

机载成像差分吸收光谱技术测量区域 NO₂ 二维分布研究

刘进 司福祺 周海金 赵敏杰 窦科 王煜 刘文清

Observation of two-dimensional distributions of NO₂ with airborne imaging DOAS technology

Liu Jin Si Fu-Qi Zhou Hai-Jin Zhao Ming-Jie Dou Ke Wang Yu Liu Wen-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034217 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034217

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034217>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氧气 A 带吸收系数的温度依赖关系研究

Study on the temperature dependence of oxygen A-band absorption coefficient

物理学报.2014, 63(21): 214204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214204>

温度压强对 CO₂ 吸收光谱的影响

Influence of temperature and pressure on absorption spectrum of around 1.6 μm for differential absorption lidar

物理学报.2014, 63(17): 174203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.174203>

直射太阳光红外吸收光谱技术遥测大气中二氧化碳柱浓度

Study on remote sensing of carbon dioxide column concentration in the atmosphere by direct-sun infrared absorption spectroscopy

物理学报.2013, 62(12): 124206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.124206>

基于机载平台的 NO₂ 垂直廓线反演灵敏度研究

The sensitivity study of NO₂ vertical profile retrieval by airborne platform

物理学报.2013, 62(10): 104214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104214>

直射太阳光差分吸收光谱法测量合肥 NO₂ 整层柱浓度

Measurement of NO₂ total vertical columns by direct-sun differential optical absorption spectroscopy in Hefei city

物理学报.2012, 61(11): 114209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.114209>

机载成像差分吸收光谱技术测量区域NO₂二维分布研究*

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, 合肥 230031)

(2014年5月14日收到; 2014年8月1日收到修改稿)

本文主要介绍了一种快速测量区域大气痕量气体二维分布的方法——机载成像差分吸收光谱(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)技术. 该技术基于成像光谱仪, 利用DOAS算法, 对痕量气体大范围分布快速扫描成像, 可实现污染源扩散趋势的可视化观测, 应用于污染源定位、污染源排放率监测、污染物传输演化等研究. 文中详细介绍了研制的机载成像DOAS系统, 并利用该系统开展飞行实验, 快速获取了飞行轨迹上空的NO₂浓度分布. 实验中针对重点关注区域进行扫描测量, 成功获取了高分辨率的NO₂二维分布图, 分析了污染扩散趋势, 并结合风场数据, 估算污染点源的NO₂排放率为1570 kg/h.

关键词: 机载, 成像DOAS, NO₂, 二维分布

PACS: 42.68.Ca, 42.68.Kh, 42.79.Pw

DOI: 10.7498/aps.64.034217

1 引言

近年来, 中国经济快速发展, 而环境污染问题却日益严峻, 高速发展的现代化工业所造成的各种污染排放对中国生态环境造成了严重破坏. 为实行行之有效的环境保护政策, 需要对各种环境污染物的形成、分布及扩散进行充分的了解. 差分吸收光谱技术(DOAS)作为一种测量大气污染成分^[1-5](SO₂, NO₂, O₃等)的有效方法, 已经越来越广泛的应用于大气环境监测方面.

DOAS技术于上世纪80年代被提出后, 逐渐形成了被动和主动两个大的发展方向. 主动DOAS采用人造光源, 而被动DOAS采用自然光(主要是太阳散射光), 对于大范围的污染气体测量, 更适合采用被动DOAS. 近几年来被动DOAS技术有较大发展, 包括MAX-DOAS^[6-8]、车载DOAS^[9,10]、成像DOAS^[11]等技术在污染气体监测领域得到应用, 其中成像DOAS技术的优势是可以获取高分辨的痕量气体二维分布, 该技术的研究还相对较少. 成

像DOAS技术, 基于成像光谱仪, 以扫描方式获取指定范围内的高光谱数据, 通过DOAS算法对数据进行处理, 获得痕量气体的二维浓度分布图, 具有较高的分辨率. 实际上, 国外已有采用成像DOAS获取痕量气体的二维分布方面的研究, 例如地基成像DOAS技术测量火山烟羽^[12,13]及电厂烟羽^[14]、机载成像DOAS技术测量痕量气体二维分布^[15,16].

在前期工作中已开展了地基成像DOAS的相关研究, 比较详细的描述了成像DOAS系统构成及工作原理^[17,18]. 本文将进一步以机载成像DOAS技术为研究目标, 对其测量理论与方法进行介绍, 并利用自行研制的机载系统开展机载观测实验. 通过实验, 对天津与唐山地区的污染气体NO₂进行大范围监测, 验证机载成像DOAS技术快速获得了大区域上较高分辨率的NO₂分布, 研究NO₂扩散及输送情况的可行性; 结合风场数据, 对观测到的点源排放率进行了估算. 希望通过本项工作解决机载成像DOAS相关的反演算法问题, 促进成像DOAS技术的发展, 为环境监测提供实时有效的光学遥感

* 国家自然科学基金(批准号: 41275037)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

方法.

2 测量技术

结合机载平台高空快速移动的优势, 成像 DOAS 技术可实现较大区域痕量气体二维分布的快速成像处理. 仪器视场直接指向地面, 如图 1 所示, 目标区域红色部分纵列映射到光谱仪入射狭缝, 太阳散射光进入狭缝后按照波长分散开, 通过二维 CCD 阵列记录数据, 每一行 CCD 像元对应于纵列上一点的光谱. 在这里, 二维 CCD 为 512×2048 阵列, 512 对应空间维, 2048 对应光谱维, 即每次

测量可获得纵列上 512 个点的光谱, 每条光谱具有 2048 个数据. 结合 DOAS 技术对光谱进行反演可得到纵列上每一点的痕量气体斜柱浓度 SCD (slant column density).

DOAS 拟合获得的是斜柱浓度 SCD, 即浓度沿路径的积分, 结合辐射传输模型模拟计算大气质量因子 AMF (air mass factor) 可将 SCD 转化为与路径无关的垂直柱浓度 VCD (vertical column density), 通过这种方式可以获得纵列上的痕量气体浓度信息. 仪器沿着垂直于入射狭缝方向扫描, 即可获得痕量气体垂直柱浓度的二维分布.

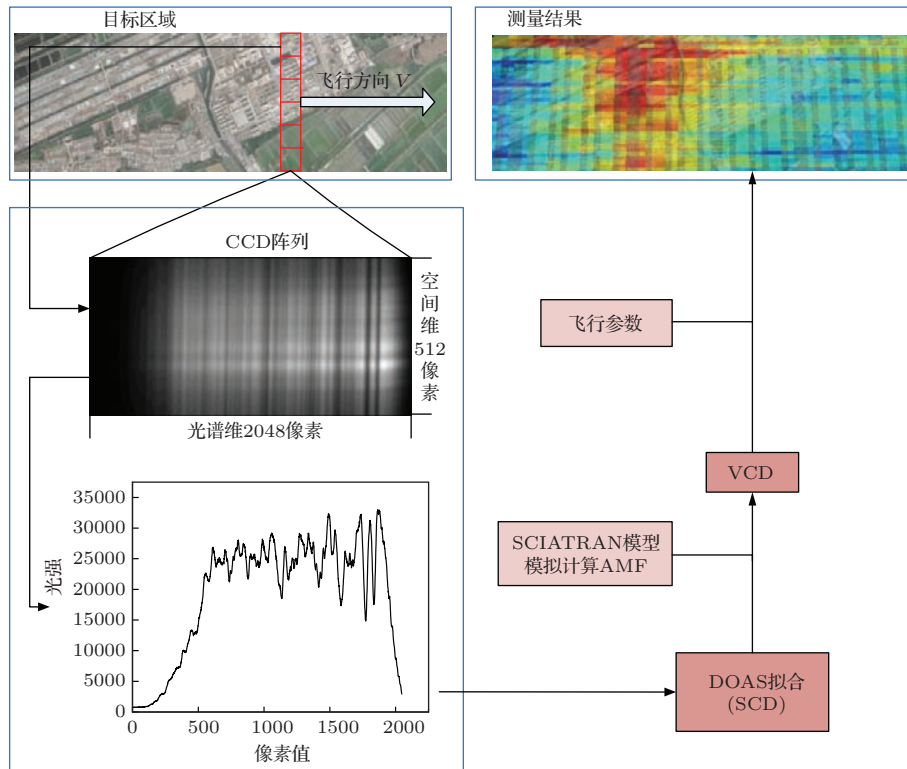


图 1 (网刊彩色) 机载成像 DOAS 技术流程图

2.1 仪器组建

如图 2 所示, 机载成像 DOAS 系统由紫外镜头、成像光谱仪、面阵 CCD 探测器、温度控制系统、控制计算机与二次电源等组成. 温度的稳定是系统性能的保证, 温度的漂移将使光谱产生漂移, 给后期数据处理带来误差, 因此需采取措施保障系统温度稳定. 温度控制中主要的加热器件为电阻式柔性加热片, 采用 PWM 模式实现温度的精确控制. 另外 CCD 探测器通过自身携带的温控系统, 可保持

在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下稳定工作, 有效的降低了系统噪声. 二次电源将机上供电系统提供的 28 V 电源转换为 12 V 电源.

紫外镜头将散射的太阳光汇聚到入射狭缝上, 入射光信号进入成像 DOAS 光谱仪中, 通过光栅色散和光谱成像, 由面阵 CCD 探测器完成光谱维与空间维的光谱采集工作, 数字化后通过 USB 传导到计算机中存储, 通过 DOAS 分析存储的光谱得到痕量气体信息, 系统参数如表 1 所示.

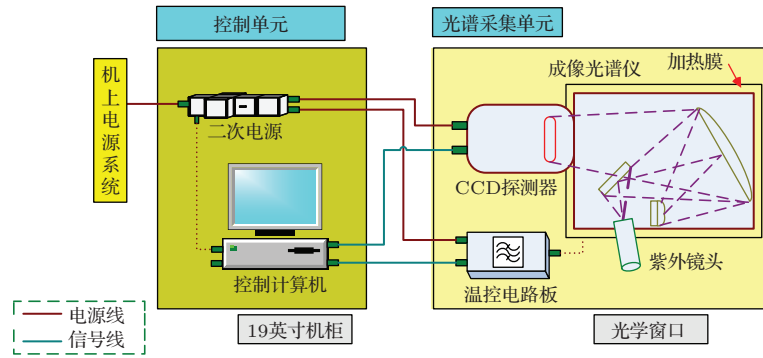


图2 (网刊彩色) 系统结构示意图

表1 成像 DOAS 系统参数

Parameter	Specification
Spectral resolution	0.4 nm
Spectral window	300—410 nm
CCD Detector size	2048 × 512
Field of view	15°

整个仪器通过减震器安装在飞机上, 其入射狭缝垂直于飞行方向. 图3为飞机扫描示意图, 其中V表示飞行方向, D为单次数据采集期间飞机所飞过的距离, 即系统沿飞行方向上的分辨率, 由飞行速度和积分时间决定. 另外数据的存储与读取需要一定的时间, 这将会在两次测量之间形成一个较小的空白带. 系统视场角 α 为15°, 扫描带宽W与飞机飞行高度H及视场角 α 有关, 可通过下式计算:

$$W = 2H \cdot \tan(\alpha/2). \quad (1)$$

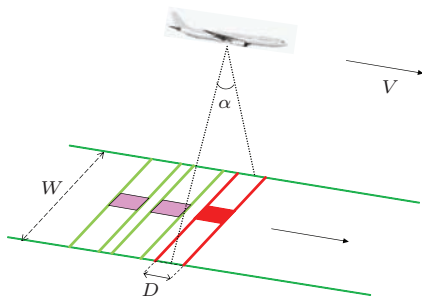


图3 (网刊彩色) 飞机扫描示意图

垂直飞行方向上的地面分辨率由视场角、飞行高度及 CCD 空间维像素 (CCD 阵列的行数) 决定. 为确定仪器成像质量, 采用氙灯对系统进行了测试. 将氙灯放置在系统视场中心处, 距离仪器约 3 m, 可视为点源, 观察到氙灯在仪器上所成像如

图4所示, 其空间维上的半高宽约占8个像素, 即系统的空间最小分辨率为8个像素, 因此需要将最少8行光谱数据进行合并. 光谱合并后, 垂直飞行方向上的分辨率将会降低, 而这在一定程度上可提高信噪比, 降低探测限. 各相加行的定标波长和狭缝函数要非常接近, 否则会增大 DOAS 拟合误差. 垂直飞行方向上的分辨率可由下式计算得到:

$$R_x = 2H \cdot \tan[(\alpha \cdot x/N)/2], \quad (2)$$

其中 N 为空间维像素值, x 为合并数目. 假设飞行高度为 10 km, 合并数目为 8, 则垂直飞行方向上的地面分辨率为 40.9 m.

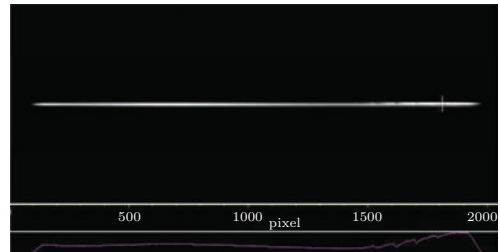


图4 (网刊彩色) 氙灯在仪器上的像

2.2 DOAS反演算法

DOAS 技术的基本原理为朗伯比尔定律, DOAS 分析得到的结果为痕量气体的斜柱浓度 SCD.

$$\ln \left[\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \right] = \sum_{j=1}^n \sigma'_j(\lambda) \text{SCD}_j + P, \quad (3)$$

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, P 为低阶多项式, 包含瑞利散射、米散射造成的宽带吸收以及分子宽带吸收, 通常以高通滤波的方式去除. 通过最小二乘法对上式求解, 可以获得痕量气体 j 的斜柱浓度 SCD.

结合大气质量因子AMF将SCD转换为与路径无关的垂直柱浓度VCD为

$$\text{VCD} = \frac{\text{SCD}}{\text{AMF}}. \quad (4)$$

大气质量因子与太阳角度、气溶胶参数、观测角度及波长等多种因素有关, 本文将采用SCIA-TRAN大气辐射传输模型对AMF进行计算.

3 结果与分析

2013年5月1日, 机载成像DOAS实验在天津及唐山地区顺利开展, 如图5所示为飞行轨迹图, 飞机从天津滨海机场出发, 经海面达到唐山地区. 根据扫描带宽, 对北疆电厂、唐山曹妃甸区滨海镇等重点关注区域设计飞行线路, 以获取更大范围上的痕量气体二维分布图.

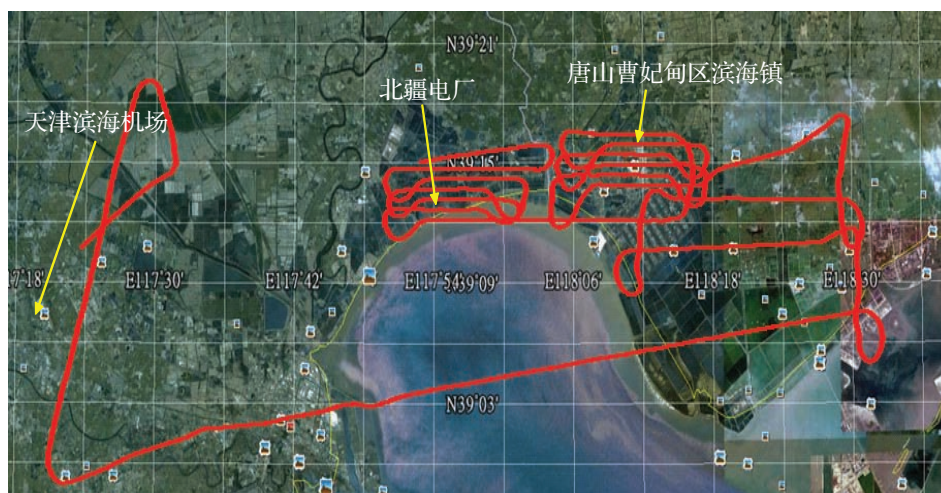


图5 (网刊彩色) 飞行轨迹

3.1 DOAS拟合

反演过程中需要一个干净区域的测量谱作为参考谱, 用于扣除夫琅禾费结构并减去平流层背景的影响, 选择一个较好的参考谱要考虑到以下几个方面: 1) 飞机到达指定巡航高度; 2) 飞行下方无云; 3) 光强适中. 最终确定的参考谱为位于沿海附近的农田上方的观测谱, 经纬度为[E118.02854°, N39.22416°], 时间为5月1日12时1分30秒.

由于CCD芯片不同空间维上的仪器函数是不一样的, 对测量谱进行DOAS拟合需要选择对应的参考谱, 即相同CCD采集的参考谱. 图6为一光谱的NO₂反演效果实例, 光谱采集时间为10时37分02秒, 经纬度为[E118.39392°, N39.18014°], 设置合并数目为16, 则每次测量共有32条测量谱, 选择第15条测量谱和对应的第15条参考谱进行拟合, 拟合波段为350—390 nm, O₃同时参与反演, 另外将Ring效应作为一种吸收结构参与拟合进行扣除, 反演得到的NO₂的浓度为2.39 × 10¹⁶ molec/cm², 拟合的剩余结构的均方根(Residual)为6.14 × 10⁻⁴, 对应的NO₂拟合误差7.517 × 10¹⁴

molec/cm². DOAS拟合参数如表2所示.

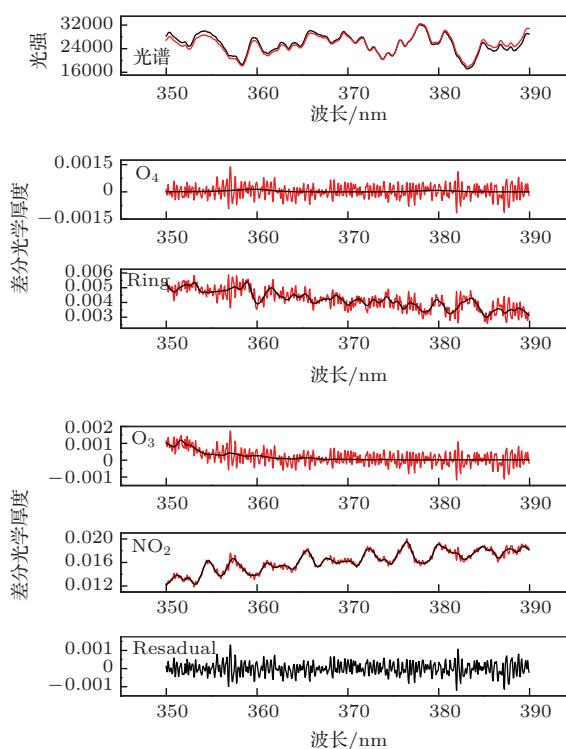


图6 (网刊彩色) DOAS拟合效果图

表2 DOAS拟合参数

参数	说明
拟合区间	350—390 nm
波长标定	基于高分辨率太阳谱 (Kurucz, 2010)
吸收截面	
NO ₂	Vandaele(1998) 294 K
O ₃	Voigt(2001) 246 K
Ring 效应	由参考谱计算得到
多项式阶数	3阶

3.2 NO₂二维分布图

通过DOAS拟合得到的是NO₂斜柱浓度SCD, 在进一步的分析中需要将SCD转换为VCD. 气溶胶是影响大气质量因子的重要因素^[19], 在成像DOAS实验中, 同时在飞机上安装了一台激光雷达参与联合观测, 以获取飞行轨迹上空的气溶胶信息. 激光雷达提供飞行高度以下的气溶胶光学厚度AOD(aerosol optical depth), 飞机指定巡航高度为3.6 km, 设定3.6 km以下的气溶胶消光系数随高度呈指数分布, 可将AOD转换为消光廓线. 将所得的消光廓线输入到SCIATRAN大气辐射传输模型^[20]模拟计算大气质量因子, 主要参数设置如下:

- 1) 工作模式: 球形模式下, 采用联合微积分CDI方法计算.
- 2) 气溶胶输入: 3.6 km以下采用激光雷达获取

的数据, 3.6 km以上采用LOWTRAN数据库中的对流层及平流层标准大气.

- 3) 计算波长: DOAS拟合波段中心波长370 nm.
- 4) 观测模式: 卫星.
- 5) 用户定义高度: 3.6 km.

飞行时段为10:16—12:15, 期间太阳天顶角由35°逐渐减小到24°, 而气溶胶光学厚度随时间有较剧烈变化, 说明在不同地区气溶胶光学厚度差异较大. AMF计算的结果如图7所示, 可见大气质量因子同时受AOD和SZA的影响.

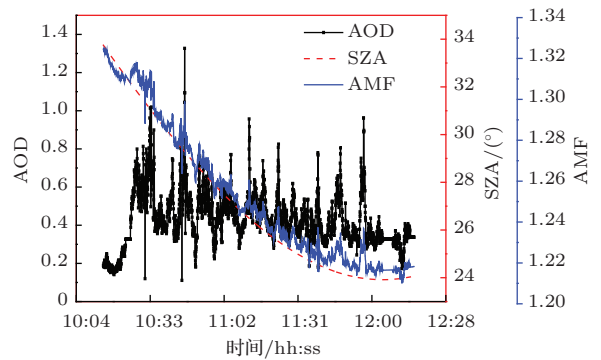


图7 (网刊彩色) 大气质量因子

利用计算得到的AMF, 将DOAS拟合得到的SCD转化为VCD后, 结合经纬度数据信息得到飞行轨迹上空的NO₂浓度分布, 如图8所示, 黑线左边为天津宁河县, 右边为唐山曹妃甸. 通过对NO₂

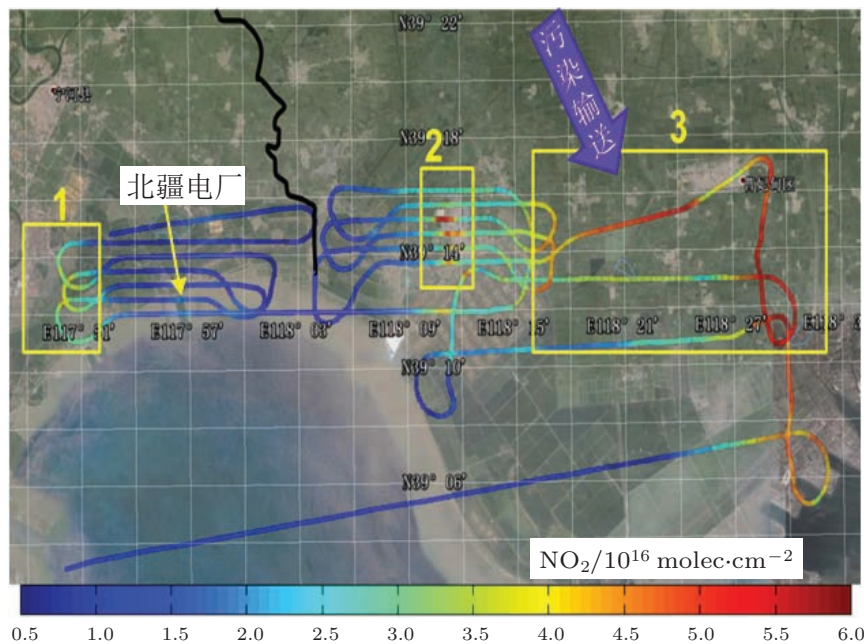


图8 (网刊彩色) 飞行轨迹下的NO₂柱浓度

浓度分布分析,可以快速找到飞行区域内的污染区(图中三个黄色方框).通过地图数据显示,在1、2区域存在较多的工厂烟羽排放;在区域3存在着较大面积的高浓度NO₂污染,但在该区域并未发现明显的排放源,很可能由自上风向的污染输送造成(测量当天曹妃甸地区有4—5级西北风);另外在重点关注区北疆电场并未发现明显的污染排放,这与当天在该区域工作的车载DOAS所获得的结果是一致的.

需要注意的是,图8中的数据采用的是全合并方式进行计算的,即将每次测量的空间维512条光谱数据全部加权平均,可有效减少数据计算时间,快速寻找污染源.为获得高分辨率的NO₂浓度分布图,进一步对污染排放进行分析,将每次测量的512条谱,每16条进行合并,即每次测量获得垂直飞行方向上32个NO₂数据,本次试验中飞行高度H为3600 m,通过(1),(2)式计算得到飞行带宽W为948m,垂直飞行方向上的分辨率为29.5 m.沿飞行方向上的分辨率取决于飞行速度(50—80 m/s)和积分时间(1s),约为50—80 m.结合飞行经纬度数据,获得的高分辨率NO₂分布如图9所示,可以更详细的看出在区域2存在着点源排放,且污染物向下方向扩散,区域4的污染来自上方点源的污染输送.对比其他转弯处的数据可以说明,在区域1、3两个转弯处的污染是确切存在的,并非因转弯时飞机姿态变化所造成.

3.3 通量分析

为对区域2中的点源排放速率进行估算,首先要对该区域进行的数据进行网格化,并将经纬度

信息转换为距离信息.将区域2内的数据网格化为50×50像素数据集,并将区域2视为平面,经度方向1度对应距离约为86 km,纬度方向1度对应距离为111 km,以点[118.15163, 39.22341]作为原点计算距离.所得结果如图10(a)所示,可以明显的看到烟羽排放扩散趋势:点源排放出来的NO₂主要沿着近地面风向扩散(西北风),如图中黑箭头所示,而在偏离下风向的黑色圆圈内出现了较高的污染,可能是由于随着烟羽的抬高,高空风向出现变化,造成污染在此出现一定的汇聚.

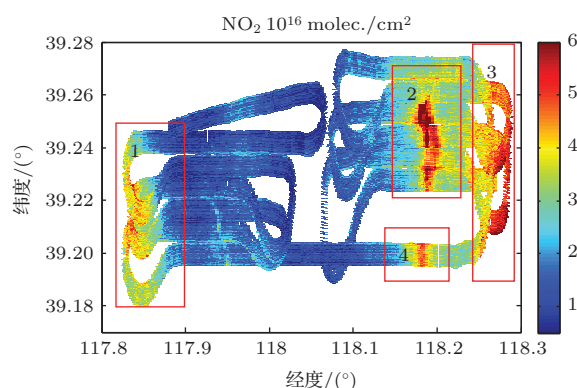


图9 (网刊彩色) NO₂二维分布图

对于网格化后的数据,共50行,选取排放源下风向附近即第30行数据计算排放率,位置如图10(a)中黑色矩形条带所示,VCD数据变化趋势如图10(b)所示.需要注意的是,由于烟羽在周边地区的停留,会影响排放速率的计算,在此采用图10(a)全图数据的平均值作为背景值来消除.排放率可通过下式计算:

$$E = \int (VCD - VCD_{bc}) \cdot u \cdot \sin(\beta) \cdot dl, \quad (5)$$

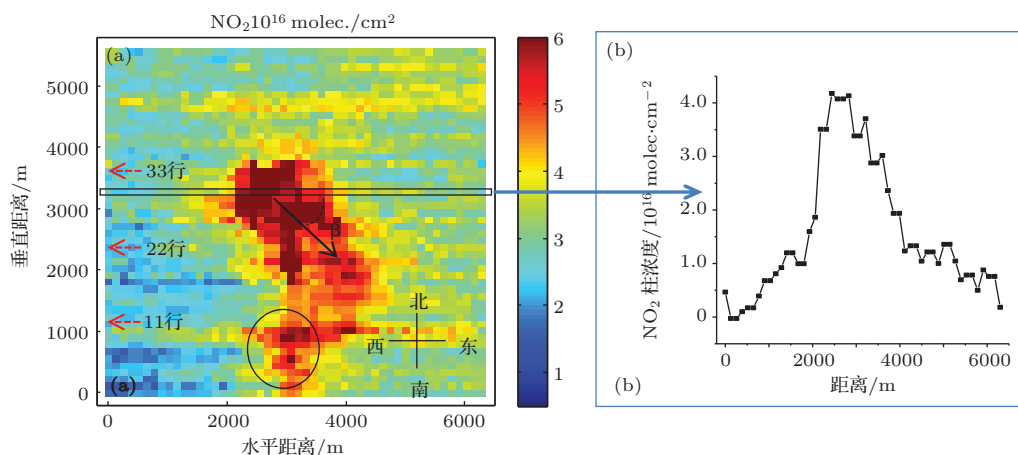


图10 (网刊彩色) (a) 区域2网格化数据; (b) 第30行柱浓度截面数据

式中背景值 VCD_{bc} 为 1.34×10^{16} molec/cm², 当天天气为4—5级西北风, 假设平均风速 u 为8 m/s, 风向与水平向量(东西向)的夹角 β 约为45°. 最终计算得到的NO₂ 排放率 E 为 5.71×10^{24} molec/s, 采用标准大气压参数对进行单位转换, 排放率等效为1570 kg/h.

排放率的计算与垂直柱浓度、风速、风向、距离等多个因素相关. 在这里, 垂直柱浓度和距离均通过计算得到, 风场数据成为限制排放率计算的主要因素; 另外, 由于烟羽扩散的不均匀性, 选取不同行的截面柱浓度数据计算得到的排放率是不同的, 如何对排放率进行精确的估算, 还需要进一步深入研究.

4 结 论

本文对机载成DOAS技术的原理及仪器进行了详细介绍, 并开展了机载成像DOAS实验, 快速定位飞行区域的污染源, 成功的获取了较高分辨率的NO₂ 二维分布图, 其地面分辨率可达到30 m × 80 m; 对NO₂ 污染的分布及扩散进行了分析, 并结合风场数据, 对观测到的点源排放率进行了估算, 最终得到排放率为1570 kg/h. 论证了采用机载成像DOAS技术快速寻找大区域内的污染源, 获取污染气体二维分布图, 进而对污染物的排放及分布扩散趋势进行研究的可行性.

参考文献

- [1] Irie H, Takashima H, Kanaya Y, Boersma K F, Gast L, Wittrock F, Brunner D, Zhou Y, Van Roozendaal M 2011 *Atmos. Meas. Tech.* **4** 1027
- [2] Hendick F, Muller J F, Clemer K, Wang P, De Maziere M, Fayt C, Gielen C, Hermans C, Ma J Z, Pinardi G, Stavrou T, Vlemmix T, Van Roozendaal M 2014 *Atmos. Chem. Phys.* **14** 765
- [3] Li X, Brauers T, Hofzumahaus A, Lu K, Li Y P, Shao M, Wagner T, Wahner A 2013 *Atmos. Chem. Phys.* **13** 2133
- [4] Xu J, Xie P H, Si F Q, Li A, Wu F C, Wang Y, Liu W Q, Andreas H, Chan K L 2014 *Acta Phys. B.* **23** 094210
- [5] Wang Y, Li A, Xie P H, Zeng Y, Wang R B, Chen H, Pei X, Liu J G, Liu W Q 2012 *Acta Phys. B.* **21** 114211
- [6] Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, Dou K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044216 (in Chinese) [周海金, 刘文清, 司福祺, 窦科 2013 物理学报 **62** 044216]
- [7] Baidar S, Oetjen H, Coburn S, Dix B, Ortega I, Sinreich R, Volkamer R 2013 *Atmos. Meas. Tech.* **6** 719
- [8] Oetjen H, Baidar S, Krotkov N A, Lamsal L N, Lechner M, Volkamer R 2013 *J. Geophys. Res.* **118** 7400
- [9] Wagner T, Ibrehim O, Shaiganfar R, Platt U 2010 *Atmos. Meas. Tech.* **3** 129
- [10] Wu F C, Xie P H, Li A, Chan K L, Hartl A, Wang Y, Si F Q, Zeng Y, Qin M, Xu J, Liu J G, Liu W Q, Wenig M 2013 *Atmos. Meas. Tech.* **6** 2277
- [11] Pikelnaya O, Flynn J H, Tsai C, Stutz J 2013 *J. Geophys. Res.* **118** 8716
- [12] Bobrowski N, Honninger G, Lohberger F, Platt U 2006 *J. Volcanol. Geoth. Res.* **150** 329
- [13] Louban H, Bobrowski N, Rouwet, Inguaggiato S, Platt U 2009 *B. Volcanol.* **71** 753
- [14] Lohberger F, Honninger G, Platt U 2004 *Appl. Optics.* **43** 4711
- [15] Heue K P, Wagner T, Broccardo S P, Walter D, Piketh S J, Ross K E, Beirle S, Platt U 2008 *Atmos. Chem. Phys.* **8** 6707
- [16] Schonhardt A, Altube P, Gerilowski K, Krautwurst S, Hartmann J, Meier A C, Richter A, Burrows J P 2014 *Atmos. Meas. Tech. Discuss* **7** 3591
- [17] Si F Q, Xie P H, Heue K P, Liu C, Peng F M, Liu W Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6018 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, Klaus-Peter Heue, 刘城, 彭夫敏, 刘文清 2008 物理学报 **57** 6018]
- [18] Si F Q, Xie P H, Liu Y, Dou K, Xu Jin, Liu Wenbing, Liu Wenqing 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 2458 (in Chinese) [司福祺, 谢品华, 刘宇, 窦科, 徐晋, 刘文斌, 刘文清 2009 光学学报 **29** 2458]
- [19] Leitao J, Richter A, Vrekoussus M, Kokhobovsky A, Zhang Q J, Beekmann M, Burrows J P 2010 *Atmos. Meas. Tech.* **3** 475
- [20] Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, Kokhanovsky A, Burrows J P 2005 *Adv. Space Res.* **36** 1015

Observation of two-dimensional distributions of NO₂ with airborne imaging DOAS technology*

Liu Jin Si Fu-Qi[†] Zhou Hai-Jin Zhao Ming-Jie Dou Ke Wang Yu Liu Wen-Qing

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

(Received 14 May 2014; revised manuscript received 1 August 2014)

Abstract

The airborne imaging DOAS (differential optical absorption spectroscopy) method which can obtain two-dimensional distributions of trace gas is introduced in this paper. Based on this method, pollution source in a wide range of area can be found quickly, and a map of trace gas distribution can be obtained to study the pollutant diffusion tendency. In this paper we report the flying experiment over Tianjin and Tangshan. The airborne imaging system is introduced in detail and an image of two-dimensional NO₂ distributions is obtained with a resolution of about 30 m × 80 m. Combined with wind field data, the emission rate of a point source on the flight path is calculated to be 1570 kg/h.

Keywords: airborne, imaging DOAS, NO₂, two-dimensional distributions

PACS: 42.68.Ca, 42.68.Kh, 42.79.Pw

DOI: [10.7498/aps.64.034217](https://doi.org/10.7498/aps.64.034217)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41275037).

† Corresponding author. E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn