

南京地区微脉冲激光雷达气溶胶观测

祝存兄¹ 曹念文¹ 杨丰恺² 杨少波¹ 谢银海¹

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, 江苏 南京 210044

²四川省成都市双流县气象局, 四川 成都 610200

摘要 使用中国气象局南京综合观测基地的微脉冲偏振激光雷达(MPL)对南京北郊上空气溶胶进行观测,分析反演实测数据得到气溶胶的消光系数和退偏振比廓线,结果表明:晴天大气、雾霭大气和水相云中气溶胶的退偏振比数值相当,冰相云的退偏振比明显较前三种气溶胶大。2009年1月~6月50次实验观测数据的反演结果表明:当云底高度为4 km以下时,退偏振比数值集中在0~0.05之间;当云底高度在4 km以上时,退偏振比数值集中在0.05~0.15之间,且云底越高,较大数值退偏振比出现的几率越高。对比2012年一次夏季雾霭和一次冬季沙尘实测数据的反演结果表明:沙尘出现的边界特征明显,而雾的边界特征模糊;结合消光系数时空分布和退偏振比的变化,可以监测沙尘的爆发与消散。将MPL结果与CE-318太阳光度计数据进行对比,两种仪器所测气溶胶光学厚度随时间的变化趋势基本一致。

关键词 散射; 气溶胶; 消光系数; 退偏振比

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.050101

Micro Pulse Lidar Observations of Aerosols in Nanjing

Zhu Cunxiong¹ Cao Nianwen¹ Yang Fengkai² Yang Shaobo¹ Xie Yin Hai¹

¹Key Laboratory of Aerosol-Cloud Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

²Shuangliu County Bureau of Meteorology, Chengdu, Sichuan 610200, China

Abstract The aerosol measurement by micro-pulse lidar(MPL) system is taken in Nanjing Comprehensive Observation Base of China Meteorological Administration in the north suburb of Nanjing. The variation of aerosol extinction coefficient profiles and depolarization ratio profiles indicate that the depolarization ratio of aerosols in clear atmosphere, mist and water cloud have similar values, but the value of ice cloud depolarization ratio is larger than all of them. Nearly 50 times inversion results of experimental data during January to June in 2009 show that the depolarization ratio is concentrated between 0 to 0.05 when the height of cloud base is below 4 km. While the height is above 4 km, this value is almost between 0.05 to 0.15. The higher of height cloud base is, the higher of the probability of larger depolarization ratio values is appeared. Comparing the inversion results of summer mist and winter dust in 2012, the results show that dust appears obvious boundary, while the characteristics of mist boundary is blurred. Dust's outbreak and dissipate can be monitored by combining spatial distribution and temporal distribution of extinction coefficient with change of depolarization ratio. Comparing the results of MPL and CE-318 sun photometer, the optical thickness of both instruments measured is consistent with the trends of time.

Key words scattering; aerosol; extinction coefficient; depolarization ratio

OCIS codes 010.1110; 010.1100; 010.1615; 010.1310; 010.3640

1 引言

1971年, Scholand等^[1-2]发表了一篇利用偏振激光雷达对云进行探测的文章,自此偏振激光雷达在大气遥感探测中应用已四十多年。偏振激光雷达是通过探测非球形粒子后向散射光的退偏振比来研究目标物粒子形态的,是研究卷云和沙尘气溶胶等大气非球形粒子形态的有效工具^[3-4]。同时,可利用偏振激光雷达

收稿日期: 2014-10-31; 收到修改稿日期: 2014-12-12; 网络出版日期: 2015-04-25

项目基金: 国家自然科学基金(41175033, 41375044)

作者简介: 祝存兄(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: zhucunxiong_2008@126.com

导师简介: 曹念文(1967—),男,博士,教授,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: nwcao@nuist.edu.cn(通信联系人)

后向散射信号的水平分量反演计算大气气溶胶的消光系数、光学厚度、气溶胶时空变化及类型^[5-7]。在大气环境尤其是云、雾霾和沙尘气溶胶的探测研究方面,偏振激光雷达发挥了十分重要的作用^[8-9]。

本文简要介绍了微脉冲偏振激光雷达(MPL)的结构、技术参数及数据处理方法,反演计算了大型化工厂密集分布的南京北郊上空气溶胶消光系数垂直廓线、气溶胶光学厚度时间序列和大气气溶胶退偏振比,并通过雾霾和沙尘个例的观测结果进行分析和讨论。

2 实验观测及数据分析

2.1 观测系统

本实验的MPL安装在中国气象局南京综合观测基地(32.2°N, 118.7°E)。由激光发射单元(激光器、扩束器等)、光学接收单元(望远镜、窄带滤光片等)、数据采集控制单元(探测器和光子计数卡)三部分组成。

激光器产生波长为532 nm的偏振激光经扩束后进入大气,经过大气分子和气溶胶粒子的散射,带有大气信息的回波信号被激光雷达系统接收。MPL系统参数如表1所示。

表1 MPL技术指标

Table 1 Technical values for MPL

Parameter	Index
Wavelength /nm	532
Pulse energy /μJ	About 3.8
Resolution /km	0.015/0.03/0.07
Maximum range /km	15

2.2 数据分析

对于Mie散射激光雷达,利用水平偏振信号得到大气气溶胶的消光系数垂直廓线,进而得到气溶胶的光学厚度,本文采用Fernald^[10]方法求解气溶胶后向散射系数:

$$\beta_a(r) = -\beta_m(r) + \frac{P(r)r^2 \exp[2(S_a - S_m)] \int_{r_m}^r \beta_m(r') dr'}{\beta_a(r_m) + \beta_m(r_m) + 2S_a \int_{r_m}^r P(r)r^2 \exp[2(S_a - S_m)] \int_{r_m}^r \beta_m(r'') dr''} dr', \quad (1)$$

式中 r 为探测目标距激光雷达的距离, $P(r)$ 为距激光雷达 r 高度处的散射光子数, $\beta_a(r)$ 和 $\beta_m(r)$ 分别为气溶胶和大气分子距激光雷达 r 高度处的后向散射系数, $\beta_a(r_m)$ 和 $\beta_m(r_m)$ 分别为参考边界高度 r_m 处的气溶胶和大气分子后向散射系数, S_m 和 S_a 分别为分子和气溶胶后向散射消光比。对Rayleigh信号而言, $S_m = 8\pi/3$ 为常数,对Mie散射信号, S_a 与气溶胶的特性有关,取值范围在10~100之间,中国大陆地区 S_a 一般取50^[11-13],利用后向散射消光比即可得到气溶胶消光系数的垂直廓线,大气分子后向散射系数依据US1976标准大气模式经NASA/EOS订正得到^[14],取参考高度处气溶胶和大气分子后向散射比 $R=1.01$ 。

偏振激光雷达的优点在于可以根据偏振散射光的退偏特性得到探测目标物(气溶胶粒子)的形状特征,当退偏振比越接近0,代表目标物(气溶胶粒子)形状越接近球形,而退偏比越接近1,代表目标物(气溶胶粒子)的非球形程度越明显。可以通过分析退偏振比的大小,定性分析目标物非球形特征,从而区分大气中气溶胶、冰相云、水相云的分布,也可以进一步结合其他物理光学特性,判断气溶胶的组成和类型。偏振激光雷达探测的退偏振比 $\delta(r)$ 为后向散射信号的垂直分量 $P_{\perp}(r)$ 与水平分量 $P_{\parallel}(r)$ 的比值,表示为

$$\delta(r) = \kappa \frac{P_{\perp}(r)}{P_{\parallel}(r)}, \quad (2)$$

式中 κ 为激光雷达定标因子,表征激光雷达两个偏振通道的探测效率和退偏效应。在两个通道有相同的退偏效应的理想状态下 $\kappa=1$,实际工作中 κ 值须经重新定标才能保证探测数据符合实际大气,由于本文使用的数据没有经过探测前的定标处理,所以后期采用大气分子的退偏振比较准原始数据^[15],进而使得计算结果误差得到控制。

3 观测结果及分析

3.1 典型天气状况下的观测结果

本文对激光雷达观测数据进行背景噪声处理^[16],并利用Fernald方法反演分析,图1为利用3组典型天

气状况下的观测数据反演计算得到气溶胶消光系数和退偏振比的垂直廓线。

图1中黑色实线为US1976标准大气气溶胶消光系数经NASA\EOS订正后的垂直廓线,红色标记线为激光雷达观测数据反演得到的气溶胶垂直廓线,蓝色虚线为相应高度的退偏振比,绿色虚线为该时刻探测垂直方向上大气混合层所在的位置。

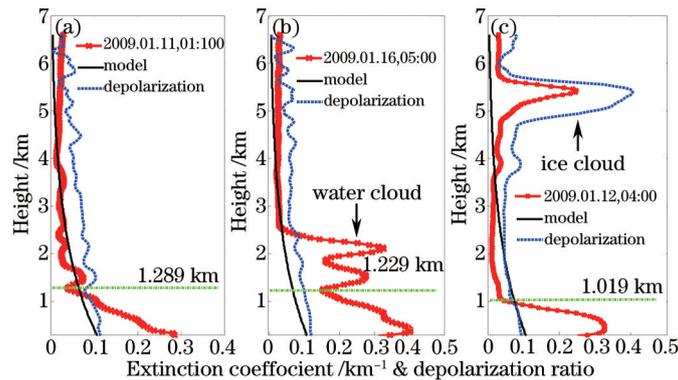


图1 典型天气大气气溶胶消光系数与退偏振比垂直廓线

Fig.1 Vertical profile of aerosol extinction coefficient and depolarization ratio under typical weather conditions

图1(a)为晴朗天气时气溶胶消光系数垂直廓线,可见1 km以下高度激光雷达实测消光系数比标准大气气溶胶消光系数大,1 km以上两者吻合较好,随高度增加气溶胶消光系数减小。图1(b)所示2.5 km以上高度MPL实测数据与标准大气气溶胶消光系数一致,2.5 km以下MPL实测数据明显比标准大气气溶胶消光系数大,可探测的整层大气消光系数总趋势随高度减小,从图中观察到近地面到2.5 km之间气溶胶分布不均匀,有起伏波动,出现两组峰值,即1~2.5 km之间有两层明显的气溶胶层,应为该高度范围内的两层云。图1(c)显示1 km以下有气溶胶层,1~4.5 km处消光系数随高度递减,并与标准大气气溶胶消光系数保持一致,在5 km左右高度存在约1 km左右的气溶胶层,消光系数明显增大,激光穿过云层后消光系数减弱,激光雷达探测结果表现为图1(c)中5 km左右高度处的消光系数峰值。图1中由于消光系数和退偏振比在数量级上相近,因此横坐标同时表示两个物理量。

图1(a)~(c)中蓝色虚线为气溶胶退偏振比,图1(a)为常规大气气溶胶,退偏振比小于0.1且随着高度增加常规气溶胶浓度减少,最终在高层清洁大气中退偏振比减小为空气分子($P_n=0.035$)的退偏振比^[17]。图1(b)中1~2.5 km高度层中消光系数表现出双峰特征,而退偏振比在MPL可探测的整层大气内保持递减趋势,即气溶胶层(云)中的粒子的形态表现为球形或近球形,可判断在1~2.5 km处存在两层水相云。图1(c)中消光系数大值区出现的高度较高,相对应高度处的退偏振比也较大,最大达到0.405,探测目标物退偏振比表现出明显的非球形特性,云中可能含有不规则的冰晶粒子,即该高度层为冰相云,由于该云层中的退偏振比有明显的峰值,所以可视为该层云是核心为冰晶粒子而云外围为冰水混合的高层云。

比较3组典型天气状况下的消光系数垂直廓线和退偏振比可知,雾霭时比晴天大气消光系数大,云层中消光系数比雾霭和晴天时常规气溶胶大;晴天大气、雾霭大气和水相云的退偏振比相当,冰相云的退偏振比明显比前三种气溶胶大。根据消光系数廓线可以粗略判断大气混合边界层的高度,如图1(a)~(c)中绿色虚线所在位置为气溶胶消光系数递减率最大的高度,可视为该时刻大气混合边界所在的高度位置(三组天气下混合边界层高度分别为1.289, 1.229, 1.019 km),从绿色虚线也可以看出无论是晴天或雾霭天气,南京浦口观测站近地层的气溶胶消光系数都大于 10^{-1} km^{-1} ,可见作为高排放量化工厂密集分布的江北工业区的污染较为严重。图1所列的典型天气状况下MPL实测数据与表2所列的气象数据一致。

表2 不同天气状况气象信息^[18]

Table 2 Meteorological information under different weather conditions^[18]

Time	Temperature	Humidity	Wind direction	Wind speed	Weather
2009.01.11 01:00	-5 °C	80%	SE	1.0 m/s	Sunny
2009.01.16 05:00	-1 °C	73%	SE	3.0 m/s	Fog
2009.01.12 04:00	-3 °C	74%	N	3.0 m/s	Mist

利用MPL数据分析了2009年1月~6月10日中50例云层的退偏振比与云底高度的变化关系,结果如图

2所示,可见当云底高度为4 km以下时,退偏振比的值集中在约0~0.05之间,当云底高度在4 km以上时,退偏振比的值集中在约0.05~0.15之间,且退偏振比大于0.2的几率比4 km以下高度时大,总趋势为云底高度越高,退偏振比大值出现的几率越高,即高层云中出现冰云的几率比低层高。

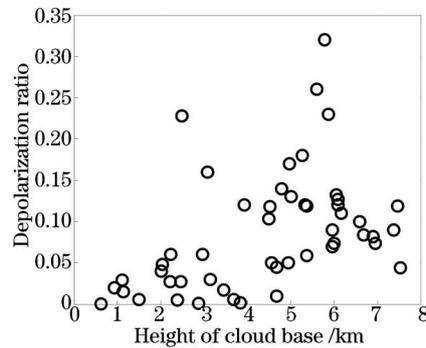


图2 云高对退偏振比的影响

Fig.2 Effect of cloud height on depolarization ratio

3.2 一次浓雾和沙尘天气过程分析

为了更细致地分析南京北郊特殊天气情况中的大气气溶胶的光学特性,对比分析了2012年一次夏季雾霭过程个例和一次冬季强沙尘过程,图3为2012年6月10日~14日的雾过程的大气气溶胶消光系数的时空分布。

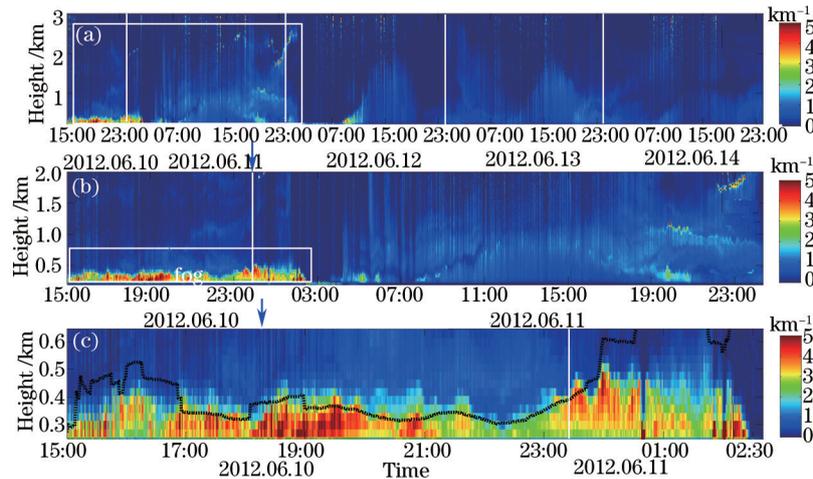


图3 2012年6月10日~14日一次雾霭过程

Fig.3 Mist process on June 10~14, 2012

图3中(a)~(c)分别为不同时长的气溶胶消光系数时空分布序列,其中严重雾霭发生于6月10日下午至6月11日凌晨,6月11日仍有少量轻雾,6月12日以后雾霭消散,恢复晴好天气。通过MPL数据可以实时监测雾霭的生消过程,明显看到雾霭时气溶胶消光系数(均值约为 2.23 km^{-1})比较雾(均值为 0.7 km^{-1})和雾霭消散后(均值为 0.19 km^{-1})大。如图3(c)所示黑色虚线为雾霭消光系数递减率最大的高度,即雾霭混合层高度,可见雾霭出现的高度为MPL可探测最低高度至450 m左右,雾霭内部结构较清晰,消散高度的边界随时间变化剧烈,如图3(c)显示边界模糊,并且雾霭边界处消光系数随高度逐渐减小至与空中背景气溶胶消光系数数值相当。

激光雷达探测2012年11月27日~29日的一次沙尘天气的气溶胶消光系数时空变化,结果如图4所示。

图4(a)为2012年11月27日~29日测站上空6 km以下的气溶胶消光系数的时间序列,其中矩形标记框A和B中消光系数较大,可判定为该测站上空的云层。A框中云层保持在5 km高度层附近,如A中白色箭头所示,云层随时间保持高度不变,垂直方向上飘移较缓慢,可判断为测站上空持续有云或有云飘过;B框中云层所处高度随时间变化剧烈,如B框中白色箭头所示,从6 km飘移到2 km再上升到4 km,可视为测站上空的云(气流)有垂直方向的变化。综上所述,雷达反演数据中可以定性分析大气中云的移动情况,即高空气流(风)的变化。图4(a)中C框为本次沙尘过程探测到的沙尘时空区域,局部放大如图4(b)所示。由激光雷达

探测数据可知沙尘自11月27日开始,28日18:00左右开始出现强沙尘持续到29日沙尘逐渐减缓,这与官方沙尘监测报道一致。沙尘强烈时段,沙尘气溶胶消光系数最大可达 3 km^{-1} ,均值为 0.26 km^{-1} 。粗略分析沙尘边界如图4(b)中白色虚线所示,可见此次沙尘影响高度约1 km左右,最高可达1.5 km。由图4(b)观察到沙尘的边界高度随时间变化平缓,即与雾过程相比边界相对明显。

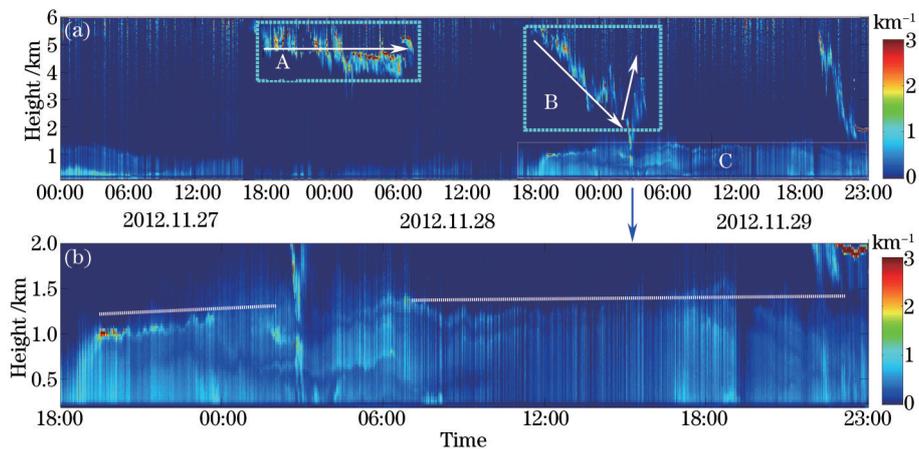


图4 2012年11月27日~29日沙尘天气过程气溶胶消光系数

Fig.4 Aerosol extinction coefficient of a dust process on November 27~29, 2012

图5为2012年11月27日~29日南京沙尘天气期间激光雷达探测数据计算到的退偏振比,对比图4(b)可见强沙尘时段(18:00~07:00)退偏振比相应较大,数值在0.6~0.8之间,其余时段气溶胶消光系数大,但退偏振比在0.2~0.5之间,较强沙尘时段小。结合消光系数时空分布和退偏振比的变化,可以监测云的生消过程、定性分析高空风的垂直变化、监测沙尘爆发消散动态。

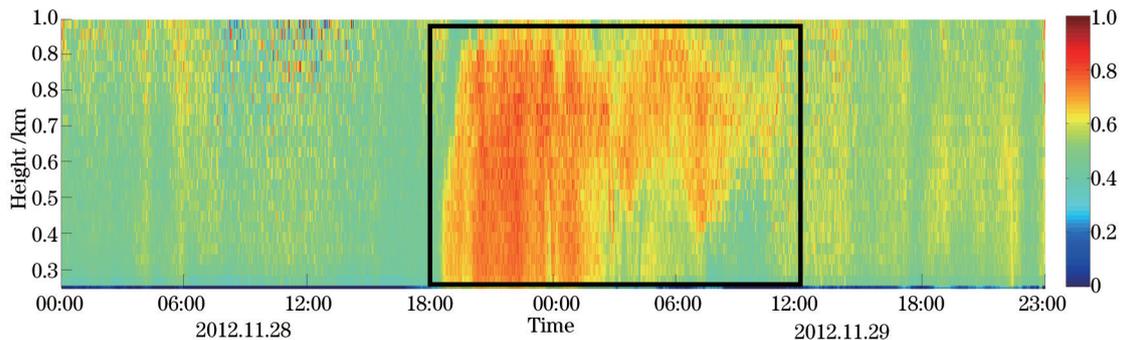


图5 2012年11月28~29日强沙尘时段气溶胶退偏振比

Fig.5 Depolarization ratio of strong dust storm process on November 28~29, 2012

3.3 比对试验

为了更直观地观察大气气溶胶的消光作用,求得气溶胶光学厚度(AOD)为

$$D_0 = \int_0^r \sigma(r) dr, \quad (3)$$

式中 $\sigma(r)$ 为高度 r 处的气溶胶消光系数。

图6为MPL连续观测数据得到光学厚度时间序列,选取了2009年5月7~9日晴好少云天气时的观测数据。由图6可见三日光学厚度均值为0.3302,一天中AOD最小值出现在夜间,最大值出现在白天,这与白天人类活动频繁有关,如工业排放和汽车尾气排放等,气溶胶含量增加,夜间温度下降水汽凝结,部分气溶胶随露水沉降,使得AOD时间序列呈现先增大后减小如抛物线状变化特征。

为了确保MPL观测大气气溶胶数据的可行性,使用距离MPL观测站1 km以内的太阳光度计数据进行比对试验(太阳光度计安装在南京信息工程大学东校区气象楼12楼顶层)。由于太阳光度计数据样本有限,实验选取4组数据与MPL结果进行对比,MPL波长为532 nm,从太阳光度计7个工作波段中选取较接近的500 nm作为参考,如图7(a)、(b)、(c)、(d)所示,太阳光度计所测的气溶胶光学厚度随时间变化特征与MPL实测结果基本趋势一致。

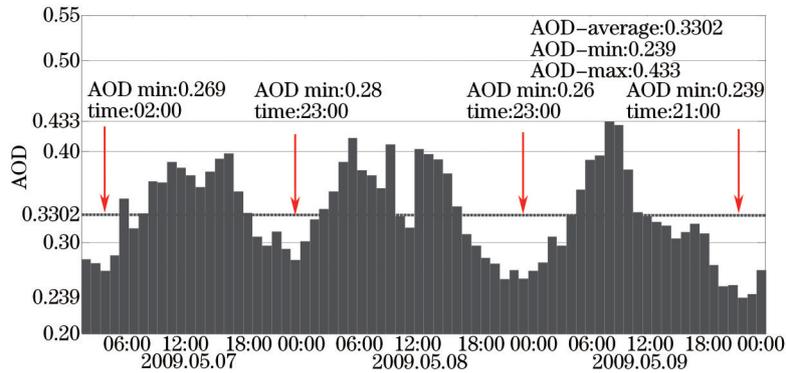


图6 2009年5月7~9日AOD时间序列

Fig.6 Aerosol optical depth time series on May 7~9, 2009

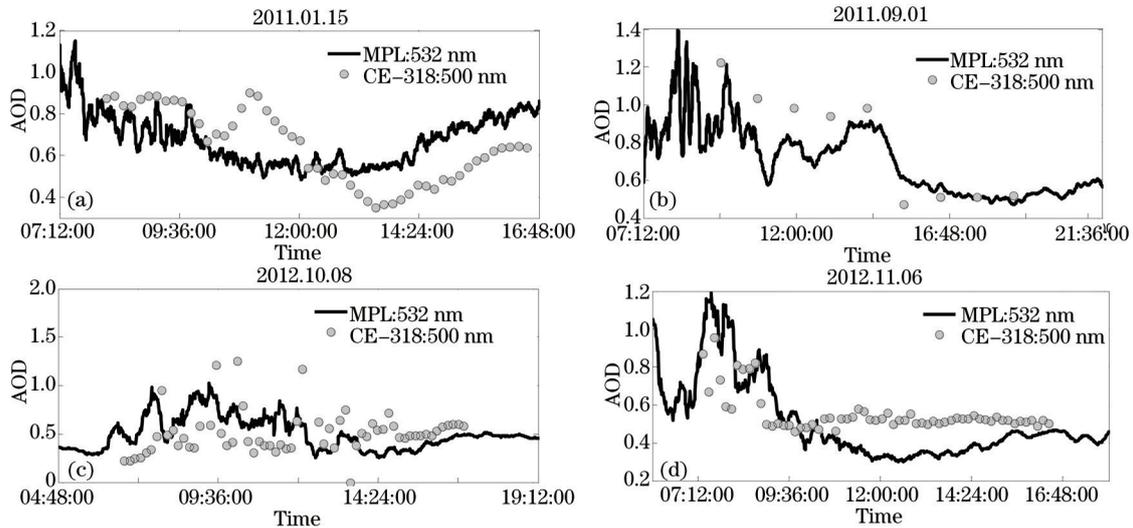


图7 MPL数据与太阳光度计数据对比

Fig.7 Comparison of MPL data and sunphotometer data

4 结 论

利用MPL对中国气象局南京观测基地上空大气气溶胶进行连续探测,计算得到大气气溶胶的消光系数和退偏振比垂直廓线,分析气溶胶的光学和物理特性,分析云层中的退偏振比可以判断其相态分布;利用MPL的实测数据对南京当地的雾霭和沙尘天气过程进行分析,结合消光系数和退偏振比的时空变化特征,可预测雾霭和沙尘天气的爆发和消散,为南京地区气象灾害的预报提供相应的依据。利用MPL的连续观测数据计算实测气溶胶光学厚度,并和太阳光度计数据加以对比,确保了观测数据的可靠性。

参 考 文 献

- Scholand R Mand, Sassen K, Stone R. Observation by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors[J]. J App Meteor, 1971, 10(5): 1011-1017.
- Sassen K. The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1991, 72(12): 1848-1866.
- Liu Dong, Qi Fudi, Jin Chuangjia, *et al.*. Polarization lidar observations 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.
- Liu Qi, Chu Jinkui, Wang Jing, *et al.*. Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301004.
刘 琦, 褚金奎, 王 兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0301004.
- Cao Nianwen, Shi Jianzhong, Zhang Yingying, *et al.*. Aerosol measurements by Raman-Rayleigh-Mie lidar in north

- suburb area of Nanjing city[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060101.
曹念文, 施建中, 张莹莹, 等. 南京北郊气溶胶观测[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060101.
- 6 Cao Nianwen, Yan Peng. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1101003.
曹念文, 颜 鹏. 基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1101003.
- 7 Shi Jianzhong, Cao Nianwen. Tropospheric aerosol measurements by lidar in northern suburbs of Nanjing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100101.
施建中, 曹念文. 南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(10): 100101.
- 8 Nianwen Cao, Cunxiong Zhu, Shaobo Yang, *et al.*. Identification of aerosol species using polarization lidar[J]. *Lasers and Their Applications*, 2014, 117(3): 486-491.
- 9 Lü Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, *et al.*. A new micro-pulse Lidar for atmospheric horizontal visibility measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0908005.
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0908005.
- 10 Frederick G Fernald. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652-653.
- 11 Yasuhiro Sasano, Hideaki Nakane. Significance of the extinction/backscatter ratio and the boundary value term in the solution for the two-component lidar equation[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(1): 11-13.
- 12 Yasuhiro Sasano, Edward V Browell. Light scattering characteristics of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations[J]. *Appl Opt*, 1989, 28(9): 1670-1679.
- 13 Zhang Zhaoyang, Su Lin, Chen Liangfu. Retrieval and analysis of aerosol lidar ratio at several typical regions in China[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513002.
张朝阳, 苏 林, 陈良富. 中国典型地区气溶胶激光雷达比反演与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513002.
- 14 NOAA, NASA, USAF. The US Standard Atmosphere[M]. US Government Printing office, 1976.
- 15 Wang Zhenzhu, Liu Bo, Wang Bangxin, *et al.*. Experimental determination of the calibration factor of polarization-Mie lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, 4(6): 414-420.
王珍珠, 刘 博, 王邦新, 等. PML偏振激光雷达定标因子实验方法确定[J]. *大气与环境光学学报*, 2009, 4(6): 414-420.
- 16 Nianwen Cao, Cunxiong Zhu, Yangfeng Kai. A method of background noise reduction in lidar data[J]. *Applied Physics B*, 2013, 113(1): 115-123.
- 17 Rudolf B, Penndorf. Total Mie scattering coefficients for spherical particles of refractive index $n \sim 1.0$. [J]. *JOSA*, 1957, 47(7): 603-605.
- 18 Weather Underground, Inc. Weather History for Nanjing, China.[EB/OL].[2014-05-01]. <http://www.wunderground.com/history/airport//2013/7/30/MonthlyHistor.y.html#calendar>.

栏目编辑: 史 敏