

## 激光与光电子学进展

## 重污染过程的差分吸收激光雷达监测

贾鹏程<sup>1\*\*</sup>, 曹念文<sup>1\*</sup>, 范广强<sup>2</sup>, 赵忆睿<sup>1</sup><sup>1</sup>中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044;<sup>2</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

**摘要** 基于差分吸收激光雷达反演了气溶胶消光系数、边界层高度以及臭氧的质量浓度,通过大气温度廓线、地面气象要素和空气质量数据以及后向轨迹和海军气溶胶分析与预测系统分析了望都县的一次重污染过程。实验结果表明,观测期间望都县处于东亚大槽系统的控制下,近地面层 100~200 m 内一直存在逆温层。颗粒物污染严重时,地面相对湿度较高、风速较小,高空有弱下沉气流,这有利于颗粒物的吸湿增长和长时间聚集;且边界层的高度始终较低,不利于污染物的扩散。此外,边界层高度与颗粒物质量浓度没有明显的相关性,但与能见度呈负相关,相关系数为 $-0.344$ 。臭氧的质量浓度与气温和能见度呈正相关,与相对湿度、边界层高度和风速呈负相关。本地的静稳天气以及外地污染源传输是造成本次望都县空气污染的主要原因。

**关键词** 大气光学; 差分吸收激光雷达; 重污染; 气象条件; 边界层高度

中图分类号 P407.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0901002

## Differential Absorption Lidar Monitoring of Heavy Pollution Process

Jia Pengcheng<sup>1\*\*</sup>, Cao Nianwen<sup>1\*</sup>, Fan Guangqiang<sup>2</sup>, Zhao Yirui<sup>1</sup><sup>1</sup>Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration,

Nanjing, Jiangsu 210044, China;

<sup>2</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** This study retrieves the aerosol extinction coefficient, the height of the boundary layer, and the mass concentration of ozone based on differential absorption lidar. Through the atmospheric temperature profile, ground meteorological elements, and air quality data, backward trajectory and naval aerosol analysis and prediction system, a heavy pollution process in Wangdu County is analyzed. Experiment results show that during the observation period, Wangdu County is under the control of the East Asian trough system, and there is always a temperature inversion layer within 100–200 m of the surface layer. When particulate pollution is severe, the relative humidity on the ground is high, the wind speed is low, and there is a weak downdraft at high altitude, which is conducive to the moisture absorption growth and long-term accumulation of particles. The boundary layer height is always low, which is not conducive to the diffusion of pollutants. In addition, the boundary layer height has no obvious correlation with the particle mass concentration, but it is negatively correlated with visibility, and the correlation coefficient is  $-0.344$ . The mass concentration of ozone is positively correlated with temperature and visibility and negatively correlated with relative humidity, boundary layer height, and wind speed. The local quiet and stable weather and the transmission of pollution sources from other places are the major causes of air pollution in Wangdu County.

**Key words** atmospheric optics; differential absorption lidar; heavy pollution; meteorological conditions; boundary layer height

**OCIS codes** 010.1290; 010.3640; 010.1110

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-09-25; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0209600, 2018YFC0213100)

\*E-mail: nwcao@nuist.edu.cn; \*\*E-mail: 20181205004@nusit.edu.cn

## 1 引言

气溶胶是指悬浮在空气中的固体颗粒与液滴的混合物,主要来源于发电厂、工业生产和汽车尾气排放等人类活动。气溶胶散射会导致能见度(VIS)下降,从而引发交通事故,人类长期暴露在高浓度颗粒物环境下也会引发呼吸系统疾病。此外,从气候变化的角度来看,气溶胶不仅会直接影响地球辐射的收支平衡,还会间接影响云的生消与降水<sup>[1]</sup>。近地面的臭氧(O<sub>3</sub>)是一种有毒的气体污染物,主要由人类活动排放的氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs)在特定气象条件下发生化学反应生成<sup>[2]</sup>。高浓度O<sub>3</sub>不仅会影响人的身体健康<sup>[3]</sup>,还会对农作物造成破坏<sup>[4]</sup>。

激光雷达作为一种主动遥感手段,具有时空分辨率高、能连续监测等优点,可用来监测气溶胶及气态污染的垂直分布。Uno等<sup>[5]</sup>利用地基激光雷达监测了2013年1月北京的一次霾天气,发现200~300 m高空中存在浅层气溶胶层。李霞等<sup>[6]</sup>基于微脉冲激光雷达和小波协方差方法反演了大气边界层高度(PBLH),并通过对比实验验证了反演结果和算法的可靠性。Ansmann<sup>[7]</sup>利用拉曼激光雷达和太阳光度计数据研究了珠江三角洲地区霾的光学特性,并给出了霾层的垂直分布。曹念文等<sup>[8]</sup>利用拉曼-瑞利-米激光雷达探测了南京北郊的雾霾气溶胶,验证了激光雷达监测雾霾出现时间及其垂直分布的可行性。差分吸收激光雷达利用待测吸收气体对两个激光波长的吸收差确定发射激光共同路径上待测气体的质量浓度,具有时空分

率高、测量精度高等特点<sup>[9-11]</sup>。范广强等<sup>[12]</sup>利用差分吸收激光雷达分析了一次灰霾天气下气溶胶消光系数和O<sub>3</sub>质量浓度的时空分布特性,发现细颗粒物与O<sub>3</sub>质量浓度的分布在不同高度具有不同的关联特征。王馨琦等<sup>[13]</sup>利用差分吸收激光雷达的长期连续观测数据,得到了广州市对流层O<sub>3</sub>的垂直分布特征。

差分吸收激光雷达能同时测量气溶胶的消光系数与污染气体的质量浓度,因此,本文利用差分吸收激光雷达结合探空数据、地面气象资料、空气质量数据以及再分析数据(ERA-5),分析了2018年12月15日至20日的一次重污染过程,并利用后向轨迹和海军气溶胶分析与预测系统(NAAPS)分析了污染物的来源和传输路径,研究结果可为该区域的大气污染防控和环境管理提供依据。

## 2 数据与处理方法

### 2.1 数据资料

实验使用的差分吸收激光雷达安装在河北省保定市望都县(38.709°N, 115.237°E),观测点周边主要为农田,观测点东南方向3 km处为京港澳高速公路。差分吸收激光雷达系统主要分为激光发射单元、光学接收单元、信号采集单元三部分,如图1所示,其中,AM为幅度调制。激光发射单元包括Nd:YAG激光器和拉曼管,光学接收单元包括卡塞格林望远镜和光电倍增管(PMT),信号采集单元包括模拟数字转换器(AD)。Nd:YAG激光器发射的波长为266 nm的激光束经过氘气(D<sub>2</sub>)拉曼管系统和光子计数器发生受激

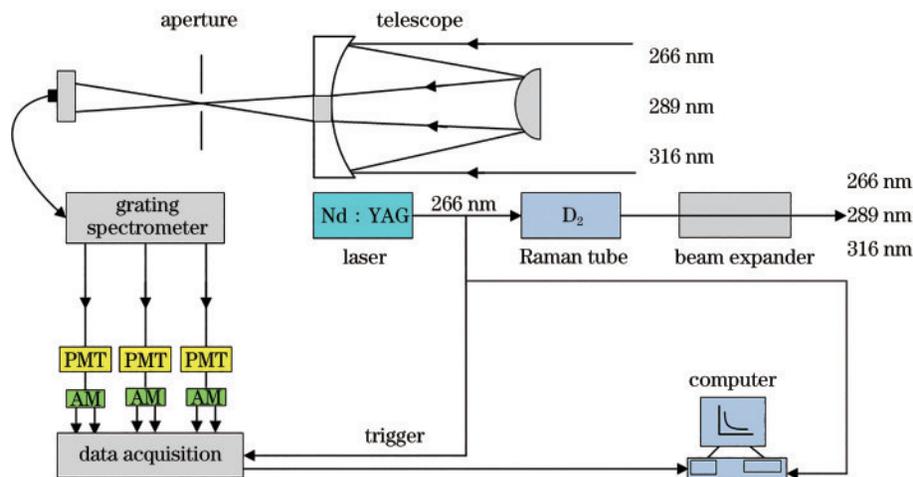


图1 差分吸收激光雷达的结构

Fig. 1 Structure of the differential absorption lidar

拉曼散射作用,产生波长为 289,316 nm 的激光,并与残余的 266 nm 激光经扩束镜扩束后垂直发射到大气中。然后,通过卡塞格林望远镜接收三个波长返回的弹性后向散射光,经光栅光谱仪分光后,三个波长的散射光被 PMT 转换为电流信号,并用瞬态记录仪采集。

地面空气质量数据来源于保定市环境监测站,主要包含常规的气态污染物(NO<sub>2</sub>,O<sub>3</sub>,CO,PM<sub>2.5</sub>以及 PM<sub>10</sub>)数据,数据的起止时间段为 2018 年 12 月 15 日 0 时至 2018 年 12 月 20 日 23 时,时间分辨率为 1 h,且该数据缺少 2018 年 12 月 17 日 2 时至 7 时的数据。地面气象资料来源于保定市气象站点,包括

能见度、相对湿度(RH)、温度(T)、气压、降水、风向及风速(WS),时间分辨率为 1 h。探空数据为怀俄明大学提供的 2018 年 12 月 16 日至 21 日北京站点 8 时和 20 时的探空数据(<http://weather.uwyo.edu>)。此外,利用 ERA-5 分析了观测期间 10 m 风场(包括高度为 10 m 的风向和风速)和 850 hPa 位势高度场的变化,数据的空间分辨率为 0.25°×0.25°(<https://cds.climate.copernicus.eu/>)。

## 2.2 数据反演方法

### 2.2.1 大气消光系数反演

用 Fernald 方法<sup>[14]</sup>反演消光系数,高度为  $z$  处的消光系数可表示为

$$\alpha_a(z) = -\frac{S_1}{S_2} \cdot \alpha_m(z) + \frac{D(z) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z) dz\right]}{\frac{D_0(z_c)}{\alpha_a(z_c) + \frac{S_1}{S_2} \cdot \alpha_m(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} D(z) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_1}{S_2} - 1\right) \int_z^{z_c} \alpha_m(z') dz'\right] dz}, \quad (1)$$

式中,下标 a 为气溶胶,下标 m 为大气分子, $\alpha_a(z_c)$  为边界点高度  $z_c$  处的气溶胶消光系数, $\alpha_m(z)$  为高度  $z$  处的大气分子消光系数, $\alpha_m(z_c)$  为边界点高度  $z_c$  处的大气分子消光系数, $P(z)$  为经大气分子和气溶胶散射后望远镜接收的后向散射信号功率, $D(z) = P(z)z^2$ 、 $D_0(z_c) = P(z_c)z_c^2$  分别为高度  $z$  和边界点高度  $z_c$  处的距离平方校正信号, $S$  为激光雷达比,是气溶胶或大气分子消光系数与后向散射系数的比。对于气溶胶引起的米散射,其消光系数与后向散射系数  $\beta_a(z)$  的比为

$$S_1 = \frac{\alpha_a(z)}{\beta_a(z)}, \quad (2)$$

对于分子引起的瑞利散射,其消光系数与后向散射系数  $\beta_m(z)$  的比为

$$S_2 = \frac{\alpha_m(z)}{\beta_m(z)} = \frac{8\pi}{3}. \quad (3)$$

对于瑞利散射信号, $S_2$  为常数;对于米散射信号, $S_1$  与气溶胶或云的折射率、粒径分布和形状等参数有关,一般在 10~100 sr 范围内取值。实验中取  $S_1=40$  sr,参考高度为 3 km,大气分子的消光系数根据美国标准大气模型<sup>[15]</sup>确定。

### 2.2.2 O<sub>3</sub> 质量浓度的反演方法

差分吸收激光雷达向大气中发射波长接近的两束脉冲激光,其中,一束激光的波长  $\lambda_{on}$  处于待测气体的吸收线上,另一束激光的波长  $\lambda_{off}$  处于待测气

体吸收线的边翼上,则待测气体的质量浓度可表示为

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

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}), \quad (5)$$

$$E_m = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_m(\lambda_{on}, z) - \alpha_m(\lambda_{off}, z)], \quad (6)$$

$$E_a = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_a(\lambda_{on}, z) - \alpha_a(\lambda_{off}, z)], \quad (7)$$

$$B = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[ \ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right], \quad (8)$$

式中, $N(z)$  为高度  $z$  处的 O<sub>3</sub> 质量浓度, $\sigma(\lambda_{on})$  为 O<sub>3</sub> 在波长  $\lambda_{on}$  处的吸收截面, $\sigma(\lambda_{off})$  为波长  $\lambda_{off}$  处的吸收截面。 $P(\lambda_{on}, z)$  为波长  $\lambda_{on}$  在高度  $z$  处的后向散射信号回波功率, $P(\lambda_{off}, z)$  为波长  $\lambda_{off}$  在高度  $z$  处的后向散射信号回波功率, $\alpha_m(\lambda_{on}, z)$  和  $\alpha_m(\lambda_{off}, z)$  分别为波长  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  在高度  $z$  处的大气分子消光系数, $\alpha_a(\lambda_{on}, z)$  和  $\alpha_a(\lambda_{off}, z)$  分别为波长  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  在高度  $z$  处的气溶胶消光系数, $\beta(\lambda_{on}, z)$  和  $\beta(\lambda_{off}, z)$  分别为对应波长在高度  $z$  处的气溶胶后向散射系数。 $E_m$ 、 $E_a$  和  $B$  被统称为大气干扰项,其中, $E_m$ 、 $E_a$  分别由大气分子和大气气溶胶消光系数决定, $B$  由大气(包括大气分子和气溶胶)后向散射系数决定。 $E_m$  可用美国中纬度大气模式<sup>[15]</sup>计算得到,但在计算  $E_a$  和  $B$  时,由于大气气溶胶的复杂性和变化性,需利用实时测量的气溶胶消光系数和后向散射系数进行反演,具

体反演方法参考文献[16]。

### 2.2.3 边界层高度的计算方法

可基于激光雷达测量的气溶胶消光系数廓线计算消光系数廓线随高度的变化率,变化率最大处即为边界层的高度<sup>[17]</sup>。实验在计算消光系数随高度的变化率时,利用滑动窗口法在每个窗口内对消光系数进行最小二乘法拟合,再对拟合结果进行求导,得到整条消光系数廓线的曲率,曲率最大处即为边界层的高度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 地面气象要素的变化

地面能见度的下降往往意味着空气质量变差,观测期间,有多个时间段的能见度低于 10 km 甚至

1 km。空气中污染物的质量浓度与气象条件密切相关,图 2 为观测期间观测地点降水、气压、相对湿度、温度、风向以及风速的变化情况。可以发现,整个观测期间天气以晴天和多云为主,没有出现降水天气。2018 年 12 月 15 日 0 时至 2018 年 12 月 16 日 15 时地面气压从 1031.5 hPa 下降至 1016.7 hPa,观测地点位于低压底部,温度和相对湿度的日变化趋势比较明显。相比 2018 年 12 月 15 日,2018 年 12 月 16 日的地面气温有所升高,峰值约为 10 °C,温度表现为白天高、夜间低,相对湿度则表现为夜间高、白天低。污染期间观测点的相对湿度大于 60%,风速通常低于 2 m/s,且风向的变化较大。大风有利于空气中污染物的稀释扩散,而微风或静风则会抑制污染物的扩散,造成近地面层污染物的累积。

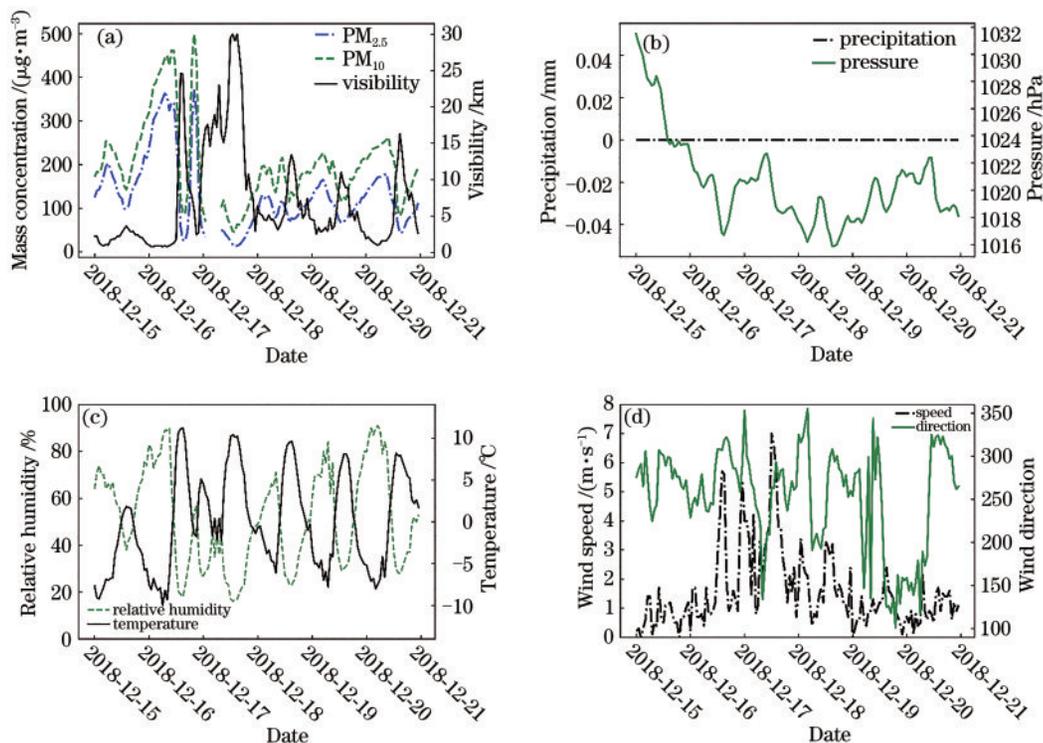


图 2 观测期间的地面气象变化情况。(a)能见度和颗粒物的质量浓度;(b)降水量和气压;(c)相对湿度和温度;(d)风向和风速

Fig. 2 Surface weather changes during the observation period. (a) Visibility and mass concentration of the particulate matter; (b) precipitation and air pressure; (c) relative humidity and temperature; (d) wind direction and speed

### 3.2 污染物的质量浓度变化

观测期间共出现了两次主要污染过程,由于 2018 年 12 月 15 日白天激光雷达数据的缺失,因此从 15 日夜间开始进行分析,结果如图 3 所示。可以发现,2018 年 12 月 16 日 6 时、19 时  $PM_{2.5}$  质量浓度的峰值分别为  $363 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,2018 年 12 月 16 日 9 时、19 时  $PM_{10}$  质量浓度的峰值分别为  $462 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $499 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2018 年 12 月 17 日之后污

染开始减轻,但颗粒物的质量浓度依旧较高, $O_3$  的质量浓度呈明显的日变化趋势,通常在每日 13 时、14 时达到峰值, $NO_2$  质量浓度的日变化与  $O_3$  相反,原因是近地面的  $O_3$  主要来源于对流层的光化学反应,即  $NO_2$  的光解。 $CO$  与  $SO_2$  质量浓度的变化与颗粒物质量浓度的变化趋势大体一致,原因是  $CO$  和  $SO_2$  都主要来源于化石燃料的燃烧。

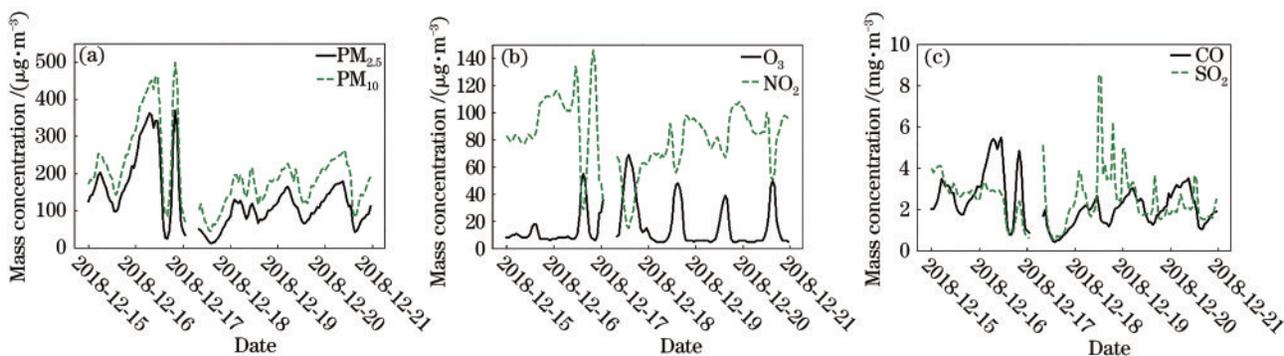


图 3 观测期间污染物质量浓度的变化情况。(a)颗粒物;(b) O<sub>3</sub>和 NO<sub>2</sub>;(c) CO和 SO<sub>2</sub>

Fig. 3 Changes in the mass concentration of pollutants during the observation period. (a) Particulate matter; (b) O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub>; (c) CO and SO<sub>2</sub>

### 3.3 污染期间气象场的变化

低层温度层结的分布决定了大气静力稳定度,而逆温有利于污染天气的形成。图 4 为 2018 年 12 月 16 日至 21 日的温度探空廓线数据,可以发现,

观测期间近地面 100~200 m 内均存在明显的逆温层,大气配置比较稳固,空气流动缓慢且不能向上扩散,限制了近地面污染物的扩散,导致了颗粒物的累积,能见度降低。

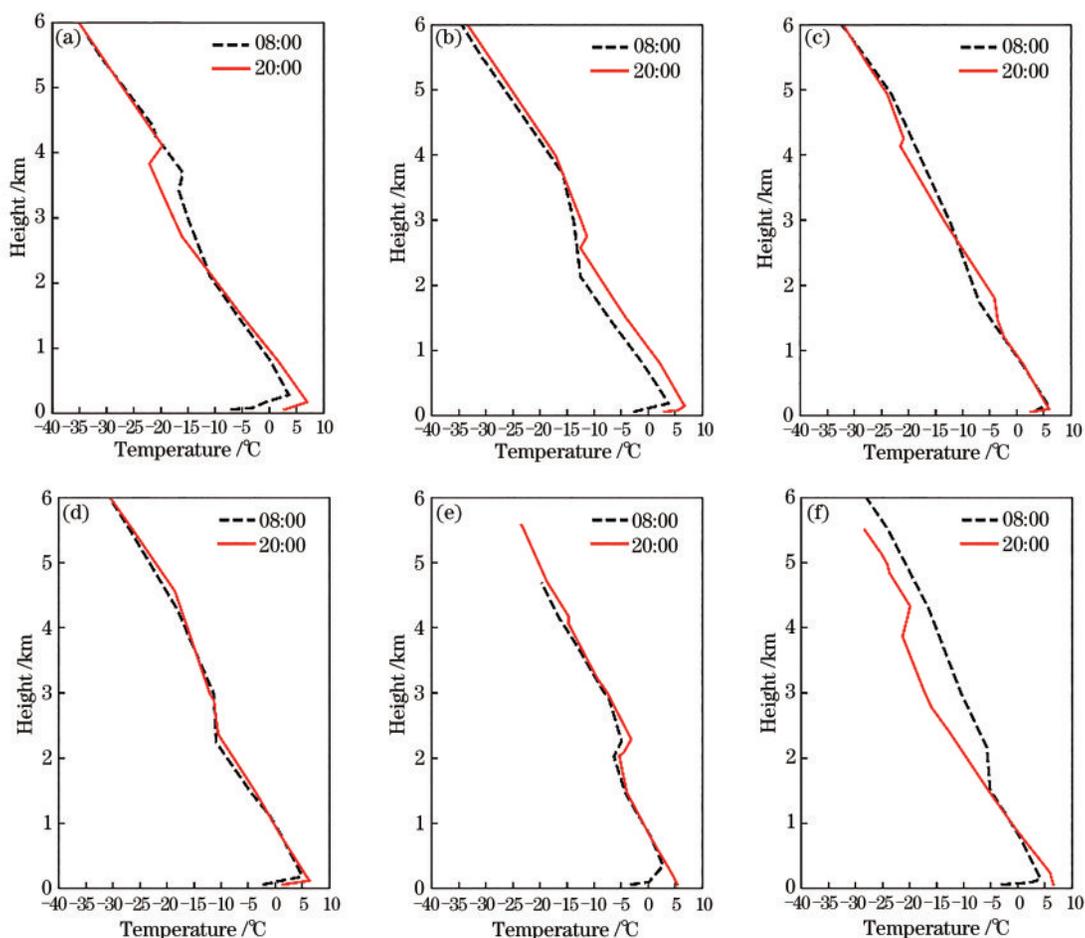


图 4 观测期间的温度探空廓线。(a) 16 日;(b) 17 日;(c) 18 日;(d) 19 日;(e) 20 日;(f) 21 日

Fig. 4 Temperature sounding profile during the observation period. (a) 16th; (b) 17th; (c) 18th; (d) 19th; (e) 20th; (f) 21st

图 5 和图 6 分别为 2018 年 12 月 15 日至 20 日 850 hPa 位势高度场和 10 m 风场的变化情况。从

850 hPa 位势高度场可以发现,观测期间望都县基本处在东亚大槽系统控制下,15 日的等压线比较

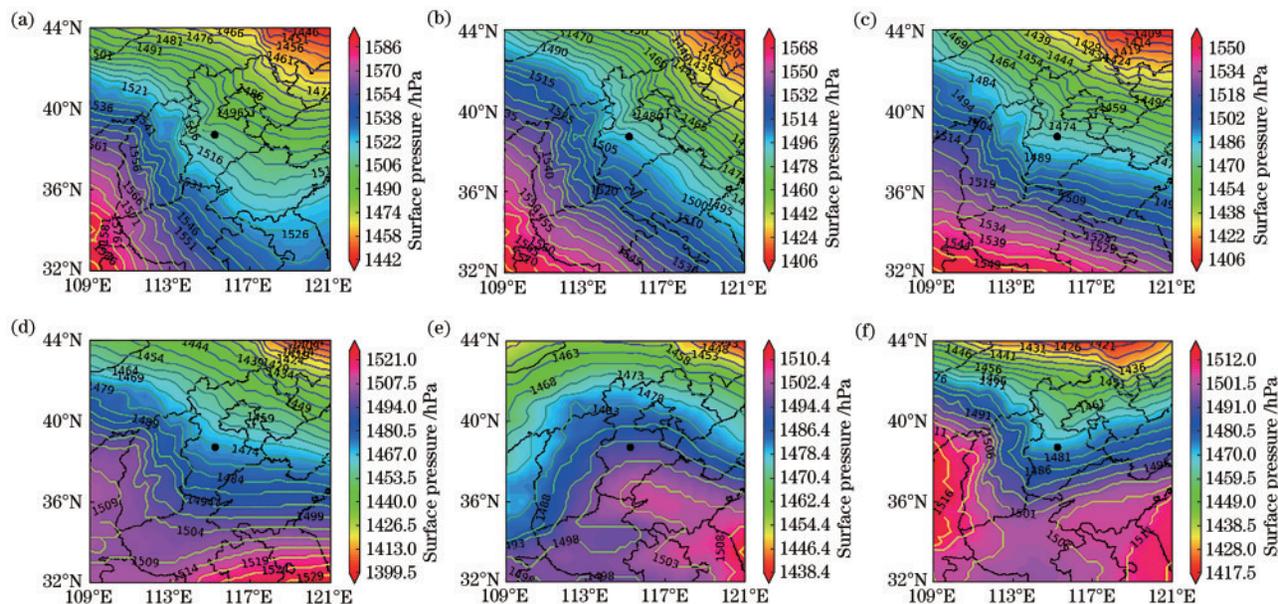


图 5 850 hPa 位势的高度场。(a) 15 日 ;(b) 16 日 ;(c) 17 日 ;(d) 18 日 ;(e) 19 日 ;(f) 20 日

Fig. 5 Height field of the 850 hPa potential. (a) 15th; (b) 16th; (c) 17th; (d) 18th; (e) 19th; (f) 20th

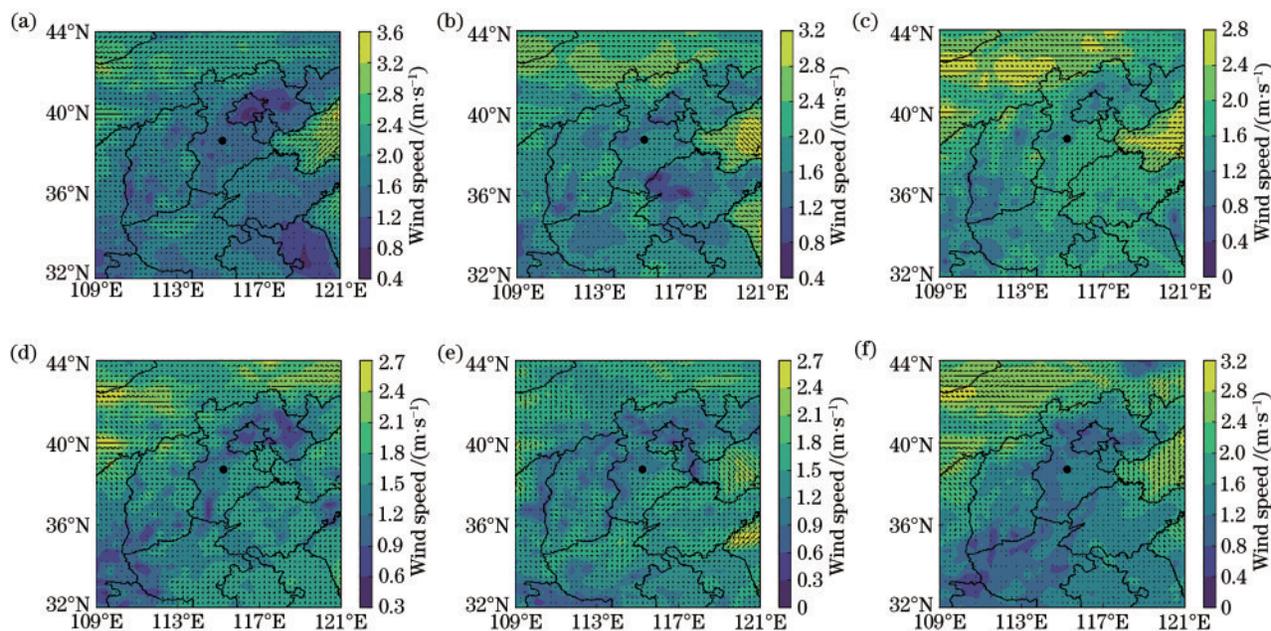


图 6 高度为 10 m 的风场。(a) 15 日 ;(b) 16 日 ;(c) 17 日 ;(d) 18 日 ;(e) 19 日 ;(f) 20 日

Fig. 6 Wind field with a height of 10 m. (a) 15th; (b) 16th; (c) 17th; (d) 18th; (e) 19th; (f) 20th

稀疏, 气压梯度力小, 风速也较小, 不利于污染物的扩散。19 日至 20 日有弱的暖脊发展, 地面受到均压场的控制, 近地层的风速较小、大气层结稳定、污染扩散形势差, 导致地面出现了持续的霾天气。从 10 m 风场的变化情况可以发现, 整个观测期间望都县的风速较小, 基本小于 2 m/s, 有利于维持逆温层, 从而导致颗粒物  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的累积。

### 3.4 污染期间消光系数和 $O_3$ 质量浓度的变化

图 7 为根据差分吸收激光雷达测得的 316 nm

回波信号反演的气溶胶消光系数时空分布以及  $O_3$  质量浓度的时空分布。气溶胶的消光系数可反映出颗粒物质量浓度的高低, 可以发现, 观测期间的污染过程大致分为两次, 第一次为 2018 年 12 月 15 日夜间至 16 日凌晨, 200~400 m 高度范围内的气溶胶消光系数大于  $1 \text{ km}^{-1}$ , 最大为  $1.99 \text{ km}^{-1}$ 。第二次为 2018 年 12 月 18 日 12 时至 20 日 12 时, 200~500 m 高度范围内出现强消光系数带, 其中, 19 日夜间距离地面大约 300~400 m 高度范围内的

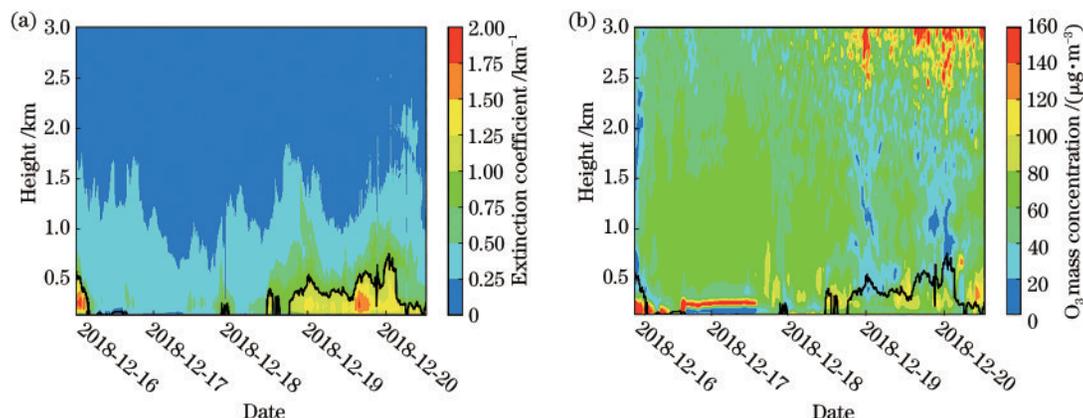


图 7 差分吸收激光雷达测量的污染物时空分布。(a)颗粒物消光系数;(b) O<sub>3</sub>质量浓度

Fig. 7 Time and space distribution of pollutants measured by differential absorption lidar. (a) Particle extinction coefficient; (b) O<sub>3</sub> mass concentration

消光系数为 1.5~1.8 km<sup>-1</sup>,这与地面颗粒物污染的时间基本一致。从差分吸收激光雷达反演的 O<sub>3</sub> 质量浓度时空分布图可以看出,O<sub>3</sub>质量浓度在高度小于 0.5 km 时有明显的日变化规律,通常在午后出现峰值。与颗粒物污染一样,15 日夜间在 300 m 高度范围内 O<sub>3</sub>质量浓度也出现了峰值,约为 200 μg/m<sup>3</sup>。16 日下午至 17 日中午,在 300~350 m 高度范围内,一直存在一个 O<sub>3</sub>污染带,原因可能是 16 日比 15 日的气温(1.8℃)高,最高为 11.2℃。此外,由于近地面 O<sub>3</sub>前体物质量浓度的升高,16 日白天的 NO<sub>2</sub>和 CO 质量浓度均较高,峰值分别为 134 μg/m<sup>3</sup>和 5.4 mg/m<sup>3</sup>,这两者都有利于大气中光化学反应的发生<sup>[18]</sup>。

图 7 中的黑色线条为利用消光系数廓线反演的边界层高度,可以发现,整个观测期间,尤其是颗粒物质量浓度较高时,边界层高度较低,最低为 120 m。低层大气污染物的扩散和输送受边界层高度的影响,边界层高度越低,越有利于污染物的累积<sup>[19]</sup>。图 8 和图 9 为污染期间不同时刻的气溶胶消

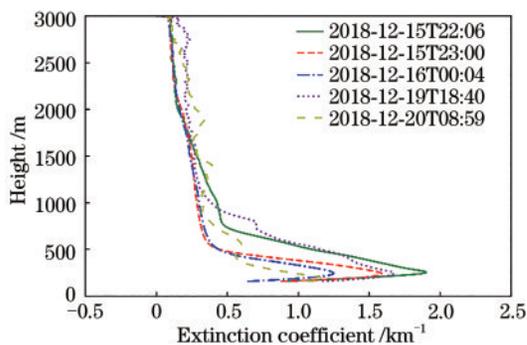


图 8 不同时刻的气溶胶消光系数

Fig. 8 Aerosol extinction coefficient at different moments

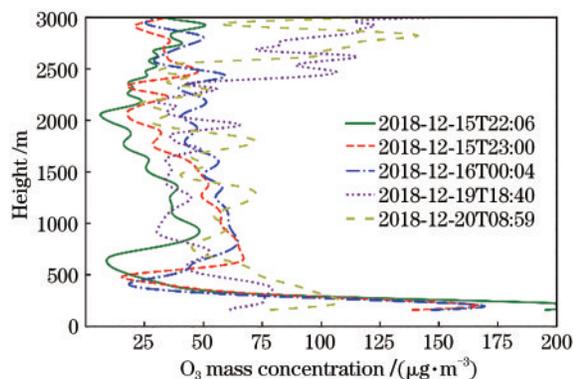


图 9 不同时刻的 O<sub>3</sub>质量浓度

Fig. 9 O<sub>3</sub> mass concentration at different moments

光系数廓线和 O<sub>3</sub>质量浓度廓线,可以发现,消光系数高值主要分布在近地面处,随着高度的增加,消光系数逐渐减小,1 km 以上高空的消光系数变化差异较小;O<sub>3</sub>质量浓度高值也主要分布在近地面处,但当有高层向下传输时,高空也会出现 O<sub>3</sub>质量浓度高值。

### 3.5 颗粒物、O<sub>3</sub>质量浓度与气象要素的关系

表 1 为 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub>质量浓度与边界层高度及其他气象要素的相关系数统计,其中,*p*值(*p* value)表示原假设为真时得到的样本观察结果或更极端结果出现的概率,\*表示有统计学差异(*p*<0.05),\*\*表示差异显著(*p*<0.01),\*\*\*表示差异极显著(*p*<0.001)。可以发现,PM<sub>2.5</sub>质量浓度与 PBLH 没有明显的相关性,但与相对湿度呈正相关,相关系数为 0.637,达到 0.001 显著性水平,原因是相对湿度较高时,颗粒态污染物会吸湿增长,粒径变大<sup>[20]</sup>。PM<sub>2.5</sub>质量浓度与风速、温度、能见度呈负相关,与大气边界层气压(PRES)

表1 PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>质量浓度与边界层高度以及其他气象要素的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub> mass concentrations and boundary layer height, other meteorological elements

Factor	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>	PBLH	RH	T	VIS	WS	PRES
PM <sub>2.5</sub>	1.0	-0.54***	0.003	0.637***	-0.608***	-0.640***	-0.433***	0.369***
O <sub>3</sub>		1.0	-0.30**	-0.76***	0.80***	0.88***	-0.74***	-0.30**
PBLH			1.0	0.368***	-0.280**	-0.344***	-0.418***	0.220*
RH				1.0	-0.958***	-0.774***	-0.700***	0.396***
T					1.0	0.750***	0.696***	-0.349***
VIS						1.0	0.800***	-0.244*
WS							1.0	-0.176
PRES								1.0

呈正相关。原因是风速越低,越不利于污染物的扩散。PBLH与能见度的相关系数为-0.344,达到0.001显著性水平。O<sub>3</sub>质量浓度与温度和能见度呈正相关,相关系数分别为0.80和0.88,达到0.001显著性水平,原因是能见度较高时,往往对应晴朗天气,日照时间长或太阳辐射强,有利于光化学反应的发生。O<sub>3</sub>质量浓度与相对湿度和风速呈负相关,相关系数分别为-0.76和-0.74,达到0.001显著性水平。原因是大气中的水汽通过消光机制影响太阳辐射,此外,降水的湿清除作用会消耗O<sub>3</sub><sup>[21]</sup>。O<sub>3</sub>质量浓度与PBLH的相关系数为-0.30,达到0.01显著性水平。

### 3.6 污染过程后向轨迹特征

为了了解污染期间颗粒物的来源,利用后向轨迹模式<sup>[22]</sup>和NAPPS分析污染物的来源和输送途径。图10为污染期间不同高度气团的24h后向轨迹,起始点为保定市望都县(38.709°N, 115.237°E),垂直方向上选取300 m、1500 m(气压约为850 hPa)和3000 m作为模拟的初始高度。可以发现,2018年16日19时三个高度层的气团都来源于西北方向,途经我国内蒙和山西地区,且1500 m高度的气团下沉到300 m,望都地区受西北方向气团输送的污染物影响,颗粒物的质量浓度达到峰值。

图11为NAAPS全球气溶胶模式模拟的沙尘传输路径和过程,本次沙尘起源于内蒙古中部,向东南部传输,影响山西北部、河北西北部、北京、天津等地区。此外,本地工业污染产生的硫酸盐污染进一步加剧了此次污染过程。

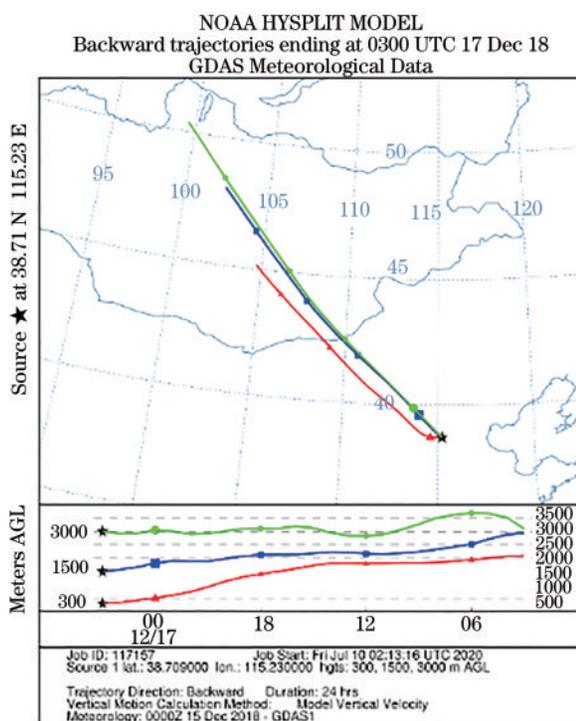


图10 2018-12-15T19:00—2018-12-17T19:00气团的后向轨迹

Fig. 10 Dackward trajectory of the air mass from 2018-12-15T19:00—2018-12-17T19:00

## 4 结 论

基于差分吸收激光雷达、地面空气质量数据、地面气象要素和探空数据等综合观测资料,分析了河北省保定市望都县冬季一次重污染过程。结果表明,差分吸收激光雷达反演的消光系数与地面PM<sub>2.5</sub>以及PM<sub>10</sub>的变化趋势基本一致。颗粒物质量浓度升高时,近地面消光系数变大,反之,近地面消光系数减小。污染期间,近地面一直存在逆温层,

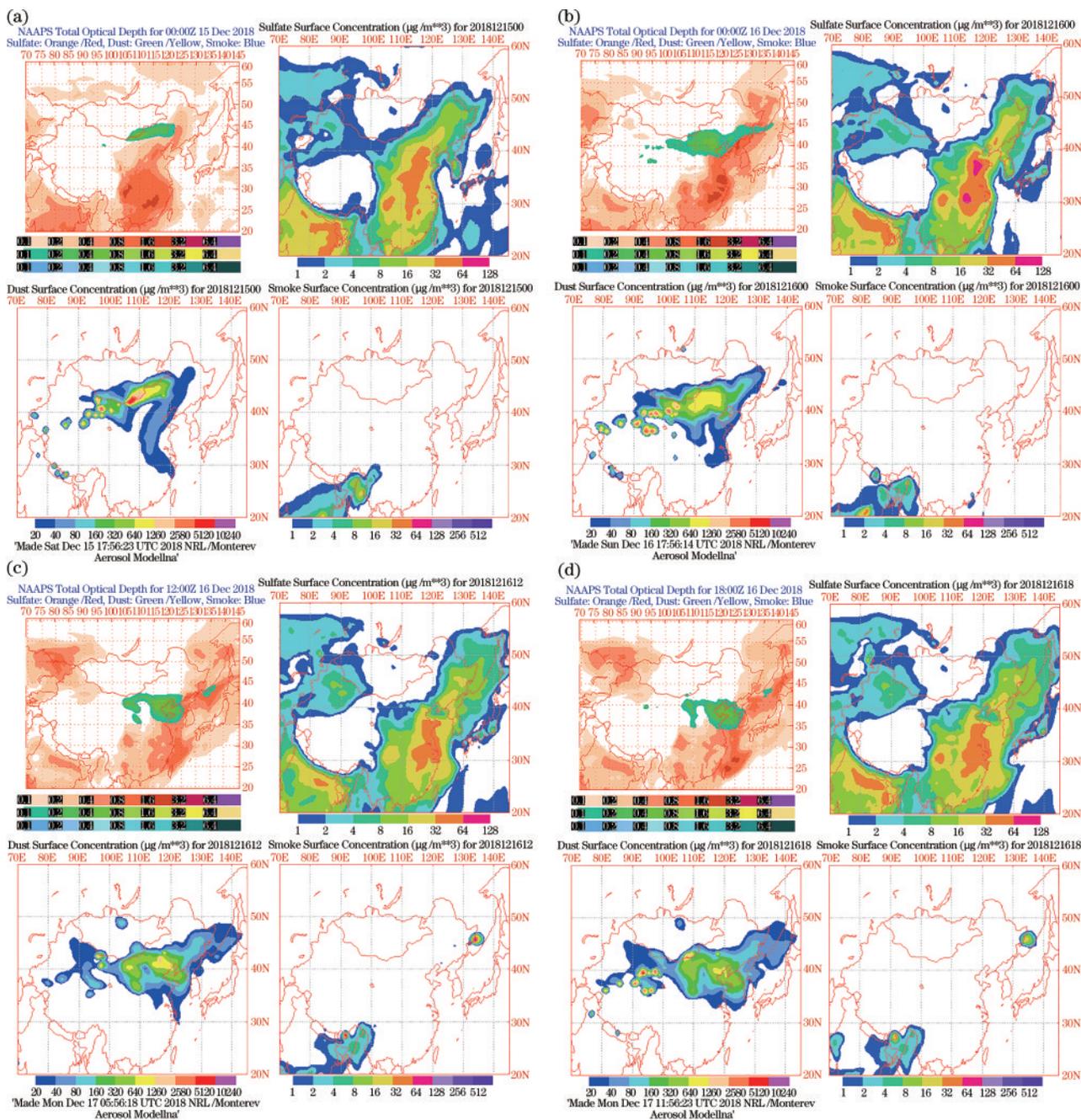


图 11 NAAPS 模拟的气溶胶。(a) 2018-12-15T08:00; (b) 2018-12-16T08:00; (c) 2018-12-16T20:00; (d) 2018-12-17T02:00  
 Fig. 11 NAAPS simulated aerosol. (a) 2018-12-15T08:00; (b) 2018-12-16T08:00; (c) 2018-12-16T20:00; (d) 2018-12-17T02:00

抑制了颗粒物和水汽的输送。且边界层一直维持在较低的高度,最低约为 120 m。风速较小,尤其是夜间至凌晨,相对湿度较大时,气溶胶吸湿情况有明显增长,从而加重了颗粒物污染。气团的后向轨迹和 NAAPS 气溶胶模式模拟结果表明,污染期间,气团主要来自西北方向,且有高空气团从 1500 m 下降至 300 m,这表明本地的静稳天气、局地工业污染型硫酸盐粒子污染和外地沙尘气溶胶粒子输送是造成本次望都县空气污染的主要原因。

参 考 文 献

[1] Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.  
 石广玉,王标,张华,等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.

[2] Jenkin M E, Clemitshaw K C. Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes

- governing their formation in the planetary boundary layer[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(16): 2499-2527.
- [3] Jerrett M, Burnett R T, Pope C A, et al. Long-term ozone exposure and mortality [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2009, 360(11): 1085-1095.
- [4] Zhu X K, Feng Z Z, Sun T F, et al. Effects of elevated ozone concentration on yield of four Chinese cultivars of winter wheat under fully open-air field conditions [J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(8): 2697-2706.
- [5] Uno I, Sugimoto N, Shimizu A, et al. Record heavy PM<sub>2.5</sub> air pollution over China in January 2013: vertical and horizontal dimensions [J]. *SOLA*, 2014, 10: 136-140.
- [6] Li X, Quan J N, Wang F, et al. Evaluation of the method for planetary boundary layer height retrieval by lidar and its application in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(2): 435-446.  
李霞, 权建农, 王飞, 等. 激光雷达反演边界层高度方法评估及其在北京的应用[J]. *大气科学*, 2018, 42(2): 435-446.
- [7] Ansmann A. High aerosol load over the Pearl River Delta, China, observed with Raman lidar and sun photometer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(13): L13815.
- [8] Cao N W, Yang F K, Shi J Z, et al. Low altitude fog-haze measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in Nanjing [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5): 979-984.  
曹念文, 杨丰恺, 施建中, 等. 南京地区低空雾霾气溶胶的拉曼-瑞利-米激光雷达测量[J]. *应用光学*, 2012, 33(5): 979-984.
- [9] 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.
- [10] Hu S X, Chen Y F, Liu Q W, et al. Differential absorption lidar system for background atmospheric SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> measurements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911009.  
胡顺星, 陈亚峰, 刘秋武, 等. 差分吸收激光雷达系统探测背景大气 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub>[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0911009.
- [11] Fan G Q, Liu J G, Chen Z Y, et al. A differential absorption lidar system for tropospheric ozone monitoring[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1113001.  
范广强, 刘建国, 陈臻懿, 等. 一套测量对流层臭氧的差分吸收激光雷达系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1113001.
- [12] Fan G Q, Zhang T S, Fu Y B, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1014003.  
范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1014003.
- [13] Wang X Q, Zhang T S, Pei C L, et al. Monitoring of vertical distribution of ozone using differential absorption lidar in Guangzhou [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1211003.  
王馨琦, 张天舒, 裴成磊, 等. 差分吸收激光雷达监测广州市臭氧垂直分布特征[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1211003.
- [14] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [15] Krueger A J, Minzner R A. A mid-latitude ozone model for the 1976 US Standard Atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1976, 81(24): 4477-4481.
- [16] Fan G Q, Liu J G, Liu W Q, et al. A new retrieval method for ozone concentration at the troposphere based on differential absorption lidar[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3304-3308.  
范广强, 刘建国, 刘文清, 等. 基于差分吸收激光雷达的一种新的对流层臭氧浓度反演算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3304-3308.
- [17] Yuan S, Xin Y, Zhou J, et al. Lidar observations of the lower atmosphere in Hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(3): 387-395.  
袁松, 辛雨, 周军, 等. 合肥市郊低层大气的激光雷达探测研究[J]. *大气科学*, 2005, 29(3): 387-395.
- [18] Liu J, Wu D, Fan S J, et al. Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 813-820.  
刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3): 813-820.
- [19] Liu C, Hua C, Zhang H D, et al. Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer[J]. *Meteorological Monthly*,

- 2017, 43(5): 591-597.
- 刘超, 花丛, 张恒德, 等. L波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. 气象, 2017, 43(5): 591-597.
- [20] Wu Y X, Yin Y, Gu X S, et al. An observational study of the hygroscopic properties of aerosols in north suburb of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 1938-1949.
- 吴奕霄, 银燕, 顾雪松, 等. 南京北郊大气气溶胶的吸湿性观测研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 1938-1949.
- [21] Wang L, Liu D Y, Han G R, et al. Study on the relationship between surface ozone concentrations and meteorological conditions in Nanjing, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1285-1296.
- 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1285-1296.
- [22] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(12): 2059-2077.