



我国大气环境立体监测技术及应用

刘文清^{①②}, 陈臻懿^{①*}, 刘建国^{①②}, 谢品华^{①②}

① 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031;

② 中国科技大学环境科学与光电技术学院, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: zyichen@aiofm.ac.cn

2016-05-09 收稿, 2016-07-04 修回, 2016-07-06 接受, 2016-09-22 网络版发表

摘要 大气环境是一个十分复杂的动态系统, 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, 影响着空气质量、气候变化. 提高大气环境的监测技术水平, 发展遥感观测手段, 实现对大气环境的在线、快速、立体探测, 对于了解大气中各种成分的动态变化过程、源汇机制以及其对环境、气候的影响等具有重要意义. 近年来, 日新月异的激光/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的各种立体监测技术以高灵敏度、高分辨率、高选择性、多组分以及实时等优势在大气、环境、气象、空间、遥感以及军事领域得到了广泛的应用. 通过光与大气中物质相互作用产生的吸收、散射、发射等过程, 形成了多种探测技术, 实现了对大气痕量气体、大气气溶胶、温室气体、大气风场、水汽、温度以及多种大气污染成分的快速、实时探测, 并通过光波的遥感特性, 在地基、车载、机载及星载多平台上对大气多种成分、大气参数进行多尺度的探测.

关键词 立体监测, 环境光学, 大气环境

自工业文明以来, 从近地面的边界层到平流层的大气成分(痕量气体、温室气体、气溶胶等)发生了显著变化, 这些变化对空气质量、气候变化产生深远的影响. 中国目前面临着复合性、区域性大气污染问题^[1], O_3 和细颗粒物浓度较高, 成为可持续性发展的瓶颈. 大气环境污染物的形成、转化、输送和演变过程具有极强的时空相关性, 治理大气环境污染的重点和难点是如何有效控制细颗粒物和 O_3 的浓度以及其重要的相关前体物, 如 NO_x , VOCs, CO, SO_2 , NH_3 等. 大气环境研究的基本手段有外场观测、实验室模拟和数值模拟. 其中外场立体观测是大气环境研究的基础, 不仅可以实时地了解大气污染物浓度的时空分布和变化规律, 从中找出化学转化机制和相互关系, 为模式验证取得现场数据, 而且由于大气环境过程复杂, 在现场观测的基础上, 立体观测结合模式

计算能够了解污染物在环境中的分布和变化趋势, 进而开展预测和评估. 因此, 如何利用先进的大气探测技术来满足在高灵敏、高分辨时空分布、多组分排放、跨区域传输、过程演变等方面的监测需求, 为模型计算、卫星校正等提供准确、实时的有效数据, 是研究区域大气复合污染形成的物理化学机制和大气污染防治的基本要求, 也是全面掌握大气污染状况、发展态势和环境管理的支柱.

目前用于大气环境污染监测的技术主要有光学技术、质谱技术和色谱技术等. 其中基于光学原理的在线立体监测技术, 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, 是国际上环境立体监测技术的主要发展方向之一. 国际上欧美等发达国家先后发展了一系列先进的主被动、多波段立体观测技术及仪器, 并建立了多个大气成分探测和

引用格式: 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 我国大气环境立体监测技术及应用. 科学通报, 2016, 61: 3196~3207

Chen Z Y, Liu W Q, Liu J G, et al. Stereoscopic monitoring technology and applications for the atmospheric environment in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3196~3207, doi: 10.1360/N972016-00394

环境要素物理化学性质三维分布的观测系统及网络,如大气成分变化监测网络(NDACC)、全球气溶胶监测网络(AERONET)、欧洲气溶胶雷达观测网(EARLINET)、美国能源部大气辐射观测网(ARM)、德国对流层大气观测网(BERDOM)等。目前我国已经拥有了比较完善的地面气象、环境观测网,中国气象局、国家环保部和中国科学院等单位也建立了一些大气成分、大气辐射及空气质量等的观测台站,但基本上是以地面参数和整层总量参数观测为主,分布在全国的气象探空站(网)也以温、压、湿、风等常规气象参数探空测量为主要业务。近年来,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,构建了我国首个大气环境综合立体监测系统,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。同时地面立体观测网也已开始起步,如“江淮大气环境立体探测研究(示范)网”已在无锡、上海、合肥、岳西、厦门、铜陵等建立站点并连续运行,开展长期的区域大气环境监测。但总的来说,我国大气环境立体监测评估方法、技术手段发展都需要进一步的提升,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,大气污染物的高精度立体观测方法研究和现代综合观测技术手段的发展,依然是研究的重点。

1 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,结合了环境科学、大气光学、光谱学等学科,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研究环境污染的机理及监测防治技术,图1是痕量气体在紫外-可见-红外-激光

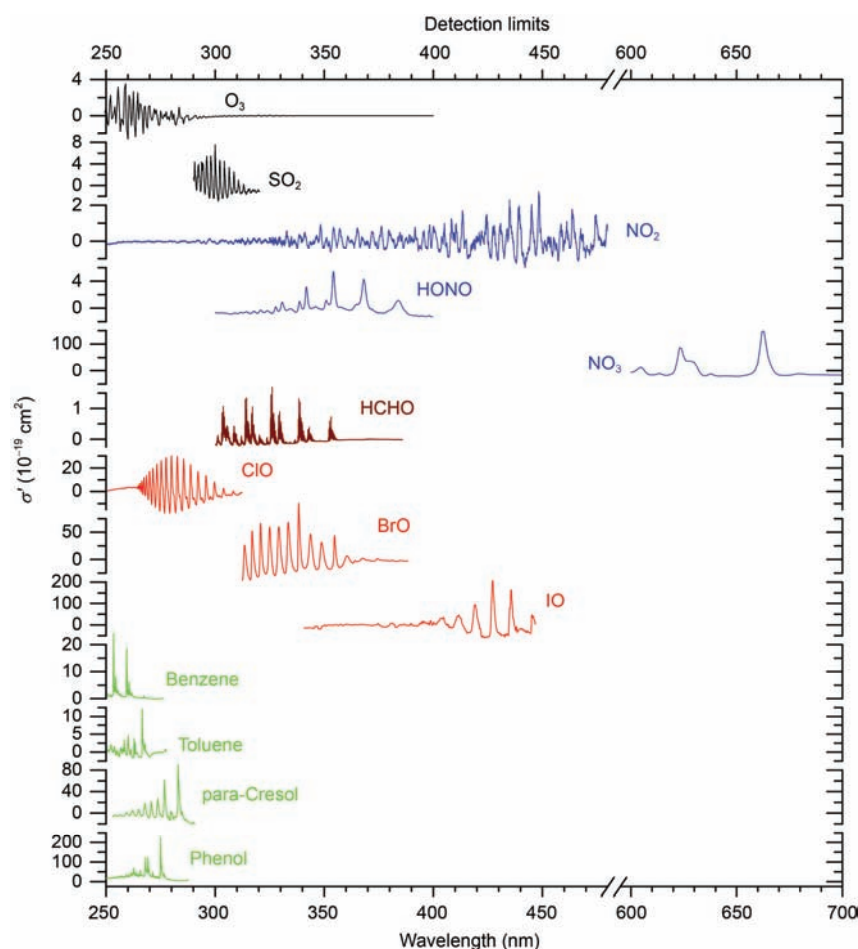


图1 痕量气体在紫外-可见波段的特征光谱

Figure 1 Trace gases absorbing characteristic spectrum in ultraviolet-visible wavelength

波段的特征光谱例子, 光谱特征数据库是发展环境监测技术的基础, 光谱数据分析方法是能否成功研发环境监测仪器设备的核心. 目前国内已形成了以差分光学吸收光谱(DOAS)技术、可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术、傅里叶变换红外光谱(FTIR)技术、非分光红外(NDIR)技术、激光雷达技术、光散射测量技术、荧光光谱技术、激光诱导击穿光谱(LIBS)技术、光声光谱技术等为主体的环境光学监测技术体系^[2~9]. 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, 并对大气中自由基 NO_3 和HONO的测量十分有效. FTIR技术特别适用于测量和鉴别污染严重的大气成分、有机物或酸类以及温室气体. 如果测量一种或二种有毒气体, 采用TDLAS技术, 可以发挥其光谱分辨率、响应快、成本低等优点. 激光雷达技术具有高空间分辨率、高测量精度等优点, 可用于污染物浓度立体分布和输送通量测量. 当然, 还有许多其他高灵敏的环境光学监测技术, 如光散射技术、激光质谱技术、激光诱导荧光技术和光声光谱技术等, 在实际场合中应视具体的应用目标来确定测量技术. 此外, 为更好地进行多尺度的大气环境探测, 可借助不同平台, 在地基、车载、机载及星载多平台上对大气颗粒物及多种污染气体进行立体监测.

1.1 地基遥感监测

(i) 污染气体监测技术. 地基大气成分遥感探测技术主要有被动差分吸收光谱技术(DOAS)、被动傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)、多波段光度计遥感、微波辐射计遥感等. 被动DOAS技术通过探测太阳散射光谱, 结合不同气体的特征吸收截面, 利用最小二乘法反演各种痕量气体的浓度信息. 目前中国科学院安徽光学精密机械研究所在国内率先开展了主动DOAS技术、地基被动DOAS技术(MAX-DOAS和车载多动DOAS)以及机载和星载DOAS技术的研究. 大气环境空气质量的主动DOAS监测技术研究, 可以实现对大气环境一次污染物(SO_2 , NO_2 等)、自由基及其前体物(NO_3 , OH, HONO, HCHO等)和针对污染源有毒有害气体(H_2S , Cl_2 , 苯系物, SO_2 , NO_2 等)多种成分的快速在线探测. 地基MAX-DOAS是一种大气痕量气体和气溶胶垂直总量及分布探测的新技术, 以散射太阳光作为光源, 通过天顶及多个离轴方向

对穿越大气层的散射太阳光谱(紫外/可见)进行探测, 这些光谱包含了痕量气体、气溶胶、云的吸收、发射和散射等信息^[10]. 由于增加了多个离轴(近地面低仰角)探测方向, 对低层大气探测更为灵敏, 通过被动差分吸收光谱的解析方法并结合大气辐射传输模型, 能够获得对流层痕量气体的垂直柱浓度以及垂直分布信息, 特别是对边界层非常敏感, 可用于卫星数据的地基校验和化学模型的校验. 地基多轴DOAS(MAX-DOAS)技术(图2)还可部署在具有区域代表性的地点或区域污染输送通道, 从而掌握区域大气的柱浓度分布以及廓线信息, 并了解区域大气的输送状况. 相比卫星观测而言, 地基多轴DOAS技术具有更高的时间和空间分辨率. 目前中国科学院安徽光学精密机械研究所已在中国东部地区建立了MAX-DOAS观测网. 王杨等人^[11]在2013年研究了地基MAX-DOAS反演对流层 NO_2 垂直廓线和垂直柱浓度的方法, 利用非线性最优估算法反演得到了对流层 NO_2 廓线, 特别在近地面反演精度达到了0.6%, 并与主动DOAS进行了对比, 相关系数达到了0.76. 王杨等人^[12]在2014年研究了多地基MAX-DOAS的云和气溶胶类型鉴别方法, 最终形成了MAX-DOAS技术的云和气溶胶类型鉴别方案. 利用该鉴别方案, 统计分析了相关阶段的MAX-DOAS观测结果. 此外, 近来发展较快的宽带腔体增强差分吸收光谱(CE-DOAS)技术可以用于自由基及其前体物的相关大气化学研究, 目前国内对实际大气 NO_2 和HONO的探测灵敏度分别达到0.2和0.1 ppb(1 ppb=1 ng/g, 余同), 这对研究HONO形成途径, 特别是 NO_2 非均相反应对HONO形成的贡献研究具有重要的意义.

傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)是基于对干涉后的红外光进行傅里叶变换的原理而开发的红外光谱分析技术^[13]. 图3给出了一台典型的基于迈克尔逊干涉仪的FTIR光谱仪的原理简图. 当一束来自光源S的辐射经准直透镜L1成为平行光进入干涉仪后, 首先被分束器P分成方向相互垂直的两束, 向上反射的一束光在定镜M1上反射折回, 再透过P并穿过样品区A后由L2会聚于探测器D; 透过P的另一束光射向动镜M2, 并从M2返回后经P反射, 也穿过样品区A后会聚于探测器D上. 显然, 在探测器上将两个具有一定时间位移的光波将发生干涉, 其总光强依赖于两束光的光程差 $\Delta(=2d)$. 由于干涉效应, 探测器探测到的是干涉光的强度信号, 干涉图是光程差的函数, 光

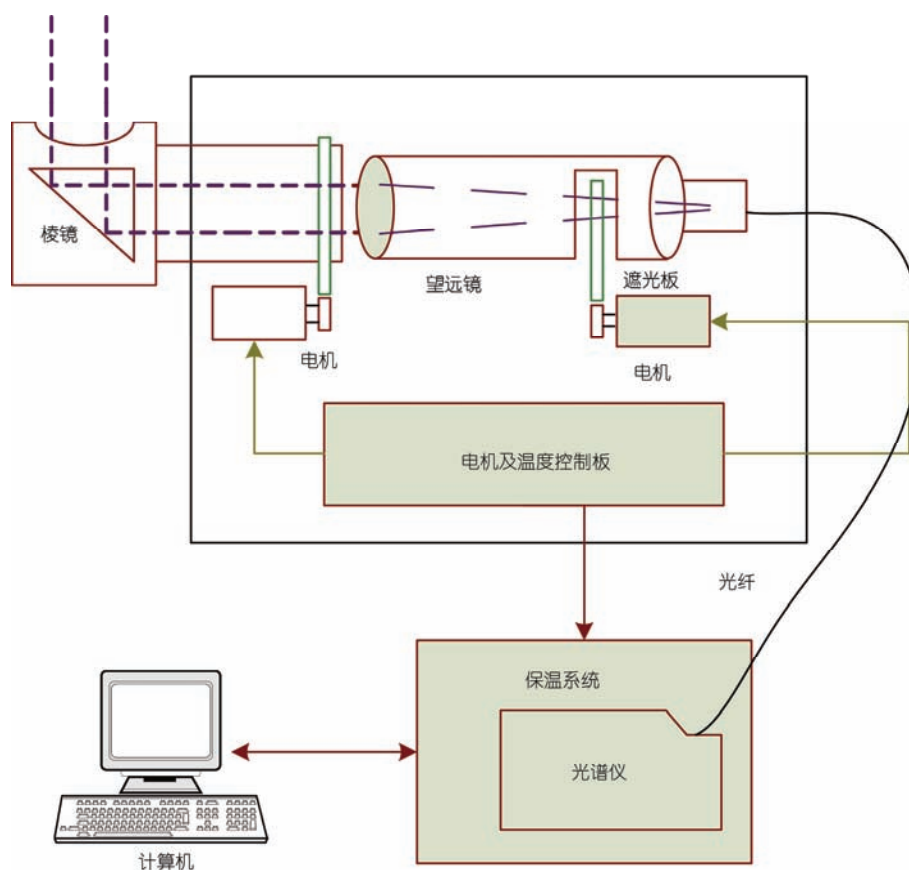


图2 地基MAX-DOAS探测技术

Figure 2 Ground-based MAX-DOAS for trace gas monitoring

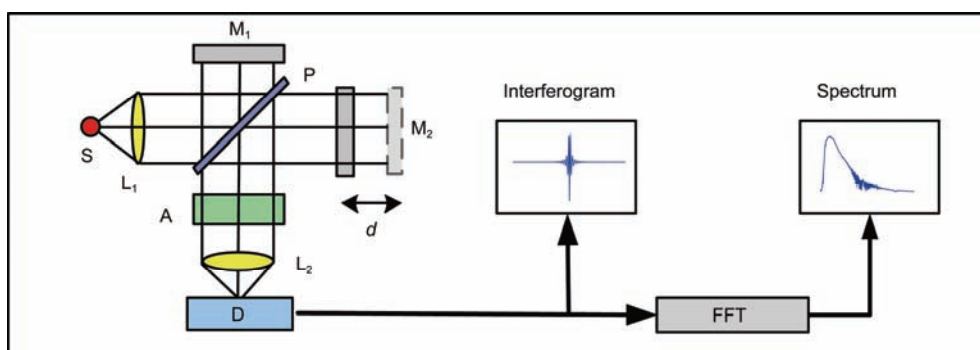


图3 傅里叶变换红外光谱仪原理图

Figure 3 On-site FTIR system for VOCs monitoring

谱是波数 ν 的函数,通过傅里叶变换可以实现干涉图和相应光谱的相互转换.在环境监测领域,根据系统光源配置的不同,开放光路傅里叶变换红外光谱仪可以分为单站式与双站式两种方式.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,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,而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.傅里叶变换红外光谱仪目前已得到全面的发展,使用方法几乎适应各类物质的检测分析,具体方法包括衰减全反射、漫反射法、光声光谱法、动态光谱法

(动力学法)、光谱仪与各种仪器联用等. 红外光谱法通常作为分析各种聚合物材料最佳选择的技术, 是今后发展的重要方向之一.

(ii) 颗粒物监测技术. 激光雷达(LIDAR)作为一种主动遥感的先进探测仪器, 其原理如图4, 利用激光对大气光学、物理特性、气象参数进行连续的高时空分辨率的精细探测, 在探测高度、时空分辨率、长期连续高精度监测等方面具有独特优势, 被广泛应用于激光大气传输、全球气候预测、气溶胶气候效应等大气科学和环境科学研究领域. 根据光与物质的不同散射机制, 激光雷达类型多样, 但激光雷达的. 近年来硬件设备和算法的改进方面得到了进一步发展, 提高了气溶胶成分的探测精度、进一步降低了探测盲区, 并在沙尘暴、灰霾探测中得到了应用. 2013年范广强等人^[14]研制了一套差分吸收雷达对合肥晴空无云典型日和沙尘过程中臭氧的浓度变化进行了观测; 2014年吕立慧等人^[15]利用微脉冲雷达进行垂直和水平方向的能见度算法研究和数据比对; 2014年Chen等人^[16]利用激光雷达资料分析珠江三角洲气溶胶光学特性, 利用Raman-Mie激光雷达测量了广东中山上空的对流层大气气溶胶的光学特性. 随着激光雷达的新技术(包括激光光源、发射与接收光学、信号探测与采集等单元)的发展, 数据处理和反演的新方法也在不断地提出, 比如激光雷达从具有单一波长单一探测功能向具有多波长多探测功能的方向发展, 由仅能夜晚探测向白天夜晚均可以连续探测发展, 以及由实验室研究型的仪器向商业化产品型的设备转化. 这些新技术和新方法使激光雷达探测大气的跨度范围不断地延伸, 探测的时间分辨

率以及探测大气的功能与精度等都在不断地提高. 为了满足气象、气候与环境研究的需求, 获得区域性的大气参数三维空间的分布特征, 国际激光雷达界近几年来陆续建立了若干区域性大面积空间覆盖的地基激光雷达观测网^[17,18]. 此外, 激光雷达平台的扩展从地基、车载发展到机载和星载, 也在扩展着激光雷达的应用范围, 使大气参数的探测范围从局地单点扩大到一个区域乃至全球.

颗粒物另一种监测技术为宽粒径谱多道快速分析技术. 传统的光散射测量方法一般只能测量 $0.3\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒物粒径谱, 并且容易受到颗粒物的形状和折射率等因素的干扰. 采用飞行时间测量方法和电子学时间多道分类存储技术, 可以实现 $0.5\sim 20\ \mu\text{m}$ 范围内颗粒物空气动力学粒径谱的准确测量, 并实时获得 $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_1$ 质量浓度, 通过自动控制电迁移内电极负电压的方式实现纳米级粒子粒径在线分级, 结合凝结核粒子计数技术完成 $5\ \text{nm}\sim 1\ \mu\text{m}$ 范围内颗粒物电迁移粒径谱的测量. 若将电迁移粒径与空气动力学粒径有效融合, 可以实现 $5\ \text{nm}\sim 20\ \mu\text{m}$ 范围内大气细颗粒物粒径谱的多道快速测量(图5), 为大气细颗粒物增长过程研究提供了重要的测量手段.

1.2 车载测量技术

在存在主导风向的天气下, 如果将监测系统装载于车上, 围绕某一区域周围测量, 结合气象仪器提供的风速、风向信息, GPS系统提供测量点的经纬度位置信息, 通过计算就可以监测出该区域的有害气体排放通量. 车载测量技术通常有两种监测模式: 闭合路径监测模式(图6(a))和下风口监测模式(图6(b)).

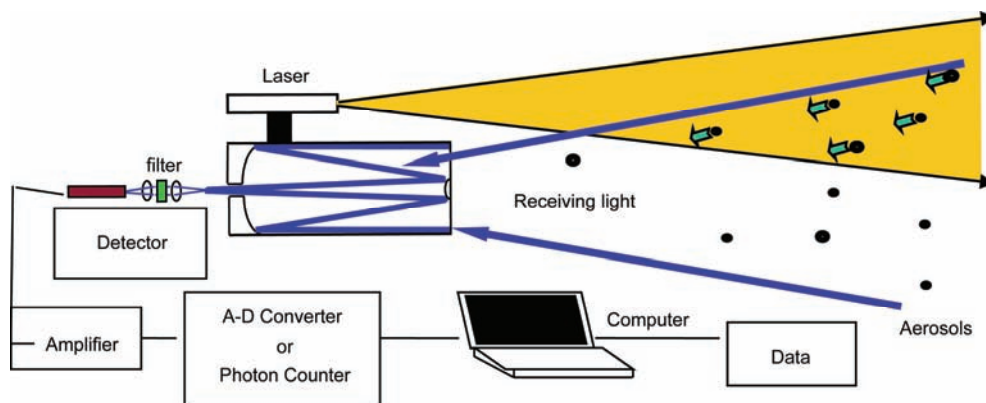


图4 激光雷达原理

Figure 4 Lidar for aerosols monitoring

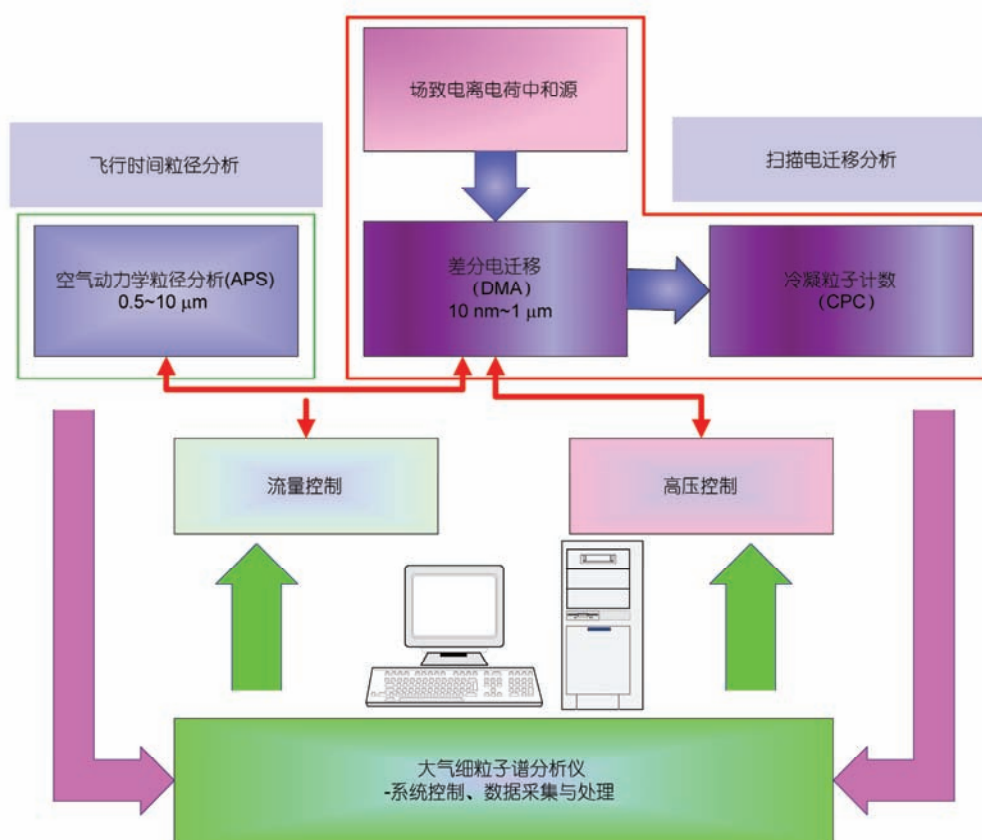


图5 宽范围粒径谱分析技术

Figure 5 Wide range of particle size spectrum analysis technology and measurement results

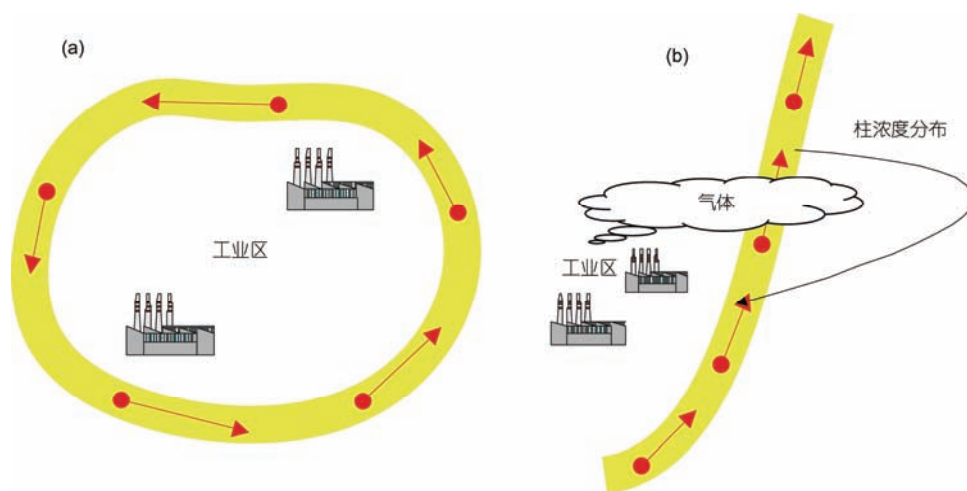


图6 车载测量技术. (a) 闭合路径监测模式; (b) 下风口监测模式

Figure 6 Emission flux measurement for closed path monitoring mode (a) and downwind monitoring mode (b)

当工业区周围有监测车可以通过的闭合路径时可以采用闭合路径监测模式, 该方式测量到的工业区有害气体排放通量更准确. 当工业区周围没有监测车

可以通过的闭合路径时, 如果风速较大且比较稳定, 工业排放气体几乎都被吹到下风向, 此时可以采用下风口监测模式, 监测到的有害气体的排放通量可

以近似为工业区的排放通量. 实际车载测量中, 出于精确测量气体扩散场的考虑, 需要根据车载的风速仪实测地面风速来估算风廓线, 利用经验公式并考虑烟羽扩散模式.

1.3 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, 借助于机载平台的大气环境遥感载荷也开始发展起来. 需要建立大气环境立体探测的空中实验平台, 包括飞艇、飞机、气球以及无人机等的遥感监测实验系统, 实现多时空尺度全面长期连续监测与数据积累, 逐步形成对大气系统的立体、动态监测分析能力. 开展大气不同高度的大气物理化学过程研究, 以及从区域尺度到全球尺度的系统观测测量研究. 如美国大气和地球科学机构所装备的C-130, ER-2, 湾流和麦道等大气综合探测飞机系统, 欧洲的FAICON.

2014年, 一种用于机载、可快速获取区域环境大气污染成分的环境大气成分探测系统, 历时4年在中国科学院研制成功. 该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, 在获取大气气溶胶、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上可以相互补充、共同描述大气环境实时状况. 机载差分吸收光谱技术通过探测地物的反射光谱, 利用差分吸收光谱技术获得污染气体的区域分布信息. 基于机载平台可实现快速、多组分同时测量, 能及时迅速地捕捉地面污染排放热点, 并能对卫星数据进行对比和校验. 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. 目前初步的飞行实验结果表明, 机载激光雷达采用的关键技术符合航空平台关于体积、重量、功耗以及环境适应性的要求, 利用激光雷达的主动探测能力, 结合机上同时搭载的被动遥感仪器, 将实现国家关注的大气成分及其环境要素的科学实验研究目标.

1.4 星载遥感监测

卫星遥感技术以其独特的全球覆盖、快速、多光

谱、大信息量的特点在环境监测领域具有无可比拟的优势. 根据不同化学物质的吸收特性反演大气主要化学物质的浓度及分布状况, 如TOMS, MODIS, OMI, SCHIMACHY, GOMEII等卫星资料, 正被广泛地应用到全球大气化学物质的研究中. 卫星遥感资料能较好地反映整层大气的平均状况, 应用于污染物的水平分布、输送以及排放研究.

为满足多种气体监测、一天全球覆盖等要求, 中国科学院安徽光学精密机械研究所研发了覆盖240~710 nm、视场角114°的大气痕量气体差分吸收光谱仪载荷, 紫外-可见波段的覆盖使对SO₂, NO₂, O₃, BrO, HCHO, HONO和气溶胶等多种成分的监测成为可能, 实现一天全球覆盖, 相关技术参数见表1. 载荷采用4通道凸面光栅成像光谱仪设计, 解决了高分辨率光谱仪杂散光抑制等难题, 其光谱分辨率达0.3~0.5 nm, 突破了宽视场/高分辨率光谱成像技术、在轨光谱高稳定度技术及在轨高精度紫外定标等关键技术. 目前载荷处于正样研制阶段, 计划2016年发射.

2 应用示范

利用立体监测技术可以监测大气环境污染物质, 确定它们的浓度, 判断它们是否超过环境保护的有关规定, 并可以用这些信息通过闭路反馈系统控制生产过程, 对环境污染进行监测、控制和治理, 目前已被广泛应用于环境空气质量监测、污染源烟气排放监测、雾霾时空分布监测、区域排放通量监测、交通排放现场监测、生态系统温室气体排放等方面.

2.1 雾霾过程时空分布监测

细粒子雷达通过直接观测对流层范围内细粒子的空间分布和时间演化, 监测真实大气中的污染过

表1 参数对比

Table 1 Comparison of parameters

技术参数	大气痕量气体差分 吸收光谱仪	OMI
光谱范围	240~710 nm (470 nm)	270~500 nm (230 nm)
光谱分辨率	0.3~0.5 nm	0.45~0.64 nm
总视场	114°(交轨)	114°(交轨)
空间分辨率	<48 km(垂直于轨道) ×13 km(沿轨方向)	24 km(垂直于轨道) ×13 km(沿轨方向)
量化等级	14 bit	12 bit

程,了解对流层尺度灰霾与光化学烟雾的污染状况,取得准确的污染物种类和来源,为分析灰霾过程引起的颗粒物形态和光学性质的变化提供科学数据.图7和8分别为激光雷达观测的气溶胶消光系数和退偏比垂直特性时空分布图,由测量结果可以看出,2011年11月14日0.7 km以下开始出现污染颗粒物,至15~16日中午开始出现大面积污染区域,API指数也骤然从几天前的60升高至111,为轻型污染,消光系数变大.在0.2~0.9 km处,消光系数值主要集中在 $0.5\sim 0.8\text{ km}^{-1}$ 范围内,退偏比值集中在0.1~0.2之间,主要表现为局地污染.

2.2 区域及化工园区污染排放监测

图9是采用车载DOAS于2013年6~7月获得华北地区(北京、保定、沧州、德州、济南、石家庄)的 NO_2 和 SO_2 的时空分布图,观测结果显示区域污染分布及

区域污染输送通道主要来自沿太行山脉由南向北的输送,导致来自河北、河南等的污染物(SO_2 等)输入至北京,易形成大面积的区域灰霾.

不仅从地基平台上观测污染物的排放及通量,机载平台可以快速获取区域环境大气污染的排放和分布,如图10采用机载差分吸收光谱仪(DOAS),在天津、唐山地区进行了飞行试验,监测了来自于工业源排放的 NO_2 烟羽及其扩散过程.

对化工企业生产装置开停工的放空排放,是VOCs的主要排放方式之一.图11是某石化企业关停和放空过程中,基于车载FTIR的VOCs的排放通量和柱浓度分布监测,通过对实验结果进行分析发现,放空前通量下降33%,放空后通量上升81%,然后迅速降低89%,最大浓度在放空后急剧增加后迅速降低,整个变化趋势如图11所示.通过VOCs排放通量光学监测方法和相关的数据综合处理方法,可以为

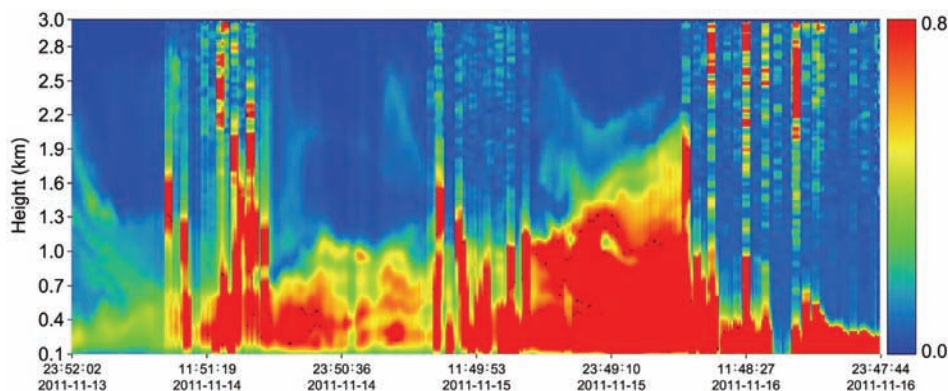


图7 2011年11月13~16日消光系数

Figure 7 Lidar observation of aerosol extinction

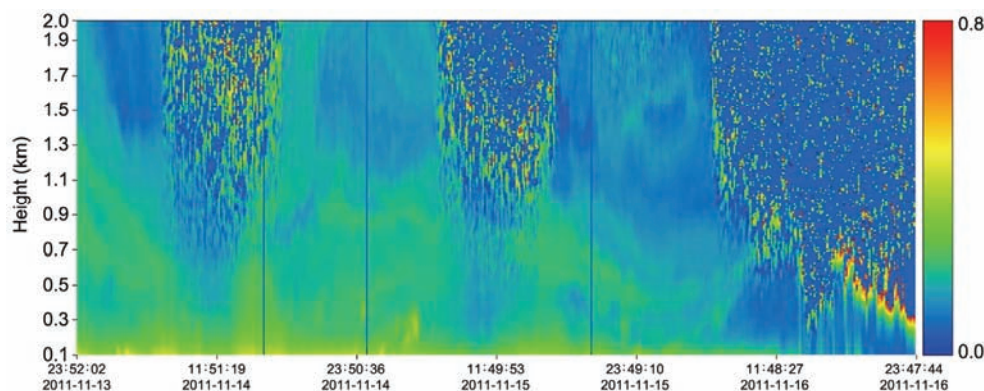


图8 2011年11月13~16日退偏比

Figure 8 Lidar observation of aerosol depolarized ratio

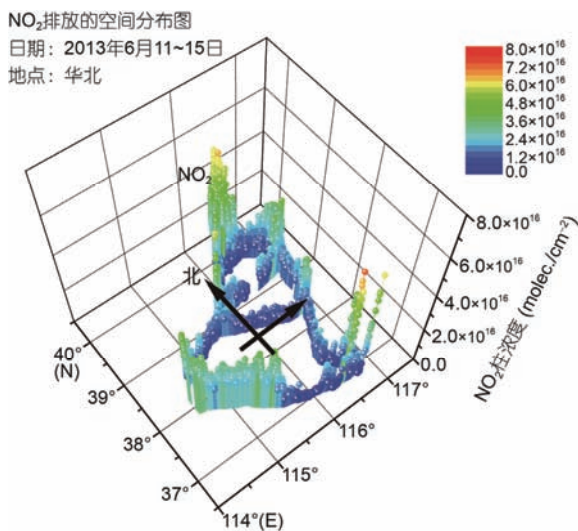


图9 车载移动DOAS监测华北地区SO₂和NO₂区域分布
Figure 9 SO₂ and NO₂ distribution in North China by mobile DOAS

VOCs的减排评估制定提供技术和数据支持。

2.3 生态系统痕量气体激光在线监测

对于大型生态系统,由于下垫面的非均一性及天气过程的不可重复性,痕量气体的分布存在较大的时空差异,通过开放式生态系统痕量气体在线监测技术研究,可以实现高时间分辨率、高灵敏度的大尺度痕量气体浓度的在线监测。实际运用中,利用高频波长扫描技术改善大气湍流对激光吸收光谱造成的影响,并结合参考校准光谱,实现气体浓度的长期稳定监测。图12是在某生态试验站观测的大尺度痕量气体NH₃在线观测结果。

3 展望

基于光学与光谱技术的大气环境立体监测技术发展已有十余年,其应用广度和深度仍在不断扩展。作为全世界范围内经济发展最快的国家之一,我国的大气污染问题已引起越来越多的关注,构建并完善以常规监测、自动监测为基础,遥感监测为辅助的天地一体式环境监测体系,提高监测和预报水平,是一个非常有益的课题。目前,遥感技术在大气环境监测中已经开始得到广泛的应用,在大气污染物区域分布、时空变化等方面已经发挥出其不可替代的优势,但在实际应用中仍存在监测时间过短、获取数据不具代表性等缺陷,影响了研究结论的说服力。此外,根据卫星数据反演污染物浓度的精度也有待提高。各种方法在测量实时性、测量精度、可操作性等方面各有优缺点,在实践中需相互结合与补充,同时也需进一步探索出更为精准实用的反演方法。目前,遥感技术正从单一遥感资料的分析,向多时相、多数据源(包括非遥感数据资料数据)的信息复合与综合分析过渡。从对各种事物的表面性的描述,向内在规律分析、定量化分析过渡,就大气环境遥感而言,有待在以下几方面加强研究。

(1) 突破大气环境监测的关键技术。发展大气污染形成过程中关键物种(VOCs、大气新粒子化学成分、自由基等)的准确、快速监测技术;突破对流层、平流层地基、机载大气成分和大气参数的遥测技术;实现对大气PM_{2.5}化学组分、光化学烟雾及其前体物和中间产物提供监测技术解决方案和成套装备。构建大气污染源排放综合监测、大气复合污染及其前体

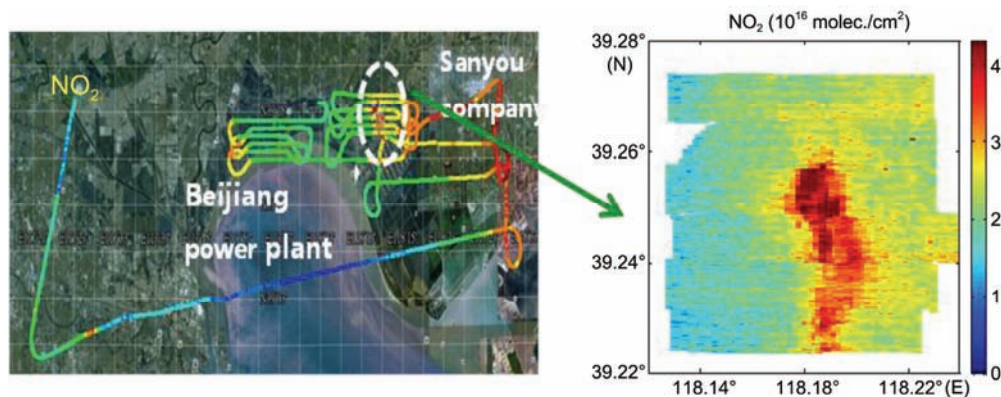


图10 机载DOAS监测工业源排放NO₂分布
Figure 10 NO₂ emission plume captured by airborne DOAS

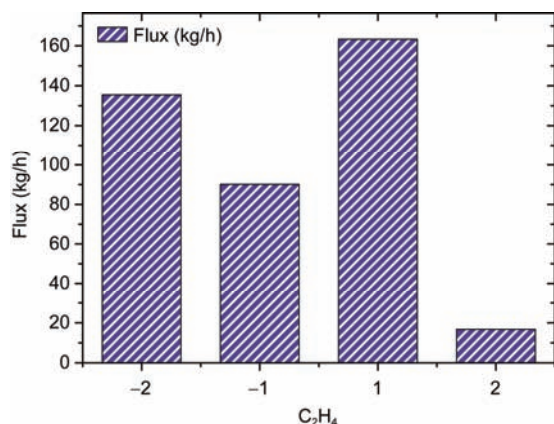


图 11 某石化企业关停和放空过程中乙烯装置排空监测通量变化趋势图

Figure 11 Comparison of VOCs pollution emission flux before and after uploading by FTIR

物立体观测、以及大气环境监测质量控制等大气污染监测技术体系。

(2) 建立先进的大气环境监测技术创新研究平台。利用地基MAX-DOAS(多轴差分吸收光谱仪)和大气细颗粒物探测激光雷达等设备,建设“灰霾及其前体物立体监测网络”,开展SO₂, NO_x, HCHO(甲醛)等大气细颗粒气态前体物和颗粒物PM₁₀(可吸入颗粒物)/PM_{2.5}的垂直总量和廓线的监测研究,将弥补目

前环保监测网络单一地面监测数据的不足,为研究灰霾的形成、演变和区域输送规律、开展雾霾准确预报提供技术手段。逐步建立地球表面至平流层重要大气成分(O₃, CO₂, 水汽, CH₄, SO₂, NO_x, 气溶胶, 痕量气体等)和有关气象环境要素参数(温度、风场等)探测体系,通过多平台、多波长、主被动结合的方式,获得高分辨时空分布数据库。长期系统地开展重要大气成分和环境要素高分辨率垂直与水平分布及其时间变化特征的观测,为气候变化模式、大气环境评估等研究及其验证提供基础数据。

(3) 建设大气环境探测与模拟实验研究设施。针对我国大气复合污染防治研究,建设我国自己的大气环境探测与模拟实验研究设施,形成从实验室微观机理研究到模拟大气环境实验,再到外场观测实验和验证的有机闭环链条,揭示我国城市和区域尺度的大气复合污染形成机理并量化其环境影响,建立符合中国特点的相关污染模式,从而预测我国不同区域背景下大气环境复合污染及其环境效应的发展趋势并提出控制思路,为国家 and 地方制定有效的控制战略提供科技支撑。总之,只有发展特殊技术并综合多种技术集成,才能满足环境污染及其变化的各种需求,并推动大气环境监测仪器向更高精度、更多成分、更大范围、更加实用发展。

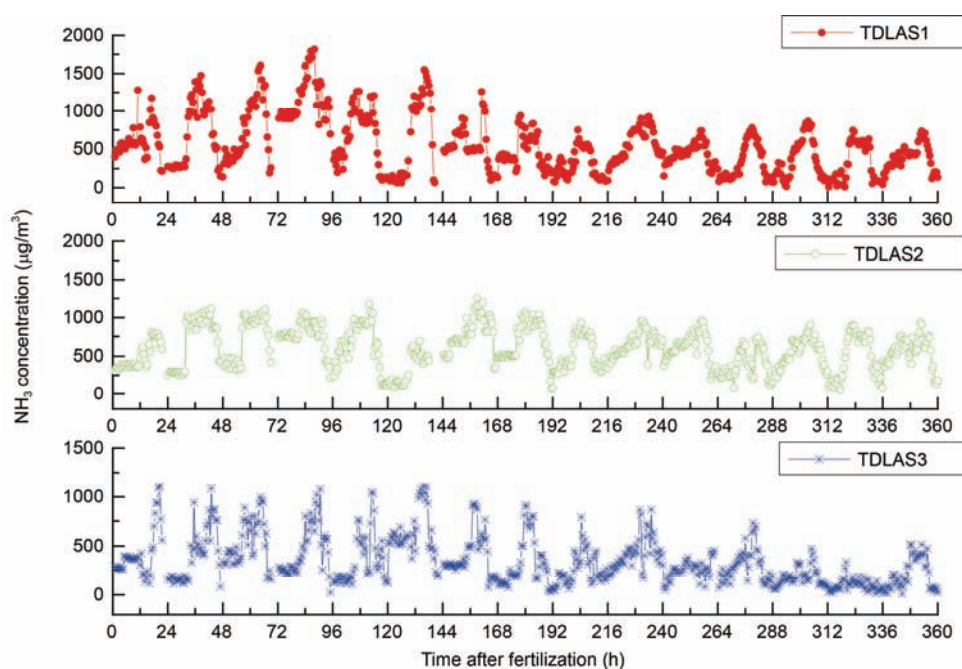


图 12 生态系统温室气体排放激光在线监测NH₃

Figure 12 Online-laser monitoring of NH₃ emission from farmland

参考文献

- 1 Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007, The Physical Science, Technical Summary of the Working Group Report. New York: Cambridge University Press, 2007
- 2 Campbell J R, Welton E J, Spinhirne J D, et al. Micropulse lidar observations of tropospheric aerosols over northeastern South Africa during the ARREX and SAFARI 2000 dry season experiments. *J Geophys Res-Atmos*, 2003, 108: 8497, doi: 10.1029/2002JD002563
- 3 Yuan S, Kan R F, He Y B, et al. Laser temperature compensation used in tunable diode laser absorption spectroscopy (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2013, 40: 0515002-1-5 [袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿. *中国激光*, 2013, 40: 0515002-1-5]
- 4 Zhou M Q, Zhang X Y, Wang P C, et al. XCO₂ satellite retrieval experiments in short-wave infrared spectrum and ground-based validation. *Sci China Earth Sci*, 2015, 58: 1191-1197 [周敏强, 张兴赢, 王普才, 等. 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*, 2015, 45: 856-863]
- 5 Xie P H, Liu W Q, Fu Q, et al. Intercomparison of NO_x, SO₂, O₃, and aromatic hydrocarbons measured by a commercial DOAS system and traditional point monitoring techniques. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21: 211
- 6 Xu J, Xie P H, Si F Q, et al. Determination of tropospheric NO₂ by airborne multi axis differential optical absorption spectroscopy (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 024204 [徐晋, 谢品华, 司福祺, 等. 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*, 2012, 61: 024204]
- 7 Dae W H, Gwi S H, Jin S H, et al. Application of the open path FTIR with COL1SB to measurements of ozone and VOCs in the urban area. *Atmos Environ*, 2004, 38: 5567-5576
- 8 Groß S, Tesche M, Freudenthaler V, et al. 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*, 2011, 63: 706-724
- 9 Wang F, Wu Q, Huang Q X, et al. Simultaneous measurement of 2-dimensional H₂O concentration and temperature distribution in pre-mixed methane/air flame using TDLAS-based tomography technology. *Optics Commun*, 2015, 345: 53-56
- 10 Wang Y, Xie P H, Si F Q, et al. A rapid method to derive horizontal distributions of trace gases and aerosols near the surface using multi-axis differential optical absorption spectroscopy. *Atmos Meas Tech*, 2013, 13: 2571-2586
- 11 Wang Y, Li A, Xie P H, et al. Measuring tropospheric vertical distribution and vertical column density of NO₂ by multi-axis differential optical absorption spectroscopy (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 6262: 476-477 [王杨, 李昂, 谢品华, 等. 多轴差分吸收光谱技术测量 NO₂ 对流层垂直分布及垂直柱浓度. *物理学报*, 2013, 6262: 476-477]
- 12 Wang Y, Thomas W, Li A. Research of classification of cloud and aerosol using multi-axis differential optical absorption spectroscopy (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 110708 [王杨, Thomas W, 李昂, 等. 多轴差分吸收光谱技术的云和气溶胶类型鉴别方法研究. *物理学报*, 2014, 63: 110708]
- 13 Harbeck S, Emirik Ö F, Gürol I, et al. Understanding the VOC sorption processes on fluoro alkyl substituted phthalocyanines using ATR FTIR spectroscopy and QCM measurements. *Sensor Actuat B-Chem*, 2013, 176: 838-849
- 14 Fan G Q, Zhang T S, Fu Y B, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2014, 41: 1014003-1-6 [范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征. *中国激光*, 2014, 41: 1014003-1-6]
- 15 Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, et al. A new micro-Pulse Lidar for atmospheric horizontal visibility measurement (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2014, 41: 0908005-1-5 [吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度. *中国激光*, 2014, 41: 0908005-1-5]
- 16 Chen Z Y, Liu W Q, Heese B, et al. Aerosol optical properties observed by combined Raman-elastic backscatter lidar in winter 2009 in Pearl River Delta, south China. *J Geophys Res*, 2014, 119: 2335-2352
- 17 Wandinger U, Mattis I, Tesche M, et al. Air mass modification over Europe: EARLINET aerosol observations from Wales to Belarus. *J Geophys Res*, 2004, 109: D24205, doi: 10.1029/2004JD005142
- 18 Amiridis V, Balis D S, Kazadzis S, et al. Four-year aerosol observations with a Raman lidar at Thessaloniki, Greece, in the framework of European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET). *J Geophys Res*, 2005, 110: D21203, doi: 10.1029/2005JD006190

Stereoscopic monitoring technology and applications for the atmospheric environment in China

LIU WenQing^{1,2}, CHEN ZhenYi¹, LIU JianGuo^{1,2} & XIE PinHua^{1,2}

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

²School of Environmental and Photoelectric Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Human activity and natural sources have released a large number of pollutants into the atmospheric environment, which seriously influences the survival conditions of many creatures of the planet. The economy has grown rapidly in recent years; however China is now faced with some of the world's most severe and complex environmental problems. The promotion of atmospheric and environmental science research is imperative in solving the climate and environmental issues with which human beings are now faced. With obvious temporal and spatial change features, typical geographical conditions and regional climatic characteristics, these factors influence air quality and climatic change. Therefore, interdisciplinary research on optics and the environment is emphasized with the goal of producing comprehensive and stereoscopic monitoring technology for the atmospheric environment. Increased monitoring technology level of the atmospheric environment and the development of remote sensing observation methods, including online, rapid, and stereoscopic detection of atmospheric environmental data, are essential in understanding the dynamic change process and source mechanism of various components in the atmosphere, as well as in understanding their influence on environment and climate. In recent years, newly developed laser/spectrum technology was used to study trace pollutants and atmospheric compositions, including UV/visible/IR spectrum technology, laser spectrum technology, and optical remote sensing technology. Multiple detection technology was formed through absorption, a scattering and emission process caused by mutual interaction between light and substances in the atmosphere. This technology is capable of rapid and real-time detection of atmospheric trace gas, atmospheric aerosol, greenhouse gas, atmospheric wind fields, aqueous vapor, temperature, and atmospheric pollution. More specifically, differential optical absorption spectroscopy (DOAS) is a continuously developing spectroscopy technology, and it is widely used in the detection of atmospheric components. The Chinese Academy of Sciences (CAS) has taken the lead in conducting research using the active DOAS technique, the ground-based passive DOAS technique (multi-axis DOAS and mobile DOAS), and the airborne and space-based DOAS technique in China. A unique MAX-DOAS observation network was established in Eastern China to perform long-term observation of trace gases (e.g., NO₂, SO₂, etc.) and aerosol in the troposphere (since 2008 for the majority of the sites, and since 2012 for other sites). This observation research provides an effective optical remote sensing technique for the measurement of distributions and emissions from point and area sources and high-tech support for emission control of pollutants. Light detection and ranging (LIDAR) remote sensing techniques, both ground-based and airborne, were developed for measuring of atmospheric components. These established, advanced LIDAR systems, most of which were first built in China, were used for measuring the vertical profiles of atmospheric aerosol, temperature, water vapor, pollution, and gases (e.g. NO₂, SO₂, O₃, etc.) in the boundary layer, greenhouse gas (CO₂) in the troposphere, temperature and ozone in the stratosphere, and wind with a high vertical resolution. According to the measurement needs of industrial areas (e.g., petrochemical industry zones and large garbage disposal fields) and unexpected spill accidents involving dangerous chemicals, the research and development platform technique of Fourier Transform Infrared Spectrum (FTIR) has been implemented in many field campaigns. The aim of FTIR is to study regional air pollution (including the distribution, transport, and evolution of pollutants and source identification), as well as free atmospheric radicals and photo-chemical intermediates and production. The temporal and spatial distribution of atmospheric composition (e.g., greenhouse gases, pollutant gases, and aerosols) is observed by ground-based troposphere observation networks. These networks also provide remote satellite sensing ground validation.

stereoscopic monitoring, environmental optics, atmospheric environment

doi: 10.1360/N972016-00394