

基于成像差分吸收光谱技术探测合肥市 大气边界层 NO₂ 斜柱浓度分布研究

吴子扬^{1,2}, 谢品华^{1,2,3*}, 徐晋², 李昂², 张强^{1,2}, 胡肇焜², 李晓梅², 田鑫^{1,2}

1. 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽合肥 230026
2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031
3. 中国科学院区域大气环境研究卓越创新中心, 福建厦门 361021

摘要 近年来, 中国经济发展迅速, 工业化程度越来越高, 大气环境污染问题加剧, 严重影响人民的日常生活, 因此对大气污染物的实时监测研究尤为重要。城市边界层大气中各类污染源排放的相互作用, 使得其污染问题复杂多变, 特别是在重污染过程中污染物在大气中的垂直分布和变化情况问题。成像差分吸收光谱(I-DOAS)技术用于对污染物空间分布的探测, 国内外对该技术的研究主要基于地基扫描、机载和星载平台, 因其具有长距离、多组分、高分辨同时连续实时观测的特点, 观测范围可从小尺度逐渐向大区域拓展, 可为分析大气环境现状提供重要数据支撑。地基成像差分吸收光谱技术一般用于对某一污染源的探测, 主要研究其对城市大气边界层污染物分布的探测方法, 其中介绍了基于比尔-朗伯定律的差分吸收光谱(DOAS)原理, 分析了基于“推扫”方式的成像系统的成像原理, 并且以大气中常见污染物 NO₂ 为例, 2018年6月12日在合肥市科学岛开展对边界层大气 NO₂ 的成像遥测实验, 将多芯光纤束前端与紫外镜头耦合, 后端连接光谱仪狭缝, 紫外镜头搭载于二维转台电机上, 设置二维旋转电机合适的仰角, 水平方向上从 0° 旋转至 90°, 观测区域中主要包括郊区, 电厂区和城市区三个典型区域。选择天顶太阳光谱作为参考谱, 将测量光谱、参考谱进行相应多通道光谱合并及提取, 每采集一次可获得相对应的 38 条光谱。使用 DOAS 反演方法对所有测量光谱进行数据反演, 得到 38×90 组 NO₂ 的差分斜柱浓度(DSCD), 并根据观测角度的几何模型, 将浓度信息与空间维上的像元相匹配, 按照扫描方向进行依次插值重构, 扣除复杂背景后, 获得合肥市边界层 NO₂ 差分斜柱浓度的二维分布图像, 并且与当天同时进行实验的 MAX-DOAS 观测数据作对比, 两者在郊区、电厂区和城市区的相关系数分别为 0.86, 0.87 和 0.83, 结果表明该系统能够有效获取城市边界层大气污染物浓度分布信息。

关键词 差分吸收光谱; 城市边界层; 二氧化氮; 二维分布成像

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0720-07

引言

氮氧化物(NO_x)在全球大气化学研究中发挥着重要作用, 由于大气中臭氧的氧化作用, NO_x 中 NO 和 NO₂ 的比例在不断变化。NO₂ 同时是衡量大气污染程度的重要标尺之一, 长期接触可能破坏人类免疫系统, 导致呼吸道感染等疾病。近年来, 我国经济发展迅速, 工业化程度越来越高, 大气环境污染问题加剧, 严重影响人民的日常生活。据估计,

全球至少一半氮氧化物的排放归因于化石燃料的燃烧, 因此, 对大气污染痕量气体监测是目前研究的一个重要领域。

自 20 世纪 80 年代起, 差分吸收光谱技术(DOAS)迅速发展起来, 其作为一种对大气污染行之有效的监测手段, 已成功探测到大气对流层和平流层中的 NO₂, SO₂, HCHO, O₃, BrO, NH₃, CS₂ 和 NO₃ 和芳香烃等许多种类的痕量污染气体。成像差分吸收光谱(I-DOAS)是一种被动测量技术, 主要用于提供烟羽中污染气体的斜柱浓度(SCD)二维分布, 能够快速获取观测区域内大气痕量污染物的时空分布信息。目前, 成像 DOAS 技术已应用于不同平台上进行监测, 如地

收稿日期: 2018-12-27, 修订日期: 2019-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41530644), 国家重点研发计划项目(2017YFC0209902)资助

作者简介: 吴子扬, 1994 年生, 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院硕士研究生 e-mail: wzy17003@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: phxie@aiofm.ac.cn

基扫描、车载、机载以及星载,观测区域也从小尺度、小范围监测逐渐发展向大尺度、区域性甚至全球性的大气污染监测。

国外对成像 DOAS 获取污染气体二维分布的研究主要集中在地基扫描观测和机载、星载平台观测。德国海德堡大学利用机载多光纤成像技术获得大区域的二氧化氮浓度分布以及火山排放的 SO_2 , BrO , OClO 浓度^[1-2], 对墨西哥的 Popocatepetl 火山口进行了地基成像 DOAS 观测^[3]; 德国不来梅大学环境物理研究所在罗马尼亚布加勒斯特开展机载成像 DOAS 实验测得区域 NO_2 差分斜柱浓度^[4], 也开展了大视场镜头下机载成像 DOAS 对德国某电厂区域上方 NO_2 的观测实验^[5]; 韩国高级环境监测研究中心(ADEMRC)在某电厂开展地基成像扫描实验^[6-7], 并利用成像 DOAS 数据改进污染源排放烟羽扩散公式^[8]; 美国加利福尼亚大学洛杉矶分校大气与海洋科学系以及休斯顿大学地球与空间科学系和大气科学系也对成像 DOAS 观测来自污染源排放的 HCHO 和 SO_2 进行了研究^[9]。国内对成像 DOAS 的研究起步较晚, 但发展迅速, 中国科学院安徽光学精密机械研究所对该研究取得了一定进展, 刘进等^[10-11]利用成像 DOAS 技术在机载和地基平台分别进行了污染痕量气体的二维分布解析。对污染源排放的污染痕量气体的成像遥测已经取得了初步研究, 由于城市边界层中各类污染源排放的相互作用, 使大气成分复杂多变, 污染气体分布范围广, 浓度较污染源排放时低, 太阳散射光的光学传输路径难以计算, 所以对城市边界层大气中污染痕量气体的成像遥测比较困难, 具体的研究也较少。

本文主要研究成像差分吸收光谱技术, 对差分吸收光谱原理、成像原理和测量系统进行了详细介绍, 对测量仪器的各项参数进行了具体分析, 并以 NO_2 为例, 利用地基扫描成像 DOAS 系统对安徽省合肥市边界层大气进行成像遥测实验, 通过 DOAS 方法对所采集光谱反演得到浓度信息, 并通过观测的几何模型的计算, 将获得的浓度信息与空间信息进行精准的像元匹配, 成功获得了目标区域的污染痕量气体浓度的二维分布图, 并在城市区、电厂区和郊区三个方向上与当天同时进行实验的 MAX-DOAS 观测数据及结果作对比, 获得了很好的相关性。

1 成像 DOAS 技术

大气中污染气体的分布, 尤其是污染源及大气边界层的二维分布的精确探测, 是研究大气污染物生成和变化规律的基础, 其中成像 DOAS 技术是一种高效的探测手段。

1.1 DOAS 原理

差分吸收光谱技术(DOAS)原理是基于比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律, 其表达式如式(1)

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left\{ - \int_0^l [\epsilon_R(\lambda, l) + \epsilon_M(\lambda, l) + \sum_i \sigma_i(\lambda, P, T) c_i(l) dl] \right\} \quad (1)$$

其中, $I(\lambda)$ 表示接收光强, $I_0(\lambda)$ 表示发射光强, ϵ_R 表示瑞利散射系数, ϵ_M 表示米氏散射系数, l 为光程长度, $\sigma_i(\lambda, P, T)$ 为吸收截面, c 为气体浓度, i 为气体种类。

由于成像 DOAS 技术以太阳散射光为光源, 因此痕量气体的吸收光程 l 无法获得, 将式(1)变换为对未知路径进行积分

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp \left[- \int (\sigma(\lambda) c(s)) ds \right] \quad (2)$$

令 $\text{SCD} = \int c(s) ds$, 则式(2)变为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda) \text{SCD}] \quad (3)$$

将由各种散射造成的光衰减即吸收截面的慢变化部分, 通过数字高通滤波消除, 得到差分光学厚度计算公式

$$D' = \ln \frac{I'_0(\lambda)}{I(\lambda)} = \sum_i \sigma'_i(\lambda) \text{SCD}_i \quad (4)$$

式(4)中斜柱浓度 SCD (slant column density) 即表示痕量气体浓度沿太阳光路径的积分。

1.2 扫描成像原理

研究的成像 DOAS 技术是基于“推扫”遥测成像方式^[12], 测量中垂直方向上穿过污染痕量气体的太阳散射光经采集进入系统, 经光栅色散后成像在面阵探测器上, 由面阵探测器收集空间维和光谱维信息。利用差分吸收光谱技术对获取的光谱信息进行反演得到多组气体浓度值, 再根据测量几何模型, 将浓度信息与空间上每个像元相匹配, 最后垂直与水平方向上信息相结合, 完成对物体的二维分布成像, 如图 1 所示。

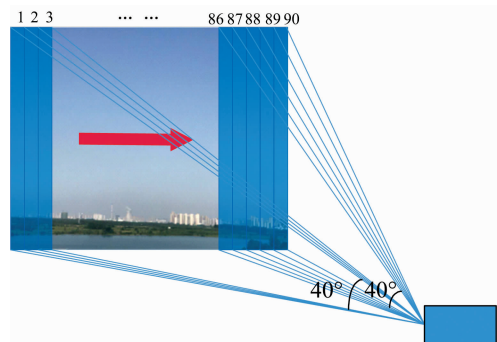


图 1 扫描过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the scanning process

面阵 CCD 的空间维对应观测的垂直方向, 已知观测点到目标的垂直距离时, 通过视场角以及一次扫描角度计算出浓度分布矩阵中每个浓度值对应空间大小, 即成像后的空间分辨率, 计算如式(5)和式(6)

$$R_1 = 2L \tan(\alpha/2) \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{2L \tan(\beta/2)}{512} \quad (6)$$

其中, R_1 为水平分辨率, R_2 为垂直分辨率(式中 512 为 CCD 空间维上的像元数), L 为观测点到目标的垂直距离, α 为每次测量水平扫描的角度, β 为垂直视场角。水平分辨率 R_1 与 α 和 L 有关, α 通常大于扫描时的瞬时水平视场角。

2 结果与讨论

2.1 实验系统及参数

地基成像 DOAS 系统如图 2 所示。系统主要包括带有温控系统的高光谱分辨率消像差 Czerny-turner 成像光谱

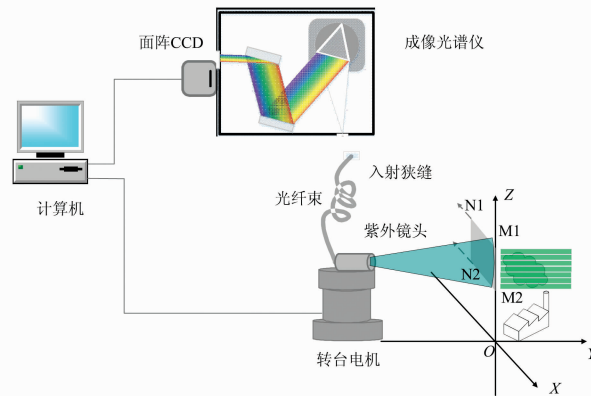


图 2 地基成像 DOAS 系统及扫描示意图

Fig. 2 Diagram of ground I-DOAS system and scanning

表 1 成像 DOAS 系统参数

Table 1 Imaging DOAS system parameters

光谱分辨率/nm	0.5
光谱范围/nm	293~505
CCD 像元数/pixel	512×2 048
视场角/(°)	40
观测仰角/(°)	0
温控/°C	-45
曝光时间/s	2
电机转速/(°·s ⁻¹)	0.5
间隔	每 1°扫描一次

太阳散射光进入紫外镜头,再通过导入光学系统进入成像光谱仪,成像光谱仪为一种三光栅塔加两片消像差凹面反射镜结构,光谱仪采集到的光谱信息经过面阵 CCD 的模数转化后传输到计算机,面阵 CCD 的空间维为 512 pixel,光谱维为 2 048 pixel,每次测量能够获得 M1—M2 一条纵列上的 512 条具有 2 048 pixel 的光谱。通过电机的水平推扫,从 M1—M2 到 N1—N2 之间进行多次测量。利用计算机通过 DOAS 方法对每条光谱进行反演,即可获得整个面上在光传输路径中污染痕量气体的斜柱浓度,再对获得的每个面上的痕量气体斜柱浓度值进行空间插值重构,得到区域污染气体的分布情况。

导入光学系统为 40°视场角的紫外镜头以及多芯光纤束,多芯光纤束的结构如图 3 所示,光纤束总共有 60 芯,可以实现较高的散射光信号收集,具有较好的成像质量、大视场并且与光谱仪孔径匹配等优点,同时光纤束传输的方式极大地便利了成像系统仪器的安装和调试。光纤芯两端水平顺序排布,光纤芯束一一对应,芯芯间的间距为 220 μm;光纤芯排布长度为 8.36 mm。光纤束前端耦合成像光谱仪的入射狭缝,后端耦合 40°视场角紫外镜头,紫外镜头搭载于二

维转台上,通过电机连接计算机可获得精确的扫描角度信息。

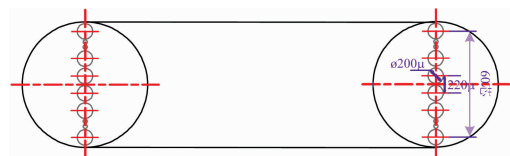


图 3 多芯光纤束示意图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-core fiber bundle

2018 年 6 月 12 日,在合肥市西北科学岛安徽光学精密机械研究所综合楼楼顶搭建地基成像 DOAS 扫描系统,对合肥市边界层大气 NO₂ 开展观测实验。当天天气晴朗无云,观测时间为下午 2 点整。设置二维转台电机从 0°到 90°水平旋转,每隔 2 s 旋转一次,一次旋转 1°,完成完整扫描耗时约 10 min,扫描范围如图 4 所示,扫描区域由北到南包括三个区域,分别为郊区、电厂区和城市区,针对不同区域对 NO₂ 浓度分布进行成像分析。



图 4 扫描区域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the scanning area

2.2 光谱提取

实验中成像光谱仪不同空间维上的仪器函数不同,且采用了多芯光纤束作为导入光学结构,而每根光纤之间存在包层等结构,导致 CCD 存在未被照亮的部分,为提高信噪比,需要在 512 pixel 的空间维上对照亮部分依次提取。根据 CCD 像面尺寸和光纤芯数的对应关系,可提取 38 条光纤采集的光谱,同时对汞灯谱以及作为参考谱的天顶太阳光谱进行光谱合并和提取,共得到空间维上与测量光谱相对应的 38 个波长信息以及相对应的 38 条参考谱,这样保证了光谱中的夫琅禾费结构能尽可能地扣除。

根据几何光学计算其有效视场,如式(7)和式(8)所示

$$\tan\left(\frac{40^\circ}{2}\right) = \frac{60}{l} \quad (7)$$

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{38}{l} \quad (8)$$

其中, l 等效为光谱仪入射狭缝到面阵 CCD 的距离, θ 为有效视场角,计算结果为 $\theta = 26^\circ$ 。

2.3 光谱分析

针对污染源的污染气体分布探测,通常选择相对干净背景光谱作为参考光谱,以扣除太阳光谱中的夫琅禾费结构,同时可减少大气背景对数据处理的影响。而在对大区域(如城市边界层)探测的情况下,为获得边界层大气的斜柱浓度分布信息,一般选择天顶太阳光谱作为参考光谱进行反演,得出浓度分布后,将每列斜柱浓度向量减去相比最低的列向量,即可近似为减少大气背景影响下的边界层斜柱浓度分布信息。在忽略不同行间像元串扰的前提下,利用提取的光谱信息,结合同像元参考光谱及定标信息,使用 QDOAS 光谱反演软件对测量光谱进行逐条反演,获得多组 NO₂ 斜柱浓度信息。反演中选取 337~370 nm 波段,参与反演的气体包括 NO₂, HCHO, O₄ 和 O₃,通常将 Ring 效应当作一种吸收成分参与光谱拟合,具体 QDOAS 参数设置如表 2 所示。选取其中两条测量光谱为例进行拟合反演,如图 5 所示。

表 2 QDOAS 参数设置

Table 2 QDOAS parameter setting

Parameter	Data source	Fitting interval NO ₂ (337~370 nm)
NO ₂	Vandaele et al. (1998) 220, 294 K	✓
O ₃	Bogumil et al. (2003) 223, 243 K	✓
O ₄	Thalman and Volkamer(2013), 293 K	✓
HCHO	Meller and Moortgat(2000), 293 K	✓
Ring	Two Ring spectra calculated with DOASIS (Kraus, 2006; Wagner et al., 2009)	✓
Polynomial degree		5

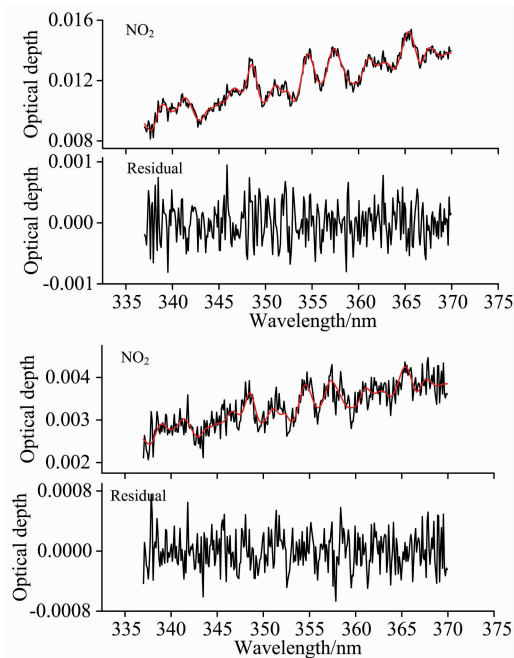


图 5 光谱拟合及残差示意图

Fig. 5 Schematic diagram of spectral fitting and residual

可得 NO₂ 的 DSCD 值分别为 3.3×10^{16} 和 2.6×10^{16} molec · cm⁻², 其残差相应为 5.2×10^{-4} 和 3.4×10^{-4} 。对所有测量光谱进行 DOAS 方法反演,得到 $38 \times 90 = 3420$ 组 NO₂ 的 DSCD 值。

2.4 成像结果

对上述 3420 组 NO₂ 的 DSCD 值按扫描方向从左向右依次排列,得到合肥市边界层 NO₂ 斜柱浓度分布,如图 6 所示。电机水平推扫,推扫过程中垂直方向每个仰角上接收的太阳散射光的光程相同,因此,为扣除大气边界层存在的复杂背景,将浓度分布矩阵中所有列向量均减去郊区区域内 NO₂ 斜柱浓度最低所对应的列向量,可得到扣除边界层复杂背景后的 NO₂ 浓度分布情况,如图 7 所示。

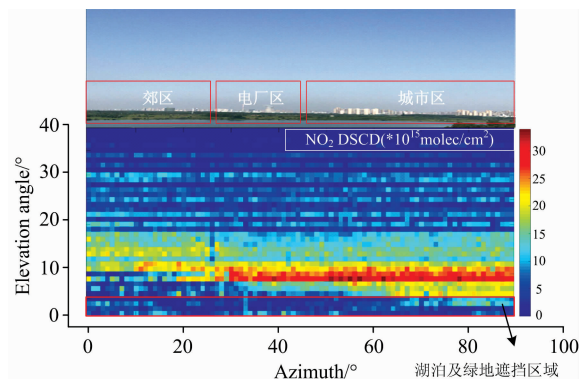


图 6 合肥市边界层 NO₂ 差分斜柱浓度分布示意图(未扣除复杂背景)

Fig. 6 Schematic diagram of distribution of NO₂ DSCD in the boundary layer of Hefei (Unsubscribed the complex background)

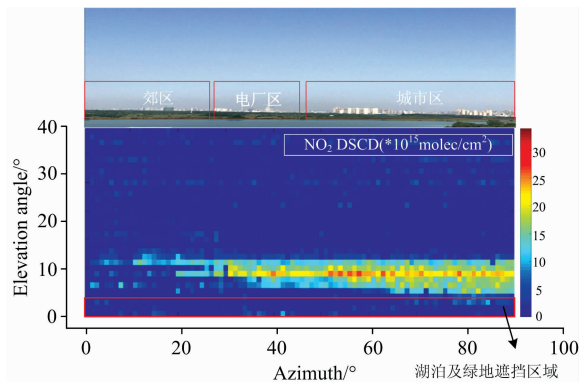


图 7 合肥市边界层 NO₂ 斜柱浓度分布示意图 (扣除复杂背景)

Fig. 7 Schematic diagram of distribution of NO₂ DSCD in the boundary layer of Hefei (Deducted the complex background)

在距离观测点 1 000 m, 电机扫描每次旋转 1°, 镜头有效垂直视场角为 26° 时, 系统的空间分辨率由式(5)和式(6)计算, 结果为 17.45 m × 0.90 m (水平 × 垂直)。由于在垂直方向上约 5 个通道合并提取出一条光谱, 因此垂直方向上空间分辨率为 0.90 × 5 = 4.50 m, 所以 1 000 m 处的二维分布图的每个像素点对应空间大小为 17.45 m × 4.50 m (水平 × 垂直), 同理可计算出距离观测点 2 000 m, 3 000 m 及更远处的空间分辨率。

图 7 中电厂距离观测点 8 800 m, 可计算出空间分辨率为 153.59 m × 39.68 m。扣除复杂背景后, 发现 NO₂ 主要集中在近地面区域, 城市区污染层厚度约为 39.68 m × 6 = 238.08 m, 电厂区污染层厚度约为 39.68 m × 5 = 198.4 m。在近地面水平方向上, 电厂区与城市区的 NO₂ 浓度明显高于郊区, 郊区 NO₂ 的来源主要是跨区域输送和秸秆等生物质的燃烧, 而城市区 NO₂ 排放较多可能是由于汽车尾气、工业过程排放等造成, 观测表明, 近地面 NO₂ 斜柱浓度最高可达到 3.4×10^{16} molec · cm⁻²。

2.5 与 MAX-DOAS 数据结果对比

选取在成像扫描观测期间在同一位置的 MAX-DOAS 同步观测结果进行了对比。MAX-DOAS 是指一种通过改变望远镜指向 (即仰角) 来接收多仰角散射光的测量方式, 通常视场角较小 (小于 1°), 而 I-DOAS 使用面阵 CCD, 在垂直方向上有较大的视场角 (本系统为 26°), 在特定仰角下, 可同时获得一组不同方向进入探测器的光谱, 这与 MAX-DOAS 观测方式类似, 因此, 二者在斜柱浓度探测上, 可以进行相互对比验证。

在观测期间, MAX-DOAS 分别对合肥市边界层郊区、电厂区、城市区三个方向进行了垂直扫描观测, 得出的 NO₂ DSCD 结果与 I-DOAS 观测的结果进行了对比, 对比结果如图 8 所示。

对比结果可以看出在 MAX-DOAS 和 I-DOAS 所探测到的 NO₂ 差分斜柱浓度的分布规律相似, 同时, 对合肥市郊区、电厂区、城市区三个区域的观测结果分别进行相关性分

析, 如图 8 所示, 分别得到 0.86, 0.87 和 0.83 的相关系数, 二者均能观测到相同的边界层 NO₂ 差分斜柱浓度的分布变化趋势, 也进一步说明了成像 DOAS 对边界层污染气体探测方面更加直观、更有时效性。

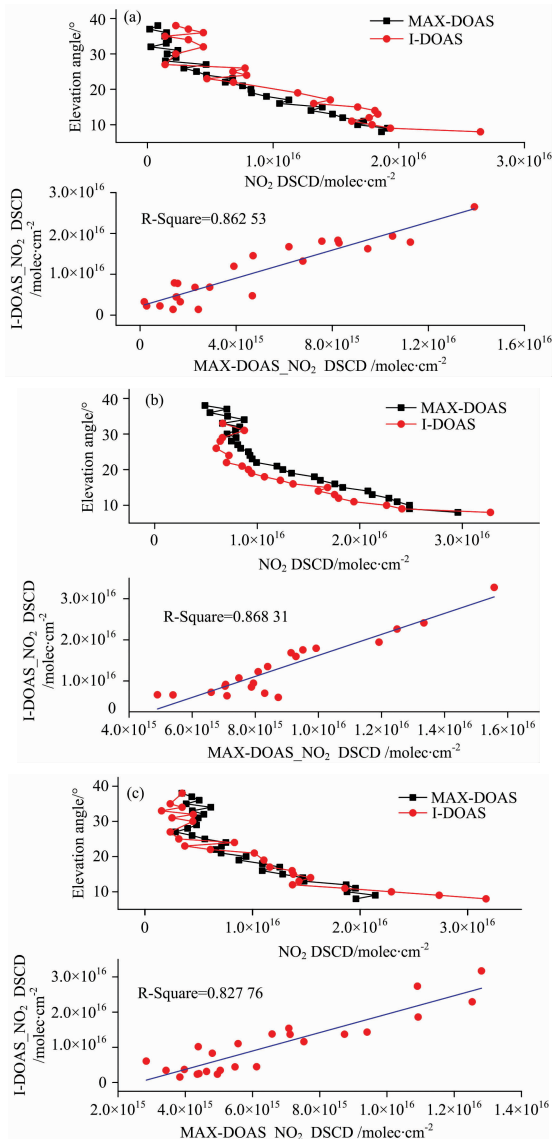


图 8 MAX-DOAS 与 I-DOAS 在三个区域内 NO₂ DSCD 分布对比及相关性分析示意图

(a): 郊区; (b): 电厂区; (c): 城市区

Fig. 8 Comparison of NO₂ DSCD distribution and correlation analysis between MAX-DOAS and I-DOAS in three regions

(a): Suburban; (b): Power plant area; (c): Urban area

3 结论

研究了基于成像差分吸收光谱技术的污染气体浓度分布探测方法和应用, 并介绍了地基成像 DOAS 扫描系统的基本结构和仪器参数, 对合肥市边界层大气 NO₂ 开展了二维扫描观测, 通过测量的几何模型, 与空间维的像元信息相匹

配, 扣除复杂背景后, 获得了合肥市边界层大气中 NO_2 差分斜柱浓度分布图。结果表明, 城市区和电厂区的 NO_2 浓度比郊区 NO_2 浓度高得多, 且分布高度更高, 这说明电厂区和城市区的化工燃料的燃烧排放以及汽车尾气的大量排放可能对大气中的 NO_2 浓度与分布起到了主要的贡献作用。成像系统所观测到的污染痕量气体分布能够直观给出所观测气体斜柱浓度高低分布, 对分析城市边界层污染气体分布和传输提

供了强有力的支撑。为验证系统观测结果准确性, 在城市区、电厂区和郊区三个主要方向上, 将获得的结果与当天同时观测的 MAX-DOAS 的结果相对比, 两者均能观测到相同的边界层 NO_2 差分斜柱浓度的分布变化趋势, 具有很好的相关性, 也进一步说明了成像 DOAS 在边界层污染气体探测具有直观性和时效性。下一步可进行多时段的观测, 并结合风场数据, 以研究污染气体在边界层大气中的传输及演化。

References

- [1] General S, Bobrowski N, Pöhler D, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2014, 7: 3459.
- [2] General S, Pöhler D, Sihler H, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, 300: 175.
- [3] Lubcke P, Bobrowski N, Illing S, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, 6(3): 677.
- [4] Andreas Carlos Meier, Anja Schönhardt, Tim Bösch, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2017, 10: 1831.
- [5] Schönhardt A, Altube P, Gerilowski K, et al. *Atmos. Meas. Tech.*, 2015, 8: 5113.
- [6] Lee Hanlim, Noh Youngmin, Kwon Soonchul, et al. *Bull. Korean Chem. Soc.*, 2014, 35(4): 1191.
- [7] Chong Jihyo, Kim Young J, Baek Jongho, et al. *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere. Proceedings of SPIE*, 2016, 10001: 1000112.
- [8] Lee Hanlim, Ryu Jaeyong, Jeong Ukkyo, et al. *Bull. Korean Chem. Soc.*, 2014, 35(12): 3427.
- [9] Olga Pikel'naya, James H Flynn, Catalina Tsai, et al. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118: 8716.
- [10] LIU Jin, SI Fu-qi, ZHOU Hai-jin, et al(刘进, 司福祺, 周海金, 等). *Acta Phys. Sin. (物理学报)*, 2015, 64(3): 034217.
- [11] 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): 0630003.
- [12] Ulrich Platt, Peter Lübcke, Jonas Kuhn, et al. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, 300: 7.
- [13] LIU Jian-peng, TANG Yi, HUANG Gang, et al(刘健鹏, 唐义, 黄刚, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2012, 32(3): 0322007.
- [14] AN Yan, SUN Qiang, LIU Ying, et al(安岩, 孙强, 刘英, 等). *Chinese Optics(中国光学)*, 2012, 5(5): 470.

Study on the Distribution of NO_2 Slant Column Density in Atmospheric Boundary Layer of Hefei City Based on Imaging Differential Absorption Spectroscopy

WU Zi-yang^{1,2}, XIE Pin-hua^{1,2,3*}, XU Jin², LI Ang², ZHANG Qiang^{1,2}, HU Zhao-kun², LI Xiao-mei², TIAN Xin^{1,2}

1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
2. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
3. CAS Center for Excellence in Urban Atmospheric Environment, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Abstract In recent years, China's economy has developed rapidly, industrialization has become higher and higher, and atmospheric pollution has intensified, seriously affecting people's daily lives. Therefore, real-time monitoring and research on atmospheric pollutants is particularly important. The interaction of various pollution sources in the atmosphere of the urban boundary layer makes the pollution problem complex and variable, especially the vertical distribution and change of pollutants in the atmosphere during heavy pollution. Imaging differential absorption spectroscopy (I-DOAS) is used to detect the spatial distribution of pollutants. The research at home and abroad is based on ground-based scanning, airborne and space-borne platforms. Because of its long-distance, multi-component, high-resolution and continuous real-time observation, the observation range can be extended from small scale to large area, which can provide important data support for analyzing the current situation of the atmospheric environment. Ground-based imaging differential absorption spectroscopy is generally used to detect a certain pollution source. This paper mainly studies its detection method for urban atmospheric boundary layer pollutant distribution. It introduces the principle of differential absorption spectroscopy (DOAS) based on Beer-Lambert law, and introduces the imaging principle of im-

aging system based on “push-broom”. Taking the common pollutant NO_2 in the atmosphere as an example, on June 12, 2018, the imaging telemetry experiment of NO_2 in the boundary layer was carried out in Science Island of Hefei City. The front end of the multi-core fiber bundle was coupled with the ultraviolet lens, and the back end was connected to the slit of the spectrometer. The ultraviolet lens was mounted on the two-dimensional rotating motor. Set the appropriate elevation angle of the two-dimensional rotating electric machine, and rotated it from 0° to 90° in the horizontal direction. The observation area included the suburb, power plant area and urban area. The zenith solar spectrum was selected as the reference spectrum, and the corresponding multi-channel spectra were combined and extracted for the measured spectrum and the reference spectrum. 38 spectra were obtained for each acquisition. Data inversion of all measured spectra was performed using the DOAS inversion method to obtain the differential slant column density (DSCD) of $38 \times 90 \text{ NO}_2$, and the density information was matched with the pixels on the spatial dimension according to the geometric model of the observation angle. After deducting the complex background, the two-dimensional distribution images of the NO_2 differential slant column density in the boundary layer of Hefei City were obtained, according to the scanning direction. Compared with the MAX-DOAS data observed at the same time, the correlation coefficients of the two in the suburbs, power plant area and urban area were 0.86, 0.87 and 0.83, respectively. The results showed that the system can effectively obtain the distribution information of atmospheric pollutant concentration in urban boundary layer.

Keywords Differential absorption spectroscopy; Urban boundary layer; Nitrogen dioxide; Two-dimensional distribution imaging

(Received Dec. 27, 2018; accepted Mar. 8, 2019)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者，本刊要求作者重写，这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文，要求言简意明、确切地论述文章的主要内容，**突出创新之处**。
2. 应拥有与论文同等量的主要信息，包括四个要素，即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素，例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下，英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围，以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据，如检测限、相对标准偏差等；结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。
3. 句型力求简单，尽量采用被动式，建议经专业英语翻译机构润色，与中文摘要相对应。用 A4 复印纸单面打印。
4. 摘要不应有引言中出现的内容，换言之，摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论，不得简单重复题名中已有的信息；不用非公知公用的符号和术语；不用引文，除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号，除相邻专业的读者也能清楚地理解外，在首次出现时必须加以说明，例如用括号写出全称。