

1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征*

李子华 黄建平

周毓荃

(南京气象学院, 南京, 210044)

(河南省人工影响天气办公室, 郑州, 450003)

朱诗武

(江苏省气象研究所, 南京, 210008)

摘 要

1996 年 12 月 27~31 日, 南京地区连续出现了浓雾天气。利用 ADAS 系统对大气边界层的探测资料, 揭示了雾在发生发展过程中的大气边界层结构特征, 研究了雾的宏观发展物理过程; 利用三用滴谱仪取样资料, 分析了雾的微物理结构特征, 讨论了影响微结构的主要因子及与宏观发展过程之间的关系。

关键词: 辐射雾, 微结构, 物理过程。

1 引 言

随着社会经济的迅速发展, 雾的危害越来越突出。沪宁高速公路通车后, 雾严重地影响行车安全。1996 年 11 月 24 日晨, 沪宁线无锡段因路面雾大, 发生了 44 辆车相撞、20 余人伤亡的重大交通事故。像这种因雾而发生的连环撞车事故, 国内外屡有发生。因而研究高速公路沿线雾的发生发展过程及其成因, 并在此基础上建立雾的预测预警系统十分必要。

国外研究雾始于 1917 年^[1]。1970 年代初, Roach 和 Brown 等又在贝福德郡卡丁顿^[2]、Pillie 在纽约附近的埃尔迈拉山谷^[3]对雾开展了外场综合观测, 并结合进行数值模拟研究。1970 年代末, 纽约州阿尔巴尼实施了一项辐射雾野外计划^[4], 历时数年。这些工作基本搞清了辐射雾生消物理过程及主要影响因子。近年来, 中国重庆和上海对雾进行了大规模探测试验, 发现了复杂地形条件下大城市雾的许多新的特点^[5]。雾的形成往往与局地条件有关, 各地地形和生态环境不同, 雾的结构和生消过程会有相当大的差异。为了预防高速公路雾害, 对沪宁线上雾的物理结构进行了研究。

1996 年 12 月 27~31 日, 沪宁线上连续出现了 5 天大雾。在沪宁线汤山站(海拔 42.0 m)进行了大气边界层和雾的微物理结构观测, 在长江北岸的盘城(海拔 22.0 m)进行了雾滴谱采样。两站的地理位置如图 1 所示。边界层探测用的是美国 AIR 公司生产的

* 初稿时间: 1997 年 10 月 29 日; 修改稿时间: 1998 年 4 月 13 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目 49665012。

自动数据获取系统(ADAS),它由系留气艇携带探空仪升高,可测得不同高度上的温、压、湿、风等资料,并传递给地面接收机。测量精度为:干湿球 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,气压 $\pm 0.5\text{hPa}$,风向 $\pm 5^{\circ}$,风速 $\pm 0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。雾滴谱取样用的是三用滴谱仪,它是利用惯性使雾滴沉降在涂有油层的玻璃片上,在显微镜下直接读数或显微照相后再读取雾滴大小和个数。每次取样后,立即读数或照相,一般可在 $1\sim 5\text{min}$ 内完成,由于有雾时操作现场空气湿度大,因而蒸发影响较小。考虑到代表性,一般每个样品读数不少于 300 个。滴谱仪可测最小尺度为 $1.6\mu\text{m}$,资料处理时进行捕获系数订正。ADAS 探测每小时一次,雾滴谱取样大约每 10min 一次。

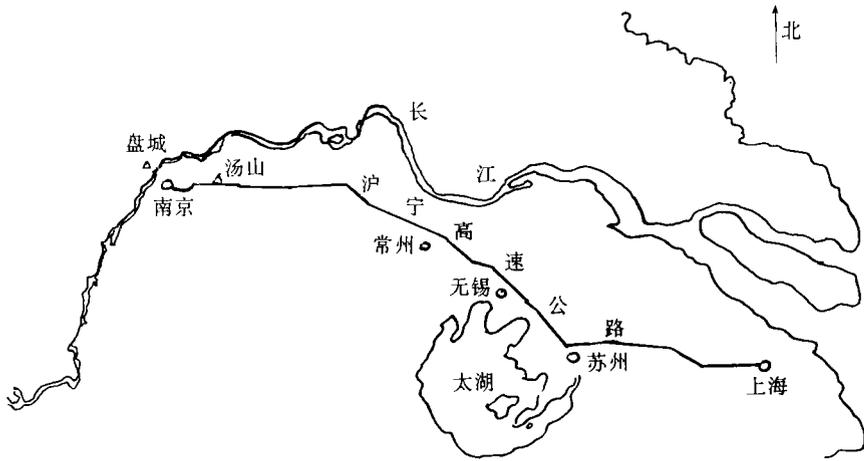


图 1 沪宁高速公路及观测点位置示意图

2 连续浓雾发生的天气背景

连续 5 天浓雾的大体情况是:12 月 27 日南京出现首场大雾,它一直持续到 28 日;29 日晨产生第二场雾,午后消散;接着 29 日晚浓雾复生,一直持续到 30 日午后;31 日晨继续有雾,中午消散,这是这次过程的末场大雾。下面简要介绍连续浓雾发生的天气背景。

12 月 26 日 08 时,在 500hPa 图上, 45°N 以南中国大陆上空为宽平的高压脊区,脊自新疆、河套伸向东部沿海;在地面图上,大陆弱高压从新疆—河套延伸到东南沿海,江苏处在高压向东南延伸的均压区内。在这种形势下,夜间晴空无云、风小,有利于辐射降温,有利于贴地逆温层和辐射雾的形成。由于高空弱高压脊后有弱暖湿脊伴随,使得大陆弱高压气团属性变得暖而湿,同时由于高空有下沉气流^[6],从而在低层产生下沉逆温现象,这有利于增强雾顶之上的逆温强度,而不利于雾的消散。另外从 12 月 23 日 08 时开始,9625 号热带风暴在菲律宾东部洋面形成并西进,25 日 14 时以后转向北、北东方向缓慢北上,29 日以后移速加快,强度减弱。热带风暴阻碍了大陆高压东移,并使宽平高压脊区得以维持,而大陆高压的数天维持正是江苏持续 5 天浓雾的原因。9625 号热带风暴减弱快速移去以后,青藏高原有高原槽东移,31 日夜移经江苏,由于北方冷空气入侵,全省先后出现雷阵雨、大风天气,持续 5 天浓雾才得以结束。

3 12月27日雾的宏观发展过程

12月26日晚,晴空无云,微风(小于 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),地面辐射降温强。27日01时,贴地气层形成了厚达117m、强度为 $1.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的逆温层。以后空气继续冷却,逆温层加厚,强度也逐渐增大。由02时30分至04时,地面降温率最大,达到 $1.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$,逆温层顶达到174m,平均强度加大到 $2.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,贴地层逆温强度由 $2.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 突增到 $10.4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。此时湿空气已达饱和,地面层有雾形成。如图2所示,06时雾加浓,但雾层厚度仅13m。值得注意的是,在68m处及112~168m高度层,由于降温率大,相对湿度达到95%以上,其中153~168m,相对湿度达到98%以上,可以认为这里已有雾形成(严格地说,此时应属低云,为叙述方便,暂称为空中雾)。此后,雾进入发展阶段。一个重要表现是,随着凝结潜热释放,地面雾突发向上发展。特别是日出(07时)后的1h内,由于地面雾层温度升高、湍流增强及雾顶辐射降温,雾层迅速向上伸展到48m,空中雾迅速向下发展。09时,上下雾区相连,雾层爆发性增厚,雾顶高度达到162m。09时至11时,为雾的成熟阶段。在这一段时间,雾顶高度在162~196m之间起伏变化。11时以后,随着地面温度升高,地面雾浓度减小,能见度增大,雾顶抬升,最后变成低云。这种低云一直维持到28日,地面相对湿度保持94%左右,能见度处于600~800m之间。

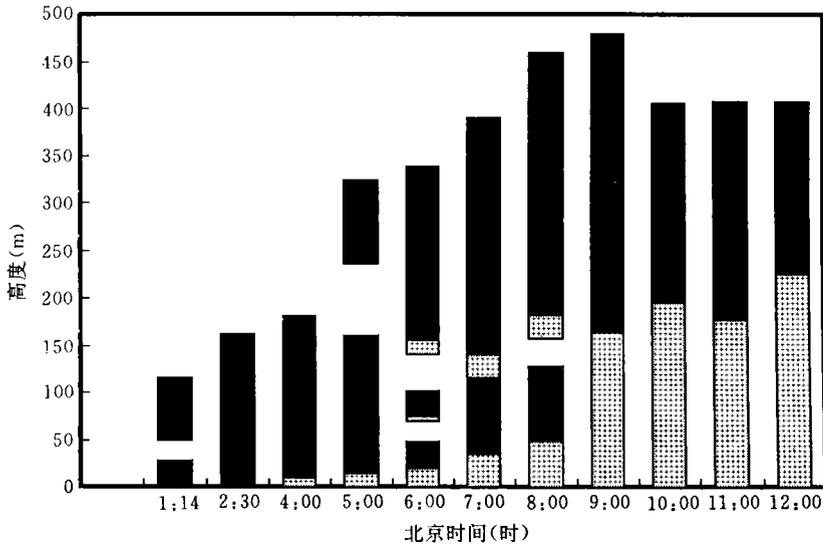


图2 雾区(阴影区)和逆温层(黑区)时间演变图

由图2可以看出,在雾的发生发展整个过程中,都存在着深厚的逆温层。这种深厚的逆温层,对辐射雾的形成和长时间维持起着重要作用。在贴地气层辐射冷却率增大、逆温强度突增时形成了雾。当雾层增厚时,逆温层开始离开地面,被抬升到雾顶附近。日出以后,雾顶继续维持着深厚的逆温层,而且逆温强度愈来愈大,平均强度由07时的 $1.9^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 增大到12时的 $4.1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。午后,在深厚的强逆温层下不能形成较强的对流,因而

雾未能消散,而是主体聚集在逆温层下形成低云。

日出以后雾顶之上逆温层增强的主要原因有二:一是雾顶辐射降温比较强,二是在雾顶上部有下沉增温和平流增温^[6]。图 3 是 12 月 27 日各时次的温度廓线。由图可以看到,07 至 09 时,地面层虽在增暖,但由于雾顶冷却率大,因而逆温层底温度继续下降,说明雾直接吸收的太阳辐射较长波辐射失热来得小。从 10 时到 12 时,地面吸收了太阳辐射增温,并以乱流方式将热量传向上面空气,使得整个雾体增温,因而雾顶附近的逆温层底温度相应上升,但由于逆温层上部增温幅度更大,从而使逆温层不仅未被破坏,而且进一步增强。在图 4 中也可以看到,雾形成以后,在雾层之上,300m 以上高空,气温升高,相对湿度急剧下降,特别是 9~11 时,气温升高速率远远超过了贴地气层因太阳辐射而引起的升温率。这一点在重庆^[7]、成都^[8]、西双版纳^[9]都是未出现过的。这种急剧的升温仅用贴地层热量传输是不能解释的,它与下沉增温有关,在文献^[6]中详细讨论了这个问题。在图 4 中还可以清楚地看到,在雾顶的上界等温线最密集,表明这里逆温强度最大;等相对湿度线也密集,特别是处于成熟时期的雾顶,等相对湿度线最为密集,表明湿度梯度达最大值,雾顶之上湿度则急剧下降。

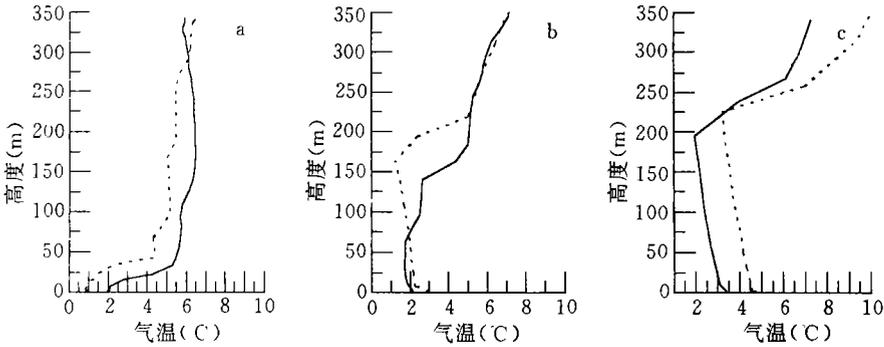


图 3 12 月 27 日各时次的温度廓线

(a. 实线为 04 时,虚线为 06 时;b. 实线为 07 时,虚线为 09 时;c. 实线为 10 时,虚线为 12 时)

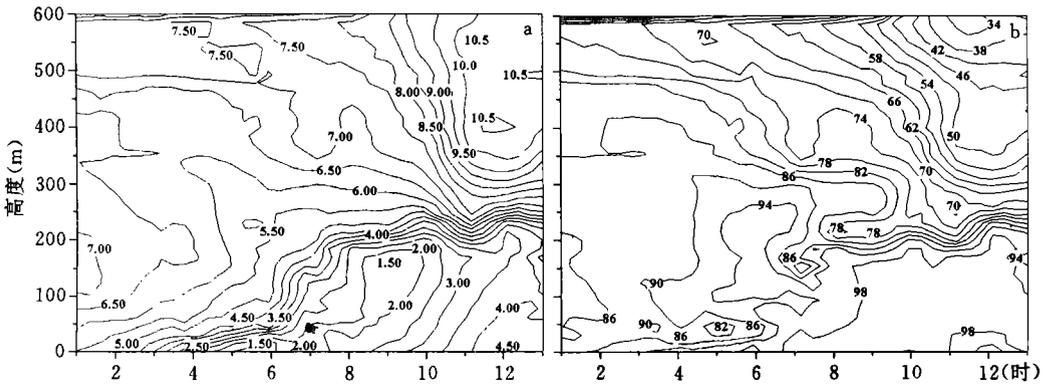


图 4 12 月 27 日气温和相对湿度时间剖面图

(a. 为气温;b. 为相对湿度)

4 雾的微物理结构

研究雾的微物理结构及与宏观发展过程之间的关系,对了解成雾机制及探讨消雾途径极为重要。描写雾的微观结构的物理量,包括雾滴数密度(N)、质点大小(D)、含水量(w)。能见距离(L)用下列公式计算^[10]:

$$L = \frac{2 \cdot 62 r_c}{w}$$

式中 r_c 为有效平均半径,即

$$r_c = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}$$

这里 $n(r)$ 为雾滴半径分布函数。由于没有考虑大量气溶胶质粒对能见距离的影响,计算结果要比实际的大。

4.1 微物理特征量及其演变

表 1 列出了雾的微物理特征量。为便于比较,表中同时给出了上海和重庆的相应微结构参数。由表 1 可见,就含水量来说,南京汤山为 $0.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,与南京盘城 3 次观测的平均值接近,比上海小,比重庆大;就平均直径而言,汤山为 $12.4 \mu\text{m}$,比上海、重庆都要大,但汤山的雾滴数密度远小于上海、重庆。空气污染影响雾的微结构,从而严重影响雾中能见度。表 1 中盘城观测的数密度远远大于汤山,这是由于盘城靠近南京大厂工业区,与大厂区空气污染密切相关。大厂排出的大量污染颗粒物,有许多可作为凝结核凝结成雾滴,雾滴数密度愈大,则其尺度就愈小。从表 1 中还可以看出,盘城雾滴数密度随时间愈来愈大。这与雾区稳定的大气层结及强逆温层有关,连续几天强逆温层的存在,使得大量污染颗粒物在近地层不断聚集,从而使雾滴数密度连续剧增,甚至超过了中国雾滴数密度最大的重庆市。

表 1 雾的微物理结构

时 间	地点	数密度 N (个 $\cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量 w ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均直径 D (μm)	最大直径 D_{max} (μm)	样本数	
1996-12-27	5:20—11:15	汤山	48.4	0.14	12.4	57.5	31
1996-12-29	7:50—10:40	盘城	152.6	0.09	6.0	39.5	12
	21:40—0:20	盘城	1517.0	0.17	4.6	29.3	13
1996-12-30	7:15—11:25	盘城	2047.7	0.25	4.5	32.4	31
1997-1-21	2:12—3:30	阳澄湖	268.6	0.04	4.8	31.7	7
1989-1		上海	173	0.26	5.0	54.8	
1989-12~1990-1		重庆	606	0.07	4.2	23.8	

上面介绍的雾的微物理结构是地面雾的平均状况。实际上在雾的宏观发展过程中,雾的微结构是随之不断变化的。

图 5 给出了 12 月 27 日汤山雾平均直径(D)、最大直径(D_{max})、数密度(N)、含水量(w)、能见距离(L)及气温(T)随时间的演变。能见距离(L)数值上与实测虽有差异,但变

化趋势是一致的。由图 5 可以看出:① 雾进入发展阶段以后,平均直径与数密度呈反相关趋势,即雾滴直径大时,数密度减小,而数密度增大,则直径减小;② 含水量大体与数密度、最大直径的变化趋势一致,即含水量的变化依赖于数密度和大雾滴;③ 能见度与含水量、数密度变化趋势相反,即含水量和数密度的增大都能使能见距离减小。

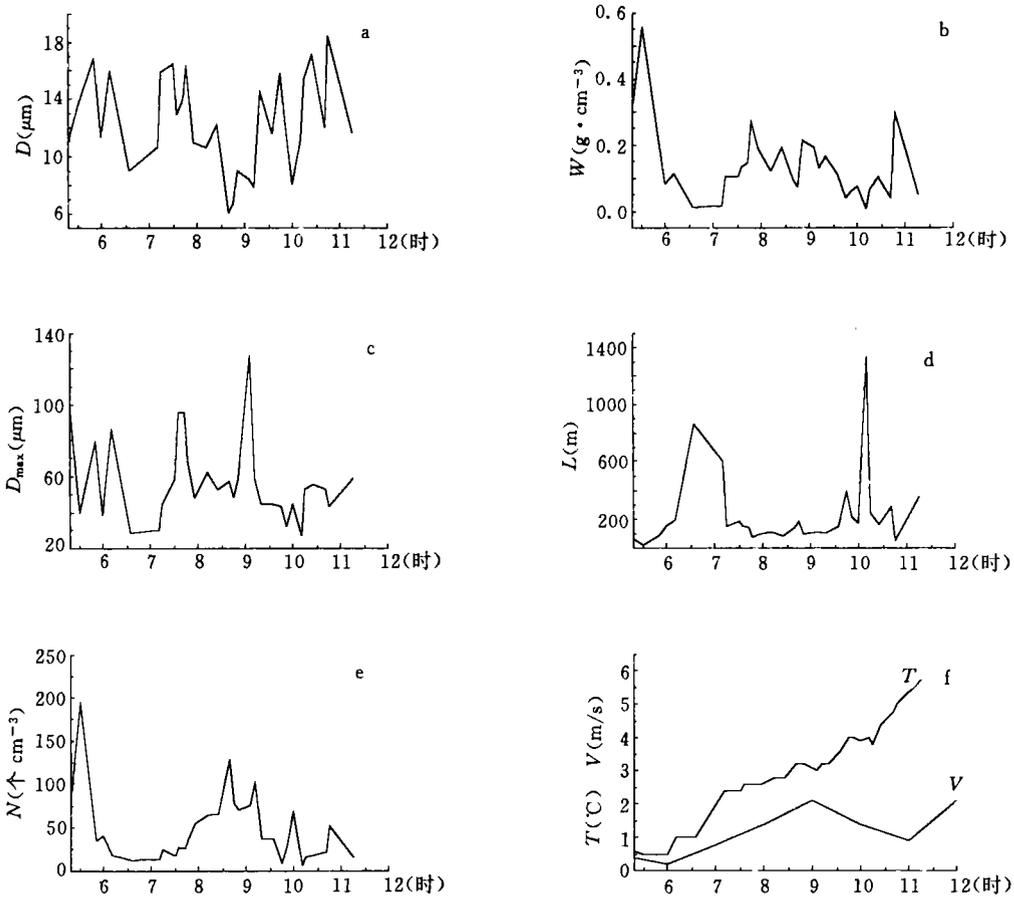


图 5 微物理特征量的演变

如果按前面划分的雾宏观发展过程的各个阶段来研究雾的微结构特征,则可计算得出表 2。由表 2 和图 5 都可以看出,雾的形成来得很快,数密度和含水量均很快达到全过程中的最大值,平均能见距离减小到 30m 左右。这是由于在形成阶段降温率大,有大量凝结核活化、凝结,而湍流垂直交换又很弱,雾体聚集在贴地气层,最大厚度仅 13m。在发展阶段,由于雾滴凝结潜热释放(发展一)以及日出后地面接收太阳辐射增温(发展二),雾体内气温升高很快(见图 5f),而雾顶辐射冷却增强,因而雾内层结稳定度减小,湍流垂直输送增强,甚至出现弱对流,导致雾体向上发展,使地面雾滴数密度和含水量明显减小。在图 5 中,06~08 时,含水量和数密度曲线位于明显凹区,而能见距离明显增大,正是反映了这个事实。在成熟阶段,雾顶高度起伏变化,地面层雾滴数密度和含水量也起伏变化,但其变

化趋势位相相反。为了研究这种变化趋势与湍流垂直交换的关系,利用图5的 T, V 资料,计算了雾底层的梯度理查孙数 Ri ,结果如图6所示。结合图5可以看到,当 Ri 减小,即湍流垂直交换增强时,雾顶升高,同时含水量及数密度趋向减小;当 Ri 增大,即湍流混合作用减弱时,雾顶降低,同时含水量及雾滴数密度趋向增大。

表2 12月27日雾各个阶段的微物理结构

时间	阶段	N (个/cm ³)	W (g/m ³)	D (μm)	D_{max} (μm)	D_p (μm)	T ($^{\circ}\text{C}$)	样本
5:20-5:50	形成	142	0.38	12.3	41.6	4.8	0.6	2
5:50-7:00	发展(一)	24.4	0.09	12.9	52.8	7.4	0.6~2.6	5
7:00-9:00	发展(二)	54.7	0.16	11.4	54.0	5.2	2.8~3.2	11
9:00-11:00	成熟	39.7	0.11	12.8	52.4	9.5	3.2~5.0	12
11:00-	消散	11.6	0.04	12.6	59.2	8	5.7	1

地面雾的微结构除与宏观发展过程有关外,地面蒸发也是一个重要影响因子。由图5f、b、e可以看出,07时日出以后,气温先是急剧上升,而后变缓,09时以后,增温速度又加快。与此相对应,数密度和含水量先是随地面蒸发增强而增大,而后随太阳辐射增强而减小。进入消散阶段以后,随着气温进一步升高,雾滴因蒸发而减小,因而数密度和含水量都明显减小,能见距离随之明显增大。应该指出,由于雾的主体并未减弱,而是聚集在强逆温层下,因而地面时而观测到沉降的大滴。以上分析的是雾的微结构变化趋势与环境因子、宏观过程之间的关系。

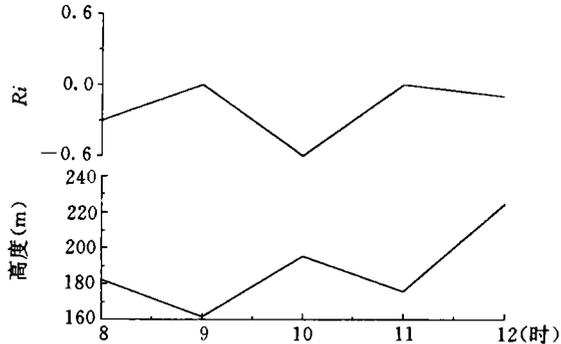


图6 成熟阶段雾底层 Ri 、雾顶高度随时间的变化

仔细分析图5可以看出,雾的微结构起伏变化,特别是07时以后,含水量和数密度都有明显的周期为20~30min的振荡现象。Bott^[11]的一维辐射雾模式模拟结果,也出现了周期为15~20min的含水量的准周期振荡,他用重力沉降的起伏解释了这个现象。黄玉生、李子华等^[9]研究西双版纳辐射雾时,指出这种起伏是由于重力碰并、沉降与核化、凝结过程交叉起主要作用而造成的。毫无疑问,微结构的振荡,受到雾体结构不均匀或平流因素的影响,但主要与微物理过程的起伏有关。

总起来看,地面雾的微物理结构的变化,不仅与环境因子(如温、湿、气溶胶粒子等)变化有关,也受到由湍流垂直混合引起的热量和水份铅直通量的影响。雾微结构的振荡与雾的微物理过程的起伏有关。

4.2 雾滴谱分布及其演变

不同大小雾滴的数密度分布,是表征雾的微物理特征的一个重要方面。图7是12月27日南京汤山雾的平均谱分布。根据实测资料,利用最小二乘法拟合了平均雾滴谱公式。

结果表明,雾滴直径分布函数 $n(D)$ 满足 Deimendjian 分布:

$$n(D) = aD^\alpha \exp(-bD^\beta)$$

式中 $a=3.1187, \alpha=0.3937, b=0.1090, \beta=1.055$, 样本标准差 $S=0.5863$ 。

图 7 中,折线代表观测值,较平滑的一条为由公式计算得到的分布曲线。可见上述公式反映了雾滴谱的基本特征。与文献[12]比较表明,南京汤山雾滴谱与重庆沙坪坝雾滴谱类似。

对取样得到的所有样本都做了谱分布图。分析这些谱分布,得出雾滴谱随时间是不断变化的,特别是不同发展阶段的雾滴谱有很大差异。图 8 给出了 12 月 27 日各阶段的雾滴谱图。可以看出,在雾形成阶段(后期),小滴数密度很大,谱也比较宽,说明地面雾形成时,核化、凝结、碰并过程进行得很快。在发展(一)阶段,各种尺度雾

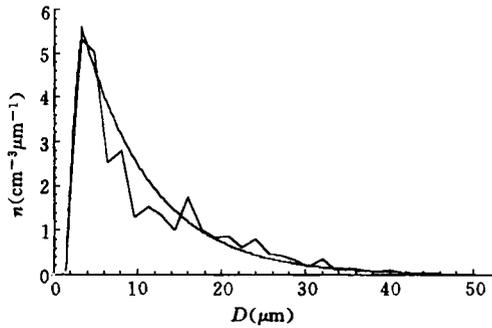


图 7 12 月 27 日汤山平均雾滴谱分布

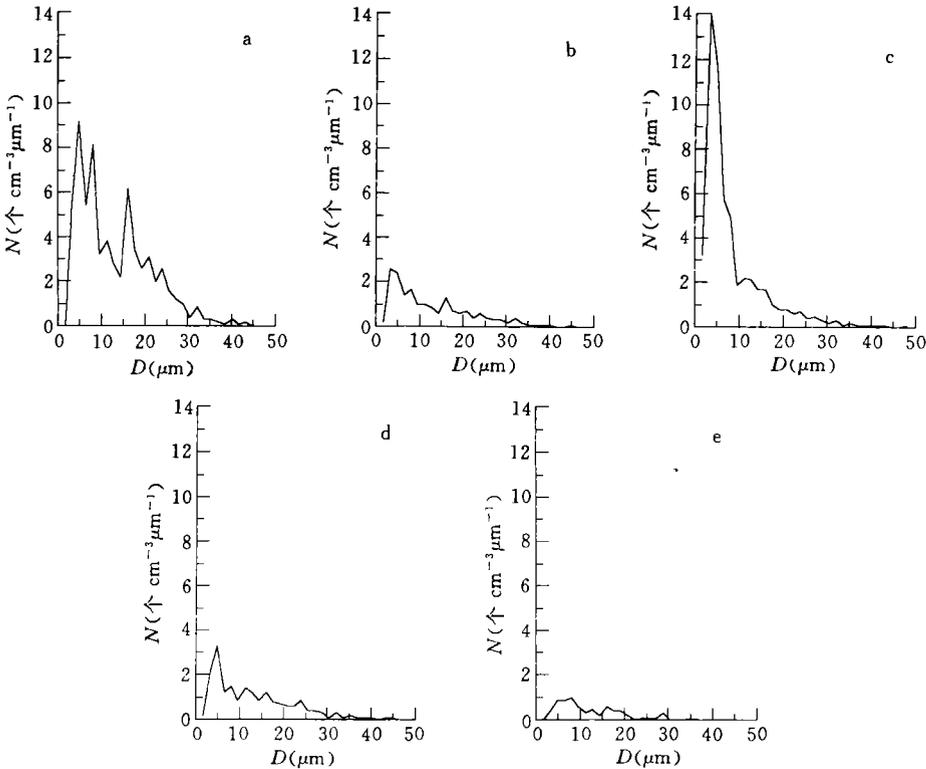


图 8 不同发展阶段的雾滴谱

(a. 形成阶段(后期); b. 发展阶段(一); c. 发展阶段(二); d. 成熟阶段; e. 消亡阶段)

滴数密度都减小,尤其是小滴减小更为明显,这是地面雾突发向上输送,而使雾顶跃增的结果。在发展(二)阶段,雾滴数密度增加,这是由于日出后地面蒸发增强,有大量凝结核核化,凝结成小雾滴。在成熟阶段,随着温度逐渐升高,地面雾滴总体上虽蒸发减小,但雾滴谱序列图(图略)表现出滴谱分布起伏变化,雾滴数密度、谱宽、峰值直径等也在不停地起伏变化,说明在这一阶段,核化、凝结、碰并、蒸发以及沉降等微物理过程十分活跃,湍流垂直交换作用也比较大。在消亡阶段,地面雾以蒸发为主,各档雾滴数都明显减少。但由于雾的主体聚集在逆温层下 90~225 m 高度层,在湍流垂直交换作用下,地面雾始终没有消尽,能见距离维持在 600~800 m 之间。

5 结论

由以上分析可以得出:

- (1) 辐射雾是在贴地气层降温率最大、逆温层最强时形成的;
- (2) 当贴地气层雾浓度增大、凝结潜热大量释放及日出后湍流增强时,地面雾会突发性向上发展,而使雾层厚度跃增。与此同时,地面雾浓度减小;
- (3) 深厚逆温层的维持对雾层长时间维持起着重要作用;
- (4) 空气污染影响雾的微结构。随着污染颗粒物增多,雾滴数密度增大,平均尺度减小,能见距离减小;
- (5) 雾滴谱型式满足 Deimendjian 分布。在不同的发展阶段,雾滴谱也有很大差异;
- (6) 地面雾微物理结构的变化与环境因子变化有关,微物理过程与宏观发展过程紧密相联。

参考文献

- 1 Taylor, G I. The formation of fog and mist. *Quart J R Meteor Soc*, 1917, XLIII, 241-268
- 2 Roach W T, Brown R, Caughy S J, et al. The Physics of radiation fog. Part I: A field study. *Quart J R Meteor Soc*, 1976, 102, 313-333
- 3 Pillie R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. The life cycle of valley fog. Part 1: Micrometeorological Characteristics. *J Appl Meteor*, 1975, 14, 347-363
- 4 Jiusto J E, Lala G G. Radiation fog field Program, recent studies ASRC-SUNY, 1983. 869
- 5 李子华, 彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特性. *气象学报*, 1994, 52(4): 477-483
- 6 葛良玉, 江燕如, 梁汉明等. 1996 年末沪宁线持续 5 天大雾的原因探讨. *气象科学*, 1998, 18(2): 181-188
- 7 Li Zihua, Zhang Limin, Zhang Qinghong. The physical structure of the winter fog in Chongqing metropolitan area and its formation process. *A M S*, 1994, 8(3): 316-328
- 8 李子华, 仲良喜, 余香仁. 西南地区和长江下游雾的时空分布和物理结构. *地理学报*, 1992, 47(3): 242-251
- 9 黄玉生, 李子华等. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究. *气象学报*, 1992, 50(1): 112-117
- 10 E J 麦卡特尼. 大气光学. 潘乃先等译. 北京: 科学出版社, 1988. 310-311
- 11 Bott A, Sievers U, Zdunkowski W. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics. *J Atmos Sci*, 1990. 147: 2153-2166
- 12 李子华, 吴君. 重庆市区冬季雾滴谱特征. *南京气象学院学报*, 1995, 18(1): 46-51

PHYSICAL STRUCTURES OF THE FIVE-DAY SUSTAINED FOG AROUND NANJING IN 1996

Li Zihua Huang Jianping

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Zhou Yuquan

(*Weather Modification Office of Henan Province, Zhengzhou, 450003*)

Zhu Shiwu

(*Jiangsu Research Institute of Meteorological Sciences, Nanjing, 210008*)

Abstract

Sustained heavy fog occurred in Nanjing during 27—31 December 1996. The characters of the ABL structure and evolution of microstructure are analysed, and the physical development of the fog is also studied based on the data from ADAS and the triplex droplet collector.

Key words: Radiation fog, Microstructure, Physical structure