

doi:10.3788/gzxb20144309.0901002

## 基于激光云高仪的雾霾过程探测

卜令兵<sup>1</sup>, 袁静<sup>1</sup>, 高爱臻<sup>1</sup>, 雷勇<sup>2</sup>, 郭伟<sup>2</sup>, 邰海阳<sup>1</sup>, 黄兴友<sup>1</sup>

(1 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

(2 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:** 利用激光云高仪数据资料, 得出气溶胶后向散射系数时序图、消光系数廓线图以及能见度, 结合探空资料、自动气象站数据以及能见度仪数据, 综合分析了雾霾天气过程。结果表明: 雾霾天气的出现受气象要素的影响较大, 静、小风有利于霾的出现, 较高的相对湿度有利于雾霾共存, 并且对能见度产生较大影响; 雾后向散射强度较大, 后向散射系数在垂直方向变化率大, 出现高度较低; 霾后向散射强度较小, 霾空间分布均匀, 后向散射系数垂直变化小, 出现高度较高。利用激光云高仪数据反演水平能见度和垂直能见度, 所得水平能见度与能见度仪所测能见度基本一致。垂直能见度与相对湿度日变化趋势大致相反, 与风速日变化趋势基本一致; 分析雾和霾天气下后向散射系数随时间变化特征发现, 雾霾天气下傅里叶变换的功率谱分布, 与雾和霾的边界特征相对应。

**关键词:** 雾霾; 激光云高仪; 后向散射系数

中图分类号: P412.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0901002-6

## Analysis of Haze-fog Events Based on Laser Ceilometer

BU Ling-bing<sup>1</sup>, YUAN Jing<sup>1</sup>, GAO Ai-zhen<sup>1</sup>, LEI Yong<sup>2</sup>, GUO Wei<sup>2</sup>,  
GAO Hai-yang<sup>1</sup>, HUANG Xing-you<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration,  
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

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

**Abstract:** To investigate the optical characteristics of haze-fog, sequence diagram of backscattering coefficient, profiles of extinction coefficient, visibility were retrieved from data of laser ceilometer. Combining data from sounding, automatic meteorological station and visibility sensor, analyses of haze-fog process were performed. The results show that the occurrence of haze-fog is strongly influenced by meteorological elements, static, small wind is benefit to the emergence of the haze, while higher relative humidity which has great influence on visibility often leads to coexist of haze and fog. The fog which often occurs in low altitude has stronger backscattering, large vertical rate of change, while haze often has weaker backscattering, smaller vertical rate of change and larger span in vertical direction; The variation of backscattering coefficient in the fog and haze were analyzed, both horizontal visibility and vertical visibility were obtained from data of ceilometer. The horizontal visibility was consistent with visibility from visibility sensor, and the variation of vertical visibility had opposite trends with relative humidity while has the same trends with wind speed. By analyzing variation of backscattering coefficient with time, the Fourier transform power spectral distribution was obtained, this distribution was corresponding with the border characteristics of fog and haze.

**Key words:** Haze-fog; Laser ceilometer; Backscattering coefficient

**OCIS Codes:** 010.1350; 010.7295; 140.3538

基金项目: 江苏省自然科学基金(No. BK20141480)和国家自然科学基金(No. 41304124)资助

第一作者: 卜令兵(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光大气探测. Email: lingbingpu@gmail.com

收稿日期: 2014-01-14; 录用日期: 2014-03-25

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

霾是一种大气光学现象,气象学上定义为排除降水、大风、沙尘暴、扬沙等其他导致低能见度事件情况下,日均能见度小于 10 km,日均相对湿度小于 90% 时出现的天气现象<sup>[1]</sup>. 雾和霾主要区别是相对湿度的大小,相对湿度达到 90% 以上的叫雾,相对湿度低于 80% 的叫霾. 80%~90% 之间,是雾和霾的混合物,但主要成分是霾. 雾和霾往往相伴而生,霾天气时主要污染源为 PM<sub>2.5</sub> (细颗粒物), PM<sub>2.5</sub> 的特点是表面积大,容易吸附有害化学物质,悬浮时间长,能够造成长时间大范围的环境污染. 而雾的存在会降低空气透明度,使能见度恶化. 雾霾对人类的影响主要有两个方面:一方面,霾天气时细颗粒物通过呼吸系统被吸入沉积到肺泡,甚至通过肺换气达到其他器官,从而直接影响人类健康<sup>[2]</sup>;另一方面,雾霾天气导致大气能见度低下,甚至使交通中断,困扰居民的生产、生活和交通. 研究表明,近年来霾天气次数成增加趋势,根据中国气象局发布数据,2013 年全国平均霾天气日数为 4.2 日,达到 52 年来最高<sup>[3]</sup>.

由于雾霾天气的不利影响,对雾霾天气的研究成为近年来的研究热门之一,激光遥感是研究雾霾天气的重要手段之一. 贺千山等基于微脉冲激光雷达对云和气溶胶的光学属性进行连续自动观测,得到气溶胶的光学特性及变化规律<sup>[4]</sup>. 刘诚等用微脉冲激光雷达对对流层气溶胶进行测量和分析,给出了气溶胶消光系数的垂直分布以及大气边界层高度,利用微脉冲激光雷达实现了对大气气溶胶的有效测量<sup>[5]</sup>. 黄建平等人利用激光雷达观测资料分析了我国北方大部分地区的强沙尘暴过程,研究了沙尘气溶胶的间接辐射效应<sup>[6]</sup>. 上述对气溶胶的激光探测使用的都是大口径微脉冲激光雷达 (Micro Pulse Lidar, MPL), 该激光雷达系统造价较为昂贵,国内仅有少数几家单位拥有,而且激光雷达探测区域小,对于雾霾这种大尺度天气现象的探测极为不利. 激光云高仪是一种简易的激光雷达 (主要表现在激光发射功率和接收口径上), 是自动化观测的备选仪器之一,已经通过中国气象局组织的业务化考核,有望组网观测. 一般来说,激光云高仪对气溶胶的探测能力弱于 MPL,但对于雾霾天气,大气中的颗粒物散射剧增,激光云高仪能够获得足够的信噪比用于雾霾的观测.

本文基于激光云高仪数据对雾霾天气个例进行分析,获得雾霾过程中光学特性,验证使用激光云高仪进行雾霾探测的可行性. 有助于激光云高仪对大尺度范围内雾霾天气的联网观测,同时也为激光云高仪增加了新的数据输出产品.

## 1 仪器介绍

激光云高仪是基于激光雷达原理的云自动化观测设备,设备垂直向上发射波长为 910 nm 的脉冲激光. 大气中的气溶胶、水汽、大气分子与激光相互作用并将部分激光后向散射. 散射光由接收系统接收、转化成光电流并记录不同高度的后向散射强度. 根据激光雷达方程,激光雷达系统接收到的不同高度的信号强度表示为<sup>[7-8]</sup>

$$P_r(z) = E_0 \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{A}{z^2} \cdot \beta(z) \cdot e^{-2 \int_0^z \sigma(z') dz'} \quad (1)$$

式中,  $P_r(z)$  是从距离  $z$  处接收到的瞬时信号强度;  $E_0$  为有效的激光能量;  $c$  表示光的速度;  $A$  为接收机孔径;  $z$  表示距离;  $\beta(z)$  是距离  $z$  处的某气团后散射系数;  $e^{-2 \int_0^z \sigma(z') dz'}$  双程大气透射度,代表在不同探测高度处,地面到探测高度之间大气的衰减.

式(1)中有两个未知数,若设  $\beta(z) = k \cdot \sigma(z)$ , 方程中未知数变为一个,由 Klett 法则可以得到不同高度处的后向散射系数和消光系数, Klett 法则适用于分子散射可以忽略不计的浑浊大气<sup>[9]</sup>. 根据后向散射系数可以得到云高和云的层状结构,对一段时间内的云高信息进行加权平均则可以得到云量信息<sup>[10]</sup>. 图 1 为激光云高仪实测后向散射系数曲线,该图显示在 1.2 km 处有一层云,云厚为 0.3 km,在高于 1.5 km 的地方由于云较强的衰减所得的后向散射系数廓线出现了明显震荡,在低于 1.5 km 以下的地方,云高仪信号信噪比高,反应了边界层气溶胶信息,因此可以用激光云高仪数据研究边界层气溶胶或者雾霾现象.

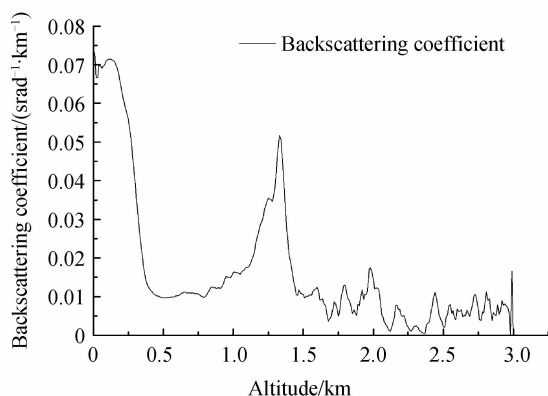


图 1 激光云高仪实测的后向散射系数曲线

Fig. 1 Curve of backscatter coefficient measured by Laser ceilometer

## 2 雾霾产生原因

### 2.1 高空风场分析

2013 年 1 月 13 至 16 日南京地区发生雾霾天气过程,取得高空风时间剖面如图 2. 分析发现 13 至 16 日南京地区高空基本处于西风气流中,自 14 日 08 时

(00Z UTC)起,在 700 hpa~500 hpa 之间,高空风明显减小,风向由西北风逐渐转为西南风,而在 700 hpa 以下为东风和东南风,所以在 700~500 hpa 之间存在垂直风切变,高空和低层大气风向不一致,为分层大气,尤其在 14 日到 15 日凌晨,分层现象显著,这段时间内,风向随高度逆转,有冷平流,空气下沉. 15 日 20 时 (12Z UTC)以后,700~500 hpa 风速开始增大,850~500 hpa 垂直风切变基本消失,雾霾也逐渐消散. 对同年同月 23 至 26 日的另外一次雾霾过程中高空风场进行分析,结论基本类似,风速基本小于 10 m/s,在 700~500 hpa 出现层状风,高空和低层大气风向不一致,不利于垂直方向空气交换,有利于雾霾产生<sup>[11]</sup>.

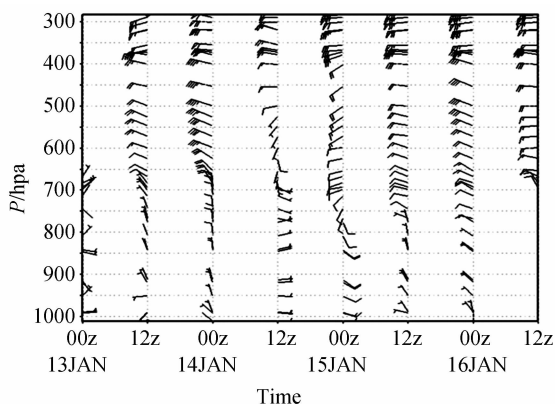


图 2 2013 年 1 月 13 至 16 日南京高空风时间剖面图  
Fig. 2 Variation of wind profiles above Nanjing from January 13 to 16, 2013

## 2.2 地面要素分析

图 3 是根据自动气象站和能见度仪数据资料得到的雾霾发生过程中的气象要素图,这里主要给出相对湿度、风速以及水平能见度的日变化趋势. 以 13~15 日发生的雾霾过程为例,13 日 8:00-23:00 左右相对湿度都处于 50%~80% 之间,能见度在 1 km 至 5.5 km 内变化,此时处于轻微霾天气. 14 日凌晨至 14:00 左

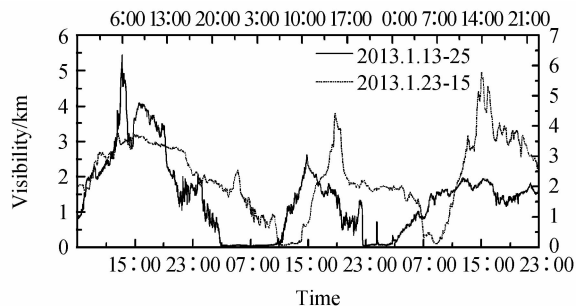
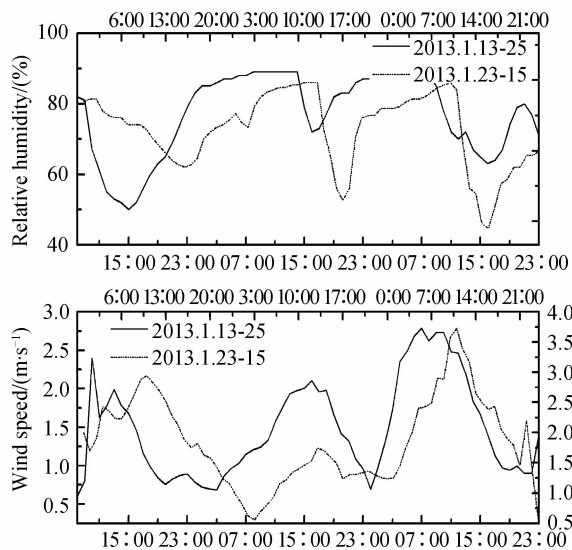


图 3 相对湿度、风速与水平能见度的日变化图

Fig. 3 Diurnal changes of relative humidity, wind speed and visibility

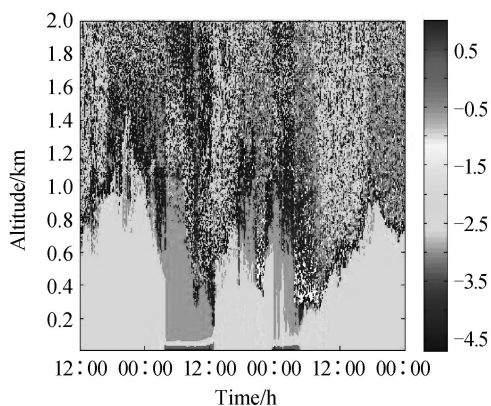
右相对湿度持续在 90% 左右,风速保持在软风级别,并且能见度不足 1 km,为雾天气. 随后,从 15:00 到 15 日的 8:00 相对湿度处于 80%~90% 之间,能见度一直低于 3 km,为一次典型的雾霾混合天气. 在 15 日 8:00 日出之后,相对湿度开始减小,维持在 60%~75% 之间,风速由无风增大到轻风,能见度由 1 km 以下增至 2 km 以上,此时进入轻度霾天气,并且霾开始逐渐消散.

通过对 13 至 15 日天气参量日变化的分析,再结合 23 至 25 日的气象要素日变化图,可知,在雾霾天气过程中,能见度与风速的日变化趋势比较一致,而其与相对湿度的日变化呈相反的趋势. 所以,气象要素对雾霾天气有较大的影响,较高的相对湿度有利于雾霾共存,同时还影响能见度. 静、小风容易导致气溶胶堆积无法扩散,降低能见度,这些都有利于霾的出现<sup>[12-13]</sup>.

## 3 雾霾光学特性分布

### 3.1 后向散射系数时空分布

图 4(a)是利用激光云高仪后向散射数据给出的 2013 年 1 月 13 至 15 日南京北郊地区的气溶胶后向散射时序图,图(b)是对图(a)中雾霾较严重的局部区域放大图. 从图 4(a)中可以看出,在 13 日 12:00 至 14 日 0:00 时气溶胶后向散射强度比较弱,后向散射系数为  $0.01 \text{ km}^{-1} \text{ srad}^{-1}$ ,而且空间分布比较均匀,垂直变化率在 20% 左右,此时处于轻微霾天气. 14 日凌晨



(a) Backscattering coefficient

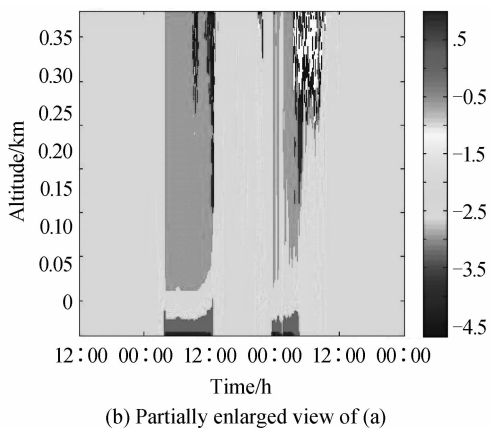


图4 2013年1月13至15日南京北郊气溶胶后向散射系数时序图及局部放大图

Fig. 4 The sequence diagram of backscattering coefficient and its partially enlarged view from January 13 to 15, 2013

3:00之后,近地面处气溶胶后向散射强度明显增强,结合局部放大的图(b),可以明显看出此时气溶胶都堆积在近地面处,后向散射系数垂直变化率最高达到90%,气溶胶空间分布极不均匀,主要分布在近地面几十米范围内,属于典型的雾天气过程.中午12:00之后,气溶胶后向散射强度逐渐减弱,在垂直方向上的变化也比较均匀.到15日0:00之后气溶胶后向散射强度又一次增强,气溶胶垂直分布变得不均匀,但在早晨

日出后向散射强度又逐渐减弱,这期间处于雾霾混合的天气过程.15日8:00之后气溶胶后向散射强度逐渐减弱至 $0.01 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ ,并且后向散射强度在垂直范围内没有较大波动,气溶胶在空间上分布均匀,气溶胶高度层也被逐渐抬升至1 km左右,恢复到轻度霾天气.

图5是气溶胶消光系数廓线图,主要是从轻微霾到重度雾霾再到雾霾开始消散三个阶段的气溶胶垂直廓线.从图中可以看出,气溶胶垂直结构在雾霾天气中发生变化.由图5中(a)可以看出,9:00和14:00在1 km以上有很强的消光作用,主要是因为1 km以上有云.(b)为14日雾霾天气时段的消光系数垂直变化,可以看出,气溶胶消光层降至200 m以下,4:00时的消光强度最强,且高度在100 m以下,结合图2和图3可知,此时高空和低层大气风向不一致,分层现象显著,不利于垂直方向空气交换,而且相对湿度在90%左右,霾粒子吸湿下沉,近地面又基本处于无风状态,气溶胶都堆积在近地面处,无法扩散.(c)为15日雾霾逐渐消散时段的气溶胶垂直廓线,从图中可以看出早上7:00最强消光层还在200 m左右,到10:00时已经被抬升到400 m以上,主要是因为该时段内风速增大,加强了对流运动,垂直风切变基本消失,气溶胶得到了扩散,雾霾也开始逐渐消散.

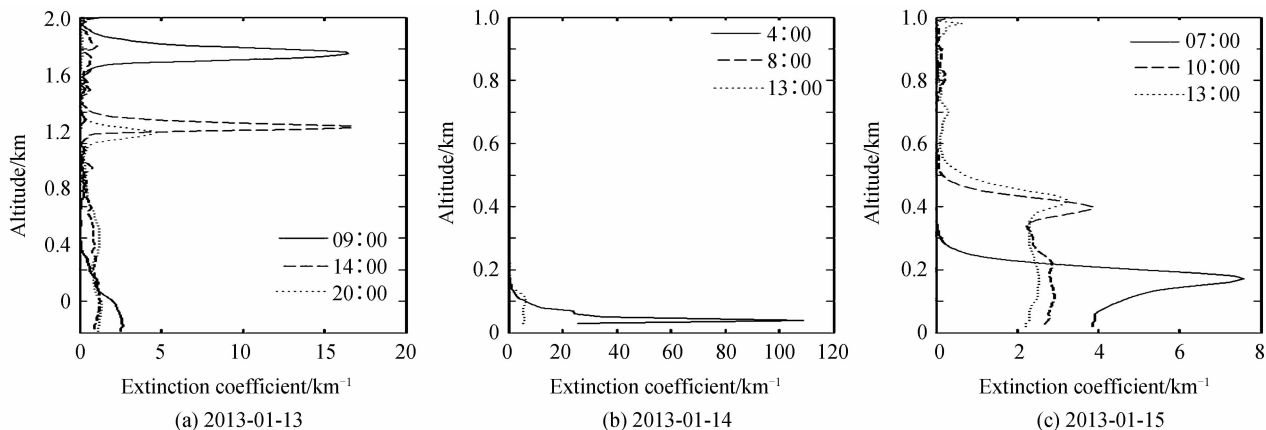


图5 2013年1月13至15日南京气溶胶垂直廓线图

Fig. 5 Vertical profiles of aerosols from January 13 to 15, 2013

对23至25日的雾霾相间出现天气过程进行同样的分析,得出的结论与13至15日的雾霾个例基本一致.在23到24日凌晨雾天气时,雾在垂直方向上分布不均匀,最大垂直变化率在80%以上,厚度在100 m以下,近地面处后向散射强度很大,后向散射系数达到 $0.1 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 以上.而发生霾时,霾的高度层主要在1 km左右,且霾粒子空间分布均匀,垂直变换率在20%,近地面处的后向散射系数为 $0.02 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ .上述分析表明雾和霾时激光云高仪的后向散射数据体现出的不同特征.

### 3.2 雾霾过程中能见度变化

图6中(a)和(c)是根据激光云高仪数据反演出的能见度廓线与能见度仪测得的能见度廓线对比图,从图中可以看出,在雾霾天气过程中,两者的能见度变化趋势大体一致,说明基于云高仪数据反演能见度具有可行性.另外,结合图3的相对湿度和风速日变化图,也可以验证在雾霾天气过程中,能见度与相对湿度的变化趋势大致相反,与风速的变化趋势基本一致.图6(b)和(d)为激光云高仪数据反演出的垂直能见度图,以图6(b)为例,可以看出,13日轻微霾天气过程时,随

着相对湿度下降,风速变大,垂直能见度从 3 km 上升至 7 km. 在 14 日有雾时,相对湿度上升,风速变小,霾粒子吸湿增长,垂直能见度开始变差,最低为 30 m 左右,与对应的水平能见度相吻合. 15 日 0:00-8:00 垂直能见度有明显的波动,主要是由于此时的气溶胶后向散射强度在垂直范围内有明显的波动,气溶胶空间

分布不均匀. 上述分析表明,垂直能见度的变化与相对湿度变化趋势相反,与风速变化趋势一致;垂直能见度的大小受气溶胶垂直分布影响. 因此,垂直能见度可以用于反映大气层稳定程度、判定气团性质,还可用于研究大气污染<sup>[14]</sup>.

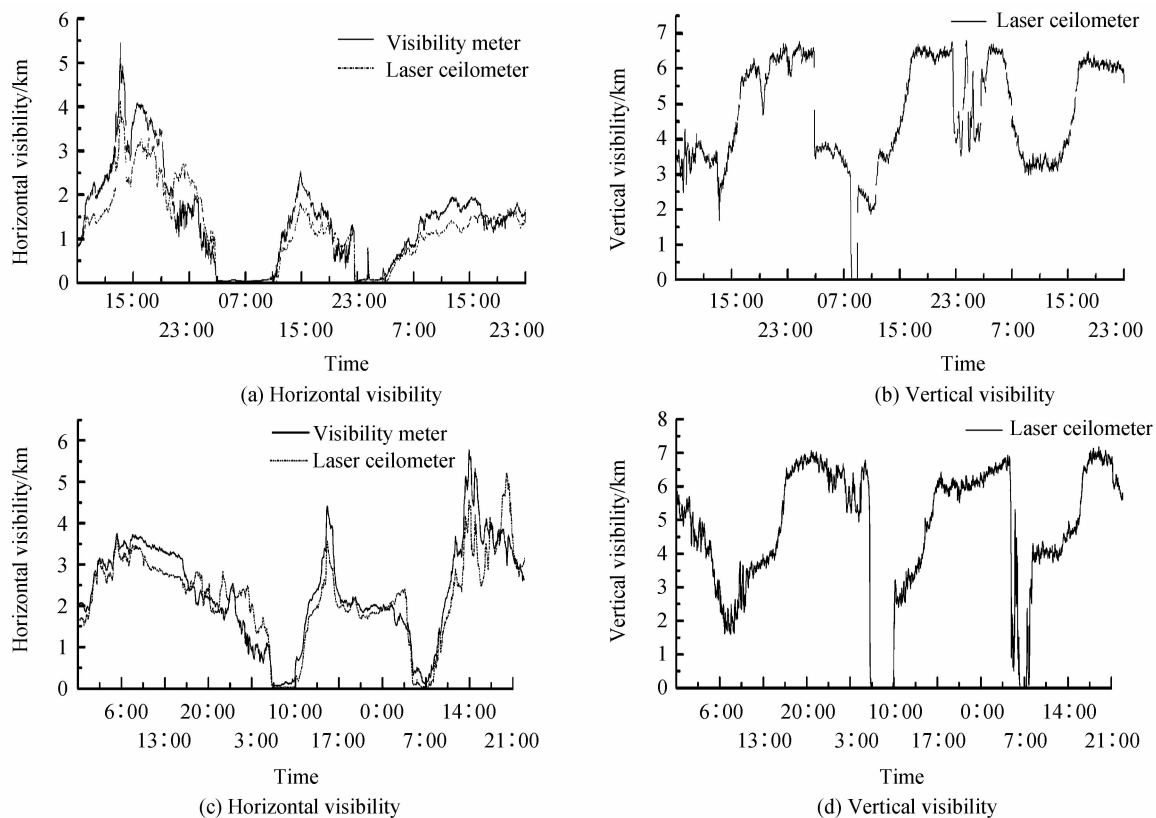


图 6 激光云高仪和能见度仪能见度廓线和垂直能见度图

Fig. 6 The visibility profile by laser ceilometer and visibility meter and Vertical visibility

### 3.3 后向散射系数随时间稳定性

雾和霾往往相伴而生,霾天气情况下大气中存在很多小粒子,在气象条件合适的情况下,小粒子作为凝结核吸湿增长使空气湿度增大生成雾,当雾由于日照或其他原因失去水分后又会恢复霾的过程. 雾和霾的边界特征不同,雾的边界清晰,起伏明显,而霾的边界不清晰,且内部均匀<sup>[15]</sup>. 根据雾和霾的不同边界特征,可以利用激光云高仪来实现对雾和霾的区分. 图7为

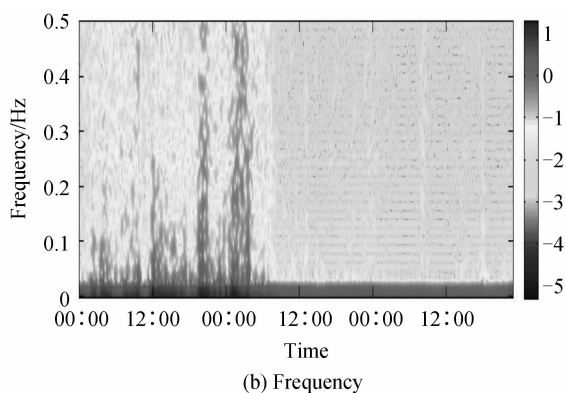
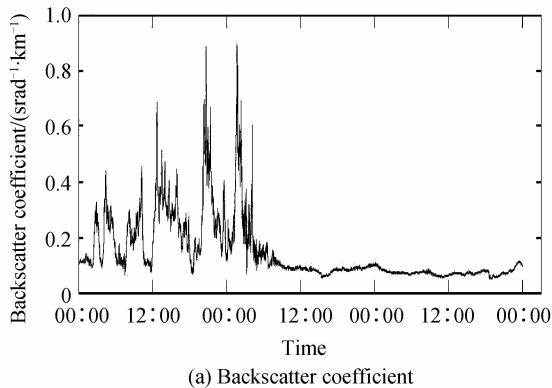


图 7 2012 年 3 月 4 至 6 日气溶胶后向散射系数及其傅里叶变换时序图

Fig. 7 The aerosol backscatter coefficient and its Fourier transform timing diagram

2012 年 3 月 4 至 6 日南京北郊气溶胶后向散射系数及其傅里叶变换时序图. 图 7(a)中在 4 日到 5 日 7:00, 气溶胶后向散射系数起伏明显,波动较大,7:00 之后的后向散射系数变化则相对平稳. 图 7(b)是对后向散



射系数进行傅里叶变换后的时序图,其中灰度值代表傅里叶变换不同频率处的功率.从图中可以看出,霾天气时,由于后向散射系数随时间变化不大,傅里叶变换后,功率主要集中在低频部分,低频所占百分比达90%左右;而4至5日7:00左右的后向散射系数进行傅里叶变换后,高频部分所占比重增大,由霾时的10%增加到30%,最大比重达50%,这说明在这个时间段内后向散射系数频率波动较大,幅值变化明显,气溶胶分布不均匀,这与雾的边界特征吻合.

## 4 结论

利用激光云高仪数据资料,结合探空资料和自动气象站数据,对雾霾天气进行了综合分析.结果表明,雾霾天气的出现受气象要素的影响较大,静、小风有利于霾的出现,而较高的相对湿度有利于雾霾共存,并且对能见度产生较大影响,能见度最小时仅有几十米.在雾霾相间的天气过程中,雾和霾的激光云高仪后向散射数据特征不同.雾在垂直方向上最大变化率为80%以上,厚度在100 m以下,近地面处后向散射系数在 $0.1 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ 以上.霾粒子空间分布均匀,垂直变换率大致在20%,霾的高度层在1 km左右,且近地面处的后向散射系数为 $0.02 \text{ km}^{-1} \cdot \text{srad}^{-1}$ .利用激光云高仪数据获得雾霾过程中水平能见度和垂直能见度,发现两者有较大差异,但都与相对湿度日变化趋势相反,与风速日变化趋势一致.最后,对雾和霾天气下后向散射系数随时间变化特征进行分析,霾天气时由后向散射系数进行傅里叶变换后的功率主要分布在低频部分,而雾天气下傅里叶变换后的功率在高频分布比重明显增加,与雾和霾的边界特征相吻合.本研究表明利用激光云高仪进行雾霾探测是可行的,可以基于激光云高仪开发雾霾天气监测的相关数据产品,实现大尺度范围内雾霾天气的联网观测.

### 参考文献

- [1] WU Dui, BI Xue-yan, DENG Xue-jiao, *et al.* Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, **64**(4): 510-517.  
吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等.珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J].气象学报,2006, **64**(4):510-517.
- [2] DOUGLAS W, DOCKERY C. An association between air pollution and mortality in six U. S. cities[J]. *The New England Journal of Medicine*, 1993, **329**: 1753-1759.
- [3] 中国气象局:2013年我国平均雾霾日数52年来最多[EB/OL]. [2014-01-14]. [http://www.china.com.cn/travel/txt/2013-11/03/content\\_30481631.htm](http://www.china.com.cn/travel/txt/2013-11/03/content_30481631.htm).
- [4] HE Qian-shan, MAO Jie-tai. Micro-pulse lidar and its applications[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, **32**(4): 221-224.  
贺千山,毛节泰.微脉冲激光雷达及其应用研究进展[J].气象科技,2004, **32**(4):221-224.
- [5] LIU Cheng, MING Hai, WANG Pei, *et al.* Measurements of the aerosol over naqu of tibet and suburb of beijing by micro pulse lidar (MPL)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1435-1439.  
刘诚,明海,王沛,等.西藏那曲与北京郊区对流层气溶胶的微脉冲激光雷达测量[J].光子学报,2006, **35**(9):1435-1439.
- [6] HUANG Jian-ping. Measurements of the aerosol and cloud radiative effects by lidar [C]. Tenth National Optical Technology Symposium, 2012.  
黄建平.激光雷达对气溶胶和云辐射效应的探测研究[C].第十届全国光电技术学术交流会议论文集,2012.
- [7] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Optical Society of America*, 1984, **23**(5): 652-653.
- [8] Vaisala Oyj Corporation. Vaisala ceilometer CL31 user's guide [M]. Finland:Vaisala Oyj, 2006: 45-47.
- [9] KLEET J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(2): 211-220.
- [10] MAO Fei-yue, GONG Wei, LI Jun, *et al.* Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3097-3102.  
毛飞跃,龚威,李俊,等.基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参量反演[J].光学学报,2010, **30**(11): 3097-3102.
- [11] WEI Xiu-lan, WANG Wei, FAN Wen-feng. Analysis of a haze event in southwestern shandong province [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2008, **36**(6): 724-726.  
魏秀兰,王玮,范文峰.鲁西南霾天气个例分析[J].气象科技, 2008, **36**(6):724-726.
- [12] PAN Hu, GENG Fu-hai, CEN Yong-hang, *et al.* Analysis of a haze event by micro-pulse light laser detection and ranging measurements in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(11): 2164-2173.  
潘鹤,耿福海,陈勇航,等.利用微脉冲激光雷达分析上海地区一次灰霾过程[J].环境科学学报,2010, **30**(11):2164-2173.
- [13] TIAN Xiao-yi, YUAN Cheng-song, WU Zhen. Evolvement of haze-fog weather and influences on visibility along expressway [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2010, **38**(6): 673-678.  
田小毅,袁成松,吴震.高速公路上雾霾演变及其对能见度的影响[J].气象科技,2010, **38**(6):673-678.
- [14] YANG Cheng-wu, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun. Algorithm for retrieving vertical visibility of laser diode ceilometers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(2): 307-311.  
杨成武,刘文清,张玉钧.用于反演半导体激光云高仪垂直能见度的算法[J].强激光与粒子束,2012, **24**(2):307-311.
- [15] WU Dui. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather[J]. *Meteorology*, 2005, **31**(4): 3-7.  
吴兑.关于霾与雾的区别和霾天气预警的讨论[J].气象, 2005, **31**(4):3-7.