

雾微物理结构的观测分析*

王 庚 辰

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文简述了用光电法观测雾微物理结构的工作特点及资料处理中的有关问题。根据观测结果对雾滴浓度、雾滴谱及雾中含水量等参数及其演变特征做了粗略分析。结果表明,雾滴谱分布是雾体演变的主要表征量,而单位体积中大雾滴数量的增加,小滴数量的比例相应减小,雾滴谱加宽则是雾体发展的主要特点。

一、前 言

对云雾微物理结构的实际观测在云雾研究中占有相当重要的地位。1978年秋季,在大气物理研究所香河站(位于北京东南方约70公里处)用光电粒子计数器,对雾滴浓度和雾滴谱进行了实际观测。共获得29次观测资料,其中浓雾(能见度小于100米)18次,轻雾(能见度1—3公里)11次。就其形成条件而言,均属辐射雾。观测期间地面空气温度的变化范围为 3° — 12°C ,在浓雾中,相对湿度均为100%;在轻雾观测过程中,相对湿度的变化范围为80—97%。本文的目的是根据实测结果,对雾的某些微物理特性,例如:雾滴浓度、雾滴谱分布以及含水量等做一粗略的分析。

二、仪 器 描 述

光电粒子计数装置的工作原理,是根据在固定方向上的散射光强来推断散射粒子的几何尺寸。图1是仪器的光路系统示意图。整个系统由白炽灯O,聚光系统I,投影系统II,雾滴样本散射腔M,导光系统III和光电倍增管T组成。由光源发出的光束通过聚光系统成象在大小为 1×2 毫米²的狭缝上,并经投影系统在样本散射腔测量区形成一个

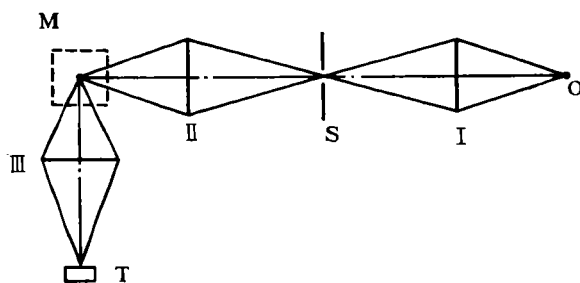


图 1 粒子计数器的光路示意图

* 本文于1980年5月12日收到,1980年8月29日收到修改稿。

1×2 毫米²的亮区。当含有雾滴的被测空气，由抽气泵从进气管道吸入散射腔内并经过测量区时，每个微滴都顺序将光散射一次，同时产生一个散射光脉冲，其幅度大小和微滴直径的平方成一定函数关系。然后，这个光脉冲被导光系统聚焦在光电倍增管的阴极面上，并在其输出端得到相应的电脉冲。此电脉冲再经必要的放大和衰减后，送到脉冲幅度甄别器里去甄别，拈出所需信号，最后由计数系统计数、显示。仪器测量的粒子线性尺度范围为 0.3—10 微米（对固态尘埃粒子而言），共分 15 挡进行计数、显示。

三、观测和资料处理中的几个问题

1. 为保证所取样本具有代表性，就必须保证样本有足够大的体积。基于数学统计的有关理论，在观测过程中，我们每次取样的体积为 100 立方厘米。

2. 观测过程中，使用仪器内所设的校准系统定期监视光源、光路系统、光电倍增管以及其它光电系统的稳定性并进行必要的校正。

3. 对雾滴的所有取样，都是在无风的天气条件下进行的，所以，在仪器管道的进口处，由于风而引起的流场变化可不必考虑。

4. 根据散射理论，粒子在给定方向上的散射强度不仅取决于粒子的几何尺寸，而且同其折射指数有关。考虑到本仪器所涉及到的基本上是可见光区，所以雾滴对光的吸收可忽略不计，从而可把雾滴视为球形透明粒子。具有不同折射指数的球形透明粒子，在给定方向上的散射可近似地根据 Fresnel 反射公式来获得。表 1 给出了用显微法和光电法对具有不同折射指数 m 的球形透明粒子的测量结果^[1]。[表中 R 是 Fresnel 反射系数， d_c 和 d_m 分别表示根据光电粒子计数器和显微法观测处理得到的粒径。根据表 1 中的资料，可得到如下的经验关系

表 1 球形透明粒子的有关参数

m	R	d_c/d_m
1.53	0.056	0.59
1.90	0.109	0.98
2.25	0.158	1.67
2.50	0.192	2.00

$$d_c/d_m \cong 10 R$$

而在 $1.3 < m < 2.5$ 范围内，近似地有

$$m = 1.14 + 7.03 R$$

由此

$$d_c/d_m = \frac{m - 1.14}{0.703}$$

对于雾滴而言，取 $m = 1.33$ ，则有

$$d_c = 0.27 d_m$$

这样，根据粒子计数器的观测结果，就不难得到实际的雾滴参数。

四、雾的微观结构分析

1. 雾滴浓度

对雾滴浓度的观测是在不同气象条件下进行的, 其部分结果列在表 2 中。表中还给出了相应的温度、相对湿度、能见度等值。对观测结果的分析表明, 香河地区, 在大气比较洁净的秋季所形成的辐射雾中, 其浓度变化范围约在 140—200 滴/厘米³ 之间, 而浓

表 2 雾滴浓度观测结果

日期	参 数		N (滴/厘米 ³)	温 度(°C)	相对湿度(%)	能见度(米)
	最 大 值	最 小 值				
11 月 5 日	最 大 值		172	6.7	100	100
	最 小 值		144	3.0	100	20
	平 均 值		160	4.7	100	50
11 月 6 日	最 大 值		171	4.0	100	100
	最 小 值		142	3.0	100	20
	平 均 值		160	3.4	100	50
11 月 8 日	最 大 值		191	6.3	100	100
	最 小 值		162	4.3	100	20
	平 均 值		179	5.0	100	50
11 月 7 日	最 大 值		188	12.1	97	3000
	最 小 值		154	8.8	80	1000
	平 均 值		167	10.2	88	2000

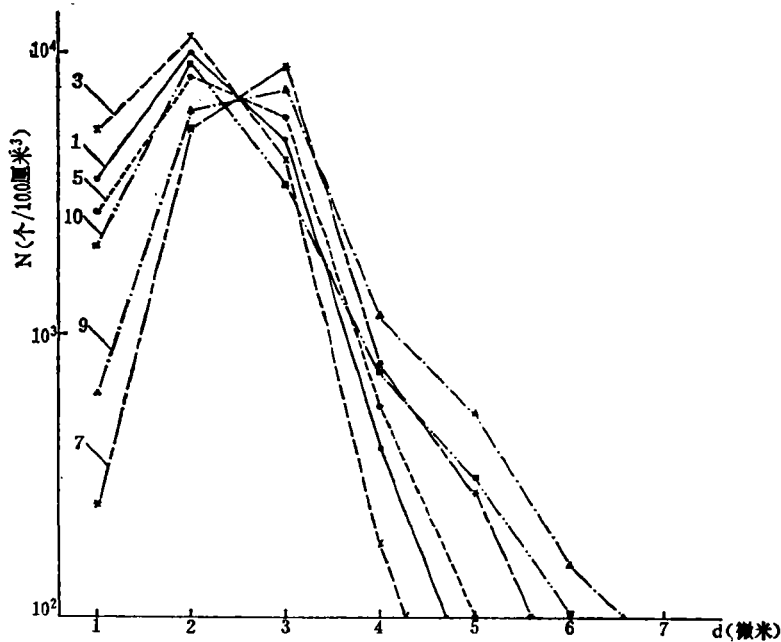


图 2 雾演变过程中滴谱的变化实例(1978.11.8)

(1, 3, 5, 7, 9, 10 分别表示 1, 3, 5, 7, 9, 10 时的资料)

度为 160—180 滴/厘米³ 的雾约占 50%。顺便指出,在本仪器感应范围内($1\ \mu \leq r \leq 18\ \mu$),观测结果表明,浓雾和轻雾的差别主要不在于其浓度,而在于其谱分布(见下节)。为便于讨论,我们根据雾中相对湿度、温度以及雾滴谱的变化特征,将雾的演变过程分为形成、发展、稳定和消散等四个阶段。图 2 和表 3 分别给出了在不同阶段雾滴谱和雾滴浓度的演变实例。就浓度而言,在雾的最初阶段,雾滴浓度取决于大气中所含凝结核的性

表 3 雾滴浓度的演变 (1978.11.8)

观测时间(小时)	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
雾滴浓度(个/厘米 ³)	192	191	182	183	181	178	164	166	162	173

质与数量,而进一步的变化则主要依赖于大气中的湿度、温度的变化以及扩散-凝结、雾滴之间的碰撞、碰并等物理过程的发生。因此,不难理解,在雾的形成、发展到消散的各个阶段,其浓度也会发生相应的变化。表 3 中,上午 9 点以前是雾的形成、发展和稳定阶段,9 点以后雾开始迅速消散。可以发现,随着雾的发展其浓度逐渐减少(应当指出,这一现象所反映的只是直径大于 1 微米的雾滴数目的变化),但在下一节我们会看到,这种浓度的减少只是反映了雾中较小水滴数目的减少,而与此同时,雾中大水滴的数量却在雾的形成和发展过程中不断增加。由此可见,雾的发展并不一定意味着雾滴浓度的增加,而雾的开始消散也并不一定伴随着雾滴浓度的明显减少。

2. 雾滴谱分布

雾滴谱被认为是反映雾的微物理特征的重要参数之一。一般来讲,雾滴谱取决于控制气团的物理状态。图 3 给出了雾滴谱的平均分布。可以发现,就其平均状态而言,轻雾的滴谱较窄,而且整个谱分布曲线移向小滴一端。也就是说,和浓雾相比,轻雾主要由几何尺寸比较小的微滴构成。不同尺寸的雾滴数目在雾中的变化过程是复杂的,对浓雾而言,雾滴浓度的变化往往伴随着滴谱分布的变化。单位体积中的雾滴总数变化似

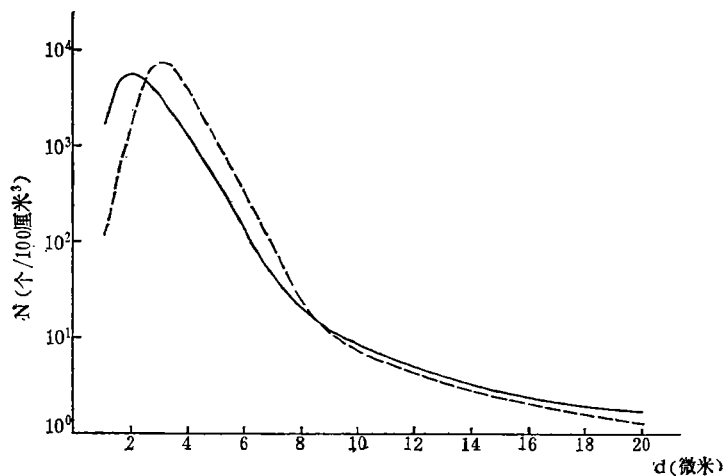


图 3 雾滴谱(平均值)分布
(——轻雾; ---浓雾)

乎主要是由较小雾滴数目的增减而引起的。根据雾滴在饱和条件下的增长理论,在雾形成和发展的一定阶段上,雾中蒸发-凝结以及碰撞、碰并等过程会导致雾中大水滴个数的相应增加和单位体积中总雾滴数目的相应减少。这一点已被本观测结果所证实(图4)。从图2给出的典型实例中,可以看到不同大小的雾滴,在雾演变的不同阶段的相对变

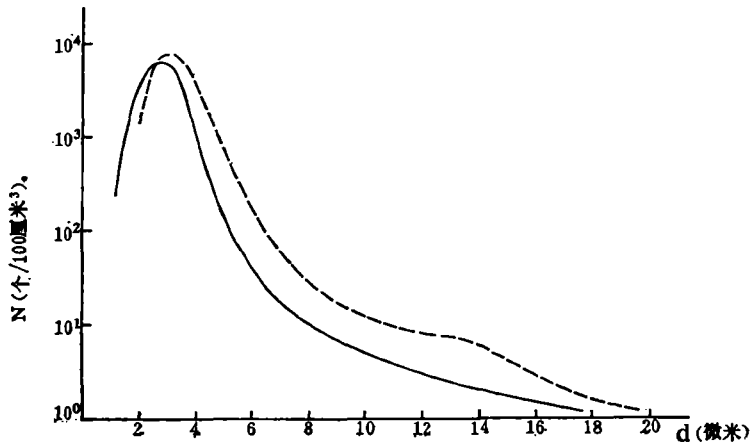


图4 雾滴谱分布随其浓度(平均值)的变化
(—— N (个/100厘米³): 16731, ---- N (个/100厘米³): 14800, V (能见度) <100 米。)

表4 雾滴谱的相对变化

雾滴直径 (微米)	1	2	3	4	5	6	8.5	N	d
时间(小时)									
01	/	/	/	/	/	/	/	/	/
03	1.25	1.05	0.65	0.52	0.51	0.92	0.78	0.95	0.94
05	0.80	0.88	1.11	1.25	1.19	1.30	1.44	0.94	1.04
07	0.08	0.59	1.48	1.87	3.01	5.57	4.22	0.85	1.15
09	0.18	0.64	1.28	3.93	6.57	12.50	6.67	0.84	1.27
10	0.66	0.94	0.85	1.82	3.48	7.92	2.56	0.90	1.07

化。为了对这种变化有一定量了解,表4给出了这些变化的具体数据。表中将01时各类雾滴的浓度视为1,即以01时的资料为基准来考察不同大小雾滴的浓度随时间的相对演变。表中最后两例,分别是雾滴总浓度 N 和雾滴直径的算术平均值 d 的相对变化。这些数据清楚地表明,在雾的演变过程中,尽管单位体积内的总雾滴数目有所减少,但雾中大滴数目增多和小滴数目相对减少这一现象是十分明显的。例如,直径在2微米以下的雾滴所占雾滴总数的比例,由01时的69%降到09时的41%;而直径大于5微米的雾滴所占比例,在同一时间内却由0.6%增至5%。

图5直观地给出了雾滴浓度 N 、平均半径 r_a 及雾的含水量 W 等参数随时间的变化实例。同时给出了大气相对湿度 H 、温度 T 等气象要素的相应变化。

根据上述分析,可将雾演变的四个阶段具体描述如下:

1) 形成阶段。这一阶段的气象条件应是最有利于雾的形成(如,相对湿度增大,静风等)。在这种条件下,主要依靠水汽扩散而发生的凝结过程迅速发展,尺寸较小的雾

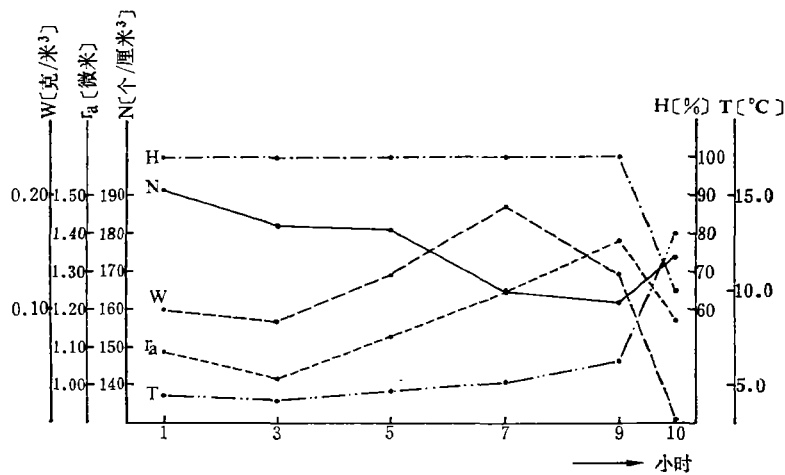


图 5 雾体参数的演变

滴数目迅速增加，雾滴的平均半径较小。

2) 发展阶段。在这一阶段，核化过程进一步发展，小尺度湍流，甚至重力等雾的动力学过程使雾滴迅速增长，较大雾滴的数目相对增多，而小滴数目的比例相对减少，雾滴谱加宽。同时，雾中含水量增大，能见度变小。

3) 稳定阶段。其主要特点是：大雾滴的浓度达到最大值，雾滴的平均半径、雾中含水量等值也相应较大，雾滴谱相对比较稳定。

4) 消散阶段。在这一阶段中，一般是气温升高和相对湿度迅速下降，随之是雾中大水滴数目减少，小水滴数目的比例相对增大，整个滴谱向小雾滴方向移动。雾中含水量迅速减少，而能见度迅速增大，直至雾完全消失。

由于影响雾滴谱演变的物理过程的复杂性，所以至今人们还没能够从对这些物理过程的研究中，找到描述实际大气中雾滴谱及其变化的实用的数学表达式；有的只是来自实测资料的各种经验公式^[2-6]。考虑到实际计算的简便性，我们用下述公式得到了较好的拟合效果

$$n(r) = ar^b e^{-cr}$$

式中 $n(r)$ 是单位体积中半径为 r 的雾滴数， a, b, c 为经验常数。

3. 雾中含水量的粗略估计

雾中的液态含水量是有关云雾动力学、热力学研究中的重要因子。分析表明，雾中含水量可以在很大的范围内变化。就本观测而言，这个范围为 0.425—0.061 克/米³，其平均值为 0.153 克/米³，而在雾的消散阶段，其含水量可急剧减少。表 5 给出了雾滴半径的算术平均值 r_a 、体积平均值 r_v 以及雾中含水量 W 等参数在雾的不同演变阶段相应变化的实例。可以发现，在雾的形成阶段，由于较小雾滴数量的迅速增加，所以 r_v 值有所减小。随后，随着凝结和碰撞等过程的发生，大雾滴数目迅速增多，雾滴半径和含水量也迅速增大，直到整个系统达到热力和动力平衡为止。最后，由于热力和动力条件的变化，使雾的稳定状态受到破坏，蒸发过程增强，雾滴尺寸变小，雾中含水量也迅速减少，一直到雾完全消失。可以认为，雾中含水量的变化主要取决于雾演变过程中雾

表 5 雾滴半径和雾中含水量的变化

参 数 \ 时间(小时)	01	03	05	07	09	10
r_0 (微米)	1.09	1.02	1.13	1.25	1.38	1.17
r_s (微米)	1.91	1.65	2.40	3.56	4.94	3.25
W (克/米 ³)	0.114	0.106	0.118	0.131	0.144	0.002

滴谱的变化。

五、主要结果

1. 雾滴浓度主要取决于大气中所含凝结核的数量和性质。香河地区, 在秋季形成的辐射雾中, 可望其浓度范围为 140—200 滴/厘米³。这一浓度在雾演变的各阶段也发生相应的变化。

2. 雾滴谱是雾演变的主要表征量, 这个量的变化取决于各阶段的热力和动力条件。在雾的发展过程中, 大滴数量逐渐增多、小滴数量的比例相应减少、滴谱逐渐加宽等是雾滴谱变化的主要特点。

3. 在同一地区, 雾中含水量可以有较大的变化, 并且主要依赖于雾滴谱的分布。在香河地区, 对于秋季形成的雾而言, 含水量的平均值约为 0.153 克/米³。

致谢: 黄美元, 何珍珍, 任丽新等同志看过本文原稿并提了宝贵意见, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Eldridge, R. G., A new fog drop-size distributions, *J. of Meteorology*, 18, No. 5, 671—676, 1961.
- [2] Best, A. C., The size of cloud droplets in layer-type cloud, *Quart. J. Royal Met. Soc.* 77, No. 332, 241—248, 1951.
- [3] Хргиан, А. Х. И Мазин, И. П. О распределении капель по размерам в облаках. *Труды ЦАО*, вып. 7, 56—61, 1952.
- [4] Левин, Л. М., О функциях распределения бвланных и дождевых капель по размерам. *Доклэд АНСССР* 94, вып. 6, 1045—1048, 1954.
- [5] Левин, Л. М., О функциях распределения обланых капель, *Известие АНСССР, сер. геофиз.*, вып. 10, 1211—1221, 1958.
- [6] Deirmendjian, D., Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in the visible and infrared, *Appl. Opt.* 3, 187—196, 1964.

AN ANALYSIS OF THE MICROPHYSICAL STRUCTURE OF FOG

Wang Geng-chen

(Institute of Atmospheric Physics, Academic Sinica)

Abstract

The note for the observations of the microphysical structure of fog by optical-electrical method and some problems about the data processing are described in the paper. Analysis of microphysical properties of fog, such as the drop concentration, the size distribution of the fog drops and the water content in the fog, is given. The result shows that distribution of drop spectrum is the most important characteristic factor in the fog evolution process. Basic characters for fog development are: 1) the number of larger drops increases, 2) the fraction of smaller drops decreases and 3) the drop size distribution widens.