

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2015.02.001

环境污染与环境安全在线监测技术进展

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

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2 中国科技大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 近年来, 日新月异的激光技术促进了光谱技术的发展, 以光学探测和光谱数据解析为核心的各种在线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环境监测领域中发挥着不可替代的作用。着重介绍了在线监测技术在环境污染和环境安全方面的应用新进展, 并提出了我国进一步深入开展环境光学应用科学技术研究的建议。

关键词: 在线监测; 环境光学; 大气污染; 环境安全

中图分类号: P402; X513; O657.3

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2015)02-0082-011

On-line Monitoring Technology and Applications for Air Pollution and Environmental Safety

LIU Wenqing^{1,2}, CHEN Zhenyi¹, LIU Jianguo^{1,2}, XIE Pinhua^{1,2},
ZHAO Nanjing¹, ZHANG Yujun¹(1 Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;2 School of Environmental and Photoelectric Technology, University of Science and Technology of China,
Hefei 230026, China)

Abstract: In recent years, the rapid laser technology has promoted the development of spectroscopic technology. Various on-line monitoring technologies based on optical detection and spectral retrieval play an irreplaceable role in the field of environmental monitoring with high sensitivity, high resolution, high selectivity, multi-component, real-time and other advantages. The new development of on-line monitoring technology in the field of environmental pollution and environmental security is explored. And some beneficial suggestions about continuous development of science and technology of optical remote sensing application are proposed.

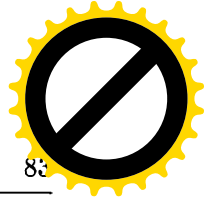
Key words: on-line monitoring; environmental optics; air pollution; environmental safety

收稿日期: 2015-01-10

基金项目: 中国工程院咨询研究项目、国家自然科学基金专项基金项目 (L1422031) 资助

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

* 特约稿



1 引言

环境的变化、环境污染及其对生态的影响已成为全球关注的重要问题^[1]。随着我国经济的快速发展,保护环境资源、加强环保监督、实现可持续发展的任务十分艰巨。用传统的监测技术已不能满足监测环境的要求。经过“十一五”、“十二五”国家科技计划的支持,我国环境监测技术研发水平发展较快,初步打破了多年来我国环境自动监测仪器必须依赖国外的局面,基本满足了城市空气质量指标(SO₂、NO₂和PM₁₀)在线自动监测的需求。但在环境污染和环境安全监测方面,现有监测技术体系仍然难以应对多种污染物的复合型污染监测,有限的监测指标很难反映出环境质量的好坏,与公众的感观不一致,远不能满足认知污染机制和演变过程的需求,也不能为环境部门解决环境污染问题、有效控制污染源和节能减排等提供有效的技术支撑。一方面,中国的大气环境污染问题主要表现为O₃和细颗粒物浓度较高,属于典型复合性、区域性大气污染。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O₃的浓度,以及其重要的相关前体物,如NO_x、VOCs、CO、SO₂、NH₃。另一方面,环境安全问题也不容忽视,化工生产过程中排放的污染物种类多、数量大、毒性高,容易引发突发环境应急事件,并导致局部环境质量恶化,严重影响着生态环境、危及人类健康。因此,多组分大气痕量成分的快速、实时、动态监测技术已成为环境监测领域工作者必须面对的重大课题。目前用于环境污染和环境安全监测的技术主要有光学技术,质谱技术和色谱技术。比较光学和非光学技术,基于光学原理的在线监测技术,由于具有非接触、无采样、高灵敏度、大范围快速监测等特点,是国际上环境监测技术的主要发展方向之一。在线监测技术比传统点式分析测量的优势在于:1)可以反映一

个区域的平均污染程度,不需要多点取样,这对于连续监测或是泄漏监测十分有用;2)能对不易接近的危险区域监测;3)可以同时测量多种污染物成分。所以,基于光学和光谱学原理的在线监测技术是当前环境监测的发展方向和技术主流。

2 技术进展

基于光学原理的环境污染与环境安全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技术广泛用在紫外和可见波段范围,监测标准污染物O₃、NO_x、SO₂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,并对于大气平流层中的易反应气体OH、NO₃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。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高、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,还有许多其它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选择测量技术。

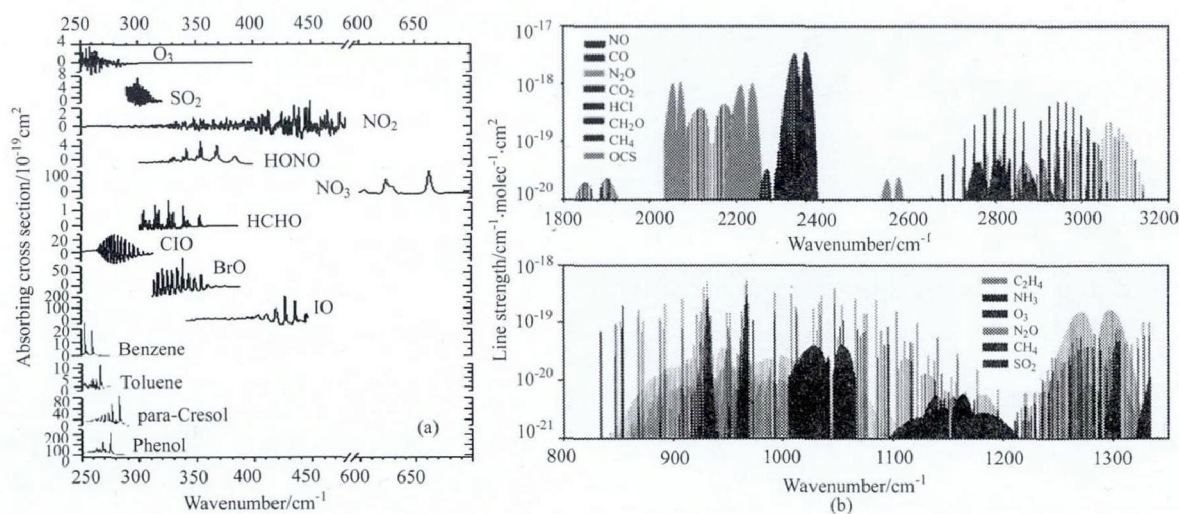
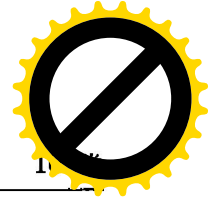
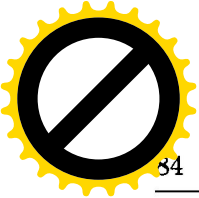


图1 痕量气体在紫外-可见 (a) 红外-激光 (b) 波段的特征光谱

Fig.1 Trace gases absorbing characteristic spectrum in ultraviolet-visible (a) and IR-Laser (b) wavelength

2.1 主、被动差分光学吸收光谱学 (DOAS) 技术

差分光学吸收光谱 (DOAS) 技术是一种不断发展并广泛用于大气成分探测的光谱技术。目前中科院安光所在国内率先开展了主动 DOAS 技术、地基被动 DOAS 技术 (MAX-DOAS 和车载多轴 DOAS) 以及机载和星载 DOAS 技术的研究, 见图 2。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) 及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 技术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。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 ppb 和 0.1 ppb, 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。

2.2 傅里叶变换红外光谱技术 (FTIR)

傅里叶变换红外光谱技术 (FTIR) 是一种基于傅立叶变化获取光谱信息的综合性探测技术^[11]。由于大气中大多数的微量、痕量气体都是红外活性气体, 在 $2\sim 30\ \mu\text{m}$ 红外波段范围内具有吸收和发射红外特征光谱的能力, 因此这个波段称为中红外区域或分子指纹区, 对于光谱测量非常有利, 从而使得 FTIR 在大气环境监测中应用前景非常广泛。其主要特点表现为: 可以用极短的扫描时间得到高质量的光谱, 具有大光通量以保证检测的高灵敏度, 并具有很高的波数准确度、宽

光谱范围以及较高且恒定的光谱分辨能力。近些年来, 科技工作者利用该项技术广泛地开展了对大气环境及大气污染的观测及研究工作, 尤其是对污染源排放气体以及区域性的温室气体和反应性痕量气体的本底、分布廓线、时空变化进行了大量观测研究。主要应用方式有: 抽取式多次反射池 FTIR 测量、长光程开放光路 OP-FTIR 的主动式测量、地基太阳光谱 FTIR 测量、热烟羽和化学蒸气云团的 FTIR 被动测量以及对于污染面源如石化工业区、大型垃圾处理场、大型养殖场以及石油天然气储运站等此类大范围的逸散源监测。针对污染面源排放 VOCs 浓度开放光路连续监测的开放光路 FTIR 技术, 已经作为美国 EPA 推荐的

TO-16VOC 监测方法, 得到了推广和应用。该技术的核心部件为高稳定性高信噪比红外干涉仪, 波长范围 $2\sim 15\ \mu\text{m}$ 、分辨率为 $1\ \text{cm}^{-1}$ 的稳定可靠、高信噪比傅里叶变换红外光谱仪, 并包含 350 余种主要 VOCs 成分和大气温室气体的红外光谱定量分析数据库, 见图 3。

2.3 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, 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

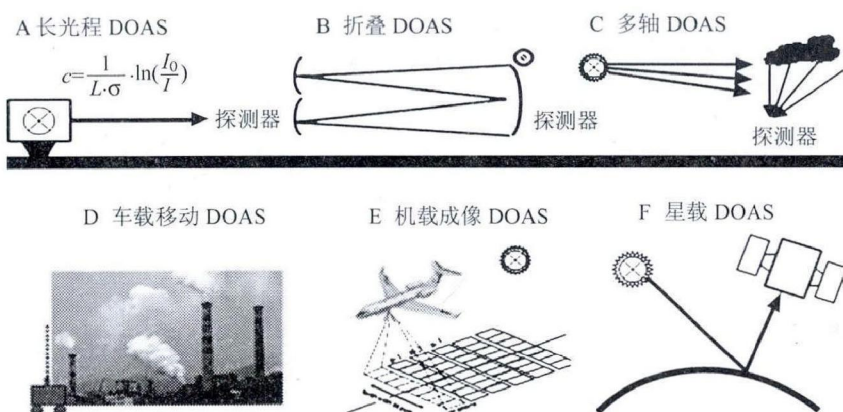


图 2 基于不同平台的环境污染在线监测技术

Fig.2 Various optical platforms for environmental pollution monitoring technology

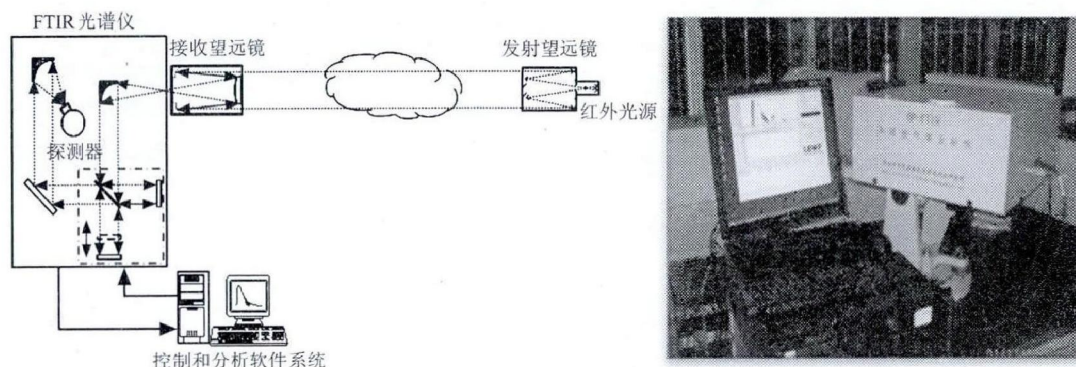
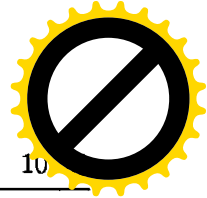
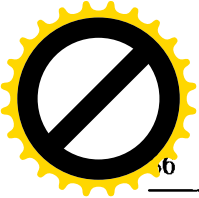


图 3 污染源现场挥发性有机物浓度监测设备

Fig.3 The composition of the on-site VOCs concentration monitoring system for pollution sources



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,见图4。近年来,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)以及数据处理和反演的新方法也在不断提出。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^[12-17]。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。

2.4 排放通量测量技术

化工园区的有害气体排放的快速测量是环境安全与应急监测的一个任务,为监测大型工业污染固定源或监测道路交通污染源对环境空气质量

影响而设置的污染需要进行监控,监测结果反映了污染源对周围影响的污染水平。近年来,国内重点开展了基于各种光学遥感技术的污染物柱浓度获取方法,针对不同的污染源类型和排放情况,如高架点源、由多个点源组成的工业厂区、面源或区域源(城市),均可以利用车载在线监测仪进行排放通量的监测,实现了对各类污染源、面源(区域)排放的 NO_2 、 SO_2 、 CS_2 、VOC排放通量实时现场监测分布及排放通量的实时遥测。测量时,通常采用车载在线测量系统围绕重点排放源进行测量(图5)。

1) 点源

在排放源的下风向,车载在线测量系统在下风向扫描烟羽剖面,并结合风速风向数据,计算排放通量

$$Flux = \sum Flux_i. \quad (1)$$

2) 区域源(工业区、面源、无组织排放等)

通过上风向和下风向测量区域内流入和流出的通量的差来计算净排放通量 $Flux_{\text{净}}$,即

$$Flux_{\text{净}} = Flux_{\text{入}} - Flux_{\text{出}}. \quad (2)$$

排放通量的测算误差来源包括仪器本身的测

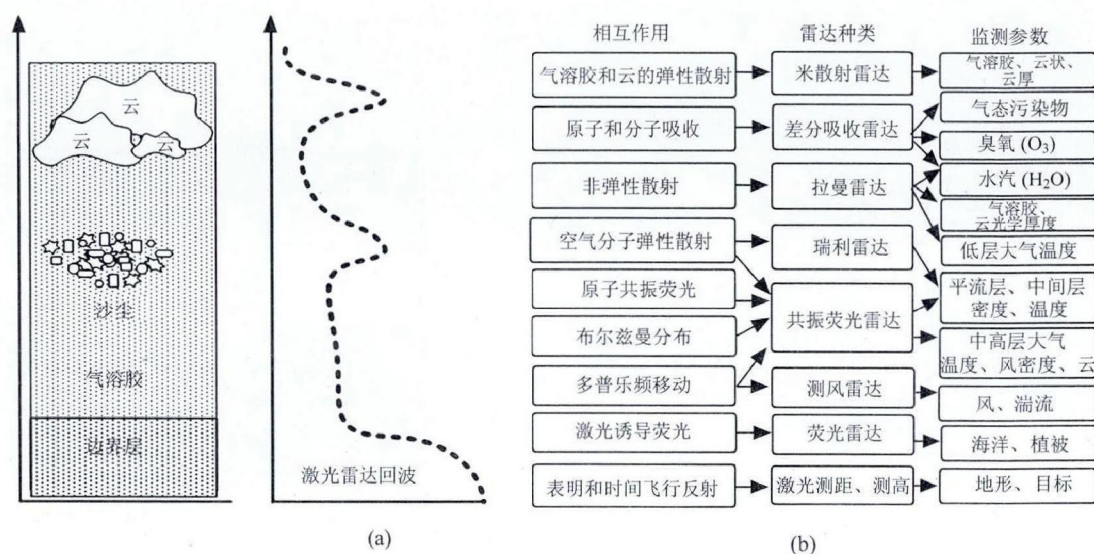


图4 激光雷达原理(a)和不同类型的激光雷达(b)

Fig.4 Lidar principle (a) and different types of lidar (b)

量误差以及在计算通量过程中带来的误差。以车载被动 DOA 为例, 测量区域污染通量的总误差可以表述为^[18]

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{wind}}^2 + \sigma_{\text{DOAS}}^2 + \sigma_{V_{\text{car}}}^2}, \quad (3)$$

其中: σ_{total} 为系统总误差; σ_{wind} 为风速测量造成的误差; σ_{DOAS} 为光谱反演误差; $\sigma_{V_{\text{car}}}$ 为车速测量误差。

风速风向误差是决定通量结果误差的主要因素。此外, 车速测量的误差包括 GPS 测量的车速和实际车速的差别带来的误差, 车速的大小导致采样频率的变化所带来的误差。前者根据 GPS 精度小于 1%, 可以忽略。而后者是车速带来误差的主要来源。尽管车载在线监测仪进行污染排放通量的监测具有不确定性, 但排放通量测量为无组织面源、区域 (整个城市) 排放估计提供了一种相对简易的方法, 能给出痕量气体通量的绝对值, 这个值可直接用于模型计算和卫星校验, 为已存在的排放估计提供了一种监测手段, 已应用于北京奥运、上海世博、广州亚运会、南京亚青会等多项国家重大赛事活动的空气质量保障外场观测实验。

3 应用

利用在线监测技术可以监测环境污染物质,

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、有害气体泄漏监测、环境重金属污染监测等方面。

3.1 雾霾过程时空分布监测

细粒子雷达和差分吸收雷达通过直接观测对流层范围内细粒子、水汽和臭氧的空间分布和时间演化, 监测真实大气中的污染过程, 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。新研发的 Fernald-DIAL 差分吸收雷达反演算法^[19]可以同时获得臭氧浓度和气溶胶消光系数廓线, 所得到的臭氧浓度可以有效扣除大气干扰的影响。图 6 是差分吸收雷达观测的北京夏天灰霾期间臭氧和气溶胶垂直特性时空分布图。在灰霾阶段 (6 月 13 日至 16 日), 细粒子污染逐渐加重, 6 月 16 日能见度不到 2 km, 3800 m 以下 O_3 有明显日变化规律, 夜间下降至 30 ppb, 白天逐渐上升至 100 ppb, 1 km 以上 O_3 日变化不明显; 但 6 月 15 日 1 km 以上有明显的臭氧输送, 气团浓度达到 120 ppb 左右。观测期间, 多次观测到细颗粒物与臭

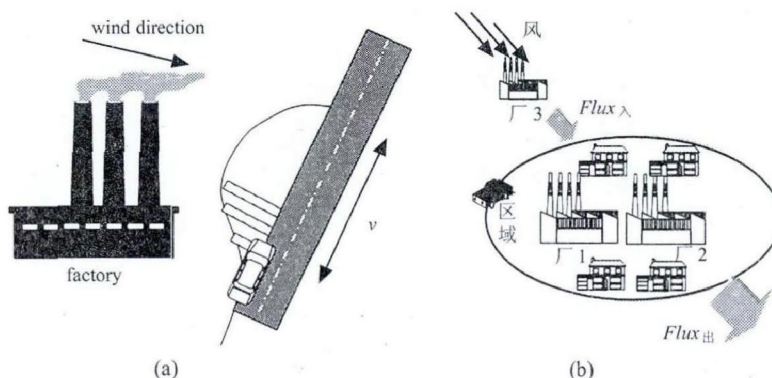
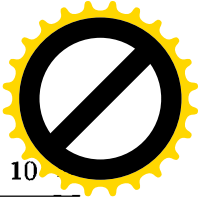
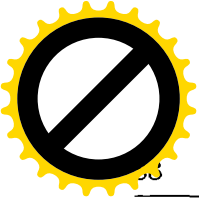


图 5 点源和区域源的排放通量测量技术

Fig.5 Emission flux measurement for point source (a) and regional sources such as industrial zone, fugitive emissions (b)



氧在不同高度具有不同的关联特征: 低层 (800 m 以下) 细粒子生成过程消耗大量 O_3 , 高层 (1.5 km 以上) 细粒子生成过程消耗 O_3 较少, 这一差别反映了低层和高层细粒子生成过程对应着不同的大气化学过程。

3.2 区域及化工园区排放通量监测

图 7 是车载移动 DOAS 于 2008 年奥运期间监测北京五环 SO_2 和 NO_2 区域分布, 实时快速发现污染排放情况。比较 2005 年和 2008 年的结果, 可以看出北京地区的区域排放明显下降, 污染源钢铁厂、电厂和焦化厂排放大幅度下降, 在控制措施实施后排放大幅度下降。

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 8 是某石化企业

关停和放空过程中, 基于车载 FTIR 的 VOC 的排放通量和柱浓度分布监测, 从图中可以看出, 最大排放通量和最大柱浓度都出现在生产装置放空时段。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, 为 VOCs 的减排评估制定提供技术和数据支持。

3.3 管道泄漏监测

在整个集输系统中, 天然气站场在整个输气工艺中占很大的比重, 其可靠性在很大程度上决定影响整个管输系统的安全。天然气站场的设备多, 流程复杂, 密封点多, 泄漏的概率大。开放空间天然气泄露激光在线检测仪以可调谐半导体激光吸收光谱技术 (TDLAS) 为核心, 结合微弱信号检测技术和计算机自动检测技术, 使用单一窄带

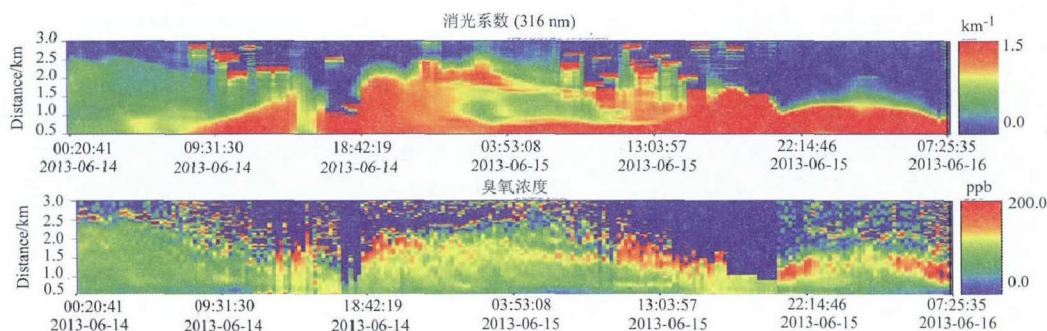


图 6 雷达同时获取 O_3 和气溶胶消光系数浓度时空分布

Fig.6 Simultaneous observation of ozone and aerosol profiles by lidar during haze episode

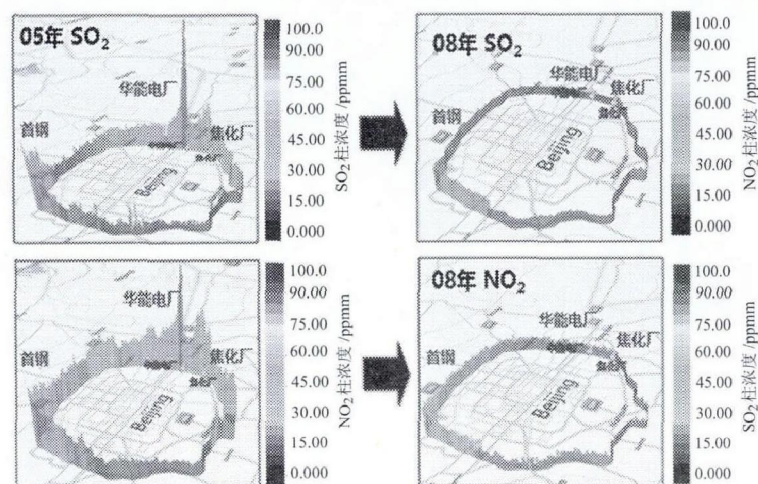


图 7 车载移动 DOAS 监测北京五环 SO_2 和 NO_2 区域分布

Fig.7 Comparison of SO_2 , NO_2 pollution emission flux between 2005 and 2008 by mobile DOAS

的激光频率扫描通过单根气体吸收线, 从而实现目标气体的定量和定性分析, 具有高选择性、高灵敏度、高精度、快速在线非接触测量的特点, 实现了对天然气站场和隧道环境中 CH_4 和 H_2S 浓度的高灵敏连续测量与泄漏报警。该系统可以实现阀路自动切换、报警限设置、8 路气体浓度实时显示、声光报警等功能, H_2S 和 CH_4 的检测限分别为 1 ppm 和 0.1 ppm^[20], 并已成功应用到四川普光气田的多条天然气输送管道和站场中。

3.4 机动车尾气排放监测

目前我国的尾气检测主要采用的怠速法或自由加速烟度法都属于无负载检测法, 这样的机动车尾气检测存在以下问题: 效率低、社会和经济效益差以及不能反映车辆尾气的真实排放状况等。

可调谐半导体激光吸收光谱技术 (TDLAS) 采用 TDLAS 二次谐波检测技术对行驶中的机动车辆所排放的尾气中 CO 和 CO_2 进行光谱测量, 见图 10(a); 采用 DOAS 技术, 对行驶中的机动车辆排放尾气中的 HC 和 NO 进行光谱测量; 机动车牌照自动获取及识别系统在机动车辆行驶过该系统时完成对过往车辆车牌图像的抓拍, 并通过牌照识别软件得到车辆牌照信息; 车辆速度及加速度传感器利用三点测量时间法来计算过往车辆速度及加速度信息, 目前该系统已在北京、重庆、厦门等地安装 60 多套, 见图 10(b), 并在北京奥运期间作为车辆尾气排放监控的主要装备, 为我国城市化中的机动车尾气防治、开展高排放车辆的道路筛选发挥了技术引领和示范作用^[21]。

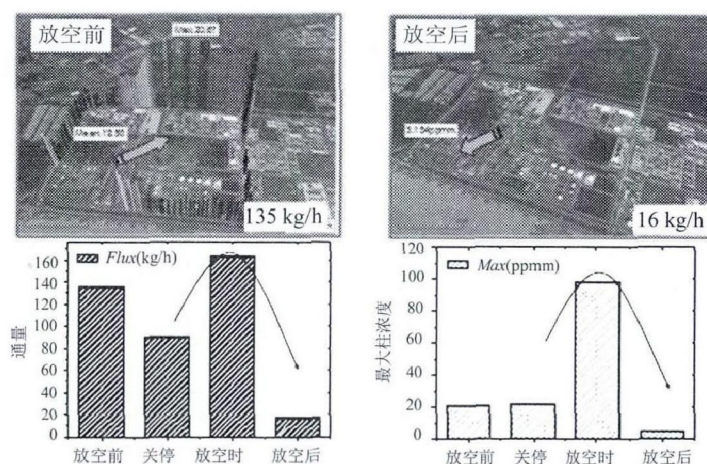


图 8 某石化企业关停和放空过程中 VOC 的排放通量和柱浓度分布

Fig.8 Comparison of VOC pollution emission flux before and after uploading by FTIR

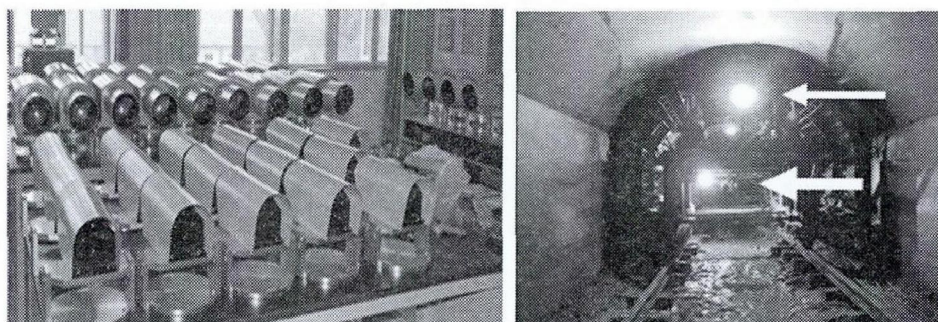


图 9 开放空间天然气泄露激光在线检测仪

Fig.9 On-line laser monitoring instrument for the tunnel pipeline leak

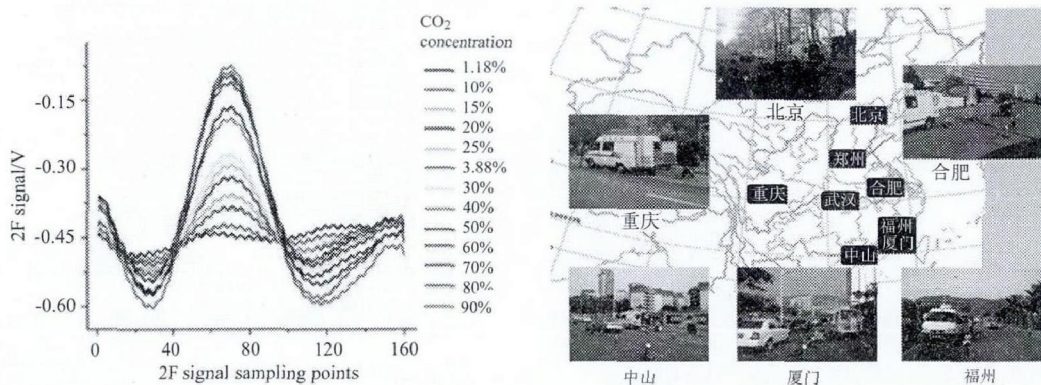
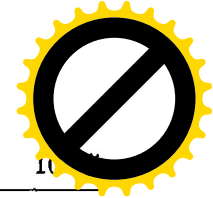
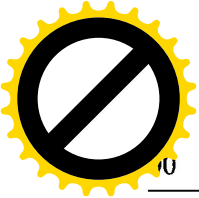


图 10 机动车尾气在线检测仪

Fig.10 On-line vehicle exhaust emission measuring technology

4 展 望

基于光学与光谱技术的环境污染与环境安全在线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。主要的发展趋势包括从采样分析向自动化监测发展,从点式监测向区域监测发展,从地面监测向立体监测发展,从被动遥测向主动遥测发展;亟需发展的技术包括高精度的数据处理和定量化,长期稳定运行的提取算法、软件模块以及相应应用模块技术,多平台、多技术的监测数据同化等。总之只有发展特殊技术或者多种技术集成,才能满足环境污染极其变化的各种需求,并推动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。

参考文献:

[1] Intergovernmental panel on climate change, climate change 2007, the physical science, technical summary of the working group report [R]. New York: Cambridge University Press, 2007.

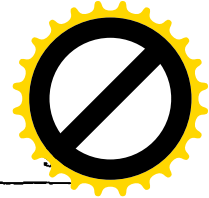
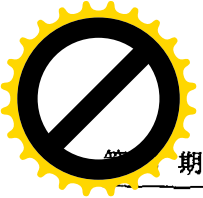
[2] Campbell J R, Welton E J, Spinhirne J D, et al. Micropulse lidar observations of tropospheric aerosols over northeastern South Africa during the ARREX and SAFARI 2000 dry season experiments [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 2003, **108**: 8497.

[3] Xu Zhenyu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, et al. Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(23): 234204-1-8(in Chinese).

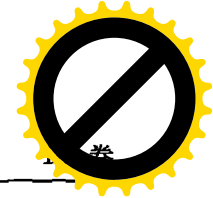
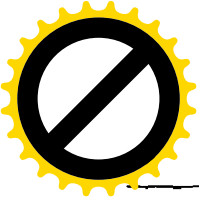
许振宇, 刘文清, 刘建国, 等. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的温度测量方法研究 [J]. *物理学报*, 2012, **61**(23): 234204-1-8.

[4] Meng Xiaoyan, Wang Pucai, Wang Gengchen, et al. Characteristics of SO₂-NO₂-O₃ in summer of Beijing from DOAS measurement [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(5): 94-99(in Chinese).

孟晓艳, 王普才, 王庚辰, 等. 北京夏季 SO₂-NO₂-O₃ 的 DOAS 观测结果及变化特征 [J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(5): 94-99.



- [5] Xie P H, Liu W Q, Fu Q, et al. Intercomparison of NO_x , SO_2 , O_3 , and aromatic hydrocarbons measured by a commercial DOAS system and traditional point monitoring techniques [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21**(2): 211-219.
- [6] Xu Jin, Xie Pinhua, Si Fuqi, et al. Determination of tropospheric NO_2 by airborne multi axis differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(2): 282-288(in Chinese).
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 NO_2 垂直柱浓度的研究 [J]. *物理学报*, 2012, **61**(2): 282-288.
- [7] Hu Lanping, Li Yan, Zhang Lin, et al. Advanced development of remote sensing FTIR in air environment monitoring [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(10): 1863-1867(in Chinese).
胡兰萍, 李 燕, 张 琳, 等. 遥感 FTIR 在大气环境监测中的新发展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(10): 1863-1867.
- [8] Pan Hu, Geng Fuhai, Chen Yonghang, et al. Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **30**(11): 2164-2173(in Chinese).
潘 鹤, 耿福海, 陈勇航, 等. 利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(11): 2164-2173.
- [9] He Ying, Zhang Yujun, Wang Liming, et al. Laser technology for CO_2 and H_2O on-line detection in large-scale region [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(1): 0115003-1-0115003-5(in Chinese).
何 莹, 张玉钧, 王立明, 等. 大尺度区域 CO_2 和 H_2O 的激光在线检测技术 [J]. *中国激光*, 2014, **41**(1): 0115003-1-0115003-5.
- [10] Wang Y, Li A, Xie P H, et al. A rapid method to derive horizontal distributions of trace gases and aerosols near the surface using multi-axis differential optical absorption spectroscopy [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2014, **7**(6): 1663-1680.
- [11] Xu Liang, Liu Jianguo, Gao Minguang, et al. Application of long open path FTIR system in ambient air monitoring [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(3): 448-451(in Chinese).
徐 亮, 刘建国, 高闽光, 等. 开放式长光程傅里叶变换红外光谱系统在环境气体分析中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(3): 448-451.
- [12] Ansmann A, Riebesell M, Weitkamp C. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(13): 746-748.
- [13] Böckmann C, Wandinger U, Ansmann A, et al. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2. Aerosol backscatter algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 977-989.
- [14] Wandinger U, Mattis I, Tesche M, et al. Air mass modification over Europe: EARLINET aerosol observations from Wales to Belarus [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.* (1984-2012), 2005, **109**(D24): D24205.1-D24205.12.
- [15] 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]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(D21): D21203. 1-D21203.12.
- [16] Nagai T, Uchino O, Fujimoto T. Lidar observations of stratospheric aerosol layer after the Mt. Pinatubo volcanic eruption [C]. *Proc. 16th ILRC, NASA CP3158*, 1992: 17-20.



- [17] Ackermann I J, Hass H, Memmesheimer M, et al. Modal aerosol dynamics model for Europe: development and first applications [J]. *Atmos. Environ.*, 1998, **32**(17): 2981-2999.
- [18] Wu F C, Xie P H, Li A, et al. Observations of SO_2 and NO_2 by mobile DOAS in the Guangzhou eastern area during the Asian Games 2010 [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, **6**(9): 2277-2292.
- [19] Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, et al. A cloud elimination algorithm based on differential absorption lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1135-1139(in Chinese).
- 范广强, 刘建国, 张天舒, 等. 基于差分吸收激光雷达的云消除算法研究 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(10): 1135-1139.

- [20] Zhang Shuai, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. A mobile sensor for remote detection of natural gas leakage [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(2): 570-574(in Chinese).

张 帅, 刘文清, 张玉钧, 等. 一种移动式遥测天然气泄漏检测仪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(2): 570-574.

- [21] Wang Tiedong, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Remote sensing CO, CO_2 of vehicle emissions using TDLAS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(suppl.): 336-340(in Chinese).

王铁栋, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于可调谐半导体激光技术的机动车尾气中 CO、 CO_2 遥测 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(suppl.): 336-340.

作者简介: 刘文清 见本期第 81 页