

合肥梅雨季节大气污染物分布特征的激光雷达探测

方欣^{1,2*}, 王敏³, 胡顺星⁴

¹中国科学技术大学中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026;

²中国科学技术大学地球和空间科学学院安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽 合肥 230026;

³安徽省大气探测技术保障中心, 安徽 合肥 230031;

⁴中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘要 利用 AML-2 型车载测污激光雷达测得的合肥梅雨季节大气污染物的监测数据, 研究梅雨季节对流层大气气溶胶和臭氧的时空分布特征, 对比分析雨水对大气污染物消减的影响。结果表明: 梅雨季节气溶胶的消光系数较小, 且随着高度增大呈递减的趋势, 在 0.5 km 高度处, 多天的消光系数为 $0.1 \sim 0.18 \text{ km}^{-1}$; 持续降水对气溶胶浓度具有显著的消减作用, 梅雨季节之前和梅雨季节气溶胶消光系数的均值分别为 0.37 km^{-1} 和 0.14 km^{-1} ; 梅雨季节臭氧的时空变化特征明显, 臭氧浓度随高度的增大而逐渐减小, 臭氧浓度的日差异较大, 2008 年 6 月 20 日和 24 日, 0.4 km 高度处臭氧质量浓度相差 $59.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 与梅雨季节之前相比, 梅雨季节的臭氧浓度大幅减小, 相同高度处臭氧质量浓度均值的差值可达 $41.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

关键词 大气光学; 消光系数; 激光雷达; 气溶胶; 臭氧; 梅雨季节

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0110003

Distribution Characteristics of Atmospheric Pollutions in Meiyu Season Observed by Lidar over Hefei

Fang Xin^{1,2*}, Wang Min³, Hu Shunxing⁴

¹Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

²Mengcheng National Geophysical Observatory, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Anhui Atmospheric Observation and Technical Support Center, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract By analyzing monitoring data of atmospheric pollutions in Meiyu season measured by AML-2 mobile lidar, we study the temporal and spatial distribution characteristics of aerosol and ozone in troposphere over Hefei in Meiyu season, and analyze the effect of precipitation on pollution reduction. The results show that the aerosol extinction coefficient is small in Meiyu season and decreases with the increase of altitude on the whole. At 0.5 km, the extinction coefficient is from 0.1 km^{-1} to 0.18 km^{-1} in multiple days in Meiyu season. Continuous precipitation plays a significant role in reducing aerosol concentration, the mean aerosol extinction coefficient before Meiyu season and in Meiyu season is 0.37 km^{-1} and 0.14 km^{-1} , respectively. The temporal and spatial variation characteristics of ozone are obvious in Meiyu season. The ozone concentration decreases with the increase of altitude and shows large daily variation. In June 20 and 24, 2008, the difference of mass concentration of ozone at 0.4 km is about $59.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Compared with concentration of ozone before Meiyu season, the concentration in Meiyu season is greatly reduced with the maximum difference up to $41.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at the same height.

Key words atmospheric optics; extinction coefficient; lidar; aerosol; ozone; Meiyu season

OCIS codes 010.1110; 010.4950; 010.3640; 290.2200

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-08-10; 录用日期: 2018-09-26

基金项目: 中国科学技术大学预研项目(YZ208000033)、国家基金委重大仪器专项(41127901)

* E-mail: xinf@ustc.edu.cn

1 引言

大气污染对人类健康、生态环境、气候变化、经济发展等有重要影响^[1-2]。党中央、国务院高度重视大气污染防治工作,采取措施淘汰落后产能企业,加强大气污染防治能力,提高环境保护准入门槛,严控大气污染物的排放限值。我国早在1982年颁布的《环境空气质量标准》历经多次修订,新增加了臭氧和细颗粒物(PM_{2.5})两项污染物控制标准,并提高了其他污染物限值的要求,以适用于环境空气的质量评价与管理。社会各界也越来越关注大气污染治理、监测和空气质量评价问题^[3-4]。

大气气溶胶和臭氧是大气中的主要污染物。大气气溶胶主要集中在对流层,对地球表面和大气层辐射能量平衡具有重要影响。刘毅等^[5]指出,大气气溶胶对气候变化、云的形成、能见度的改变、大气微量成分的循环以及人类健康具有重要影响。气溶胶粒子增加的直接效应是影响大气水循环和辐射平衡。气溶胶不仅可以通过散射作用对大气系统进行降温,使地面温度下降,产生负的强迫作用,使大气温度上升;还可以作为云凝结核,影响云的微物理过程和光学性质,以及云的生命周期和降水过程^[6-8]。王庚辰等^[9]指出,臭氧在大气动力、热力、辐射、化学等过程中极其重要,臭氧的气候效应不仅依赖于臭氧总量,还强烈地依赖于它在大气中的垂直分布。实时、准确地获得大气气溶胶和臭氧浓度的分布信息对自然灾害的预防、污染物输送和监测等具有重要的指导意义。

合肥(北纬31.90°,东经117.17°)地处我国东部的江淮流域,受东南季风带来的太平洋暖湿气流的影响,通常会在6~7月份出现一次持续降雨过程。此时正值梅子成熟期,因此通常称为“梅雨”,人们将此时段称作梅雨季节。梅雨季节持续的阴雨天气对当地大气污染物的清洁大有裨益。从高空而落的雨水可携带部分气溶胶粒子降落到地面,对降低空气气溶胶粒子浓度、提高空气能见度有积极作用。研究^[10-11]表明:紫外辐射可为生成臭氧的光化学反应提供能量来源。阴雨天气使得到达地面的太阳紫外辐射量大幅减少,从而对臭氧的生成产生重要影响。目前,关于梅雨季节大气污染物消减程度的时空分布并没有定量的分析,关于这方面的研究也少见报道。激光雷达是一种遥测大气污染物浓度垂直分布的有效手段,被广泛应用于大气气溶胶、大气成分以及云的研究。气溶胶垂直分布的定量化研究为分析大气辐射热量影响、对流和湍流运动的寿命提供了

基础数据,大气辐射强迫、地表辐射收支等研究也需要云和气溶胶的垂直分布信息,因此对流层臭氧垂直浓度监测的研究对分析对流层臭氧浓度的变化趋势、来源具有重要意义。本课题组基于AML-2型车载测污激光雷达在梅雨季节及前期测得的大气气溶胶和臭氧监测数据,详细分析合肥地区梅雨季节对流层气溶胶粒子浓度和臭氧浓度时空垂直分布特征。同时,通过与梅雨季节之前的大气污染物观测数据进行对比,分析梅雨对大气气溶胶和臭氧浓度的消减程度及消减量。进一步研究降水对降低大气气溶胶和臭氧浓度、提高空气质量的积极作用,以期能为空气质量预报、数值模拟等提供参考。

2 激光雷达系统结构

AML-2型车载测污激光雷达采集数据的空间分辨率为15 m,采样点数为1024。采用Quantel Brilliant b型Nd:YAG激光器。AML-2型激光雷达的系统结构如图1所示,该系统主要由拉曼激光光源、激光发射与扫描系统、光信号接收与检测系统、控制系统4部分组成。

3 测量原理与数据处理方法

AML-2型激光雷达融合了米散射激光雷达与差分吸收激光雷达的优点,可实现气溶胶消光系数和臭氧浓度等的全方位角探测。根据激光雷达方程,距离发射系统 z 处的大气回波信号为

$$P(z) = C \frac{\beta(z)}{z^2} \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z) dz \right], \quad (1)$$

式中: $P(z)$ 为激光雷达接收距离 z 处的大气后向散射回波信号(W); C 为激光雷达系统常数($W \cdot km^3 \cdot sr$); $\alpha(z)$ 、 $\beta(z)$ 分别为距离 z 处大气总的消光系数(km^{-1})和后向散射系数($km^{-1} \cdot sr^{-1}$)。

3.1 Fernald 积分法反演气溶胶消光系数

根据Fernald积分法,分别考虑空气分子和气溶胶粒子的消光影响,则 $\alpha(z)$ 与 $\beta(z)$ 分别为

$$\begin{cases} \alpha(z) = \alpha_a(z) + \alpha_m(z) \\ \beta(z) = \beta_a(z) + \beta_m(z) \end{cases}, \quad (2)$$

下标a与m分别代表气溶胶与大气分子。设气溶胶消光后向散射比 $S_a(z) = \alpha_a(z) / \beta_a(z)$,它随着气溶胶浓度、尺度谱分布、化学成分的变化而变化。对于532 nm的波长,一般设 $S_a(z)$ 为常数,并取值为50。空气分子消光后向散射比 $S_m = \alpha_m(z) / \beta_m(z) = 8\pi/3$ 。求解(1)式可得气溶胶后向消光系数^[12]为

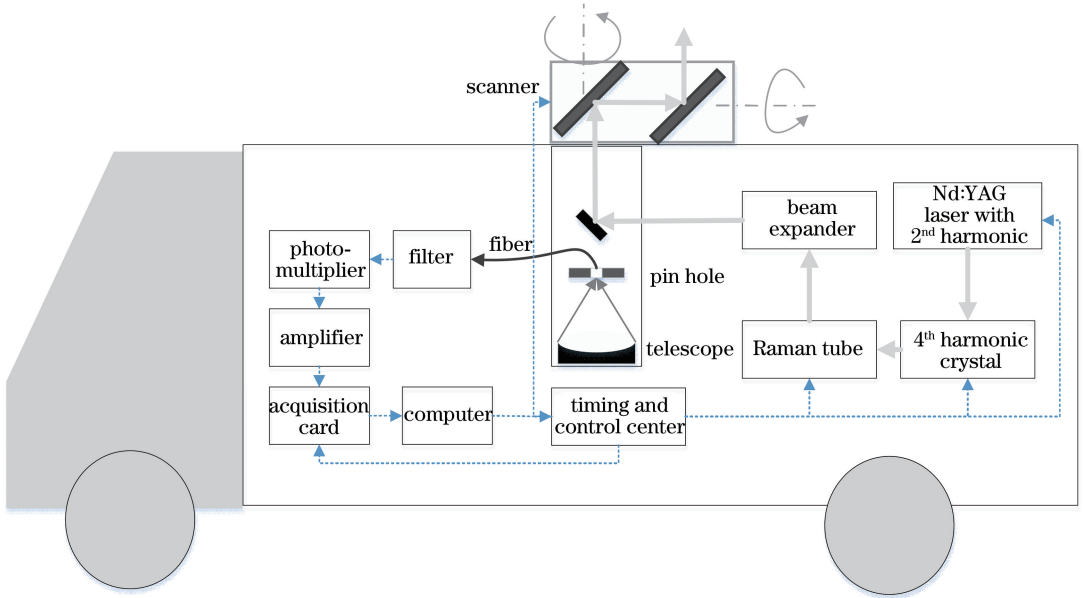


图 1 AML-2 型激光雷达系统结构原理图

Fig. 1 Schematic of AML-2 lidar system structure

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(z) + \frac{X(z)\exp\left[2(S_a/S_m - 1)\int_z^{z_c}\alpha_m(z)dz\right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_a(z_c) + (S_a/S_m)\alpha_m(z_c)} + 2\int_z^{z_c}X(z)\exp\left[2(S_a/S_m - 1)\int_z^{z_c}\alpha_m(z)dz\right]dz}, \quad (3)$$

式中: $X(z) = P(z)z^2$; z_c 为标定高度, 即假设在某高度 z_c 处, 气溶胶后向散射系数 $\beta_a(z_c)$ 或消光系数 $\alpha_a(z_c)$ 已知, 且 $X(z)/\beta_m(z)$ 的值最小, 此高度即为标定高度。

AML-2 型激光雷达回波信号为 2000 次激光脉冲的回波平均。首先, 对原始信号采用分段权重平滑的方法来消除大气抖动对信号产生的影响。为了减小背景噪声的影响, 对回波信号进行订正, 订正范围为 12~15 km。白天测量时, 采用分时连续测量气溶胶米散射信号与背景噪声, 用气溶胶米散射信号减去背景噪声来消弱噪声的影响。标定高度选取范围为 2.8~5 km, 并将此范围内 $X(z)/\beta_m(z)$ 最小值点作为标定高度点。(3) 式中空气分子的后向散射系数 $\beta_m(z)$ 和消光系数 $\alpha_m(z)$ 可根据激光雷达测量时刻温度、气压和湿度垂直分布的气象探空资料计算得到, 或使用标准大气模式通过瑞利散射理论计算得到。最后, 通过积分求解(3)式即可得气溶胶消光系数的时空分布。

3.2 差分吸收法反演臭氧浓度

AML-2 型激光雷达发射系统向同一光学路径上准同时发射两组波长接近的脉冲激光, 其中一束激光的波长位于臭氧的吸收线上, 记为 λ_{on} (288.38 nm), 它会受到臭氧较强的吸收作用。另一束激光的波长

位于臭氧吸收线的边翼或吸收线之外, 记为 λ_{off} (299.05 nm), 臭氧在该波长处的吸收相对较小。由激光雷达方程可推导出臭氧的质量浓度^[13-15]为

$$N(z) = \frac{1}{2[\delta(\lambda_{on}, T) - \delta(\lambda_{off}, T)]} \times \left\{ \frac{d}{dz} \left[-\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] + B + E_a + E_m \right\}, \quad (4)$$

式中: $B = \frac{d}{dz} \ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)}$ 为大气后向散射作用项; $E_a = -2[\bar{\alpha}_a(\lambda_{on}, z) - \bar{\alpha}_a(\lambda_{off}, z)]$ 为大气气溶胶消光作用项; $E_m = -2[\bar{\alpha}_m(\lambda_{on}, z) - \bar{\alpha}_m(\lambda_{off}, z)]$ 为大气分子消光作用项; $P(\lambda_{on}, z)$ 和 $P(\lambda_{off}, z)$ 分别为波长 λ_{on} 和 λ_{off} 在高度 z 处的回波信号; $\delta(\lambda, T)$ 为温度 T 时的待测气体吸收截面。

采用分段三角形滤波方法对回波信号进行平滑处理, 差分距离取 300 m。对于大气分子消光作用项 E_m , 根据 532 nm 波长的大气分子模式及消光系数与波长的关系, 估算 E_m 值。大气后向散射项 B 和大气气溶胶消光干扰项 E_a 可利用 532 nm 波长探测气溶胶后向散射比计算获得。在实际测量中, 当选取适合的波长时, 大气后向散射项 B 和大气气溶胶消光干扰项 E_a 会很小, 故可忽略 B 和 E_a 。因此, 只要测得激光雷达回波信号 $P(\lambda_{on}, z)$

和 $P(\lambda_{\text{off}}, z)$, 即可计算出臭氧浓度随高度的分布。

4 污染物的时空分布特征

AML-2 型激光雷达于 2003 年研制成功, 多次参与了北京、深圳等地的环境质量监测, 其稳定性和测量精度已得到了证明^[16-18]。2008 年 5—6 月, AML-2 型激光雷达参与了合肥大气参数综合观测实验。实验地点在合肥市科学岛, 实验的目的在于全面分析合肥夏季的大气成分、气溶胶粒子光学特性及大气污染物的时空分布。由于实验时间横跨梅雨季节前后, 因此本研究利用 AML-2 型激光雷达观测数据来分析梅雨季节持续降水对大气污染物浓度消减的影响。

4.1 天气情况

表 1 和表 2 所示分别为梅雨季节之前和梅雨季节的实验日期及天气情况。由表 1 可知, 梅雨季节之前的实验日期分别为 2008 年 5 月 5 日、5 月 6 日、5 月 11 日和 6 月 5 日, 共 4 d。观测期间的天气主要以晴为主, 5 月 5 日晴转多云。由表 2 可知, 梅雨季节的实验日期分别为 2008 年 6 月 16 日、18—20 日、24 日, 共 5 d。这段时间内有多次降水, 但实验过程的天气主要为多云或阴天。

大气污染物浓度与温度、湿度、风向、风速等气象要素密切相关。图 2 所示为 2008 年 6 月 16—28 日中国科学院安徽光学精密机械研究所自建气象观

表 1 梅雨季节之前的实验日期及天气情况

Table 1 Measurement date and weather conditions before Meiyu season

Date	Weather	Observation project
2008-05-05	Sunny, becoming cloudy	O ₃
2008-05-06	Sunny	Aerosol, O ₃
2008-05-11	Sunny	Aerosol
2008-06-05	Sunny	Aerosol, O ₃

表 2 梅雨季节的实验日期及天气情况

Table 2 Measurement date and weather conditions in Meiyu season

Date	Weather	Observation project
2008-06-16	Overcast	Aerosol
2008-06-18	Overcast	Aerosol, O ₃
2008-06-19	Overcast	Aerosol, O ₃
2008-06-20	Cloudy	Aerosol, O ₃
2008-06-24	Cloudy	Aerosol, O ₃

测场的气温、湿度、风向和风速等气象要素的变化。由图 2 可知: 在激光雷达观测实验期间, 气温为 18.3~33.1 °C, 受梅雨影响, 平均气温维持在 23 °C 左右, 气温的日变化较明显, 最高值基本上出现在正午至 14:00 时段; 空气的相对湿度 (RH) 较大, 多日 RH 的最大值超过了 90%。实验期间盛行 68°~90° 和 315°~338° 这 2 种风向。风速都比较小, 均小于 4.0 m/s, 频率最大的风速为 1.0~1.5 m/s。

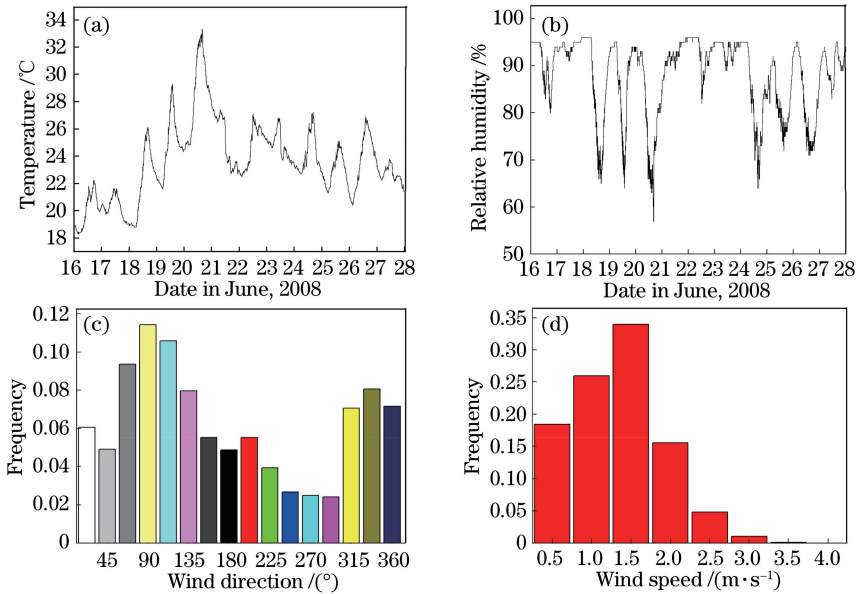


图 2 气象要素的变化。(a) 温度; (b) 相对湿度; (c) 风向; (d) 风速

Fig. 2 Variations of meteorological factors. (a) Temperature; (b) relative humidity; (c) wind direction; (d) wind speed

4.2 大气气溶胶的时空分布

AML-2 型激光雷达在 2008 年 6 月 16—24 日多天气溶胶消光系数的垂直分布如图 3 所示。6 月 16—19 日,在近地面高度 0.5~1.2 km 处存在薄云层,导致气溶胶消光系数出现突变峰值;总体来看,气溶胶消光系数随着高度增大呈递减的趋势。6 月 20 日和 24 日,在垂直观测方向上,没有薄云引起的消光系数突变,比较真实地反映了梅雨季节气溶胶消光系数的分布特征。垂直方向上气溶胶的消光系数较小,高度为 0.5 km 处的消光系数为 0.1~0.18 km⁻¹。特别是高度大于 1.2 km 时,多天气溶胶消光系数基本上小于 0.05 km⁻¹。由图 2 可知,实验期间地面盛行东风和北东北风,风速相对较小,气象条件不利于大气污染物的扩散。造成气溶胶浓度减小的原因主要是多日的持续降水。在雨水的冲刷下,部分气溶胶粒子降落到地面,改善了空气质量。

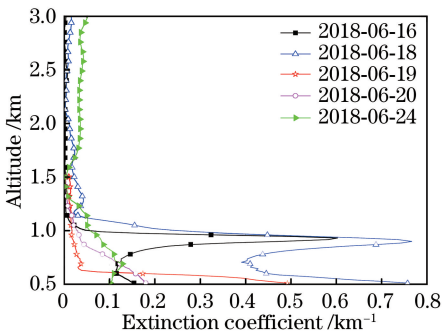


图 3 梅雨季节气溶胶消光系数的垂直分布
Fig. 3 Vertical distribution of aerosol extinction coefficient in Meiyu season

图 4 所示为 2008 年 6 月 18 日 09:00 至 21:00,垂直方向气溶胶消光系数的时空演变,其中灰色区域表示因云层影响引起的气溶胶消光系数的突变。可知,在观测期间,高度 1 km 的上空多次出现了云层,特别是 11:24 上空有多个薄云层。不考虑云层的影响,18 日气溶胶消光系数总体较小。在 0.5 km 高度处,09:00 和 15:00 左右的气溶胶消光系数为一天中两个相对最大值。在 11:24 左右和夜里,消光系数减小,为一天中的两个最小值。从图 4 中还可以看出,人类活动对气溶胶浓度的影响比较明显。在中午和夜里,人类活动频次减少,气溶胶浓度也减至一天中的最小值。

4.3 臭氧的时空分布

实时监测臭氧浓度的垂直剖面结构对分析污染物的扩散和输送具有实际意义。图 5 所示为 2008

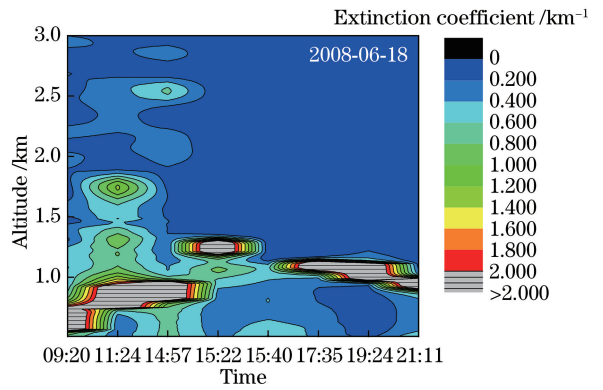


图 4 垂直方向气溶胶消光系数的时空变化
Fig. 4 Temporal and spatial variation of aerosol extinction coefficient

年 6 月 18 日、20 日和 24 日臭氧浓度的垂直分布。由图 5 可知:在垂直方向上,臭氧浓度有显著的时空变化特征;在空间分布上,臭氧浓度随探测高度的增大呈减小的趋势;在时间序列上,臭氧浓度的日差异明显;在 0.4 km 高度处,18 日、20 日和 24 日的臭氧质量浓度分别为 87.7、43.5、103.1 μg/m³,20 日臭氧浓度突然减小,比 24 日臭氧质量浓度低 59.5 μg/m³,原因是对流层臭氧的化学性质非常活跃。由此,形成了臭氧浓度随太阳辐射有较显著的日变化特征,这与文献[19-20]的研究结果相符。

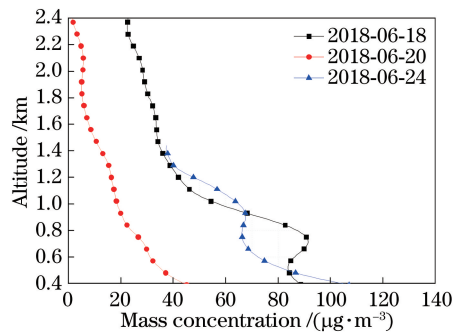


图 5 梅雨季节臭氧质量浓度的垂直分布
Fig. 5 Vertical distribution of ozone mass concentration in Meiyu season

5 污染物浓度的对比分析

5.1 气溶胶

为了对比分析梅雨季节之前和梅雨季节气溶胶浓度的变化,数据处理时将梅雨季节之前 3 天内气溶胶的观测结果与梅雨季节多天的气溶胶探测结果的均值作为梅雨季节前后气溶胶浓度的代表值。在梅雨季节,考虑到 16 日、18 日和 19 日在高度为 1 km 时有云层,因此:当高度为 0.5~1.2 km 时,气溶胶的消光系数取 20 日和 24 日的均值;当高度大

于 1.2 km 时,气溶胶的消光系数取 16 日、18 日、19 日、20 日和 24 日的均值。图 6 所示为合肥梅雨季节之前和梅雨季节气溶胶消光系数均值的垂直分布。由图 6 可知,梅雨季节之前和梅雨季节气溶胶浓度的差别比较明显。梅雨季节之前气溶胶的消光系数相对较大,气溶胶浓度较大。在高度为 0.5 km 时,梅雨季节之前和梅雨季节的气溶胶消光系数分别为 0.37 km^{-1} 和 0.14 km^{-1} ,后者与前者相比减小了 0.23 km^{-1} ,消减量约为 62%。

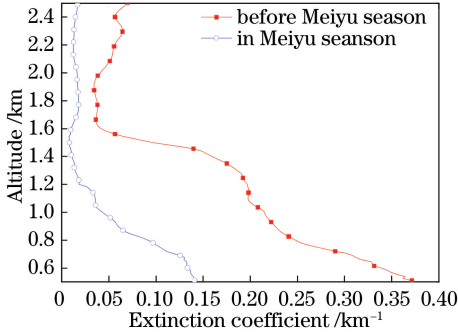


图 6 梅雨季节之前和梅雨季节气溶胶消光系数均值的垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of mean aerosol extinction coefficient before Meiyu season and in Meiyu season

图 7 所示为梅雨季节之前和梅雨季节气溶胶消光系数的差值及相对消减量分布。由图 7 可知:1) 高度为 0.5~2.5 km 时,气溶胶消光系数的消减量为 50~93%;高度约为 1.5 km 时,相对消减量最大,达到 93.5%。梅雨季节持续的降水冲刷了悬浮

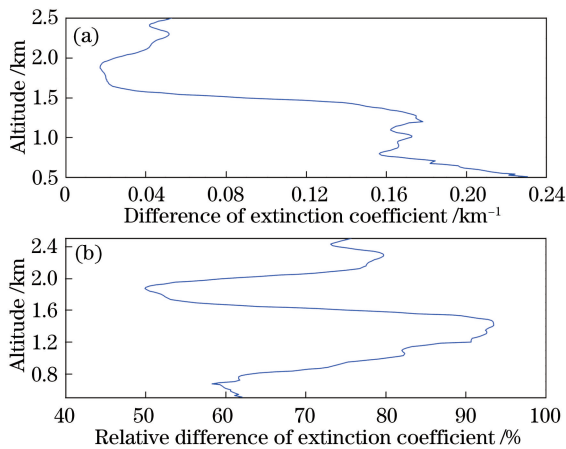


图 7 梅雨季节之前与梅雨季节气溶胶消光系数的差值及相对消减量。(a)差值;(b)相对消减量

Fig. 7 Difference and relative difference of aerosol extinction coefficient before Meiyu season and in Meiyu season. (a) Difference; (b) relative difference

于大气中的烟灰、土壤和矿尘等微粒,对气溶胶浓度的影响比较明显。同时,潮湿的地表情况也不利于气溶胶的产生,导致气溶胶浓度总体小于梅雨季节之前的。2)随着高度增大,梅雨季节前后气溶胶消光系数的差值逐渐减小。气溶胶粒子主要来自于地球表面,近地层气溶胶浓度偏大;随着高度增大,气溶胶的浓度逐渐减小,雨水冲刷引起的气溶胶消光系数的差值也逐渐减小。

由图 6 和图 7 可知,梅雨季节的频繁降水对气溶胶粒子起到较好的消减和净化作用。

5.2 臭 氧

以梅雨季节之前 3 天内臭氧浓度观测结果的均值代表该时期臭氧的垂直分布特征,以梅雨季节 18 日、20 日和 24 日臭氧浓度观测结果的均值代表其分布特征。梅雨季节之前和梅雨季节臭氧质量浓度的垂直分布如图 8 所示。由图 8 可知,梅雨季节之前,臭氧的质量浓度相对于梅雨季节更大,0.4 km 处臭氧的质量浓度为 $100.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$,比梅雨季节相同高度处高约 $22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。图 9 所示为梅雨季节之前和梅雨季节臭氧浓度的差值分布。由图 9 可知,梅雨季节之前和梅雨季节臭氧浓度的最大差值为 $41.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$,这可能是由臭氧的光化学性质决定的。臭氧浓度与太阳紫外照射密切相关。对于阴雨绵绵的梅雨季节来说,云层对太阳光的反射、散射等作用大幅削弱了到达地面的太阳辐射强度,使臭氧浓度受到一定影响。

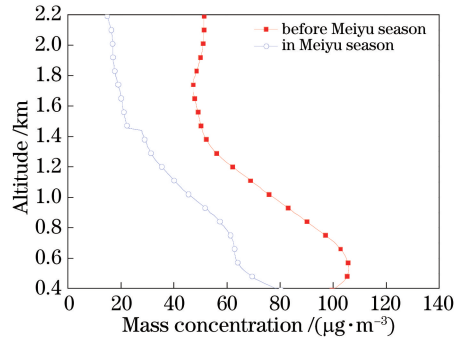


图 8 梅雨季节之前和梅雨季节臭氧质量浓度的垂直分布
Fig. 8 Vertical distribution of ozone mass concentration before Meiyu season and in Meiyu season

6 结 论

梅雨季节之前和梅雨季节的大气污染物观测结果表明,6—7 月份出现的长时间的梅雨天气对净化大气气溶胶、降低臭氧浓度具有重要作用。

梅雨季节持续降水,使空气中气溶胶粒子的浓

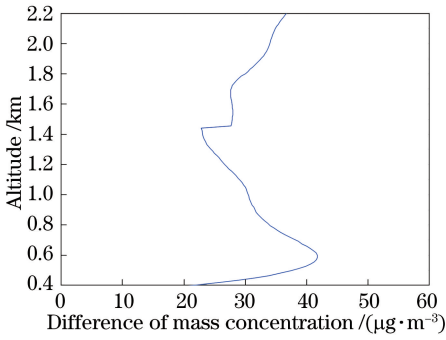


图9 梅雨季节之前和梅雨季节臭氧浓度的差值分布

Fig. 9 Difference distribution of ozone mass concentration before Meiyu season and in Meiyu season

度得到较好的消减。大气气溶胶消光系数相对较小,且随着探测高度的增大呈递减的趋势。除去薄云层引起的消光系数突变,在高度为 0.5 km 处,多天的气溶胶消光系数为 $0.1\sim 0.18\text{ km}^{-1}$;高度大于 1.2 km 时,气溶胶消光系数基本上小于 0.05 km^{-1} 。人类活动会明显增大气溶胶的浓度,气溶胶浓度的增减与人类活动作息时间有较好的对应关系。

在空间上,臭氧浓度随探测高度的增大而逐渐减小;在时间上,臭氧浓度的日变化较大。2008 年 6 月 20 日和 24 日,0.4 km 高度处臭氧质量浓度相差 $59.5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

梅雨季节之前和梅雨季节的大气气溶胶的浓度相差比较明显。梅雨季节之前,气溶胶消光系数相对较大,经过多天的雨水冲刷,大气气溶胶的消光系数大幅减小。在 0.5 km 高度处,梅雨季节之前和梅雨季节多天的气溶胶消光系数均值分别为 0.37 km^{-1} 和 0.14 km^{-1} 。在探测范围内,梅雨季节之前和梅雨季节气溶胶消光系数的消减量最大可达 93.5%。研究结果进一步证明,阴雨天气对降低气溶胶含量、改善空气质量具有重要作用。

在 0.4 km 高度处,梅雨季节之前和梅雨季节多天的臭氧质量浓度均值分别为 $100.8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $78.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。梅雨季节前后,相同高度处臭氧质量浓度的差值最大可达 $41.8\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。原因是持续的阴雨天气使得入射到地面的太阳辐射通量有所削减,使得生成臭氧的气化反应条件受到影响,导致梅雨季节臭氧浓度相对梅雨季节之前有所减小。

参 考 文 献

[1] de Sonoulepnikoff L, Mitev V, Simeonov V, *et al.* Experimental investigation of high-power single-pass Raman shifters in the ultraviolet with Nd:YAG and KrF lasers[J]. Applied Optics, 1997, 36(21): 5026-

5043.
 [2] Ma X M, Zhang H, Shan H H, *et al.* Statistical distribution of aerosol backscattering coefficient profiles in near-ground at west suburb of Hefei in 2014[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0705001.
 麻晓敏,张辉,单会会,等.合肥西郊2014年近地面气溶胶后向散射系数廓线统计分布[J].中国激光,2016,43(7):0705001.
 [3] Proffitt M H, Langford A O. Ground-based differential absorption lidar system for day or night measurements of ozone throughout the free troposphere[J]. Applied Optics, 1997, 36(12): 2568-2585.
 [4] Wang Z E, Nakane H, Hu H L, *et al.* Three-wavelength dual differential absorption lidar method for stratospheric ozone measurements in the presence of volcanic aerosols[J]. Applied Optics, 1997, 36(6): 1245-1252.
 [5] Liu Y, Wang M X, Zhang R J. The present status of aerosol research in China [J]. Climatic and Environmental Research, 1999, 4(4): 406-414.
 刘毅,王明星,张仁健.中国气溶胶研究进展[J].气候与环境研究,1999,4(4):406-414.
 [6] Dong X B, Yang J, Yang Y, *et al.* Microphysical characteristics in the vertical direction of atmospheric aerosol particles of north China during the heavy haze process background [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 204-211.
 董晓波,杨军,杨洋,等.华北重度霾过程期间大气气溶胶粒子的微物理垂直特征[J].科学技术与工程,2018,18(2):204-211.
 [7] Shen J, Cao N W. Inversion of tropospheric aerosol extinction coefficient profile by Mie-Raman scattering lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0610003.
 沈吉,曹念文.米-拉曼散射激光雷达反演对流层气溶胶消光系数廓线[J].中国激光,2017,44(6):0610003.
 [8] Liu C, Su L, Zhang C Y, *et al.* Comparative analysis of vertical distribution of aerosols by using spaceborne lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0413001.
 刘聪,苏林,张朝阳,等.星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析[J].中国激光,2015,42(4):0413001.
 [9] Wang G C, Kong Q X, Chen H B, *et al.* Characteristics of ozone vertical distribution in the atmosphere over Beijing [J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(5): 743-748.
 王庚辰,孔琴心,陈洪滨,等.北京上空大气臭氧垂

- 直分布的特征[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 743-748.
- [10] Liu M, Wang C, Hou L, *et al.* Spatial-temporal patterns and variation trend of ozone pollution in Shenyang[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(4): 126-131.
刘闯, 王闯, 侯乐, 等. 沈阳臭氧污染时空分布特征及变化趋势[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 126-131.
- [11] Ge Z Q, Hu H L, Hu S X, *et al.* Variation of stratospheric ozone profiles over Hefei during 1998—2001[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(4): 263-267.
葛战旗, 胡欢陵, 胡顺星, 等. 1998~2001年合肥地区平流层臭氧浓度垂直廓线变化特征[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(4): 263-267.
- [12] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [13] Nakazato M, Nagai T, Sakai T, *et al.* Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide [J]. Applied Optics, 2007, 46(12): 2269-2279.
- [14] Kovalev V A, McElroy J L. Differential absorption lidar measurement of vertical ozone profiles in the troposphere that contains aerosol layers with strong backscattering gradients: a simplified version [J]. Applied Optics, 1994, 33(36): 8393-8401.
- [15] McDermid I S, Godin S M, Lindqvist L O. Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone[J]. Applied Optics, 1990, 29(25): 3603-3612.
- [16] Zhang G X, Zhang Y C, Hu S X, *et al.* Measurements of planetary boundary layer aerosols with mobile lidar AML-1[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(3): 286-290.
张改霞, 张寅超, 胡顺星, 等. AML-1车载测污激光雷达探测大气边界层气溶胶[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(3): 286-290.
- [17] Zhang G X, Zhang Y C, Hu S X, *et al.* Slant measurements of atmospheric boundary layer aerosol with mobile lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1015-1019.
张改霞, 张寅超, 胡顺星, 等. 车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程探测[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1015-1019.
- [18] Qu K F, Zhang Y C, Tao Z M, *et al.* Measurement of surface ozone with mobile lidar system [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(3): 365-368.
屈凯峰, 张寅超, 陶宗明, 等. 车载测污激光雷达探测近地面层臭氧[J]. 量子电子学报, 2006, 23(3): 365-368.
- [19] Zhang X Z, Chen W T, Huang Y, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone in Jiangsu province during 2013—2016 [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(4): 50-59.
张祥志, 陈文泰, 黄樱, 等. 江苏省2013—2016年臭氧时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(4): 50-59.
- [20] Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone in Beijing [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4446-4453.
王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京市臭氧的时空分布特征[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4446-4453.