

引用格式: DUAN Wei-min, XIONG Yuan-hui, CHEN Zhen-wei, *et al.* Remote Sensing and Monitoring of Industrial SO<sub>2</sub> and Carbon Black Particles with Ultraviolet Imaging Technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4):0404002  
段为民,熊远辉,陈振威,等.工业 SO<sub>2</sub> 及碳黑颗粒紫外成像遥感监测技术[J].光子学报,2020,49(4):0404002

# 工业 SO<sub>2</sub> 及碳黑颗粒紫外成像遥感监测技术

段为民<sup>1,2</sup>,熊远辉<sup>2</sup>,陈振威<sup>2</sup>,于光保<sup>1,2</sup>,刘林美<sup>2</sup>,李发泉<sup>2</sup>,武魁军<sup>2</sup>

(1 中国科学院大学,北京 100049)

(2 中国科学院武汉物理与数学研究所,武汉 430071)

**摘要:**为了准确有效监测工业烟囱排放,基于 SO<sub>2</sub> 及碳黑颗粒物的光学特性,设计并研制出一套双通道紫外成像遥感监测系统.该成像系统的两个光谱通道的中心波长分别定于 310 nm 和 330 nm,利用两个通道的光学厚度之差反演 SO<sub>2</sub> 浓度图像,颗粒物浓度图像由 330 nm 通道获取,根据浓度图像结合光流法获取烟羽运动速度,进而计算得出 SO<sub>2</sub> 和碳黑颗粒物的排放速率.结果表明,该工业烟囱的 SO<sub>2</sub> 及碳黑颗粒物排放速率分别为 72.48±3.16 kg/h 和 6.33±1.18 kg/h.实验采用紫外相机同时对工业烟囱排放的 SO<sub>2</sub> 及碳黑颗粒物进行监测,实验表明双通道紫外成像遥感监测兼具高时间分辨率与高空间分辨率,测量结果准确直观,在工业废气污染、船舶尾气污染以及火山喷发污染排放遥感监测中具有非常明显的技术优势及巨大的应用前景.

**关键词:**光学遥感;紫外成像;空气污染;吸收光谱;图像处理

中图分类号:O433

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0404002

## Remote Sensing and Monitoring of Industrial SO<sub>2</sub> and Carbon Black Particles with Ultraviolet Imaging Technology

DUAN Wei-min<sup>1,2</sup>, XIONG Yuan-hui<sup>2</sup>, CHEN Zhen-wei<sup>2</sup>, YU Guang-bao<sup>1,2</sup>,  
LIU Lin-mei<sup>2</sup>, LI Fa-quan<sup>2</sup>, WU Kui-jun<sup>2</sup>

(1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to monitor industrial chimney emissions accurately and effectively, based on the optical properties of SO<sub>2</sub> and carbon black particles, a dual-channel ultraviolet imaging remote sensing monitoring system was developed. The center wavelength of the two spectral channels were set at 310 nm and 330 nm, respectively. The SO<sub>2</sub> concentration image was obtained by the optical thickness difference of the two channels, and the particles concentration image was obtained by the 330 nm channel. With the plume speed obtained from the density image by the Optical-flow method, the emission rates of SO<sub>2</sub> and carbon black particle were calculated from them. The results show that the emission rates of SO<sub>2</sub> and carbon black particles from the industrial chimney are 72.48±3.16 kg/h and 6.33±1.18 kg/h, respectively. In this experiment, the SO<sub>2</sub> and carbon black particles emitted from industrial chimney were monitored by ultraviolet cameras simultaneously. A high time and spatial resolution was provided with dual-channel ultraviolet imaging remote sensing monitoring in this experiment, and the measurement results are accurate and intuitive. This method has obvious technical advantages and great application prospects in remote sensing of industrial exhaust, ship exhaust and volcanic eruption pollutions.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41975039,61705253),国家重点研发计划项目(No.2017YFC0211900)

第一作者:段为民(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学成像遥感技术及环境监测.Email:duanweimin18@mailsucas.ac.cn  
导师(通讯作者):武魁军(1988-),男,副研究员,博士,主要研究方向为分子滤光成像技术研究.Email:wukuijun@wipm.ac.cn

收稿日期:2019-11-21;录用日期:2020-02-17

**Key words:** Optical remote sensing; UV imaging; Air pollution; Absorption spectra; Image processing  
**OCIS Codes:** 040.6808; 010.1120; 300.6540; 110.4155; 120.0280

## 0 引言

工业发展在促进经济腾飞的同时也带来了严重的环境问题,工业废气排放已经成为城市大气环境污染的主因.工业废气的主要污染成分是  $\text{SO}_2$  和碳黑颗粒物,据统计,2015 年工业  $\text{SO}_2$  占全国  $\text{SO}_2$  污染排放总量的 83.7%,工业烟尘排放量占全国烟尘排放总量的 80.1%<sup>[1]</sup>.为有效防治工业污染,国家多次出台相关法规政策,如 2016 年颁布实施的《中华人民共和国大气污染防治法》将工业污染源全面达标排放作为 25 项国家生态环境保护重大工程之一<sup>[1]</sup>,2019 年 7 月,国家生态环境部印发了《工业炉窑大气污染综合治理方案》,提出“系统梳理工业炉窑分布状况与排放特征,建立详细管理清单,实现监管全覆盖”的总体要求<sup>[2]</sup>.工业污染防治迫在眉睫而又任重道远,对工业污染等进行更有效、更准确地监测极具现实意义.

工业烟囱的排放是实时变化的,对其快速、准确、远距离监测一直是国际上环境遥感领域研究的热点和难点<sup>[3]</sup>.目前国内外已发展出一系列的探测技术,包括主动式探测和被动式探测两大类.主动探测手段主要有差分吸收激光雷达、拉曼激光雷达等<sup>[4]</sup>,其优点是可以实时、快速地定点探测,时间分辨率较高,但设备较为昂贵,且操作复杂,维护成本高,而且只能获得单点污染物浓度,并不能代表整片烟羽中的排放情况,存在一定的随机性.被动探测包括差分吸收光谱技术(Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS)<sup>[5-7]</sup>、傅里叶红外光谱技术、紫外(红外)成像光谱技术等<sup>[8-10]</sup>,其中傅里叶红外光谱技术及差分吸收光谱技术可以对烟羽中的  $\text{SO}_2$  进行快速探测、灵敏度高、操作简单、成本低、且具有很高的光谱分辨能力,但在数据离散性方面存在一定的技术局限性;而紫外成像光谱技术及红外成像光谱技术,虽然都能够直观显示出成像光谱仪视场中任意位置的浓度信息,确保探测的准确性,但通常需要机械扫描实现成像,因此在时间分辨方面比较受限.

双通道  $\text{SO}_2$  紫外成像技术是近几年才被提出的新型  $\text{SO}_2$  探测方法,与传统的遥感方法相比,该技术在时间分辨率、空间分辨率以及探测准确性方面都具有较为明显的技术优势,目前已经在火山喷发  $\text{SO}_2$  遥感方面得到实际应用,在工业  $\text{SO}_2$  排放遥感方面也开展了探索性研究.2006 年, MORI T 等率先将相机用于火山喷发的遥感探测,并成功获得了  $\text{SO}_2$  浓度图像<sup>[11]</sup>;2010 年, KERN C 等分析了相机视场角以及太阳天顶角对实验结果的影响,并进行了实验校准<sup>[12]</sup>;2013 年, LUBCKE P 等计算了标准泡镜片反射、气溶胶散射对定标曲线的影响,并与 DOAS 技术获得的定标结果对比,进一步提高了  $\text{SO}_2$  紫外成像技术的测量精度<sup>[13]</sup>.近年来,紫外相机性能的不断提升以及滤光片透过率的提高,使得紫外成像技术应用于  $\text{SO}_2$  浓度更低的工业排放及船舶尾气排放的监测成为可能.2014 年, PRATA AJ 使用单通道紫外  $\text{SO}_2$  相机,在多个港口测量了船舶排放尾气中的  $\text{SO}_2$ <sup>[14]</sup>,并粗略地估算了  $\text{SO}_2$  的排放速率;2015 年, SMEKENS JF 等使用紫外  $\text{SO}_2$  摄像系统对燃煤发电厂的排放进行了远程监测<sup>[15]</sup>,所测数据与位于烟囱内的传感器提供的数据一致性良好,证明了紫外相机用于人为源排放的可行性;2017 年, MATÍAS O 等提出了 2-IM 图像法<sup>[16]</sup>,通过羽流分割,以及多项式拟合来模拟背景光强,在晴朗或多云条件下,通过这种方法获得的人工背景与真实天空背景强度都较为接近,解决了多云条件下 4-IM 法不能准确测量  $\text{SO}_2$  排放浓度的难题.2018 年,中科院合肥物质科学研究所的谢品华等在实验室搭建了一套紫外相机系统,测试了系统的线性响应,实验表明其响应率可达 98.5%,且在不同成像区域内灵敏度变化在 3%以内,证明了紫外相机成像技术应用于遥感监测的准确性<sup>[17]</sup>.

本文在参考国内外相关技术的基础上,设计并研制了一套新型工业烟囱废气监测系统,该系统利用紫外相机对工业污染  $\text{SO}_2$  遥感成像,并提出了碳黑颗粒物成像监测方法,实现了工业烟囱废气中的  $\text{SO}_2$  和碳黑颗粒物排放情况的同时监测,突破了国际上紫外相机只能用来探测  $\text{SO}_2$  的技术局限.该监测系统空间分辨率及时间分辨率高、准确性好,能实现快速遥感监测,在实时监管工业烟囱污染排放及船舶尾气污染排放方面具有重要应用价值.

## 1 $\text{SO}_2$ 及碳黑颗粒物的测量方法

### 1.1 $\text{SO}_2$ 的测量原理

双通道紫外成像遥感监测系统探测  $\text{SO}_2$  的技术原理是基于 Beer-Lambert 定律.  $\text{SO}_2$  气体在 240 ~

320 nm 的紫外波段有显著的吸收特征谱(HITRAN2016<sup>[18]</sup>),其峰值在 290 nm 附近(如图 1 实线所示).而到达近地面的太阳辐射主要从 300 nm 开始(点画线所示),原因是波长小于 300 nm 的紫外光,几乎被大气中的 O<sub>3</sub> 所吸收.综合考虑 SO<sub>2</sub> 吸收谱及太阳散射谱,本实验将 310 nm 作为探测波段,探测带宽 10 nm;为扣除杂散消光吸收对 SO<sub>2</sub> 探测结果的影响,并进一步获取碳黑颗粒排放图像,增加 330 nm 作为参考通道,探测带宽同样为 10 nm.两通道滤光片的透射谱曲线分别用 Filter A 及 Filter B 表示(如图 1 虚线所示).

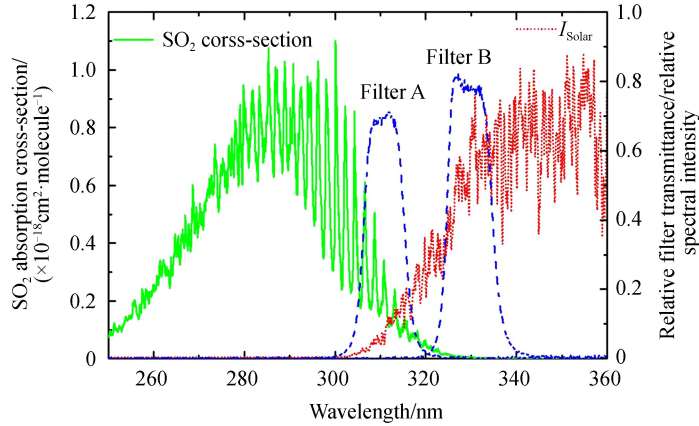


图 1 归一化 SO<sub>2</sub> 吸收截面、太阳散射光谱及滤光片透射谱

Fig.1 Normalized SO<sub>2</sub> absorption cross section, solar scatter spectrum and filter transmission spectrum

基于太阳辐射传输及烟气吸收的 Beer-Lambert 定律可表示为<sup>[12]</sup>

$$I_A(\lambda) = I_{0,A}(\lambda) \cdot \exp[-\tau(\lambda)] \quad (1)$$

$$\tau(\lambda) = \sigma(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (2)$$

式中,  $I_A$  为穿过烟羽的光强,  $I_{0,A}$  为未穿过烟羽的光强,  $\tau$  为光学厚度,  $\sigma$  是 SO<sub>2</sub> 吸收截面,  $S$  为气体柱密度.

相机实际测量到的信号是滤光片带宽内光强的谱积分强度,对于 A 滤光片,考虑到测量系统的相关参数,如滤光片透射率  $T_A(\lambda)$  及探测器的量子效率  $Q(\lambda)$ ,有烟羽存在的信号强度  $I_{M,A}$  及无烟羽的背景光信号强度  $I_{N,A}$  可分别表示为

$$I_{M,A} = \int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) \cdot \exp[-\sigma(\lambda) \cdot S(\lambda)] d\lambda \quad (3)$$

$$I_{N,A} = \int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中,  $I_S(\lambda)$  为进入羽流前的光谱强度.同理可得滤光片 B 相应的烟羽存在的信号强度  $I_{M,B}$ ,以及无烟羽的背景光信号强度  $I_{N,B}$ .

在 310 nm 波段测量 SO<sub>2</sub>,最大干扰来自于羽流中碳黑颗粒物的消光效应.为消除该影响,本实验增加了 330 nm 光谱通道.先由比尔-朗伯定律计算得到两个通道的光学厚度,再对两者做差值处理,即可获得不受颗粒物消光作用影响的 SO<sub>2</sub> 吸收对应的光学厚度.滤光片 A, B 的光学厚度分别记为  $\tau_A$ 、 $\tau_B$ ,则 SO<sub>2</sub> 的归一化光学厚度  $\tau$  可表示为

$$\tau = \tau_A - \tau_B = \ln \left[ \frac{I_{M,B}/I_{N,B}}{I_{M,A}/I_{N,A}} \right] \quad (5)$$

由式(5)可知,通过 310 nm 及 330 nm 两通道获得的烟羽图像及背景图像,即可计算 SO<sub>2</sub> 的归一化光学厚度,进而求得 SO<sub>2</sub> 的浓度.

## 1.2 碳黑颗粒物的测量

在波长为 330 nm 处,SO<sub>2</sub> 对光的吸收作用极其微弱,碳黑颗粒物的消光作用是引起 330 nm 通道光学厚度变化的主要因素,Buffaloe GM 等由大量实验总结得出,碳黑颗粒物质量与 330 nm 波段的光学厚度之间存在一定的函数关系<sup>[14]</sup>

$$m_{bc} = -\frac{1}{k_{bc}} \ln \left[ \frac{I_{M,B}}{I_{N,B}} \right] \quad (6)$$

式中,  $m_{bc}$  为碳黑颗粒物质量,  $k_{bc}$  为碳黑的质量吸收系数, 计算表达式为

$$k_{bc}(\lambda) = k_{bc(550)} \cdot \frac{550}{\lambda} \quad (7)$$

式中,  $k_{bc(550)} = 7.5 \pm 1.5 \text{ m}^2/\text{g}$ .

因此, 通过 330 nm 通道获得的烟羽图像及背景图像, 即可计算得到碳黑颗粒物的浓度图像。

### 1.3 背景强度的获得

计算光学厚度, 需要准确的天空背景强度作为输入条件. 目前, 获取背景的方法有两种, 4-IM 法与 2-IM 法. 其中 4-IM 法是在 310 nm 和 330 nm 处分别获得两幅信号图像, 再将相机移动至视场中无烟羽处, 拍摄得到烟羽附近的天空背景, 以此作为 310 nm 和 330 nm 通道的背景图像. 当天空晴朗无云时, 4-IM 法拍摄的背景与真实背景较为接近, 但在多云条件下, 无法用烟羽附近的背景代替真实背景. 为了解决这个问题, MATÍAS O 等<sup>[16]</sup>提出了 2-IM 法, 即只拍摄两幅信号图像, 天空背景通过对信号图像进行人工拟合得到, 在晴朗或者多云条件下, 均可获得较好的天空背景.

为了确定羽流在图像中的位置, 先计算两幅图像的比值  $I(\lambda_{310}, i, j)/I(\lambda_{330}, i, j)$ . 由于  $\text{SO}_2$  的吸收, 羽流的强度系数小于周围天空的强度系数, 这种操作在不改变羽流和背景之间的对比的情况下消除了云团. 然后进行全局阈值化, 将羽流从排放图像  $I(\lambda_{310/330}, i, j)$  中分割出来, 当需要处理大量图像时, 自动(非迭代)羽流分割方法极具优势.

在一个垂直像素处取水平剖面, 获得沿水平像素分布的光强曲线. 对于无羽流区域, 光强曲线是连续的, 当有羽流存在时, 该处水平剖面部分的光强曲线出现断裂, 假定羽流两侧光强度相似, 将背景建模为<sup>[16]</sup>

$$I_0(\lambda, x, y) = p(\lambda, x, y) \quad (8)$$

式中,  $x, y$  为笛卡尔坐标,  $p$  为一个多项式, 用于拟合烟气后的天空背景.

采用上述多项式对光强曲线进行拟合, 补充断裂处, 获得羽流处的背景光强, 从而构建出人工背景图像.

### 1.4 浓度校准

到达地球表面的散射光谱强度取决于太阳天顶角(Solar Zenith Angle, SZA), 特别是在  $\text{O}_3$  有明显吸收的紫外波长区域. 对于高太阳天顶角, 光线通过大气中臭氧层的平均光程比低太阳天顶角时长得多, 因此这种情况下, 对于紫外光的吸收也更强烈. 不同太阳天顶角时, 到达近地面太阳散射光强弱不同, 穿过羽流的路径长度也不一样, 从而导致光学厚度发生变化. 因此对于精确测量, 采用  $\text{SO}_2$  校准泡对测量结果进行实时标定是十分必要的.

由光学厚度  $\tau$  反演得到  $\text{SO}_2$  柱浓度  $S_{\text{SO}_2}$  的表达式为

$$S_{\text{SO}_2} = K \cdot \tau \quad (9)$$

式中,  $K$  为定标曲线的斜率.

为了减小误差, 应收集尽可能多的数据点进行校准, 且这些数据点应涵盖整个测量值范围, 因此, 采用多组已知浓度的  $\text{SO}_2$  定标泡获得校准曲线.

使用特殊设计的分子泡进行校准, 所述分子泡具有相同的厚度, 直径为 50 mm, 与相机镜头直径相匹配, 每个分子泡填充有不同浓度的  $\text{SO}_2$  气体. 光线以完全相同的方式, 通过滤光片和镜头进入相机. 采用多组定标泡, 得到 100 ppm·m 至 2 000 ppm·m 浓度下的实验值, 再对实验值与已知的气体真实浓度值进行最小二乘拟合, 得到拟合曲线, 拟合表达式为

$$C = K \cdot \ln \left[ \frac{W_0}{W} \right] \quad (10)$$

式中,  $C$  为气体的真实柱浓度值,  $W_0$  为不充入气体测量的光强度,  $W$  为充入浓度为  $C$  的  $\text{SO}_2$  气体时测量得到的光强度,  $K$  为拟合曲线(即定标曲线)的斜率, 实验条件下, 测得  $K$  的值为 9.32.

## 2 成像遥感实验

实验装置及光路结构如图2, 其主要组成为两台紫外相机、两个镜头、两片滤光片, 相机分辨率为  $1\,200 \times 1\,200$ , 像元尺寸为  $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ , 光学镜头的焦距为 105 mm, 镜头视场角为  $9.8^\circ$ , 光学尺寸为 18 mm, 滤光片 A 的中心波长为 310 nm, 滤光片 B 的中心波长为 330 nm, 半高宽 FWHM 为 10 nm. 具体相关参数见表 1.



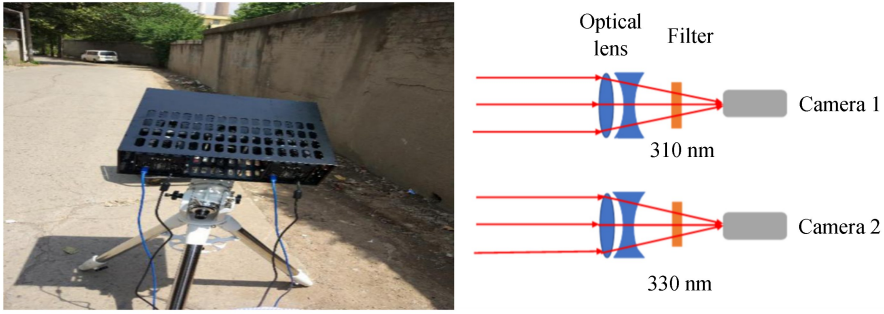


图 2 实验装置与光路结构

Fig.2 Experimental equipment and optical circuit structure

表 1 仪器相关参数

Table 1 Instrument related parameters

Instrument	Features	Parameter
Camera	Resolution	1200×1200
	Pixel size	11 μm × 11 μm
	Frame rate	5 fps@16-bit
	Dark noise	100
	Exposure time (filter A)	100 ms
	Exposure time (filter B)	60 ms
	Focal length	105 mm
Lens	Field angle	9.8°
	Optical size	18 mm
Filters	Filter A	Center wavelength:310 nm FWHM:10 nm
	Filter B	Center wavelength:330 nm FWHM:10 nm

图 3 为选定的实验测量地点,位于武汉市某钢铁厂附近,实验时间为 2018 年 12 月 12 日下午 13:00~14:00,此处可以清晰地观察到工业烟囱的排放情况,此时的天空背景有云团,并非均匀的,此背景既能提供充足的光强,又因为有云团的存在,使测量更具一般性.



图 3 目标工厂烟囱

Fig.3 Target factory chimney

相机拍摄的原始图像如图 4,图 4(a)为在 310 nm 处的图像,图 4(b)为 330 nm 处的图像.

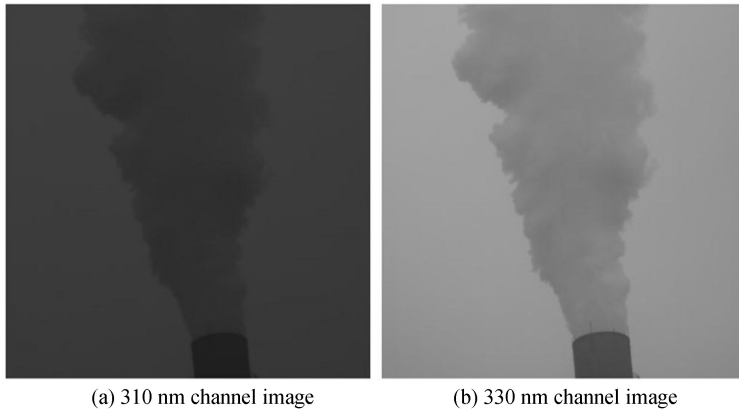


图 4 紫外相机拍摄的原始图像  
Fig.4 Original images taken by the UV cameras

### 3 图像处理与数据分析

#### 3.1 SO<sub>2</sub> 浓度图像

采用紫外相机成像技术,获得 SO<sub>2</sub> 及碳黑颗粒物排放的二维图像,进而获取图像中任意一点的浓度值.实测相机到烟囱的距离为 570 m,结合相机相关参数,计算得到图像中一个像元对应烟羽处的空间范围为 8.1 cm×8.1 cm,因此该系统具有高空间分辨率.一般情况下,采样频率可以根据需要设定在 1 Hz 到 10 Hz 之间.为了保证数据质量,本次实验的采样频率设定为 5 Hz,能在极短时间内获得大量数据,可实时监测 SO<sub>2</sub> 及碳黑颗粒物的排放情况,具有高时间分辨率(0.2 s).

对不同波长采取不同的曝光时间,310 nm 处由于光强更弱,可使曝光时间更长;获得原始图像后,由 2-IM 法,得到在 310 nm 和 330 nm 处的人工背景图像.当光照条件(或云)不变,人工背景并不需要每次都重新计算,但如果羽流后面的云移动速度很快,为了使整个实验过程中的误差最小,每组图像都要生成人工背景.

获得 310 nm 和 330 nm 处烟羽排放的背景图像后,再通过紫外成像探测原理浓度反演算法,计算得到两幅图像的光学厚度,二者差值即为 SO<sub>2</sub> 的光学厚度.结合校准曲线,得到 SO<sub>2</sub> 排放图像如图 5.

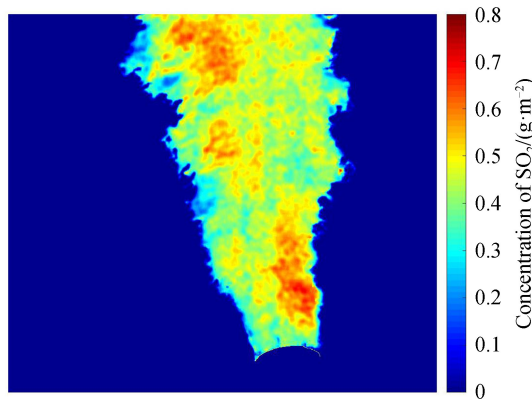


图 5 滤除背景后 SO<sub>2</sub> 的排放图像  
Fig.5 Emission image of SO<sub>2</sub> after filtering the background

#### 3.2 碳黑颗粒浓度图像

利用 2-IM 法获得 330 nm 处图像的人工背景,由式(6)、(7)计算得到碳黑颗粒物的排放图像,如图 6.

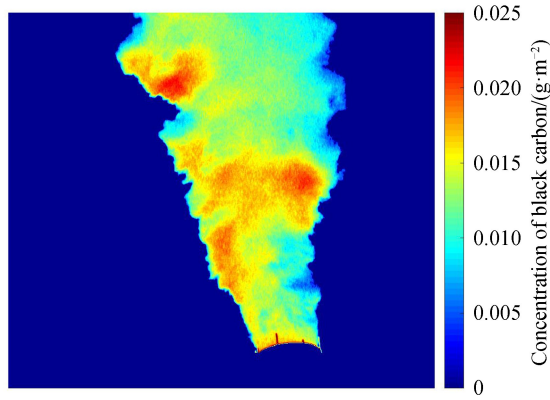


图 6 滤除背景后碳黑颗粒物的排放图像

Fig.6 Emission image of black carbon particles after filtering background

### 3.3 SO<sub>2</sub>及碳黑颗粒排放速率

相比于污染物浓度图像,其排放速率的测量具有更加重要的价值,排放速率可以直观地显示污染物的排放量值,而该物理量的获取是其他遥感技术难以实现的.污染物的排放速率由式(11)计算得到<sup>[16]</sup>

$$\Phi_{\text{SO}_2} = n \cdot v \cdot R \sum_i S_{\text{SO}_2} \cdot \Delta\alpha \quad (11)$$

式中, $n$  为羽流截面的法向量, $v$  为羽流的运动速度, $R$  为探测器沿观测方向到羽流的距离, $S_{\text{SO}_2}$  为探测器仰角为  $\alpha$  时的微分斜柱密度.

通过先后抓取的来自羽流的运动特征图像,来确定羽流的运动速度,光流法是较为精确的速度估计工具,特别是对于湍流羽流.由于测量距离较近,可忽略来自于光衰减等辐射传递效应的潜在误差.

通过激光测距仪实际测得的相机到工业烟囱的距离  $R$  为 570 m,烟气运动速度的值经过光流法计算为 4.87 m/s,代入式(11),可计算得到 SO<sub>2</sub>及碳黑颗粒物的排放速率,二者的排放速率结果如图 7.

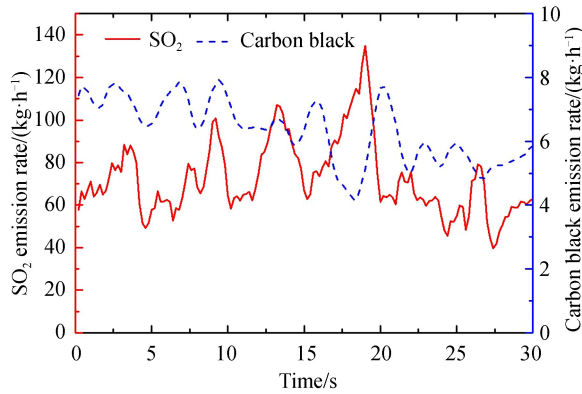

 图 7 SO<sub>2</sub>及碳黑颗粒物排放速率

 Fig.7 Emission rates of SO<sub>2</sub>and carbon black particles

### 3.4 误差分析

排放速率误差  $\Delta\Phi$ ,可由式(11)推导得出,计算表达式为

$$\Delta\Phi = \sqrt{(v \cdot R \cdot \Delta\alpha \cdot \sum \Delta S_{\text{SO}_2})^2 + (R \cdot \Delta\alpha \cdot \sum S_{\text{SO}_2} \cdot \Delta v)^2 + (v \cdot \Delta R \cdot \Delta\alpha \cdot \sum S_{\text{SO}_2})^2} \quad (12)$$

式中, $\Delta S_{\text{SO}_2}$ 、 $\Delta v$ 、 $\Delta R$  分别为柱浓度、速度、距离各项的误差.浓度项引起的误差  $\Delta S_{\text{SO}_2}$  可由式(9)推导得

$$\Delta S_{\text{SO}_2} = \sqrt{(\Delta K \cdot \tau)^2 + (K \cdot \Delta\tau)^2} \quad (13)$$

式中, $\Delta K$ 、 $\Delta\tau$  分别为定标曲线斜率、光学厚度的误差,定标曲线斜率的误差估计为 0.018.

光学厚度的误差  $\Delta\tau$  可由式(5)推导得到

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta I} = \frac{\partial\tau}{\partial I} = \frac{1}{I_{M,B}} - \frac{1}{I_{N,B}} - \frac{1}{I_{M,A}} + \frac{1}{I_{N,A}} \quad (14)$$

$$\Delta\tau = \sqrt{\left(\frac{\partial\tau}{\partial I_{M,B}} \cdot \Delta I_{M,B}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial I_{N,B}} \cdot \Delta I_{N,B}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial I_{M,A}} \cdot \Delta I_{M,A}\right)^2 + \left(\frac{\partial\tau}{\partial I_{N,A}} \cdot \Delta I_{N,A}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{I_{M,B}} + \frac{1}{I_{N,B}} + \frac{1}{I_{M,A}} + \frac{1}{I_{N,A}}} \quad (15)$$

式中,  $\frac{\partial\tau}{\partial I}$  为光学厚度对各项光强值的偏导数,  $\Delta I$  为各项光强值的改变量。

由式(12)可知, 排放速率误差  $\Delta\Phi$  的一个来源是浓度图像误差  $\Delta S_{SO_2}$ , 该值由定标曲线斜率  $\Delta K$  及光学厚度误差  $\Delta\tau$  决定。其中, 光学厚度误差  $\Delta\tau$  主要由光子噪声及暗噪声产生。实际测量结果表明, 本实验采用的高性能紫外相机的系统暗噪声仅为 100 左右, 对测量结果的影响很小, 可以忽略。而光子噪声产生的随机误差也可以通过像元合并的方式进一步减小 ( $N$  个像元合并, 误差可以减小为原来的  $N^{-1/2}$ )。为精确测量排放速率, 本实验计算了 100 个羽流截面的值 (即选取了图像中烟羽部分的 100 行像元的强度信息), 从而将光子噪声引起的误差减小到原来的 1/10, 最后得出浓度图像误差引起的排放速率误差为 0.67 kg/h, 由定标系数和光学厚度两部分的误差导致。

误差的另一个主要来源为羽流运动速度计算误差以及相机到烟羽的距离测量误差。利用光流法计算得到的羽流运动速度误差约为 0.16 m/s, 测距仪实际测量相机到烟羽的距离误差约为 5 m, 代入式(12), 可计算得到羽流速度及探测距离两者误差引起的  $SO_2$  的排放速率误差分别为 3.01 kg/h 和 0.67 kg/h, 进而可得  $SO_2$  测量总的误差  $\Delta\Phi$  为 3.16 kg/h。

表 2 直观地展现了各项因素带来的误差大小, 由表可知, 对于  $SO_2$  排放速率误差影响最大的是烟羽运动速度。

表 2  $SO_2$  排放速率各项误差数值

Table 2 Various error values of  $SO_2$  emission rate

Source of error	Error magnitude/( $kg \cdot h^{-1}$ )	Percentage
Calibration coefficient	0.18	0.25%
Optical thickness	0.65	0.89%
Plume velocity	3.01	4.1%
Distance	0.67	0.93%

对于碳黑颗粒物测量的误差, 主要来自于经验式(6)和(7), 由碳黑的质量吸收系数引起。其次, 还包括式中烟羽运动速度、距离带来的误差, 综合计算, 总的误差约为 1.18 kg/h。

## 4 结论

本文利用紫外相机遥感成像探测技术, 设计了一套新型工业烟囱尾气监测系统, 实现了对工业烟囱排放尾气中的  $SO_2$  和碳黑颗粒物同时成像监测。对烟囱进行连续观测, 获得了持续时间为 30 s 的排放图像, 并计算了  $SO_2$  及碳黑颗粒物排放速率及其误差:  $SO_2$  排放的平均值为 72.48 kg/h, 误差为 4.3%, 碳黑颗粒物排放速率的平均值为 6.33 kg/h, 误差为 18.6%。对于  $SO_2$  的测量, 误差较小。由式(15)结合像元合并的方法, 计算得到系统能检测的最小光学厚度变化值为 0.001 34, 再由定标曲线, 得到系统的探测极限大约为 4.7 ppm · m; 对于碳黑颗粒物的测量, 由于采取经验公式, 不可避免会产生一些误差。相比只对单一组分进行测量的方法, 该技术可实现工业烟囱  $SO_2$  以及碳黑颗粒物排放的同时监测, 且紫外相机获得的二维图像能更直观显示出烟囱尾气中  $SO_2$  及碳黑颗粒物的浓度信息及其空间分布, 因而结果也更加可靠, 可以为环保部门提供更准确有效的监测数据, 以监管控制工业烟囱的废气排放改善环境问题。下一步的工作中, 将进一步改进实验, 重点考虑长距离传输过程中, 太阳散射光对测量结果的干扰, 争取将误差进一步减小, 使测量结果更加准确。

## 参考文献

- [1] LI Hua, ZHAO Xue-yan, WANG Wei-jun, *et al.* Spatial and temporal variation of industrial pollution in China based on multi-scale analysis and its influencing factors[J]. *Geographical Research*, 2019, **38**(8):1993-2007.  
李花, 赵雪雁, 王伟军, 等. 基于多尺度的中国城市工业污染时空分异及影响因素[J]. 地理研究, 2019, **38**(8):1993-2007.
- [2] Ministry of ecology and environment of the People's Republic of China. Notice on printing and distributing the "Integrated Control Plan for Air Pollution in Industrial Furnaces"[EB/OL]. (2019-07-09)[2019-11-10]. <http://www.mee.gov.cn/>



xxgk2018/xxgk/xxgk03/201907/t20190712\_709309.html.

中华人民共和国生态环境部.关于印发《工业炉窑大气污染综合治理方案》的通知[EB/OL].(2019-07-09)[2019-11-10].  
[http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/201907/t20190712\\_709309.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk03/201907/t20190712_709309.html).

- [3] QU Yi. Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(6):834-840.  
曲艺.大气光学遥感监测技术现状与发展趋势[J].中国光学, 2013, **6**(6):834-840.
- [4] KALABOKAS P, PAPAYANNIS A, TSAKNAKIS G, *et al.* A study on the atmospheric concentrations of primary and secondary air pollutants in the Athens basin performed by DOAS and DIAL measuring techniques[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **414**:556-563.
- [5] ZHANG Bao, GAO Chao, GUO Yong-cai, *et al.* Measurement method for low-concentration SO<sub>2</sub> based on statistics and DOAS[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(2): 0230001.  
张豹,高潮,郭永彩,等.基于DOAS及统计量的低浓度SO<sub>2</sub>测量方法[J].光子学报, 2018, **47**(2):0230001.
- [6] LIU Bin, FU An-qi, YAO Zhi-gang, *et al.* SO<sub>2</sub> Concentration retrieval algorithm using EMD and PCA With application in CEMS based on UV-DOAS[J]. *Optik*, 2018, **158**:273-282.
- [7] MOU Fu-sheng, LUO Jing, LI Su-wen, *et al.* Aerosol extinction retrieved with optical estimation algorithm based on multi-axis differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7):0701002.  
牟福生,雒静,李素文,等.基于多轴差分吸收光谱技术的最优估算法反演气溶胶消光廓线研究[J].光子学报, 2018, **47**(7): 701002.
- [8] SCHÖNHARDT A, ALTUBE P, GERIŁOWSKI K, *et al.* A wide field-of-view imaging DOAS instrument for two-dimensional trace gas mapping from aircraft[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**: 5113-5131.
- [9] LEE H L, NOH Y M, KWON S C, *et al.* First simultaneous visualization of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> plume dispersions using imaging differential optical absorption spectroscopy[J]. *Bulletin- Korean Chemical Society*, 2014, **35**(4):1191.
- [10] LIU Jin, SI Fu-qi, ZHOU Hai-jin, *et al.* Estimation of sulfur dioxide emission from power plant using imaging differential optical absorption spectroscopy technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(6): 0630003.  
刘进,司福祺,周海金,等.基于成像差分吸收光谱技术测量电厂SO<sub>2</sub>排放方法研究[J].光学学报, 2015, **35**(6): 0630003.
- [11] MORI T, BURTON M. The SO<sub>2</sub> camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO<sub>2</sub> in volcanic plumes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(24).
- [12] KERN C, KICK F, LÜBCKE P, *et al.* Theoretical description of functionality, applications, and limitations of SO<sub>2</sub> cameras for the remote sensing of volcanic plumes[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, **3**:733-749.
- [13] LÜBCKE P, BOBROWSKI N, ILLING S, *et al.* On the absolute calibration of SO<sub>2</sub> cameras[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**:677-696.
- [14] PRATA A. Measuring SO<sub>2</sub> ship emissions with an ultraviolet imaging camera [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**:1213-1229.
- [15] SMEKENS J, BURTON M, CLARKE A, *et al.* Validation of the SO<sub>2</sub> camera for high temporal and spatial resolution monitoring of SO<sub>2</sub> emissions[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, **300**:37-47.
- [16] MATÍAS O, NICOLÁS C, GASTÓN B, *et al.* Plume segmentation from UV camera images for SO<sub>2</sub> emission rate quantification on cloud days[J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(6):517.
- [17] ZHANG Ying-hua, LI Ang, XIE Pin-hua, *et al.* An UV imaging methods application to the two-dimensional spatial distribution of pollutant concentration[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, **38**(5):1476-1480.  
张英华,李昂,谢品华,等.污染气体浓度二维空间分布的紫外成像方法[J].光谱学与光谱分析, 2018, **38**(5):1476-1480.
- [18] GORDONA I, ROTHMANA L, HILLAB C, *et al.* The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, **203**: 3-69.