

郭伟, 卜令兵, 贾小芳, 等. 2016. 基于激光云高仪的北京沙尘气溶胶特征分析. 气象, 42(12): 1540-1546.

基于激光云高仪的北京沙尘气溶胶特征分析^{* 1}

郭 伟¹ 卜令兵² 贾小芳¹ 刘达新¹ 雷 勇¹ 陈冬冬¹ 王柏林¹

¹ 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

² 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

提 要: 利用激光云高仪对 2015 年春天北京沙尘天气过程进行连续观测, 结合常规地面气象要素、能见度和 PM₁₀ 颗粒物质量浓度变化分析了两次沙尘天气过程中浮尘、扬沙和沙尘暴三类天气现象时气溶胶后向散射系数的时空分布特征, 分析了云高仪后向散射系数与 PM₁₀ 颗粒物质量浓度的相关性。结果表明: 激光云高仪能够监测沙尘气溶胶粒子的时空变化, 扬沙和沙尘暴期间后向散射系数随高度的增加而减小, 后向散射系数在 0.005 km⁻¹ · srad⁻¹ 以上的沙尘层厚度约 500 m; 云高仪的近地面大气后向散射系数变化趋势与 PM₁₀ 颗粒物浓度变化相同, 10、50 和 100 m 高度上的后向散射系数与 PM₁₀ 颗粒物质量浓度的相关系数均在 0.82 以上。

关键词: 沙尘, 激光云高仪, 后向散射特征

中图分类号: P414, P427

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.012

Analyses on Sand-Dust Aerosol Properties with Ceilometer in Beijing

GUO Wei¹ BU Lingbing² JIA Xiaofang¹ LIU Daxin¹ LEI Yong¹

CHEN Dongdong¹ WANG Bolin¹

¹ Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

² Atmospheric Physics School, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Continuous observation was made with the help of ceilometers on the sand-dust weather processes in Beijing in the spring of 2015. By using the observation data and the conventional ground meteorological elements, visibility and the changes of PM₁₀ particulate mass concentration, this paper analyzes the spatio-temporal distribution characteristics of aerosol backscatter coefficients in the three weather phenomena of floating dust, blowing sand and dust storm during the two sand-dust weather processes. In addition, the paper conducts the correlation analysis on the backscatter coefficient of ceilometers and the PM₁₀ particulate mass concentration as well. The results indicate that ceilometers have the ability of monitoring the vertical distribution of aerosol particles. During the process of blowing sand and dust storm, backscatter coefficient decreases with the increase of height. What's more, the correlation coefficients between the backscatter coefficient and PM₁₀ particulate mass concentration at the height of 10 m, 50 m and 100 m are all above 0.82.

Key words: sand-dust, ceilometer, backscatter property

* 江苏省基础研究计划(BK20141480)、中国气象局气象关键技术与集成项目(CMAGJ2015M79)和中国气象局气象探测中心青年基金项目“基于多种观测手段的视程障碍算法改进研究”共同资助。

2015 年 11 月 12 日收稿; 2016 年 9 月 12 日收修定稿

第一作者: 郭伟, 主要从事大气探测工作. Email: cloud_aoc@163.com

引 言

沙尘天气是浮尘、扬沙和沙尘暴三种天气现象的统称,是中国西北和华北北部地区出现的灾害性天气。2008—2014 年,据地面观测记录统计北京(54511 站)共发生沙尘天气 31 d,其中浮尘 18 d、扬沙 13 d、沙尘暴 0 d,年平均发生分别为 2.57、1.86 和 0 d。2015 年春季,北京出现沙尘日 6 d,超出了近几年均值,4 月 15 日出现了近 13 年来北京遭遇的最强沙尘天气。

激光雷达作为一种主动式大气遥感探测设备,利用大气分子、气溶胶、云等对激光的散射,获取它们的光学性质、空间垂直分布等相关信息。自 20 世纪 80 年代起,国内学者开始应用激光雷达观测资料,对沙尘过程中气溶胶层进行分析。邱金桓等(1984)基于光波与气溶胶质点相互作用的弹性理论,根据红宝石激光雷达大气回波信息讨论了 1982 年 5 月上旬北京地区接连两次出现的沙暴过程的气溶胶消光系数分布特征,指出激光探测沙暴过程中的气溶胶特性是可行的,激光沙暴探测的主要缺点在于穿透能力的限制。李成才等(2004)利用微脉冲激光雷达观测数据分析了 2003 年珠江三角洲地区一次气溶胶污染过程,结果表明其最低层消光系数基本可反映气溶胶质量浓度分布。董旭辉等(2007)利用双波长偏振激光雷达观测了 2002 年 4 月 11—15 日北京沙尘暴过程,对光学强度、后向散射强度、消光系数、退偏振率、双波长信号比等雷达光谱数据进行了分析,对沙尘事件的强度、持续时间、沙尘云厚度以及沙尘天气的污染特征进行了解析和探讨。曹贤洁等(2009)将微脉冲激光雷达观测兰州地区沙尘过程时大气光学厚度与太阳光度计观测结果进行对比,结果表明两者十分接近。夏俊荣等(2011)利用位于北京以及河北香河的两台地基 Mie 散射激光雷达、星载激光雷达、太阳光度计和颗粒物监测仪等一系列仪器对发生在 2008 年 5 月底的一次沙尘事件进行立体监测。樊璠等(2013)利用双偏振双波长激光雷达、PM_{2.5}和地面气象要素等综合观测资料,分析了北京地区 2012 年一次强沙尘过程中气溶胶的时空分布特征。郭本军等(2008)、黄艇等(2010)均利用微脉冲激光雷达观测数据对当地沙尘天气过程进行过分析。

一般激光雷达对运行环境要求较高,多安装于

室内恒温环境中,不利于用于气象台站的长期天气过程监测(卜令兵等,2014)。目前,激光云高仪作为一种简易的激光雷达,其云高观测准确性、运行稳定性、环境适应性等已通过了中国气象局组织的外场测试,自 2013 年起已在北京、上海、江苏、重庆、广东、安徽、浙江、湖北八个省(市)的自动化综合示范台站开展试用,有望在全国地面气象观测业务台站中组网布设(李肖霞等,2016)。在实现云高自动观测的同时,进一步挖掘云高仪的气溶胶层观测能力,联合其他地面气象观测数据以获得多种产品,从而最大限度地发挥效益。本文利用激光云高仪观测数据,结合 PM₁₀颗粒物质量浓度、能见度以及其他地面常规气象要素对 2015 年春季两次典型沙尘过程进行分析,探索其进行沙尘探测的可行性。

1 仪器介绍

HY-CL51 型激光云高仪是后向散射激光雷达的一种,探测的主要产品为云底高、云的层次和积分云量,在无法给出云高信息时输出垂直能见度。其采用半导体脉冲激光器,发射出的激光与大气中的大气分子、气溶胶、水汽等相互作用,后向散射信号被雷达接收系统接收,得到不同高度后向散射回波强度,反演出后向散射系数和消光系数,进而判断云和气溶胶存在位置及厚度。HY-CL51 型激光云高仪的主要参数见表 1,其回波强度遵循激光雷达方程(Fernald,1984)

$$P_r(z) = E_0 \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{A}{z^2} \cdot \beta(z) \cdot e^{-2 \int_0^z \sigma(z') dz'}$$

式中, $P_r(z)$ 是距离 z 处接收到的信号强度; E_0 是激光脉冲输出能量; c 为光的速度; A 为接受机孔径; $\beta(z)$ 是距离 z 处的后向散射系数; σ 为大气消光系数。该方程有 β 和 σ 两个未知量。经典的大气气溶胶反演算法有 Collis 斜率法、Fernald 和 Klett 算法等,Klett 算法更适用于分子散射忽略不计的浑浊大气(Klett,1981)。假设 $\beta(z) = k \cdot \sigma(z)$, k 是经验系数,在不同的天气下有比较宽的变动范围,非高湿情况下一般取 0.03 srad^{-1} ,只要确定了边界条件,就可计算出后向散射系数分布(Vaisala Oyj Corporation,2012)。

该仪器被安装于北京南郊观象台观测场东北侧,距自动气象站、能见度自动观测仪等约 170 m,距 PM₁₀观测仪器 180 m 左右,仪器 24 h 全天候开

机,采用垂直观测方式获取大气后向散射回波信息,数据输出频率为每分钟 1 次。

表 1 HY-CL51 激光云高仪的主要参数
Table 1 Main parameters of HY-CL51

项目	参数
激光波长	在 25 °C 时, 910 ± 10 nm
重复频率	6.5 kHz
能量	$3.0 \mu\text{Ws} \pm 20\%$
发散角	$(\pm 0.15 \text{ mrad}) \times (\pm 0.25 \text{ mrad})$
接收器视场角	0.4 mrad
探测距离	0~15 km
垂直分辨率	10 m
有效透镜直径	148 mm

2 分析方法和资料选取

根据北京南郊观象台(54511 站)地面气象观测记录,2015 年春季共出现浮尘 1 次、扬沙 4 次和沙尘暴 1 次,分别发生在 3 月 28 日、4 月 15—16 日和 4 月 21 日。本文选取 3 月 28 日(扬沙)和 4 月 15—16 日(浮尘—沙尘暴—扬沙)两次典型天气过程,分析激光云高仪后向散射系数、 PM_{10} 颗粒物质量浓度和地面观测气温、气压、相对湿度、风速和能见度等随时间的变化情况,开展后向散射系数与 PM_{10} 颗粒物浓度的相关性分析。本研究中使用的地面气象要素和能见度资料为中国气象局业务观测数据,地面气象要素为自动站观测分钟数据, PM_{10} 质量浓度资料为 5 min 平均数据。由于两次天气过程影响范围遍及整个北京及周边地区,南郊观象台未安装粒径谱测量仪器,选取上甸子站(54421 站)安装的环境颗粒物检测仪 Grimm180 的观测数据进行分析,该仪器有 31 个通道,可探测粒径范围为 0.25~32 μm ,测量数据可用于分析扬沙天气过程的颗粒物粒径谱。

3 沙尘过程分析

3.1 扬沙天气过程分析

3.1.1 地面要素变化

人工观测天气现象记录显示,2015 年 3 月 28 日 10:03—15:11 为一次典型的扬沙天气过程。从地面常规气象要素时间变化(图 1)可以看出,06:00 之前观测站区域的温度、气压、风速和大气水平能见

度均随时间变化而减小,能见度在 10 km 以下,相对湿度随时间变化持续升高但不高于 70%,人工观测记录表明该段时间天气现象为霾。06:00 之后风速加大,在 06:40 出现极大值 $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度迅速下降到 25% 左右,而温度升高了 6°C ,气压变化不明显,由此可判断,06:00—07:00 由于风速增大,观测站上空大气的霾消散,地面大气能见度转好;07:00—08:00 风速略小,气压略有增大,水平能见度继续变好;08:00 之后,风力持续在 3~4 级,水平能见度在 09:10 左右达到最大 14 km,气压也出现极大值 1009.5 hPa,之后水平能见度和气压均呈下降趋势,12:00 左右水平能见度出现极低值 2.6 km;12:00 之后,水平能见度逐渐增大,天气逐渐变好。

扬沙天气发生过程中,相对湿度一直持续在 25% 左右,温度在 21°C 左右,气压在扬沙开始之前略有升高,之后持续降低直至扬沙过程结束才略有回升,气压、温度和相对湿度这三要素的变化均不显著。

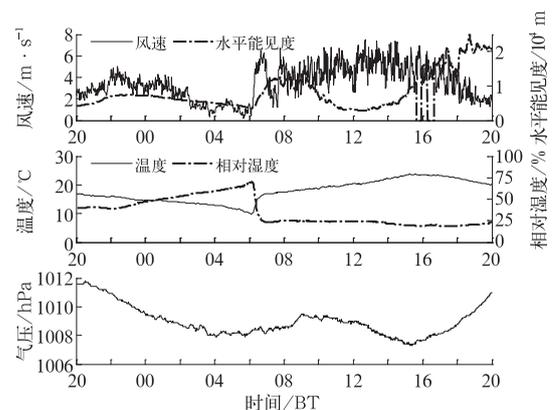


图 1 2015 年 3 月 28 日北京南郊观象台地面常规气象要素随时间的变化

Fig. 1 Variation of wind speed, horizontal visibility, temperature, RH and pressure recorded by the Beijing Southern Suburb Observatory on 28 March 2015

3.1.2 PM_{10} 颗粒物质量浓度变化

从 3 月 28 日 PM_{10} 颗粒物质量浓度的时间变化(图 2)可见,06:20 之前观测站上空 PM_{10} 颗粒物浓度较为稳定,在 $130 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右;06:25—06:30 出现负值,表示仪器缺测;06:30—09:30, PM_{10} 颗粒物浓度在 $140 \sim 400 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围出现较大幅度的波动,由气象要素变化时序可知,这是由于观测站上

空风速变大,空气流动造成 PM_{10} 颗粒物浓度发生变化;09:40—12:25, PM_{10} 颗粒物浓度持续增加并达到最大值 $1432.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;12:30—17:00 持续下降,17:00 之后稳定在 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,沙尘天气结束。10:05—15:10 时段内 PM_{10} 颗粒物浓度在 $400 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上。

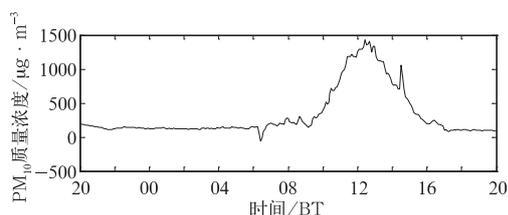


图 2 2015 年 3 月 28 日北京南郊观象台 PM_{10} 颗粒物质量浓度随时间的变化

Fig. 2 Variation of PM_{10} mass concentration at the Beijing Southern Suburb Observatory on 28 March 2015

3.1.3 后向散射系数时空变化

3 月 28 日激光云高仪后向散射系数变化如图 3 和图 4。10:00—15:00 扬沙发生时段内,沙尘气溶胶层位于近地面高度上,大气后向散射系数随高度的增加而减小。在 06:00 之前,近地面层(100 m 以下)气溶胶层后向散射系数较小,在 $0.004 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 左右,06:00—09:30,后向散射系数出现较大幅度的波动,这是由于观测站上空风速变大,空气流动造成气溶胶浓度等发生变化;09:30—12:00 左右,后向散射系数持续增加并达到最大值 $0.013 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$;12:30—17:00 持续下降,17:00 之后稳定在 $0.0013 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 左右,沙尘天气结束。散射系数在 $0.005 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 以上的沙尘层厚度约 500 m。

值得关注的是,03:20—06:00 时段,台站地面观测天气现象记录该时段天气现象为霾,没有出现

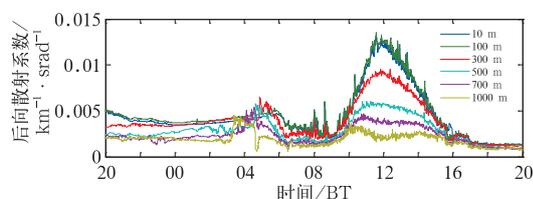


图 3 2015 年 3 月 28 日北京南郊观象台不同高度上后向散射系数随时间的变化

Fig. 3 Variation of CL51 backscatter coefficient at different heights on 28 March 2015

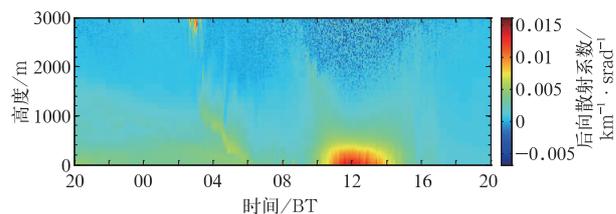


图 4 2015 年 3 月 28 日北京南郊观象台激光云高仪后向散射系数廓线随时间的变化

Fig. 4 Variation of CL51 backscatter profile, on 28 March 2015

沙尘天气现象。由图 3 可见,在该时段的大气不同高度上后向散射系数均随时间变化出现较大波动,观测高度越低,后向散射系数峰值出现时间越晚;由图 4 可见,该时间段内后向散射系数廓线出现随高度的变化先递增后递减的垂直变化特征,且峰值出现高度随着时间的推移而降低,可能出现了水汽或气溶胶层的沉降。由图 1 可知,该时段地面温度随时间逐渐减小,而相对湿度逐渐升高,风速在 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,有利于水汽或者浮尘等的沉降,这与水平能见度随时间而降低的变化趋势是一致的。该时段 10 m 高度上后向散射系数随时间推移略有增大,然而 PM_{10} 浓度并未出现明显变化,该气溶胶层的性质还需其他资料进行分析。

综合分析,3 月 28 日的扬沙过程中,北京南郊观象台上空大气 PM_{10} 颗粒物浓度主要受风的影响。从时间上看,水平能见度与 PM_{10} 颗粒物浓度变化趋势相反,而云高仪的近地面大气后向散射系数变化趋势与 PM_{10} 颗粒物浓度变化相同。

3.2 浮尘—沙尘暴—扬沙天气过程分析

3.2.1 地面要素变化

台站地面天气现象观测记录表明,4 月 15 日 14:30 之前天气现象为霾,14:31—18:15 为浮尘,18:15—18:44 为沙尘暴,18:44 至 4 月 16 日夜间为扬沙天气。由 4 月 15—16 日地面常规气象要素时间变化(图 5)可见,4 月 15 日 14:30 前后地面自动站观测的温度、湿度、风速和水平能见度并无明显跳变;17:00 之前气压持续降低而气温持续升高,17:01 气压出现最低值 990.2 hPa 之后迅速增大而气温开始下降;17:20 之后风速增大,18:15 前后水平能见度明显降低,18:25 能见度出现最低值 966 m ;19:00 风速继续增大,水平能见度增大到 1.0 km 以上,沙尘暴转为扬沙天气,至 4 月 16 日

02:00,水平能见度升高到 10.0 km 以上,扬沙天气结束。

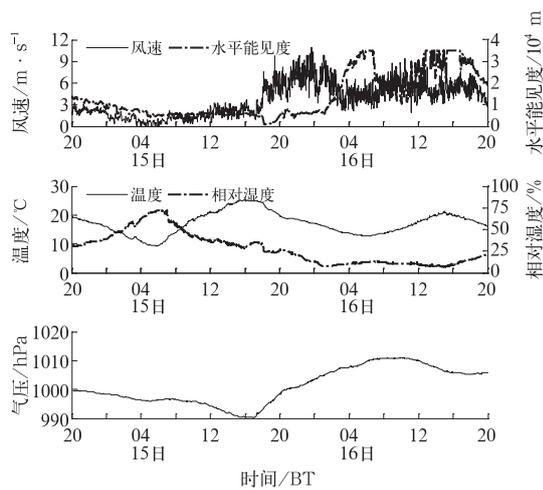


图5 同图1,但为4月15—16日

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for the period of 15—16 April 2015

4月15—16日沙尘天气持续过程中,相对湿度较低,均在35%以下;从常规地面气象要素变化来看,浮尘现象与霾并无显著差异;在沙尘暴开始之前,有一个明显的气压升高、气温降低的过程,为风速的急速增大提供了必要的动力条件。

3.2.2 PM₁₀颗粒物质量浓度变化

分析4月15—16日PM₁₀颗粒物质量浓度时间变化(图6)可见,14:30前后PM₁₀颗粒物质量浓度并无较大变化,稳定在150~200 μg·m⁻³,直到18:05才升至412.8 μg·m⁻³,18:10开始猛增,18:25达到最大值4494.4 μg·m⁻³,18:45 PM₁₀颗粒物质量浓度降到3705.3 μg·m⁻³,16日01:55降至400 μg·m⁻³以下,沙尘天气结束。15日18:20—18:45,PM₁₀颗粒物浓度均大于3700 μg·m⁻³,至16日01:50时段内PM₁₀颗粒物浓度在400 μg·m⁻³以上,这与地面观测记录的沙尘暴和扬沙

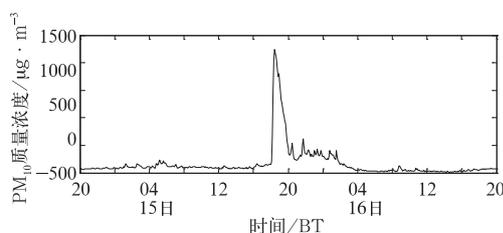


图6 同图2,但为4月15—16日

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the period of 15—16 April 2015

天气时段现象发生时间基本一致。浮尘天气过程中PM₁₀颗粒物质量浓度与霾天气条件下无太大差异,但明显低于扬沙和沙尘暴天气情况。

3.2.3 后向散射系数时空变化

4月15—16日激光云高仪后向散射系数变化如图7和图8。14:30前后低层大气(100 m以下)后向散射系数并无较大变化,在0.0035~0.004 km⁻¹·srad⁻¹左右,直至18:05才升至0.007 km⁻¹·srad⁻¹,18:12猛增至0.03 km⁻¹·srad⁻¹以上,18:21达到最大值0.0313 km⁻¹·srad⁻¹,18:44降至0.025 km⁻¹·srad⁻¹以下,沙尘暴减弱为扬沙天气,16日01:50之后降至0.003 km⁻¹·srad⁻¹以下,扬沙天气结束。

浮尘天气出现时,台站上空低层大气(100 m以下)后向散射系数<0.005 km⁻¹·srad⁻¹,与霾天气条件下时无太大差异;扬沙天气下,低层大气后向散射系数在0.005~0.025 km⁻¹·srad⁻¹;沙尘暴天气出现时,低层大气后向散射系数>0.025 km⁻¹·srad⁻¹。扬沙和沙尘暴天气过程中,近地面层大气的后向散射系数随高度的增加而减小,后向散射系数在0.005 km⁻¹·srad⁻¹以上的沙尘层厚度约450 m。

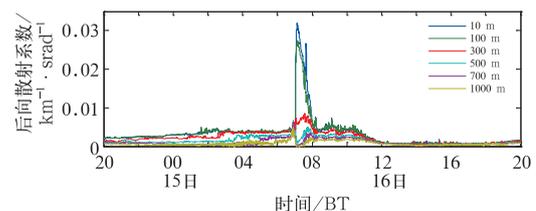


图7 同图3,但为4月15—16日

Fig. 7 Same as Fig. 3, but for the period of 15—16 April 2015

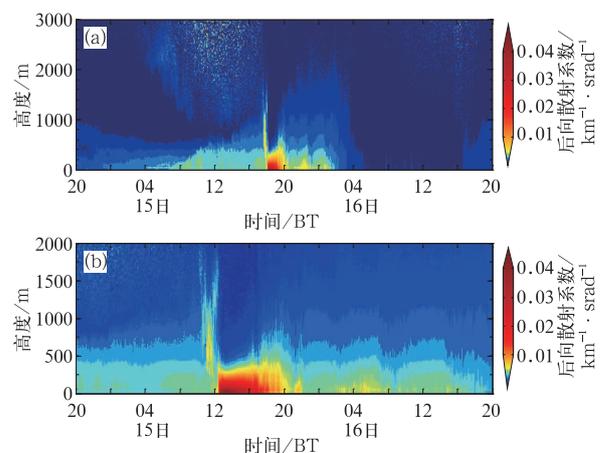


图8 同图4,但为4月15—16日,(b)为(a)局部放大

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for the period of 15—16 April 2015, Fig. b is local enlarged of Fig. a

由图 8b 可见,在本次天气过程中,后向散射系数呈现随高度增加而减小的趋势,然而在 17:38—18:00 在 250~1500 m 左右出现气溶胶后向散射系数较大区域,且峰值出现高度随时间的推移而下降,初步推断该段时间为沙尘暴前的落尘过程,4 月 15—16 日的沙尘天气是 17:38 由高空风输送而来,并与 18:00 左右降落地面,形成沙尘暴及扬沙天气。

3.3 后向散射系数与 PM₁₀ 颗粒物质量浓度相关性分析

研究取 3 月 27 日 20:01 至 28 日 20:00 和 4 月 14 日 20:01 至 16 日 20:00 的 10、50 和 100 m 高度后向散射系数与 PM₁₀ 颗粒物浓度进行相关性分析,结果如图 9,两次沙尘天气过程前后,近地面三个高度上两者相关性都大于 0.82,100 m 高度上相关性略低于 10 和 50 m 高度,10 和 50 m 高度上两者相关性差异不大。

3.4 扬沙过程的粒径谱分析

根据上甸子站地面气象观测记录,3 月 28 日扬沙天气过程的最小能见度为 2352 m,发生在 11:15。选取扬沙开始时刻 10:40,最小能见度时刻 11:15,

结束时刻 13:40 以及沙尘过程开始前 1 h 和结束后 2 h 粒径密度谱进行分析。由图 10 可见,选取的五个观测时次的气溶胶颗粒物数浓度最大值均出现在粒径区间 0.25~0.28 μm,数浓度随粒径的增大递减。08:00 时,水平能见度 6864 m,相对湿度 48%,2 min 平均风速为 1.7 m·s⁻¹,天气现象为霾,其气溶胶粒子直径集中在 <0.5 μm 部分;10:40,扬沙天气开始,直径 <0.5 μm 粒子数浓度减小,>0.5 μm 粒子数浓度增大;11:15 时,直径 <0.5 μm 粒子数浓度继续减小,>0.5 μm 粒子数浓度继续增大,水平能见度达到最低值;13:40,大风将气溶胶粒子带走,各区间直径大小的粒子数浓度均降低,空气质量转好,扬沙天气结束;16:00 时水平能见度 30 km,相对湿度 20%,其气溶胶粒子直径集中在 <0.5 μm 部分,数浓度比 08:00 霾时低许多。由图 10 可见,北京地区春季有扬沙天气发生时,大气中颗粒物主要是 >0.5 μm 的气溶胶粒子急剧增加,0.5~1 μm 之间的气溶胶粒子数浓度变化尤为显著。牛生杰等(2001)分析的贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布及王振海等(2010)、刘瑞金(2011)对兰州为代表的半干旱地区的粒径谱分析,均认为沙尘过程中增加的主要为 >1 μm 的颗粒物,本研究结果有较大不同,

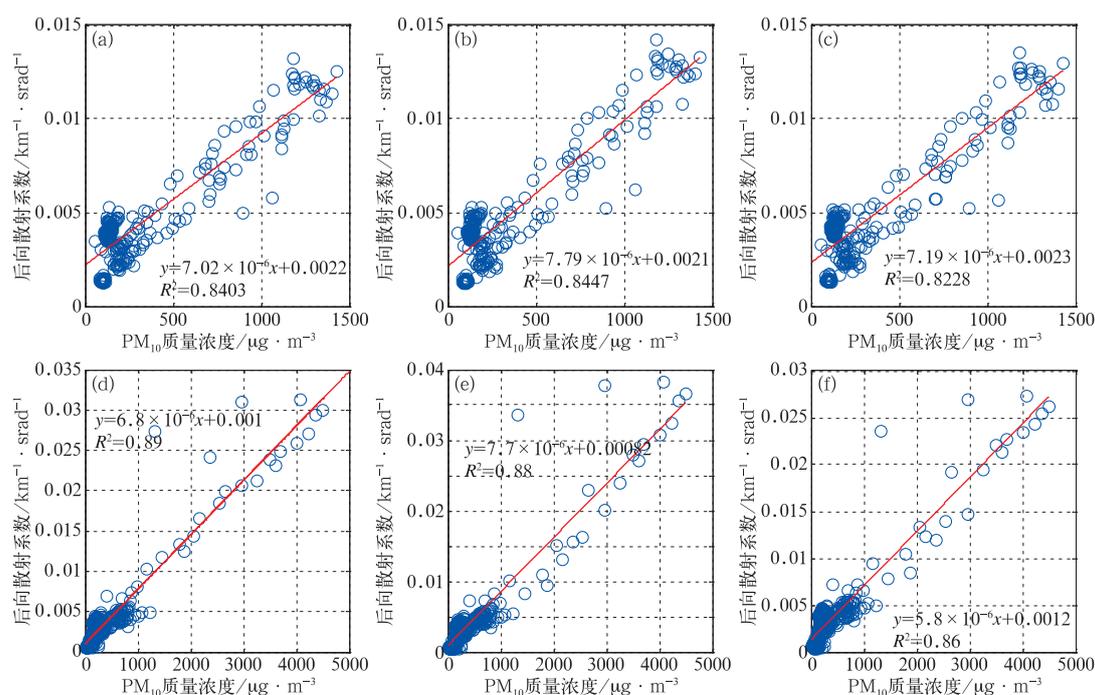


图 9 2015 年 3 月 27 日 20:01 至 28 日 20:00 (a, b, c) 和 4 月 14 日 20:01 至 16 日 20:00 (d, e, f) 北京南郊观象台 10 m (a, d)、50 m (b, e) 和 100 m (c, f) 高度后向散射系数与 PM₁₀ 颗粒物浓度相关性分析

Fig. 9 Correlation analysis between the backscattering coefficient and PM₁₀ particle concentration at 10 m (a, d), 50 m (b, e) and 100 m (c, f) heights from 20:01 BT 27 to 20:00 BT 28 March (a, b, c) and from 20:01 BT 14 to 20:00 BT 16 April (d, e, f) 2015

主要考虑是兰州和贺兰山区为沙尘源区,而北京地区的沙尘气溶胶自西北经高空输送而来(尹晓惠等,2007;张志刚等,2007;张亚妮等,2013),大直径的颗粒物在长途输运过程中减少而小直径粒子颗粒物增加使得沙尘气溶胶粗、细粒子的组成发生改变。

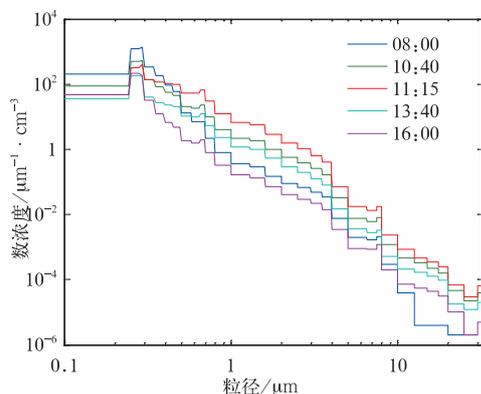


图 10 2015 年 3 月 28 日扬沙天气现象发生前、过程中和结束后的粒径谱密度变化
Fig. 10 Variation of particle size distribution before, during and after the dust weather on 28 March 2015

4 结论与讨论

利用激光云高仪对 2015 年春季北京沙尘天气过程进行连续观测,通过分析两次沙尘天气过程中常规地面气象要素、能见度和 PM_{10} 颗粒物质量浓度发展变化特征,浮尘、扬沙和沙尘暴三类天气现象时气溶胶后向散射系数的时空分布特征,分析云高仪后向散射系数与 PM_{10} 颗粒物质量浓度的相关性,得到以下结论:

(1) 北京南郊观象台上空大气 PM_{10} 颗粒物浓度主要受风的影响。从时间上看,水平能见度与 PM_{10} 颗粒物浓度变化趋势相反,而云高仪的近地面大气后向散射系数变化趋势与 PM_{10} 颗粒物浓度变化相同。

(2) 扬沙发生时段内,台站上空大气气溶胶层 PM_{10} 颗粒物浓度在 $400 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,后向散射系数在 $0.005 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 以上;沙尘暴期间,台站上空大气气溶胶层 PM_{10} 颗粒物浓度均大于 $3700 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,后向散射系数在 $0.025 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 以上;浮尘期间, PM_{10} 颗粒物浓度与后向散射系数与浮尘发生前相比变化均不明显。

(3) 激光云高仪能够监测气溶胶粒子的垂直分布与沙尘层厚度。2015 年春季北京两次沙尘天气过程中,后向散射系数均随高度的增加而减小,后向

散射系数在 $0.005 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 以上的沙尘层厚度约 500 m。

(4) 两次沙尘天气过程及前后,近地面 10、50 和 100 m 三个高度上向散射系数与 PM_{10} 颗粒物浓度两者相关性 >0.82 ,100 m 高度上相关性略低于 10 和 50 m 高度,10 和 50 m 高度上两者相关性差异不大。

(5) 通过粒径谱分析表明,扬沙天气发生时,大气中急剧增加的气溶胶粒子主要为 $>0.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物。

参考文献

- 卜令兵,袁静,高爱臻,等.2014.基于激光云高仪的雾霾过程探测.光子学报,43(9):58-63.
- 曹贤洁,张镭,周碧,等.2009.利用激光雷达观测兰州沙尘气溶胶辐射特性.高原气象,28(5):1115-1120.
- 董旭辉,祁辉,任立军,等.2007.偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析.环境科学研究,20(2):106-111.
- 樊璠,陈义珍,陆建刚,等.2013.北京春季强沙尘过程前后的激光雷达观测.环境科学研究,26(11):1155-1161.
- 郭本军,刘莉,黄丹萍,等.2008.激光雷达对一次沙尘天气探测与分析.气象,34(5):52-57.
- 黄艇,宋煜,胡文东,等.2010.大连地区一次沙尘过程的激光雷达观测研究.中国沙漠,30(4):983-988.
- 李成才,刘启汉,毛节泰,等.2004.利用 MODIS 卫星和激光雷达遥感资料研究香港地区的一次大气气溶胶污染.应用气象学报,15(6):641-650.
- 李肖霞,王柏林,郭伟,等.2016.激光云高仪试验数据对比分析.气象,42(6):764-769.
- 刘瑞金.2011.半干旱区卷云和沙尘气溶胶激光雷达观测.兰州:兰州大学硕士学位论文,44.
- 牛生杰,章澄昌,孙继明,等.2001.贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究.大气科学,25(2):243-252.
- 邱金桓,赵燕曾,汪宏七.1984.激光探测沙尘过程中的气溶胶消光系数分布.大气科学,8(2):205-210.
- 王振海,张武,史晋森,等.2010.半干旱地区大气颗粒物浓度及粒径谱特征的观测研究.中国沙漠,30(5):1186-1193.
- 夏俊荣,王普才,宗雪梅,等.2011.利用激光雷达太阳光度计等多种遥感手段立体监测一次沙尘事件.中国环境监测,27(6):74-80.
- 尹晓惠,时少英,张明英,等.2007.北京沙尘天气的变化特征及其沙尘源地分析.高原气象,26(5):1039-1044.
- 张亚妮,张碧辉,宗志平,等.2013.影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析.气象,39(7):911-922.
- 张志刚,高庆先,矫梅燕,等.2007.影响北京地区沙尘天气的源地和传输路径分析.环境科学研究,20(4):21-27.
- Fernald F G. 1984. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments. Appl Opt,23(5):652-653.
- Klett J D. 1981. Analytical inversion solution for processing lidar returns. Appl Opt,20(2):211-220.
- Vaisala Oyj Corporation. 2012. Vaisala ceilometer CL51 user's guide. Vaisala Oyj:45-47.