

SO₂ 气体排放的紫外成像遥感监测

熊远辉^{1,2}, 罗中杰¹, 陈振威², 于光保^{1,2}, 段为民², 刘林美², 李发泉², 武魁军^{2*}

1. 中国地质大学数学与物理学院, 湖北 武汉 430074

2. 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071

摘要 工业烟囱及船舶尾气中 SO₂ 气体排放是造成大气污染的重要因素。SO₂ 容易被氧化生成硫酸雾或硫酸盐气溶胶, 产生酸雨, 严重危害大气生态环境平衡及人类健康。现有的 SO₂ 光学遥感测量技术, 如拉曼散射激光雷达、差分吸收激光雷达 (DIAL)、傅里叶变换红外吸收光谱 (FTIR)、紫外差分吸收光谱 (DOAS)、高分辨光谱成像等, 难以兼顾气体污染监测对高时间分辨率、高空间分辨率以及便携机动等应用需求。近年来, 紫外 SO₂ 相机成像探测因探测精度高、实用性强得到迅速发展, 该技术时间分辨率高、空间分辨力强, 能从解析图像中直观在线获取污染气体浓度在空间的二维分布及随时间的排放率, 对于监测环境污染有重要作用。基于紫外 SO₂ 相机成像探测技术, 围绕 SO₂ 柱浓度探测的测量原理及影响因素、仪器设计及实验方法、反演算法及结果比对等方面开展研究。取得的成果主要有: (1) 利用窄带滤光片的窄波窗口, 用紫外相机测量 310 nm 附近的 SO₂ 紫外吸收, 建立了紫外成像遥感监测理论模型, 介绍了紫外成像遥感检测获取 SO₂ 浓度图像的测量原理; (2) 将滤光片放置镜头前后, 讨论了不同入射角对滤光片中心波长及透过率曲线的影响, 发现滤光片放置镜头后, 相机系统对 SO₂ 的灵敏度受人射角影响更小, 对 SO₂ 浓度图像的反演误差更小; (3) 分析了太阳高度角对 SO₂ 浓度图像反演的影响, 阐明了 SO₂ 浓度反演曲线实时校准的不可或缺性; (4) 通过理论分析设计出了紫外成像遥感探测装置, 开展了基于紫外成像遥感监测 SO₂ 气体排放的实验研究, 通过 2-IM 法拟合出了人工天空背景, 获得了 SO₂ 光学厚度图像, 利用标准泡进行校准, 反演出了 SO₂ 浓度图像; (5) 采用 DOAS 技术对 SO₂ 气体排放进行监测, 与紫外成像遥感获得的 SO₂ 浓度进行对比表明, 两方法实验结果所计算得到的浓度信息趋势相一致, 从而证明紫外成像遥感监测技术测量结果的准确性, 同时展现了该技术在工厂烟囱及船舶尾气污染排放遥感监测中的巨大应用前景。

关键词 SO₂ 相机; 紫外光谱; 差分吸收; 成像遥感

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)04-1289-08

引言

随着全球工业化的进一步推进和经济水平的提高, 空气质量逐渐成为人民最为关心的生态环境问题。大气污染不仅影响人民的生活健康, 而且由其引起的恶劣天气会对国家造成十分严重的经济损失。一直以来, 工业固定源的污染气体排放物是造成空气污染的首要原因, 其中比例最多的、影响最为严重的污染气体为 SO₂。SO₂ 气体具有强烈的刺激性及明显的促癌性, 对人体危害很大; 而且, SO₂ 容易被氧化生成毒性更强的 SO₃, 在大气化学过程中产生酸雨, 从而对生态环境造成巨大破坏。

为监测 SO₂ 气体污染排放情况, 多种机理的光学遥感技术被陆续提出, 比如拉曼散射激光雷达、差分吸收激光雷达 (DIAL)、傅里叶变换红外吸收光谱 (FTIR)、差分吸收光谱仪 (DOAS)、高分辨光谱成像等。其中, 拉曼散射激光雷达和差分吸收激光雷达属于主动探测方式, 可实现污染物空间立体检测, 具有距离分辨能力^[1], 但设备庞大, 不适合用于工厂等空间有限。为了便携性和工程性, 被动监测方式相继出现, FTIR 的高分辨率和傅里叶函数解析使得该方法具有多组分分析、测量范围宽、分析速度快等特点^[2]。差分吸收光谱技术 (DOAS) 具有响应快、能实现实时检测, 可同时监测不同种类的气体, 降低了气体测量的成本及复杂性^[3-4]; 但由于非成像式检测只有一维光谱数据, 数据离散性大。与

收稿日期: 2019-04-09, 修订日期: 2019-08-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0211900), 国家自然科学基金项目 (61705253) 资助

作者简介: 熊远辉, 1996 年生, 中国地质大学数理学院硕士研究生 e-mail: xiongyuanhui524@163.com

* 通讯联系人 e-mail: wukuijun@wipm.ac.cn

之相比成像光谱仪具有高空间分辨率的特点,利用大视场接收的污染物吸收成像监测方法,以利于降低随机监测离散度,提高定量测量的准确性;成像光谱仪可以同时获取一维光谱信息及二维空间信息。德国海德堡大学利用 IDOAS 研究泰埃特纳火山化学组分以及火山羽流中 SO_2 分布情况^[5];中国科学院安徽光学精密机械研究所刘文清院士等采用超光谱成像 DOAS 系统结合扫描转台实现了对 SO_2 和 NO_2 的二维成像测量^[6]。然而,成像光谱仪结构较为复杂,一般需要机械扫描获取图像信息,时间分辨率通常较低。

近年来,一种更为简单、更为精准的紫外 SO_2 相机成像探测方式得到迅速发展,紫外 SO_2 相机的高时间分辨率允许观测模拟烟囱羽流的动态趋势;同时具有高空间分辨率可以测量二维 SO_2 光学厚度分布^[7-9]。2010 年,德国 Kern 等分析了不同太阳高度角对太阳散射光谱以及滤光片放置镜头前不同入射角的滤光片透过率,利用紫外 SO_2 相机观测了火山 SO_2 羽流^[10]。2013 年,Christoph Kern 等提出了滤光片放置镜头后对 SO_2 浓度反演影响小,并对滤光片透过率曲线进行了分析^[11]。2015 年,Christoph Kern 等对 7 种不同 SO_2 相机和 4 种滤光片进行了比较,分析了不同视场角下的火山羽流光学厚度^[12]。2015 年,Christoph Kern 等采用双紫外 SO_2 相机连续实时测量火山 SO_2 浓度^[13]。2017 年,Matias Osorio 等实现了在多云天气下对工厂烟囱尾气 SO_2 进行了外场测量^[14]。2018 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所在实验室内通过氙灯以 SO_2 为研究对象分析了紫外成像的线性响应,响应系数 R^2 高达 0.985,且不同成像区域的灵敏度变化差异仅为 1%~3%^[15]。本工作主要从紫外 SO_2 成像的工作机理及工程化实现着手,探讨了该技术的测量原理、影响因素及反演算法,开展了基于紫外成像在 SO_2 羽流测量中的应用,并对实验结果的准确性进行了对比分析。

1 成像测量原理

SO_2 相机由紫外灵敏相机和窄带滤光片组成, SO_2 相机有两片中心波长不同的滤光片,通过两滤光通道内的气体分子对太阳散射光吸收率不同实现 SO_2 浓度的反演。

1.1 基本原理

无论是工厂烟囱、船舶尾气,还是火山喷发,其气团中除了 SO_2 ,通常还有颗粒物,颗粒物的消光作用及米散射作用会对 SO_2 的探测产生不良影响,因此双滤光片可以很好解决颗粒物对 SO_2 浓度反演的影响。带通滤光片 A 和 B 的透过曲线、 SO_2 的吸收截面以及太阳光的散射光谱如图 1 所示,滤光片 A 通道覆盖 SO_2 吸收光谱及太阳散射光谱的交叠波段;滤光片 B 通道接近滤光片 A 通道但不采集 SO_2 的光谱信息。通过滤光片 A 通道采集到的图像信息反演得到 SO_2 气体的吸收率及颗粒物的消光系数,再利用滤光片 B 通道扣除颗粒物的消光系数,从而获取纯 SO_2 气体的排放图像。

当相机视场中没有污染气体羽流时,太阳散射光到达相机感光面的光强可表示为^[10]

$$I_0(\lambda) = I_S(\lambda)T(\lambda)Q(\lambda) \quad (1)$$

其中, $I_0(\lambda)$ 为太阳散射光到达感光面的光强, $I_S(\lambda)$ 为太阳散射光强, $T(\lambda)$ 为滤光片透过率, $Q(\lambda)$ 为相机的量子效率。

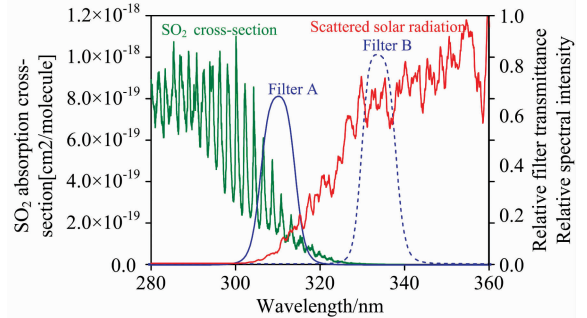


图 1 带通滤光片 A 和 B 的透过曲线、 SO_2 的吸收截面以及太阳光的散射光谱

Fig. 1 Transmission curves of bandpass filters A and B, absorption cross-section of SO_2 , and scattering spectra of sunlight

当相机视场中存在污染气体羽流时,A 滤光片通道接收到的太阳散射光将受到 SO_2 吸收及颗粒物消光的双重影响,根据朗伯比尔定律有

$$I_A(\lambda) = I_{A0}(\lambda)\exp(-\sigma(\lambda)S(\lambda) - \tau_m) \quad (2)$$

其中, $I_{A0}(\lambda)$ 和 $I_A(\lambda)$ 分别为穿过气团前后的光强, $\sigma(\lambda)$ 是 SO_2 的吸收截面, τ_m 是气团中颗粒物对散射光的消光率,紫外相机获得的光强变化是沿视线方向气团中所有 SO_2 吸收效应的综合效果,在视线方向没有空间分辨能力,因而此处的 $S(\lambda)$ 的是柱浓度,其单位为 $\text{ppm} \cdot \text{m}$,表示气团中 SO_2 浓度沿视线方向有效光路 L 的浓度积分。

对于 B 滤光片通道,由于避开了 SO_2 吸收光谱,因此其透射信号仅受颗粒物对散射光的消光作用

$$I_B(\lambda) = I_{B0}(\lambda)\exp(-\tau_m) \quad (3)$$

其中, $I_{B0}(\lambda)$ 和 $I_B(\lambda)$ 是穿过颗粒物前后的光强。

两滤光片通道光学厚度进行综合处理可获得 SO_2 的光学厚度,可表示为

$$\tau = -\ln \frac{I_A(\lambda)}{I_{A0}(\lambda)} + \ln \frac{I_B(\lambda)}{I_{B0}(\lambda)} = \sigma(\lambda)S(\lambda) \quad (4)$$

其中, τ 是 SO_2 的光学厚度, SO_2 吸收截面 $\sigma(\lambda)$ 可根据 HIT-RAN 数据库获取,通常根据标准浓度的 SO_2 定标泡来获取 SO_2 的光学厚度与 SO_2 浓度之间的定标曲线,从而根据定标曲线来确定出紫外相机 SO_2 浓度。

1.2 滤光片影响

光学成像系统中,不可能所有散射光线都垂直照射滤光片,对于非垂直照射滤光片表面的光线,滤光片透射窗口的有效中心波长和透过率会发生变化。因而导致 SO_2 相关灵敏度曲线也将发生变化。所以滤光片校准是检测 SO_2 浓度反演准确性至关重要一步。

对于小于 20° 的入射角 θ ,滤光片透射窗口的中心波长 λ_c 可表示为^[11]

$$\lambda_c \approx \lambda_F \left[1 - \left(\frac{n}{n_F} \right)^2 \sin^2(\theta) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中, n_F 为滤光片材料的折射率, n 为空气折射率, λ_c 取决

于滤光片中心波长 λ_F 及其折射率 n_F , λ_C 随着入射角 θ 的增加向短波方向移动。

SO₂ 相机使用的带通滤光片光谱透过率 $T(\lambda)$, 可近似用高斯线性 G 表示^[11]

$$T(\lambda) \approx T_0 G(\lambda, \lambda_F, \sigma_F) \approx \frac{T_0}{\sigma_F \sqrt{2\pi}} \exp(-(\lambda - \lambda_F)^2 / 2\sigma_F^2) \quad (6)$$

其中 T_0 是归一化因子, σ_F 是透过率带宽参数, λ_F 为滤光片的中心波长。入射角 θ 低于 20° 时, 滤光片有效最大透过率 $T_C(\theta) = T_F(1 - 2\%)\theta$ 。

如果滤光片放置镜头前面, 入射角等于视场角; 而当滤光片放置镜头后面时, 入射角可表示为^[11]

$$\theta(r, \varphi) = \arctan\{f^{-1}[f^2 \tan^2(M\alpha) + r^2 - 2fr \tan(M\alpha) \cos\varphi]^{1/2}\} \quad (7)$$

其中, r 是镜头上某一点到镜头中心的距离, φ 的方向是相对于水平 x 轴, f 是镜头焦距, M 为物镜的角度放大率, α 为视场角。

滤光片有效透过率可表示为^[11]

$$T(\lambda, \alpha) = \frac{T_0}{T_F \pi R^2} \int_0^{R/2} \int_0^{2\pi} T_C(\theta(r, \varphi)) G(\lambda, \lambda_C(\theta(r, \varphi)), \sigma_F) r d\varphi dr \quad (8)$$

其中, R 为镜头半径。滤光片有效透过率曲线及太阳辐射谱如图 2 所示, 入射角分别为 0°, 10° 和 15°, 实线为滤光片放置镜头后有效透过率曲线, 虚线为滤光片放置镜头前有效透过率曲线, 图中红线是辐射传输模型模拟在没有羽流下的太阳辐射光谱, 黑线是在羽流下的太阳辐射光谱。

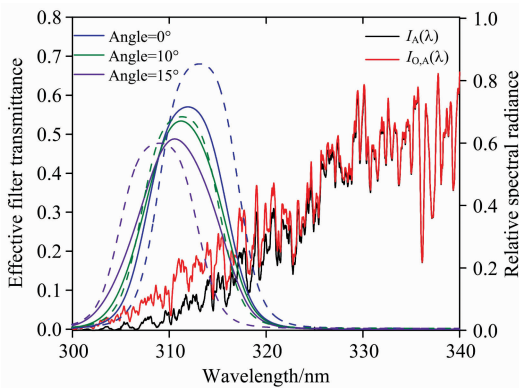


图 2 滤光片有效透过率曲线及太阳辐射谱
Fig. 2 Filter effective transmittance curve and solar radiation spectrum

通过对比可以知道, 滤光片放置镜头前有效中心波长向短波方向移动, 且有效透过率随着入射角 θ 的增加而降低; 而滤光片放置镜头后, 滤光片透过率随入射角增大而降低, 但中心波长及有效透过率基本无变化。相机系统对 SO₂ 灵敏度与视场角关系如图 3 所示, 与滤光片放置镜头前相比, 滤光片放置镜头后可大大降低相机系统边缘对 SO₂ 灵敏度变化, 因此选择滤光片放置镜头后面可有利于反演 SO₂ 浓度。

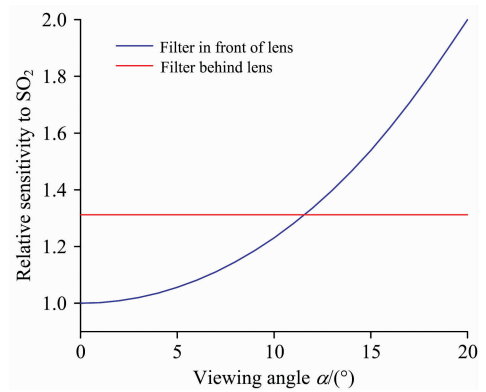


图 3 相机系统对 SO₂ 的灵敏度与视场角关系
Fig. 3 Sensitivity to SO₂ of camera system as a function of the viewing angle

1.3 太阳高度角影响

在紫外波长区域, 到达地球表面的散射光谱强度取决于太阳高度角(SZA)。臭氧吸收截面和不同高度角下太阳散射光谱强度如图 4 所示, 其中红线表示高度角为 0° 时太阳散射光谱强度, 黑线表示高度角为 20° 时太阳散射光谱强度, 绿线表示高度角为 40° 时太阳散射光谱强度。臭氧(O₃)吸收截面在紫外短波方向急剧增加。太阳高度角越大, 太阳散射通过臭氧层的平均光程路径要越长, 散射光谱强度受光程长度影响越大, 使得相同浓度的 SO₂ 气体会在不同太阳高度角下测量得到不同的光学厚度。

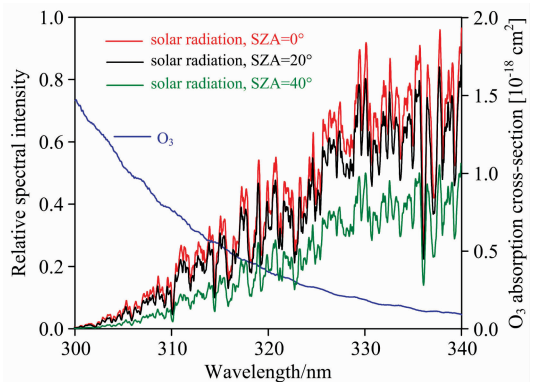


图 4 臭氧吸收截面及不同高度角下太阳散射光谱强度
Fig. 4 Ozone absorption cross-section and solar scatter spectrum intensity at different solar zenith angles

图 5 所示为在入射角为 0°, 太阳高度角分别为 0° 和 40° 时滤光片 A 通道的光谱强度, 蓝线和红线分别表示背景太阳散射光谱和 SO₂ 吸收后的太阳散射光谱

太阳高度角的变化会引起太阳散射光谱的变化, 从而导致实验测得的 SO₂ 光学厚度随之改变。图 6 所示为不同太阳高度角下, SO₂ 光学厚度与浓度之间的函数关系。由图可见, SO₂ 浓度反演定标曲线受太阳高度角影响非常大。因此通过标准泡实时获取不同太阳高度角下的 SO₂ 光学厚度与 SO₂ 浓度反演校准曲线, 是精确测量 SO₂ 浓度的必不可少的一环。

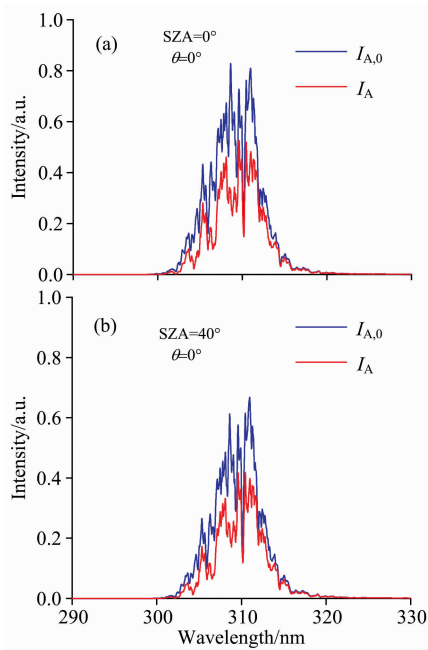
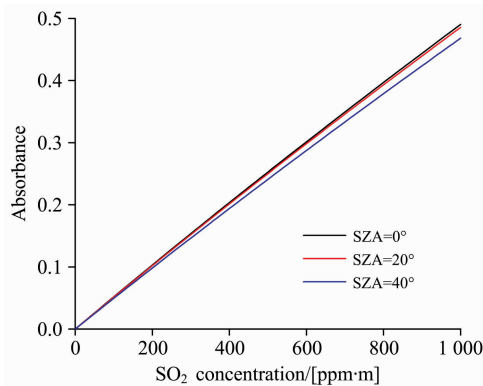


图 5 紫外相机滤光片 A 通道的光谱强度

Fig. 5 Light intensity after passing through A channel of filter as a function of wavelength λ 图 6 不同太阳高度角下, SO_2 光学厚度与浓度之间关系Fig. 6 SO_2 absorbance as a function of concentration for different solar zenith angles

2 成像遥感实验

2.1 装置

由上述理论分析可知,光学系统设计对于紫外成像实验的 SO_2 浓度反演准确性极其关键,滤光片放置镜头后,可有效减小入射角对滤光片透过率曲线的影响;其次相机系统对 SO_2 的敏感度受入射角影响较小,有利于减小滤光片透射谱型对 SO_2 浓度反演结果的影响。根据理论分析结果,设计的成像系统实验装置如图 7 所示。系统中使用的非制冷型紫外相机 (PHOTOMETRICS 公司, Prime95B) 的量子效率为 40% @ 310 nm, 最大信噪比为 49 dB, 有效成像面积为 22.5mm(H) × 22.5 mm(V), 该相机能够以 41 帧 · s⁻¹ (16 位数字化) 的帧速采集 1 200 × 1 200 像素图像, 可以同时获

取较高的时间分辨率与空间分辨率。对于模拟工业烟囱尾气监测应用中,紫外相机的紫外镜头 (美国 UNIVERSE KOGAKU 公司) 光学设计的视场角为 9.8°, F 数为 4.0, 镜头透过率约为 85%; 太阳散射光经过烟囱尾气后的信号, 通过光学镜头和双窄带滤光片 (日本 Asahi 公司, XBPA310 Bandpass Filter/310 nm 25 mm, XBPA330 Bandpass Filter/330 nm 25 mm) 被紫外相机采集。使用紫外相机对成像气体进行定量测量需要整套成像系统的两通道采集信号保持一致。在紫外成像实验装置中, 中间添加了光谱通道可同时采集光谱信息, 同时反演出 SO_2 浓度结果可与紫外成像实验结果对比。实验装置中紫外相机、接收镜头、带通滤光片及高分辨光谱仪参数如表 1 所示。

表 1 仪器参数

Table 1 Instrument parameters

仪器	特性	参数
相机	分辨率	1 200 × 1 200
	像元尺寸	11 μm × 11 μm
	帧速	41 fps @ 16-bit
	暗电子数	约 100 e ⁻
	A 滤光片曝光时间	20 ms
镜头	B 滤光片曝光时间	20 ms
	焦距	105 mm
	视场角	9.8°
滤光片	光学尺寸	18 mm
	滤光片 A	中心波长: 310 nm FWHM: 10 nm
光谱仪	滤光片 B	中心波长: 330 nm FWHM: 10 nm
	视场角	0.54°
	光谱分辨率	0.035 nm
	光谱范围	240 ~ 390 nm
	曝光时间	100 ms

2.2 实验结果

SO_2 紫外成像遥感仪器与烟囱尾气模拟装置距离约 20 m, 相机视场对准模拟烟囱尾气, 如图 7(a) 所示。图 8 为紫外成像实验数据原始, 图 8(a) 为 310 nm 滤光通道采集到的尾气图像, 图 8(b) 为 330 nm 滤光通道采集到的尾气图像。

除图像信号外, 该装置还可以同时获取尾气的光谱数据, 用于对比图像方法反演结果。图 9 所示为光谱通道实验数据结果, SO_2 吸收截面主要集中在 310 nm 波段, 由于太阳散射在 300 nm 左右往短波方向波段无透过, 因此 SO_2 吸收信号在 300 nm 的长波方向才有信号。

3 数据处理

3.1 图像处理

两通道信号对紫外线的吸收率的差值可以准确提取 SO_2 信号; 获取背景图像的均匀性可以提高通道信号的光学厚度从而影响 SO_2 浓度反演的准确性。在烟囱气体发射信号中,

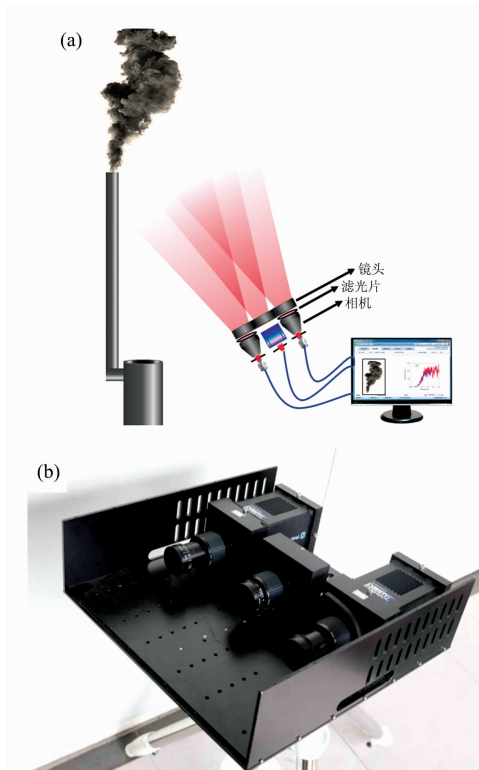


图 7 成像遥感实验装置图 (a) 和 (b)
 Fig. 7 Experimental device for imaging remote sensing (a) and (b)

背景图像应该是羽流后面的光强度图像, 在气体存在的情况下, 不可能从观测点直接获得背景图像。获取背景的典型方式是转动相机, 改变观察方向获取天空均匀的无烟图像, 这种方法称为四像法(4-IM)^[18]。如果没有云层存在, 背景观察方向上的照度近似等于羽流背后的照度, 那么四像法就能很好的工作, 因为到达相机的光线取决于太阳的高度角和方位角。为了减少图像数量, 使天空背景接近均匀, 通过在羽流部分插值构造人工背景, 这种方法称为二像法(2-IM)^[18]。如图 10(a)和(b)所示为通过图像匹配后裁剪原始数据图像得到的同视场图像, 对其进行气体羽流区域扣除并人工生成的背景图像, 人工背景图像合成方法借鉴 2-IM 法, 如图 10(c)和(d)所示。

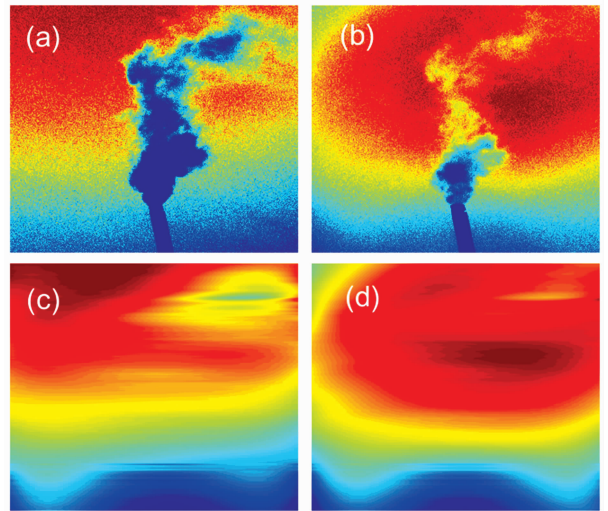


图 10 图像匹配裁剪后的原始信号 (a) 和 (b) 及人工生成的背景图像 (c) 和 (d)

(a): 310 nm 通道; (b): 330 nm 通道;
 (c): 310 nm 通道; (d): 330 nm 通道

Fig. 10 Raw images (a), (b) and artificial background images (c), (d)

(a): 310 nm channel; (b): 330 nm channel;
 (c): 310 nm channel; (d): 330 nm channel

利用人工拟合出的背景图像对两通道信号进行处理得到两通道光学厚度如图 11 所示, 图 11(a)为 310 nm 通道光学厚度, 图 11(b)为 330 nm 通道光学厚度, 可以看出 310 nm 通道光学厚度相较于 330 nm 通道光学厚度大, 两通道光学厚度图像中显示出人工拟合出的天空背景呈现均匀性, 显示出接近于零的光学厚度。

通过图像信号拟合出人工背景, 根据朗伯比尔定律解析出烟囱 SO₂ 气体光学厚度, 通常使用标准泡定标, 可以获得 SO₂ 光学厚度与浓度之间关系曲线, 然后通过反演获得的 SO₂ 光学厚度确定 SO₂ 浓度大小, 反演出 SO₂ 气体柱浓度图像如图 12 所示, 图像颜色代表 SO₂ 柱浓度大小。该结果是利用 2-IM 法获得人工背景, 实验结果中背景非常均匀。

3.2 光谱处理

太阳光的光信号经过尾气吸收衰减后, 到达光谱仪。根

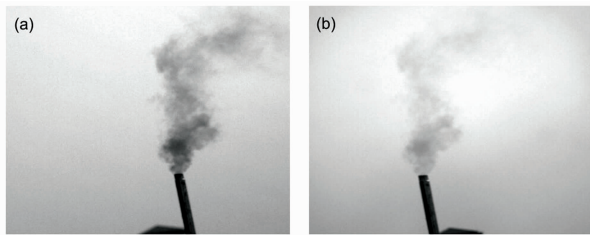


图 8 实验数据原始信号图

(a): 310 nm 通道; (b): 330 nm 通道

Fig. 8 Example of raw images

(a): 310 nm channel; (b): 330 nm channel

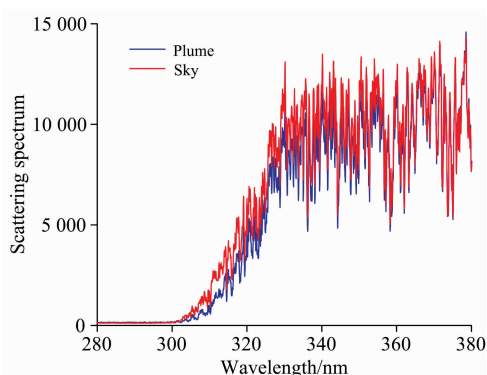


图 9 光谱通道实验数据结果

Fig. 9 Raw spectral data

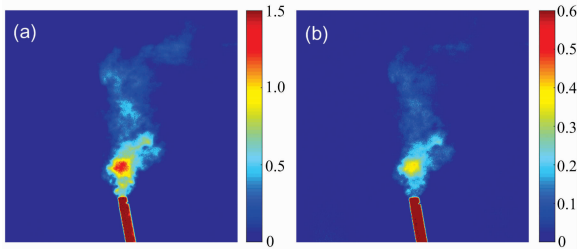
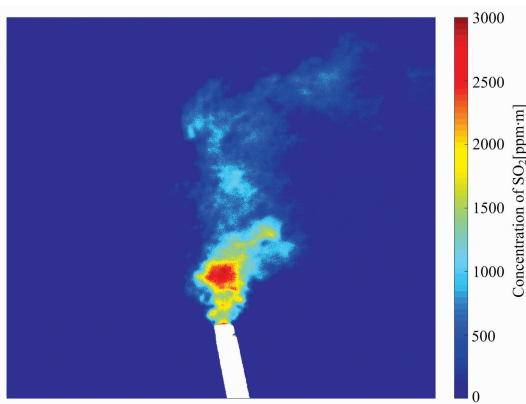


图 11 光学厚度

(a): 310 nm 通道; (b): 330 nm 通道

Fig. 11 Optical depths of two channels

(a): 310 nm channel; (b): 330 nm channel

图 12 SO₂ 浓度实验结果Fig. 12 Experimental result of SO₂ concentration

据朗伯比尔定律对实验光谱进行分析得到信号经过尾气 SO₂ 后的吸收曲线。为了校准 SO₂ 路径浓度,对光谱仪采集的暗电流进行扣除,则用 DOAS 方法计算光谱可表示为

$$A_{\lambda} = -\ln\left(\frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}}\right) \quad (9)$$

其中, A_{λ} 是关于波长函数的吸收率, S_{λ} , R_{λ} 和 D_{λ} 分别是信号光谱,背景光谱和暗噪声强度。对光谱分析得到的 SO₂ 吸

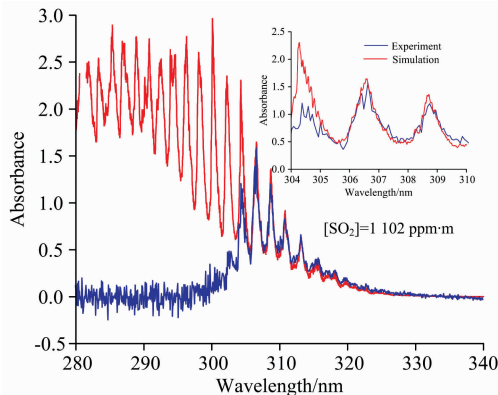


图 13 光谱仪实验结果与理论结果

Fig. 13 Theoretical simulation results and experimental results of spectrometer

收率实验结果如图 13 所示,通过数据拟合及光谱理论算法得到的 SO₂ 吸收率曲线,分别用蓝线和红线表示。利用式(9)DOAS 方法可以计算得到 SO₂ 在紫外图像中对应视场的浓度信息。

该实验装置可实现光谱仪与紫外成像实验结果的对比。图 14 所示为紫外成像实验结果与光谱仪实验结果在不同时刻的对比,紫外相机实验结果用红线表示,光谱仪实验结果用蓝线表示。该结果表明紫外成像实验结果与光谱仪实验结果趋势相一致。

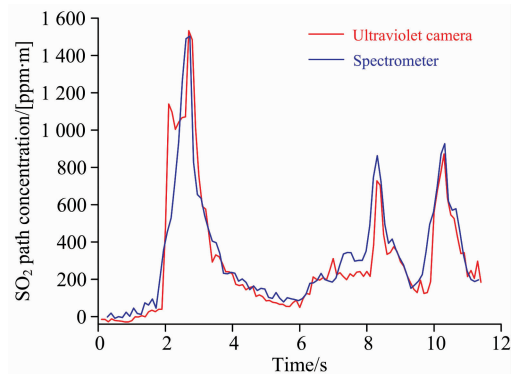


图 14 紫外成像实验结果与光谱仪实验结果对比

Fig. 14 Comparison of UV imaging and spectrometer experimental results

4 结 论

研究了 SO₂ 气体紫外成像遥感监测技术及其在模拟烟囱尾气检测中的应用,介绍了获取 SO₂ 浓度图像的测量原理,论证了滤光片放置镜头后能够减小 SO₂ 浓度反演的系统误差,分析了太阳高度角对 SO₂ 浓度反演的影响,阐明了实时定标 SO₂ 浓度反演曲线的必要性。

基于 SO₂ 在 310 nm 波段紫外吸收,通过理论分析设计了一种用于测量烟囱羽流中的二维 SO₂ 分布的新型监测技术,采用了双滤光片通道的紫外成像技术,分别获得信号图像和本底图像,并利用 2-IM 法拟合了人工天空背景,结果显示通过去除羽流拟合生成人工背景更加接近真实背景,均匀性更好,且 2-IM 法过程中相机始终处于静止状态,指向 SO₂ 发射源的方向,可以更好的研究 SO₂ 排放随时间的变化。该实验在利用紫外成像技术获取 SO₂ 浓度图像的同时,也采用了 DOAS 技术获得图像中对应光谱仪视场角的 SO₂ 浓度信息;两种不同机理的测量技术获得的浓度信息随时间演化规律表现出良好的一致性。但通过 DOAS 法计算的 SO₂ 浓度与紫外相机反演出来的浓度对比发现,由于光谱仪视场角很小,不具备成像能力,所测得的浓度信息只是所对应 SO₂ 紫外相机视场中的空间某一点位置的浓度信息,而紫外相机通过二维图像更加直观显示出烟囱尾气中 SO₂ 的浓度信息及其空间分布,这是 DOAS 技术所无法比拟的。

紫外相机的高空间分辨率和高时间分辨率,在测量 SO₂ 浓度图像方面展现出极大的优越性,在工厂烟囱及船舶尾气污染排放遥感监测中具有广泛的应用前景。

References

- [1] Kalabokas P D, Papayannis A D, Tsaknakis G, et al. *Science of the Total Environment*, 2012, (414): 556.
- [2] Alessandro La Spina, Mike Burton, Patrick Allard, et al. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, (413): 123.
- [3] Tan Wei, Liu Cheng, Wang Shanshan, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, (18): 15387.
- [4] Wu F C, Xie P H, Li A, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18: 1535.
- [5] Schönhardt A, Altube P, Gerilowski K, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, (8): 5113.
- [6] LIU Jin, SI Fu-qi, ZHOU Hai-jin, et al(刘 进, 司福祺, 周海金, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2015, 35(6).
- [7] Robin Campion, Hugo Delgado-Granados, Toshiya Mori. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, (300): 48.
- [8] Benedetto Schiavo, Wolfgang Stremme, Michel Grutter, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2019, (370): 82.
- [9] Burton M R, Prata F, Platt U. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, (300): 2.
- [10] Kern C, Kick F, Lübcke P, et al. *Atmospheric Measurement Technique*, 2010, (3): 733.
- [11] Christoph Kern, Cynthia Werner, Tamar Elias, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, (262): 80.
- [12] Christoph Kern, Peter Lübcke, Nicole Bobrowski, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, (300): 22.
- [13] Christoph Kern, Jeff Sutton, Tamar Elias, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, (300): 81.
- [14] Matias Osorio, Nicolás Casaballe, Gastón Belsterli, et al. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 517.
- [15] ZHANG Ying-hua, LI Ang, XIE Pin-hua, et al(张英华, 李 昂, 谢品华, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2018, 38(5): 1476.

Study on Ultraviolet Imaging Remote Sensing Monitoring Technology for SO₂ Gas Emission

XIONG Yuan-hui^{1,2}, LUO Zhong-jie¹, CHEN Zhen-wei², YU Guang-bao^{1,2}, DUAN Wei-min², LIU Lin-mei², LI Fa-quan², WU Kui-jun^{2*}

1. School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

Abstract SO₂ emissions from industrial smokestacks and ship exhausts is an important factor causing air pollution. SO₂ is easy to be oxidized into sulfuric acid fog or sulfate aerosol, which produces acid rain and seriously endangers the balance of atmospheric, ecological environment and harms human health. The existing SO₂ optical remote sensing measurement techniques, such as Raman scattering lidar, Differential absorption lidar (DIAL), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, Differential absorption spectrometer (DOAS), high-resolution spectral imaging techniques, etc., are all difficult to satisfy with the application requirements in consideration of a high temporal resolution, high spatial resolution and portable mobile, etc. In recent years, the ultraviolet SO₂ camera imaging detection technology gets rapid development for its high precision and strong practicability. With features of high temporal resolution and strong spatial resolution, this technology can directly get pollution gas concentration distribution in the two-dimensional space and the emission rates over time by analyzing image's spatial information and the correlation between SO₂ concentration, which makes it play an important role in monitoring environmental pollution. This paper carries out researches based on the ultraviolet SO₂ camera imaging detection technology, which focuses on the measurement principle and influencing factors, instrument design and experimental methods, inversion algorithm and result comparison. The main achievements are as follows: (1) combining the narrow-band filter's narrow-wave window, measuring ultraviolet absorption of SO₂ near 310 nm by using ultraviolet cameras, the ultraviolet imaging remote sensing theory model is established, and the measurement principle that the ultraviolet imaging remote sensing image detection technology acquires SO₂ concentration is introduced; (2) the influence of different incident angle for the filter center wavelength and transmittance curve is discussed by placing the filter in front and back of the lens, from which it was found that camera system sensitivity to SO₂ is less influenced by the incident angle when the filter is placed in the back of lens that; (3) the influence of solar zenith angle on SO₂ concentration image inversion is analyzed, and the necessity of real-time calibration of SO₂ concentration inversion curve is clarified; (4) the UV imaging remote sensing detection apparatus is designed based on the above theoretical analysis and the experiment research of UV imaging remote sensing monitoring SO₂ emissions are carried out. The images of the SO₂ concentration is obtained by using the 2-IM method to fit the artificial sky background by using the standard calibration of the SO₂ Optical depth; (5) DOAS technology is used to mo-

monitor the SO₂ emissions simultaneously. And the SO₂ concentration results obtained by DOAS technology and by the UV imaging remote sensing technology are compared, which shows that the trend of the concentration information calculated by the two methods are consistent. This proves the accuracy of the measurement results of the UV imaging remote sensing monitoring technology and shows the great application prospect of this technology in remote sensing monitoring of industrial smokestacks and ship exhausts pollution.

Keywords SO₂ camera; Ultraviolet spectroscopy; Differential optical absorption; Imaging remote sensing

(Received Apr. 9, 2019; accepted Aug. 2, 2019)

* Corresponding author

(上接 1275 页)

五、会议组织机构

大会组委会人员组成请见如下链接: http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=12

学术委员会人员组成见如下链接: http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/extend.php?mid=24&body_id=13

有关会议的邀请报告、住房信息、交通路线、稿件编号等信息敬请登录会议主页查询。

六、组委会和会务组联系方式

组委会:

吴兰: 13688385033 Email: wulan@scu.edu.cn

会务组:

注册&住宿: 张亮 15902844473 Email: zhang.liang@scu.edu.cn

报告&论文: 李成辉 18980877825 Email: atcpubs@scu.edu.cn

厂商联络: 王香凤 13520034335 Email: xiangfeng@bnu.edu.cn

七、支持媒体

会议官网: 光谱网(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>)

会议各类信息发布以光谱网信息为准。

主办单位:

中国光学学会

中国化学会

中国光学学会光谱专业委员会

承办单位:

四川大学分析测试中心

中国光学学会光谱专业委员会

四川大学分析测试中心

2019年11月18日