

南京北郊对流层气溶胶激光雷达观测

施建中 曹念文

(南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要 介绍了中国气象局南京综合观测基地拉曼-瑞利-米氏激光雷达(RRML)系统。为了获得对基地上空气溶胶的可靠观测数据,利用该系统米氏通道回波信号对南京北郊对流层气溶胶进行观测,反演得到不同天气条件(晴、多云)下的典型气溶胶消光廓线,观测了一次无风时气溶胶扩散过程。分析了南京北郊气溶胶光学厚度随时间、风向的变化特征。观测南京地区多云天气的云底高度和层云内部消光结构,并对层云进行实时监测。结果表明:利用激光雷达能够很好地对气溶胶实现监测,多云或者有污染天气气溶胶光学厚度明显偏大,全年气溶胶光学厚度先增大后减小,同时由于地理位置原因,对流层气溶胶光学厚度受到偏南北方向风影响较大。对层云的观测表明层云内部的消光结构呈现对称和不对称两种情况。而通过对气溶胶的监测发现,在无风时,边界层处气溶胶向下扩散,使得整个边界层内下方气溶胶消光系数增大,而整个边界层内光学厚度保持不变。

关键词 大气光学;激光雷达;层云;气溶胶;光学厚度

中图分类号 P416.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.100101

Tropospheric Aerosol Measurements by Lidar in Northern Suburbs of Nanjing

Shi Jianzhong Cao Nianwen

(School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information and Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract The Raman-Rayleigh-Mie lidar (RRML) system in the Nanjing Comprehensive Observation Base of China Meteorological Administration is introduced. In order to get accurate aerosol data, we use the lidar signal from Mie channel of the lidar system to measure the aerosol in the northern suburbs of Nanjing. The extinction profiles at different weather conditions (sunny and cloudy) are obtained. The variation of aerosol with time and wind direction is analyzed. The stratus base height and extinction structure are observed. According to experiments in real time, the aerosol loading changes with time in the windy case. The measurement results indicate that lidar can be finely used in detecting aerosol. Tropospheric aerosol loading varies with wind direction due to the geographic location of Nanjing. The aerosol optical depth in the whole year of 2011 first increased and then decreased and the maximum value occurred in September. The extinction structure in stratus could be symmetric or asymmetric. Aerosol at the boundary layer diffuses downward, at the same time the altitude of boundary layer keeps stable and extinction of aerosol at low-altitude increases. In this process, the optical depth of aerosol from ground to boundary layer remains unchanged.

Key words atmospheric optics; lidar; stratus; aerosol; optical depth

OCIS codes 010.3640; 010.1615; 010.1290

1 引言

对流层气溶胶粒子通过吸收和散射太阳辐射及地球的长波辐射而影响局地、区域乃至全球的气候,因此对流层气溶胶光学特性的测量受到世界各国的重视^[1,2]。激光雷达时空分辨率高,在大气遥感中得到广泛应用。随着大气科学与大气环境研究的发展,激光雷达在大气温度遥感^[3,4]、气溶胶^[5,6]、云^[7,8]等的物理光

收稿日期: 2012-05-15; **收到修改稿日期**: 2012-06-13; **网络出版日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(41175033)资助课题。

作者简介: 施建中(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: kuro123123@sina.com

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

学特性研究方面的应用已受到重视。

为了观测南京乃至长江中下游地区的大气气溶胶参数,中国气象局于南京信息工程大学中校区建立南京综合观测实验基地,以便对南京地区大气参数进行综合观测,获得准确可靠的观测数据,丰富气象预报信息。南京综合观测基地的拉曼-瑞利-米氏激光雷达(RRML)可以对大气温度、中低层大气气溶胶实行常规观测。本文主要利用 RRML 的米氏(Mie)通道回波信号对南京上空对流层气溶胶消光进行观察,观察南京北郊对流层气溶胶变化规律以及层云气溶胶光学特性。

2 拉曼-瑞利-米氏激光雷达系统

图 1 为 RRML 系统结构示意图。整个系统放置在一个水平工作台上,实验室内保持恒温。光学发射单元采用 Continuum 公司生产的 Surelite II 型激光器,波长 532 nm,脉冲能量 200 mJ,重复频率 20 Hz。激光器发出激光,经反射镜反射后垂直向上输入大气。激光雷达光学接收单元包括接收望远镜和后继光路。回波中瑞利和拉曼高层回波信号极微弱,为提高其信噪比,需要采用高灵敏度、高量子效率的探测器和光子计数技术检测,因此 607 nm 通道和 532 nm 高层通道采用 Hamamatsu 公司的极高灵敏度、高增益的侧窗式 R4632 型光电倍增管(PMT),暗计数 50 s^{-1} ,光谱响应峰值波长在 $400 \sim 600 \text{ nm}$ 之间,响应时间 2.2 ns。信号采集选用 FAST ComTec 公司的 P7882 型光子计数卡。532 nm 低层通道信号检测采用 Hamamatsu 公司的 H5783 型光电倍增管,峰值响应波长 500 nm,光敏面直径 8 mm,内置高压模块,在大气气溶胶层强回波信号的检测上有较好的性能。信号采集选用凌华公司的 PCI29812 型 12 位模/数(A/D)数据采集卡。通过 532 nm 高低两个通道米氏散射回波信号的拼接,可以反演 $1 \sim 15 \text{ km}$ 气溶胶和卷云参数;通过 607 nm 通道的拉曼信号可以计算气溶胶和卷云的光学参数^[9]。

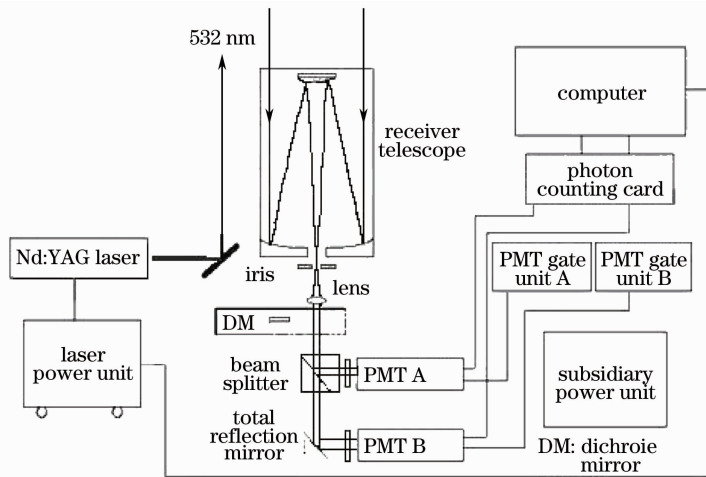


图 1 RRML 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of the RRML system

3 数据分析及观察结果

3.1 数据处理

对于米氏散射激光雷达,利用 Klett^[10]的方法求解消光系数:

$$\sigma(z) = \frac{\exp[(s - s_m)/k]}{\sigma_m^{-1} + \frac{2}{k} \int_z^{z_m} \exp[(s - s_m)/k] dz}, \quad (1)$$

式中 z 为高度, z_m 为参考高度, s 为距离校正后的信号, s_m 表示参考点距离校正函数的对数值, σ_m 为参考高度的消光值, k 取决于激光雷达波长(文中激光雷达波长为 532 nm)和气溶胶性质, k 的取值范围一般为 $0.67 \sim 1.00$,通常取 k 值近似为 1。有学者在经过大量实验观察分析后,认为在计算气溶胶时 k 取值为 0.8 或

者 0.9 时测量结果更加接近于真实值^[11],文中取 $k = 0.9$ 进行计算。反演结果如图 2 所示,其中采用几何法测量雷达系统参数并选取少数较好天气和空气情况进行实拟合法修正计算^[12],两者对比分析,综合得出该系统的几何重叠因子,如图 3 所示。

通过最小二乘法线性拟合图 2 中距离校正远端信号来求取拟合曲线曲率即为边界值。图 4 为激光雷达反演近点数据与浊度仪绿光波段数据对比图。可以看到激光雷达所探测到的数据与浊度仪探测到的数据具有很高的可比性,相差不超过 1 个数量级,而有时也会出现较大误差,主要因为参考点取值可能与真实值之间有一定的差距。浊度仪测量的是整个绿光波段数据而非精确到 532 nm,在空气中出现稠密气溶胶时,会引发多次散射,使用(1)式求解同样会造成误差。

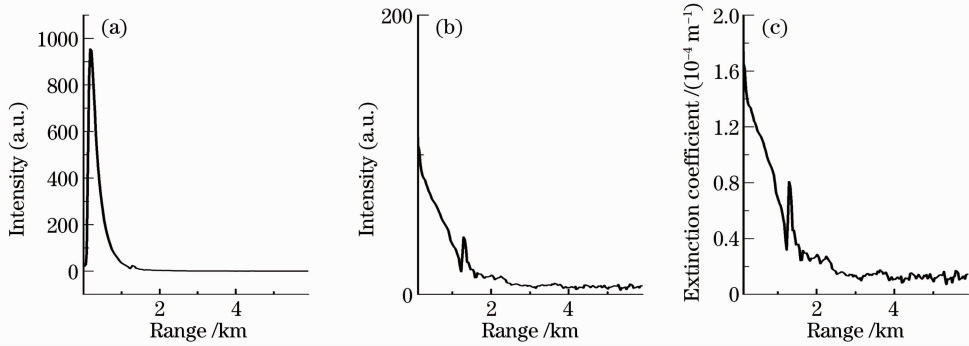


图 2 2009 年 11 月 25 日 10:49 原始信号(a)、距离校正(b)和消光廓线图(c)

Fig. 2 (a) Original data; (b) range corrected data and (c) extinction profile at 10:49, Nov. 25 2009

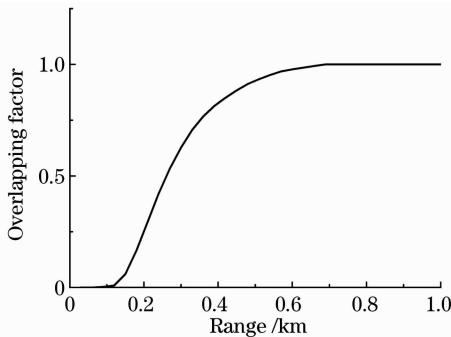


图 3 几何重叠因子

Fig. 3 Geometric overlapping factor

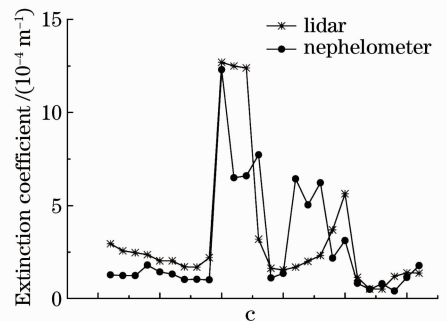


图 4 雷达和浊度仪数据对比

Fig. 4 Lidar data and nephelometer data

3.2 2011 年 4 月以及全年不同天气下气溶胶光学厚度连续观测结果

为了更好地观察气溶胶的变化,根据下式求出其光学厚度:

$$D_o = \int_0^z \alpha(z') dz' \quad (2)$$

表 1 为 2011 年 4 月份的一些观测数据(由于天气等条件限制,未能连续观测)。为避免背景噪声过大,每次观测为 18:30~22:30,调整光子计数卡每 10000 次脉冲记录一个数据文件,约为 9 min。图 5 直观地绘出了光学厚度数据。

从表 1 数据可以明显看出,晴天的气溶胶光学厚度较低(均值为 0.299),而多云天气条件下气溶胶光学厚度较高,均值为 0.463。晴天和多云天气光学厚度相差很大,且均偏大,可能是因为局部地区污染导致。同时,风向为东南的时候所观测到的光学厚度很小。观测基地位于南京北郊,其北面为工厂集结地,南面为南京市市区,当风向偏向于南或北时,均有不同程度的污染会随风扩散而来。

表 2 为 2011 年全年所观测的月平均光学厚度(1 月、2 月、8 月由于种种原因没有进行观测),其中主要在晴和多云天气进行观测。从表 2 以及图 6 中观察发现全年光学厚度呈现一个先变大后变小的趋势,从测量的结果来看,7 月、9 月、10 月光学厚度稍大,可能是因为这几个月中南京处于东南季风影响下,将南面市

区中的汽车尾气等气溶胶带来。同时从测量结果的方差中可以看出数据整体上具有较高的可信度,9月所测数据方差最大,说明9月气溶胶日变化比较剧烈,这可能是由于9月处于降雨高峰期,雨前与雨后空气气溶胶变化很大。

表1 2011年4月观测数据

Table 1 Data in April, 2011

Date	Weather	D_o	Wind
2011-04-01	Cloudy becoming slight rain	0.423	Northeast by east
2011-04-04	Fine	0.277	East
2011-04-08	Cloudy	0.582	Southwest
2011-04-10	Fine becoming cloudy	0.614	West, northwest
2011-04-11	Fine	0.212	Southeast by east
2011-04-12	Fine becoming cloudy	0.442	Southeast by east
2011-04-13	Cloudy	0.349	Southeast by east
2011-04-14	Fine becoming cloudy	0.552	Southwest, no wind
2011-04-17	Cloudy	0.540	West, northwest by north
2011-04-18	Fine becoming cloudy	0.349	Northwest by north
2011-04-19	Fine	0.292	Southeast by east
2011-04-20	Fine	0.300	Southeast by east
2011-04-23	Fine becoming cloudy	0.413	Southwest by west
2011-04-24	Fine	0.412	No wind
2011-04-25	Cloudy	0.459	Southwest
2011-04-26	Cloudy	0.346	East, southeast by east
2011-04-27	Cloudy becoming fine	0.408	Northwest, southwest
2011-04-28	Fine becoming cloudy	0.422	Southeast by east

表2 2011年的月份光学厚度数据

Table 2 Monthly optical depth data of 2011

Month	3	4	5	6	7	9	10	11	12
Optical depth	0.344	0.411	0.375	0.367	0.472	0.496	0.459	0.390	0.331
Observing days	15	18	22	16	15	12	16	16	20
Variance	0.008	0.012	0.014	0.015	0.022	0.024	0.015	0.016	0.013

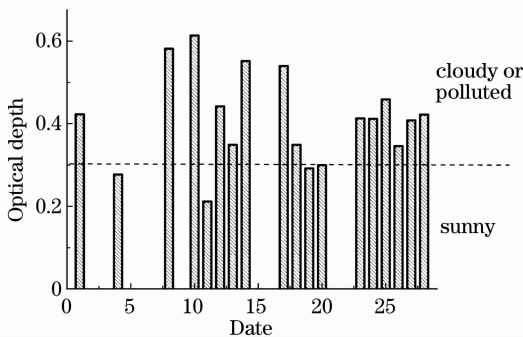


图5 2011年4月光学厚度日变化

Fig. 5 Optical depth daily variation in April 2011

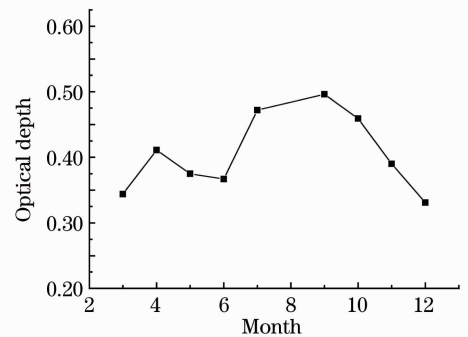


图6 2011年的月均光学厚度变化

Fig. 6 Optical depth monthly variation of 2011

4 南京北郊层云观测

4.1 含云数据处理

当所探测的空气中含有云等浓稠密气溶胶时,应考虑多次散射效应,此时的激光雷达方程应改为

$$p(r) = \frac{k\beta(r)}{r^2} \exp\left[-2 \int_0^r \eta(r') dr'\right], \quad (3)$$

式中 k 为雷达系统常数, r 为激光束在云层内部穿透发生散射的距离,即散射点距离云底的高度, η 为多次散射因子,其值取决于云的光学厚度、云粒子相函数、望远镜孔径和视场角以及云的厚度等因素。在云层外 $\eta =$

1, 在云层内有

$$\eta(r) = 1 - \frac{\ln[B_{\text{mss}}(r)]}{2\delta(r)}, \quad (4)$$

式中

$$\delta(r) = - \int_0^r \sigma(r') dr', \quad (5)$$

B_{mss} 为总的多次散射与单次散射之比, 可以利用 Monte Carlo 模型模拟计算。李颖颖等^[13] 根据水云的单次散射相函数利用 Monte Carlo 模型对多次散射的影响进行了模拟计算, 得到望远镜视场角为 1 mrad 的 B_{mss} 值与激光束在云层中的穿透深度的关系近似为直线: $B_{\text{mss}} = 0.412r + 0.008$ 。利用改进的 Fernald 方法^[14] 求解方程:

$$\beta_m(r) + \beta_a(r) = \frac{X(r) \exp\left[-2(\eta_a - s_m) \int_{r_c}^r \beta_m(z) dz\right]}{\frac{X(r)}{\beta_m(r_c) + \beta_a(r_c)} + 2\eta_a \int_{r_c}^r X(r) \exp\left[-2(\eta_a - s_m) \int_{r_c}^r \beta_m(z') dz'\right] dr}, \quad (6)$$

式中 r_c 为参考高度, s_a 为气溶胶消光散射比, β_a 为气溶胶的后向散射系数。

从距离校正信号和原始回波信号上可以很清楚地看到有突然的回波增大。激光束的回波距离校正信号在遇到强散射物体之后, 若从峰值迅速减弱至接近于 0 时, 则认为是激光无法穿透云层, 若距离校正信号到达峰值之后以一个坡度缓慢衰减时, 则可以认为是激光束已经穿透云层。从图 7(a) 看到激光束遇到云层体现出强反射, 回波信号增强, 而后回波信号有一个慢慢再变小的过程; 而图 7(b) 从距离校正信号上看激光束同样遇到强反射, 但信号从最大值直接衰减成 0, 可见激光束未能穿透云层。本文主要对激光束穿透的云层进行了观测和反演。

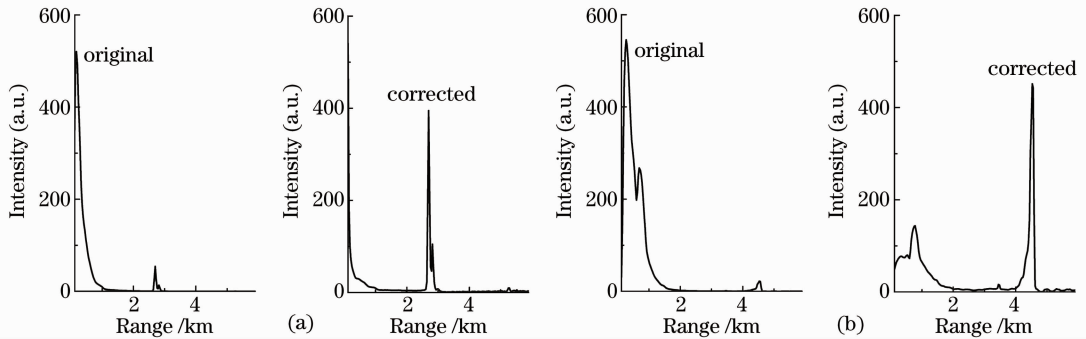


图 7 激光穿透(a)和未穿透(b)云层时的原始信号与距离校正信号

Fig. 7 Original signal and range corrected signal when the laser (a) penetrates and (b) does not penetrate the cloud layer

从多次观察的结果看来, 激光束基本能穿透中低空的水云, 而如果在低空出现大量雾霾甚至沙尘的情况下, 激光束则很难穿透该层。从图 8 上看, 经过校正后的云层消光比之前只考虑单次散射的要小, 大概只为未校正前的一半。其余部分有少许变化, 而云层底下的信号变大, 可能是因为多次散射信号到达低空, 会使原来的信号偏大, 导致测量出来的结果偏小。

4.2 不同天气条件下观测的典型气溶胶消光廓线

图 9 为不同天气条件下观测到的典型的气溶胶消光廓线。表 3 为所观测的部分层云数据, 可以看出层云的消光峰值变化很大, 最大值和最小值之间相差近 1 个数量级。厚度在 0.15~0.40 km 之间, 云层的高度都在

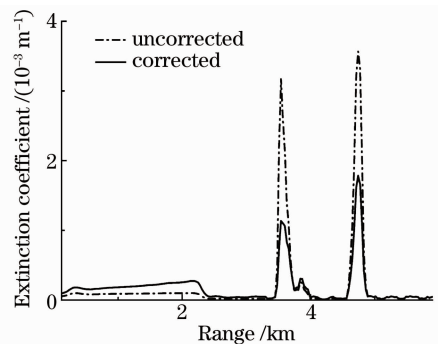


图 8 多次散射校正与未校正的消光系数

Fig. 8 Multiple scattering corrected and uncorrected extinction profile

1.3 km以上,而云层的光学厚度变化很大,最大值可达0.699,最小值只有0.049。表4为观测到的云底高度的频数表,可以看出南京地区在多云而无降雨的天气下,云层的云底高度大部分在2~4 km,约占63.2%,4~6 km约占26.3%,1~2 km约占10.5%。

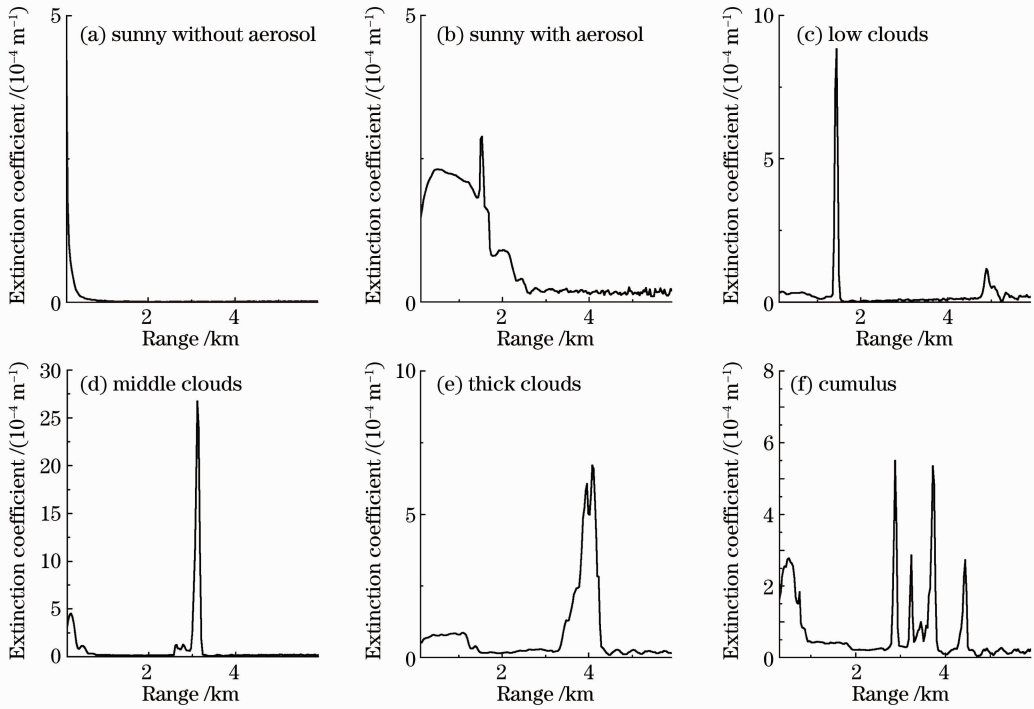


图9 不同天气下的消光廓线

Fig. 9 Extinction profiles under different weather conditions

表3 层云数据

Table 3 Data of stratus

Date	Cloud base height /km	Cloud thickness /km	Cloud maximum	
			extinction coefficient /m ⁻¹	Cloud optical depth
2010-05-19	5.28	0.33	0.00284	0.548
2010-05-30	2.76	0.15	0.00069	0.052
2011-04-01	3.42	0.18	0.00139	0.098
2011-05-09	1.62	0.09	0.00329	0.171
2011-05-24	4.62	0.24	0.00334	0.615
2011-07-01	5.55	0.24	0.00088	0.181
2011-07-03	2.91	0.39	0.00010	0.127
2011-09-10	1.38	0.12	0.00133	0.144
2011-11-17	2.97	0.27	0.00186	0.250
2011-11-27	3.93	0.18	0.00117	0.054
2011-12-09	3.99	0.48	0.00165	0.453
2012-01-02	3.69	0.15	0.00307	0.699
2012-02-16	3.03	0.48	0.00013	0.049
2012-02-20	2.73	0.15	0.00043	0.050

表4 云底高度统计

Table 4 Statistics of cloud base height

Height /km	1~2	2~4	4~6
Times	12	72	30

4.3 云内部消光结构

4.3.1 不对称云层结构

图 10 给出了 2010 年 5 月 19 日和 2011 年 4 月 1 日测到的消光廓线。从消光廓线上可以看出云层气溶胶的消光廓线呈现明显的不对称性,云顶或者云底气溶胶消光呈明显的陡降或者陡升的趋势。

4.3.2 对称云层结构

图 11 为 2011 年 5 月 24 日晚间不同时刻观测到的不同云气溶胶消光廓线,云层显示出很强的对称性。云层顶部和底部消光均没有出现陡降或者陡升的情形。

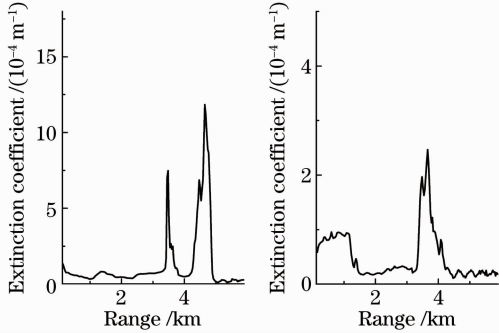


图 10 不对称云结构

Fig. 10 Structure of asymmetric clouds

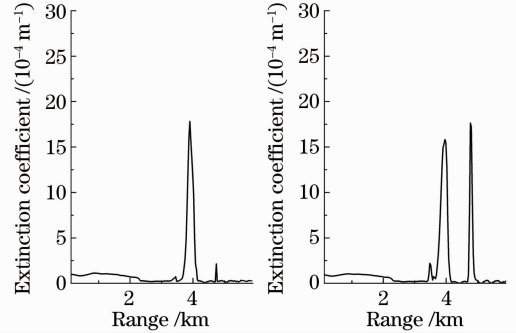


图 11 对称云结构

Fig. 11 Structure of symmetrical cloud

4.4 云层实时监测

图 12 为 2012 年 2 月 20 日 9:45~15:19 之间的消光廓线时序图,图 13 分别为 10:20 的消光廓线图和对流层光学厚度时序图。9:45 观察到云层高度约在 2.79 km,之后云层的高度越来越低。从图上可以看出,在 9:45~15:19 之间大约有 3 片云飘过,11:15、11:30 有很明显的间断点。云底高度呈现明显的下降趋势,云层的厚度基本保持不变,在 180 m 左右。从图 12 可以看出在 9:45~13:00 之间,低层大气气溶胶消光

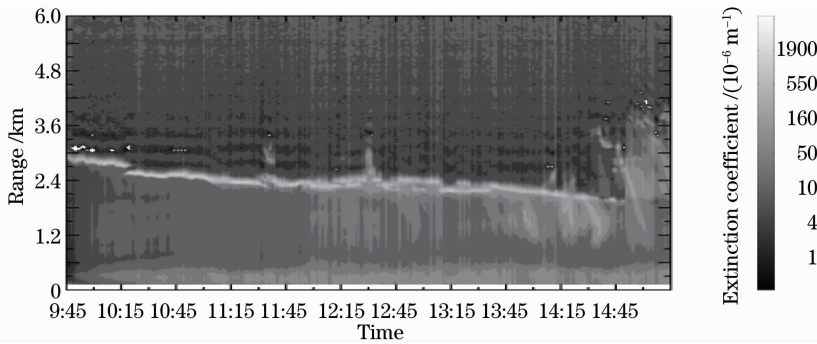


图 12 消光廓线时序图

Fig. 12 Time series plot of extinction profile

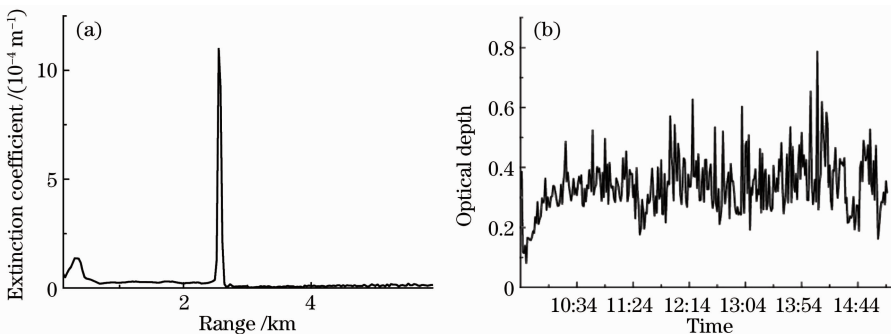


图 13 10:20 瞬时消光廓线(a)和光学厚度实时变化(b)

Fig. 13 (a) Extinction profile and (b) time series plot of optical depth at 10:20

很小,而在 13:00 之后低层大气开始出现大量气溶胶,查看当时的资料,在 13:00 之前均为东风,而在 13:00 之后为东南风,这与 2011 年 4 月份的观测结果吻合得很好。

5 一次气溶胶无风扩散

图 14 为 2011 年 4 月 14 日 19:00 观测到的一次无风气溶胶扩散过程,在 19:03 观察到 1.5 km 处出现一层高浓度气溶胶,其消光峰值达到 0.001 m^{-1} 量级,边界层出现在 1.7 km 处,在边界层上方空气气溶胶含量较少,气溶胶消光较小,为 10^{-5} m^{-1} 量级。在 19:15 观测到气溶胶高浓度层仍然存在,比之前稍微减小,而气溶胶层下方的空气中气溶胶消光增大。从图 14 可以看出,19:03~19:51 高浓度气溶胶层消光逐渐减小,同时向下方空气扩散,使得下方空气中气溶胶浓度增大,消光明显增强。当日风向在 19:00~20:00 之间为西南偏南和无风,可以推测是由于偏南风将市区中车辆尾气、人为污染等气溶胶带入到观测基地上空,之后由于无风,在大气湍流的作用下,气溶胶向下沉降,使得低空气溶胶消光明显增大。在此过程中大边界层没有受到影响,高度保持不变。整个扩散过程的数据如表 5 所示。

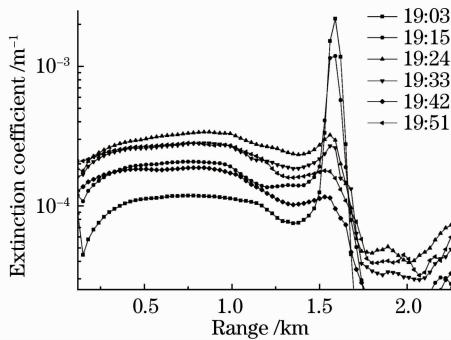


图 14 气溶胶扩散过程中消光廓线

Fig. 14 Extinction profile of spreading aerosol

表 5 气溶胶扩散过程数据

Table 5 Data in aerosol diffusing

Time	Boundary layer height /km	Maximum extinction / m^{-1}	Optical depth from ground to boundary
19:03	1.70	0.00219	0.294
19:15	1.70	0.00119	0.328
19:24	1.70	0.00034	0.332
19:33	1.70	0.00028	0.338
19:42	1.70	0.00028	0.324
19:51	1.70	0.00025	0.286

6 结束语

利用中国气象局观测基地的 RRML 设备对南京地区气溶胶消光进行了全年观测。对多云和晴天天气下气溶胶的观测结果体现了激光雷达对云层和气溶胶实时观测的能力,可实现对云层内部消光结构的准确探测。以上工作还需进一步推进,尤其是在对更多类型的层云的观测以及其他各种气象因素的影响等方面。

参 考 文 献

- 1 Y. Sasano. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24): 4941~4952
- 2 Lei Chengxin, Zhang Huafu, Liu Hanfa. Study of extinction characteristics of solar radiation by soot aerosols[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3373~3377
类成新, 张化福, 刘汉法. 煤烟气溶胶粒子对太阳辐射的消光特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3373~3377
- 3 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Measurements of thermal profiles in the stratosphere and lower mesosphere with Rayleigh scattering lidar[J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2002, **26**(1): 23~29
吴永华, 胡欢陵, 胡顺星 等. 瑞利散射激光雷达探测平流层和中间层低层大气温度[J]. *大气科学*, 2002, **26**(1): 23~29
- 4 Wu Yonghua, Li Tao, Zhou Jun *et al.*. Raman lidar measured temperature profiles in the mid-and upper troposphere[J]. *Chinese J. Atmospheric Sciences*, 2002, **26**(5): 702~708
吴永华, 李陶, 周军 等. Raman 激光雷达探测对流层中上部大气温度分布[J]. *大气科学*, 2002, **26**(5): 702~708
- 5 Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi *et al.*. Retrieval of polluted aerosol optical properties over coastal water[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(6): 060101
王家成, 乔延利, 杨世植 等. 近海污染大气气溶胶光学性质反演研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 060101
- 6 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
- 7 Zhang Qingze, Zhang Hui, Wang Ping *et al.*. Retrieval methods of cirrus cloud effective lidar ratio[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 060102
- 张清泽, 张 辉, 王 平等. 卷云有效激光雷达比反演方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(6): 060102
- 8 E. Giannakaki, D. S. Balis, V. Amiridis *et al.*. Optical and geometrical characteristics of cirrus clouds over a Southern European lidar station[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, **7**(21): 5519~5530
- 9 Bo Guangyu, Zhong Zhiqing, Liu Bo *et al.*. Design of optical receiver and signal detection unit for combined Rayleigh-Rammi-Mie lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3020~3025
- 伯广宇, 钟志庆, 刘 博 等. 瑞利-拉曼-米氏激光雷达光学接收和信号检测设计[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 3020~3025
- 10 J. D. Klett. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 211~220
- 11 Zhang Wenyu, Wang Yinqi, Song Jiayao *et al.*. Research on logarithmic ratio k aerosol extinction using lidar[J]. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**(5): 1083~1087
- 张文煜, 王音淇, 宋嘉尧 等. 激光雷达反演参数 k 值的研究[J]. 高原气象, 2008, **27**(5): 1083~1087
- 12 He Yinghong, Andrew Yuk Sun Cheng, Cheng Juan *et al.*. The correction of short-range laser lidar returns with fitting to lidar range-adjusted power[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 289~292
- 贺应红, 郑玉臣, 程 娟 等. 米氏散射激光雷达近场距离校正函数曲线拟合法修正[J]. 光学学报, 2005, **25**(3): 289~292
- 13 Li Yingying, Sun Dongsong, Wang Zhenzhu *et al.*. Study of clouds multiple-scattering influence on lidar measurement[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(6): 611~613
- 李颖颖, 孙东松, 王珍珠 等. 云的多次散射对激光雷达测量结果影响的研究[J]. 激光技术, 2008, **32**(6): 611~613
- 14 Tong Gui, Liao Wenhe, Liang Chun. Modal reconstruction of continuous membrane mirrors based on the simulated annealing[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(5): 517~520
- 童 桂, 廖文和, 梁 春. 基于模拟退火的连续膜变形镜最优模式复原[J]. 激光技术, 2008, **32**(5): 517~520