

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2009.04.001

区域大气复合污染立体监测技术系统与应用*

刘文清, 刘建国, 谢品华, 陆亦怀, 高闽光, 张玉钧

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 随着我国社会经济的高速发展, 环境问题日益突出, 各种污染物相互耦合叠加, 造成我国大气污染呈现区域性、复合性以及长期性的特点。尽管我国已建立了以城市为中心的空气质量自动监测站, 但近地面有限指标的监测, 不能完全反映大气污染的实际状况, 使空气质量评价结果与公众直观感受不一致。也不能满足空气污染形成机制、演变和输送过程的研究需求。介绍了用于区域、立体、实时监测的几种技术以及利用这些技术构建的区域大气复合污染立体监测技术系统, 主要用于颗粒物区域输送通量监测、气态污染物区域排放通量监测以及区域污染物垂直柱浓度监测。同时介绍了北京奥运会期间的部分监测结果, 讨论了控制区域大气复合污染需要的监测技术和方法。

关键词: 区域大气; 复合污染; 立体监测

中图分类号: O433.4; X851

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2009)04-0243-13

Spatio-Temporal Monitoring System and its Application in Regional Complex Air Pollution Study

LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, XIE Pin-hua, LU Yi-huai, GAO Min-guang, ZHANG Yu-jun

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

Abstract: With the rapid economic growth of China, environmental pollution has become one of the most widely concerned issues. The air pollution in economy fast developing area has appeared regional and complex behavior by the accumulation and coupling of multi pollutants from various sources. Although many ambient air quality monitoring stations are established in urban area, the ground surface pollutant levels are limited to give the whole picture of the air pollution and reveal its real evolution process, chemical reaction scheme and regional transportation. It brings some confusion to the public by the mismatch of air quality index with the sense of atmospheric visibility. Several advanced optical and spectroscopic techniques and an integrated spatio-temporal air quality monitoring system based on these techniques are introduced, which are applied to monitor the particulate matter regional transport flux, gaseous pollutant emission flux from area sources

收稿日期: 2009-05-28; 修改日期: 2009-07-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“北京及周边地区奥运大气环境监测和预警联合行动计划”; 北京市环境保护科技计划课题“利用光学遥感监测技术开展重要污染源区排放以及区域污染输送影响监测”

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

*: 特约稿

and distribution of vertical columns of trace gases in a large area. The partly measurement results obtained during the 2008 Beijing Olympic Games are presented. The monitoring method and techniques applied for the regional and complex air pollution study are also discussed.

Key words: regional atmosphere; complex pollution; spatio-temporal monitoring

1 引言

20 世纪 80 年代以来我国社会经济进入高速发展阶段,短短 20 多年的时间就走完了发达国家上百年的发展路程。由于社会经济的快速发展,大气环境污染问题日益严峻,导致本应在不同阶段出现的环境问题在短期内集中体现和爆发出来,各种污染物相互耦合叠加,并逐渐呈现区域性和复合型污染的新特点。2008 年,全国 23.2% 的城市空气质量未达到国家二级标准; 113 个重点城市中,有 48 个城市空气质量达不到二级标准,城市空气中的 PM_{10} 、 SQ_2 浓度依然维持在较高水平。上海、广州、天津、深圳等城市的灰霾天数已占全年总天数的 30%~50%^[1]。

在经济快速发展的大中城市中,以 SO_2 、氮氧化物等为特征的传统污染依然严峻的同时,直径小于或等于 $2.5 \mu m(PM_{2.5})$ 的细微颗粒物(又称可入肺颗粒物)、臭氧、挥发性有机物等污染物相互耦合,经过二次反应后形成高浓度细粒子污染,臭氧和细颗粒物浓度显著增加。这些污染形式叠加在一起,引起了能见度下降、灰霾天气和光化学烟雾的形成。“看不见蓝天”已成为许多城市的共同忧患,呼吸道疾病患病率明显增加,对人体健康也带来新的威胁。煤烟型污染、汽车尾气以及有机气体的光化学污染共存和相互耦合,形成了发达国家也未遇到过的复杂的复合型大气环境污染,国际上也没有成功的经验可资借鉴。

我国城市的空气污染状况主要由地面空气质量监测网提供,目前的空气质量评价指标仅包括 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 最基本的污染数据。没有足够的信息来确定污染物的动态时空演化过程和化学反应过程,因而难以揭示污染的形成、来源、发展趋势等根本问题,缺乏对污染浓度水平的必

要了解和预见能力,不能够为政府决策者制定污染控制策略提供必要的依据。众所周知,污染的形成和演变主要是边界层内对流层底(从地面至几百米)发生的光化学反应造成的,对流层底是大气主要污染区。另外,较低对流层中的风环流也导致边界层内大气污染混合输送或水平对流。因此,大气垂直廓线会不断的发生变化。

面对我国严峻的环境污染问题,如何以科学的方法、准确的数据表征我国当前环境质量现状和变化趋势,及时跟踪污染源变化,实现环境质量报告和预警,采用先进环境监测技术,监测环境变化是必然的选择。先进环境监测技术与仪器是环境保护的重要基础、环境管理的基本手段。先进环境监测技术与仪器的发展是环境监测向前发展的必要条件,是推动环境监测实现监测技术现代化的巨大动力^[2]。

测量痕量气体和气溶胶颗粒物浓度(其它参数如大气辐射强度)是实验研究大气污染监测和大气光化学反应的前提,迄今还没有一种单一的测量技术能满足痕量气体检测的多种要求。只有发展各种新技术或者多种技术结合,才能完成大气研究、污染控制、大气变化监测等多项任务。近年来,环境监测技术由较窄的局部监测、单纯的地面环境监测向全方位遥感遥测相结合的方向发展^[3]。环境监测手段向物理、化学、生物、电子、光学等技术综合应用的高技术领域发展。本文重点介绍区域大气复合污染监测和大气化学研究的几种激光和光谱分析技术,主要用于颗粒物区域输送通量监测、气态污染物区域排放通量监测以及区域污染物垂直柱浓度监测。本文还给出这些技术对北京奥运会期间空气质量的监测结果,讨论了控制区域大气复合污染需要的监测技术和方法。值得指出的是,这些技术也是目前星载平台

上能够实现全球范围内痕量气体的时间和空间分辨遥感的主要手段。

2 原理与方法

2.1 气溶胶颗粒物区域输送通量监测技术

大气低层风场影响气溶胶颗粒物和污染气体的输送和扩散过程, 风速越大越有利于空气中污染物的稀释扩散, 显然, 也会导致污染物的长距离输送。微风或静风则会抑制污染物的扩散, 使近地面污染物聚集和增加。激光雷达技术监测气溶胶颗粒物垂直分布(廓线)的一种有效手段。激光技术和电子学技术的发展使激光雷达在对流层气溶胶颗粒物的探测高度、垂直跨度、空间分辨率、时间上的连续监测和测量精度等方面具有独特的优势, 是其它探测手段很难比拟的^[4-6]。激光雷达与风廓线雷达相结合可以监测颗粒物区域输送通量。一般来说, 在城郊之间放置激光雷达和风廓线雷达, 可以监测输入和输出的不同高度的气溶胶颗粒物通量, 基本原理如图 1 所示。激光雷达和风廓线雷达同步实时工作, 激光雷达测量的气溶胶颗粒物后向散射系数, 根据激光雷达方程反演出颗粒物的垂直分布。风廓线雷达获取距地面不同高度风场数据 V 。将风场矢量数据与输送通道方向矢量 R_0 进行矢量相乘, 则获取风向在输送通道上的投影值, 即颗粒物在输送路径上的输送速度。然后乘以颗粒物浓度 $\rho(z)$, 定量得到不同高度的输送通量 $flux(z)$ 。对不同高度的输送通量求和, 从而获得输送总量 $Sum(flux)$, 即

$$flux(z) = \rho(z) \cdot [V(z) \cdot R_0]$$

$$Sum(flux) = \sum^n flux(z), \quad (1)$$

当 $flux(z)$ 值为正时, 表示颗粒物沿输送路径方向进行输送; 反之, 表示颗粒物沿输送路径输出。

2.2 气态污染物区域排放通量监测技术

气态污染物区域排放通量的测量是利用太阳散射光作为光源的差分光学吸收光谱技术 (differential optical absorption spectroscopy, DOAS), 测量天顶紫外/可见吸收光谱, 通过有关的反演算法可

以获得痕量污染气体的垂直柱密度和空间分布。被动 DOAS 系统首次对火山烟羽进行测量, 成功获得火山喷发的烟羽中 SO_2 的垂直柱密度及其通量^[7]。将被动 DOAS 系统装置在车载移动平台上, 对污染源排放烟羽进行扫描测量, 并结合风场信息, 就可以获得污染源排放所产生的污染气体通量, 测量原理如图 2 所示。车载被动 DOAS 系统, 沿路径对烟羽剖面进行扫描测量, 或者沿城市环路测量。通过 DOAS 算法获得每个采样点的垂直柱密度 (VCD), 利用风廓线雷达获得风向和垂直于运动方向的风速 ($V_{风, \perp}$), 以及车速 ($V_{车}$) 和单次采样扫描烟羽的时间 (Δt), 则单位时间内污染物的排放通量 F 可由下式表示

$$F = VCD \cdot V_{车} \cdot V_{风, \perp} \cdot \Delta t. \quad (2)$$

为了获得污染源污染气体净排放通量, 通常采用围绕源一周连续进行测量的方法, 根据风向、风速, 通过进、出通量的差获得净通量 (即 $F_{净} = \sum F_{出} - \sum F_{进}$), 最终污染源的排放总量可由净排放通量与时间的乘积来获得^[8]。

2.3 挥发性有机物 (VOCs) 区域排放通量监测技术

挥发性有机物 (VOCs) 区域排放的测量是采用太阳掩星法通量监测技术 (solar occultation flux, SOF)^[9], 以太阳的红外辐射为光源, 利用车载平台测量 VOCs 的红外特征吸收光谱来反演待测气体

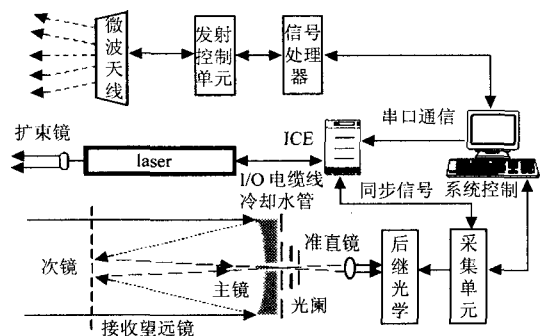


图 1 输送通量测量系统组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of the transport flux measurement system

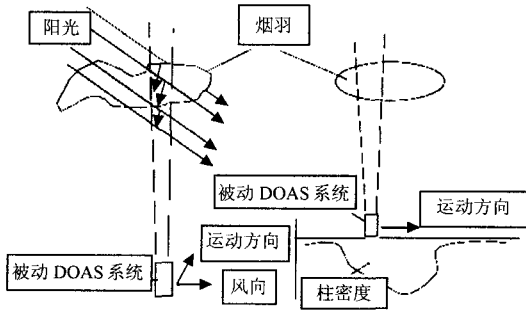


图 2 气态污染物被动 DOAS 测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of the emission monitoring by passive DOAS system

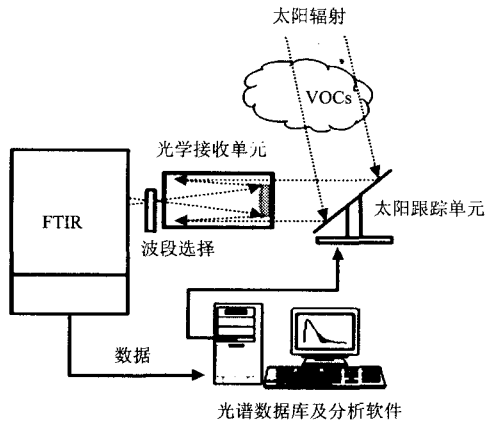


图 3 SOF 监测系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the SOF system

组分的垂直柱密度及空间分布,并结合气象参数(风向、风速)获取 VOCs 的区域排放通量。

SOF 系统主要包括太阳跟踪器、光学接收单元、FTIR 光谱仪及通量计算软件,系统如图 3 所示。整个系统安装在车载平台上进行快速移动测量,太阳红外辐射光穿过 VOCs 烟羽,由太阳跟踪器和光学接收及传输部分将烟羽选择吸收后的太阳光引入光谱仪,测量各个采样点的 VOCs 特征吸收光谱。从标准数据库中提取待测 VOCs 的标准吸收截面,结合系统仪器参数(如光谱分辨率、仪器线型函数)和气象参数(温度、压强),代入定量分析软件进行拟合反演运算,计算其垂直柱浓度。利用气象仪器提供的垂直于运动方向的风速以及 GPS 系统提供的测量点经纬度位置信息,由公式 (3) 计算出 VOCs 通过某一个测量区间垂直

平面的排放通量

$$flux = V'_{average} \int_{x_1}^{x_2} column(x) dx. \quad (3)$$

如果车载系统绕行某一区域做一周快速连续测量,可以获取该区域的净排放通量。SOF 监测技术可有效的应用于大型石化企业、化工园区及区域 VOCs 的排放监测。

2.4 区域气态污染垂直柱浓度与廓线监测技术

地基多轴 DOAS 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。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^[10]。通过在具有区域代表性的地点部署地基多轴 DOAS 系统,或沿区域污染输送通道布点,可以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,具有高的时间和空间分辨率。

图 4 为地基多轴 DOAS 系统的观测示意图。各个离轴方向的散射光通过望远镜收集进入光谱探测系统

$$I(\lambda, \theta) = I_0(\lambda) \exp \left[- \sum_{j=1}^J \sigma_j(\lambda) SCD_j + \sigma_{Mie}(\lambda) SCD_{Mie} + \sigma_{Ray}(\lambda) SCD_{Ray} \right], \quad (4)$$

公式 (4) 右边第一项代表痕量气体吸收,第二项为 Mie 散射,第三项为 Rayleigh 散射,其中 SCD_j 为痕量气体的斜柱密度,它可以采用 DOAS 反演算法处理获得。

根据斜柱密度与垂直柱密度的关系 $AMF_j(\lambda, \theta) \equiv SCD_j/VCD_j$, 可以获得痕量气体的垂直柱密度 VCD_j , 其中 AMF_j 可由大气辐射模型计算获得。

采用先验痕量气体廓线作为输入,通过大气辐射模型计算 SCD 并与实际观测值比较,调整廓

线参数(形状),通过非线性迭代反演使计算值与测量值达到最佳匹配,来获得痕量气体廓线^[11]。

2.5 区域大气复合污染立体监测技术系统

针对区域大气复合污染监测的技术需求,近年来,建立了以差分光学吸收光谱(DOAS)技术、可调谐二极管激光光谱(TDLAS)技术、激光诱导荧光光谱(LIF)技术、激光雷达(Lidar)技术、以及傅里叶红外光谱(FTIR)技术等主动、被动高分

辨率遥感监测技术系统,并研发了用于区域、立体、实时监测的系列设备,如表1所示。

针对我国经济快速发展过程中的大气环境污染问题,以我国重大环境应急监测工程需求为牵引,发展以先进环境监测技术为主的多种大气复合污染监测的关键技术,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

表 1 大气痕量气体与气溶胶颗粒物监测技术与仪器

Table 1 Techniques and instruments of atmospheric trace gases and aerosols monitoring

监测项目	大气要素	现有可应用测量技术
温室气体	二氧化碳(CO ₂)	TDLAS*、FTIR*、NDIR*、GC
	甲烷(CH ₄)	TDLAS*、FTIR*、NDIR*
	氧化亚氮(N ₂ O)	TDLAS*、FTIR*
	六氟化硫(SF ₆)	TDLAS*、FTIR*
	氟氯烃类(CFCs)	TDLAS*、FTIR*
	稳定同位素	TDLAS*、FTIR(12C,13C)、MS
反应性痕量气体	地面臭氧(O ₃)	DOAS*、FTIR*、紫外荧光、紫外光度法
	臭氧总量及廓线	Lidar*、Dobson、ZSL-DOAS
	一氧化碳(CO)	TDLAS*、FTIR*、NDIR*、GC
	二氧化硫(SO ₂)	DOAS*、FTIR*、紫外荧光法
	二氧化氮(NO ₂)	DOAS*、TDLAS、化学发光
	挥发性有机物(VOCs)	FTIR*、DOAS*、GC-FID
污染性痕量气体	亚硝酸(HNO ₂)	DOAS*、DENUDER
	氨(NH ₃)	TDLAS*、DOAS*、FTIR*
	甲醛(CH ₂ O)	DOAS*、TDLAS*、FTIR*、GC-FID
	一氧化氮(NO)	TDLAS*、DOAS*、化学发光法
	芳香烃有机物	DOAS*、GC
	离子成分	飞行时间质谱仪
气溶胶颗粒物	碳黑含量(BC)	气溶胶碳黑仪*
	物理特性(质量浓度PM _{2.5} 、PM ₁₀)	TEOM、颗粒物粒径分析仪
	光散射特性	Lidar*
	光学厚度等	Lidar*
	时空分布	Lidar*
	能见度	能见度仪*

注：“*”号为已经研发的技术和仪器设备

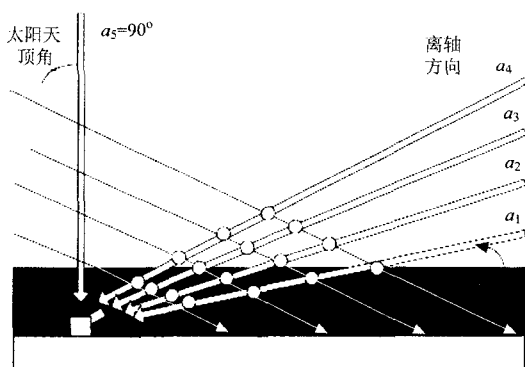


图 4 地基多轴 DOAS 测量示意图

Fig.4 Observation geometry of the multi-axis DOAS

合, 常规观测与高技术手段观测相结合, 构成区域大气复合污染立体监测技术系统, 如图 5 所示。特别是激光和光谱学技术与化学技术在许多测量平台中的互补的结合, 大大提高了探测灵敏度和痕量气体的探测种类, 可以以更高的灵敏度探测环境中低剂量和难以检测的污染物种类。通过建立大气环境污染立体监测技术, 开展技术示范研

究, 有助于提高对大气系统、大气环境演变的了解, 特别是对城市区域大气污染机制、输送过程的认知水平。

激光和光学监测技术的发展改变了大气环境研究传统的由点到线再到面的演绎法, 为大气环境研究提供了一个新的手段, 克服了传统大气环境研究中的诸多局限性。这些新技术的采用将测量低层大气环境任意测程上的化学和物理性质的测量手段从点式传感器转向距离分辨的遥感测量技术, 实现了多空间尺度性、多时间尺度性、多参数遥感遥测。

3 示范应用

围绕城市区域环境空气质量和污染源监测进行技术示范, 选择典型城市区域(城市群)大气复合污染和区域背景监测开展技术示范。北京市作为全国政治、经济和文化中心, 社会发展状况高于全国平均水平, 已经成为世界上快速发展的大都市之一。举办 2008 年奥运会带来巨大机遇和挑

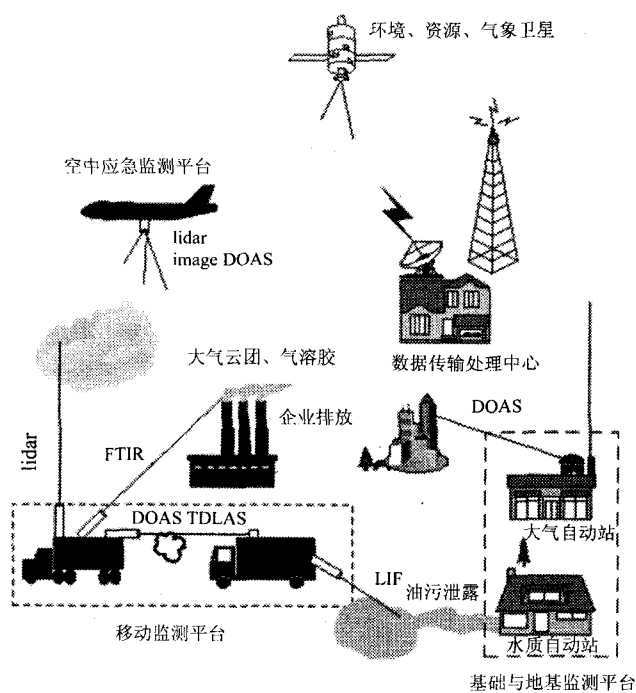


图 5 区域大气复合污染立体监测技术系统

Fig.5 Integrated spatio-temporal monitoring system for regional complex air pollution

战。作为拥有 1300 多万人口、处于快速发展时期的特大型城市, 面临的严峻问题之一就是严重的空气污染状况。大气污染已成为政府和社会关注的焦点。北京已具有覆盖全市主要地区的常规空气质量自动监测系统, 在监测的质量控制和质量保证方面也建立了一套相对完整的体系, 可以较好地反映北京市大气环境的实际状况。但是, 北京市的颗粒物来源及变化规律十分复杂。北京市人口稠密, 汽车尾气、工程施工、扬尘等都会产生颗粒物。同时, 北京市与周边地区存在明显的污染物传输过程, 在某些天气条件下, 这种传输导致的污染物汇聚使北京市的空气质量迅速恶化, 但周边省市地面常规监测数据不足以反映区域间的污染物输送状况。由于地形和自然环境所形成的污染物区域间传输和汇聚, 使北京的大气环境污染成因和过程十分复杂。而且, 对光化学污染的关注也对环境监测提出了新的要求。因此急需一种大气环境立体监测技术手段, 开展对污染物的输送通道的连续监测, 以弥补北京市大气环境例行业务在监测手段、内容和范围等方面的不足, 评估北京与周边区域大气污染及其相互影响的特征。所以, 结合 2008 北京奥运空气质量保障, 以

北京地区大气复合污染监测为对象, 开展大气环境污染立体监测技术示范, 应用于污染物的区域传输过程、量化特定地区的污染物排放总量、对机动车排放污染的监测、对高排放源的排查, 以及对与光化学污染有关的前体物的检测等。

2005~2008 年区域大气复合污染立体监测技术系统在北京进行了外场监测应用示范。特别是 2008 年奥运会和残奥会期间, 围绕北京重点污染源(燕山石化、首钢、首都机场)以及区域污染的东南和西南输送通道建立了 11 个监测站, 其中 3 个超级站, 以及 2 台移动监测车, 如图 6 所示。通过这些站点, 可以实时连续监测北京地区空气质量, 定量监测燕山石化、首钢、首都机场等主要污染源污染物排放通量, 监测北京四环、五环区域主要污染物排放通量, 实时测量北京东南和西南两个主要污染输送通道的颗粒物输送。大量的污染物立体监测数据为监测重点污染源控制效果、区域污染输送状况提供支持, 为奥运期间周边及重点污染源区对场馆地区的环境影响进行监测评估并提供技术支持。

利用集成的气溶胶颗粒物区域输送通量监测技术系统对北京东南和西南输送通道的颗粒物输

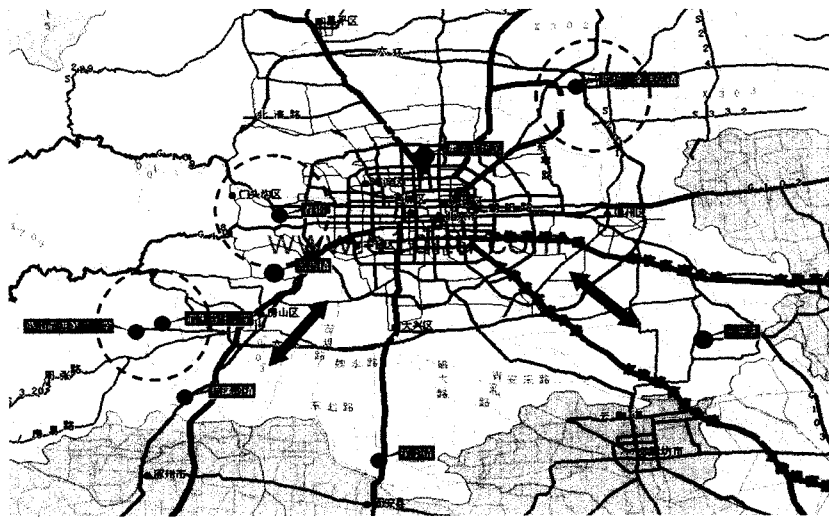


图 6 监测站点分布图 超级站(绿色圆点)、污染源(红色圆环)、输送通道(蓝色箭头)

Fig.6 Map of monitoring stations

Super Station(green dot), pollution source(red circle), transport channel(blue arrow)

送通量与总量进行了实时监测。图 7(a) 给出 6 月中到 7 月底西南通道 (云岗镇) 的颗粒物输送通量情况; 对通量在高度上进行积分, 可以得到从地面到 3 km 高度上的输送颗粒物总量, 如图 7(b) 所示。通量为正, 表示颗粒物向城区输送; 通量为负, 表示颗粒物由城区向城外输送。在东南风为主的风场作用下, 至限车的 7 月 20 日, 西南通道颗粒物基本以向北京城区内输送为主, 6 月 17 日~7 月 4 日一直持续以较大的通量向城内输送, 之后通量逐渐降低。永乐店地处北京东南角, 远离燕山山脉, 地势平坦, 有利于污染物扩散, 附近也没有重污染企业, 污染相对较轻。永乐店的边界层具有明显的昼夜变化特征, 工农业生产等人类活动对大气边界层的影响非常小, 这一点与西南通道的云岗镇明显不同。6~8 月的监测期间内, 永乐店的边界层没有明显变化, 限车前后边界层的特征基本一致, 限车对永乐店的影响比较小。这个站点的监测数据可以看作北京市颗粒物时空分布的背景特征。图 8(a) 给出了 6 月中到 7 月底

东南通道 (永乐店) 的颗粒物输送通量情况; 对通量在高度上进行积分, 可以得到从地面到 3 km 高度上的输送颗粒物总量, 如图 8(b) 所示。可以看出 7 月份, 东南通道输出明显小于西南通道的输入, 输入颗粒物通量是输出的 3~4 倍。

图 9 给出 7~9 月份西南通道 (云岗镇) 的颗粒物输送通量 (a) 和东南通道 (永乐店) 颗粒物输送通量 (b)。可以看出西南是北京颗粒物主要输入通道, 东南是颗粒物主要输出通道。虽然天气 (特别是输送通道上风) 是清除颗粒物的主要因素, 但是, 由于首钢和周边省市的减排限产, 8、9 月份周边对北京市区的颗粒物输送显著下降。值得指出的是与气象场有关, 天气仍然是决定颗粒物清除的最主要因素, 尤其是输送通道上风的影响。也就是说减排措施只能减少污染物的积累, 污染物的清除最终还要依靠天气。

为了对区域气体态污染物的分布进行监测, 在北京地区安装 MAX-DOAS 仪 9 套, 对奥运场馆、三大污染源及输送通等地点对流层 NO₂, SO₂

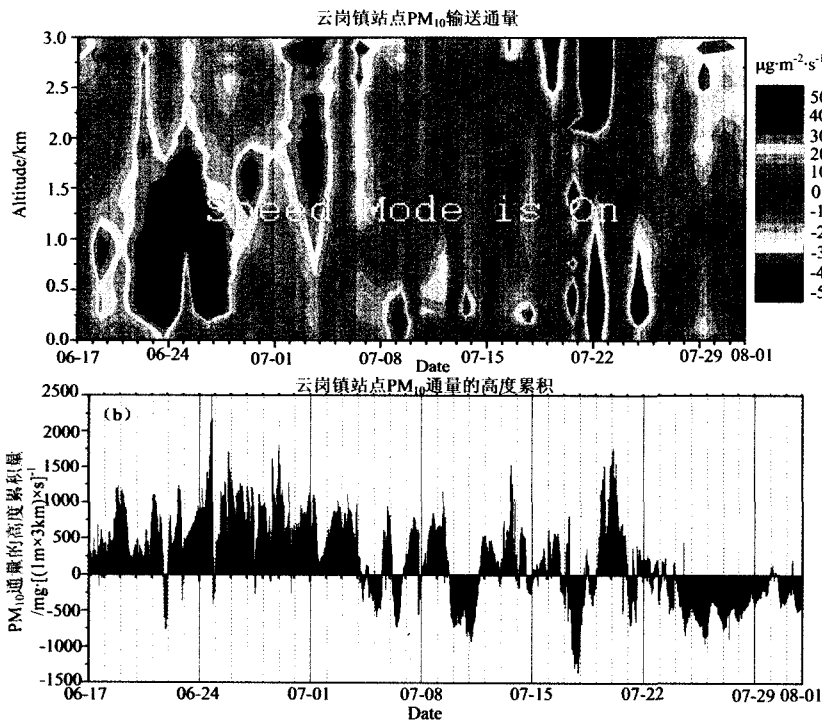


图 7 西南通道 (云岗镇) 颗粒物输送通量情况 (a); 输送的颗粒物总量 (b)

Fig.7 Air particle matter transport flux in southwest passageway (a), and the transport amount of the atmospheric particles (b)

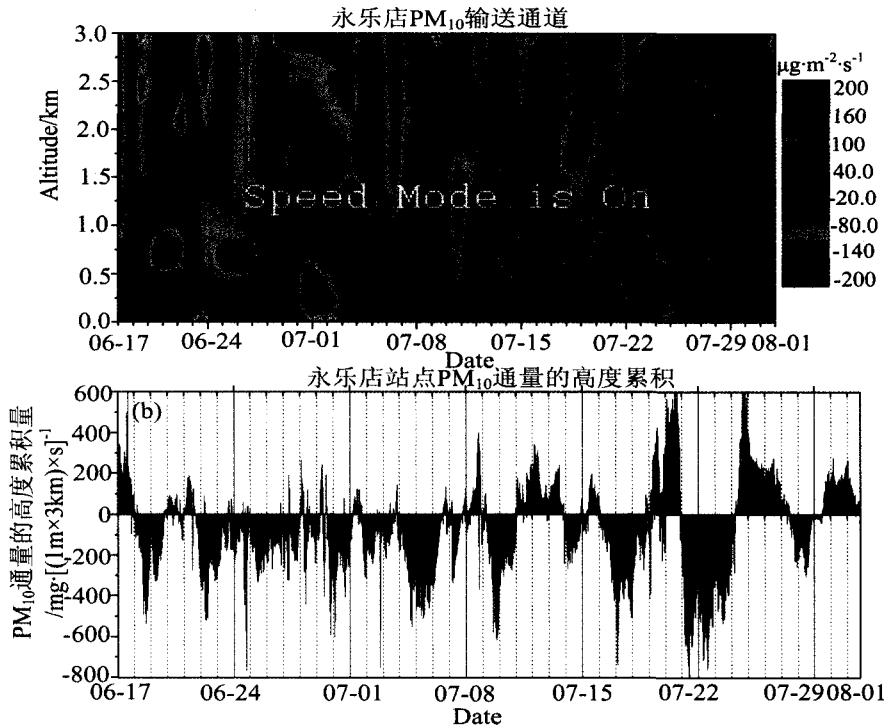


图 8 东南通道 (永乐店) 颗粒物输送通量情况 (a); 输送的颗粒物总量 (b)

Fig.8 Air particle matter transport flux in southeast passageway(a), and the transport amount of the atmospheric particles (b)

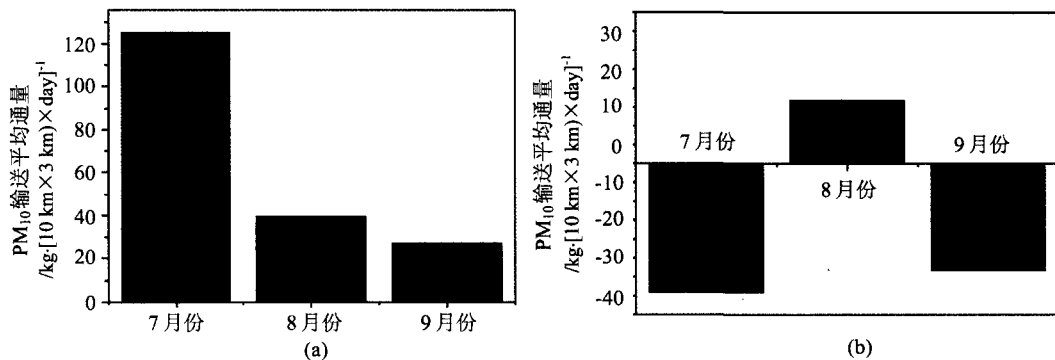


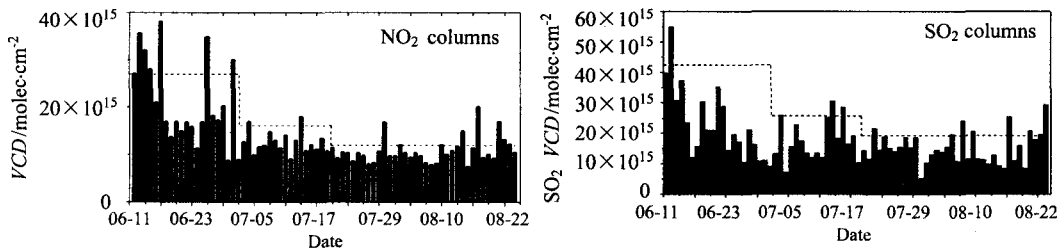
图 9 西南通道 (云岗镇) 颗粒物输送通量 (a); 东南通道 (永乐店) 颗粒物输送通量 (b)

Fig.9 Air particle matter transport flux in southwest passageway (a), and southeast passageway (b)

及整层 O₃ 垂直柱浓度进行实时监测。测量期间各站点的平均浓度反映区域整体污染状况, 沿输送通道的各站观测可以监测污染物的输送过程。

区域 NO₂ 和 SO₂ 的平均柱浓度各站点平均值如图 10 所示。可以看出其随着保障措施的实施, 各站点均值垂直柱浓度下降明显, NO₂ 平均

柱浓度 7 月份比 6 月份下降 42.7%, 8 月份比 7 月份又下降了 9%。SO₂ 平均柱浓度 7 月份比 6 月份下降 32.6%, 8 月份比 7 月份下降了 7%(如表 2 所示)。结合气象条件分析, 由于 6 月下旬连续阴雨, 合适的气象条件易于污染物的清除, 7 月份没有连续阴雨的影响, 污染物下降主要是由于空

图 10 区域各点 NO₂ 和 SO₂ 均值柱浓度Fig.10 Average column concentrations of NO₂ and SO₂表 2 测量期间各点月均值 NO₂ 垂直柱浓度对比Table 2 Vertical column concentrations of NO₂ in different measuring points

监测内容	6 月	7 月	8 月	9 月
各点均值 NO ₂ 柱浓度 (molec·cm ⁻²)	21.3×10 ¹⁵	12.2×10 ¹⁵	11.1×10 ¹⁵	13.5×10 ¹⁵
各点均值 SO ₂ 柱浓度 (molec·cm ⁻²)	24.2×10 ¹⁵	16.3×10 ¹⁵	15.2×10 ¹⁵	19.4×10 ¹⁵

气保障措施的实施。由于 7 月份北京的污染物浓度已经降至较低的水平, 因此 8 月份的下降比例相比 7 月份不十分明显。

沿输送通道各站点的气态污染物柱浓度可以反映于污染物的输送过程。由图 11 可以看出, 7 月 13 日在西南风的影响下, 污染物 SO₂ 表现为从西南方向(燕山石化)到东北方向(遥感所、首都机场)的传输。可以清楚的看出, 由西南往东北, 前朱各庄、首钢、遥感所和首都机场 NO₂ 峰值柱浓度在西南风的作用下依次出现。

图 12 为监测站点分布与距离示意图, 可以看出, 从前朱各庄小学到首钢约 24.6 km, 到遥感所约 46 km, 到达首都机场为 70 km, 而从污染物日变化曲线上可以看出, 污染物峰值在各站点出现的时间间隔约为 1 h。当日主导风向为西南风, 风速为 5~6 m/s@500~1000 m, 观测到的污染物沿输送通道传输与风场数据吻合的很好。说明在西南风向盛行时, 燕山石化、首钢一带对遥感所(奥运区域)有影响。

采用车载 DOAS 系统对五环内的市区 NO₂ 和 SO₂ 的排放通量进行监测。如图 13 所示, (a)

图为车行路线, (b) 图为五环内城区 SO₂ 排放通量的测量例子, 可以清晰看见主要工业污染源的排放高值。通过与风场数据结合, 估算出区域的污染物排放通量。

2005~2008 年以来采用车载 DOAS 围绕五环对城区污染物 NO₂ 和 SO₂ 的排放通量进行了监测, 可以发现, 减排控制措施效果明显, 2008 年的监测结果, 在路线的西面已看不到明显的工业源的排放如图 14 所示。3 年来的监测结果表明城区排放的 NO₂ 和 SO₂ 都呈明显的下降趋势, 如图 15 所示。

4 讨 论

大气复合污染立体监测技术系统将有助于形成“点、线、面”与“地、空、天”相结合的环境监测能力, 能够对光学遥感仪器进行定标, 比对校正监测结果。一般说来, 城市与周边地区存在明显的污染物传输过程, 可能存在污染物输送通道, 在输送通道上配置颗粒物和气态污染物的通量为主的监测设备, 并辅以风廓线雷达和卫星遥感的支持, 就可以获取城市与周边地区污染物输送发

生的条件、污染物输送的通量和总量、以及对城空气质量的影响等重要数据。

本地污染物的排放量是决定当地空气质量的根本因素。限于各行业整体管理和统计数据的水准、历史污染源数据库种类的不足, 以及社会经济高速发展所带来的污染源的不断变化, 传统污染源清单的建立方式面临严峻挑战。将传统源清单技术与分地区污染排放总量测量技术相结合, 开发以点源与分区排放总量为内容的分区污染源清单, 可以有效缓解和改善污染源的管理, 支持相应的环境决策。

为了制定控制减少大气污染方针政策, 建议:

- 1) 结合现有的气象数据, 研究制作当地污染物详细排放目录, 并不断更新, 鉴别以及量化主要排放源的各种污染物;
- 2) 使用 DOAS、FTIR、TDLAS、传统化学分析仪和卫星数据监测近地面层和更高空间的污染物;
- 3) 研究空气污染机制和循环方式;
- 4) 使用 1) 中的监测数据, 输入到大气化学污染预报模型研究短期和长期的情况, 最终, 实施有效必要的策略控制减少空气污染;
- 5) 为减少大气污染排放包括工业污染排放和机动车

污染排放, 提高当地空气质量, 最重要是制定实施成功有效的减少空气污染的方案。

本文重点讨论了发展 DOAS、FTIR、lidar、TDLAS 和 LIF 等主动、被动高分辨率遥感监测技术, 以及采用这些单项技术集成的研究区域尺度的地基 (定点、移动) 大气复合污染立体

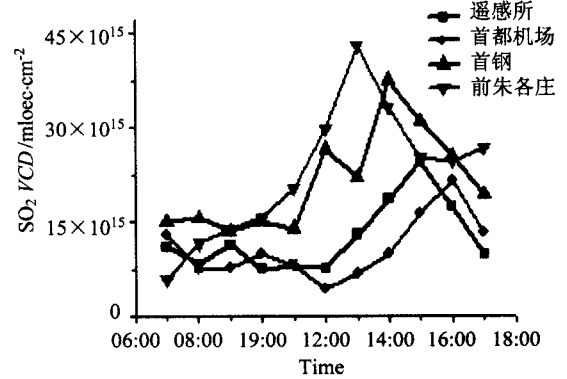


图 11 遥感所、首钢、前朱各庄及首都机场 SO₂ 垂直柱浓度日变化曲线

Fig.11 Diurnal variation of the SO₂ vertical columns at sites of IRSA, Capital Steel Company, Qianzhugezhuang and Beijing Capital Airport

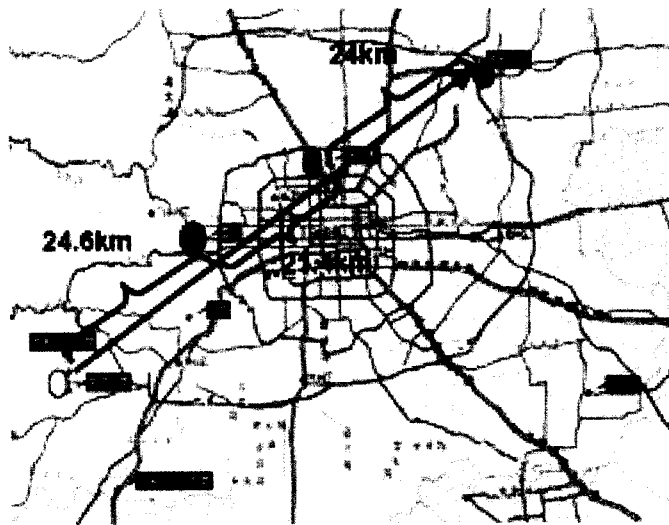


图 12 各监测站点分布与距离示意图

Fig.12 Distributions of the monitor stations

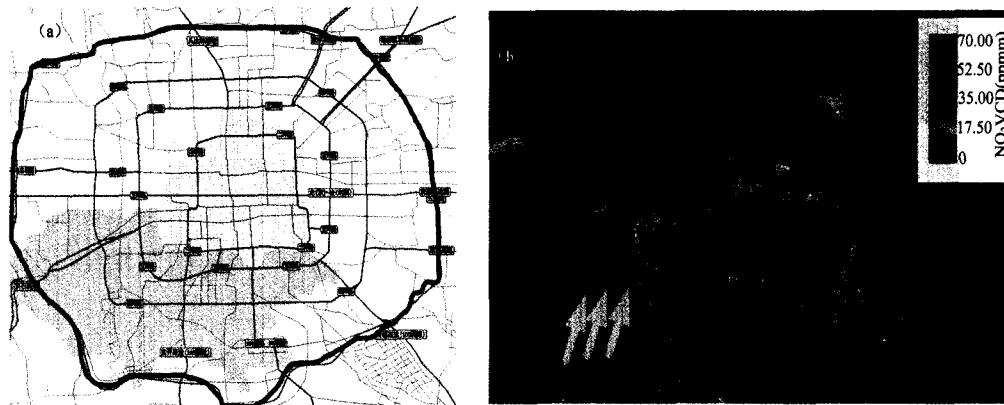


图 13 车载 DOAS 测量线路 (a) 及 2005 年五环内 SO₂ 排放测量例子 (b)

Fig.13 Measuring circuit of the mobile passive DOAS (a) and the example of the SO₂ emission in the Fifth Ring Road, 2005 (b)



图 14 2008 年五环 SO₂ 排放测量结果示意 (2008 年)

Fig.14 SO₂ emission in the Fifth Ring Road in 2008

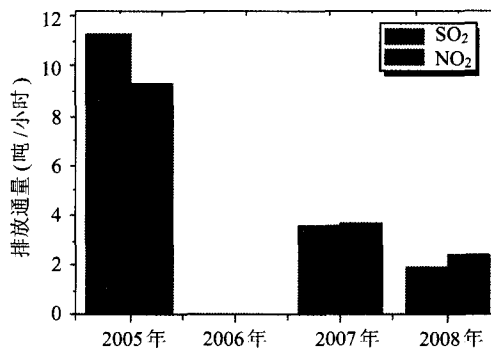


图 15 五环内 NO₂ 和 SO₂ 排放的逐年比较

Fig.15 SO₂ and NO₂ emissions in the Fifth Ring Road from 2005 to 2008

监测技术系统。至今还没有一种单一的测量技术能完全满足对大气痕量气体测量的所有要求，因此，各种技术的结合和集成才能实现大气复合污染的全面测量。监测技术未来的发展将集中在连续、在线监测仪器以及仪器的小型便携化方面，从而使仪器适宜于地基、车载、船载、无人机、气球等多种测量平台。激光和光谱学技术具有多组分测量、空间分布、高时间分辨率、高选择性、高检测灵敏度等优势，是近年来国际上大型外场实验观测的发展趋势。光谱学技术的应用还使传统方法无法监测的大气中瞬变物种的监测成为可能，其在区域环境污染评估监测、各种短寿命的反应性气体监测和光化学烟雾的重要前体物监测方面

都具有优势，是对常规监测技术的有力补充，同时也为在卫星平台上观测全球大气痕量气体成份和气溶胶颗粒物提供唯一途径。

参考文献:

[1] Zhou Shengxian. Pollution of brownish haze and ozone in the eastern cities has become a prominent problem [OL]. Xinhua Net, 2009-04-22. http://news.xinhuanet.com/necoscenter/2009-04/22/content_11238371.htm(in Chinese).
周生贤. 灰霾和臭氧污染已成东部城市空气污染的突出问题 [OL]. 新华网, 2009-04-22. <http://news.xinhuanet.com/necoscenter/2009-04/22/>

- [2] Liu Jianguo, Liu Wenqing. The current situation of environment monitoring instruments in industry and the monitoring high-tech researches in China [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(2): 14-18(in Chinese).
- 刘建国, 刘文清. 我国的环境监测仪器产业状况及监测高新技术创新的研究 [J]. *光电子技术与信息*, 2002, **15**(2): 14-18.
- [3] Clemitshaw K C. A review of instrumentation and measurement techniques for ground-based and airborne field studies of gas-phase tropospheric chemistry [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2004, **34**(1): 1-108.
- [4] Yang Hui, Liu Wenqing. Urban planetary boundary layer aerosol monitoring by Lidar at Beijing [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2006, **33**(9): 1255-1258(in Chinese).
- 扬 辉, 刘文清. 激光雷达监测北京城区夏季边界层气溶胶 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1255-1258.
- [5] De Young R J, Grant W B, Severance K. Aerosol transport in the California Central Valley observed by airborne lidar [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(21), 8351-8357.
- [6] Chin M, Diehl T, Ginoux P, et al. Intercontinental transport of pollution and dust aerosols: implications for regional air quality [J]. *Atmo. Chem. Phys.*, 2007, **7**(21), 5501-5517.
- [7] Galle B, Oppenheimer C, Geyer A, et al. A miniaturised ultraviolet spectrometer for remotesensing of SO₂ fluxes: a new tool for volcano surveillance [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, **119**(1-4): 241-254.
- [8] Li Ang, Xie Pinhua, Liu Wenqing. Monitoring of total emission from sources based on passive differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1537-1542(in Chinese).
- 李 昂, 谢品华, 刘文清. 被动差分光学吸收光谱法监测污染源排放总量研究 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1537-1542.
- [9] Mellqvist J, Kihlman M, Samuelsson J, et al. The solar occultation flux (SOF) method, a new technique for the quantification of fugitive emissions of VOCs [C]. A&WMA's 98th Annual Conference & Exhibition, Minneapolis, USA, 2005.
- [10] Hönninger G, von Friedeburg C, Platt U. Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2004, **4**: 231-254.
- [11] Palazzi E, Petritoli A, Ravegnani F, et al. Multiple axis DOAS measurements for the retrieval of nitrogen dioxide and ozone vertical profiles in the Presidential Estate of Castel Porziano (Rome) [C]. *Proc. of SPIE*, **6745**: 67451Y-1.

作者简介: 刘文清 (1954-), 男, 江苏人, 研究员、博士生导师, 希腊克里特大学与欧共体克里特研究中心博士, 安徽光机所环境光学与环境遥感监测技术学科带头人, 毕业于中国科技大学, 曾在日本国立公害研究所、意大利米兰工业大学、日本千叶大学和德国海德堡大学做博士后、访问学者和高级访问学者, 作为项目负责人多次承担国家 863 项目、中科院方向性创新项目、科技部科技攻关项目、省市科技攻关项目以及企业合作项目, 与国外学术界有广泛的联系和学术合作, 主要从事环境光学特性、有害痕量气体光学与光谱学监测方法、新型环境监测技术研究, 主要研究领域为环境监测中的差分吸收光谱学 (DOAS)、可调谐二极管激光光谱学 (TDLAS)、激光诱导荧光 (LIF)、激光雷达 (Lidar) 和傅里叶光谱学 (FTIR) 技术。