

外混合气溶胶粒子光散射的等效性

饶瑞中

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学室,合肥 230031)

摘 要 以两种典型的气溶胶粒子组成的单分散和多分散外混合气溶胶粒子系统的光散射的各效率因子、各散射截面和散射相函数分析了以等效折射率描述由具有不同折射率的各种粒子组成的混合气溶胶粒子系统的适用性。结果表明,对单分散系统,在不同的混合比下对于许多尺度参数吸收效率因子和散射相函数的等效性很差;对多分散系统,在不同的混合比下等效性较稳但各散射光学量的余差很大。因而对多分散系外混合气溶胶粒子系统如使用等效折射率,则由光散射技术测定的谱分布与实际谱分布有很大的出入。故以光散射技术研究气溶胶时,应同时采用其他手段获取粒子系统的混合信息。

关键词 光散射, 气溶胶粒子, 折射率。

1 引 言

大气气溶胶在光传播和地球的辐射平衡过程中起着十分重要的作用^[1,2],而正确评估这种作用必须了解其从紫外至红外波段的折射率。由于大气气溶胶具有各种不同的成分,而且其主要成分因地而异,因而没有固定的折射率值,导致了許多测量气溶胶折射率的方法的产生,其中包括光散射技术^[3~7]。一般使用库反演方法处理用光散射技术获得的散射光学量,即选择一批折射率值,其中使散射光学量具有最小反演余差的那个值即被选为等效值^[4]。以前关于折射率对气溶胶谱分布影响的分析都是针对整个多分散系统,而且没有考虑粒子折射率的非唯一性,由于气溶胶是由具有不同折射率的各种粒子组成的混合体而且粒子的谱分布也对散射结果起作用,这样就混淆了粒子的折射率和谱分布的影响。上述方法获得的等效折射率和粒子谱分布显然具有不稳定性。为解决等效折射率的适用性及其可信赖程度的问题,必须把折射率与谱分布的作用分开研究,本文首先探讨单分散气溶胶粒子系统,然后再研究多分散气溶胶粒子系统。

本文只研究外混合的情况,选取两种粒子^[8](一种为典型的海盐粒子,0.5 μm 处的折射率为 $1.50 - 1.0 \times 10^{-3}i$;另一种为典型的烟羽粒子,0.5 μm 处的折射率为 $1.75 - 0.45i$)组成的单分散和多分散外混合气溶胶粒子系统作为研究对象。

2 混合粒子系统散射光学量的单粒子等效分析

球形粒子的光散射过程可用米氏理论来描述^[9,10],在此理论中,尺度参数 $x(2\pi \times \text{粒子半}$

径 / 光波长) 和折射率 $n - k_2$ [以下以 (n, k) 来表示] 是两个基本参量。与散射过程有关的光学量包括消光、散射和吸收效率因子 (或截面) 以及散射相函数。用光散射技术确定粒子的折射率就是基于对上述散射光学量的测量。对一个具有尺度参数 r 和折射率 (n, k) 的粒子, 消光、散射和吸收效率以及四个散射相函数分别用下列符号表示^[9]: $Q_{\text{ext}}, Q_{\text{scat}}, Q_{\text{abs}}, M_1, M_2, S_{21}$ 和 D_{21} 。对具有同一尺度参数 r 和不同折射率 (n_1, k_1) 和 (n_2, k_2) 的两粒子, 相应的散射光学量分别为 $Q_{\text{ext}}^1, Q_{\text{scat}}^1, Q_{\text{abs}}^1, M_1^1, M_2^1, S_{21}^1$ 和 D_{21}^1 以及 $Q_{\text{ext}}^2, Q_{\text{scat}}^2, Q_{\text{abs}}^2, M_1^2, M_2^2, S_{21}^2$ 和 D_{21}^2 。对混合比分别为 $1 - f$ 和 f 的粒子 (n_1, k_1) 和粒子 (n_2, k_2) 的外混合体, 相应的散射光学量 $Q_{\text{ext}}^m, Q_{\text{scat}}^m, Q_{\text{abs}}^m, M_1^m, M_2^m, S_{21}^m$ 和 D_{21}^m 可由下列公式得出:

$$Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^m = Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^1 \cdot (1 - f) + Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^2 \cdot f \quad (1)$$

$$P_i^m = P_i^1 \cdot (1 - f) + P_i^2 \cdot f \quad (2)$$

这里 $P_i^1 (i = 1, 2, 3, \text{和 } 4)$ 分别代表 M_1^1, M_2^1, S_{21}^1 和 D_{21}^1 , $P_i^2 (i = 1, 2, 3, \text{和 } 4)$ 分别代表 M_1^2, M_2^2, S_{21}^2 和 D_{21}^2 , $P_i^m (i = 1, 2, 3, \text{和 } 4)$ 分别代表 M_1^m, M_2^m, S_{21}^m 和 D_{21}^m 。

粒子 (n_1, k_1) 和粒子 (n_2, k_2) 的外混合体的散射光学量与粒子 (n, k) 的散射光学量的相对差别定义如下:

$$eQ_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}} = (Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^m - Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^n) / Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^n \quad (3)$$

$$eP = \sqrt{(4N)^{-1} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^N \{ [P_i(\theta_j) - P_i^m(\theta_j)]^2 / P_i^m(\theta_j) \}^2} \quad (4)$$

这里 $P_i (i = 1, 2, 3, \text{和 } 4)$ 分别代表 M_1, M_2, S_{21} 和 D_{21} , $\theta_j (j = 1, 2, 3, \dots, N)$ 代表散射角。使下式所表达的差别具有最小值的粒子的折射率 (n, k) 被选取为粒子 (n_1, k_1) 和粒子 (n_2, k_2) 的外混合体的等效折射率:

$$e = \sqrt{(eP^2 + eQ_{\text{ext}}^2) / 2} \quad (5)$$

对多分散系统的粒子, 使用消光、散射和吸收截面和散射相函数作为散射光学量。如果以 $f_1(r)$ 和 $f_2(r)$ 表示具有折射率 (n_1, k_1) 和 (n_2, k_2) 的两个多分散系统粒子的尺度谱分布函数, 即单位体积和单位半径间隔的粒子数, 则在两个多分散系统的混合体中, 多分散系统 (n_2, k_2) 的混合比为:

$$f = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} f_2(r) dr / \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} [f_1(r) + f_2(r)] dr \quad (6)$$

两个多分散系统的混合体的消光、散射和吸收截面 $C_{\text{ext}}^m, C_{\text{scat}}^m, C_{\text{abs}}^m$ 可由下式得到:

$$C_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^m = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} [Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^1 \cdot f_1(r) + Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}}^2 \cdot f_2(r)] \cdot \pi r^2 dr \quad (7)$$

同样, 两个多分散系统的混合体的散射相函数可由下式得到:

$$P_i^m = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} [P_i^1 \cdot f_1(r) + P_i^2 \cdot f_2(r)] \cdot dr \quad (8)$$

具有等效折射率 (n, k) 的上述两个多分散系统的混合体的消光、散射和吸收截面和相函数可由下列公式得到:

$$C_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}} = \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} [f_1(r) + f_2(r)] Q_{\text{ext}, \text{scat}, \text{abs}} \cdot \pi r^2 dr \quad (9)$$

$$P_i^p = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [f_1(r) + f_2(r)] \cdot P_i \cdot dr \quad (10)$$

多分散系统的混合体的散射光学量与具有等效折射率 (n, k) 的同一系统的散射光学量的相对差别定义同单分散系统相似，只需把各散射效率换成对应的各散射截面即可。

3 数值计算

两种粒子在 $0.5 \mu\text{m}$ 的折射率 (n_1, k_1) 和 (n_2, k_2) 分别取为 $(1.50, 1.0 \times 10^{-8})$ 和 $(1.75, 0.45)$ 。对单分散系统和多分散系统根据不同的混合比分为下列四种情况进行数值分析：

- 1) $f = 0.01$ ，即粒子 (n_1, k_1) 和 (n_2, k_2) 的混合比分别为 99% 和 1%；
- 2) $f = 0.1$ ，即粒子 (n_1, k_1) 和 (n_2, k_2) 的混合比分别为 90% 和 10%；
- 3) $f = 0.5$ ，即粒子 (n_1, k_1) 和 (n_2, k_2) 的混合比各为 50%；
- 4) $f = 0.9$ ，即粒子 (n_1, k_1) 和 (n_2, k_2) 的混合比分别为 10% 和 90%。

折射率实部的库由从 1.25 至 2.00 (步长为 0.05) 的 16 个数据组成，而折射率虚部的库由从 1.0×10^{-8} 至 1.0 (等对数间隔) 的 61 个数据组成。对单分散系统，尺度参数取从 0.1 至 100 的 31 个等对数间隔点。对多分散系统，两种粒子的尺度谱分布函数都取相同的荣格 (Junge) 谱，粒子半径范围为 0.01 至 $10 \mu\text{m}$ ，光波长 $0.5 \mu\text{m}$ 。对 0 至 180 度的 181 散射角计算四个散射相函数。由于米氏散射的振荡结构散射相函数在特定的尺度参数下难以进行合适的比较，所以对尺度参数为 x 的散射光学量在以 x 为中心的 $0.1x$ 的范围内的 101 个点进行了微尺度平均^[1]。

对单分散粒子系统和多分散粒子系统的混合体的消光、散射和吸收效率 (或截面) 以及相函数同具有等效折射率的相应系统的各光学参量进行了比较。重点放在吸收效率 (或截面) 和散射相函数上，因为前者 (相应于折射率虚部) 在实际测量中非常难以确定，而后的测量则被用于反演粒子的折射率和尺度谱分布。

4 单分散粒子系统的结果

对应于四种混合比的情况，主要的结果分别列于表 1 至表 4。在表中列出了在各个尺度参数下等效的折射率实部和虚部、吸收效率、消光效率的相对差别和散射相函数的均方根相对差别。

Table 1. Comparison of optical quantities between the selected equivalent particle and the mixture of two aerosol particles with $(1.50, 1.0 \times 10^{-8})$ and $(1.75, -0.45)$, the mixture ratios are 99% and 1% respectively

z	n	k	$eQ_{\text{ext}}(\%)$	$eQ_{\text{ext}}(\%)$	$eP(\%)$
0.25	1.50	3.98(-3)	7.8	4.7	39.3
0.32	1.50	5.01(-3)	34.8	16.9	39.2
0.40	1.45	6.31(-3)	73.0	13.6	43.4
0.50	1.40	1.00(-2)	176.5	12.2	36.1
0.63	1.45	7.94(-3)	112.2	-1.8	18.5
0.79	1.50	1.00(-2)	165.7	11.1	8.4
1.00	1.50	7.94(-3)	122.4	3.8	5.8

x	n	k	$\varepsilon Q_{\text{abs}}(\%)$	$\varepsilon Q_{\text{ext}}(\%)$	$\varepsilon P(\%)$
1.26	1.50	7.94(-3)	150.6	2.4	5.1
1.58	1.50	3.98(-3)	74.8	0.1	14.2
2.00	1.50	1.00(-6)	-100.0	-0.6	1.3
2.51	1.50	3.16(-4)	-75.1	-0.1	1.2
3.16	1.50	1.00(-3)	1.8	0.1	1.6
3.98	1.50	1.00(-6)	-100.0	0.3	3.9
5.01	1.50	1.26(-4)	-73.8	0.3	2.1
6.31	1.50	1.00(-6)	-100.0	-0.0	14.7
7.94	1.50	1.00(-6)	-100.0	-0.3	3.7
10.00	1.50	1.00(-6)	-100.0	0.2	3.4
12.59	1.50	1.00(-6)	-100.0	0.0	5.3
15.85	1.50	1.58(-4)	33.1	-0.0	4.5
19.95	1.50	1.26(-4)	28.5	-0.0	14.0
25.12	1.50	1.26(-5)	-79.8	-0.0	5.6
31.62	1.50	3.98(-6)	-93.71	0.0	11.4
39.81	1.50	6.31(-4)	972.1	0.1	18.0
50.12	1.50	1.00(-6)	-100.0	0.0	4.2
63.10	1.50	1.00(-6)	-100.0	0.0	120.1
79.43	1.50	1.00(-6)	-100.0	0.0	29.9
100.00	1.50	3.98(-6)	-81.4	0.0	3.2

Table 2. Comparison of optical quantities between the selected equivalent particle and the mixture of two aerosol particles with refractive indices $(1.50, -1.0 \times 10^{-6})$ and $(1.75, -0.45)$, the mixture ratios are 90% and 10% respectively

x	n	k	$\varepsilon Q_{\text{abs}}(\%)$	$\varepsilon Q_{\text{ext}}(\%)$	$\varepsilon P(\%)$
0.50	1.55	3.98(-2)	2.1	2.0	36.4
0.63	1.55	5.01(-2)	28.3	17.0	35.2
0.79	1.50	6.31(-2)	64.9	19.5	36.9
1.00	1.55	7.94(-1)	113.9	36.2	40.2
1.26	1.30	3.16(-4)	-9.6	-55.9	94.9
1.58	1.50	3.98(-2)	63.0	-0.1	39.0
2.00	1.50	1.00(-6)	-100.0	-5.8	36.0
2.51	1.50	2.51(-3)	-80.4	-1.3	18.2
3.16	1.45	2.00(-2)	74.0	-11.3	47.8
3.98	1.50	6.31(-3)	-14.2	2.1	19.7
5.01	1.50	1.26(-3)	-74.1	3.1	14.5
6.31	1.50	1.00(-4)	-97.3	-0.2	24.1
7.94	1.50	1.00(-6)	-100.0	-3.3	46.1
10.00	1.50	1.00(-6)	-100.0	1.5	76.1
12.59	1.50	1.00(-6)	-100.0	-0.0	126.2
15.85	1.50	6.31(-3)	256.6	-0.3	39.2
19.95	1.50	1.00(-6)	-100.0	-1.0	57.7
25.12	1.50	1.00(-6)	-100.0	0.0	45.9
31.62	1.50	1.00(-6)	-100.0	-0.1	35.0

r	n	k	$eQ_{\text{abs}}(\%)$	$eQ_{\text{ext}}(\%)$	$eP(\%)$
39.81	1.50	2.51(-3)	251.4	0.2	75.0
50.12	1.50	1.58(-4)	-64.1	0.0	61.6
63.10	1.50	3.98(-4)	5.2	0.0	55.2
79.43	1.60	2.51(-3)	473.3	0.8	106.6
100.00	1.50	1.00(-6)	-100.0	-0.0	35.3

Table 3. Comparison of optical quantities between the selected equivalent particle and the mixture of two aerosol particles with refractive indices $(1.50, -1.0 \times 10^{-8})$ and $(1.75, -0.45)$, the mixture ratios are 50% respectively

r	n	k	$eQ_{\text{abs}}(\%)$	$eQ_{\text{ext}}(\%)$	$eP(\%)$
0.25	1.70	2.00(-1)	-6.6	-6.5	19.5
0.32	1.70	2.00(-1)	17.2	16.8	11.9
0.40	1.70	2.00(-1)	17.0	16.4	12.3
0.50	1.65	2.00(-1)	20.2	17.6	16.4
0.63	1.70	2.51(-1)	17.5	15.9	13.9
0.79	1.65	2.51(-1)	20.6	14.0	17.4
1.00	1.65	3.16(-1)	23.8	12.4	18.2
1.26	1.60	2.51(-1)	29.9	9.4	31.6
1.58	1.60	3.16(-1)	67.0	20.5	47.8
2.00	1.75	2.51(-1)	67.9	27.9	93.3
2.51	1.55	2.51(-1)	70.0	-1.4	115.0
3.16	1.40	3.98(-1)	85.0	-22.8	93.6
3.98	1.25	1.58(-1)	60.7	-38.5	231.0
5.01	1.50	2.00(-2)	-33.1	13.7	76.1
6.31	1.50	1.00(-1)	92.5	3.9	137.1
7.94	1.45	1.00(-1)	104.7	11.4	145.7
10.00	1.50	1.00(-1)	111.6	-5.4	212.3
12.59	1.40	5.01(-2)	98.8	5.4	195.5
15.85	1.50	2.51(-2)	66.0	-0.0	97.0
19.95	1.35	6.31(-2)	118.2	3.9	87.7
25.12	1.25	6.31(-2)	124.1	0.1	138.8
31.62	1.35	1.58(-2)	82.9	1.5	92.7
39.81	1.25	7.94(-2)	123.8	0.8	98.1
50.12	1.75	1.00(-2)	76.8	-0.1	80.5
63.10	1.55	7.94(-3)	80.1	0.1	85.9
79.43	1.40	5.01(-3)	66.4	0.3	85.0
100.00	1.25	6.31(-2)	123.8	-0.1	116.7

Table 4. Comparison of optical quantities between the selected equivalent particle and the mixture of two aerosol particles with refractive indices $(1.50, -1.0 \times 10^{-8})$ and $(1.75, -0.45)$, the mixture ratios are 10% and 90% respectively

r	n	k	$eQ_{\text{abs}}(\%)$	$eQ_{\text{ext}}(\%)$	$eP(\%)$
0.50	1.75	3.98(-1)	-1.2	1.0	4.4
0.63	1.75	3.98(-1)	-0.9	-0.6	4.3

r	n	k	$eQ_{\text{abs}}(\%)$	$eQ_{\text{ext}}(\%)$	$eP(\%)$
0.79	1.75	3.98(-1)	-0.2	0.2	5.2
1.00	1.70	2.00(-1)	-43.4	-33.9	120.8
1.26	1.70	3.98(-1)	-2.1	-1.1	10.6
1.58	1.65	3.98(-1)	3.9	-3.9	19.6
2.00	1.80	3.16(-1)	4.0	11.1	65.5
2.51	1.70	3.98(-1)	8.9	0.9	71.7
3.16	1.70	2.51(-1)	7.3	8.0	125.5
3.98	1.50	3.16(-1)	8.2	-4.0	89.1
5.01	1.25	2.51(-1)	1.8	-16.0	510.4
6.31	1.25	6.31(-2)	-24.0	11.3	437.5
7.94	1.35	3.98(-1)	12.3	-1.1	141.5
10.00	1.60	1.26(-1)	16.5	0.2	171.9
12.59	1.25	2.00(-1)	18.1	-2.7	95.3
15.85	1.35	2.51(-1)	18.2	-1.9	78.4
19.95	1.45	3.16(-1)	16.3	0.1	75.1
25.12	1.40	2.51(-1)	18.2	-0.8	74.6
31.62	1.30	2.51(-1)	19.2	-1.1	81.7
39.81	1.40	3.16(-1)	17.1	-0.4	64.4
50.12	1.35	2.51(-1)	19.1	-0.6	69.5
63.10	1.40	2.51(-1)	18.6	-0.4	68.7
79.43	1.30	3.98(-1)	16.2	-0.5	57.8
100.00	1.30	3.98(-1)	16.4	-0.4	58.2

4.1 等效的折射率实部

因为两种粒子的折射率实部不同,一般认为等效的折射率实部应位于该二值之间,实际运算结果表明,此观点不成立。对 $f = 0.01$ 和 $f = 0.1$ 两种情况,等效的折射率实部大部分都与第一种粒子的折射率实部相同,即为 1.50,这显然是由于第一种粒子在混合体中占据主要份额所致。虽然有一些值位于两种粒子的折射率实部 1.50 和 1.75 之间,但也有另外一些值在这两者之外。随着第二种粒子在混合体中所占份额的增加,对 $f = 0.5$ 和 $f = 0.9$ 两种情况,可发现一种不同的倾向:当尺度参数小于 1 时,等效的折射率实部趋于第二种粒子的折射率实部即 1.75,但当尺度参数大于 1 时,等效的折射率实部一般随着尺度参数的增大而减少并伴有一些起伏,而且大部分都低于第一种粒子的折射率实部即 1.50。在各种混合比的情况下一个明显的特征是等效的折射率实部都不高于第二种粒子的折射率实部即 1.75。

一般认为折射率的实部比虚部较容易而准确地测定。上述结果说明如果用光散射手段研究作为混合体的粒子系统,获得的等效折射率实部也具有很大的不确定性,而且在不知道粒子系统的混合特征时,从等效折射率实部也无从估计真实的折射率实部。

4.2 等效的折射率虚部

由于两种粒子的折射率虚部相差很大,达八个量级,所以选择了一个很大的延伸达六个量级的库,每个量级上按等对数间隔取 10 个值,这个库远比文献中所报导的同类库大且密集。在各种混合比的情况下,对于小尺度参数(一般小于 1.0),等效的折射率虚部几乎与尺度参数无关,对大尺度参数等效的折射率虚部随尺度参数的变化有明显的起伏。等效的折射率虚部一般随第二种粒子在混合体中所占份额的增加而增大。即使第二种粒子在混合体中所

占份额非常小, 如第一种情况 ($f = 0.01$), 等效的折射率虚部一般也都远大于第一种粒子的折射率虚部。

4.3 消光效率

上述等效的折射率实部和虚部是根据最小的 ϵ 来确定的。在计算 ϵ 时从消光、散射和吸收效率中只选择消光效率, 是因为在实际的测量中只有消光效率易于准确测定。在各种混合比的情况下, 具有等效的折射率实部和虚部的粒子的消光效率同混合体粒子的消光效率的差别是不大的, 对大多数尺度参数, 这些差别一般小于 5%。但对某些尺度参数, 这些差别也会很大。对上述四种情况, 最大的差别分别为 16.9%、-55.9%、-38.5% 和 -33.9%。对大多数尺度参数, 消光效率的差别不大说明: 如果仅考虑粒子的消光特性, 一般不难找到等效的粒子。相应的吸收效率和散射相函数的很大差别说明, 消光测量确定的等效折射率不适于用来分析其他光学量。

4.4 散射相函数

普遍认为可从散射相函数中获得远多于从各散射效率中所能获得的信息量, 因而利用光散射测量技术推断气溶胶的粒子谱分布和折射率这一方法的应用日益广泛。在这些测量中, 在一些散射方向上四个散射相函数中的几个或全部量被用来推断气溶胶的粒子谱分布和折射率^[12, 4, 6]。

完全不同于消光效率, 具有等效的折射率实部和虚部的粒子的散射相函数同混合体粒子的散射相函数的平均差别一般是很大的。根据这种差别的行为特征, 可按粒子的尺度参数分为两个区域: 当尺度参数小于 1.0 时, 这种差别几乎与尺度参数无关并且随第二种粒子在混合体中所占份额的增加而降低。当尺度参数大于 1.0 时, 这种差别一般很大且随尺度参数的改变而起伏, 但与第二种粒子在混合体中所占份额的改变没有明显的关系。

由于分析的散射相函数的差别是各散射角上的平均值, 而散射相函数的实际测量是在各散射角上分别进行的, 应分析一下散射相函数的差别与散射角的关系。图 1 的 (a)、(b)、(c) 和 (d) 分别绘出了散射相函数 M_1 , M_2 , S_{21} 和 D_{21} 的差别在第二种情况下 ($f = 0.1$) 当尺度参数分别为 0.2、2 和 20 时随散射角的变化关系。

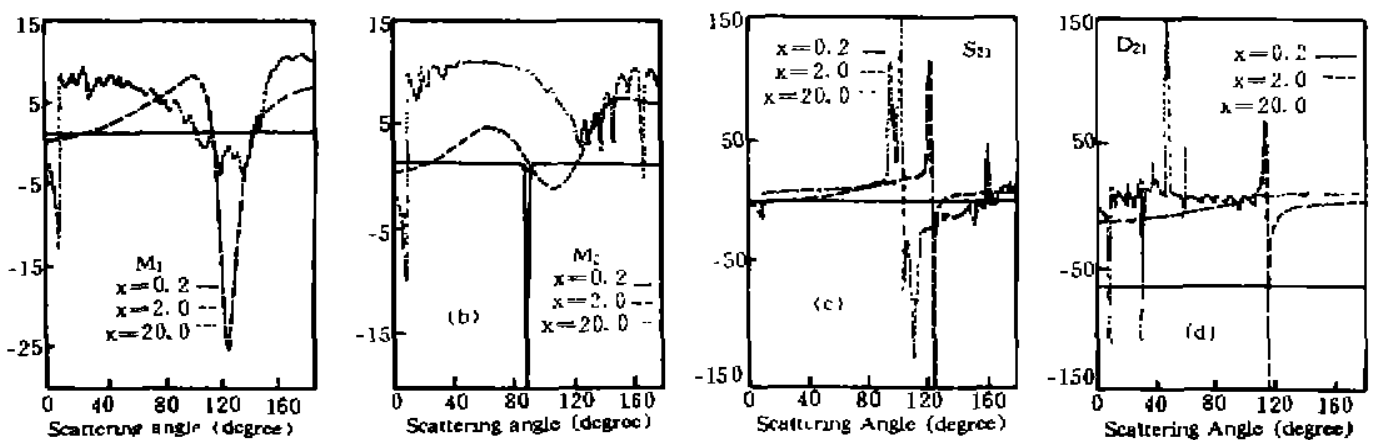


Fig. 1 Relative differences (%) of phase quantities M_1 , M_2 , S_{21} , and D_{21} for three size parameters 0.2, 2.0, and 20.0 at the mixture ratio $f = 0.1$; a) M_1 , b) M_2 , c) S_{21} , and d) D_{21}

从图 1 的 (a) 和 (b) 可看出 M_1 的差别和 M_2 的差别与散射角的变化关系具有大致相同的趋势: 它们随尺度参数的增加而增大并且起伏加剧, 这同米散射的角散射特征相符合。从图 1 的 (c) 和 (d) 可看出 S_{21} 的差别和 D_{21} 的差别与散射角的变化关系也具有大致相同的趋势: 它们

随尺度参数的增加起伏加剧并伴有一些尖峰,而当尺度参数很小时 D_{21} 的差别远大于 S_{21} 的差别。对这四种散射相函数总的说来, M_1 的差别和 M_2 的差别比 S_{21} 的差别和 D_{21} 的差别小而且较为稳定。这意味着对 S_{21} 和 D_{21} 而言,它们比 M_1 和 M_2 更难找到合适的等效粒子。

4.5 吸收效率

由于吸收效率的准确测定直接关系到折射率虚部的确定^[13],因此对于折射率虚部而言,等效粒子的吸收效率与粒子混合体的吸收效率的差别就成为判断粒子混合体的等效性的重要判据。当第二种粒子在混合体中所占份额不大于第一种粒子在混合体中所占份额时(即上述第一、二和三种情况),吸收效率的差别具有下列一般特征:当尺度参数小于 1.0 时,这种差别较小;而当尺度参数大于 1.0 时,这种差别一般很大。另一方面当第二种粒子在混合体中所占份额远大于第一种粒子在混合体中所占份额时(即第四种情况),吸收效率的差别一般较小。而在实际大气气溶胶中,第二种粒子在混合体中所占份额一般远小于第一种粒子在混合体中所占份额,从吸收效率的角度来看,难于找到合适的等效粒子。

5 多分散粒子系统的结果

在上节中探讨了单分散粒子系统,结果表明从吸收效率和散射相函数的角度来看都难于找到合适的等效粒子。但由于实际大气气溶胶是多分散粒子系统,尺度谱分布可能会影响这种等效性。可通过消光截面、吸收截面和散射相函数的差别来分析这个问题。

表 5 列出了在不同混合比的情况下等效的折射率实部和虚部、吸收效率、消光效率的相对差别和相函数的均方根相对差别。与单分散粒子系统不同的是,多分散粒子系统的等效性较为稳定。在各种混合比的情况下,等效的折射率实部大部分都与第一种粒子的折射率实部即 1.50 相同或接近。而等效的折射率虚部随第二种粒子在混合体中所占份额的增加而增大。吸收效率的差别在各种混合比的情况下都在 10% 至 100% 之间。当第二种粒子在混合体中所占的份额非常小时,散射相函数的差别低于 10%;而当第二种粒子在混合体中所占的份额大于 10% 时,散射相函数的差别位于 10% 至 100% 之间。

Table 5. Comparison of optical quantities between the polydispersion with equivalent refractive index and the mixture of two Junge-type aerosol polydispersions of refractive indices (1.50, -1.0×10^{-3}) and (1.75, -0.45)

f	n	k	$\epsilon C_{\text{ext}}(\%)$	$\epsilon C_{\text{abs}}(\%)$	$\epsilon P(\%)$
0.01	1.50	7.94(-4)	27.6	-0.4	7.6
0.10	1.50	1.58(-2)	66.5	-3.3	45.9
0.50	1.55	1.26(-1)	21.1	-6.9	89.8
0.90	1.50	2.51(-1)	-11.9	-17.7	50.1

图 2 的(a)、(b)、(c)和(d)分别绘出了散射相函数 M_1 、 M_2 、 S_{21} 和 D_{21} 的差别在上述四种混合比情况下随散射角的变化关系。 M_1 的差别和 M_2 的差别与散射角的变化关系同单分散粒子系统的情形显著不同,这里不存在起伏,它们随散射角的增加而稳步增大。后向散射(散射角在 90 至 180 度之间)的情况下这些差别远大于前向散射(散射角在 0 至 90 度之间)情况下的差别。这在实际应用中非常重要,特别是在利用天空散射光时,一般难于获得后向散射的数据。因而利用此类测量方法推断的等效折射率不适于描述粒子的角散射特性,特别是在后向散射部分。 S_{21} 的差别和 D_{21} 的差别与散射角的变化关系则同单分散粒子系统的情形大致相

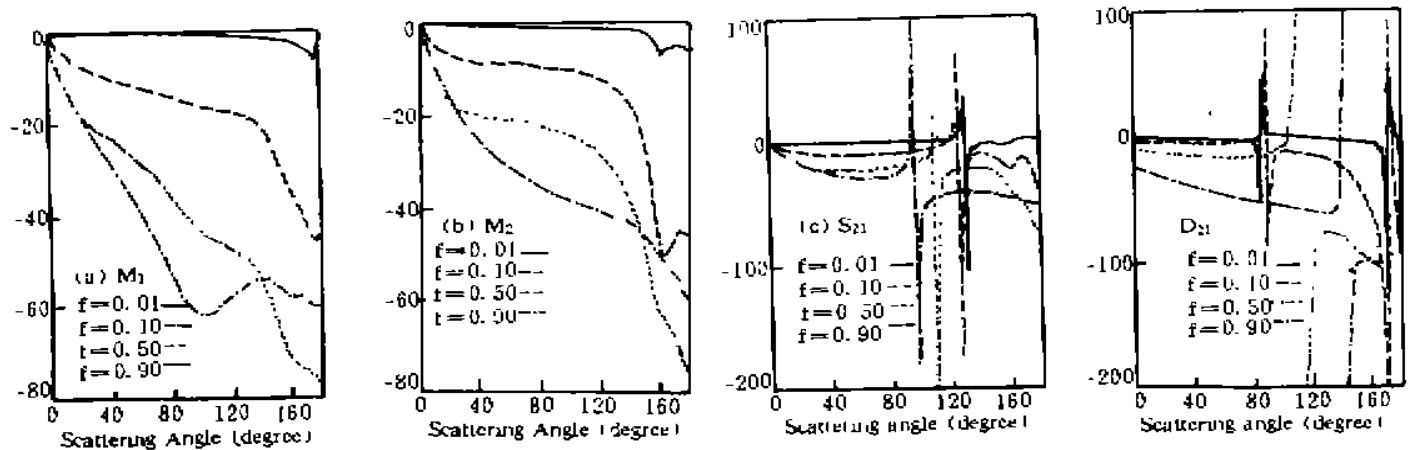


Fig. 2 Relative differences (%) of phase quantities M_1 , M_2 , S_{21} , and D_{21} for the polydispersions at four mixture ratios 0.01, 0.10, 0.50, and 0.90; a) M_1 , b) M_2 , c) S_{21} , and d) D_{21}

同。总的说来这四种散射相函数，它们的差别随第二种粒子在混合体中所占份额的增加而增大。

6 结 论

利用光散射技术研究气溶胶的谱分布和折射率，一般使用一个等效的折射率来描述由具有不同折射率的各种粒子组成的气溶胶粒子系统。为研究此种等效性的适用性，分析了由两种粒子（一种为典型的海盐粒子，折射率为 $1.50 - 1.0 \times 10^{-8}$ ，另一种为典型的烟羽粒子，折射率为 $1.75 - 0.45$ ）组成的单分散和多分散外混合气溶胶粒子系统的光散射的各效率因子、各散射截面和散射相函数。结果表明，对单分散粒子系统，具有等效的折射率的粒子的散射光学量同混合体粒子的散射光学量的差别随粒子的尺度参数的变化而变化，等效性一般很差。对多分散粒子系统，当某种粒子在混合体中所占的份额非常小时，等效性较好，其他情况下等效性一般很差。即使等效性较好的情况，也是粒子的谱分布造成的。由于大部分尺度参数的单分散粒子系统等效性很差，而根据此等效折射率反演的谱分布势必为扭曲的谱分布。因此可以推论，对外混合气溶胶粒子系统的各种情况，以等效的折射率所推断的粒子的尺度谱分布同实际谱分布应有很大的差别。许多研究结果表明，即使对只含同一种折射率的气溶胶粒子系统，用不正确的折射率反演气溶胶粒子谱，所获得的结果同实际结果也有很大的差别^[14]。因而对含有不同折射率成分的混合气溶胶粒子系统，这种差别应更为显著。所以在应用光散射技术研究气溶胶粒子以及其他粒子系统时，应同时利用其它手段分析粒子的混合特性；测量数据的反演方法也应相应改进，即反演方程的核函数应考虑粒子的不同来源而具有多种折射率。

参 考 文 献

- [1] B. E. 祖耶夫, M. B. 卡巴诺夫, 光信号在地球大气中的传输, 北京, 科学出版社, 1987: 54~107
- [2] P. V. Hobbs, *Aerosol-cloud-climate interactions*, Academic Press, New York, 1993: 29~41
- [3] M. Z. Hansen, W. H. Evans, Polar nephelometer for atmospheric particulate studies. *Appl. Opt.*, 1980, 19 (19): 3389~3395
- [4] M. Tanaka, T. Nakajima, T. Takamura, Simultaneous determination of complex refractive index and size distribution of airborne and water-suspended particles from light scattering measurements. *J. Meteor. Soc. Japan*,

- 1982, 60(6): 1259~1272
- [5] J. Qiu, X. Zhou, J. Sun *et al.*, Simultaneous determination of the aerosol size distribution, refractive index and surface albedo from radiance data. *Proc. Beijing International Radiation Symposium*, 北京, 1986: 550~556
- [6] 赵凤生, 通过测量散射光的 Stokes 参量同时反演气溶胶折射指数和谱分布的一种方法. 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士论文, 合肥, 1989
- [7] Göttfried Hanel, Optical properties of atmospheric particles: complete parameter sets obtained through polar photometry and an improved inversion technique. *Appl. Opt.*, 1994, 33(30): 7187~7199
- [8] E. P. Shettle, R. W. Fenn, Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties. AFGL-TR-79-0214, 1979: 18
- [9] H. C. van de Hulst, *Light scattering by small particles*, John Wiley & Sons, New York, 1957: 124~130
- [10] W. Wiscombe, Improved Mie scattering algorithms. *Appl. Opt.*, 1980, 19(9): 1505~1509
- [11] W. J. Wiscombe, A. Mugnai, Scattering from nonspherical Chebyshev particles. 2: Means of angular scattering patterns. *Appl. Opt.*, 1988, 27(12): 2405~2421
- [12] M. Z. Hansen, Atmospheric particulate analysis using angular light scattering. *Appl. Opt.*, 1980, 19(20): 3441~3447
- [13] H. Horvath, Atmospheric light absorption—a review. *Atmos. Environ.*, 1993, 27A(3): 293~317
- [14] 胡欢陵, 赵凤生, 龚知本, 折射指数对光散射粒子计数器测量精度的影响. *科学通报*, 1987, 32(8): 631~634

Equivalence of Light Scattering by External Mixture of Atmospheric Aerosol Particles

Rao Ruizhong

(Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 22 July 1995; revised 25 September 1995)

Abstract The validity of the equivalent refractive index for describing the external mixture of atmospheric aerosol particles was analyzed by scattering efficiencies, cross sections, and phase functions of monodispersions and polydispersions of the external mixture of two typical aerosol particles with their complex refractive indices of very high and very low imaginary parts. Results show that for monodispersions, the equivalence for the absorption efficiency and phase functions is poor; for polydispersions, the equivalence is stable but with quite large residuals. The retrieved size distribution will have a large bias if the equivalent refractive index is employed in light scattering techniques. It was recommended to use light scattering techniques simultaneously with other techniques to monitor the mixture property of aerosol particles.

Key words light scattering, aerosols, refractive index.