

合肥地区 PM_{2.5} 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的拟合

张辉¹, 陶宗明^{1,2*}, 麻晓敏^{1,2,3}, 单会会¹, 王申浩¹, 刘东², 谢晨波², 王英俭²

¹解放军陆军炮兵防空兵学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

³中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031

摘要 目前直接探测 PM_{2.5} 质量浓度高度廓线有一定的困难,但可以通过一定的关系把激光雷达探测出的气溶胶后向散射系数高度廓线转化为 PM_{2.5} 质量浓度高度廓线。在把气溶胶后向散射系数廓线转化为 PM_{2.5} 质量浓度的过程中,气溶胶吸湿因子是一个关键的参数。激光雷达系统可探测气溶胶后向散射系数在近地面的高度分布廓线,PM_{2.5} 质量探测仪可探测所在处的 PM_{2.5} 质量浓度和大气相对湿度。将这两种仪器置于同一地点同时进行探测,以获取同一地点同一时间的气溶胶后向散射系数、PM_{2.5} 质量浓度和大气相对湿度。在理论的指导下对所探测的数据进行拟合,可得出吸湿因子的表达式。对 2016 年 5 月—2017 年 10 月合肥地区仪器所在地的气溶胶后向散射系数、PM_{2.5} 质量浓度和大气相对湿度的探测数据进行拟合,获得了 PM_{2.5} 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间吸湿因子的变化规律。

关键词 测量; PM_{2.5} 质量浓度; 后向散射系数; 吸湿因子

中图分类号 O648.18

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0704006

Fitting of Hygroscopic Factor Between PM_{2.5} Mass Concentration and Aerosol Backscattering Coefficient in Hefei Area

Zhang Hui¹, Tao Zongming^{1,2}, Ma Xiaomin^{1,2,3}, Shan Huihui¹, Wang Shenhao¹,
Liu Dong², Xie Chenbo², Wang Yingjian²

¹Teaching & Research Section of Physics, Department of Basic Sciences, PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei, Anhui 230031, China;

²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract At present, the height profile of PM_{2.5} mass concentration is difficult to detect directly. However, a certain relationship can be used to transfer the height profile of aerosol backscattering coefficient detected by lidar to the height profile of PM_{2.5} mass concentration. The hygroscopic factor of aerosol is a key parameter in the process of transferring the profile of aerosol backscattering coefficient to that of PM_{2.5} mass concentration. The near ground height distribution profile of aerosol backscattering coefficient can be detected by the lidar system, while the PM_{2.5} mass concentration and atmospheric relative humidity are measured by PM_{2.5} monitor. The two instruments are placed at the same location and probed simultaneously to obtain the aerosol backscattering coefficient, PM_{2.5} mass concentration and atmospheric relative humidity at the same time. Under the guidance of the theory, the expression hygroscopic factor is calculated by fitting the related experimental data. By fitting the detection data aerosol backscattering coefficient, PM_{2.5} mass concentration and atmospheric relative humidity in Hefei area from May 2016

收稿日期: 2017-11-28; 收到修改稿日期: 2017-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(41175021,41475025)

作者简介: 张辉(1970—),女,硕士,副教授,主要从事激光雷达大气探测方面的研究。E-mail: yhhzhhf@163.com

* 通信联系人。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

to October 2017, the change law of the hygroscopic factor between $PM_{2.5}$ mass concentration and aerosol backscattering coefficient is obtained.

Key words measurement; $PM_{2.5}$ mass concentration; backscattering coefficient; hygroscopic factor

OCIS codes 120.5820; 010.1290; 010.3640; 010.1110

1 引 言

随着国民经济的高速发展,城市雾霾天气出现频率越来越高且程度越来越严重。近年来,华北、华东等地区多次出现大面积的严重雾霾天气。雾霾天气不仅导致能见度下降,影响正常的生产和交通,更严重的是城市雾霾中携带了大量的有毒、有害化学成分,对人体健康造成较大的危害^[1-3]。大气气溶胶通常是指直径在 $0.001\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间悬浮在大气中的固体和液体颗粒物的总称, $PM_{2.5}$ 是指直径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子(由于其尺寸小又称为细颗粒物),它们是雾霾重要的组成部分。

为了防治和科学防控大气污染,就要对大气中的污染物总量进行估算。大气中的污染物主要集中在近地面的大气边界层内,要估算污染的总量,仅探测地面上污染物的浓度是不够的,还要探测边界层的高度和污染物在边界层内随高度的变化等信息。同时,探测污染物在高度上的分布廓线信号还有利于研究污染物的扩散规律。目前,能够直接测量 $PM_{2.5}$ 质量浓度的仪器是颗粒物质量探测仪,这种仪器是原位探测式而非遥感式,只能布置在有限点进行测量。激光雷达可以探测大气边界层的高度和气溶胶后向散射系数的高度廓线等信号,把气溶胶激光雷达与 $PM_{2.5}$ 颗粒物探测仪联合起来,可以进行 $PM_{2.5}$ 质量浓度的高度廓线反演^[4]。在反演 $PM_{2.5}$ 质量浓度的高度廓线过程中,与相对湿度(RH)有关的气溶胶吸湿性是必须要考虑的一个参数。

吸湿性是气溶胶的主要性质之一,它是指气溶胶在一定相对湿度中的吸水能力。大气气溶胶随着相对湿度的变化发生着潮解、风化过程。在潮解和风化过程中,单个大气颗粒物的粒径、密度、质量、折射率指数等微物理参数也随之发生改变,使得气溶胶粒子群宏观上的后向散射系数发生了变化,通过实验的方法可以探测大气中的吸湿因子的大小^[5-7]。文献[5-7]综述了国内外研究人员在实验室和外场用数值模拟的方法来研究气溶胶的吸湿性,由于气溶胶种类的复杂性,研究者没有总结出吸湿因子随相对湿度变化的表达式。文献[8-9]在对气溶胶光学厚度与消光系数关系进

行研究时,对吸湿因子进行修正,所利用的吸湿因子表达式分别为 $f(R_H) = a/(1-R_H) + b$ 和 $f(R_H) = 1/(1-R_H)$,其中 R_H 为相对湿度, a 和 b 为常数。本课题组在实验中发现这一表达式对本研究的实验数据处理不是很合适,存在较大的误差。

本文利用同时同地点探测出的 $PM_{2.5}$ 质量浓度、气溶胶后向散射系数和大气相对湿度等数据,在理论的指导下拟合出 $PM_{2.5}$ 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间的吸湿因子,为高精度地反演 $PM_{2.5}$ 质量浓度高度廓线奠定基础。

2 探测装置

2016年5月,本课题组研制了一台单波长发射五通道接收的激光雷达系统^[10],该系统位于合肥市西部,可以探测气溶胶后向散射系数廓线、水汽混合比廓线、气溶胶激光雷达比、气溶胶退偏比廓线等。其中,基于电荷耦合器件(CCD)的侧向散射激光雷达和基于望远镜的后向散射激光雷达是联合在一起进行探测的。由望远镜、光电倍增管、瞬态记录仪和激光器等组成后向散射激光雷达子系统;由 CCD 相机、几何定标装置和激光器组成侧向散射激光雷达子系统。基于 CCD 的侧向散射激光雷达是没有盲区 and 过渡区的,它与基于望远镜的后向散射激光雷达是联合在一起的,可以获得从 25 m 高度至对流层顶的探测数据,其中的拉曼通道可以获得气溶胶的激光雷达比。激光器的发射波长是 532 nm,望远镜的口径是 300 mm,详细的系统参数介绍可参考文献[10]。激光雷达系统的工作方式是每 10 min 工作一次,每次工作时间为 100 s。

$PM_{2.5}$ 颗粒物探测仪是合肥福瞳光电有限公司研制的,它是一个独立于激光雷达的仪器,工作原理为 β 射线吸收法^[11]。该台仪器每小时给出一组 $PM_{2.5}$ 质量浓度,同时该仪器还附带有大气温度、相对湿度和气压的探测。本研究所用到的大气相对湿度数据就来自于该仪器。

激光雷达系统放在 6 层高的实验楼的顶层室内, $PM_{2.5}$ 监测仪放在楼顶平台上面,其海拔高度为 20 m。激光雷达反演出的后向散射系数廓线是从 25 m 至对流层顶。为了更好地把激光雷达的数据

与 PM_{2.5} 颗粒物探测仪的数据进行融合,先把激光雷达每 10 min 探测的数据按小时进行平均(PM_{2.5} 质量浓度数据是按小时的),然后把 20 m 高度上探测的 PM_{2.5} 质量浓度、大气相对湿度(来自于 PM_{2.5} 颗粒物探测仪)和 25 m 高度上的气溶胶后向散射系数(来自于激光雷达系统,且近似认为 20 m 高度和 25 m 高度上的大气在 1 h 内的平均效应是相同的)等数据进行拟合计算。

3 数据处理方法

气溶胶的后向散射系数和 PM_{2.5} 质量浓度都是描述气溶胶的参数,它们与气溶胶的尺度谱分布、相对湿度、气溶胶来源等参数有关。相对湿度的大小与气溶胶的吸湿性能密切相关,“干”气溶胶吸湿后,其粒径有明显的增长,改变了气溶胶的谱分布,故使气溶胶粒子群宏观上的后向散射系数变大^[6]。然而,相对湿度的大小与 PM_{2.5} 质量浓度无关,因为探测 PM_{2.5} 质量浓度时,气溶胶已经被烘干了,去除了相对湿度的影响。

定义气溶胶尺度谱分布函数 $n(r)$ 为单位体积中在半径 $r \rightarrow r + dr$ 区间内的粒子数 dN 与 dr 的比值,即

$$n(r) = \frac{dN}{dr} \quad (1)$$

在大气中相对湿度为 R_H 时,气溶胶尺度谱记为 $n(r)_{RH}$,“干”气溶胶尺度谱记为 $n(r)_{dry}$,PM_{2.5} 的质量浓度 $C_{PM_{2.5}}$ 可表达为

$$C_{PM_{2.5}} = \int_0^{2.5 \mu m} \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) n(r)_{dry} dr, \quad (2)$$

式中 ρ 为“干”气溶胶密度。大气中所有颗粒物总浓度 $C_{PM_{\infty}}$ 可表达为

$$C_{PM_{\infty}} = \int_0^{\infty} \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) n(r)_{dry} dr. \quad (3)$$

“干”大气中气溶胶后向散射系数 β 定义为

$$\beta_{dry} = \int_0^{\infty} \frac{P(\pi)}{4\pi} Q_s \pi r^2 n(r)_{dry} dr, \quad (4)$$

式中 Q_s 为气溶胶散射效率因子、 $P(\pi)$ 为气溶胶后向散射相函数的大小。大气中气溶胶后向散射系数 β 定义为

$$\beta_{RH} = \int_0^{\infty} \frac{P(\pi)}{4\pi} Q_s \pi r^2 n(r)_{RH} dr. \quad (5)$$

气溶胶吸湿因子定义为

$$f(R_H) = \beta_{RH} / \beta_{dry}. \quad (6)$$

令粒子有效半径 $r_{eff} = \int_0^{\infty} r^3 n(r)_{dry} dr / \int_0^{\infty} r^2 n(r)_{dry} dr$,

粒子谱的整体散射效率因子为 \bar{Q}_s , 平均密度为 $\bar{\rho}$, 由 (3) ~ (6) 式可得到气溶胶后向散射系数与总颗粒物浓度之间的关系式为

$$C_{PM_{\infty}} = \frac{16\pi\bar{\rho}r_{eff}}{3P(\pi)\bar{Q}_s f(R_H)} \beta_{RH}. \quad (7)$$

令 $k = C_{PM_{2.5}} / C_{PM_{\infty}}$ 为质量浓度比,由此可得气溶胶后向散射系数与 PM_{2.5} 质量浓度的关系式为

$$C_{PM_{2.5}} = \frac{16\pi\bar{\rho}r_{eff}k}{3P(\pi)\bar{Q}_s f(R_H)} \beta_{RH} = K \beta_{RH} / f(R_H), \quad (8)$$

式中 $K = \frac{16\pi\bar{\rho}r_{eff}k}{3P(\pi)\bar{Q}_s}$ 为比例系数。(8)式是把气溶胶后向散射系数转化为 PM_{2.5} 质量浓度的理论依据。

在(8)式中,比例系数 K 是由气溶胶的种类、谱分布、折射率指数等参数决定的常数。但比例系数 K 可随时间和地点而变化,因为在不同时间和不同地点,大气气溶胶的来源可能不同,导致大气气溶胶的谱分布、折射率指数等参数不一样。

以(8)式为理论基础,对 PM_{2.5} 质量浓度 $C_{PM_{2.5}}$ 、气溶胶后向散射系数 β 和大气相对湿度 R_H 进行拟合的方法步骤如下:

1) 整理出一次连续探测 N 个小时内按小时变化的 $3N$ 个数据,即 N 个 PM_{2.5} 质量浓度、 N 个气溶胶后向散射系数和 N 个水汽相对湿度;

2) 假设一个比例系数 K 和一个含 x (K 和 x 均取整数) 的吸湿因子表达式: $f(R_H) = 1/(1 - R_H + x\%)$, 由(8)式算出 N 个 PM_{2.5} 质量浓度 $C_{PM_{2.5}}$;

3) 算出一次探测实验中的 $C_{PM_{2.5}}$ 与对应实际探测 PM_{2.5} 质量浓度 $C'_{PM_{2.5}}$ 之间差值的平方和 $\Delta = \sum_{i=1}^N (C_{iPM_{2.5}} - C'_{iPM_{2.5}})^2$;

4) 改变比例系数 K 的大小和吸湿因子 $f(R_H)$ 表达式中 x 的值,当 Δ 最小时,所对应的比例系数 K 和吸湿因子表达式 $f(R_H) = 1/(1 - R_H + x\%)$ 即为拟合出的比例系数和吸湿因子表达式。

研究过程中发现,在一次探测时间内(如 10 h 左右),拟合出的 $C_{PM_{2.5}}$ 与实际探测 $C'_{PM_{2.5}}$ 有很好的相关性。故可以合理地认为气溶胶的来源及“干”气溶胶谱分布不变,只是气溶胶浓度的绝对大小和相对湿度在变化。对每一次的探测数据都进行上述的拟合操作,发现比例系数在不同的探测次序中变化较明显,但吸湿因子表达式没有明显的变化。

4 实验结果

2016年5月激光雷达系统研制成功后,在晴天的夜晚将其与PM_{2.5}探测仪同时同地进行实验观测。下面对2016年5月—2017年10月这一年半时间的激光雷达的观测数据和PM_{2.5}颗粒物探测仪的数据进行个例研究和综合分析。

4.1 个例结果

2016年12月6日是晴朗天气,表1给出了该日08:00~24:00(北京时间,下同)的探测结果。表1中第一列是北京时间,第2~4列分别为探测PM_{2.5}质量浓度 $C'_{PM_{2.5}}$ 、气溶胶后向散射系数 β 、大

气相对湿度 R_H ,第5列为拟合出的PM_{2.5}质量浓度 $C_{PM_{2.5}}$,拟合的公式为 $C_{PM_{2.5}} = 7680\beta \cdot (1 - R_H + 40\%)$ 。图1(a)是PM_{2.5}颗粒物探测仪的数据与公式 $C_{PM_{2.5}} = 7680\beta \cdot (1 - R_H + 40\%)$ 拟合出的数据随时间的变化情况,从图中可以看出两者具有很好的一致性。图1(b)和(c)分别是该时间段内的地面上相对湿度和气溶胶后向散射系数随时间的变化情况,图1(d)是实测和拟合的PM_{2.5}质量浓度之间的相关性。从图1中还可以看出,PM_{2.5}质量浓度、相对湿度和气溶胶后向散射系数具有正相关关系,其中大气相对湿度的变化区间约为40%~65%。

表1 2016年12月6日08:00~24:00的数据及拟合结果

Table 1 Data and fitting result from 08:00 to 24:00 on December 6, 2016

Time	$C'_{PM_{2.5}} / (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	$\beta / (\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$	$R_H / \%$	Fitting result by $C_{PM_{2.5}} = 7680\beta \cdot (1 - R_H + 40\%)$
08:00	63.7	0.01	61	60.7
09:00	64.1	0.01	61	60.7
10:00	53.6	0.008	61.1	48.5
11:00	60.4	0.0095	59.2	58.9
12:00	59.7	0.0095	55.2	61.9
13:00	69.9	0.0105	51.6	71.3
14:00	62.9	0.009	47.7	63.8
15:00	55.1	0.0073	45.4	53.5
16:00	44.7	0.007	39.8	53.9
17:00	53.1	0.008	43.7	59.25
18:00	69.5	0.011	49.3	76.6
19:00	74.9	0.012	56.3	77.1
20:00	81.5	0.013	59.5	80.4
21:00	91.5	0.014	61.1	84.9
22:00	91.3	0.0142	60.7	86.1
23:00	91.5	0.015	62.9	88.9
24:00	94.1	0.016	63.9	93.4

表2为2017年9月28日20:00—9月29日05:00的探测结果,在探测时间内天气是晴朗的。表2中第一列是时间,第2~4列为探测结果,第5列为拟合的结果,拟合的公式为 $C_{PM_{2.5}} = 12000\beta \cdot (1 - R_H + 40\%)$ 。图2(a)是PM_{2.5}颗粒物探测仪的数据与拟合出的PM_{2.5}质量浓度随时间的变化情况,从该图中也可看出两者有很好的一致性。图2(b)和(c)分别是该时间段内的地面上相对湿度和气溶胶后向散射系数随时间的变化情况,图2(d)是实测和拟合的PM_{2.5}质量浓度之间的相关性。从图2中可看出PM_{2.5}质量浓度、相对湿度和气溶胶后向散射系数具有正相关关系,其中水汽相对湿度的变化区间约为65%~85%。

4.2 统计结果

截止2017年10月底,本课题组共观测了39个晚上,405 h。下面对这一年半时间里405组侧向激光雷达的观测数据和PM_{2.5}颗粒物探测仪的数据进行统计分析。对于每一次的探测数据,当相对湿度在40%以下时,用公式 $f(R_H) = 1$ 进行拟合;当相对湿度在40%~85%之间时,用公式 $C_{PM_{2.5}} = K\beta \cdot (1 - R_H + x\%)$ 进行拟合。对同一天的数据进行拟合时,比例系数 K 保持不变;对不同日期的数据进行拟合时,比例系数 K 可能是不同的。如以上两例的 K 分别是7680和12000。根据(8)式可知, K 与气溶胶的种类、谱分布、折射率指数等有关,故 K 不同是由不同日期的气溶胶的种类、谱分布、折射率指数不同所造成的。但每一次拟合过程中,拟合出的

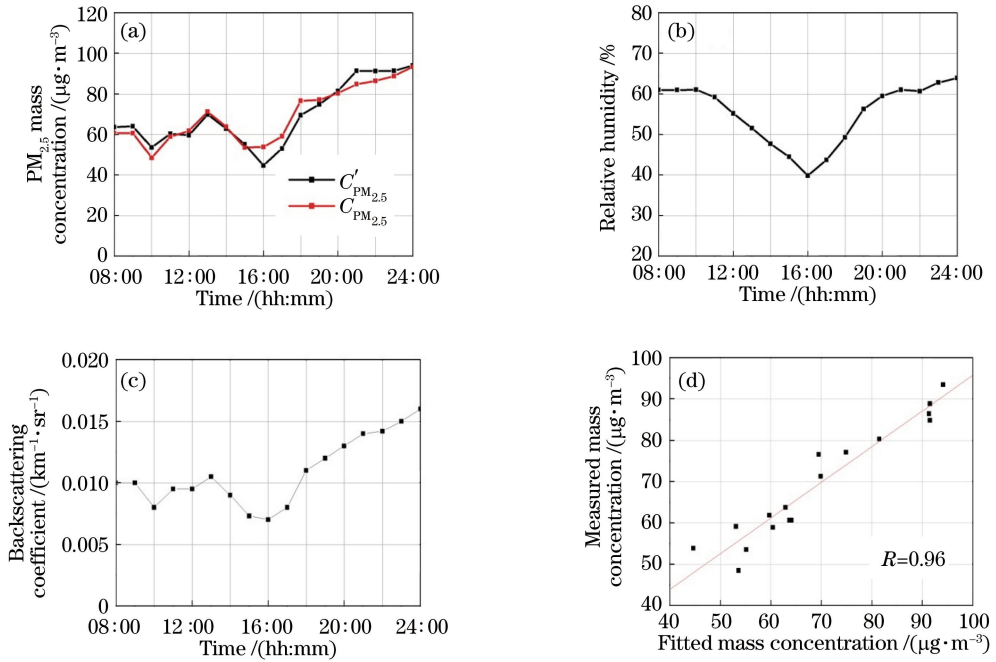


图 1 探测个例。(a) $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与时间的关系；(b) 相对湿度与时间的关系；
 (c) 气溶胶后向散射系数与时间的关系；(d) 探测和拟合的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度之间的相关性

Fig. 1 Case study. (a) Relationship between $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and time; (b) relationship between relative humidity and time; (c) relationship between aerosol backscattering coefficient and time; (d) relativity between measured and fitted $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration

表 2 2017 年 9 月 28 日 20:00—9 月 29 日 05:00 的数据及拟合结果

Table 2 Data and fitting result from September 28, 20:00 to September 29, 05:00 in 2017

Time	$C'_{\text{PM}_{2.5}} / (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$\beta / (\text{km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1})$	$R_H / \%$	Fitting result by $C_{\text{PM}_{2.5}} = 12000\beta \cdot (1 - R_H + 40\%)$
20:00	12.6	0.00176	70	14.8
21:00	24.1	0.00248	67.5	21.6
22:00	18.5	0.00234	68.5	20.1
23:00	23.1	0.003	72.2	24.4
24:00	27.6	0.00326	73.4	26.1
01:00	21.5	0.00304	75.3	23.6
02:00	29.2	0.00421	78.7	31.0
03:00	26.4	0.00382	80.9	27.1
04:00	29.8	0.00429	82	29.9
05:00	28	0.00421	83.5	28.6

吸湿因子的表达式始终是不变的。对 39 个晚上 405 h 的拟合数据进行统计分析,结果如图 3 所示。在图 3 中,纵坐标表示由(8)式计算出的 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物质量浓度,横坐标表示 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物探测器探测出的质量浓度,其中 R 为相关度, SD 为标准误差。从图 3 可以看出,两组数据呈很好的线性关系,斜率是 0.99(近似是 1),相关度 $R = 0.99$,表示相关度很高。这一结果表明,拟合出的吸湿因子的表达式是可信的、可靠的。

在相对湿度大于 40% 的情况下,气溶胶溶性粒子具有明显的吸湿增长特性。不同的学者描述气溶

胶吸湿因子的定义不完全一样,何秀等^[8]定义气溶胶的吸湿因子为湿气溶胶消光系数与“干”气溶胶消光系数之比;刘新昱等^[5]定义气溶胶的吸湿因子为湿气溶胶散射系数与“干”气溶胶散射系数之比;王轩等^[6]直接定义气溶胶的吸湿因子为吸湿前粒径变化率。可以证明,本研究对气溶胶的吸湿因子的定义与文献^[5]的定义是一致的。

李倩等^[9]在修正吸湿因子时,用到的吸湿因子表达式为 $f(R_H) = 1/(1 - R_H)$ 。而本研究拟合出的结果为:当相对湿度 R_H 在 40% 以下时,吸湿因子 $f(R_H) = 1$;当相对湿度 R_H 在 40%~85% 之间时,

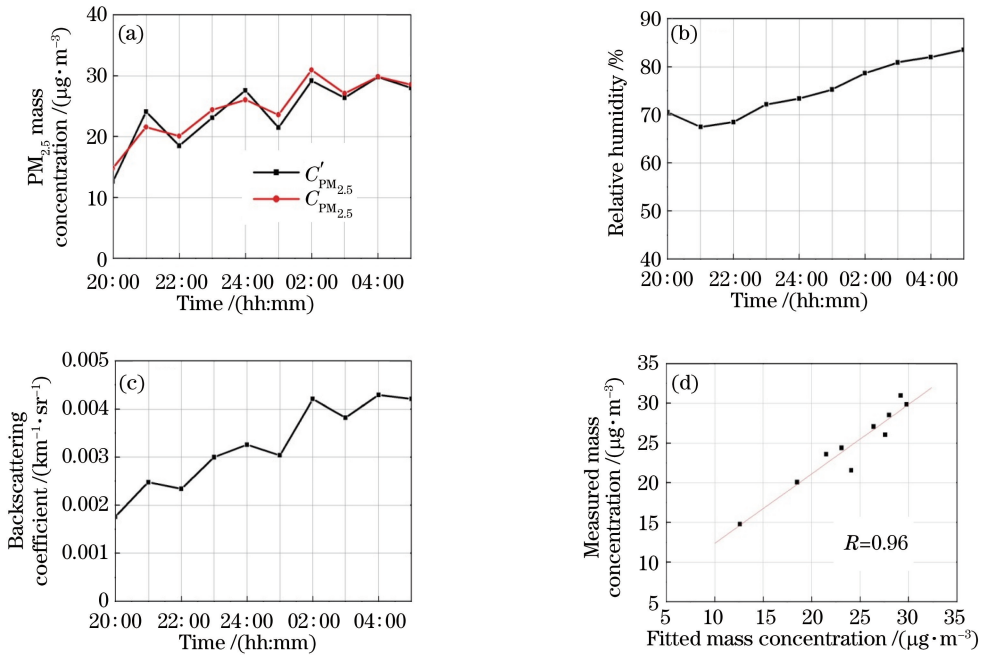


图 2 探测个例。(a) PM_{2.5} 质量浓度与时间的关系;(b)相对湿度与时间的关系;
(c)气溶胶后向散射系数与时间的关系;(d)探测和拟合的 PM_{2.5} 质量浓度之间的相关性

Fig. 2 Case study. (a) Relationship between PM_{2.5} mass concentration and time; (b) relationship between relative humidity and time; (c) relationship between aerosol backscattering coefficient and time; (d) relativity between measured and fitted PM_{2.5} mass concentration

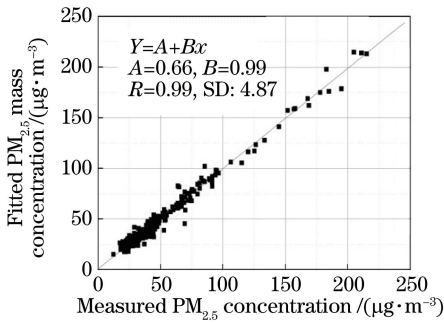


图 3 拟合和探测的 PM_{2.5} 质量浓度之间的相关性
Fig. 3 Relativity between fitted and measured PM_{2.5} mass concentration

吸湿因子 $f(R_H) = 1/(1 - R_H + 40\%)$; 当相对湿度 R_H 大于 85% 时, 本研究中的实验数据不多, 未拟合出吸湿因子的表达式, 有待进一步研究。

从吸湿因子产生机理可知, 吸湿因子与气溶胶的来源等有关, 具有地域的特性。在刘新翌等^[5]的研究中, 把硫酸盐在相对湿度为 80% 时的吸湿因子取为 1.7, 与本研究由吸湿因子表达式 $f(R_H) = 1/(1 - R_H + 40\%)$ 计算得到的结果 1.67 是接近的。

5 结 论

气溶胶后向散射系数的高度廓线用激光雷达可

以进行探测, 而 PM_{2.5} 质量浓度高度廓线的直接探测目前还有一定的难度。利用 PM_{2.5} 质量浓度与气溶胶后向散射系数之间的相关性, 就可以把气溶胶的后向散射系数高度廓线转化为 PM_{2.5} 质量浓度的高度廓线。在这一转化过程中, 由大气相对湿度而产生的吸湿因子是一个关键的参量。首先从定义出发, 理论上推出了 PM_{2.5} 质量浓度、气溶胶后向散射系数和大气相对湿度之间的关系式[(8)式], 从(8)式可知, 经过吸湿因子修正后, PM_{2.5} 质量浓度与气溶胶后向散射系数存在比例关系; 然后利用探测数据, 通过拟合的方法, 得出了合肥地区气溶胶吸湿因子的具体表达式, 为高精度反演 PM_{2.5} 质量浓度的高度廓线奠定基础。

参 考 文 献

[1] Wang P L, Dai C L, Zhang C J. The study progress in the research for the particular in city and its effect on human health[J]. Environmental Monitoring in China, 2005, 21(1): 83-87.
王平利, 戴春雷, 张成江. 城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应[J]. 中国环境监测, 2005, 21(1): 83-87.

[2] Gao Z, Guo X B. The comparison of PM₁₀ and PM_{2.5} in health effects[J]. Chinese Journal of Public Health

- Engineering, 2006, 5(1): 52-55.
- 高竹, 郭新彪. 大气 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的健康效应[J]. 中国卫生工程学, 2006, 5(1): 52-55.
- [3] Sun D P, Huang G Q. Cause, hazard and control measures of hazy weather in China[J]. Advances in Environmental Protection, 2014, 4(4): 101-111.
- 孙丹平, 黄国勤. 中国雾霾天气的成因、危害及其防治措施[J]. 环境保护前沿, 2014, 4(4): 101-111.
- [4] Tao Z M, Ma X M, Liu D, *et al.* The statistical distribution of $PM_{2.5}$ mass concentration profiles at west suburb of Hefei City in 2014[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0601001.
- 陶宗明, 麻晓敏, 刘东, 等. 2014年合肥西郊 $PM_{2.5}$ 质量浓度廓线统计分布[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0601001.
- [5] Liu X G, Zhang Y H. Advances in research on aerosol hygroscopic properties at home and abroad [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(6): 808-816.
- 刘新罡, 张远航. 大气气溶胶吸湿性质国内外研究进展[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(6): 808-816.
- [6] Wang X, Chen J H, Wang W. Review of study in hygroscopic properties of aerosol particles[J]. China Powder Science and Technology, 2010, 16(1): 101-106.
- 王轩, 陈建华, 王玮. 气溶胶吸湿特性研究现状[J]. 中国粉体技术, 2010, 16(1): 101-106.
- [7] Tang I N. Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1996, 101(D14): 19245-19250.
- [8] He X, Deng Z Z, Li C C, *et al.* Application of MODIS AOD in surface PM_{10} evaluation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(2): 178-184.
- 何秀, 邓兆泽, 李成才, 等. MODIS 气溶胶光学厚度产品在地面 PM_{10} 监测方面的应用研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(2): 178-184.
- [9] Li Q, Li C C, Wang Y F, *et al.* Retrieval on mass concentration of urban surface suspended particulate matter with lidar and satellite remote sensing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(4): 673-682.
- 李倩, 李成才, 王焯芳, 等. 利用激光雷达和卫星遥感获得城市地面大气悬浮颗粒物浓度分布[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(4): 673-682.
- [10] Tao Z M, Shan H H, Zhang H, *et al.* Development of lidar system based on one wavelength emission and five channel receivers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 1030002.
- 陶宗明, 单会会, 张辉, 等. 单波长发射五通道接收激光雷达系统研制[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1030002.
- [11] Fu M N, Zheng Y F, Xu X S, *et al.* Advance of study on monitoring and evaluation of $PM_{2.5}$ [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(4): 1-6.
- 傅敏宁, 郑有飞, 徐星生, 等. $PM_{2.5}$ 监测及评价研究进展[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(4): 1-6.