

基于成像差分吸收光谱技术测量电厂SO₂排放方法研究

刘 进 司福祺* 周海金 赵敏杰 窦 科 王 煜 刘文清

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

摘要 介绍了一种测量烟羽污染气体二维分布的方法——成像差分吸收光谱(IDOAS)技术。该技术基于成像光谱仪,结合旋转平台实现对目标区域的二维扫描测量,获取目标区域的高光谱数据;采用差分吸收光谱(DOAS)算法对光谱进行处理,获取扫描区域内污染气体的二维分布图,进而对污染气体的分布及扩散趋势进行分析。对地基IDOAS系统及其测量原理进行了介绍,并开展外场实验,成功获取了电厂烟羽中的SO₂二维分布图,实现电厂污染排放的可视化;对SO₂排放率及平均浓度估算方法进行了分析,结合风速,利用获得的二维数据计算得到电厂SO₂排放率及平均浓度分别为210 kg/h、6.7 mg/m³。

关键词 光谱学; 二维分布; 成像差分吸收光谱技术; SO₂; 排放率

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0630003

Estimation of Sulfur Dioxide Emission from Power Plant Using Imaging Differential Optical Absorption Spectroscopy Technique

Liu Jin Si Fuqi Zhou Haijin Zhao Minjie Dou Ke Wang Yu Liu Wenqing

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

Abstract A method for measuring the two-dimensional distribution of air pollutants from power plant – imaging differential optical absorption spectroscopy (IDOAS) technique is introduced. It is based on an imaging spectrometer combining with a rotating platform, which can realize two-dimensional scanning and hyperspectral measurement of the target area. The spectrum is calculated using the differential optical absorption spectroscopy (DOAS) algorithm to get two-dimensional distribution of pollutant gas in the area. Then the diffusion trend of pollutant can be further analyzed. The ground-based IDOAS system and its principle are introduced, and a field experiment is performed. During the field experiment, the two-dimensional distribution of SO₂ from power plant smoke plume is acquired, realizing the visualization of power plant emissions. The SO₂ emission rate and average concentration estimation method is analyzed combining with wind speed. The power plant SO₂ emission rate and average concentration is evaluated respectively as 210 kg/h and 6.7 mg/m³.

Key words spectroscopy; two-dimensional distribution; imaging differential optical absorption spectroscopy technique; SO₂; emission rate

OCIS codes 300.1030; 300.6170; 010.1120

1 引 言

二氧化硫(SO₂)是最常见的硫氧化物,具有强烈的刺激性气味,易被空气中的粉尘催化氧化后形成硫酸型酸雨,是大气主要污染物之一;SO₂易被湿润的粘膜表面吸收生成亚硫酸、硫酸,对眼及呼吸道粘膜有强烈

收稿日期: 2014-12-08; 收到修改稿日期: 2015-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(41275037)

作者简介: 刘 进(1987—),男,博士研究生,主要从事差分吸收光谱技术方面的研究。E-mail: jinliu@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—),男,博士,研究员,工程院院士,主要从事环境光学特性、有害痕量气体的光学与光谱学监测方法、新型环境监测技术等方面的研究。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

的刺激作用,危害人体健康^[1]。长期以来大气中的SO₂主要来自火山喷发或有机物溶解过程,而二十世纪后随着现代工业的发展,人为排放源所造成的SO₂排放已成为大气中SO₂的主要来源^[2-3]。我国是燃煤大国,能源消费结构对煤的过分依赖导致了环境污染的加剧,在我国SO₂污染主要来自燃煤发电厂排放,因此迫切需要对电厂烟羽排放开展实时监测,以便有效控制和治理。

近年来,差分吸收光谱技术以其无需采样、易于操作、多组分实时分析、价格低廉、灵敏度高等优点,越来越广泛地应用到大气环境监测中^[4-10],而对工厂烟羽排放污染组分分析已有不少报道^[11-12]。本文采用成像差分吸收光谱(IDOAS)方法对烟羽内SO₂进行扫描成像,以实现燃煤电厂SO₂排放的实时监控。IDOAS技术使用成像光谱仪^[13-14]以扫描方式获取指定区域内的高光谱数据,通过差分吸收光谱(DOAS)算法获得痕量气体的二维浓度分布图,具有较高的空间分辨率。被动DOAS仪器每次测量获取的是一条光路上的痕量气体信息,IDOAS技术是被动DOAS技术的进一步发展,采用二维电荷耦合元件(CCD),每次测量可获取多条光路上的痕量气体信息,通过推扫、摆扫等手段对目标区域快速扫描,实现痕量气体信息的可视化测量。

目前国外已有采用IDOAS获取痕量气体的二维分布方面的研究,例如地基IDOAS技术测量火山烟羽^[15]及电厂烟羽^[16]、机载IDOAS技术测量痕量气体二维分布^[17],主要目的是验证IDOAS技术的可行性。在前期工作中已开展了地基IDOAS的相关研究^[18-19],比较详细地描述了地基IDOAS系统构成及其工作原理。本文针对地基IDOAS技术的测量理论与处理算法进行研究,并针对电厂烟羽开展实验,着重研究烟囱出口附近的SO₂浓度及排放率估算问题,促进IDOAS技术的发展,为环境监测提供实时有效的光学遥感方法。

2 测量原理与仪器

2.1 DOAS 算法

DOAS算法的基本原理为朗伯-比尔定律

$$\ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} = \sum_{j=1}^n \sigma'_j(\lambda) C_{\text{scdj}} + P, \quad (1)$$

式中 $I(\lambda)$ 为测量光谱, $I_0(\lambda)$ 为参考光谱; $\sigma'_j(\lambda)$ 为痕量气体的差分吸收截面,代表分子窄带吸收; C_{scdj} 为痕量气体 j 的斜柱浓度(SCD),代表痕量气体 j 的浓度在光路路径上的积分; P 为低阶多项式,包含瑞利散射、米散射造成的宽带吸收及分子宽带吸收,通常以高通滤波的方式去除。通过最小二乘法对(1)式求解,可以获得痕量气体 j 的斜柱浓度。详细的DOAS反演算法可参考文献[18]。

2.2 仪器与扫描测量

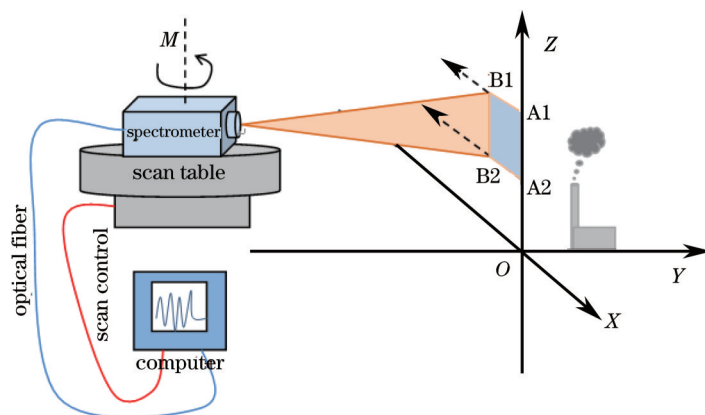


图1 地基IDOAS系统扫描简图

Fig.1 Sketch for ground IDOAS system scanning

图1所示为地基IDOAS扫描示意图^[19]。地基IDOAS系统主要包括紫外镜头、光谱仪、面阵CCD、旋转台、计算机等。目标区域的太阳散射光经紫外镜头收集后会聚到入射狭缝,通过光谱仪光栅色散照射到面阵CCD上,完成光电转换后被计算机记录下来。面阵CCD为512 pixel×2048 pixel,其中512对应空间维,2048对应光谱维,即每次测量可获得A1-A2纵列上的512条具有2048 pixel的光谱,对每条光谱进行DOAS反演,

获得对应区域的痕量气体信息。光谱仪安装在旋转台上绕 M 轴水平旋转,多次测量后视场由 A1-A2 逐渐转向 B1-B2,即可获取该区域的痕量气体二维分布信息。系统空间分辨率可由以下公式计算:

$$R_x = 2 \tan(\alpha/2)L, \quad (2)$$

$$W = 2 \tan(\beta/2)L, \quad (3)$$

$$R_y = nW/512, \quad (4)$$

式中 L 为光谱仪到目标区域的水平距离, α 为每次扫描测量电机的旋转角度, β 为系统视场角, W 为扫描带宽, n 为光谱合并数目。水平方向(即 A1-B1 方向)分辨率 R_x 由旋转角度 α 和距离 L 决定,在这里转台每次旋转角度为 0.25° ,而水平旋转时光谱仪瞬时视场为 0.22° ,小于电机旋转角度。扫描带宽 W (即 A1-A2)与视场角 β 和 L 相关,由于视场角为仪器不可变参数,因此为获取较好的成像效果,需要适当调整光谱仪与目标区域的距离,以确保获取完整的烟羽二维信息。垂直方向(即 A1-A2 方向)上的分辨率 R_y 取决于扫描带宽及光谱合并数目 n 。光谱合并是指在进行 DOAS 反演前,将测量到的 512 条光谱每 n 条进行一次合并,例如 n 为 16 时,合并后得到的光谱数目为 32。光谱合并可提高信噪比,但会降低空间分辨率,因此应选择适当的合并数目。系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System Parameters

Spectral resolution	About 0.4 nm
Spectral window	290~420 nm
CCD detector size	2048 pixel × 512 pixel
Field of view	15°
Spatial resolution	About 3.4 m × 3.5 m ($L=770$ m, $n=8$)

2.3 排放估算分析

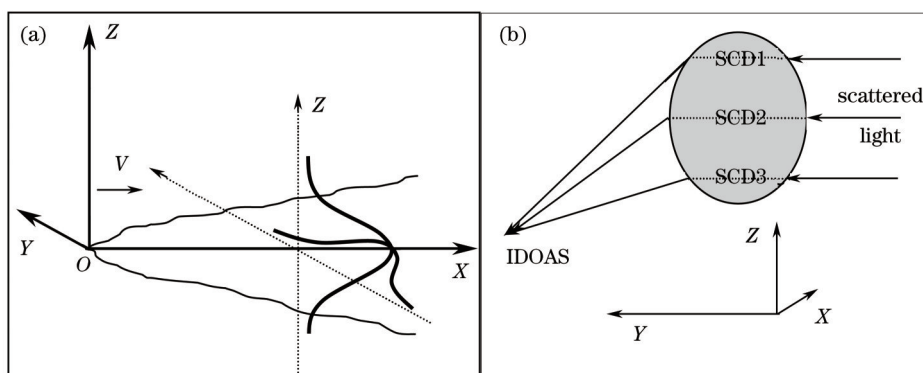


图 2 (a) 烟羽扩散模型; (b) 光路示意图

Fig.2 (a) Plume diffusion model; (b) light path schematic

图 2(a)所示为烟羽扩散模型示意图,其中 V 为风速,有效源位于坐标原点 O 处,平均风向与 X 轴平行。假设污染物在输送扩散中质量守恒,污染源的源强均匀、连续,在任一垂直于 X 轴的烟气截面上有

$$Q = \iint VC \, dy \, dz, \quad (5)$$

式中 Q 为源强,即单位时间内的污染物排放量, V 为平均风速, C 为烟羽内污染气体浓度。IDOAS 每次测量获得的是一组随高度分布的斜柱浓度信息,斜柱浓度表示浓度在路径上的积分,假设烟羽内的散射路径与 Y 轴平行,如图 2(b)所示,则斜柱浓度公式可写为

$$C_{scd} = \int C \, dy, \quad (6)$$

结合(5)、(6)式进一步得到 SO_2 的源强计算公式为

$$Q = \int VC_{scd} \, dz. \quad (7)$$

当一组斜柱浓度对高度积分时,可得到与风向垂直的截面上的 SO_2 浓度信息,积分结果可理解为厚度为

1 cm 的截面内 SO_2 的分子数,通过对截面面积 D 的合理估算,采用(8)式计算烟羽内 SO_2 的平均浓度 C :

$$C = (\int C_{\text{scd}} dz) / D. \quad (8)$$

3 结果与讨论

3.1 实验开展

2013年7月8日,采用地基IDOAS系统对合肥某电厂开展了现场观测实验,电厂烟囱高度为240 m,测量时间为下午15:00左右,太阳天顶角为 41° ,期间当地风向为南风3~4级(3.4~7.9 m/s),烟羽向北扩散。为获得较好的观测效果,将系统安装于电厂烟囱西侧约770 m处。实验观测图如图3所示,调整仪器底座仰角,仪器视场下边缘与水平线夹角为 α_1 ,上边缘与水平线夹角为 α_2 ,使得烟羽完全处于视场中。需要注意的是,由于仪器整体存在一定仰角,与上文讨论的扫描带宽有所不同,现场扫描带宽可通过 $H_2 - H_1$ 计算得到。实验中共开展了两次扫描,每次完整扫描时间约为10 min,所得几何参数如表2所示。

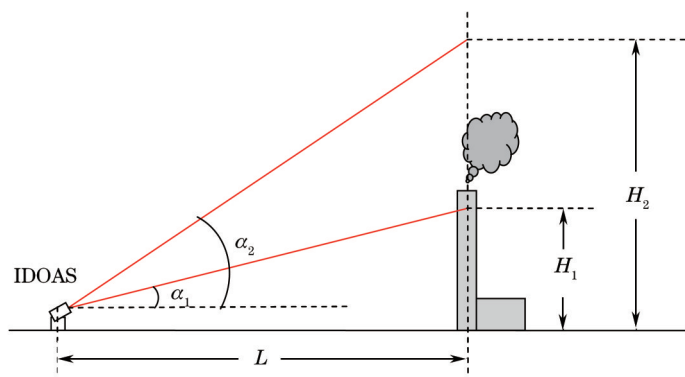


图3 现场测量示意图

Fig.3 Field measurement sketch

表2 几何参数

Table 2 Geometric parameters

	L/m	$\alpha_1 / (^\circ)$	$\alpha_2 / (^\circ)$	H_1/m	H_2/m	W/m	n	R_b/m	$\alpha / (^\circ)$	R_s/m
1	770	11.0	26.0	149	375	226	10	4.3	0.25	3.4
2	770	11.7	26.7	159	378	228	8	3.6	0.25	3.4

在被动DOAS技术中,采用太阳散射光作为光源,需要对其夫琅禾费结构进行扣除,参考谱的选择非常重要。处理中选择上风向第一次测量所得光谱作为参考谱,可在扣除夫琅禾费结构的同时,尽量减小大气背景信息的影响。另外,由于成像光谱仪不同空间维上的仪器函数是不同的,如果按照传统地基被动DOAS仪器处理方法选择一条固定参考谱,会造成夫琅禾费结构不能完全扣除,因此反演中选择相对应的空间维测量光谱作为参考谱。测量过程中实时调整积分时间,以保证在光强不饱和的情况下获得较大值,从而提高信噪比。

3.2 DOAS反演与成图

图4所示为烟羽中心一条测量谱拟合实例,测量时间为15:51,采用三阶多项式进行拟合,拟合区间选择 SO_2 具有明显吸收结构的波段,即305~330 nm,最终得到的 SO_2 斜柱浓度为 1.15×10^{17} molecules/cm²,拟合残差为 3.27×10^{-3} ,对应的拟合误差为 3.8×10^{15} molecules/cm²。

对每次测量的数据进行DOAS拟合反演,将所得SCD数据进行二维拼图,获得烟羽内 SO_2 分布,如图5所示,图5(a)、(b)分别为第1、2次扫描结果,在此测量的是烟羽刚从烟囱口排出的情况,可以比较直观地观察到烟羽中 SO_2 排放,其中水平距离为0处为烟囱所在位置。由于当天风速较大(南风), SO_2 随风向左(北方)扩散趋势明显,上下扩散距离约为30 m;烟羽中心区域的 SO_2 斜柱浓度较高,最高值达到 1.68×10^{17} molecules/cm²,这主要是由两个因素造成,一是经过该区域的光线在烟气中有较长的光程,二是该区域 SO_2 浓度相对较高。两幅图中背景区域 SO_2 斜柱浓度相对较低,基本保持在 1×10^{16} molecules/cm²左右,且没有出现上部分(高仰角)SCD值低,下部分(低仰角)SCD值高的情况,这说明采用上风向第一次测量谱作为参考谱是有效的。观察图5(b)可以发现,在下

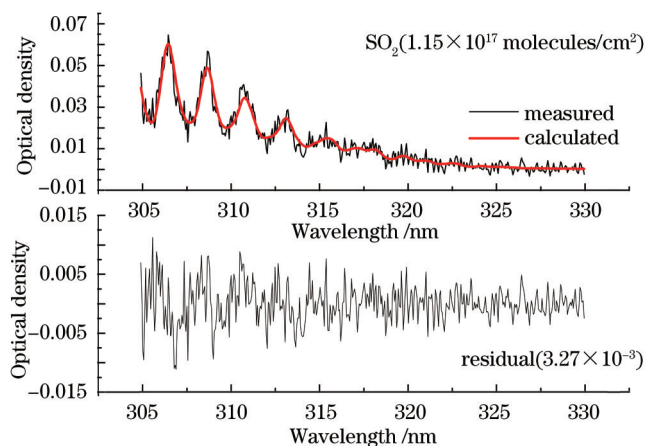


图 4 DOAS 拟合反演实例

Fig.4 Fitting result of DOAS retrieval

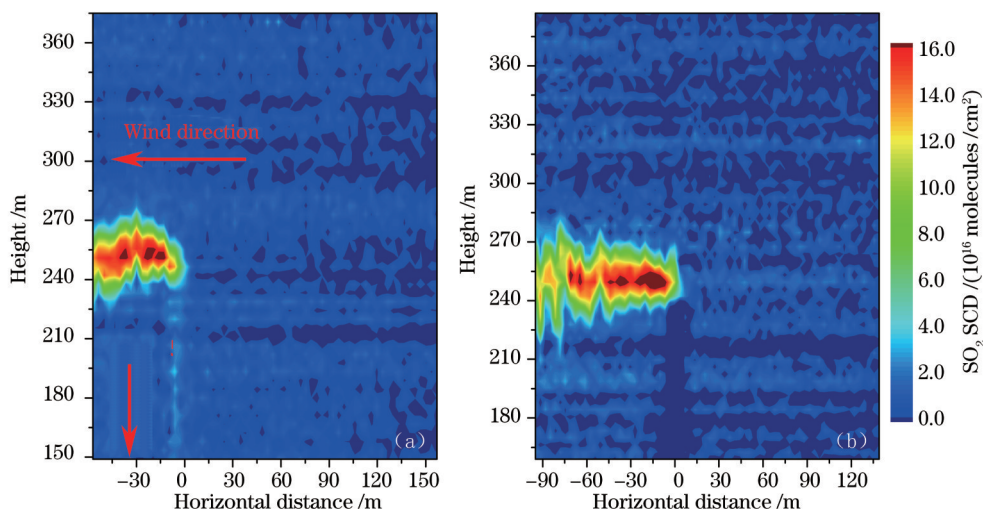


图 5 SO₂二维分布图。(a)第1次扫描结果;(b)第2次扫描结果

Fig.5 Two-dimensional distribution of SO₂. (a) First scan;(b) second scan

风向 50 m 范围内,烟羽上下扩散比较均匀,随着距离增加,上下扩散范围开始增大,并且表现出一定的随机性。

3.3 排放率及浓度估算

图 6 所示为第 1 次扫描第 57 次测量所得的 SO₂ SCD 随高度分布图,对应的水平位置为 -40 m,SO₂ 基本分布在与烟囱相同的高度,上下扩散比较对称,即在较高风速下,气体在垂直风速方向上扩散速度比较均匀。

计算排放率之前,需要对烟囱口处的风速进行估算,采用国标 GB/T 3840-91 中计算烟囱口风速的经验公式:

$$Z_2 \leq 200 \text{ m}, V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^m, \quad (9)$$

$$Z_2 > 200 \text{ m}, V_2 = V_1 \left(\frac{200}{Z_1} \right)^m, \quad (10)$$

式中 V_1 、 V_2 分别为距离地面高度为 Z_1 、 Z_2 处的风速, m 为大气稳定度参数。测量期间风速平均值 $V_1=6 \text{ m/s}$, $Z_1=10 \text{ m}$, 烟囱高度 $Z_2=240 \text{ m}$, 查表得到 $m=0.25$, 采用(10)式计算得到烟囱口处的风速 $V_2=12.7 \text{ m/s}$ 。

采用(7)式对源强进行计算,结果如图 7 所示,可以发现,两次扫描结果是基本一致的,在烟囱口下风向 20~50 m 之间(图 7 虚线框内),计算得到的源强基本稳定,而第二次扫描探测到在下风向 50 m 之后,源强表现出较大的波动性。采用虚线框内的源强平均值作为电厂的实际排放率,计算 SO₂ 排放率为 $5.5 \times 10^{23} \text{ molecules/s}$, 在标准大气压下进行单位转化则为 210 kg/h。另外,实验期间采用车载 DOAS 系统^[20]对电厂 SO₂ 排放率进行了同步测量,结果测得 SO₂ 排放率为 237 kg/h,两者偏差为 11.4%。估算结果与车载 DOAS 测量结果对比偏差比较小,说明采用 IDOAS 系统测量电厂污染排放是可行的。

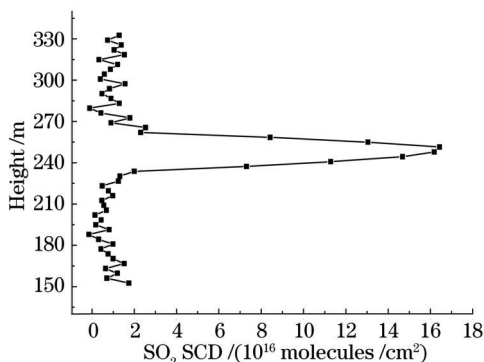


图 6 SO₂斜柱浓度随高度的分布趋势

Fig.6 Change of SO₂ SCD with height

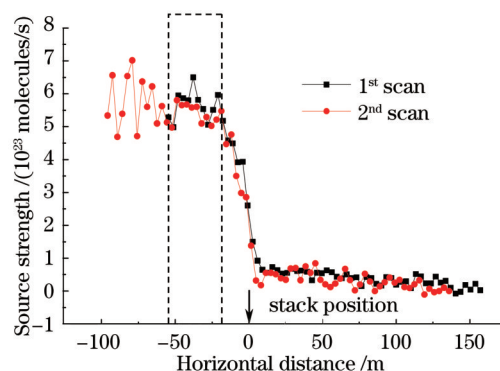


图 7 源强计算结果

Fig.7 Results of source intensity

选择第 1 次扫描第 57 次测量数据对 SO₂ 平均浓度进行计算,假设烟羽在垂直风速的截面上是均匀扩散的,即截面为圆形,以烟羽上下平均距离 30 m 作为截面直径,则截面面积 D 为 706.8 m²,通过(8)式计算得到截面处 SO₂ 的平均浓度为 6.3×10^{19} molecules /m³,转化为标准状况下的浓度约为 6.7 mg /m³。

对排放率的估算误差主要存在于风速的不确定性上,而对浓度的估算误差主要决定于对截面面积的判断。需要明确的是,假设光线在烟羽中经过一次散射后直接到达系统,如果考虑多次散射,光线在烟羽内的光程会相应增加,浓度的估算结果将会有所降低。

4 结 论

对地基成像 DOAS 技术原理及仪器进行了介绍,开展地基成像 DOAS 实验,成功地获取了高分辨率的烟羽排放二维分布图,目标区域分辨率达到 3.4 m×3.5 m;对烟羽内 SO₂ 分布进行了分析,结合风场数据,对电厂 SO₂ 排放通量进行了估算,最终得到的排放率为 210 kg /h;进一步对烟羽内 SO₂ 平均浓度进行了估算,结果符合国家排放标准。实验对烟羽近距离观测,获得了较好的效果,获得的高分辨率二维数据有利于排放率的精确计算。下一步可开展远距离电厂观测实验以获得更大范围的污染气体二维分布,进而对排放污染物在大气中的传输及演化进行研究。

参 考 文 献

- 1 W J Gauderman, R McConnell, F Gilliland, *et al.*. Association between air pollution and lung function growth in southern California children[J]. *Am J Resp Crit Care*, 2000, 162(4): 1383-1390.
- 2 B Zhao, P Wang, J Z Ma, *et al.*. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China[J]. *Atmos Chem Phys*, 2012, 12(1): 481-501.
- 3 F C Wu, P H Xie, A Li, *et al.*. Observations of SO₂ and NO₂ by mobile DOAS in the Guangzhou eastern area during the Asian Games [J]. *Atmos Meas Tech*, 2013, 6(9): 2277-2292.
- 4 Zhou Haijin, Liu Wenqing, Si Fuqi, *et al.*. Retrieval of atmospheric NO₂ vertical profile from multi-axis differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101007.
周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 被动多轴差分吸收光谱技术监测大气 NO₂ 垂直廓线研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1101007.
- 5 T Wang, F Hendrick, P Wang, *et al.*. Evaluation of tropospheric SO₂ retrieved from MAX-DOAS measurements in Xianghe, China [J]. *Atmos Chem Phys*, 2014, 14(20): 11149-11164.
- 6 K Grossmann, U Friess, E Peters, *et al.*. Iodine monoxide in the western Pacific marine boundary layer[J]. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13(6): 3363-3378.
- 7 Liu Jin, Si Fuqi, Zhou Haijin, *et al.*. Research on the atmospheric water vapor column density with passive multi-axis differential optical absorption spectroscopy technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801002.
刘 进, 司福祺, 周海金, 等. 被动多轴差分吸收光谱技术测量大气中水汽柱浓度方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0801002.
- 8 Fan Guangqiang, Zhang Tianshu, Fu Yibin, *et al.*. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1014003.

- 范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014003.
- 9 Wu Fengcheng, Xie Pinhua, Li Ang, *et al.*. Research of aerosol extinction inverted with look-up table method based on multi-axis differential optical absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0601002.
- 吴丰成, 谢品华, 李 昂, 等. 基于多轴差分吸收光谱技术的查找表法反演气溶胶消光廓线研究[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601002.
- 10 H Irie, H Takashima, Y Kanaya, *et al.*. Eight-component retrievals from ground-based MAX-DOAS observations[J]. Atmos Meas Tech, 2011, 4(6): 1027-1044.
- 11 Sun Youwen, Liu Wenqing, Xie Pinhua, *et al.*. Measurement of industrial gas pollutant emissions using differential optical absorption spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(1): 010701.
- 孙友文, 刘文清, 谢品华, 等. 差分吸收光谱技术在工业污染源烟气排放监测中的应用[J]. 物理学报, 2013, 62(1): 010701.
- 12 Xie Pinhua, Liu Wenqing, Zheng Zhaohui, *et al.*. Differential optical absorption spectroscopy (DOAS) technique applied to monitor sulfur dioxide in flue gas[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(3): 271-276.
- 谢品华, 刘文清, 郑朝晖, 等. 差分光学吸收光谱 (DOAS) 技术在烟气 SO₂ 监测中的应用[J]. 光子学报, 2000, 29(3): 271-276.
- 13 Xue Qingsheng, Cao Diangsheng, Yu Xiangyang. Optical design of neotype Schwarzschild spectral imaging system with a large relative aperture[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116001.
- 薛庆生, 曹佃生, 于向阳. 新型大相对孔径 Schwarzschild 光谱成像系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116001.
- 14 Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010008.
- 王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010008.
- 15 H Louban, N Bobrowski, D Rouwet, *et al.*. Imaging DOAS for volcanological applications[J]. Bull Volcanol, 2009, 71(7): 753-765.
- 16 F Lohberger, G Honninger, U Platt, *et al.*. Ground-based imaging differential optical absorption spectroscopy of atmospheric gases [J]. Appl Opt, 2004, 43(24): 4711-4717.
- 17 A Schonhardt, P Altube, K Gerilowski, *et al.*. A wide field-of-view imaging DOAS instrument for continuous trace gas mapping from aircraft[J]. Atmos Meas Tech Discuss, 2014, 7: 3591-3644.
- 18 Si Fuqi, Xie Pinhua, Klaus-Peter Heue, *et al.*. Hyperspectral imaging differential optical absorption spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 6018-6023.
- 司福祺, 谢品华, Klaus-Peter Heue, 等. 超光谱成像差分吸收光谱技术研究[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 6018-6023.
- 19 Si Fuqi, Xie Pinhua, Liu Yu, *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.
- 20 Li Ang, Xie Pinhua, Liu Wenqing, *et al.*. Studies on the determination of the flux of gaseous pollutant from an area by passive differential optical absorption spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(1): 28-32.
- 李 昂, 谢品华, 刘文清, 等. 被动差分吸收光谱法测量区域内污染气体排放通量的方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(1): 28-32.

栏目编辑: 吴秀娟