第28卷,第8期
2008年8月

光 谱 学 与 光 谱 分 析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 28, No. 8, pp1776-1780
August, 2008

基于前向近红外散射光谱测量雾和雨天大气消光的应用研究

王 缅, 刘文清, 陆亦怀, 赵雪松, 宋炳超, 张玉钧,
王亚萍, 连翠华, 陈 军, 程 寅, 刘建国, 魏庆农

中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽省环境光学监测技术重点实验室,
中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘 要 在可见和近红外区, 由于大气的吸收作用忽略不计, 大气消光由散射决定, 主要贡献来自于雾滴、雨滴、其他形式降水和小粒子。基于前向近红外散射光谱的前向散射式能见度仪(FVM)采用近红外的LED光源照射到约100 mL的空气体积上, 并测量前向30°～36°范围内的粒子的散射光强。由于该前向角范围内, 雾滴和霾粒子的散射相函数不受粒子尺寸分布的影响, 经过波长校正后, 散射强度与大气消光系数成正比, 该散射消光比通过对比标准人工观测值获得。然而, 在把雾和霾的散射消光比应用到雨天测量时, 会产生难以接受的误差。要得到雨天消光的准确测量, 就需要找到适合雨滴的散射消光比。基于Mie散射理论计算了不同尺寸分布下的雾滴和雨滴的散射相函数, 并对雾天和雨天下FVM的测量值与人工实际观测值进行了对比分析, 发现FVM在雨天的消光要比人工观测值高出约20%～60%。根据测量结果, 可以定出FVM在雨天测量的校准系数, 因此, 基于前向近红外散射光谱的FVM不仅能够测量雾天的大气消光, 还能对雨天的消光进行较准确的估算。

关键词 前向散射; 近红外; 大气消光; 相函数; 尺寸分布; 消光系数; 能见度
中图分类号: X831; O43 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2008)08-1776-05

引 言

大气消光由可见光被大气散射和吸收决定。在理想大气状态下, 认为大气中只存在分子散射贡献, 这时的能见度为227 km, 因此一般情况下通常忽略分子散射的作用, 认为大气消光的主要贡献来自于微滴(如雾滴、雨滴)、其他形式降水和小粒子(霾等)。而在可见和近红外区, 大气的吸收作用可以忽略不计[1,2], 引起光散射的粒子类型和尺寸如图1所示, 其中与可见光波长(400～700 nm)相同尺寸的粒子是大气最有效的散射体[3]。

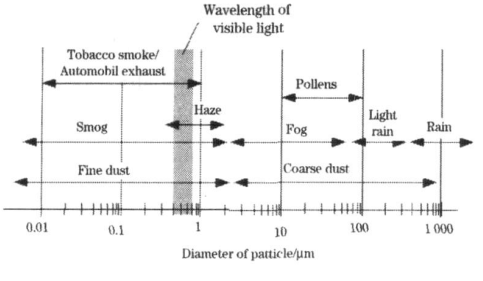

Fig 1 Types and sizes of atmospheric particles

众所周知, 在前向25°～45°散射角上, 由于粒子的散射相函数对粒子尺寸分布不敏感[4,5], 散射强度只依赖于入射光强、波长和大气消光系数。根据气象组织(WMO)定义的能见度: 一定尺寸的黑体目标物在近地面的雾等散射背景下, 能够被分辨出的最远距离。当利用探测器测量能见度, 这个最小分辨力为5%。以眼睛最敏感的绿光(波长为550 nm)作为能见度观测的参考波长λ_0, 根据Koschmieder定律, 得到能见度V与大气消光系数σ_0之间的关系为[6]:

$$V = \frac{2.996}{\sigma_0} \quad (1)$$

本文主要研究的是在雾霾天和雨天如何利用前向近红外散射光谱准确测量大气消光系数或能见度。主要工作既包括不同尺寸分布下的雾滴和雨滴的散射相函数计算及对比, 也包括雾霾天和雨天的实际测量及与标准人工观测值的对比实验。

收稿日期: 2007-05-09, **修订日期**: 2007-08-26
基金项目: 国家"863"高技术研究发展计划(2005AA641010)和国家气象局新技术推广项目资助
作者简介: 王 缅, 女, 1976年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所在读博士研究生 e-mail: mwang@aiofm.ac.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　前向近红外散射光谱法测量大气消光

当基于前向近红外散射光谱测量大气消光时，我们会遇到两个问题：一个是光源波长不同于参考波长，另一个是对某一个散射角上的光的测量。即波长效应和散射光的角度分布。这两者都依赖于粒子的折射指数、尺寸和粒子形状。一般来说，粒径和波长相同的粒子对光的散射是最有效的。由此得到一个参考波长 λ_0 (550 nm) 下的消光系数 σ 的校正公式[7]，

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{q} \tag{2}$$

而对于最有效散射粒子引起的消光，一般取 $q \approx -1.3$[7]。后一个问题在前面已经说明了。而且，基于前向近红外散射光谱法测量大气消光的前向散射能见度仪 (FVM) 具有结构简单紧凑，光学系统固定和便于安装等特点，目前在探测雾对大气的消光作用上，已经得到充分运用。其工作原理如图 2 所示，FVM 为避开太阳在可见光范围的强辐射区，采用近红外的 LED 光源照射到约 100 mL 的取样空气体积上，并测量前向 30°～36° 范围内的散射光强，在忽略粒子尺寸分布的影响下，散射光强与水平大气消光系数成正比。这个比例系数在这里称为散射消光比，它可由高精度的透射仪或者是由专业气象人员的人工观测值来标定。

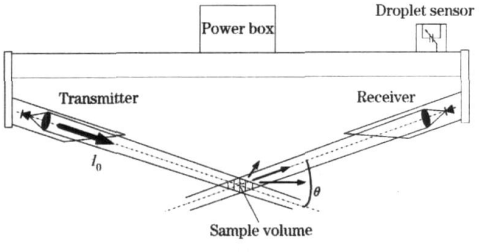

Fig. 2　Schematic diagram of forward-scattering visibility system

一般认为，大气消光系数在水平路径上是均一的[6]，所以，FVM 测量取样体积内粒子的散射光强，进而计算出消光系数，该系数就认为是大气水平的总消光系数。FVM 的光电探测器接收到取样体积在 30°～36° 范围内的散射强度为

$$I(\theta) = \sigma_s \left\{ I_0 2\pi \int_{30^\circ}^{36^\circ} P(\theta) \sin\theta \mathrm{d}\theta \right\} \tag{3}$$

由式(3)可知，消光系数 σ_s 与散射强度 $I(\theta)$ 成正比，大括号内是散射消光比 k，它等于入射光强 I_0 乘以相函数 $P(\theta)$ 在 30°～36° 角度内的积分。

不过，在把雾滴等大气气溶胶粒子的散射和消光之间存在的关系应用到雨天测量时，会产生难以接受的误差。要得到雨天消光测量的较准确值，就需要找到适合降雨粒子的散射和消光的对应关系。下面从 Mie 散射理论计算入手，分析雾滴和雨滴的相函数对消光的影响。

2　雾滴和雨滴分布下的散射相函数计算

基于电磁波的 Stokes 参量，散射电磁波强度 I 在每一点和任意方向上都和入射光强 I_0 相关，

$$I = MI_0 \tag{4}$$

其中 M 为[8]

$$M(\lambda, r, m, \theta) = \frac{1}{2x^2} [\,|S_1(x, m, \theta)|^2 + |S_2(x, m, \theta)|^2\,] \tag{5}$$

从麦克斯韦方程得知，$S_1(x, m, \theta)$，$S_2(x, m, \theta)$ 是散射振幅的垂直分布函数和水平分布函数。x 为粒子的尺寸参数 ($x = 2\pi r/\lambda$)，单个球形粒子的散射能力随角度的分布 $P(\lambda, r, m, \theta)$[9] (称为相函数) 定义为

$$M(\lambda, r, m, \theta) = \frac{\sigma_s(\lambda, r, m)}{4\pi r^2} P(\lambda, r, m, \theta)$$

$$P(\lambda, r, m, \theta) = \frac{2\pi}{(x/r)^2 \sigma_s(\lambda, r, m)} \cdot [\,|S_1(x, m, \theta)|^2 + |S_2(x, m, \theta)|^2\,] \tag{6}$$

其中，相函数对 4π 立体角积分，满足 $\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} P(\lambda, r, m, \theta)\sin\theta \mathrm{d}\theta \mathrm{d}\varphi = 4\pi$。$\sigma_s(\lambda, r, m)$ 是单个粒子的总散射截面，

$$\sigma_s(\lambda, r, m) = \frac{\pi}{(x/r)^2} \cdot \int_0^{\pi} [\,|S_1(x, m, \theta)|^2 + |S_2(x, m, \theta)|^2\,] \sin\theta \mathrm{d}\theta \tag{7}$$

在处理实际大气中霾、雾、雨等多分散系粒子[7]的散射时，需要将单个粒子的总散射截面和相函数分别对粒子尺寸分布 $n(r)$ 进行积分，得到总散射系数 σ_s 和多分散系的归一化的散射相函数 $P(\theta)$ 为，

$$\sigma_s = \frac{\lambda^3}{8\pi^3} \int_0^{\infty} x^2 n(x) Q_s(x) \mathrm{d}x \tag{8}$$

$$P(\theta) = \frac{\lambda^3}{4\pi^2 \sigma_s} \int_0^{\infty} n(x) [\,|S_1(x, m, \theta)|^2 + |S_2(x, m, \theta)|^2\,] \mathrm{d}x \tag{9}$$

散射效率因子 $Q_s = \dfrac{\sigma_s(\lambda, r, m)}{\pi r^2}$。

目前，最早由 Porch (1973) 提出的积聚模态粒子[10] (如霾) 和粗模态粒子[10] (如雾) 都适用的尺寸分布为对数正态分布，

$$n(r) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\ln\sigma_{gm}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln r - \ln r_{gm}}{\ln\sigma_{gm}} \right)^2 \right) \tag{10}$$

$n(r)$ 是尺寸间隔内单位取样体积上的粒子数，N 为取样体积内的粒子总数。r_{gm} 是几何平均半径，

$$\ln r_{gm} = \sum \frac{n_i \ln r_i}{N} \tag{11}$$

σ_{gm} 是几何标准偏差，

$$\ln\sigma_{gm} = \left[\frac{\sum n_i (\ln r_{gm} - \ln r_i)^2}{\sum n_i - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{12}$$

而对于雨滴来说，主要服从 Marshall-Palmer (1947) 分布[11]，

$$N_D = N_0 \mathrm{e}^{-\Lambda D} \tag{13}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

D 是雨滴直径，N_D 是尺寸间隔内单位体积上的雨滴数，$D=0$ 时，N_0 为

$$N_0 = 8\times10^6\ (\mathrm{m}^{-4}) \tag{14}$$

对于任何强度的降雨，

$$\Lambda = 4\ 100R^{-0.21}\ (\mathrm{m}^{-1}) \tag{15}$$

R 是降雨速率，单位为 mm·h^{-1}。图 3 给出了 4 种雨速下计算得到的雨滴分布。

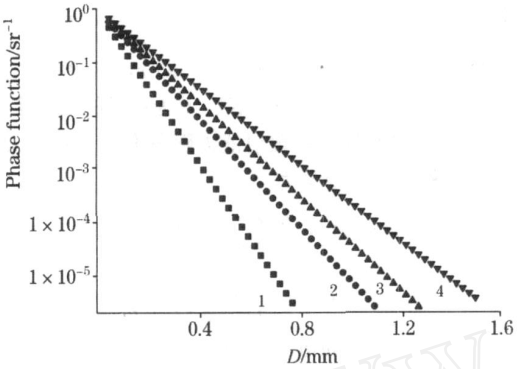

Fig. 3 M-P distribution of raindrops calculated at four rates of rainfall

1: R=1 mm·h^{-1}; 2: R=5 mm·h^{-1}; 3: R=10 mm·h^{-1}; 4: R=25 mm·h^{-1}

图 4 是利用 C 语言计算得出的几种雾滴分布[12,13]下的相函数曲线。入射波长 λ=0.85 μm，雾滴折射率 m=1.33，粒子总数 N=50，取对数尺寸间隔为 $\ln\left(\frac{r+\Delta r}{r}\right)$=0.03，单个粒子的相函数计算由 6 s 公司[8]提供的 FORTRAN 源程序获得。表 1 所示为对于不同的雾滴分布，在 30°～36°之间的散射相函数相等，均值为 0.14，标准差为 0.47 %。

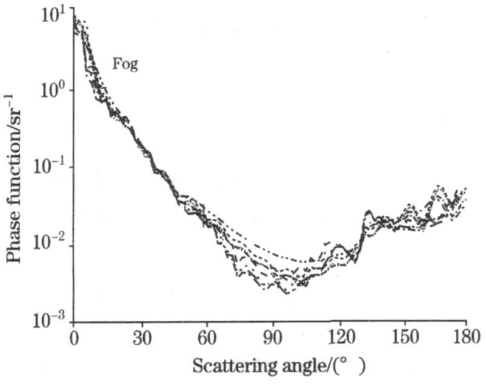

Fig. 4 Scattering phase function for several typical fog distributions

假定半径约为 1 mm 以下的雨滴粒子是球形的[11,14]，则可以利用 Mie 散射理论来计算雨滴的相函数。图 5 是在不同 M-P 分布下，计算得到的雨滴散射相函数曲线。入射波长 λ=0.85 μm，雨滴折射率 m=1.33，D_p 对应于该分布中最有效的散射粒子直径，单个粒子的相函数计算由 6 s 公司[8]提供的 FORTRAN 源程序获得。表 2 所示，对于不同雾滴分布，在 30°～36°之间的散射相函数相等，均值为 0.098，标准差为 0.25 %。

Table 1 k/I_0 for fog phase functions

Fog type	r_{gm}/μm	σ_{gm}	k/I_0
1	3.2	1.65	0.14
2	4	1.6	0.141
3	5	1.57	0.138
4	7.1	1.45	0.149
5	8.3	1.35	0.134
6	9.7	1.51	0.135
7	15	1.57	0.138
8	20	1.78	0.136

根据表 1 和表 2 可知，在 25°～45°之间，雨滴的散射相函数比雾滴的散射相函数低约 30 %。这是因为雨滴的尺寸和入射光波波长的比值相较于雾滴和入射光波波长的比值要大，根据 Mie 理论解释，会有更多的散射光集中到前向较窄的衍射瓣中。因此，从图 5 可以看出，除了近 0°的前向散射区域外，不同雨滴分布的散射相函数在各个散射角上几乎相等，显然大粒子的光散射能力随角度的分布，除 0°区域外，不再受粒子尺寸参数 x 的影响。

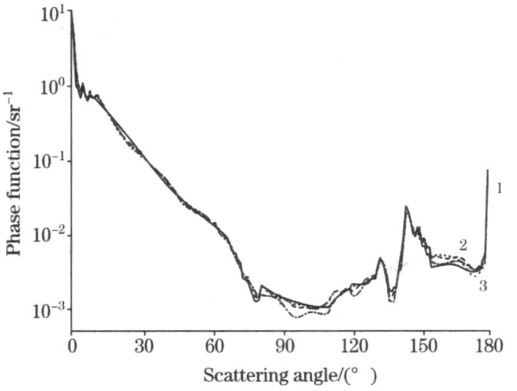

Fig. 5 Scattering phase function for several typical rain distributions

1: 1; 2: 5; 3: 10; 4: 25 mm·h^{-1}

Table 2 k/I_0 for rain phase functions

Precip. Rate/(mm·h^{-1})	D_p/μm	k/I_0
1	250	0.095
5	330	0.101
10	410	0.099
25	520	0.098

3 雾和雨的消光的实际测量

根据第 2 节的结论知道，在 25°～45°范围内，各种雨速下的不同雨滴分布的散射相函数总是低于雾的散射相函数。也就是说，在相同消光系数下，FVM 能够探测到的雨的散射强度要低于探测到的雾的散射强度。因此，FVM 需要对不同天气下的消光测量进行标定。然而，雾对能见度的损害是人们主要关心的问题，所以，一般 FVM 以雾天大气消光

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

测量的标定为准。图 6～图 8 所示的是已标定的两台 FVM 在气象观测站与人工观测值进行的对比，由于人工观测值直接获得的是能见度，我们利用 Koschmieder 定律(1)将其转换成消光系数，并认为是标准消光系数。图 6 是雾天的大气消光系数测量的对比，线性相关度约为 99.85 %，斜率为 1.01，标准偏差为 0.022。而在雨天测量的消光系数，如图 7 所示，在毛毛雨至小雨的降雨量($R < 4$ mm·h^{-1})下，线性相关度为 97.2 %，斜率为 1.23，标准偏差为 0.11。而在中到大雨的降雨量(4 mm·h^{-1} < R < 10 mm·h^{-1})下，FVM 测得的消光系数远大于标准值，而且随着降雨量的增加，线性相关性也随之降低，图 8 所示的是斜率为 2.79，线性度为 96 %，标准偏差为 0.8。

依据雨天的实际测量值，我们得到了 FVM 在雨天测量的两个校准公式：

$$\sigma_{\text{Rainlight}} = (0.813 \pm 0.07)\sigma_{\text{FVM}} \quad (16)$$

$$\sigma_{\text{Rainheavy}} = (0.36 \pm 0.09)\sigma_{\text{FVM}} \quad (17)$$

σ_{FVM}是依据雾的散射消光比标定的 FVM 在雨天测得的消光系数。(16)和(17)式中的系数和误差由图 7 和图 8 中的含标准偏差的斜率的倒数确定，(16)和(17)式分别针对降雨量在

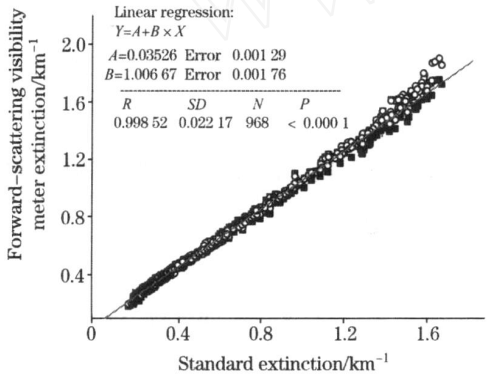

Fig. 6　Scatter plot of extinction measured with tow calibrated FVMs *versus* standard extinction which equals 3 divide by manually observed values during fog

■: FVM1; ○: FVM2; —: Linear fit

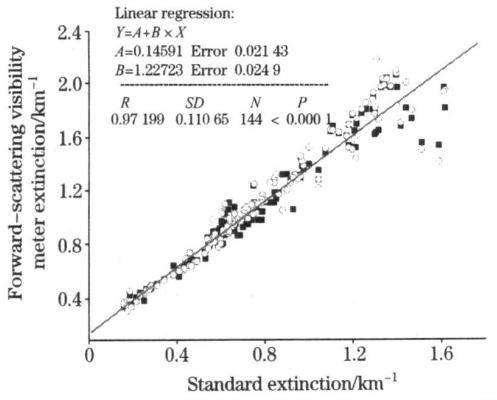

Fig. 7　Scatter plot of extinction measured with two calibrated FVMs *versus* standard extinction which equals 3 divide by manually observed values during drizzle, light and middle rainfall

■: FVM1; ○: FVM2; —: Linear fit

小雨和大雨下的消光系数测量值的校准。显然，(3)和(16)，(17)式表明，我们只是根据 FVM 的输出值来估算雨的消光系数的均值。另外，如果给 FVM 附加一个雨滴传感器，以此分辨是雾或降雨，并测量降雨量，就可以将这两个校准系数存入到单片机系统中，由单片机程序判断是否对输出进行校准，还可选择校准系数。

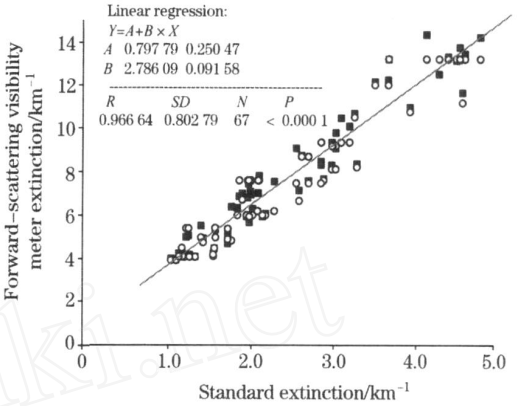

Fig. 8　Scatter plot of extinction measured with two calibrated FVMs versus **standard extinction which equals 3 divide by manually observed values during heavy rainfall**

■: FVM1; ○: FVM2; —: Linear fit

4　讨论和总结

根据上述分析和测量结果表明，在雾霾和雨天下，前向 25°～45°角度内的散射光强和消光系数的路径平均值成线性关系。基于前向近红外散射光谱的 FVM 经过高精度的透射仪或标准人工观测值标定后，在雨天，通过与标准人工观测值的对比实验，获得了雨天测量消光的校准公式，从而扩展了 FVM 在不同类型天气下准确测量大气消光的应用。而且 FVM 具有结构简单可靠，安装方便，成本低，性能稳定，易于校准等特点。

事实上，根据 Mie 理论的相函数计算分析，在前向 25°～45°范围内，具有 M-P 分布的雨滴的散射相函数比雾滴的散射相函数低约 30 %。因此，在雨天测量时，FVM 应给出比人工观测值更低的消光系数。然而，上面的测量结果表明，FVM 测得的消光系数比人工观测值高出约 20 %～60 %，而不是预期的低于 30 %。这是因为雨滴的前向散射比雾滴的前向散射具有更窄的衍射峰，并且其他方向上的散射光强相对减弱，而前向相对增强。因此针对于人眼观察，反而能接收到更多的前向光，其中除透射光外还包括 0°附近的前向散射光。所以，FVM 在雨天会低估能见度。另外，如(9)式所示，相函数是散射分布函数对总消光系数的归一化，它和粒子浓度、入射光强无关，只表示的是气溶胶粒子在 0°～180°方向上的散射能力，不过它和入射光的波长有关，在不同的光谱波段上，测量的差值可能会不同。这些问题有赖于进一步分析前向散射能见度仪的雨天消光测量和标准值的对比。

本文仅分析和讨论了利用前向近红外散射光谱测量雾和雨天的消光，其实还有许多其他类型的天气也可以考虑采用

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

类似的分析方法。

参 考 文 献

[1] Vogt H. Journal of the Atmospheric Sciences, 1968, 25(5): 912.

[2] David C Burnham, Fifth Symposium on Meteorological Observations and Instrumentations, Ioronto, Ont., Canada, April 11-15, 1983. 102.

[3] HONG Guang-lie, ZHANG Yin-chao, ZHOU Meng-ran, et al(洪光烈, 张寅超, 周孟然, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(7): 1249.

[4] Winstanley J V, Adams M J. Applied Optics, 1975, 14(9): 2151.

[5] Deirmendjian D. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation. M Kerker Ed., New York: Academic Press, 1969. 171.

[6] ZHOU Xiu-ji, TAO Shan-chang, YAO Ke-ya(周秀骥, 陶善昌, 姚克亚). Advanced Atmospheric Physics(高等大气物理学). Beijing: Meteorological Press(北京: 气象出版社), 1991. 906.

[7] MeCartney Earl J. Optics of the Atmosphere Scattering by Molecules and Particles. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1976. 29, 275.

[8] Vermote E, et al. 6S User Guide Version 2, NASA-Goddard Space Flight Cent., Greenbelt, MD., 1997.

[9] YIN Hong(尹 宏). Atmospheric Radiation Foundation(大气辐射学基础). Beijing: Meteorological Press(北京: 气象出版社), 1993. 58.

[10] ZHANG Cheng-chang, ZHOU Wen-xian(章澄昌, 周文贤). Atmospheric Aerosol Tutorials(大气气溶胶教程). Beijing: Meteorological Press(北京: 气象出版社), 1995. 21.

[11] Yura H T, Barthel K G, Büchtemann W. J. Opt. Soc. Am., 1983, 73(11): 1574.

[12] Josef Podzimek. Studia Geophysica et Geodaetica, 1997, 41(3): 277.

[13] Marshall J S, Palmer W McK. J. Meteorology, 1948, 5: 165.

[14] Ranmaswamy V, Chylek P. Shape of Raindrops, Light Scattering by Irregularly Shaped Particles, Schuerman D W Ed., New York: Plenum Press, 1979.

Study on the Measurement of the Atmospheric Extinction of Fog and Rain by Forward-Scattering Near Infrared Spectroscopy

WANG Mian, LIU Wen-qing, LU Yi-huai, ZHAO Xue-song, SONG Bing-chao, ZHANG Yu-jun, WANG Ya-ping, LIAN Cui-hua, CHEN Jun, CHENG Yin, LIU Jian-guo, WEI Qing-nong

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

Abstract In the visible and near IR, absorption is negligible so that the atmospheric extinction can be derived by atmospheric scattering which is mainly contributed by fog droplet, rain droplet, another types of droplet and small articles. The forward-scattering visibility meter (FVM) works by illuminating with near IR light a small sample volume of about 100 mL of air and measuring the intensity scattered in the angular range of 30 °to 36 °degrees. The scattered intensity is proportional to the extinction coefficient regardless of the article size distribution and after wavelength calibration. The ratio of scattered signal to extinction coefficient of fog and haze can be achieved by comparative test of FVM outputs and manual observations. Nevertheless, as a result of the application of the measurement during rain with the ratio of fog and haze, an unacceptable error is raised. To obtain an accuracy extinction measurement during rain, an appropriated ratio of scattered signal to extinction coefficient of rain would be found. The calculation for different size distributions of fog and rain with Mie theory has been made in this paper. And a comparison of extinction measurements made with two FVMs and manual observations during fog and rain has been made. The result shows that during rain the FVM extinction coefficient is from 20 % to 60 % greater than that of manual observations. This result can be used to define correction factors so that the FVM using forward-scattering near IR spectroscopy not only can be used to estimate extinction during fog and haze as well as during rain.

Keywords Forward-scattering; Near IR; Atmospheric extinction; Phase function; Size distribution; Extinction coefficient; Visibility

(Received May 9, 2007; accepted Aug. 26, 2007)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net