

研究简报

气溶胶粒子谱的观测分析

朱文琴

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文对我国北京附近三个地方的气溶胶粒子浓度的观测资料进行了分析研究,并分别用 Junge 分布和 Deirmendjian 分布分段进行拟合,这样拟合精度较高且能反映不同半径范围内气溶胶粒子的分布特征。

一、引 言

气溶胶是大气的一个组成部分,它在大气科学的许多分支学科中,如云物理学、大气光学、大气辐射、大气遥感、大气化学及大气污染等学科中,都占有重要地位。尤其近年来卫星遥感的发展,对气溶胶的光学性质极为关注,而平流层气溶胶的光学性质和粒子谱分布,对气候的增温和冷却也有一定影响^[1]。

气溶胶尺度谱是气溶胶的重要性质之一,我国这方面的实测资料还很少,本文着重叙述我国北京附近地区气溶胶谱分布的一些实测结果及其特征,并给出常用的 Junge 分布和 Deirmendjian 分布进行分段拟合的结果。

二、观 测 结 果

我们利用建筑科学院空调研究所制造的 J_{10} 型光学粒子计数器进行大气气溶胶采样。该仪器可测得大于等于 0.3μ 直径以上的粒子总数,并进行分档显示,仪器共分 15 档,即对粒径大于等于 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10μ 的各档进行计数显示。我们于 1980 年 3 月和 7 月份分别在河北省中国科学院天文台兴隆观测站 ($117^{\circ}30'E, 40^{\circ}23'N$) 和北京气象铁塔 ($116^{\circ}22'E, 39^{\circ}58'N$) 两地进行了每隔一小时采样一次的观测,取样速率为每 20 秒取 0.1 升大气。兴隆观测站远离城市位于海拔 890 米的山上,可以代表受人类活动影响较少地区的气溶胶情况,而北京可以代表城市气溶胶情况。1978 年 10—11 月间曾用类似仪器在河北省香河县 ($117^{\circ}E, 39^{\circ}45'N$) 进行了同样观测,其资料一并列入(见表 2, No. 15—18)进行分析。

1981 年 3 月 11 日收到初稿, 1981 年 4 月 9 日收到修改稿。

为了减少观测误差和粒子随机起伏的变化,我们将相同天气条件下的观测值(数次或数十次不等)加以平均,从而增加谱分布的代表性。观测值与平均值的相对偏差一般为10—20%,但在某些大粒子处甚至可达100%,相比而言,北京观测资料的相对偏差要比兴隆、香河两地大得多,即北京的粒子随机起伏变化较大。

兴隆观测期间曾下过数次雪,雪前天气阴沉,水平能见度较差,雪后近地面水汽较大,粒子总浓度比雪前减少。北京观测期间,仅在一次中雨后,观测到能见度极好的情况,从而测得了所有观测情况中最少的粒子浓度,约45个/厘米³。在北京的其它观测天气,非阴即霾,粒子浓度普遍较高。香河的观测资料都取于晴天,但适值冬季来临,观测站又位于县城附近,北边是县城中心,西边是一片居民宿舍区,这里的煤烟较多,致使谱形中巨粒子部分出现明显的增大(图1),这在图2的体积谱分布中也看得很清楚。现将三地观测资料中有代表性天气的粒子谱分布和能见度较差时的粒子谱分布绘于图1。其具体参数和分析结果见表2,表1中列出其观测的时间、地点和天气状况等。图2中绘出这六组资料相应的体积谱分布 $v(r)$,

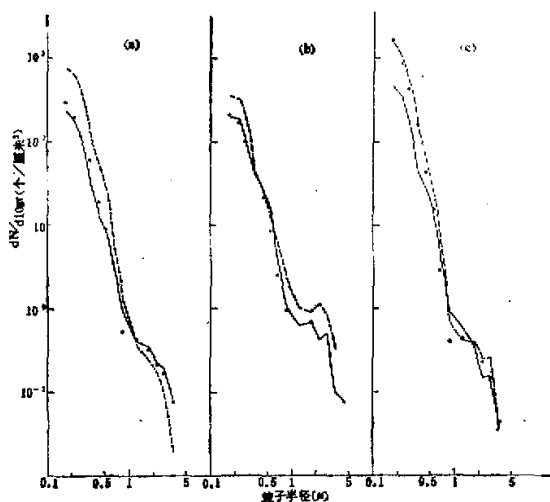


图1 气溶胶粒子谱的观测资料,分别为 No.2, 18, 和 13 的拟合计算值

(a) 兴隆,实线: No.2; 虚线: No.3, (b) 香河: 实线: No.18; 虚线: No.17,
(c) 北京,实线: No.10; 虚线: No.13.

$$v(r) = \frac{dV}{d \log r} = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \frac{dN}{d \log r} = \frac{4}{3} \pi r^3 n(r), \quad (1)$$

式中 r 是粒子半径; V 是单位体积中粒子体积的总和; N 是单位体积中的粒子总数,即粒子浓度; $n(r)$ 是粒子谱分布。

由图1—2看出,三地的谱形大致相似,尤其在半径为0.1—1 μ 的粒子(大粒子)范围内,形状比较稳定,它不象爱根核那样易于凝聚,也不象巨粒子那样易于沉降,而是很好地处于“自我维持”状态,Davies^[2]根据观测资料,曾计算了半径0.1与1 μ 两种粒子由于凝

聚作用而使浓度减半的时间 $t_{1/2} = 210$ 天, 而对 0.01 与 0.1μ 两种粒子 $t_{1/2}$ 仅为 3 小时, 在图 2 的体积谱分布图中, 出现了双峰, 主峰在 0.22μ 附近, 次峰在 2.75μ 附近, 这亦为较多观测资料所证实^[1].

对晴天而言, 气溶胶粒子浓度有明显的日变化(图 3), 早晨和傍晚粒子浓度大, 而中午小, 夜间粒子浓度变化不大. 这可能是中午前后湍流交换强烈, 混合层高度增高, 从而

使地面气溶胶含量相对减少所造成的. 夜间的湍流交换活动比白天小得多, 所以粒子浓度变化不大. 根据日本城市观测结果^[4], 气溶胶浓度在上午 8 时和下午 6 时左右出现两个峰值, 而在 12 至 14 时之间出现极小值, 他们认为这是由于人类活动和气象条件两种因素造成的, 图 3 中可以看出这种变化趋势.

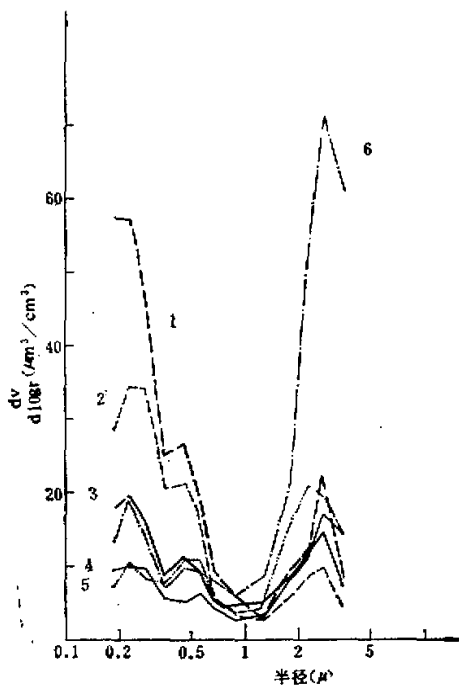


图 2 气溶胶体积谱分布

1—No.13; 2—No.3; 3—No.10;
4—No.2; 5—No.18; 6—No.17.

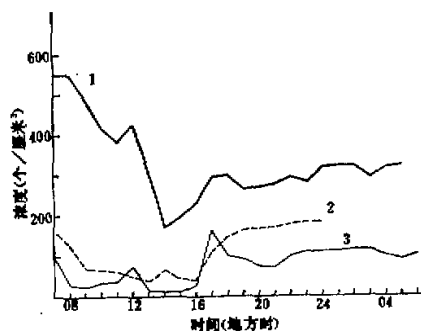


图 3 气溶胶浓度的日变化

1—No.13; 2—No.18;
3—No.7.

三、气溶胶粒子谱的拟合

粒子谱分布常用 Deirmendjian^[5] 提出的广义 Γ 函数分布(以下简称 D 谱)和 Junge^[6] 提出的幂函数分布(以下简称 J 谱)来描述, 其表达式分别为:

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = ar^{\alpha}e^{-br^{\gamma}}, \quad (2)$$

$$n(r) = \frac{dN}{d \log r} = cr^{\nu}. \quad (3)$$

(2) 式中 dN 表示在半径 r 处 dr 间隔内的粒子数, a, b, α, γ 是四个待定参数; (3) 式中 dN 表示在半径 $\log r$ 处 $d \log r$ 间隔内的粒子数, c 与 ν 是两个待定参数.

如将实测谱形,整段用同一组参数的 D 或 J 谱来拟合,这样造成的离差太大。以 No.1 的观测资料为例,整段用 D 或 J 谱拟合,则各点的观测值与拟合值的平均相对误差 ε 都大于 100%,而分段拟合平均相对误差减小到 26%。Junge 等^[7](1971)也曾指出,将整个观测范围内的粒子分布用同一组参数的 J 谱来拟合是不合适的,而 Davies 用多个对数正态分布函数拟合实测资料取得一定成功。同时我们考虑到半径大于 1μ 的巨粒子数量少,变化大,易受局地源影响,因此我们采取了分段拟合处理的方法,既能提高拟合精度,又有利于分析不同半径范围内气溶胶粒子的分布特征。

表 1 气溶胶取样观测的状况

编 号	观测地点	次 数	观 测 时 间	天 气 状 况
1	兴 隆	24	1980年3月13、18、19日三天上午	断续下雪,雪停期间观测
2		36	3月10、16、17日 白天	晴、能见度 20~25 公里
3		13	3月12日 白天	有霾、能见度 10 公里左右
4		12	3月9日 白天	雪后,晴天
5		32	3月11、13、15、19日 4天下午	晴、能见度 15 公里左右
6		13	3月14日 白天	晴、能见度大于 30 公里
7		13	3月17日 18 ^h 至 18日 6 ^h	阴、夜间观测
8		16	3月20日 17 ^h 至 21日 8 ^h	雪后,夜间观测
9	北 京	5	1980年7月25日 16 ^h ~17 ^h 30 ^m	雨后、晴空、能见度大于30公里
10		8	7月26日 10 ^h ~17 ^h	晴、能见度 10 公里左右
11		15	7月28、29日二天下午13 ^h ~17 ^h	晴间多云、能见度小于 10 公里
12		4	7月30日 14 ^h ~17 ^h	阴、能见度小于 10 公里
13		12	8月1日 白天	有霾、能见度较差
14		12	8月1日 17 ^h 至 2日 5 ^h	阴、夜间观测
15	香 河	7	1978年10月27日 下午	晴、能见度大于 30 公里
16		7	10月28日 下午	晴、能见度 30 公里左右
17		9	10月30日 8 ^h 57 ^m ~17 ^h	晴、多云、能见度 20 公里左右
18		8	11月9日 10 ^h ~17 ^h	晴、能见度大于 30 公里

用 D 谱拟合的步骤如下:先分别固定 α 、 γ 两参数,取 $\alpha=2$ 、 $\gamma=1$ 和 $\alpha=2$ 、 $\gamma=0.5$ 两种情况,这时(2)式分别可改写成

$$\ln\left(\frac{dN}{dr}/r^2\right) = \ln a - br \quad (4)$$

$$\ln\left(\frac{dN}{dr}/r^2\right) = \ln a - br^{1/2} \quad (5)$$

同一组资料分别对(4)、(5)式用一元线性回归法求出参数 a 、 b 和拟合残差平方和。取残差为小的那一组 a 、 b 、 α 、 γ 值作为用麦夸脱迭代法确定非线性模式中参数的初值^[8]。

用 J 谱拟合比较简单,(3)式两端取对数得

$$\ln\left(\frac{dN}{d\log r}\right) = \ln c - v\ln r \quad (6)$$

然后按一元线性回归法求出 c 和 v 。

对于兴隆(8组)、北京(6组)和香河(4组)的平均观测资料,分别按上述方法,用

表 2 气溶胶观测资料的 D 谱和 J 谱拟合

編 号	0.15 μ ≤ γ <1 μ 范围的参数										1 μ ≤ γ ≤5 μ 范围的参数										N_m (厘米 ⁻³)		θ_N (%)		$\bar{\varepsilon}$ (%)	
	D 谱					J 谱					D 谱					J 谱					N_m (厘米 ⁻³)		θ_N (%)		$\bar{\varepsilon}$ (%)	
	$a \times 10^3$	b	α	γ	ν	c	τ	a	b	α	τ	c	ν	a	b	α	τ	c	ν	D	J	D	J	D	J	
1	5.83397	19.72	1.96	0.558	3.72	1.0624	0.99	1.37	1.92	2	0.99	2.75	2.34	0.045	110.62	119.62	135.5	8.1	22	26	32.3					
2	2.33695	19.56	1.88	0.589	3.46	0.8664	0.5	60.13	5.8	2	0.5	1.23	2.0	0.046	62.71	75.84	73.78	20	17.68	17.4	17.38					
3	25.72370	22.50	3.10	0.719	4.20	1.1383	1	1.3	1.89	1.33	1	25.75	8.07	0.1	231.10	221	327.99	-4.3	41.9	35	41					
4	3.03281	22.0	2.06	0.653	3.75	0.5448	0.52	71.24	6.12	2	0.52	0.625	1.85	0.05	69.40	68.97	73.22	-0.6	5.5	30	22					
5	5.73660	19.58	1.98	0.548	3.72	1.072	0.5	79.9	5.92	2	0.5	68.38	8.31	0.045	103.60	107.12	176.72	3.3	70.5	32	23.2					
6	3.29169	19.57	2.04	0.563	3.75	0.551	0.5	16.66	5.0	2	0.5	0.402	0.976	0.05	65.42	67.5	73.65	3.1	12.5	33.5	19.46					
7	3.85650	19.76	1.97	0.550	3.46	1.432	0.5	121	5.8	2	0.5	1.85	1.59	0.045	101.69	101.4	121.4	-0.25	19.39	20.5	23.7					
8	1.62982	21.76	2.36	0.730	3.51	0.569	0.5	45	5.72	2	0.5	0.597	1.47	0.073	50.07	56.4	51.65	-12	3.1	21.7	20.69					
9	1.12527	20.22	0.2895	0.433	3.34	0.654	1	172.96	4.6	2	1	0.262	7.68	0.0003	44.90	41.91	44.99	-6.6	+0.2	—	—					
10	5.51725	25.83	8.825	0.857	3.65	1.229	1	250.67	4.77	2	1	39.32	8.25	0.09	119.159	115.77	166.8	-2.8	39.9	46	29					
11	6.85204	36.24	3.614	1.197	3.87	0.881	0.5	94.42	6.13	2	0.5	0.8713	1.79	0.12	128.84	125.36	141.73	-2.69	10	—	—					
12	46.6177	32.53	3.437	0.956	4.79	0.414	1	620.42	7.31	2	1	0.5106	15.09	0.099	214.87	212.35	296.26	-1.17	37.8	—	—					
13	46.5471	23.71	1.964	0.604	4.33	1.448	1	84.287	4.18	2	1	18.41	6.85	0.036	357.45	339.51	487.8	-5	36.4	35	26					
14	23.7985	31.63	3.330	1.014	4.16	1.342	1	253.66	4.84	2	1	41.84	8.5030	0.1	287.99	285.96	371.2	-7	28.8	—	—					
15	2.49026	19.37	1.983	0.563	3.38	1.04	1	0.8	1.57	2	1	0.87	0.86	0.048	61.59	61.24	72.5	-0.56	17.7	23.6	—					
16	2.13986	18.03	1.985	0.544	3.21	1.60	1	1.28	1.68	2	1	1.45	1.23	0.053	74.7	76.81	88.4	2.8	18.3	23.4	—					
17	2.52964	21.0591	1.967	0.654	3.24	1.858	0.47	89.32	5.31	2	0.47	1.802	1.0830	0.051	101.84	95.2	110.0	-6.5	8	36	31					
18	1.95535	19.435	1.982	0.582	3.23	1.313	1.03	1.364	1.78	1.94	1.03	1.394	1.6190	0.050	54.21	59.2	76.46	9.2	41	30	31					

* 8 值未全部计算,表中—表示未计算。

D 和 J 谱进行拟合, 结果列于表 2.

表 2 中列出了根据 D 谱拟合参数而计算出的模式半径

$$r_c = \left(\frac{\alpha}{b \cdot \gamma} \right)^{1/\gamma}, \quad (7)$$

实测粒子浓度 N_M 与根据拟合参数计算的粒子浓度 N_c 的相对误差

$$\varepsilon_N = \frac{N_M - N_c}{N_M}, \quad (8)$$

以及 $n(r)$ 在各点的实测值 n_{M_i} 与拟合值 n_{c_i} 的平均相对误差

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left| \frac{n_{M_i} - n_{c_i}}{n_{M_i}} \right|. \quad (9)$$

迭代过程中, 残差逐次减小, ε 开始也减小, 然而 ε 并不随着残差的减小而无限减小, 到一定程度时残差虽继续减小但 ε 却不再减小, 有时反而增大, 为了使拟合谱形均匀逼近实测谱形, 我们以 ε 最小时终止迭代.

由上述图、表可以看出:

(1) 在半径为 $0.1-1\mu$ 的大粒子范围内, 无论用 D 谱还是 J 谱, 拟合精度都较高, 且参数值大多落在这些谱参数的常见范围内, 即 b 在 $8-20$ 之间, α 在 2 附近, γ 在 $0.5-1$ 之间, ν 在 $2.8-4$ 之间; 而在半径大于 1μ 的巨粒子范围内情况却较差, 即拟合精度差, 参数值变化不定.

(2) 在大粒子范围内, 除去 4 次 (No. 3, 12, 13, 14) 粒子浓度超过 200 个/厘米³ 的情况外, J 谱的参数 ν 均满足 $3 < \nu < 4$, 14 次的平均值为 3.52 , 均方差为 0.21 .

(3) 对拟合的 D 谱, 推算出的模式半径 r_c 绝大部分 (仅 No. 9 例外) 落在常见范围 $0.05-0.1$ 微米内.

(4) D 谱和 J 谱相比较而言, D 谱对粒子浓度 N 的拟合值一般比 J 谱好, 由表中 ε_N 这一列可以看出, 对 D 谱 18 次 ε_N 平均为 5.33% , 均方差为 4.7% , 而对 J 谱 ε_N 平均为 23.9% , 均方差为 17.9% . 但从各点拟合的相对误差来看, D 谱和 J 谱的 ε 值大致相当.

(5) 三地相比, 兴隆和香河拟合参数更为相近, 粒子浓度一般小于 120 个/厘米³, 而北京的粒子浓度一般大于 120 个/厘米³, 拟合参数的变动也较大, 这明显地反映了北京的观测资料受到了更多的人类活动的影响.

四、结 论

根据我国北京附近地区实测气溶胶谱的分析, 可以得出以下几点结论

(1) 实测气溶胶粒子在整个测量的粒径范围内不太符合同一参数的 D 谱或 J 谱, 将大粒子和巨粒子两段分别用不同参数的 D 谱或 J 谱拟合效果要好得多, 而且可以反映不同粒径范围内气溶胶粒子的分布特征.

(2) 大粒子谱形比较稳定, 仅在浓度上有变化, 而巨粒子受局地源影响较大. 同时, 由于浓度较低, 易受取样偶然性的影响, 这两者使得巨粒子谱形状多变, 拟合谱参数的变化范围也大. 体积谱分布中在巨粒子范围内出现次峰.

(3) 大粒子范围内, D 谱和 J 谱的拟合参数都落在常见值范围内, J 谱幂指数 ν 的平均值为 3.52, D 谱的模式半径 r_c 在 $0.045 \sim 0.1 \mu$ 之间。

致谢: 在兴隆观测中, 建科院空调所吴植娣、王家俊同志参加了观测和仪器维护工作; 研究和写作过程中任丽新、孔琴心、王明星、游荣高等同志提出不少有益的建议, 作者在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Pollack, J. B. et al., *J. Geophys. Res.*, A, 81, p. 1071, 1976.
- [2] Davies, C. N., *J. Aerosol Sci.*, 5(3), p. 293, 1974.
- [3] Kneip T. J. (Ed.), *Aerosol: Anthropogenic and natural, sources and transport*, chap. 1, the New York Academy of Sciences, 1980.
- [4] 馆益等, 环境的科学, 第一章, 1978年中译本, 科学出版社.
- [5] Deirmendjian, D., *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*. American Elsevier, 1969.
- [6] Junge, C. E., *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press, 1963.
- [7] Junge, C. E. et al., *J. Aerosol Sci.*, 2(3), p. 305, 1971.
- [8] 曲线拟合经验公式, 计算所三室编 (油印本), 1973.

ANALYSIS OF OBSERVED SIZE DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC AEROSOLS

Zhu Wen-qin

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

Some measurements on the size distribution of atmospheric aerosol at three sites near Beijing are presented and analyzed in this paper. The measurements in large and giant particle range can be fitted by the same kind of distribution function with different parameters. Piecewise fitting technique using Junge and Deirmendjian distributions is presented. It is found that the fitting accuracy is improved and the features of distribution of aerosol particles in different size ranges can be reflected clearly.