

# 被动差分吸收光谱法测量烟羽速度的方法研究

李 昂, 谢品华, 刘文清, 刘建国, 窦 科, 林艺辉

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

**摘 要** 差分吸收光谱技术(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)是利用气体分子在紫外-可见光谱范围的特征吸收来测量其浓度含量。被动 DOAS 以天顶太阳散射光为光源通过对污染源排放烟羽进行扫描测量能获取污染气体(如 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>)柱浓度的连续分部,再结合风场信息后可以估算出污染源污染气体的排放总量。在实际测量中由于无法准确获取烟羽速度这一重要参数使得排放总量的计算变得比较困难,并且这也成为估算总量中的主要误差来源。文章研究了被动 DOAS 测量污染源排放烟羽速度的原理和方法,两套系统以固定夹角在烟羽下方获取烟羽通过一定距离的时间差从而得到烟羽运动速度。通过两套被动 DOAS 系统对某电厂排放烟羽进行测量得到了两个时刻的烟羽速度 3.6 和 5.4 m·s<sup>-1</sup>,并与单经纬仪测风法获取当时烟羽高度上的风速结果进行对比表明,这种基于被动 DOAS 光学遥测方法能够满足烟羽速度的测量。

**关键词** 被动差分吸收光谱; 污染源; 烟羽速度

中图分类号: O433.5 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2008)10-2214-04

## 引 言

基于人工光源的主动差分光学吸收光谱技术(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)<sup>[1, 2]</sup>,已经成功用于空气质量监测和烟气在线监测<sup>[3-5]</sup>以及气溶胶光学厚度及大气能见度的研究<sup>[6]</sup>。20世纪70年代初发展起来的被动 DOAS 技术<sup>[7-9]</sup>,近年来由于其光学结构简单,便于实时机动测量等优点,应用到火山排放气体测量<sup>[10, 11]</sup>和污染源污染气体的排放总量测量<sup>[12, 13]</sup>。但总量计算中所需要的烟羽速度实际中由便携式风速测量计采集地面风速来粗略代表通常在几百米高度上的烟羽速度,这成为该方法测量排放总量中误差的最大来源<sup>[14]</sup>。

本文研究了被动 DOAS 测量烟羽速度的原理和方法,构建了实验系统并对某电厂排放烟羽速度进行测量,将获得的结果与单经纬仪测风仪器提供的风速数据进行对比,表明了污染源排放总量测量中被动 DOAS 不仅是有效测量排放总量的手段,而且也是获取烟羽速度参数的一种成本低廉而且快速有效的方法。

## 1 实验原理和系统

### 1.1 DOAS原理

DOAS 方法基于 Lambert Beer 定律,在定义 SCD<sub>i</sub> =  $\int c_i(l)dl$  为斜柱浓度(slant column density, SCD)后,可以表示为下式:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\sum_i \alpha_i \text{SCD}_i \quad (1)$$

其中  $I_0$ ,  $I$  分别是入射和透射光强,  $\alpha_i$  代表第  $i$  种气体分子差分吸收截面, (1) 式等号左边的项也叫差分光学密度。DOAS 最终利用差分光学密度与分子吸收截面的快变化部分进行最小二乘拟合可以获得各气体的 SCD。DOAS 应用到污染源测量时,根据(1)式获得的 SCD 可看作污染气体的垂直柱密度(vertical column density, VCD),下文中简称为柱密度<sup>[13]</sup>。

### 1.2 烟羽速度的测量

在准确获取烟羽柱浓度的前提下,烟羽速度的测量是在烟羽下方沿其运动路径方向分别布置一台被动 DOAS 系统指向上风向而另一台瞄准下风向来进行(如图 1),两台仪器

收稿日期: 2007-06-26, 修订日期: 2007-09-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2006AA06A303)和北京与周边地区大气污染物输送、转化及北京市空气质量目标研究项目(Z0005190042791)资助

作者简介: 李 昂, 1980 年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: angli@aiofm.ac.cn

©1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

观测方向的夹角为  $\alpha$ 。烟羽速度 ( $V_p$ ) 可从两台仪器获得的柱浓度序列间的时间差 ( $\Delta t_1$ ) 和烟羽在该时间内运动的距离  $L$  算出, 如下式,

$$V_p = \frac{L}{\Delta t_1} = \frac{2H}{\Delta t_1} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

式中:  $H$  为烟羽高度。已知  $H$  的情况下  $V_p$  可以从 (2) 式计算获得。

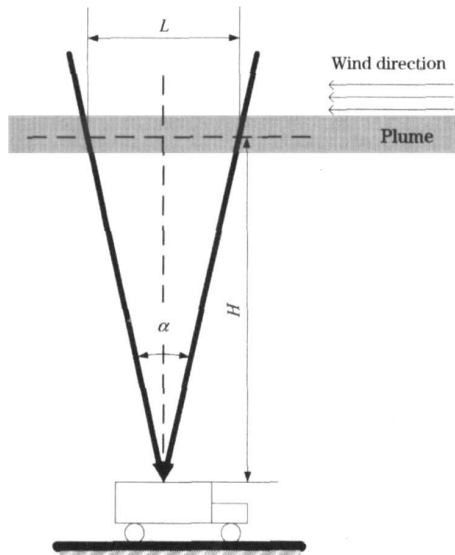


Fig 1 Schematic view of the plume velocity measurements

烟羽高度测量如图 2 所示, 烟羽在垂直于纸面方向运动, 被动 DOAS 系统在垂直于烟羽运动的平面内运动。在  $A$  位置  $45^\circ$  仪器先观测到烟羽质心, 在  $\Delta t_2$  时间后两台仪器运行了  $X$  距离后到达了  $B$  位置, 此时垂直仪器观测到烟羽质心。根据简单的几何关系, 那么烟羽高度  $H$  就等于两台仪器测得的烟羽质心的距离差  $X$ 。即 (3) 式:

$$H = X = V_{car} \Delta t_2 \quad (3)$$

式中:  $V_{car}$  为搭载仪器的汽车的速度,  $\Delta t_2$  为两台仪器观测到烟羽质心的时间差。

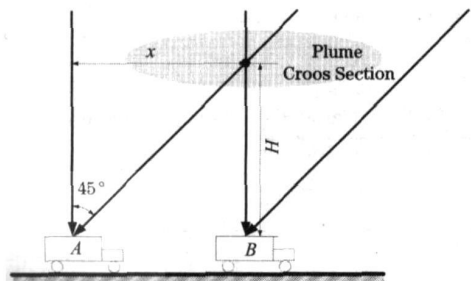


Fig 2 Schematic view of the plume height measurements

1.3 测量系统

被动 DOAS 测量烟羽速度仪器的结构 (如图 3) 为, 入射光经过单透镜望远镜会聚后由光纤耦合到小型 CCD 光谱仪

采集, 再送入计算机进行光谱处理。在测量中光谱仪固定在 290~420 nm 波段, 选取其间  $SO_2$  作为测量烟羽速度的标示气体。系统配合了吸顶式 GPS 接收机, 提供车速 ( $V_{car}$ ) 以及位置信息。实验中两套系统 (PDOASA, PDOASB) 安置于车顶按实验内容分别如图 1 和图 2 布置。

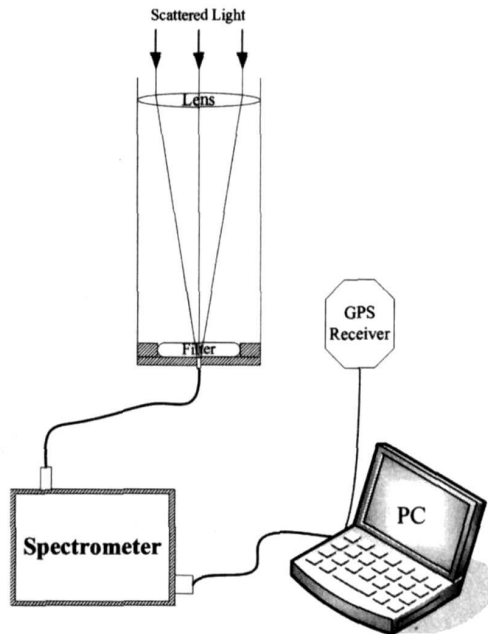


Fig 3 Schematic view of experiment setup

2 烟羽速度测量实验

2.1 外场实验

2007 年 4 月 9 日我们使用两套被动 DOAS 系统 (PDOASA, PDOASB) 对某热电厂排放的烟羽进行了测量 (如图 4 所示)。选择在该电厂下风向  $C$  和  $D$  段来回横穿测量烟羽高度, 然后在烟羽正下方  $M$  位置延烟羽运动方向放置仪器测量烟羽速度。同时北京市气象局的一套单经经纬仪测风仪器在相同地点 ( $M$ ) 测量提供对比风速数据。

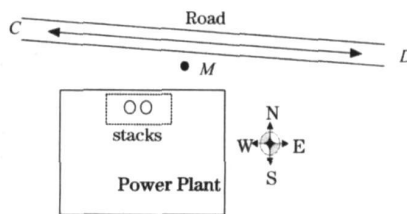


Fig 4 Map of the area surrounding the power plant and the route of the traverses

2.2 光谱处理

实验中选择在 308~315 nm 波段内计算  $SO_2$ , 参与反演的气体有  $O_3$ ,  $NO_2$  及 Ring 结构<sup>[15, 16]</sup>, 如图 5 所示, 其中 (a)~(d) 图是实际差分吸收截面 (细线) 和拟合得到各气体差分

吸收结构(粗线)的叠加, (e) 为拟合后的剩余结构。

2.3 烟羽高度的计算

在烟羽高度实验中 PDOASA 垂直指向天顶、PDOASB 指向前方 45°, 两台仪器按照前文中描述的方式运行, SO<sub>2</sub> 柱浓度结果如图 6 所示。PDOASA 分别在 t<sub>2</sub> 和 t<sub>4</sub> 时刻、PDOASB 分别在 t<sub>1</sub> 和 t<sub>3</sub> 时刻捕捉到了烟羽柱浓度最大值, 根据(3)式计算出烟羽高度 H (见表 1), H 的平均值为 370.23 m。

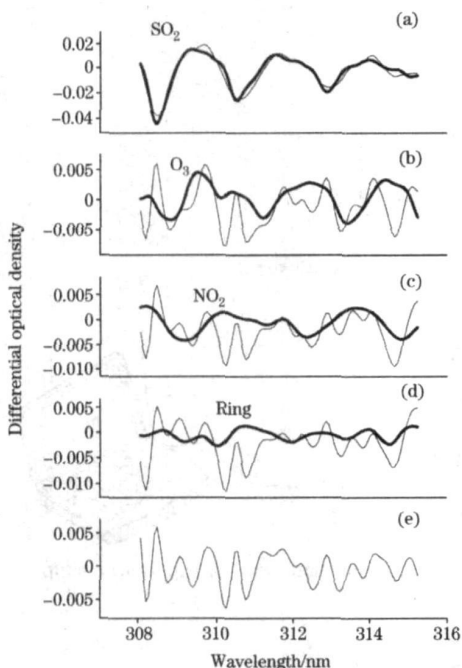


Fig. 5 Example for SO<sub>2</sub> fitting

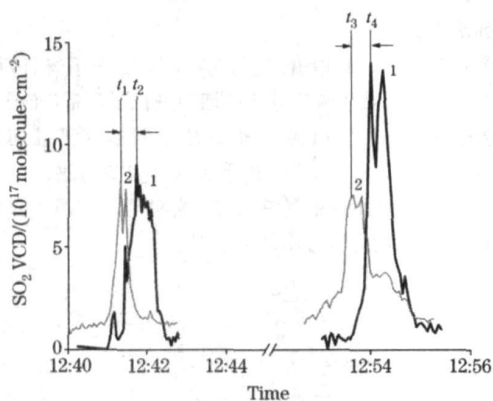


Fig. 6 SO<sub>2</sub> VCD time series of the plume height measurement

1: 90° PDOASA; 2: 45° PDOASB

Table 1 Calculation of the plume height

时间	$\Delta t_2 / s$	$V_{car} / (m \cdot s^{-1})$	$H / m$
t <sub>1</sub> ~t <sub>2</sub>	23.77	15.59	370.57
t <sub>3</sub> ~t <sub>4</sub>	21.43	17.26	369.88

2.4 烟羽速度的计算

在测量烟羽速度实验中, 单经纬仪测风仪器提供了 13:

36 和 13:49 时刻附近烟羽高度上的风速, PDOASA, PDOASB 获取的这两个时间范围的 SO<sub>2</sub> 柱浓度结果如图 7 (a)和(b)所示。根据(2)式计算的烟羽速度 V<sub>p</sub> 及单经纬仪测得的风速 V<sub>经纬仪</sub> 见表 2(H = 370.23 m, α = 5°)。如果以单经纬仪测得的风速为准, 那么测量烟羽速度的相对误差 E<sub>r</sub> = (V<sub>p</sub> - V<sub>经纬仪</sub>) / V<sub>经纬仪</sub>, 从表 2 中可以看出当风速增大时, E<sub>r</sub> 也随之增大, 这是由于当风速较小时的烟羽上升高度要高于风速较大时的高度, 而实验中由于条件限制只是在开始时(风速较低)测量了烟羽高度, 当风速增加后在 V<sub>p</sub> 的计算中延用了这个高度从而造成了 V<sub>p</sub> 的过高估计, 导致误差增加。在下一步工作中采用多台系统同时测量高度和风速是减小测量误差的有效途径。

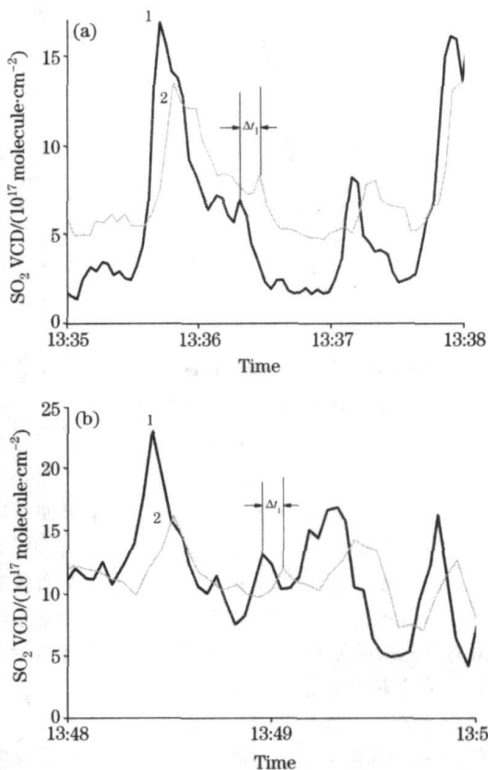


Fig. 7 SO<sub>2</sub> VCD time series of the plume velocity measurement

1: PDOASA; 2: PDOASB

Table 2 Calculation of the plume velocity

	$\Delta t_2 / s$	$V_p / (m \cdot s^{-1})$	$V_{经纬仪} / (m \cdot s^{-1})$	$E_r / \%$
图 7(a)	8.98	3.6	3.3	9.1
图 7(b)	6.00	5.4	4.7	14.9

3 结论

本文研究了被动 DOAS 测量烟羽速度的原理和方法, 构建了两套被动 DOAS 系统对某电厂排放烟羽进行了测量。首先通过两台仪器分别指向天顶和前向 45° 横穿烟羽, 通过观测到烟羽质心位置的时间差计算得到了烟羽高度为 370.23

m. 烟羽速度则是在烟羽下方延烟羽运动方向布置两台仪器, 结合两台捕捉到烟羽的时间差和烟羽高度获得了 13: 36 和 13: 49 时刻烟羽速度分别为  $3.6$  和  $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过与单经纬仪测风仪器提供的两个时刻的数据对比, 说明了目前在被动 DOAS 测量烟羽速度还比较粗略的情况下, 该方法为

被动 DOAS 污染源测量提供了一种快速有效而且低成本烟羽速度测量方法。

致谢 本文中为烟羽速度对比使用的单经纬仪测风数据由北京市气象局观象台提供。作者感谢北京市气象局观象台李淑杰和孙敏峰等老师的支持帮助。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Platt U, Perner D, Pätz H W. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(10): 6329.
- [ 2 ] Platt U. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 1999, 1: 5409.
- [ 3 ] XIE Pinhua, FU Qiang, LIU Jianguo, et al(谢品华, 付强, 刘建国, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(9): 1584.
- [ 4 ] LI Siwen, LIU Weiqing, XIE Pinhua(李素文, 刘文清, 谢品华). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(12): 2292.
- [ 5 ] Kleffmann J, Lörzer J C, Wiesen P, et al. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 3640.
- [ 6 ] SIFU Qi, LIU Jianguo, XIE Pinhua, et al(司福祺, 刘建国, 谢品华, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(10): 1810.
- [ 7 ] Brewer A W, McElroy C T, Kerr J B. *Nature*, 1973, 246: 129.
- [ 8 ] Noxon J F. *Science*, 1975, 189(4202): 547.
- [ 9 ] Solomon S, Schmeltekopf A L, Sanders R W. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(7): 8311.
- [ 10 ] Galle B, Oppenheimer C, Geyer A, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 119: 241.
- [ 11 ] Elias T, Sutton A J, Oppenheimer C, et al. *Bulletin of Volcanology*, 2006, 68(4): 313.
- [ 12 ] McGonigle A J S, Thomson C L, Tsanev V I, et al. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 21.
- [ 13 ] Li Ang, Liu Cheng, Xie Pinhua, et al. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5832: 371.
- [ 14 ] McGonigle A J S, Hilton D R, Fischer T P, et al. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(L11302): 1.
- [ 15 ] Grainger J F, Ring J. *Nature*, 1962, 193: 762.
- [ 16 ] Hönninger G, Friedeburg C V, Platt U. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2004, 4: 231.

## Study on Determination of Plume Velocity by Passive Differential Optical Absorption Spectroscopy

LI Ang, XIE Pinhua, LIU Weiqing, LIU Jianguo, DOU Ke, LIN Yihui

Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

**Abstract** Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) technique has been used to measure various trace gases in the atmosphere by their strongly structured absorption of radiation in the UV and visible spectral range. Passive DOAS using the zenith scattered sunlight as the light source can obtain the continuous column density distribution of air pollutants (such as  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$ ) by scanning the plume emitted from sources on a mobile platform, then with the plume velocity information the total emission value can be ultimately estimated. In practice it is hard to calculate the total emission because there is no efficient way to accurately get the plume velocity which is the most important parameter. Usually the wind speed near ground is used as the actual plume speed, which constitutes the greatest source of uncertainty in the passive DOAS measurements for the total emission calculation. A passive DOAS method for the determination of plume velocity of pollution source was studied in the present paper. Two passive DOAS systems were placed under the plume along the plume transmission direction to observe the scattered sunlight at one fixed separation angle, and then the plume velocity was derived from the time delay resulting from the plume moving a certain distance, and also the plume height needed in the plume velocity calculation was measured by the same two passive DOAS systems. Measurement of the plume emitted from a certain power plant was carried out by the two passive DOAS systems and the plume velocities of  $3.6$  and  $5.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  at two separate moments were derived. The comparison with the wind speed measured at the same time by the single theodolite wind observation method indicates that this optical remote sensing method based on passive DOAS can be used to determine the plume velocity by monitoring the total emission from sources.

**Keywords** Passive differential optical absorption spectroscopy; Pollution source; Plume velocity

(Received Jun. 26, 2007; accepted Sep. 28, 2007)