

文章编号: 0253-2239(2009)02-0297-06

大气污染物垂直廓线扫描差分吸收光谱方法研究

朱燕舞 谢品华 窦科 刘世胜 秦敏 李素文 司福祺 刘文清

(中国科学院合肥物质科学研究院, 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 差分光学吸收光谱法(DOAS)已经成为测量大气痕量气体含量的常用方法,该方法灵敏度高,可同时监测多种大气痕量气体。提出了应用差分吸收光谱方法监测大气痕量气体垂直分布,结合放置数套角反射器的近地层高塔,研制出扫描长光程差分吸收光谱(扫描 LP-DOAS)系统。应用此系统于 2007 年夏季对北京城市重要大气污染物 NO₂ 的垂直分布进行了外场监测,准确获得了 NO₂ 沿各光路的积分浓度,确定了系统在各光路的检测限和系统总的测量误差。基于垂直廓线模型,成功反演了 NO₂ 的垂直廓线和垂直梯度。研究结果表明扫描 LP-DOAS 技术监测城市大气近地层痕量气体垂直分布的可行性。

关键词 大气光学;扫描长光程差分吸收光谱系统;垂直廓线监测;二氧化氮

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0297

Study on Scanning Differential Optical Absorption Spectroscopy for Monitoring Vertical Profiles of Atmospheric Pollutant

Zhu Yanwu Xie Pinhua Dou Ke Liu Shisheng

Qin Min Li Suwen Si Fuqi Liu Wenqing

(*Key Laboratory of Environmental Optical & Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China*)

Abstract Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) has become a widely used method for the simultaneous detection of atmospheric trace gases with low detection limits. DOAS method is proposed for monitoring the vertical distribution of atmospheric trace gases. Based on DOAS technique and a high tower with angle-reflectors, the scanning long-path(LP)-DOAS system is developed. Field observations of vertical distribution of NO₂ was performed by using the scanning LP-DOAS system in the summer of 2007. The NO₂ concentrations along three light paths were accurately measured, and the detection limits along three light paths and the total systematic error were obtained. The vertical profiles and vertical gradient of NO₂ were successfully retrieved by using the vertical profiles model. The results indicate that the scanning LP-DOAS system can perform vertical observations of trace gases in the urban boundary layer.

Key words atmospheric optics; scanning long-path differential optical absorption spectroscopy; monitoring of vertical profile; nitrogen dioxide

1 引 言

大气边界层是地球动量、能量和各种物种(水份、二氧化碳和其它温室气体及各种污染物成分)上下输送的通道。城市各污染源排放的大气污染物(O₃, NO_x, HCHO, NO₃, SO₂ 及 HONO 等)的扩

散、输送和沉降主要集中在大气边界层,大气污染物对人类和其它生物造成的危害也出现在该层,要深入了解大气边界层的大气物理化学过程就需要掌握污染物的空间分布特征。因此研究大气污染物在近地面不同高度的垂直分布状况日趋重要^[1]。对于城

收稿日期: 2008-04-22; 收到修改稿日期: 2008-08-02

基金项目: 国家 863 计划(2006AA06A301; 2007AA12Z109)和中国科学院知识创新工程(kzcx1-yw-06-01)资助项目。

作者简介: 朱燕舞(1977-),女,博士研究生,主要从事环境检测方面的研究。E-mail: zhuyw@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954-),男,研究员,博士生导师,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、新型环境监测技术的研究。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

市近地边界层大气痕量气体垂直分布观测,国内有利用系留气艇携带点式监测仪器进行探测^[2];也有将点式监测仪器放置于近地边界层高塔平台或者高层建筑直接在线观测^[3,4]。但是这些监测技术成本较高,往往一台仪器仅能获得一种气体的浓度,而且一个平台有时很难容纳较多仪器同时监测;再者仅能提供一个或几个位置上的浓度,很难给出痕量气体近地层平均浓度以及垂直分布廓线。国外在这方面的研究较多,主要利用高层建筑或近地边界层高塔为平台放置多套角反射器,应用差分吸收光谱(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)技术进行多种大气污染物的同时垂直廓线监测^[5~7]。DOAS 技术是遥测、非接触式测量,具有高灵敏度、高时间分辨率、不破坏痕量气体特性等优点,目前已逐渐发展成为大气污染气体观测较为理想的技术。本文提出了获得大气痕量气体垂直廓线的扫描 DOAS 方法。结合放置角反射器的近地层高塔,研制出扫描 LP-DOAS 系统。描述了系统的结构,利用开发的自校正系统——望远镜准确接收角反射器最大反射光强,实现了系统在扫描监测过程中望远镜和各个角反射器之间的精确瞄准。应用此系统于 2007 年夏季对北京城市重要大气污染物 NO₂ 的垂直分布进行了外场监测,准确获得了 NO₂ 沿各光路的积分浓度,获得了各光路的平均检测限及系统总的测量误差。基于垂直廓线模型,成功反演了 NO₂ 的垂直廓线和垂直梯度。研究表明扫描 LP-DOAS 技术监测城市大气近地层痕量气体垂直分布的可行性。

2 扫描 LP-DOAS 系统设计

2.1 系统的测量原理和结构

DOAS 法最初由 Perner 和 Platt 等人^[8,9]在 20 世纪 70 年代末提出,目前已发展成为大气污染监测的常用方法之一。图 1 为设计研发的扫描 LP-DOAS 系统的结构图,该系统主要包括光源、望远镜、光纤、光谱仪、探测器及三套角反射器。系统采用发射-接收为一体的 Cassegrain 望远镜(直径为 220 mm,相对孔径 $f/4$,焦距 645 mm),以 150 W 氙弧灯为光源,同时将光源内置于望远镜内部,结构紧凑并可实现扫描 DOAS 系统室外正常运行。望远镜系统以旋转底座为支撑,通过步进电机驱动旋转底座实现望远镜在水平和垂直方向上的自动扫描,采用最小细分(分辨率为 0.0003° ,可以调节转动速度)和从上至下的循环扫描方式并结合开发的

自校正系统确定角反射器最大反射光强,从而有效地避免了望远镜系统空回,解决了难以确定最大反射光强的问题,实现了系统在扫描监测过程中与各高度平台角反射器之间的精确瞄准。将 DOAS 系统在不同光路采集得到的光谱经 DOAS 浓度反演算法^[10],准确地获得了大气污染物沿各个光路的平均浓度。

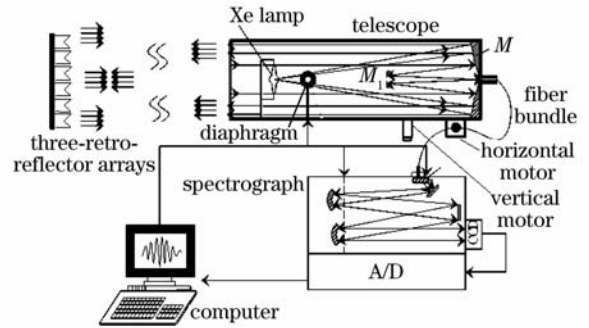


图 1 扫描 DOAS 系统原理图

Fig. 1 Sketch of scanning DOAS system

系统采用的接收望远镜和连接到光谱仪上的石英光纤的光学设计与光谱仪的孔径数相一致,从而将光强的损失降到最低。为了降低暗电流,探测器制冷到 -20°C ,得到平均偏置 159.37 counts,平均暗电流 8.0 count/s。光谱仪绝缘、恒温,杂散光影响小,采用 600 lp/mm 的光栅,光谱范围 283.9~373.5 nm,334.15 nm 的光谱分辨率为 0.21 nm,可满足多种大气痕量气体的同时监测。通过对系统测试,结果表明完成一次扫描周期的时间分辨率小于 18 min,大气能见度较好的条件下,最小时间分辨率达到 7 min。整套扫描 LP-DOAS 系统结构简单,性能稳定,操作简单、维护费用低和调试时间短。

2.2 垂直浓度廓线和梯度的反演

根据 DOAS 方法的测量原理^[11,12]可得到各种痕量气体沿光路的平均浓度。基于单个光路上气体的平均浓度和 BOX 垂直浓度廓线模型进而得到每一层气体的平均浓度即得到气体的垂直浓度廓线。图 2 显示了 BOX 垂直廓线模型示意图, h_0 表示望远镜的高度, $h_{1\sim3}$ 分别表示第 1~3 个角反射器的高度, $l_{1\sim3}$ 为第 1~3 条光路的光程。定义 $\bar{c}_{1\sim3}$ 为沿三条光路污染物的平均浓度, $c_{1\sim3}$ 为第 1~3 个角反射器所在层的污染物平均浓度。三个不同高度的角反射器将近地层分为上、中、下三层(即上、中、下三个 BOX),利用 DOAS 测量得到的沿三个光路的污染物平均浓度 $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3$ 计算各层平均浓度 c_1, c_2, c_3 。光路上气体的平均浓度由光路所穿过的各层平均浓

度以及相应层高所决定^[5~7]:

$$\bar{c}_i = \frac{1}{h_i} \sum_1^i c_i (h_i - h_{i-1}), \quad (1)$$

整理得到各层平均浓度为

$$c_i = \frac{\bar{c}_i h_i - \bar{c}_{i-1} h_{i-1}}{h_i - h_{i-1}}. \quad (2)$$

设计的扫描 LP-DOAS 系统光路如图 2 所示,光路参数见表 1。第一条和第二条光路分别仅穿过底层 Box 和 中层 Box,根据(2)式得到底层 Box 和 中层 Box 平均浓度即为第一条和第二条光路的平均浓度

$$c_1 = \bar{c}_1, \quad c_2 = \bar{c}_2, \quad (3)$$

上层光路穿过中层 Box 和上层 Box,由(2)式和(3)式推导得到上层 Box 的平均浓度如下式所示

$$c_3 = \frac{\bar{c}_3 h_3 - \bar{c}_2 h_2}{h_3 - h_2}. \quad (4)$$

在获得垂直廓线的基础上,利用下式进行垂直梯度的计算

$$\frac{\Delta c}{\Delta z} = \frac{c_3 - c_1}{z_3 - z_1}. \quad (5)$$

这里假设每层污染物的垂直浓度梯度是常数或作线性变化^[5]。

上式中 z_1, z_3 分别表示上层 Box 和底层 Box 中心的高度,即 $z_1 = \frac{h_0 + h_1}{2}, z_3 = \frac{h_3 + h_2}{2}$ 。

表 1 扫描 LP-DOAS 系统光路参数

Table1 Light paths and retro-reflector arrays height of LP-DOAS system

Instrument setup height/m	Light path length/m	Height of layer/m
$h_1 = 16$	$l_1 = 470 \times 2$	Lower box 16~27
$h_2 = 100$	$l_2 = 476 \times 2$	Middle box 27 ~ 100
$h_3 = 180$	$l_3 = 494 \times 2$	Upper box 100 ~ 180
$h_0 = 27$		

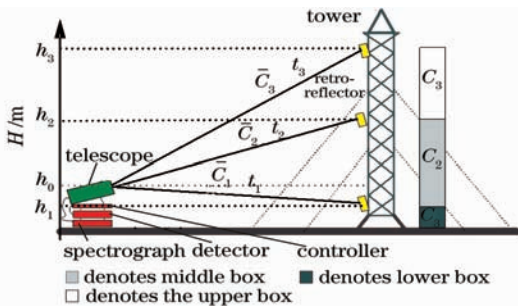


图 2 扫描 LP-DOAS 垂直廓线模型示意图
Fig. 2 Schematic view of the vertical profile model of scanning LP-DOAS

3 外场观测实验

3.1 测量地点

测量地点位于北京市朝阳区德胜门外祁家豁子附近,处于北京市正北的四环路和三环路之间。扫描 LP-DOAS 望远镜放置在中国科学院地质和地球物理研究所 9 楼楼顶,三套角反射器分别放置于中科院大气所气象塔的 16 m、100 m 和 180 m 的平台上。测量点附近主要是交通和居民区以及建筑工地。

3.2 光谱数据的反演和数据质量

为了验证该系统监测大气痕量气体垂直廓线的可行性,于 2007 年 8 月测量了大气重要污染物 NO₂ 的垂直廓线,反演波段为 329~370 nm,对浓度反演进行了优化,从而有效的避免了氙灯结构、HCHO 和 HONO 在此波段对 NO₂ 吸收的干扰,具体的 DOAS 反演方法可参见文献[10]。图 3 示意了 2007 年 9 月 1 日夜间 22:39 在上层光路采集得到的大气谱反演 NO₂ 浓度的过程。图 3(a)是采集的大气谱经过一系列处理后得到的差分光学密度(OD,灰线)与(48.3±0.2)×10⁻⁹体积分数 NO₂ 参考谱(黑线)的叠加。从图 3(b)可明显看出 HCHO 对 NO₂ 吸收的干扰,图 3(c)是扣除了氙灯结构和 NO₂ 吸收后的谱(灰线)与干扰组分 HCHO 参考谱(黑线)的叠加。扣除上述气体和氙灯结构的吸收后能够明显看到 HONO 的吸收,HONO 的体积分数为(1.06±0.1)×10⁻⁹,图 3(d)是拟合最后得到的剩余噪声,1σ 的剩余噪声约为 1.1×10⁻⁴。图 4 和图 5 分别示意了此扫描循环过程在中层和底层光路测量得到的光谱反演 NO₂ 的过程,详细过程

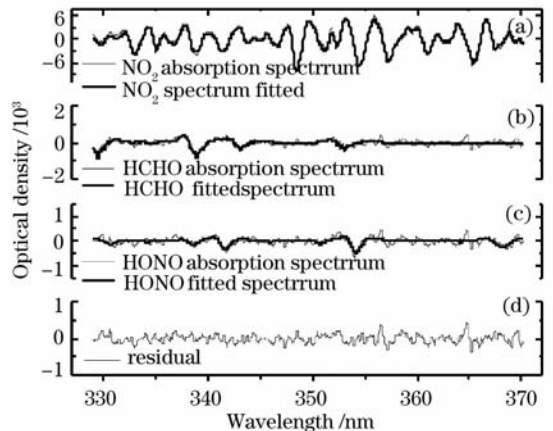


图 3 上层光路 NO₂ 的浓度反演(2007/09/01,22:39, NO₂(48.3±0.2)×10⁻⁹,HONO(1.06±0.1)×10⁻⁹)
Fig. 3 NO₂ concentration retrieval of the upper light path (1 September 2007, 22:39, NO₂(48.3±0.2)×10⁻⁹, HONO(1.06±0.1)×10⁻⁹)

与图 3 相同。

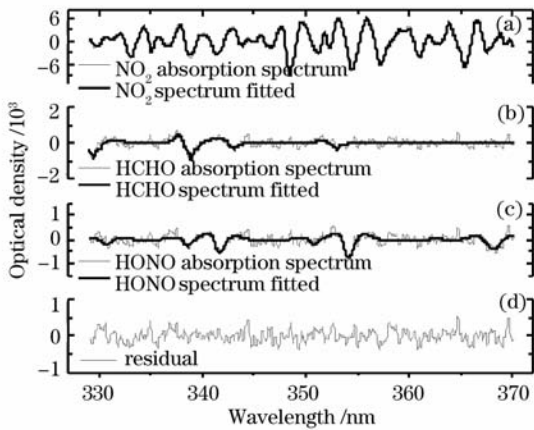


图 4 中层光路 NO_2 的浓度反演(2007/09/01, 22:45, $\text{NO}_2 (55.0 \pm 0.1) \times 10^{-9}$, $\text{HONO} (1.70 \pm 0.06) \times 10^{-9}$)
Fig. 4 NO_2 concentration retrieval of the middle light path (1 September 2007, 22:45, $\text{NO}_2 (55.0 \pm 0.1) \times 10^{-9}$, $\text{HONO} (1.70 \pm 0.06) \times 10^{-9}$)

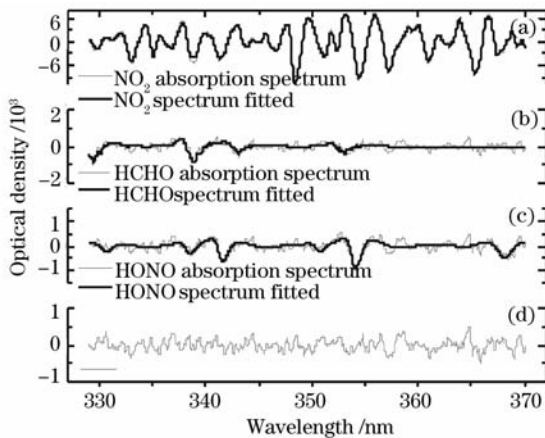


图 5 底层光路 NO_2 的浓度反演(2007/09/01, 22:49, $\text{NO}_2 (66.9 \pm 0.2) \times 10^{-9}$, $\text{HONO} (2.00 \pm 0.1) \times 10^{-9}$)
Fig. 5 NO_2 concentration retrieval of the lower light path (1 September 2007, 22:49, $\text{NO}_2 (66.9 \pm 0.2) \times 10^{-9}$, $\text{HONO} (2.00 \pm 0.1) \times 10^{-9}$)

研发扫描 LP-DOAS 系统的重点在于实现仪器扫描过程中系统光学部分和机械部分的可靠性和稳定性。因此实验也研究了环境变化对测量产生的影响。为了弥补由温度变化产生的影响,除了对光谱仪进行绝缘、恒温保护外,对拟合过程光谱的漂移、压缩或拉伸分别进行限定,从而有效的弥补了环境温度变化产生的光谱漂移、压缩或拉伸。通过 DOAS 算法和提高测量的积分时间能有效的消除大气能见度对测量数据质量产生的影响。反演得到剩余噪声典型的峰峰值为 10^{-3} 左右,光谱漂移 ± 2 pixel,压缩或者拉伸 $0.999 \sim 1.002$ pixel,表明

实验期间仪器稳定、数据可靠。

3.3 探测限和误差

系统的探测限(即最低检测限)可根据 6 式计算^[13]:

$$C_{\min} = \frac{\tau_{\text{Res}}}{\delta(\sigma) L \sqrt{N}}, \quad (6)$$

式中 C_{\min} 表示系统可探测的最低浓度(10^{-9}); τ_{Res} 表示剩余结构的差分光学密度; $\delta(\sigma)$ 表示体积分数为 1×10^{-9} 吸收气体的差分吸收截面; L 表示光程(cm); N 表示吸收气体光谱拟合范围内吸收峰的个数。由此计算得到该系统测量 NO_2 在上层、中层和下层光路的平均检测限分别为 0.36×10^{-9} 、 0.62×10^{-9} 和 0.63×10^{-9} 。

DOAS 系统误差包括实验误差、采用标准吸收截面的测量误差以及最小二乘法拟合误差。根据实验室大量工作可知对于本系统的实验误差约 2% (其中包括偏置、暗电流和杂散光等)^[14~16],对于所采用的 NO_2 吸收截面的测量误差为 6%^[17],对于光谱拟合过程的误差,Stutz 和 Platt^[18] 对其进行了讨论,通常约为“纯”统计误差 1σ 的 3 倍,对于 NO_2 的拟合,结果表明误差小于 10%,根据高斯误差传递公式得到总的测量误差在 12% 以内。

3.4 NO_2 垂直分布测量结果

图 6 显示了基于 BOX 垂直廓线模型得到测量期间 NO_2 体积浓度的垂直廓线[如图 6(a)]和垂直梯度[如图 6(b)]的平均日变化趋势。由图可见 NO_2 在三层中均表现出明显日变化趋势,从早晨 6:00 左右交通量开始增加,因交通排放致使 NO_2 的浓度逐渐增加,在 7:00~10:00 出现峰值;因太阳辐射增强, NO_2 光解,其浓度迅速下降,16:00 左右光解减弱并逐渐消失,伴随晚间交通高峰, NO_2 浓度开始积累,在午夜出现最大值。可见 NO_2 白天由于光解,浓度较低,14:00 出现最低值;夜间浓度积累,在午夜出现峰值。如图 6 所示 NO_2 存在明显的垂直分层变化趋势,最底层浓度最高,中间层其次,最高层浓度最低,可见 NO_2 主要来自于地面排放源即交通排放,通过大气传输由底层向高层传输。底层和 100 m 范围内 NO_2 垂直浓度分层变化较小,而达到 180 m 时, NO_2 垂直浓度变化迅速增加,由此可见在近地层 100 m 范围内 NO_2 混合较为均匀。由图 6(b)可见, NO_2 有着明显的负梯度变化趋势,中午由于光解三层浓度基本达到本底值,梯度消失;夜间 NO_2 浓度开始积累且大气湍流减弱垂直传输较慢, NO_2 梯度达到最大值,实验结果表明测量

地点与文献[5]具有相似 NO₂ 垂直浓度分层变化规律。

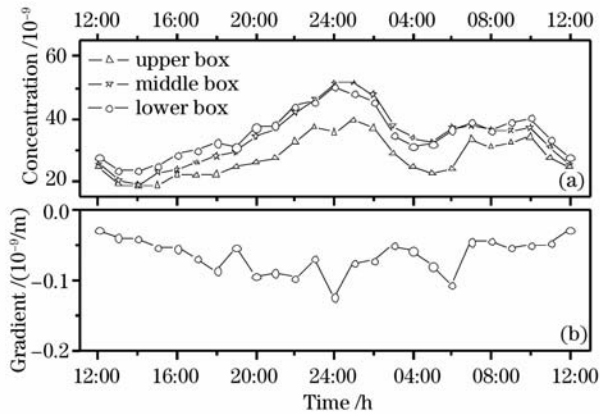


图 6 NO₂ 垂直浓度廓线和垂直梯度时间序列

Fig. 6 Vertical variation of NO₂ concentration profile and gradient

4 结论和展望

差分光谱吸收方法已广泛用于监测大气痕量气体浓度,本文在现有技术的基础上,研发出应用于监测城市近地层大气痕量气体垂直廓线的扫描 LP-DOAS 系统。以近地层高塔为放置角反射器的平台,最小细分驱动步进电机扫描和从上至下的循环扫描方式并结合开发的自校正系统确定角反射器最大反射光强,从而有效的解决了望远镜系统空回、难以确定最大反射光强的问题,实现了系统在扫描监测过程中与各高度平台角反射器之间的精确瞄准。经过测试表明仪器稳定、操作简单、日常维护费用低、调试仪器耗费时间短。应用此系统对大气重要污染物 NO₂ 的垂直分布进行了监测,通过对光谱数据的反演和各个光路的光谱数据质量的分析,证实系统具有较高的灵敏度和信噪比,得到 NO₂ 在上层、中层和底层光路的检测限分别为 0.36×10^{-9} 、 0.62×10^{-9} 和 0.63×10^{-9} ,系统总的测量误差在 12% 以内;同时利用 BOX 垂直廓线模型成功解析得到 NO₂ 明显的负垂直廓线和负垂直梯度。研究结果表明利用扫描 LP-DOAS 技术监测城市大气近地层痕量气体垂直分布的可行性。

DOAS 技术一次可以采集较宽的光谱范围,从而可同时得到多种大气污染物浓度信息;也可以在更多平台上安装角反射器,由此得到污染物多层浓度变化信息。因此采用扫描 LP-DOAS 技术能同时获得多种大气污染物详细的垂直浓度分层信息,有利于研究污染物的垂直扩散、演变和其化学反应过程。

参 考 文 献

- Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. *Chin. J. Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(4): 713~728
胡非,洪钟祥,雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. *大气科学*, 2003, **27**(4): 713~728
- Zheng Xiangdong, Ding Guoan, Sun Mingfeng *et al.*. Preliminary analysis on boundary layer ozone vertical profiles observed in winter in Beijing urban region [J]. *J. Applied Meteorological Science*, 2002, **13**(Suppl.): 100~108
郑向东,丁国安,孙敏峰等. 北京冬季低层大气 O₃ 垂直分布观测结果的研究[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(特刊): 100~108
- Ding Guoan, Meng Zhaoyang, Yu Haiqing *et al.*. Measurement and research on abl air pollution in Beijing [J]. *J. Applied Meteorological Science*, 2002, **13**(Suppl.): 82~91
丁国安,孟昭阳,于海青等. 北京城区大气边界层空气污染特征观测研究[J]. *应用气象学报*, 2002, **13**(特刊): 82~91
- Sun Yang, Wang Yuesi, Liu Guangren *et al.*. Analysis for vertical profile of atmospheric SO₂ during air seriously polluted days in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**: 408~414
孙扬,王跃思,刘广仁等. 北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO₂ 的垂直分布分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**: 408~414
- S. Wang, R. Ackermann, J. Stutz. Vertical profiles of O₃ and NO_x chemistry in the polluted nocturnal boundary layer in Phoenix, AZ: I. Field observations by long-path DOAS [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, **6**: 2671~2693
- J. Stutz, B. Alicke, R. Ackermann *et al.*. Vertical profiles of NO₃, N₂O₅, O₃, and NO_x in the nocturnal boundary layer: 1. Observations during the Texas Air Quality Study 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D12 306
- V. Hansjörg, K. Bernd, M. Mirko *et al.*. New techniques for measurements of atmospheric vertical trace gas profile using DOAS[J]. *Optical and Radar Techniques*, 2002, (4): 17~26
- U. Platt, D. Perner, H. Patz. Simultaneous measurements of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ in the polluted troposphere by differential optical absorption [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84D**: 6329~6335
- U. Platt, D. Perner. Direct measurements of atmospheric CH₂O, HNO₂, O₃, NO₂ and SO₂ by differential optical absorption in the near UV [J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**: 7453~7458
- Zhou Bin, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Study of concentration retrieving method in differential optical absorption spectroscopy for measuring air pollutants [J]. *Acta Physica Sinica.*, 2001, **50**(9): 1818~1823
周斌,刘文清,齐峰等. 差分吸收光谱法测量大气污染物的浓度反演方法研究[J]. *物理学报*, 2001, **50**(9): 1818~1823
- Si Fuqi, Liu Jianguo, Xie Pinhua *et al.*. Determination of size distribution of atmospheric aerosol by DOAS [J]. *Acta Physica Sinica.*, 2006, **55**(6): 3165~3169
司福祺,刘建国,谢品华等. 差分吸收光谱技术监测大气气溶胶粒径分布[J]. *物理学报*, 2006, **55**(6): 3165~3169
- Li Suwen, Xie Pinhua, Li Yujin *et al.*. Wavelet transform based differential optical absorption spectroscopy data processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1601~1604
李素文,谢品华,李玉金等. 基于小波变换的差分吸收光谱数据处理方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1601~1604
- Qin Min, Xie Pinhua, Liu Jianguo *et al.*. Study on UV-visible DOAS system based on photodiode array (PDA) [J].

- Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(9): 1463 ~ 1467
- 秦 敏, 谢品华, 刘建国 等. 基于二极管阵列 PDA 的紫外-可见差分吸收光谱(DOAS)系统的研[J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(9): 1463~1467
- 14 Li Suwen, Liu Wengqing, Xie Pinhua *et al.*. Measurement of nighttime nitrate radical concentration in the atmosphere by long-path differential optical absorption spectroscopy [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 2007, **24**(5): 875~880
- 15 Xie Pinhua. Investigation of Monocyclic Aromatic Hydrocarbons by DOAS in Typical Chinese Cities [D]. Hefei: Chinese Academy of Sciences, 2003, 68~69
- 谢品华. 中国典型城市大气单环芳香烃的差分吸收(DOAS)研究[D]. 合肥: 中国科学院, 2003. 68~69
- 16 Zhou Bing, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Error analysis in differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 957~961
- 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
- 17 W. Schneider, G.K. Moortgat, G. S. Tyndall *et al.*. Absorption cross-sections of NO₂ in the UV and visible region (299 ~ 700 nm) at 298 K [J]. *J. Photochem. Photobiol.*, 1987, **40A**: 195 ~ 217
- 18 J. Stutz, U. Platt. Numerical analysis and estimation of the statistical error of differential optical absorption spectroscopy measurements with least-squares methods [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(30): 6041~6053