

中国大气环境光学探测研究

刘文清^{1,2}, 陈臻懿¹, 刘建国^{1,2}, 谢品华^{1,2}, 刘诚², 赵南京¹

1. 中国科学院 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要: 激光/波谱技术促进了大气立体监测技术的发展, 以光学探测和光谱数据解析为核心、以紫外、可见到红外全光谱为探测波段的各种高分辨率光学监测技术, 在中国逐渐实现了从近地面到100 km大气气象要素和大气痕量成分实时探测的能力, 以及近地面到50 km大气多要素的实验模拟能力。光学技术以高灵敏度、高分辨率、高选择性、多组分以及实时等优势, 在大气环境领域日益发挥作用, 为研究大气污染演变与气象过程相互作用、大气细粒子污染和光化学烟雾形成机理等基础科学问题研究提供数据支持, 为揭示城市和区域尺度的大气复合污染特征、量化其环境影响, 提供科技支撑。

关键词: 光学技术, 大气环境, 立体监测, 激光光谱, 遥感技术

中图分类号: P402/X513/O657.3 **文献标志码:** A

引用格式: 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 谢品华, 刘诚, 赵南京. 2016. 中国大气环境光学探测研究. 遥感学报, 20(5): 724-732

Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, Xie P H, Liu C and Zhao N J. 2016. Research progress on optical observations for atmospheric environment in China. Journal of Remote Sensing, 20(5): 724-732 [DOI:10.11834/jrs.20166229]

1 背景需求

地球大气环境是一个十分复杂的动态系统, 随着人类工业文明的不断发展, 从近地面的边界层到平流层的大气成分(包括痕量污染气体、温室气体、气溶胶等)均发生了巨大的变化, 对全球环境、气候变化产生深远的影响。大气气溶胶及其气态前体物、大气成分及环境要素分布在从大气边界层、对流层到平流层的垂直空间里, 具有十分显著的时间和空间变化特征以及典型的地理环境气候区域特征。通过各种技术手段观测认识全球大气污染现状, 预测其未来的变化, 研究大气成分变化对大气氧化能力、气候以及大气圈与生物圈相互作用的影响, 是大气环境科学研究的热点。大气环境科学研究的基本手段有外场观测、实验室模拟和数值模拟, 其中外场观测可以实时了解大气污染物浓度的时空分布和变化规律, 并为数值模拟和模式验证提供现场数据。

为了适应全球气候和环境变化研究对大气成

分和环境要素时空分布和时间演变资料的迫切需求, 欧美国家先后发展了一系列先进的主、被动多波段立体观测仪器, 并建成美国能源部大气辐射观测(ARM)、欧洲气溶胶研究激光雷达观测网(EARLINET)、德国BERDOM观测网等。通过采样和遥感手段, 获得了大量近地面采样、柱含量和垂直廓线信息, 这些数据通过质量控制和数据产品发布, 已经应用于全球气候和环境变化领域、卫星污染气体产品数据的校验及中、低纬度和极地内外污染气体的动态变化过程的观测中, 并发挥了巨大的作用。其中基于光学原理的遥感技术, 由于具有非接触、无采样、高灵敏度、大范围快速监测、遥感等特点, 成为国际上大气环境立体监测技术的主要发展方向之一。中国科学院等单位先后发展了大气颗粒物激光雷达探测、痕量气体多轴差分吸收光谱在线测量等关键技术设备, 构建了中国首个大气环境综合立体监测系统, 组织实施了中国典型城市大气环境综合外场

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-07-02; 优先数字出版日期: 2016-07-09

基金项目: 中国工程院咨询研究项目(编号: 2016-xy-26)

第一作者简介: 刘文清(1954—), 男, 中国工程院院士, 中国科学院安徽光学精密机械研究所所长, 研究方向为激光遥感、激光散射成像、新型环境监测仪器、有害痕量气体光学与光谱学监测技术等。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

观测, 获取了大量实验区大气污染高分辨时空变化信息, 弥补了常规业务监测网络在监测手段、监测内容和监测范围的不足。但总的来说, 中国大气环境立体监测评估方法、技术手段发展仍相对不足, 尤其是在大气成分时空分布、相互作用及其变化过程的定量化综合测量分析方面。因此, 必须加强大气污染物的高精度立体观测方法研究, 发展现代综合观测技术手段, 准确、客观地测算其时间空间的差异和相互影响。

2 技术进展

基于光学原理的大气环境在线监测技术是一种新兴技术, 该技术利用光学中的吸收光谱、发射光谱、光的散射以及大气辐射传输等方法进行环境污染的机理及监测研究。其中, 高分辨率的气体成分数据库是探测大气成分的基础, 图1是痕量气体在紫外—可见—红外—激光波段的特征光谱。目前国内已形成了以差分光学吸收光谱DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy)技术、可调谐半导体激光吸收光谱技术TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)、傅里叶变换红外光谱技术FTIR(Fourier Transform

Infrared spectroscopy)、激光雷达技术LiDAR(Light Detection And Ranging)、激光诱导击穿光谱技术LIBS(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)、非分光红外技术NDIR(Non-Dispersive Infra-Red)、光散射测量技术、荧光光谱技术、光声光谱技术等为主体的环境光学监测技术体系(Campbell 等, 2003; 2004; Müller 等, 2007; Groß 等, 2011; Cattrall 等, 2012; 徐晋 等, 2012; 袁松 等, 2013; 周敏强 等, 2015; Wang 等, 2015)。DOAS技术广泛用于紫外和可见波段范围, 监测标准污染物 O_3 、 NO_x 、 SO_2 和苯等, 测量的种类为对应于该波段的窄吸收光谱线的气体成分, 并对于大气中自由基 NO_3 和HONO的测量十分有效; FTIR技术比较适用于测量和鉴别大气成分、有机物或酸类以及温室气体; TDLAS技术根据波段可分为近红外光谱和中红外光谱, 近红外光谱选择在0.78—2.6 μm 的近红外区, 可以测量二氧化碳和甲烷, 而中红外光谱选择在3—13 μm 的“指纹”区, 铅盐和量子级联激光器可以测量一氧化二氮和其他温室气体。在实际运用中, 各种光谱技术之间相互借鉴, 许多光谱技术都采用DOAS分析方法, 或者采用激光雷达的差分测量方法, 另一些则融合了傅里叶变换光谱技术等。

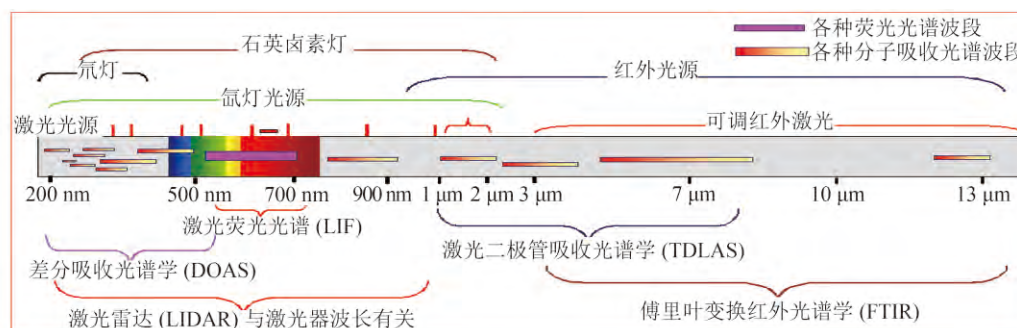


图1 环境光学监测技术基本分类图

Fig. 1 Basic classification for optical environment monitoring technology

2.1 地基遥感监测

(1)差分光学吸收光谱(DOAS)技术。差分光学吸收光谱技术(DOAS)是利用光线在大气中传播时, 各种气体分子在不同波段对光的特征吸收, 实现对气体定性、定量测量的一种光谱分析方法, 其系统及探测结果见图2。在20世纪80年代初, 德国海德堡大学环境物理研究所Ulrich Platt教授提出了差分光学吸收光谱(DOAS)的思想后,

DOAS技术广泛用于大气环境监测, 如利用DOAS技术首次探测到对流层中的HONO、OH自由基、 NO_3 自由基、BrO和ClO、平流层中的OCIO和BrO。2012年, 中国科学院联合淮北师范大学利用DOAS系统监测了合肥一周的大气 NO_3 自由基浓度(朱国梁 等, 2015); 2013年, 复旦大学采用长光程DOAS系统在上海城市区域开展了夜间 NO_3 自由基的检测(Wang 等, 2013), 结合相关辅

助参数分析,发现 NO_3 自由基主要是通过通过与 NO_2 反应生成的 N_2O_5 被间接清除。目前,DOAS技术得到了极大的发展,如采用人工光源(氙灯、氙灯等)的主动DOAS系统,用来测量近地面污染气体;采用太阳光、天空散射光作光源的被动DOAS,用来

研究大尺度(如平流层或全球范围)污染物浓度变化。地基、机载、星载DOAS系统在内的DOAS技术,已成为大气化学研究中不可缺少的工具(Wang等,2014)。

(2)傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)。傅里叶

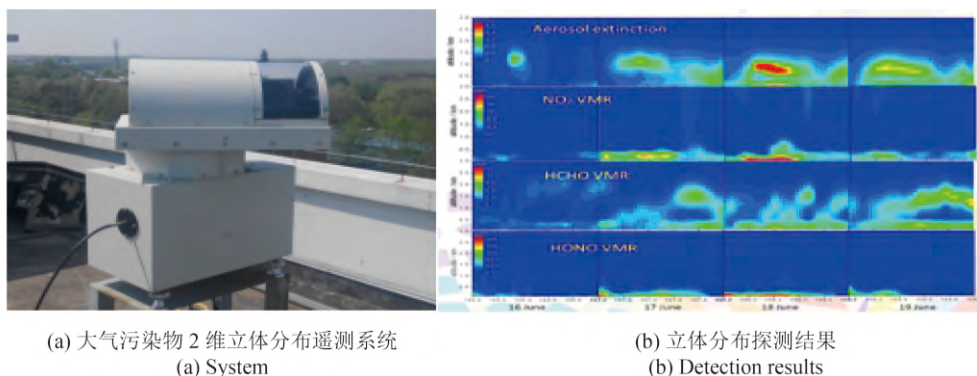


图 2 地基MAX-DOAS探测技术

Fig. 2 Ground-based Max-DOAS detecting technology

变换红外光谱技术是基于对干涉后的红外光进行傅里叶变换,通过测量干涉图和对干涉图进行傅里叶积分变换获得光谱图,从而对各种形态的物质进行定性和定量分析的一种技术。20世纪70年代发展起来的傅里叶变换红外光谱仪具有测量范围宽、测量精度和分辨率高以及测量速度快等优点(Hong等,2004; Harbeck等,2013)。不论何种形式的傅里叶变换红外光谱仪,它的主要结构都是由红外光源、光阑、干涉仪(分束器、动镜、定镜)、样品室、检测器以及各种红外反射镜、激光器、控制电路板和电源组成。核心部分为干涉仪,它将光源来的信号以干涉图的形式送往计算机进行傅里叶变换的数学处理,最后将干涉图还原成光谱图。根据系统光源配置的不同,它又可以分为单站式与双站式两种方式,双站式配置是指系统红外发射光源与FTIR接收系统分置在监测区域的两侧,单站式配置是指系统红外发射光源与FTIR接收系统设置在监测区域的同一侧(图3),在这种配置中,常使用角反射镜替代双站式配置中光源发射望远镜,通常角反射镜是一个角反射阵列或者用猫眼,相对于双站式架构,单站式方式可以获得比双站式系统长一倍的光程,同时只需要为系统提供一套电源,远处的角反射镜不需要配备电源和精确调整,而且可在一个测量场地的不同地点放置上多个反射器,就可以只用一台光谱仪实现多条路径的测量。

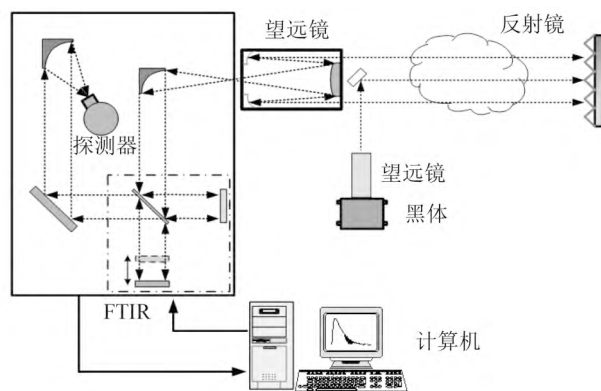


图 3 单站式长光程开放式FTIR系统

Fig. 3 Single-station type of open long-optical path FTIR system

(3)激光雷达探测技术(LiDAR)。激光雷达作为一种主动遥感的先进探测仪器,是传统雷达技术与现代激光技术结合的产物,通过接收激光经大气气溶胶散射后的回波信号,经限光光阑、滤光片、光电探测器、信号放大、数据等处理,可以获得目标物的时空分布图。自1960年世界上第一台激光器问世,激光技术便被迅速地应用于大气探测。依据光与物质的不同散射机制,激光雷达可以分为米散射(Mie)激光雷达、拉曼(Raman)激光雷达、多普勒(Doppler)激光雷达、差分吸收(DIAL)激光雷达以及共振荧光(fluorescence)激光雷达等。米散射雷达主要用于探测气溶胶和烟云等

颗粒粒状污染物,已被广泛应用于探测大气气溶胶、能见度、边界层的演变过程等(潘鹄等, 2010; Burton等, 2012; Rosenfeld等, 2014; Chen等, 2014); 拉曼激光雷达主要用于对大气中水汽的浓度、大气温度扩线、垂直大气消光扩线以及 CO_2 、 CH_4 和 SO_2 等污染气体的探测; 差分激光雷达是基于大气中的原子、分子对激光选择性吸收的机制, 利用气体分子对激光的吸收特性, 通过发射两束波长相近但气体吸收截面不同的激光束, 差分测量其后向散射信号强度, 对气体浓度检测具有极高的灵敏度和抗干扰能力; 共振荧光雷达采用激光与原子、分子产生共振荧光的机制, 来进行大气痕量成分的探测。基本测量思路是向大气中发射特定波长的激光束, 使得分子或原子激发共振荧光, 进而对荧光信号进行采集处理, 即可识别污染物质的种类并获得相应的浓度分布。图4是双波段(355/532 nm)偏振雷达结构图。

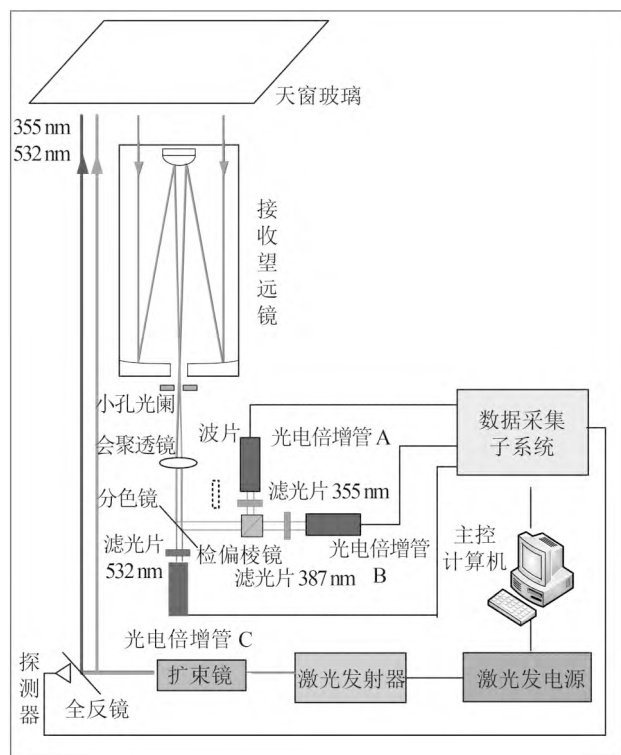


图4 双波段偏振激光雷达

Fig. 4 Dual-wavelength polarized LiDAR

(4) 可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)。TDLAS是利用可调谐半导体激光器的波长调谐特性, 用单一窄带的激光频率扫描通过气体分子的一条或者几条气体特征吸收线, 获得

被测气体的特征吸收光谱范围内的吸收光谱, 从而对污染气体进行定性或者定量分析。在大气痕量气体检测中, 一般需要和长光程吸收池相结合使用(图5)。TDLAS从信号检测方法上分为直接吸收、波长调制、频率调制和近几年发展起来的平衡探测技术, 从原理上讲平衡探测是属于直接吸收的探测方法, 而其灵敏度又比传统的直接吸收高得多, 并且可以与调制光谱技术相结合得到更高的检测灵敏度。TDLAS技术具有选择性好、灵敏度高、精度高、快速在线非接触测量、操作简单、不需要对样品进行任何的预处理的特点, 主要应用于分子结构的信息、分子动力学过程和痕量气体监测分析的研究(姚路等, 2015)。

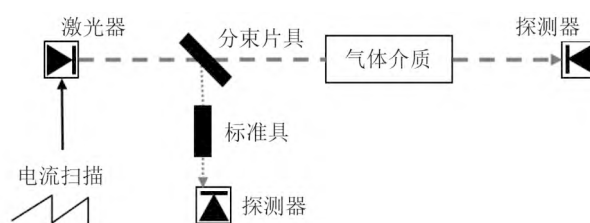


图5 可调谐半导体激光吸收光谱直接吸收测量方法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tunable diode laser absorption spectrum system

2.2 机载遥感监测

在地基遥感技术快速发展并逐渐成熟的基础上, 借助机载平台的大气环境遥感载荷也开始发展起来, 如美国大气和地球科学研究机构所装备的C-130、ER-2、湾流、麦道等大气综合探测飞机系统和欧洲的FAICON。基于机载平台可以实现快速、多组分同时测量, 能迅速捕捉地面污染排放热点, 并能对卫星数据进行对比和校验。如机载激光雷达技术针对云和气溶胶相互作用、污染区域、沙尘传输路径以及大气环境突发事件等热点问题探测, 可以解决星载激光雷达信噪比偏低的问题, 获得更高精度的探测数据, 从而成为星载激光雷达的有效补充, 机载激光雷达还可以作为星载大气探测设备的技术验证和数据对比平台。中国科学院安徽光机所最新研制的用于机载、可快速获取区域环境大气污染成份的环境大气成份探测系统, 包括机载激光雷达、机载差分

吸收光谱仪和机载多角度偏振辐射计,已在天津、唐山地区进行了飞行试验(图6),获取了大气气溶胶、云物理特性、大气成分、污染气体、颗粒物等大气成分有效信息。

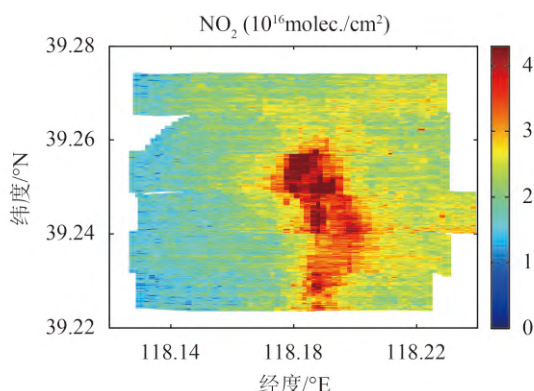


图6 机载探测污染源NO₂二维分布图像

Fig. 6 Airborne flight detection for NO₂ pollution source distribution

2.3 星载遥感监测

虽然地基遥感能够准确测量气溶胶的信息,但由于大气污染物的周期短、空间变化性大的特点,使得地基遥感对大区域范围气溶胶特性的监测略显不足。而卫星遥感范围广,时间周期短,可以覆盖全球,提供的信息可以弥补地基观测的不足,利用卫星资料反演大气痕量气体及气溶胶已经被认为是获得大区域大气成分光学特性、研究区域范围内的气溶胶变化趋势、评估其影响的主要方法,为探测大气气溶胶提供了新的手段。例如国际上最早用于气溶胶光学厚度反演的卫星传感器AVHRR具有一个5通道交叉轨道扫描的辐射计,1978年开始搭载于NOAA卫星上飞行,下午星用于反演海洋上空气溶胶光学厚度。近年来国外气溶胶研究主要采用以MODIS传感器为主的多光谱信息、MISR等传感器的多角度信息和POLDER等传感器的偏振信息来反演气溶胶特性(D'Angelo等,2016)。中国自行研发的覆盖240—710 nm、视场角114°的大气痕量气体差分吸收光谱仪载荷(图7),使对SO₂、NO₂、O₃、BrO、HCHO、HONO和气溶胶等多种成分的监测成为可能,并可以实现一天全球覆盖。

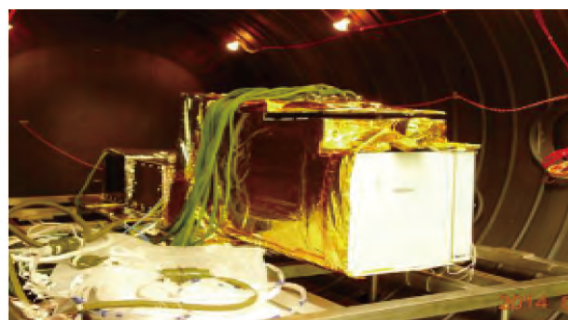


图7 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪

Fig. 7 Spaceborne difference absorption spectrometer

3 应用示范

3.1 立体时空分布

中国经济目前正处在高速发展期,光化学烟雾、霾污染、酸沉降等多种问题并存,大气污染成因十分复杂,并在气象条件的作用下形成城市间传输,使中国大气污染表现出明显的区域复合性污染特征。区域大气复合污染立体监测技术系统是以先进环境监测技术为核心,构建的多种大气复合污染时空分布综合立体监测系统,将固定点连续监测和典型过程流动加强监测相结合,地面监测与垂直测量相结合,地面遥测、航空遥测与卫星观测相结合,常规观测与高技术手段观测相结合,实现全方位的大气环境立体监测。中国科学院研发的多成分、多平台测量的立体监测系统(图8),可以用于探测颗粒物消光廓线垂直分布、污染气体(NO₂、SO₂等)对流层垂直柱浓度、VOCs等,并结合风场数据研究区域间污染输送影响。该立体监测系统已经成功地应用于上海世界博览会、广州亚洲运动会、南京青少年奥林匹克运动会、北京APEC(图9)等会议期间的空气质量监测,为环境管理部门提供了科学的数据资料。

图10是激光雷达对京津冀地区2015年冬季的一次污染过程的观测结果,观测期间,北京市区、北京近郊(门头沟)和天津三地的边界层高度最低值都降至0.3 km,其中门头沟污染最严重(0.217 km);气溶胶消光峰值出现在0.265 km高度,该高度处消光值0.89 km⁻¹,与地面均值0.93 km⁻¹差异不大,说明此污染期间污染物上下混合均匀,垂直结构不明显。比较三地的雷达观测结果,北京周边的污染高于北京市区,污染物难以向周边扩散,同时参考当日气象数据,在南风影响下,观

测到污染气团回流至北京市区，从而导致污染快速上升，说明此次污染属于中尺度范围的区域污染，三地污染源基本一致，主要来自北京南部低

空的短距离输送和西部长距离高空输送的混合，此外，外来输送比例较大，输送高度集中在0.5—0.8 km。

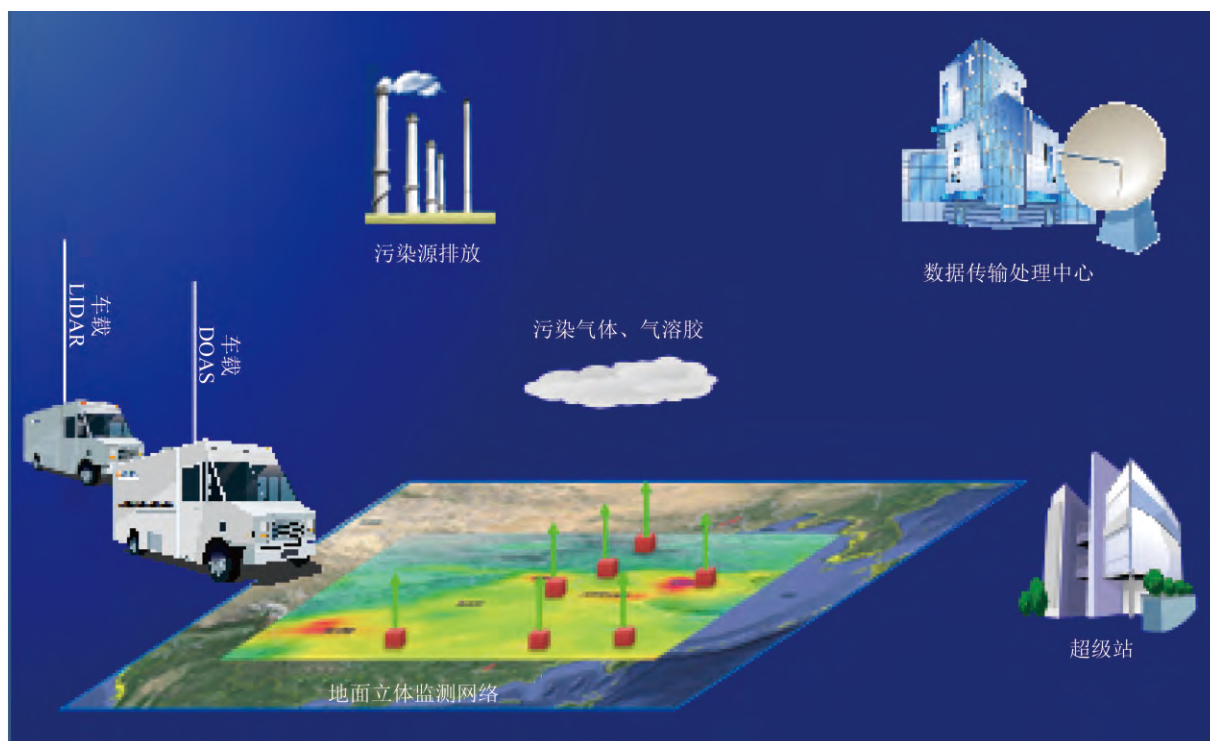


图 8 区域大气环境综合立体监测系统

Fig. 8 A comprehensive monitoring system for regional atmospheric environment



图 9 2014年APEC期间京津冀地区污染观测

Fig. 9 Pollution observation in Beijing-Tianjin-Hebei area during the 2014 APEC

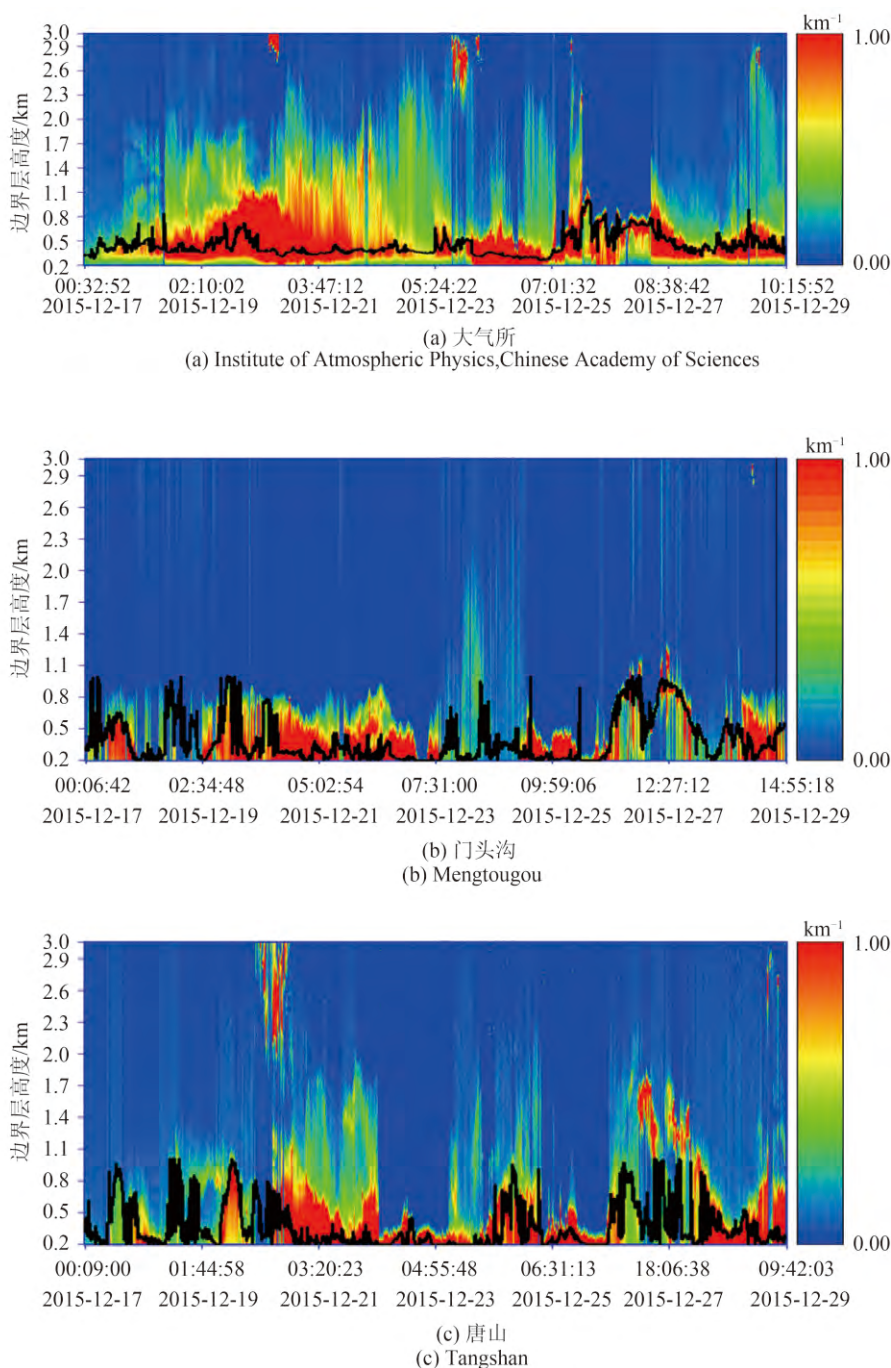


图 10 激光雷达观测2015年冬季京津冀地区气溶胶消光演变

Fig. 10 Aerosol extinction evolution observed by LiDAR in 2015 winter in Beijing-Tianjin-Hebei region

3.2 区域输送特征

2015年9月,车载DOAS观测了西南风场下西南方向 NO_2 对北京城区的传输,观测结果表明西南五环输送带宽度13.8 km,通量约0.93 kg/s。位于南五环地基DOAS监测 NO_2 垂直分布可以看出(图11),此次输送持续2.5 h,污染气团高度约700—900 m。

4 展 望

近年来,各类环境光学监测技术迅速发展,监测方法从常规的监测体系向理化、生物、遥感、应急等多种监测分析相结合的综合监测技术方向发展。监测组分不断增多,发展趋势是向多监测参数实时在线和现场、自动化、集成化和网络化等多功能自动化方向发展。中国目前在大气

环境监测单项技术已取得重要突破，初步形成了满足常规监测业务需求的技术体系。但是，中国自主研发的监测技术和设备，与大气复合污染形成过程监测的需要还有相当大的差距，如针对重霾污染形成机理研究的监测技术和手段不足，尚未建立完善的实验模拟和外场观测技术平台等。为此，一方面，急需研发具有自主知识产权的先进大气环境监测技术与设备，总体上向更高精度、更多成分、更大尺度、更适用、更智能，并由单一参数单一功能向多参数、多功能、集成化、自动化方面发展；另一方面随着半导体激光带宽变宽，调谐范围变大，光源之间的差别开始缩小，而当更多的红外探测器阵列被应用推广，各种光谱技术之间的界限也变得模糊，未来的环境监测将是各种测量技术的综合，包括地基的高塔和车载、机载、球载等机动测量用于城市环境监测，小型飞机和无人机以及星载仪器等用于全球环境监测。

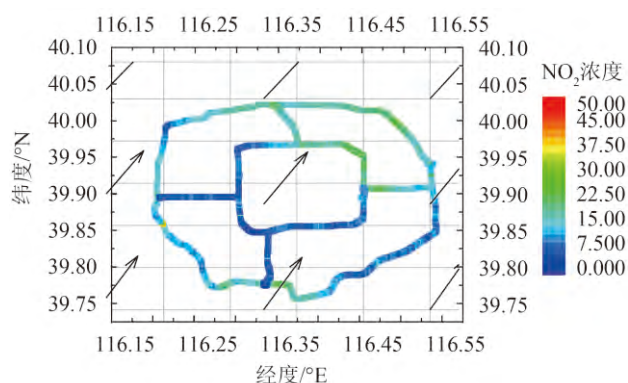


图 11 车载DOAS观测2015年北京五环NO₂柱浓度分布

Fig. 11 NO₂ concentration observed by mobile DOAS in the fifth ring of Beijing in 2015

参考文献(References)

Burton S P, Ferrare R A, Hostetler C A, Hair J W, Rogers R R, Obland M D, Butler C F, Cook A L, Harper D B and Froyd K D. 2012. Aerosol classification using airborne high spectral resolution Lidar measurements – methodology and examples. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5: 73–98 [DOI: 10.5194/amt-5-73-2012]

Campbell J R, Welton E J, Spinhirne J D, Ji Q, Tsay S C, Piketh S J, Barenbrug M and Holben B N. 2003. Micropulse lidar observations of tropospheric aerosols over northeastern South Africa during the ARREX and SAFARI 2000 dry season experiments. *Journal of Geophysical Research*, 108(D13): 8497 [DOI: 10.1029/

2002JD002563]

Cattrall C, Reagan J, Thome K and Dubovik O. 2012. Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios of key aerosol types derived from selected Aerosol Robotic Network locations. *Journal of Geophysical Research*, 110: D10S11 [DOI: 10.1029/2004JD005124]

Chen Z Y, Liu W Q, Heese B, Althausen D, Baars H, Cheng T H, Shu X W and Zhang T S. 2014. Aerosol optical properties observed by combined Raman-elastic backscatter lidar in winter 2009 in Pearl River Delta, south China, *J. Geophys. Res.*, 119(2):2335–2352

D'Angelo L, Rovelli G, Casati M, Sangiorgi G, Perrone M G, Bolzacchini E and Ferrero L. 2016. Seasonal behavior of PM_{2.5} deliquescence, crystallization, and hygroscopic growth in the Po Valley (Milan): implications for remote sensing applications. *Atmospheric Research*, 176–177: 87–95 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.02.011]

Groß S, Tesche M, Freudenthaler V, Toledano C, Wiegner M, Ansmann A, Althausen D and Seefeldner M. 2011. Characterization of Saharan dust, marine aerosols and mixtures of biomass-burning aerosols and dust by means of multi-wavelength depolarization and Raman lidar measurements during SAMUM 2. *Tellus B*, 63(4): 706–724 [DOI: 10.1111/j.1600-0889.2011.00556.x]

Harbeck S, Emirik Ö F, Gürol I, Gürek Z Z and Ahsen V. 2013. Understanding the VOC sorption processes on fluoro alkyl substituted phthalocyanines using ATR FT-IR spectroscopy and QCM measurements. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 176: 838–849 [DOI: 10.1016/j.snb.2012.08.020]

Hong D W, Heo G S, Han J S and Cho S Y. 2004. Application of the open path FTIR with COLISB to measurements of ozone and VOCs in the urban area. *Atmospheric Environment*, 38(33): 5567–5576 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.033]

Müller D, Ansmann A, Mattis I, Tesche M, Wandinger U, Althausen D and Pisani G. 2007. Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar. *Journal of Geophysical Research*, 112: D16202 [DOI: 10.1029/2006JD008292]

Pan H, Geng F H, Chen Y H, He Q S, Zhang H, Kang Y M, Mao X Q and Wang H Q. 2010. Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(11): 2164–2177 (潘鹄, 耿福海, 陈勇航, 贺千山, 张华, 亢燕铭, 毛晓琴, 王洪强. 2010. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程. *环境科学学报*, 30(11): 2164–2173)

Rosenfeld D, Andreae M O, Asmi A, Chin M, de Leeuw G, Donovan D P, Kahn R, Kinne S, Kivekäs N, Kulmala M, Lau W, Schmidt K S, Suni T, Wagner T, Wild M and Quaas J. 2014. Global observations of aerosol-cloud-precipitation-climate interactions. *Reviews of Geophysics*, 52(4): 750–808 [DOI: 10.1002/2013RG000441]

Wang F, Wu Q, Huang Q X, Zhang H D, Yan J H and Cen K F. 2015. Simultaneous measurement of 2-dimensional H₂O concentration and temperature distribution in premixed methane/air flame using

- TDLAS-based tomography technology. Optics Communications, 346: 53–63 [DOI: 10.1016/j.optcom.2015.02.015]
- Wang S S, Shi C Z, Zhou B, Zhao H, Wang Z R, Yang S N and Chen L M. 2013. Observation of NO₃ radicals over Shanghai, China. Atmospheric Environment, 70: 401–409 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.01.022]
- Wang Y, Li A, Xie P H, Wagner T, Chen H, Liu W Q and Liu J G. 2014. A rapid method to derive horizontal distributions of trace gases and aerosols near the surface using multi-axis differential optical absorption spectroscopy. Atmospheric Measurement Techniques, 7: 1663–1680 [DOI: 10.5194/amt-7-1663-2014]
- Xu J, Xie P H, Si F Q, Li A and Liu W Q. 2012. Determination of tropospheric NO₂ by airborne multi axis differential optical absorption spectroscopy. Acta Physica Sinica, 61(2): 024204 (徐晋, 谢品华, 司福祺, 李昂, 刘文清. 2012. 机载多轴差分吸收光谱技术获取对流层NO₂垂直柱浓度的研究. 物理学报, 61(2): 024204)
- Yao L, Liu W Q, Liu J G, Kan R F, Xu Z Y, Ruan J and Dai Y H. 2015. Research on Open-Path Detection for Atmospheric Trace Gas CO Based on TDLAS. Chinese Journal of Lasers, 42(2): 305–312 (姚路, 刘文清, 刘建国, 阚瑞峰, 许振宇, 阮俊, 戴云海. 2015. 基于TDLAS的长光程环境大气痕量CO监测方法研究. 中国激光, 42(2): 305–312)
- Yuan S, Kan R F, He Y B, Yao L, Chen J Y, Xu Z Y, Li H, Ruan J, He J F and Wei M. Laser temperature compensation used in tunable diode laser absorption spectroscopy, Chinese Journal of Lasers, 40(5): 0515001-1–0515002-6 (袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 姚路, 陈玖英, 许振宇, 李晗, 阮俊, 何俊峰, 魏敏. 2013. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿. 中国激光, 40(5): 0515001-1–0515002-6)
- Zhou M Q, Zhang X Y, Wang P C, Wang S P, Guo L L, Hu L Q. 2015. XCO₂ satellite retrieval experiments in short-wave infrared spectrum and ground-based validation. Science China: Earth Sciences, 58: 1191–1197 (周敏强, 张兴赢, 王普才, 王舒鹏, 郭丽莉, 胡列群. 2015. 二氧化碳柱浓度的卫星反演试验及地基验证. 中国科学: 地球科学, 45(6): 856–863) [DOI: 10.1007/s11430-015-5080-z]
- Zhu G L, Hu R Z, Xie P H, Chen H, Qin M, Fang W, Wang D and Xing X B. Calibration system for OH radicals based on differential optical absorption spectroscopy. Acta Phys. Si, 64(8): 080703 (朱国梁, 胡仁志, 谢品华, 陈浩, 秦敏, 方武, 王丹, 杏兴彪. 2015. 基于差分光学吸收光谱方法的OH自由基定标系统研究. 物理学报, 64(8): 080703)

Research progress on optical observations for atmospheric environment in China

LIU Wenqing^{1,2}, CHEN Zhenyi¹, LIU Jianguo^{1,2}, XIE Pinhua^{1,2}, LIU Cheng², ZHAO Nanjing¹

1. Key Laboratory of Environmental Optical and Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: The constantly developing laser/spectrum technology has promoted the development of atmospheric stereoscopic monitoring technology. With optical detection and spectral data analysis at the core, various high-resolution optical monitoring technologies with ultra-violet-visible light-infrared "full spectra" as detection bands, the real-time monitoring of meteorological elements and atmospheric trace constituents from near-surface to 100 km, and the experimental simulations of atmospheric multi-factors from near-surface to 50 km have gradually developed in China. With its numerous advantages, such as high sensitivity, high resolution, high selectivity, multiple component, and provision of real-time data, optical technology plays an increasingly important role in the field of atmospheric environment in China. It provides data support for the research into basic scientific issues, such as the interaction between the evolution of atmospheric pollution and meteorological processes, the formation mechanism of atmospheric fine particle pollution and photochemical smog, and the interaction between atmospheric aerosol and cloud microphysical processes. Optical technology also offers technical support to reveal the formation mechanisms of combined atmospheric pollution and to quantize their environmental influence at urban and regional scales in China.

Key words: environmental optics, atmospheric environment, stereoscopic monitoring, laser spectroscopy, remote sensing technology

Supported by Chinese Academy of Engineering Consulting Project (No. 2016-xy-26)