

基于差分吸收光谱技术的大气痕量气体二维观测方法

刘进 邹莹 司福祺 周海金 窦科 王煜 刘文清

Two-dimensional observation of atmospheric trace gases based on the differential optical absorption spectroscopy technique

Liu Jin Zou Ying Si Fu-Qi Zhou Hai-Jin Dou Ke Wang Yu Liu Wen-Qing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 164209 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.164209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于匹配算法的脉冲差分吸收 CO<sub>2</sub> 激光雷达的稳频研究

Research on the frequency stabilization of pulsed differential absorbing lidar for CO<sub>2</sub> detection based on matching algorithm

物理学报.2015, 64(15): 154215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154215>

车载多轴差分吸收光谱探测对流层 NO<sub>2</sub> 分布研究

Detection and distribution of tropospheric NO<sub>2</sub> vertical column density based on mobile multi-axis differential optical absorption spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114211>

机载成像差分吸收光谱技术测量区域 NO<sub>2</sub> 二维分布研究

Observation of two-dimensional distributions of NO<sub>2</sub> with airborne Imaging DOAS technology

物理学报.2015, 64(3): 034217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034217>

温室气体及碳同位素比值红外光谱反演精度的影响因素研究

Influence factors of quantitative analysis precision of greenhouse gases and carbon isotope ratio based on infrared spectroscopy

物理学报.2015, 64(2): 024217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024217>

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>

# 基于差分吸收光谱技术的大气痕量气体 二维观测方法\*

刘进<sup>1)</sup> 邹莹<sup>2)</sup> 司福祺<sup>1)†</sup> 周海金<sup>1)</sup> 窦科<sup>1)</sup> 王煜<sup>1)</sup> 刘文清<sup>1)</sup>

1)(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, 合肥 230031)

2)(上海航天技术研究院, 上海 201109)

(2014年11月27日收到; 2015年3月17日收到修改稿)

基于差分吸收光谱技术, 对大气痕量气体二维观测方法进行研究. 对常规多轴差分吸收光谱系统进行改进, 使望远镜可指向不同方位角, 获取测量点各方位角上的痕量气体信息, 从而更直观地了解测量点四周污染气体分布及其演变情况. 主要对  $\text{NO}_2$  浓度分布进行了研究, 同时获取了不同方位角上的  $\text{O}_4$  斜柱浓度; 采用辐射传输模型模拟计算  $\text{O}_4$  斜柱浓度并与实测数据对比, 结果表明二者具有高度相关性, 验证了大气中  $\text{O}_4$  分布的稳定性; 基于实测  $\text{O}_4$  数据提取光路信息, 结合辐射传输模型对  $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_4$  因廓线不同造成的散射路径差异进行修正, 将  $\text{NO}_2$  斜柱浓度进一步转化为体积混合比, 获得了不同方位角上  $\text{NO}_2$  浓度分布图. 将计算结果与长光程差分吸收光谱技术数据进行对比, 结果表明二者具有较好的一致性.

**关键词:** 二维观测,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_4$ , 体积混合比

**PACS:** 42.68.Ca, 42.68.Kh, 42.72.Bj

**DOI:** 10.7498/aps.64.164209

## 1 引言

近年来, 随着国家经济的发展, 环境问题日益突出, 环境的监测和治理任务愈发紧迫, 对大气环境进行长期监测是其中重要的一项, 如何准确地获得大气污染气体浓度及其分布是一个亟待深入研究的课题. 现阶段, 对大气中痕量气体监测有不同方法, 一般采用直接抽样测量的方式进行, 这样的测量方式可获取局部痕量气体信息, 并可对经过仪器入口处的浓度梯度进行研究, 但面临如何对大气模型或卫星测量等更大尺度上的浓度进行评价的挑战. 与此相比, 差分吸收光谱技术 (differential optical absorption spectroscopy, DOAS) 测量的的是一个较长路径上的浓度积分, 所测量的光谱经过了整个大气层, 对光路上不均一的痕量气体进行平均化, 是一项较为成熟的大气环境监测应用

技术<sup>[1-4]</sup>.

DOAS 技术采用朗伯比尔定律, 利用具有窄带吸收特性的光学厚度选择性地探测量化痕量气体<sup>[5]</sup>. 其中多轴 DOAS (multi-axis DOAS, MAX-DOAS) 以太阳光为光源, 利用光路分布的差异性实现对近地面痕量气体的监测. 一维的 MAX-DOAS 是对同一方位角上不同仰角进行测量, 以天顶测量谱作为参考谱, 获得不同仰角上的斜柱浓度 (slant column density, SCD). 结合辐射传输模型模拟计算大气质量因子 (air mass factor, AMF), 将斜柱浓度转化为垂直柱浓度 (vertical column density, VCD), 以 VCD 数据对当地污染情况进行评判. 进一步则利用不同仰角上的痕量气体信息对污染气体垂直廓线分布进行研究<sup>[6-10]</sup>. 实际上, 由于污染气体水平分布的不均匀性, 不同方位角上的浓度是不同的, 以某一个方位角上的观测结果代表测量区域污染气体浓度存在一定的局限性<sup>[11]</sup>. 因

\* 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

此,有必要对一维MAX-DOAS系统进行改进,以获取不同方位角上的痕量气体浓度信息.然而,由于测量到的SCD包含了气体浓度和散射路径信息,不能直接代表气体浓度分布.本文从同时测量到的O<sub>4</sub>数据中提取散射路径信息,将斜柱浓度转化为体积混合比.O<sub>4</sub>作为大气中一种稳定存在的痕量气体,其廓线基本是稳定不变的,浓度与O<sub>2</sub>的平方成正比,因此各个角度上的实测值相对真实值的变化主要是由于气溶胶变化所造成<sup>[12-14]</sup>,而这种变化主要表现为散射路径的改变.

本文改进了一维MAX-DOAS只对一个方位角进行测量的现状,结合旋转平台实现不同仰角和方位角同时测量,构建了二维MAX-DOAS(2D-MAX-DOAS)测量系统.以NO<sub>2</sub>为例对不同方位角的斜柱浓度进行研究,获得不同方位角上的NO<sub>2</sub>浓度信息.采用辐射传输模型对不同时刻O<sub>4</sub>信息进行模拟,确定太阳天顶角及方位角对测量结果的影响,结合实际测量的O<sub>4</sub>斜柱浓度数据修正气溶胶参数,并提取光路信息,进而对NO<sub>2</sub>体积混合比进行推算.将所得结果与长光程DOAS(long path DOAS, LP-DOAS)进行对比,获得了较好的一致性.

## 2 测量原理与方法

### 2.1 DOAS技术基本原理

DOAS技术最基本的原理为朗伯比尔定律,当太阳光经过大气层时要受到气体吸收、瑞利散射、米散射等多种因素的影响,如(1)式所示.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\sum_j^n \sigma_j(\lambda) \cdot \text{SCD}_j\right] \cdot g(\lambda), \quad (1)$$

(1)式中 $I_0(\lambda)$ 为原始光强; $I(\lambda)$ 为经过大气吸收及散射后的光强; $\sigma_j(\lambda)$ 为第 $j$ 种气体的吸收截面; $\text{SCD}_j$ 为其斜柱浓度,表示气体浓度在路径上的积分; $g(\lambda)$ 代表大气中瑞利散射、米散射等对光强造成的衰减.DOAS技术的核心为“差分”思想<sup>[15]</sup>,即将痕量气体分子吸收截面分为随波长快变化部分 $\sigma_j^f(\lambda)$ 和慢变化部分 $\sigma_j^b(\lambda)$ .定义变量 $I_0'(\lambda)$ ,表示接收光强中的慢变化部分:

$$I_0'(\lambda) = I_0(\lambda) \exp\left[-\sum_j^n \sigma_j^b(\lambda) \cdot \text{SCD}_j\right] \cdot g(\lambda). \quad (2)$$

那么(1)式可写为

$$\ln \frac{I_0'(\lambda)}{I(\lambda)} = -\sum_j^n [\sigma_j^f(\lambda) \cdot \text{SCD}_j]. \quad (3)$$

(3)式左侧代表差分光学厚度,由于大气中瑞利散射、米散射通常随波长做慢变化,因此可通过高通滤波的方式将 $\sigma_j^b(\lambda)$ 、瑞利散射、米散射等影响予以扣除,只留下分子吸收的快变部分,通过与标准吸收截面进行非线性最小二乘拟合,即可得到各痕量气体的浓度信息SCD.选择适当的气溶胶廓线,采用大气辐射传输模型计算大气质量因子AMF,可将斜柱浓度转换为与路径无关的垂直柱浓度:

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

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.在实际测量中,常采用天顶角的测量谱作为参考谱,所获得的是两条光路之间的差分斜柱浓度dSCD,即两条光路上的斜柱浓度差异.

### 2.2 平均混合率计算方法

采用DOAS算法直接获得的是痕量气体在大气中的差分斜柱浓度dSCD,其中同时包含了痕量气体浓度和光路信息,因此测量到的不同方位角上的dSCD不足以直接代表气体浓度的高低.在这里,通过从实测的O<sub>4</sub>数据中获取光路信息,将所测斜柱浓度转化为体积混合比,从而有效地展示不同方位角上气体浓度的分布趋势.参照Sinreich的建议<sup>[11]</sup>,根据(5)式计算O<sub>4</sub>在大气中的有效散射光程,其中 $c_{\text{O}_4}$ 为O<sub>4</sub>在大气底层的浓度;根据(6)式对NO<sub>2</sub>在大气中的体积混合比 $\text{VMR}_{\text{NO}_2}$ 进行计算,其中 $F$ 为单位转换因子:

$$L_{\text{eff}} = \text{dSCD}_{\text{O}_4} / c_{\text{O}_4}, \quad (5)$$

$$\text{VMR}_{\text{NO}_2} = \frac{\text{dSCD}_{\text{NO}_2}}{L_{\text{eff}}} \cdot F. \quad (6)$$

由于大气中NO<sub>2</sub>廓线和O<sub>4</sub>廓线不同,使得同一次测量中二者的有效散射光程 $L_{\text{eff}}$ 存在一定的差异,因此需要增加一个修正因子 $f$ 对这种差异进行修正.采用SCIATRAN模型<sup>[16]</sup>对 $f$ 进行计算,公式如下:

$$f = \frac{c_{\text{retrieved}}}{c_{\text{real}}} = \frac{\text{dSCD}_{\text{NO}_2} / L_{\text{eff}}}{\text{VCD}_{\text{NO}_2} / H}, \quad (7)$$

$f$  定义为模型中反演浓度和真实浓度的比值, 即以  $L_{\text{eff}}$  作为光程的辐射传输模型计算浓度  $c_{\text{retrieved}}$  和作为真实浓度输入到模型中的痕量气体浓度  $c_{\text{real}}$  之间的比值. 其中  $\text{dSCD}_{\text{NO}_2}$  是在特定太阳天顶角、仪器仰角、波长和  $\text{NO}_2$  垂直廓线下采用辐射传输模型计算得到,  $\text{VCD}_{\text{NO}_2}$  为  $\text{NO}_2$  垂直柱浓度,  $H$  为边界层高度. 将 (5) 式代入可得到  $f$  的计算公式:

$$f = \frac{\text{dAMF}_{\text{NO}_2} \cdot c_{\text{O}_4} \cdot H}{\text{dAMF}_{\text{O}_4} \cdot \text{VCD}_{\text{O}_4}}, \quad (8)$$

其中  $\text{dAMF}_{\text{O}_4}$  和  $\text{dAMF}_{\text{NO}_2}$  分别为模拟计算得到的  $\text{O}_4$  和  $\text{NO}_2$  的差分大气质量因子,  $\text{VCD}_{\text{O}_4}$  为一常数. 综上所述, 最终  $\text{NO}_2$  体积混合比计算公式为

$$\text{VMR}_{\text{NO}_2} = \frac{1}{f} \cdot \frac{\text{dSCD}_{\text{NO}_2} \cdot c_{\text{O}_4} \cdot F}{\text{dSCD}_{\text{O}_4}}. \quad (9)$$

为获得准确的修正因子, 采用实测  $\text{O}_4$  数据与辐射传输模型计算结果进行对比, 通过调整气溶胶廓线使得二者相关性达到 80% 以上, 再对  $\text{NO}_2$  及  $\text{O}_4$  的  $\text{dAMF}$  进行计算. 整个数据计算流程如图 1 所示.

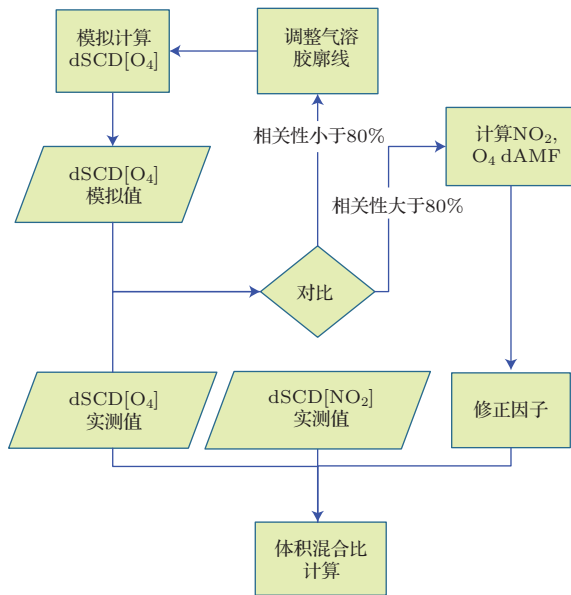


图 1 (网刊彩色) 数据处理流程

Fig. 1. (color online) The data processing flow.

### 3 实验与结果讨论

#### 3.1 实验描述

二维 MAX-DOAS 系统安装在安徽光学精密机械研究所综合实验楼楼顶 [E117.15, N31.90], 距

离地面高度约为 22 m, 选择晴好天气开展实验. 实验系统主要包括 maya2000 光谱仪、望远镜、光纤、计算机、旋转台, 如图 2 所示. 望远镜安装在旋转臂内绕  $N$  轴旋转, 可对仰角进行调整, 整个水平旋转平台绕  $M$  轴旋转, 可实现对方位角的调整, 从而构成一个二维观测系统. 望远镜收集到的太阳散射光通过光纤传输到光谱仪光学入口, 经光栅分光及 CCD 光电转换后被计算机记录.

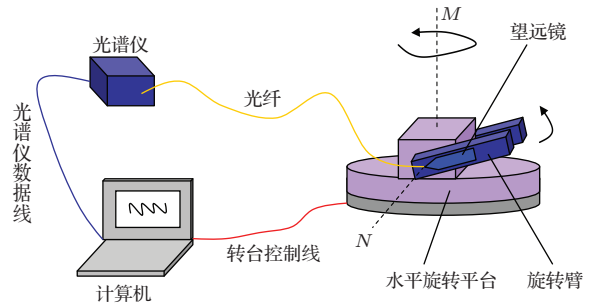


图 2 (网刊彩色) 二维 MAX-DOAS

Fig. 2. (color online) The schematic of the two-dimensional MAX-DOAS.

由于仪器的限制, 采用  $85^\circ$  仰角所采集的光谱作为参考谱, 实验中共设置了  $5^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $85^\circ$  三个仰角; 在方位角上, 从  $0^\circ$ — $360^\circ$  每隔  $20^\circ$  进行一次测量. 仰角是指望远镜与水平面的夹角, 方位角是指望远镜在水平面的投影逆时针旋转到正北方向的夹角. 测量中根据光强自动调节积分时间, 一个扫描序列所需时间约为 5 min, 保证了测量结果的时间分辨率.

#### 3.2 测量结果与讨论

图 3 所示为 2014 年 1 月 21 日上午 8 时的一组测量数据拟合效果实例, 测量仰角为  $5^\circ$ , 方位角为  $180^\circ$  (正南方向). 一般 DOAS 拟合波段宽度为几十纳米, 而反演过程中发现, 当拟合波段同时涵盖  $\text{O}_4$  在 477 和 577 nm 处的两个吸收峰时,  $\text{O}_4$  拟合误差最小, 而  $\text{NO}_2$  的拟合误差并未明显升高, 因此选择拟合区间为 430—610 nm. 拟合过程中  $\text{H}_2\text{O}$  同时参与反演, Ring 效应以吸收截面的方式予以扣除 [15]. 拟合得到的  $\text{O}_4$  差分斜柱浓度为  $3.55 \times 10^{43} \text{ molec}^2/\text{cm}^5$ ,  $\text{NO}_2$  差分斜柱浓度为  $1.91 \times 10^{17} \text{ molec}/\text{cm}^2$ , 拟合残差为  $4.39 \times 10^{-3}$ , 对应的  $\text{NO}_2$  拟合误差为  $2.4 \times 10^{15} \text{ molec}/\text{cm}^2$ ,  $\text{O}_4$  拟合误差为  $6.5 \times 10^{41} \text{ molec}^2/\text{cm}^5$ .

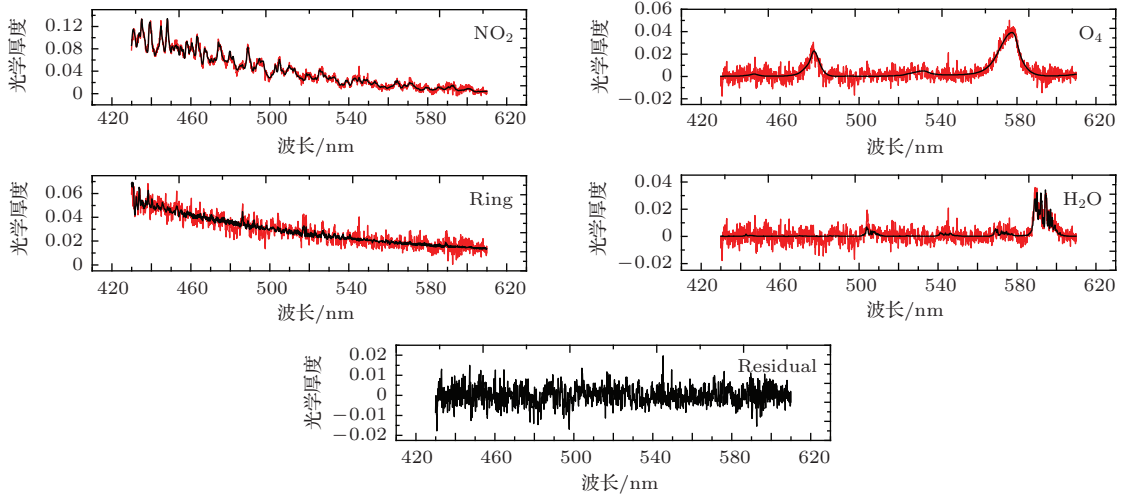


图3 (网刊彩色) 拟合效果实例

Fig. 3. (color online) Fitting rendering.

### 3.2.1 斜柱浓度数据分析

如图4和图5分别为1月16日和21日不同方位角dSCD数据随时间的变化趋势, 圆环内侧时间为上午8:00左右, 外侧时间为下午5:00左右, 由于在仰角为5°、方位角为240°时视场存在遮挡, 处理中将该方向数值设置为-1. 观察NO<sub>2</sub>数据可以发现, 其dSCD值在不同方位角上的相对值存在较大差异. 16日较大值出现在测量点东边, 时间

为14:40, 且仰角为5°和20°数据的峰值出现点基本一致; 21日仰角为5°的数据显示在各方位角上dSCD值随时间变化基本是相似的, 在测量点东南方向上, 11:25左右出现了一次高值, 但在20°数据相同点处并未出现. 由于NO<sub>2</sub>斜柱浓度同时包含了气体浓度信息和路径信息, 因此难以直接对NO<sub>2</sub>浓度分布及演变趋势做出评估, 将斜柱浓度数据转化为平均混合率是有必要的.

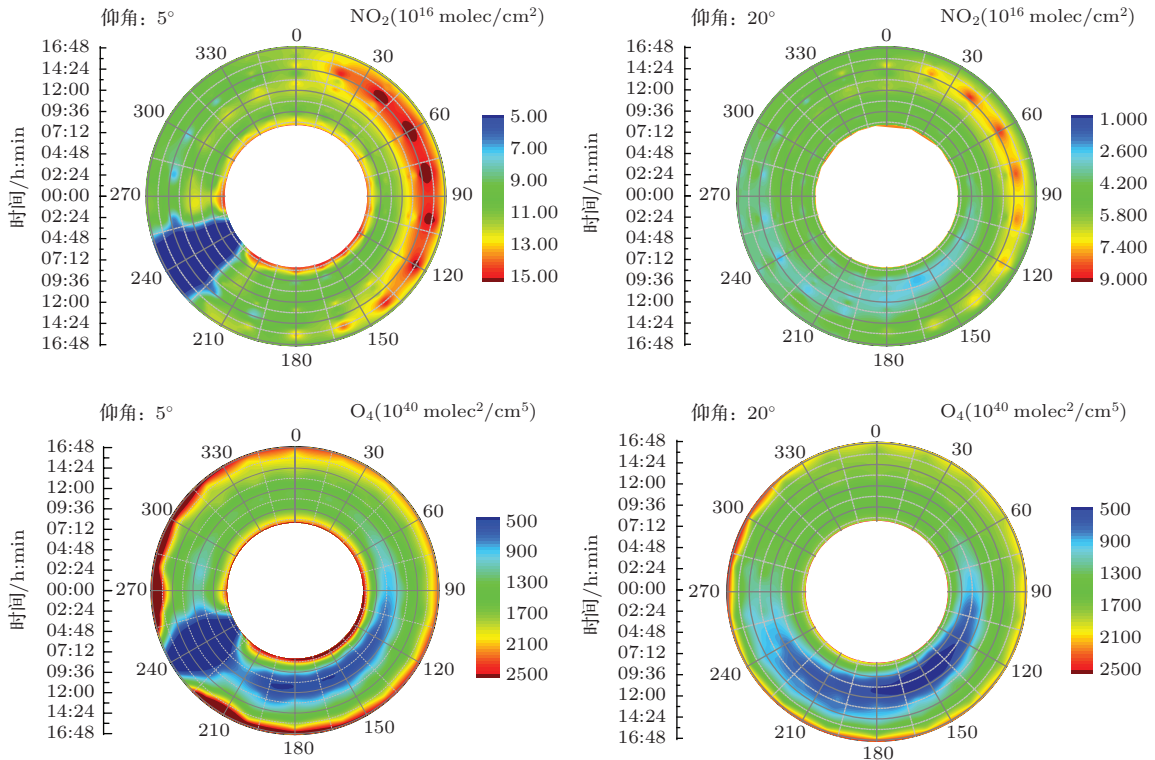


图4 (网刊彩色) 16日dSCD数据

Fig. 4. (color online) dSCD data on January 16.

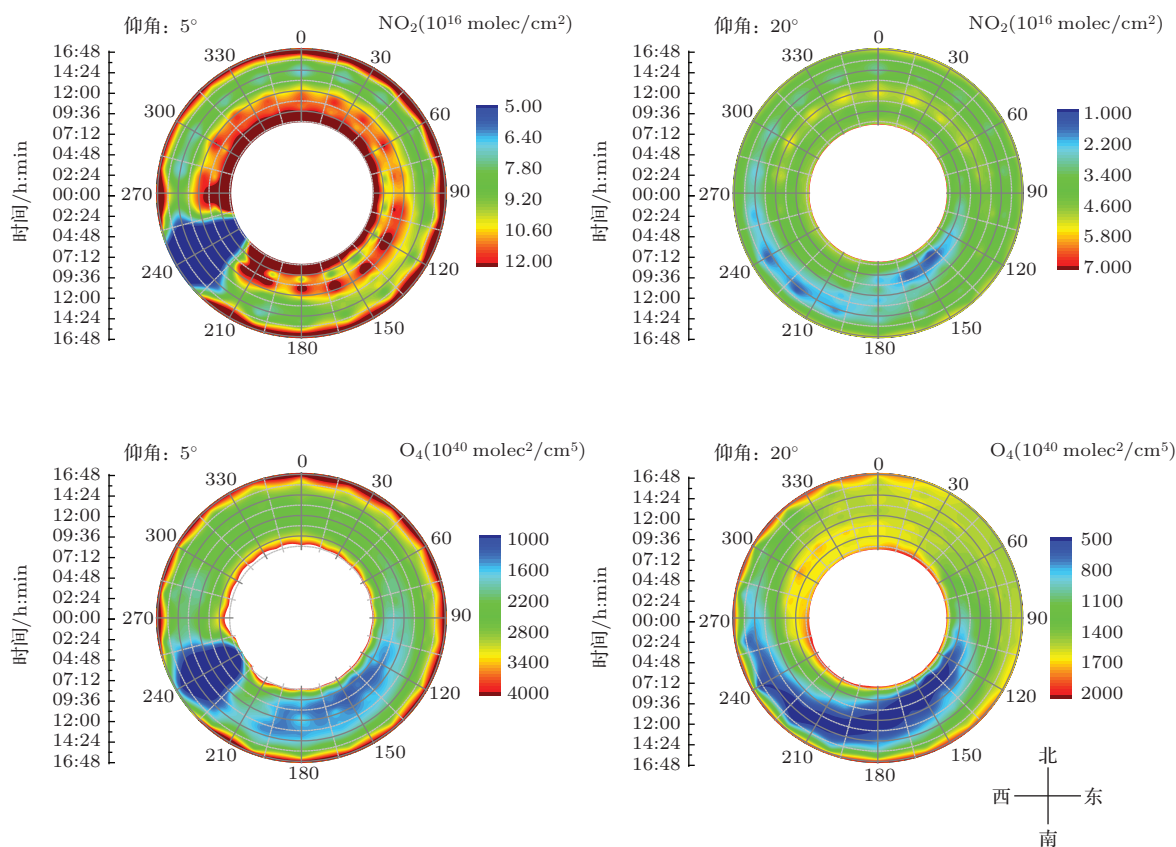


图5 (网刊彩色) 21日dSCD数据

Fig. 5. (color online) dSCD data on January 21.

观察两天的  $\text{O}_4$  差分斜柱浓度发现, 不管是  $5^\circ$  还是  $20^\circ$  仰角数据, 均出现一种螺旋结构, 这主要是由于太阳方位角变化造成的. 由于  $\text{O}_4$  气体廓线基本保持稳定, 浓度基本不变, 当太阳方位角与仪器夹角较小时, 散射路径也相应较小, 所测得的差分斜柱浓度就会相应减小, 反之亦然; 而早晨和傍晚出现的高值主要是由于太阳天顶角较大使得光路较长所致. 可见在一天的观测中, 光路信息对  $\text{O}_4$  差分斜柱浓度测量具有较大影响, 且随太阳角度表现出一定的规律性.

### 3.2.2 平均混合率计算

采用  $\text{O}_4$  实测数据提取光路信息, 按照数据计算流程, 首先对  $\text{O}_4$  实测数据进行模拟, 适当调整气溶胶廓线后而对修正因子进行计算. 处理过程中将  $\text{O}_4$  dSCD 相对偏差大于 20% 的数据予以扣除以保证测量数据的有效性. 如图 6 所示, 以 21 日  $20^\circ$  仰角  $\text{O}_4$  数据为例, 得到测量值与模拟值之间的相关性为 82.9%, 此时可认为模拟设置的气溶胶与实际气溶胶基本一致.

设置好气溶胶参数后, 进一步采用辐射传输模型对修正因子进行计算, 利用 (9) 式计算  $\text{NO}_2$  体积混合比. 计算结果如图 7 所示, 上半部分为 16 日  $\text{NO}_2$  浓度随方位角和时间分布图, 与直接测量到的斜柱浓度分布存在较大差异,  $5^\circ$  仰角测量到的高浓度值主要出现在  $120^\circ$ — $210^\circ$  方位角之间, 时间为上

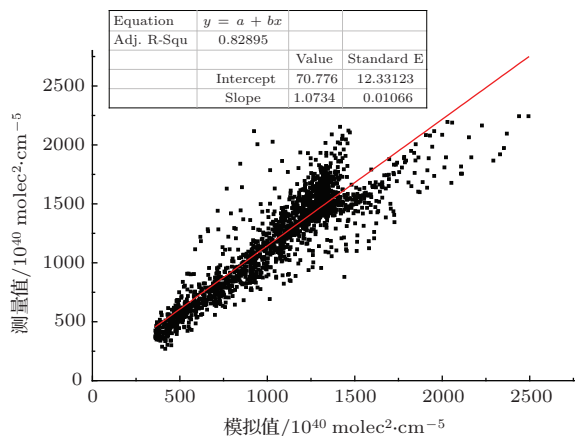


图6 (网刊彩色) 21日  $20^\circ$  仰角  $\text{O}_4$  测量值与模拟值相关性  
Fig. 6. (color online) Correlation analysis between measured value and simulation  $\text{O}_4$  value for elevation angle of  $20^\circ$  on January 21.

午 11:30 左右, 20° 仰角高浓度值则在相同时间方位角 120°—150° 之间观测到, 210° 方位角上 NO<sub>2</sub> 浓度略有升高; 下半部分为 21 日 NO<sub>2</sub> 浓度分布图, 高浓度值出现时间与 16 日基本相同, 5° 仰角测量到的高浓度值在 120°—180° 方位角之间, 而 20° 仰角测量到的高浓度值主要出现在 180° 方位角上.

综合两天的观测结果, NO<sub>2</sub> 高浓度值均出现在测量点东南方向, 表明该方向可能存在排放源. 实际上测量点东南方向附近有一条交通干道, 远处则对应合肥市区, 高浓度值的出现可能是由附近交通干道上的尾气排放或远处市区污染排放的输送所致; 另外, 两个仰角可对应不同的空间高度, 根

据 21 日在两个仰角上 NO<sub>2</sub> 高值出现的方位, 可以判定当天主要风向为东风, 查询到当天风向为东北风, 与判定比较符合; 16 日当天合肥空气质量为中度污染, 21 日为良好, 而测量到的结果显示 16 日 NO<sub>2</sub> 浓度整体高于 21 日, 从侧面佐证了该方法的有效性.

根据误差传递 (10) 式, 对 NO<sub>2</sub> 体积混合比的相对误差进行简单估算, 其中  $\Delta f$  主要由于模拟气溶胶与真实气溶胶差异引起, 典型值为 20%,  $\Delta \text{SCD}_{\text{NO}_2}$  为 5%,  $\Delta \text{SCD}_{\text{O}_4}$  为 20%, 那么计算得到体积混合比相对误差约为 29%.

$$\Delta \text{VMR} = \sqrt{\Delta \text{SCD}_{\text{NO}_2}^2 + \Delta \text{SCD}_{\text{O}_4}^2 + \Delta f^2}. \quad (10)$$

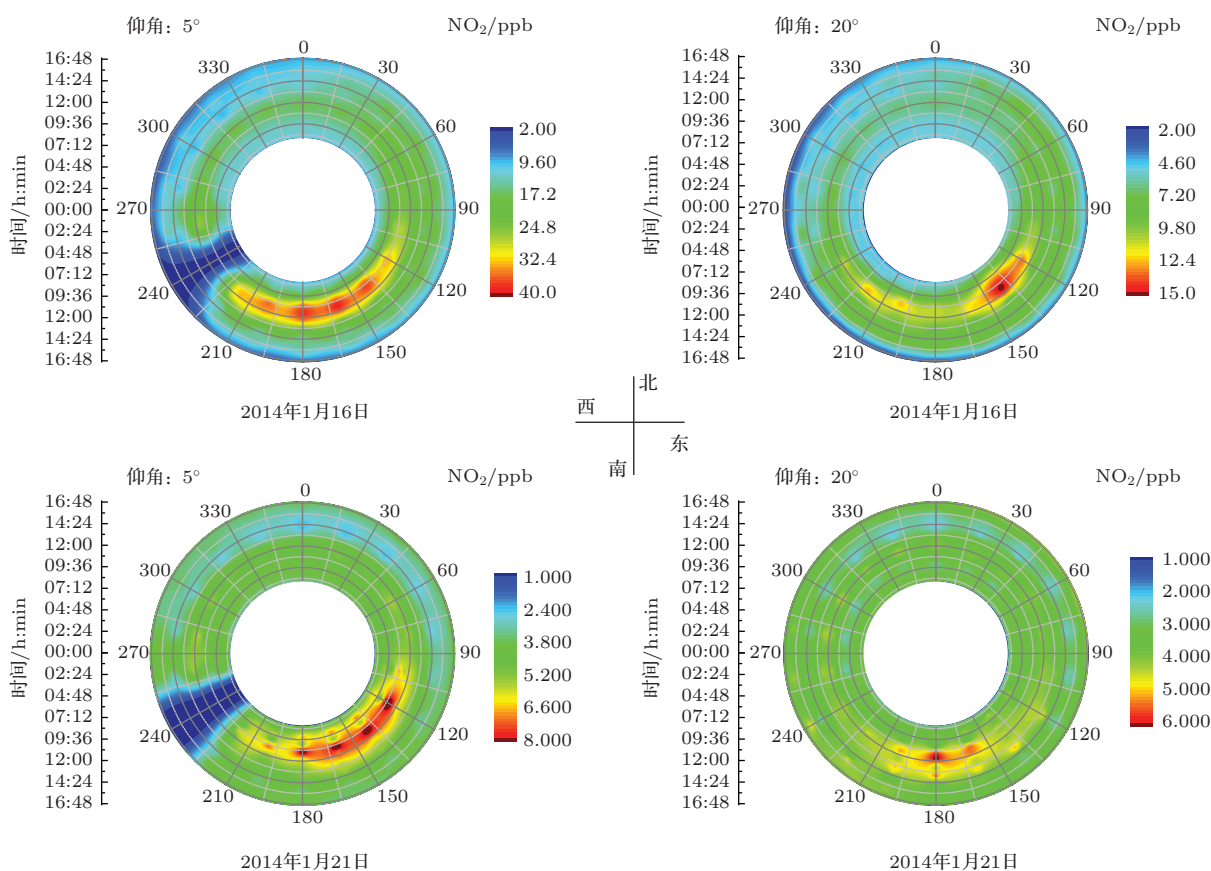


图 7 (网刊彩色) NO<sub>2</sub> 体积混合比分布

Fig. 7. (color online) Volume mixing ratio distribution of NO<sub>2</sub>.

### 3.2.3 与 LP-DOAS 数据对比

LP-DOAS 安装在同一栋楼的 3 楼, 距离地面约为 8 m, 望远镜方向为正南向, 因此选择仰角为 5°、方位角为 180° 的二维 MAX-DOAS 数据与之对比. 以 16 日数据为例, 对比结果如图 8 左侧所示, 二者在浓度值和相对趋势上基本相同; 图 8 右侧为相关性分析, 二者之间的相关系数为 0.82, 具有较

好的一致性, 二者之间的差异主要是由于观测路径不一致所造成的. 数据显示, 在 10:00 之前、14:00 之后出现相对较大的差异, 这可能是由于太阳天顶角变化引起的. 测量时段内 LP-DOAS 的光路保持不变, 而当太阳天顶角较大时, 2D-DOAS 有效散射路径变长, 从而造成了二者测量光路路径差异增大, 使得数据出现相对较大的偏差.

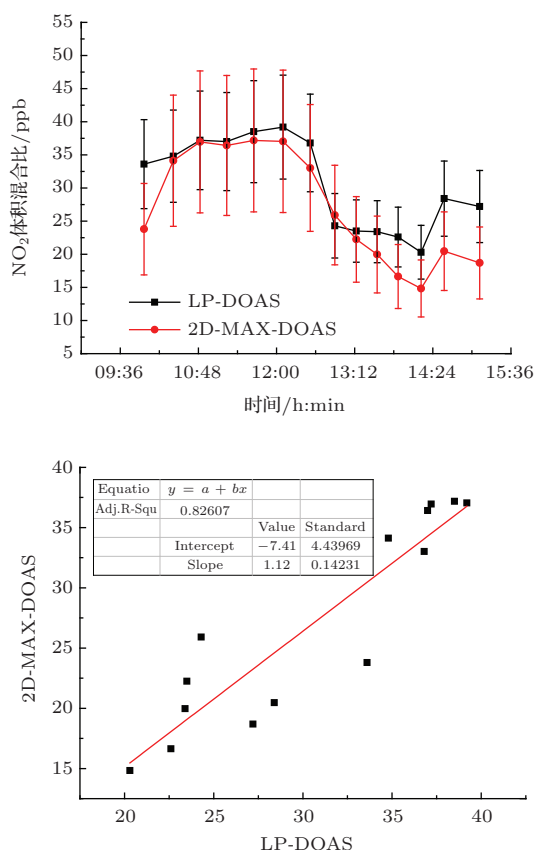


图8 (网刊彩色) 2D-MAX-DOAS 与 LP-DOAS 数据对比结果

Fig. 8. (color online) NO<sub>2</sub> VMR comparison between LP-DOAS and 2 D-MAX-DOAS.

## 4 结 论

本文对常规 MAX-DOAS 系统进行改进, 同时获取了不同方位角上 NO<sub>2</sub>、O<sub>4</sub> 的差分斜柱浓度; 基于 O<sub>4</sub> 廓线在大气中稳定不变的特征, 采用实测 O<sub>4</sub> 数据对光路信息进行提取, 结合辐射传输模型对 NO<sub>2</sub> 和 O<sub>4</sub> 因廓线不同造成的散射路径差异进行修正, 从而获得了测量点不同方位上的 NO<sub>2</sub> 浓度分布图. 相对于一个方位角测量而言, 多方位角测量更好地展示了测量点附近的污染气体分布. 所得浓度分布图与斜柱浓度分布图存在较大差异, 说明对于不同方位角上的浓度对比, 将斜柱浓度转化为体积混合比是很有必要的. 将计算结果与 LP-DOAS

数据进行对比, 结果表明二者具有较好的一致性, 验证了方法的可行性.

## 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 *Chin. Phys. B* **23** 094210
- [5] Platt U, Stutz J 2008 *Differential Optical Absorption Spectroscopy* (Berlin: Springer) p138
- [6] Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, Xie P H, Xu J, Dou K 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 1101007 (in Chinese) [周海金, 刘文清, 司福祺, 谢品华, 徐晋, 窦科 2011 光学学报 **31** 1101007]
- [7] Ma J Z, Beirle S, Jin J L, Shaiganfar R, Yan P, Wagner T 2012 *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **12** 26719
- [8] Xu J, Xie P H, Si F Q, Dou K, Li A, Liu Y, Liu W Q 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 2464 (in Chinese) [徐晋, 谢品华, 司福祺, 窦科, 李昂, 刘宇, 刘文清 2010 光谱学与光谱分析 **30** 2464]
- [9] Eskes H J, Boersma K F 2003 *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **3** 895
- [10] Wang Y, Li A, Xie P H, Chen H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 180705 (in Chinese) [王杨, 李昂, 谢品华, 陈浩 2013 物理学报 **62** 180705]
- [11] Sinreich R, Merten A, Molina L, Volkamer R 2013 *Atmos. Meas. Tech.* **6** 1521
- [12] Greenblatt G D, Orlando J J, Burkholder J B 1990 *J. Geophys. Res.* **95** 18577
- [13] Wagner T, Friedeburg C, Wenig M 2002 *J. Geophys. Res.* **107** D204424
- [14] Wagner T, Dix B, Friedeburg C 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D22205
- [15] 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]
- [16] Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M 2005 *Adv. Space Res.* **36** 1015

# Two-dimensional observation of atmospheric trace gases based on the differential optical absorption spectroscopy technique\*

Liu Jin<sup>1)</sup> Zou Ying<sup>2)</sup> Si Fu-Qi<sup>1)†</sup> Zhou Hai-Jin<sup>1)</sup> Dou Ke<sup>1)</sup> Wang Yu<sup>1)</sup> Liu Wen-Qing<sup>1)</sup>

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

2) (*Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China*)

( Received 27 November 2014; revised manuscript received 17 March 2015 )

## Abstract

A two-dimensional observation method of atmospheric trace gases based on differential optical absorption spectroscopy technique is reported in this paper. The conventional multi-axis differential absorption spectrum system is improved to make the telescope point to different directions. Thereby, the trace gas information of different azimuthal angles and consequently the distribution and variation of pollution gases around the measurement point can be obtained simultaneously. Using this method, NO<sub>2</sub> concentration and distribution as well as O<sub>4</sub> slant column densities are obtained. High degree of similarity is shown between O<sub>4</sub> slant column density simulated by radiation transfer model and the measured data. Based on the measured O<sub>4</sub> data, light path information can also be extracted. By combining with radiation transfer model, the light path differences caused by different profile modifications are corrected. The corrected NO<sub>2</sub> slant column density is further converted into the volume mixing ratio. By comparing the calculated NO<sub>2</sub> mixing ratio with the long-path-differential optical absorption spectroscopy data, the results show good consistency with each other.

**Keywords:** two-dimensional observation, NO<sub>2</sub>, O<sub>4</sub>, volume mixing ratio

**PACS:** 42.68.Ca, 42.68.Kh, 42.72.Bj

**DOI:** [10.7498/aps.64.164209](https://doi.org/10.7498/aps.64.164209)

---

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

† Corresponding author. E-mail: [sifuqi@aiofm.ac.cn](mailto:sifuqi@aiofm.ac.cn)