

滤光片对非色散成像系统获取污染气体柱浓度的影响

张英华^{1,2,3**}, 李昂^{1*}, 谢品华¹, 杨雷¹, 徐晋¹, 张朝刚¹, 胡肇焜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安徽新华学院通识教育部, 安徽 合肥 230088

摘要 研究了滤光片对非色散可见成像系统获取污染气体柱浓度的影响。分析了滤光片的中心波长与入射角度之间的关系,发现滤光片的中心波长随入射角度的增大向短波方向移动,当入射角度为 40°时,滤光片的中心波长漂移 17.4 nm。探讨了不同滤光片对信噪比(SNR)、线性响应及灵敏性的影响。研究结果表明,可通过延长曝光时间或叠加图片增大 SNR;半峰全宽为 10 nm 的滤光片具有较好的灵敏性;0.9 以上的线性响应系数表明,半峰全宽为 40 nm 的滤光片仍满足非色散成像系统解析污染气体柱浓度的理论条件;半峰全宽为 10 nm 的滤光片的检测下限最优,约为 4.475×10^{16} molecule/cm²,获取污染气体柱浓度的滤光片最佳半峰全宽取值范围为 2~40 nm 之间。基于半峰全宽为 10 nm、中心波长为 450 nm 的滤光片对某钢铁厂烟囱的烟羽进行了测量,获得了烟羽中 NO₂ 柱浓度的二维空间分布图。

关键词 测量;带通滤光;信噪比;灵敏性;探测限

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0212001

Influence of Filter on Column density of Polluted Gas in Non-Dispersive Imaging System

Zhang Yinghua^{1,2,3**}, Li Ang^{1*}, Xie Pinhua¹, Yang Lei¹, Xu Jin¹,
Zhang Chaogang¹, Hu Zhaokun¹

¹Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Department of General Education, Anhui Xinhua University, Hefei, Anhui 230088, China

Abstract The effect of filter on the column density of polluted gas in the non-dispersive visible imaging system is studied. The relationship between central wavelength and incident angle is analyzed for the filter, and it is found that the central wavelength of the filter shifts toward the short-wave direction with the increase of the incident angle. When the incident angle reaches up to 40°, the center wavelength of the filter has a drift of 17.4 nm. The influences of different filters on the signal to noise ratio (SNR), linear response and sensitivity are also discussed. The research results show that the SNR can be increased by the increase of exposure time or by the image stack. The filter with a full width at half maximum (FWHM) of 10 nm possesses good sensitivity. At the same time, the linear response coefficient above 0.9 indicates that a filter with a FWHM of 40 nm can still satisfy the theoretical condition for resolving the column density of polluted gas in the non-dispersive imaging system. The detection limit for a filter with a FWHM of 10 nm is the best, which is about 4.475×10^{16} molecule/cm². The optimal FWHM is between 2 nm and 40 nm for obtaining the column density of polluted gas. Based on the filter with a FWHM of 10 nm and a central wavelength of 450 nm, the two-dimensional spatial distribution map of NO₂ column density is obtained by measuring remotely the smoke plume from the chimneys in one steel plant.

Key words measurement; band-pass filtering; signal to noise ratio; sensitivity; detection limit

OCIS codes 120.2440; 300.6170; 280.1120

收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2018-08-06; 录用日期: 2018-09-12

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

* E-mail: angli@aiofm.ac.cn; ** E-mail: yhzhang@aiofm.ac.cn

1 引 言

大气环境监测通过调查大气污染的原因、程度及结果,为大气环境的研究与治理提供了理论与技术支持。在污染源监测中,污染气体二维分布的光谱成像遥感测量对评价和确定厂区气体泄露及鉴别突发事件的发生具有重要意义。随着人类对大自然中事物认识能力的不断提升,对遥感探测技术的空间分辨率和光谱分辨率的探测精度的要求也越来越高。空间分辨率的大幅提高可以使探测到的图像在视觉效果上更加清晰,可以帮助研究者在显示器上对遥感数据进行直观可视化分析。光谱成像遥感技术按不同的分光方式可以分为色散型光谱成像遥感技术^[1-2]和非色散型光谱成像遥感技术^[3-6]。色散型光谱成像遥感技术通过棱镜或光栅分光,将图像成像在探测器上。色散型成像光谱仪具有结构稳定和易于实现的优点,是最早进入工程应用的成像遥感技术,目前这类成像遥感技术发展得比较成熟。非色散型光谱成像遥感技术是在成像系统中加入滤光片分光,这种光谱成像遥感技术具有结构紧凑、成本低、搭建快、体积小、便携及时间响应速度快等优点,逐渐成为近地面目标物体成像监测的一个有力手段,在国外该技术已被成功用于火山^[7-15]及工厂污染源^[16-18]的监测。

在滤光片型光谱成像遥测技术中,滤光片的性能对污染气体的获取起决定性作用。本文讨论了滤光片中心波长与入射在滤光片上的光线角度之间的关系;分析了半峰全宽(FWHM)为 2、10、40 nm 的三个可见滤光片对测量信噪比(SNR)、线性响应及灵敏性的影响;以 NO₂ 为例,探讨了滤光片的检测下限,得到了获取污染气体柱浓度时滤光片的最佳半峰全宽范围;根据朗伯-比尔定律,通过半峰全宽为 10 nm、中心波长为 450 nm 和 600 nm 的两个滤光片获取了某钢铁厂烟囱烟羽中 NO₂ 排放的柱浓度分布图。

2 实验原理及测量系统

2.1 实验原理

基于滤光片分光的非色散光谱成像遥感技术以太阳光散射光为光源,结合污染气体分子对散射光的“指纹”吸收特征,选取具有合适的反演波长范围及带宽的带通滤光片,依据朗伯-比尔吸收定律对污染气体进行二维成像监测。以 NO₂ 柱浓度为目标对象,选取 NO₂ 在 450 nm 波长附近的强吸收波段为主要吸收波段。将该波段处的带通滤光片记为滤光片 A,经过此滤光片采集的图片的强度记为 I'_A ,同时选择该滤光片下比较洁净的空气为背景,光强记为 I_A 。根据朗伯-比尔吸收定律,滤光片 A 获得的光学密度(OD)为

$$\tau_A = \ln\left(\frac{I_A}{I'_A}\right) = \ln\left\{\frac{\int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) \cdot \exp[-S(\lambda) \cdot C(\lambda)] \cdot d\lambda}\right\}, \quad (1)$$

式中: $I_S(\lambda)$ 为散射光强度; $T_A(\lambda)$ 为带通滤光片的透光强度; $Q(\lambda)$ 为探测器的量子效率; $S(\lambda)$ 为目标气体的吸收截面; $C(\lambda)$ 为柱浓度; λ 为波长。由(1)式可知,目标气体的柱浓度与光学密度 τ_A 之间存在非线性关系,但当滤光片的透光波长范围较小时,可近似认为目标气体的吸收截面 S 和柱浓度 C 与波长无关,(1)式可简化为

$$\tau_A = S \cdot C \approx \kappa \cdot C, \quad (2)$$

式中 κ 为目标气体在滤光片透光波长范围内的等效吸收截面,反映光学密度与柱浓度之间的响应灵敏

性。利用差分吸收光谱技术(DOAS)解析 NO₂ 的实时柱浓度,结合滤光片型光谱成像遥测技术获取等效吸收截面参数 κ 。

为了消除气溶胶等干扰的影响,选取 NO₂ 吸收弱的波段作为差分波段,将该波段的滤光片记为 B。经过此滤光片采集的图片强度记为 I'_B ,同时选择该滤光片下比较洁净的空气为背景,光强记为 I_B 。对滤光片 B 采用与滤光片 A 同样的处理方法进行处理,依据朗伯-比尔吸收定律可得滤光片 B 的光学密度为

$$\tau_B = -\ln\left(\frac{I'_B}{I_B}\right) = -\ln\left\{\frac{\int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T_B(\lambda) \cdot Q_B(\lambda) \cdot \exp[-S(\lambda) \cdot C(\lambda)] \cdot d\lambda}{\int_{\lambda} I_S(\lambda) \cdot T_B(\lambda) \cdot Q_B(\lambda) \cdot d\lambda}\right\}, \quad (3)$$

式中 $T_B(\lambda)$ 为带通滤光片 B 的透光强度, $Q_B(\lambda)$ 为探测器此时的量子效率。

滤光片 A、B 的透光波段比较接近, 且气溶胶吸收强度随波长的变化缓慢, 因此可认为气溶胶在这两个波段内的吸收近似相等。(1)式与(3)式相减以消除气溶胶的影响, 由此获得的光学密度为相对光学密度, 记为 τ 。用相对光学密度 τ 代替(2)式中的绝对光学密度 τ_A , 用于反演 NO_2 气体柱浓度的二维空间分布。

2.2 实验装置

实验中所用的滤光片型成像光谱遥测系统包括

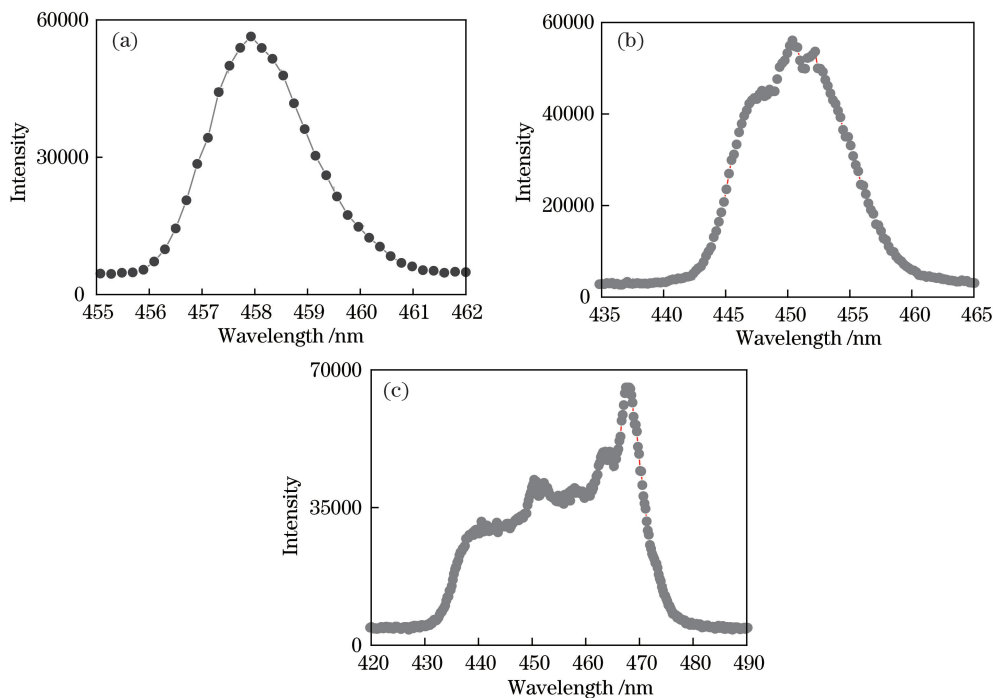


图1 不同带通滤光片的透光峰型和透光波长范围。(a) $\lambda_c = 458 \text{ nm}$, $\omega_{1/2} = 2 \text{ nm}$; (b) $\lambda_c = 450 \text{ nm}$, $\omega_{1/2} = 10 \text{ nm}$;
(c) $\lambda_c = 450 \text{ nm}$, $\omega_{1/2} = 40 \text{ nm}$

Fig. 1 Transmittance peak types and wavelength ranges of different band-pass filters. (a) $\lambda_c = 458 \text{ nm}$, $\omega_{1/2} = 2 \text{ nm}$;
(b) $\lambda_c = 450 \text{ nm}$, $\omega_{1/2} = 10 \text{ nm}$; (c) $\lambda_c = 450 \text{ nm}$, $\omega_{1/2} = 40 \text{ nm}$

3 实验内容

3.1 滤光片中心波长

基于滤光片分光的成像光谱遥感技术需要考虑滤光片的安装位置。安装位置一般有两种: 1) 紧贴探测器, 安装在成像透镜的后方; 2) 安装在物镜的前方。前者需要精准的定位装置, 使滤光片正确引入光路, 其优点是入射光线依次经过光阑、物镜和像镜后再会聚, 限制了入射在滤光片上的光线的角度。后者安装方便, 调整方便, 更便于与其他测量装置结合使用, 但是由于滤光片安装在望远镜的前面, 入射在滤光片上的光线入射角度范围较大。为了研究入射角度对滤光片的影响, 讨论了中心波长为 450 nm、

焦距为 100 mm、透光孔径为 23 mm 的望远镜镜头和可制冷的二维面阵电荷耦合器件 (CCD) 探测器, 探测器的工作温度设置为 -10°C ; 实验室内以氙灯为光源; 分光装置为带通滤光片。

为了分析滤光片对目标气体 (NO_2) 的影响, 研究了三个半峰全宽不同的可见波段滤光片。滤光片的中心波长 (λ_c) 及半峰全宽 ($\omega_{1/2}$) 组合分别为 (458 nm, 2 nm), (450 nm, 10 nm) 及 (450 nm, 40 nm), 滤光片的透光峰型与透光波长范围如图 1 所示。

半峰全宽为 10 nm 的带通滤光片的中心波长与入射角度之间的变化关系, 结果如图 2 所示, 中心波长变化范围如表 1 所示。

由图 2 可知, 随着入射角度的增大, 滤光片的中心波长向短波方向漂移 (蓝移)。由表 1 可知, 当入射角度变化了 40° 时, 其中心波长向短波方向漂移了 17.40 nm。利用滤光片光谱成像技术反演目标气体时, 需要参考目标气体的“指纹”吸收特征。滤光片的中心波长随入射角度的增大而发生蓝移, 其透光波长范围也发生相应的蓝移。较大的波长漂移范围, 会给目标气体的解析带来较大误差, 甚至得到错误的结果, 因此需要控制滤光片的入射角度。如图 2(b) 所示, 当入射角度在 10° 以内时, 中心波长偏

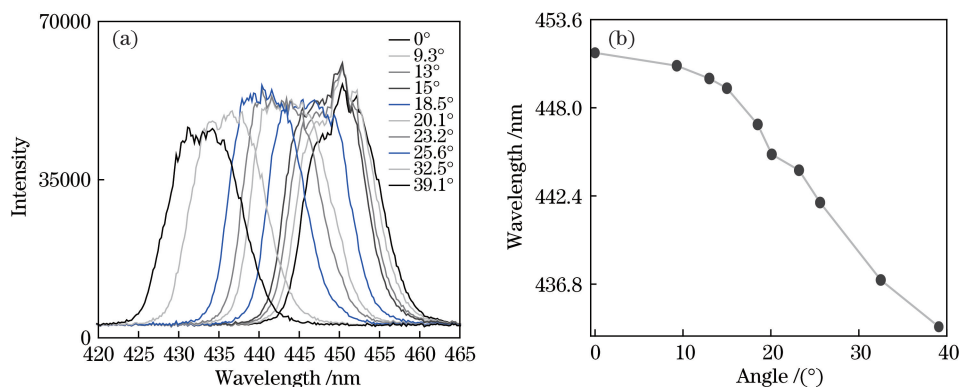


图 2 中心波长与入射角度的关系。(a)透光光谱;(b)中心波长与入射角度的关系曲线
Fig. 2 Relationship between central wavelength and incident angle. (a) Transmittance spectra;
(b) curve of central wavelength versus incident angle

表 1 滤光片中心波长及其变化范围

Table 1 Central wavelength of filter and its range of variation

| Filter | Central wavelength /nm | Changes in band /nm | Wavelength range /nm |
|---------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| 450 nm, 10 nm | 450 | 451.49-434.09 | 17.40 |

移缓慢,其中心波长的偏移量仅为 0.82 nm。对于半峰全宽为 10 nm、透光波长范围约为 20 nm 带通滤光片,其偏移的范围约为 4.1%。根据(2)式解析目标气体柱浓度时,对解析结果影响最大的是等效吸收截面,即吸收截面的权重值。因此只要控制滤光片的入射光角度 θ 在 10° 以内,就可有效抑制中心波长的漂移。

该成像系统采用的是焦距为 100 mm 的望远镜头及对角线尺寸为 14.8 mm 的二维面阵探测器。滤光片安装在镜头前面的旋转轮上,探测器位于镜头的后焦平面上。三者的相对位置如图 3 所示。

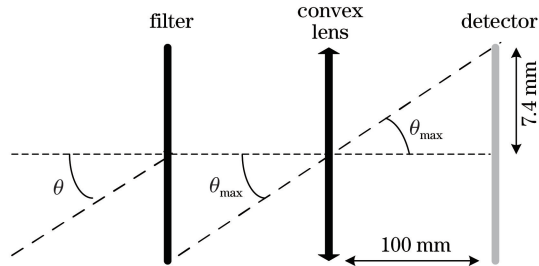


图 3 成像系统示意图

Fig. 3 Schematic of imaging system

由图 3 可知,所使用的成像系统的最大入射角度 θ_{max} 约为 $\pm 4.2^\circ$ 时,能较好地控制滤光片的中心波长向短波方向的漂移程度。

3.2 滤光片的半峰全宽对 SNR 的影响

利用光谱方法解析污染气体浓度时,光谱仪的分辨率对目标气体的柱浓度的获取非常重要。以滤

光片作为分光元器件解析目标气体的柱浓度时,滤光片的半峰全宽及中心波长是主要性能参数。 NO_2 在可见光波段的吸收较强,而可见波段存在水汽的吸收,但是水汽的吸收截面比 NO_2 的小约 6 个数量级,如图 4 所示。

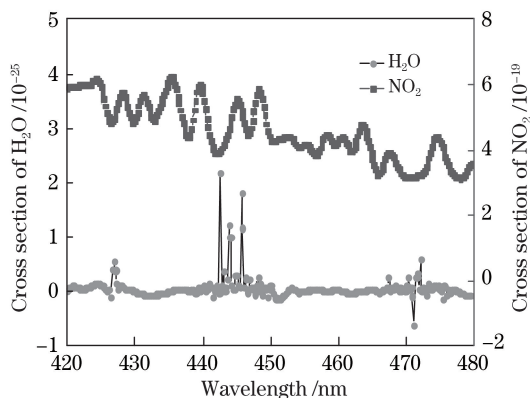


图 4 NO_2 与水的吸收截面

Fig. 4 Absorption cross section of NO_2 and H_2O

为了突显滤光片的半峰全宽对 SNR 的影响,在可见光谱波段选取滤光片的中心波长,为 450 nm 左右,滤光片的半峰全宽分别选取 2, 10, 40 nm。滤光片的 SNR 如图 5 所示。结果表明当单幅图片的像素强度达到饱和光强的 70% 以上时,半峰全宽为 2 nm 的滤光片的 SNR 最高,半峰全宽为 10 nm 与 40 nm 的两个滤光片的 SNR 相当。对于半峰全宽为 2, 10, 40 nm 的滤光片,单幅图片像素强度达到饱和光强 70% 以上的曝光时间分别为 2, 0.1, 0.03 s。

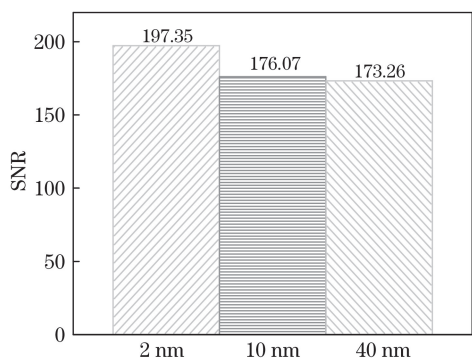


图 5 三种滤光片的 SNR
Fig. 5 SNRs of three filters

以某钢铁厂烟囱的烟羽图为例,如图 6 所示,测量当天风速较大,图 6(a)的曝光时间为 2 s,已经不能捕捉到烟羽的实际轮廓;图 6(b)的曝光时间为 0.5 s,更接近实际烟羽。因此过长的曝光时间会使烟羽的空间分布特性弱化,在恶劣的天气条件下,曝光时间越长,目标对象空间分布特性的弱化越明显。

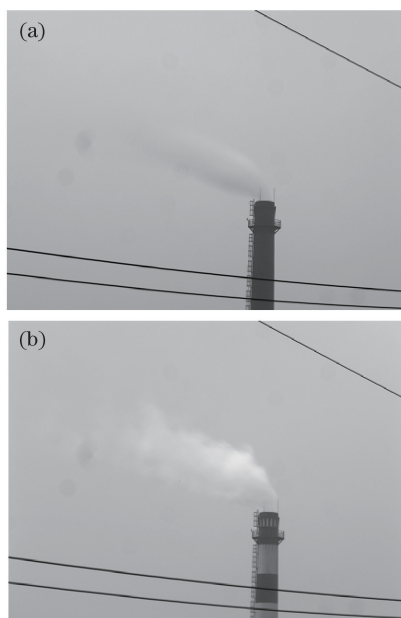


图 6 不同曝光时间的烟羽图。(a) 2 s; (b) 0.5 s
Fig. 6 Plume maps under different exposure time.
(a) 2 s; (b) 0.5 s

从曝光时间的分析可知,半峰全宽越大,透过滤光片的光能量越高,因此半峰全宽为 10 nm 及 40 nm 的滤光片较为合适。但是这两个滤光片的 SNR 相对较小,可以通过图片叠加来增大 SNR。对每个滤光片连续采集 10 幅图片,将奇数图片叠加,再用奇数图片的叠加结果除以偶数图的叠加结果计算 SNR。5 幅图片叠加后,半峰全宽为 10 nm 和 40 nm 的滤光片曝光总时间分别为 0.5 s 和 0.15 s。以半峰全宽为 10 nm 的滤光片为例,SNR 与曝光时

间、叠加图片数目之间的关系如图 7 所示。由图 7 可知:叠加图片的数目相同时,SNR 随着曝光时间的增大而增大;曝光时间相同时,叠加图片的数目越多,SNR 越大;曝光时间相同时,SNR 与叠加图片数目之间的关系是非线性的,意味着当图片的叠加数目达到一定值时,SNR 很难再增大。

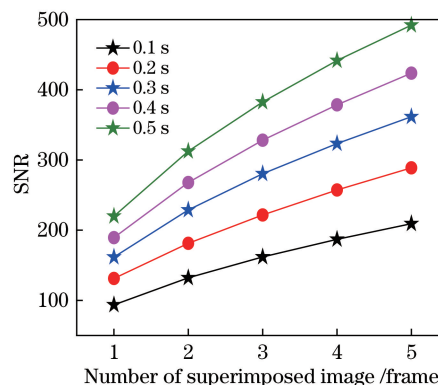


图 7 SNR 与曝光时间和叠加图片数目的关系曲线
Fig. 7 SNR versus exposure time and number of superimposed images

根据单幅图的 SNR、SNR 与曝光时间和图片叠加数目的关系曲线可知,半峰全宽为 10 nm 和 40 nm 的滤光片比较适合用于反演 NO₂ 柱浓度。

3.3 滤光片对目标气体浓度灵敏性的响应

为了分析滤光片对目标气体柱浓度的灵敏性响应,采用 DOAS 测量出样品池内 NO₂ 柱浓度的实时值,把中心波长与半峰全宽分别为(458 nm, 2 nm)、(450 nm, 10 nm)及(450 nm, 40 nm)的滤光片安装在滤光片旋转轮上,同时使用滤光片光谱成像技术对样品池内的 NO₂ 气体进行连续成像。结合两套仪器的测量结果,确定滤光片成像光谱技术与目标气体 NO₂ 柱浓度的线性关系及灵敏性响应,测量结果如图 8 所示,其中 SCD 表示斜柱浓度。

图 8 表明,三个滤光片对 NO₂ 柱浓度的线性响应较好,线性相关系数 R² 均在 0.9 以上,意味着即使当滤光片的透光范围高达 40 nm 时,(2)式使用的条件依然成立。根据线性方程,半峰全宽为 10 nm 的滤光片的斜率为 5.3998 × 10⁻⁴,半峰全宽为 2 nm 与 40 nm 的滤光片的斜率分别为 4.47214 × 10⁻⁴ 和 4.38462 × 10⁻⁴,表明半峰全宽为 10 nm 的滤光片对目标气体 NO₂ 柱浓度的变化响应较好。从光谱解析的角度分析可知,随着滤光片的半峰全宽的减小,其他物质的干扰减小,识别物质的能力提高,准确性提高。根据滤光片型成像光谱技术获取目标气体的原理,探测器上某一像元探测到的光学

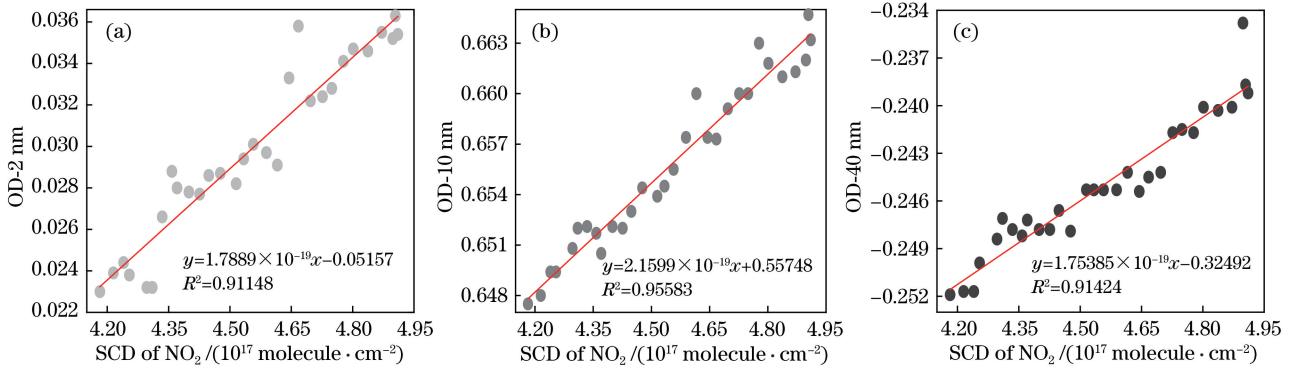


图 8 光学密度与 NO₂ 柱浓度的关系。(a) $\lambda_c=458\text{ nm}$, $\omega_{1/2}=2\text{ nm}$; (b) $\lambda_c=450\text{ nm}$, $\omega_{1/2}=10\text{ nm}$;
(c) $\lambda_c=450\text{ nm}$, $\omega_{1/2}=40\text{ nm}$

Fig. 8 Relationship between column density of NO₂ and optical density. (a) $\lambda_c=458\text{ nm}$, $\omega_{1/2}=2\text{ nm}$;
(b) $\lambda_c=450\text{ nm}$, $\omega_{1/2}=10\text{ nm}$; (c) $\lambda_c=450\text{ nm}$, $\omega_{1/2}=40\text{ nm}$

密度是曝光时间内滤光片透光波段内所有波长的光学密度的积分值。当滤光片的半峰全宽较小时,在叠加图片数目确定的条件下,为了增大 SNR,必须延长曝光时间。曝光时间的增长不仅增大了 SNR,也增大了干扰的影响,导致灵敏性减弱。对于半峰全宽为 40 nm 的带通滤光片,其半峰全宽较大,在较短的曝光时间内就可以获得良好的 SNR,但是识别目标对象的能力下降,同样灵敏性减弱。半峰全宽为 10 nm 的滤光片可兼顾灵敏性和分辨率。

3.4 滤光片对检测下限的影响

检测下限是衡量测量系统性能的重要参数之一,而滤光片是该非色散成像光谱技术的主要分光元器件。假定测量的光学密度比纯噪声大都可以获得目标气体的柱浓度,标准偏差 σ 反映了测量噪声,测量系统的检测下限一般表示为 2σ 。选择晴朗无云的天气条件,使测量系统对准同一片天空背景,通过两次相继快速曝光的图片获取相对光学密度的标准偏差 σ ,即

$$\sigma = \text{std}\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \left[\frac{I_1(P)}{I_2(P)} - \left\langle \frac{I_1}{I_2} \right\rangle \right]^2}, \quad (4)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为两次曝光获取的图片强度; $I_1(P)$ 和 $I_2(P)$ 为像素 P 处的光强; $\text{std}()$ 表示标准偏差函数; N 为总像素; $\langle I_1/I_2 \rangle$ 为相对强度的平均值。

依据(4)式计算上述三个不同滤光片的探测下限,结果如图 9 所示。由图 9 可知:半峰全宽为 10 nm 的滤光片检测下限最小,约为 $4.475 \times 10^{16}\text{ molecule/cm}^2$;半峰全宽为 2 nm 的滤光片检测下限最大,约为 $2.185 \times 10^{17}\text{ molecule/cm}^2$;半峰全宽为 40 nm 的滤光片的检测下限居中,约为 $5.775 \times 10^{16}\text{ molecule/cm}^2$ 。这说明在该成像监测技术中,

滤光片的半峰全宽并非越小越好,较大的半峰全宽会因干扰因素的增大使检测下限增大。故在解析目标气体柱浓度时,滤光片的半峰全宽选取的范围为 2~40 nm。

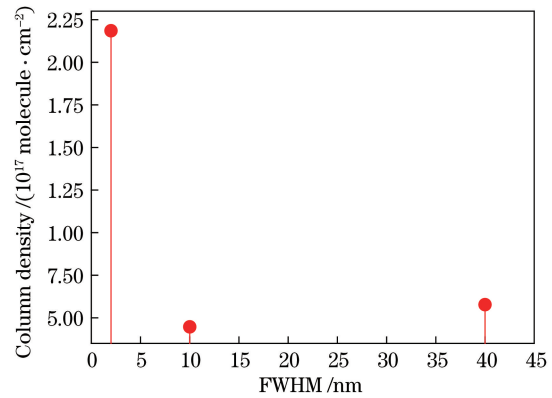


图 9 滤光片的检测下限

Fig. 9 Detection limits of filters

3.5 NO₂ 的外场测量

依据上述分析结果,于 2018 年 4 月 30 日在安徽省铜陵市铜官大道南段对某钢铁厂的烟囱进行了现场测量,测量地点与烟囱之间的距离约为 1.5 km。测量过程中选用了两个带通滤光片,其中心波长和半峰全宽分别为 (450 nm、10 nm) 和 (600 nm、10 nm)。多云天气,光线一般,两个滤光片通道的曝光时间均为 0.3 s,设置探测器温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 。成像系统采集的原图如图 10 所示。

从图 10 可直接观察到烟囱的水汽较多,为了成功解析烟囱中的 NO₂ 柱浓度,使用中心波长为 600 nm、半峰全宽为 10 nm 的滤光片消除水汽等的干扰。NO₂ 柱浓度结果如图 11 所示。

图 11(a)所示为中心波长为 450 nm 的滤光片的光学密度分布图,由该波长通道采集的原图与对

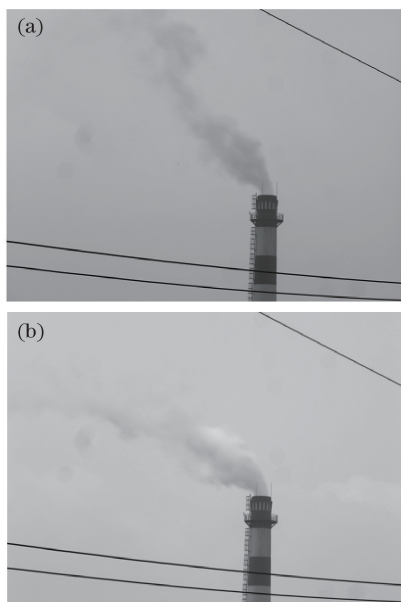


图 10 原图。(a) $\lambda_c=450$ nm; (b) $\lambda_c=600$ nm

Fig. 10 Master maps. (a) $\lambda_c=450$ nm; (b) $\lambda_c=600$ nm

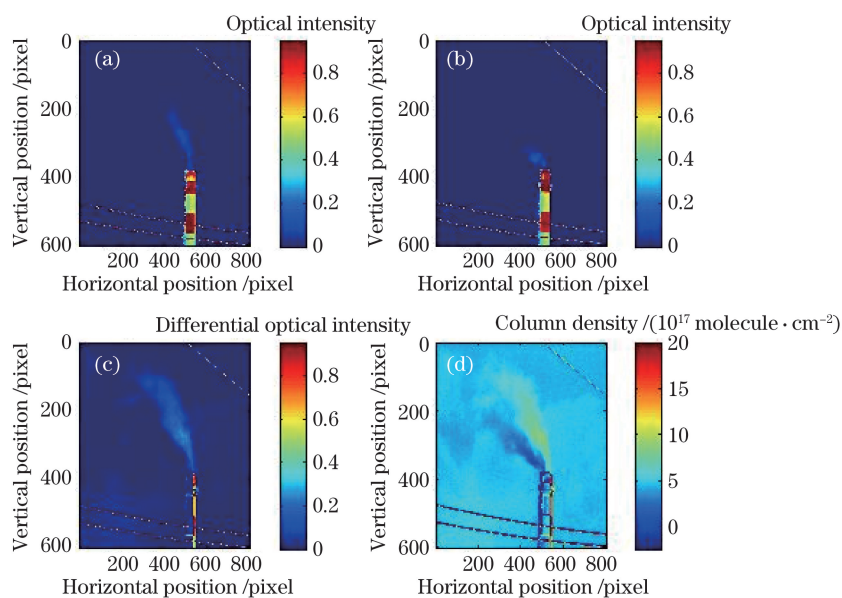


图 11 NO_2 的光学密度及柱浓度分布图。(a) 中心波长为 450 nm 的滤光片的光学密度; (b) 中心波长为 600 nm 的滤光片获得的光学密度; (c) NO_2 的差分光学密度; (d) NO_2 柱浓度二维分布图

Fig. 11 Distributions of optical density and column density of NO_2 . (a) Optical density of filter with central wavelength of 450 nm; (b) optical density of filter with central wavelength of 600 nm; (c) differential optical density of NO_2 ; (d) two-dimensional column density distribution of NO_2

移。探讨了滤光片的半峰全宽对测量 SNR 的影响, 可以通过延长积分时间或叠加图片的方法增大 SNR。分析了半峰全宽为 2, 10, 40 nm 滤光片的线性响应及灵敏性, 发现半峰全宽为 10 nm 的滤光片的线性相关性及灵敏性较好。半峰全宽为 40 nm 的滤光片仍具有较好的线性相关性, 依然适合于非色散成像光谱技术。通过比较滤光片的检测下限,

应背景图片依据郎伯-比尔定律获得; 图 11(b) 所示为由中心波长为 600 nm 的滤光片获得的光学密度分布图。受水汽等干扰因素的影响, 用 450 nm 通道获取的光学密度扣除 600 nm 通道对应的光学密度, 得到 NO_2 的差分光学密度, 如图 11(c) 所示。根据线性最小二乘拟合直观再现了烟囱中 NO_2 柱浓度二维分布图, 如图 11(d) 所示。测量当天风向为西南风向, 故在烟囱西南下风方向距离烟囱口附近的 NO_2 含量较高, 约为 9×10^{16} molecule/cm²。远离烟囱口处测得的浓度迅速减小, 即 NO_2 快速扩散至大气背景中。

4 结 论

研究了滤光片的中心波长和半峰全宽对非色散可见光谱成像技术的影响。分析了滤光片的中心波长随入射角度的变化关系, 通过前置装置控制入射在滤光片上的光线角度, 有效抑制了中心波长的漂

确定在解析污染气体柱浓度时, 滤光片的最佳半峰全宽范围为 2~40 nm。通过半峰全宽为 10 nm、中心波长分别为 450 nm 及 600 nm 的一对滤光片对某钢铁厂的烟囱进行了现场测量, 结果表明烟囱出口附近 NO_2 柱浓度约为 9×10^{16} molecule/cm²。

后续将基于滤光片分光的紫外可见光谱成像技术与其他测量装置结合对比使用, 该装置无需额外

的扫描装置,测量结果可实现直观可视化,这为污染源排放监测提供了一种新的测量方法。

参 考 文 献

- [1] Si F Q, Xie P H, Liu Y, *et al.* Determination of plume by hyperspectral imaging differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(9): 2458-2462.
司福祺, 谢品华, 刘宇, 等. 超光谱成像差分吸收光谱系统烟羽测量研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2458-2462.
- [2] Liu J, Si F Q, Zhou H J, *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 SO₂ 排放方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0630003.
- [3] Stevenson J A, Varley N. Fumarole monitoring with a handheld infrared camera: Volcán de Colima, Mexico, 2006-2007 [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 177(4): 911-924.
- [4] Wilkes T, Pering T, McGonigle A, *et al.* A low-cost smartphone sensor-based UV camera for volcanic SO₂ emission measurements [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(1): 27.
- [5] Dekemper E, Vanhamel J, van Opstal B, *et al.* The AOTF-based NO₂ camera[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(12): 6025-6034.
- [6] Zhang Y H, Li A, Xie P H, *et al.* An UV imaging methods applicable 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.
- [7] Corradini S, Tirelli C, Gangale G, *et al.* Theoretical study on volcanic plume SO₂ and ash retrievals using ground TIR camera: Sensitivity analysis and retrieval procedure developments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1619-1628.
- [8] Osorio M, Casaballe N, Belsterli G, *et al.* Plume segmentation from UV camera images for SO₂ emission rate quantification on cloud days[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 517.
- [9] Mori T, Burton M. The SO₂ camera: A simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO₂ in volcanic plumes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24): L24804.
- [10] Mori T, Burton M. Quantification of the gas mass emitted during single explosions on Stromboli with the SO₂ imaging camera[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, 188(4): 395-400.
- [11] Kern C, Kick F, Lübcke P, *et al.* Theoretical description of functionality, applications, and limitations of SO₂ cameras for the remote sensing of volcanic plumes[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(3): 733-749.
- [12] Nadeau P A, Palma J L, Waite G P. Linking volcanic tremor, degassing, and eruption dynamics via SO₂ imaging[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(1): 121-133.
- [13] Tamburello G, Kantzas E P, McGonigle A J S, *et al.* UV camera measurements of fumarole field degassing (La Fossa crater, Vulcano Island)[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2011, 199(1/2): 47-52.
- [14] Klein A, Lübcke P, Bobrowski N, *et al.* Plume propagation direction determination with SO₂ cameras[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(3): 979-987.
- [15] Gliß J, Stebel K, Kylling A, *et al.* Improved optical flow velocity analysis in SO₂ camera images of volcanic plumes-implications for emission-rate retrievals investigated at Mt Etna, Italy and Guallatiri, Chile[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(2): 781-801.
- [16] Dalton M P, Watson I M, Nadeau P A, *et al.* Assessment of the UV camera sulfur dioxide retrieval for point source plumes[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, 188(4): 358-366.
- [17] Nisulescu G C, Ionel I, Malan B, *et al.* Remote SO₂ monitoring with UV cameras for stack emissions[J]. *Revista de Chimie*, 2012, 63(9): 940-944.
- [18] Prata A J. Measuring SO₂ ship emissions with an ultraviolet imaging camera[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(5): 1213-1229.