

基于多轴差分光学吸收光谱探测的北京春季气溶胶垂直廓线

蒋 诚¹, 唐贵谦^{2*}, 李启华^{1*}, 刘保献³, 王 蒙², 王跃思²

1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601

2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

3. 清华大学环境学院, 北京 100084

摘 要 气溶胶垂直廓线是评估污染物来源、输送等途径的必要手段。气溶胶污染对环境和人体健康带来直接的影响。该研究于2019年4—5月,利用中国科学院大气物理研究所(39.98°N, 116.39°E)的地基多轴差分光学吸收光谱(MAX-DOAS)仪,对北京地区春季大气光谱垂直廓线进行了观测。凭借MAX-DOAS实时、在线、连续的观测优势,能有效的对气溶胶进行监测。MAX-DOAS基于最优估算法(OEM)以及最小二乘光谱拟合法,并以辐射传输模型SCIATRAN作为前向模型,利用海德堡廓线(HEIPRO)算法反演得到气溶胶消光系数的垂直廓线,通过对气溶胶消光系数在其路径的积分获得气溶胶光学厚度(AOD)。利用地基太阳光度计观测的AOD和高塔观测的颗粒物质量浓度垂直廓线,分别与MAX-DOAS观测的AOD和气溶胶消光系数垂直廓线进行对比,验证MAX-DOAS算法的适用性。研究结果表明,MAX-DOAS与太阳光度计观测AOD结果,相关系数为0.92,斜率为0.89。三层气溶胶消光系数与PM_{2.5}质量浓度的皮尔森相关系数从低处到高处分别达到0.69(60 m), 0.77(160 m)和0.75(280 m)。并且,将气溶胶平均消光系数和对应三层(60, 160和280 m)的PM_{2.5}平均质量浓度对比,发现两者趋势一致。同样的,为了验证MAX-DOAS是否具备准确识别污染物的长距离输送的能力,我们通过Angstrom指数确定沙尘天气,通过计算梯度理查森数和边界层高度确定静稳天气,分析了在特殊天气条件下,MAX-DOAS能够对沙尘和静稳天气做出及时、准确的响应。分析气溶胶平均消光系数,发现气溶胶垂直廓线随高度升高呈现指数衰减变化的趋势,并且气溶胶消光系数均值在1.5 km高度处约为近地面的50%左右,而在1.5 km以上消光系数会随着高度的增加而快速减小。当高度达到2 km左右时,气溶胶消光系数均值下降到了0.1 km⁻¹。以上结果表明MAX-DOAS探测大气气溶胶垂直廓线具有较高的适用性。

关键词 颗粒物污染; 气溶胶; 垂直廓线; 地基多轴差分光学吸收光谱; 相关性

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)01-0265-07

引 言

随着工业化进程的加快,空气质量受到了严重的影响,人们的生活环境以及生态环境也正在遭受着越来越严重的挑战^[1]。颗粒物污染会对人们的身体健康带来极大的威胁,包括刺激人的皮肤及眼睛,引起呼吸道的各种疾病,严重刺激人的神经系统。各地,尤其是大城市经常出现大范围的重霾天气,颗粒物的污染导致了能见度的降低。空气质量的改善成为越来越多人的迫切需要,因此全国也加大了对颗粒物污

染治理的重视程度。据“大气十条”评估报告显示,2013年—2017年北京京津冀、长三角和珠三角近地面PM_{2.5}质量浓度分别下降了39.6%, 34.3%和27.7%,同时相应的大气气溶胶光学厚度(AOD)柱总量下降率分别为28%, 16%和20%^[2]。整体下降趋势显著的同时,仍未达到WHO的标准,中国对颗粒物污染的治理也进入了深水区。此外,近地面污染物下降相对柱浓度的趋势更明显,两者在下降率上并不匹配,急需垂直层面的检测仪器进行观测分析。

由于颗粒物寿命长,不易清除,导致颗粒物的区域输送,尤其是高空输送的问题,仅仅靠近地面的观测无法捕

收稿日期: 2020-11-03, 修订日期: 2021-02-22

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFC0210000, 2016YFC0203302, 2018YFC0213104), 国家自然科学基金项目(41705113, 41877312, 41722501, 51778596), 中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA23020301)资助

作者简介: 蒋 诚, 1996年生, 安徽大学物质科学与信息技术研究院硕士研究生 e-mail: jiangcheng@dq.cern.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: tgq@dq.cern.ac.cn; lqh628@ahu.edu.cn

捉,垂直观测的重要性显而易见。目前全国虽已经建立了 1 000 多个观测站对颗粒物污染进行观测,但却缺乏光学手段对颗粒物进行垂直层面的观测。以往国内外在进行颗粒物的垂直观测时采用的手段都存在诸多的局限性:首先是进行的铁塔观测^[3],由于高度问题,只能进行近地面的观测;其次是激光雷达的观测^[4],因为存在近地面的盲区,加之由于仪器不稳定带来维护成本高的问题,并不能进行很好的观测,此外由于仪器在结露时受水汽影响大,亦是实验中需要解决的问题;最后是飞机遥测^[5],虽然观测的效果不错,但由于只能进行短期观测,并不能反映区域长时期的气溶胶状况,难以真正地服务到大众。

而本课题所用多轴差分光学吸收光谱(MAX-DOAS)仪,由于是实时、在线、连续的观测仪器,加之观测高度可达 4 km,成为了优秀的观测手段。MAX-DOAS 的对比验证通常包括飞机航测和雷达观测两种方式。Wang 等开展了 MAX-DOAS 监测和飞机航测的对比研究,发现两者探测的消光系数有很强的一致性^[6]。此外气溶胶激光雷达的对比也表明,MAX-DOAS 探测气溶胶垂直廓线有很好的适用性^[7]。但由于飞机和气溶胶激光雷达存在近地面盲区的问题,MAX-DOAS 探测的近地层气溶胶垂直廓线仍未有明确的

验证。

为解决上述问题,本研究结合 MAX-DOAS、太阳光度计对北京地区 AOD 进行相关性分析,结合 MAX-DOAS 与高塔观测进行气溶胶消光系数与 PM_{2.5} 质量浓度的相关性分析,进而检验其对颗粒物垂直结构的响应能力。对 MAX-DOAS 的适用性做出评估,从而使得 MAX-DOAS 能在环境监测方面得到推广。

1 实验部分

1.1 实验场地与观测时段

MAX-DOAS 实验仪器被安装在中国科学院大气物理研究所的合建楼顶(39.98°N, 116.39°E),距离地面约 44 m,是典型的城市中心地带^[8]。太阳光度计 CE-318 和颗粒物分析仪安装在铁塔分部(39.98°N, 116.38°E)的地面,两地相距约 1 km,中间隔着一条京藏高速^[9]。本研究时段为 2019 年 4 月至 5 月,利用中国科学院大气物理研究所铁塔的优势,建立对颗粒物浓度的梯度测量,进而分析 MAX-DOAS 在监测气溶胶污染时的适用性。

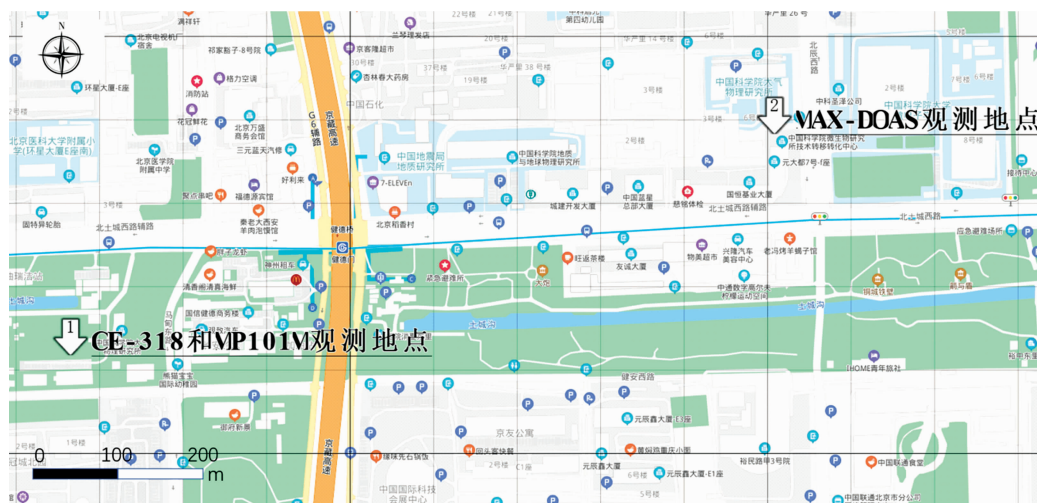


图 1 观测点位置图

(1): CE-318, MP101M 观测地点; (2): MAX-DOAS 观测地点

Fig. 1 Location map of observation points

(1): CE-318, MP101m observation site; (2): MAX-DOAS observation site

1.2 MAX-DOAS 测量

实验所用仪器型号为 SkySpec-2D-200-System (MAX-DOAS),光谱仪覆盖了紫外(303~370 nm)和可见光(390~608 nm),利用多轴扫描的方式,反演气溶胶总消光。仪器通过步进电机从地平线到天顶进行自动调整观测,仪器视野小于 1°。由内部程序设定了 11 个(1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6°, 8°, 10°, 15°, 30°和 90°)观测仰角,每个角度扫描 100 次。由于采用的是被动式探测方法,MAX-DOAS 的工作时间为每天的 8:00—17:00,选取的气溶胶反演波段为 338~370 nm,吸收峰的中心波长为 360.8 nm,垂直廓线时间分辨率及观测垂直分辨率分别为 15 min 和 100 m。进行气溶胶反演时,在反

演算法的辐射传输模型(RTM)中分别设置基本参数:太阳天顶角(SZA)、单次散射反照率以及廓线类型等,此外还需设置观测高度 100 m 为一层,每一层设置一个消光,然后用最优估算法(OEM)进行反演。光谱分辨率半高宽(FWHM)紫外为 0.45 nm,可见光为 0.3 nm。通过利用海德堡(HEIPRO)反演算法,主要基于最优估算法以及最小二乘光谱拟合法,并以辐射传输模型 SCIATRAN 作为前向模型^[10],计算不同高度消光系数。

1.3 CE-318 测量

地面 AOD 的测量选用的仪器为 CE-318 型太阳光度计。由于 MAX-DOAS 反演所选用的波段为 361 nm,选用波长为

340 nm 光谱通道。采用对数线性曲线拟合算法, 在 340 nm 处估算 Angstrom 指数。Angstrom 指数定义为

$$\tau_{\text{aero}}(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

式(1)中, $\tau_{\text{aero}}(\lambda)$ 是 AOD, β 是表示大气中气溶胶含量的浊度系数, α 是 Angstrom 指数。Angstrom 指数的计算公式为^[11]

$$\alpha = -\frac{\ln[\tau_{\text{aero}}(\lambda_2)] - \ln[\tau_{\text{aero}}(\lambda_1)]}{\ln(\lambda_2) - \ln(\lambda_1)} \quad (2)$$

之后我们通过波长为 340 和 380 nm 两个光谱通道反演的 AOD 数据, 利用线性插值法求出 $\tau_{\text{aero}}(361)$ 。计算 $\tau_{\text{aero}}(361)$ 线性插值法为

$$K = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}; b = Y_1 - KX_1; Y = KX + b \quad (3)$$

$$\tau_{\text{aero}}(361) = \exp(Y) \quad (4)$$

其中: $X_1 = \ln(340)$; $X_2 = \ln(380)$; $X = \ln(361)$; $Y_1 = \ln(340 \text{ nm 通道反演的 AOD})$; $Y_2 = \ln(380 \text{ nm 通道反演的 AOD})$; 最后将所得数据求取小时平均值进行分析。

1.4 MP101M 测量

测量颗粒物浓度采用法国 MP101M 颗粒物分析仪。利用中国科学院大气物理研究所的铁塔的高度优势, 建立了基于铁塔的 60, 160 和 280 m 三个高度梯度观测平台。其工作原理主要基于 β 射线法^[12]。

1.5 数据处理和质量控制

为了避免平流层吸收引起的影 响, 在研究中, 太阳天顶角小于 75° 时的数据进行分析。最后在廓线反演前, 过滤掉残差均方根(RMS)大于 1×10^{-3} 的拟合结果。

在进行数据分析前, 对所获得的数据进行了如下预处理: (1) 首先删除 MAX-DOAS 反演属性中误差的卡方检验 chisq 大于 200 以及自由度 (dfs) 小于 1 的数据。之后将 MAX-DOAS 误差与廓线比值大于 50% 的数据删除。(2) 由于 MAX-DOAS 为被动式观测仪器, 受云层干扰较大, 因此删除有云时间段所有数据。(3) 删除太阳光度计中异常值数据, 同时删除 Angstrom 指数大于 2.0 的数据。参数设置如表 1 所示。

表 1 应用于 MAX-DOAS 的阈值结果

Table 1 Threshold results applied to Max-DOAS

参数	具体条件
SZA	$< 75^\circ$
RMS	$< 1 \times 10^{-3}$
Chisq	< 200
Dfs	> 1
相对误差	$< 50\%$
云条件	除去所有有云时段

进行数据筛选后, 将数据进行小时平均处理, 并将气溶胶消光系数积分获得 AOD, 同太阳光度计观测数据进行对比。

1.6 辅助数据

为了验证 MAX-DOAS 在不同天气条件下的适用性, 引入了一些气象数据。其中, 利用梯度理查森数 (Ri) 来判定当天是否处于静稳天气。 Ri 的值可以用来表示大气的稳定性,

当 $Ri > 1$ 时表明大气处于静稳状态, 并且 Ri 值越大, 大气越稳定^[13]。计算梯度理查森数所用的数据包括高度、位温、风速、风向等气象数据, 上述数据获取来源是中国气象局国家测深观测站 (ID: 54511, 116.470°E, 39.806°N), 场地位于南五环亦庄桥上, 是北京主城区的南边界。边界层高度通过中国科学院大气物理研究所增强型单透镜云高仪进行观测, 通过根据衰减后向散射系数的垂直梯度突变的位置来计算边界层高度 (BLH)^[14]。

2 结果与讨论

2.1 AOD 评估

气溶胶光学厚度是表征大气浑浊程度的关键物理量, 反映了大气能见度情况^[15]。首先, 验证 MAX-DOAS 在测量 AOD 时的准确性。通过比对 CE-318 获得 AOD 和 MAX-DOAS 获得的 AOD, 发现两者的相关系数达到 0.92, 同时, 斜率为 0.89, 其相关性分析如图 2 所示, 证明两者 AOD 观测数据具有很高的相关性。

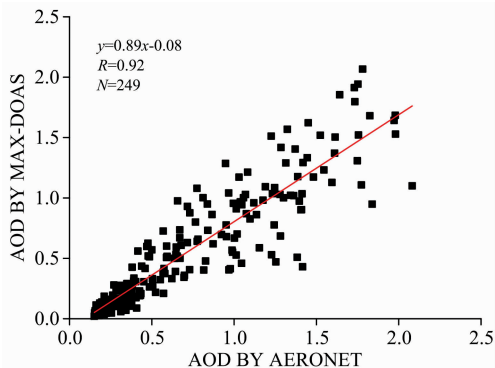


图 2 CE-318 与 MAX-DOAS 的 AOD 相关性分析

Fig. 2 AOD correlation analysis between CE-318 and MAX-DOAS

2.2 气溶胶垂直廓线评估

MAX-DOAS 反演得到的气溶胶消光系数, 从近地面到达 4 km 的高度, 每 100 m 划分为一层, 共有 40 层。为了验证 MAX-DOAS 的准确性, 比较了最低 3 层 (MAX-DOAS 的 0~200 m) 的平均梯度浓度, 由于颗粒物分析仪的时间分辨率为 15 min, 因此比较两者每层的小时平均。

将两者在不同高度的小时平均值进行相关性的比较, 其中在 60 m 处相关性为 0.69, 在 160 m 处为 0.77, 在 280 m 处为 0.75, 相应的相关性分析图如图 3 所示。这证明 MAX-DOAS 所得的气溶胶消光系数与铁塔监测所获得的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度同样具有较高相关性。

2.3 长距离输送特例

为了进一步验证 MAX-DOAS 和真实大气的相关性, 分析了特殊天气条件下 (如沙尘天气、静稳天气等), MAX-DOAS 是否具有相应的响应能力。

2.3.1 对沙尘天气的响应能力

Angstrom 指数的大小能反映大气中气溶胶颗粒粒径的

大小。Angstrom 指数越小, 气溶胶颗粒粒径越大, 反映可能存在沙尘天气。为了判断当天是否处于静稳天气, 我们引入

了梯度理查森数。从图 4(b) 我们发现在绝大多数时候 Ri 都是小于 1 的, 说明当时的天气并非处于静稳状态下。

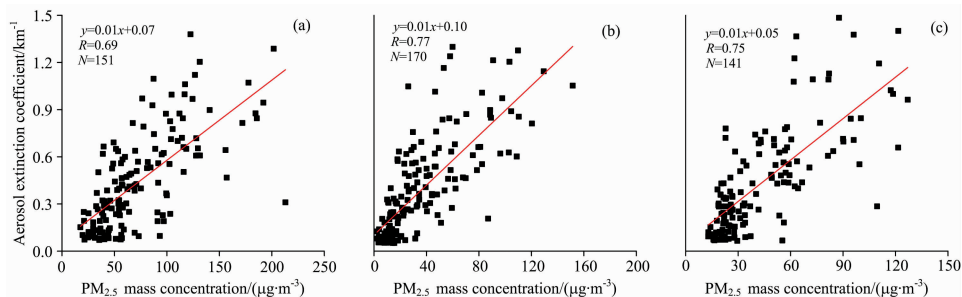


图 3 三层 $PM_{2.5}$ 质量浓度与气溶胶消光系数相关性

(a): 60 m; (b): 160 m; (c): 280 m

Fig. 3 Correlation between mass concentration of three-layer $PM_{2.5}$ and extinction coefficient of aerosol

(a): 60 m; (b): 160 m; (c): 280 m

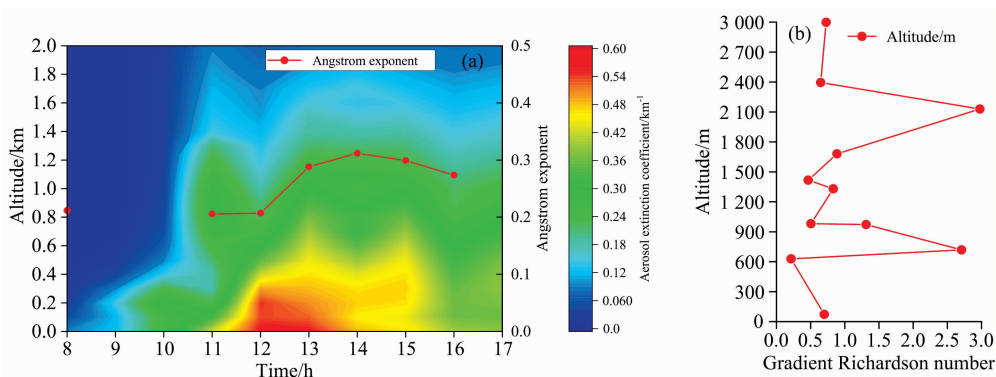


图 4 2019 年 4 月 5 日北京地区分析图

(a): 气溶胶消光系数与 Angstrom 指数; (b): 上午 8 点北京地区梯度理查森数

Fig. 4 The analysis diagram of Beijing area on May 11, 2019

(a): Aerosol extinction coefficient and Angstrom exponent;

(b): Gradient Richardson number in Beijing area, at 8 a. m.

2019 年 4 月 5 日, 沙尘持续时间为 11 时至 21 时, MAX-DOAS 对此次沙尘天气做出了及时的响应。在 11 时后, Angstrom 指数一直处于较低状态, 反映出沙尘天气的到来, 同时, 气溶胶消光系数的骤升验证了大气中颗粒物含量的增加。从图中可以看出, 污染在 11 点呈现出“葫芦”状, 近地面和 0.5~1.0 km 处为高值, 而 0.2~0.5 km 处为低值。伴随着 Angstrom 指数在 12 点的下降, 12 点时近地面污染加重, 而高空污染物出现明显的下降, 污染物从 0.8 km 高空向近地面输送。

2.3.2 对静稳天气的响应能力

2019 年 5 月 11 日上午 8 点梯度理查森如图 5(b) 所示。此外, 为了确保静稳天气的准确性, 同时考虑了当天该时段边界层高度的数据, 如图 5(a)。

北京时间 2019 年 5 月 11 日 12 时前, 边界层高度处于较低值, 同时, 在高度为 200~900 m 的大气中, Ri 一直处于较高值 ($Ri > 1$), 说明此时北京处于静稳状态下, 大气中的污染物无法进一步扩散, 导致了气溶胶消光系数的升高。13 时后, 边界层高度升高, 污染物扩散, 气溶胶消光系数呈现

出下降的态势。这表明 MAX-DOAS 在大气处于静稳状态下对污染物能做出及时的响应。

2.3.3 对重污染静稳天气的响应能力

在静稳天气下, 经常存在重污染的天气情况。因此, MAX-DOAS 能否在重污染条件下保持着较高的响应能力同样很重要。北京时间 2019 年 4 月 23 日, 北京地区上午出现了重污染, 对应边界层高度处于较低状态, 且存在 $Ri \gg 1$ 的情况[如图 5(b) 所示], 北京当天处于静稳的重污染环境下。

如图 6(a) 所示, MAX-DOAS 观测的气溶胶消光系数在近地面至接近边界层的 500 m 高空处于较高值, 显示了重污染的情况。在正午后, 随着边界层的升高, 静稳状态解除, 污染物逐渐向高空输送, 近地面的污染情况得到了缓解, MAX-DOAS 准确的监测到了这一污染的输送情况。

2.4 垂直变化规律

本文将 2019 年 4 月—5 月两个月的气溶胶垂直廓线求取平均, 发现平均垂直廓线随高度增加而呈现 e 指数递减, 如图 7 所示。气溶胶消光系数均值在 1.5 km 高度处约为近地面的 50%, 而在 1.5 km 以上消光系数随着高度的增加而

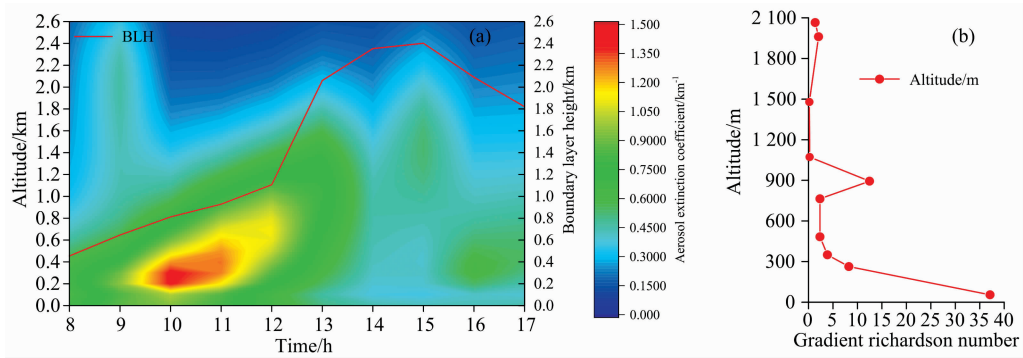


图 5 2019 年 5 月 11 日北京地区分析图
 (a): 气溶胶消光系数与边界层高度; (b): 上午 8 点北京地区梯度理查森数

Fig. 5 The analysis diagram of Beijing area on May 11, 2019

(a): Aerosol extinction coefficient and boundary layer height; (b): Gradient Richardson number in Beijing area, at 8 a. m.

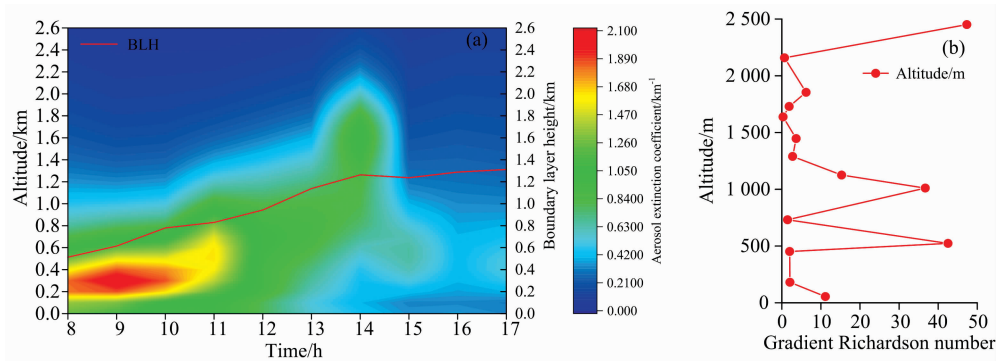


图 6 2019 年 4 月 23 日北京地区分析图
 (a): 气溶胶消光系数与边界层高度; (b): 上午 8 点北京地区梯度理查森数

Fig. 6 The analysis diagram of Beijing on Apr 23, 2019

(a): Aerosol extinction coefficient and boundary layer height; (b): Gradient Richardson number in Beijing area, at 8 a. m.

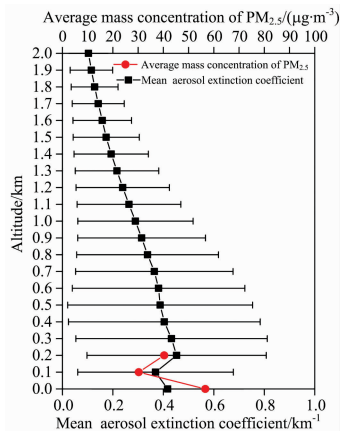


图 7 气溶胶消光系数和 PM_{2.5} 平均垂直廓线
 Fig. 7 Mean vertical profile of Aerosol extinction coefficient and PM_{2.5}

快速减小。当高度达到约 2 km 时, 气溶胶消光系数均值下降至 0.1 km⁻¹。在整体都出现递减的情况下, 气溶胶消光系数平均垂直廓线和 PM_{2.5} 平均质量浓度均在近地层出现先降低后升高的情况, 两者趋势一致。

3 结 论

为验证北京地区 MAX-DOAS 算法对于气溶胶的适用性。2019 年 4 月 1 日至 5 月 31 日期间, 在北京地区利用 MP101M 颗粒物分析仪, 获取了 PM_{2.5} 质量浓度的廓线(60, 160 和 280 m), 并在同时段通过 MAX-DOAS 反演气溶胶消光系数廓线(0, 100 和 200 m), 证实 MAX-DOAS 对于气溶胶消光的反演大大提高了垂直层面监测的精度, 同时完善了颗粒物实时在线的监测体系。

同时, 在出现沙尘天气、静稳条件的污染天气以及重污染情况下, MAX-DOAS 都做出了及时的响应, 说明 MAX-DOAS 反映出真实大气的情况。以上结果均表明 MAX-DOAS 探测大气气溶胶垂直廓线具有较高的适用性。

References

- [1] LIU Tong-zhou(刘统周). Science and Technology Innovation Herald(科技创新导报), 2016, (13): 63.
- [2] ZHANG Xiao-ye, XU Xiang-de, DING Yi-hui, et al(张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等). Chinese Science: Earth Science(中国科学: 地球科学), 2020, (4): 483.
- [3] FENG Xin-yuan, WANG Shi-gong(冯鑫媛, 王式功). Arid Zone Research(干旱区研究), 2014, 31(4): 585.
- [4] LIN A-ling, WU Xi-hong, JIANG Yong-cheng, et al(林阿玲, 巫锡洪, 蒋永成, 等). Straits Science(海峡科学), 2017, (12): 75.
- [5] MOU Jiang-shan, ZHU Yu-jiao, SHAN Ye, et al(牟江山, 朱玉皎, 单 业, 等). Geochimica(地球化学), 2020, 49(3): 99.
- [6] Wang Yang, Steffen Dörner, Sebastian Donner, et al. Atmos. Chem. Phys., 2019, 19(8): 5417.
- [7] WU Feng-cheng, XIE Pin-hua, LI Ang, et al(吴丰成, 谢品华, 李 昂, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2013, (6): 7.
- [8] Wang Q, Sun Y, Xu W, et al. Atmospheric Chemistry & Physics, 2018, 18: 2495.
- [9] Kumar V, Beirle S, D Rner S, et al. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2020, 20: 14183.
- [10] Xing C, Liu C, Wang S, et al. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(23): 14275.
- [11] Shao Ping, Xin Jinyuan, An Junlin, et al. Atmospheric Pollution Research, 2017, 8: 233.
- [12] LIANG Yan, ZHANG Zeng-fu, CHEN Wen-liang, et al(梁 艳, 张增福, 陈文亮, 等). Journal of Transduction Technology(传感技术学报), 2014, (10): 1418.
- [13] Liu Y, Tang G, Huang X, et al. Atmospheric Research, 2021, 249: 105300.
- [14] Zhao W, Tang G, Yu H, et al. Journal of Environmental Sciences, 2019, 83: 152.
- [15] HOU Si-yuan, LIU Yu-hua, ZHENG Xiao-shen, et al(侯思远, 刘雨华, 郑小慎, 等). Marine Information(海洋信息), 2019, 34(2): 36.

Vertical Profile of Aerosol in Spring in Beijing Based on Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy Detection

JIANG Cheng¹, TANG Gui-qian^{2*}, LI Qi-hua^{1*}, LIU Bao-xian³, WANG Meng², WANG Yue-si²

1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China

2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Aerosol vertical profile is a necessary means to evaluate the source and transport of pollutants. Aerosol pollution has a direct impact on the environment and human health. In April—May 2019, we observed the vertical profile of atmospheric spectra in the Beijing area in spring using the ground-based Multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (39.98°N, 116.39°E). MAX-DOAS can effectively monitor aerosols by virtue of its real-time, online and continuous advantages. MAX-DOAS is based on the optical estimation method (OEM), and the least square spectral fitting method, the radiation transmission model SCIATRAN is used as the forward model, and the HEIPRO algorithm is used to invert the vertical profile of the aerosol extinction coefficient. The aerosol optical depth (AOD) was obtained by integrating the aerosol extinction coefficient in its path. The AOD observed by ground-based solar photometer and particle mass concentration observed by high tower was compared with the AOD and aerosol extinction coefficient observed by MAX-DOAS respectively, to verify the applicability of the MAX-DOAS algorithm. The results show that the correlation coefficient of AOD measured by MAX-DOAS and solar photometer is 0.92 with a slope of 0.89. The Pearson correlation coefficient between the extinction coefficient of three-layer aerosol and the mass concentration of PM_{2.5} reaches 0.69 (60 m), 0.77 (160 m) and 0.75 (280 m) respectively from low to high. In addition, the average aerosol extinction coefficient was compared with the average PM_{2.5} mass concentration of the corresponding three layers (60, 160 and 280 m), and the trend was consistent. Similarly, to verify whether MAX-DOAS can accurately identify the long-distance transport of pollutants, we determine the sand and dust weather through Angstrom exponent and determine the static and stable weather by calculating the gradient Richardson number and boundary layer height. It is analyzed that MAX-DOAS can respond quickly to sand and static and stable weather under special weather conditions. The average extinction coefficient of aerosols was used to explore, and it was found that the vertical profile of aerosols showed an exponential decay trend with height increasing. The average extinction

coefficient of aerosols at the height of 1.5 km was about 50% of that near the ground, while the extinction coefficient above 1.5 km decreased rapidly with height increasing. When the height reached about 2 km, the average extinction coefficient of the aerosol decreased to 0.1 km^{-1} . The above results show that MAX-DOAS has high applicability in detecting atmospheric aerosol vertical profiles.

Keywords Particulate pollution; Aerosol; Vertical profile; MAX-DOAS; Correlation

(Received Nov. 3, 2020; accepted Feb. 22, 2021)

* Corresponding authors

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社