

南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程^{*}

唐浩华¹, 范绍佳¹, 吴 兑², 邓雪娇²

(1. 中山大学大气科学系, 广东 广州 510275;

2. 广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080)

摘 要: 南岭山地冬春季每当有华南准静止锋活动时浓雾发生的频率非常高。根据 2001 年 2—3 月南岭山地浓雾试验获取的宏观和微观资料, 分析该地浓雾微物理结构及其演变过程。结果表明: 南岭山地浓雾属于平流雾和爬坡雾, 与冷空气活动(锋面)密切相关, 具有持续时间长, 能见度极其恶劣等特征; 平均数密度(N)、平均直径(D)和含水量(W)等微物理结构参量随时间变化很大, 彼此存在关联; 雾滴谱在浓雾过程中不断变化, 反映了核化、凝结和碰并(或碰撞)、沉降等微物理过程的不平衡发展。

关键词: 南岭山地; 平流雾和爬坡雾; 微物理结构; 微物理过程

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2002)04-0092-05

南岭山地地处亚热带湿润型季风气候区, 每年 10 月至次年 5 月每当有华南准静止锋活动时常有平流雾与爬坡雾高频发生, 每月浓雾日可高达 15~18 d, 能见度极其恶劣。正在建设之中的中国最长的高速公路——京珠高速公路穿越南岭山脉, 在其粤北的乐昌至乳源段, 路面海拔高度从 200 多 m 增至 800 多 m, 山地的抬升使雾害加剧, 严重影响当地交通安全。京珠高速公路建成后即将面临的安全行车和雾区行车监控等问题, 直接影响着该高速公路的经济效益和社会效益, 因此有必要对该地浓雾的物理结构及其演变过程进行研究, 为最终建立高速公路的安全行车预警监控系统提供基本的背景资料。

国外在过去的 30 多年中, 曾进行过多次雾的外场试验。1970 年美国在纽约附近的埃尔曼拉山谷^[1]和纽约州的阿尔巴尼^[2]、1971 年英国在贝福德郡卡丁顿^[3]、1989 年意大利在波河河谷^[4]等地都对雾进行了广泛的观测研究。中国自 20 世纪 60 年代以来, 在西南地区、长江流域和闽、皖、浙等省地也相继进行了雾的微物理结构观测和研究。比较大的计划有沪宁高速公路雾研究^[7,8]、重庆辐射雾观测^[9]和西双版纳雾研究^[10]等。然而, 以往大多数的研究主要以辐射雾为研究对象, 而对平流雾的研究甚少, 尤其在國內。

1998 年 12 月 28 日—1999 年 1 月 23 日以及 2001 年 2 月 13 日—3 月 8 日, 吴兑等人对南岭山地

浓雾进行了 2 次大规模的外场试验。本文主要目的是根据第 2 次浓雾试验(2001 年 2—3 月)获取的雾滴谱等实测资料, 重点分析浓雾的微物理结构及其演变过程, 并揭示浓雾宏观物理过程的相互关系。

1 资料概况

观测地点选在粤北乐昌市云岩镇的开封小学, 海拔高度为 815 m, 距离京珠高速公路翻越南岭山脉的最高点只有百米之遥, 获取资料有较好的代表性。微物理结构观测用三用滴谱仪, 利用惯性使雾滴沉降在涂有变压器油与白凡士林调配的油层的取样片基上, 经显微摄像后再读取雾滴大小和个数, 从而得到雾滴谱资料, 资料处理时需进行捕获系数订正。含水量观测用含有淀粉的滤纸熏磺蒸汽, 产生蓝色斑痕的方法直接测得。本文所用资料包括两个浓雾过程(2001 年 2 月 24—28 日和 2001 年 3 月 7—8 日)共 7 个雾日的雾滴谱资料 103 份共 1570 帧, 含水量资料 296 份以及 2001 年 2—3 月的目测能见度 and 常规气象观测资料。

2 雾的宏观发展过程

在南岭山地观测到的 2 次浓雾过程都与冷空气活动(锋面)密切相关, 发生在弱冷空气西路补充的时候, 雾维持期间地面保持冷高压脊的形势, 观测现场主要盛行偏北风。

* 收稿日期: 2002-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49975001)

作者简介: 唐浩华(1976—), 男, 硕士研究生; 通讯联系人: 范绍佳; E-mail: eesfj@zsu.edu.cn

第一次雾过程发生于 2001 年 24—28 日，起雾时间为 1:45，持续 105 h，气温 1.0~11.0℃，平均 3.7℃；第 2 次雾过程发生在 2001 年 3 月 7—8 日，起雾时间为 2:38，持续 35 h，气温 4.2~13.6℃，平均温度 7.0℃。

图 1 给出了 2 个浓雾过程地面气温与能见度随时间的演变。由图可以看到如下几个特征：

(1) 雾的生消与天气系统密切相关。2 次浓雾过程都是在冷锋过境后气温急剧下降的情况下出现，雾的维持时间与系统控制时间相一致，系统东移、气团变性则雾崩溃、消散。

(2) 浓雾过程持续时间长，第一过程长达 105 h，第二过程 35 h。参照第一次试验的结果可发现^[9]，1998 年 12 月—1999 年 1 月观测的 3 个浓雾过程持续时间都超过 40 h。

(3) 浓雾过程没有明显的日变化特征。该地浓雾属于平流雾和爬坡雾，其发生发展过程与过去研究的辐射雾不同。辐射雾强依赖于温度的变化，具

有明显的日变化特征，它们往往起因于夜间的强辐射降温、逆温作用，有利的天气背景、环境因素的配合使雾得到发展，次日太阳的加热作用使雾崩溃、消散。然而，南岭山地浓雾从出现至消散并没有表现出明显的日变化规律，白天和夜晚雾的特征相差不大。

(4) 浓雾过程普遍出现低视程现象。在观测过程中，能见度十分恶劣，最小的能见距离不足 35 m。根据观测资料统计得到，能见距离小于 100 m 的观测值占总观测值的 35%，小于 200 m 的观测值占 73%。

(5) 雾的团块结构表现明显。在观测到的浓雾过程中，有时不同方位的雾浓度不一样，偶尔或间断会出现能见度好转的现象。在观测现场，即使在几分钟时间内（或瞬间）能见度变化都可能很大。这种团块结构是雾的典型特征，与下垫面、锋面扰动以及云内微观结构的空间分布不均匀有关。

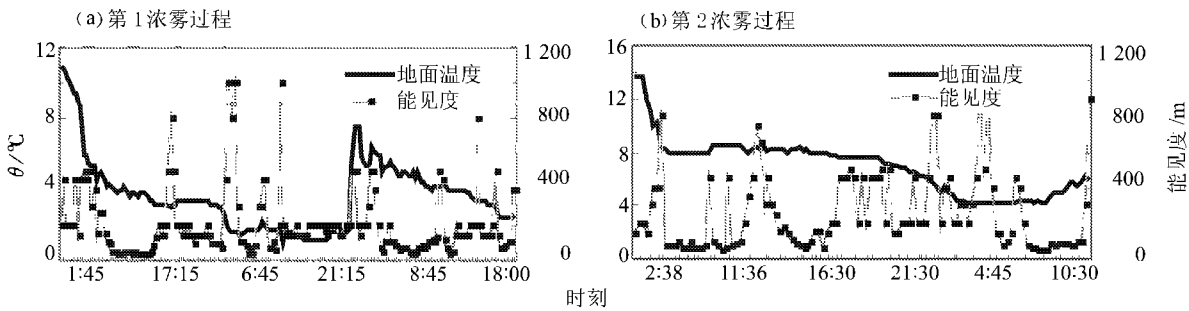


图 1 浓雾过程地面气温与能见度随时间的演变

Fig. 1 Temporal variation of the ground temperature and visibility

3 雾的微物理结构及其演变过程

3.1 微物理结构主要参量

由表 1 可以发现，南岭山地 2001 年 2 个浓雾过程的观测结果与 1999 年观测的相差不大，平均数密度约为 187.7 个/cm³，平均直径约为 7.6 μm，计算含水量与实测含水量相近，介于 0.140~0.186 g/m³ 之间。

重庆、成都与南京的城市雾的数密度比较大，尤其是南京的盘城，平均数密度为 1 518 个/cm³，约为南岭山地的 8 倍。这可能与盘城靠近南京大厂工业区，大厂排出的大量污染颗粒物可作为凝结核有关。许多研究也表明大城市的浓雾发生与城市的空气污染^[12]、城市热岛等因素关系密切，重庆雾

的数密度较高就是个典型的例子。南岭山地雾与西双版纳勐养山地雾的平均数密度比城市雾小，这是由于山区空气较为清洁，空气中凝结核较少所致。舟山海雾的平均数密度最小，但平均直径最大，这与临海地区的大量巨盐粒子作为凝结核有关。此外，无论是山地雾、城市雾，还是海雾，其含水量无明显差异。

3.2 微物理结构参量的演变及其与能见度的关系

观测发现，在雾的发生发展过程中，各微物理参量都是不断变化的，而且变化的幅度比较大。图 2 给出了本次试验第 1 浓雾过程的雾滴平均直径 (D)、平均数密度 (N)、含水量 (W) 以及能见度 (L) 的演变过程。由图可以看到，各物理参量虽然在不断变化，但彼此之间存在关联：

表 1 南岭、重庆等地雾的微物理结构参量比较

Tab 1 Comparison of the microphysical parameters of fog over different areas

观测地点	观测时间	平均数密度 (个·cm ⁻³)	算术平均直径 / μm	均平方根直径 / μm	均立方根直径 / μm	实测含水量 (g·m ⁻³)	计算含水量 (g·m ⁻³)
南岭山地	20010224—0228	191.4	8.2	10.0	12.1	0.155	0.173
	20010307—0308	201.7	7.2	8.8	10.7	0.115	0.140
	19990111—0115 ^[6]	170.2	7.5	9.7	12.1	0.148	0.186
四川重庆 ^[11]	198912—199001	606	3.2	—	—	—	0.07
四川成都 ^[11]	198512—198601	417.4	8.3	—	—	—	0.5
南京盘城 ^[11]	19961230	1518	3.8	—	—	—	0.19
云南勐养 ^[11]	19971126—1129	222	8.1	—	—	—	0.11
浙江舟山 ^[11]	198504—05	37.1	22.1	—	—	—	0.37

(1) 雾滴平均直径(D)与平均数密度(N)呈反相关趋势,这反映了雾滴核化、凝结和碰并(或碰撞)等微物理过程的变化。一般来说,当核化和凝结占主导作用时,小滴数会大量增加,从而使 N 增大, D 相应减小,这种情况通常在雾的形成阶段表现比较明显;当碰并(或碰撞)过程占优时,小滴数减少,大滴将增加,从而使 N 减小, D 相应增大,这种情况在雾发展阶段和成熟阶段表现较为明显。

(2) 平均含水量(W)与能见度(L)呈反相关趋势,即 W 增大, L 减小; W 减小,则 L 增大。 L 与 W 的关系式^[9]为: $L = Cr/W$,其中 C 为经验常数,值为2.5; $\bar{r}$ 为雾滴平均半径。

(3) 平均含水量(W)的起伏变化程度明显比能见度(L)大,这是雾的微物理过程变化剧烈的一个表现。关于含水量起伏变化的振荡现象,Bott^[5]、李子华等^[7]指出这是由于重力碰并、沉降与核化、凝结过程交叉作用引起的。南岭山地浓雾平均含水量等微物理结构参量的起伏变化,除了与雾体本身结构不均匀有关外,环境因素的影响也是不可忽视的。南岭山地下垫面极其复杂,当雾体随环境风平移到不均匀的下垫面时,不规则的爬坡、翻越山坡运动是造成雾体微物理结构不均匀、振荡起伏变化的另一重要原因。

综合前述雾的宏观发展过程,并结合地面雾的微观发展情况,可将南岭山地浓雾的生消过程分为形成、发展和消散3个阶段。需要指出的是,过往研究的辐射雾强依赖于地面辐射降温过程,其发生发展过程有明显的规律可循。李子华等^[7]的研究表明,辐射雾形成后都是经过迅猛的发展第一阶段,接着雾层爆发性增厚,进入发展第二阶段,然后再进入相对稳定的成熟阶段。然而,南岭山地雾属于平流雾和爬坡雾,其发生发展过程并不是依赖于辐射降温过程,而是依赖于系统的强弱以及气团的运动过程。当系统经过南岭不均匀的下垫面时,气团不规

则的爬坡、越坡运动以及气团空气的不连续输送使该地浓雾在发展过程中产生强烈的振荡不稳定,从而很难辨别出雾的发展阶段与成熟阶段之间的差异。为方便起见,本文把南岭山地雾的发展阶段和成熟阶段合并成一个阶段(发展阶段)考虑。

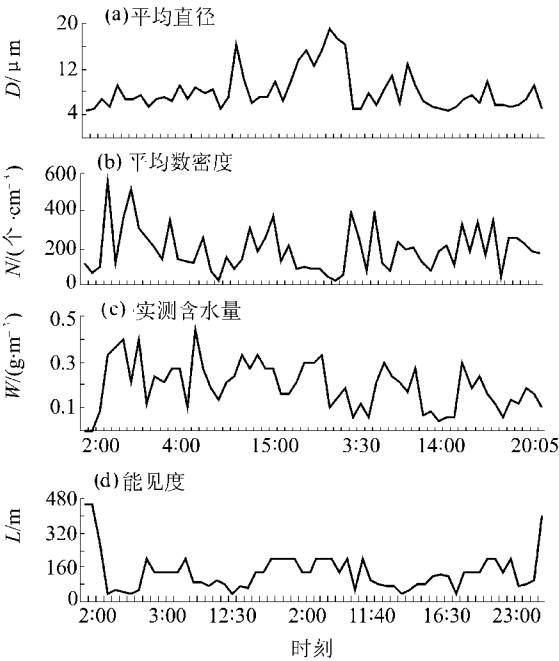


图 2 第 1 浓雾过程物理参量随时间的演变

Fig 2 Temporal variatoin of the physical parameters during the first process

由图 2 可以看到,在雾的初生阶段, W 和 D 都比较小, N 逐渐增大, L 则相应减小。这个阶段时间很短,一般持续 0.5~1.0 h。在该阶段的前半期,显微镜可以看到很小的雾滴,但含水量的采样滤纸上尚无明显的斑痕,因此容易被漏测,雾滴谱读数的误差也表现比较明显。

雾形成以后,很快就进入发展阶段。在该阶段的前期,雾的微物理结构迅猛发展, N 和 D 在短

时间内都有较明显的增幅， W 也增大到几乎是全过程的最大值，而 L 则降为最低值。可以推断，这个时期核化、凝结和碰并增长等微物理过程表现非常活跃。雾滴增长最旺盛时，还出现了毛毛雨或小雨。之后，雾进入一段强烈振荡的发展时期，微物理结构参量以及能见度的变化显得极不规则，毫无规律可循。这与系统冷空气的补充和减弱，或者系统在南岭山地来回摆动、停滞有密切关系。当雾进入发展阶段后期时，微物理结构参量再次呈现出与前期相似的特征，即 W 、 D 和 N 增大， L 减小的趋势，但增幅没有前期明显。这可能与气温开始缓慢回升，地面蒸发增强，空气水汽增多有关。雾消散阶段的重要特征是， N 、 W 和 D 都逐渐减小，而 L 则迅速转好。这个阶段持续时间也很短。

以上分析表明，雾的宏观和微观物理过程紧密相连、相互促进、相互影响。因此研究雾的时候，有必要把宏观和微观物理过程结合起来一起考虑。

3.3 雾滴谱分布及其演变

雾滴谱是指不同大小雾滴的数密度分布状况，是表征雾的微物理特征的一个重要方面。对 2 个浓雾过程完整的序列观测进行平均，求得雾滴平均谱分布，如图 3 所示。由图可以发现，2 个浓雾过程的雾滴谱曲线符合指数递减规律，谱型均为“单峰”结构，整个谱明显偏向小滴一端；雾滴谱径主要出现在 $4\sim8\ \mu\text{m}$ ，峰值位于 $4\ \mu\text{m}$ 处；最大谱径超过 $40\ \mu\text{m}$ ，但大滴的数密度很小。以上特征与层云云滴非常相似。

本文以第 2 浓雾过程（即 3 月 7—8 日）为例，分析各阶段雾滴谱的演变特征，如图 4 所示。需要

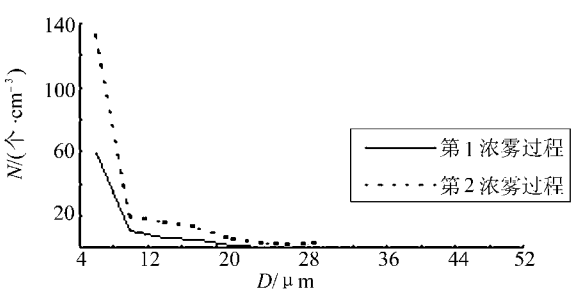


图 3 2 个浓雾过程平均谱分布
Fig 3 Averaged droplet spectra distribution

注意的是，雾在初生阶段浓度非常小，而且雾滴大小尚未达到观测仪器的分辨率，因此不易取样，雾滴谱观测是在雾体形成阶段后期才开始的。由图可以看到，在雾的形成阶段（后期）（图 4(a)），谱宽较大，达到 $40\ \mu\text{m}$ ，雾滴数较小，尚未达到 $20\ \text{个}/\text{cm}^3$ ，说明形成后期，碰并（或碰撞）过程占主导作用。当雾进入发展阶段后（图 4(b)–(e)），核化、凝结和碰撞、碰并、沉降等微物理过程表现非常活跃，但这些过程发展并不平衡，当雾滴碰撞或碰并增长，出现大滴后，便向地面沉降，使大滴减少，含水量减小；然而核化、凝结过程的发展又使小滴数剧增，为下次碰撞或碰并增长准备条件，从而导致雾滴谱分布的起伏变化。从图可以发现，雾谱曲线反复演绎“数密度上升—拓宽—变窄”等变化过程，反映了雾是在“凝结核化—碰撞碰并—沉降”等微物理过程交替作用下发展起来的。雾滴谱分布曲线在消散阶段（图 4(f)）明显拓宽，各档雾滴数急剧下降，雾体内相对湿度减小，能见度迅速增大。

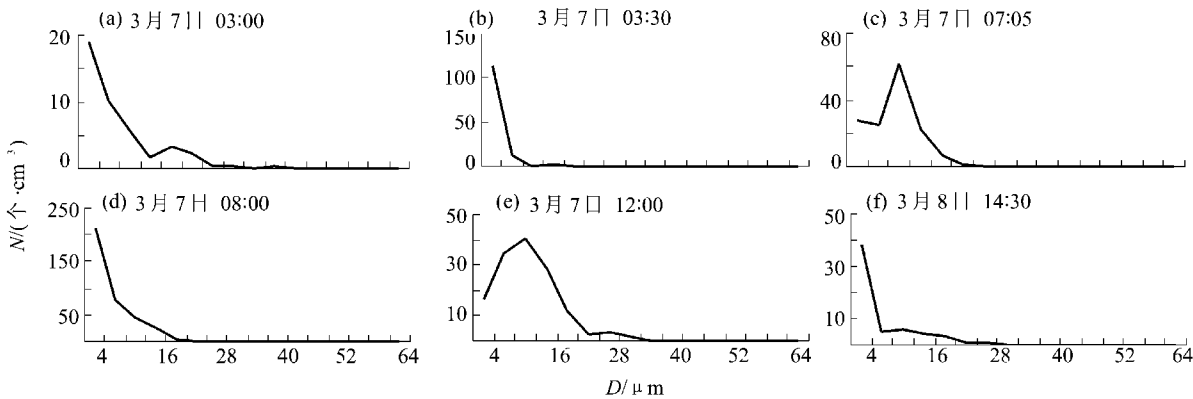


图 4 第 2 过程雾滴谱分布曲线的演变
Fig 4 Temporal variation of the droplet spectra during the second process

4 小 结

由以上分析可以得到以下几点结论：

（1）南岭山地冬春季节发生的浓雾属于平流雾和爬坡雾，与冷空气活动（锋面）密切相关，具有持续时间长、无日变化规律、能见度恶劣和团块结构明显等特征；

（2）南岭山地浓雾的平均数密度约为 187.7 个/cm³，平均直径约为 7.6 μm，计算含水量与实测含水量相近，介于 0.140~0.186 g/m³ 之间；

（3）在浓雾过程中，雾滴平均直径（*D*）、平均数密度（*N*）和含水量（*W*）等微物理结构参量随时间变化很大，但彼此之间存在关联；*D* 与 *N*、*W* 与 *L* 都呈反相关趋势；

（4）南岭山地浓雾的平均谱分布符合指数递减规律，整个谱偏向小滴一端，主要集中在 4~8 μm 之间，峰值位于 4 μm 处。在雾的发展阶段，核化、凝结和碰撞、碰并、沉降等微物理过程表现活跃，雾谱曲线反复演绎“数密度上升—拓宽—变窄”等变化过程。

参考文献：

[1] PILIE R J, MACK E J, KOCMOND W C, et al. The life cycle of valley fog (I): Micrometeorological characteristics [J]. J App Meteor, 1975, 14: 347—363.
[2] JUSTO J E, LALA GRIESER J G G. Radiation fog field

programs recent studies[J]. ASRC—SUNY, 1983 Publ. No. 869
[3] ROACH W T, BROWN R, CAUGHEY S J, et al. The physics of radiation fog (I): A field study[J]. Quart J Roy Meter Soc, 1976, 102: 313—333.
[4] FUZZI S, FACCHINI M C. The Po Valley fog experiment 1989, An overview. Tellus 1992, 44B: 448—468
[5] BOTT A, SIEVERS U, ZDUNKOWSKI W. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysi[J]. J Atmos Sci, 1990, 147: 2153—2168.
[6] 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 23—64.
[7] 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征[J]. 气象学报, 1999, 57(5): 622—631.
[8] 黄建平, 梅清银, 靳永才, 等. 沪宁地区辐射雾的微物理结构及其演变[J]. 气象, 1998, 24(5): 3—7.
[9] 李子华, 吴君. 重庆市区冬季雾滴谱特征[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(1): 46—51.
[10] 黄玉生, 黄玉仁, 李子华, 等. 西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程[J]. 气象学报, 2000, 58(6): 715—725.
[11] 李子华. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616—624.
[12] 周斌斌. 论雾与污染的关系[J]. 气象, 1994, 20(9): 19—23.

Research of the Microphysical Structure and Evolution
of Dense Fog over Nanling Mountain Area

TANG Hao hua¹, FAN Shao jia¹, WU Dui², DENG Xue jiao²

(1. Department of Atmospheric Science, Sun Yat sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China;
2. Guangzhou Institute of Tropical and Oceanic Meteorology, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Sustained advection fog will occur over Nanling mountain area while the South China Quasi-stationary front comes during autumn and winter seasons, and the dense fog will last for a long time and result in very bad visibility. The characters of the microphysical structure and evolution of the dense fog were analyzed based on field data. It was found that the microphysical parameters such as fog droplet spectrum, droplet size distribution and water content, varied continuously during the development of the dense fog, and these might be the result of asymmetrical development of the microphysical processes including condensation, collection and deposition.

Key words: Nanling Mountain area; advection fog; microphysical structure; microphysical process