

文章编号: 0258-7025(2006)11-1567-07

气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法

韩道文, 刘文清, 刘建国, 陆亦怀, 赵南京, 杨 辉, 张玉钧

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境与光学技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 用激光雷达反演气溶胶质量浓度的空间垂直分布是环境监测领域的重点研究内容之一。利用激光雷达测量得到的地面消光系数和振荡天平获得的地面质量浓度, 建立起质量浓度与消光系数之间的关联, 再通过消光系数的垂直分布反演质量浓度的垂直分布。基于这一思想, 采用两种模型进行了拟合和相关性分析。实验表明用这两种模型反演的质量浓度空间分布相关性好, 数据量级与实际相符, 具有一定的可信度。模型易于实现, 计算简单, 可实现在线实时检测。

关键词 激光雷达; 气溶胶; 质量浓度; 空间垂直分布

中图分类号 X 831 **文献标识码** A

Retrieval Method for Aerosol Mass Concentration Vertical Distribution

HAN Dao-wen, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, LU Yi-huai,
ZHAO Nan-jing, YANG Hui, ZHANG Yu-jun

(Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution with lidar is one of research contents in environment monitoring fields. Making use of the extinction coefficients on ground gained by lidar and corresponding mass concentrations gotten by the tapered element oscillating microbalance (TEOM), the relationship between extinction coefficient and mass concentration can be disclose, then the mass concentration vertical distribution can be retrieved through the extinction coefficient vertical distribution. Based on it, two models are adopted, and confirmed by some experiments. It is indicated that the aerosol mass concentration vertical distributions retrieved by both the models are consistent with each other, and consistent with facticity. The models are maneuverable and simple, and can monitor online and real-time.

Key words lidar; aerosol; mass concentration; vertical distribution

1 引 言

大气中的气溶胶已成为当今气候和环境研究中的核心内容之一, 这不仅是因为悬浮在大气中的气溶胶粒子会直接影响到地气系统的能量收支, 进而影响气候变化, 而且会污染人类的生存环境, 进而直接危害人体健康^[1]。

激光雷达为大气气溶胶探测研究提供了有力的工具^[2,3]。在边界层结构、气溶胶消光系数反演等领域, 激光雷达探测技术已经非常成熟。然而, 气溶胶质量浓度空间垂直分布方面的研究虽备受关注^[4], 却一直进展不大, 到目前为止, 仍无有效的方法反演气溶胶质量浓度的空间垂直分布, 这也使得激光雷达在环境监测中的作用不能充分发挥出来。

收稿日期: 2006-03-29; **收到修改稿日期:** 2006-05-31

基金项目: 国家 863 计划(2005AA64100)资助项目。

作者简介: 韩道文(1974—), 男, 安徽桐城人, 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境与光学技术重点实验室博士研究生, 主要从事激光雷达大气环境监测研究。E-mail: dwhan@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 中国科学院安徽光学精密机械研究所所长, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型环境监测技术, 痕量气体、水体、目标散射特性等的光学与光谱学监测方法, 机动车尾气在线监测技术等研究和相应的监测仪器研发工作。E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

文中运用激光雷达获取的气溶胶消光系数值,结合振荡天平测得的地面颗粒物的质量浓度,采用两种模型进行了拟合和相关性分析,通过实验验证,表明两个模型在反演气溶胶质量浓度空间垂直分布时具有一定的可信度,可为该领域的进一步研究提供参考。

2 反演模型

2.1 线性模型

通常大气气溶胶对激光的散射为一次散射,假定认为气溶胶在任何高度只是浓度不同,组分之间的比例相同,因此消光系数只是随着高度而变化。假定最小比例组分的组合为一个基本单位,把该基本单位的气溶胶组合等效为一个粒子,称为等效粒子。这样,不同高度的气溶胶就是由这种单一的等效粒子组成的,只是粒子数不同。在高度 z 处的气溶胶组成为基本单位的 $n(z)$ 倍,则高度 z 处的等效粒子数为 $n(z)$ 。设等效粒子的消光系数为 σ_{ext} ,质量浓度为 ρ ,则在高度 z 处气溶胶的消光系数 $\sigma(z)$ 和质量浓度 $m(z)$ 分别为

$$\sigma(z) = \sigma_{\text{ext}} \times n(z), \quad (1)$$

$$m(z) = \rho \times n(z), \quad (2)$$

由(1),(2)式可得

$$m(z) = \rho \times n(z) = \rho \times \sigma(z) / \sigma_{\text{ext}} = (\rho / \sigma_{\text{ext}}) \times \sigma(z) = \xi \sigma(z), \quad (3)$$

式中 $\xi = \rho / \sigma_{\text{ext}}$ 是比例系数,与大气气溶胶尺度谱分布、组分及光学折射率有关。

这样,气溶胶在高度 z 处的质量浓度就与该处的消光系数成正比。这与文献[5,6]的结论一致。

由于气溶胶粒子的粒径范围比较广(0.001~100 μm),同时考虑到测量时的不稳定因素,我们将(3)式线性模型写成如下的形式

$$m(z) = \xi \sigma(z) + C, \quad (4)$$

其中 C 为常量,与测量时的气溶胶组成及测量系统有关。

2.2 指数模型

胡欢陵等^[7]研究了近地面气溶胶消光系数 σ 与近地面气溶胶质量浓度 m 的相互关系,给出的经验公式为

$$m = a \sigma^b, \quad (5)$$

其中 a, b 为模型参数,与季节、气溶胶模式^[8]及气象条件有关。(5)式指出近地面气溶胶的质量浓度与消光系数是指数关系。同样,在空间垂直方向若气溶

胶组分比例不变,只是浓度变化,则空间垂直方向的质量浓度与消光系数也应满足上述关系,即

$$m(z) = a \sigma(z)^b, \quad (6)$$

同样考虑到测量时的不稳定因素,将(6)式写成如下的形式

$$m(z) = a \sigma(z)^b + C. \quad (7)$$

2.3 模型的计算流程

用上述模型反演气溶胶质量浓度空间垂直分布的步骤如下:

1) 获取地面的气溶胶消光系数值和同一地点对应时刻的质量浓度值。气溶胶消光系数可由激光雷达得到,质量浓度可由多种方法测量^[9],例如滤膜采样称重,振荡天平测量等。

2) 把相同条件下的消光系数与质量浓度对放在一起,通过迭代法计算模型的参数。消光系数与质量浓度对至少应在3对以上,计算的模型参数包括线性模型的 ξ 和 C ,指数模型的 a, b 和 C 。

3) 由计算得到的模型参数和实际测得的垂直方向的消光系数,反演气溶胶质量浓度的空间垂直分布。垂直方向的消光系数可由激光雷达测得。把激光雷达垂直放置,将接收到的雷达回波信号代入

$$X(z) = P_z \cdot z^2 = C\beta(z) \exp\left[-\int_0^z 2\sigma(z) dz\right] = C[\beta_a(z) + \beta_m(z)] \exp\left\{-2\int_0^z [\sigma_a(z) + \sigma_m(z)] dz\right\} \quad (8)$$

雷达方程,运用 Fernald 方法^[10,11]可反演出不同高度的气溶胶消光系数。式中, P_z 为激光雷达接收探测距离 z (km) 处的大气后向散射回波信号(W); C 为激光雷达系统常数($\text{W} \cdot \text{km}^3 \cdot \text{sr}$); $\beta(z)$ 和 $\sigma(z)$ 分别为距离 z 处大气总的后向散射系数($\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$)和消光系数(km^{-1}), $\beta(z) = \beta_a(z) + \beta_m(z)$, $\sigma(z) = \sigma_a(z) + \sigma_m(z)$, 下标 a, m 分别为气溶胶和空气分子。根据激光雷达和采集卡的性能,消光系数的空间分布距离不同,每隔一定的距离即可获得一个消光系数值。反演时,间隔相应的距离,将模型参数和对应的消光系数值代入计算,即可获得该高度的质量浓度值,把所有点的消光系数都计算一遍,就可以得到测站上空的气溶胶质量浓度空间垂直分布。

需要说明的是,气溶胶消光系数和质量浓度的对应值应按照不同条件(例如天气、气溶胶分布等)分组。因为不同的天气和外界条件对模型参数的影响不同,因此在计算时要尽可能选择天气状况及其他因素相同或接近的消光系数与质量浓度对进行计

算。实际计算时,考虑到天气及气溶胶分布在很短时间内可认为是相对稳定的,因此可选择天气和气溶胶组分及浓度都变化不大且时间临近的数据对进行分组计算。虽然线性方程的模型参数只有 ξ 和 C 两个,指数模型的参数只有 a, b 和 C 三个,但为了更准确地反映消光系数与质量浓度之间的关系,消光系数与质量浓度对应当越多越好,然而,由于受条件的约束,在很短时间内获得的数据毕竟是有限的。因此需要根据实际情况确定参与运算的消光系数与质量浓度对,要综合考虑参与同次运算的数据获取条件和数据对数量两个因素。

3 实验结果

为了验证线性模型及指数模型的准确性,采用 2006 年 2 月在北京丰台区的实验数据进行反演。实验采用的气溶胶激光雷达和振荡天平均由中国科

学院安徽光学精密机械研究所研制。采用垂直发射的激光雷达测量回波信号,计算得到消光系数,其垂直距离分辨率为 15 m,测量高度 1.5 km 左右。地面颗粒物质量浓度由振荡天平测量。振荡天平测量的是 PM10 的质量浓度,而北京冬季的 PM10 质量浓度占气溶胶总质量浓度的比例约为 57%^[1],由此可得到气溶胶的总质量浓度。

3.1 模型反演结果

根据 2.3,首先由地面的消光系数和质量浓度对计算模型参数,然后再由垂直方向的消光系数计算质量浓度的空间垂直分布。为了进行对比,我们选择了两组不同条件下的数据进行反演。

表 1 是 2006 年 2 月 19 日 10:00~12:00 之间的几组数据及计算得到的模型参数值,表 2 是 2006 年 2 月 25 日 17:00~19:00 之间的几组数据及计算得到的模型参数值。

表 1 2006 年 2 月 19 日 10:00~12:00 之间的数据及相应的模型参数值

Table 1 Related data between 2006-02-19 10:00~12:00 and model parameters

Time	Mass concentrations on ground	Extinction coefficients on ground	Linear model parameters	Exponential model parameters	Results retrieved by linear model	Results retrieved by exponential model
10:45	255.67	0.36558	$\xi = 200,$ $C = 157$	$a = 326,$ $b = 0.62,$ $C = 50$	230.11	224.68
11:07	210.33	0.30223			217.44	205.24
11:29	180.26	0.24456			205.91	186.15
11:51	167.73	0.18386			193.77	164.07

表 2 2006 年 2 月 25 日 17:00~19:00 之间的数据及相应的模型参数值

Table 2 Related data between 2006-02-25 17:00~19:00 and model parameters

Time	Mass concentrations on ground	Extinction coefficients on ground	Linear model parameters	Exponential model parameters	Results retrieved by linear model	Results retrieved by exponential model
17:00	74.34	0.08123	$\xi = 257,$ $C = 50$	$a = 146,$ $b = 0.60,$ $C = 40$	70.87	72.37
17:22	68.32	0.06372			66.38	67.98
17:38	68.72	0.07299			67.75	68.36
18:44	60.86	0.05722			63.70	64.23

运用表 1,表 2 计算得到的模型参数,结合相应时刻激光雷达测得的垂直消光系数分布,可以反演出该时刻的气溶胶质量浓度空间垂直分布。图 1,图 2 是第一组数据的开始时刻和结束时刻,分别用线性模型和指数模型反演的气溶胶质量浓度空间垂直分布示意图,图 3,图 4 是第二组数据的后两个时刻分别用线性模型和指数模型反演的气溶胶质量浓度空间垂直分布示意图。

3.2 反演结果讨论

由于实际的气溶胶质量浓度空间垂直分布无法直接测量(这也是制约该领域发展的原因之一),因此无法将每个模型的结果与真实值进行对比。但同一时刻用不同方法反演的结果却应当具有一定的可比性。

图 5~图 8 是上述四个时刻两种模型反演结果的对比图与线性拟合曲线图。不同时刻两种模型反

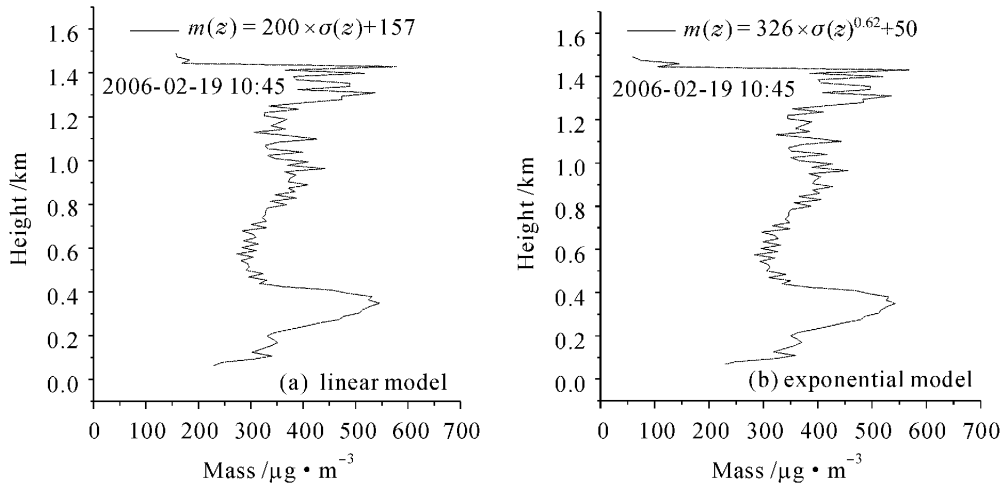


图 1 2006 年 2 月 19 日 10:45 的气溶胶质量浓度垂直分布
 Fig. 1 Aerosol mass concentration vertical distributions at 2006-02-19 10:45

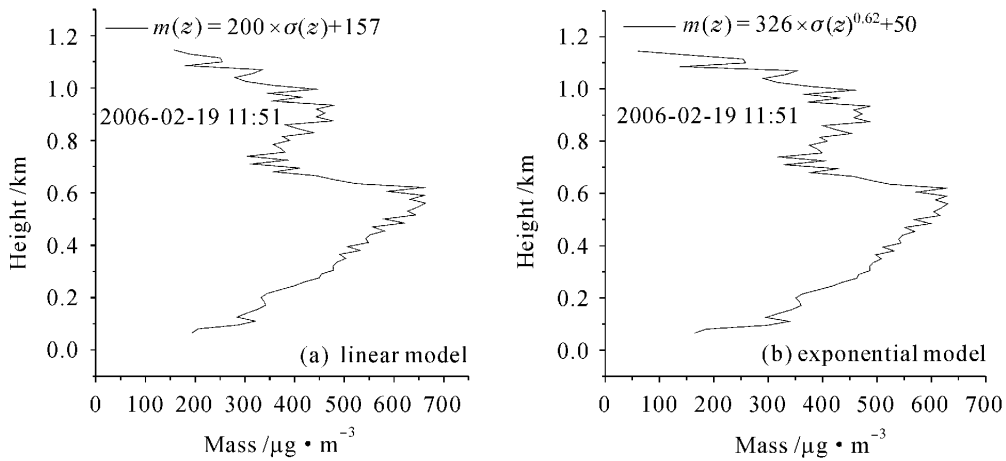


图 2 2006 年 2 月 19 日 11:51 的气溶胶质量浓度垂直分布
 Fig. 2 Aerosol mass concentration vertical distributions at 2006-02-19 11:51

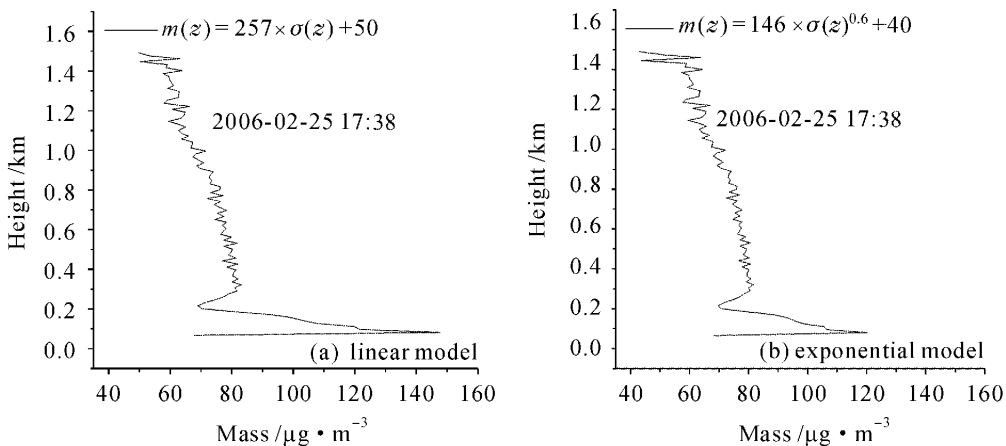


图 3 2006 年 2 月 25 日 17:38 的气溶胶质量浓度垂直分布
 Fig. 3 Aerosol mass concentration vertical distributions at 2006-02-25 17:38

演结果的数据相关性如表 3 所示。

从图 5~图 8 和表 3 可以看出,两种模型的计算结果非常接近,具有可比性。数据量级与相关文

献[12~14]报道的也在同一量级上,表明两种模型反演的结果具有一定的可信度。

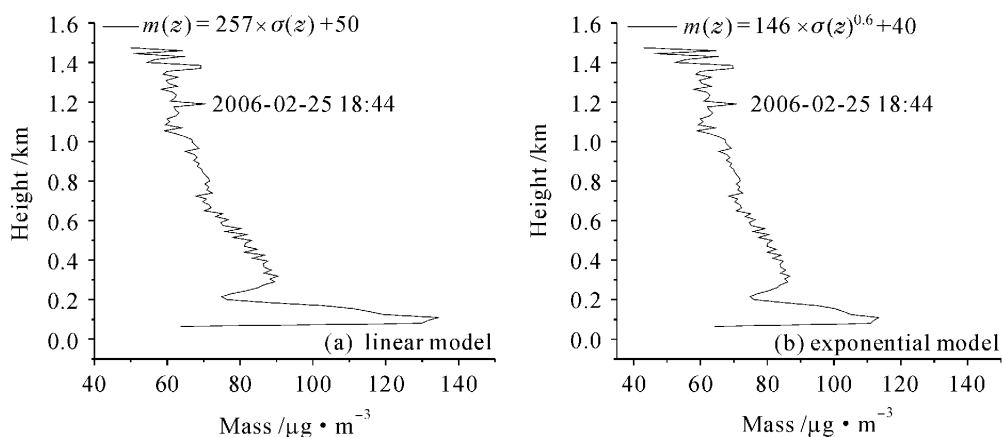


图 4 2006 年 2 月 25 日 18:44 的气溶胶质量浓度垂直分布

Fig. 4 Aerosol mass concentration vertical distributions at 2006-02-25 18:44

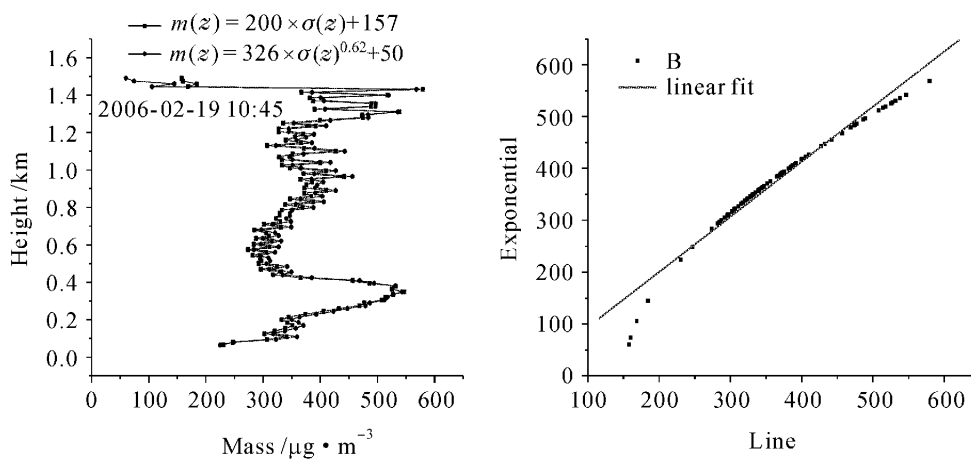


图 5 2006 年 2 月 19 日 10:45 两种模型反演结果对比及线性拟合图

Fig. 5 Comparison and linear fit of results at 2006-02-19 10:45

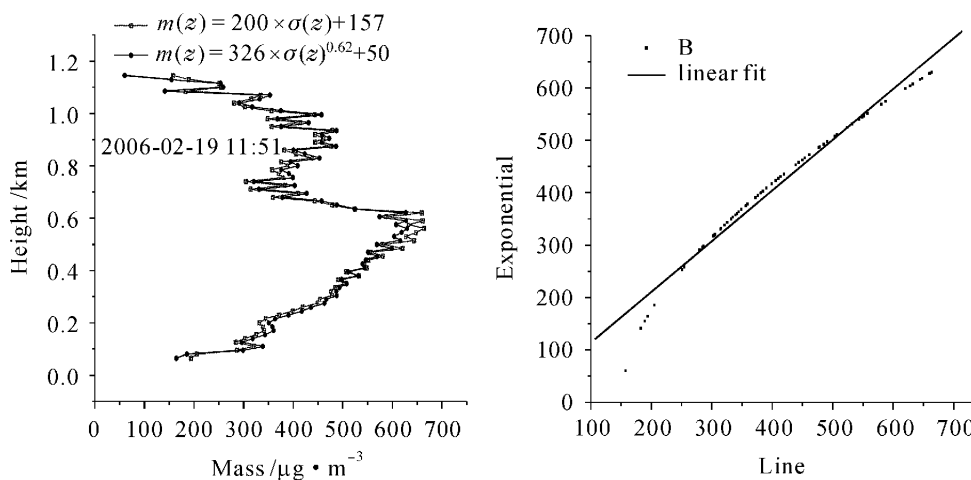


图 6 2006 年 2 月 19 日 11:51 两种模型反演结果对比及线性拟合图

Fig. 6 Comparison and linear fit of results at 2006-02-19 11:51

表 3 不同时刻两种模型反演数据的相关性

Table 3 Relativity of the results retrieved by both models

Time	2006-02-19 10:45	2006-02-19 11:51	2006-02-25 17:38	2006-02-25 18:44
Relativity	0.98028	0.98623	0.97853	0.98478

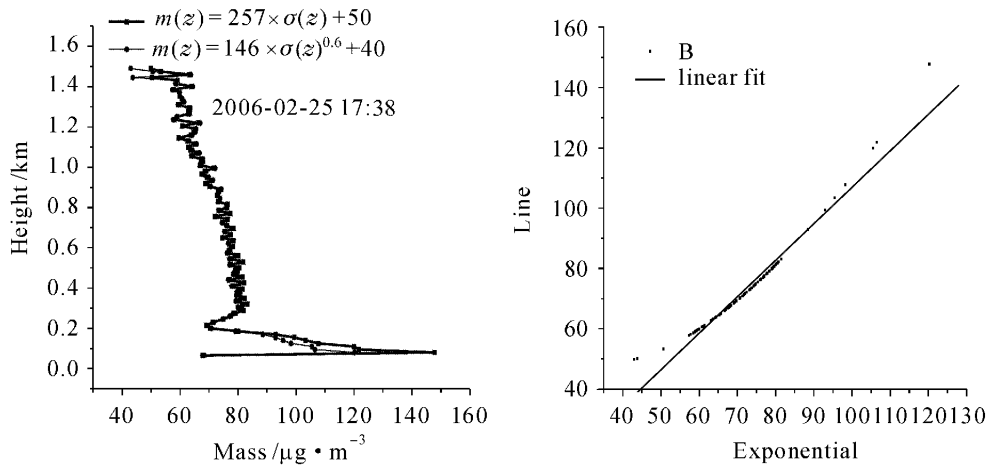


图7 2006年2月25日17:38两种模型反演结果对比及线性拟合图

Fig. 7 Comparison and linear fit of results at 2006-02-25 17:38

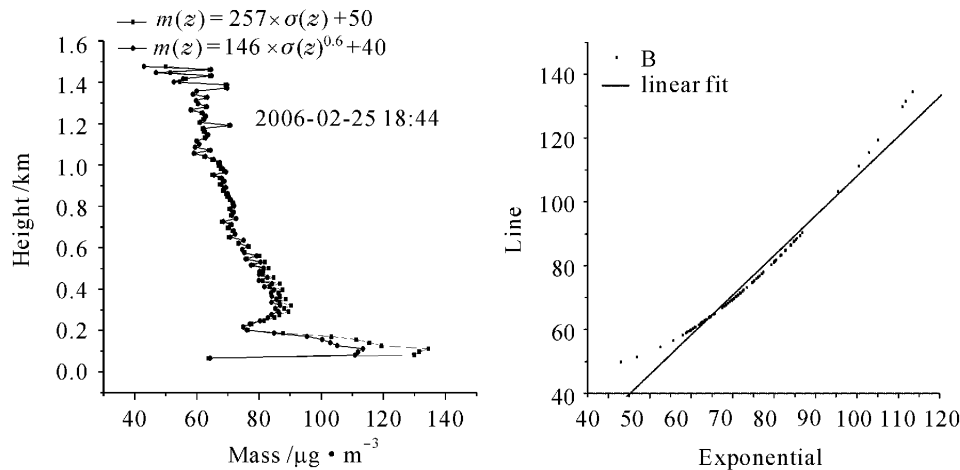


图8 2006年2月25日18:44两种模型反演结果对比及线性拟合图

Fig. 8 Comparison and linear fit of results at 2006-02-25 18:44

4 结 论

采用两种模型对气溶胶质量浓度空间垂直分布进行了反演,并作了相关分析,虽然无法获得实际的气溶胶质量浓度的空间垂直分布来判定两模型的优劣,但实验表明两种模型反演的结果具有一定的可信度。模型易于实现,计算简单。如果将激光雷达和振荡天平的数据实时传送到计算机中,通过软件即可实现对大气气溶胶质量浓度空间垂直分布的在线实时监测。在目前尚无更好的方法反演气溶胶质量浓度空间垂直分布的情况下,文中的模型提供了一种思路,具有一定的实用价值,并可为进一步研究提供参考。

参 考 文 献

- 1 Wang Gengchen, Xie Hua, Wan Xiaowei *et al.*. Variation of aerosol mass concentration and element composition with height in Beijing area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1):37~40
- 2 王庚辰,谢 骅,万小伟 等. 北京地区气溶胶质量浓度及组分随高度的变化[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1):37~40
- 3 Haitao Fang, Deshuang Huang. Lidar signal de-noising based on wavelet trimmed thresholding technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1):1~3
- 4 Hu Shunxing, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. L625 differential absorption lidar system for tropospheric ozone measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5):597~601
- 5 胡顺星,胡欢陵,吴永华 等. L625 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5):597~601
- 6 Wang Naining, Yu Xianhuang, Zhu Xiaocheng. Study of the laser based measuring technique for smoke and dust in emission [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):1032~1036
- 7 王乃宁,虞先煌,竺晓程. 烟尘粉尘向大气排放的激光监测技术研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(11):1032~1036
- 8 Sun Jingqun, Zhang Haifu. A theoretical analysis of remote measurement of mass concentration of atmospheric dust using lidar [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, **2**(1):36~43
- 9 孙景群,张海福. 激光遥测大气尘埃质量浓度的理论分析[J]. *环境科学学报*, 1982, **2**(1):36~43
- 10 Sun Jingqun. Atmospheric Detection Using Laser [M]. Beijing: Science Press, 1986. 132~134
- 11 孙景群. 激光大气探测[M]. 北京:科学出版社,1986. 132~134

- 7 Hu Huanling, Wu Yonghua, Xie Chenbo *et al.*. Aerosol pollutant boundary layer measured by lidar at Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1):59~73
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):59~73
- 8 Yan Peng, Li Weiliang, Qin Yu. A review of the current development of atmospheric aerosol models [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, **15**(5):629~640
颜鹏,李维亮,秦瑜. 近年来大气气溶胶模式研究综述[J]. 应用气象学报, 2004, **15**(5):629~640
- 9 Yan Fengqi. Study on measure of atmospheric aerosol's physical parameters [D]. Hefei: Chinese Academy of Sciences, 2003. 14~15
阎逢旗. 大气气溶胶物理参数测量研究[D]. 合肥:中国科学院, 2003. 14~15
- 10 F. G. Fernald. Analysis of atmospheric lidar observation; some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5):652~655
- 11 Xu Feng, Cai Xiaoshu, Su Mingxu *et al.*. Study of independent model algorithm for determination of particle size distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):223~228
徐峰,蔡小舒,苏明旭等. 独立模式算法求解颗粒粒径分布的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(2):223~228
- 12 Zhang Renjian, Wang Wei, Wang Zifa. Seasonal variation of dry deposition and mass concentration of aerosols in Beijing [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2004, **4**(Suppl): 750~753
张仁健,王纬,王自发. 北京大气气溶胶干沉降和质量浓度的季节变化特征[J]. 过程工程学报, 2004, **4**(增刊):750~753
- 13 Wang Gengchen, Xie Hua, Wan Xiaowei *et al.*. Chemical composition of PM10 and its variation in the atmosphere in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1): 41~44
王庚辰,谢骅,万小伟. 北京地区空气中PM10的元素组分及其变化[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1):41~44
- 14 Yan Fengqi, Hu Huanling, Wu Yonghua *et al.*. Variation of aerosol parameters in the summer and winter in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(1):30~33
阎逢旗,胡欢陵,吴永华等. 北京地区夏冬季气溶胶变化特征分析[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(1):30~33