

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2009.04.005

# 天气和气象条件对移动 mini-DOAS 系统测量 污染源排放的影响探讨 \*

李金香<sup>1,2</sup>, 虞统<sup>1</sup>, 刘文清<sup>2</sup>, 李海军<sup>1</sup>, 于建华<sup>1</sup>, Johansson M<sup>3</sup>

(1 北京市环境保护监测中心, 北京 100048;

2 中科院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

3 Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden )

**摘要:** 介绍了北京奥运前利用一套微型被动差分吸收光谱学(mini-DOAS)系统, 测量和估算北京市石景山区1个点源和1个面源SO<sub>2</sub>排放量的实验, 探讨了应用该系统测量和估算排放量过程中的重要影响因素, 尤其是天气和气象条件的作用。研究发现: (1) 测量应当在中尺度天气系统的稳定控制下进行, 而天气系统调整阶段由于局地山谷风的干扰, 不易获得可靠的测量结果; (2) 在混合层高度低、近地面几百米风速小的情况下, 可以获得更为准确的测量值; (3) 在推算点源排放量时, 应选择排放高度上的风速和风向。

**关键词:** 移动 mini-DOAS; 污染源排放; SO<sub>2</sub>; 天气系统和气象条件

**中图分类号:** X831      **文献标识码:** A      **文献编号:** 1673-6141(2009)04-0283-07

## Influence of Meteorological Factors on the Measurements and Estimation of Pollutant Emission Using a Mobile Mini-DOAS System

LI Jin-xiang<sup>1,2</sup>, YU Tong<sup>1</sup>, LIU Wen-qing<sup>2</sup>, LI Hai-jun<sup>1</sup>, YU Jian-hua<sup>1</sup>, JOHANSSON M<sup>3</sup>

(1 Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China;

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3 Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden)

**Abstract:** Experiments for estimation of SO<sub>2</sub> emissions from one point-source and one area-source in Shijingshan District, Beijing were introduced, in which a mobile mini-DOAS system was employed to study the environmental prerequisites for its application. A comparison among meteorological conditions for each experiment indicates that, (1) a mid-scale weather system was necessary for measurement so as to avoid local mountain-valley winds; (2) when mixing height and wind velocity were low, more accurate measurements can

收稿日期: 2009-05-28; 修改日期: 2009-06-23

E-mail: ljjx@bjmemc.com.cn.

\*: 特约稿

be obtained and are closer to statistical values from the local authority; (3) using wind direction and velocity at emission height yielded a better estimation of pollutant emission of the point source.

**Key words:** mobile mini-DOAS; the pollutant emission; SO<sub>2</sub>; weather systems and meteorological factors

## 1 引 言

移动 mini-DOAS 系统是以差分光学吸收光谱 (DOAS) 理论<sup>[1-2]</sup> 为核心的地基、被动光源实用测量系统。它采用散射的太阳辐射作为光源，从而简化了 DOAS 系统，使整个系统可以置于交通工具上，成为移动监测装置。移动 mini-DOAS 系统被成功地应用于测定火山气体喷发量<sup>[3]</sup>，在测定城市污染源大气污染排放量方面也进行了卓有成效的尝试<sup>[4-5]</sup>。由于该方法在操作上具有很好的灵活性，因此它为监管污染源提供了极具潜力的解决方案。值得注意的是，与这些实验结果一起被管理部门关注的，还有该方法的测量精确度问题。

移动 mini-DOAS 系统污染源排放量的测量精度可以分为两个层次，一是污染物柱浓度直接测量的精度，二是污染物单位时间排放量的估算精度。直接测量柱浓度涉及的主要理论、硬件实现和演算方法等，已经有众多学者论述，结论较为明确：如混合层内光子的路径为直线、各处光子均匀分布的假设<sup>[3]</sup>；影响系统测量精度的因素来自光谱仪，保持光谱仪工作温度稳定非常重要<sup>[6]</sup>；选择恰当的光谱仪分辨率，可以获得更好的测量精准度等等<sup>[7-8]</sup>。本文着重讨论后者，操作环境和衍生量计算的影响因素，这些因素带来的误差可能更大。

被动光源测量需要在白天日照充足的条件下进行，气溶胶浓度不高，没有低云，测量实施环境气溶胶散射尽可能弱；其次，面源测量时要求风向稳定少变，以使得上风向和下风向污染物的输入、输出关系不变。这两点都对测量的天气和气象条件提出了粗略的要求。衍生量计算是将污染物的柱浓度推及点、面上的排放量<sup>[4]</sup>，同样要

求计算时选取适当的风向、风速参数。事实上，Johansson 等于 2005 年 4 月和 8 月所测定计算的五环路内 SO<sub>2</sub> 日排放量分别为 293 吨 / 天和 52 吨 / 天、NO<sub>2</sub> 日排放量则分别为 189 吨 / 天和 174 吨 / 天，SO<sub>2</sub> 两次测量都在非采暖期，而结果差异巨大，很可能是由于 SO<sub>2</sub> 化学性质活泼、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 主要排放量的排放高度差异、以及测量时天气与气象条件的不同所致。

本文根据当时野外实验的条件和结果，讨论天气与气象条件对于污染源排放量估算的影响问题，以期为合理应用移动 mini-DOAS 系统、获得有效的测量积累数据，为奥运空气质量保障提供技术支持。

## 2 观测实验

### 2.1 研究区污染源和观测线路简介

石景山区主要的工业部门为中国首钢集团的钢铁业，以及大唐国际北京高井热电厂和北京京能热电厂两大电厂。首钢电厂、焦化厂和上述两个电厂都是北京市的煤炭消耗大户，年耗煤量共计达到 800 万吨。电厂锅炉和炼焦炉都安装了效率较高的除尘、脱硫设施，但是烟尘、SO<sub>2</sub> 和氮氧化物等大气污染物的排放总量在全市仍属较大。污染源的污染排放量大，加之常年稳定运行，因此该区域是较为理想的观测实验场所。

石景山工业区位于北京市西郊西山脚下、永定河东侧，西面和北面受西山包围。考虑道路的通达程度，在实验开始之前进行了实地踏查，确定了从西五环 - 卢沟桥、沿永定河向北至门头沟镇、向东返回石景山区、绕高井电厂后、从石景山区北部至五环的行驶路线。该路线包围了首钢的钢铁生产厂区、高井京能电厂厂区，可以反映

各风向下污染物的排放、扩散情况, 其中北部路线在 22 日实验中, 又向北推至永引渠路。

高井电厂的测量路线选择了电厂东侧约 1500 m、南侧 800 m 的道路, 在每一次实验中, 多次往返测量, 比较所得 SO<sub>2</sub> 柱浓度的差别, 计算点源的排放量。

## 2.2 设备系统和实验设置

本研究采用 Ocean Optics S2000 型 UV-Vis 光纤光谱仪, 光栅为 2400 线全息紫外, 检测器为 2048 像素 CCD。光纤定制为 AVANTES UV800, 系统光学分辨率约为 1 nm。测量范围 280~425 nm。在该波长范围内, SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 都有比较强的吸收。系统的定位辅助测量为 GPS 信号, 接收和记录每一测量的经度、纬度、高程和时间 (ms), 用于精确计算载有该 DOAS 系统的汽车在相邻两次测量间的行驶速度。仪器的校准使用了 Ocean Optics HG-1 型 Hg-Ar 校准光源。天气与气象信息来自国家气象台局和北京市气象局的网络资源、天气分析图和地面站气象要素。此外, 在多数观测中, 实验场范围内同时运行了一台风廓线雷达。

## 2.3 数据处理与主要计算方法

关于污染物柱浓度和源排放量的计算方法参见文献 [4-5], 此处不赘述。

由谱结构计算 SO<sub>2</sub> 柱浓度采用最小二乘法拟合, 由柱浓度推算排放量则采用了以下假设: 烟羽内污染气体的柱浓度, 即每平方厘米的分子个数, 乘以烟羽的厚度, 再乘以排放高度上的风速, 就可以得到单位时间内污染气体分子的排放量, 即污染的排放通量; 面源考虑上、下风向的输入、输出作用, 取其差值作为排放量。此外, 当测量路线与风向不垂直时, 需要将污染物通量投影到风向的垂面上。

柱浓度的计算和排放量估算的计算都通过编程实现。测量谱数据通过 USB 连接记录在计算机中, 软件部分可以实现现场污染物浓度的反演与显示, 也可以根据所记录的光谱, 实验完毕之后重新反演。

## 3 结果与讨论

### 3.1 气象条件对于点源排放测量的影响

点源高井电厂的测量情况见表 1。11 日和 12 日的边界层中下部风向一致, 13 日则不一致。从积分时间来看, 12 日 17:00 后的测量谱数过少 (2~3 个), 认为测量精度不高, 只作为参考值计算。计算排放量时采用各组内几次测量的平均值。

表 1 高井电厂点源测试基本情况

Table 1 Overview of the measurements of the point-source at the Gaojing Electricity Plant

日期	开始 (北京)	测量 时间	积分时间 (约 2000 ms) 次数	天气 / 气象概况	
				谱数 * 曝光时间 (ms)	
2005-04-11	16:25	2	9*220; 8*234	50~1500 m 以下都是西南风, 风速小。	
2005-04-12	15:32	1	24*80	整层北风, 风速较大。15:00 后转偏西风。	
	17:13	3	3*581; 3*623; 2*667		
2005-04-13	10:37	2	8*228; 16*117	上层西北风较大。16:00 前 50-1500 m	
	12:28	3	12*162; 10*184; 11*171		西南风, 400 m 以下在 08:00~14:00 为南风。

表 2 是根据上述柱浓度测量计算的  $\text{SO}_2$  排放量, 对比了采用地面风和一定高度上的风的计算结果。表中地面台站风是指北京市气象台的奥运气象网站上公布的地面自动气象站小时风数据, 50~300 m 风是利用风廓线观测数据计算的平均风。之所以选择这个高度, 是因为考虑到高井电厂

排放高度在 200 m 左右, 加上烟气抬升高度, 烟羽扩散受到 300 m 以下风的共同作用。

在表 2 中, 形成鲜明对比的首先当数排放量估算值的逐日差别: 从 0.2 kg/s 到 1.28 kg/s, 跨度相差一个量级。造成这种差异的原因是大气状况的差异。

表 2 风速风向对通量计算的影响

Table 2 Impact of wind velocity and wind direction on the emission

日期	测量	实验编号	地面台站风	排放量 1	50~300 m 均风	排放量 2
			速 (m/s), 风向	(kg/s)	速 (m/s), 风向	(kg/s)
2005-04-11	1	BJTL-02,03	5.4, WS	1.14	6.42, WS	1.35
2005-04-12	2	TL01	3.4	0.14	4.50, W	0.39
			ENE			
2005-04-13	3	TL02-04	2.7 S	0.27	4.69, WN	0.71
	4	TL05,06	5.5	0.67	2.73, ESS	0.29
			WSW			
	5	TL07,08,09	6.7 SW	1.28	4.89, WSS	1.09

根据 2006 年采暖期对高井电厂锅炉手工采样(在烟道内采样)的分析结果, 其  $\text{SO}_2$  的排放速率约为 3~4 kg/s。比较表 2 各次实验的计算结果发现, 计算值较之手工监测结果普遍偏低, 只有第 1 和第 5 组数据比较接近。

这是因为烟气离开烟囱出口进入大气环境后, 会被携带输送、稀释, 其稀释的程度与三维风矢量特征、距离烟囱的远近有关。第 1 和第 5 组二者的共同点是地面和 50~300 m 的平均风向基本一致, 风速比较大。当吹西南风时, 测量线路所测得的烟羽峰浓度正好在道路距离烟囱最近处(如图 2 中 TL08), 所以第 1 和第 5 组测得的通量最大, 而其它组不同程度地更低。

原因之二是天气系统的影响。当受到中尺度天气系统的稳定影响, 风廓线图上可以看到 1500 m 以下整层风向相对一致, 风速相对较大(例如

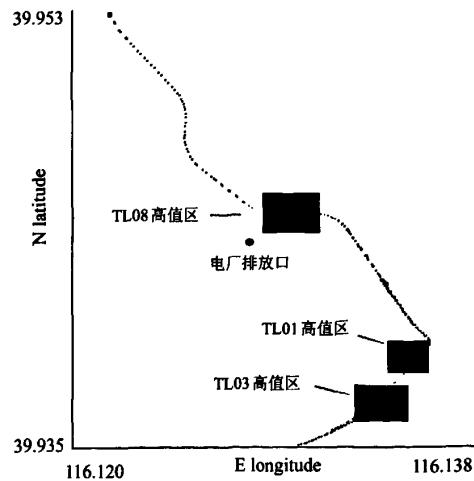


图 1 三天测量中高井电厂排放  $\text{SO}_2$  柱浓度的峰值位置比较

Fig.1 Locations of the peak values of  $\text{SO}_2$  column concentration of 3 traverses

1500 m 不低于 8 m/s), 此时地面台站的风向往往与近地面层至 1000 m 较长时间地保持一致; 而当中尺度天气系统较弱时, 实验区地形对气象条件有着强烈影响, 天气的局地性十分明显, 表现在地面和近地面层山风 - 谷风转换, 而且各层转换时间不一, 在同一时间里风向差异大, 例如第 2 组; 或者测量时间处于天气系统的调整期, 也容易出现各层风不一致, 如第 3 组和第 4 组测量。

因此, 各层风向不一致是通量计算最大的不准确来源。使用该系统测量污染物排放需要选择中尺度系统稳定控制的时间段。

### 3.2 天气、气象条件对面源排放(通量)估算的影响

2006 年 2 月 20~22 日使用该套设备对石景山区面源排放进行了实验测量。

表 3 实验时间和天气情况记录

Table 3 Records of experimental time and weather conditions

日期	实验开始 - 结束(北京)时间	天气 / 气象概况
2006-02-20	11:09:55~12:42	晴, 上层偏西 - 西南风, 低层 08:00 以后持续偏东风, 风速小, 多静风。
2006-02-21	14:56:12~16:32:06	晴, 上层西北风较大, 低层扰动强, 出现沙尘天气。
2006-02-22	14:04:39~15:22:18	晴, 上层偏北转偏西风, 低层 10:00 以后偏西转偏南风。

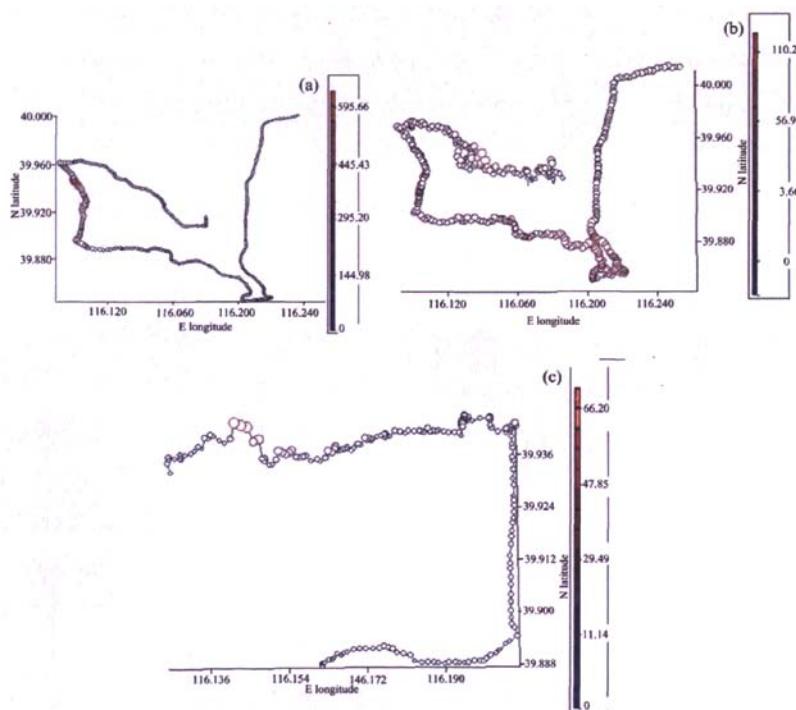


图 2 石景山区面源  $\text{SO}_2$  排放测三次量值比较 (a)20 日, (b)21 日, (c)22 日

Fig.2 Comparison of the measurements of the area-source in 3 days

三次测量的时间都选择了光照最充足的时段，天气晴朗。根据实况天气图和风廓线雷达的测量结果，20日属于高空槽前西南气流控制之下的偏静稳大气状态，低层风速小；21日属于槽后西北气流控制之下，大气处于动力不稳定状态，低层亦多垂直对流和水平输送，永定河岸出现扬沙；22日为21日天气的发展和稳定状态，系统性天气过程的控制逐渐减弱。

图2所示为20~22日SO<sub>2</sub>柱浓度测量值的空间分布。可见，从绝对数量来讲，图2(a)所示20日浓度高值最大，达到 $600 \times 10^{17}$ 分子/cm<sup>2</sup>，位置在

石景山区西侧，21日浓度次高(图2(b))，高值在东南侧密集，柱浓度峰值 $110 \times 10^{17}$ 分子/cm<sup>2</sup>；22日总体较低(图2(c))，在北部的香山脚下出现了稀疏的几个高值，柱浓度峰值 $66 \times 10^{17}$ 分子/cm<sup>2</sup>。因此，21和22日的测量结果势必偏低，而不具有污染源排放的代表性，准确度不高。

表4所列为通量计算结果。同样地，分别采用地面台站和风廓线雷达的风测量值。由于21日风廓线数据静风和低风速较多，数据无效；20日和22日垂直风速低于地面站数据，只作为对比参照量。

表4 面源排放SO<sub>2</sub>通量计算对比

Table 4 Comparison of the estimated SO<sub>2</sub> emissions

	地面风	通量1	垂直风	通量2
	风速(m/s), 风向	(kg/s)	风速(m/s), 风向	(kg/s)
2006-02-20	3.0, E	18.0	0.92, E	4.31
2006-02-21	7.0, N	1.50	风速无效	
2006-02-22	4.0, WS <sup>5</sup>	0.53	2.33, S	0.37

从排放量的绝对数值来看，该区域内高井、京能两大电厂和首钢常年稳定生产，污染物日排放量变化不大，测量通量相差三个量级说明了天气条件的变化对于测量的巨大影响。从绝对量来看，20日测量结果较高。

## 4 结 论

移动mini-DOAS测量污染源排放具有快速、方便的特点，容易探测污染空间分布，这一点在实验中已经得到了充分的体现。本文尝试根据地面气象台站数据和实验中同期获得的风廓线仪数据，结合天气形势分析，对通量计算中天气/气象条件的作用进行研究，结果发现：

1) 天气系统的稳定控制是获取理想测量结果的必备条件，而处于天气系统调整的时段测量不准确性增大。因此需要根据详细的数值天气预报，

来确定采样的时间和实施路线。

2) 地面和垂直剖面上风向不一致时，柱浓度测量值偏低，排放量估算值也偏低。对于石景山这样受地形影响天气/气象局地性很强的山区，这一点尤其重要。

3) 在不利于污染扩散的条件下，更容易获得较准确的测量结果。此时，污染物的混合高度低，污染物被限制在低空，浓度较高。

4) 一般而言，垂直剖面上的风比地面的风速大，所以计算值应当更接近真实值。但是由于数据来源不同，结果并未得到完全证实，有待进一步实验证明。

5) 高井电厂的测试表明，该方法用于获取点源排放的准确性比较理想。虽然对石景山区域排放的测量次数较少，但是测量结果的差异性已经说明天气和气象条件的巨大影响。

## 参考文献:

- [1] Platt U. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) [C]. *Monitoring by Spectroscopic Techniques* [M]. Ed. by Sigrist M W. Switzerland: John Wiley & Sons, 1994: 27-84.
- [2] Xie Pinhua, Liu Wenqing, Zheng Zhaozui, et al. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) technique applied to monitor sulfur dioxide in flue gas [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(3): 271-276(in Chinese).
- 谢品华, 刘文清, 郑朝辉, 等. 差分吸收光谱技术(DOAS)在烟气SO<sub>2</sub>监测中的应用 [J]. 光子学报, 2000, 29(3): 271-276.
- [3] Galle B, Oppenheimer C, Geyer A, et al. A miniaturised ultraviolet spectrometer for remote sensing of SO<sub>2</sub> fluxes: a new tool for volcano surveillance [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 119(1-4): 241-254.
- [4] Li Ang, Xie Pinhua, Liu Wenqing, et al. Monitoring of total emission volume from pollution 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, 等. 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.
- [5] Johansson M, Galle B, Yu T, et al. Quantification of total emission of air pollutants from Beijing using mobile mini-DOAS [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(29): 6926-6933.
- [6] 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(in Chinese).
- 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) 研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(9): 1463-1467.
- [7] Peng F M, Xie P H, Zhang Y H, et al. Effect of spectral resolution on the measurement of monoaromatic hydrocarbons by DOAS [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(25): 632-640.
- [8] Si Fuqi, Liu Jianguo, Xie Pinhua, et al. Determination of size distribution of atmospheric aerosol by DOAS [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2006, 55(6): 3165-3169(in Chinese).
- 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.

作者简介: 李金香 (1969-), 女, 内蒙人, 高工, 在读博士生, 从事环境监测与大气污染方面研究, 发表关于大气污染方面论文数篇。