

利用紫外 Mie 散射激光雷达探测澳门地区沙尘暴事件

刘巧君^{1,2}, 郑玉臣^{1,2*}, 朱建华¹, 冯瑞权³, 曾秀桦³, 谭建成³, 冼保生³

1. 四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064
2. 澳门科技大学资讯科技学院激光雷达联合实验室, 中国 澳门
3. 澳门地球物理暨气象局, 中国 澳门

摘 要 研制了一台工作波长为 355 nm 的紫外高能 Mie 散射激光雷达, 并利用该激光雷达在 2010 年一次沙尘暴事件期间对澳门上空的大气进行了探测, 得到了澳门地区不同时刻的气溶胶消光系数垂直廓线。利用 Fernald 方法反演得到的气溶胶近地面消光系数随时间的变化与当地气象数据具有较好的一致性, 气溶胶消光系数与当地可吸入颗粒物浓度的相关性达到了 0.93。气溶胶垂直廓线显示, 在沙尘暴来临期间存在明显的沙尘气溶胶凝集层。通过气溶胶轨迹倒推, 分析了沙尘气溶胶的来源及路径。观测结果表明, 该激光雷达可以在特殊天气条件下对澳门地区气溶胶进行有效探测, 这将有助于深化对澳门上空气溶胶特性的研究。

关键词 激光雷达; 沙尘暴; 气溶胶; 消光系数

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)03-0625-05

引 言

沙尘暴是一种在较干旱土地区域上发生的气象现象。沙尘粒子作为气溶胶的一个重要来源, 可在大气环流的作用下, 离源头区域长距离的输送出去, 通过吸收和散射太阳和红外辐射影响所到处的大气环流和气候。

大气激光雷达具有时空分辨率高、可连续探测等优点, 已经成为探测大气气溶胶的有力工具^[1-3]。其探测结果不但可以对当地大气状况有更深的了解, 还可以对一些理论预言进行反馈修正。

Maria 等研究了折射率虚部对沙漠气溶胶消光背向散射比的影响, 并将在撒哈拉沙漠沙尘暴期间从拉曼雷达监测得到的消光系数和背向散射系数值与数值模拟得到的结果比较, 给出了较为合适的描述撒哈拉沙漠沙尘气溶胶的折射率虚部范围^[4]。

毛建东等利用工作波长 532 nm 的 Mie 散射激光雷达研究了银川上空的大气气溶胶光学特性, 并对一次明显的沙尘天气进行了探测。迟如利等研制了工作波长为 1 064 和 532 nm 的双波长 Mie 散射激光雷达, 用其研究了合肥上空气溶胶波长依赖指数的空间垂直分布及光学厚度的月变化^[5]。

2010 年 3 月 19 日起的沙尘暴天气, 使我国华北以至华

东之多个内地城市均受到不同程度的浮尘或扬沙的天气影响。在 20 日北京大气中的可吸入颗粒物浓度已经超过 1 500 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 达到重度污染级别。而随着沙尘暴的南下, 澳门地区的空气质量迅速转坏, 所有自动空气测量站均记录到了历史最差的空气质量指数。

为了对澳门上空的气溶胶进行研究探测, 本课题组研制了一台发射波长在 355 nm 的紫外 Mie 散射激光雷达。由于紫外波段的太阳辐射比可见光波段的太阳辐射弱, 在白天的测量中, 该紫外激光雷达可以获得更好的信噪比。本文对激光雷达的结构参数及数据处理方法进行了介绍, 利用该激光雷达探测了沙尘暴来临及过境后澳门上空大气的 Mie 散射回波信号并进行了反演, 得到了大气气溶胶消光系数的垂直廓线。结合当地的能见度数据, 分析了近地面气溶胶消光系数和 PM_{10} 探测结果的相关性, 同时给出了沙尘气溶胶的路径和来源的分析结果。

1 实验系统

图 1 是自行研制的 Mie 散射离轴激光雷达的结构示意图。系统座落于澳门凼仔大潭山的澳门气象局内, 海拔高度 112 m。

收稿日期: 2011-07-07, 修订日期: 2011-10-28

基金项目: 澳门特别行政区-科学技术发展基金项目(021/2007/A2)资助

作者简介: 刘巧君, 1984 年生, 四川大学物理科学与技术学院博士研究生

e-mail: qiaojunliu@yahoo.cn

* 通讯联系人 e-mail: ayscheng@netvigator.com

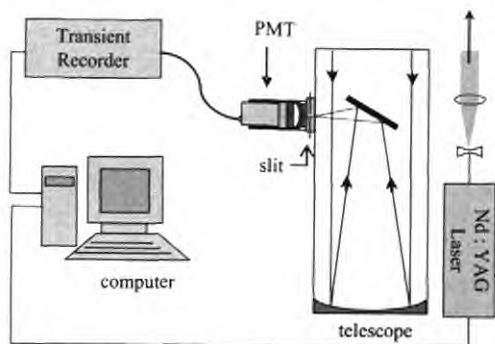


Fig. 1 Configuration of 355 nm bi-static mie lidar system

系统的发射光由 Nd : YAG 激光器提供, 该激光器发射的脉冲重复频率 50 Hz, 脉宽约 5.7 ns, 单脉冲最大发射能量可达 160 mJ。激光器发出三倍频后的 355 nm 的紫外光束, 并经扩束后垂直射入大气。大气回波信号的接收由直径 254 mm 的牛顿望远镜完成, 在望远镜焦平面上有一小孔光阑, 限制杂散光进入视场, 经准直透镜和滤光片后, 大气后向弹性散射光平行进入光电倍增管进行光电转换后形成的电信号进入信号瞬态记录仪采集、模数转换及存储, 最后由计算机对获得的时间分辨信号进行数字信号处理得到所需的大气参数。激光雷达系统的具体参数见表 1。

Table 1 Lidar parameters

Emission	
Laser	Nd : YAG 355 nm
Pulse width (FWHM)	5.7 ns
Repetition rate	50 Hz
Maximum Pulse energy	~160 mJ
Beam diameter	~8 mm expanded to ~70 mm
Laser Beam divergence (Full angle measured at FWHM)	0.5 mrad
Receiver	
Telescope	254 mm Schmidt-Newtonian f/4
Field-of-View	0.1~11.25 mrad adjustable
Band-pass filter	1 nm FWHM
Detector	Hamamatsu PMT
Data acquisition	40 MHz transient recorder with analogue and photon-counting
Range resolution	3.75 m
Max range bins	61.44 km

该激光雷达工作波长处于太阳辐射较弱的紫外波段, 白天测量可以有效的降低天空背景噪声。同时, 高激光发射能量使该激光雷达具有极好的表现力, 即使在沙尘暴来临的情况下, 仅利用 50% 的激光能量, 其白天和夜间的探测高度也分别达到了 6 和 9 km。

2 激光雷达数据反演

激光雷达的回波信号强度与激光的发射功率、激光与大气相互作用机制和激光雷达接收效率等因素有关。激光在大

气中传输实际上受到大气分子和气溶胶粒子共同作用, Fernald^[6]将分子和气溶胶的贡献分开考虑, 激光雷达方程表示为

$$P(r) = \frac{EC}{r^2} [\beta_{\text{mol}}(r) + \beta_{\text{aer}}(r)] \cdot \exp \left\{ -2 \int_0^r [\sigma_{\text{mol}}(r') + \sigma_{\text{aer}}(r')] dr' \right\} \quad (1)$$

其中, $P(r)$ 为激光雷达接收到的探测距离 r 处的大气回波信号功率, E 是发射激光脉冲能量, C 是激光雷达校正常数, $\beta_{\text{mol}}(r)$ 和 $\beta_{\text{aer}}(r)$ 分别为大气分子和大气气溶胶的背向散射系数, $\sigma_{\text{mol}}(r)$ 和 $\sigma_{\text{aer}}(r)$ 分别表示大气分子和气溶胶的消光系数。

令气溶胶消光背向散射比 $S_1 = \sigma_{\text{aer}}(r)/\beta_{\text{aer}}(r)$, 大气分子的消光背向散射比是一个常数 $8\pi/3$, 得到气溶胶的消光系数为

$$\sigma_{\text{aer}}(r) = \frac{P(r)r^2 \exp \left[-\frac{8\pi}{3} \int_0^r \beta_{\text{mol}}(r') dr' \right] (3S_1/4\pi)^{-2} S_1}{CE} - \frac{1 - \frac{2S_1}{CE} \int_0^r P(r)r^2 \exp \left[-\frac{8\pi}{3} \int_0^r \beta_{\text{mol}}(r') dr' \right] (3S_1/4\pi)^{-2} dr}{S_1 \beta_{\text{mol}}(r)} \quad (2)$$

气溶胶的消光背向散射比 S_1 与激光波长、气溶胶尺度谱分布和折射指数等因素有关, 其取值范围一般在 10~100 Sr 之间变化, 本文的取值为 50^[7]。分子的消光系数、后向散射系数可根据美国标准大气分子模式较为精确的确定^[8]。

由于离轴结构激光雷达的激光发射单元和信号接收单元的光轴不重合, 近场回波信号不能进入或只有部分进入接收望远镜视场, 直接利用雷达回波信号难于反演近场大气的真实信息。利用文献[9]的方法, 对近场回波信号加以修正, 以得到大气气溶胶的近场信息。

3 实验结果及分析

图 2 和图 3 分别给出了在 3 月 22 日沙尘暴来临日和 3 月 26 日沙尘暴过境后反演得到的不同时刻海平面以上大气气溶胶消光系数廓线。本次探测中, 选择的脉冲重复频率为 50 Hz, 单脉冲能量 80 mJ, 各时刻的结果都是 15 min 内数据的平均, 时间标于各廓线的上方。

由图 2 可见, 在 22 日这个沙尘天气, 大气边界层内各高度气溶胶消光系数普遍较大, 低空消光系数最大值接近 1 km^{-1} , 且各时刻的消光系数值随时间的变化并不明显。在下午时刻的气溶胶消光系数廓线在 4 000 m 左右有一气溶胶(沙尘)浓度较高的凝集层。随着太阳辐射的减少, 温度下降, 大气湍流减弱, 该层下降至 3 km 左右。傍晚的数据显示在 2.5~4 km 左右的气溶胶凝集层具有多个峰值, 说明该沙尘层具有明显的分层结构。图 3 显示, 3 月 26 日气溶胶的消光系数仍处于一个较高的水平, 近地面处消光系数在 0.5 km^{-1} 左右, 高度 2.5~4.5 km 仍然存在气溶胶凝集层, 分层结构也更明显。

图 4 同时给出了 3 月 26 日激光雷达反演得到的近地面处消光系数(星号)和 PM_{10} 浓度(实线)随时间的变化关系,

由图可见，在 PM_{10} 浓度较高的 11:00 左右测得的气溶胶消光系数值也较大，15:00 以后 PM_{10} 浓度降到较低水平，这段时间激光雷达反演的消光系数值亦较 11:00 的低，二者在时间上有较好的一致性。

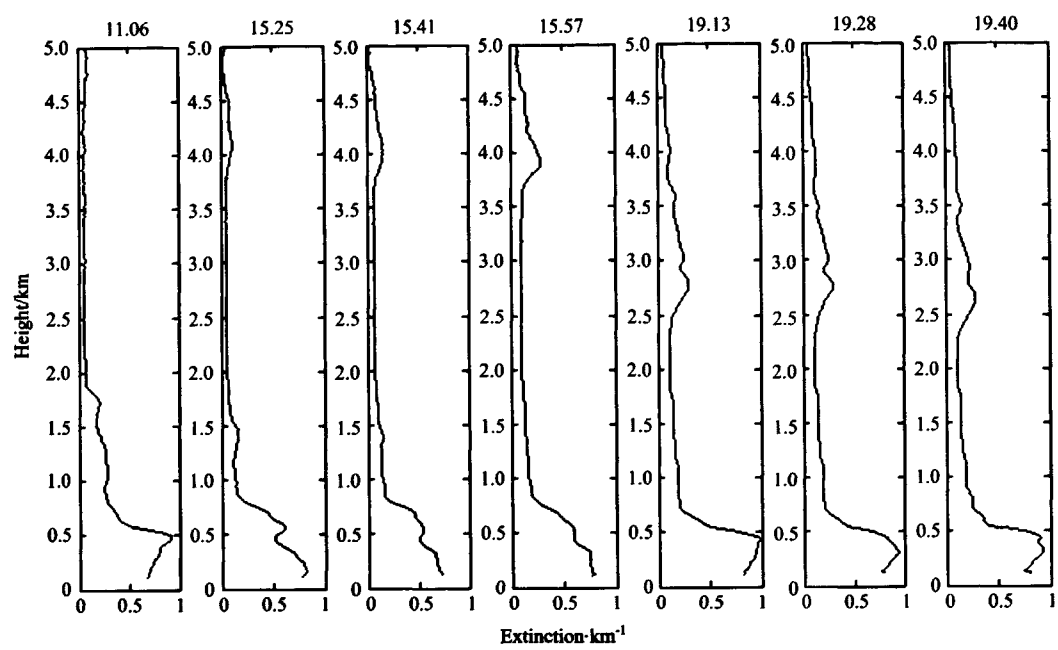


Fig. 2 Extinction coefficients inverted from Mie lidar on 22nd

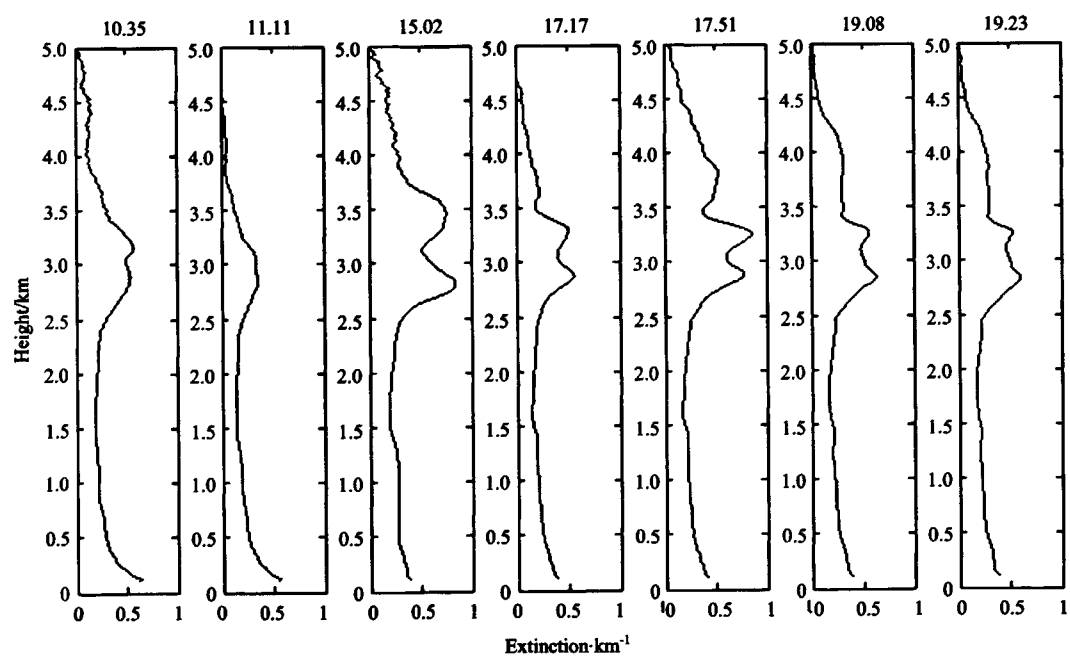


Fig. 3 Extinction coefficients inverted from Mie lidar on 26th

气象局的资料显示 3 月 26 日 11:00 至 20:00 的 PM_{10} 的平均值为 $97.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，恢复到沙尘来之前的水平，该值不足 22 日同时段 PM_{10} 值 $527.49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的五分之一，但图 3 中消光廓线的近地面值约为 22 日近地面值的一半，显示沙尘粒子对澳门空气的影响尚未结束。这种时间上的延迟主要有两个原因：一是对于 Mie 散射激光雷达探测，气溶胶粒子的不同粒径分布对回波信号强度具有很大的影响，从而影响

反演的消光系数结果。在沙尘粒子过境的 22 日，测得的 PM_{10} 值很高，该日大气中气溶胶主要由粒径较大的沙尘粒子组成，这些大粒子的散射强度主要集中在前向，对我们的后向散射信号强度贡献并不大；二是当沙尘粒子到达澳门上空后，大粒子在重力作用下会很快沉降到地面，26 日 PM_{10} 值的降低主要是由这部分对消光系数反演贡献较小的大粒子的

沉降引起,但粒径较小的粒子却可以在空中悬浮一周左右,因此 26 日的 PM_{10} 值虽然低,但大部分都对消光系数反演有较大贡献,所以尽管 26 日的 PM_{10} 值仅为 22 日的五分之一,但当日的近地面消光系数却约是 22 日的一半左右。

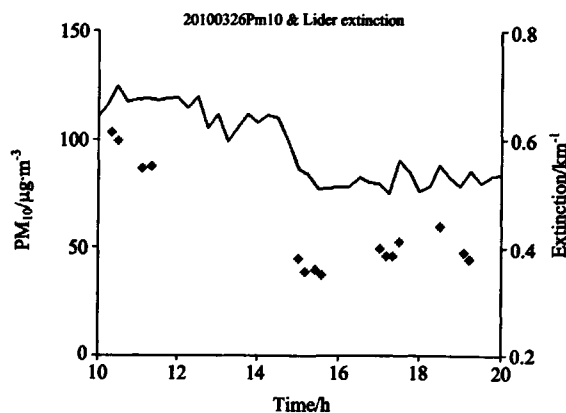


Fig. 4 The time-variation of extinction coefficients (star) and PM_{10} concentration (line)

基于这两个原因,355 nm 波长的消光系数并不足以显示此次沙尘粒子对大气造成的影响。为了进一步研究 PM_{10} 浓度和近地面消光系数的关系,结合当地能见度的相关数据,355 nm 波长的近地面气溶胶消光系数可转化为 1 064 nm 的消光系数值^[11],将其与同时刻的 PM_{10} 值进行相关性分析,得到线性拟合公式 $y=1\,732.9x$, x 表示 1 064 nm 消光系数值, y 表示 PM_{10} 浓度。利用该公式可粗略获得在此次沙尘暴事件中澳门上空的 PM_{10} 值随高度的分布。实测数据与此公式的相关系数达 0.93,显示了较好的一致性。实测数

据与拟合直线在图 5 给出。

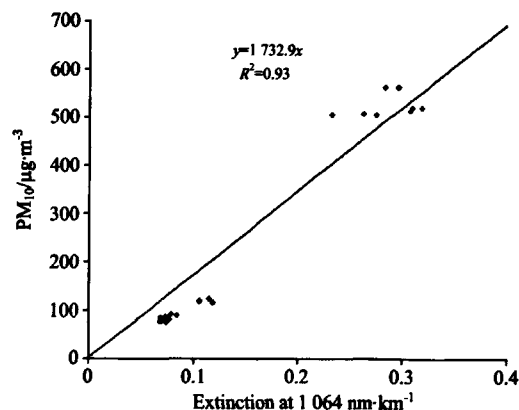


Fig. 5 The correlation between extinction coefficient inverted from lidar and PM_{10} concentration

为了研究气溶胶凝集层中沙尘粒子的来源,可选取气溶胶消光系数廓线出现峰值的高度,利用 NOAA 的 HYSPLIT 模式来进行气溶胶的轨迹倒推。以澳门为起点,以 2010 年 3 月 22 日 03UTC 作初始场进行模拟,从图 6(a)可见,分别离地面高度 1 028 和 1 661 m 的物质主要是来源于南海,而高度为 402 m 的物质由中国北部向东南方向移动,约在长江口附近出海再南下途经台北后再转西南经巴士海峡进入华南沿岸海域。图 6(b)显示,离地 300, 200 和 100 m 的气溶胶后向轨迹线非常一致,在 3 月 19 日初期位于蒙古地区,此时离地面高度约 4 000 m 左右,到 3 月 20 日 00UTC 时轨迹线已在河南地区,且从垂直剖面分析得知由原来的 4 000 m 下沉至 1 000~2 000 m,继续在长江口附近出海后沿着中国东南沿岸海域到达澳门。

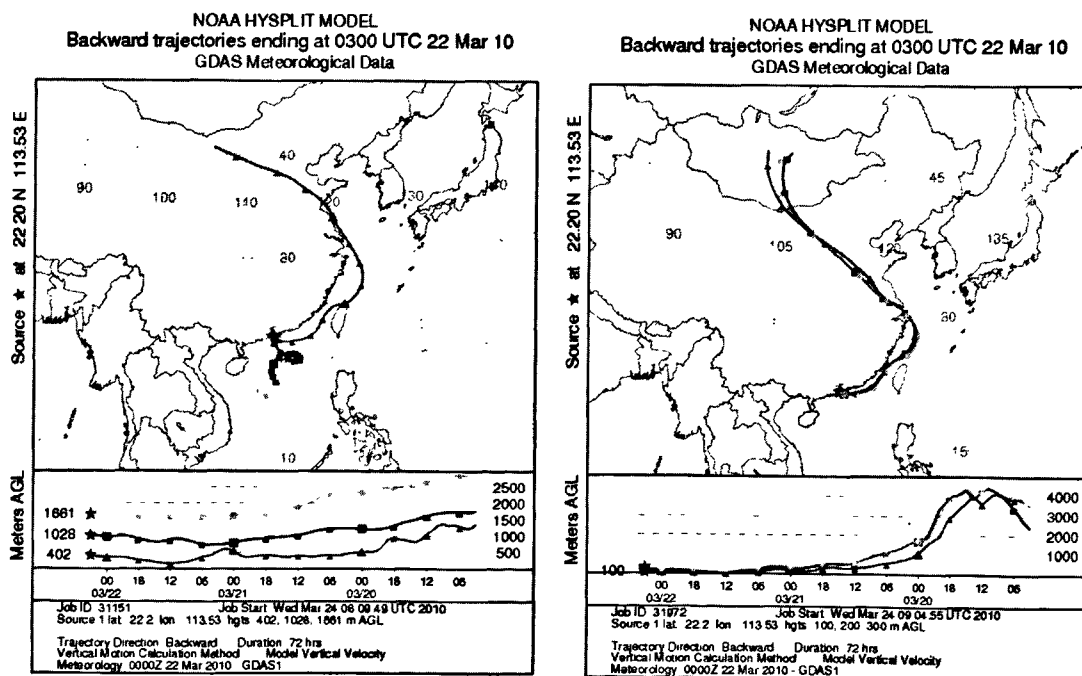


Fig. 6 Back-trajectory at different heights by HYSPLIT model

4 结 论

利用研制的离轴紫外高能 Mie 散射激光雷达,在最近的一次沙尘暴天气中,对澳门上空的大气进行了探测,反演得到了气溶胶消光系数的垂直廓线,并结合当地的气象资料,将激光雷达测量的气溶胶消光系数与地面观测的可吸入颗粒物浓度进行了相关性分析,二者显示了较好的一致性。通过

气溶胶轨迹倒推,分析了沙尘气溶胶的来源及路径。这是澳门地区首次利用激光雷达对沙尘暴事件下的大气进行研究。激光雷达获得数据与当地气象资料的一致性显示,即使在沙尘天气条件下,该紫外激光雷达仍可高质量的完成大气探测任务,这将保证对澳门地区大气气溶胶消光系数时空分布进行持续、有效的观测,并利用观测结果对该地区气溶胶状况进行进一步的分析研究。

References

- [1] Porter J N, Lienert B R, et al. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19: 1873.
- [2] WANG Hong-bo, CAO Ting-ting, HE Jie, et al(王宏波, 曹婷婷, 何捷, 等). *Journal of Atmospheric and Environmental Optics(大气与环境光学学报)*, 2007, 2(5): 340.
- [3] HONG Guang-lie, ZHANG Yin-chao, ZHAO Yue-feng, et al(洪光烈, 张寅超, 赵曰峰, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2006, 55(2): 983.
- [4] Perrone M R, Barnaba F, De Tomasi F, et al. *Appl. Opt.*, 2004, 43(29): 5531.
- [5] Fernald F G, Herman B M, Reagan J A. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, 11: 482.
- [6] Ansmann A, Engelmann R, Althausen D, et al. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L13815.
- [7] US Standard Atmosphere. US Government Printing Office, Washington D. C., USA, 1976.
- [8] LIU Qiao-jun, YANG Lin, WANG Jie-yu, et al(刘巧君, 杨林, 王劭予, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2009, 58(10): 7376.
- [9] Inaba H. Detection of Atoms and Molecules by Raman Scattering and Resonance Fluorescence, in *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Hinkley E D ed. Springer-Verlag, Berlin, 1976. 153.

Ultraviolet Mie Lidar Observations of Aerosol Extinction in a Dust Storm Case over Macao

LIU Qiao-jun^{1,2}, CHENG A Y S^{1,2*}, ZHU Jian-hua¹, FONG S K³, CHANG S W³, TAM K S³, Viseu A³

1. Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China
2. Joint Laboratory for Laser Radar, Faculty of Information Technology, Macau University of Science and Technology, Macao SAR, China
3. Meteorological and Geophysical Bureau, Macao SAR, China

Abstract Atmospheric aerosol over Macao was monitored by using a 355 nm Mie scattering lidar during the dust event on March 22nd, 2010. Vertical profiles of aerosol extinction coefficients were obtained and correlated with local PM₁₀ concentration. The near-surface aerosol extinction coefficients have good agreement with PM₁₀ concentration values. The aerosol extinction vertical profiles showed that there were distinct layers of dust aerosol concentration. The source and tracks of dust aerosol were analyzed by back-trajectory simulation. Observations showed that this lidar could run well even in dust storm episode, and it would help to further the study on aerosol properties over Macao.

Keywords Lidar; Dust storm; Aerosol; Extinction coefficient

(Received Jul. 7, 2011; accepted Oct. 28, 2011)

* Corresponding author