

文章编号: 0253-2239(2006)07-0961-4

# 差分吸收光谱技术监测气溶胶光学厚度及大气能见度的研究\*

司福祺<sup>1</sup> 刘建国<sup>1</sup> 谢品华<sup>1</sup> 张玉钧<sup>1</sup> 刘文清<sup>1</sup> 久世宏明<sup>2</sup> 刘 诚<sup>2</sup> 竹内延夫<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)  
(<sup>2</sup> 日本千叶大学环境与遥感中心, 日本 千叶县 263-8522)

**摘要:** 介绍了一种基于闪烁氙灯光源、利用差分光谱吸收(DOAS)技术监测大气气溶胶的新方法。提出用大气能见度确定系统校正参量的可行做法,解决了差分光谱吸收探测气溶胶领域原始光强难以测量的难题。并对350~650 nm范围内的气溶胶光学厚度进行反演,通过与多道太阳光度计的对比证实方法的可行性,实验中发现气溶胶光学厚度与悬浮颗粒物(SPM)浓度具有很好的相关性。同时,利用气溶胶550 nm处的消光系数确定大气能见度。  
**关键词:** 大气光学; 气溶胶; 差分吸收光谱; 光学厚度; 能见度

中图分类号: O433.4 文献标识码: A

## Determination of Aerosol Optical Thickness and Atmospheric Visibility by Differential Optical Absorption Spectroscopy

Si Fuqi<sup>1</sup> Liu Jianguo<sup>1</sup> Xie Pinhua<sup>1</sup> Zhang Yujun<sup>1</sup> Liu Wenqing<sup>1</sup> Hiroaki Kuze<sup>2</sup>  
Liu Cheng<sup>2</sup> Nobuo Takeuchi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)  
(<sup>2</sup> Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Chiba 263-8522 Japan)

**Abstract:** With the method of differential optical absorption spectroscopy (DOAS), aerosol along the light path is measured with a flashlight source. After calibrating the system parameters by the visibility in the clear day, the difficulty to measure the original light intensity in aerosol measurement with DOAS is resolved, and the optical thickness from 350~650 nm is obtained with method of inversion. Comparison with solar photometer and good correlation is found between aerosol optical thickness and suspended particle matter concentration. In addition, the atmospheric visibility is retrieved by extinction coefficient at 550 nm.

**Key words:** atmospheric optics; aerosol; differential optical absorption spectroscopy; optical thickness; visibility

## 1 引 言

差分吸收光谱(DOAS)技术是利用光线在大气中传输时,各种气体分子在紫外和可见波段的特征吸收光谱来反演其在大气中浓度的一种方法。该方法最初由 Platt 等<sup>[1,2]</sup>提出,经过发展,目前该方法广泛的应用于监测城市中的污染气体<sup>[3~5]</sup>。

差分光谱吸收方法就是用高压氙灯作为光源,经过长距离的传输后,由望远镜接收。在以前的文

章中<sup>[6,7]</sup>,我们介绍了一种基于航空防撞灯(闪烁氙灯)的差分光谱吸收系统并成功的利用该系统反演出大气中的 NO<sub>2</sub> 浓度及初步的气溶胶信息。

大气气溶胶,因其在许多大气过程的重要作用(能见度,辐射平衡,大气的电子特性,空气污染和云的形成)<sup>[8]</sup>越来越受到人们的重视。气溶胶光学厚度作为重要的气溶胶参量在气溶胶测量中占重要地位,太阳光度计,激光雷达<sup>[9~11]</sup>等仪器均被用来反

\* 国家自然科学基金(10274080)和中国科学院创新基金(KJCX2-SW-H08)资助课题。

作者简介: 司福祺(1977~),男,安徽蚌埠人,中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光谱法测量污染物的研究。E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2005-06-21; 收到修改稿日期: 2005-11-20

演气溶胶光学厚度。本文利用工作在日本千叶大学(位于日本千叶县,东京南部,濒临东京湾)的闪烁差分光谱吸收系统测量大气气溶胶光学厚度,采用大气能见度对仪器进行校正。在 350~650 nm 范围内采用等间隔的 7 个通道(350 nm, 400 nm, 450 nm, 500 nm, 550 nm, 600 nm 和 650 nm),完成对气溶胶光学厚度的反演,通过与多道太阳光度计的对比证实该方法的可行性。同时,经过对气溶胶在 550 nm 处的光学厚度与悬浮颗粒物(SPM)浓度的对比,证实两者具有很好的相关性,并利用气溶胶 550 nm 处的消光系数对大气能见度进行反演。

## 2 气溶胶光学厚度反演

气溶胶的光学厚度  $\tau_a$  可以表示为

$$\tau_a = \alpha_a L = \ln k I_0(\lambda) - \ln I(\lambda) - \tau_{\text{Rayleigh}}(\lambda) - \tau_{\text{gas}}(\lambda), \quad (1)$$

式中  $\alpha_a$  为消光系数,  $L$  是测量距离,  $k$  是校正系数。靠近光源观测的光源强度表示为  $I_0(\lambda)$ ,  $I(\lambda)$  为测量点测得的光强,痕量气体吸收表示为  $\tau_{\text{gas}}$  主要成分为  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  的浓度可以通过差分光谱吸收方法用 400~450 nm 的光谱反演出来。对瑞利散射,  $\tau_{\text{Rayleigh}}$  可以通过(2)式得到,

$$\tau_{\text{Rayleigh}}(\lambda) = 8\pi^3(n-1)^2/(3\lambda^4 N)L, \quad (2)$$

其中  $N$  为大气质量,  $n$  是折射率。去除痕量气体吸收以及由瑞利散射造成的,如果可以确定校正系数  $k$ ,那么气溶胶光学厚度就可以通过(1)式反演出来。在这里,系统采用了大气能见度法进行校正<sup>[12]</sup>。

550 nm 处大气能见度  $V$ ,可以通过科施米德(Koschmeider)公式从米氏散射消光系数中得到:

$$V = 3.912/\alpha_a, \quad (3)$$

根据当地实际情况,一般用相对干净的天气里能见度可以达到 50 km。在千叶大学,测量距离为 5.5 km,当能见度为 50 km 的时候,气溶胶在 550 nm 处的光学厚度为 0.43,系统用这个参量进行校正,得到校正系数  $k$ 。同时注意到,由能见度变化对  $k$  值的影响并不大,经过计算当能见度  $V$  在 10% 范围内变化时,校正系数  $k$  仅在 2% 的范围内发生变化。

## 3 实验系统

图 1 是实验装置图<sup>[6]</sup>。系统采用口径为 115 mm 天文望远镜(Meade, DS-115)作为接收望远镜,探测系统为集 CCD 和光谱仪于一身的海洋公司

USB2000 型光谱仪。狭缝宽度为 5  $\mu\text{m}$  的 USB2000 体积小巧(63 mm  $\times$  89 mm  $\times$  34 mm),结构结实,USB2000 型光谱仪采用 Sony 公司的 ILX511 型 CCD 作为探测器,线阵 CCD ILX511 拥有 2048 pixel,感光范围为 200~800 nm,平均分辨率为 0.3 nm/pixel。实验中,设置 CCD 的积分时间为 300 ms,两次采样间隔 7 ms,在此间隔内可以将光谱数据通过通用 USB 接口传输到计算机中。接收装置安装在千叶大学遥感中心,高度为 34 m。

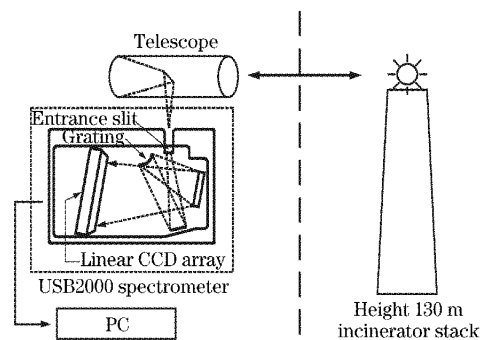


图 1 气溶胶测量实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for measuring aerosol

本实验中采用离千叶大学 5.5 km 处安装在垃圾焚烧炉烟囱上高度为 130 m 处的氙灯作为光源,在这一高度安装了四盏功率为 300 W,水平角度为 120° 的氙灯。这些航空防撞灯每 1.5 s 闪烁一次,持续时间为 0.5 ms。它们只工作在白天,在夜间用闪烁的红色光源代替氙灯,所以,闪烁差分光谱吸收系统由于受光源影响,仅工作在白天。

## 4 结果与讨论

在气溶胶反演过程中,用干净天气条件下的数据确定校正系数  $k$ 。在千叶,我们假定 2004 年 7 月 2 日 10 时作为干净天气,根据此时测量的光谱,反演得到系统校正系数  $k = 9.0 \pm 0.2$ 。

图 2(a)显示的是 2004 年 7 月 9 日由闪烁差分光谱吸收系统测得的白天的光学厚度,6:00~9:00,表示从 6 时到 9 时的平均光学厚度,以下类推。图 2(b)是由 5 波段(368 nm, 500 nm, 530 nm, 675 nm, 778 nm)太阳光度计测得的同天结果,同样 6:00~9:00 表示 6 时到 9 时的平均光学厚度。由于太阳光度探测的为整层大气的垂直光学厚度,而闪烁差分光谱吸收系统的测量结果为 5.5 km 范围内水平大气的光学厚度,因此两者在绝对量值上不具有可比性,但是两者随波长及时间的变化具有很好的一致性。从图上可以明显的看出,用两种不同仪

器反演出来的气溶胶均随着波长减少,其光学厚度曲线符合埃氏(Angstrom)公式,  $\tau = \beta\lambda^{-a}$ , 同时在一

天当中,气溶胶的光学厚度均表现出随时间变化而减少的趋势。

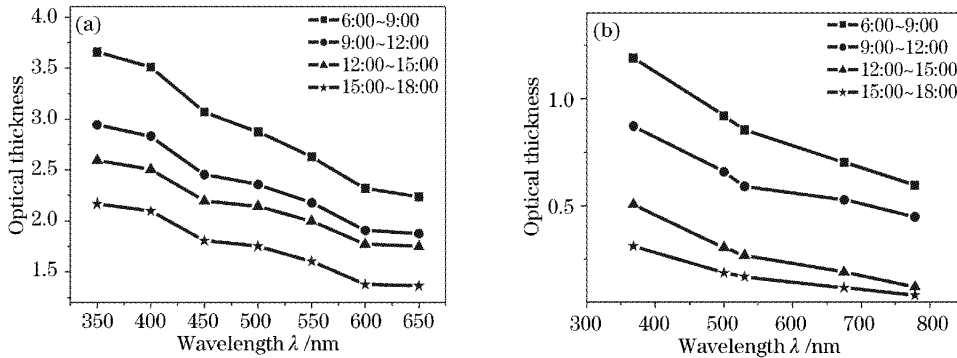


图 2 2004 年 7 月 9 日白天的气溶胶光学厚度。(a)由差分光谱吸收测量,(b)由太阳光度计测量

Fig. 2 Diurnal variation of aerosol optical thickness on 9 July 2004. (a) Aerosol optical thickness measured by DOAS, (b) aerosol optical thickness measured by solar photometer

系统采用 550 nm 处的消光系数利用公式  $V = 3.912/\alpha_a$  反演大气能见度。图 3 显示的 7 月份日平均能见度(6:00~18:00),日平均悬浮颗粒物(SPM)浓度及日平均相对湿度(RH)的月变化曲线。图 3(a)为差分光谱吸收系统测得的能见度月变化曲线(缺 15 日至 19 日的数据,因为实验室检修); $\beta$ 射线法点式仪器悬浮颗粒物的监测结果为图 3(b);图 3(c)是相对湿度的月变化曲线。从图上可以看出,能见度跟悬浮颗粒物浓度和日平均相对湿度均呈相反的变化趋势,能见度在 7 月 2 日达到最大,为 40 km,而同一天,悬浮颗粒物和日平均相对湿度均为月最小值,悬浮颗粒物为  $0.0127 \text{ mg/m}^3$ ,日平均相对湿度为 50%;能见度的极低值出现在 7 月 14 日,为 7.2 km,这天,悬浮颗粒物和日平均相对湿度的值均较大。经实验,可以推论,当悬浮颗粒物和日平均相对湿度均较小时,可以得到相对较好的能见度。

在实验中我们还发现,550 nm 处的气溶胶光学厚度的日变化与悬浮颗粒物浓度的日变化具有很好的相关性。图 4 为 7 月 25 日和 7 月 27 日 550 nm 处气溶胶光学厚度与悬浮颗粒物浓度的日变化曲线。从图上可以看出它们具有很好的相关性,相关系数  $R$  均达到 0.9。良好的相关性为研究单位质量的消光系数(MEE)提供了先决条件,单位质量的消光系数表示消光系数与悬浮颗粒物浓度的比例<sup>[13,14]</sup>,单位为  $\text{m}^2/\text{g}$ 。有关单位质量的消光系数的研究将在下一篇文章中给出。

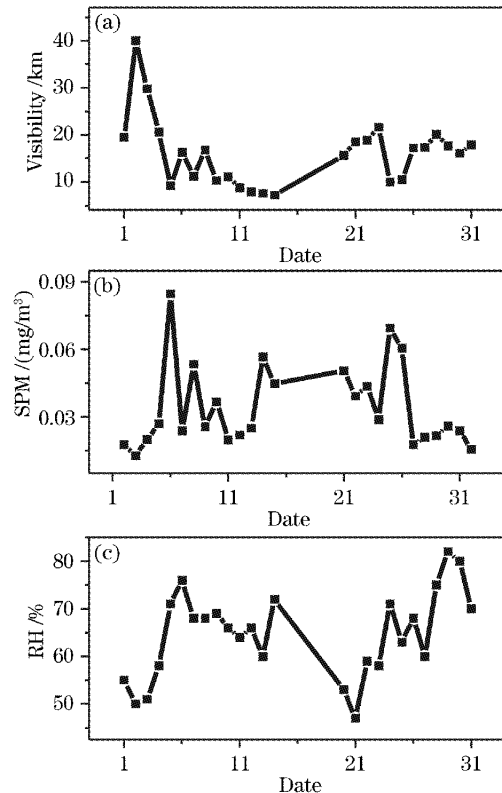


图 3 由差分光谱吸收系统测得的能见度,悬浮颗粒物浓度和相对湿度曲线。(a)日平均能见度,(b)日平均悬浮颗粒物浓度,(c)日平均相对湿度

Fig. 3 Comparison among the visibility derived from DOAS, the SPM concentration and RH. (a) one-month variation of visibility, (b) one-month variation of SPM, (c) one-month variation of RH

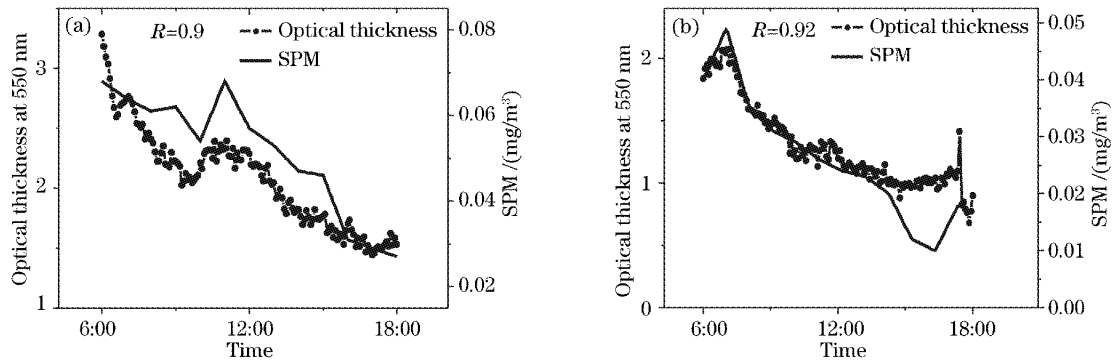


图4 550 nm处气溶胶光子厚度与悬浮颗粒物浓度的日变化曲线。(a) 2004年7月25日,(b) 2004年7月27日

Fig. 4 Diurnal variation in the aerosol optical thickness at 550 nm and SPM concentration. (a) 25 July 2004, (b) 27 July 2004

## 5 结 论

差分光谱吸收方法一般用来监测大气痕量气体浓度,本文中我们将此方法加以扩展应用于监测大气气溶胶,用能见度法确定系统校正参量解决了原始光强难以确定的难题。经过一个月的实验,发现该方法反演的宽波段大气气溶胶光学厚度与太阳光度计的结果具有很好的相关性。采用550 nm的气溶胶消光系数计算得到大气能见度,通过了一个月的实验并与悬浮颗粒物和日平均湿度的数据进行对比,可以看出能见度与上述两参量呈相反的变化趋势。另外,550 nm处气溶胶光学厚度与悬浮颗粒物日变化的良好相关性,为进一步研究单位质量的消光系数提供了必要的先决条件。

## 参 考 文 献

- Platt U, Perner D, Pätz H W. Simultaneous measurements of atmospheric  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  and  $\text{NO}_2$  by differential optical absorption [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(C10): 6329~6335
- Platt U, Perner D. Direct measurements of atmospheric  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_2$ ,  $\text{O}_3$  and  $\text{SO}_2$  by differential absorption in the near UV[J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**(C12): 7453~7458
- Zhou Bing, Liu Wenqing, Qi Feng *et al.*. Error analysis in differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 957~961 (in Chinese)  
周斌,刘文清,齐峰等. 差分吸收光谱法测量大气污染物的测量误差分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 957~961
- Kim K H, Kim M Y. Comparison of an open path differential optical absorption spectroscopy system and a conventional in situ monitoring system on the basis of long term measurements of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , and  $\text{O}_3$  [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**: 4059~4072
- Lee J S, Kuk B J, Kim Y J. Development of a differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system for the detection of atmospheric trace gas species;  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , and  $\text{O}_3$  [J]. *J. Kor. Phys. Soc.*, 2002, **41**(5): 693~698
- Yoshii Y, Kuze H, Takeuchi N. Long-path measurement of atmospheric  $\text{NO}_2$  with an obstruction flashlight and a charge-coupled-device spectrometer [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(21): 4362~4368
- Si F Q, Kuze H, Yoshii Y *et al.*. Measurement of regional distribution of atmospheric  $\text{NO}_2$  and aerosol particles with flashlight long-path optical monitoring [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(27): 4959~4968
- Zhang Junhua, Si Zhaojun, Mao Jietai *et al.*. Remote sensing aerosol optical depth over China with GMS-5 satellite [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2003, **27**(1): 23~35 (in Chinese)  
张军华,斯召俊,毛节泰等. GMS卫星遥感中国地区气溶胶光学厚度 [J]. *大气科学*, 2003, **27**(1): 23~25
- Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Measurements of stratosphere aerosol with L625 lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1012~1015 (in Chinese)  
吴永华,胡欢陵,周军等. L625激光雷达探测平流层气溶胶 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1012~1015
- Liu Zhishen, Wu Dong, Song Xiaoquan *et al.*. Development of lidar and experimental research for measuring atmospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 724~728
- Zhou Jun, Yue Guming, Jin Changjia *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1412~1417 (in Chinese)  
周军,岳古明,金传佳等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1412~1417
- Thomas M, Detlef M, Rene D. Particle extinction measured at ambient conditions with differential optical absorption spectroscopy I. System setup and characterization [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9): 1657~1666
- William C M, Derek E D. Optical properties of aerosols at Grand Canyon National Park [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 3373~3391
- Mallet M, Roger J C, Despiou S *et al.*. Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during ESCOMPTE [J]. *Atmospheric Research*, 2003, **69**: 73~97