

电厂烟羽中 SO₂ 柱浓度的紫外非色散二维成像

张英华^{1,2,3}, 李 昂^{1*}, 谢品华¹, 黄业园¹, 胡肇焜¹, 张朝刚¹

1. 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, 安徽 合肥 230031
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026
3. 安徽新华学院, 安徽 合肥 230088

摘 要 鉴于近年来突发事故和雾霾等污染现象时有发生, 其危害范围广、危害程度深, 因此迫切需要掌握污染影响的区域、范围、强度以及污染扩散的趋势。而污染源、污染气体的二维快速成像分布在确定气体泄漏源定位、鉴别突发事件以及鉴定污染范围和污染影响的过程中占绝对优势。基于面阵 CCD 探测器, 利用紫外滤光片分光的成像技术实现了对丰台电厂烟羽排放的烟羽进行快速成像测量; 采用烟气在线监测技术获取的 SO₂ 实时浓度作为参考浓度, 经转换之后标定成像系统, 标定结果表明 SO₂ 斜柱浓度与光学厚度呈线性关系, 相关系数 0.958, 满足成像理论可被解析的先决条件; 考虑到成像系统视场角小, 使镜头在上风向偏离烟羽区域拍摄的图片作为背景, 任取背景图上的一行像素, 这些像素的光学强度表明上风向强度均匀, 无其他干扰影响; 测量过程中, 为了减小烟羽变化带来的误差, 鉴别目标气体的 310 nm 滤光片与祛除气溶胶影响的 330 nm 滤光片对烟羽交替成像; 最后根据线性最小二乘拟合获取了 2017 年 5 月 20 日 12 点 30 分左右的 SO₂ 斜柱浓度的二维分布及其时序图。测量结果显示在烟囱出口附近出现 SO₂ 斜柱浓度高值, SO₂ 斜柱浓度高值约为 $1.7 \times 10^{17} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$; SO₂ 斜柱浓度分布图直观显示 SO₂ 浓度的扩散趋势, 表明下风向 SO₂ 斜柱浓度沿着烟羽的扩散轴减小缓慢, 在大气浮力、烟羽流体动力学以及风向共同作用下, 垂直于烟羽扩散轴的方向上, 扩散轴上方的 SO₂ 斜柱浓度小于其下方浓度, 但基本趋势是垂直于扩散轴的两侧 SO₂ 斜柱浓度衰减很快; 在下风向距离烟囱中心 28 米的区域, 取 SO₂ 斜柱浓度与高斯曲线进行拟合, 拟合系数 0.747, 表明风向方向; SO₂ 斜柱浓度扩散遵循高斯扩散; 根据 SO₂ 斜柱浓度时序图, 获得了烟羽的传播速度约为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 为了验证紫外非色散成像系统测量结果的可靠性, 在已知烟羽 SO₂ 排放量 ($9.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$)、烟羽速度 ($1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、烟羽高度 (约 140 m) 及周边环境的情况下, 采用高斯烟羽扩散模型进行理论预测, 成像系统的测量结果与烟羽模型的模拟结果对比表明: SO₂ 斜柱浓度的测量值及扩散趋势与理论预测基本一致。利用基于滤光片的快速成像方法实现了对固定点源排放的污染气体 SO₂ 斜柱浓度的成像测量, 最终成功获取了烟羽中 SO₂ 斜柱浓度的分布及扩散的趋势, 测量结果与模型模拟的一致性表明该成像方法有望为定量、定性评估污染危害提供测量依据。

关键词 斜柱浓度; 高斯扩散; 二氧化硫; 滤光片

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0688-06

引 言

近年来, 经济的快速发展对化学品的需求与日俱增, 化学品的种类翻倍增大, 突发事故时有发生, 危害巨大。再者最近几年各大城市均不同程度的爆发了雾、霾等污染现象。

以前单独出现的大气污染, 现在慢慢发展成多种污染的有机融合, 逐渐形成了新的复合型污染现象。这些复合型污染源于多种污染源的一次污染物排放, 以及通过物理过程、化学变化等形成的二次污染物排放。由于污染源种类, 排放方式, 排放强度以及地理位置等直接决定了污染源的影响区域、范围和深度。因此对污染源的监测尤为重要, 而在污染

收稿日期: 2019-01-10, 修订日期: 2019-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0209902, 2016YFC0201507, 2016YFC0208203), 国家自然科学基金项目(41775029), 安徽省自然科学基金重点项目(KJ2018A0588)资助

作者简介: 张英华, 女, 1977 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: yhzhang@aiofm.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: angli@aiofm.ac.cn

源的监测中, 污染气体的二维成像优势^[1-6]明显。因为成像测量对评价、确定工厂泄露、鉴别突发事件以及鉴定污染范围和影响的过程是非常有用的。目前红外光谱区的成像技术^[7-9]已经实现了对污染源气体实时成像, 紫外区的被动扫描成像 DOAS^[10]技术也成功的对工厂烟羽及火山进行了二维浓度解析。

本文采用基于滤光片分光的非色散紫外-可见成像系统对丰台电厂进行了现场测量。用烟气在线监测技术测量的 SO₂ 浓度作为参考浓度标定成像系统; 成功解析烟羽中 SO₂ 斜柱浓度的二维分布以及斜柱浓度的时序图; 测量结果表明 SO₂ 斜柱浓度在稳定的气象条件下在下风向遵循高斯扩散。为了验证测量结果的可靠性, 与烟羽的数值模型结果进行了对比, 测量结果与理论模拟预测的扩散趋势一致, 测量 SO₂ 斜柱浓度的浓度量级在理论结果预测范围内。



图 1 测量地点

Fig. 1 Measuring location

1.3 测量原理

基于滤光片分光的非色散光谱成像遥感技术以太阳散射光为光源, 结合 SO₂ 气体分子对散射光的“指纹”吸收特征, 分别选取中心波长在 310 和 330 nm, 半高宽为 10 nm 的紫外带通滤光片, 依据朗伯-比尔吸收定律获取 SO₂ 柱浓度的成像分布。为了比较准确的获取 SO₂ 的柱浓度, 实验中, 使测量镜头稍微偏离烟羽所在的空间区域, 且在烟羽的上风方向采集的图片作为每个滤光片的背景, 原理见式(1)

$$\tau_{A, B} = \ln \frac{I_{A, B}}{I'_{A, B}} =$$

$$\ln \left[\frac{\int_{\lambda} I_{0, A, B}(\lambda) T_{A, B}(\lambda) Q_{A, B}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} I_{0, A, B}(\lambda) T_{A, B}(\lambda) Q_{A, B}(\lambda) \exp(-\sigma_{A, B}(\lambda) S_{A, B}(\lambda)) d\lambda} \right] \quad (1)$$

其中, 角标 A 和 B 分别表示滤光片 310 和 330, $I_{A, B}$ 和 $I'_{A, B}$ 分别为两个滤光片的背景光强及含有 SO₂ 气体的目标对象光强。探测器上的所有像素对应的光学厚度均满足式(1)。由于滤光片的透光波段比较小, 因此假定 SO₂ 等气体的吸收截面及其柱浓度与波长无关, 式(1)进一步简化为式(2)和式(3)

$$\tau_A = \sigma_A S_A + A_{A, aerosol} + \sigma_{A, other} S_{A, other} \quad (2)$$

1 实验部分

1.1 装置

紫外-可见非色散成像装置包括采光系统(焦距 100 mm, 光圈可调的石英镜头), 分光装置(中心波长分别为 310 nm、330 nm, 半高宽均为 10 nm 的两个带通滤光片), 接收装置(可制冷的面阵探测器), 控制系统(一台笔记本电脑), 三脚架及便携式外接电源。实验过程中, 选择最大透光孔径; 探测器工作温度为 -5 °C。

1.2 测量地点

电厂的北面、西面是田野村庄, 地形平坦开阔, 南面 2 km 左右是 308 省道, 东面紧邻 203 省道。仪器就放置在 203 省道旁边距离烟囱约 890 m 的一套简易房前, 两烟囱之间的距离约为 165 m, 具体位置见图 1。

$$\tau_B = \sigma_B S_B + A_{B, aerosol} + \sigma_{B, other} S_{B, other} \quad (3)$$

(1) 气溶胶随波长缓慢变化, 所以两个滤光片测量的气溶胶消光几乎相同; (2) 330 nm 滤光片的 SO₂ 的吸收远小于 310 nm, 所以 330 nm 波段 SO₂ 的吸收可以忽略; (3) 燃煤锅炉排放烟羽中其他的污染气体在 310 nm 波段的吸收远小于 SO₂ 的吸收, 且排放浓度低, 因此式(2)减去式(3)可祛除气溶胶和其他干扰气体影响。式(4)即为紫外非色散成像系统解析 SO₂ 柱浓度的理论基础, 其中吸收截面 σ_A 用权重吸收截面 k 表示。

$$\tau = \tau_A - \tau_B = \sigma_A S \approx \kappa S \quad (4)$$

1.4 测量的视场领域

由探测器尺寸: 11.84(mm) × 8.88(mm), 结合镜头焦距, 根据式(5)可以获得测量系统的视场角

$$\alpha = 2 \arctg(D_{H, V} / 2f) \quad (5)$$

水平方向的视场角为

$$\alpha_H = 2 \arctg(D_H / 2f) = 5.1^\circ \quad (6)$$

竖直方向的视场角为

$$\alpha_V = 2 \arctg(D_V / 2f) = 6.77^\circ \quad (7)$$

测量地点距离目标对象的距离约为 890 m, 根据式(8)可以进一步确定测量的空间范围, 其空间范围约为 81(m) × 105(m)。

$$X = dtg\theta \quad (9)$$

成像系统测量的烟羽及背景见图 2。图 2(c) 表示烟羽内部由

于烟羽中的气体及气溶胶而引起的光强衰减, 图 2(d) 表示均匀背景下像素的光学强度。

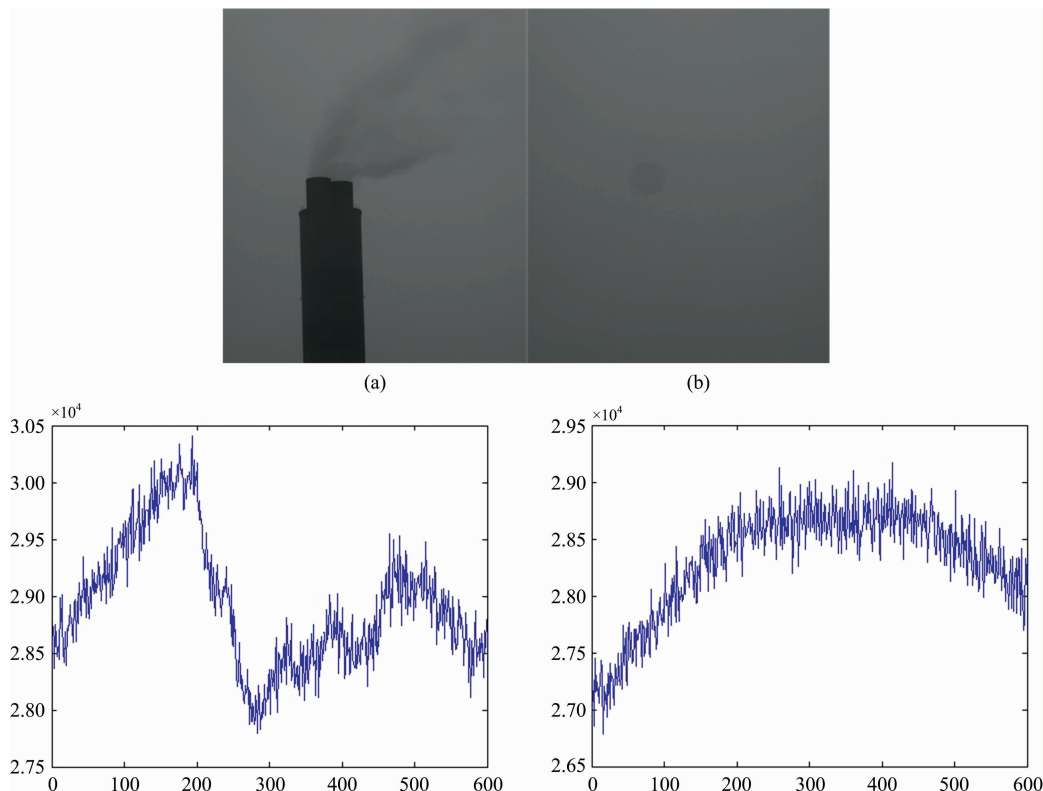


图 2 烟羽 (a, c) 及背景 (b, d)

Fig. 2 Smoke plume (a, c) and background (b, d)

1.5 烟羽 SO_2 柱浓度的模拟

我们先采用理论模型预测该电厂烟囱 SO_2 的排放。众所周知影响污染源烟羽的因素有: 风速、大气稳定性、烟羽的温度、烟羽出口的速度、周边环境等。除周边环境外, 高斯烟羽扩散模型已经综合考虑了上述因素。烟囱周边除南面 2 公里左右一条省道外, 南面的城市中心距测量目标较远, 而其他三面地势开阔, 地理环境相对简单, 可认为烟囱是一个理想的点源。高斯扩散模型指出, 空间给定点待测气体的浓度满足式(9)

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (9)$$

式(9)中 $c(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ 给定点浓度, $Q(\text{g} \cdot \text{s}^{-1})$ 源的排放率, $u(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 风速, $\sigma_y(\text{m})$ 水平方向上的扩散参数, $\sigma_z(\text{m})$ 垂直方向上的扩散参数, h 烟羽的高度, $x(\text{m})$ 下风向距离污染源的垂直距离。由于镜头相对于水平方向俯仰角较小(5° 左右), 所以测量方向上的 SO_2 的斜柱浓度近似表示为式(10)

$$scd = \int_{-\infty}^{+\infty} c(x, y, z) dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\} dy = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) dy = \frac{\sqrt{2} Q}{2 u \sigma_z} \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (10)$$

式(10)单位是 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 转化为 $\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 式(10)进一步表示为式(11)

$$scd_1 = \frac{scd N_A}{M_{\text{mol}} 10^4} \quad (11)$$

当天气候条件比较稳定, 选择乡村地形大气扩散参数。所以垂直方向扩散参数: $\sigma_z = 0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$, $h = 140 \text{ m}$, $u = 1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据烟气在线监测技术的测量结果, 选择 12 点左右的 SO_2 排放量 $9.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 用于数值模拟, SO_2 排放模拟结果见图 3。数值模拟结果显示距离源排放口浓度较高, SO_2 斜柱浓度约 $8 \times 10^{17} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$, 距源排放口 100 m 处, SO_2 斜柱浓度量级为 $10^{17} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右。

1.6 SO_2 斜柱浓度的测量

2017 年 5 月 20 日中午 12:30, 我们利用紫外-可见成像系统对双烟囱排放口进行了为期一小时的测量。当天, 天气条件良好。测量期间, 测量地点前面的 203 省道, 车流量少。为了定量解析烟羽中 SO_2 的柱浓度, 必须对成像系统进行标定。采用烟气在线监测系统测量的实时 SO_2 浓度, 经转换之后, 作为标定系统的参考浓度, 标定结果见图 4。

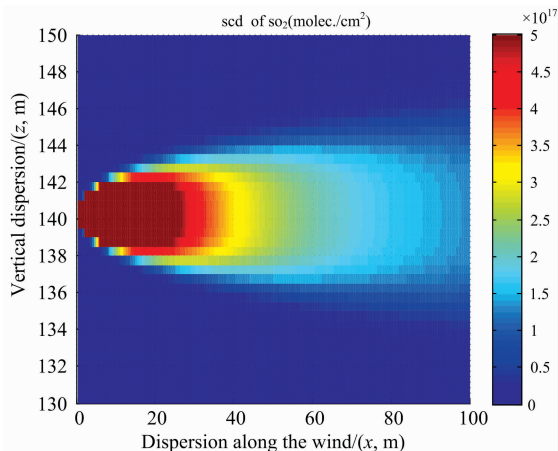


图 3 SO₂ 斜柱浓度模拟结果

Fig. 3 Simulation result of SO₂ slant column density

标定结果显示 SO₂ 柱浓度与其光学厚度线性相关, 相关系数高达 0.9582, 线性相关性好。其次选取测量背景, 由于成像系统视场角小, 因此使镜头偏离烟羽且在其上风向获取

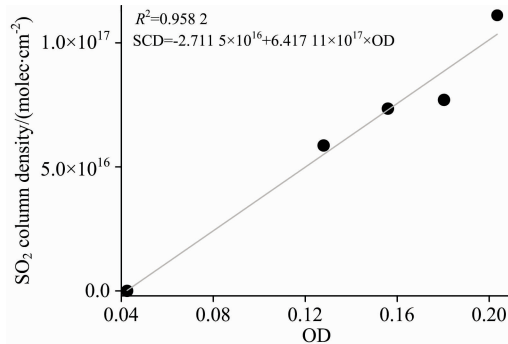


图 4 成像系统的标定

Fig. 4 Calibration of the imaging system

的图片作为背景, 见图 2(b)。背景均匀, 视场内无云及其他影响。测量过程中, 310 和 330 nm 两个滤光片对烟羽交替成像, 每个滤光片分别获取背景。为了提高信噪比, 两个滤光片根据测量环境各自设置曝光时间, 310 nm 滤光片的曝光时间 1 s。根据标定结果及成像理论基础, 依据线性最小二乘拟合获取烟羽的 SO₂ 斜柱浓度, 结果见图 5。

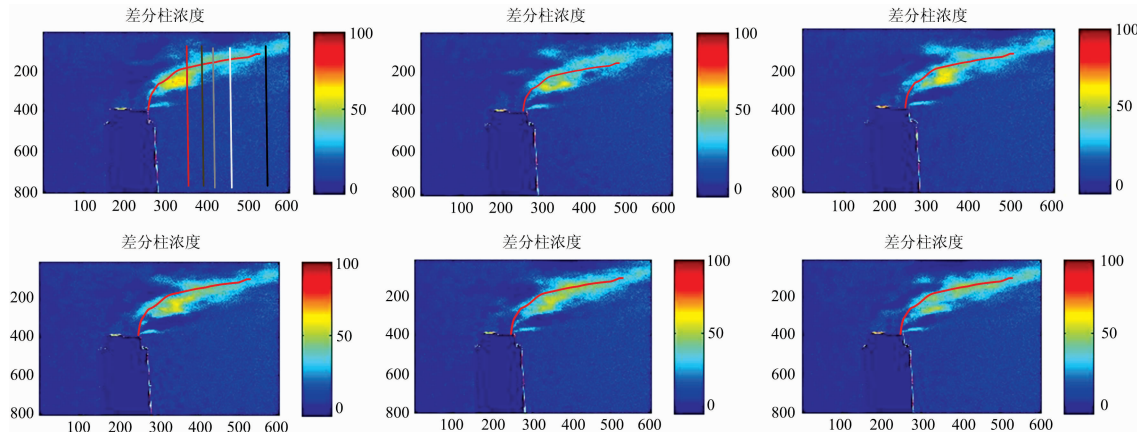


图 5 SO₂ 柱浓度分布

Fig. 5 Distribution of SO₂ column density

图 5 直观显示了 12:32 分 24 秒内 SO₂ 柱浓度的连续变化。结果表明两烟囱烟羽重叠区域、烟羽流轴线(图 5 中的红线所示)偏下方出现 SO₂ 浓度高值; SO₂ 柱浓度随时间发生变化, 且随着距烟囱出口距离的增加而减小。图 5 还表明两烟囱烟羽轴线方向柱浓度变化较慢, 羽流两翼柱浓度迅速衰减。图 5 上图出现相似的柱浓度分布团, 因此可根据两个柱浓度团的相对位置及两图片的时差估算烟羽流的速度; 因为成像系统 1 min 内采集、存储图片 15 张左右, 一张图总用时约 4 s, 两图片的时差为 8 s, 两柱浓度团之间的像素约为 70, 每个像素对应的空间距离为 0.135 m, 所以估算烟羽流速为 1.2 m · s⁻¹。从图 5 还可以看出风速以及沿着风向的扩散相对稳定, 但是从 SO₂ 斜柱浓度图较难直观判断烟羽来源于两个排放源。为确定具体的排放源, 需对斜柱浓度图进行详细分析。以图 5 左上柱浓度图为例, 分别取出烟囱出口附近、中段以及烟羽流尾段几列 SO₂ 浓度值(见图中 5 条竖线), 结果见图 6。图 6 最底的浓度序列是烟囱口附近 SO₂ 的斜柱浓

度, 虽然两烟囱出口附近 SO₂ 斜柱浓度值高, 但由于两个烟羽重叠, 无法区分不同排放源; 烟羽流中段还可以清晰区分 SO₂ 来源于两个不同的烟囱排放; 烟羽流尾段由于扩散原因浓度减小, 两个烟囱排放的烟羽完全融合, SO₂ 斜柱浓度小于系统的探测限因而无法识别。图 6 进一步表明 SO₂ 斜柱浓度沿轴线的两翼迅速减小, 取其中一列柱浓度(450 列, 距源 28 m)与高斯曲线进行拟合, 拟合结果见图 7。拟合系数 R² = 0.747, 说明烟羽中 SO₂ 斜柱浓度在水平风向方向扩散为高斯扩散。

2 结果与讨论

在已知源排放率、烟羽流速、源高及源周边环境的情况下, 模拟结果表明在源的下风向距源至少 100 m 处, 扩散轴线附近的 SO₂ 斜柱浓度理论值约为 1.3 × 10¹⁷ molec · cm⁻², 而距源 10 m 左右, 模拟结果显示轴线 SO₂ 斜柱浓度理论值

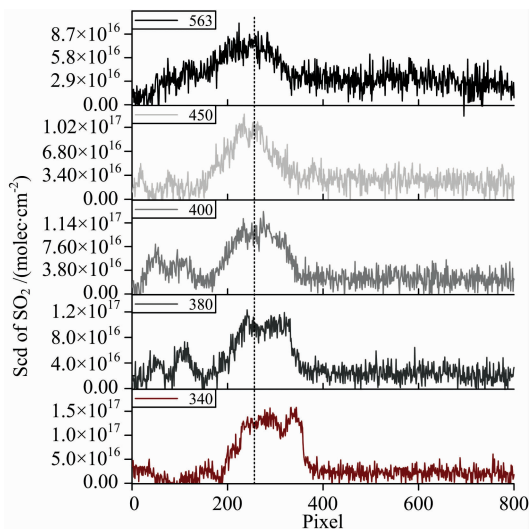
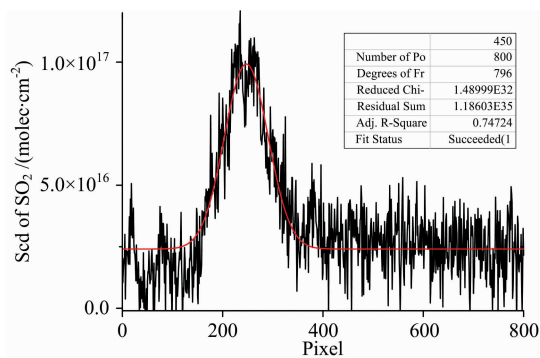
图 6 五列 SO₂ 柱浓度Fig. 6 Five SO₂ column density

图 7 柱浓度与高斯曲线的拟合

Fig. 7 Fitting of column density with Gaussian curve

高达 10^{18} molec · cm⁻² 左右。因此, 通过理论模拟, 可以估算污染源的排放强度以及污染范围, 给实际测量提供理论指

导。而紫外-可见成像系统作为一种源排放监测手段, 其检测下限为 4.2×10^{16} molec · cm⁻² [3]。从图 5 的 SO₂ 斜柱浓度分布可知, 紫外-可见成像方法测量的 SO₂ 斜柱浓度高值约为: 1.7×10^{17} molec · cm⁻², 在理论估算的 SO₂ 斜柱浓度范围之内。紫外-可见光谱成像方法不仅获得了烟羽中 SO₂ 斜柱浓度的直观图(图 5), 图中还明确显示出 SO₂ 斜柱浓度的分布、变化及其扩散趋势, 与理论模拟预测的趋势基本一致。

SO₂ 斜柱浓度测量结果分布图与理论模拟预测分布图存在差异。原因在于成像系统观测方向与水平 y 轴方向确实存在夹角, 而理论模拟时为了简化运算, 忽略了仪器仰角的影响。再者实际的烟羽排放源是两个, 从图 6 底部的两个图可以发现近源处两个排放源相互影响。理论模拟时我们主要考虑源排放的强度和影响, 没有考虑烟羽流体动力学以及空气浮力等因素对烟羽抬升的影响。

3 结论

基于滤光片的紫外非色散成像技术对电厂排放的烟羽进行了实地测量。测量结果表明: 源周边环境平坦, 气象条件稳定的情况下, 烟羽中 SO₂ 斜柱浓度在下风向遵循高斯扩散; SO₂ 斜柱浓度沿着烟羽流扩散轴缓慢减小, 由于风向及烟羽的抬升作用, 使得下风向偏向于羽流扩散轴的下方 SO₂ 斜柱浓度高于扩散轴的上方, 并出现 SO₂ 斜柱浓度高值, 约为 1.7×10^{17} molec · cm⁻², 但是总体来说在垂直于扩散轴的两翼 SO₂ 斜柱浓度迅速减小; SO₂ 斜柱浓度时间序列图直观再现了 SO₂ 斜柱浓度随时间在空间上的变化、分布以及扩散趋势, 可为定性评估源污染的力度和范围提供测量依据; 也可根据 SO₂ 斜柱浓度时间序列图中 SO₂ 斜柱浓度的变化分布, 估算烟羽流的速度, 为其他遥测装置提供参考数据。

测量结果与模拟结果关于 SO₂ 斜柱浓度扩散趋势的一致性表明基于滤光片分光的紫外非色散成像系统不仅可用于污染源监测, 也可以为数值模型提供修正依据。

References

- [1] Prata A J. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(5): 1213.
- [2] Klein A, Lubcke P, Bobrowski N, et al. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(3): 979.
- [3] 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.
- [4] 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): 063003.
- [5] Holger Sihler, Peter Lubcke, Rudiger Lang, et al, Atmos. Meas. Tech., 2017, 10: 881.
- [6] Kuhn J, Bobrowski N, Lubcke P, et al. Atmos. Meas. Tech., 2014, 7: 3705.
- [7] Lopez I, Thomas H, Prata A, et al. J. Volcanol. Geoth. Res., 2015, 300: 148.
- [8] Stremme W, Krueger A, Harig R, et al. Atmos. Meas. Tech., 2012, 5: 275.
- [9] General S, Bobrowski N, Pohler D, et al. J. Volcanol. Geoth. Res., 2015, 300: 175.
- [10] Wang Yang, Lampel J, Xie Pinhua, et al. Atmospheric Chemistry & Physics, 2017, 17(3): 2189.

Ultraviolet Two-Dimensional Non-Dispersive Imaging of SO₂ Column Density in Power Plant Plume

ZHANG Ying-hua^{1, 2, 3}, LI Ang^{1*}, XIE Pin-hua¹, HUANG Ye-yuan¹, HU Zhao-kun¹, ZHANG Chao-gang¹

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

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China

Abstract In view of the frequent occurrence of sudden accidents, haze and other pollution phenomena in recent years, the harm scope is wide and the harm degree is deep. Therefore, it is urgent to grasp the region, the scope and the intensity of the pollution, as well as the trend of the pollution diffusion. The two-dimensional fast imaging distribution of pollution sources has an absolute advantage in determining the location of gas leakage source, identifying emergencies and identifying the scope and impact of pollution. In this paper, the fast imaging measurement about the plume from the power plant in Fengtai is realized by ultraviolet filter based on a planar CCD detector. The concentration of SO₂ obtained by the flue gas on-line monitoring technology is used as the reference concentration. The imaging system is calibrated after the reference concentration is transformed. The calibration result shows that the SO₂ column density presents a linear relationship with the optical intensity, the correlation coefficient is 0.958, and the prerequisite that the imaging theory can be analyzed is satisfied. Considering that the angle of view of the imaging system is small, the background is taken as lens deviates from the plume area upwind. The background intensity indicates that the upwind intensity is uniform and there is no other influence. The 310 nm filter identifying the target gas and the 330 nm filter dispelling the influence of aerosol are used alternately to image for the smoke plume in order to reduce the error of the plume change during the measurement process. At last, the two-dimensional distribution and the sequence diagram of SO₂ slant column density are obtained according to the linear least squares fitting at about 12:30 on May 20, 2017. The results show that SO₂ slant column density is high near the chimney exit, and high SO₂ concentration of inclined column is approximately 1.7×10^{17} molec · cm⁻². The figure of slant column density distribution displays visually diffusion trend of SO₂ concentration, showing that SO₂ inclined column density decreases slowly along the axial diffusion of the plume under the direction of the wind, and under the direction of the perpendicular to the plume diffusion, the figure tells that inclined column of SO₂ above the axis is less than its concentration below because of the air buoyancy, fluid dynamics about plume and the direction of wind. However the basic trend of diffusion is that both sides of the SO₂ inclined column perpendicular to the axis decrease quickly. In the 28 meters away from the center of the chimney from downwind direction, the concentration of SO₂ inclined column and gauss curve are taken for fitting, and the fitting coefficient is 0.747, which indicates that the concentration diffusion of SO₂ inclined column in wind direction basically follows gauss diffusion. The plume velocity is about $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ according to the time series diagram about SO₂ column density. The gauss diffusion model is used to verify the feasibility of ultraviolet non-dispersive imaging system on the basis of the known plume SO₂ emissions ($9.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$), smoke plume speed ($1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), smoke plume height (140 m) and the surrounding environment. Comparing the results about the imaging system with the plume model, it is shown that SO₂ slant column density measured and the diffusion trend are consistent with theoretical predictions. This paper for the first time uses rapid imaging method based on filter to image SO₂ slant column density from fixed point pollution source, and finally the distribution and diffusion of SO₂ in plume are obtained successfully. The consistency between measurement results and model simulation indicates that this imaging method is expected to provide measurement basis for quantitative and qualitative assessment of pollution hazards.

Keywords Slant column density; Gauss diffusion; Sulfur dioxide; Filter

(Received Jan. 10, 2019; accepted Mar. 21, 2019)

* Corresponding author