

被动多轴差分吸收光谱技术监测大气 NO₂ 垂直廓线研究

周海金^{1,2} 刘文清² 司福祺² 谢品华² 徐 晋² 窦 科²

(¹ 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026
² 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 痕量气体垂直廓线的监测,对大气污染研究具有重要意义。介绍了被动多轴差分吸收光谱(MAX-DOAS)技术监测痕量气体垂直廓线的光学遥感方法。研究中 MAX-DOAS 测量多个角度的斜柱浓度、结合大气辐射传输模型,利用最优估算法反演出痕量气体垂直廓线,并对最优估算法参数选取和反演评估进行了详细描述。将该技术应用于合肥地区 NO₂ 垂直廓线的监测;通过与长光程差分吸收光谱仪的测量结果对比,相关系数达到 0.80。该技术为大气环境立体监测提供了一种简便的方法。

关键词 环境光学;被动多轴差分吸收光谱(MAX-DOAS);最优估算法;NO₂;垂直廓线

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1101007

Retrieval of Atmospheric NO₂ Vertical Profile from Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy

Zhou Haijin^{1,2} Liu Wenqing² Si Fuqi² Xie Pinhua² Xu Jin² Dou Ke²

¹ Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

² Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Measurement of trace-gas vertical profile is very important for research of atmospheric pollution. The multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) is used on trace-gas profile monitoring. Combing with radiative transfer models, trace gas vertical profile is derived from slant column densities of several elevation angles of MAX-DOAS with optimal estimation method. The parameters setup of retrieval algorithm and the characterization of the retrieval has been described in detail. MAX-DOAS is used to monitor NO₂ profile of Hefei area. The measurement result is validated with long-path differential optical absorption spectroscopy (LP-DOAS), and the correlation coefficient is 0.80. This technique provides a simple and convenient method three-dimensional observation for air pollution.

Key words environmental optics; multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS); optimal estimation method; NO₂; vertical profile

OCIS codes 010.0280; 010.1120; 010.7030

1 引 言

中国快速的工业化、城市化进程,造成了环境的急剧恶化。特别是大气污染情况尤其严重,表现为

NO₂ 等污染气体和大气细粒子等污染物浓度增加。大气成分的浓度和组分变化,也强烈影响着地球的辐射平衡,造成了气候变化^[1]。因此,通过长期的地

收稿日期: 2011-05-10; **收到修改稿日期**: 2011-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(40805015)和安徽省优秀青年科技基金(10040606Y28)资助课题。

作者简介: 周海金(1986—),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: hjzhou@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—),男,博士,研究员,博士生导师,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

基观测,提供对流层污染物的柱浓度、垂直分布等信息,是非常必要的。

地基被动差分吸收光谱(DOAS)技术在在大气环境监测领域应用广泛^[2,3]。该技术用于痕量气体廓线监测,开始于地基天顶散射光观测。Preston等^[4]利用最优估算法由天顶散射光解析出对流层NO₂垂直分布。Hendrick等^[5]也在最优估算法的基础上,由天顶散射光解析出NO₂,BrO廓线。但是地基天顶散射光观测痕量气体廓线局限于曙暮时刻,应用存在局限性。

随着被动DOAS技术的发展,出现了地基多轴差分吸收光谱技术(MAX-DOAS)^[6]。研究发现,MAX-DOAS同样可以用于痕量气体廓线解析,并且应用时间范围更长。A. Heckel等^[7]利用MAX-DOAS观测结果反演HCHO廓线,采用循环迭代方法,过程简单,但是存在计算时间长、很多情况下不收敛的问题。C. Vigouroux等^[8]将最优估算法扩展应用于MAX-DOAS技术,实现了HCHO廓线的准确反演,H. Irie等^[9]在研究中也基于最优估算法,实现了MAX-DOAS监测NO₂,HCHO等痕量气体。但文献中对反演过程中的关键技术未做详细介绍。

现阶段,在国内MAX-DOAS的应用局限于痕量气体垂直柱浓度和气溶胶监测。如付强等^[10]利用MAX-DOAS观测研究北京奥运限行期间的污染气体NO₂柱浓度;徐晋等^[11]介绍了基于被动多轴差分吸收光谱技术反演对流层NO₂柱浓度的方法;司福祺等^[12]利用MAX-DOAS实现了气溶胶光学厚度的监测,未见国内有文献报道MAX-DOAS监测痕量气体垂直廓线监测的研究工作。

痕量气体垂直廓线的监测,对于研究痕量气体光化学反应和区域输送机制具有重要意义。为扩大MAX-DOAS技术的应用范围,推动痕量气体廓线监测研究工作,开展MAX-DOAS监测痕量气体垂直廓线的研究势在必行。因此,本文基于最优估算法研究MAX-DOAS监测NO₂廓线。研究中通过模拟验证和实际监测应用对比,验证了最优估算法的可行性,实现了NO₂廓线的监测。

2 MAX-DOAS 技术及实验系统

MAX-DOAS因其安装简单、造价低和维护方便等优点,已经成为对流层大气污染物自动监测中广泛使用的技术。污染气体O₃,SO₂,NO₂,BrO和HCHO等在能够穿透大气层到达地面的太阳辐射中有其各自的指纹吸收谱^[13,14]。MAX-DOAS技术

利用其指纹吸收谱,采用光谱拟合技术得到污染气体的斜柱浓度(SCD)。MAX-DOAS连续测量从水平面到天顶一系列不同仰角光路的太阳散射光,得到的多个角度的斜柱浓度。由多角度的斜柱浓度可解析出污染气体垂直柱浓度(VCD)及廓线分布信息^[15,16]。

关于本文使用的MAX-DOAS实验系统,在本实验室已发表文献中已做较多说明^[9,12],本文仅作简单介绍。实验系统由棱镜、望远镜、遮光板及其驱动装置、温度控制系统、光纤、光谱仪与控制计算机等组成,结构如图1所示。驱动电机带动棱镜旋转将不同角度的散射光导入接收望远镜,并通过光纤会聚到光谱仪。进入光谱仪的散射光在完成色散、光电转化与数字化后通过USB线传导到计算机中存储、计算,最终实现对大气痕量气体垂直柱浓度及廓线的解析。同时为保证光谱采集系统工作稳定,防止由于温度变化造成的光谱漂移给反演带来的误差,系统采用温度控制系统保证光谱仪工作温度恒定。

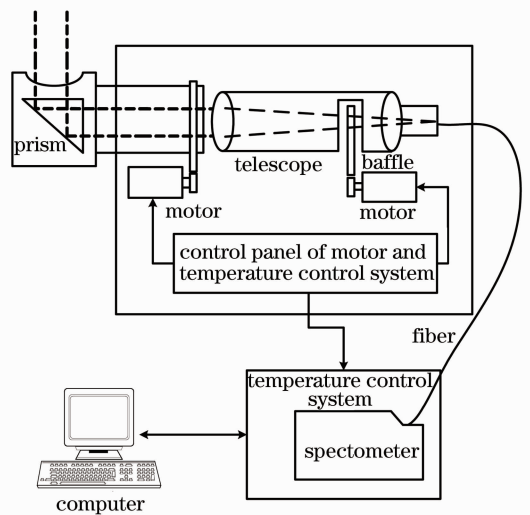


图1 MAX-DOAS结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of MAX-DOAS

3 最优估算法

Rodgers提出的最优估算法,思路是引入反演参数的估计值,即先验信息,作为反演问题的附加约束条件,以解决反演不适定的问题。该算法日益广泛应用于解决大气遥感应用中的反演问题^[17,18]。MAX-DOAS技术监测痕量气体廓线,采用的反演算法通常是基于最优估算法。

3.1 算法简介

一般来讲,大气反演问题可以归结为如下形式

的数学问题：

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{y} 代表测量向量； $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b})$ 代表测量向量与大气状态参数 \mathbf{x}, \mathbf{b} 之间的函数关系，其中 \mathbf{x} 为反演问题希望得到的大气状态参数， \mathbf{b} 为函数中其他的大气状态参数；向量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是测量的随机误差和系统误差。 $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b})$ 通常是代表系统物理性质的正演数学模型。

MAX-DOAS 反演痕量气体廓线，正演模型可以近似为线性模型^[8]，反演时采用最优估算法的线性形式，(1)式可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{K}\mathbf{x} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2)$$

反演向量 \mathbf{x} 代表痕量气体垂直廓线，测量向量 \mathbf{y} 是一个测量序列的痕量气体差值斜柱浓度 (DSCD)， \mathbf{K} 是模型的权重函数矩阵，代表层结大气质量因子 (BOX-AMF) 与分层高度的乘积， $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 DSCD 的测量误差。BOX-AMF 代表指定高度层内气体的斜柱积分浓度与垂直柱积分浓度的比值，以说明不同仰角对同一海拔高度处痕量气体浓度的灵敏度。

由于大气遥测的反演问题通常是病态的，引入先验信息 $\mathbf{x}_a, \mathbf{S}_a$ 提供欠定问题的附加约束条件，以得到稳定解。(2)式反演状态向量的解可以表示为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_a + \mathbf{S}_a \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{S}_a \mathbf{K}^T + \mathbf{S}_\varepsilon)^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K} \mathbf{x}_a), \quad (3)$$

式中 \mathbf{x}_a 是先验状态向量，代表测量前对系统状态的一个估计，可以通过气候学方法或其它独立的方法来获得。 \mathbf{S}_a 为先验状态向量的协方差矩阵。 \mathbf{S}_ε 是测量向量 \mathbf{y} 的误差协方差矩阵。

3.2 平均核矩阵

对反演结果优劣的评判，最重要的参数是平均核矩阵。平均核矩阵量化了不同海拔上反演值对真实值的灵敏度和反演的垂直分辨率，说明真实值和先验值对反演结果的贡献情况。平均核矩阵的定义如下：

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_a + \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_a), \quad (4)$$

式中 \mathbf{A} 代表平均核矩阵。在痕量气体廓线反演中，平均核 (\mathbf{A} 的行) 为相应海拔高度上反演浓度对真实廓线的灵敏度，其半峰全宽 (FWHM) 代表了该高度上反演垂直分辨率。对一个理想的反演，平均核矩阵应是单位矩阵 \mathbf{I} ，代表 $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}$ ，平均核是相应高度上的脉冲函数^[19]。

对于实际反演，由 (2)，(3) 式可以求解出平均核矩阵

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{x}} = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K})^{-1} \cdot \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\varepsilon^{-1} \mathbf{K}, \quad (5)$$

4 NO₂ 廓线反演算法模拟验证

研究中，利用大气辐射传输模型 SCIATRAN^[20] 模拟验证最优估算法应用于 MAX-DOAS 监测 NO₂ 廓线的可行性，验证流程如图 2 所示。预设 NO₂ 气体廓线代表测量时大气环境真实廓线，输入高度 0~120 km，其中 0~3 km 选择三段线性廓线拼接，每段高度 1 km，浓度随高度减小，3 km 以上输入美国标准大气廓线。通过对比预设 NO₂ 气体廓线和最优估算法反演出的廓线，来验证说明算法可行性，并为反演参数设置提供指导。

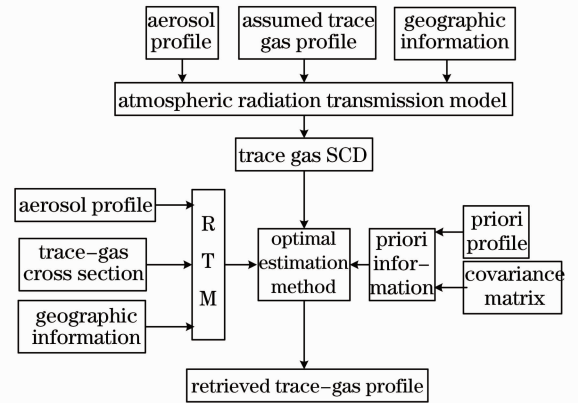


图 2 模拟验证流程图

Fig. 2 Flow diagram of validation through simulation

验证计算中输入的参数如表 1 所示。预设参数信息输入到 SCIATRAN，输出 9 个仰角的 NO₂ 气体 SCD 值。实际应用中为消除夫琅禾费结构的影响，选择 90° 的天顶谱作为参考谱，因此 DOAS 拟合计算出的斜柱浓度是扣除天顶方向柱浓度后的，称为差值斜柱浓度 (DSCD)，即 $f_{\text{DSCD}} = f_{\text{SCD}_\alpha} - f_{\text{SCD}_{90^\circ}}$ ^[21]。因此，对模型模拟出的 SCD 值，做同样的处理，扣除 90° 仰角 SCD 值，计算得到非天顶角度的 DSCD 值。由 SCIATRAN 模型计算得到的 NO₂ 气体 DSCD 作为 MAX-DOAS 的测量结果，用于廓线反演。

表 1 输入参数设置

Table 1 Parameters for input

Parameter	Value
Elevation angle / (°)	2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 90
Solar zenith angle / (°)	35
Solar azimuth angle / (°)	180
Wavelength / nm	360
Surface albedo	0.07
Aerosol type	Summer urban model
NO ₂ profile	0~3 km, 3~120 km: US standard atmosphere

考虑到 MAX-DOAS 仪器的性能指标, DSCD 的测量误差为 5%~10%, 文中取 10%^[22]。S_e 矩阵为对角阵, 对角线元素为相应仰角 DSCD 误差的平方值。图 3 中给出了模拟的 NO₂ 气体的 DSCD 值和误差。

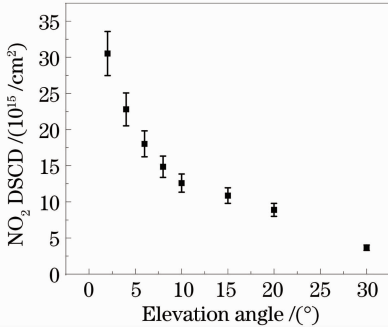


图 3 360 nm 波长处模拟的 NO₂ 气体 DSCD
Fig. 3 Simulated DSCD of NO₂ at 360 nm

各角度的 BOX-AMF 通过 SCIATRAN 模型计算得到。先验廓线 X_a 选择美国标准大气廓线。在图 3 中给出了先验廓线。对于先验廓线的协方差矩阵 S_a, 设计如下: 对角线元素代表 X_a 误差的平方值, S_a(1, 1) 处的相对误差为 200%, 其他元素随高度线性减少到 10%; 非对角线元素, 利用 Gauss 方程设置为

$$S_a(i, j) = \sqrt{S_a(i, i)S_a(j, j)} \exp\left[-\left(\frac{z_i - z_j}{\eta}\right)^2\right], \quad (8)$$

式中 η 代表先验廓线浓度相关高度, 以表征不同高度的 NO₂ 浓度变化的相关程度, 取为 0.5 km, Z_i, Z_j 代表对应的海拔高度^[23]。

由于边界层的 NO₂ 廓线更为人所关心, NO₂ 反演的廓线高度设置为 0~3 km, 分为 16 层, 分层高度 200 m。高度高于 3 km 的 NO₂ 廓线未考虑。

按照上文的设置, 计算得到的 DSCD, S_e, X_a, S_a 和 BOX-AMF 参数, 用于最优估算法反演 NO₂ 垂直浓度廓线。图 4 中给出了反演出的 NO₂ 廓线, 并与预设的真实廓线做比较, 可以看出二者在形状和数值上具有很好的一致性, 说明了反演结果接近于真实值, 验证了算法的可行性。

图 5 中给出了反演的平均核。可以看出, 包含在测量的 NO₂ 气体 DSCD 中的 NO₂ 垂直分布信息主要集中在 1 km 以下的海拔高度, 同时也说明了反演高度取 0~3 km 的设置是合理的。虽然选择的先验廓线与真实廓线间差异较大, 对反演模型的约束较差, 但反演的灵敏高度与其他文献结果相

当^[8,9], 这说明在灵敏高度 1 km 范围内, 反演结果更加依赖于测量值, 而不是输入的先验信息, 保持了 MAX-DOAS 廓线解析结果的独立性。而在 1 km 以上高度, 反演结果受测量和先验廓线共同影响。MAX-DOAS 的测量精度, 对于 NO₂ 廓线反演很重要。结果表明, 在精度优于 10% 时, 可以准确的解析近地面的 NO₂ 浓度。

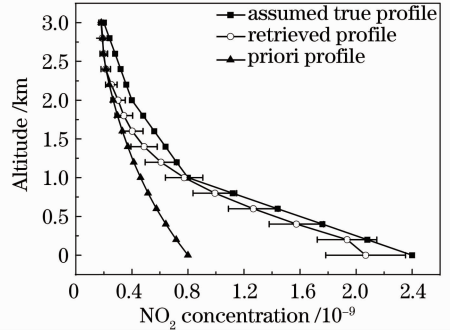


图 4 反演廓线与真实廓线的对比
Fig. 4 Comparison of inversion profile and true profile

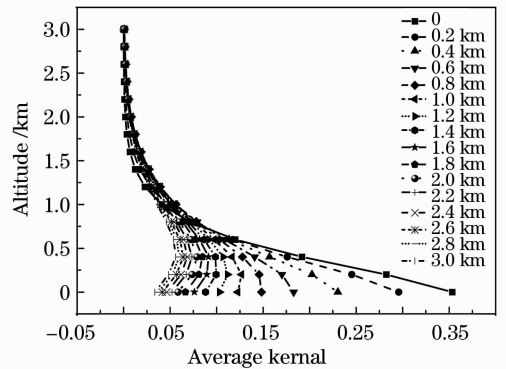


图 5 反演的平均核
Fig. 5 Average kernel of retrieval

5 NO₂ 廓线测量结果及讨论

MAX-DOAS 仪器安装在合肥市安徽光机所六楼楼顶, 扫描方向正北。站点还安装了一套长光程差分吸收光谱仪 (LP-DOAS), 可以作为 MAX-DOAS 廓线监测的地面验证。LP-DOAS 系统主要包括光源 (高压氙灯)、发射接收一体望远镜、角反射镜、光谱仪和 PDA 探测器。高压氙灯发出的光经望远镜准直后进入大气, 经角反射镜反射回来被望远镜接收, 聚焦在光纤束后传输到光谱仪分光, 随后由探测器接收。该系统望远镜、角反射镜安装高度 13 m, 光程 713 m, 基于 DOAS 算法测量光程内的 NO₂, SO₂ 等痕量气体浓度^[24]。

2010 年 8 月 13 日和 14 日以晴朗天气为主, 对这两天的测量结果进行分析。首先利用 DOAS 方法计

算 NO₂ 斜柱浓度,参与 DOAS 拟合的吸收截面包括 NO₂, O₃, O₄ 以及 Ring 结构,拟合波段 360~390 nm。图 6 为 2010 年 8 月 13 日 14:08 测量光谱的 DOAS 拟合实例,NO₂ 斜柱浓度 $3.90 \times 10^{-16} / \text{cm}^2$,拟合残差 7.97×10^{-4} 。

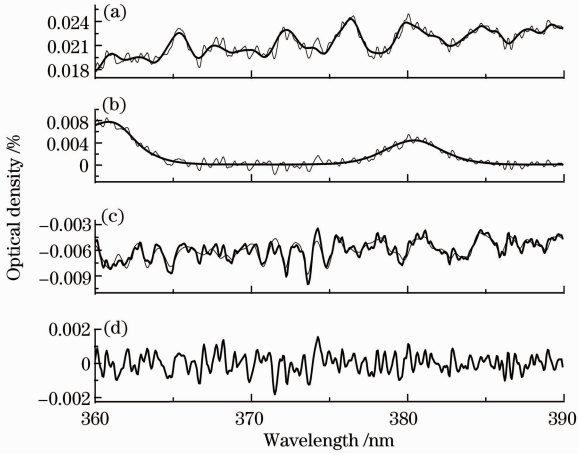


图 6 NO₂ 斜柱浓度 DOAS 拟合实例。(a)~(c)分别为 NO₂, O₃, Ring 的参考截面与扣除其他气体吸收的吸收截面;(d)为拟合剩余结构
Fig. 6 An example of DSCD by DOAS fitting of NO₂, (a)~(c) fitted NO₂, O₃, ring referred spectrum overlaid to the residual including absorption; (d) residual of the fitting

得到斜柱浓度后,利用最优估算法反演 NO₂ 廓线。图 7 为 2010 年 8 月 13 日 14:08 的 NO₂ 廓线反演结果,可以看出 NO₂ 主要分布在 1 km 以下的近地面层,从地表到 3 km 高度逐渐减少。为了验证数据的可信度,选择廓线近地面第一层的浓度值与 LP-DOAS 观测结果对比。对比结果在图 7 中给出,二者十分接近。

图 8 (a), (c) 为 2010 年 8 月 13 日 8:00~17:00, 2010 年 8 月 14 日 7:00~17:00 的 NO₂ 时均

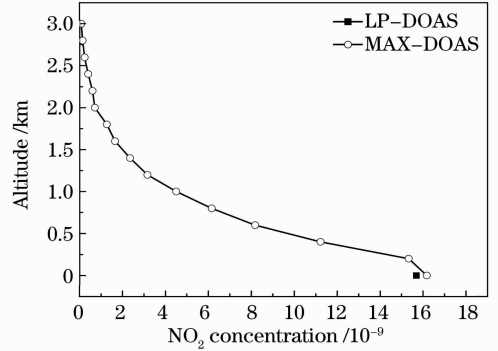


图 7 MAX-DOAS 测量的 NO₂ 廓线及与 LP-DOAS 测量结果对比

Fig. 7 NO₂ profile retrieval from MAX-DOAS measurements and comparison with NO₂ concentration from LP-DOAS

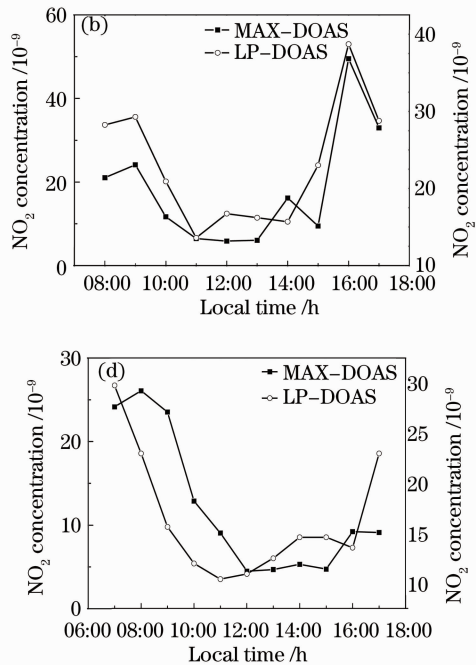
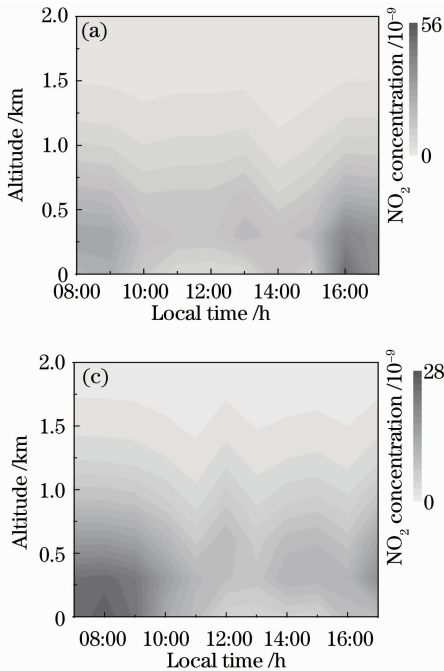


图 8 (a), (b) 2010 年 8 月 13 日, (c), (d) 8 月 14 日 NO₂ 时均值廓线, 近地面浓度 MAX-DOAS 测量值与 LP-DOAS 对比结果

Fig. 8 Hour average profile of NO₂ at (a) 2010-8-13 and (c) 2010-8-14; comparison of NO₂ concentration measured from MAX-DOAS and LP-DOAS at (b) 2010-8-13 and (d) 2010-8-14

值廓线。由廓线可以看出 NO_2 主要集中在 1 km 以下的高度。在 10:00 左右以后由于光解等消耗,地表 NO_2 浓度下降显著;下午,由于光解减弱, NO_2 开始重新积累,浓度升高,在 17:00 左右呈现峰值。

将 NO_2 廓线近地面第一层的浓度值与 LP-DOAS 的测量结果对比,如图 8(b),(d) 所示。对比结果显示,两组数据显示出较好的一致性,说明了最优估算法应用于 MAX-DOAS 技术监测 NO_2 廓线是可行的。用于同时两者的测量结果也有不同,初步认为不同的原因如下:首先,两者测量范围不同,MAX-DOAS 测量的是对流层整层的浓度变化,而 LP-DOAS 仅测量观测光程内的平均浓度;其次,两者的时间分辨率不同;最后,简单的模型假设也是造成不同的原因,本文假定的气溶胶廓线是通过 LOWTRAN 数据库^[25] 得到,与实际情况存在偏差。

在两天的观测结果中,8月13日的天气相对较好,当天的 MAX-DOAS 相对 8月14日有更多的测量数据,选择该日数据做相关性计算,如图 9 所示。相关系数 R 为 0.80,说明 MAX-DOAS 观测 NO_2 垂直廓线具有较高的可信度。

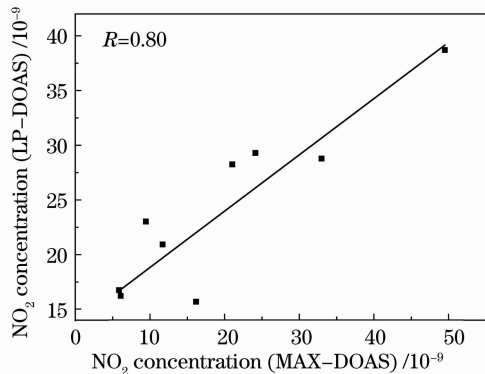


图 9 MAX-DOAS 与 LP-DOAS 测量结果相关性分析
Fig. 9 Correlation analysis of the measurement results by MAX-DOAS and LP-DOAS

6 结 论

介绍了最优估算法应用于 MAX-DOAS 大气 NO_2 垂直廓线监测,并通过在合肥市的实际观测结果与 LP-DOAS 的对比说明了算法的可行性,实现了 MAX-DOAS 对 NO_2 气体廓线的监测,拓展了 MAX-DOAS 的应用领域,为大气化学反应和痕量气体区域输送机制研究提供了技术支持。拟在下一步工作中提高痕量气体廓线反演精度,开展 MAX-DOAS 监测气溶胶廓线的研究工作。

参 考 文 献

- R. Andreas, P. B. John, N. Hendrik *et al.*. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. *Nature*, 2005, **437**(7055): 129~132
- Shi Peng, Xie Pinhua, Li Ang *et al.*. Measurement of nitrate radical in the atmosphere by direct moonlight passive differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3643~3648
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_3 自由基[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3643~3648
- 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
- K. E. Preston, R. L. Jones, H. K. Roscoe. Retrieval of NO_2 vertical profiles from ground-based UV-visible measurements: method and validation[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D15): 19089~19097
- F. Hendrick, M. Van Roozendael, M. P. Chipperfield *et al.*. Retrieval of stratospheric and tropospheric BrO profiles and columns using ground-based zenith-sky DOAS observations at Harestua, 60° N [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, **7**(18): 4869~4885
- U. Platt, D. Perner. Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS), Principles and Applications [M]. German: Springer, 2008. 495~498
- A. Heckel, A. Richter, T. Tarsu *et al.*. MAX-DOAS measurements of formaldehyde in the Po-Valley [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2005, **5**(4): 909~918
- C. Vigouroux, F. Hendrick, T. Stavrakou *et al.*. Ground-based FTIR and MAX-DOAS observations of formaldehyde at Reunion island and comparisons with satellite and model data[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, **9**(24): 9523~9544
- H. Irie, H. Takashima, Y. Kanaya *et al.*. Eight-component retrievals from ground-based MAX-DOAS observations [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, **4**(1): 1027~1044
- Fu Qiang, Liu Wenqing, Si Fuqi *et al.*. Determination of the vertical column density of trace gas measured by MAX-DOAS[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **38**(5): 1216~1220
付 强, 刘文清, 司福祺 等. 被动多轴 DOAS 技术污染气体垂直柱浓度反演方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **38**(5): 1216~1220
- Xu Jin, Xie Pinhua, Si Fuqi *et al.*. Retrieval of tropospheric NO_2 by multi axis differential optical absorption spectroscopy [J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2010, **30**(9): 2464~2469
徐 晋, 谢品华, 司福祺 等. 利用多轴差分吸收光谱技术反演对流层 NO_2 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(9): 2464~2469
- Si Fuqi, Xie Pinhua, Dou Ke *et al.*. Determination of the atmospheric aerosol optical density by multi axis differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2867~2872
司福祺, 谢品华, 窦 科 等. 被动多轴差分吸收光谱大气气溶胶光学厚度监测方法研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2867~2872
- Wang Shanshan, Zhou Bin, Ye Qing *et al.*. Application of vehicle-borne passive differential optical absorption spectroscopy for urban traffic air pollution monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2645~2649
王珊珊, 周 斌, 叶 庆 等. 车载被动差分吸收光谱在城市道路空气污染监测中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2645~2649
- Lin Yihui, Xie Pinhua, Li Ang *et al.*. Measurement of CS_2 in emission plume of power plant by passive differential optical

- absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1449~1453
- 林艺辉, 谢品华, 李 昂 等. 被动差分吸收光谱技术测量电厂烟羽中 CS₂ 的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1449~1453
- 15 U. Platt, D. Perner. Simultaneous measurements of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by differential optical absorption [J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(10): 6329~6335
- 16 G. Honninger, C. Von Friedeburg, U. Platt. Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2004, **4**(2): 231~254
- 17 C. D. Rodgers. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2000. 463~512
- 18 C. D. Rodgers, B. J. Connor. Intercomparison of remote sounding instruments[J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D3): 4116~4122
- 19 U. Frieb, P. S. Monks, J. J. Remedios *et al.*. MAX-DOAS O₄ measurements: a new technique to derive information on atmospheric aerosols; 2. Modeling studies[J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(22): 14203~14223
- 20 A. Rozanov, V. Rozanov, J. P. Burrows. A numerical radiative transfer model for a spherical planetary atmosphere: combined differential-integral approach involving the picard iterative approximation[J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 2001, **69**(4): 513~534
- 21 X. Li, T. Brauers, M. Shao *et al.*. MAX-DOAS measurements in southern China: retrieval of aerosol extinctions and validation using ground-based in-situ data[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, **10**(5): 2079~2089
- 22 K. Clemer, M. Van Roozendael, C. Fayt *et al.*. Multiple wavelength retrieval of tropospheric aerosol optical properties from MAX-DOAS measurements in Beijing [J]. *Atmos. Meas. Tech. Discuss*, 2010, **3**(1): 111~145
- 23 B. Barret, M. D. Maziere, P. Demoulin. Retrieval and characterization of ozone profiles from solar infrared spectra at the Jung-fraujoch [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(D24): 4788~4795
- 24 Qin Min, Xie Pinhua, Liu Jianguo *et al.*. Study on UV-Visible DOAS system based on photodiode array (PDA) [J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2005, **25**(9): 1463~1467
- 秦 敏, 谢品华, 刘建国 等. 基于二极管阵列 PDA 的紫外-可见差分吸收光谱 (DOAS) 系统的研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(9): 1463~1467
- 25 F. X. Kneizys, E. P. Shettle, L. W. Abreu *et al.*. Users guide to lowtran 7[R]. Air Force Geophysics Laboratory AFGL, 1986. 32~56

栏目编辑: 谢 婧