

差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征

范广强 张天舒 付毅宾 董云升 陈臻懿 刘建国 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 差分吸收激光雷达是测量对流层臭氧时空分布的有力工具, 利用差分吸收激光雷达在灰霾条件下开展观测研究, 分析了臭氧浓度时空分布特征。结果表明: 在夏季副热带高压大气天气条件下, 受偏南风气团输送的影响, 6 月中旬形成一次高浓度的臭氧污染过程。6 月 14 日夜间至 6 月 15 日中午离地面 1.5~2 km 高度的臭氧气团浓度 (即体积分数) 高达 1.2×10^{-7} 以上, 下午臭氧气团出现下沉, 从而引起当日下午近地面臭氧浓度的升高。在灰霾天气过程中, 细颗粒物与臭氧分布在不同高度上具有不同的关联特征, 地面颗粒物充分参与了光化学反应过程, 而高空高浓度的颗粒物和臭氧气体则与输送有关。晴朗天气下的臭氧浓度在整个空间尺度上都有不同程度的下降, 并且没有出现明显的外部输入气团。

关键词 大气光学; 差分吸收激光雷达; 灰霾; 臭氧浓度; 副热带高压

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1014003

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone Based on Differential Absorption Lidar in Beijing

Fan Guangqiang Zhang Tianshu Fu Yibin Dong Yunsheng Chen Zhenyi
Liu Jianguo Liu Wenqing

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

Abstract The differential absorption lidar is an effective tool for measuring ozone distributions. In the haze event, the differential absorption lidar is carried out to observe the temporal and spatial distribution characteristics of ozone concentration. The results show that a high ozone pollution process is caused by southwest airflow together with the influence of subtropical anticyclone in mid June. From the night of June 14 to midday of June 15, ozone concentration in high altitude reaches above 1.2×10^{-7} . And the ozone gas ranging from 1.5 km to 2 km moves down to the surface, thus causing the increase of surface ozone concentration afternoon on June 15. In the haze period, the distributions of fine particulates and ozone show different characteristics in different heights. Specifically the near-ground particles completely participate in the photochemical reaction process, while particles and ozone with are more related to transportation. In addition ozone concentration in clear weather is low and no obvious external input air mass is observed.

Key words atmospheric optics; differential absorption lidar; haze; ozone concentration; subtropical anticyclone

OCIS codes 290.2200; 290.1090; 280.3640; 280.1100; 280.1120

1 引言

对流层臭氧仅占大气臭氧总量的 10% 左右, 但是对流层臭氧浓度的急剧增加将对人体和生态环境造成显著危害^[1-2], 其对地球辐射总量的收支平衡也起着重要的作用。对流层臭氧作为光化学烟雾的

主要生成物之一, 除了与其发生光化学反应的前体物相关外, 对气象因素、污染输送、平流层臭氧的沉降也有着重要影响。随着城市化进程的发展, 全国人均汽车保有量的迅猛增加, 工业排放和城市建设的加快, 对城市大气环境造成负担越来越大。近年

收稿日期: 2014-02-24; **收到修改稿日期**: 2014-06-06

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024)

作者简介: 范广强(1982—), 男, 博士, 主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: gqfan@aiofm.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

来,我国经常出现区域性的持续性灰霾天气,期间大气能见度剧烈下降,PM_{2.5},PM₁₀浓度急剧升高,同时伴随高浓度的光化学产物-臭氧出现。近地面臭氧浓度及其扩散、反应、沉降等过程在很大程度上依赖于上层混合及垂直边界层的物理状况,如夜间残留层的臭氧在次日可以被下沉运动带到地面,从而使地面的臭氧浓度升高,甚至启动近地层的光化学污染进程。因此,单独的地面观测并不能满足空气质量评估的数据需要,开展对流层臭氧的垂直浓度监测对于研究对流层臭氧浓度的变化趋势、分析其来源具有重要意义。

差分吸收激光雷达根据臭氧在不同波长的光谱吸收差异进行探测对流层臭氧分布垂直廓线,具有高精度、高时空分辨率、实时在线等优点,能够昼夜不间断监测对流层臭氧浓度时空分布,是研究对流层臭氧污染输送和生成的有力工具^[3-5]。自1996年 Schotland^[6]使用差分吸收激光雷达技术探测水汽以来,差分吸收激光雷达技术不断地得到丰富和发展,逐渐应用于大气污染物如臭氧、二氧化氮、二氧化硫等气体污染物的时空分布监测,其在大气污染气体尤其臭氧气体监测中的应用在国际上受到相当的重视。Benoit Lazzarotto 等^[7]采用 Nd:YAG 四倍频激光器作为光源,利用臭氧对 N₂、O₂ 拉曼散射光的不同吸收特性反演臭氧浓度,由于两路几何因子几何相同,因此可以得到边界层内的臭氧浓度,但是由于拉曼散射回波信号信噪比低,影响到系统的有效探测距离,其有效探测距离仅为 1.5 m。Ancellet 等^[8]采用 Nd:YAG 四倍频激光器抽运 D₂ 拉曼管技术产生 266、289、316 nm 三波长激光作为测量臭氧的光源,能够测量 0.5~4 km 高度处的臭氧浓度,测量精度在晴朗天气条件下优于 10%~15%。Nakazato 等^[9]采用 Nd:YAG 四倍频激光抽运 CO₂ 拉曼管产生 276、287、299 nm 三波长激光作为对流层臭氧的光源,时间分辨率为 30 min 时,能够测量近地面至 10 km 高度处的臭氧浓度,其统计误差在 1.5 km 以下小于 5%,2.6 km 以下小于 10%。

20 世纪 90 年代国内也开展了差分吸收激光雷达技术探测大气臭氧的研究,中国科学院安徽光学精密机械研究所研究人员 1993 年底研制出我国第一台探测平流层臭氧的紫外差分吸收激光雷达^[10],并测量了合肥上空 18~45 km 的臭氧浓度垂直分布特征;随后采用 Nd:YAG 四倍频激光抽运 CH₄ 和 H₂ 双拉曼管所获得的一级 Stokes 频移波长 288.38 nm 和 299.05 nm 作为探测臭氧的两个差分吸收波长对,获

得了合肥上空 0.5~2 km 的臭氧的时空分布特征,并使用 355 nm 波长信号反演得到的气溶胶消光系数和后向散射系数对气溶胶的干扰进行修正^[11]。

本文利用中国科学院安徽光学精密机械研究所研究人员研制的地基户外臭氧激光雷达系统,对北京地区的臭氧进行了连续观测,介绍了臭氧激光雷达系统结构和主要技术参数,以及双波长差分吸收激光雷达的数据处理方法,讨论了系统误差和统计误差的影响和处理,并对比了 6 月份灰霾过程和清洁天气两种典型天气条件下的颗粒物消光系数与对流层臭氧浓度时空分布特征,分析了高空臭氧污染气团沉降对地面臭氧浓度的影响。

2 监测地点和仪器

差分吸收激光雷达监测地点位于北京朝阳区立水桥南中国环境科学研究院内(N40.04°、E116.41°),如图 1 中 A 所示,监测地点位于北五环,周边主要为居民区。差分吸收激光雷达时间分辨率为 15 min,每个周期激光雷达工作 7 min,休息时间为 7 min。

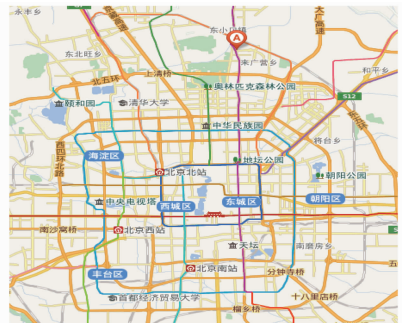


图 1 差分吸收激光雷达安装位置

Fig. 1 Installation position of the differential absorption lidar

实验采用的臭氧激光雷达系统的结构图如图 2 所示,系统由激光发射单元、光学接收单元和信号采集单元三部分组成,详细参数如表 1 所示。Nd:YAG 四倍频 266 nm 激光分成两束,分别抽运 D₂、H₂ 拉曼管发生受激拉曼散射作用,分别产生 289、316、299 nm 激光,三个波长的激光和剩余的 266 nm 激光经扩束后垂直发射到大气中,与大气中的气溶胶颗粒物发生米氏散射作用,与大气分子发生瑞利散射作用,与痕量气体发生吸收作用。主镜直径为 400 mm 的 Cassegrain 型望远镜接收四波长的弹性后向散射光,经过光栅光谱仪分光,四波长散射光分别由光电倍增管(PMT)转换为电流信号由瞬态记录仪采集,由计算机保存采集数据和显示采集原始信号波形。

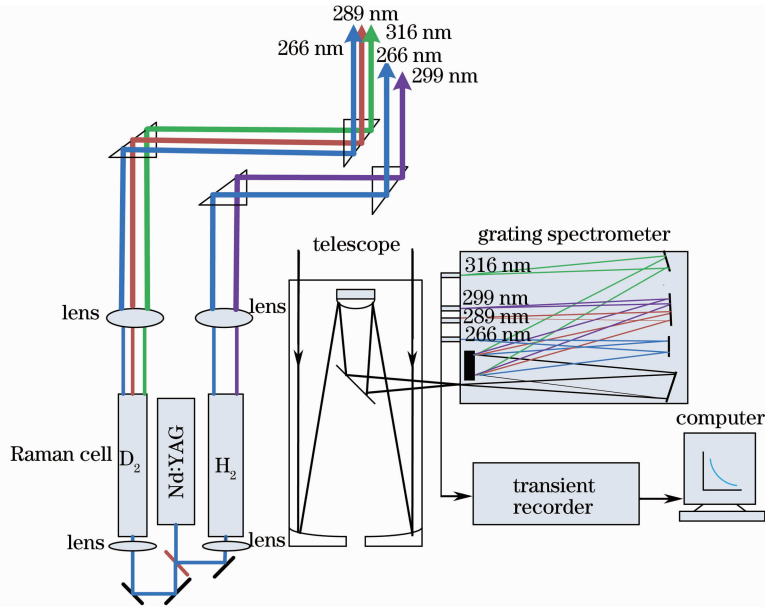


图 2 臭氧激光雷达结构图

Fig. 2 Schematic diagram of the differential absorption lidar

表 1 差分激光雷达系统主要参数

Table 1 Key parameters of the differential absorption lidar system

	Cell name	Parameter
Transmitter	Laser	Nd:YAG (266 nm)
	Raman active gases	D ₂ , H ₂
	Shifted wavelength /nm	289, 316, 299
	Output energy /mJ	10, 9, 13
	Telescope	Cassegrain
Receiver	Telescope diameter /mm	400
	Detector	PMT (Hamamatsu R7400)
	Data acquisition	analog-digital and photon counter

3 数据处理方法

对流层臭氧垂直廓线分布测量采用的是差分吸收光谱技术,同时向大气中发射两束波长非常近的激光,其中一束激光的波长位于臭氧光谱吸收较强的位置,记为 λ_{on} ,另一束激光波长位于臭氧光谱吸收较弱的位置,记为 λ_{off} ,由于选择两束激光波长差

很小,并且其他痕量气体在这两个波长的吸收差异很小,因此其他痕量气体对两束光的消光差异一般可以忽略。因此,可以根据两束激光在不同高度上的回波信号的差异确定对流层臭氧的浓度。

差分吸收激光雷达回波信号可表示为^[12-13]

$$P(\lambda_i, z) = C_i \frac{\beta(\lambda_i, z)}{z^2} \times \exp\{-2 \int_0^z [\alpha(\lambda_i, z) + N(z)\delta(\lambda_i, z)] dz\}, i \text{ is on, off}, \quad (1)$$

式中 $P(\lambda_i, z)$ 为接收到的高度 z 处波长为 λ_i 的大气后向散射回波信号, C_i 为雷达常数, $\beta(\lambda_i, z)$ 为大气后向散射系数, $\alpha(\lambda_i, z)$ 为扣除大气臭氧引起的吸收效应后的大气消光系数, $N(z)$ 为高度为 z 处的待测臭氧浓度(体积分数,下同), $\delta(\lambda_i, z)$ 为在波长为 λ_i 处的臭氧吸收截面。

由 λ_{on} 、 λ_{off} 双波长激光雷达回波信号方程可以推导臭氧浓度表达式为^[14-16]

$$N(z) = \frac{1}{2\Delta\delta} \frac{d}{dz} \left\{ -\ln \left[\frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] \right\} + B - E_a - E_m - E_{gas} \quad (2)$$

式中,

$$B = \frac{1}{2\Delta\delta} \frac{d}{dz} \left\{ \ln \left[\frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right] \right\}, \quad (3)$$

$$E_a = \frac{1}{\Delta\delta} [\alpha_a(\lambda_{on}, z) - \alpha_a(\lambda_{off}, z)], \quad (4)$$

$$E_m = \frac{1}{\Delta\delta} [\alpha_m(\lambda_{on}, z) - \alpha_m(\lambda_{off}, z)], \quad (5)$$

$$E_{gas} = \frac{\Delta\delta_{gas} N'_{gas}}{\Delta\delta}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\delta$ 、 $\Delta\delta_{gas}$ 分别为臭氧和其他痕量气体在 λ_{on} 、 λ_{off} 两个波长的吸收截面差, N'_{gas} 为其他痕量气体的浓度, B 、 E_a 、 E_m 分别为不同波长的大气后向散射、气溶胶消光、分子消光差异对臭氧浓度反演带来的影响项, E_{gas} 为其他痕量气体在不同波长的吸收作用差异对臭氧浓度反演带来的影响项。

B 、 E_a 、 E_m 引起的误差称为系统误差。在实验中选取 289 nm 和 299 nm 波长回波信号反演臭氧垂直分布廓线, B 、 E_a 引起的误差是不能忽略的, 尤其在灰霾天气条件下, 其可能引起的臭氧浓度误差能达到 $(1\sim 2) \times 10^{-8}$ 。臭氧在 316 nm 波长吸收截面很小, 所以使用 316 nm 波长回波信号采用 Fernald 算法反演气溶胶消光系数和后向散射系数, 并利用气溶胶消光系数和后向散射系数的波长转换关系 (λ^{-a} , 其中 a 取值范围一般在 $0.5\sim 2$, 在实验中取 1.0), 得到 λ_{on} 、 λ_{off} 两波长的气溶胶消光系数和后向散射系数, 进而对 B 、 E_a 进行修正。由于空气分子分布稳定, 随时间变化小, E_m 被认为是不随时间而

变化的, 所以使用美国标准大气模式修正 E_m 。

信号量子噪声和背景噪声引起的误差称为统计误差。实验中采集的 289 nm 和 299 nm 原始回波信号具有 7.5 m 的空间分辨率, 在实际的反演计算中, 首先对原始回波信号进行滤波处理, 并通过长时间累积信号减小统计误差。采用 7.5 m 空间分辨率的原始数据直接反演臭氧浓度廓线, 统计误差将远远大于 100%。通过减小空间分辨率的方法能有效减小统计误差, 达到测量精度的要求。图 3 为采用 75、150、300 m 空间分辨率的信号反演得到的臭氧浓度廓线, 75 m 的空间分辨率信号反演得到的臭氧浓度统计误差在 1.5 km 以下的大部分高度内小于 20%, 但是 1.5 km 以上大部分高度大于 20%; 150 m 空间分辨率信号反演得到的臭氧浓度统计误差在 1.5 km 以下大部分高度小于 10%, 在 1.5~3 km 内的大部分高度内小于 20%; 300 m 空间分辨率信号反演得到的臭氧浓度统计误差在 3 km 内大部分高度内统计误差小于 10%。在实际计算中, 需要兼顾反演结果统计误差和精细结构的变化。根据反演结果的统计误差大小, 在不同高度采用不同空间分辨率的信号进行反演, 以反演结果统计误差为 10% 为可允许的最大统计误差, 则在 1.5 km 以下高度, 信号分辨率为 150 m, 1.5 km 以上高度信号分辨率为 300 m, 300 m 为信号的最大空间分辨率。

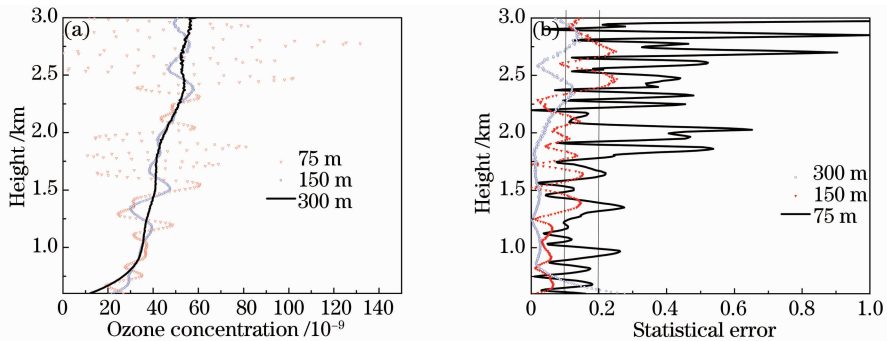


图 3 不同空间分辨率的(a)臭氧浓度廓线和(b)统计误差

Fig. 3 (a) Ozone concentration profiles and (b) statistical errors in different spatial resolutions

4 臭氧激光雷达实验结果与分析

空气中污染物浓度除了与污染源的分布和源强度大小有直接的关系外, 也与气象条件, 如风向、风速、降水、温度、大气边界层稳定度等有密切的关系^[17]。地面天气形势是高低空大气扩散能力和稳定程度的综合反映, 对地面风向和气压的分析有利于了解污染物的扩散条件和来源地等信息。2013

年 6 月 13 日~19 日经历了两种不同的天气过程, 13 日~16 日为灰霾天气过程, 17 日~19 日为晴朗天气。图 4 为 2013 年 6 月 13 日~19 日期间的海平面气压、气温、相对湿度和风速、风向分布情况。由图 4 可知, 两次天气过程中, 温度峰值没有出现明显变化, 在 31 °C 左右变化, 昼夜温差为 11 °C; 海平面气压呈逐渐下降的趋势, 灰霾天气过程为副热带

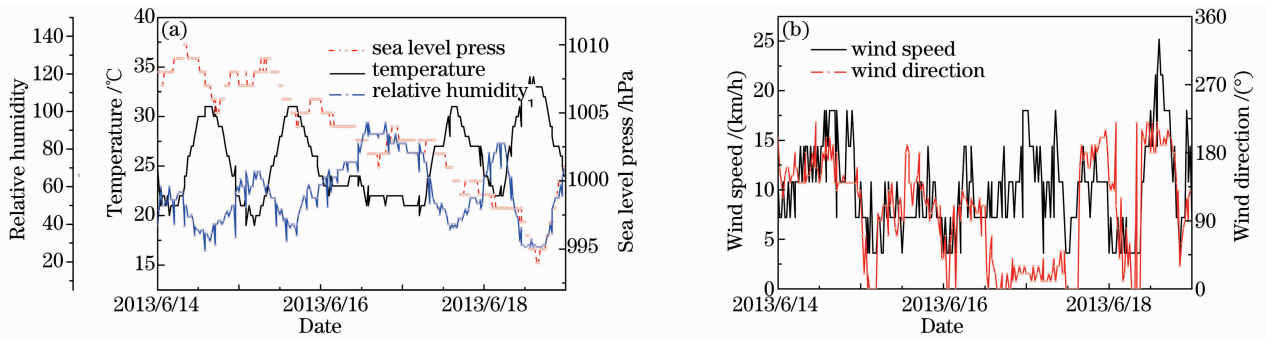


图 4 气象参数

Fig. 4 Meteorological parameters

高压,6月16日下午经历降雨后,逐渐下降到低压;由相对湿度的数据来看,灰霾天气过程中的大部分时段,相对湿度小于60%,水分含量较少;整个测量阶段的风速绝大部分时段在15 km/h以下,大部分时段为二级风,灰霾天气过程风向以偏南风为主,晴朗天气过程以偏北风为主。文献[18-19]研究表明,夏秋季副高或者高压系统带来的下沉气流及偏南风输送是造成污染物累积的主要天气系统,而降雨或西北气流则使臭氧污染迅速清除。2013年6月13日~19日期间的污染物过程也是大致符合这一规律的。

图5为差分吸收激光雷达测量的316 nm处的颗粒物消光系数和臭氧浓度时空分布图,横坐标为时间轴,纵坐标为高度,色标由蓝到红表示了颗粒物消光系数和臭氧浓度值的大小由小到大。需要注意的是,高空的臭氧浓度时空演化图的深蓝色区域为

无效数据。颗粒物消光系数的大小可以反映颗粒物质量浓度的高低,在晴空天气下,没有明显的颗粒物污染时,近地面颗粒物的消光系数小于 0.2 km^{-1} ,而在灰霾天,近地面的颗粒物消光系数与近地面颗粒物质量浓度有关,空气能见度越低,颗粒物质量浓度越高,颗粒物消光系数越大。颗粒物消光系数若大于 1.5 km^{-1} ,说明颗粒物污染表现为严重污染状态。由颗粒物消光系数的时空分布结合天气状况对灰霾污染过程进行分析,可以发现,6月14日~16日期间,大部分时段为偏南风气流,在西南气流和副热带高压影响下,北京地区的污染物加重。6月14日,1~2 km高度之间的球形颗粒物下沉,并在副热带高压的控制下,连续几天的局地积累,造成一次严重的雾霾污染过程。由环保局网站查询可知,6月16日污染状况为6级,可见污染物的输送和积累对地面的严重影响。

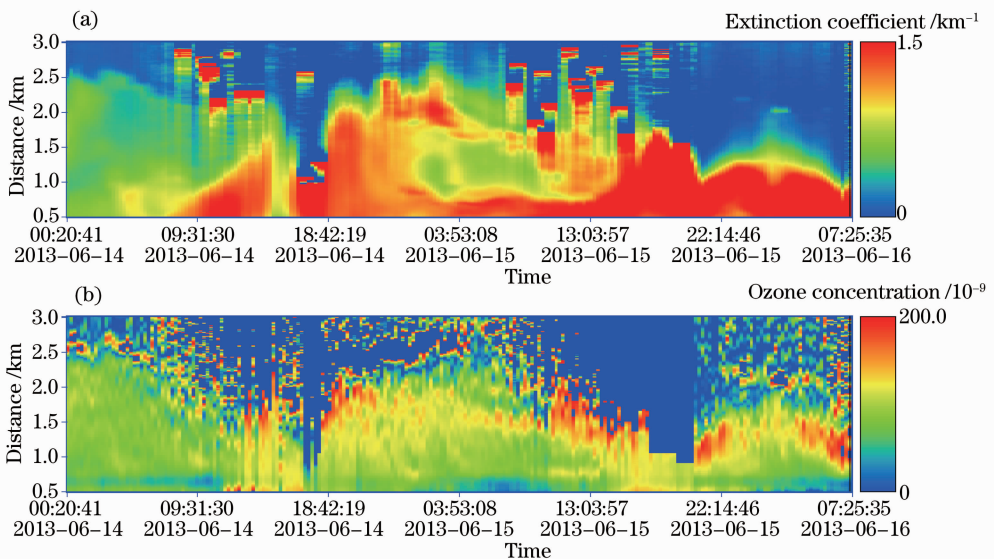


图 5 灰霾天差分吸收激光雷达测量的(a)颗粒物消光系数和(b)臭氧浓度时空分布图

Fig. 5 Temporal and spatial distributions of (a) particles extinction coefficient at 316 nm and (b) ozone concentration measured by the differential absorption lidar during haze

在这次灰霾污染过程中,臭氧浓度也同样出现了高值。由差分吸收激光雷达测量的臭氧时空分布图可以看出,臭氧浓度在 0.8 km 高度以下有明显的日变化规律,臭氧浓度在夜间下降至 $(3\sim 4)\times 10^{-8}$,白天逐渐上升至 100×10^{-9} 左右;1 km 高度以上的臭氧浓度的日变化规律不明显。6 月 14 日夜间至 6 月 15 日 1.5~2 km 以上有明显的臭氧输送过程,气团浓度达到 1.2×10^{-7} 左右,6 月 15 日中午发生臭氧气团的沉降,导致地面臭氧浓度升高,臭氧污染时段加长。

图 6 为不同时刻,差分吸收激光雷达测量的颗粒物消光系数和臭氧浓度垂直廓线,可以发现细颗粒物与臭氧分布在不同高度具有不同的关联特征。夜间,近地面颗粒物消光系数大于 1 km^{-1} ,颗粒物

的质量浓度很高,但是同一高度的臭氧浓度很低,只有 $(3\sim 4)\times 10^{-8}$;高空 1.5 km 左右的颗粒物消光系数质量浓度同样很高,而不同时刻同一高度的臭氧浓度同时超过 1.2×10^{-7} 。这一差别反映了低层和高层细颗粒物生成过程对应着不同的大气化学过程。这一差异可能由于近地层处有更多的 NO 滴定作用,与臭氧反应转化为 NO_2 ,同时生成细颗粒物;而高空 NO 由地面源向上输送过程中氧化消耗较多,导致能到达高空的 NO 量较少,同时由于高空光化学反应更加充分,夜间残留储存的臭氧较多;偏南风气流同时引入了高浓度的臭氧气团,这些因素共同作用导致臭氧浓度较高。高空的细颗粒物生成机制应有不同,可能与污染物输送有关,具体还需进一步研究。

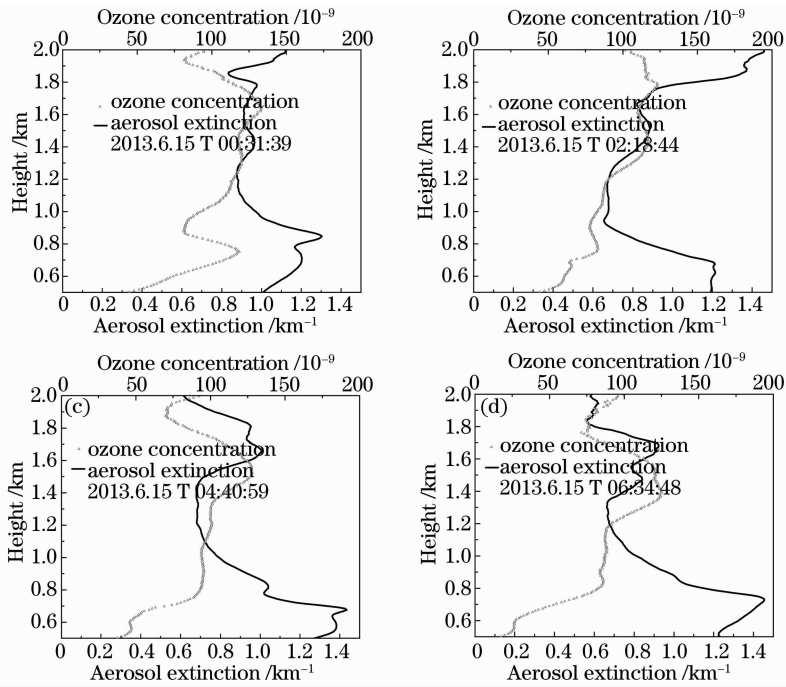


图 6 不同时刻颗粒物与臭氧的垂直分布廓线

Fig. 6 Vertical profiles of particles and ozone at the different times

6 月 16 日降雨,6 月 17 日~19 日大部分时段为偏北风,天气晴朗,空气干净。由图 7 可知,细颗粒物浓度很低,大部分时段颗粒物的消光系数小于 0.3 km^{-1} ,但是呈现出逐日增加的趋势,尤其 6 月 19 日夜间,颗粒物消光系数大于 1.5 km^{-1} 。近地面臭氧浓度较灰霾天有所下降,没有出现明显的外部输入气团,1 km 高度以下臭氧浓度的日变化明显,1 km 高度以上臭氧浓度的日变化规律不明显。6 月 17 日夜间,2~3 km 存在臭氧浓度为 9×10^{-8} 左右的气团,6 月 18 日 1 km 以上的臭氧浓度气团

浓度大约在 9×10^{-8} ,范围扩大。

5 结 论

针对北京 6 月份灰霾天的臭氧污染,利用差分吸收激光雷达在中国环境科学研究院进行了长时间连续自动监测,对不同天气条件下的臭氧污染和颗粒物时空分布特征进行了讨论分析,结果表明:

1) 近地面臭氧浓度日变化明显,高空臭氧浓度日变化不明显,受外部气团输送的影响,高空臭氧气团向近地面输送引起地面臭氧浓度升高;

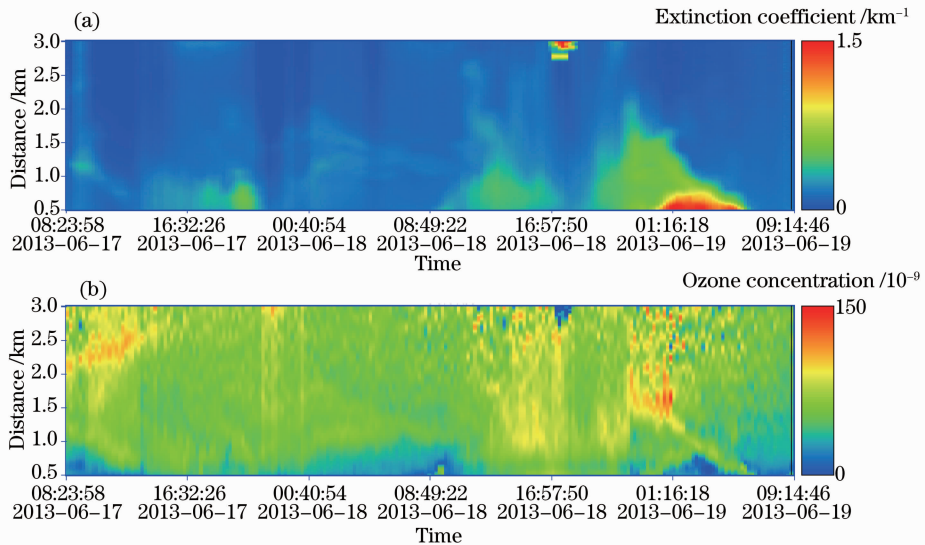


图7 清洁天差分吸收激光雷达测量的(a)颗粒物消光系数和(b)臭氧浓度时空分布图

Fig. 7 Temporal and spatial distributions of (a) particles extinction coefficient and (b) ozone concentration measured by the differential absorption lidar during clear day

2) 此次臭氧污染过程是在副热带高压的影响下,由西南气流气团输入引起的,而在降雨和在西北气流的影响下,臭氧污染将迅速消除;

3) 细颗粒物与臭氧分布在不同高度具有不同的关联特征,地面颗粒物充分参与光化学反应过程,而高空高浓度的颗粒物和臭氧污染物与输送的关系,还需进一步研究;

4) 灰霾天气下,臭氧气团浓度在 1.2×10^{-7} 左右,在晴朗天气下,臭氧输送气团浓度为 9×10^{-8} 左右;灰霾天气下的臭氧浓度明显高于晴朗天气下的臭氧浓度。

参 考 文 献

- 1 Shi Yuzhen, Wang Gengchen, Xu Yongfu. Simulation study of photochemical smog in Beijing urban and suburban areas[J]. Climatic and Environmental Research, 2008, 13(1): 84-92.
石玉珍, 王庚辰, 徐永福. 北京市城近郊区光化学烟雾模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 84-92.
- 2 Li Jie, Wu Qizhong, Gao Chao, *et al.*. Model study of ozone in the boundary layer over East Asia in spring[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(1): 1-6.
李杰, 吴其重, 高超, 等. 东亚春季边界层臭氧的数值模拟研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(1): 1-6.
- 3 G Ancellet, A Papayannis, J Pelon, *et al.*. DIAL tropospheric ozone measurement using a Nd: YAG laser and the Raman shifting technique[J]. Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, 6(5): 832-839.
- 4 Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, *et al.*. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide[J]. Appl Opt, 2007, 46(12): 2269-2279.
- 5 A Papayannis, G Ancellet, J Pelon, *et al.*. Multi-wavelength lidar for ozone measurements in the troposphere and the lower stratosphere[J]. Appl Opt, 1990, 29(4): 467-476.

- 6 Schotland R M. Some observations of the vertical profile of water vapor by a laser optical radar[C]. 4th Symposium on Remote Sensing of Environment, 1966. 273-283.
- 7 Benoit Lazzarotto, Max Frioud, Gilles Larcheveque, *et al.*. Ozone and water-vapor measurements by Raman lidar in the planetary layer: error source and field measurements[J]. Appl Opt, 2001, 40(18): 2985-2997.
- 8 G Ancellet, Francois Ravetta. Compact airborne lidar for tropospheric ozone: description and field measurements[J]. Appl Opt, 1998, 37(24): 5509-5521.
- 9 M Nakazato, T Nagai, T Sakai, *et al.*. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide[J]. Appl Opt, 2007, 46(12): 2269-2279.
- 10 Hu Huanling, Wang Zhien, Wu Yonghua, *et al.*. UV-DIAL system for measurements of stratospheric ozone [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1998, 22(5): 701-708.
胡欢陵, 王志恩, 吴永华, 等. 紫外差分吸收激光雷达测量平流层臭氧[J]. 大气科学, 1998, 22(5): 701-708.
- 11 Tao Zongming, Chen Yu, Chu Delin, *et al.*. Atmospheric backscattering correction for ozone measurement with AML-2 mobile lidar [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(6): 401-406.
陶宗明, 陈宇, 褚德林, 等. AML-2 车载激光雷达测量臭氧的大气后向散射系数修正方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(6): 401-406.
- 12 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Zhang Tianshu, *et al.*. Dual-channel polarization lidar monitoring of sandstorm and its transportation research[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s114006.
范广强, 刘建国, 张天舒, 等. 双通道偏振激光雷达监测沙尘暴污染及其输送研究[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s114006.
- 13 Liu Qiaojun, Zheng Yuchen, Zhu Jianhua, *et al.*. Ultraviolet Mie lidar observations of aerosol extinction in a dust storm case over Macao[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(3): 625-629.
刘巧军, 郑玉臣, 朱建华, 等. 利用紫外 Mie 散射激光雷达探测澳门地区沙尘暴事件[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(3): 625-629.
- 14 M H Proffitt, A O Langford. Ground-based differential absorption lidar system for day or night measurements of ozone

- throughout the free troposphere[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(12): 2568—2585.
- 15 Hu Shunxing, Hu Huanling, Zhang Yinchao, *et al.*. Different absorption lidar for environmental SO₂ measurements[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(9): 1121—1126.
胡顺星, 胡欢陵, 张寅超, 等. 差分吸收激光雷达测量环境 SO₂ [J]. *中国激光*, 2004, 31(9): 1121—1126.
- 16 Tao Zongming, Chen Yu, Chu Delin, *et al.*. Atmospheric backscattering correction for ozone measurement with AML-2 mobile lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(6): 401—406.
陶宗明, 陈宇, 褚德林, 等. AML-2 车载激光雷达测量臭氧的大气后向散射系数修正方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(6): 401—406.
- 17 Giorgi F, Meleux F. Modeling the regional effects of climate change on air quality[J]. *Comptes Rendus Geosciences*, 2007, 339: 721—733.
- 18 Ren Zhenhai, Su Fuqing, Chen Zhaohui, *et al.*. Influence of synoptic systems on the distribution and evolution process of PM₁₀ concentration in the boundary layer in summer and autumn [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 741—751.
任阵海, 苏福庆, 陈朝辉, 等. 夏秋季天气系统对边界层内大气中 PM₁₀ 浓度分布和演变过程的影响[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 741—751.
- 19 Fan Qing, Cheng Shuiyuan, Su Fuqing, *et al.*. Example analysis of typical environment pollution process in the summer in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(5): 12—19.
范清, 程水源, 苏福庆, 等. 北京夏季环境污染过程个例分析[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(5): 12—19.

栏目编辑: 王晓球