

基于多轴差分吸收光谱技术的合肥地区气溶胶观测研究

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

1. 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

2. 中国科学技术大学科学岛分院, 安徽合肥 230026

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 大气气溶胶的直径从几纳米到几十微米不等, 对大气辐射评估、全球气候变化、当地空气质量和能见度以及人类健康都有着直接或间接影响, 尤其秋冬季节是雾霾高发期, 更有利于大气气溶胶的生成、转化和积累。目前, 用于气溶胶信息观测的技术有很多, 包括激光雷达、太阳光度计、华盖计、卫星遥感等。多轴差分光学吸收光谱(MAX-DOAS)技术是一种被动遥测式光谱设备, 具有稳定、可实时连续监测等特点, 可同时获取多种痕量气体的浓度信息, 且能反演气溶胶光学厚度(AOD)和气溶胶廓线。介绍了 MAX-DOAS反演气溶胶信息的算法, 并于2017年12月至2018年1月, 在合肥市科学岛开展了 MAX-DOAS观测, 观测方位角为0度(正北), 垂直方向上从低到高扫描10个仰角; 反演时取中午时段的天顶方向测量光谱作为参考光谱。在337~370 nm波段, 利用 QDOAS 软件计算出 O_3 斜柱浓度(DSCD), 然后再利用气溶胶廓线反演算法(PriAM)反演出 AOD 和气溶胶消光系数(AE)。将结果与太阳光度计 CE318 测得的 AOD 做对比, 小时均值和日均值的相关性系数均为 0.91, 结果表明 MAX-DOAS 在获取气溶胶信息方面具有较高的可靠性。同时, 将 MAX-DOAS 获得的近地面气溶胶消光系数与地面站点的点式仪器测得的 $PM_{2.5}$ 浓度进行了相关性对比, 日均值和小时均值线性拟合相关系数 r 分别为 0.83 和 0.62, 进一步验证了 MAX-DOAS 获取气溶胶信息的可靠性。由于冬季是雾霾的高发期, AOD 值较高, 选取 2017 年 12 月 3 日至 6 日的一次雾霾过程, 廓线结果表明气溶胶主要分布在 1.5 km 以下, 结合当时的风场信息及雾霾期间的气流后向轨迹图, 可知此次污染是西北方向污染气团输送导致的。

关键词 多轴差分吸收光谱; 太阳光度计; 溶胶光学厚度; 气溶胶消光系数

中图分类号: X831 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)03-0712-08

引言

大气气溶胶是大气成分的重要组成部分, 是大气液态或固态悬浮微粒的总称。气溶胶在大气物理中的作用是影响地球辐射平衡, 作为云凝结核, 影响云的特性; 另外, 它在大气化学转化中也起到了重要的作用, 参与多种大气化学过程, 为气体转化提供场所, 加速了污染气体的生成^[1]。近年来在我国京津冀地区、华北平原、长江中下游地区等工业发达、人口稠密的特大城市 and 城市群周围频繁发生严重的雾霾事件, 严重危害人类的健康。有研究发现^[2], 在中国不同地区的大城市中, 大多数气溶胶颗粒是次生的, 即在霾污染事件期间通过前体气体的光化学反应形成。因此, 研究气溶胶

的光学特性非常必要。

气溶胶的光学遥感探测技术主要有太阳光度计、激光雷达等, 太阳光度计可以提供较为准确的气溶胶光学厚度(AOD), 目前已经建立全球气溶胶地基观测网络(AERONET), 但是无法提供气溶胶垂直消光系数廓线; 激光雷达技术是一种有效的大气探测技术, 能够实现对大气颗粒物的高精度、高时空分辨率的连续观测, 但是在气溶胶较为活跃的边界层存在盲区^[3], 且价格昂贵。

多轴差分吸收光谱仪(MAX-DOAS)通过多个仰角观测太阳散射光, 再利用差分吸收光谱技术反演出对流层的痕量气体和气溶胶的垂直分布^[4], 在国际上很多研究机构已经开展了基于该技术的气溶胶观测研究。Zieger 等 2009 年在荷兰 Cabauw 利用 MAX-DOAS 研究了气溶胶消光系数对湿度

收稿日期: 2019-01-07, 修订日期: 2019-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41530644, 41975037)资助

作者简介: 李晓梅, 1995年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: xmli@aiofm.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: phxie@aiofm.ac.cn

(RH) 的依赖性^[5]; Irie 等在日本筑波市进行了 MAX-DOAS, 腔衰荡光谱仪, 激光雷达和天空辐射计的协同气溶胶观测, 评估 MAX-DOAS 在 467 nm 反演的气溶胶消光系数(AESC)和 AOD^[6]; Davis 等 2013 年 8 月至 9 月在麦克默里堡北部的艾伯特省开展 MAX-DOAS 观测, 并将气溶胶结果与激光雷达和 GEM-MACH 空气质量模型作对比^[7]; Zhang 等 2017 年 4 月至 12 月份在上海郊区开展 MAX-DOAS 观测, 研究 O₄ 校正因子的优化调整, 以及冬季气溶胶垂直分布特征^[8]。

利用地基 MAX-DOAS 在 2017 年 12 月至 2018 年 1 月在合肥地区开展两个月的连续观测, 反演了气溶胶光学厚度信息, 并将观测的 AOD 结果与安装在同一观测点的太阳光度计 CE318 的结果进行对比, 来验证 MAX-DOAS 仪器性能以及研究合肥地区的气溶胶光学特性。将 MAX-DOAS 反演出的 AOD 和近地面气溶胶消光系数分别与太阳光度计 CE318 和地面站点的 PM_{2.5} 作对比; 选取了一次雾霾过程, 分析了观测期间气溶胶 AOD 和廓线的变化特征。

1 原理

1.1 O₄DSCD 计算原理

差分光学吸收光谱(DOAS)技术, 基于朗伯比尔定律^[9], 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 $I(\lambda)$ 是接收的散射太阳光, 即经过各种气体吸收、瑞利散射、米散射等衰减后的光强, ϵ_R 为瑞利散射系数, ϵ_M 为米散射系数, 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。

散射的影响可以通过多项式拟合等方法去除, 进而得到痕量气体吸收的部分, 再与标准气体截面拟合, 最后得到痕量气体的斜柱浓度。

$$D' = \ln \frac{I'_0(\lambda)}{I(\lambda)} = \sum_i \sigma'_i(\lambda) \text{SCD}_i \quad (2)$$

MAX-DOAS 采用将差分光学吸收光谱(DOAS)技术, 通过多仰角的测量获取多角度的 O₄DSCD。

$$O_4 \text{DSCD}_\alpha = O_4 \text{SCD}_\alpha - O_4 \text{SCD}_{90^\circ} \quad (3)$$

其中 α 为不同仰角。

1.2 气溶胶反演原理

由于氧二聚体 O₄ 在大气中的浓度基本稳定不变, 影响 O₄ 差分斜柱总量(O₄DSCD)的主要因素就是光的传输路径。在晴朗无云的条件下, 光的传输路径主要受气溶胶廓线的影响, 因此可以利用 O₄DSCD 反演出大气中气溶胶的信息。研究中采用中科院安徽光学精密机械研究所(AIOFMI)与德国马普化学所(MPIC)合作开发的气溶胶消光和痕量气体浓度廓线反演算法(PriAM)^[10] 结合多角度的 O₄DSCD 进一步反演出气溶胶廓线信息。

首先, 测量值是 $y(\alpha, \phi, \lambda)$, 即在测量序列中具有相同

的扫描方位角 ϕ 和 O₄ 吸收波长带的不同仰角处的 O₄DSCD 观测值, 假设测量值 y 可以通过正演模型重现, 而正演模型结果取决于气溶胶廓线 x 和气溶胶光学特性。假设每层中的气溶胶均匀分布, 使得观测向量(y)可以描述为

$$y + \epsilon = f(x) + \delta \quad (4)$$

其中 ϵ 和 δ 分别是测量误差和模型误差, $f(x)$ 为大气辐射传输模型(RTM)。

其次, 观测向量 y 中包含的信息很可能不足以反演独特的气溶胶消光特征, 因此使用最优估计方法进行气溶胶反演^[11]。

大气中的辐射传输是非线性的, 因此气溶胶消光的反演通过使用 Gauss-Newton 方法迭代求解^[12], 定义为

$$x_{i+1} = x_i + (S_a^{-1} + K_i^T S_\epsilon^{-1} K_i)^{-1} \cdot [K_i^T S_\epsilon^{-1} (y - f(x_i)) - S_a^{-1} (x_i - x_a)] \quad (5)$$

为加速迭代过程, 提高反演精度, 结合 Levenberg-Marquardt 算法对 Gauss-Newton 方法进行修正后的迭代过程变为

$$x_{i+1} = x_i + [(1 + \gamma_i) S_a^{-1} + K_i^T S_\epsilon^{-1} K_i]^{-1} \cdot [K_i^T S_\epsilon^{-1} (y - f(x_i)) - S_a^{-1} (x_i - x_a)] \quad (6)$$

根据式(6), 初始气溶胶廓线 x_a 通过不断迭代得到最接近真实情况的气溶胶廓线。

2 实验部分

2.1 二维 MAX-DOAS

二维 MAX-DOAS 仪器安装在合肥(117.16°E, 31.91°N)西北角的科学岛安光所综合实验楼楼顶, 位置如图 1 所示。仪器结构图如图 2(a, b)所示, 望远镜收集太阳散射光, 并通过石英光纤束引入光谱仪单元, 光谱仪光谱分辨率为 0.47 nm, 然后光谱仪将范围为 293~414 nm 的光谱映射到具有 2 048 像元的面阵 CCD 探测器, 最后传输到计算机中进行数据处理。光谱仪单元需要冷却到 +19 °C 的稳定温度, 以便使光谱仪的光学性质变化最小并减少探测器暗电流^[13]。室外的二维转动平台可以实现 0~360°方位角和 0~90°仰角的扫描, 并且装有电子倾角仪, 可实现反馈控制, 从而提高仰角指向精度。仪器的正北方设定为方位角 0°, 垂直扫描选取 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 8°, 15°, 30°, 90°(天顶角)10 个仰角。



图 1 测量点的位置

Fig. 1 Location of the measurement sites

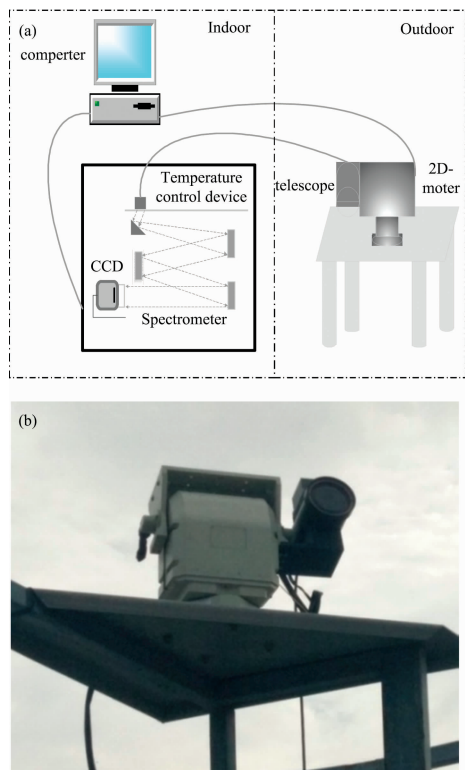


图 2 二维 MAX-DOAS 装置结构图和实物图

Fig. 2 Diagram of 2D MAX-DOAS device structure

2.2 太阳光度计

在二维 MAX-DOAS 仪器北 7 m 处, 运行着一台 CE318 标准型太阳光度计, 如图 3 所示, 用于测 AOD 精度较高的仪器, 从紫外到近红外波段设有 8 个通道, 其中通道中心波长为 340 和 380 nm 所测得的 AOD 用于与 MAX-DOAS 的结果做对比。我们使用云屏蔽和去除了突变值的质量有保证的



图 3 太阳光度计 CE318 实物图

Fig. 3 Solar photometer CE318

level1.5 数据。

2.3 数据处理

利用 DOAS 算法, 将采集到的光谱在 337~370 nm 波段反演 O_4 DSCD, 取当天中午的天顶光谱作为 Fraunhofer 参考光谱 (FRS)。利用 QDOAS 软件, 将 FRS、若干痕量气体吸收截面、Ring 谱的三阶多项式和二阶偏移多项式的对数拟合到测量光谱的对数, 并针对暗电流和偏移进行了修正, QDOAS 参数设置如表 1 所示。图 4 (a, b, c, d) 分别给出了 2018 年 6 月 2 日 13:08 在方位角为 0° , 仰角 30° 时记录的 DOAS 拟合的实例。对于每个测量周期, 将相应的天顶光谱 (仰角 90°) 作为离轴仰角处的光谱的 FRS。在很大程度上消除了对 DSCD 的平流层贡献。但是, O_4 DSCD 仅受平流层吸收的轻微影响因为 O_4 主要存在于对流层。工作中使用高分辨率吸收截面, 通过仪器狭缝函数进行卷积以匹配仪器的分辨率。

表 1 QDOAS 参数设置

Table 1 QDOAS parameter settings

Parameter	Data source	Fitting interval O_4 (337~370 nm)
NO_2	Vandaele et al. [14], 220, 294 K	×
O_3	Bogumil et al. [15], 223, 243 K	×
O_4	Thalman and Volkamer [16], 293 K	×
HCHO	Meller and Moortgat [17], 293 K	×
Ring	Two Ring spectra calculated with DOASIS (Kraus [18])	×
Polynomial degree		5

3 结果与讨论

3.1 MAX-DOAS 与 CE318 测量 AOD 相关性对比

利用 QDOAS 软件, 将测量光谱计算出 O_4 DSCD, 然后再利用 PriAM 算法反演出 AOD。由 MAX-DOAS 和太阳光度计测量的气溶胶光学厚度 (AOD) 的时间序列如图 5 (a) 所示, AOD 的日均值时间序列如图 5 (b) 所示, MAX-DOAS 和太阳光度计数据随时间显示出相似的变化趋势。另外, 在测量时间段, MAX-DOAS 测得的 AOD 均值为 0.71, 日均值在 0.26~1.90 之间。由于 MAX-DOAS 和太阳光度计的采样时间不同, 因此进行小时均值和日均值处理, MAX-DOAS 和太阳光度计 AOD 测量之间的相关性如图 5 (c) 和 (d) 所示, MAX-DOAS 测量结果与 AERONET 观测值的小时均值 Pearson 相关系数 $r_{\text{hourly}}=0.92$, 日均值相关系数 $r_{\text{daily}}=0.91$, 均表现出良好的一致性, 截距为 0.14, 且太阳光度计测得的 AOD 比 MAX-DOAS 所测结果高出 20%。由于 MAX-DOAS

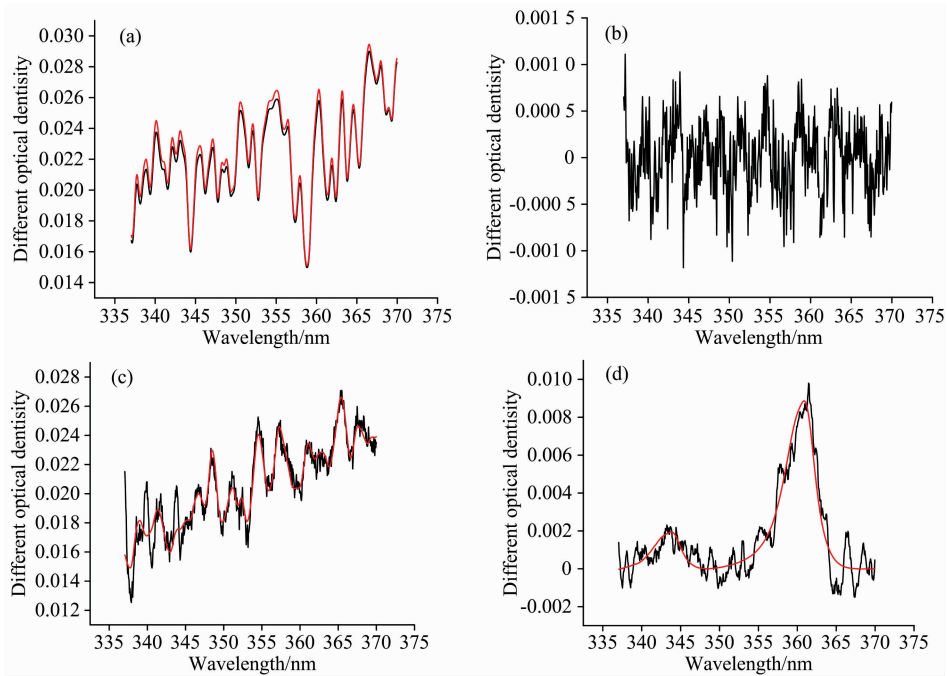


图 4 QDOAS 反演示例

(a): 观测光谱与参考光谱; (b): 残差; (c): $\text{NO}_2 \text{DSCD} = 3.22 \times 10^{16} (\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2})$; (d): $\text{O}_4 \text{DSCD} = 3.48 \times 10^{13} (\text{molec}^2 \cdot \text{cm}^{-5})$

Fig. 4 QDOAS retrieval example

(a): Measuring spectrum and reference spectrum; (b): Residual;

(c): $\text{NO}_2 \text{DSCD} = 3.22 \times 10^{16} (\text{molec} \cdot \text{cm}^{-2})$; (d): $\text{O}_4 \text{DSCD} = 3.48 \times 10^{13} (\text{molec}^2 \cdot \text{cm}^{-5})$

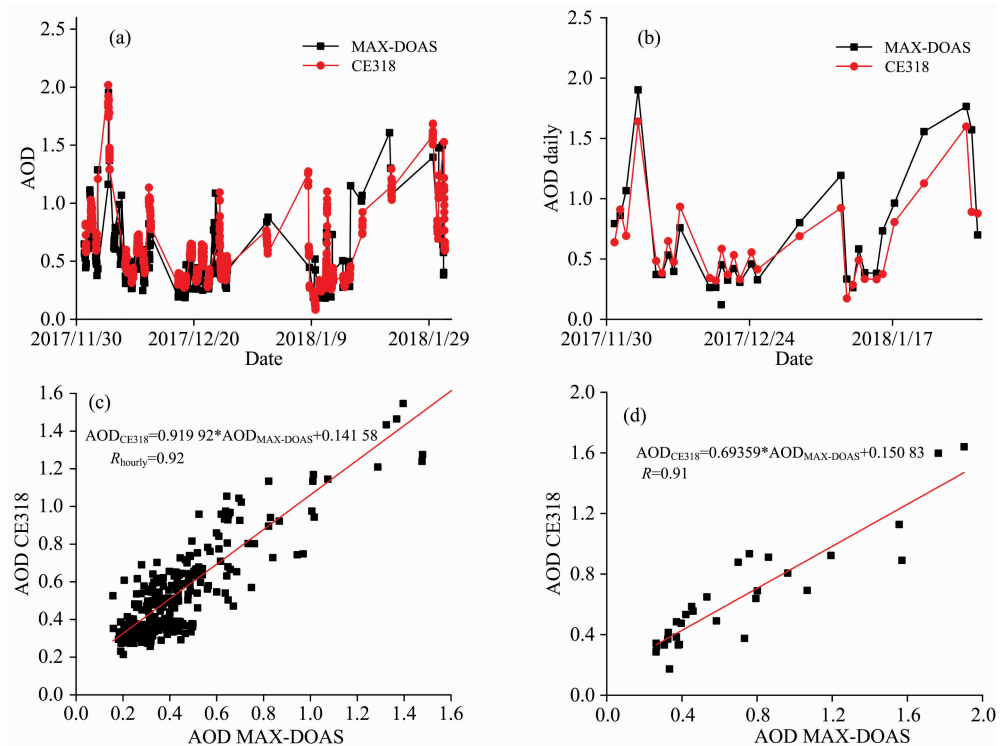


图 5 MAX-DOAS 和 CE318 测量的 AOD 的时间序列图 (a) AOD 小时均值, (b) AOD 日均值 MAX-DOAS 和太阳光度计, AOD 测量之间的相关性 (c) AOD 小时均值, (d) AOD 日均值

Fig. 5 Time series diagram of AOD daily and hourly data measured by MAX-DOAS and CE318 are shown in (a) and (b), respectively. Linear regression plots of daily and hourly data are shown in (c), (d) respectively

测量对对流层低层的气溶胶最敏感,而太阳光度计则通过直接太阳测量得到 AOD,对整个大气中的气溶胶很敏感^[16]。因此,当气溶胶在对流层上层运动时,两次测量之间的差异可能很大^[17]。气溶胶光学特性的假设也导致反演到的 MAX-DOAS AOD 的不确定性。

3.2 近地面气溶胶消光系数

由于在观测地点地表和垂直方向缺乏气溶胶消光系数测量,另一种半定量验证 MAX-DOAS 反演气溶胶消光系数的方法是将其与颗粒质量浓度进行比较。将地面站点的地表 PM_{2.5} 浓度与 MAX-DOAS 反演近地面气溶胶消光系数进行比较,采用气溶胶消光剖面 50 m 以下的底层作为代表性的近地面。图 6(a)和(b)显示了 MAX-DOAS 反演的 AOD 和近地面气溶胶消光系数与用地面站点测量的地表 PM_{2.5} 浓度的时间序列图,其中图中橘色阴影部分的 AOD 值较高,而气溶胶近地面消光系数和 PM_{2.5} 浓度均较低。具体分析橘色阴影时段(12月3日至6日)的气溶胶垂直廓线,将 3 km 以下的气溶胶消光系数分成 6 段进行统计分析,如图 6(c)所示,

气溶胶主要分布在 0.8~1.4 km 处,表明这一时段气溶胶主要位于高层,因此导致 AOD 与近地面仪器测量的 PM_{2.5} 浓度相差较大。

如图 6(d)(e)所示,MAX-DOAS 反演的气溶胶近地面消光系数与地面 PM_{2.5} 浓度之间存在良好的一致性,这意味着 MAX-DOAS 反演获得的近地面消光系数真实地反映了地面附近的颗粒物含量。气溶胶消光系数和颗粒质量浓度的日均值和小时均值线性拟合相关系数 r 分别为 0.83 和 0.62。通过对两种气溶胶类型进行回归分析,气溶胶消光系数基本随颗粒质量浓度变化;然而,它也受到粒子组成、吸湿性和气象条件等多种因素的影响;其次,原位 PM_{2.5} 数据直接在地表面处或靠近表面测量,而气溶胶近地面消光系数是从 MAX-DOAS 反演到的从地面到 50 m 的剖面中提取的,在大的水平距离上取平均值。因此,颗粒的分布不均匀在垂直和水平方向上,降低了这两个数据系列的一致性^[18]。同时,整个反演的数据集没有考虑云的影响。

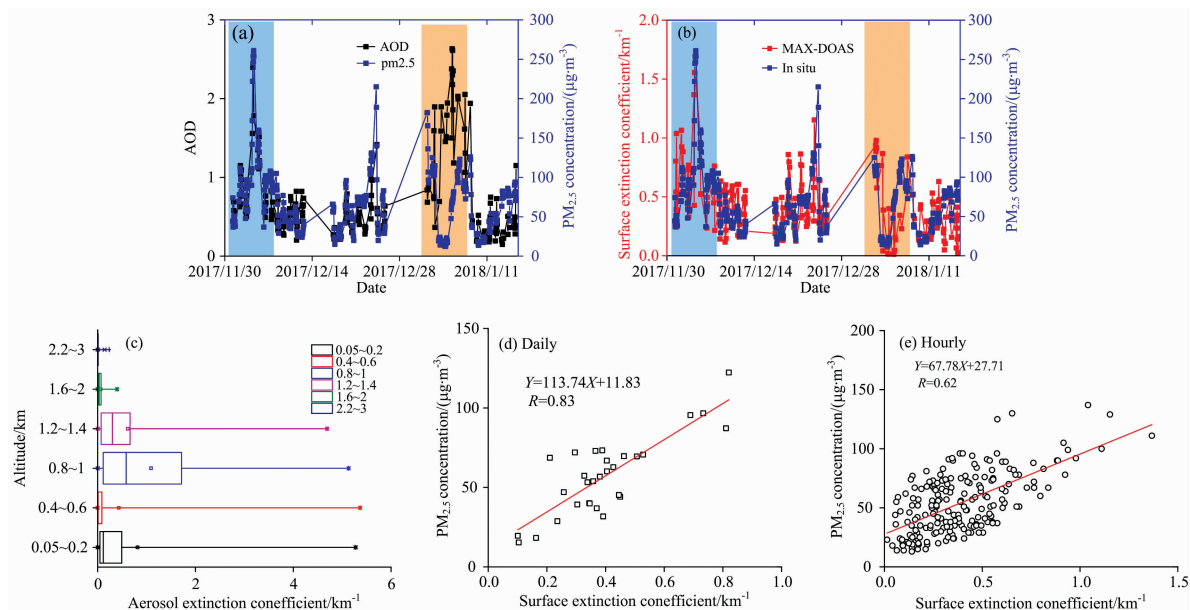


图 6 (a)MAX-DOAS 反演的 AOD 与地面站点测得的 PM_{2.5} 浓度的时间序列图; (b)MAX-DOAS 反演气溶胶近地面消光系数与地面站点测得的 PM_{2.5} 浓度的时间序列图; (c)橘色阴影时段 3 km 以下气溶胶消光系数分段统计图; (d)气溶胶近地面消光系数与 PM_{2.5} 浓度的日均值相关性; (e)小时均值相关性

Fig. 6 (a)Time series of the AODs at 360 nm retrieved from MAXDOAS and comparison with in situ PM_{2.5} concentration; (b)Time series of surface aerosol extinction coefficient retrieved from MAX-DOAS and comparison with in situ PM_{2.5} concentration; (c) Segmentation chart of aerosol extinction coefficient below 3 km in orange shaded period; Linear regression plots of daily and hourly data are shown in (d) and (e), respectively

3.3 一次雾霾过程分析

图 6(a)和(b)的蓝色阴影处是 2017 年 12 月 3 日至 6 日的一次明显雾霾过程,图 7(a)是 MAX-DOAS 测得的 AOD 与地面站点测得的 PM_{2.5} 浓度在此次污染过程的时间序列图,4 日的气溶胶含量达到最大值,5 日稍有下降。图 7(b)和(c)展现了这一段时间的温湿度及风速风向等气象参数,4 日和 5 日的相对湿度基本在 80% 以上,这种高湿度环境更利于气溶胶吸湿增长,使污染加重;4 日凌晨左右风向从东南风

变成了北风,而且污染严重的两天风向均是来自西北方向,表明北边有污染气团传输过来,5 日夜间风向又变为东南方向,气溶胶含量下降,污染减弱。图 7(d)是基于后向轨迹分析(Hysplit 模型, <http://www.ready.noaa.gov>)的 4 日 12 点的 48 小时风场后向轨迹图,500 m 高度风场来自东北方向,1 500 和 3 000 m 高度风场来自西北方向,三者占比相近,可见西北方向的风场影响更大,这也与图 7(c)结果吻合。从图 8 气溶胶消光系数垂直分布可以看出,气溶胶主要

聚集在地面上 1 km 附近,且在雾霾期间(4 日至 5 日),气溶胶均是上午聚集在 1 公里高度,到了中午便开始沉降近地面。另外,结合图 6(b)这一时段气溶胶近地面消光系数与

PM_{2.5}趋势一致,更加说明 MAX-DOAS 测量对对流层低层的气溶胶最敏感。

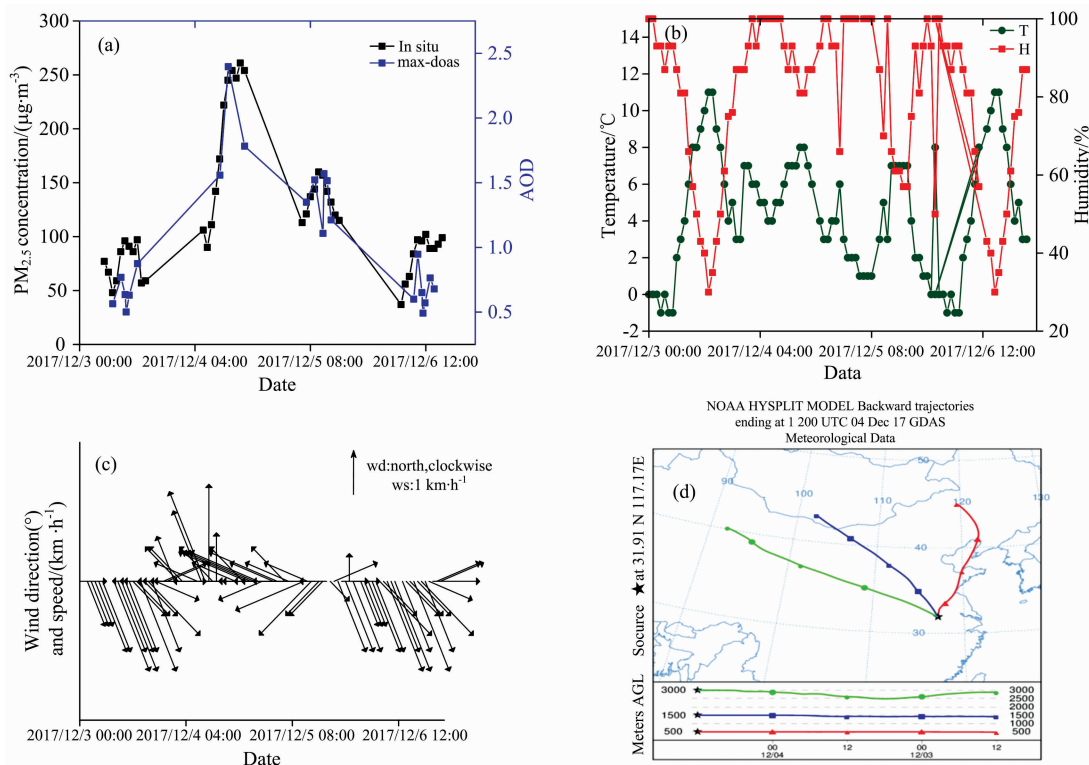


图 7 (a)2017 年 12 月 3 日至 6 日 MAX-DOAS 反演的 AOD 与地面站点测量的 PM_{2.5} 浓度时间序列图; (b)温湿度; (c)风速风向; (d)2017 年 12 月 4 日 12 点的 48 h 风场后向轨迹图
 Fig. 7 (a)Time series of the AODs at 360 nm retrieved from MAXDOAS and comparison with in situ PM_{2.5} concentration on 3th to 6th Dec 2017; Diurnal variation of meteorological parameters are showed in (b) and (c); (d) 49 h back-trajectories arriving in Hefei at 12:00 4 Dec 2017

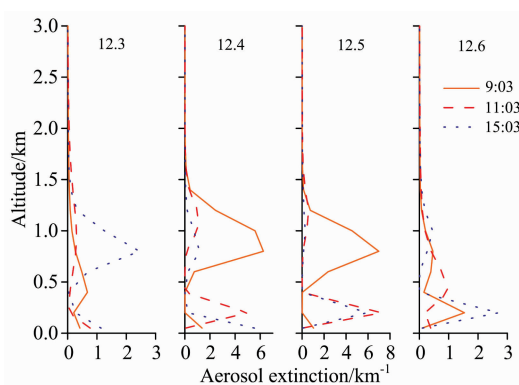


图 8 气溶胶消光系数的垂直分布
 Fig. 8 Vertical profiles of aerosol extinction coefficients

4 结论

利用 MAX-DOAS 从 2017 年 12 月至 2018 年 1 月在合肥市科学岛观测并反演了气溶胶 AOD 和消光系数。通过反

演 O₄ 斜柱浓度,利用廓线反演算法 PriAM 反演对流层 4 km 以下的气溶胶消光系数。将 MAX-DOAS 在 360 nm 反演的 AOD 与太阳光度计 CE318 的结果进行比较,二者均表现出相似的时间变化规律,小时均值和日均值的相关系数 *r* 均达到 0.90 以上,但太阳光度计测得的 AOD 比 MAX-DOAS 测得的高出 20%。MAX-DOAS 测量对对流层低层的气溶胶最敏感,而太阳光度计通过直射阳光测量得到 AOD,对整个大气中的气溶胶很敏感。将 MAX-DOAS 反演的近地面气溶胶消光系数与地面站点的 PM_{2.5} 浓度进行了对比,两种数据之间的对比呈现出良好一致性。选择 2017 年 12 月 3 日至 6 日的雾霾期间 MAX-DOAS 反演气溶胶,与地面站点 PM_{2.5} 对比,并通过气团后向轨迹分析辅助 MAX-DOAS 反演识别污染来源,结果表明,除近地面二者表现出相同的变化趋势外,MAX-DOAS 还获得了高空气溶胶的分布变化信息,说明 MAX-DOAS 技术是获取对流层的气溶胶信息的有效工具,其结果可以为气象、环境管理部门提供重要的数据支持。

References

- [1] Lee H, Irie H, Gu M, et al. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(32): 5760.
- [2] Crippa M, Ciarelli G, Piazzalunga A, et al. *Nature*, 2014, 514: 218.
- [3] Liu Y, Zhang T, Xiang Y, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0505001.
- [4] Hönninger, G, Platt U. *Atmos. Environ.*, 2002, 36: 2481.
- [5] Zieger P, Weingartner E, Henzing J, et al. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2011, 10(12): 2603.
- [6] Irie H, Nakayama T, Shimizu A, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(7): 1013.
- [7] Davis Z, Friess U, Strawbridge K, et al. EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2016.
- [8] Zhang J W, Wang S S, Guo Y L, et al. *Atmos. Environ.*, 2018, 192: 193.
- [9] Platt U, Perner D, Patz H. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(10): 6329.
- [10] Wang Y, Li A, Xie P H, et al. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 180705.
- [11] Chan K L, Wiegner M, Wenig M, et al. *Science of the Total Environment*, 2017, 619: 1545.
- [12] Frieß U, Klein Baltink H, Beirle S, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(7): 3205.
- [13] Wagner T. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research= Revistabrasileira de pesquisasmedicas e biologicas /Sociedade Brasileira de Biofisica*, 2011, 44(7): 618.
- [14] WANG Ting, WANG Pu-cai(王 婷, 王普才). *Journal of Geophysics(地球物理学报)*, 2018, 61(2): 494.
- [15] Ivan Ortega, Larry K Berg, Richard A Ferrare. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2016, 176: 34..
- [16] Wang S, Cuevas C A, Frieß U, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(10): 5089.
- [17] Wang Y, Lampel J, Xie P, et al. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17(3): 1.
- [18] Frieß U, Baltink H K, Beirle S, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(7): 3205.

Aerosol Observation and Research in Hefei by MAX-DOAS Technology

LI Xiao-mei^{1,2}, XIE Pin-hua^{1,2,3*}, XU Jin¹, LI Ang¹, TIAN Xin², REN Bo², HU Zhao-kun^{1,2}, WU Zi-yang²

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

Abstract Atmospheric aerosols range in diameter from a few nanometers to tens of micrometers, with direct or indirect effects on atmospheric radiation assessments, global climate change, local air quality and visibility, and human health. Especially during the high season of smog in autumn and winter, it's more conducive to the formation, transformation and accumulation of atmospheric aerosols. At present, there are many technologies for aerosol observation, including laser radar, solar photometer, canopy meter, and satellite remote sensing, etc. Multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) technology is a passive and telemetry spectroscopy instrument. In addition to the characteristics of stable and real-time continuous monitoring, it can simultaneously acquire the concentration information of various trace gases and further retrieve the aerosol optical thickness (AOD) and aerosol profile. This paper introduces the method of aerosol retrieval by retrieving O_4 column concentration information based on MAX-DOAS technology. Ground-based MAX-DOAS measurements were carried out at Science Island, Hefei from December 2017 to January 2018. The spectra were recorded with an azimuth of 0 degrees (north) and 10 elevation angles from low to high in the vertical direction for each scanning cycle. The zenith direction measured the spectrum as a reference spectrum. In the 337~370 nm band, we calculated the total amount of oxygen dimer (O_4) differential slant column densities (DSCD) using QDOAS software, and retrieved aerosol optical thickness (AOD) and aerosol extinction coefficient (AE) using the aerosol profile inversion algorithm (PriAM). We compared the results with the AOD measured by the solar photometer CE318, and the correlation coefficient between the hourly mean and the daily average was 0.91. The results showed that MAX-DOAS has high reliability in obtaining aerosol information. In addition, we also compared the near-surface aerosol extinction coefficient obtained by MAX-DOAS with the $PM_{2.5}$ concentration measured by the point instrument at the ground station. The correlation coefficient r of the daily mean and hourly mean linear fit was 0.83 and 0.62, respectively, which further verified the reliability of MAX-

DOAS for obtaining aerosol information. Since winter is a time for high incidence of haze, the AOD value is higher. We studied a smog process from December 3 to 6, 2017, and found the aerosol was mainly distributed below 1 km. Combining with the wind field information and the airflow backward trajectory map during the period of haze, it can be seen that the pollution is caused by the transportation of polluted air masses in the northwest.

Keywords Multi-axis differential optical absorption spectroscopy; Sorlar photometer; Aerosol optical thickness; Aerosol extinction coefficient

(Received Jan. 7, 2019; accepted Apr. 13, 2019)

* Corresponding author

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

《光谱学与光谱分析》2020年征订启事

国内邮发代码：82-68

国外发行代码：M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN码：GYGFED，国内外公开发行人，大16开本，332页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价95元，全年1140元。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的CJCR, CNKI, CSCD, SCI, AA, CA, Ei, AJ, PJK, MEDLINE, Scopus等文献机构收录。根据中国科学技术信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子、引文量及综合评价总分《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可证：京海市监广登字20170260号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路76号（南院），

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码：100081

联系电话：010-62181070, 62182998

电子信箱：chnghpxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：<http://www.gpxygpfx.com>

