

基于气溶胶和大气风场激光雷达对北京一次沙尘过程分析

张晋茹^{1**}, 陈玉宝^{1,2}, 卜令兵^{1*}

¹气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点实验室,

教育部气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044;

²中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘要 基于北京南郊观象台的气溶胶激光雷达探测得到的气溶胶消光系数和粒子退偏振比, 多普勒测风激光雷达探测的大气风场、地面气象要素 PM₁₀ 等综合观测资料, 对北京 2017 年 5 月 4 日至 5 日的一次强沙尘天气过程进行分析。结果表明: 5 月 3 日下午水平风速开始减小, 高空中出现垂直向下的气流, 利于沙尘从高空降落到地面; 5 月 4 日 12 时至 20 时之间, 在 40~1350 m 整个高度层出现统一向上的垂直气流, 速度最高达到 2 m/s, 导致低空沙尘向高空扩散; 从激光雷达的数据可以得到沙尘的立体分布情况, 初期沙尘层高度在 1 km 左右, 中期沙尘高度在 2 km 左右, 后期沙尘高度回归到 1 km 左右; 激光雷达最低观测高度处的消光系数与地面 PM₁₀ 浓度变化的相关系数为 0.8308。研究表明气溶胶激光雷达和测风激光雷达相结合能够有效地监测和预报大气气溶胶的分布及扩散。

关键词 激光雷达; 沙尘; 消光系数; 退偏振比; 大气风场

中图分类号 P412.25

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080102

Analysis of a Dust Process in Beijing Based on Aerosol and Atmospheric Wind Field Lidar

Zhang Jinru^{1**}, Chen Yubao^{1,2}, Bu Lingbing^{1*}

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Key Laboratory of Meteorological Disaster of the Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

² China Meteorological Administration (CMA) Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China

Abstract Based on the comprehensive observation data observed in the Beijing southern suburbs observatory, such as aerosol extinction coefficient and particle depolarization ratio obtained from aerosol lidar detection, wind field obtained from Doppler wind lidar, PM₁₀ and ground meteorological elements, we analyse strong sand and dust weather process on May 4-5, 2017. The results show that on the afternoon of May 3, the horizontal wind speed begins to decrease, and the vertical downward airflow appears in the upper air, which are conducive to the dust falling from high altitude to the ground. During 12:00 to 20:00 of May 4, the vertical air flow occurs in the entire height layer from 40 m to 1350 m, and the maximum speed reaches 2 m/s, leading to the spread of low-level dust to high altitude. The three-dimensional distribution of dust is obtained from the lidar product: the initial dust layer height is about 1 km, the mid-term dust height is about 2 km, and the later dust height gets over to be about 1 km. The related coefficient of variation between the extinction coefficient of the lowest observation height of lidar and the variation of ground PM₁₀ concentration is 0.8308. The study shows that the combination of aerosol lidar and wind-measuring lidar can effectively monitor and predict the distribution and diffusion of atmospheric aerosol.

Key words lidar; dust; extinction coefficient; depolarization ratio; atmospheric wind field

OCIS codes 010.3640; 010.1110; 010.1290

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-02-25; 录用日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(41675133)、中国气象局气象探测中心自设项目(TCZS201707)

* E-mail: lingbingbu@nuist.edu.cn; ** E-mail: 751639350@qq.com

1 引言

沙尘是大气气溶胶的一个重要来源,对大气温度有很大影响,大气的热力状况易受其影响引起大气动力结构的改变,进而影响天气变化^[1]。激光雷达是获取大气气溶胶、风、温和湿等重要参数的遥感设备之一,具有高时空分辨率的特点^[2]。近年来,激光雷达被越来越多地用于沙尘过程的研究。刘东等^[3]采用偏振激光雷达研究沙尘退偏振比特性,结果可知:沙尘气溶胶的退偏振比在 0.2~0.3 范围内,而强烈沙尘条件下气溶胶退偏振比能达 0.4。郭本军等^[4]采用微脉冲激光雷达对 2005 年 4 月 28 日大连的一次沙尘过程进行观测,研究分析得到沙尘天气时气溶胶消光系数的垂直结构以及演化特性。黄艇等^[5]运用激光雷达等综合观测资料,对大连区域某次沙尘过程分析,得到沙尘过程的时间和空间的分布特性。樊璠等^[6]应用激光雷达等综合观测资料,分析了北京地区的一次强沙尘过程前后的天气形势和细颗粒物(PM_{2.5})的污染特征,反演了雷达探测期间的消光系数,探讨了沙尘过程中气溶胶的时空分布特征及输送特征。郭伟等^[7]通过分析两次沙尘天气过程中浮尘、扬沙和沙尘暴三类天气情况的地面综合观测资料得到气溶胶后向散射系数的时间和空间结构特性。

以上研究大都使用单一的激光雷达,数据产品限于消光系数和偏振信息,而高时空分辨率的风场信息在沙尘天气分析应用中并不多见。本文利用北京南郊观象台的偏振-米氏散射激光雷达、多普勒测风激光雷达,综合其他地面大气观测资料,分析了沙尘前后期及当日的天气形势特征,并对沙尘过程的时空分布特征进行分析和探讨。

2 材料与方法

2.1 数据资料

使用的气溶胶激光雷达和多普勒测风激光雷达

都安装于北京市南郊观象台(39.81°N、116.47°E)。气溶胶激光雷达为双波长偏振激光雷达,由发射系统、光学接收系统、光电转换系统和信号处理显示系统组成,发射波长为 355 nm 和 532 nm,355 nm 的单脉冲能量为 30 mJ,532 nm 的单脉冲能量为 25 mJ,脉冲重复频率为 20 Hz,垂直分辨率为 7.5 m,可 24 h 连续观测;数据产品包括消光系数和退偏振比。使用的小型全光纤相干多普勒测风激光雷达的波长为 1550 nm,可以测得 40~1350 m 高度的水平风速、水平风向以及垂直气流,其时间分辨率为 10 min。地面气象综合观测站则提供了能见度、PM₁₀浓度等气象要素,能见度时间分辨率为 1 min,PM₁₀浓度时间分辨率为 5 min。

2.2 数据反演方法

2.2.1 消光系数反演

大气消光主要是由散射决定的,其主要贡献来自于各种形式的降水、颗粒物和气态污染物,而颗粒物的消光系数占总消光系数的 90%^[8-9]。

激光在大气传输过程中与大气中的分子和气溶胶发生相互作用,接收激光雷达径向距离 r 处的大气后向散射信号的回波信号 $P(r)$ 是由激光雷达方程所决定^[10]:

$$P(r) = P_0 C r^{-2} [\beta_m(r) + \beta_a(r)] \cdot \exp \left[-2 \int_0^r \alpha_m(r) + \alpha_a(r) dr \right], \quad (1)$$

式中: $P(r)$ 为距激光雷达 r 处的回波能量; P_0 为出射激光能量; C 为激光雷达系统参数; $\beta_a(r)$ 为距激光雷达 r 处的气溶胶后向散射系数, $\beta_m(r)$ 为距激光雷达 r 处大气分子后向散射系数; $\alpha_a(r)$ 为距激光雷达 r 处气溶胶消光系数; $\alpha_m(r)$ 为距激光雷达 r 处大气分子消光系数。

利用 Fernald^[11-12]数据反演方法,选取参考高度 r_c ,假设已知 r_c 处大气气溶胶粒子消光系数 $\alpha_a(r_c)$ (参考值)、大气分子消光系数 $\alpha_m(r_c)$,气溶胶粒子消光系数 $\alpha_a(r)$ (后向积分)在高度 r_c 以下为^[10]

$$\alpha_a(r) = -\frac{S_a}{S_m} \alpha_m(r) + \frac{P(r)r^2 \cdot \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r) dr \right]}{\alpha_a(r_c) + \frac{S_a}{S_m} \cdot \alpha_m(r_c) + 2S_a \int_r^{r_c} P(r)r^2 \cdot \exp \left[2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r') dr' \right] dr}, \quad (2)$$

式中: $S_a = \alpha_a(r)/\beta_a(r)$ 为大气气溶胶消光后向散射比,对于 532 nm 波长, $S_a = 50$ ^[13]; $S_m = \alpha_m(r)/$

$\beta_m(r) = 8\pi/3$ 为大气分子的消光后向散射比。用美国标准大气模式计算得到大气分子的消光系数

$\alpha_m(r)$ 。参考高度 r_c 选取原则为不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度。大气气溶胶消光散射系数边界值 $\alpha_a(r_c)$ 由大气气溶胶散射比 $1 + \beta_a(r_c)/\beta_m(r_c) = 1.01$ 来确定^[14]。

2.2.2 退偏振比反演

一般大气气溶胶均近似球形,退偏振比较低,而沙尘气溶胶有较高的退偏振比(大于 0.1),故易与大气污染物区分^[6]。

退偏振比 $\delta(r)$ 定义为

$$\delta(r) = \frac{P_{rs}(r)/k_s}{P_{rp}(r)/k_p} = \frac{\beta_s(r)}{\beta_p(r)} \times \exp\left\{\int_0^r [\alpha_p(r') - \alpha_s(r')] dr'\right\}, \quad (3)$$

式中: $P_{rp}(r)$ 为距离激光雷达接收端 r 处的大气后向散射平行分量的回波功率; $P_{rs}(r)$ 为垂直分量的回波功率; k_p 为接收平行分量通道雷达系统常数; k_s 为垂直分量通道雷达系统常数; r 为距离; $\beta_p(r)$ 为大气后向散射系数的平行分量; $\beta_s(r)$ 为大气后向散射垂直分量; $\alpha_p(r)$ 和 $\alpha_s(r)$ 分别为距离 r 处大气消光系数的平行分量和垂直分量之和。

一般情况下, $\alpha_p(r) = \alpha_s(r)$, 所以(3)式可以写成

$$\delta(r) = \frac{\beta_s(r)}{\beta_p(r)} = k \frac{P_{rs}(r)}{P_{rp}(r)}, \quad (4)$$

式中: $k = k_p/k_s$ 。因大气分子的退偏振为 2.97%, 对偏振激光雷达探测大气粒子获得的大气退偏振比 $\delta(r)$ 贡献小, 所以退偏振探测结果主要受非球形粒子的影响^[14]。

2.2.3 大气风廓线反演

多普勒测风激光雷达具有高分辨率、高精度、大探测范围、能提供三维风场信息能力等优点, 在气候研究和天气预报等方面有着重要的应用^[15]。全光纤相干多普勒测风激光雷达采用四波束的方法反演得到大气的风场廓线数据。雷达以 θ 仰角分别向东

南西北 4 个方向发射激光脉冲, 发射激光与大气中的气溶胶粒子发生弹性散射, 后向散射信号被雷达的望远镜接收, 经过处理后, 得到 4 个方向的径向速度分别为 v_E, v_S, v_W 和 v_N , 由于每个方向的径向速度分别为该方向的垂直速度和水平速度的合成, 东和西两个方向上, 水平速度符号相反, 垂直速度相同, 那么雷达在东西方向的水平速度分别为

$$v_{h,EW} = \cos\theta(v_E - v_W)/2. \quad (5)$$

同理可计算得到南北方向的水平速度:

$$v_{h,SN} = \cos\theta(v_S - v_N)/2. \quad (6)$$

水平风速、风向可以通过三角函数的关系求得:

$$v_h = \sqrt{v_{h,EW}^2 + v_{h,SN}^2}, \quad (7)$$

$$D_{ir} = \arctan(v_{h,EW}/v_{h,SN}). \quad (8)$$

垂直速度为

$$v_v = \sin\theta(v_E + v_S + v_W + v_N)/4. \quad (9)$$

3 结果与分析

3.1 沙尘过程天气概述

2017 年 5 月 4 日至 5 日, 北京地区经历了一次严重的沙尘天气过程。沙尘是在 4 日上午四时左右抵达地面, 5 日上午 9 时左右消失, 持续时间约为 29 h。图 1 所示为沙尘发生前、中、后期的 500 hPa 对应高度的天气图, 由图 1(a) 可知, 沙尘发生前北京地区属于槽前, 高层为西南风, 且温度槽落后于高度槽, 槽将发展; 在俄罗斯地区存在低涡, 低涡南部分裂出一条东南的小槽, 随着槽线的移动, 高纬度的冷空气经西北路东移南下, 进入北京。由图 1(b) 可知, 沙尘发生时北京 500 hPa 对应高度上为西风, 冷高压控制地面, 受冷空气主体影响, 北京地区温度降低, 风力加大。由图 1(c) 可知, 沙尘发生后, 俄罗斯东部、中国东北部出现了槽, 槽后是西北风, 槽前是西南风, 北京位于槽前。

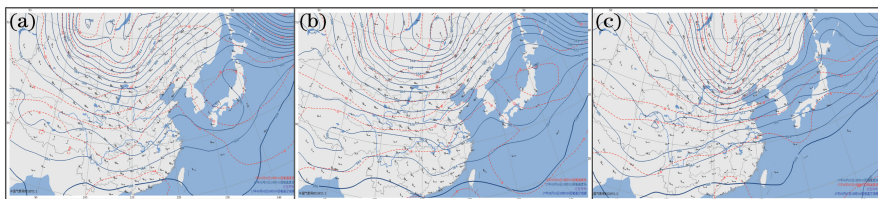


图 1 500 hPa 天气图。(a) 5 月 3 日 20 时; (b) 5 月 4 日 8 时; (c) 5 月 5 日 8 时

Fig. 1 500 hPa weather maps. (a) 20:00 on May 3; (b) 08:00 on May 4; (c) 08:00 on May 5

影响北京区域沙尘天气的传输路径主要分为西路、北路和西北路^[16]。为了解本次沙尘过程的来源, 采用混合单粒子拉格朗日积分轨迹模式 (HYSPLIT-4) 进行研究。该模式已被广泛用于污

染物传输与扩散等研究中^[17]。图 2 为 5 月 4 日 4 时(图中时间为世界标准时间 5 月 3 日 20 时)的气流后向轨迹, 图中 GDAS 为 Ground Data Acquisition System。研究终点为北京南郊观象台

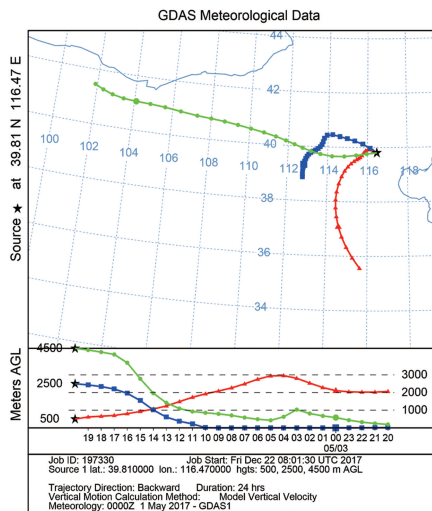


图 2 2017 年 5 月 4 日 4 时(北京时间)的 24 h 后向轨迹图 (横坐标时间为世界标准时间时间)

Fig. 2 24-hour backward trajectory starting at 04:00 BST on 4 May 2017 (Coordinated universal time in x axis)

雷达所在地 (39.81°N 、 116.47°E), 选择 500, 2500, 4500 m 3 个高度层, 计算步长为 1 h, 分析过去 24 h 的气流移动轨迹与沙尘过程的关系。从图 2 上半部分可知, 近地面高度的气溶胶来自北京的南部和西南部, 沙尘均来自于西北偏西方向的内蒙古地区, 图 2 下半部分可知 4500 m 高度的沙尘的输送来自低空和地面。

3.2 激光雷达资料结果分析

3.2.1 激光雷达气溶胶和风场观测资料综合分析

图 3、图 4 分别为 2017 年 5 月 3 日至 5 日气溶胶激光雷达反演得到的 200~5500 m 消光系数和退偏振比时空变化图。图 5、图 6 为 2017 年 5 月 3 日至 5 日的多普勒测风激光雷达测得的 40~1350 m 的水平风速和风向图。图 7 为 2017 年 5 月 3 日至 5 日的多普勒测风激光雷达测得的 40~1350 m 的垂直气流速度图, 其中正号代表垂直向下的气流, 负号代表垂直向上的气流。

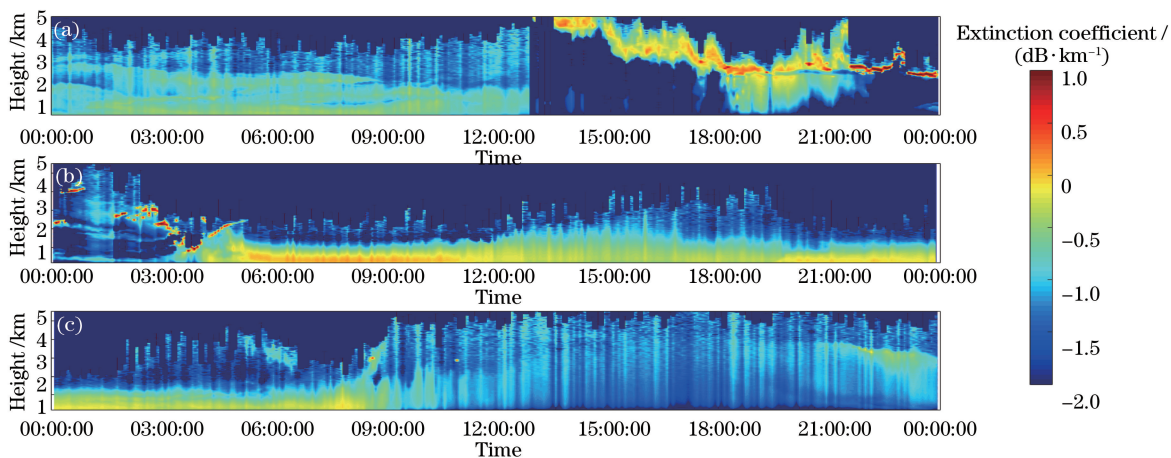


图 3 2017 年 5 月 3 日至 5 日大气气溶胶消光系数。(a) May 3, 2017; (b) May 4, 2017; (c) May 5, 2017

Fig. 3 Atmospheric aerosol extinction coefficient on May 3-5, 2017. (a) May 3, 2017; (b) May 4, 2017; (c) May 5, 2017

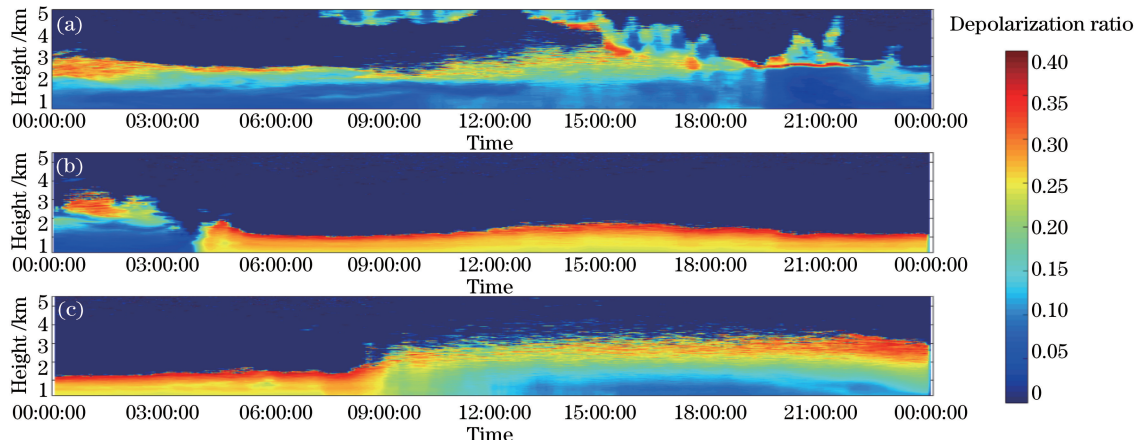


图 4 2017 年 5 月 3 日至 5 日大气气溶胶退偏振比。(a) May 3, 2017; (b) May 4, 2017; (c) May 5, 2017

Fig. 4 Atmospheric aerosol depolarization ratio on May 3-5, 2017. (a) May 3, 2017; (b) May 4, 2017; (c) May 5, 2017

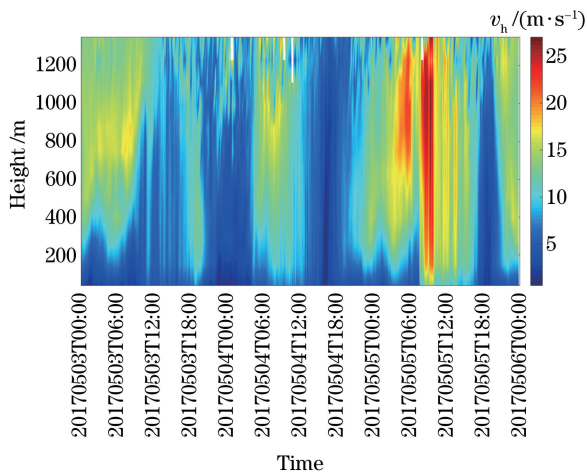


图5 2017年5月3日至5日的水平风速

Fig. 5 Horizontal wind speed on May 3-5, 2017

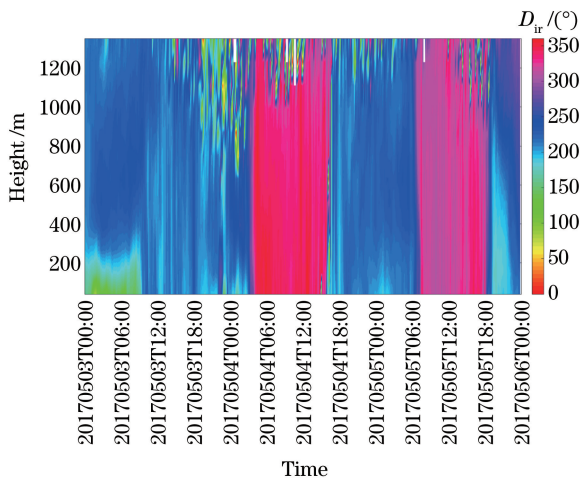


图6 2017年5月3日至5日的风向

Fig. 6 Wind direction on May 3-5, 2017

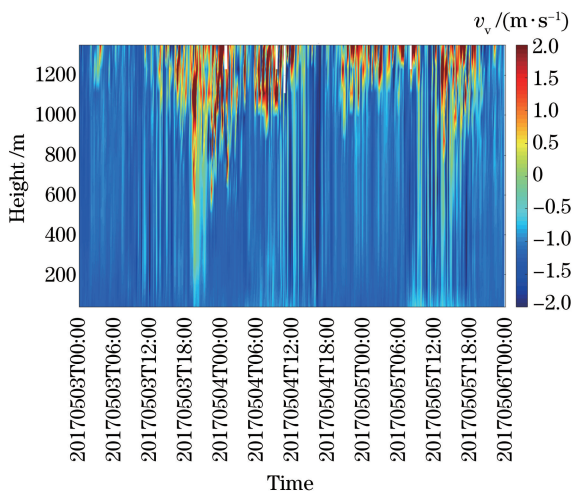


图7 2017年5月3日至5日的垂直气流速度

Fig. 7 Vertical airflow speed on May 3-5, 2017

沙尘发生的时间为5月4日4时左右,分析沙尘发生前的天气形势,结合图3(a)和图4(a)可知在

5月3日12时之前低层大气中气溶胶粒子较多,消光系数在 $10^{-1} \sim 10^{-0.5} \text{ km}^{-1}$ 之间,但是退偏振比在10%左右,说明这个阶段的气溶胶不是沙尘;由图5~7风场数据可知,在5月3日12时之前高空风速偏大,最大风速达到17.8 m/s,但是低空风速较小都在3 m/s以下,因此,低空的气溶胶较稳定,不易扩散;在5月3日12时左右高空中退偏振比约为35%,说明高空中出现了沙尘,同时水平风速整体降低到10 m/s以下,高空中出现了西北风,低空基本为西南风;5月3日12时后水平风速开始减小,高空中出现垂直向下的气流,利于沙尘从高空降落到地面;从图3(b)和图4(b)可知,在5月4日4时左右沙尘已降落到地面,此时低空风速接近于0 m/s。

沙尘发生时间段为5月4日4时至5月5日9时,结合图3(b)和图4(b)可知:5月4日4时至12时左右低空中沙尘消光系数值很高且比较稳定,这段时间沙尘高度在1 km左右,消光系数最大达到 1.38 km^{-1} ;同时退偏振比基本在25%~30%之间。从图5~7的风场数据可知,此段时间水平风向基本为西北风和北风,利于沙尘从西北方向的输送,在5月4日的12时至20时之间,低空沙尘出现了向高空的扩散的现象,但是退偏振比没有太大的变化,说明没有新的气溶胶来源;虽然该阶段水平风速较小,但是在40~1350 m整个高度层出现统一向上的垂直气流,最高达到2 m/s,导致了低空沙尘向高空扩散,这段时间沙尘高度在2 km左右。

沙尘在5月5日9时左右消失,高空和低空的水平风速迅速增大,最大超过了20 m/s,由图3(c)和图4(c)可知,0~4 km气溶胶消光系数迅速减小,同时2 km以下退偏振比减小到10%~15%左右,2 km以上高空依然较大,接近于30%,说明这个阶段是沙尘的扩散阶段,虽然风向依然是北风,但是已经没有沙尘输送。后期沙尘高度回归到1 km左右。

3.2.2 能见度观测资料分析

图8为沙尘天气发生前后期及当日的能见度数据,可知在5月3日中午之前能见度都小于8 km,这与图3(a)中12时之前消光系数较大是吻合的;12时之后消光系数变小,能见度也随之增大,最大达到了能见度仪的最大探测距离15 km;在沙尘天气发生后,大气能见度迅速降低,其中能见度在7时49分达到了最低值1.223 km。5月5日9时左右能见度迅速增大,达到了能见度仪的最远探测范围。

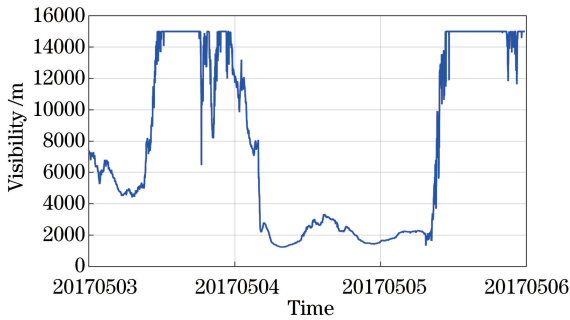


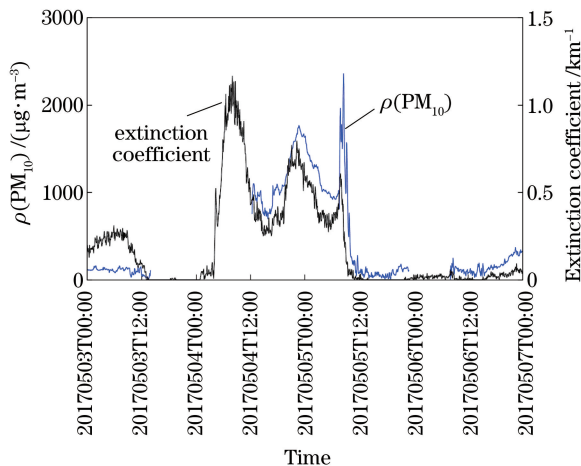
图8 2017年5月3日至5日能见度

Fig. 8 Visibility on May 3-5, 2017

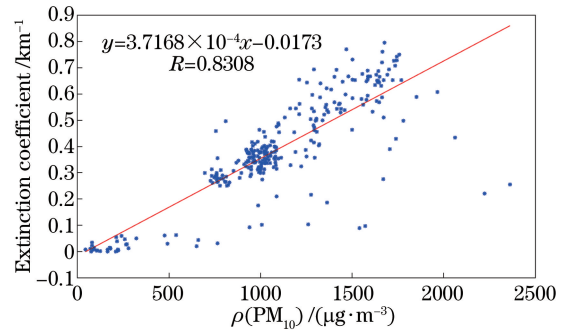
3.2.3 地面 PM₁₀ 浓度与气溶胶消光系数的对应分析

图9是沙尘天气发生前后期及当日地面 PM₁₀ 浓度[本文指 PM₁₀ 质量浓度, 即 $\rho(\text{PM}_{10})$]和激光雷达最低观测高度处(200 m)消光系数的变化, 此时激光雷达数据按照 $\rho(\text{PM}_{10})$ 的时间分辨率挑选同一时间段的数据。由图9可知, 在沙尘发生时且在 $\rho(\text{PM}_{10})$ 有数据的时间段内, 5月4日15时消光系数达到最小值 0.25 km^{-1} , $\rho(\text{PM}_{10})$ 达到最小值 $754.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。随后消光系数与 $\rho(\text{PM}_{10})$ 又开始增大, 消光系数在4日22时10分左右达到一个极值 0.8 km^{-1} , 而 $\rho(\text{PM}_{10})$ 在5月5日零时左右达到一个极值 $1767.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在5月5日9时左右消光系数与 $\rho(\text{PM}_{10})$ 都迅速减小, 表明此次沙尘天气结束。对应分析结果表明, 消光系数与 $\rho(\text{PM}_{10})$ 变化基本吻合, 消光系数越大, 地面 $\rho(\text{PM}_{10})$ 越大。

取5月4日12时20分至5月5日12时20分

图9 2017年5月3日至6日沙尘过程气溶胶激光雷达最低观测高度(200 m)处的消光系数和地面 $\rho(\text{PM}_{10})$ 的变化Fig. 9 Extinction coefficient at 200 m and concentration of PM₁₀ at land surface on May 3-6, 2017

的200 m高度的消光系数和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 进行相关性分析, 结果如图10所示, 消光系数和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 有良好的相关性, 相关系数 R 为0.8308。

图10 5月4日12时20分至5月5日12时20分气溶胶激光雷达200 m高度的消光系数和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 相关性分析Fig. 10 Correlation analysis between extinction coefficient at 200 m and mass concentration of PM₁₀ on May 4 at 12:20 to May 5 at 12:20

4 结 论

基于气溶胶激光雷达和多普勒测风激光雷达, 并综合地面气象要素等综合观测资料, 综合分析了沙尘天气的发生、发展和结束的全过程。该次沙尘过程主要是由西北偏西方向的内蒙古地区沙尘输送导致的。由气溶胶激光雷达数据可以得到沙尘的立体分布情况: 初期沙尘层高度在1 km左右, 消光系数最大达到 1.38 km^{-1} , 中期沙尘高度在2 km左右, 后期沙尘高度回归到1 km左右; 激光雷达200 m高度处的消光系数与地面 $\rho(\text{PM}_{10})$ 变化的相关系数为0.8308。多普勒激光雷达的垂直和水平风场信息与沙尘气溶胶的演变有重要的关系: 水平风速较小、高空出现垂直向下气流有利于沙尘从高空降落到地面; 当出现统一向上的垂直气流时, 低空的沙尘向高空扩散; 风速增大且无沙尘气溶胶来源时有利于沙尘消散。结合两种体制的激光雷达的数据能够更为有效地研究污染过程的分布和演变情况。

参 考 文 献

- [1] Liu Z, Zhang X J, Zhang Y F, *et al.* Spatio-temporal distribution and transport behavior of a dust event based on the CALIPSO in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12): 4315-4327.
刘贞, 张雪姣, 郑有飞, 等. 基于 CALIPSO 对中国春季一次沙尘暴的研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4315-4327.
- [2] Sun H B, Cao N W. Accuracy of value k in aerosol

- inversion optic properties based on lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 012802.
- 孙海波, 曹念文. 激光雷达反演气溶胶光学特性的 k 值准确度的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 012802.
- [3] Liu D, Qi F D, Jin C J, *et al.* Polarization lidar observation of cirrus clouds and Asian dust aerosols over Hefei [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(6): 1093-1100.
- 刘东, 戚福弟, 金传佳, 等. 合肥上空卷云和沙尘气溶胶退偏振比的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 2003, 27(6): 1093-1100.
- [4] Guo B J, Liu L, Huang D P, *et al.* Analysis of lidar measurements from a dust event[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(5): 52-57.
- 郭本军, 刘莉, 黄丹萍, 等. 激光雷达对一次沙尘天气探测与分析[J]. *气象*, 2008, 34(5): 52-57.
- [5] Huang T, Song Y, Hu W D, *et al.* Lidar detection of a sand-dust process Dalian, Liaoning, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(4): 983-988.
- 黄艇, 宋煜, 胡文东, 等. 大连地区一次沙尘过程的激光雷达观测研究[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 983-988.
- [6] Fan F, Chen Y Z, Lu J G, *et al.* Lidar detection of a sand-dust process at Beijing in spring [J]. *Research of Environment Sciences*, 2013, 26(11): 1155-1161.
- 樊播, 陈义珍, 陆建刚, 等. 北京春季强沙尘过程前后的激光雷达观测[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(11): 1155-1161.
- [7] Guo W, Bu L B, Jia X F, *et al.* Analyses on sand-dust aerosol properties with ceilometer in Beijing [J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(12): 1540-1546.
- 郭伟, 卜令兵, 贾小芳, 等. 基于激光云高仪的北京沙尘气溶胶特征分析[J]. *气象*, 2016, 42(12): 1540-1546.
- [8] Liu X M, Shao M. The analysis of ambient light extinction coefficient in summer time of Beijing city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(2): 185-189.
- 刘新民, 邵敏. 北京市夏季大气消光系数的来源分析[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 185-189.
- [9] Christine S S, George T W. Prediction of ambient light scattering using a physical model responsive to relative to humidity: Validation with measurements from detroit [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, 19(4): 669-680.
- [10] Chen S S, Xu Q S, Xu C D, *et al.* Calculation of whole atmospheric aerosol optical depth based on micro-pulse lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0701002.
- 陈莎莎, 徐青山, 徐赤东, 等. 基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0701002.
- [11] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [12] Fernald F G, Herman B M, Reagan J A. Determination of aerosol height distributions by lidar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, 11(3): 482-489.
- [13] Xia J R, Zhang L. Advances in detecting aerosols with Mie lidar[J]. *Arid Meteorology*, 2006, 24(4): 68-72, 81.
- 夏俊荣, 张镭. Mie 散射激光雷达探测大气气溶胶的进展[J]. *干旱气象*, 2006, 24(4): 68-72, 81.
- [14] Liu D. Development of polarization-Mie lidar and lidar observation of atmosphere boundary layer [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- 刘东. 偏振-米激光雷达的研制和大气边界层的激光雷达探测[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005.
- [15] Zhang N N, Han Y L, Chen T D, *et al.* Design off direct detection Doppler lidar with coherent light path [J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(10): 1010005.
- 张楠楠, 韩於利, 陈廷蒂, 等. 相干光路的直接探测多普勒激光雷达设计[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1010005.
- [16] Zhang Z G, Jiao M Y, Bi B G, *et al.* Analysis of the heavy polluting effects of sand dust weather in Beijing [J]. *Research of Environment Sciences*, 2009, 22(3): 309-314.
- 张志刚, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 沙尘天气对北京大气重污染影响特征分析[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(3): 309-314.
- [17] Cao X J, Zhang L, Zhou B, *et al.* Lidar measurement of dust aerosol radiative property over Lanzhou [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(5): 1115-1120.
- 曹贤洁, 张镭, 周碧, 等. 利用激光雷达观测兰州沙尘气溶胶辐射特性[J]. *高原气象*, 2009, 28(5): 1115-1120.