

车载激光雷达对北京地区边界层污染监测研究

汪少林^{1,2}, 谢品华¹, 胡顺星¹, 魏合理¹, 胡欢陵¹, 谢军¹, 曹开法^{1,2}, 方欣^{1,2}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 合肥 230031; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:介绍了自行研制的车载差分激光雷达 AML-2 探测原理及技术参数, 于 2006-08、2006-09 在不同天气因素条件下对北京西南郊榆垓地区大气边界层污染物 O_3 、 NO_2 、 SO_2 进行了实时监测, 对比分析了 3 种污染物浓度垂直分布及日变化特征. 结果表明, 无外来污染输送时, 3 种污染物在阴雨天气总体浓度较小, O_3 和 NO_2 浓度随高度升高而减小, SO_2 浓度垂直分布少见此特征, 但在近地面 0.6 km 左右有较强 SO_2 污染层. 南部气流输送对北京地区大气环境影响明显, 2006-08-23 ~ 2006-08-25 这次强污染气流输送高度约 1 ~ 1.5 km, 3 种污染物浓度垂直分布及日变化特征受到干扰, 北京榆垓地区边界层 O_3 、 NO_2 、 SO_2 总体浓度明显上升.

关键词:大气环境; 激光雷达; 边界层; O_3 ; NO_2 ; SO_2

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0562-07

Measurement of Atmospheric Boundary Layer Pollutants by Mobile Lidar in Beijing

WANG Shao-lin^{1,2}, XIE Pin-hua¹, HU Shun-xing¹, WEI He-li¹, HU Huan-ling¹, XIE Jun¹, CAO Kai-fa^{1,2}, FANG Xin^{1,2}

(1. Centre of Atmospheric Optics, Anhui Institutes of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The parameters of AML-2 mobile lidar were introduced, which was based on differential absorption principle and designed by our institute. In Yufa of Beijing, the pollutants including O_3 , NO_2 , SO_2 in atmospheric boundary layer were monitored in August and September of 2006 under different weather conditions. Vertical profile and diurnal variation of concentrations of these pollutants were analyzed. If without the influence of pollution air transport from south region, the concentrations of these pollutants are low under the overcast weather condition. The concentrations of O_3 and NO_2 decrease with altitude, and this characteristic is not obvious for SO_2 , but there is a high concentration layer of SO_2 near ground (about 0.6 km). The quality of atmosphere Beijing is influenced significantly by air transportation from south region, and the altitude of the severe pollution air transport is about 1 km to 1.5 km in August 23rd to 25th. As a result, the characteristics of vertical profile and daily variation of the pollutants are changed, and the concentrations of O_3 , NO_2 , SO_2 in atmospheric boundary layer of Yufa area increased obviously.

Key words: atmosphere environment; lidar; atmospheric boundary layer; O_3 ; NO_2 ; SO_2

随着奥运会临近, 有关北京地区大气污染已有许多研究, 为了更好地治理北京的大气环境问题, 利用先进监测手段对污染物进行实时监测显得尤为重要. 目前主要的垂直监测手段有^[1]: 铁塔^[2]、高层建筑、系留飞艇、激光雷达. 前两者受到高度的限制, 不能探测到边界层高层(1 km 以上)污染情况, 系留飞艇难以做到实时快捷的监测. 本研究选择北京西南郊榆垓地区为监测点, 榆垓位于京冀交界, 是来自南部污染气流输送经过之地^[3~5]. 监测点采用中国科学院安徽光学精密机械研究所自行研制的车载激光雷达 AML-2^[6~9]于 2006-08 ~ 2006-09(相应 2008 奥运会举行时段), 对该地区边界层污染气体 O_3 、 NO_2 、 SO_2 进行了实时监测.

1 AML-2 激光雷达基本探测原理及结构

1.1 基本原理

根据激光雷达方程, 当波长 λ_i 、脉冲能量 E_i 的激光发射到大气中, 激光雷达从距离 z 、厚度为 Δz 的大气接收到的回波信号为^[9]:

$$P_i(z) = K_i \frac{E_i \beta_i(z) \Delta z}{z^2} \times \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_i(r) + N(r) \sigma(\lambda_i)] dr \right\} \quad (1)$$

式中, K_i 为激光雷达的系统常数, $N(r)$ 为距离 r 处的待测气体浓度, $\sigma(\lambda_i)$ 为待测气体对波长为 λ_i 激光的吸收截面, $P_i(z)$ 为距离为 z 的大气回波信号强度. 大气后向散射系数 $\beta_i(z)$ 和消光吸收系数 $\alpha_i(z)$ 包括气体分子和气溶胶 2 部分, 下标 M、A 分别对应

收稿日期: 2007-04-16; 修订日期: 2007-07-31
基金项目: 北京市科学技术委员会大气污染控制专项 (Z0005190042791)
作者简介: 汪少林(1984 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光雷达探测大气技术, E-mail: wshaolin@yahoo.com.cn

于分子和气溶胶的贡献^[9]:

$$\beta_i(z) = \beta_m(z) + \beta_{ia}(z) \tag{2}$$

$$\alpha_i(z) = \alpha_m(z) + \alpha_{ia}(z) \tag{3}$$

该激光雷达系统采用差分吸收测量方法探测污染气体浓度^[10~12],可在同一光路向大气发射波长接近的2束脉冲激光: λ_{on} 位于待测气体的吸收峰, λ_{off} 位于待测气体的吸收谷.待测气体对这2个波长吸收作用存在明显差异,而其他气溶胶粒子对这2个波长激光消光作用和后向散射作用基本相同.从而可根据2个波长回波差异确定待测气体浓度.将2个波长代入式(1)可解得距离 z 处待测气体浓度^[10]:

$$N(z) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{P(\lambda_{on}, z)}{P(\lambda_{off}, z)} \right] + B - E_A - E_M \tag{5}$$

式中, $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})$, B 、 E_A 及 E_M 分别为大气后向散射作用项、大气气溶胶消光作用项及大气分子消光作用项:

$$B = \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dz} \left[\ln \frac{\beta(\lambda_{on}, z)}{\beta(\lambda_{off}, z)} \right] \tag{6}$$

$$E_A = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_A(\lambda_{on}, z) - \alpha_A(\lambda_{off}, z)] \tag{7}$$

$$E_M = \frac{1}{\Delta\sigma} [\alpha_m(\lambda_{on}, z) - \alpha_m(\lambda_{off}, z)] \tag{8}$$

当 $\lambda_{on} \approx \lambda_{off}$ 时,大气后向散射作用项、大气气溶胶消光作用项及大气分子消光作用项可以忽略不计.

探测气溶胶时,系统向大气中发射波长为532 nm激光.可由Klett积分法^[13]求解消光系数.Klett积分法假定大气的消光系数和后向散射系数之间存在下述关系:

$$\beta(z) = C \cdot \alpha^k(z) \tag{9}$$

式中,参数 k 与发射的激光波长、气溶胶粒子特性有关,其取值范围为 $0.67 \leq k \leq 1.0$, C 为常数.把式(9)代入雷达方程,解方程后可得后向积分式^[9]:

$$\alpha(z) = \frac{\exp \{ \ln X(z) - \ln X(z_f) \} / k}{\frac{1}{\alpha(z_f)} + \frac{2}{k} \int_z^{z_f} \exp \{ \ln X(z') - \ln X(z_f) \} / k \, dz'}$$

(10)

表2 监测时间榆垓地区实时天气¹⁾

Table 2 Weather conditions of measurement period																	
日期	8月																
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23*	24*	25*	26
天气	雾转阴	雾转阴	雾转阴	雨	日晴夜雨	雾	雾转晴	晴(有云)	多云	雾	阴转晴	多云	雨	阴转多云	多云	日晴夜雨	阴雨
日期	9月																
	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5*	6*	7*	8	9	10	11	12
天气	雾转晴	雨	晴	雨	多云转晴	晴	雾转阴	日雾夜雨	晴	多云到晴	晴到多云	晴	雨	晴	晴	晴	晴

1)*表示有来自南面气流输送

式中, $X(z) = P(z)z^2$, $\alpha(z_f)$ 分别为相应的边界条件.利用上式可以求得不同距离处的大气消光系数.由于近地面气溶胶对532 nm激光消光系数远大于大气分子的消光作用,满足 $\alpha_A(z) \gg \alpha_m(z)$,所以此时大气消光系数近似等于气溶胶消光系数,即 $\alpha(z) \approx \alpha_A(z)$.

1.2 AML-2 激光雷达系统结构

AML-2 车载激光雷达为同轴结构,采用法国生产的 Quantel Brilliant b 型 Nd:YAG 激光器.该系统主要由拉曼激光光源^[14~16]、激光发射与扫描系统、光信号接收与检测系统和控制系统4部分组成.图1是 AML-2 的系统结构示意图^[17].表1列出了该系统的主要技术参数.

表1 车载激光雷达 AML-2 技术参数
Table 1 Specification of mobile lidar AML-2

项目	指标	
可探测污染物	SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , aerosol	
探测距离	SO ₂ , NO ₂ , O ₃ : 0.4 ~ 3 km, aerosol: 0.4 ~ 5 km	
最小探测距离	15 m	
最小探测浓度	SO ₂	10 × 10 ⁻⁹ (体积分数)
	NO ₂	25 × 10 ⁻⁹ (体积分数)
	O ₃	6 × 10 ⁻⁹ (体积分数)
	aerosol	0.05 km ⁻¹ (消光系数)
光源	Nd:YAG (Quantel Brilliant b)	
扫描频率/Hz	20	
扫描范围/(°)	纵向: 0 ~ 90; 横向: 0 ~ 360	
望远镜类型	Cassegrain (直径: 300 mm)	
AD 采集卡	16 bit, 10 MHz	
输出能量/mJ	≈ 30	(532 nm)
	≥ 4	(260 ~ 287 nm)
	≥ 15	(390 ~ 400 nm)

2 对北京周边大气环境几种污染物监测

于2006-08~2006-09,车载激光雷达对北京榆垓地区O₃、NO₂、SO₂进行了监测.表2给出了该地区实时天气情况.

2.1 O₃ 监测

据监测,大气O₃浓度有着较明显的日变化特征,图2是车载激光雷达在阴天2006-08-10以及晴

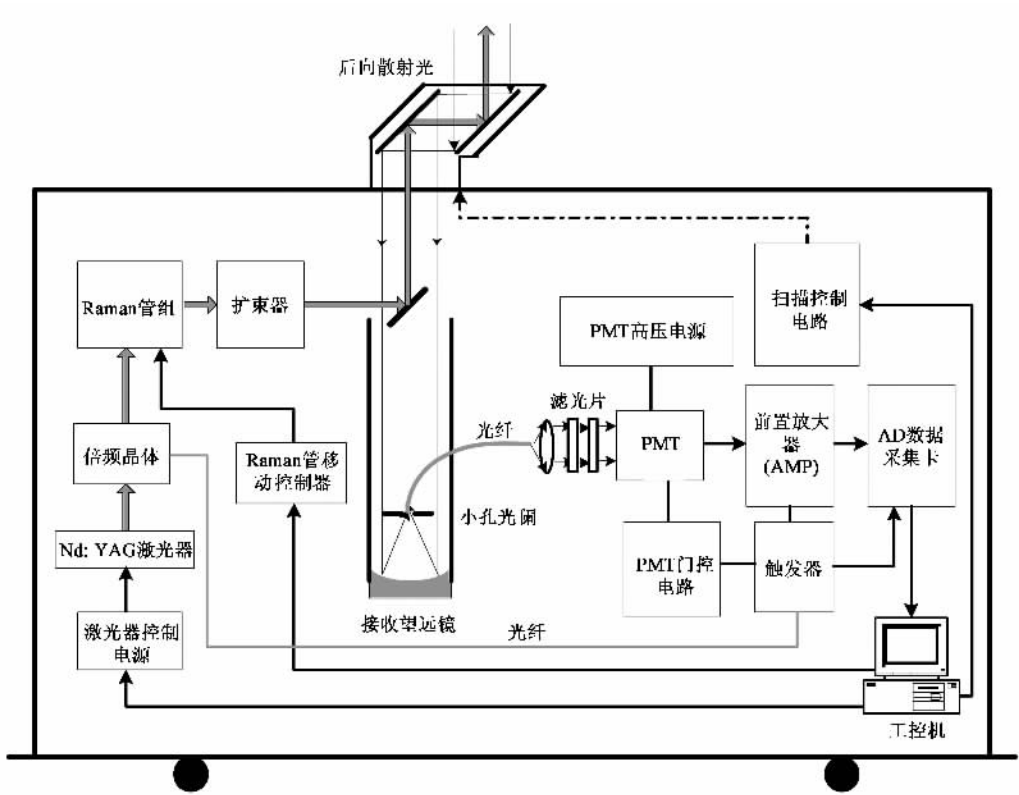


图 1 车载激光雷达 AML-2 结构

Fig.1 Structure of mobile lidar AML-2

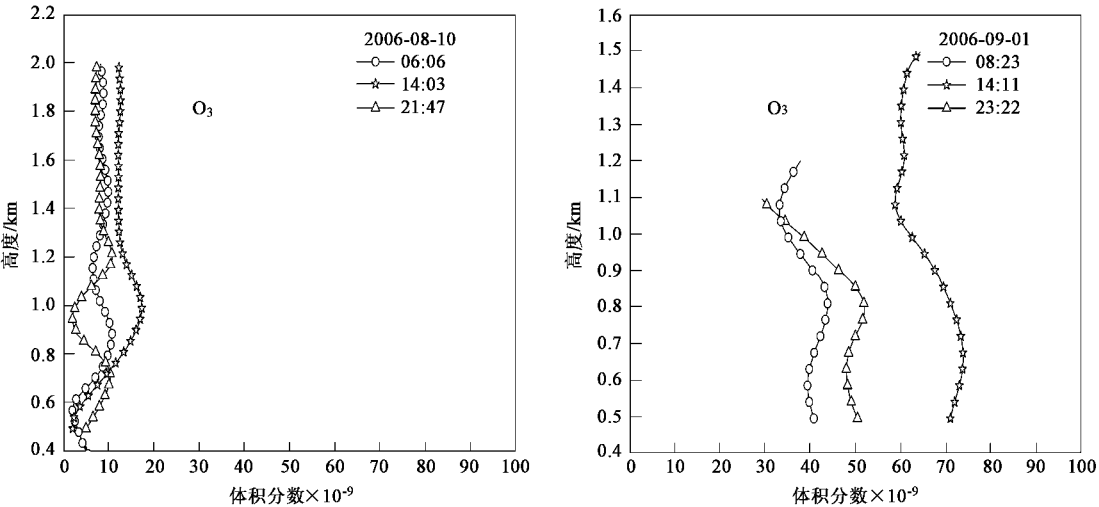
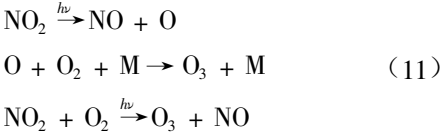


图 2 2006-08-10 及 2006-09-01 O_3 浓度垂直分布

Fig.2 Vertical profiles of the concentration of O_3 on August 10th and September 1st

天 2006-09-01 早、中、晚 3 时段探测的 O_3 浓度垂直分布.在阴雨天气, O_3 浓度随时间变化不明显,且浓度较低,而在晴朗天气, O_3 浓度随时间有着明显的变化,在中午时分浓度较高,通常在 14:00 左右浓度最高,这主要是因为 O_3 的浓度与太阳辐射造成的光

化学反应有着密切关系.在晴天, O_3 浓度主要与以下化学反应有关^[18]:



式中, M 表示催化载体, $h\nu$ 表示太阳辐射. 在晴朗天气, 由于太阳辐射的作用, 以及城市污染大气中的 CO 、 NMHC 同时消耗 $\text{NO}^{[19]}$, 加速了上述化学反应的正向效率, 促进了 O_3 的生成.

图 3 给出了降雨间隙 2006-08-27、2006-08-29、2006-08-31 不同时刻 O_3 浓度垂直分布. 可看出在晴天 O_3 浓度有随高度上升而减小的趋势; 随着间歇性

降雨, 边界层底部 O_3 浓度有日益减小的趋势, 而在边界层高层(1~2 km 以上) O_3 浓度稳定, 可能因为 2006-08-28、2006-08-30 的降雨降低了近地面与 O_3 光化学反应有关的气溶胶等载体浓度, 从而削弱了 O_3 的生成条件, 而在高层这些气溶胶等载体本身浓度就较低且 2006-08-26 已有所降雨, 后续降雨造成的载体浓度下降相对量小.

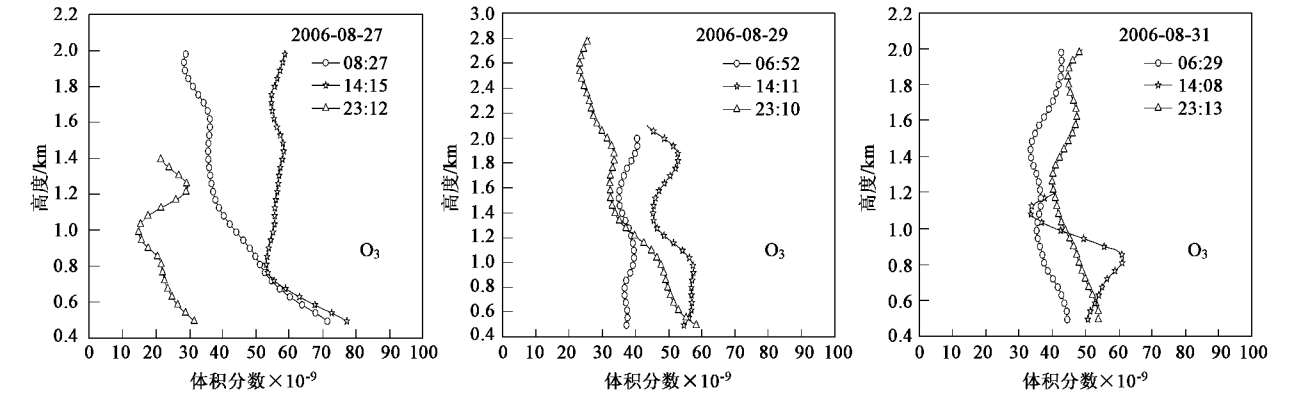


图 3 2006-08-27、2006-08-29、2006-08-31 O_3 浓度垂直分布
Fig. 3 Vertical profiles of the concentration of O_3 on August 27th, 29th, 31st

图 4 给出了有来自南面气流输送时(2006-08-23 下午~2006-08-25 上午), 榆垓地区 O_3 浓度在白昼和夜晚的最大时刻. 由于来自南面污染气流的影响, O_3 的日变化规律受到影响: O_3 的总体浓度较高, 最高达到了环境空气质量标准三级限制^[8](体积分数: 93×10^{-9}); 2006-08-24 出现了晚上 O_3 最高浓度大于白昼最高浓度, 且都大于中午时分; O_3 浓度随高度

上升而减小的特征消失; 在边界层 1~1.5 km 处 O_3 浓度出现峰值, 可能是因为此高度污染气流输送相对较强.

2.2 NO_2 监测

在没有南部污染气流输送的影响下, 大气中 NO_2 浓度日变化也有着显著特征, 通常晴天 NO_2 浓度较之阴雨天气高, 边界层顶部附近 NO_2 浓度波动较小, NO_2 浓度与人类活动直接相关, 因此在边界层底部 NO_2 浓度波动较大, 且 NO_2 浓度有随高度上升而减小的趋势. 图 5 给出了 2008-08-12(阴)、2008-08-29(晴) NO_2 、 O_3 早、中、晚 3 时段的浓度垂直分布. 可看出在 2008-08-29, NO_2 和 O_3 的浓度出现负相关关系, 主要由于在正午时段太阳辐射较强, O_3 随着式(11)的光化学反应不断产生, NO_2 被不断消耗, 在 14:00 左右, O_3 浓度达到最大值, NO_2 浓度达到白昼时刻最小值. 而在下午和傍晚, 由于太阳辐射的不断减弱, 由太阳辐射产生将 NO 不断被氧化成 NO_2 , NO_2 浓度不断上升, 从 2008-08-29 NO_2 浓度垂直分布图中可以看出, 17:00 左右 NO_2 浓度明显大于 14:00.

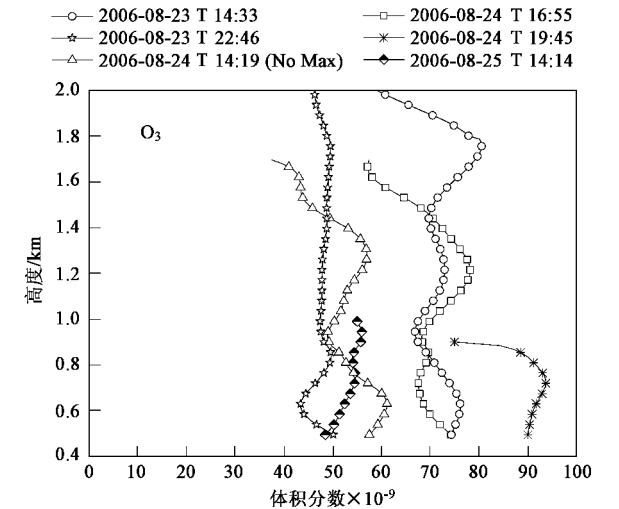


图 4 2006-08-23、2006-08-24、2006-08-25 O_3 浓度垂直分布
Fig. 4 Vertical profiles of the concentration of O_3
on August 23rd, 24th, 25th

图 6 给出了降雨间隙 2006-08-27、2006-08-31 的 NO_2 浓度垂直分布, 同时比较图 5 2006-08-29 NO_2 浓

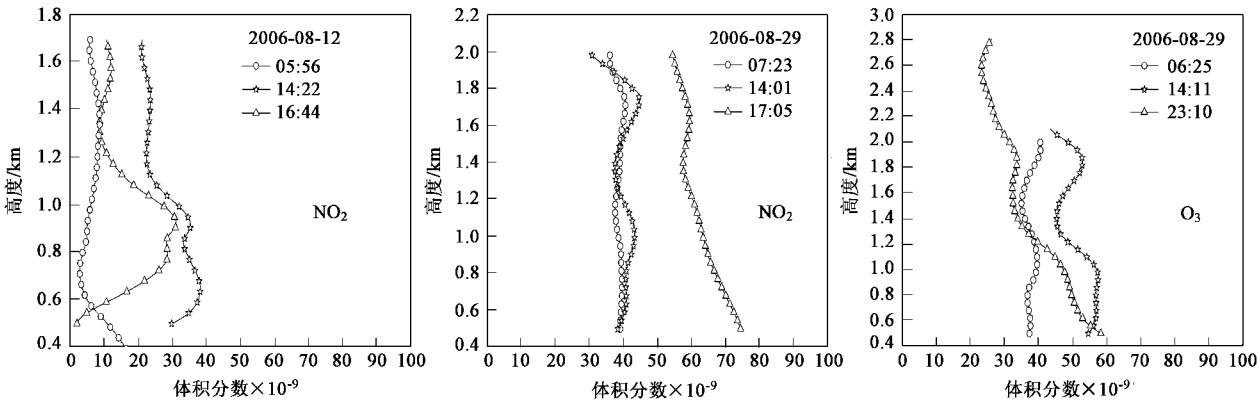


图 5 2006-08-12 NO₂、2006-08-29 O₃、NO₂ 浓度垂直分布

Fig.5 Vertical profiles of the concentration of NO₂ on August 12th, O₃ and NO₂ on August 29th

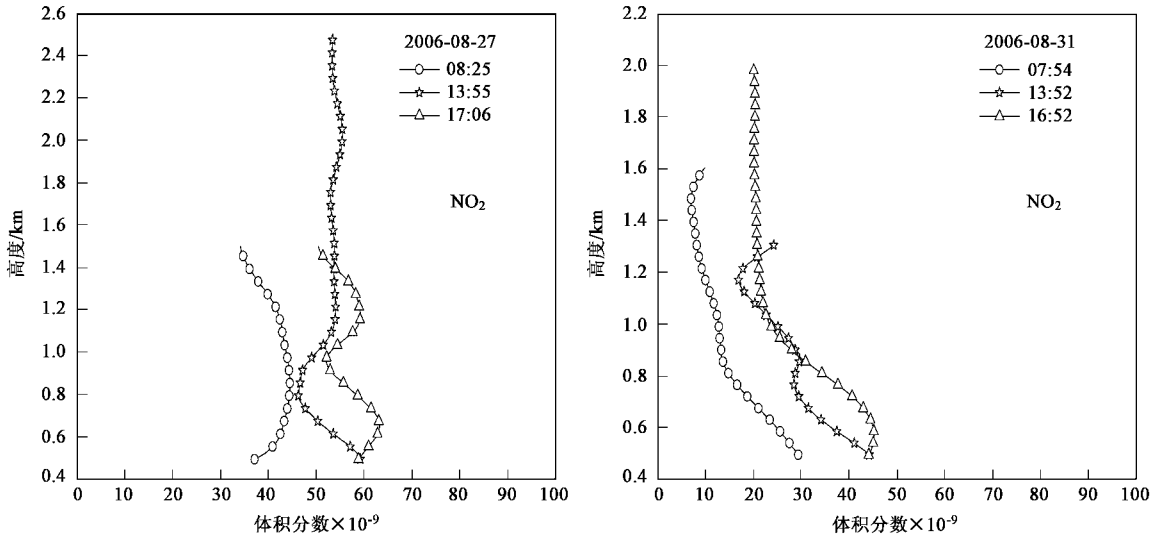


图 6 2006-08-27、2006-08-31 NO₂ 浓度垂直分布

Fig.6 Vertical profiles of the concentration of NO₂ on August 27th, 31st

度垂直分布,可以看出由于 2006-08-28、2006-08-30 这 2 d 的降雨,在边界层顶部 NO₂ 浓度降低,而在边界层底部 NO₂ 浓度虽有所降低,但波动较大,主要还是因为 NO₂ 浓度受人类活动影响比较明显,如汽车尾气的排放亦能造成 NO₂ 浓度的波动变化.

图 7 给出了有来自南面气流输送时(2006-08-23 下午~2006-08-25 上午),榆垓地区白昼 NO₂ 浓度最小时刻和夜晚最大时刻.2006-08-24 该南部气流对该地区造成的污染较为严重,NO₂ 浓度超出国家三级限制(体积分数:58×10⁻⁹);NO₂ 浓度变化规律受到影响,没有出现浓度随高度增加而减小的特征,在 2006-08-24 T15:00 左右 NO₂ 浓度依然很高,体积分

数达到 80×10⁻⁹;这次南部气流输送对边界层 NO₂ 浓度影响均匀,NO₂ 浓度垂直分布波动较小.

2.3 SO₂ 监测

图 8 给出了 2006-08-10(阴),2006-08-12(阴,星期六)及 2006-09-01(晴)SO₂ 不同时刻浓度垂直分布.边界层 SO₂ 无明显的日变化规律,少见浓度随高度增加而减小的垂直分布特征;边界层底部 SO₂ 浓度波动较大,顶部相对较稳定;通常阴雨天气边界层 SO₂ 浓度相对较低;由于 SO₂ 属于工业污染物,所以周末及节假日城市 SO₂ 浓度明显减小.

图 9 给出了降雨间隙 2006-08-27、2006-08-29、2006-08-31 的 SO₂ 浓度垂直分布.可看出边界层 SO₂

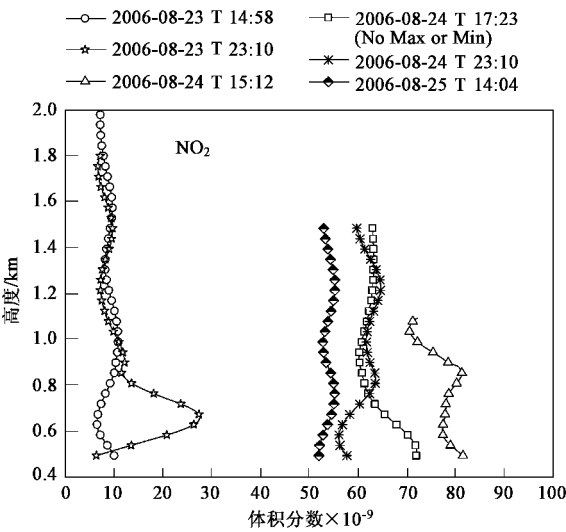


图 7 2006-08-23、2006-08-24、2006-08-25 NO₂ 浓度
最大值与最小值垂直分布

Fig.7 Vertical profiles of maximal and minimal concentration
of NO₂ on August 23rd, 24th, 25th

浓度并没有随着间歇性降雨成下降的趋势,因为城市 SO₂ 的污染源于每天工业排放,与气溶胶浓度无直接关系,所以前 1d 的降雨对第 2 d 的 SO₂ 的浓度无明显影响;在夜晚由于工业生产减少可看出边界层 SO₂ 浓度比白昼明显减小;2006-08-27 是星期天,所以 SO₂ 浓度低于工作日;在边界层 0.6 km 附近常形成 SO₂ 浓度的峰值,形成原因可能是工业烟囱(如电厂烟囱等)排放的 SO₂ 在此高度上形成较强的污染层.

图 10 给出了有来自南面气流输送时(2006-08-23 下午~2006-08-25 上午),榆堡地区不同监测时刻 SO₂ 浓度垂直分布.可看出 2006-08-24 南面气流输送造成的污染最强,日平均浓度超过国家二级限制(体积分数:52×10⁻⁹);SO₂ 浓度在边界层 0.6 km 处仍有峰值,可能因为工业排放造成的污染层随气流输送而飘移,加大了该地区边界层 0.6 km 处 SO₂ 污染层的浓度;同时在更高层(1~1.5 km)也有着较强

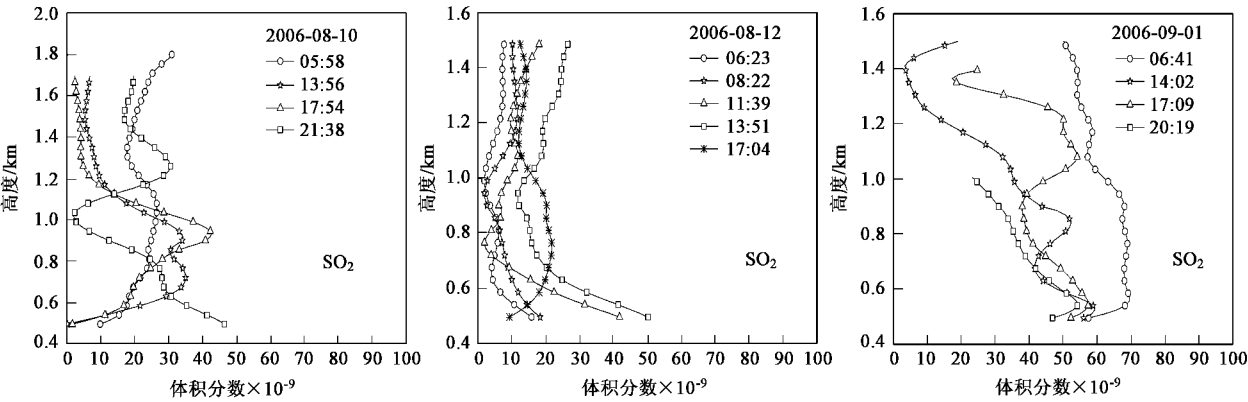


图 8 2006-08-10、2006-08-12、2006-09-01 SO₂ 浓度垂直分布

Fig.8 Vertical profiles of the concentration of SO₂ in August 10th, 12th and September 1st

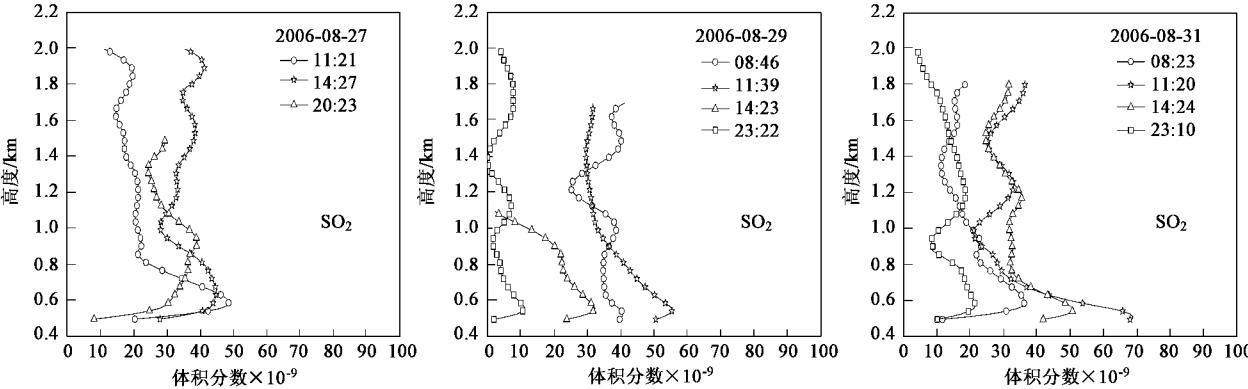


图 9 2006-08-27、2006-08-29、2006-08-31 SO₂ 浓度垂直分布

Fig.9 Vertical profiles of the concentration of SO₂ in August 27th, 28th, 31st

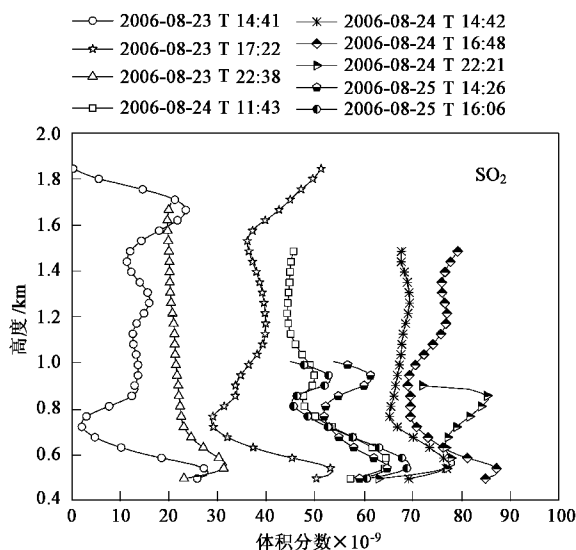


图 10 2006-08-23、2006-08-24、2006-08-25 SO_2 浓度垂直分布

Fig.10 Vertical profiles of the concentration of SO_2
on August 23rd, 24th, 25th

高浓度 SO_2 污染气流输送。

3 结论

(1)在此次监测期间,无外来污染输送时,北京榆垓地区边界层 NO_2 时平均浓度常高于环境空气质量标准二级限制(体积分数: 58×10^{-9}), SO_2 时平均浓度一般低于二级限制(体积分数: 52×10^{-9}),而 O_3 时平均浓度基本始终低于一级限制(体积分数: 56×10^{-9})。

(2)3种污染物在阴雨天气浓度较晴朗天气偏低。

(3)在晴朗天气边界层 O_3 、 NO_2 浓度日变化及负相关性特征较为明显,且浓度随高度增加而减小, SO_2 浓度无明显日变化规律,通常在夜晚和节假日浓度较小。此次监测期间, SO_2 在边界层低空区域(0.6 km左右)形成较强污染层。

(4)南部气流输送对北京地区环境污染有着直接影响,2006-08-23~2006-08-25南部气流输送时段,北京榆垓地区 O_3 、 NO_2 、 SO_2 浓度明显升高,从 O_3 、 SO_2 在边界层1~1.5 km左右变化可看出此高度有较强的污染气流输送,同时北京榆垓地区高度0.6 km左右的 SO_2 污染层浓度也随之增加。

致谢:感谢在共同参与“北京及周边大气环境观测”项目时,中国科学院大气物理研究所、北京大学环境学院、日本东京大学等合作单位为车载激光雷达监测提供气流输送、湿度、地面污染指数等有关信

息的支持。

参考文献:

- [1] 丁国安,孟昭阳,于海青,等.北京城区大气边界层空气污染特征观测研究[J].应用气象学报,2002,13(Suppl): 82-91.
- [2] 孙扬,王跃思,刘广仁,等.北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO_2 的垂直分布分析[J].环境科学,2006,27(3): 408-414.
- [3] 苏福庆,高庆先,张志刚,等.北京边界层外来污染物输送通道[J].环境科学研究,2004,17(1): 26-40.
- [4] 胡欢陵,吴永华,谢晨波,等.北京地区夏冬季颗粒物污染边界层的激光雷达观测[J].环境科学研究,2004,17(1): 61-66.
- [5] 任阵海,万本太,虞统,等.不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送[J].环境科学研究,2004,17(1): 7-13.
- [6] 屈凯峰,张寅超,陶宗明,等.车载测污激光雷达探测近地面层臭氧[J].量子电子学报,2006,23(3): 365-368.
- [7] 余诗华,张寅超,陶宗明.车载测污激光雷达电厂周边 SO_2 测量研究[J].量子电子学报,2006,23(3): 351-354.
- [8] 张寅超,胡欢陵,邵石生,等.北京大气 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的激光雷达监测实验[J].量子电子学报,2006,23(3): 346-350.
- [9] 张寅超,胡欢陵,谭锟,等.AML-1大气污染监测激光雷达样机研制[J].光学学报,2004,24(8): 1025-1031.
- [10] Fredriksson K, Galle B, Nystrom K, et al. Mobile lidar system for environmental probing [J]. Applied Optics, 1981, 20(24): 4181-4189.
- [11] Goers U B. Laser remote sensing of sulfur dioxide and ozone with the mobile differential absorption lidar ARGOS [J]. Optical Engineering, 1995, 34(11): 3097-3102.
- [12] Uchino O, Tabata I. Mobile lidar for simultaneous measurements of ozone, aerosols, and temperature in the stratosphere[J]. Applied Optics, 1991, 30(15): 2005-2012.
- [13] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [14] Xu B, Yue G M, Wu Y H, et al. Study on UV laser generated by SRS of CH_4 for NO_2 DIAL measurements[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(3): 377-381.
- [15] Hu S X, Hu H L, Zhang Y C, et al. A new differential absorption lidar for NO_2 measurements using Raman-shifted technique [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(8): 435-437.
- [16] 吴永华,岳古明,胡欢陵,等. Nd:YAG 四倍频激光抽运氙后的拉曼效应及其在激光雷达中的应用[J].中国激光,2000,27(9): 823-827.
- [17] 屈凯峰.车载测污激光雷达对近地面层大气污染物的实验测量研究[D].合肥:中国科学院合肥物质科学研究院,2006. 25-30.
- [18] 刘烽,陈辉, Liu Y G. 北京市夏季低层大气 NO_x 、 O_3 垂直分布观测研究[J].青岛海洋大学学报,2002,32(2): 179-185.
- [19] 安俊岭,高会旺,王自发,等.高 NO_x 条件下的非甲烷烃体积分数的变化对 O_3 生成量的影响[J].气候与环境研究,1998,3(2): 147-150.
- [20] GB 3095-1996,环境空气质量标准[S].