

# 基于月光散射的面阵 FTIR 硫化物排放测量研究

闫 淳<sup>1,2</sup>, 陈 豪<sup>1,2</sup>, 曾丹丹<sup>1,2</sup>, 李帅辉<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:**常见的被动型或采用日光光源的逐点扫描型傅里叶变换红外光谱(FTIR)测量易受杂散光干扰,无法得到较高时空精度气体浓度分布,因此面阵型 FTIR 技术在污染气体遥测中越来越得到重视。本文利用波长范围 7.4~12.5  $\mu\text{m}$  小型面阵 FTIR 设备,在夜间借助月光散射对我国北方某化工园区进行污染物排放实验测量,测量区域包括烟囱排放区和化工设备排放区,经原始干涉数据处理和反傅里叶变换得到了全波段辐亮度灰度图,观测到烟囱口附近白色排放气体团,辐亮度较背景高;化工设备排放区三块黑色云,辐亮度较背景低,存在吸收效应。实验测量中,以月亮为原位标准光源进行了原位光谱辐亮度标定,其中光源不确定度为 7%,数值处理方法精度 6%,FTIR 测量均方误差最高约为 9%。根据本文建立的基于红外高光谱的污染物空间浓度分布计算模型,与 HITRAN 数据库给出的计算谱线对比,确定污染物主要为硫化物( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ),特征峰分别为 1060  $\text{cm}^{-1}$ 、1310  $\text{cm}^{-1}$  与 1020  $\text{cm}^{-1}$ 、1210  $\text{cm}^{-1}$ ,结合标定数据给出了气体云辐亮度的时空分布,其成像周期 1.5 s,排放气体云团空间分辨率约为 0.4 m  $\times$  0.4 m。根据反演得到的污染物排放浓度时空云图可知,两个烟囱受东南风影响与水平方向分别呈 60°、30° 向西北飘散,气体浓度均在距排放口约 30 m 处飘散到本文设定的最低检测限 19 ppm  $\cdot$  m 以下。本文发展的基于月光散射面阵型 FTIR 测量方法,实现了高时空分辨率、高精度的污染气体测量,对化工污染气体、温室气体排放定量测量具有重要意义。

**关键词:**硫化物;面阵型 FTIR;浓度时空分布;月光散射

中图分类号:TN219;X831 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.010

## Array FTIR sulfide emission measurement study based on moonlight scattering

YAN Bo<sup>1,2</sup>, CHEN Hao<sup>1,2</sup>, ZENG Dan-dan<sup>1,2</sup>, LI Shuai-hui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The common passive or point-by-point scanning Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) measurements with daylight sources are susceptible to stray light interference and are unable to obtain high spatial and temporal accuracy of gas concentration distribution. Therefore, array FTIR techniques are gaining importance in the remote measurement of pollutant gases. In this paper, a compact array FTIR device in the wavelength range of 7.4~12.5  $\mu\text{m}$  is used to conduct an experiment on pollutant emissions from a chemical park in the northern of China at night with

基金项目:国家任务项目(No. E0F80246);中国科学院先导 B 类项目(No. Y820121XD1)资助。

作者简介:闫 淳(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为高光谱气体遥感技术。E-mail:YANBO@imech.ac.cn

通讯作者:李帅辉(1978-),男,博士,研究员,主要研究方向为飞行器技术。E-mail:LEE@imech.ac.cn

收稿日期:2022-11-18;修订日期:2023-01-09

the aid of moonlight scattering, and the measurement area including the chimney emission area and the chemical equipment emission area. After the raw interferometric data process and inverse Fourier transform, a full-band irradiance grayscale map is obtained and a white emission gas cloud near the exit of chimney is observed with a higher irradiance than the background. Three black clouds in the emission area of the chemical equipment, the irradiance is lower than the background and there is an absorption effect. For the experimental measurements, the situ calibration is carried out using direct light from the moon as the standard light source. The maximum mean square error of the FTIR measurements is about 9%, with an uncertainty of 7% for the light source, an accuracy of 6% for the numerical processing method. According to the calculation model of the spatial concentration distribution of pollutants based on infrared hyperspectrum established in this paper, and compared with the ideal spectral lines in the HITRAN database, it is determined that the pollutants are mainly sulphides ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) with characteristic peaks of  $1060\text{ cm}^{-1}$ ,  $1310\text{ cm}^{-1}$  and  $1020\text{ cm}^{-1}$ ,  $1210\text{ cm}^{-1}$ , respectively. The spatial and temporal distribution of the irradiance of the gas clouds is given in combination with the calibration data, with an imaging period of 1.5 s and a spatial resolution of about  $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ . According to the spatial and temporal clouds of pollutant emission concentrations obtained from the calculated inversion, it can be seen that the two chimneys are affected by the south-easterly wind and the horizontal direction of  $60^\circ$  and  $30^\circ$ , to the northwest, respectively, and the gas concentrations drifted below the minimum detection limit of  $19\text{ ppm} \cdot \text{m}$  set in this paper at about 30 m from the emission outlet. The array FTIR measurement method developed in this paper, which is based on a moonlight scattering, achieves high spatial-temporal resolution and high accuracy for the measurement of pollutant gases, which is of great significance for the quantitative measurement of chemical pollutant gases and greenhouse gas emissions.

**Keywords:** sulphide; array FTIR; spatial and temporal distribution of concentration; moonlight scattering

## 1 引言

近年来,随着经济的发展与工业的扩张,化工污染、温室气体的排放日益增多,为此,我国提出了降低碳排放的“双碳战略”。此外,危险气体的泄露事故时有发生,如2022年6月18日,上海金山石化发生乙炔爆炸事故造成1死1伤。气体检测逐渐成为石化、环保等领域所关注的重点。

传统的化学气体检测手段适用气体范围单一,成本较高,精度较低,测量范围较小,难以做到实时大范围的气体检测。遥感气体检测手段可远距离实时测量气体种类与浓度,成为了新的发展方向<sup>[1]</sup>。目前常用的遥感检测手段主要有可调谐半导体激光吸收技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)、差分吸收光谱技术(Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS)<sup>[1]</sup>,以及傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)<sup>[2]</sup>技术等。其中,FTIR技术具有探测空间范围广,可探测气体种类多,测量精度高等优点,可应用于污染与温室气体探测领域。

早期的FTIR设备体积较大,一般应用于机载、星载的地面遥感中<sup>[2]</sup>。随着技术的发展,小型化FTIR设备开始在气体检测领域发挥作用,目前常用的FTIR为不需外加红外光源的被动型设备<sup>[2-3]</sup>,具有机动、快速、灵活的优点,其基于新型材料的面阵

型基底相比传统设备更具有优势<sup>[4]</sup>。2003年,Harig<sup>[3]</sup>等首先使用逐点扫描式FTIR光谱仪对甲烷气体进行了探测,得到了空间内某一路径上甲烷气体的柱浓度。焦洋等<sup>[5]</sup>也进行了类似实验,结合新型光谱提取算法,得到了 $\text{SF}_6$ 气体在一定区域内柱浓度分布,但取样点只有36个,且每个取样点扫描时间长达2秒以上,单幅图像总采集时间超过两分钟,一般而言气体云已逸散开来,获得大范围、高时空分辨率、高精度气体柱浓度分布较为困难。2007年,Chamberland<sup>[6]</sup>等拓展了温室和污染气体种类,使用面阵型FTIR得到了 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$ 与 $\text{SO}_2$ 等多种气体云柱浓度分布,实验于野外日间进行,采样太阳光光源、杂散光干扰小。对于常见使用场景如化工园区等,难以外加主动光源,日间光环境较野外更为复杂,会影响其测量效果,虽然可以通过掩日观测提高信噪比<sup>[7]</sup>,但需要随太阳改变观测位置,对于实际问题机位寻找困难且难以进行持续观测。同时,对于部分吸收与辐射峰不太明显的气体,如常见于火电站与汽车尾气排放的 $\text{H}_2\text{S}$ ,现有开放光路式FTIR设备受检测灵敏度限制,一般对 $200\text{ ppm} \cdot \text{m}$ 以上浓度才能做到有效检测<sup>[7]</sup>,对化工园区污染排放定量测量较为困难。

综上所述,目前现有常规手段探测范围较小、空间分辨率较低、受杂散光影响严重,且灵敏度较低,

亟需采用新型探测手段提高温室气体、污染气体泄露监测、定量测量。本文结合面阵型 FTIR 设备的优点,提出了基于月光散射的气体测量原理,在夜间对我国北方某城市化工园区排放进行了观测。建立了基于红外高光谱数据的污染物空间柱浓度分布计算模型,定性确定了排放气体的种类,得到了硫化物柱浓度时空分布。

## 2 基于月光散射的 FTIR 气体测量原理

如图 1 所示的大气探测模型,路径上大气可视处于局地热力学平衡状态下的多层均匀介质,每一层大气在产生辐射的同时,也在吸收上一层大气的发射辐射。对于被动式红外测量,依赖自然光源,如太阳或月亮及其散射光<sup>[9]</sup>。为避免日间地表化工设备反射等杂散光影响,本文采用月光散射光源,FTIR 设备在探测路径上接收经过大气和污染气体云团散射的月光。由于污染气体云团距离 FTIR 设备较近,其间大气光学薄,长波红外波段透过率近似为 1,根据气体探测三层传输模型<sup>[3]</sup>,进入探测系统的总光谱辐亮度为:

$$L_1 = (1 - \tau_2)L_2 + \tau_2(L_{\text{air}} + L_{\text{moon}}) \quad (1)$$

其中,  $L_1$  为设备接收到的光谱辐亮度;  $\tau_2$  为第二层即污染气体云团的光谱透过率;  $L_2$  为与污染气体云团同温度下黑体光谱辐亮度;  $L_{\text{moon}}$  为月光散射光谱辐亮度;  $L_{\text{air}}$  为第三层大气光谱辐亮度,二者之和为背景光谱辐亮度,记作  $L_b$ 。

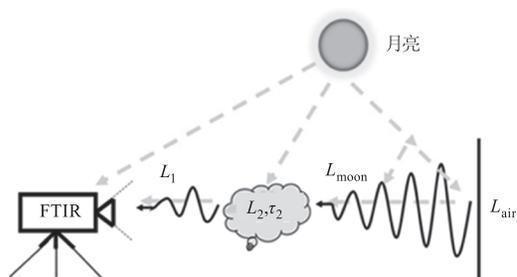


图 1 基于月亮散射的三层气体探测模型

Fig. 1 The three-layer gas detection model based on moon scattering

在实际测量中,FTIR 原始干涉图像需经过趋势项去除、切趾与相位校正等数据预处理<sup>[10]</sup>,通过反傅里叶变换并结合实验室标定和原位标定,可得到光谱辐亮度  $L_1$ 。在 FTIR 设备低仰角向上观测时,大气背景  $L_b$  可通过测量设备直接得到。当第三层大气中探测路径足够长时,此时二氧化碳在长波红外波段内具有沉积效应,满足光学厚条件,可通过标准光谱数据库拟合反演得到气体光

谱亮温和浓度,进而确定  $L_2$ <sup>[11]</sup>。将上述诸量代入式(1),即可得到夜间依赖月光散射的污染气体光谱透过率  $\tau_2$ <sup>[12]</sup>,进而得到气体光谱吸收率  $\alpha_2$ ,表达式如下:

$$\tau_2 = (L_1 - L_2)/(L_b - L_2) \quad (2)$$

$$\alpha_2 = 1 - \tau_2 \quad (3)$$

获得气体吸收率后,通过峰的位置确定气体种类,一般采用朗博-比尔定律可得到气体浓度<sup>[13-14]</sup>。在实际应用中,由于已有常用、准确的光谱吸收率数据库,如 HITRAN 数据库<sup>[15]</sup>,假定温度、气体压力和柱浓度可得计算光谱,将每一像元、每一波数的实测光谱吸收率与基于标准数据库计算出的目标气体光谱进行对比,寻找与实测光谱整体匹配度最佳的标准数据库谱线,其判别标准为拟合均方差阈值满足要求,即对不同波数之间的残差求均方值:

$$R = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N (\alpha_{2,n} - \alpha_{\text{cal},n})^2} \quad (4)$$

这里  $N$  为波数个数;  $\alpha_{\text{cal},n}$  为计算得到的第  $n$  个波数气体吸收率。当满足迭代终止条件时,此时标准数据库谱线所代表的气体浓度即视为被测气体柱浓度,这里记作  $\rho_c$ 。

在自然环境下,排放污染气体温度略高,拟合反演时温度范围设为 290 ~ 310 K,标准大气压 1 atm,柱浓度最大值一般取 1000 ppm · m,可得计算气体谱线。将不同像元实测谱线与计算气体谱线逐一比较,可以确定每个像元对应区域内的气体柱浓度<sup>[16]</sup>。

## 3 硫化物排放实验测量

### 3.1 化工园区排放外场实验测量

2022 年 9 月夜间对我国北方某化工园区气体排放进行了实验测量。实验现场气温约为 19 °C,相对湿度 52 %,东南风 5 km/h。月相为上弦月,月光照射较为充足,能见度较高。实验现场可见光图像如图 2 所示,观测点在相对高位处,海拔约 65 m。观测点与观测区域的相对位置如图 3 所示,化工园区主标志烟囱在观测点南偏南西约 19 °,海拔约 30 m,水平距观测点约 1300 m。实验中以不同仰角进行多组观测,高仰角记为烟囱排放区,低仰角记作化工设备排放区。较高的烟囱记为  $F_1$ ,高约 140 m,较低的记为  $F_2$ ,高约 110 m。



图2 实验测量区域可见光图像

Fig.2 Visible image of the experimental measurement area

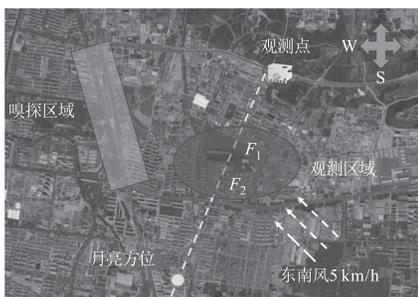


图3 实验测量区域相对位置示意图

Fig.3 Diagram of the relative position of experimental measurement area

实验中采用加拿大 Telops 公司生产的成像型 FTIR 设备(图 4),其为小型集成化产品,包括光学头、控制盒,重量分别约 8 kg 和 4 kg。实验中通过便携式电源供电,PC 机进行控制、原始数据采集和实时处理。该 FTIR 为长波红外面阵式探测器,像元数  $320 \times 256$ ,像元尺寸  $30 \mu\text{m}$ ,探测波段  $7.4 \sim 12.5 \mu\text{m}$ ;波数  $825 \sim 1355 \text{ cm}^{-1}$ ,光谱分辨率  $3 \sim 32 \text{ cm}^{-1}$ ,实验中设置为  $5 \text{ cm}^{-1}$ 。FTIR 光学系统焦距为  $50 \text{ mm}$ ,视场角  $17.9^\circ \times 14.6^\circ$ ,瞬时视场角约为  $1 \text{ mrad}$ 。光谱成像帧频约为  $0.7 \text{ Hz}$ ,数据立方体获取周期约为  $1.5 \text{ s}$ 。

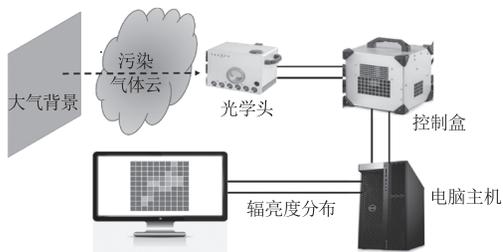


图4 面阵型 FTIR 设备简图

Fig.4 Array FTIR equipment sketch

为提高测量准确性,实验中以月亮直射光为标准光源进行了原位标定。如图 5 所示,选取月亮中心  $3 \times 3$  像元区域,对其光谱辐亮度进行平均,并与 MODTRAN 计算结果进行了对比。这里 MODTRAN 大气模式选取 1976 年美国标准大气,温湿度取上述给出的当地实际测量值,月亮高度

角  $65^\circ$ 、方位角南偏西  $22^\circ$ ,气溶胶模式选择 H-G 模式,能见度设为  $10 \text{ km}$ 。分析表明,月光 FTIR 原位标定数据相比 MODTRAN 给出的计算光谱结果平均偏大约  $6\%$ 。如果考虑到月光辐亮度本身有约  $7\%$  的波动等因素,则可知 FTIR 实验测量均方误差约为  $9\%$ 。

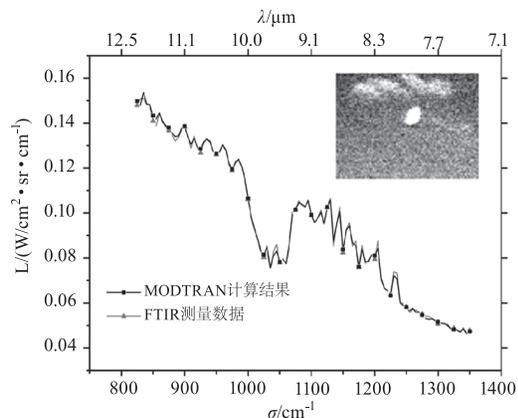
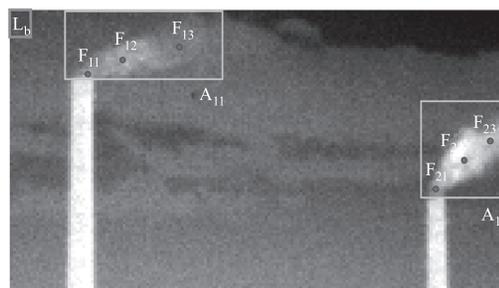


图5 月亮光谱 MODTRAN 计算结果与 FTIR 测量数据对比

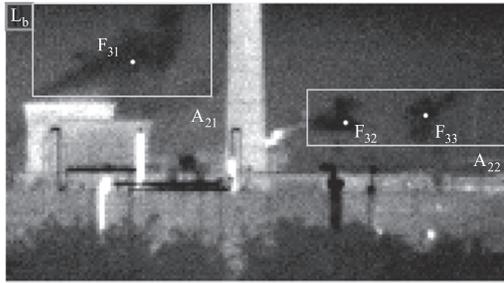
Fig.5 Comparison of lunar spectrum MODTRAN calculation results with FTIR experimental data

### 3.2 排放物光谱识别与浓度定量反演

图 6 给出了 FTIR 测量得到的化工园区污染气体排放全波段辐亮度灰度图,图 6(a) 烟囱口附近白色云为排放气体团,辐亮度较背景高;图 6(b) 化工设备排放区有三块黑色云,辐亮度较背景低,表明存在吸收效应。两场景均取上风处未受污染气体影响的左上角  $10 \times 10$  像元大小区域辐亮度均值作为背景辐亮度  $L_b$ 。记烟囱  $F_1$ 、 $F_2$  排放气体云团区域为  $A_{11}$  和  $A_{12}$ ,大小分别为  $20 \times 70$  像元与  $30 \times 30$  像元,在两个气体云团的源头、中部与尾部分别取三个典型位置,记作  $F_{11}$ 、 $F_{12}$ 、 $F_{13}$  和  $F_{21}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{23}$ 。取化工设备排放区两气体云区域,记作  $A_{21}$  与  $A_{22}$ ,大小分别为  $32 \times 55$  像元与  $22 \times 67$  像元,从三团气体云中选取亮度最低的点,分别标记为  $F_{31}$ 、 $F_{32}$  和  $F_{33}$ 。



(a) 烟囱排放区

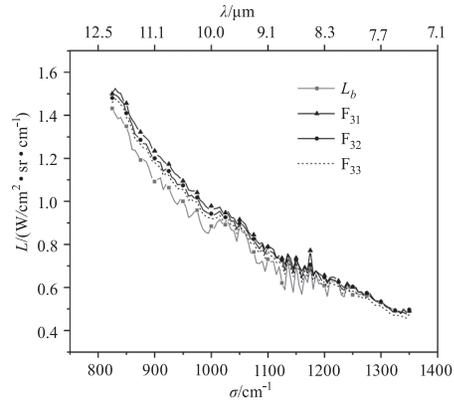


(b) 化工设备排放区

图 6 化工园区污染气体排放全波段辐亮度灰度图及采样点选取示意图

Fig. 6 The grey picture of the full-band irradiance of pollutant gas emissions in the chemical emission area, and the diagram of sampling points in the district

图 7 给出了上述烟囱排放区和化工设备排放区采样点与背景的光谱辐亮度对比。可以看出,  $A_{11}$ 、 $A_{12}$  区域采样点气体云辐亮度整体高于背景, 平均约高 15%。在  $H_2S$  特征波段  $1000 \sim 1200 \text{ cm}^{-1}$  范围内, 可发现气体云辐亮度存在明显波动, 表明排放污染气体团存在发射辐射现象。在化工设备排放区, 采样点辐亮度与背景相比, 在整个探测波段范围内差异不大, 但在  $SO_2$  特征波段  $1100 \sim 1300 \text{ cm}^{-1}$  范围内, 气体云辐亮度较背景低约 7%, 且存在波动, 吸收现象明显。

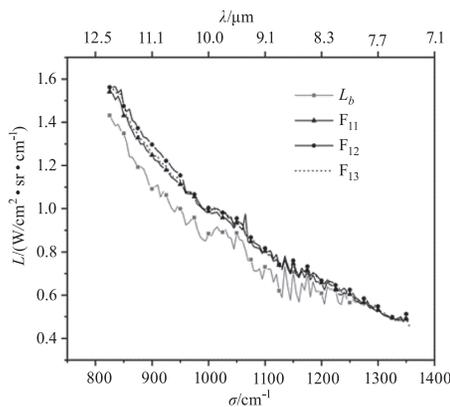


(c) 化工设备排放区采样点与背景辐亮度对比

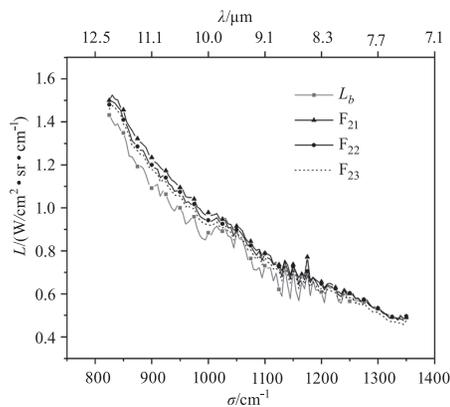
图 7 化工园区污染气体排放采样点与背景辐亮度对比

Fig. 7 Comparison of irradiance sampling points for pollutant gas emissions in chemical emission area with background

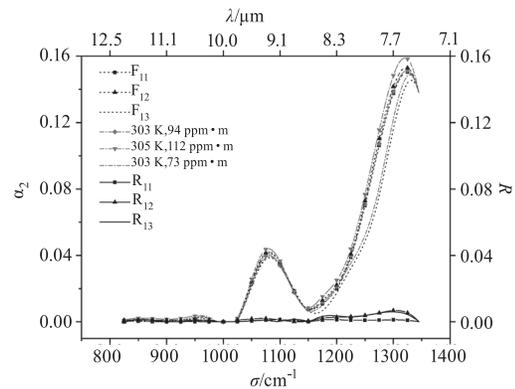
根据公式(2)和(3), 结合图 7 中 FTIR 测得的气体云和背景光谱辐亮度  $L_1$ 、 $L_b$ , 以及等效云团辐亮度  $L_2$ , 计算可得气体云团吸收率  $\alpha_2$ 。图 8 可知, 烟囱排放区污染物在  $1000 \text{ cm}^{-1}$  到  $1400 \text{ cm}^{-1}$  波数间存在明显特征峰, 分别为  $1060 \text{ cm}^{-1}$  ( $\sigma_{11}$ )、 $1310 \text{ cm}^{-1}$  ( $\sigma_{12}$ ), 表明污染物成分为  $H_2S$ ; 化工设备排放区污染物特征峰位于  $1020 \text{ cm}^{-1}$  ( $\sigma_{21}$ ) 与  $1210 \text{ cm}^{-1}$  ( $\sigma_{22}$ ), 污染气体主要成分为  $SO_2$ 。此外, 在实验测量时, 图 3 中标识区域嗅探到臭鸡蛋气味, 侧面印证了上述分析结果。



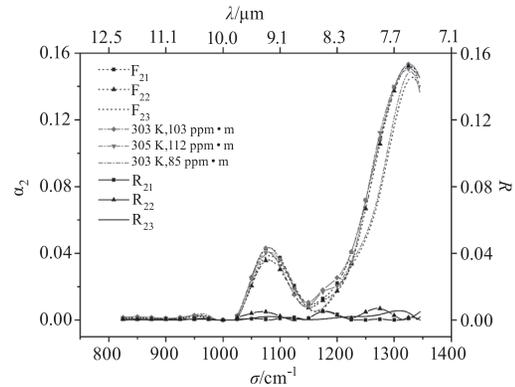
(a) 烟囱F1采样点与背景辐亮度对比



(b) 烟囱F2采样点与背景辐亮度对比



(a) 烟囱F1采样点测量光谱吸收率与拟合结果对比及残差分布



(b) 烟囱F2采样点测量光谱吸收率与拟合结果对比及残差分布

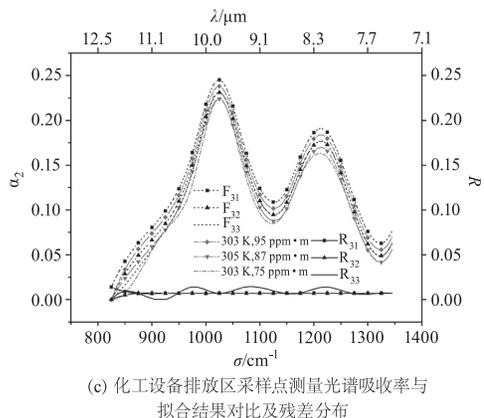


图8 不同采样点测量光谱吸收率与拟合结果对比及残差分布  
Fig. 8 Comparison of spectral absorbance experimental data with calculated results, and residual distribution at different sampling points

同时经过比较实测光谱吸收率和计算谱线,还可以得出各采样点气体云柱浓度。由图8可知,烟囱F<sub>1</sub>采样点F<sub>11</sub>、F<sub>12</sub>、F<sub>13</sub>处H<sub>2</sub>S的柱浓度分别为94 ppm·m、112 ppm·m和73 ppm·m,烟囱F<sub>2</sub>采样点F<sub>21</sub>、F<sub>22</sub>、F<sub>23</sub>处H<sub>2</sub>S的柱浓度分别为103 ppm·m、113 ppm·m和85 ppm·m。化工设备排放区域采样点F<sub>31</sub>、F<sub>32</sub>、F<sub>33</sub>处SO<sub>2</sub>柱浓度分别为95 ppm·m、87 ppm·m和75 ppm·m。

### 3.3 污染气体云团时空分布规律

本文所采用成像型FTIR测量,帧周期1.5 s,为进一步分析气体云飘散时空演化规律,从典型时刻

$t_0$ 开始连续取三帧辐亮度分布图,分别为 $t_0$ 、 $t_0 + 1.5$  s和 $t_0 + 3$  s。图9和10所示分别给出了A<sub>11</sub>、A<sub>12</sub>两个区域内,排放物H<sub>2</sub>S在三个时刻的辐亮度分布,其中图9、10(a)~(c)波数为 $\sigma_{11}$ 对应的辐亮度分布,图9、10(d)~(f)为 $\sigma_{12}$ 。观测点距离云团约1300 m,根据FTIR瞬时视场角可知图中云团空间分辨率约为0.4 m×0.4 m。

由图9、图10可知,烟囱排放区气体云团由于刚从烟囱中逸出,受速度5 km/h的东南风影响,两者在离开烟囱口一段距离后均有流动分离现象,A<sub>11</sub>气体云飘散方向整体与水平约呈30°角,A<sub>12</sub>与水平夹角60°,如图中所示流线形状较为规律,但夹角不同,可能为排出速度不同导致的。气体云团辐亮度最大值均约为0.13 W/m<sup>2</sup>·sr·cm<sup>-1</sup>,但 $\sigma_{11}$ 波数所对应的辐亮度整体高于 $\sigma_{12}$ 。 $\sigma_{11}$ 气体云团流动细节更为明显。两波段的辐亮度均高于背景大气,其值约为0.07 W/m<sup>2</sup>·sr·cm<sup>-1</sup>,表明存在气体云发射效应,辐亮度最大值处形态有变化,但始终处于气体云中心位置。在A<sub>11</sub>与A<sub>12</sub>区域,H<sub>2</sub>S气体辐亮度最高处不在排放源头而在气体云下游约7米处,原因可能为烟囱排放气体云包含水蒸气,遇冷空气后在边缘冷凝,造成气压变化促使气体向云团内部聚集,同时冷凝向内部释热,导致温度升高,辐亮度增加。

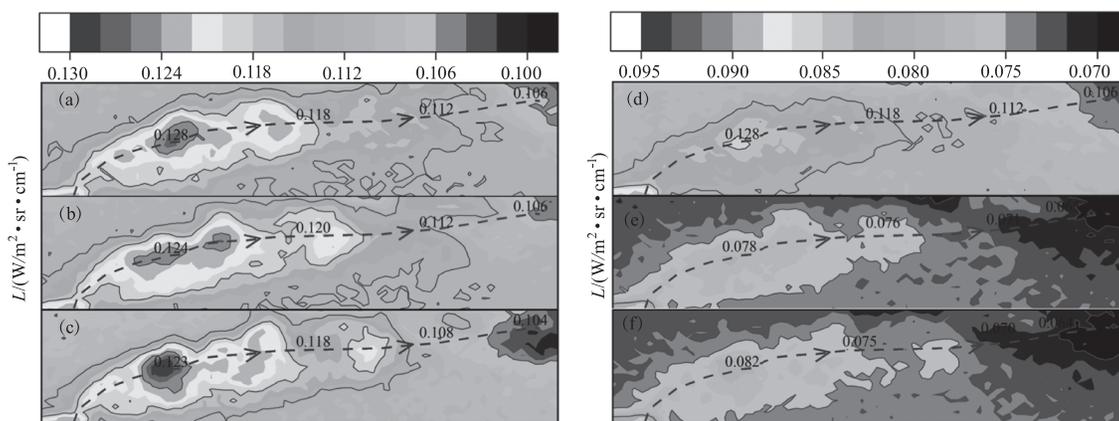


图9 烟囱排放区域A<sub>11</sub>分别在 $\sigma_{11}$ 波数和 $\sigma_{12}$ 波数下典型时刻连续三帧辐亮度分布  
Fig. 9 Irradiance distribution of three successive frames in A<sub>11</sub> region at  $\sigma_{11}$  wavenumber and  $\sigma_{12}$  wavenumber at typical moments

对于化工设备排放区,图11(a)给出了A<sub>21</sub>在SO<sub>2</sub>特征波数 $\sigma_{21}$ 的辐亮度分布,图11(b)为A<sub>22</sub>区域在 $\sigma_{22}$ 波数的辐亮度分布。由图可知,A<sub>21</sub>和A<sub>22</sub>区域排放口未出现在视场中,气体云整体与水平约呈40°夹角,已经飘散一段时间,形状较烟囱排放区不规则,气体辐亮度低于背景大气,且最低处位于气体

云中心位置,表明存在吸收现象。  
在气体云团浓度反演计算中,本文取辐亮度测量误差9%的2倍,即18%为判断是否继续迭代的残差阈值。在此阈值下本文设定H<sub>2</sub>S浓度检测极限约为19 ppm·m,SO<sub>2</sub>检测极限约为13 ppm·m。根据2小节所述方法得到排放气体浓度随时间和空

间的分布。图 12 为典型时刻  $t_0$  排放气体浓度二维分布,图中灰度图区域气体浓度低于检测极限。可以看出,  $\text{H}_2\text{S}$  柱浓度在  $A_{11}$  和  $A_{12}$  区域最大均值约为  $113 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ ,在距排放口约  $30 \text{ m}$  处,气体浓度下降到最低检测限以下。在  $A_{21}$  区域,  $\text{SO}_2$  柱密度最大值为  $95 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ ,  $A_{22}$  区域两团污染气体云最大值分别为  $87$  和  $83 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ ,在距排放气体源头约  $32 \text{ m}$  处飘散到最低检测限以下。

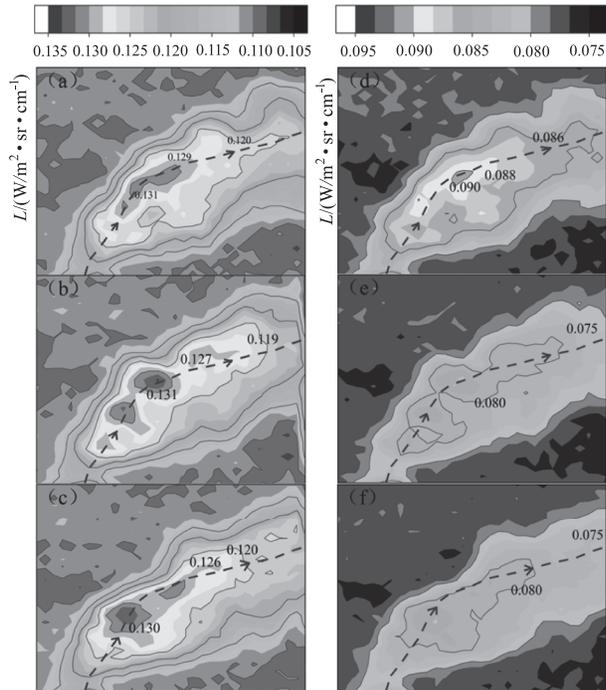


图 10 烟囱排放区域  $A_{12}$  分别在  $\sigma_{11}$  波数和  $\sigma_{12}$  波数下典型时刻连续三幅辐亮度分布

Fig. 10 Irradiance Distribution of three successive frames in  $A_{12}$  region at  $\sigma_{11}$  wavenumber and  $\sigma_{12}$  wavenumber at typical moments

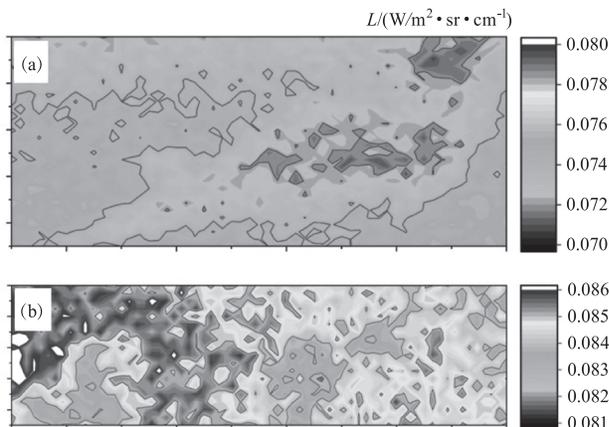
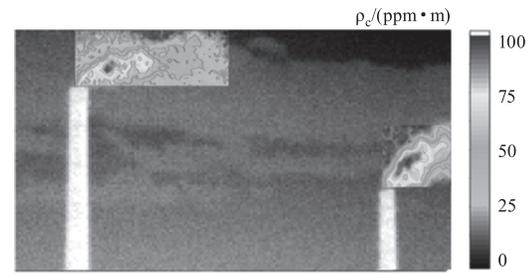
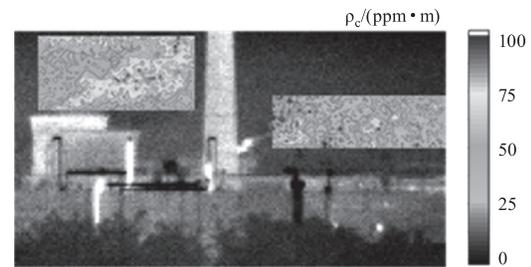


图 11 化工设备排放区域  $A_{21}$  在波数  $\sigma_{21}$  与  $A_{22}$  区域  $\sigma_{22}$  波数的辐亮度分布

Fig. 11 Irradiance distribution of in  $\sigma_{21}$  wavenumbers,  $A_{21}$  region in  $\sigma_{22}$  wave number and for the emissions region of the chemical equipment emissions area



(a) 烟囱排放区  $\text{H}_2\text{S}$  浓度分布



(b) 化工设备排放区  $\text{SO}_2$  浓度分布

图 12 典型时刻烟囱排放区与化工设备排放区硫化物浓度分布  
Fig. 12 Sulphides concentrations distribution of the chimneys emissions area and the chemical equipment emissions area at typical moments

#### 4 结 论

污染和温室气体定量测量越来越受到广泛重视,本文利用面阵型 FTIR 设备借助月光散射发展了夜间高时空分辨率、高精度污染气体云测量方法,对我国北方某化工园区排放进行实验测量,得到了烟囱排放区和地表附近化工设备排放区硫化物污染气体高光谱数据,结合标定数据给出了气体云辐亮度、浓度时空分布,其中成像周期  $1.5 \text{ s}$ ,云团空间分辨率约为  $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 。

实验测量中,以月亮为原位标准光源进行了光谱辐亮度标定,其中光源不确定度为  $7\%$ ,数值处理方法精度  $6\%$ ,测量均方误差最高约为  $9\%$ 。对高光谱辐亮度曲线进行计算处理,反演得到污染气体云光谱透过率和吸收率。与假定温度、压力和物质种类等条件的标准数据库谱线进行对比,最终确定污染物主要成分为硫化物  $\text{SO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$ ,同时得到了  $\text{SO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  柱浓度空间分布。 $\text{H}_2\text{S}$  存在于烟囱排放的气体云中,两个烟囱最大柱浓度均约为  $113 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ ,受东南风影响与水平方向分别呈  $60^\circ$  和  $30^\circ$  向西北飘散,气体浓度均在距排放口约  $30 \text{ m}$  处飘散到本文设定的检测极限  $19 \text{ ppm} \cdot \text{m}$  以下。 $\text{SO}_2$  存在于低层化学设备排放区的三片气体云中,飘散角均约为  $40^\circ$ ,最大柱浓度为  $95, 87$  和  $83 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ ,距气体源头约  $32 \text{ m}$  处飘散到极限检测限  $13 \text{ ppm} \cdot \text{m}$  以下。

本文发展的基于月光散射面阵型 FTIR 测量方法,实现了高空间时间分辨率、高精度的污染气体测量,对污染气体探测具有重要意义,为进一步对气体云三维重构奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] Liu Wenqing, Chen Zhenyi, Liu Jianguo, et al. Optical remote sensing technology and development trend of atmospheric pollution [J]. *China Environmental Monitoring*, 2018, 34(2): 1-9. (in Chinese)  
刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 大气污染光学遥感技术及发展趋势[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(2): 1-9.
- [2] Jiao Yang, Xu Liang, Gao Minguang, et al. Scanning FTIR passive telemetry system for polluted air masses[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(9): 1021-1024. (in Chinese)  
邵春沅, 顾明剑. FTIR 光谱仪动镜速度和采样抖动的噪声分析[J]. *激光与红外*, 2013, 43(9): 1021-1024.
- [3] Harig R, Matz G, Rusch P. Scanning infrared remote sensing system for identification, visualization, and quantification of airborne pollutants [C]//*Instrumentation for Air Pollution and Global Atmospheric Monitoring*. Technische Universitaet Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Messtechnik, Harburger Schlossstr. 20, D-21079 Hamburg, Germany, 2002.
- [4] Zhang Lichen, Wang Tao, Yin Fei, et al. High responsiveness GaAs-MSM optoelectronic self-mixing surface array devices[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(8): 925-928. (in Chinese)  
张立臣, 汪韬, 尹飞, 等. 高响应度 GaAs-MSM 光电自混频面阵器件[J]. *激光与红外*, 2011, 41(8): 925-928.
- [5] Jin Ling, Gao Minguang, LIU Zhiming, et al. Monitoring SO<sub>2</sub> emissions from chemical plant areas using SOF-FTIR technique[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1071-1075. (in Chinese)  
金岭, 高闽光, 刘志明, 等. 利用 SOF-FTIR 技术监测化工厂区 SO<sub>2</sub> 排放[J]. *激光与红外*, 2010, 40(10): 1071-1075.
- [6] Martin Chamberland, Vincent Farleya, Alexandre Vallièresa, et al. High-performance field-portable imaging radiometric spectrometer technology for hyperspectral imaging applications [C]//*The International Society for Optical Engineering*, 2005.
- [7] Jiao Yang, Xu Liang, Gao Minguang, et al. Scanning FTIR passive telemetry system for polluted air masses [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(9): 1021-1024. (in Chinese)  
焦洋, 徐亮, 高闽光, 等. 污染气团扫描式 FTIR 被动遥测系统 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(9): 1021-1024.
- [8] Materazzi S, S VECCHIO. Evolved gas analysis by infrared spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2010, (4): 241-273.
- [9] SHI Peng, XIE Pinhua, LI Ang, et al. Measurement of atmospheric NO radicals by differential absorption spectroscopy based on direct moonlight [J]. *Journal of Optics*, 2010, 30(12): 3643-3648. (in Chinese)  
石鹏, 谢品华, 李昂, 等. 基于直射月光的差分吸收光谱技术测量大气 NO 自由基 [J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3643-3648.
- [10] YAN Bo, FANG Junyong, CHEN Hao, et al. FTIR trend term removal method based on GA and MSAC algorithms [C]//*Earth & Space: from Infrared to Terahertz 2022 International Conference*, 2022.
- [11] Xavier Watremez, Nadège Labat, Grégoire Audouin, et al. Remote detection and flow rates quantification of methane releases using infrared camera technology and 3D reconstruction algorithm [C]//*SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2016.
- [12] Fang J, Liu WQ, Zhang TS. Line-by-line integrated gas absorption model and its application in FTIR gas detection [J]. *Infrared*, 2007, (8): 27-32. (in Chinese)  
方静, 刘文清, 张天舒. 逐线积分气体吸收模型及其在 FTIR 气体检测中的应用 [J]. *红外*, 2007, (8): 27-32.
- [13] Materazzi S, S VECCHIO. Evolved gas analysis by infrared spectroscopy [J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2010, (4): 241-273.
- [14] Martin Chamberland, Vincent Farleya, Alexandre Vallièresa, et al. High-performance field-portable imaging radiometric spectrometer technology for hyperspectral imaging applications [C]//*The International Society for Optical Engineering*, 2005.
- [15] HITRANonline [DB/OL]. <https://hitran.org/>.
- [16] X. Wang, S. Lv, S. Li, et al. Automatic baseline correction of gas spectra based on baseline drift model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(12): 3946-3951. (in Chinese)  
王昕, 吕世龙, 李岩, 等. 基于基线漂移模型的气体光谱自动基线校正 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(12): 3946-3951.