

张霖逸, 颜鹏, 毛节泰, 等. 气溶胶散射相函数的单站观测研究. 应用气象学报, 2017, 28(4): 436-446.

DOI: 10.11898/1001-7313.20170405

## 气溶胶散射相函数的单站观测研究

张霖逸<sup>1)2)</sup> 颜鹏<sup>2)\*</sup> 毛节泰<sup>3)</sup> 张骁<sup>1)</sup> 田平<sup>4)</sup> 畅海如<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

<sup>3)</sup>(北京大学物理学院, 北京 100871)

<sup>4)</sup>(北京市气象局, 北京 100089)

### 摘 要

利用 2014 年夏季在河北饶阳开展的“华北区域光化学立体试验”观测得到气溶胶辐射特性, 根据三波长角散射浊度仪 Aurora 4000 测量获取的前向角散射系数( $10^\circ \sim 90^\circ$ )和后向散射系数, 提出了一种基于浊度仪直接测量的气溶胶角散射系数和改进的 HG 相函数近似获取气溶胶散射相函数、不对称因子的拟合估算方法。分析了 2014 年 6 月 16 日—8 月 18 日夏季观测试验期间河北饶阳地区大气气溶胶细粒子( $PM_{2.5}$ ) 在 635 nm, 525 nm, 450 nm 3 个波段的不对称因子、相函数等的变化特征。结果表明: 用改进的 HG 相函数近似能够较好地拟合河北饶阳实际观测的  $PM_{2.5}$  的气溶胶散射相函数。拟合得到河北饶阳地区观测期间干气溶胶细粒子在 3 个波段的平均不对称因子( $g$ )分别为  $0.53 \pm 0.04$  (635 nm),  $0.57 \pm 0.05$  (525 nm) 和  $0.57 \pm 0.07$  (450 nm)。

**关键词:** 气溶胶; 辐射特性; 不对称因子; 散射相函数

### 引 言

气溶胶可以通过吸收和散射太阳辐射直接影响气候变化<sup>[1]</sup>。据 IPCC 第 5 次报告, 1750—2011 年人为总辐射强迫为  $2.29 \text{ W/m}^2$ , 而气溶胶产生的总辐射强迫(包括与云的相互作用)为  $-0.9 \text{ W/m}^2$ <sup>[2]</sup>; 其中不确定性的重要来源之一是在使用模式估算辐射强迫时, 缺少准确、全面的气溶胶的辐射特性<sup>[3]</sup>。

气溶胶辐射参数主要包括气溶胶消光系数(光学厚度)、单次散射反照率、相函数(不对称因子)等。其中关于气溶胶散射、吸收特性和光学厚度等的观测研究近些年国内外已有很多文献报道<sup>[4-12]</sup>, 但关于相函数、不对称因子研究的报道还较少。

散射相函数是反映气溶胶粒子对光散射能量分布的重要参数, 它决定于气溶胶粒子大小和化学成分。由于缺乏直接测量气溶胶相函数的商业化仪器等原因, 关于气溶胶相函数的直接测量还相对较少,

只有少量文献中提及采用自行设计搭建的仪器装置对气溶胶相函数进行直接测量工作<sup>[13-16]</sup>。理论上, 大气气溶胶的散射相函数可以通过已知的粒子谱和复折射指数计算得到<sup>[17]</sup>, 这也是目前获取相函数的主要方法之一<sup>[15, 18-19]</sup>, 但在计算中所需要的参数获取存在一些困难, 如有关大气气溶胶粒子谱全谱的观测还较少, 且粒子谱在测量中还存在很多不可避免的误差<sup>[20-21]</sup>; 此外, 气溶胶来源复杂, 粒子的折射率可能不同, 气溶胶的复折射指数难以通过直接测量得到, 需要估算。这些因素均会导致用粒子谱计算相函数的结果存在一定误差。针对相函数难以通过观测直接获取, 以及基于粒子谱计算得到的相函数通常以数据表形式给出, 在理论计算中不便利用, 陆续有人研究了相函数的近似方法<sup>[22]</sup>, 常用的有 Henyey 等<sup>[23]</sup>提出的 HG 相函数, Kattawar<sup>[24]</sup>提出的多参数 HG 相函数, 以及 Cornette 等<sup>[25]</sup>提出的改进的 HG 散射相函数  $P_{RHG}$ 。此外, 随着遥感技术的发展, 研究人员发展了利用遥感探测反演气溶胶相

2017-04-01 收到, 2017-05-19 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41330422), 科技部科技基础性工作专项(2013FY112500)

\* 通信作者, email: yanpeng@camsma.cn

函数的方法,如 Nakajima 等<sup>[26]</sup>、毛节泰等<sup>[27]</sup> 提出利用天空辐射测量获得气溶胶散射相函数的反演算法,得到环境大气柱平均气溶胶相函数。在直接测量研究上,多年来,国外也开展了一些基于成像技术或利用自制角散射浊度仪直接测量气溶胶相函数的工作<sup>[15-16]</sup>,但在国内有关研究还较少,只有 Bian 等<sup>[13]</sup> 近期发表了基于成像技术(CD-laser aerosol detective system)直接测量环境气溶胶相函数的研究结果。

不对称因子反映了气溶胶前、后向散射的相对能力。它作为辐射传输计算中的一个重要参数,在计算评估大气气溶胶的气候效应中有重要意义。通常获取不对称因子的方法包括:通过测量的后向散射系数和总散射系数直接计算得到的后向散射比进行估算<sup>[28-29]</sup>;通过直接测量或反演得到的粒子谱信息,利用米散射理论计算相函数和不对称因子。但以上方法在观测和计算算法中存在许多不可避免的误差,因此,利用不同方法计算得到的不对称因子还存在较大差异<sup>[18]</sup>。

本文基于2014年6—8月在华北乡村地区——河北饶阳站开展的综合观测试验,利用澳大利亚 EcoTech 最新发展的商业化角散射浊度仪 Aurora 4000,直接测量 $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的角散射系数,并以此为基础,提出利用测量计算得到的前向散射相函数( $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )、后向散射比结合改进的HG相函数,拟合获取635 nm, 525 nm, 450 nm 3个波段不对称因子( $g$ )的方法。进一步应用该方法讨论饶阳站气溶胶细粒子的不对称因子和散射相函数的变化特征,为研究华北地区气溶胶的辐射效应提供参考。

## 1 观测试验

### 1.1 观测点

观测点位于河北省衡水市饶阳县气象局内( $38^{\circ}23'N, 115^{\circ}73'E$ ,海拔高度为25 m)。饶阳位于燕山山脉输送带上的平原地区,北距北京市约240 km,西距石家庄市110 km;当地主要以蔬菜、水果、奶牛养殖等农业经济为主,无明显工业污染源,其污染主要来自周边地区的污染物输送,在一定程度上,该地的气溶胶光学特性反映了华北地区大气气溶胶的状况以及传输状况。有关站点更多介绍参见 Ran 等<sup>[30]</sup>和 Wang 等<sup>[31]</sup>的工作。

### 1.2 观测仪器

本研究采用澳大利亚 EcoTech 公司生产的最新型号积分角散射浊度仪 Aurora 4000 进行观测。这种新型浊度仪除了能够直接测得红、绿、蓝3个波段(中心波长分别为635 nm, 525 nm, 450 nm)的散射系数(积分角度为 $10^{\circ}\sim 170^{\circ}$ )和后向散射系数(角度为 $90^{\circ}\sim 170^{\circ}$ ),还能测量 $10^{\circ}$ 到 $90^{\circ}$ 之间17个角度上的角散射系数,其角度间隔为 $5^{\circ}$ 。

观测试验中,浊度仪安装在具有空调设备的集装箱观测室内,进气管从集装箱顶部穿过,进气口高度距离集装箱顶约2 m,距离地面约4.5 m。采样进气口安装 $PM_{2.5}$ 切割头,这主要是考虑到大粒子的前向散射光会很强,由于浊度计原理的限制,大粒子较强的前向散射光无法测得,这会导致对散射系数的测量误差较大,造成对粒子谱反演等的误差难以控制。在测量前先排除大粒子,则反演结果更稳定。进样气体经过室外与室内分子筛干燥管去湿,以保持仪器测量时进样气体相对湿度小于40%。因此,本工作得到的是干气溶胶细粒子( $PM_{2.5}$ )的散射相函数和不对称因子 $g$ 。

观测时,浊度仪每天进行自动零点检查,每5 d进行1次人工零点和跨点检查。观测数据每分钟记录1条,计算机自动采集和存储。所有分钟数据经过零、跨点检查和订正后,处理为小时平均数据。

## 2 观测数据处理

### 2.1 Aurora 4000 角散射浊度仪测量误差与订正

根据 Aurora 4000 角散射浊度仪测量原理<sup>①</sup>, Aurora 4000 角散射浊度仪的主要测量误差是在测量总散射和后向散射时,由于积分角度不理想,带来的角度截断误差,以及在测量气溶胶角散射系数时,遮光板对散射光遮挡的非理想性导致的误差,即由于实际测量时,遮光板并不能完全遮挡小于遮挡角度的散射光,造成角散射系数测量值存在的误差。对积分角度不理想造成的截断误差已经有许多研究进行了系统讨论<sup>[32-35]</sup>,但目前对于订正由角度遮挡非理想性导致的测量误差还缺少可用的方法。因此,本工作只对积分角度的截断误差进行订正,而对于遮光板遮挡的非理想性未进行处理,这可能对观测计算的相函数有一定影响。

①Aurora 4000 Polar Nephelometer User Manual, EcoTech. 2011.

本文对浊度仪测量的角度截断误差采用 Anderson 和 Ogen<sup>[36]</sup>提出的订正方法, 简称为 AO98。所用订正公式如下:

$$\sigma_{\text{true}} = C \cdot \sigma_{\text{nep}} \quad (1)$$

式(1)中,  $\sigma_{\text{true}}$  和  $\sigma_{\text{nep}}$  分别为气溶胶真实散射系数与仪器测量值,  $C$  为订正系数, 可以通过 Angstrom 指数计算得到<sup>[37]</sup>。

## 2.2 基于多角度散射测量计算气溶胶散射相函数

气溶胶散射相函数定义为各方向的散射能力与平均散射能力之比<sup>[22]</sup>:

$$P(\theta) = 4\pi\beta(\theta)/\sigma_{\text{sca}} \quad (2)$$

式(2)中,  $P(\theta)$  为气溶胶的相函数,  $\beta(\theta)$  为角散射系数,  $\sigma_{\text{sca}}$  为总散射系数。

根据浊度仪测量原理可知, 通过积分浊度仪测量的散射光强度  $L$  可以直接得到散射系数  $\sigma_{\text{sca}}$ 。

$$L = \left(\frac{I_0}{y}\right) \int_{\theta_1}^{\theta_2} \beta(\theta) \sin\theta d\theta = \frac{I_0}{2\pi y} \sigma_{\text{sca}} \quad (3)$$

式(3)中,  $L$  为散射光强度,  $I_0$  为漫散射光源强度,  $y$  为光源到挡板的距离,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  为仪器测量到的散射光角度范围。在 Aurora 4000 测量总散射系数时,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为  $10^\circ$  和  $170^\circ$ 。在 Aurora 4000 测量角散射系数时, 通过移动遮光板挡住小于某个角度的散射光。在每个测量周期中, 仪器实际测量的散射光强  $L$  是  $\Theta \sim 170^\circ$  的散射光强, 其中  $\Theta$  为  $10^\circ \sim 90^\circ$ , 以  $5^\circ$  为间隔的 17 个角度。测量的  $\Theta \sim 170^\circ$  的强度表示为

$$L(\Theta) = \left(\frac{I_0}{y}\right) \int_{\Theta}^{170^\circ} \beta(\theta) \sin\theta d\theta \quad (4)$$

如果取两个观测角度之差, 并取被积函数的中值, 则

$$\begin{aligned} L(\Theta_2) - L(\Theta_1) &= \left(\frac{I_0}{y}\right) \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \beta(\theta) \sin\theta d\theta \\ &= \left(\frac{I_0}{y}\right) (\beta(\theta) \sin\theta)_{\theta=(\Theta_1+\Theta_2)/2} \cdot \Delta\theta \end{aligned} \quad (5)$$

通过式(5)得到角散射函数  $\beta(\theta = \Theta_i \sim \Theta_{i+1})$ , 再通过式(2)得到在  $12.5^\circ, 17.5^\circ, \dots, 87.5^\circ$  的相函数, 即  $P_{10^\circ \sim 90^\circ}$ 。

## 2.3 相函数的近似方法与不对称因子( $g$ )估算

### 2.3.1 相函数的近似

目前, 已经发展了很多相函数近似, 包括最初由 Henyey 等<sup>[23]</sup>提出的 HG 相函数, 其表达式为  $P_{\text{HG}}(\theta, g) = \frac{1}{4\pi} \frac{1-g^2}{(1+g^2-2g\cos\theta)^{3/2}}$ 。其中,  $\theta$  为散射角,  $g$  为不对称因子。该近似方法中  $P(\theta)$  只含有不对称因子  $g$  一个变量。其优点在于表达形式简

单, 数值计算方便, 且能展开为勒让德级数, 能很好地应用于辐射传输中; 但其缺点在于对后向散射的模拟效果不好; 随后 Kattawar<sup>[24]</sup>提出双 HG 相函数 ( $P_{\text{DHG}}$ ) 克服这一问题, 虽然双 HG 函数在一定程度上改进了对后向散射的模拟效果, 但由于函数中需要确定的参数较多, 实际中不适用。这两个函数近似都只适用于粒子尺度参数不是太小的情况。Cornette 等<sup>[25]</sup>提出改进的 HG 散射相函数 ( $P_{\text{RHG}}$  相函数), 其表达式为

$$P_{\text{RHG}}(\theta, g^*) = \frac{3}{2} \frac{1-g^{*2}}{2+g^{*2}} \frac{1+\cos^2\theta}{(1+g^{*2}-2g^*\cos\theta)^{3/2}} \quad (6)$$

$$g^* = \frac{5}{9}g - \left(\frac{4}{3} - \frac{25}{81}g^2\right)x^{-1/3} + x^{1/3},$$

$$x = \frac{5}{9}g + \frac{125}{729}g^3 + \left(\frac{64}{27} - \frac{325}{243}g^2 + \frac{1250}{2187}g^4\right)^{1/2}.$$

式(6)中,  $g$  为不对称因子,  $g^*$  和  $x$  为引入参数。该  $P_{\text{RHG}}$  相函数克服了多参数问题, 能够直接建立不对称因子与相函数的关系, 且改进了对后向散射的模拟效果, 而且同样可以展开为勒让德级数, 在辐射传输计算中更加方便<sup>[25]</sup>。本文中对相函数的近似将采用式(6)。

### 2.3.2 不对称因子估算的方法

不对称因子  $g$  是反映气溶胶前、后向散射相对能力的一个重要参数, 数值为  $-1 \sim 1$ ; 若前向散射与后向散射能力越接近, 不对称因子  $g$  越接近 0。后向散射比  $b$  定义为半球后向散射与总散射系数之比  $b = \sigma_{\text{back}}/\sigma_{\text{sca}}$ <sup>[22]</sup>,  $\sigma_{\text{back}}$  为半球后向散射系数, 可通过仪器直接测量。当散射为 Rayleigh 散射时,  $g=0, b=1/2$ ; 当散射全部集中于前向时,  $g=1, b=0$ ; 全部集中于后向时  $g=-1, b=1$ 。不对称因子  $g$  和后向散射比  $b$  均可利用散射相函数计算, 得

$$g = \frac{1}{2} \int_0^\pi P(\theta) \sin\theta \cdot \cos\theta \cdot d\theta,$$

$$b = \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{2}}^\pi P(\theta) \sin\theta \cdot d\theta \quad (7)$$

由于 Aurora 4000 只测量  $10^\circ \sim 90^\circ$  各个角度的散射, 计算得到的相函数  $P_{10^\circ \sim 90^\circ}$  集中在前向 ( $10^\circ \sim 90^\circ$ ), 并不能直接用于计算得到不对称因子  $g$ 。要得到全角度的散射相函数, 一种方法是只利用测量的前向  $10^\circ \sim 90^\circ$  之间各个角度的散射相函数  $P_{10^\circ \sim 90^\circ}$  数据, 结合 Cornette 和 Shanks 提出的  $P_{\text{RHG}}$  相函数近似公式(式(6))拟合获取全角度的相函数。但分析发现, 用该方法得到的全角度相函数计算得到的后向散射比与

仪器直接测量得到的后向散射比偏离较大。因此,本文提出同时利用仪器测量的  $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$  散射相函数  $P_{10^{\circ}\sim 90^{\circ}}$  和后向散射比  $b$  数据,结合式(6)的  $P_{RHG}$  相函数拟合获取全角度范围的散射相函数及不对称因子的方法。其具体方法如下:①取不同的不对称因子  $g$  (取值范围为  $-1\sim 1$ ),根据改进的 HG 相函数(式(6)),得到  $g$  值所对应的相函数值  $P_{RHG}(g, \theta)$  及后向散射比  $b_{RHG}$ ;②构建同时考虑相函数( $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )分布与后向散射比的拟合误差函数( $\Delta E$ ) (见式(8))。误差函数的第 1 项表示  $10^{\circ}\sim 90^{\circ}$  共 16 个角度上拟合的相函数值与测量值的平均均方差,第 2 项为通过拟合相函数获得的后向散射比  $b_{RHG}$  与测量值  $b_{obs}$  的均方差。其权重分别为  $(1-\lambda)$  和  $\lambda$ 。取不同的  $g$  值,计算拟合误差函数  $\Delta E$ ,当误差函数  $\Delta E$  最小时,取该  $g$  值对应的相函数  $P_{RHG}(g, \theta)$  作为此时拟合最优的相函数,此时该  $g$  取值为拟合最优的不对称因子  $g$ 。

$$\Delta E = (1-\lambda) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{16} (P_{RHG}(\theta_i) - P_{obs}(\theta_i))^2}{15}} + \lambda \cdot \sqrt{(b_{RHG} - b_{obs})^2} \quad (8)$$

需要说明,式(8)中前向散射相函数只取  $15^{\circ}\sim 90^{\circ}$  共 15 个角度进行拟合,主要是考虑到仪器在 525 nm 波长测量的角散射系数在  $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$  的观测数据常出现异常现象,对该现象出现的原因目前还不清楚,可能与仪器对遮光板的角度控制有关,对此需要进一步分析。

为了选取合适的权重函数  $\lambda$ ,采用不同  $\lambda$  进行试

验。计算不同  $\lambda$  取值下  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$  的角散射系数和后向散射比观测值与拟合值的线性回归,结果见表 1。

表 1 不同  $\lambda$  下  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$  的角散射系数和后向散射比回归系数

Table 1 Regression coefficient for angular scattering at  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$  and backscattering ratio with different  $\lambda$

$\lambda$	$A_1$	$A_2$
0	0.978	1.083
0.1	0.981	1.079
0.2	0.985	1.075
0.3	0.990	1.069
0.4	0.997	1.063
0.5	1.007	1.056
0.6	1.022	1.05
0.7	1.052	1.019
0.8	1.071	1.001
0.9	1.072	1
1	1.072	1

注:回归公式  $P_{RHG} = A_1 \times P_{15^{\circ}\sim 20^{\circ}}$ ,  $b_{RHG} = A_2 \times b$ ,其中  $b_{RHG}$  和  $b$  分别为后向散射比的拟合值和观测值,表中的参数  $A_1, A_2$  分别为线性回归系数。

由表 1 可以看到,当  $\lambda$  取 0.6~0.7 时,对后向散射比和相函数的前向( $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ )均有较好的拟合结果,本文取  $\lambda$  值为 0.6。

图 1 为  $\lambda$  取 0.0 和 0.6 时 525 nm 后向散射比观测值与拟合值的对比;图 2 为随机选取观测期间的 6 个例子。 $\lambda$  分别取 0.0 和 0.6 时,525 nm 相函数的拟合值与观测值的对比,可以看到在取  $\lambda=0.6$  后,后向散射比一致性明显好于  $\lambda=0.0$  情况;而不同的  $\lambda$  取值对散射相函数的拟合结果改变不大(图 2)。

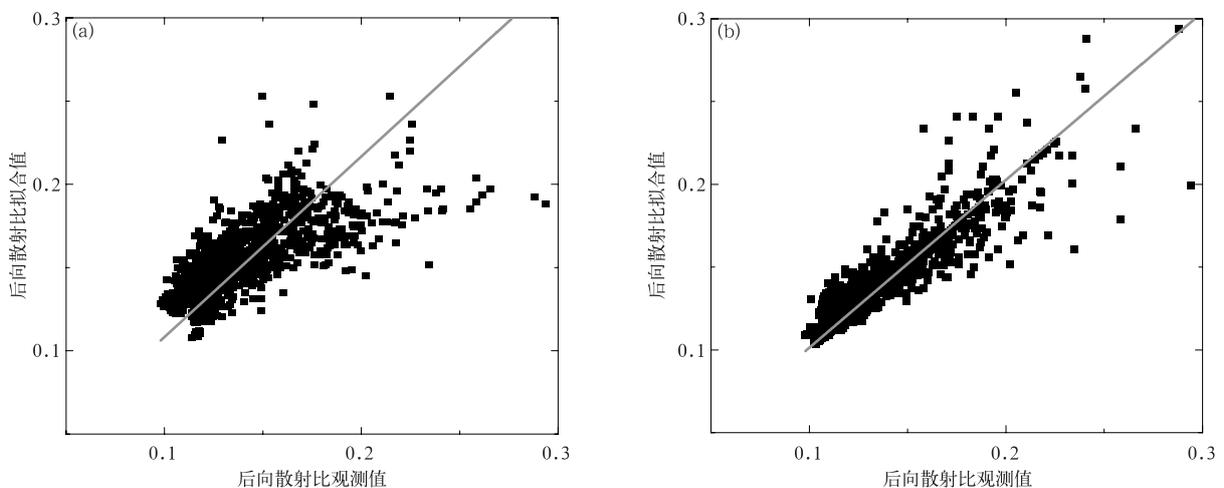


图 1  $\lambda=0.0$ (a),  $\lambda=0.6$ (b)时观测与拟合的 525 nm 后向散射比

Fig. 1 Observation and fitting results of backscattering ratio at 525 nm as  $\lambda=0.0$ (a) and  $\lambda=0.6$ (b)

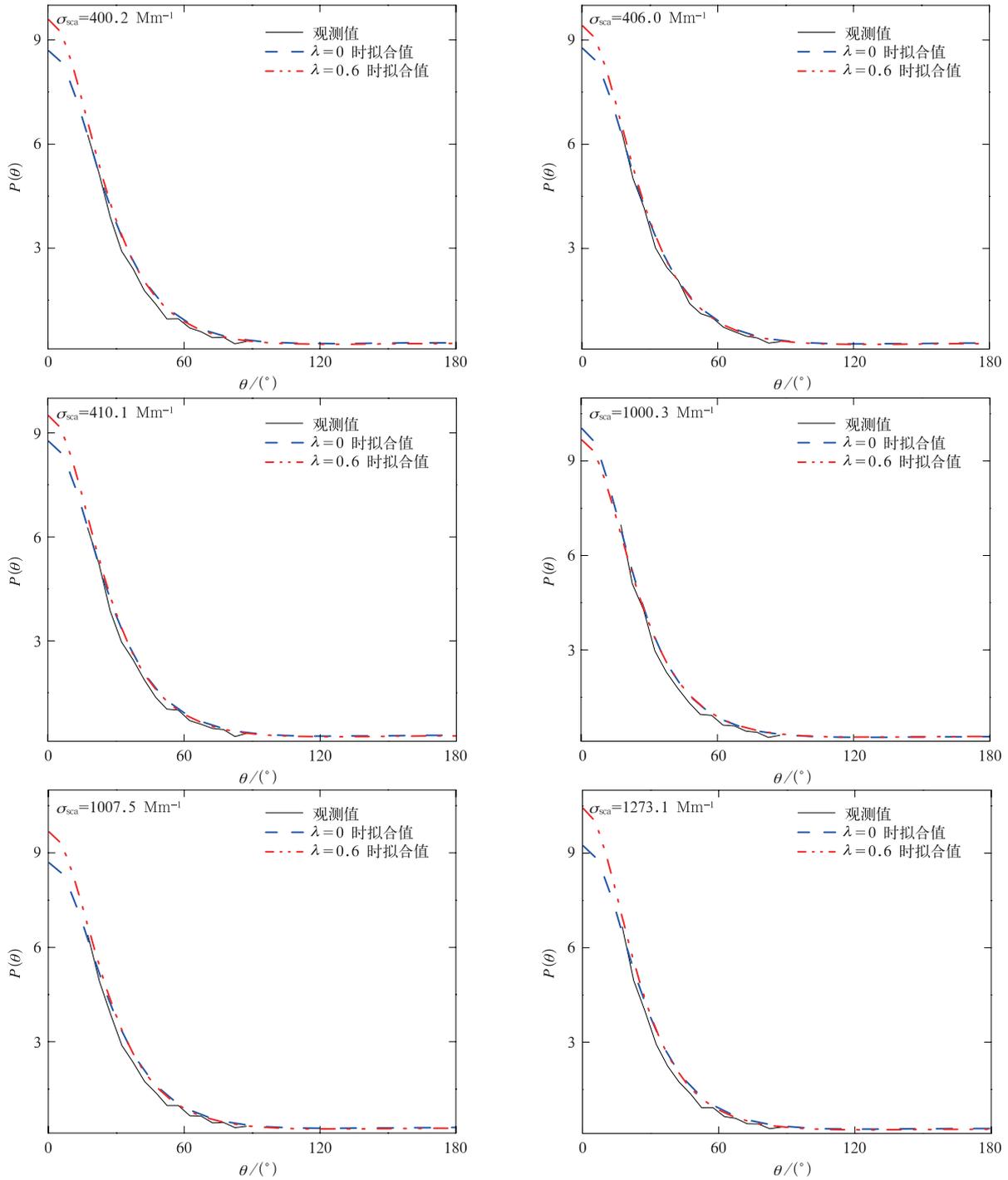


图 2  $\lambda=0.0$  和  $\lambda=0.6$  时 525 nm 相函数的拟合值与试验观测值的对比

Fig. 2 Comparison of observed and fitted results as  $\lambda=0.0$  and  $\lambda=0.6$  at 525 nm

### 3 结果分析

#### 3.1 饶阳夏季气溶胶散射相函数、不对称因子统计特征

图 3 是 2014 年 6 月 16 日—8 月 18 日基于小时

平均角散射系数测量结果计算的平均相函数情况。可以看到,635 nm,525 nm,450 nm 3 个波段的相函数基本类似。总体上看,前向( $10^\circ \sim 35^\circ$ )的相函数数值大致是  $P(\theta)_{635 \text{ nm}} < P(\theta)_{525 \text{ nm}} < P(\theta)_{450 \text{ nm}}$ ,这与在通常的粒子谱分布情况下,前向散射随入射光波长的减小而增大这一理论计算结果基本吻合。对于

测量的 635 nm 和 450 nm 散射相函数在 22.5° 和 27.5° 时出现异常分布,而 525 nm 的相函数却分布正常,目前原因还不清楚。分析认为,这种情况可能与遮光板位置控制不够精准,以及仪器光源设计原因可能造成遮光板对 3 个波段光源的遮挡效果不同

有关。

拟合计算的不对称因子  $g$  逐时分布如图 4 所示,饶阳夏季气溶胶细粒子在 3 个波段的不对称因子在观测期间有明显的时间变化。其中,在 7 月 13—15 日、8 月 12—15 日时间段内细粒子的  $g$  值较

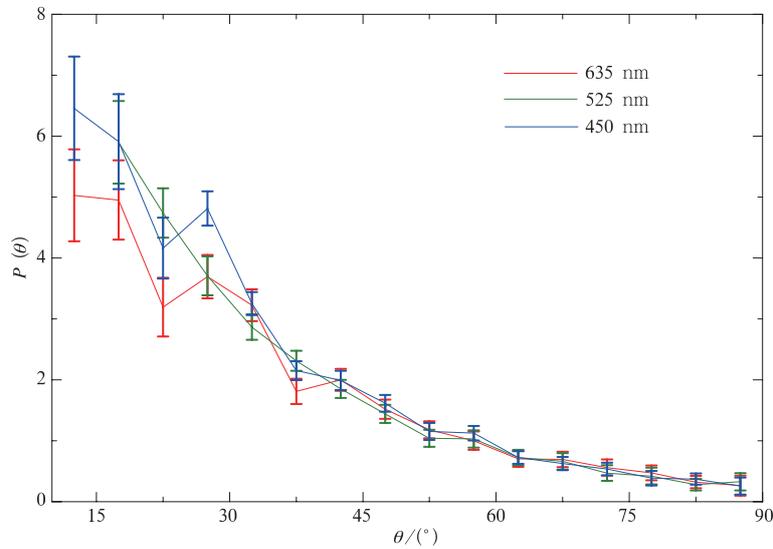


图 3 2014 年 6 月 16 日—8 月 18 日的平均相函数(10°~90°)  
Fig. 3 Average phase function(10°~90°) from 16 Jun to 18 Aug in 2014

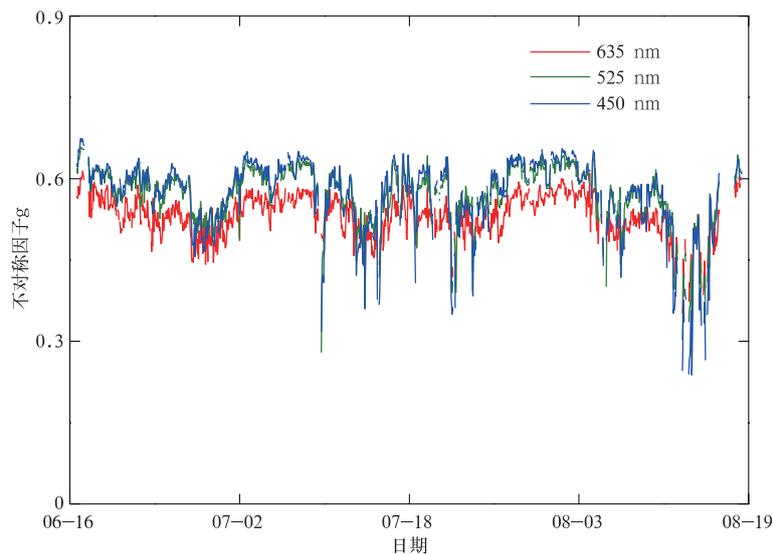


图 4 2014 年 6 月 16 日—8 月 18 日的不对称因子  $g$  逐时分布  
Fig. 4 Time series of simulated asymmetry factor( $g$ ) from 16 Jun to 18 Aug in 2014

低,各时段平均  $g$  值(525 nm)约为 0.45~0.52,尤其是 8 月 12—15 日不对称因子  $g$  的值一直低于 0.4;而 7 月 3—8 日、7 月 16—19 日、7 月 28 日—8 月 4 日细粒子的  $g$  值较高,各时段  $g$  平均值(525 nm)约为 0.58~0.61,最高值出现在 7 月 28 日—8 月 4 日。

分析发现,对应 8 月 12—15 日的低  $g$  值,该期间空气较为清洁,散射系数低于 200  $Mm^{-1}$ ,对应 Angstrom 指数也较高;而在出现高  $g$  值的 7 月 28 日—8 月 4 日,散射系数均远大于较清洁时段,空气污染较重。说明饶阳地区夏季污染和清洁情况下,细粒

子的  $g$  值差别明显。由图 4 还可以看到, 不对称因子  $g$  在 635 nm 波段较低, 而在 525 nm 和 450 nm 波段较高, 基本满足随波长的增加而减小的规律<sup>[18]</sup>。 $g$  值在 525 nm 和 450 nm 波段差异不明显, 通过对假设的不同单模态粒子谱分布用 Mie 理论计算分析认为, 产生这一现象的原因除了与仪器测量误差有关, 还可能与气溶胶粒子谱分布特征有关。Fiebig 等<sup>[38]</sup>对美国 NOAA 气溶胶监测网的数据分析也发现类似的情况, 当气溶胶粒径从小于 1  $\mu\text{m}$  变化到小于 10  $\mu\text{m}$  时,  $g$  值与波长的关系越来越弱。

表 2 是河北饶阳地区观测期间气溶胶不对称因子  $g$  的统计特征, 作为对比, 表 3 也给出了有关文献报道的不同地区测量或反演的气溶胶不对称因子结果。可以看到, 饶阳地区夏季气溶胶干的气溶胶细

粒子( $\text{PM}_{2.5}$ )的不对称因子在 635 nm, 525 nm 和 450 nm 3 个波段平均值分别为 0.53, 0.57 和 0.57。中国饶阳的不对称因子非常接近于处于生物质燃烧季节(8—11月)时的巴西库亚巴市得到的不对称因子<sup>[39]</sup>, 这个季节中巴西的主要气溶胶类型为燃烧形成的烟雾气溶胶, 以细粒子为主。也与 2003 年 5 月在美国南部大平原(俄克拉荷马)观测试验得到的干气溶胶细粒子(粒径小于 1  $\mu\text{m}$ )不对称因子(0.55~0.63)<sup>[18]</sup>相近。但比合肥<sup>[40]</sup>、兰州<sup>[41]</sup>等得到的  $g$  值偏低, 主要是这两地未进行  $\text{PM}_{2.5}$  粒径切割,  $g$  值受粗粒子的影响。与在奥地利维也纳地区遥感得到的结果<sup>[42]</sup>相比略低, 主要因为遥感结果得到的是环境条件下整层大气的平均气溶胶不对称因子, 湿度影响会造成  $g$  值增大。

表 2 2014 年 6 月 16 日—8 月 18 日气溶胶不对称因子( $g$ )的统计特征  
Table 2 Statistical property of asymmetry factor from 16 Jun to 18 Aug in 2014

统计量	$g$		
	635 nm	525 nm	450 nm
平均值	0.53	0.57	0.57
方差	0.04	0.05	0.07
最大值	0.61	0.66	0.67
最小值	0.35	0.28	0.24
中值	0.53	0.58	0.59

表 3 中国饶阳地区不对称因子与其他地区的对比

Table 3 The asymmetry factor( $g$ ) at Raoyang of China and other regions

地区	不对称因子	波长/nm	计算方法	文献出处
饶阳(中国, 农村)	0.57	525		本研究
俄克拉荷马(美国, 平原)	0.55~0.63	550	MIE 散射、直接测量	文献[18]
库亚巴(巴西, 城市)	0.54	550	MIE 散射	文献[39]
合肥(中国, 城市)	0.75	550	经验公式	文献[40]
兰州(中国, 城市)	0.7	520	经验公式	文献[41]
维也纳(奥地利, 城市)	0.628	532	直接测量	文献[42]
京都(日本, 城市)	0.59	532	直接测量	文献[15]

注: 经验公式是利用地面测量的散射、吸收系数, 根据不对称因子( $g$ )与单次散射反照率的经验公式计算; MIE 散射是利用粒子谱计算得到的相函数与不对称因子( $g$ ); 直接测量是利用多角度浊度仪测量角散射系数获得相函数和不对称因子( $g$ )。

### 3.2 饶阳观测期间污染、清洁时段气溶胶不对称因子及相函数特征

观测期间饶阳出现了明显的两次污染过程、两个清洁时段, 分别是 7 月 6—7 日、7 月 31 日—8 月

2 日的污染过程和 7 月 9—10 日、8 月 4—6 日的相对清洁时段。分析发现, 在两次污染过程中, 3 个波长的不对称因子均为 0.56~0.63, 数值明显大于清洁过程的 0.51~0.54(表 4)。从对应的 3 个波段的

表 4 2014 年 7—8 月饶阳污染过程、清洁时段不对称因子统计特征

Table 4 The asymmetry factor( $g$ ) in dirty and clean periods from Jul to Aug in 2014

过程	时段	$g$		
		635 nm	525 nm	450 nm
污染过程 1	07-06—07	0.56	0.62	0.63
污染过程 2	07-31—08-02	0.58	0.62	0.63
清洁时段 1	07-09—10	0.53	0.54	0.54
清洁时段 2	08-04—06	0.51	0.54	0.54

相函数分布看,污染情况下在  $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$  散射相函数数值均明显高于清洁情况(图 5),说明观测期间饶阳地区的气溶胶细粒子在污染情况下比相对清洁情

况具有更强的前向散射能力。结合 Aurora 4000 测量的 3 个波段散射系数,计算得到两次污染过程和两个清洁时段的 Angstrom 指数,发现两次污染过

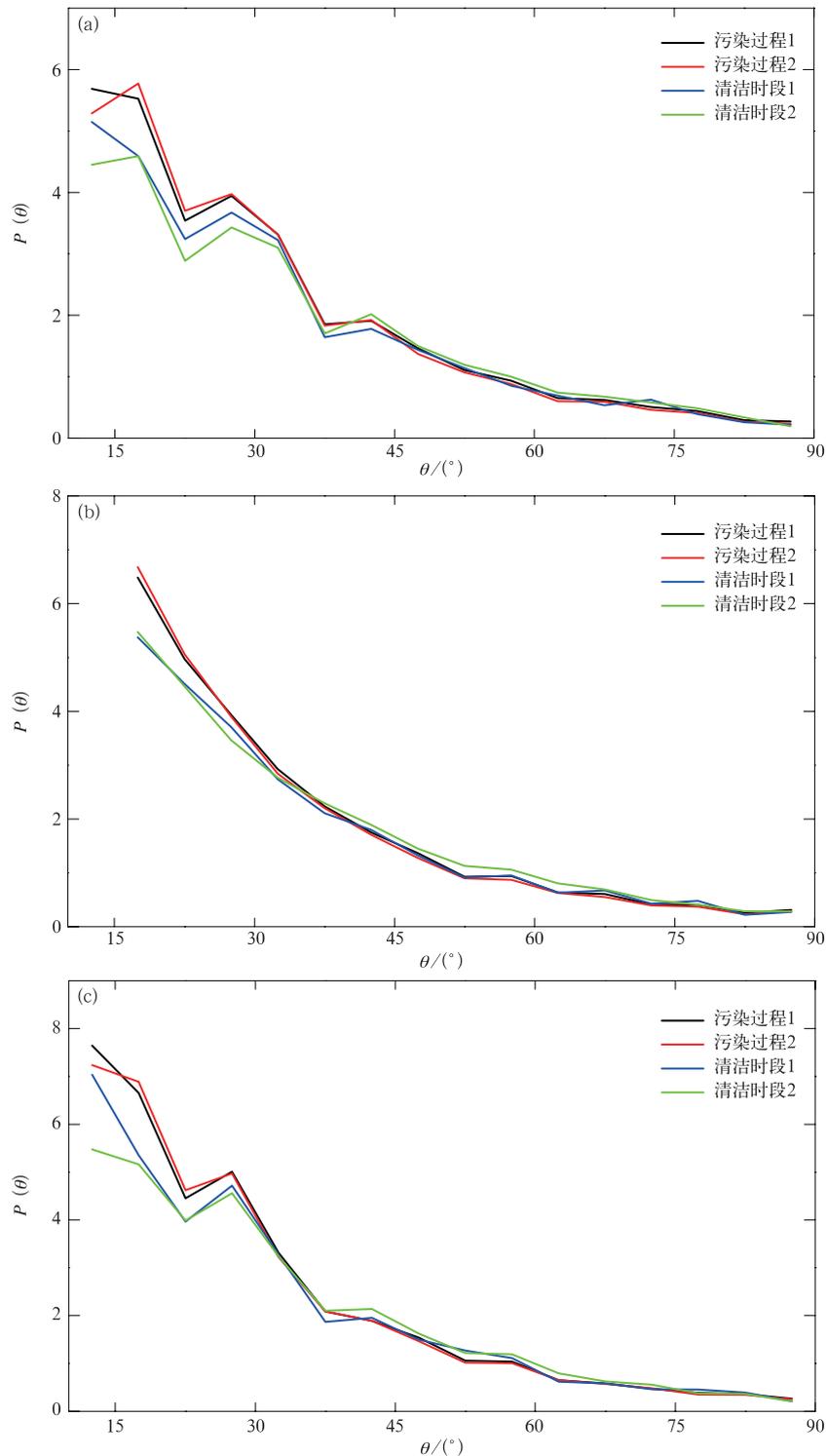


图 5 2014 年 7—8 月河北饶阳污染过程、清洁时段的相函数平均  
(a)635 nm,(b)525 nm,(c)450 nm

Fig. 5 The average phase function in dirty and clean periods at the wavelength of 635 nm(a), 525 nm(b), 450 nm(c) at Raoyang of Hebei, China from Jul to Aug in 2014

程中,Angstrom指数分别为0.75,0.49,数值明显低于2个相对清洁时段(Angstrom指数分别为0.88,1.06),这与前面讨论的污染和清洁时段不对称因子与前向散射相函数的分布特点一致。反映了饶阳地区污染较重时,气溶胶细粒子 $PM_{2.5}$ 中粒子的平均粒径较清洁时段更大。也可能反映了饶阳地区夏季在污染情况下细粒子 $PM_{2.5}$ 中老化气溶胶粒子比例更大。

#### 4 结 论

本文基于2014年夏季河北饶阳地区开展的综合观测试验,分析了饶阳气溶胶散射相函数的特征,提出拟合反演不对称因子的方法,并对不同污染情况下的不对称因子结果进行分析。主要结论如下:

1) 用改进的HG相函数近似能够较好地拟合河北饶阳实际观测的干气溶胶细粒子 $PM_{2.5}$ 的相函数,由此得到的前向( $15^\circ \sim 20^\circ$ )散射相函数值和后向散射比与通过角散射浊度仪直接测量得到的结果有很好的 consistency。

2) 饶阳地区635 nm,525 nm,450 nm 3个波段的不对称因子平均值分别为 $0.53 \pm 0.04$ , $0.57 \pm 0.05$ 和 $0.57 \pm 0.07$ 。

3) 观测期间有两次污染过程和两个清洁时段,污染情况下不对称因子、相函数( $10^\circ \sim 35^\circ$ )明显高于相对清洁时段。

#### 参 考 文 献

- [1] Coakley J A, Cess R D, Yurevich F B. The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: A parameterization for climate models. *J Atmos Sci*, 1982, 40(1): 116-138.
- [2] IPCC AR5. Clouds and Aerosols// Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [3] Liu P, Zhao C, Zhang Q, et al. Aircraft study of aerosol vertical distributions over Beijing and their optical properties. *Tellus B*, 2009, 61(5): 756-767.
- [4] 张养梅, 颜鹏, 杨东贞, 等. 临安大气气溶胶理化特性季节变化. *应用气象学报*, 2007, 18(5): 635-644.
- [5] 张玉香, 胡秀清, 刘玉洁, 等. 北京地区大气气溶胶光学特性监测研究. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 136-143.
- [6] 杨东贞, 颜鹏, 徐祥德. 北京风沙天气的气溶胶特征. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 185-194.
- [7] 安林昌, 孙俊英, 张养梅, 等. 天津武清地区单颗粒黑碳气溶胶特征观测分析. *应用气象学报*, 2011, 22(5): 577-583.
- [8] Yan P, Tang J, Huang J, et al. The measurement of aerosol optical properties at a rural site in Northern China. *Atmos Chem Phys*, 2008, 7(5): 2229-2242.
- [9] 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 257-265.
- [10] 毛节奏, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究. *气象学报*, 2005, 63(5): 622-635.
- [11] 毛节奏, 李成才. MODIS卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度及与地面光度计遥感的对比. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊 I): 127-135.
- [12] 徐敬, 丁国安, 颜鹏, 等. 北京地区 $PM_{2.5}$ 的成分特征及来源分析. *应用气象学报*, 2007, 18(5): 645-654.
- [13] Bian Y, Zhao C, Xu W, et al. Development and validation of a CCD-laser aerosol detective system for measuring the ambient aerosol phase function. *Atmos Meas Tech*, 2017: 1-14.
- [14] Benzvi S Y, Connolly B M, Matthews J A J, et al. Measurement of the aerosol phase function at the Pierre Auger Observatory. *Astropart Phys*, 2007, 28(3): 312-320.
- [15] Horvath H, Kasahara M, Tohno S, et al. Angular scattering of the Gobi Desert aerosol and its influence on radiative forcing. *J Aerosol Sci*, 2006, 37(10): 1287-1302.
- [16] Mourant J R, Boyer J, Hielscher A H, et al. Influence of the scattering phase function on light transport measurements in turbid media performed with small source-detector separations. *Opt Lett*, 1996, 21(7): 546-548.
- [17] McCartney E J, Jr F F H. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles: WILEY, 1976.
- [18] Andrews E, Sheridan P J, Fiebig M, et al. Comparison of methods for deriving aerosol asymmetry parameter. *J Geophys Res*, 2006, 111(D5): D05S4.
- [19] Fiebig M, Stein C, Schröder F, et al. Inversion of data containing information on the aerosol particle size distribution using multiple instruments. *J Aerosol Sci*, 2005, 36(11): 1353-1372.
- [20] Grimm H, Eatough D J. Aerosol measurement: The use of optical light scattering for the determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction. *J Air Waste Manage*, 2009, 59(1): 101-107.
- [21] Shen X J, Sun J Y, Zhang Y M, et al. First long-term study of particle number size distributions and new particle formation events of regional aerosol in the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2011, 10(10): 1565-1580.
- [22] 刘长盛, 刘文保. 大气辐射学, 南京: 南京大学出版社, 1990.
- [23] Henyey L G, Greenstein J L. Diffuse radiation in the galaxy. *Astrophys J*, 1940, 93(1): 70-83.
- [24] Kattawar G W. A three-parameter analytic phase function for multiple scattering calculations. *J Quant Spectrosc R A*, 1975, 15(9): 839-849.
- [25] Cornette W M, Shanks J G. Physically reasonable analytic expression for the single-scattering phase function. *Appl Op-*

- tics, 1992, 31(16):3152-3160.
- [26] Nakajima T, Tanaka M, Yamauchi T. Retrieval of the optical properties of aerosols from aureole and extinction data. *Appl Optics*, 1983, 22(22):2951-2959.
- [27] 毛节泰, 栾胜基. 大气散射相函数的计算. *大气科学*, 1985, 9(1):107-111.
- [28] Wiscombe W J, Grams G W. The backscattered fraction in two-stream approximations. *J Atmos Sci*, 1976, 33(12):2440-2451.
- [29] Hänel G. Single scattering albedo, asymmetry parameter, apparent refractive index, and apparent soot content of dry atmospheric particles. *Appl Optics*, 1988, 27(11):2287-2295.
- [30] Ran L, Deng Z, Xu X, et al. Vertical profiles of black carbon measured by a micro-aethalometer in summer in the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2016, 16(16):10441-10454.
- [31] Wang R, Xu X, Jia S, et al. Lower tropospheric distributions of O<sub>3</sub> and aerosol over Raoyang, a rural site in the North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 2016:1-29.
- [32] Müller T, Nowak A, Wiedensohler A, et al. Angular illumination and truncation of three different integrating nephelometers: Implications for empirical, size-based corrections. *Aerosol Sci Tech*, 2009, 43(6):581-586.
- [33] Fitzgerald J W. Angular truncation error of the integrating nephelometer in the fog droplet size range. *J Appl Meteorol*, 1977, 16(2):210-214.
- [34] Heintzenberg J, Wiedensohler A, Tuch T M, et al. Intercomparisons and aerosol calibrations of 12 commercial integrating nephelometers of three manufacturers. *J Atmos Ocean Tech*, 2005, 23(7):902-914.
- [35] 马楠, 周秀骥, 颜鹏, 等. 一种改进的 TSI3563 积分浊度误差校正方法. *应用气象学报*, 2015, 26(1):12-21.
- [36] Anderson T L, Ogren J A. Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer. *Aerosol Sci Tech*, 1998, 29(1):57-69.
- [37] Müller T, Laborde M, Kassell G, et al. Design and performance of a three-wavelength LED-based total scatter and backscatter integrating nephelometer. *Atmos Meas Tech*, 2010, 4(6):4835-4864.
- [38] Fiebig M, Ogren J A. Retrieval and climatology of the aerosol asymmetry parameter in the NOAA aerosol monitoring network. *J Geophys Res*, 2006, 111:D21204.
- [39] Ross J L, Hobbs P V, Holben B. Radiative characteristics of regional hazes dominated by smoke from biomass burning in Brazil: Closure tests and direct radiative forcing. *J Geophys Res*, 1998, 103(D24):31925-31941.
- [40] 韩永, 饶瑞中, 王英俭. 利用积分浊度计获取合肥地区大气气溶胶光学特性. 长江三角洲气候与环境研讨会, 2007.
- [41] 胡波, 张婕, 张武, 等. 应用积分浊度仪研究兰州城市冬季大气气溶胶. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(3):19-25.
- [42] Horvath H, Kasahara M, Tohno S, et al. Relationship between fraction of backscattered light and asymmetry parameter. *J Aerosol Sci*, 2015, 91(3):43-53.

## Observational Study on Aerosol Scattering Phase Function at Raoyang of Hebei, China

Zhang Linyi<sup>1)</sup> Yan Peng<sup>2)</sup> Mao Jietai<sup>3)</sup> Zhang Xiao<sup>1)</sup> Tian Ping<sup>4)</sup> Chang Hairu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (Chinese Academy Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Meteorological Observation Center, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

<sup>4)</sup> (Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

### Abstract

Aerosol radiative properties are key factors in the process of aerosol radiative forcing calculation. The scattering phase function and asymmetry factor facilitate the illustration of the direction of radiative transfer and the estimation of parameters in remote sensing.

In the early summer of 2014, aerosol radiative parameters are obtained at Raoyang Meteorology Administration (an agricultural district) with a latest three-wavelength polar nephelometers (Aurora 4000) developed by EcoTech, Australia. Compared with the previous model, the instrument is unique in that it can measure the volume scattering coefficient from  $\Theta$  through to  $170^\circ$  degrees and  $\Theta$  is  $10^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ$ . Based on the volume scattering coefficient, the scattering phase function can be computed with the traditional formula between them. What's more, one improved approach is proposed to calculate the asymmetry factor with the combination of scattering phase function and backscattering ratio. The backscattering ratio used can be calculated from the backscattering coefficient and total scattering coefficient as defined. Aerosol radiative properties of  $PM_{2.5}$  including calculated scattering phase function and the fitted asymmetry factor are presented during the observation between 16 June and 18 August in 2014. The result suggests that the improved HG aerosol particle phase function can fit the aerosol scattering phase function observed at Raoyang Meteorology Administration of Hebei well. Observed results of forward scattering phase function ( $15^\circ - 20^\circ$ ) and the backscattering ratio are all in good agreement with the numerical results. The average asymmetry factors at the wavelength of 635 nm, 525 nm and 450 nm are 0.53, 0.57 and 0.57, respectively, with no significant difference possibly due to the size distribution of aerosol. The value of it at 525 nm are accordant with analysis of previous experiments, which indicate the asymmetry factor of dry aerosol are in the range of 0.55 and 0.63 (550 nm). Two examples of different pollution status (dirty period and clean one) are chosen, depending on the scattering coefficient, and the radiative properties are different. During two dirty periods, values of asymmetry factor are between 0.55 and 0.63, which is larger than those in clean periods. For asymmetry factor, mean values at 635 nm, 525 nm and 450 nm wavelength are in the range of 0.51–0.53, 0.54, 0.54, respectively. Such results provide more details and supports for further study of radiative effects of aerosol.

**Key words:** aerosol; radiative property; asymmetry factor; scattering phase function