

文章编号 1004-924X(2008)07-1177-04

气溶胶细粒子与能见度的相关性

李学彬, 官纯文, 徐青山, 魏合理

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学研究中心, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了分析气溶胶粒子特别是细粒子($PM_{2.5}$)对能见度的影响,从理论上建立了气溶胶细粒子与能见度的关系,分析了谱分布的变化对 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 和细粒子消光所占总消光比重的影响。对测量数据与理论计算结果进行了对比分析,结果表明:所建立的气溶胶细粒子与能见度的关系是合理的,理论计算的误差小于30%,这对治理污染和提高城市能见度具有指导意义。

关键词: 大气光学;大气气溶胶;能见度;细粒子

中图分类号: X831;P427.1 **文献标识码:** A

Relationship between aerosol fine particle and visibility

LI Xue-bin, DONG Chun-wen, XU Qing-shan, WEI He-li

(Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The effect of aerosol fine particle($PM_{2.5}$) on the visibility was discussed, and the relationship between $PM_{2.5}$ and visibility was established theoretically. The relative $PM_{2.5}/PM_{10}$ and extinction coefficient were analyzed with changing of particle distributions based on Mie scattering theory. By comparison of measured data and calculated values, experimental results indicate that the pollution of $PM_{2.5}$ is the main factor that results in visibility dropping, and the error of calculated value is less than 30%, which is significant for dealing with pollution of $PM_{2.5}$ and improving atmospheric visibility.

Key words: atmospheric optics; aerosol; visibility; fine particle

1 引言

大气气溶胶是大气的重要组成部分,是大气物理化学过程中的一个重要因素,大气科学的很多领域都与气溶胶有关。大气气溶胶对气候变化有重要的直接和间接的影响,气溶胶粒子特别是

细粒子可通过吸收和散射太阳辐射,直接改变地-气系统的能量收支状况。随着工业经济的迅速发展,大气污染变得越来越严重,气候也变得越来越复杂,空气中的颗粒物特别是细粒子不仅给人们的身心健康带来了严重的危害,而且还对城市能见度产生巨大的影响。近年来,我国的一些城市都开展了对气溶胶细粒子的研究,建立了一些监

收稿日期:2007-09-24;修订日期:2007-12-29.

基金项目:中国科学院知识创新工程资助项目(No. KG CX2-SW-413);合肥物质科学研究院院长基金资助项目

测网络。王京丽^[1]、宋宇^[2]等统计了不同季节细粒子对能见度的影响,阎逢旗等^[3]拟合得到了能见度与细粒子浓度关系的经验公式。目前对细粒子的监测分析已成为大气污染研究的重要课题之一。

根据 Mie 散射理论,从理论上分析并建立了气溶胶细粒子的质量消光系数、消光系数和质量浓度之间的关系,分析了谱分布对它的影响,根据实验数据对其进行了验证,这对研究气溶胶对能见度的影响以及治理城市污染都具有指导意义。

2 理论分析

能见度通常是指视力正常的人在白天无云的天空背景下辨认出一个视角约为 $0.5 \sim 5^\circ$ 的黑色目标物轮廓和形体的最大距离,在夜间则是能看到和确定出一定强度的灯光的最大距离^[4]。晴空背景和黑体目标情况下,对于白光而言,大气水平能见度 V_H (km) 与消光系数 α (km^{-1}) 和识别目标对比阈值 ϵ ($=0.02$) 的关系由下式给出^[5]:

$$V_H = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\epsilon} \approx \frac{3.912}{\alpha}, \quad (1)$$

根据 Mie 散射理论由气溶胶的谱分布和它的折射率可以计算出气溶胶的消光系数:

$$\alpha_e = \pi \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r) r^2 dr, \quad (2)$$

这里 Q_{ext} 是折射率 m 、粒子半径 r 和波长 λ 的函数,谱分布 $n(r)$ 由粒子计数器测量得到。若已知气溶胶的折射率 m ,就可以由式(2)计算出大气气溶胶的消光系数。

质量消光系数是指单位质量粒子的消光截面,它是反映粒子消光性能的一个重要参数。对于密度为 ρ 的粒子组成的气溶胶,其质量消光系数为^[6]:

$$\alpha_m = 0.75 \int Q_{\text{ext}}(m, r, \lambda) n(r) dr / r \rho. \quad (3)$$

可以看出质量消光系数是折射率 m 、粒子半径 r 、粒子密度 ρ 和波长 λ 的函数,这里假设大气气溶胶是由一群浓度为 N 的粒径相同的全同粒子组成,其消光特性和实际大气气溶胶的消光特性相同,称为等效谱分布。这样就建立了气溶胶消光系数和质量浓度之间的关系^[7]:

$$\alpha_e = N \times M \times \alpha_m, \quad (4)$$

这里的 M 是全同粒子的质量, α_m 是气溶胶粒子总的质量消光系数,若要使用实际测量的 PM_{10} 或

者 $\text{PM}_{2.5}$ (动力学粒径 $< 10 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 粒子的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$) 来代替 M ,或者说由于使用了等效谱分布,需要引进等效参数,所以这里对公式(4)进行改进:

$$\alpha_e = C(\nu) \times M \times \alpha_m, \quad (5)$$

这里 $C(\nu)$ 定义为等效参数,它与粒子谱分布和粒子折射率有关。

下面分析谱分布的变化对 $\alpha_{m2.5}/\alpha_{m10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 和 $\alpha_{e2.5}/\alpha_{e10}$ 的影响,其中 $\alpha_{m2.5}/\alpha_{m10}$ 是粒径 $< 2.5 \mu\text{m}$ 粒子的质量消光系数与总质量消光系数之比, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 之比, $\alpha_{e2.5}/\alpha_{e10}$ 是粒径 $< 2.5 \mu\text{m}$ 粒子的消光系数与总消光系数之比。这里假设粒子谱是 Junge 分布^[8], $m = 1.50 - 0.02i$ 、Junge 系数 $N_0 = 10$ 、密度 $\rho = 1$,图 1 是它们随 Junge 指数 V 的变化图,可以看出 $\alpha_{m2.5}/\alpha_{m10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 、 $\alpha_{e2.5}/\alpha_{e10}$ 与 V 的正相关性,随着 V 值增大, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 和 $\alpha_{e2.5}/\alpha_{e10}$ 也随之越大,并且 $\alpha_{e2.5}/\alpha_{e10}$ 的值比 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 大,例如:在 $V=3$ 时, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的值为 0.36 ,而 $\alpha_{e2.5}/\alpha_{e10}$ 的值为 0.73 。由图 1 还可以看出,不管 V 怎么变化, $\alpha_{m2.5}/\alpha_{m10}$ 的比值都在 98% 以上,这说明对质量消光系数有贡献的主要是 $\text{PM}_{2.5}$,而 $\text{PM}_{2.5}$ 对消光系数的贡献多少是由粒子谱分布来决定的。

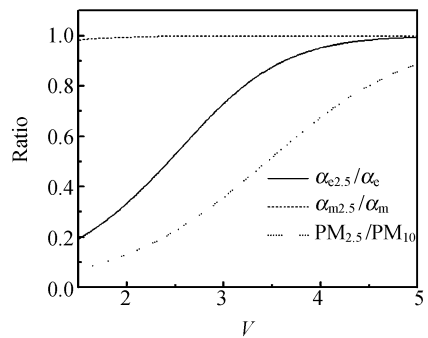


图 1 $\alpha_{m2.5}/\alpha_{m10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 和 $\alpha_{e2.5}/\alpha_e$ 与 V 的关系
Fig. 1 Relationship of $\alpha_{m2.5}/\alpha_{m10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ and $\alpha_{e2.5}/\alpha_e$ with V

根据上面的分析,这里使用 $\text{PM}_{2.5}$ 来代替 M ,可以把式(5)写成式(6):

$$\alpha_e = C(\nu) \times M_{2.5} \times \alpha_{m2.5}. \quad (6)$$

下面分析谱分布的变化对 $C(\nu)$ 值的影响,这里也假设 $m = 1.50 - 0.02i$ 、 $N_0 = 10$ 、 $\rho = 1$,由式(6)可以计算出 C 值随 V 值的变化,如图 2 所示,

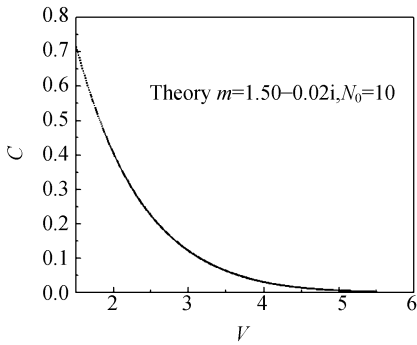


图2 C 值随 Junge 指数 V 的相对变化
Fig. 2 Relative variations of C with V

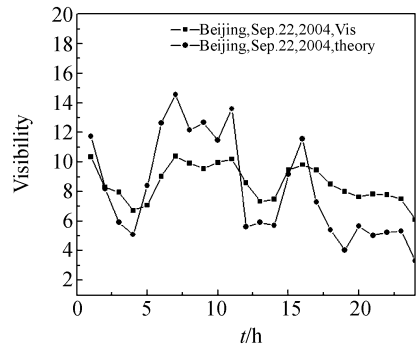


图3 能见度测量值与计算值的比较
Fig. 3 Comparison of two methods for visibility

可以看出 C 和 V 的负相关性, V 值越大说明小粒子所占的比例越大, 等效参数 $C(\nu)$ 值就越小。根据这条曲线就可以得到不同 V 值对应的 C 值。当然由于前面的假设, 这条曲线给出的只是相对值, 只要使用某一点实际测量值来标定这条曲线即可。

3 实验验证

3.1 对比分析

2004年9月20日至10月6日在中国科学院大气物理研究所铁塔部对大气气溶胶进行了测量。使用的仪器主要有 DLJ-92 多道光学粒子计数器^[9-10] (OPC)、能见度仪 (FD12 U21208)、温湿度测量仪、颗粒物质量监测仪 TEOM1400 系列 (测量 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)。这里使用9月22日的测量数据作为实例对式(6)进行验证, 利用消光系数与能见度的关系分别把式(6)等号两边转换成能见度进行比较。首先使用 OPC 测量的谱分布计算出气溶胶的质量消光系数, 然后对 $PM_{2.5}$ 测量的气溶胶质量浓度进行相对湿度的修正^[11-12], 使用5点时刻的数据对式(6)进行标定, 最后再根据式(6)和式(1)计算出其它时刻的消光系数和能见度。折射率取 $m=1.50-0.02i$, 计算的 (theory) 能见度和实际测量的 (Vis) 能见度值如图3所示。

图3是能见度测量值与计算值的比较, 可以看出, 22日的理论计算和实际测量能见度变化趋势基本一致, 但有些时间段的理论计算值较测量值波动较大, 这可能与折射率随时间的变化有关。

以上对比结果基本表明: 使用粒子谱计算质量消光系数, 使用气溶胶细粒子质量浓度 $PM_{2.5}$, 再结合实测的 Junge 指数确定 $C(\nu)$, 可以定量描述消光系数和 $PM_{2.5}$ 之间的关系。

3.2 误差分析

由图3可以看出计算值和测量值之间还是存在一定的差异, 有些时刻甚至达到了40%。引起它们之间差异的可能原因在于: (1) 假设大气气溶胶的消光特性与一群浓度为 N 粒径相同的全同粒子的消光特性相同, 这样会引起一定的误差; (2) 实验使用湿气溶胶的等效折射率模型对气溶胶质量浓度进行修正会引起一定的误差; (3) 在计算图2时假设折射率 $m=1.50-0.02i$, 它与实际大气的折射率的差异会带来一定的计算误差; (4) 在式(6)中没有考虑 PM_{10} 的影响也会给计算结果带来误差。上述分析表明, 此方法较适合在大气比较稳定、没有大的天气变化和气溶胶源比较稳定的条件下使用。

4 结论

本文从理论上分析和建立了气溶胶细粒子的质量消光系数、消光系数和质量浓度之间的关系, 分析了 Junge 指数对其的影响, 得出对质量消光系数的贡献主要是 $PM_{2.5}$, 而 $PM_{2.5}$ 对消光系数的贡献多少是由谱分布来决定的结论。最后使用北京2004年9月份的实验数据验证了气溶胶消光系数和 $PM_{2.5}$ 之间关系的正确性, 这对研究

PM_{2.5}对能见度的影响以及治理城市污染和提高城市能见度具有指导意义。

致谢:本文的部分数据由北京环境保护监测中心虞统工程师提供,这里表示感谢!

参考文献:

- [1] 王京丽,刘旭林.北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探[J].气象学报,2006,64(2):221-228.
WANG J L,LIU X L. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(2):221-228. (in Chinese)
- [2] 宋宇,唐孝炎,方晨,等.北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J].环境科学学报,2003,23(4):468-471.
SONG Y,TANG X Y,FANG CH, *et al.*. Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003,23(4):468-471. (in Chinese)
- [3] 阎逢旗,胡欢陵,周军.大气气溶胶粒子数密度谱和折射指数虚部的测量[J].光学学报,2003,23(7):855-859.
YAN F Q,HU H L,ZHOU J. Measurement of number density distribution and imaginary part of refractive index of aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinia*, 2003,23(7),855-859. (in Chinese)
- [4] 宋正方.应用大气光学基础[M].合肥:气象出版社,1990:37-50.
SONG ZH F. *Applied Atmospheric Optics*[M]. Hefei: Meteorological Press, 1990:37-50. (in Chinese)
- [5] 肖韶荣,冒晓莉.基于光纤的能见度测量方法[J].光学精密工程,2006,14(5):802-806.
XIAO SH R, MAO X L. Measuring method of visibility with optical fiber[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):802-806. (in Chinese)
- [6] HORVATH H. Atmospheric visibility[J]. *Atmospheric Environment*, 1981,15:1785-1796.
- [7] 许波,时家明,汪家春,等.水气遮蔽性能的计算和分析[J].红外与激光工程,2005,34(1):38-41.
XU B,SHI J M,WANG J CH, *et al.*. Calculation and analyzing of the extinction characteristics of the water fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005,34(1):38-41. (in Chinese)
- [8] 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.
SUN J Q,ZHANG H F. A theoretical analysis of remote measurement of mass concentration of atmospheric dust using Lidar[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1982,2(1):36-43. (in Chinese)
- [9] 周秀骥,陶善昌,姚克亚.高等大气物理学[M].北京:气象出版社,1990:750-768.
ZHOU X J, TAO SH CH, YAO K Y. *Advanced Atmospheric Physics*[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990:750-768. (in Chinese)
- [10] 李学彬,高亦桥,纪玉峰,等. LED光源光学粒子计数器的研制[J].光学精密工程,2008,16(3):406-409.
LI X B,GAO Y Q,JI Y F,*et al.*. Development of optical particle counter of LED lamp-house[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):406-409. (in Chinese)
- [11] 谭锐,胡欢陵.光学粒子计数器测量结果的订正[J].光学学报,1984,4(1):55-60.
TAN K, HU H L. Correction of measured results of an optical particle counter[J]. *Acta Optica Sinia*, 1984,4(1):55-60. (in Chinese)
- [12] 孙景群.能见度与相对湿度的关系[J].气象学报,1985,43(2):230-234.
SUN J Q. The relativity of relative humidity and visibility[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1985,43(2):230-234. (in Chinese)

作者简介:李学彬(1980—),男,安徽人,博士,主要从事气溶胶光学特性方面的研究。E-mail:xbli@aiofm.ac.cn