

# 地基傅立叶红外高光谱遥感观测大气成分 平台建设及其反演技术研究

张兴赢<sup>1,2</sup> 张 鹏<sup>1</sup> 廖 宏<sup>2</sup> 胡秀清<sup>1</sup> 李 元<sup>1</sup>  
张立军<sup>1</sup> 戎志国<sup>1</sup> 邱 红<sup>1</sup>

- (1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 国家卫星气象中心,北京 100081;  
2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室)

**提 要:** 利用国际大气成分地基观测网络(NDACC)通用的德国 BRUKER 公司生产的傅立叶红外(FTIR)高分辨率地基光谱仪器 IFS 120M,在国家卫星中心建立了地基高光谱观测平台,进行高光谱数据获取及其反演技术初步研究。阐述了地基高光谱观测平台的建设,高光谱仪器的调试和观测参数化研究结果,并且阐述了光谱的预处理和定标研究,利用地基高光谱在可见光波段的观测结果,进行了气溶胶光学厚度反演技术的初步研究。

**关键词:** 地基遥感 大气成分 辐射定标 反演技术

## On Ground-based Remote Sensing for Atmospheric Species by FTIR Instrument and Retrieval Algorithm

Zhang Xingying<sup>1,2</sup> Zhang Peng<sup>1</sup> Liao Hong<sup>2</sup> Hu Xiuqing<sup>1</sup>  
Li Yuan<sup>1</sup> Zhang Lijun<sup>1</sup> Rong Zhiguo<sup>1</sup> Qiu Hong<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental  
Satellites, CMA, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081;  
2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

**Abstract:** The FTIR instrument (IFS 120M) from BRUKER Co. Germany, usually used in NDACC, has been used for the study on ground-based remote sensing for atmospheric species and

基金项目:北京城市气象基金项目(UMRF200704),大气边界层物理和大气化学国家重点实验室基金项目(LAPC-KF-2008-11),气象局大气成分观测标准项目“地基高光谱遥感观测大气”,国家重点基础研究计划 973 项目(2005CB422202 和 2006CB403702),中欧国际合作项目 AMFIC(FP6-2005-Space-1),以及风云三号气象卫星地面系统建设工程项目(13-1)共同资助。

收稿日期:2008年3月14日; 修定稿日期:2008年11月14日

the retrieval algorithm. The construction of the observation lab is stated. The result about the calibration for the solar spectrum is explored. The retrieval algorithm of AOD from the data by this instrument is also discussed.

**Key Words:** ground-based remote sensing atmospheric species calibration retrieval algorithm

## 引 言

近年来的研究表明全球大气由于人类活动正经历快速变化,大气成分及浓度随着人类活动的发展发生了巨大的变化,各种温室气体通过温室效应导致全球变暖<sup>[1-4]</sup>。大气中的痕量气体和气溶胶不仅具有化学活性,还具有辐射活性,对太阳辐射和地表红外辐射有很强的吸收作用,它们的浓度虽低,但对地气系统的能量收支及生物圈与大气的相互作用过程却有着不容忽视的作用,同时痕量气体还可以参与光化学反应,降水化学和在气溶胶中的气-固转化,间接对全球的生态环境,以及气候变化造成严重影响。

传统的地基大气痕量气体的测量主要采用化学分析方法,分析设备复杂,并只能在近地层进行,无法得到大气柱总量,而且空间分析站点也很有限。地基高光谱傅立叶变换光谱仪是测量大气中各种物质气体成分的新型有效手段,它通过观测从紫外至红外波段的大气吸收光谱,可以地基遥感反演大气中痕量气体、水汽、云和气溶胶的总量和垂直廓线。利用相似的光学遥感原理可以把探测器放到卫星平台,实现大面积空间分布观测。

近年来,在地基遥感观测技术领域,傅立叶变换红外(FTIR)光谱仪在气体分析中发挥了越来越重要的作用,国际上很多研究机构都已经将其作为气体的实时“在线定量”分析工具<sup>[5]</sup>。FTIR 光谱技术对于平流层和对流层中存在的痕量气体,如一些重要的气体 CO、CH<sub>2</sub>O、CFCs、HCl、HF 和 HNO<sub>3</sub> 等的研究提供了极为有效的手段,傅立叶变换红外

光谱仪(FTIR)是测量大气痕量气体的强大工具,它利用太阳或月亮作为光源,根据大气痕量成分的吸收特性,可探测到对流层和平流层中 20~30 种痕量气体成分,通过光谱分析可以反演痕量气体的气柱总量。对于有些痕量气体,利用吸收线的压力加宽特征可以得到垂直浓度廓线信息。对还有些重要的痕量气体在红外不能探测,但是在紫外和可见光波段可以实现,只要对紫外到红外 0.3~14 $\mu\text{m}$ (700~33000 $\text{cm}^{-1}$ )整个光谱波段进行观测,就可以实现几乎大气中大部分痕量气体的测量计算。全球大气成分变化观测网 NDACC(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)目前在全球建立 70 多个高质量的对空遥感研究台站,目的是了解大气物理和化学状态,定量评估大气成分改变对全球气候的影响,其中 FTIR 仪器,主要用于监测一系列的大气成分柱体积浓度,包括 O<sub>3</sub>、HCL、NO、NO<sub>2</sub>、CLONO<sub>2</sub> 和 HNO<sub>3</sub> 等等。Notholt 等人<sup>[6-13]</sup>在此领域做了较多的研究工作。他们采用船载 IFS 120M 高分辨率 FTIR 光谱仪,以太阳和月球作为光源,对大气中的 20 多种痕量气体,进行监测。他们用船载 IFS 66 FTIR 光谱仪,在开普敦和不来梅港之间,对大气层中的一些重要的温室气体(如 CO、CH<sub>4</sub>)进行了遥测,得出了这些气体的总柱总量,并获得地球纬度与 CO/N<sub>2</sub>O 比值之间的相关曲线,气体的特征光谱分辨率高达 0.0035 $\text{cm}^{-1}$ 。他们还在极地对同温层中损失的臭氧及 HNO<sub>3</sub>、HF 等痕量气体进行了遥感监测。

国内最早着手开展 FTIR 遥感监测大气痕量气体污染物研究的是王俊德等人<sup>[14]</sup>,近

年来陆续对 FTIR 光谱技术在定量和数据处理方面进行一些研究<sup>[15-16]</sup>;安徽光学精密机械研究所也开展了关于 FTIR 反演气体浓度的相关研究<sup>[17]</sup>。连晨舟等人<sup>[18]</sup>也对 FTIR 的定量新方法进行了研究。但是国内这些研究主要都还是基于研究仪器的性能,旨在开发新的仪器和相关应用软件,而且这些仪器大都是主动式遥感得到一段水平区域范围内的污染分布情况,针对整层大气遥感的工作,魏合理等<sup>[19-20]</sup>早年做过对整层大气中 CH<sub>4</sub> 和 NO<sub>2</sub> 气体柱总量的测定,但是还没有系统开展大气成分的地基遥感工作,尤其是还没有利用高光谱仪器来开展大气成分地基遥感监测。

目前针对 FTIR 地基高光谱观测数据采用的反演算法主要为差分光谱吸收(DOAS, Differential Optical Absorption Spectroscopy)方法,DOAS 方法是 Noxon<sup>[21]</sup>、Platt 等<sup>[22]</sup>提出的,主要是分解痕量成分谱线吸收与连续吸收及散射贡献,通过对光谱统计拟合确定各种痕量成分含量。近年来 DOAS 技术已经成为一种重要的大气污染物测量方法,在空气监测和大气化学机理研究中起到重要作用<sup>[23-27]</sup>。在国内,关于 DOAS 仪器开发研究已经做了不少工作,许多人<sup>[28-38]</sup>对仪器数据反演算法进行了大量的研究,包括对算法的介绍、误差分析、以及对波长配准、气体吸收截面和夫琅禾费线影响的订正研究,章江英,于意仲等<sup>[39-40]</sup>将算法应用于实验室研究,王萍等<sup>[41]</sup>将 DOAS 方法应用于地基曙暮光观测,反演平流层 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 柱总量,并与 Dobson O<sub>3</sub> 资料和卫星 SAGE II 的 NO<sub>2</sub> 廓线资料进行比较验证。现在 DOAS 方法已经可以测定大气中许多重要的痕量气体或自由基,如:对流层中的 HONO<sup>[42]</sup>、NO<sub>3</sub><sup>[43]</sup>、BrO<sup>[44]</sup>、ClO<sup>[45]</sup> 和平流层中的 OClO<sup>[44]</sup>、BrO<sup>[45]</sup>,它还可以测量其他许多在紫外和可见光波长范围内有吸收的分子,如: NO<sub>2</sub>、

NO、NH<sub>3</sub>、IO、O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、HCHO 和大多数的芳香烃<sup>[46-53]</sup>。北京大学的一些科研小组也开始在这个领域做了一些工作,利用地基 DOAS 观测反演的 NO<sub>2</sub> 柱总量与 SCIAMACHY 卫星 NO<sub>2</sub> 数据的比较及 NO<sub>2</sub> 时空分布进行了相关的研究<sup>[54]</sup>。但是国内这些研究主要集中在主动式 DOAS 遥感得到一段水平区域范围内的污染分布情况,还没有系统开展被动遥感整层大气的遥感工作,国内地基遥感和卫星遥感大气痕量气体的研究还非常少,以大气成分探测为目标的高光谱遥感仪器研制以及反演技术研究在国内还刚刚起步,大气成分变化对于环境和气候影响亟需大力发展大气痕量成分空间探测与反演技术。

## 1 试验部分

### 1.1 观测平台

高光谱观测实验室选择在北京某建筑楼顶搭建,为了满足现有和将来新购置仪器的观测需求,平台建设完成后达到下面具体的使用要求:

(1) 满足多种太阳光谱仪器和太阳光度计同时观测或者单独观测需要,屋顶开启方便,密封性要好。特别是满足 BRUKER IFS 120M 傅立叶高光谱辐射仪的太阳光谱日常观测要求。

(2) 屋顶是方便开启关闭结构,主要采取可方便控制的自动开关门结构。

(3) 保持实验室的干洁性和密封性。

### 1.2 仪器和设备

#### 1.2.1 BRUKER IFS120M 地基高分辨率光谱仪

Bruker IFS120M 傅立叶变换光谱仪是德国 BRUKER 仪器公司生产的(见图 1),光

谱范围  $0.2 \sim 16.6\mu\text{m}$ , 最高光谱分辨率  $0.008\text{cm}^{-1}$ , 该仪器在不同波段换用不同的分束器和探测器:

(1) 紫外波段 ( $20000 \sim 50000\text{cm}^{-1}$ ,  $0.2 \sim 0.5\mu\text{m}$ ) Quartz (Ⅲ) 分束器, 对应的 GaP 二极管检测器响应波段为  $18000 \sim 50000\text{cm}^{-1}$  ( $0.2 \sim 0.55\mu\text{m}$ );

(2) 可见光 ( $8000 \sim 25000\text{cm}^{-1}$ ,  $0.4 \sim 1.25\mu\text{m}$ ) Quartz 分束器和对应的 Si Diode 检测器响应波段为  $8000 \sim 25000\text{cm}^{-1}$  ( $0.4 \sim 1.25\mu\text{m}$ );

(3) 热红外波段 ( $600 \sim 5000\text{cm}^{-1}$ ,  $2 \sim 16.6\mu\text{m}$ ) KBr 分束器, 对应 MCT 检测器响应波段为  $600 \sim 6000\text{cm}^{-1}$  ( $1.6 \sim 16.6\mu\text{m}$ ).

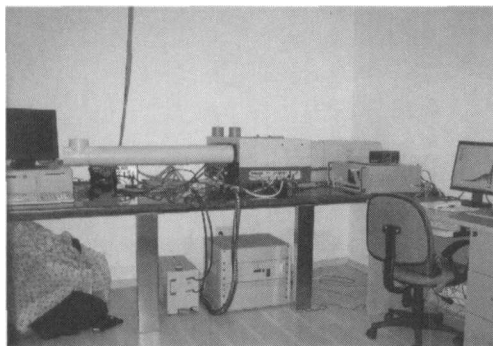


图 1 BRUKER IFS120M 地基高分辨率光谱仪

### 1.2.2 BRUKER SOLAR TRACKER 太阳自动跟踪器

为了实现全天候太阳自动跟踪捕捉光谱, 在 BRUKER 光谱仪器的基础上, 添加了 BRUKER 公司生产 SOLAR TRACKER 太阳自动跟踪器 (见图 2), 由以下几个主要部件组成: 光学跟踪头、电子控制箱、命令控制计算机及其它辅助传输线等配件组成。

#### • 光学跟踪头

光学跟踪头是太阳跟踪器的主体光学部分, 是用来对太阳跟踪的头部, 它可以实现方位和仰角的变换, 由一动镜和定镜以及两个步进马达构成。其中动镜是用来调节太阳天

顶角, 静镜用来调节方位角。

#### • 电子控制箱

电子控制箱是光学跟踪头和控制命令计算机之间软硬件接口通道, 在光学跟踪头准备就绪后先打开控制箱电源开关, 然后再打开命令控制计算机电源。

#### • 命令控制计算机

命令控制计算机是用来调节和控制光学跟踪头的中枢, 机内插有一块专用的控制板, 通过软件可以实现对光学跟踪头进行相关参数设置和太阳跟踪调节。

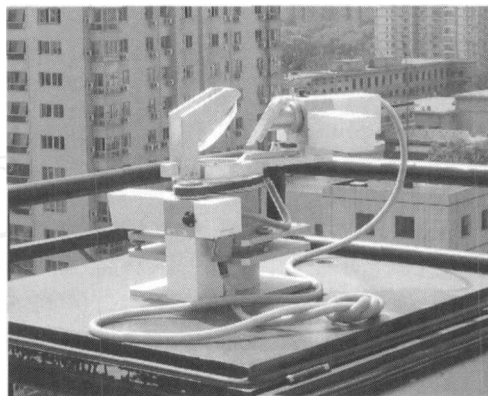


图 2 BRUKER 公司 SOLAR TRACKER 太阳自动跟踪器

### 1.2.3 CE-318 自动太阳光度计

为了加强整个观测平台的综合系统功能, 在原有的 BRUKER 仪器基础上增设了 CE-318 自动太阳光度计, 全天候自动跟踪观测太阳光谱。CE318 自动跟踪太阳辐射计 (R. N. Hathore, 1999) 进行大气消光测量, 由法国 CIMEL 公司制造的多通道太阳辐射计, CE318 是一个自动跟踪扫描太阳辐射计, 安装有 8 个通道 (见表 1), CE318 除了可以测量太阳直射辐射外, 还可以进行等高度角天空辐射扫描。太阳主平面天空扫描和太阳主平面极化扫描测量。

表1 CE318 自动跟踪扫描  
太阳辐射计光谱通道

通道号	中心波长/nm	带宽/nm
1	1020	10
2	870P1	10
3	670	10
4	440	10
5	870P2	10
6	870	10
7	936	10
8	870P3	10

注:P1、P2、P3表示3个极化通道

### 1.2.4 自动气象站

在观测平台还设置了 CAWS600 系列自动气象站,实现观测太阳光谱的同时进行全自动气象数据采集、存储、处理和传送。可以得到匹配的高频次(每分钟采集一组数据)同步气象观测数据:温、湿、风、雨、日照等,便于开展光谱数据处理和数据的应用示范研究。

## 2 结果讨论与分析

### 2.1 观测模式的选择

#### 2.1.1 参数的设置

在 BRUKER 仪器的光学平台上,需要设置观测光谱的分辨率、样品扫描时间、观测保存的波段、谱图的形式和存储的数据模块等;在光学设置部分要对光源、分束器、滤波片、光阑、检测器、扫描速度、增益等;采样参数需要考虑最高和最低的采样频率限制、高低通滤波片的选择以及采样模式等参数的设置;还要对傅立叶转化的相关参数进行设置。

#### 2.1.2 分辨率的设置

图3中深色的线是按照1个波数的分辨率采集到的光谱图,浅色的线是按照0.1个波数的分辨率采集到的光谱图,很明显可以看出,提高分辨率后在原来低分辨率没有明显出峰的地方有显著的吸收峰出现,这样可以得到更多更细致的大气成分的吸收信息,

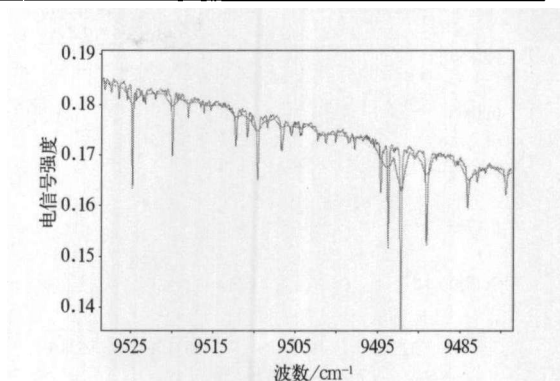


图3 不同分辨率观测光谱图

用于我们的后期数据反演。

#### 2.1.3 滤波的选择

为了得到感兴趣波段的光谱,可以通过调整滤波片来得到增强和抑制一些波段的光谱,图4是一个例子,没滤波片以前(深色的光谱线)在12000~15000波数范围内的光谱峰响应信号很弱,增加了滤波片后(浅色的光谱线),在该位置的光谱响应信号得到了增强。

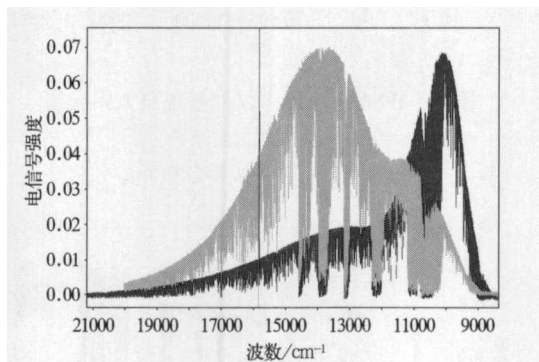


图4 滤波的选择

### 2.2 光谱处理

#### 2.2.1 填零处理

为了弥补采样的不足,要对光谱进行填零处理,使光谱更加平滑,如图5所示。

#### 2.2.2 光谱定标

原始的观测光谱是仪器响应的电信号,为了能够提取有用的太阳光谱信息,开展对观测光谱的定标处理,利用Langley法把电

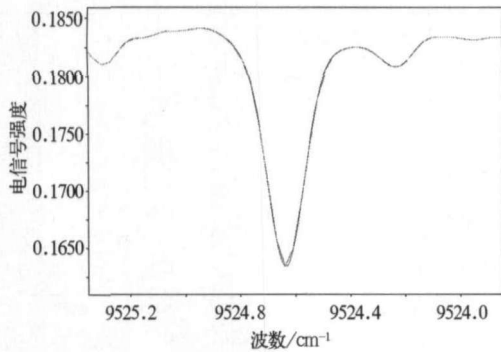


图 5 填零处理前后光谱比对

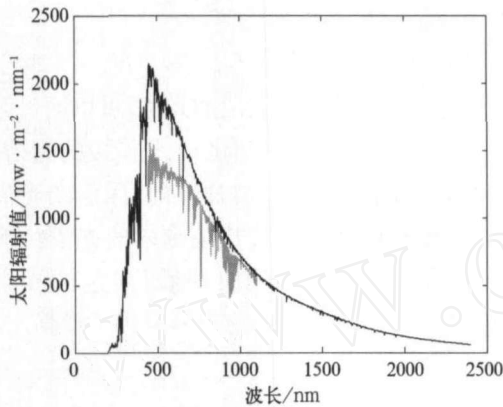


图 6 IFS120M 光谱仪地基观测太阳光谱  
灰线为观测太阳光谱,  
黑线为大气外界太阳参考光谱

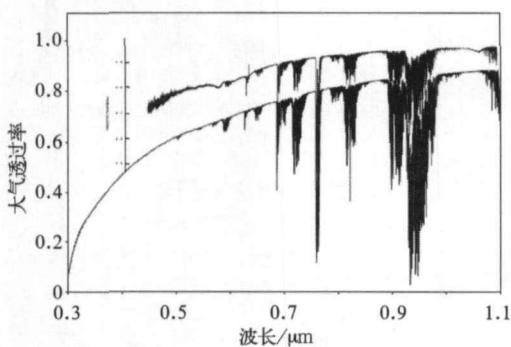


图 7 IFS120M 光谱仪观测大气透过率(上方)  
与 MODTRAN 模拟大气透过率(下方)

信号转换成太阳辐射值<sup>[55]</sup>(见图 6):外围的是大气层顶太阳参考光谱,内部的是经过我们定标处理后从地基观测光谱反推出得到的

大气层顶太阳光谱,由于现在观测是可见光波段,所以没有得到整条全波段的太阳光谱。定标处理后的大气透过率和 MODTRAN 模拟得到的大气透过率(图 7)是非常一致的,可见地基观测结果还是相当理想的。

### 2.3 气溶胶光学厚度反演

利用 Langley 法推算出不同波长大气总的消光光学厚度,用气压测值可计算分子散射 Rayleigh 光学厚度,从总的光学厚度中减掉 Rayleigh 散射和气体吸收就得到气溶胶光学厚度(见图 8),由不同波长上的气溶胶光学厚度还可以推出气溶胶其它重要参数(如 Junge 参数,粒子谱分布等),太阳辐射计的吸收通道还用来反演吸收气体总量,如臭氧吸收的 Chappuis 带和 940nm 水汽吸收带,可以用来反演垂直大气层总的臭氧量和水汽量。

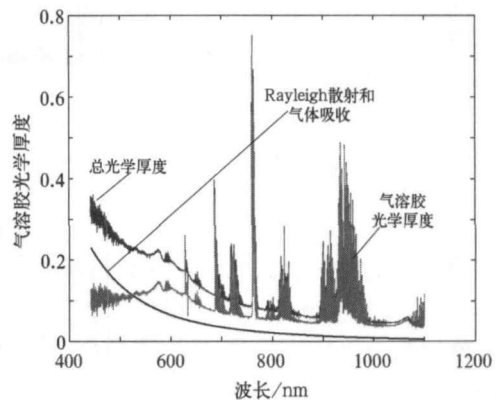


图 8 IFS120M 光谱仪推算的大气消光光学厚度

利用观测到的地基 BRUKER 高光谱长时间序列数据,开展气溶胶光学厚度反演,与 AERONET 的观测数据(如图 9)以及成熟的 MODIS 气溶胶光学厚度产品进行比较分析(如图 10),结果表明地基高光谱的反演产品是真实有效的。

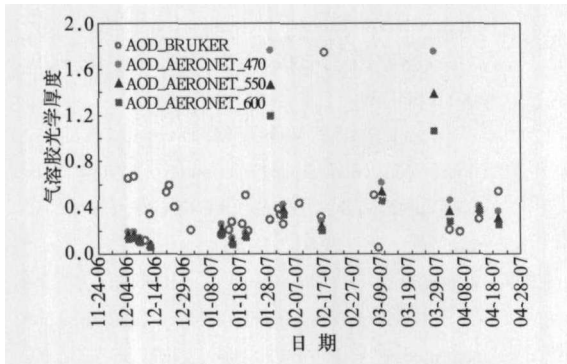


图9 BRUKER 高光谱气溶胶光学厚度反演结果与 AERONET 结果比较

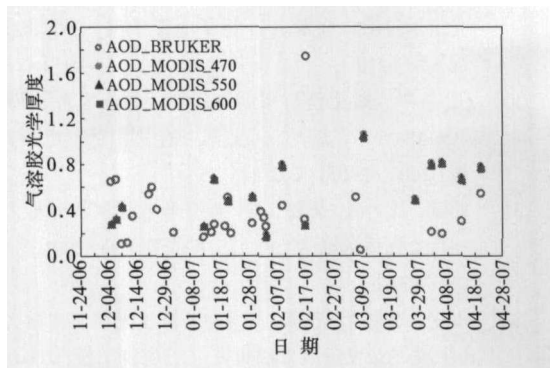


图10 BRUKER 高光谱气溶胶光学厚度反演结果与 MODIS 结果比较

### 3 工作展望

FTIR 地基高光谱遥感观测大气成分是验证卫星大气成分观测结果的最有效手段,目前国际的卫星已经有能力获取全球的大气成分分布,并且开展了完善的地基高光谱遥感验证工作,我国目前在轨卫星还没有能力得到大气成分的监测数据,也还没有开展地基高光谱验证平台的建设。为了更好地使用国外的卫星大气成分遥感数据,必须开展地基高光谱的观测平台建设和数据获取技术研究,同时我国的风云三号气象卫星上搭载着我国首个自主的大气成分遥感载荷,可以得到全球的大气臭氧分布,因此也急需开展地面遥感的真实性检验工作。

**致谢:**感谢国家科技支撑计划“基于环境一号等国产卫星的区域环境空气遥感监测应用技术与软件开发”(2008BAC34B04)

### 参考文献

- [1] Newman, P. A., J. F. Gleason, R. D. McPeters, et al. Anomalously low ozone over the Arctic[J]. Geophys. Res. Lett., 1997, 24:2689-2692.
- [2] Muller, R., P. J. Crutzen, J. U. Groöf, et al. Severe chemical ozone loss in the Arctic during the winter of 1995-1996[J]. Nature, 1997, 389: 709-712.
- [3] WMO, Global ozone research and monitoring project, scientific assessment of ozone depletion 1994 [R]. WMO Rep. 1995:37.
- [4] IPCC, Climate Change 1995: The Science of Climate Change[M]. Cambridge University Press, 1999:572.
- [5] Duquesne Sophie, Le Bras Michel, Analysis of Fire Gases Released from Polyurethane and Fire-Retarded Polyurethane Coatings[J]. Journal of Fire Science, 2000, 18(6):456-482.
- [6] J. Notholt, K. P. feilsticker, Stratospheric Trace Gas Measurements in the Near-UV and Visible Spectral Range with the Sun as a Light Source Using a Fourier Transform Spectrometer [J]. Apply. Spectrosc., 1996, 50:583-587.
- [7] J. Notholt, G. C. Toon, F. Stordal, et al. Seasonal variations of atmospheric trace gases in the high Arctic at 79°N[J]. J. Geophys. Res., 1997, 102:12855.
- [8] J. Notholt, G. C. Toon, C.P. Rinsland, et al. Latitudinal variations of trace gas concentrations in the free troposphere measured by solar absorption spectroscopy during a ship cruise [J]. J. Geophys. Res., 2000, 105:1337-1349.
- [9] J. Notholt, I. Beninga, O. Schrems. Shipborne FT-IR Measurements of Atmospheric Trace Gases on a South (33°S) to North (53°N) Atlantic Traverse[J]. Appl. Spectrosc., 1995, 49:1525-1527.
- [10] J. Notholt, H. Schuett, A. Keens., Measurements of stratospheric OH at 308 nm with the sun as light source using a Fourier transform spectrometer [C]. SPIE, 1997, 3106:17.
- [11] E. Becker, J. Notholt, Spectroscopic Atmospheric Monitoring Techniques[C]. Klaus Schaefer, Editor, SPIE, 1997, 3106:154-158.

- [12] G. C. Toon, J. F. Blavier, B. Sen, et al. Ground-based observations of Arctic O<sub>3</sub> loss during spring and summer 1997[J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, 1042: 6497.
- [13] E. Becker, J. Notholt, Intercomparison and validation of FTIR measurements with the Sun, the Moon and emission in the Arctic[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2000, 65:779-786.
- [14] 王俊德, 康建霞, 王天舒. 大气痕量气体污染物的傅立叶变换红外光谱分析[J]. *分析化学*, 1995, 23(3):349-355.
- [15] 黄中华, 王俊德. 傅立叶变换红外光谱在大气遥感监测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 22(2):235-238.
- [16] 张琳, 张黎明, 李燕, 等. 多项式偏最小二乘法对非线性体系红外谱图的分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(4):620-623.
- [17] 朱军, 刘文清, 刘建国, 等. FTIR 光谱拟和方法在反演气体浓度中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, 25(10):1573-1576.
- [18] 连晨舟, 吕子安, 季春生, 等. 一种标定新方法在 FTIR 定量分析中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(11):1323-1326.
- [19] 魏合理, 刘庆红, 徐青山, 等. 整层大气甲烷总量季节变化的遥测[J]. *气象学报*, 2001, 59(3): 360-367.
- [20] 魏合理, 胡欢陵, 用太阳光谱遥测大气污染气体 NO<sub>2</sub> 的含量[J]. *遥感学报*, 2001, 1.5(3): 220-226.
- [21] Noxon, J. F., Nitrogen dioxide in the stratosphere and troposphere as measured by ground-based absorption spectroscopy[J]. *Science*, 1975, 189, 547-549.
- [22] Platt, U., D. Perner, and H. Patz, Simultaneous measurements of atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> in the polluted troposphere by differential optical absorption[J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84D:6329-6335.
- [23] Solomon, S., Schmeltekopf, A. L., and Sanders, R. W.: On the interpretation of zenith sky measurements[J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, 92(D7): 8311-8319, 6110-6111.
- [24] Platt, G. M., Análise de Processos de Destilação Reativa. M.Sc. thesis (in Portuguese)[D]. TPQB/EQ/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil, 1997.
- [25] Aliwell, S. R., M. Van Roozendaal, P. V. Johnston, et al. Analysis for BrO in zenith-sky spectra-An intercomparison exercise for analysis improvement[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107, D14, doi: 10.1029/2001JD000329.
- [26] Burrows, J. P., M. Weber, M. Buchwitz, et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission Concept and First Scientific Results[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999:151-175.
- [27] Bovensmann, H., Burrows, J. P., Buchwitz, M., et al. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999, 56:127-150.
- [28] 王晓熊. DOAS: 一种全新的空气监测仪器, 环境污染与防治[J], 1999, 21(增刊): 31-32.
- [29] 刘文清, 崔志成, 刘建国, 等. 大气痕量气体测量的光谱学和化学技术[J]. *量子电子学报*, 2004, 21(2):202-210.
- [30] 谢品华, 刘文清, 郑朝晖, 等. 差分吸收光谱(DOAS)技术在烟气 SO<sub>2</sub> 监测中的应用[J]. *光子学报*, 2000, 29(3): 272-275.
- [31] 周斌, 刘文清, 齐锋, 等. 差分吸收光谱法测量大气污染气体的研究[J]. *环境科学研究*, 2001, 14(5): 23-26.
- [32] 周斌, 刘文清, 齐锋, 等. 差分吸收光谱法测量大气污染的浓度反演方法研究[J]. *物理学报*, 2001, 50(9): 1818-1823.
- [33] 周斌, 刘文清, 齐锋, 等. 差分吸收光谱法测量大气污染的测量误差分析[J]. *光学学报*, 2002, 22(8):957-961.
- [34] 周斌, 郝楠, 陈立民. 夫朗和费线对差分光学吸收光谱法测量大气污染气体影响的研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(9).
- [35] 付强, 谢品华, 王瑞斌. DOAS 大气环境监测系统与传统点式采样监测法可比性研究[J]. *中国环境监测*, 2003, 19(2): 26-28.
- [36] 齐锋, 刘文清, 张玉钧, 等. 差分吸收光谱法测量大气痕量气体浓度误差分析及改善方法[J]. *光子学报*, 2003, 32(10).
- [37] 司福祺, 刘建国, 郑朝晖, 等. 差分光学吸收光谱系统中标准吸收截面数据处理方法研究[J]. *量子电子学报*, 2002, 19(6): 499-503.
- [38] 宋炳超, 刘文清, 张玉钧, 等. DOAS 谱线波长配准存在的问题及解决方法[J]. *量子电子学报*, 2003, 20(6): 680-684.
- [39] 章江英, 谢建平, 明海, 等. 用差分吸收光谱检测大气中的污染气体浓度[J]. *物理实验*, 2004, 24(8): 8-11.



- [40] 于意仲, 周小玉, 张帆, 等. 紫外差分光学吸收法测量污染气体的实验研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(5): 630-634.
- [41] 王萍, 陈洪滨, 吕达人. 地基曙暮光光谱观测反演平流层 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 柱含量[J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1067-1076.
- [42] Appel, B. R., A. M. Winer, Y. Tokiwa, et al. Comparison of Atmospheric Nitrous Acid Measurements By Annular Denuder and Differential Optical Absorption Systems [J]. Atmospheric Environment Part a-General Topics, 1990, 24 (3): 611-616.
- [43] Allan BJ, Carslaw N, Coe H, Burgess RA, et al. Observations of the nitrate radical in the marine boundary layer[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1999, 33 (2): 129-154.
- [44] M. Hausmann, U. Platt. Spectroscopic measurement of bromine oxide and ozone in the high Arctic during Polar Sunrise Experiment 1992 [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 25399-25413.
- [45] Platt U, Hausmann M, et al. Spectroscopic Measurement of the Free-Radicals NO<sub>3</sub>, BrO, IO, and OH In The Troposphere[J]. Research on Chemical Intermediates, 1994, 20 (3-5): 557-578.
- [46] Pfeilsticker K, Erle F, Platt U. Observation of the stratospheric NO<sub>2</sub> latitudinal distribution in the northern winter hemisphere [J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1999, 32 (1): 101-120.
- [47] W. Kuttler, T. Lamp, K. Weber. Summer air quality over an artificial lake [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 5927-5936.
- [48] George H. Mount, Brian Rumburg, Jeff Havig. Measurement of atmospheric ammonia at a dairy using differential optical absorption spectroscopy in the mid-ultraviolet [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36: 1799-1810.
- [49] F. Wittrock, R. Muller, A. Richter. Measurements of Iodine monoxide (IO) above Spitsbergen [J]. Geophysical Research Letters, 27: No.10: 1471-1474.
- [50] Aki Virkkula. Performance of a differential optical absorption spectrometer for surface O<sub>3</sub> measurement in the Finnish [J]. Arctic Atmospheric Environment, 1997, 31: 545-555.
- [51] Lizamma Mathew, Wu R. Tai, and Jiunn-Guang Lo. Measurements of sulfur dioxide and formaldehyde in Taipei using a differential optical absorption spectrometer [J]. Journal of The Air & Waste Management Association, 2001, 51 (1): 94-101.
- [52] D. Grossmann, G. K. Moortgat, M. Kibler. Hydrogen peroxide, organic peroxides, carbonyl compounds and organic acids measured at Pabstthum during BERLIOZ [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (D4): 8250.
- [53] D. Brocco, R. Fratarcangeli. Determination of Aromatic Hydrocarbons in Urban Air of Rome [J]. Atmospheric Environment, 1997, 31: 557-566.
- [54] 李莹. 地基 DOAS 观测反演的 NO<sub>2</sub> 柱总量与 SCIAMACHY 卫星 NO<sub>2</sub> 数据的比较及 NO<sub>2</sub> 时空分布研究[D]. 2006, 北京大学硕士论文.
- [55] 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究 [J]. 应用气象学报, 2002, 13: 136-143.

## 声 明

《气象》2008 年第 34 卷第 9 期第 28~33 页《利用低仰角扫描改进高山雷达低层回波探测能力浅析》一文, 资助单位: 灾害天气国家重点实验基金, 第一署名单位为“中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室”。