

温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响^{*}

韩道文 刘文清[†] 张玉钧 陆亦怀 刘建国 赵南京

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

(2007 年 1 月 19 日收稿; 2007 年 4 月 30 日收修改稿)

Han DW, Liu WQ, Zhang YJ, *et al.* Influence of temperature and relative humidity upon aerosol mass concentrations vertical distributions. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2007, 24(5): 619 ~ 624

摘要 从理论上分析了温度和相对湿度对气溶胶质量浓度分布的影响. 温度影响空气对流和气溶胶粒子的布朗运动, 进而影响气溶胶的垂直分布, 使其质量浓度的改变满足负指数规律变化; 相对湿度与气溶胶质量浓度是正相关关系. 根据分析, 提出了一个气溶胶质量浓度温湿度修正反演模型, 并通过实验数据对模型进行验证. 实验结果表明, 该模型能很好的反映温湿度对气溶胶质量浓度分布的影响.

关键词 温度, 相对湿度, 气溶胶, 质量浓度, 垂直分布

中图分类号 X831.03

1 引言

气溶胶质量浓度垂直分布的研究一直是环境监测领域的重要课题之一. 由于技术条件的限制, 人们一直缺乏有效的方法对气溶胶质量浓度的空间垂直分布进行监测分析. 目前, 人们研究的重点是期望通过激光雷达的空间探测能力来实现对气溶胶质量浓度空间垂直分布的监测. 但是, 激光雷达不能直接探测气溶胶的质量浓度, 只能通过气溶胶的其他光学特性(例如消光系数)来反演其质量浓度分布. 然而, 诸如消光系数这样的光学特性与气溶胶质量浓度之间并没有严格的对应关系, 其他相关因素对消光系数和质量浓度的影响也不容忽视, 因此仅仅利用激光雷达探测到的气溶胶光学特性来反演其质量浓度分布, 其准确性必将受到怀疑^[1].

如果我们把影响气溶胶质量浓度垂直分布的相关因素研究清楚, 在此基础上, 运用激光雷达的空间探测能力, 反演气溶胶质量浓度的空间垂直分布, 则反演结果的准确性将大大提高. 将影响气溶胶质量浓度垂直分布的因素与激光雷达的探测结果结合起来, 建立一个气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演模型, 充分考虑各种因素对气溶胶质量浓度的影响和作用, 有可能会获得一个相对准确和合理的反演结果.

根据相关文献报道, 气象因素对气溶胶的空间垂直分布有很大的影响^[2]. 主要气象因素包括温度、相对湿度(RH, Relative Humidity)、气压、风速(风向)等. 同时, 高度和气溶胶模式对气溶胶质量浓度分布也有很大影响^[2]. 本文研究温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响, 着重研究在利用消光系数反演气溶胶质量浓度时, 温度和相对湿度对气溶胶质量浓度和消光系数的影响, 以修正利用消光系数

^{*} 863 项目(2005AA64100)资助

[†] 通讯联系人, E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

来反演气溶胶质量浓度的模型,使其更准确和更可靠.

2 理论分析

温度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响比较复杂.一方面温度垂直结构可形成空气对流,在边界层以下区域,温度随着高度的增加而减小,存在温差的不同高度,大气发生对流,使得粒子进一步混合;同时温度会影响单个气溶胶粒子的布朗运动,粒子布朗运动导致的扩散能力与温度成正比^[3].

大气中的气溶胶粒子主要来自于人类的生活和生产活动,因此近地面气溶胶浓度较大.空气对流和粒子的布朗运动,都使得气溶胶粒子向浓度偏低的上空运动.地表温度越高,空气对流和粒子的布朗运动越剧烈.因此,低温时,近地面气溶胶浓度大,空气中气溶胶浓度低;随着温度升高,空气对流和布朗运动加剧,近地面气溶胶粒子浓度降低,空中粒子浓度升高.上述温度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响可近似用负指数规律加以描述^[4].

湿度对气溶胶质量浓度的影响相对简单.随着湿度的增加,吸湿性和溶解性气溶胶粒子的尺度将随之增大.这种增大一方面依赖于大气中水汽的含量;另一方面,它还依赖于气溶胶粒子的物理特性和化学成分.在粒子与周围空气相互作用的过程中,气溶胶粒子将会与水混合,粒子的尺度及其分布、形状以及化学构成均将发生变化,从而其折射指数和粒子的众数半径也随之改变,并引起粒子消光特性和质量浓度的变化.

绝对湿度可由相对湿度与温度来共同描述.相对湿度是空气中实际水汽含量(绝对湿度)与同温度下的饱和湿度(最大可能水汽含量)的百分比值.温度不同,大气的饱和湿度也不同.因此,温度与相对湿度一起决定了大气中水汽的实际含量,它们共同引起气溶胶消光特性和质量浓度的变化.在温度不变的情况下,气溶胶质量浓度与相对湿度是正相关的关系^[5-7].

根据文献[8],气溶胶质量浓度可用气溶胶消光系数的指数模型来反演,其表达式为:

$$m(z) = a \times \sigma(z)^b + C, \quad (1)$$

式中, $m(z)$ 为高度 z 处的气溶胶质量浓度, $\sigma(z)$ 为高度 z 处的气溶胶消光系数, a 、 b 、 C 为模型参数.

考虑到温度和相对湿度对质量浓度的影响,将模型修正为:

$$m(z) = a \times \sigma(z)^b + f(T, RH) + C, \quad (2)$$

式中, $f(T, RH)$ 为温度和相对湿度对原模型的修正函数, T 和 RH 分别为温度和相对湿度.

气溶胶质量浓度与相对湿度是正相关关系,相对湿度的影响因子可描述如下:

$$f(RH) = k \times RH, \quad (3)$$

式中, k 为影响系数, RH 为相对湿度.

温度对气溶胶垂直分布的影响满足指数规律递减,温度的影响和高度有关,温度影响因子可表述如下:

$$f(T) = e^{-(z-z_0) \cdot \left(\frac{273-T}{273}\right)^{\frac{1}{t}}}, \quad (4)$$

式中, z 为高度, T 为温度, Z_0 为气溶胶标高. $\frac{1}{t}$ 是伸缩因子,温度对气溶胶垂直分布的影响近似符合指数递减规律,但是变化幅度却可能小很多,通过伸缩因子可以使曲线更加平缓.温度项 $\left(\frac{273-T}{273}\right)$ 的作用有二:一是保证在气温变化范围内,该项为正值,所以用 273 减去温度值;二是温度变化产生的影响足够小,因此将结果除以 273.

由(3)、(4)两式,得到温度湿度修正函数的表达式:

$$f(T, RH) = k \times e^{-(z-z_0) \cdot \left(\frac{273-T}{273}\right)^{\frac{1}{t}}} \times RH, \quad (5)$$

代入(2)式,可得:

$$m(z) = a \times \sigma(z)^b + k \times e^{-(z-z_0) \cdot \left(\frac{273-T}{273}\right)^{\frac{1}{t}}} \times RH + C. \quad (6)$$

把(6)式所表示的气溶胶质量浓度反演模型称为气溶胶质量浓度温湿度修正反演模型。

3 实验结果

为了验证上述模型的正确性,以实验测量的数据来进行分析.采用2005年8月和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、气象参数仪和振荡天平均由中国科学院安徽光机所研制.温度、湿度由气象参数仪测定,同时测定的还有风速、风向和气压.激光雷达采用垂直方式,测量回波信号,计算得到气溶胶消光系数,其垂直距离分辨率为15m,测量高度1.5km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%,夏季为70%^[9],由此可得到气溶胶的总质量浓度。

根据实验数据及经验数据,北京丰台地区的 Z_0 取3km.伸缩因子 t 取4.数据处理时,考虑到影响气溶胶质量浓度分布的因素很多,而本文只是研究温度和相对湿度对质量浓度分布的影响,所以选取了其他气象条件比较稳定(无雨雪、无风或微风)情况下的数据进行分析.选取了3组数据,时间范围分别是2005年8月20日16:00到2005年8月22日23:00、2006年2月18日09:00到2006年2月20日23:00和2006年2月24日00:00到2006年2月25日20:00.2006年2月21日到2006年2月23日之间出现过大风天气,气溶胶浓度有很大变化,模型参数需重新调整。

3.1 地面数据结果

地面的气溶胶质量浓度由振荡天平实际测量经换算得到,消光系数由激光雷达测量得到,温度和相对湿度由气象参数仪提供.测站处海拔高度0.05km(六楼).表1是3组数据的相关参数。

表1 三组数据的模型参数

时间范围	a	b	Z_0	z	t	k	C
2005年8月20日16:00~2005年8月22日23:00						1	-160
2006年2月18日09:00~2006年2月20日23:00	400	0.2	3	0.05	4	2	-190
2006年2月24日00:00~2006年2月25日20:00						1	-220

图1分别是3组数据运用上述获得的模型参数反演得到的质量浓度与实际测量的质量浓度的对比图。

从图1可以看出,模型反演结果与实际测量值之间的相关性是比较好的.夏季数据相关性偏低的原因可能与夏季天气的多变性有关,这也说明影响气溶胶浓度变化的因素是多方面的,因此还需要进一步分析研究其他气象因素对气溶胶分布的影响,对模型进行优化和完善。

3.2 垂直分布数据结果

由于气溶胶质量浓度的空间垂直分布无法测量(这也是本文讨论气溶胶质量浓度空间垂直分布反演模型的意义所在),这里分别运用文献[8]给出的指数模型与本文的温湿度修正模型进行反演,并对比反演结果.指数模型的表达式如(1)式所示.具体反演方法可参考文献[8]。

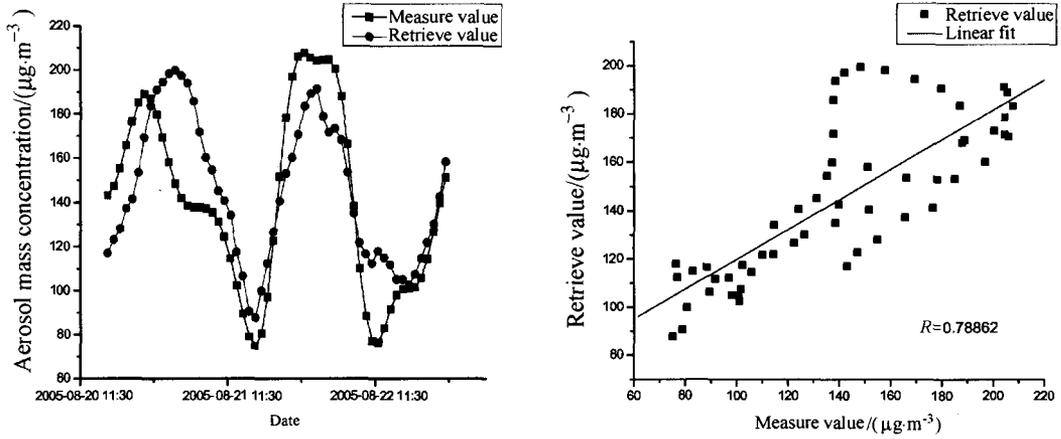
在3.1节的3个时间区间内各取一组数据进行空间分布的反演.温湿度修正模型的参数如表1所示.指数模型的参数如表2所示。

图2是上述2模型反演的气溶胶质量浓度垂直分布示意图及2种模型反演结果的相关性示意图.图2中Exponent表示指数模型反演结果,TRH表示温度(T)湿度(RH)修正模型反演的结果。

从图2可以看出,尽管两者反演结果的相关性在都在95%以上,但是还有一些明显的区别.在近地面,修正模型的反演结果大于指数模型的反演结果,而在空中,修正模型的结果则小于指数模型.这是因

表2 3组数据的指数模型参数

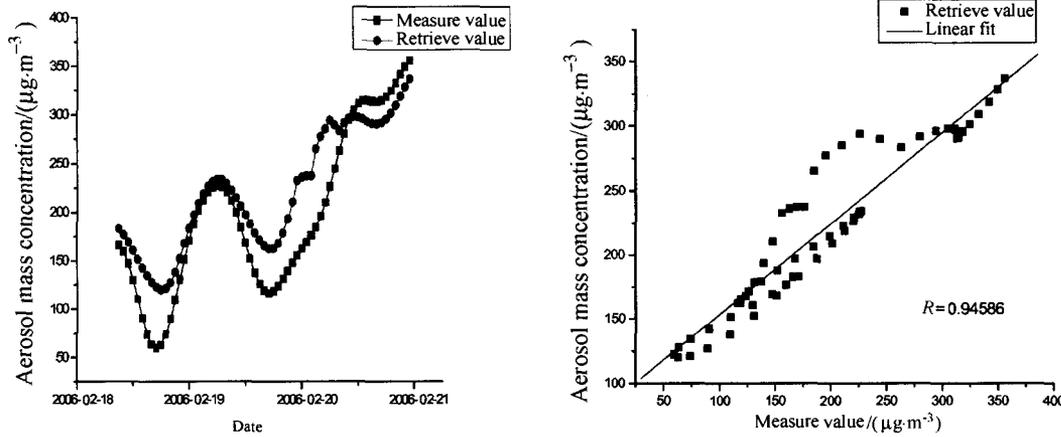
时间	a	b	C
2005年8月22日00:00			-30
2006年2月20日08:00	400	0.2	-20
2006年2月24日08:00			-130



测量值与反演值对比

相关性拟合图

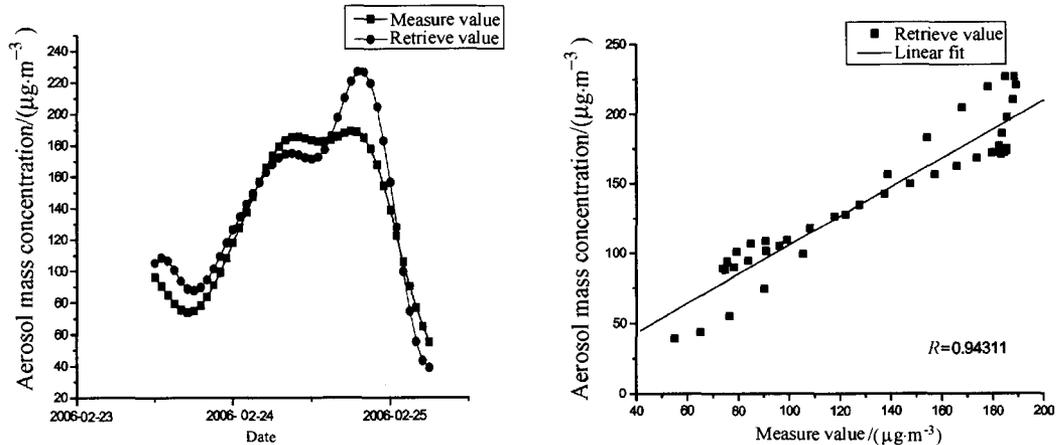
(a) 00:00 ~ 23:00 (2005-08-20)



测量值与反演值对比

相关性拟合图

(b) 09:00 ~ 23:00(2006-02-20)



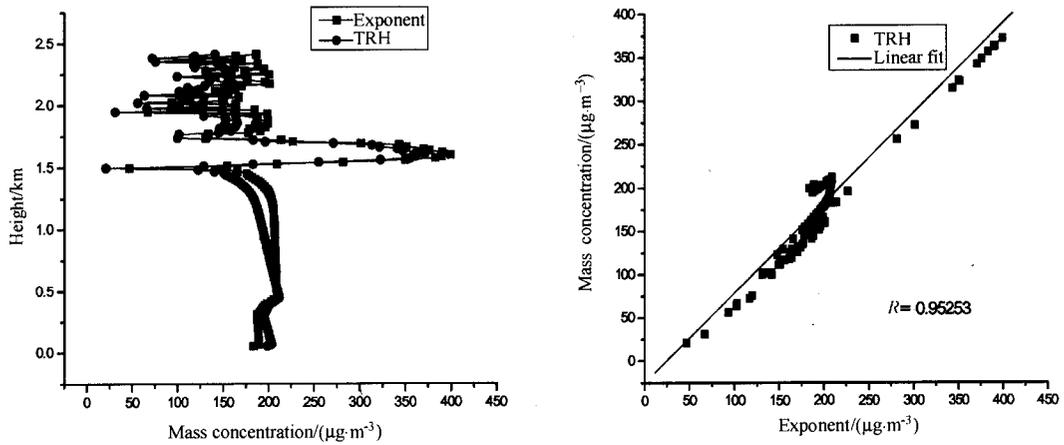
测量值与反演值对比

相关性拟合图

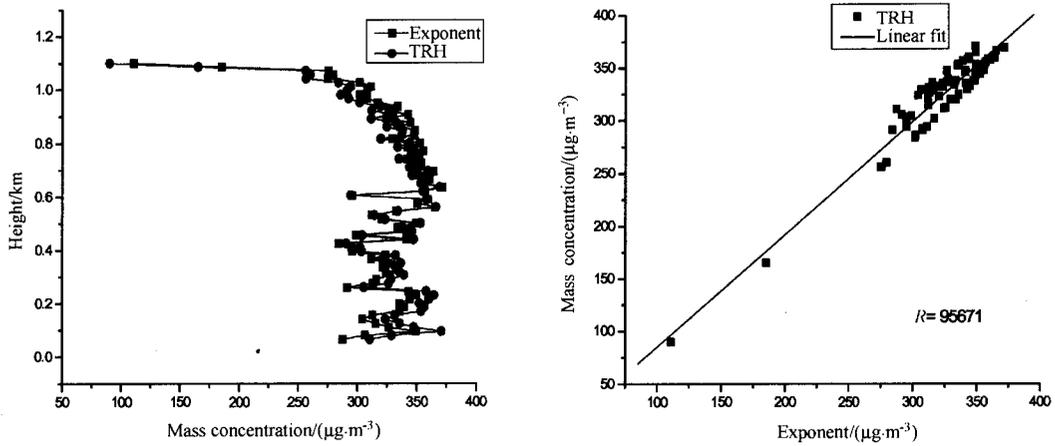
(c) 00:00 (2006-02-24) ~ 20:00(2006-02-25)

图 1 不同时刻质量浓度反演值与实测值对比图

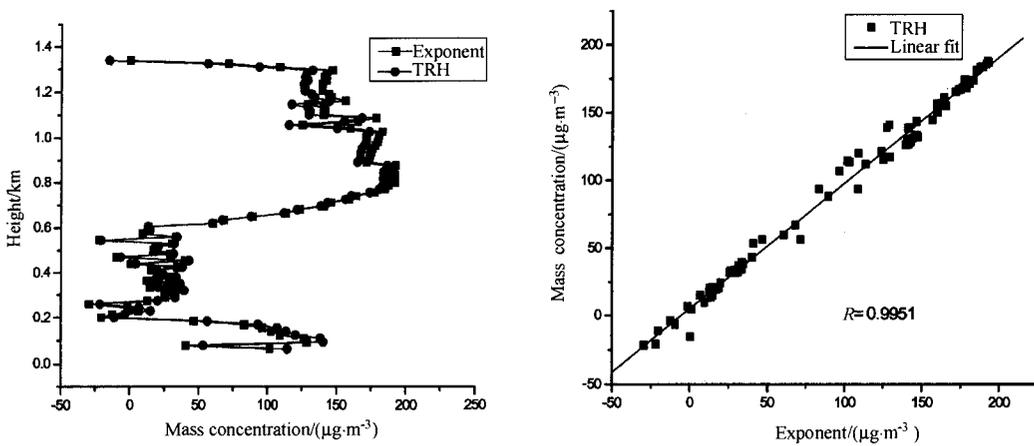
为加入了温度修正而产生的,这与大粒子向下沉降的实际较为一致.因此修正模型可能更适合气溶胶质量浓度垂直分布的反演.



(a) 00:00, 2005-08-22



(b) 08:00, 2006-02-20



(c) 08:00, 2006-02-24

图 2 不同时刻两模型反演结果及相关性比较

4 结论

温度和相对湿度对气溶胶质量浓度的影响是客观存在的.文中给出的气溶胶质量浓度温湿度修正反演模型在地面与实际测量的气溶胶质量浓度有较好的相关性,在气溶胶质量浓度垂直分布上,与其他模型相比可信度更好.实验表明,该模型能较为准确地反映相对湿度对气溶胶质量浓度分布的影响,可为反演气溶胶质量浓度分布,尤其是垂直分布提供有益的参考.但是由于影响气溶胶分布的因素太多,还需要进一步研究相关因素的影响,对模型进行完善和优化.

参考文献

- [1] Sun JQ, Zhang FH. A theoretical analysis of remote measurement of mass concentration of atmospheric dust using lidar. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982, 2(1):36~43(in Chinese)
孙景群,张海福.激光遥测大气尘埃质量浓度的理论分析.环境科学学报,1982,2(1):36~43
- [2] Yang DZ, Yu HQ, Ding GA, et al. An analysis of aerosols in the over Beijing northern lower-level atmosphere suburbs in winter. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002,13(suppl):113~126(in Chinese)
杨东贞,于海青,丁国安,等.北京北郊冬季低空大气气溶胶分析.应用气象学报,2002,13(特刊):113~126
- [3] 章澄昌,周文贤.大气气溶胶教程.北京:气象出版社,1995
- [4] Tate T Tsang, Prasad Pai, Nitin V Korgaonkar. Effect of temperature, atmospheric condition, and particle size on extinction in a plume of volatile aerosol dispersed in the atmospheric surface layer. *Applied Optics*, 1988, 27(3): 593~598
- [5] Zhang LS, Shi GY. The impact of relative humidity on the radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(2):230~237(in Chinese)
张立盛,石广玉.相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响.气象学报,2002,60(2):230~237
- [6] Zhang RJ, Wang MX, Dai SL, et al. Preliminary research on the size distribution of aerosols in Beijing. *Climatic and Environmental Research*, 2000,5(1):85~89
张仁健,王明星,戴淑玲,等.北京地区气溶胶粒度谱分布初步研究.气候与环境研究,2000,5(1):85~89
- [7] Howell SG, Clarke AD, Shinozuka Y, et al. Influence of relative humidity upon pollution and dust during ACE-Asia: Size distributions and implications for optical properties. *Journal of Geophysical Research*, 2006, D06205:111
- [8] Han DW, Liu WQ, Liu JG, et al. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution. *Chinese Journal of Lasers*, 2006,33(10): 13~19(in Chinese)
韩道文,刘文清,刘建国,等.气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法.中国激光,2006,33(10):13~19
- [9] Wang GC, Xie H, Wan XW, et al. Variation of aerosol mass concentration and element composition with height in Beijing Area. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(1):37~40(in Chinese)
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.环境科学研究,2004,17(1):37~40

Influence of temperature and relative humidity upon aerosol mass concentrations vertical distributions

HAN Dao-Wen LIU Wen-Qing ZHANG Yu-Jun LU Yi-Huai LIU Jian-Guo ZHAO Nan-Jing

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

Abstract The influence of the temperature and relative humidity upon aerosol mass concentrations distributions has been discussed. The temperature affects the particles' Brown movement and air convection, and the vertical changes of mass concentration meets the negative exponent law. The relative humidity affects water-soluble particle's absorption of moisture, and it is linear with the aerosol mass concentration. A model for retrieving aerosol mass concentration with temperature and humidity correction is developed and confirmed by experimental data. The result indicates that the model reflects the influence of the temperature and relative humidity to aerosol mass concentrations distributions.

Key words temperature, relative humidity, aerosol, mass concentration, vertical distributions