-wavelength sun photometry [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1976, 114(1): 1–14.
- [63] Yang Zhifeng, Zhang Xiaoye, Che Huizheng, et al. An introductory study on the calibration of CE318 sunphotometer [J]. *Journal of applied Meteorological Science*, 2008, 19 (3): 297–306. (in Chinese)
杨志峰, 张小曳, 车慧正, 等. CE318 型太阳光度计标定方法初探[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 297–306.
- [64] Zhang Junhua, Wang Meihua, Mao Jietai. Error analysis and correction for multi-wavelength Sun-photometer aerosol remote sensing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(6): 855–859. (in Chinese)
张军华, 王美华, 毛节泰. 多波段光度计遥感气溶胶误差分析及订正[J]. 大气科学, 2000, 24(6): 855–859.
- [65] Bruce C K, Zheng Q, Alexander F H G. Direct solar spectral irradiance and transmittance measurements from 350 to 2 500 nm [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3483–3494.
- [66] Qie L L, Dai C M, Xu Q S, et al. Calibration of near-infrared absorption band for a sun-photometer [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(5): 928–938.