

# 激光雷达对一次沙尘天气探测与分析

郭本军 刘 莉 黄丹萍 王玲玲 李学立

(辽宁省大连市气象局, 116001)

**提 要:** 利用中韩合作沙尘暴监测项目的微脉冲激光雷达(MPL)观测了2005年4月28日影响大连的一次沙尘天气过程。MPL遥感发现影响大连的沙尘气溶胶层位于0~5km的高度,厚度达5km多。通过激光雷达对大气气溶胶探测与分析,得到了一些沙尘过程对流层气溶胶分布的典型结果,并分析和讨论了沙尘过程气溶胶消光系数的垂直分布和演变特征。基本分析表明,本次沙尘过程的外源性特征明显,并且大气层结对气溶胶(沙尘)的扩散、沉降起着重要作用。

**关键词:** 激光雷达 气溶胶 沙尘 消光系数

## Analysis of Lidar Measurements from a Dust Event

Guo Benjun Liu Li Huang Danping Wang Lingling Li Xueli

(Dalian Meteorological Office, Liaoning Province 116001)

**Abstract:** A typical dust event that passed over Dalian (121.63°E, 38.90°N) on Apr. 28, 2005 has been observed by a micro-pulse Lidar (MPL) in the framework of China-Korea Dust Monitoring Program. It is found that the dust layer located in 0~5km above the ground level is more than 5km in geometrical depth. Some typical extinction coefficients of atmospheric aerosol distribution were obtained by analysis of Lidar measurements from this dust event. Vertical distribution and developing characteristic of aerosol extinction coefficient were analyzed and discussed in this sand-dust process. This study shows that this dust air mass was transported to Dalian at long distance. The stable atmospheric stratification plays an important role in the diffuse and fallout of aerosol.

**Key Words:** lidar aerosol sand-dust extinction coefficient

### 引 言

大气气溶胶是由各种固体和液体微粒悬

浮于大气中形成的弥散系。沙尘是大气环境中组成复杂、危害较大的污染物之一<sup>[1-2]</sup>,沙尘气溶胶可以通过长距离输送对区域甚至全球气候环境变化以及生物化学循环产生重要

影响<sup>[3-4]</sup>。作为世界四大沙尘来源之一的亚洲沙尘暴已经在国际上引起了广泛的关注<sup>[5]</sup>,生成亚洲沙尘暴天气的来源主要有塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠<sup>[6]</sup>,由此产生的沙尘可以从蒙古和中国西部源地输送到中国东部、韩国、日本乃至美国的夏威夷和西海岸<sup>[7]</sup>,从而对农业、城市交通和人类的生产生活造成很大的影响。关于沙尘天气发生的条件、过程及其危害已有不少研究,近十几年来,我国学者也开始对沙尘气溶胶物理化学特性<sup>[8]</sup>、近地面特征<sup>[9]</sup>、遥感分析<sup>[10]</sup>,成因分析<sup>[11]</sup>等做了深入的研究,而激光雷达技术的发展为大气探测提供了有力的探测工具<sup>[12]</sup>。2004年8月,中韩两国合作在大连建设投入业务化运行监测大气气溶胶的激光雷达,至今已成功监测到10余次沙尘过程。其中2005年4月28日到29日的沙尘过程所包含的丰富大气信息充分体现了激光雷达的优势,利用该部微脉冲激光雷达对沙尘的遥感信息,结合气象条件的分析,获取了沙尘天气时大连上空的气溶胶分布及变化规律,为沙尘污染的防治提供科学依据。

## 1 沙尘天气和大气层结实况

2005年4月27日在蒙古国中北部生成的蒙古气旋携卷着大量沙尘,造成了一次沙尘天气过程,随着蒙古气旋的东移,沙尘天气不断沿其东南路径扩散,致使我国华北、东北地区产生沙尘或浮尘天气,4月28日在高空偏西气流的输送下,沙尘区东移至华北地区,并经渤海减弱后至大连地区,在高空形成一条东西向的沙尘带,处于下游的大连地区也被沙尘笼罩(图1a,见彩页)。

EOS/MOD01S(TERRA) 遥感卫星29日下午13时监测到大连地区仍然受沙尘影响(图1b,见彩页),同28日同期相比,遥感沙尘的强度有所减弱,从华北至辽宁全境上

空为大片沙尘区。大连地面观测可吸入颗粒物PM10日平均值为 $0.164\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,空气污染指数达3级,属于轻度污染。30日随着高空沙尘带的东移和浮尘沉降,我区的空气质量逐渐好转。

4月28日08时到20时的大连的高空探测记录显示,该时段大连的800到1000hPa高度一直存在一个明显的逆温层,其中以4月28日08时逆温层为最强和最为完整(如图2)。图2中包含了温度和露点的垂直廓线、状态曲线以及各标准等压面上的高度、温度、露点和风的填图。图2显示的800hPa高度以下至1000hPa高度为逆温层或近逆温层,直至4月29日08时,该逆温层消散。

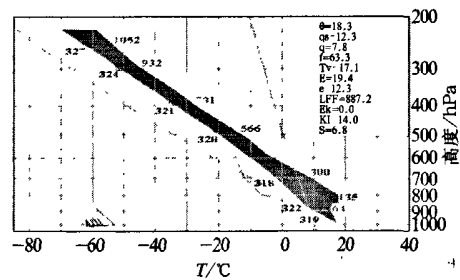


图2 4月28日08时大连高空层结探测

## 2 数据资料及分析方法

这台MPL采用的是Nd:YAG激光器,发射波长是532nm,发射功率 $4\mu\text{J}$ ,脉冲宽度小于1ns,探测模式为光子计数,发射望远镜垂直指向天空,距离分辨率设为15m。有自保护装置,当返回信号大时,为不损坏探测器,设置距离保护,200m以内不接受信号。由于机器性能和延长机器使用寿命的原因,这台MPL不能长时间连续观测。

### 2.1 数据资料

雷达连续观测时间 $t$ (10分钟)内观测的后向散射光子数,每小时时间内的平均值记

录为6组数据。本部雷达的有效探测高度通常小于8km,但能较好的完成对流层中下部气溶胶的探测。观测方式是每天的02、08、14、17、20、23点六次观测,和人工气象常规观测同步。每时次观测持续1小时,生成1个数据文件。

## 2.2 物理量

用来描述气溶胶物理特性的物理量主要有气溶胶的浓度、粒子尺度谱、粒子的光折射率、消光系数和光学厚度等。本文以较为通用的消光系数来分析气溶胶物理特性。

## 2.3 反演方法

本文以 Fernald 积分法求解激光雷达方程,它是将空气分子和气溶胶粒子的消光分别考虑来求解激光雷达方程<sup>[13-14]</sup>,是激光雷达方程各种反演方法中具有代表性也是最常用的一种方法。

## 2.4 气溶胶后向散射消光系数

空气分子的后向散射消光系数使用美国标准大气模式获得的空气分子密度的垂直分布廓线,再由分子 Rayleigh 散射理论计算得到。下文图中所涉及的气溶胶 Rayleigh 散射消光系数的垂直分布廓线均用虚线图示。

## 3 探测分析结果与讨论

### 3.1 典型的气溶胶及沙尘消光系数垂直特征

由于包括沙尘在内的对流层气溶胶的形成与地球表面的生态环境和人类活动紧密相关。因而,对流层气溶胶一般具有浓度大,粒子尺度谱范围宽,时-空分布复杂多变等特点。图3给出了对流层下部气溶胶消光系数垂直结构的两个典型结果。

图3(a)为2004年7月10日0时的消光系数廓线,天气实况为:无低云,能见度8km。

该时次的消光廓线反映了对流层下部气溶胶消光系数的一般特点:气溶胶消光系数在近地面较大,随着高度的增加,总的趋势是逐渐减小,一般能跨越2~3个数量级,在清洁的大气高层与空气分子 Rayleigh 散射消光系数的垂直廓线交汇。

有时对流层下部气溶胶消光系数不会如图3(a)所示的那样随高度逐渐减小,图3(b)是4月29日14时本次沙尘过程的一次消光系数廓线,在对流层中下部出现一个充分发展的气溶胶层(混合层),富含大量的气溶胶(沙尘)粒子,层高1~5km。它反映了本次沙尘过程典型的气溶胶多层结构分布。从地面到0.5km高度,大气较为清洁;0.5~1.5km

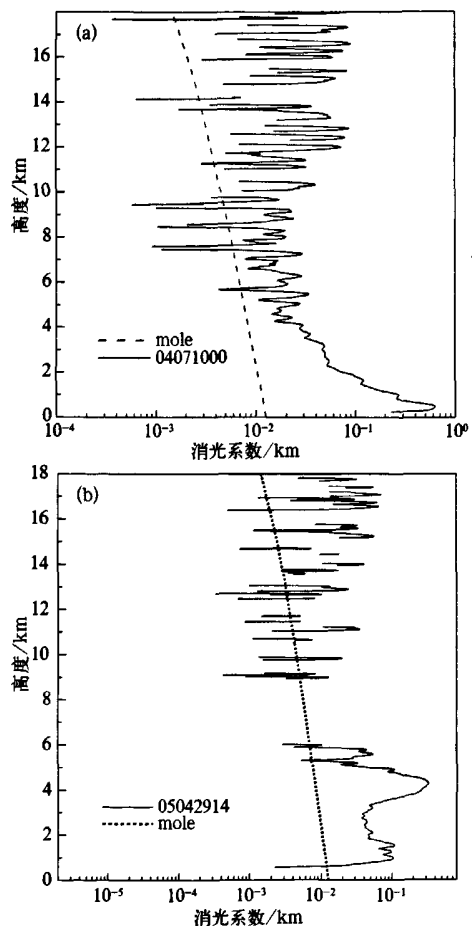


图3 2004年7月10日0时(a)和2005年4月29日14时(b)消光系数廓线

高度,气溶胶的消光系数要比大气分子的消光系数大一个数量级左右;而在4km上下还存在一个厚度近2km的气溶胶(沙尘)相对富积层,气溶胶的消光系数峰值要比大气分子的消光系数大1.8个数量级左右;在5km左右气溶胶的消光系数廓线与空气分子Rayleigh散射消光系数的廓线相交,大气较为清洁。另外消光系数廓线在低于6km高度出现了“突起”,人工目测和遥感资料证实为卷云;6~9km高度的气溶胶消光系数空白区,原因不详,但前期的激光雷达维修报告相关情况说明中,认为此种情况可能是由于高空的风速较大,高层大气比较洁净所引起的。

### 3.2 沙尘过程气溶胶消光系数演变特征

由于2005年4月28日沙尘过程前,大连天空状况有云雾,但结合遥感资料显示,沙尘来临时,也就是4月28日的8时至28日23时为无云雾的天气(见表1),激光雷达中

低层大气气溶胶探测的数据较为完整,后期虽然有少量的中高云,但对激光雷达探测数据的反演、分析影响不大。

沙尘过程中各主要时次的消光系数廓线是各小时的平均消光系数廓线,从各廓线的高度来看,高于6km的廓线就沿空气分子Rayleigh散射消光系数的垂直分布廓线震荡,所以雷达对这次过程的探测高度在6km以下为可用数据,而且气溶胶(沙尘)主要在5km以下高度(图4,见彩页)。从沙尘过程消光系数廓线的演变来看(图5,见彩页),4月28日08时开始,大气高层出现气溶胶(沙尘)富积现象,分布在高度为2.5到5.0km范围内;14时、17时,气溶胶(沙尘)消光系数减小,减少近0.5~1个数量级;28日23时、29日02时、29日08时,气溶胶(沙尘)消光系数峰值又增大至28日08时的水平,可是高度明显降低,至29日14时仍然延续着这种峰值高度降低的趋势,但气溶胶(沙尘)消光系数减小,减少1个数量级左右。

表1 消光系数指标和云雾状况

时间	最低高度/km	最高高度/km	最大峰值高度/km	最大峰值量级	云雾状况
28日08时	2.5	5.0	3.5	2	无
28日14时	2.5	4.5	3.5	0.5	无
28日17时	1.5	4.5	3.5,4.0	1	无
28日20时	2.6	4.3	3.1	2.1	无
28日23时	1.9	4.8	2.7,4.0	2.5	无
29日02时	1.5	4.8	2.7	2.5	云高2.5km
29日08时	1.0	4.5	1.5,3.3	2.5	云高4.5km
29日14时	0.6	3.3	0.8~1.5,4.0	1,1.8	卷云高6km

### 3.3 讨论

本次沙尘过程的外源性特征明显,大气高层出现气溶胶(沙尘)富积现象首先出现在西风环流的高层大气,过程的前期大气低层较为清洁,而且沙尘过程大连的地面风速一直较小,没有本地生成沙尘的条件,因此沙尘过程后期(4月29日14时)的低层出现气溶胶(沙尘)富积情况,可以判断为外源性沙尘的重力沉降。另外,4月28日午后的14时、

17时,气溶胶(沙尘)消光系数有所减小。究其原因,可能是外源性沙尘有间歇性的特点所致。综合遥感资料和人工观测资料分析和图5a、图5b判定,沙尘过程主要为4月28日08时到4月29日20时,而图5a中的28日02时、05时回波较强的为云;这次外源性沙尘过程沙尘进入高度为3.5km上下,厚度近2km。

大气层结对气溶胶(沙尘)的扩散、沉降起着关键作用。4月28日08时到20时的

大连的高空探测记录显示大连的 800 ~ 1000hPa 高度一直存在一个明显的逆温层(如图 2),逆温层由于气团稳定,没有湍流,故称为“清洁层”。在消光系数时间序列图(图 5)中,从 4 月 28 日 02 时到 29 日 05 时,大气气溶胶被“清洁层”分成明显的上下双层结构,上层为云层或外源性沙尘气溶胶层,下层为城市本地固有的气溶胶层。逆温层的高度和沙尘消光系数峰区廓线的最低高度(如图 4)吻合;并且峰区廓线的最低高度随着逆温层的高度降低而降低,这在 29 日 02~08 时尤为明显。也就是说,在 29 日 08 时以前外源性气溶胶(沙尘)受制于逆温层,在逆温层的“承托”下,只在在逆温层之上传输、扩散,对逆温层之下大气的影晌较小;而没有逆温层时,沙尘气溶胶向地面的扩散、沉降速度将加快。事实也是这样:大连近地面的空气质量恶化并不是卫星遥感资料显示较强的 28 日,而是从 29 日 08 时这个逆温层的消散而开始的,而这时卫星遥感资料显示较弱。

白天和夜间气溶胶消光系数分布规律:通常在白天,尤其是午后,由于太阳与地表热交换作用,垂直对流剧烈,对流层气溶胶粒子浓度的空间分布较广,而夜晚则较为缓和。本次沙尘过程这种昼夜分布差异特征也比较明显,4 月 29 日 14 时的气溶胶(沙尘)消光系数廓线如图 3(b)显示,廓线在 0.8 ~ 1.5km 高度上呈锯齿状多峰值的剧烈波动特点,而 4 月 28 日 23 时的廓线则平滑得多。说明夜晚气溶胶粒子的变化要比白天缓和得多。

云对气溶胶探测的影响:图 3(b)显示的是 4 月 29 日 14 时的气溶胶(沙尘)消光系数廓线,为晴天且高层处有可穿透卷云(高度 6km 处)时的测量分析结果,消光系数廓线清晰,整层大气垂直分布信息完整;而 28 日

02 时、28 日 08 时以及 29 日 20 时,为有不可穿透云层时的测量分析结果,激光信号被云层“屏蔽”,云上的气溶胶(沙尘)记录为空白,仅有云下的有限资料。所以云对气溶胶的探测有着重要的影响,而且对于激光雷达资料的应用,如区分是沙尘还是云,现在还是需要综合遥感资料和人工目视观测资料来分析区分。

#### 4 结 语

从激光雷达对 2005 年 4 月 28 日影响大连的沙尘天气过程的监测分析可看出,激光雷达能够监测大气成分的空间分布,并具有测量精度高,时空分辨能力强,测量范围大,监测的实时性、相对连续性等优势。也可观测到沙尘对大气气溶胶的时空变化影响、沙尘的间歇性、云底高度,白天和夜间气溶胶消光系数分布规律,尤其是大气边界层中的逆温层对沙尘的沉降和扩散的影响。但在应用中也发现不足之处:受观测时次的限制,激光雷达资料不连续,部分削弱了分析沙尘演变的规律;有云天气时,不能探测到整层大气垂直分布完整信息;对于近距离(尤其是 500m 以下的高度)探测,需要对激光雷达资料做几何重叠因子订正。另外,该部雷达有自保护装置,即当返回信号大时,为不损坏探测器,设置距离保护,200m 以内不接受信号,是否对沙尘天气时的大气底层气溶胶的探测有影响,也有待于评估。

#### 参考文献

- [1] 刘毅,王明星,张仁健.中国气溶胶研究进展[J],气候与环境研究,1999,4(4):406-414.
- [2] 刘强,王明星,李晶,等.大气气溶胶研究现状和发展趋势[J].中国粉体技术,1999,5(3):17-23.
- [3] Sokolik I N, Winker D M, Bergametti G, et al. In-

- roduction to special section: outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D16): 18015-18027.
- [4] Zhang M G, Uno I, Akimoto H, et al. Large-scale structure of trace gas and aerosols distributions over the Western Pacific Ocean during TRACE-P[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108 ( D21 ): doi: 10. 1029/2002JD002946.
- [5] Zhang X Y, Gong Z L, Shen Z X, et al. . Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001ACE-Asia: I. network observations[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D21): doi: 10.1029/2002JD002632.
- [6] Kurosaki Y, Mikami M. Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia[J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30 ( 14 ): doi: 10. 1029/2003GL017261.
- [7] Husar R B, Tratt D M, Schichtel B A, et al. The Asian dust of April 1998[J]. *J Geophys Res*, 2001, 106 (D16): 18317-18330.
- [8] 颜鹏, 毛节奏, 杨东贞, 等. 临安一次沙尘暴过程影响气溶胶物理化学特性演变的初步分析[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(4): 437-446.
- [9] 张仁健, 徐永富, 韩志伟. 北京春季沙尘暴的近地面特征[J]. *气象*, 2005, 31(2): 8-11.
- [10] 刘志丽, 马建文, 张国平, 等. 亚洲沙尘暴的遥感监测方法研究——以中国日本合作研究区为例[J]. *武汉大学学报*, 2005, 30(8): 708-711.
- [11] 姜学恭, 沈建国, 胡英华. 沙尘暴过程中的混合层特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(增刊): 63-71.
- [12] Edner H, Fredriksson K, Sunesson A, et al. Mobile remote sensing system for atmospheric monitoring[J]. *Appl Opt*, 1987, 26(19): 4330-4338.
- [13] F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl. Opt.* 1984, 23: 652-653.
- [14] 周军, 岳古明, 戚福第, 等. 大气气溶胶光学特性激光雷达探测[J]. *量子电子学报*, 1998, 15(2): 141-142.

# 郭本军等：激光雷达对一次沙尘天气探测与分析

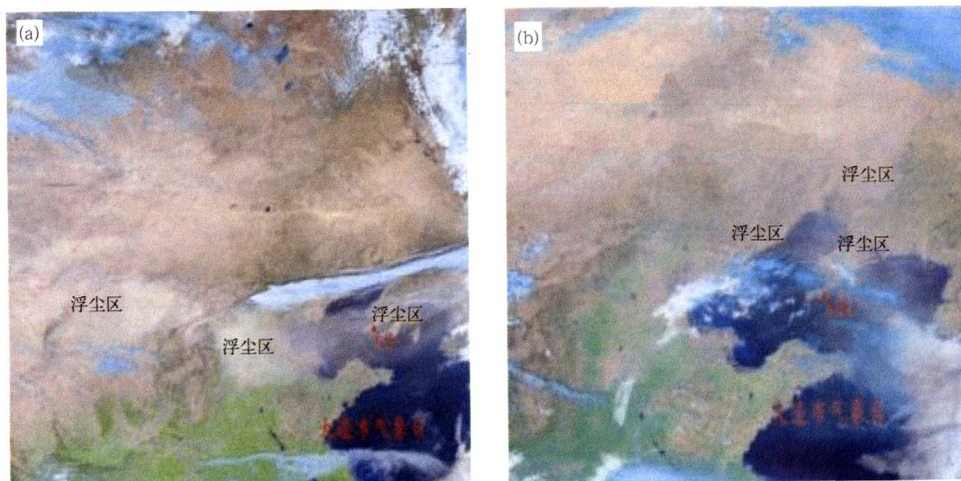


图1 2004年4月28日11时(a)和4月29日13时(b)EOS/MOD01S(TERRA)卫星沙尘监测

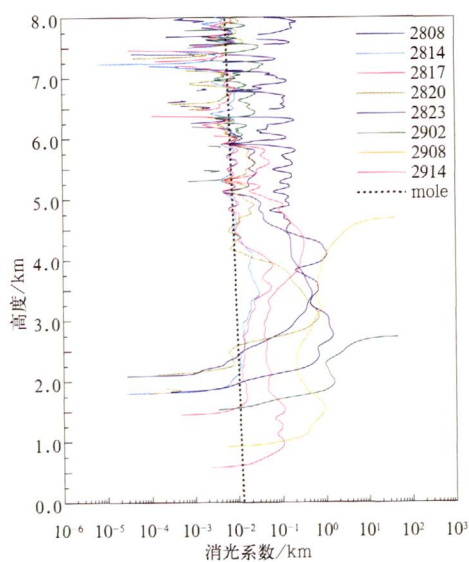


图4 2005年4月28日08时至4月29日14时沙尘过程中各主要时次的消光系数廓线图 (低层未作几何因子订正)

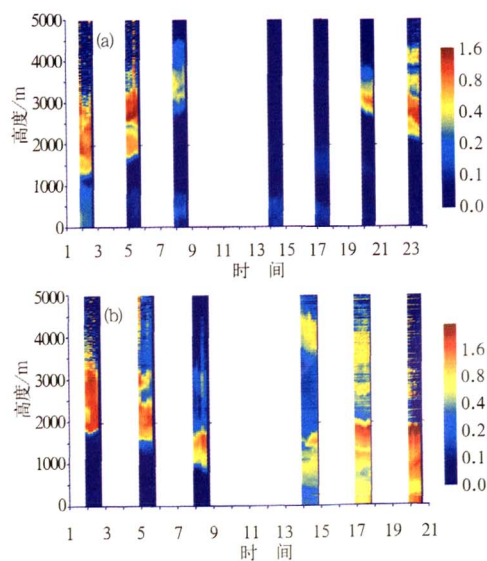


图5 雷达探测时次的消光系数时间序列图 (低层未作几何因子订正) 2005年4月28日(a), 4月29日(b)