

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2011.02.011

AML-2 车载激光雷达测量边界层污染物分布廓线

曹开法, 胡顺星

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 介绍了 AML-2 车载式大气环境激光雷达系统结构和主要技术参数。详细阐述了测量气溶胶粒子消光系数和污染气体浓度的基本原理和数据处理方法。给出了 2008 年冬季大气参数合肥综合观测实验中获得的 SO_2 、 NO_2 、 O_3 和气溶胶的垂直分布。从观测结果中可以看出, 合肥冬季 SO_2 和 NO_2 的浓度比较小, O_3 有明显的时间变化, 主要是由于受到太阳辐射的影响。通过对气溶胶消光系数垂直廓线的分析, 可以看出边界层的高度有明显的日变化。分析了这三种污染成分和气溶胶的空间分布规律, 并结合天气和其它大气参数讨论了污染物分布状况形成的原因。

关键词: 大气光学; 激光雷达; 边界层; 污染物

中图分类号: X831

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2011)02-0146-08

Vertical Profiles of Boundary Layer Pollutants Measured by AML-2 Mobile Lidar at Hefei

CAO Kai-fa, HU Shun-xing

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Schematic and system parameters of AML-2 mobile lidar for monitoring atmospheric pollutants are presented. Fundamental principles of lidar and its data processing methods are detailedly analyzed. The vertical profiles of SO_2 , NO_2 , O_3 and aerosol over Hefei are presented. The vertical density of SO_2 and NO_2 are somewhat lower, but the vertical density of ozone has obvious time evolution and is relevant to the solar radiation. The height of boundary layer top has obvious diurnal variation. The characteristics of pollutants profiles are discussed with some meteorological parameters.

Key words: atmospheric optics; lidar; boundary layer; pollutant

收稿日期: 2010-11-14

基金项目: 科技部科技基础性工作专项 (2007FY110700) 资助

E-mail: caokaifa@tom.com

1 引言

激光雷达是探测大气的一种有效手段, 被广泛应用于大气气溶胶、空气污染物、大气成分、大气气象参数以及云的研究。它具有实时性好、时空分辨率高、应用领域广、可重复使用等突出优点^[1-2]。差分吸收激光雷达 (differential absorption lidar, DIAL) 的基本概念最先由 Schotland^[3] 在激光雷达测量大气水汽空间分布时提出。差分吸收激光雷达发射 λ_{on} 和 λ_{off} 两束激光, 其中 λ_{on} 位于待测气体的强吸收处, λ_{off} 位于待测气体波长吸收很小或没有吸收处。通过两束激光的回波信号反演待测污染气体的空间分布廓线, 我国已将 47 个大中城市列为重点城市, 愈来愈多的城市和地区正在开展空气质量监测工作。测量研究近地面污染气体浓度垂直分布变化特征是监测的重点之一, 对于了解乃至预警光化学烟雾污染具有不可替代的作用。

2008 年 11 月在合肥安徽光机所大气光学中心进行了大气参数综合观测实验, 为“我国东部整层大气重要参数高分辨垂直分布探查”项目提供数据支持。AML-2 车载式测污激光雷达作为观测仪器之一, 完成了气溶胶消光系数、 O_3 、 SO_2 和 NO_2 浓度的测量任务, 目的在于分析合肥地区秋冬时节大气颗粒物和气体污染物的边界层垂直空间浓度分布。

2 激光雷达系统简介

AML-2 激光雷达发射的 5 个波长激光在 O_3 、 SO_2 和 NO_2 三种气体中的吸收截面^[4] 如图 1 所示。测量 NO_2 使用 395.60 nm 激光对应强吸收, 396.82 nm 激光对应弱吸收。测量 O_3 使用 299 nm 激光对应强吸收, 288.38 nm 激光对应弱吸收。测量 SO_2 使用 289.04 nm 激光对应强吸收, 288.38 nm 激光对应弱吸收。

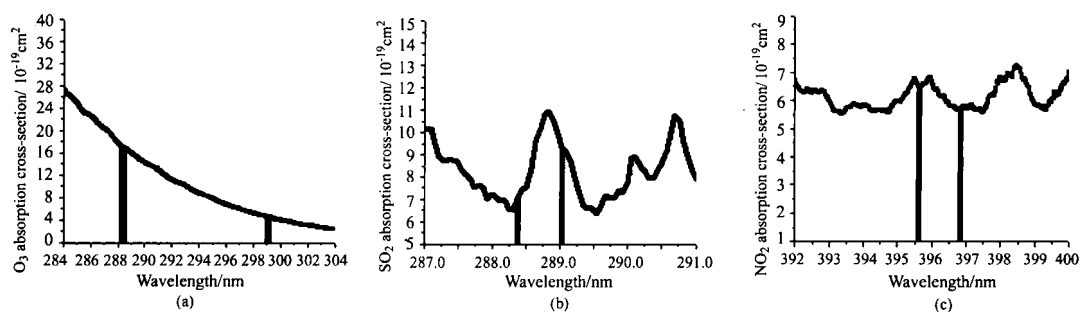


图 1 AML-2 激光雷达发射的 5 个波长对应的吸收截面

Fig.1 Absorption cross-section of AML-2 lidar's five wavelengths

大气环境监测激光雷达的核心是受激拉曼光源系统, 如图 2 所示。发射光源系统采用自行研制的受激拉曼激光光源, 它使用进口法国 Quantel 公司生产的 Brilliant B 型 Nd:YAG 激光器作为泵浦源, 经过倍频晶体组 (有三倍频和四倍频晶体各一块) 进行频率转换, 再由若干透镜组系统耦合到充有高压气体 CH_4 , H_2 和 D_2 的拉曼池中, 拉曼池两端使用石英平镜封装。在拉曼池中产生受激拉曼散射得到 5 个所需要的激光波长。四倍频激

光 266 nm 分别泵浦 CH_4 , H_2 和 D_2 产生受激拉曼光 288.38 nm, 299 nm 和 289.04 nm, 它们用于 SO_2 和 O_3 测量; 三倍频激光 355 nm 分别泵浦 CH_4 和 D_2 产生受激拉曼光 395.60 nm 和 396.82 nm 用于 NO_2 的测量。各波长由不同的反射镜反射, 经扩束后由导光镜将激光发射到大气中。使用双波长测量时, 波长的切换依靠倍频晶体和拉曼管的不同组合进行, 全部由计算机自动控制完成。

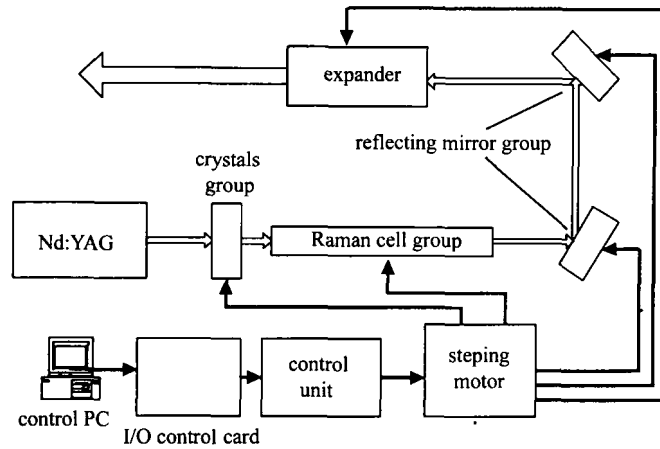


图 2 AML-2 激光雷达发射系统示意图

Fig.2 Schematic of AML-2 lidar's transmitter

3 测量原理

AML-2 车载式大气环境监测激光雷达使用了米散射激光雷达与差分吸收激光雷达的先进技术, 可实现气溶胶消光系数和污染气体浓度的全

方位空间分布探测。对于 532 nm 波长, 一般激光雷达比常数取值为 50。空气分子消光后向散射比为 S_M , 则有 $S_M = \alpha_M(z)/\beta_M(z) = 8\pi/3$ 。根据 Fenland 算法, 气溶胶后向消光系数可表达为 [2,5]

$$\alpha_A(z) = -\frac{S_A}{S_M}\alpha_M(z) + \frac{X(z) \exp\left[2(S_A/S_M - 1) \int_z^{z_c} \alpha_M(z) dz\right]}{\frac{X(z_c)}{\alpha_A(z_c) + (S_A/S_M)\alpha_M(z_c)} + 2 \int_z^{z_c} X(z) \exp\left[2(S_A/S_M - 1) \int_z^{z_c} \alpha_M(z) dz\right] dz}, \quad (1)$$

式中, $X(z)$ 表示为 $P(z)z^2$; z_c 为标定高度, 即假设在某一高度 z_c 处, 气溶胶后向散射系数 $\beta_A(z_c)$ 或消光系数 $\alpha_A(z_c)$ 已知, 且 $X(z)/\beta_M(z)$ 值最小, 此高度作为标定高度。

车载式测污激光雷达采用差分吸收原理测量 O_3 浓度的时空分布。激光发射系统向同一光学路径上准同时发射两组波长接近的脉冲激光, 其中一束激光的波长正处在污染气体的吸收线上, 计为 λ_{on} 表示。另一束激光的波长位于污染气体的吸收线的边翼或吸收线之外, 以 λ_{off} 表示。由激光雷达方程可导出污染气体浓度为 [6-9]

$$N(Z) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{P(\lambda_{on}, z + \Delta z)}{P(\lambda_{off}, z + \Delta z)} \right] + B - E_A - E_M, \quad (2)$$

$$\text{其中 } \Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}), \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right], \quad (4)$$

$$E_A = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_A(\lambda_{on}, z) - \alpha_A(\lambda_{off}, z)], \quad (5)$$

$$E_M = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_M(\lambda_{on}, z) - \alpha_M(\lambda_{off}, z)], \quad (6)$$

式中, $\Delta\sigma$ 为 λ_{on} 、 λ_{off} 激光波长的吸收截面差; Δz 是计算采用的距离分辨率; B 、 E_A 及 E_M

分别为大气后向散射作用、大气气溶胶消光作用项及大气分子消光作用引起的修正项。测量时, 激光发射装置交替发射波长为 λ_{on} 、 λ_{off} 的激光脉冲, 每组连续发射次数均为 500 次, 共发射五组, 即处于吸收线与偏离吸收线回波信号为 2500 个脉冲信号的累加。首先, 为了降低信号起伏、白天强背景噪声的影响, 对两组信号均采用了分段平滑与扣除背景噪声的方法。其次, 略去 B 、 E_A 和 E_M 三项对探测浓度产生的影响, 由 (4) 式计算获得未经修正的污染气体浓度随高度分布情况。然后, 采用不同的修正方法计算获得 B 、 E_A 和 E_M 三项的值对计算结果进行修正。大气气溶胶消光干扰项 E_A 可以通过零级近似来估算其大小。对于大气分子消光作用项 E_M , 根据 532 nm 波长的大气分子模式及消光系数与波长的关系, 估算出 E_M 值约为 5.5。大气后向散射作用项 B 采用了 Klett 积分法进行修正。在计算 Klett 积分法边界条件时, 应用了回归算法计算线性相关系数, 为选取污染气体浓度相对均匀的一段高度区域 (高度区间设为 230 m) 做准备, 并利用斜率法求得边界条件值。根据 Klett 积分法即可获得大气后向散射系数修正项。最后, 为了进一步减小大气抖动带来的影响, 对实验结果进行了分段平滑处理, 获得最终所需结果。

4 主要观测结果和分析

AML-2 车载式测污激光雷达测量中, 采用 2500 次激光脉冲的回波信号累加。首先, 对原始信号采用了分段平滑的方法消除大气抖动对信号产生的影响。分段范围与平滑点数分别为: 0.75~1.5 km 之间区域 5 点平滑; 1.5~3 km 之间区域 9 点平滑; 3~5 km 之间区域 13 点平滑, 平滑方法选取了权重平滑法。为了减少背景噪声的影响, 对回波信号进行了订正, 订正范围为 12~15 km。白天测量时, 扣除强背景噪声是必要的, 我们采用了分时连续测量气溶胶米散射信号与背景噪声的方法, 以气溶胶米散射信号减去背景噪声进而达

到去噪的目的。标定高度点选取至关重要, 考虑到 AML-2 车载测污激光雷达有效探测高度较低, 仅为 5 km 左右。文献 [5] 表明 Fernald 方法的后向积分比较稳定, 标定高度范围设为 2.8~5 km。通过比较将此范围内 $X(z)/\beta_2(z)$ 最小值点作为标定高度点。(1) 式中空气分子的后向散射系数 $\beta_2(z)$ 和消光系数 $\alpha_2(z)$ 可由激光雷达测量时刻的温度、气压和湿度的垂直分布的气象探空资料或使用标准大气模式通过瑞利散射理论计算得到。最后, 积分求解 (1) 式可得气溶胶消光系数的时空分布。

2008 年 11 月 10 日~21 日 AML-2 大气环境监测激光雷达参加了重点专项任务的合肥综合实验任务。主要测量大气气溶胶消光系数和 O_3 浓度的垂直廓线, 也同时测量了 SO_2 和 NO_2 。周一、周三和周四测量 O_3 和气溶胶, 从 07:00~21:00 每 2 h 一组。周二和周五, 在 07:00、11:00、15:00 和 19:00 测量 NO_2 、 SO_2 、 O_3 和气溶胶。

气溶胶近端信号存在几何因子的问题, 因此在反演中必须对近端信号进行修正才能获得可靠的计算结果。几何因子一般采用水平测量方法得到。水平法反演几何因子必须选择在大气消光系数水平分布均匀的情况下, 一般选择能见度好的傍晚进行。我们 2007 年 10 月 8 日在合肥科学岛大气光学中心车载激光雷达实验室进行了水平测量。当时能见度很好, 气溶胶含量很少。把信号距离平方值取对数得到 $\ln(P(R)R^2)$; 在 2~4 km 距离段对 $\ln(P(R)R^2)$ 进行线性拟合得到新的函数 $LP(R)$ 。最后在 0~2 km 区间计算函数 $\ln(P(R)R^2)/LP(R)$ 的值即为几何因子 (如图 3 所示, A 为激光雷达 PRR 信号, B 为拟合的曲线, C 为得到的激光雷达几何因子。) 本次实验气溶胶的测量采用 532 nm 的米散射信号。首先对测得的信号利用上节的反演算法进行反演, 得到的数据再除以系统的几何因子进行修正, 这样就得到了气溶胶的消光系数的廓线。

4.1 气溶胶

本次实验共获得 10 天的气溶胶数据, 这里给

出了气溶胶的消光系数和时间演化图，如图 4 所示。11 月气溶胶混合层高度变化不大，混合层高度平均在 1.5 km，混合层内气溶胶随高度缓慢衰减，在 2.0~3.5 km 有明显的气溶胶层。11 月 11 日 07:00 混合层高度约为在 0.9 km，随着太阳的照射，11:00 达到 1.1 km，15:00 达到 1.3 km，到了晚上 19:00 又下降到 0.9 km。混合层高度在 0.8~1.1 km，全天变化不大，混合层内气溶胶消光系数变化较大。11 月 13 日混合层高度变化剧烈，在 2~4 km 之间有气溶胶层。11 月 14 日没有明显的混合层界限。11 月 10 日~14 日一周的时间内，混合高度从高往低变化，混合层消光系数也随之变大，到 11 月 13 和 14 日混合层界限不明显，近地面层气溶胶消光系数较大。

11 月 17 日~21 日是观测的第二周。17 日天气是阴转雨。我们只观测了上午 07:00、09:00 和 11:00 的数据。这天气溶胶消光系数较大。18 日

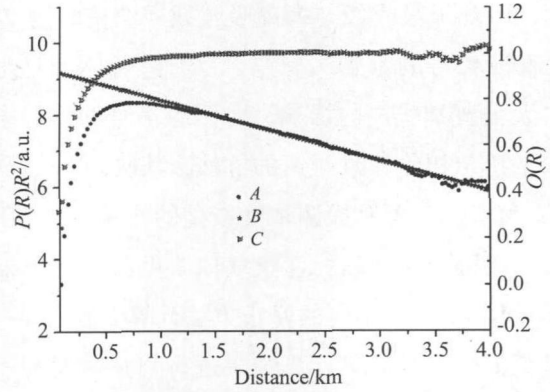


图 3 AML-2 激光雷达的几何因子

Fig.3 Geometric factor of AML-2 lidar

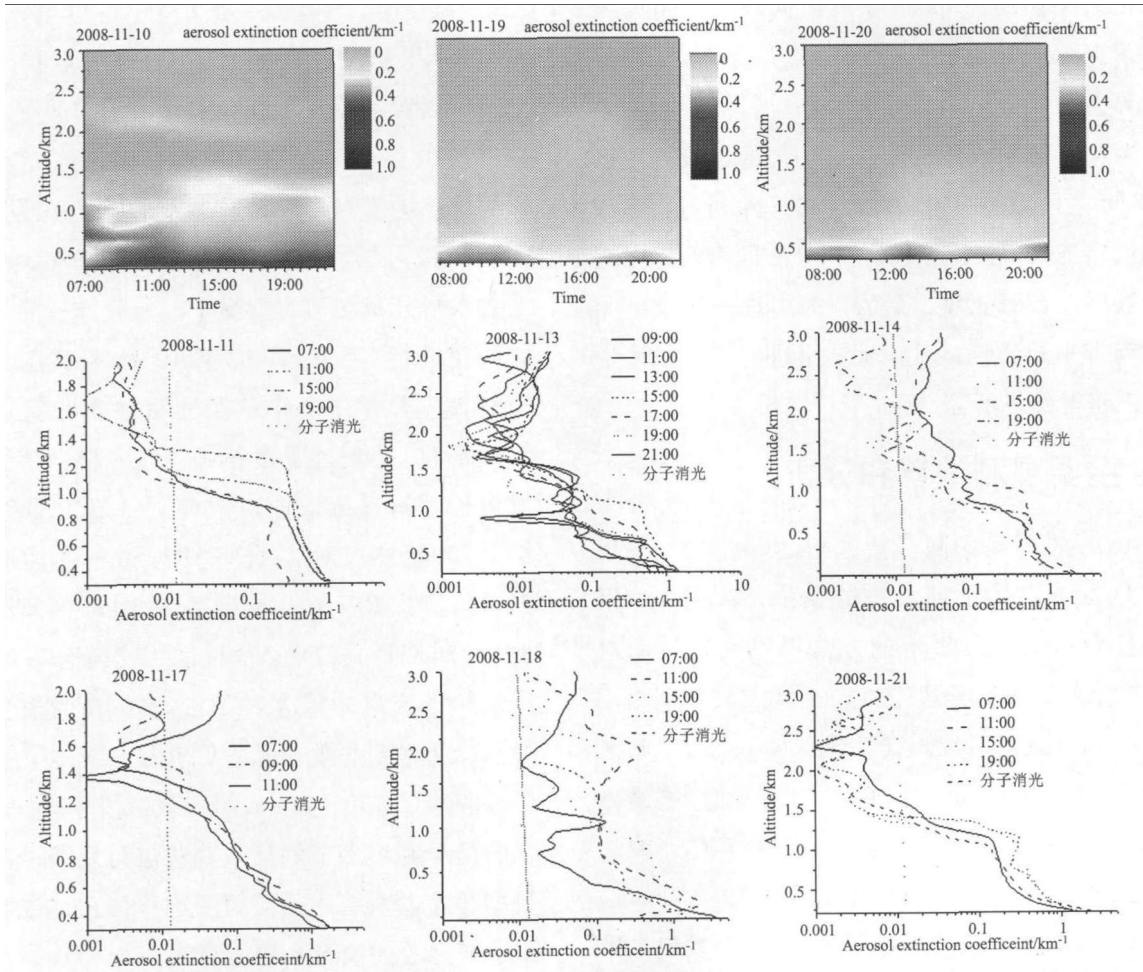


图 4 11 月 AML-2 激光雷达得到的气溶胶消光系数垂直廓线

Fig.4 Vertical profiles of aerosol extinction coefficient in November measured by AML-2 lidar

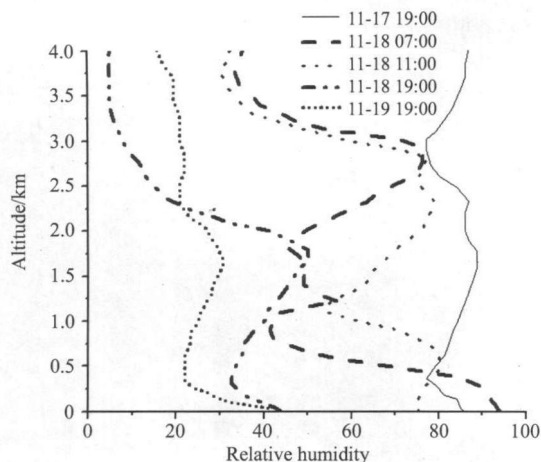


图 5 实验期间风向相对湿度的垂直廓线

Fig.5 Relative humidity profile in the experimental period

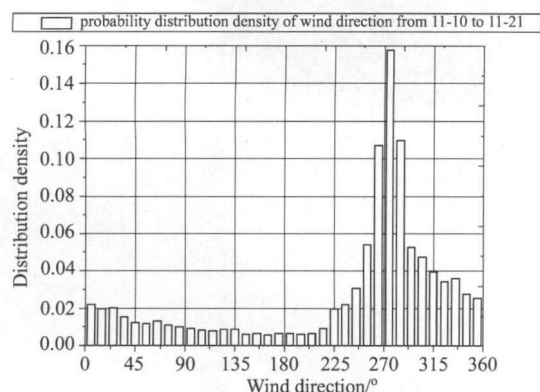


图 6 实验期间微波雷达获得大气风向分布

Fig.6 Wind direction distribution in the experimental period measured by a microwave radar

天气是阴转晴, 是雨后天晴的第一天, 但是气溶胶的消光系数并没有减小。19日天气晴好, 这天混合层比较明显, 混合层高度在 1.7~2.3 km 之间变化, 混合层内气溶胶消光系数很小且随高度衰减较小。下雨虽然会清除部分大气中的颗粒物, 但是雨后大气中水汽较多, 容易凝结颗粒物形成雾颗粒。图 5 显示了 17 日、18 日和 19 日的大气相对湿度的垂直廓线(从探空气球获得)。18 日的水汽含量较大, 与颗粒物结合形成雾颗粒, 造成全天气溶胶消光系数很大。19 日的水汽含量很小, 雾颗粒的水汽逐渐散掉, 全天的气溶胶消光

系数很小。11 月 20 日混合层高度逐渐降低, 混合层内气溶胶消光系数也比 19 日增加很多。11 月 21 日混合层高度逐渐降低, 混合层内气溶胶消光系数也比 20 日增加很多。

4.2 O₃、SO₂、NO₂

激光雷达位于三面环水的蜀山湖中央的科学岛, 科学岛的东面和南面是合肥市市区, 西面和北面为农田, 在科学岛东北偏东方向还有一座火力发电厂。实验期间合肥地区的高空风向(如图 6 所示)主要是西南偏西风, 只有 3 天的主导风向是西北偏西风, 总体来说, 合肥地区高空风向以西风为主。11 月 10 日~21 日期间风向主要为西风, 而科学岛的西部是农村地区, 没有污染。因此实验期间监测 O₃(如图 7 和图 8 所示)主要是在太阳紫外线的照射下形成的, 而污染气体 SO₂ 和 NO₂ 浓度(如图 9 所示)主要是大气的背景值。从图 7 和图 8 可以看出, O₃ 的垂直分布边界层内明显大, 全天最小值都出现在上午。17 日的降雨对 O₃ 的降低有明显的作。可以看出降雨后 18 日的 O₃ 浓度明显下降。而后在太阳照射的影响下, O₃ 浓度开始上升。图 9 显示了实验期间测量得到 SO₂ 和 NO₂ 的垂直分布, 测量得到的 SO₂ 小于 30 ppb, 得到的 NO₂ 平均小于 10 ppb。

5 结 论

实验期间观测到了合肥郊区的秋季大气气溶胶和污染气体的垂直分布状况。在没有大的天气过程变化情况下, 混合层的高度会逐渐降低, 混合层气溶胶会逐渐沉积下来使得气溶胶浓度变大。下雨后, 会冲刷气溶胶颗粒, 但雨后由于湿度较大, 颗粒物发生吸湿性增长粒径变大, 使得气溶胶消光系数变大, 但随着水汽的逐渐散去, 气溶胶消光系数会明显下降。同时, 雨后混合层高度会抬高, 随之受天晴的影响, 混合层又开始向下沉降。O₃ 的垂直分布边界层内明显大, 时间分布上中午、下午和晚上都有可能出现全天最大值, 最小值基本都在出现在上午。降雨对 O₃ 浓度的降

低有明显的作用。实验期间测量得到 SO₂ 和 NO₂ 的 NO₂ 平均小于 10 ppb。的垂直分布，测量得到的 SO₂ 小于 30 ppb, 得到

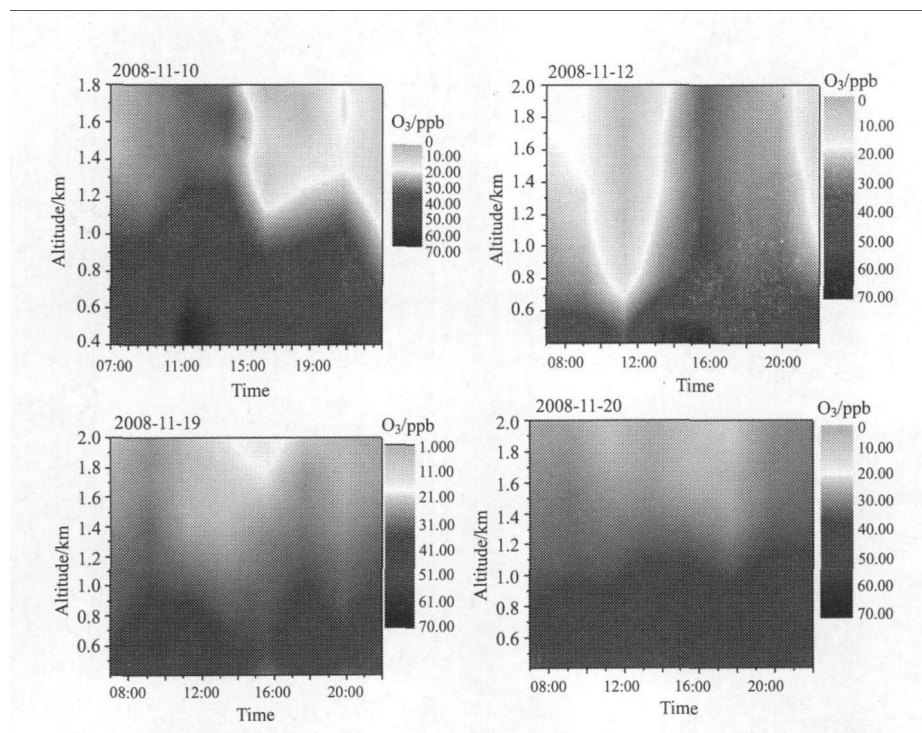


图 7 11 月 AML-2 激光雷达得到的 O₃ 浓度垂直密度日变化图

Fig.7 Time evolution of vertical density profile of ozone in November measured from AML-2 lidar

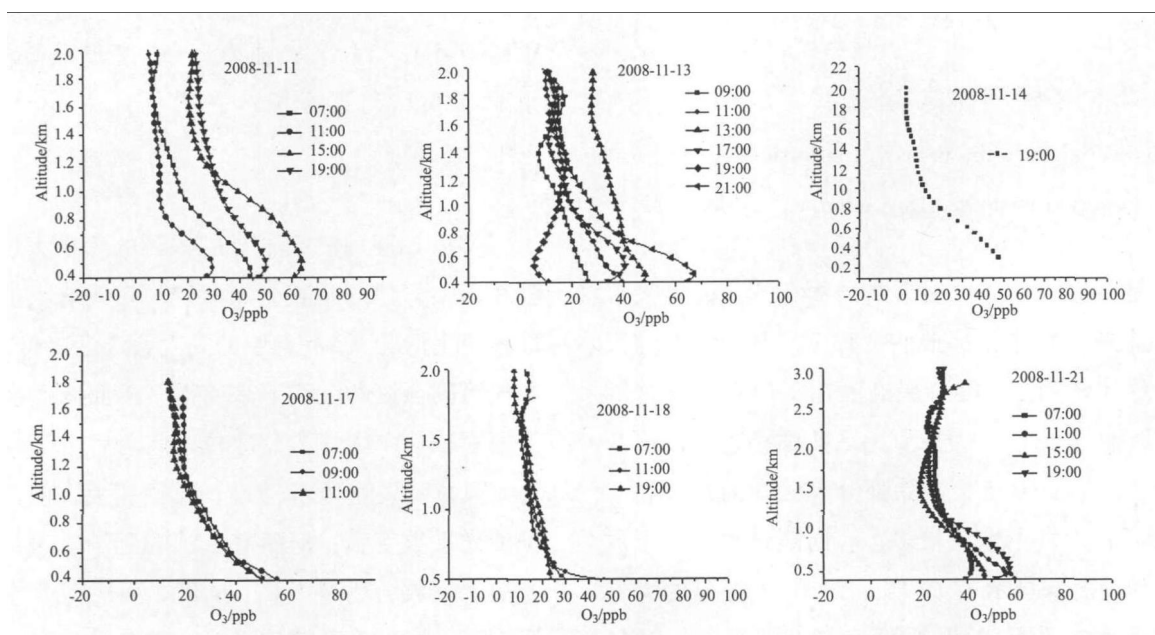


图 8 11 月 AML-2 激光雷达得到的 O₃ 浓度垂直曲线

Fig.8 Vertical density profile of ozone in November measured by AML-2 lidar

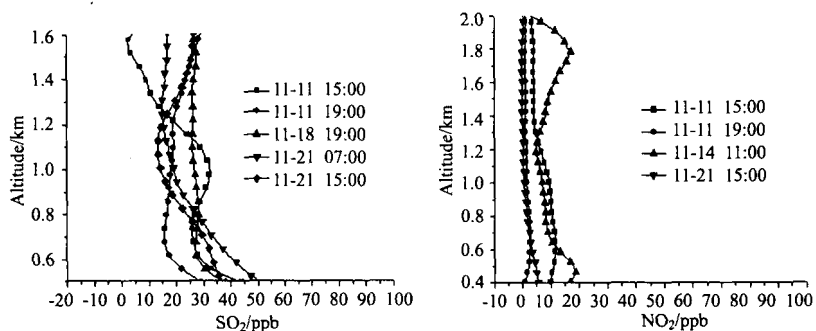


图 9 11 月 AML-2 激光雷达得到的 NO_2 和 SO_2 浓度垂直廓线

Fig.9 Vertical density profile of nitrogen dioxide and sulfur dioxide in November measured by AML-2 lidar

参考文献:

- [1] Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua, et al. Analysis of effects of photon overlap on lidar measurement of ozone [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, **19**(6): 550-554 (in Chinese).
胡顺星, 胡欢陵, 吴永华, 等. 光子并合作用对激光雷达测量臭氧的影响分析 [J]. *量子电子学报*, 2002, **19**(6): 550-554.
- [2] Yang Lujun, Zhang Yinchao, Liu Xiaoqing, et al. Optical properties of aerosol detected by mobile lidar system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, **21**(1): 88-91 (in Chinese).
杨陆军, 张寅超, 刘小勤, 等. 车载测污激光雷达测量大气气溶胶光学特性 [J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(1): 88-91.
- [3] Schotland R M. Some observations of the vertical profile of water vapor by a laser optical radar [C]. *Proceeding of 4th Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1966: 273-283.
- [4] Orphal J. A critical review of the absorption cross-sections of O_3 and NO_2 in the ultraviolet and visible [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2003, **157**: 185-209.
- [5] Klett J D. Lidar inversion with variable backscattering/extinction ratios [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(11): 1638-1643.
- [6] Nakazato M, Nagai T, Sakai T, et al. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(12): 2269-2279.
- [7] Kovalev V A, McElroy J L. Differential absorption lidar measurement of vertical ozone profiles in the troposphere that contains aerosol layers with strong backscattering gradients: A simplified version [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(36): 8393-8401.
- [8] McDermid I S, Godin S M, Lindqvist L O. Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone [J]. *Applied Optics*, 1990, **29**(25): 3603-3612.
- [9] Browell E V, Ismail S, Shipley S T. Ultraviolet DIAL measurements of O_3 profiles in regions of spatially inhomogeneous aerosols [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(17): 2827-2836.

作者简介: 曹开法 (1982-), 男, 安徽舒城人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事 Mie 散射, 水汽 Raman, Na^+ 荧光, 植物荧光以及差分吸收等激光雷达的系统设计和数据处理方法的研究。