

郭本军,贺千山,李成才,等.大连一次沙尘天气的遥感研究[J].南京气象学院学报,2008,31(5):624-632.

大连一次沙尘天气的遥感研究

郭本军¹,贺千山²,李成才³,毛节泰³,
辛跳儿²,陈希壮¹,李红斌¹,黄艇¹,宋煜¹

(1. 大连市气象局,辽宁 大连 116011;2. 上海市气象局,上海 201100;3. 北京大学 物理学院 大气科学系,北京 100871)

摘要:利用中韩合作沙尘暴监测项目的微脉冲激光雷达(micro pulse lidar,MPL)观测了2005年11月6日影响大连的一次沙尘天气过程。MPL观测发现,影响大连的沙尘气溶胶层位于1~2 km高度,厚度达1 km,层内最大消光系数高达 1.08 km^{-1} ,占整层气溶胶光学厚度(aerosol optical depth,AOD)的47%,接触到地面后可使地面消光系数达到 0.23 km^{-1} 。沙尘气溶胶层与气象要素的垂直分布密切相关,整层的相对湿度很低。沙尘气团影响时地面空气动力学直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的粒子质量浓度(PM_{10})达到峰值 $1678.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{10} 的时间变化与MPL反演的近地面消光系数相当一致,两者之间的转换系数在1.94到 $6.50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间。

关键词:微脉冲激光雷达;沙尘气溶胶;消光系数;垂直分布

中图分类号:P407.5 文献标识码:A 文章编号:1000-2022(2008)05-0624-09

Remote Sensing Study of a Dust Event over Dalian

GUO Ben-jun¹, HE Qian-shan², LI Cheng-cai³, MAO Jie-tai³,

XIN Tiao-er², CHEN Xi-zhuang¹, LI Hong-bin¹, HUANG Ting¹, SONG Yu¹

(1. Dalian Meteorological Bureau, Dalian 116011, China; 2. Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 201100, China;
3. Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A dust event that passed over Dalian ($38.90^\circ\text{N}, 121.63^\circ\text{E}$) on November 6, 2005 has been observed by a micro-pulse lidar (MPL) of China-Korea cooperative Dust Monitoring Program. It is found that the dust layer extended upwards from 1 to 2 km above the ground level, with a peak extinction coefficient of 1.08 km^{-1} . Additionally, the aerosol optical depth (AOD) of this dust air mass accounts for 47% of that for the whole air column. The extinction coefficient on the ground surface increased to 0.23 km^{-1} when the dust entered to the atmospheric boundary layer in Dalian. The dust aerosol layer related closely with the vertical distribution of the meteorological parameters which was characterized by lower RH associated with the arid condition in desert area. The mass concentration of PM_{10} increased to $1678.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ when the dust air mass affected Dalian, which is in good agreement with the temporal evolution of the ground extinction coefficient retrieved from the MPL data. The conversion scale between the mass concentration of PM_{10} and the ground extinction coefficient varied in the range of 1.94 to $6.50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$.

Key words: micro-pulse lidar; dust aerosol; extinction coefficient; vertical distribution

0 引言

大气气溶胶在全球气候变化中扮演着十分重要的角色,由于其成分复杂、时空分布多变以及由此引

起的物理化学和光学作用多样性使得人们对它在全球气候辐射强迫中的定量作用了解得还很不完全^[1,2]。沙尘粒子作为大气气溶胶的一个重要来源^[3],通过吸收和散射太阳和红外辐射,造成大气

收稿日期:2007-05-28;改回日期:2008-04-07

基金项目:大连市气象局域2006—2007年度多轨道业务建设资助项目;上海市气象局研究型专项(YJ200701)

作者简介:郭本军(1971—),男,山东临邑人,工程师,研究方向为激光雷达等应用气象领域,guobj100@163.com.

的不同加热、冷却,进而影响大气环流和气候变化^[4]。近年研究显示,大气气溶胶是重要的气候驱动因子之一。政府间气候变化委员会第3次科学评估报告^[5]特别提出了矿物(沙尘)气溶胶的气候重要性。沙尘气溶胶还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^[6-7]。作为世界四大沙尘来源之一的亚洲沙尘已经在国际上引起了广泛关注^[8],塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠是亚洲沙尘的主要来源^[9],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^[10]。关于沙尘天气发生的条件、过程及其危害已有不少研究^[11-12],近十几年来,我国学者也对沙尘气溶胶物理化学特性、输送路径、遥感分析和成因分析等做了深入研究^[13-14]。

为了研究沙尘气溶胶对气候和环境的影响,必须对沙尘气溶胶进行长期连续的观测。利用激光雷达研究气溶胶光学属性的时空分布具有很大的优势^[15-17],尤其是对气溶胶的垂直分布探测。邱金桓等^[18]利用激光雷达探测了沙尘暴粒子的消光系数垂直分布特性,结果表明沙尘暴致使2 km高度范围内气溶胶光学厚度与消光系数可以有一个量级的变化。邱金桓等^[19]应用激光雷达和光度计探测了1988年4月北京地区3次沙尘暴过程中大气气溶胶光学特性和远距离输送时的垂直结构,发现沙尘暴期间大气柱沙尘总光学厚度在0.3至15之间变化,峰值光学厚度比平时大一个数量级。本文利用发生在大连地区的一次沙尘天气过程中微脉冲激光雷达(micro-pulse lidar, MPL)对沙尘的遥感信息,结合气象资料和地面气溶胶直接采样结果,分析沙尘天气时大连上空的气溶胶分布及变化规律,为沙尘气溶胶团的输送机理研究和沙尘污染的防治提供科学依据。

1 地理特征

激光雷达测站位于大连市气象局(121.63°E, 38.90°N, 海拔高度91.5 m)。大连位于中纬度亚欧大陆东岸,三面环海,具有明显的海洋性气候特征。春、秋、冬季受西伯利亚高压的影响,大连地区盛行西北、西、东北风^[20]。大连的地理位置有利于海陆风这种日变化的局地环流形成,由于其作用,即使在背景风很弱的形势下,城市区域与周边海洋仍然进行空气交换,使得大连的空气清洁度一般较好。如2002年5月和12月在大连市区的采样观测表

明,PM₁₀质量浓度的日均值普遍小于75 μg/m³,大气中的这种颗粒物含量符合国家规定一类地区的一级标准,空气质量状况很好^[21]。

2 观测和资料

2.1 MPL 观测与反演

为了探测远离沙尘源区沙尘输送路径上空气溶胶的时空变化,中韩合作沙尘暴监测项目在大连布设了一部微脉冲激光雷达MPL(生产厂家:CIMEL ELECTRONIQUE, 法国),这台MPL采用Nd:YAG激光器,发射波长532 nm,脉冲重复频率2 500 Hz。发射望远镜垂直指向天空,距离分辨率设为15 m。为了延长激光器的寿命并满足对气溶胶进行长期连续观测的需要,该MPL的工作方式设为连续观测1 h,停止2 h,这样一天之内可以取得不连续的8 h的气溶胶遥感数据,本文对每小时的数据做了平均。

原始lidar方程为

$$P(r) = C \cdot E \cdot (\beta_a(r) + \beta_m(r)) \cdot \exp(-2 \int_0^r (\sigma_a(z) + \sigma_m(z)) dz / r^2) \quad (1)$$

式中:P(r)是雷达探测器接收到的距离望远镜r处的光电子数(μs⁻¹);σ(z)为距离望远镜z处的气溶胶或大气分子的消光系数(km⁻¹);C是系统常数;E是发射激光脉冲能量(μJ);β(r)是距离r处的气溶胶或大气分子的后向散射系数(km⁻¹)。下标a和m分别表示气溶胶和大气分子。

根据Fernald^[22]的算法可以反演得到气溶胶后向散射系数为

$$\begin{aligned} \beta_a(r) = & \frac{X(r) \cdot \exp[-2(s_a - s_m) \int_0^r \beta_m(z) dz]}{C \cdot E - 2s_a \int_0^r X(z) \exp[-2(s_a - s_m) \int_0^z \beta_m(r') dr'] dz} \\ & - \beta_m(r). \end{aligned} \quad (2)$$

式中:s_m是大气分子的消光后向散射比,取8π/3;s_a是气溶胶的消光后向散射比;X(r)=P(r)r²,代表经过距离订正的雷达信号强度。

为了准确反演气溶胶的消光系数,必须确定lidar方程中的常数C。采用Welton等^[17]的方法,利用独立观测的气溶胶光学厚度配合激光雷达可以得到C值。2005年12月23日,在大连的雷达测站附近使用一台美国SOLAR LIGHT公司生产的MICROTOPS II型5波段太阳光度计(S/N:7335)对气溶胶光学厚度进行了观测,得到11时(北京时间,下同)和14时的小时平均气溶胶光学厚度分别为

0.19 和 0.17。采用 Welton 等^[17]的方法, r 取 8 ~ 10 km, 得到的仪器常数 C 的标定如图 1 所示, 图中 C 值随高度波动是由于信号噪声引起的。11 时和 14 时平均 C 值分别为 $(3.05 \pm 0.90) \times 10^8 \text{ km}^3 \cdot \text{sr}$ 和 $(3.15 \pm 0.90) \times 10^8 \text{ km}^3 \cdot \text{sr}$, 因此取平均值 $3.1 \times 10^8 \text{ km}^3 \cdot \text{sr}$ 时标定的误差估计在 29% 以内。

利用测量的气溶胶光学厚度 AOD(aerosol optical depth, AOD) 限定激光雷达反演的气溶胶消光系数的垂直积分, 可以获得柱平均 s_a ^[23], 通常利用太阳光度计配合激光雷达对大气气溶胶进行联合观测, 可以求取柱平均 s_a ^[24]。采用上述方法并结合上面取得的 C 值计算了 12 月 23 日 s_a 的柱平均值, 为 $(21 \pm 3) \text{ sr}$ 。在此项研究中, 由 MPL 遥感数据反演沙尘气溶胶的消光系数廓线,, 取 s_a 为 21 sr, 与文献[25]中利用 Mie 理论计算的沙尘气溶胶相应参数一致, 也与 Welton 等^[23]以及 Powell 等^[26]在 ACE-2 中使用的值较接近, 即 $(39 \pm 10) \text{ sr}$ 和 $(35 \pm 5) \text{ sr}$ 。研究中所用的值体现了海洋性和城市气溶胶的混合作用。

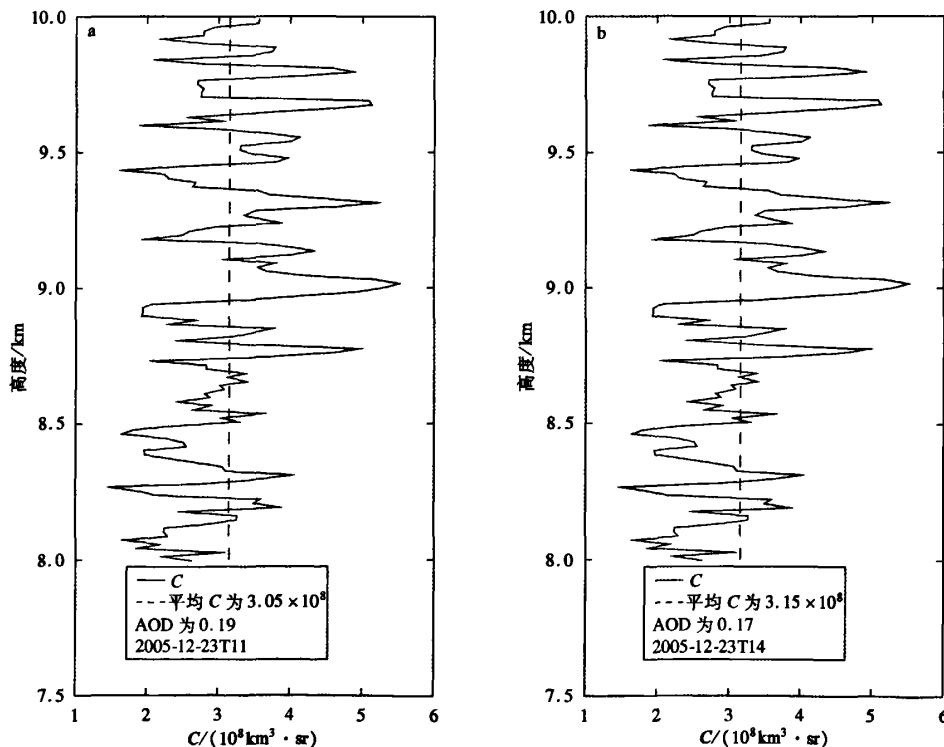


图 1 2005 年 12 月 23 日联合太阳光度计和 MPL 计算的 11 时(a)和 14 时(b)雷达常数 C
(采用的平均范围是 8 ~ 10 km)

Fig. 1 Lidar constant C derived by combination of MPL and sunphotometer
at (a) 11:00 BST and (b) 14:00 BST on December 23, 2005 (The value of C is averaged between 8 and 10 km)

利用激光雷达反演沙尘气溶胶光学特性时, 多次散射对雷达信号具有一定影响^[27]。Ackermann 等^[28]使用数值模拟方法, 研究了多次散射在反演对流层气溶胶消光系数时的影响, 他们假设大气边界层内的消光系数是常数, 边界层上的消光系数随高度呈指数递减, 并给出 5 种情况: 15.65、3.91、1.96、0.783 和 0.078 km^{-1} 。计算结果表明, 多次散射对激光雷达接收信号强度的贡献一般小于 10%, 绝不可能超过 20%。另外, 接收望远镜的面积与多次散射有直接的关系, 应该注意到 MPL 的接收望远镜面积较小(直径 20 cm), 也会降低多次散射的影响, 这是 MPL 在设计之初就考虑到的一种改进。事实上, 不管是地面能见度观测数值还是后文反演得到的消光系数廓线都表明, 沙尘气溶胶造成的消光系数不大于 1.96 km^{-1} 。因此, 根据 Ackermann 等^[28]的研究结果和 MPL 的接收望远镜特性, 此项研究中忽略了多次散射的效果, 由此造成的误差小于 10%。

2.2 PM₁₀的观测

紧邻激光雷达放置了一台 TEOM (型号: 1400A), 对 PM₁₀的质量浓度进行连续观测, 仪器每 5 min 记录一个数据。由于仪器对气溶胶进行了除湿处理, 因此得到的 PM₁₀为干燥状态下的气溶胶质量浓度。为了与激光雷达作对比, 本文仅采用记录中的小时平均数据。

2.3 气象数据

利用 08 时和 20 时两次常规的探空数据计算了位温、相对湿度和水平风向、风速的垂直廓线, 结合雷达数据分析气溶胶分布与气象条件的关系。利用大连市气象局的自动气象站 (automatic weather station, AWS) 观测得到了小时平均风温湿数据, 能见度仪记录了每小时地面能见度的变化。这两套观测设备均与 MPL 位于同一观测场内, 各种仪器之间相距不到 50 m。

3 结果与讨论

3.1 天气背景

从 2005 年 11 月 6 日 08 时 850 hPa 天气图上可以看到, 低压中心位于漠河西南侧附近, 此时温度槽与低压槽配置趋于重叠, 说明低压槽发展, 接近最强时期, 大连上空的风速由 5 日 20 时的 8 m/s (偏西风) 增强到 16 m/s (西北风), 槽后强劲的西北风 (大于 30 m/s) 有利于沙尘的长距离输送。11 月 4 日形成于极地的强低压系统在途经蒙古国与中国荒漠、戈壁地区后, 系统东南方的冷锋前后出现大量沙尘。

图 2 分别给出了从 5 日 08 时到 7 日 08 时 PM₁₀质量浓度、风向、风速、温度和相对湿度的时间序列。从图 2a 中可以看到, 6 日 03 时以前, PM₁₀质量浓度非常低, 不超过 149.2 μg/m³, 而且随时间变化不

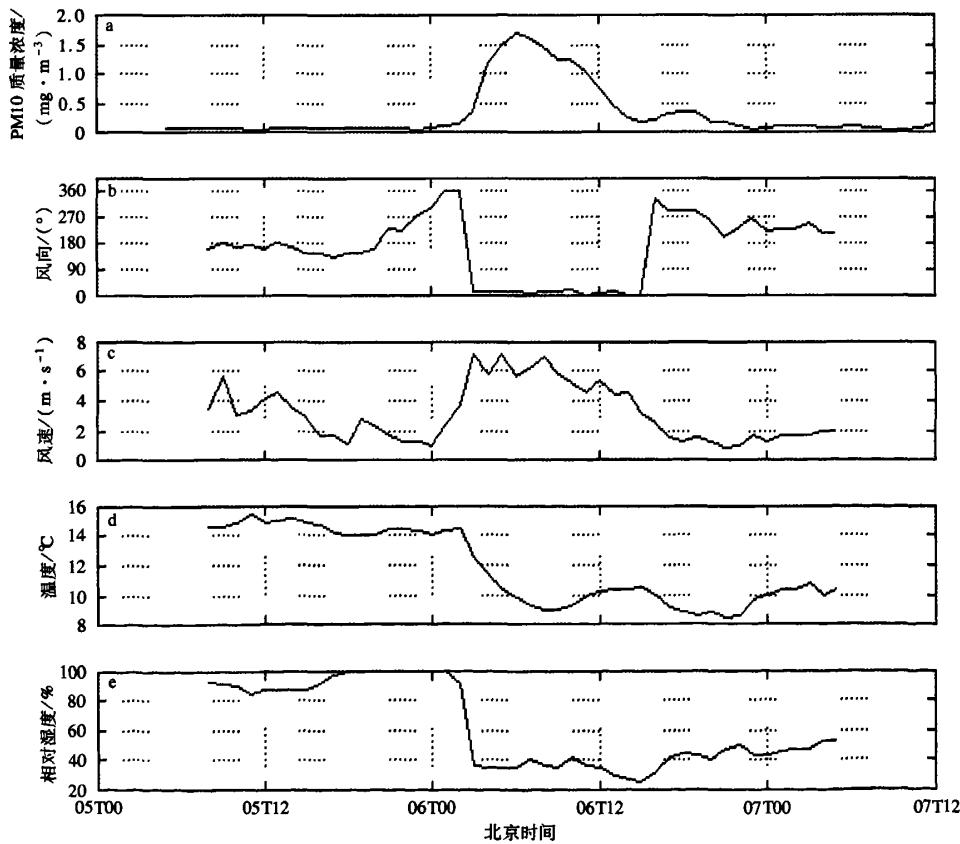


图 2 地面观测的沙尘事件发生前后 PM₁₀质量浓度 (a; mg · m⁻³) , 风向 (b) , 风速 (c; m/s) , 温度 (d; °C) 和相对湿度 (e; %) 的时间变化

Fig. 2 Temporal variations of (a) PM₁₀ mass concentration (mg · m⁻³) , (b) wind direction, (c) wind speed (m/s) , (d) temperature (°C) and (e) relative humidity (%) during the dust event on November 6, 2005 in Dalian

大,但从 03 时到 06 时的 4h 内,PM₁₀质量浓度从 343.4 μg/m³迅速增大到 1 678.9 μg/m³,随后缓慢下降,直到 20 时下降到沙尘事件之前的水平。PM₁₀质量浓度的变化表明,这次沙尘事件的持续时间为 6 日 03 时到 20 时,共 17 h。相应地,风、温、湿等气象参数(图 2b,2c,2d)在这段时间内均有显著变化,尤其风向在 5 日傍晚就有明显变化,从 5 日 18 时的 144°变为 6 日 02 时的 359°,此后一直维持北风,直到 16 时才转为偏南风;风速从 6 日 00 时的 1.0 m/s 很快增大到 03 时的 7.2 m/s,经过 6 h 的维持,在 16 时缓慢下降到 2.5 m/s;03 时左右的地表温度也有一个明显的降低过程,1 h 内下降幅度达 2.1 ℃,并在 09 时达到日间的最低点 8.9 ℃;相对湿度的变化同样十分明显,02 时以前一直维持在 92% 以上,甚至高达 100%,而到了 03 时突然降低到 37%,此后一直保持在 40% 以下,17 时略有回升并超过 40%。上述气象要素和气溶胶质量浓度的时间变化表现了整个沙尘事件的发生过程。同时还应该注意到,虽然大多数气象要素在 16 时左右已经恢复到沙尘事件之前的水平,但这时 PM₁₀质量浓度依然很高,再经过一段时间(3 h 左右)后才下降到事件之前的水平,这是因为沙尘气溶胶可以在空中悬浮很长一段时间,大的粒子在重力作用下很快沉积到地面,而小粒径的气溶胶粒子在沙尘团主体经过后仍然停留在空中,其悬浮时间与局地气象条件有关,如风切变、湍流强度、下沉气流等。沙尘团过境后的几个小时也是城市人类活动的高峰期,人为排放气溶胶也会对 PM₁₀有一定贡献,较小的风速有利于人为气溶胶的不断积累。

3.2 沙尘气溶胶的光学厚度分布

自 MODIS 应用以来,卫星遥感全球气溶胶光学厚度(AOD)成为了解气溶胶区域分布的有效手段^[29]。Kaufman 等^[30]指出,陆地上空的 AOD 产品精确度可达($\pm 0.05 \sim \pm 0.20$) × AOD。图 3a 是 2005 年 11 月 6 日 11 时(北京时间)MODIS 的 1、3 和 4 通道合成图像,右下角的白色区域为云,灰白色絮状是沙尘气溶胶团。图 3b 是由此反演得到的 550 nm AOD level 2 产品,最大 AOD 值位于我国黄海北部,大连地区上空 AOD 也较高,说明沙尘已经影响到这个地区。对于沙尘气溶胶而言,粒子的非球形特征会使 AOD 的反演误差增大。图 3b 中黄海中北部和渤海上空的 AOD 很大,但在山东半岛 AOD 相对较小,且与海上的气溶胶分布明显不连续。这是由于陆地和海面的 AOD 反演采用不同的

算法,我国近海的海水污染也会对反演结果造成一定误差,因此,这一区域海洋上空 MODIS 反演的 550 nm 的 AOD 产品只能定性分析沙尘气溶胶分布情况,在定量分析上存在较大误差。

根据图中沙尘气溶胶的区域分布情况看,6 日 11 时大连上空的沙尘空气团是整个沙尘系统的边缘,而沙尘气溶胶团大部分已经过境,MPL 测站周围的沙尘气溶胶水平分布很不均匀,在后文 MPL 消光系数分析中将详细讨论。

3.3 沙尘气溶胶层的激光雷达观测

11 月 6 日冷锋系统进入大连地区,此时大连处于低压辐合区。根据地面观测,11 月 6 日大连地区出现浮尘天气,最小能见度小于 6 km。图 4 给出 2005 年 11 月 6 日 MPL 观测的气溶胶归一化后向散射信号的时间变化。05 时,沙尘气溶胶团移到大连上空时,首先在边界层顶上空出现一层明显的沙尘气溶胶层,其中心位置在 1.5 km 左右,沙尘层的几何厚度在 05:30 达到最大,约 0.7 km,随着时间的推移上部沙尘层逐渐下降。虽然 06—08 时没有 lidar 数据,但从前后气溶胶空间分布的演变趋势看,06 时以后沙尘层与边界层发生接触并在湍流和下沉运动的作用下影响到地面的空气质量。日出后(08—09 时),对流的发展有利于上空的沙尘被带到地面,使沙尘在边界层中分布比较均匀,这在一定程度上是由于湍流的上下交换作用造成的。同时也可以从 MPL 信号中看到边界层高度的明显变化。采用文献[31]提出的方法得到 14 时混合层高度为 1.5 km,并且随着时间推移缓慢下降,18 时左右下降到白天的最小值 1.0 km。18 时以后,由于对流活动减弱,大气层结以稳定平流为主,夜间边界层的出现使得沙尘气溶胶驻留在 MPL 测站上空,悬浮在 1~3 km 的高度范围内,且由于主要的沙尘空气团已经过境,高空气溶胶后向散射信号不是很强。23—24 时,lidar 后向散射信号的垂直变化比较复杂,表明气溶胶团不仅水平分布不均匀,其内部结构的垂直变化也不均匀。

3.4 沙尘气溶胶的垂直结构

从 MPL 归一化后向散射信号反演的 2005 年 11 月 6 日 05 时、08 时和 20 时的气溶胶消光系数的垂直廓线(图 5)可以看到,当 05 时沙尘气溶胶层移到大连上空时,1~2 km 的消光系数陡然增加,1.6 km 处达最大,为 1.08 km⁻¹。从地面到 6 km 对消光系数积分得到的光学厚度为 1.16,而沙尘层(1~2 km)的光学厚度为 0.55,占整层气溶胶光学

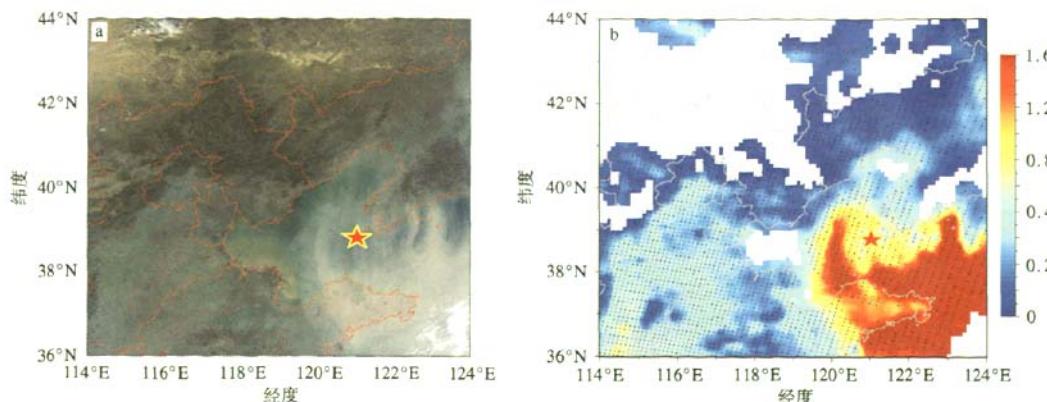


图3 2005年11月6日11:10时MODIS 1、3和4通道资料合成的真彩色图像(a)和MODIS遥感反演得到的550 nm气溶胶光学厚度(b)(图中的星号标示了雷达测站的位置)

Fig. 3 (a) True color image from the combination of channel 1, 3 and 4 on MODIS at 11:10 BST on November 6, 2005 and (b) AOD at 550 nm retrieved from MODIS data (The asterisk represents the site of MPL)

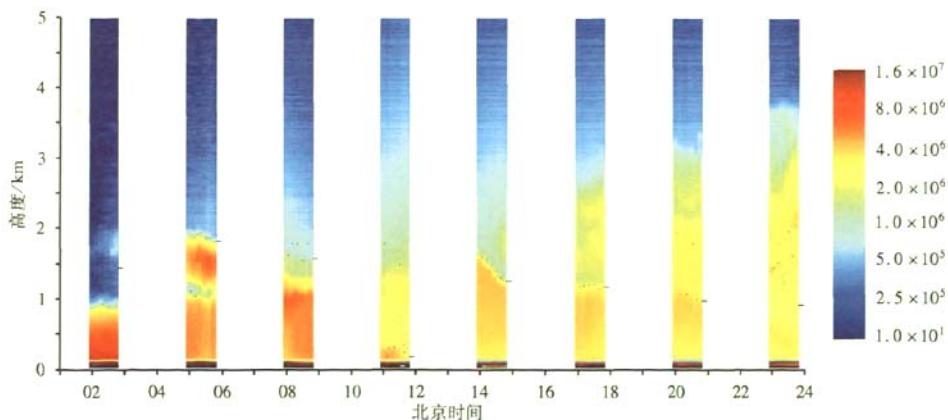


图4 2005年11月6日MPL观测的气溶胶归一化后向散射信号的时空变化
Fig. 4 Time-height cross section of the normalized range-corrected lidar signal observed by a micropulse lidar in Dalian on November 6, 2005

厚度的47%。同时还可以看到,沙尘层消光系数的垂直变化以最大值为中心呈准对称分布,沙尘层下部消光系数随高度的变化略比上部平缓一些,表明沙尘气溶胶团输送过程中在重力作用下粒子会不断下沉,导致气团内部的不均匀性。沙尘层在大尺度下沉的作用下融入城市边界层,并在对流混合的作用下影响到地面,致使地面水平能见度迅速下降到10 km以下。08时消光系数最大值已经降低到 0.68 km^{-1} ,并且边界层内的消光系数总体上比05时明显提高,整层光学厚度略减小,为0.80。05时和08时地面消光系数相差不大,05时为 0.23 km^{-1} ,

08时为 0.22 km^{-1} 。05时夜间逆温层限制气溶胶的扩散,到了08时白天混合层的发展以及海风的作用本应该使地面气溶胶移除,但沙尘气溶胶的影响抵消了这一作用,因此,08时地面大气浑浊度继续维在05时的水平。

20时的消光系数廓线呈现不同的特点,2 km以下的消光系数较前两个时段降低很多,地面消光系数下降到 0.10 km^{-1} 。夜间大气边界层比较稳定,沙尘气溶胶不易对地面污染水平产生影响,所以较小的消光系数表明,在近地面本地气溶胶开始占优。消光系数廓线在2.3 km处有明显的分层结

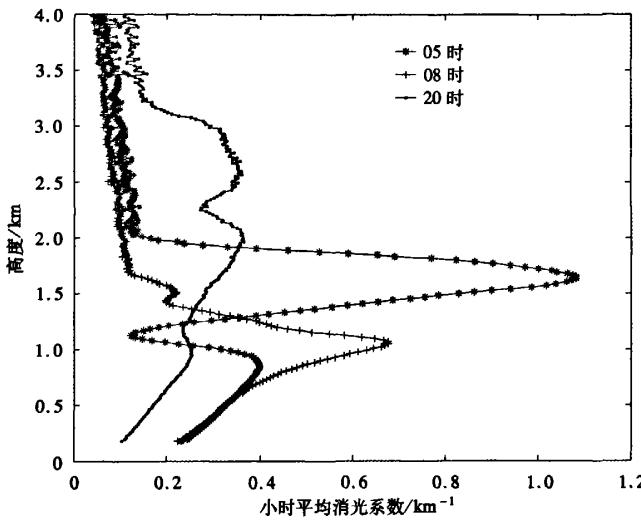


图5 MPL 反演得到的 2005 年 11 月 6 日 3 个时段的小时平均消光系数廓线

Fig. 5 Hourly extinction coefficient profiles derived from micropulse lidar data on November 6, 2005

构,与同一时间的相对湿度分布(图 2e)有很好的对应关系,进一步表明自由对流层的气溶胶是由两个不同性质的气团组成的。

3.5 近地面气溶胶消光系数与 PM_{10} 的比较

图 6 给出了 MPL 反演的近地面消光系数与 PM_{10} 质量浓度的时间演变。由于 MPL 的探测盲区及填充订正的影响,MPL 取得消光系数廓线的下限为 180 m,此高度的消光系数作为近地面的值; PM_{10} 质量浓度代表地面以上 2 m 的气溶胶质量浓度,两个量虽然不是取自同一高度,但由于距离不远,而且分析时段大多是在白天,湍流的作用使这两个高度的气溶胶属性大体一致,因此,可以认为两个物理量表征的是相同的气溶胶团。从图 6 中看到,随着雾的消散,气溶胶消光系数迅速下降,从 02 时的 0.64 km^{-1} 降低到 05 时的 0.23 km^{-1} 。05 时之前消光系数(大于 0.6 km^{-1})较高是由雾粒子对激光信号的散射作用造成的。为了更加细致地考察沙尘气溶胶粒子光学属性的变化,将沙尘影响阶段的消光系数变化绘在小图里,从中可以看到,消光系数和 PM_{10} 质量浓度的变化趋势十分吻合,最大 PM_{10} 质量浓度(05 时)对应的消光系数为 0.23 km^{-1} ,20 时沙尘事件结束时消光系数下降到一天内的最小值 0.1 km^{-1} ,此后虽然 PM_{10} 质量浓度依然保持下降趋势,但消光系数却有所增大,到 23 时达到 0.12 km^{-1} ,说明这时大气中本地气溶胶的含量开始占优,沙尘气溶胶的影响已经基本消失。

通过对沙尘事件过程中的小时平均 PM_{10} 质

量浓度与 MPL 反演得到的近地面消光系数可以看到, PM_{10} 质量浓度的时间演变与雷达反演的近地面消光系数有很好的一致性,相关系数达 0.96(通过了 95% 置信水平的假设检验)。本文把这次沙尘事件分为沙尘气团主体过境和沙尘悬浮两个阶段,分界点选在气象要素突变时刻,即 14 时左右,沙尘气团主体过境阶段的拟合直线为 $y = 14.5x - 1.9$, 沙尘悬浮阶段的拟合直线为 $y = 2.2x - 0.03$ (y 代表 PM_{10} 质量浓度, x 代表消光系数)。从拟合直线斜率可以看到,两阶段气溶胶光学属性明显不同。根据 Mie 散射理论,气溶胶粒子的消光特性不仅与粒子的数浓度有关,还与粒子的谱分布有关。当沙尘主体过境时,大粒子较多,而真正对可见光起消光作用的主要还是粒径与 lidar 波长相近的小粒子,大粒子的消光效果并不明显,因而拟合直线的斜率较大。在悬浮阶段,大粒子受重力作用很快沉降到地面,谱分布峰值向小粒径方向移动,这时 PM_{10} 中的大多数粒子都对消光系数有贡献,因此斜率减小到了 2.2。另外,截距大小表明消光系数和 PM_{10} 质量浓度的不对称程度, PM_{10} 中大粒子越多,其光学特性越复杂,包括粒子的非球形和多次散射效果等诸多因素不能从单波长一次散射 lidar 方程的反演算法中体现出来;粒子谱的复杂多变也会引起气溶胶消光后向散射比的变化,从而加大截距值。

利用以上两组数据可以计算出近地面气溶胶粒子质量和消光系数的转换因子。考虑沙尘对地面的影响阶段为 03—20 时,则 08 时小时平均转换因子

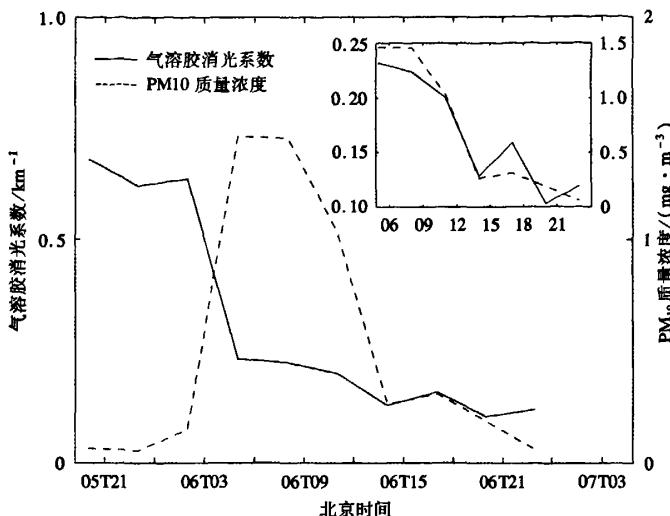


图6 沙尘事件前后近地面气溶胶消光系数(实线)和PM₁₀质量浓度(虚线)的时间变化

(右上角小图突出显示了6日14时和20时沙尘气溶胶光学和微物理特征的转变)

Fig. 6 The time series of aerosol extinction coefficient near the ground surface (solid line) and PM₁₀ mass concentration (dashed line) before and during the dust event on November 6, 2005
(The inset on the top right corner highlights the relation of the two parameters during the dust event)

最大,为 $6.50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ 。沙尘气团主体过境阶段的平均转换因子为 $5.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$,悬浮阶段为 $1.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$,沙尘悬浮阶段的值与Chen等^[32]利用激光雷达和TSP得到的北京沙尘气溶胶的转换因子 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ 十分接近,但沙尘气团主体过境阶段的转换因子比该值大很多。应该注意到该因子与气溶胶粒子的尺度分布有关,当气溶胶粒子尺度较小时,转换因子的值就会变小。通过比较11月5日和6日的MODIS图像(图略)和高层天气情况可以知道,这次沙尘过程中沙尘气溶胶团和前部云团的移动速度很快,沙尘层所在高度的风速很大,从沙尘源地来的大沙尘粒子能够输送到较远距离,沙尘气团经过大连时会有较多的大粒子下沉到近地面,因此沙尘气团主体过境阶段的转换因子较大是合理的。

4 结论

(1)利用MPL和地面观测资料分析了2005年11月6日发生在大连的一次沙尘事件,当沙尘气溶胶团移到大连上空时,MODIS AOD产品表明这个沙尘气溶胶团在东西方向上的延伸范围达500 km,其光学厚度的中心位于中国黄海北部。

(2)地面PM₁₀质量浓度和气象要素均有明显的变化。MPL对整个沙尘气团过境的监测表明,沙尘

气团来临之前地面能见度很低是由于低云覆盖造成的,一方面气溶胶不断堆积,另一方面大的相对湿度有利于气溶胶增长进而增大消光系数。

(3)当沙尘气团进入大连时,主要的沙尘层首先出现在边界层以上,随后与边界层接触并在湍流和下沉运动的作用下影响到地面。沙尘气团影响大连时,地面到2 km之间的气溶胶消光系数迅速增大,沙尘气溶胶层的厚度达1 km,层内最大消光系数达到 1.08 km^{-1} 。从消光系数廓线及其时间演变看,沙尘气溶胶团在水平和垂直方向都有很大的不均匀性。

(4)MPL反演的近地面消光系数和地面观测的PM₁₀质量浓度有很好的对应关系,相关系数达0.96。这次沙尘事件中利用MPL的消光系数和PM₁₀质量浓度得到的最大小时平均转换因子为 $6.50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$,沙尘悬浮阶段的平均转换因子为 $1.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

(5)研究表明MPL可以精确地反演出沙尘气溶胶层的光学厚度和垂直结构,同时这些结果对大连以及中国东北地区气溶胶辐射强迫的计算具有一定意义。

致谢:NASA GSFC提供了本文所用的MODIS资料,谨致谢忱!

参考文献：

- [1] Schwartz S E, Andreae M O. Uncertainty in climate change caused by aerosols [J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1121-1122.
- [2] Yu S, Zender C S, Saxena V K. Direct radiative forcing and atmospheric absorption by boundary layer aerosols in the southeastern US: Model estimates on the basis of new observation [J]. *Atmos Environ*, 2001, 35(23): 3967-3977.
- [3] Wang Z H, Ueda H, Huang M Y. A deflation module for use in modeling long-range transport of Yellow Sand over East Asia [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105(D22): 26947-26959.
- [4] Alpert P, Kaufman Y, Shay-El Y, et al. Quantification of dust-forced heating of the lower troposphere [J]. *Nature*, 1998, 395(6700): 367-370.
- [5] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 896.
- [6] Sokolik I N, Winker D M, Bergametti G, et al. Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D16): 18015-18027.
- [7] 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), 8820, doi: 10.1029/2002JD002946.
- [8] Zhang X Y, Gong Z L, Shen Z X, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: I. Network observations [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D21), 4261, doi: 10.1029/2002JD002632.
- [9] Kurosaki Y, Mikami M. Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia [J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(14), 1736, doi: 10.1029/2003GL017261.
- [10] 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.
- [11] 路爽, 张菁, 孙凤华. 沈阳地区沙尘天气分析 [J]. 气象科学, 2004, 24(1): 112-119.
- [12] 刘玉杰, 牛生杰, 郑有飞. 用 CE-318 太阳光度计资料研究银川地区气溶胶光学厚度特性 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 615-622.
- [13] 黄蔚薇, 杨军, 凌士兵. 沙尘气溶胶粒子表面变性对云滴形成过程的影响 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 210-215.
- [14] 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 360-368.
- [15] Collis R T H, Russell P B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption [M]// Laser monitoring of the atmosphere. Germany: Springer-Verlag Berlin, 1976: 71-152.
- [16] Sassen K, Cho B S. Subvisual-thin cirrus lidar dataset for satellite verification and climatological research [J]. *J Appl Meteor*, 1992, 31(11): 1275-1285.
- [17] Welton E J, Voss K J, Quinn P K, et al. Measurements of aerosol vertical profiles and optical properties during INDOEX 1999 using micropulse lidars [J]. *J Geophys Res*, 2002, 107(D1), 8019, doi: 10.1029/2000JD000038.
- [18] 邱金桓, 赵燕曾, 汪宏七. 激光探测沙暴过程中气溶胶消光系数分布 [J]. 大气科学, 1984, 8(2): 205-210.
- [19] 邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析 [J]. 大气科学, 1994, 18(1): 1-10.
- [20] 李连科, 栗俊, 高广智, 等. 大连海域大气气溶胶特征分析 [J]. 海洋环境科学, 1997, 16(3): 46-52.
- [21] 万显烈. 大连市区大气气溶胶的无机化学特征分析 [J]. 中国环境监测, 2005, 21(1): 21-23.
- [22] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments [J]. *Appl Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [23] Welton E J, Voss K J, Gordon H R, et al. Ground-based lidar measurements of aerosols during ACE-2: Instrument description, results, and comparisons with other ground-based and airborne measurements [J]. *Tellus B*, 2000, 52(2): 636-651.
- [24] Voss K J, Welton E J, Quinn P K, et al. Lidar measurements during Aerosols 99 [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106(D18): 20821-20831.
- [25] Moulin C, Guillard F, Dulac F, et al. Long-term daily monitoring of Saharan dust load over marine areas using Meteosat ISCCP-B2 data Part I: Methodology and preliminary results for 1983-1994 in the Western Mediterranean [J]. *J Geophys Res*, 1997, 102(D14): 16947-16958.
- [26] Powell D M, Reagan J A, Rubio M A, et al. ACE-2 multiple angle micro-pulse lidar observations from Las Galeras, Tenerife, Canary Islands [J]. *Tellus B*, 2000, 52(2): 651-660.
- [27] van de Hulst H C. Light scattering by small particles [M]. New York: Dover Publications, 1981: 200-206.
- [28] Ackermann J, Volger P, Wiegner M. Significance of multiple scattering from tropospheric aerosols for ground-based backscatter [J]. *Appl Optics*, 1999, 38(24): 5195-5201.
- [29] 刘景涛, 钱正安, 姜学恭, 等. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型研究 [J]. 高原气象, 2004, 23(4): 540-547.
- [30] Kaufman Y J, Tanre D. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS [C]//Algorithm Theoretical Basis Documents (ATBD-MOD-02). 1998: 85.
- [31] 贺千山, 毛节泰. 城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究 [J]. 气象学报, 2005, 63(3): 374-384.
- [32] Chen Y, Quan H, Dong X, et al. Continuous measurement of dust aerosols with a dual-polarization lidar in Beijing [C]//Proc Nagasaki workshop on aerosol-cloud radiation interaction and Asian lidar network. Nagasaki: Nagasaki University, 2001: 1-4.