

江苏北部不同等级雾的微物理结构及个例分析*

祖 繁 袁成松 吴 泓 王宏斌 朱毓颖 朱承瑛

ZU Fan YUAN Chengsong WU Hong WANG Hongbin ZHU Yuying ZHU Chengying

中国气象局交通气象重点开放实验室/江苏省气象科学研究所/南京气象科技创新研究院, 南京, 210009

Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA/ Jiangsu Institute of Meteorological Sciences/Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009, China

2019-07-22 收稿, 2020-03-20 改回.

祖繁, 袁成松, 吴泓, 王宏斌, 朱毓颖, 朱承瑛. 2020. 江苏北部不同等级雾的微物理结构及个例分析. 气象学报, 78(4): 691-704

Zu Fan, Yuan Chengsong, Wu Hong, Wang Hongbin, Zhu Yuying, Zhu Chengying. 2020. Microphysical structure of fog droplets in different levels of fog and a case study in northern Jiangsu province. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(4):691-704

Abstract Using fog droplets spectrometer data and conventional meteorological elements observed in 12 fog events in northern Jiangsu province during autumn and winter from 2015 to 2017, the microphysical characteristics and fog droplets spectra were analyzed for light fog, fog, heavy fog, dense fog and extremely dense fog. Dominant microphysical processes during fogs of different levels were discussed based on analysis of a long-lasting fog case. The results indicate that the droplets concentration and liquid water content increase significantly with the enhancement of fog level, while the droplets mean diameter and maximum diameter are similar for light fog, fog and heavy fog until the visibility decreases to less than 200 m, after which mean diameter and maximum diameter both show an obvious increase. When the visibility deteriorates, the average droplet spectra of the number concentration and liquid water content both are uplifted, and the big droplets with diameter greater than 10 μm grow notably from heavy fog to dense fog. The number concentration of fog droplets is mainly controlled by small droplets, and the liquid water content is affected by large droplets. The average liquid water content of fog droplets in Donghai county suburb is comparable to that in Nanjing, but the number concentration is only about half of that in Nanjing and the mean diameter is about 2.3 times of that in Nanjing. In the case study, condensation nuclei activation and subsequent condensational growth are the dominant microphysical process during the period of visibility decreasing from 1000 m to 50 m. However, the condensable water vapor is an important factor affecting the effect of the process, which can make the number concentration and the mean diameter show different correlations. When the visibility drops below 50 m, the effect of collision-coalescence process is remarkable. After sunrise, droplet evaporation appears and gradually reinforces.

Key words Visibility, Fog grades, Microphysical structure, Physical process, Northern Jiangsu

摘 要 利用 2015—2017 年秋冬季在江苏北部观测到 12 次雾过程的雾滴谱数据及常规气象观测资料, 统计分析了轻雾、大雾、浓雾、强浓雾和特强浓雾等级下的微物理特征量及雾滴谱分布, 并通过一次雾过程的分析, 探讨了不同雾等级下的主要微物理过程。结果表明: 随着雾等级的提升, 雾滴数浓度、含水量增长明显, 而轻雾、大雾和浓雾的雾滴平均直径和最大直径差异不大, 但当能见度小于 200 m 时, 平均直径和最大直径显著增大; 能见度下降时, 平均数浓度谱和含水量谱的谱线上抬, 从浓雾到强浓雾, 粒径大于 10 μm 的大雾滴增长明显; 雾滴数浓度主要由小雾滴控制, 雾滴含水量受大雾滴影响; 东海县郊平均的雾滴含水量与南京观测结果相差不大, 但雾滴数浓度仅为南京的一半左右, 平均直径大约是南京的 2.3 倍; 个例分析中, 能见度从 1000 m

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(41575135)、江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2016810)、江苏省自然科学基金项目(BK20161073)、江苏省气象局北极阁基金项目(BJG201701、BJG201703、BJG201606)。

作者简介: 祖繁, 主要从事云雾物理、交通气象研究。E-mail: zufan123@yeah.net

通信作者: 袁成松, 主要从事交通气象研究。E-mail: jsnjyys@vip.sina.com

下降到 50 m, 凝结核活化并凝结增长是主要微物理过程, 但可凝结水汽是影响该过程效果的一个重要因子, 可使雾滴数浓度和平均直径呈现不同的相关关系; 能见度降到 50 m 以下时, 碰并过程效果显著; 日出后雾滴蒸发作用显现并逐步增强。

关键词 能见度, 雾等级, 微物理结构, 物理过程, 江苏北部

中图法分类号 P426.4

1 引言

雾是由大量悬浮在近地层大气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶系统, 是空气中水汽凝结或凝华的产物。根据国家标准 GB/T 27964-2011《雾的预报等级》(中国气象局, 2012), 雾可依据能见度(VIS)的大小划分为轻雾($1000\text{ m} \leq \text{VIS} < 10000\text{ m}$)、大雾($500\text{ m} \leq \text{VIS} < 1000\text{ m}$)、浓雾($200\text{ m} \leq \text{VIS} < 500\text{ m}$)、强浓雾($50\text{ m} \leq \text{VIS} < 200\text{ m}$)和特强浓雾($\text{VIS} < 50\text{ m}$) 5 个等级。雾天气下的视程障碍会使高速封闭、航道停运、航班延误, 甚至引发恶性交通事故, 造成严重的人员伤亡和经济损失。因此, 提高雾的预警和预报能力对交通运输系统的安全运营有重要的意义。

雾的预报一直是数值预报的难点, Zhou 等(2012)对 NAM、RUC 和 WRF-NMM 数值模式进行北美地区低能见度($< 1\text{ km}$)的预报效果做了评估, 发现 3 种模式的 ETS 评分仅在 0.05 左右, 远低于同时期的平均降水预报评分(0.35)。雾在数值模式中可预报性低的原因有很多, 其中很重要的一点就是, 模式对次网格尺度的微物理过程缺乏合理的描述, 而与微物理过程密切联系的雾滴尺度分布和微物理特征量又对液滴凝结、蒸发、沉降及辐射等项(Brown, et al, 1976; Duynkerke, 1991)的计算有重要影响。

为揭示雾的微观物理特征及生消机制, 中外开展了一系列雾的外场观测试验(吴兑等, 2007; Niu, et al, 2012; Zhao, et al, 2013; Guo, et al, 2015; 康博识等, 2017; Fuzzi, et al, 1992; Gultepe, et al, 2009; Haeffelin, et al, 2010), 并获得了许多重要的结果。在多数雾过程中, 液态含水量通常低于 0.5 g/m^3 , 而雾滴数浓度随观测地点的改变, 量级可由 10^1 cm^{-3} 变到 10^3 cm^{-3} (Niu, et al, 2010a; Gultepe, et al, 2007; Liu, et al, 2017)。李子华等(2011a)发现不同类型雾的微物理结构特征有明显的差异, 雾滴数浓度、含水量及平均直径等微物理参数一般以平流辐射雾最大, 辐射雾次之, 蒸发雾最小。根据雾滴谱分

布特征, 辐射雾又可分为最大直径大于 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的宽谱辐射雾和最大直径小于 $22\text{ }\mu\text{m}$ 的窄谱辐射雾(Niu, et al, 2012), 且浓雾经常在很短的时间内(30 min 以内)发展为特强浓雾, 具有爆发性增强特征(濮梅娟等, 2008)。在雾生消过程中, 除了宏观天气系统的影响, 微物理过程也可改变雾的微结构, 凝结、碰并、沉降和蒸发等微物理过程交替主导, 不仅可使微物理量之间的关系呈现不同的相关关系(吕晶晶等, 2014; Degeffie, et al, 2015), 还让它们表现出起伏增长、甚至准周期振荡的特点(黄玉生等, 2000; Bott, et al, 1990)。此外, 数值模式中的能见度计算也与微物理量紧密相关, 传统的能见度参数化方案主要考虑液态含水量的大小(Kunkel, 1984), 而 Gultepe 等(2006, 2009)指出, 在相同的液态含水量条件下, 能见度变化范围很大, 仍存在较大的不确定性, 进而提出了同时考虑液态含水量和雾滴数浓度的能见度参数化方案, 提高了能见度计算的准确性。

尽管雾的微物理观测取得了丰硕的成果, 但以往的微物理特性研究多是针对能见度小于 1 km 的整个雾过程或依据能见度和微物理量的起伏变化划分的子过程(刘端阳等, 2009; Price, 2011; 岳岩裕等, 2013), 对大样本情况下不同能见度范围内的雾微物理结构特征分析却少见报道。且近几年, 江苏秋冬季大范围雾天气过程时有发生, 而苏北地区的雾持续时间往往较长, 导致该地区高速公路管制尤为频繁, 严重影响了人们的正常生活与生产活动。因此, 本研究在江苏北部东海县郊开展雾的微物理观测, 利用收集的 12 次雾过程数据, 研究轻雾、大雾、浓雾、强浓雾和特强浓雾 5 个等级下的微物理特征量及雾滴谱分布, 并通过一次持续性雾过程的分析, 探讨不同雾等级下的主要微物理过程, 期望能为雾的监测、预警能力提升提供科学依据。

2 观测及方法

2.1 观测时间、地点与仪器

2015—2017 年秋冬季在江苏东海县国家基本

气象站(34.54°N, 118.71°E, 海拔 32.9 m)观测场对苏北雾过程进行了连续观测。东海县位于连云港市西部, 西与徐州接壤, 南与宿迁相连, 观测场在县城西侧的城郊结合部, 距离县城 3 km, 周围平坦空旷, 无障碍物遮挡。

观测过程中, 温度、风速和风向等要素由江苏省无线电科学研究所生产的 DZZ4 型自动气象站采集, 能见度由洛阳凯迈环测有限公司生产的 CJY-1G 型前向散射能见度仪采集, 雾的微物理结构使用美国 DMT 公司生产的 FM-120 型雾滴谱仪测量。FM-120 型雾滴谱仪是在 FM-100 型雾滴谱仪 (Spiegel, et al, 2012) 基础上改进的新一代产品, 与 FM-100 型雾滴谱仪相比, 该雾滴谱仪测量的粒径范围仍为 2—50 μm, 但档位却由 20 档(李子华等, 2011b)变为 30 档, 在小粒径段分档更为细致, 每档的上边界分别为: 3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、16、18、20、22、24、26、28、30、32、34、36、38、40、42、44、46、48 和 50 μm。雾滴谱仪采样频率为 1 Hz, 为了与基本气象要素数据时间匹配, 对雾滴谱数据做 1 min 平均。

2.2 计算方法

雾滴数浓度(N)、液态含水量(LWC)、平均直径(D_m)和滴谱标准差(SD)等微物理特征量的计算方法参见 Zhao 等(2013)。

能见度仪计算消光系数依据 Koschmieder 定律, 计算公式如下

$$\sigma_k = \frac{-\ln \varepsilon}{VIS} \tag{1}$$

式中, ε 为对比阈值, 能见度仪通常取 0.05; VIS 为前向散射能见度仪测得的能见度; σ_k 表示大气的散射消光系数。在雾、霾低能见度情况下, 分子散射基本可以忽略 (Patterson, et al, 1976), 因此可认为大气的消光作用主要源于雾滴和霾粒的散射。

雾滴谱计算消光系数依据米散射理论, 表示为

$$\sigma_M = \int_{r_{min}}^{r_{max}} Q_{ext}(r, \lambda) n(r) \pi r^2 dr \tag{2}$$

式中, r 为粒子半径; $n(r)$ 为半径在 $r-r+dr$ 范围内的数浓度; Q_{ext} 为消光效率, 与粒子半径和光的波长(λ)有关, 由于雾滴粒子的粒径远大于可见光波长, 所以在使用雾滴谱计算消光系数的应用中 (Zhang, et al, 2014; Gultepe, et al, 2006, 2009), Q_{ext} 通常取值为 2。

3 结果分析

3.1 12 次雾过程概况

表 1 给出了观测期间在东海县郊观测到的雾过程及气象条件。根据地面及低层大气的天气形势对 12 次雾过程进行分类, 共有 7 次辐射雾, 3 次

表 1 观测期间的雾过程及气象条件
Table 1 Fog processes and meteorological elements during observational periods

个例 编号	大雾生消时间 (北京时间)	VIS<200 m持续 时间(min)	最低能见 度(m)	主导 风向	风速范围 (m/s)	温度范围 (℃)	采集 样本数	天气形势	雾类型
1	2015.10.21 03:35—09:25	285	35	N	0.1—2.1	10.2—16.0	756	高压脊均压场	辐射雾
2	2015.10.22 02:01—08:25	92	34	N	0.0—1.6	11.0—16.1	666	高压脊	辐射雾
3	2015.10.23 03:59—08:37	221	36	N	0.1—1.7	12.2—15.4	909	高压底部前部	辐射雾
4	2016.11.27 02:56—08:36	57	41	SW	0.0—1.7	-1.7—2.0	547	高压均压场	辐射雾
5	2016.12.01 03:00—09:18	155	28	W	0.0—1.9	-2.0—4.0	493	高压脊	辐射雾
6	2016.12.05 06:25—08:36	10	81	SW	0.4—2.3	1.7—4.7	518	锋前暖区均压场, 850 hPa槽线过境	锋面雾
7	2016.12.18 22:59— 12.19 10:03	151	24	N	0.0—1.6	-2.2—4.9	734	高压脊均压场, 1000 hPa暖平流	平流辐射雾
8	2016.12.31 22:22— 2017.01.01 09:09	30	44	S	0.0—2.0	-3.2—0.3	859	准静止锋暖区	锋面雾
9	2017.01.03 00:25—11:14	378	22	S	0.0—2.0	-3.0—4.5	792	高压脊均压场, 925 hPa西南暖湿平流	平流辐射雾
10	2017.01.03 19:55— 01.05 06:51	915	19	NE	0.0—4.2	-1.8—7.1	1502	冷高压脊, 850 hPa暖平流	平流辐射雾
11	2017.01.12 04:58—09:28	33	31	NE	0.0—2.0	-2.5—1.6	225	高压前部均压场	辐射雾
12	2017.01.13 06:31—09:39	52	40	NE	0.4—1.9	-3.8—-1.4	467	高压前部均压场	辐射雾

平流辐射雾,2次锋面雾。辐射雾多是在夜间或凌晨形成,日出以后消散,地面处在高压脊或高压控制的均压场中,风速较小。平流辐射雾除了地面辐射冷却作用外,低层大气还有明显的暖平流,暖平流既能促进逆温形成,又能提供水汽,使得该类型雾的低能见度持续时间较长。锋面雾受冷、暖气团交汇影响,相较于前两种类型的雾,低能见度持续时间较短,且最低能见度也较高。

3.2 雾微物理结构分析

3.2.1 不同雾等级下的微物理特征量

从轻雾、大雾、浓雾、强浓雾和特强浓雾5个等级下微物理特征量的统计结果(表2)可以看到,轻雾等级下,雾滴平均数浓度仅为 1.32 cm^{-3} ,随着能见度的下降,雾滴数浓度逐步升高,特强浓雾等级下的平均数浓度达到了 620.29 cm^{-3} ;与雾滴数浓度类似,随着雾等级的提升,雾滴含水量也呈量级式增长,能见度小于50 m的平均含水量为 0.2613 g/m^3 ;大雾等级下雾滴平均直径为 $4.29\text{ }\mu\text{m}$,

浓雾等级下雾滴平均直径为 $4.27\text{ }\mu\text{m}$,随着能见度的下降,雾滴平均直径并未增大,而雾滴数浓度和含水量均增长了一个量级,可能是因为大雾滴在增长的同时,活化凝结增长过程在不断地补充小雾滴;轻雾、大雾和浓雾的平均最大直径差异并不大,在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右,而当能见度小于200 m时,最大直径显著增大,特强浓雾等级下的最大直径为 $39.81\text{ }\mu\text{m}$,且标准差最小;从轻雾到强浓雾,雾滴谱的峰值直径由 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ 增长到 $4.51\text{ }\mu\text{m}$,但特强浓雾等级下的峰值直径较强浓雾却有所减小,为 $4.35\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.2.2 不同雾等级下雾滴谱分布

从不同能见度范围内的平均雾滴数浓度谱分布和含水量谱分布情况(图1)可以看出,整体而言,随着能见度的下降,平均数浓度谱谱线上抬,从浓雾到强浓雾,10 μm 以上谱线抬升尤为明显,这说明能见度小于200 m以后,大粒子段的雾滴数量显著增多(图1a);而且无论何种等级雾,雾滴数浓度谱总呈现偏态分布,最大峰值直径总是集中在小粒子

表2 不同雾等级下微物理特征量的平均值与标准差
Table 2 Averages and standard deviations of microphysical properties for different levels of fog

雾的等级	能见度 VIS(m)	数浓度 $N(\text{cm}^{-3})$	含水量LWC (g/m^3)	平均直径 $D_m(\mu\text{m})$	最大直径 $D_{\text{max}}(\mu\text{m})$	峰值直径 $D_p(\mu\text{m})$
轻雾	$1000\leq\text{VIS}<10000$	1.32(7.41)	0.0001(0.0012)	4.06(0.42)	18.10(7.27)	3.60(0.37)
大雾	$500\leq\text{VIS}<1000$	7.66(33.97)	0.0008(0.0050)	4.29(0.35)	20.63(7.59)	3.85(0.51)
浓雾	$200\leq\text{VIS}<500$	30.52(100.86)	0.0028(0.0136)	4.27(0.37)	21.10(7.66)	4.13(0.51)
强浓雾	$50\leq\text{VIS}<200$	285.80(285.38)	0.0795(0.1091)	5.62(1.39)	34.18(8.75)	4.51(0.33)
特强浓雾	$\text{VIS}<50$	620.29(266.18)	0.2613(0.1447)	6.88(1.10)	39.81(5.86)	4.35(0.42)

注:括号内为标准差。

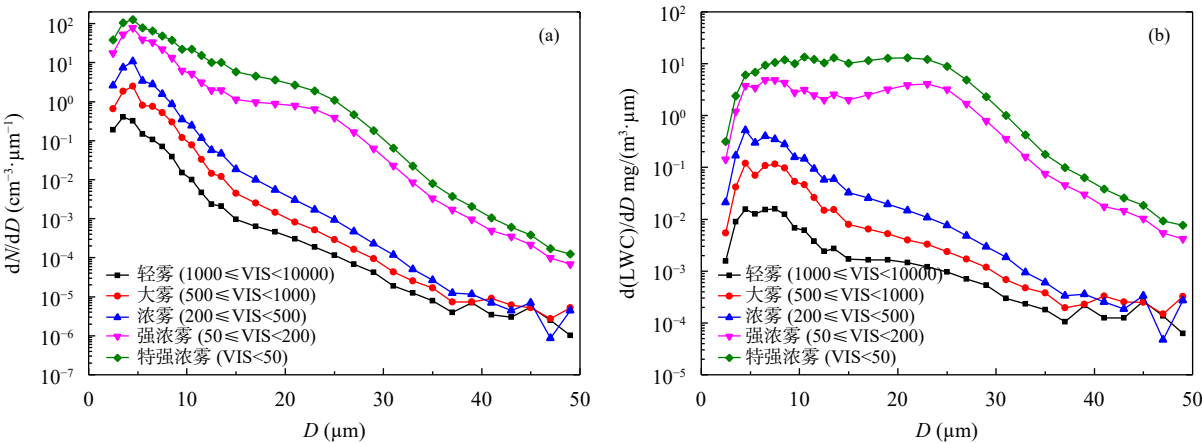


图1 不同等级雾下平均雾滴数浓度尺度分布(a)及雾滴含水量尺度分布(b)

Fig. 1 Average distributions of (a) droplets number concentration and (b) liquid water content for different levels of fog

段,表明雾滴数浓度主要由小雾滴控制。

再通过仔细辨别最大峰值位置可以发现,除了轻雾等级下最大峰值直径在第2档($D_p=3.5\text{ }\mu\text{m}$)外,能见度在1000 m以下的雾滴最大峰值直径均在第3档($D_p=4.5\text{ }\mu\text{m}$),这与南京2006—2009年冬季的平均雾滴谱峰值直径有所区别,南京观测到的雾滴数浓度谱的最大峰值直径在最小档,且平均雾滴数浓度尺度分布(dN/dD)超过了 $300\text{ cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ (Niu, et al, 2012),而东海县郊观测到的特强浓雾最大峰值直径处的 dN/dD 仅为 $127\text{ cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,这是因为南京采样点处于城市背景环境,且周边存在化工厂,空气中有大量积聚模态的气溶胶粒子(Lu, et al, 2013),为雾的形成提供了充足的凝结核,使雾滴数浓度偏高,但过多的凝结核会争食水汽,不利于雾滴增长形成大滴,导致平均尺寸偏小,谱分布曲线的峰值直径也偏小。

Γ 分布函数可以描述云中水凝物的粒子谱,且在模式微物理参数化方案中有着广泛应用(Meyers, et al, 1997; Morrison, et al, 2008)。Niu等(2010b)发现 Γ 分布也可以很好地反映雾滴尺度分布特征,因此利用 Γ 分布函数公式 $N(D)=N_0D^\mu\exp(-\lambda D)$ 对图1a中不同雾等级下的滴谱进行拟合(表3),其中 N_0 为分布截距、 μ 为形状参数、 λ 为分布斜率, R^2 为拟合的确定系数。从轻雾到浓雾, N_0 变化不大, μ 和 λ 增大,而当能见度下降到200 m以下时, N_0 显著增大, μ 和 λ 减小。从参数数值大小来看,特强浓雾等级下的 N_0 、 μ 和 λ 与蔡兆鑫等(2019)在初生积云中观测到的滴谱拟合结果相近。

从不同雾等级下雾滴含水量谱分布(图1b)来看,与雾滴数浓度谱分布一致,随着能见度的下降,平均含水量谱抬升,但不再呈现偏态的单峰分布。轻雾、大雾等级下,第6档($7.5\text{ }\mu\text{m}$)处的峰值含水量与第3档($4.5\text{ }\mu\text{m}$)处的量值大小相当;当能见度

下降到200 m以后时,大雾滴含水量谱抬升的更为明显,且显现为多峰分布,强浓雾的含水量谱峰值分别在4.5、7.5、10.5、13.5和 $23\text{ }\mu\text{m}$;特强浓雾4.5— $25\text{ }\mu\text{m}$ 的谱段较为平直, $d(\text{LWC})/dD$ 均大于 $5\text{ mg}/(\text{m}^3\cdot\mu\text{m})$,峰值分别在8.5、10.5、13.5和 $21\text{ }\mu\text{m}$,且量值相差不大。

3.2.3 雾微物理特征量与其他地区的比较

表4给出了东海县郊观测到的雾微物理参量与其他地区的比较。由于所引用的其他观测均定义能见度小于1000 m为雾,所以为了统一比较,本表格仅统计采样期间能见度在1000 m以下的微物理特征量。

雾的生消是一个复杂的过程,不仅与天气形势有关,更与局地的气候背景、地理环境、气溶胶分布特征等相联系,因此不同地区,乃至同一地区的雾过程往往有不同特征的微物理量。由表4可见,东海县郊观测到的含水量变化范围为 1.42×10^{-5} — $0.7009\text{ g}/\text{m}^3$,平均值为 $0.0693\text{ g}/\text{m}^3$,与南京的观测结果相差不大,但雾滴数浓度仅为南京的一半左右,平均直径大约是南京的2.3倍。产生该现象的原因已在上一小节中有所提及,与南京大量人为排放气溶胶质粒可充当凝结核有关。

东海县郊的雾滴平均直径为 $5.0\text{ }\mu\text{m}$,与广东湛江海雾的平均直径相当,次于水汽充足的云南热带雨林山地雾。沿海地区水汽充足,但茂名和湛江雾过程的雾滴数浓度却比较小。一方面,海陆下垫面的巨大差异使近地层水平风速存在很强的垂直切变,从而导致强烈的湍流混合和湍流输送(张舒婷等, 2013; 岳岩裕等, 2013);另一方面,海雾受平流因素的影响较大,但海雾微结构的时、空分布并不均匀,具有显著的起伏特征(黄辉军等, 2010; 张悦等, 2015)。因此,海雾往往难以长时间维持在强浓雾的水平上,其平均含水量也通常较小。

表3 不同雾等级下雾滴数浓度尺度分布的拟合参数
Table 3 Fitting parameters of droplets number concentration size distributions for different levels of fog

雾的等级	能见度VIS(m)	N_0	μ	λ	R^2
轻雾	$1000\leq\text{VIS}<10000$	0.0247	8.5932	2.2928	0.9752
大雾	$500\leq\text{VIS}<1000$	0.0160	11.9937	2.9206	0.9300
浓雾	$200\leq\text{VIS}<500$	0.0211	14.6452	3.5365	0.9429
强浓雾	$50\leq\text{VIS}<200$	1.2229	8.2192	1.8590	0.9481
特强浓雾	$\text{VIS}<50$	9.4973	4.9261	1.1038	0.9437
全部		1.4599	5.9356	1.3437	0.9434

表 4 东海县雾微物理特征量及与其他地区的比较

Table 4 Microphysical properties of the fog event in Donghai county and comparison with that in other areas

观测地点及观测时段		含水量 LWC(g/m ³)	数浓度 N(cm ⁻³)	平均直径 D _m (μm)	最大直径 D _{max} (μm)	峰值直径 D _p (μm)	地理环境
东海县 2015—2017年秋冬季	平均值	0.0693	184.5	5.0	26.7	4.1	县郊
	最小值	1.42×10 ⁻⁵	0.1	2.5	7.0	3.5	
	最大值	0.7009	1464.6	10.3	50.0	7.5	
南京 (刘端阳, 2008) 2006—2007年冬季*	平均值	0.0503	336.5	2.11	/	/	城市
	最小值	2.04×10 ⁻⁶	1.132	1.15	4.0	/	
	最大值	1.019	3248.7	8.10	50.0	/	
云南勐养 (Li, et al, 1999) 1997年11月26—29日**	平均值	0.11	222.0	8.1	38.9	4.7	山地
	最小值	0.001	2.2	4.0	12.8	3.2	
	最大值	0.667	2437.7	27.4	80.0	19.2	
广东茂名 (黄辉军等, 2009) 2007年3—4月**	平均值	0.0183	111.9	4.7	25.4	2.9	海岸
	最小值	0.0024	17.1	3.2	13.4	2.7	
	最大值	0.1808	57.1	15.3	56.1	5.3	
广东湛江 (Zhao, et al, 2013) 2010年3—4月*	平均值	0.021	54.3	5.0	26.4	2.8	海岸
	最小值	0.001	1.0	3.0	7.0	2.8	
	最大值	0.232	540.9	23.4	49.0	33.4	

*代表观测仪器为FM-100型雾滴谱仪; **代表观测仪器为三用滴谱仪。

3.3 个例分析

上文的统计特征反映了不同等级雾下的微物理量及雾滴谱的整体情况, 为进一步分析雾生消过程中微物理结构的变化, 选取能见度在不同等级雾下均有较长时间停留的个例 9, 对雾过程中微物理参量及雾滴谱的演变特征进行分析, 并由此探讨各阶段可能的主要微物理过程。

3.3.1 雾过程天气形势

2017 年 1 月 2 日 20 时至 3 日 08 时(北京时, 下同), 华东地区 500 hPa 由纬向环流控制, 没有明显的冷平流。低层(925 hPa 高度), 江苏受缓慢移动的入海弱高压控制, 配合河套、山东一带南延的暖脊, 西南暖湿气流伴随系统性下沉, 不仅有利于逆温形成, 而且还提供了充足水汽。地面图上, 苏北地区几乎一直处在南伸弱高压脊控制的均压场中, 有利于夜间地表辐射降温的增强。这是一次既受地面辐射降温影响, 又有上层西南暖湿气流供应的平流辐射雾过程。

3.3.2 微物理参量及气象要素随时间演变特征

图 2 给出了此次雾过程中东海县郊观测到的物理参量随时间演变, 图 3 给出了雾滴数浓度尺度分布及液态含水量尺度分布的变化, 根据能见度及雾滴谱的变化情况, 将此次雾过程划分为以下几个阶段。

(1) 初生阶段(阶段 I, 3 日 00 时 06 分—02 时 22 分): 该阶段能见度在大雾等级下波动。随着夜间风速的降低, 观测站点能见度在 00 时 06 分降低到 1 km 以下(图 2a), 在大雾形成之后, 能见度继续波动下降, 到 00 时 16 分前后, 风向出现了变化, 由南风转为北风(图 2f), 气温快速下降(图 2g)。经过半小时的波动, 风向又逐渐稳定在南风风向上, 暖湿气流使气温从 1.0℃ 上升到 2.6℃, 温度的升高不利于水汽在凝结核上的凝聚, 雾滴数浓度和平均直径都比较小, 最大含水量仅有 0.0009 g/m³, 能见度也一直保持在 500 m 之上。

(2) 发展阶段(阶段 II, 3 日 02 时 23 分—04 时 04 分): 能见度在浓雾等级下振荡下降。该阶段中, 风向较为稳定, 风速小于 1.0 m/s, 随着夜间地表长波辐射冷却过程的继续, 气温逐渐下降, 能见度下降到 500 m 以下并维持, 雾滴数浓度和液态含水量较阶段 I 有所增长, 但平均直径和滴谱标准差变化很小。此外, 与前一阶段相似, 阶段 II 的空气温度始终高于地表温度(图 2g), 这种温度配置有利于贴地逆温(杨军等, 2010)的形成。

(3) 爆发增强阶段(阶段 III, 3 日 04 时 05 分—05 时 30 分): 能见度主要在强浓雾等级下波动。该阶段开始前, 风向再次出现了南转北的突变, 弱冷

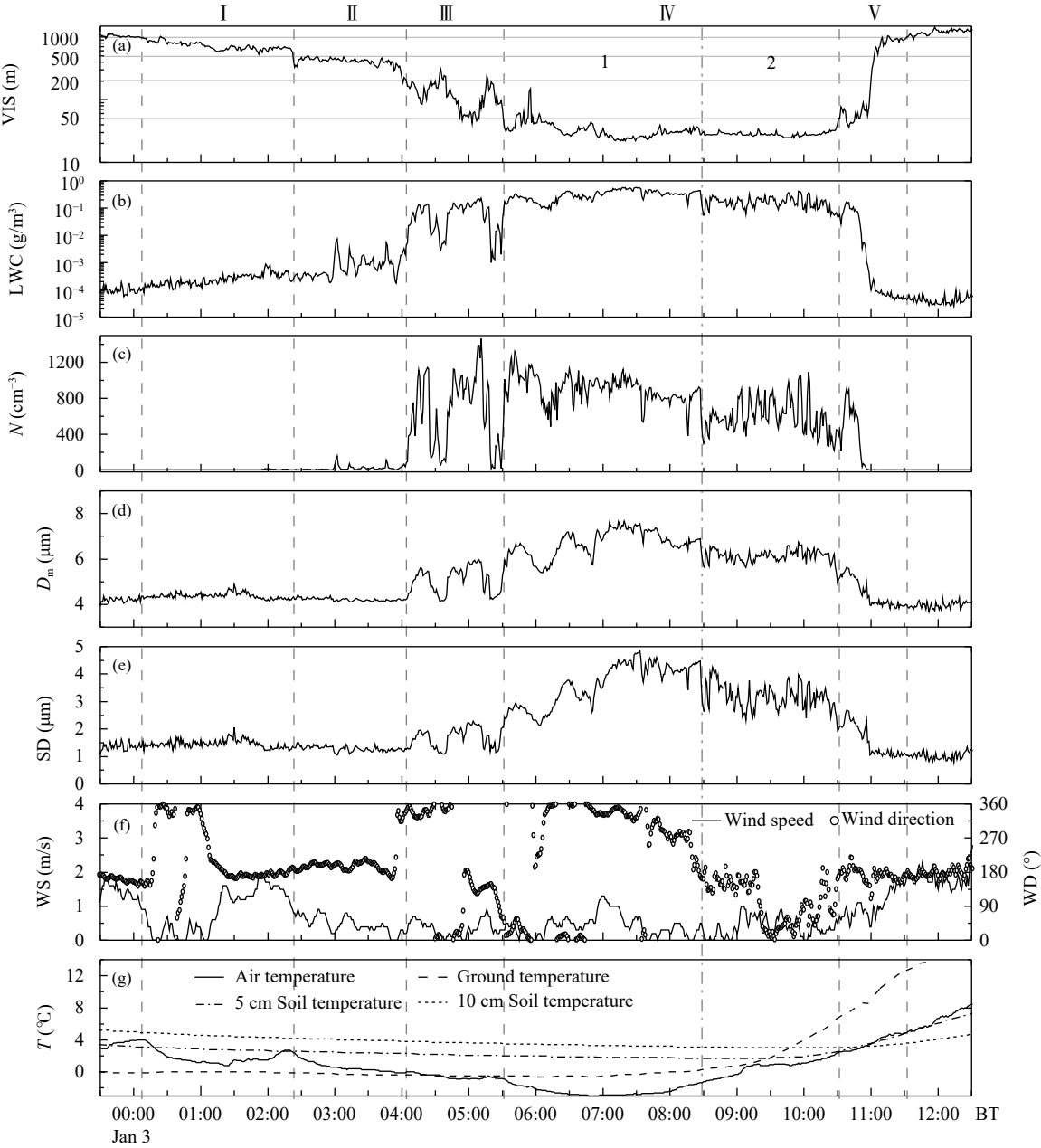


图2 个例9中(a)能见度、(b)液态含水量、(c)雾滴数浓度、(d)雾滴平均直径、(e)滴谱标准差、(f)风速和风向、(g)温度(气温、地表温度、5 cm地温、10 cm地温)随时间变化

Fig. 2 Temporal variations of (a) visibility, (b) liquid water content, (c) number concentration, (d) mean diameter, (e) standard deviation of droplet size distribution, (f) wind speed and wind direction, (g) temperature (air, ground, 5 cm soil and 10 cm depth soil) during Case 9

平流使空气温度继续降低,观测点的雾体出现了爆发性增强(图 3a、b),能见度下降到 200 m 以下。爆发性增强是雾发展过程中的一种常见现象,其本质是雾滴谱在短时间内抬升、拓宽,雾滴增多增大(李子华等,2011b; Niu, et al, 2012; 朱承瑛等, 2018),在本次浓雾至强浓雾转变过程中,各雾微物理参量

显著增大,雾滴数浓度和液态含水量呈量级式增长,分别增大了 220 倍和 344 倍(图 4)。此后,由于风向转南,风速增大,雾滴数浓度出现了大幅度降低,能见度回升到 200 m 之上,但停留时间较短,随着风向再次转北,风速减小,能见度很快又回到了强浓雾等级并持续下降,再次呈现爆发性增强。

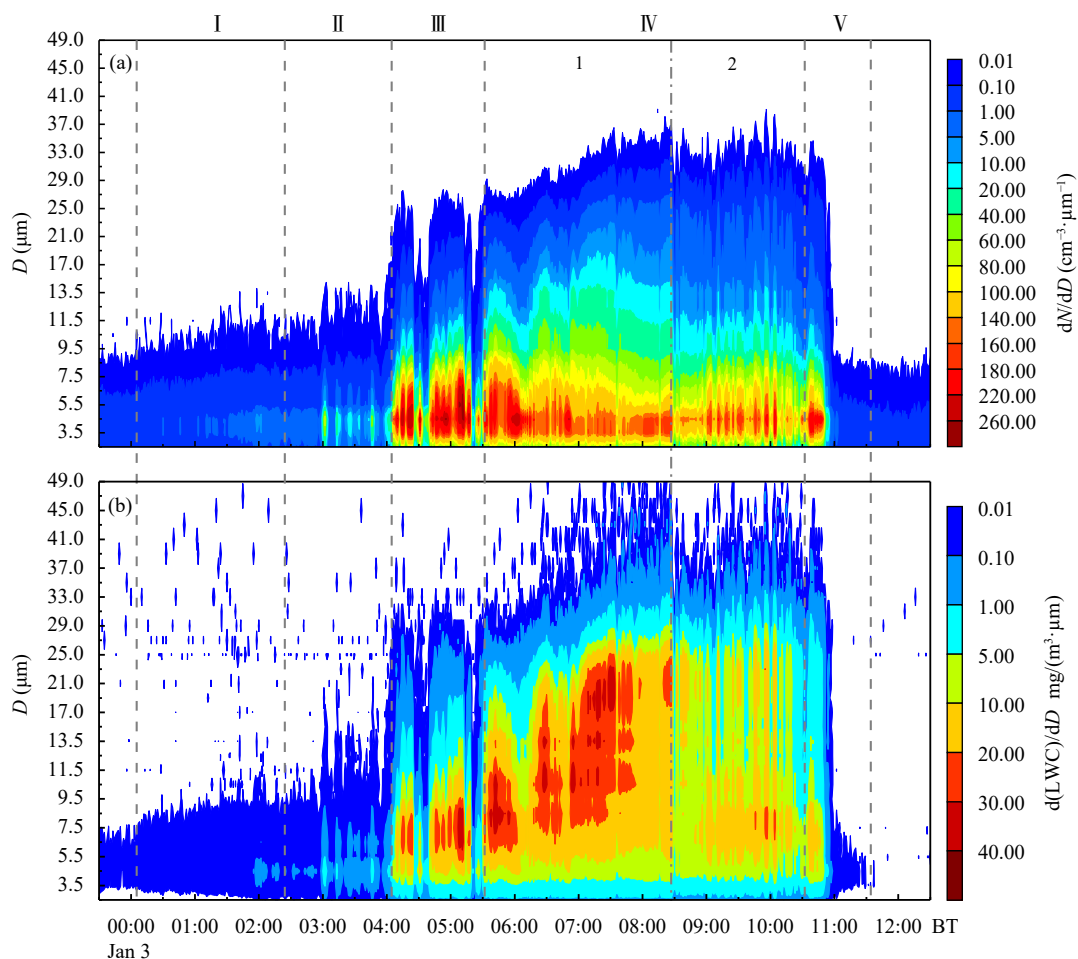


图3 个例9中(a)雾滴数浓度尺度分布及(b)液态含水量尺度分布随时间演变

Fig. 3 Temporal evolutions of (a) droplet number concentration (N) size distribution and (b) liquid water content size distribution during Case 9

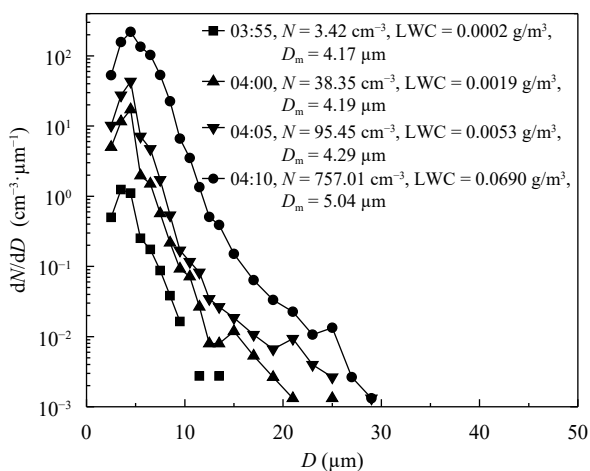


图4 爆发性增强前后的雾滴谱分布

Fig. 4 Droplet size distributions before and after the fog explosive reinforcement

(4)维持阶段(阶段IV, 3日05时31分—10时30分): 能见度主要在特强浓雾等级下维持。该阶段开始时, 北风侵入使气温快速下降, 温度配置出现气温<地表温度<5 cm地温<10 cm地温(图2f), 大雾和浓雾阶段的贴地逆温层消失, 李子华等(1999)和严文莲等(2018)对探空廓线的分析表明, 随着雾体的发展, 逆温层离开地面被抬升到雾顶附近, 雾层内温度服从湿绝热分布。日出(07时12分)后, 虽然地表和气温受太阳短波辐射影响开始缓慢回升, 但雾微物理量仍然维持在较高水平, 所以能见度并未显著回升, 50 m以下的能见度维持了近5 h。在该阶段中, 液态含水量、雾滴数浓度、平均直径和滴谱标准差均在较大水平上起伏, 但值得注意的是, 08时28分前后各雾微物理参量都出现了阶梯式陡降, 从滴谱的连续变化(图3)也可看出, 08时

28 分后各档数浓度和含水量较前时段均明显降低且呈周期性振荡, 因此又将阶段Ⅳ划分为Ⅳ-1(05 时 31 分—08 时 28 分)和Ⅳ-2(08 时 29 分—10 时 30 分)两个时段, 以供下文讨论。

(5)消散阶段(阶段Ⅴ, 3 日 10 时 31 分—11 时 32 分): 能见度由 50 m 以下回升到 1000 m 以上, 特强浓雾快速消散变为轻雾。由于微物理量的快速增大, 该阶段初期能见度有一个短暂下降过程, 10 时 40 分开始, 能见度开始逐步回升, 快速穿过强浓雾和浓雾等级, 在大雾等级下波动半小时后, 于 11 时 32 分变为轻雾。与Ⅳ-2 阶段的情况类似, 受地表温度大幅度上升影响, 该阶段风速和风向具有更明显的波动, 这可能是由逆温减弱阶段的动量下传、湍流发展造成的(陆春松等, 2010)。在温度升高和湍流发展的共同作用下, 雾滴蒸发, 微物理参量同步减小。

整体来看, 本次雾过程是在夜间气温下降条件下形成, 随着雾滴数浓度和含水量的升高, 能见度波动下降, 清晨达到最低并维持在特强浓雾等级, 后因午前温度上升, 雾体快速消散。

3.3.3 雾的微物理参量关系和微物理过程

雾的微物理特征量以及雾滴的尺度分布与微物理过程紧密联系, 不同的微物理量关系可以反映不同的微物理机制(黄玉生等, 2000; Lu, et al, 2013; Degeffie, et al, 2015)。为讨论上一小节不同阶段可能发生的主要微物理过程, 结合图 3, 对不同阶段雾滴数浓度与平均直径、液态含水量(图 5)和滴谱标准差(图 6)之间的关系进行分析。

阶段Ⅰ和阶段Ⅱ中, 液态含水量较低, 量级分别为 10^{-4} g/m³ 和 10^{-3} g/m³, 雾滴数浓度尺度分布也相对较窄(图 3a), 雾滴数浓度升高的同时平均直径和滴谱标准差减小, 雾滴数浓度与平均直径、滴谱标准差均呈现负相关(图 5a、b、图 6), 说明有凝结核活化并凝结增长, 但较低的液态含水量对其产生了限制。一般来说, 云雾滴的生长是由凝结核活化, 凝结增长后再通过碰并其他液滴而继续增长(Devenish, et al, 2012)。其中, 凝结核的活化过程可用寇拉曲线来解释, 只有当环境过饱和度大于粒子临界过饱和度时, 凝结核才能吸湿增长成为云雾滴, 而环境水汽有限时, 气溶胶粒子则处于未活化的霾粒子状态。从图 7 能见度仪观测消光系数(由

式(1)计算得到)与雾滴谱计算消光系数(由式(2)计算得到)的比较也可看出, 在能见度下降到强浓雾之前, 滴谱计算出来的消光系数远小于能见度仪观测的消光系数, 阶段Ⅰ和阶段Ⅱ雾滴谱计算出的平均消光系数分别仅占器测平均消光系数的 3.1% 和 8.0%, 这就进一步说明这两个时段可凝结的水汽有限, 存在大量未活化的霾粒子或未达到雾滴谱仪检测下限的小液滴, 活化并凝结增长的新雾滴会降低总体的平均直径和滴谱标准差。

经历了爆发性增强之后, 阶段Ⅲ中雾滴谱明显拓宽, 雾微物理量较之前两个阶段都有增长, 尤其是液态含水量, 较前一个阶段增大了两个量级, 表明水汽充足, 凝结核对水汽争食的竞争减弱。该阶段中, 雾滴数浓度与平均直径、液态含水量、滴谱标准差均呈现良好的正相关, 散点拟合的相关系数分别为 0.8762、0.9619 和 0.7973, Niu 等(2010b)对南京雾过程的研究表明, 凝结核活化并凝结增长或蒸发退活化可使多种微物理量出现互为正相关关系。图 3 中, 本阶段各档数浓度和含水量几乎是同步变化, 且随时间总体上有增大的趋势, 说明凝结核活化并凝结增长仍然为主要物理过程, 但与前两个阶段不同的是, 此阶段可凝结的水汽特别充足, 使得雾滴在凝结增长的同时, 凝结核也在持续活化, 小液滴的不断再生巩固了该主要物理过程。另外, 需要注意的是, 凝结核持续活化并凝结增长过程的占优并不能忽略其他物理机制的存在, 因为液滴凝结增长速率与其尺度成反比(Wallace, et al, 2006)且雾中过饱和度通常比云小一个量级(Hammer, et al, 2014), 所以仅依靠凝结还是很难实现大滴的快速增长, 通常需要巨核凝结、湍流混合、随机碰并等理论来解释滴谱的拓宽。

在能见度最低的阶段Ⅳ中, 雾滴数浓度尺度分布和液态含水量尺度分布进一步拓宽, dN/dD 大于 $0.01 \text{ cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的雾滴直径达到了 $38 \mu\text{m}$, 该阶段的雾滴平均直径和液态含水量均在较高水平上起伏, 但Ⅳ-2 时段的雾滴平均直径和液态含水量比Ⅳ-1 时段更为集中。Ⅳ-1 和Ⅳ-2 两个时段内雾滴平均直径与数浓度拟合直线的斜率较阶段Ⅲ明显降低, 良好的正相关关系也被破坏, 特别是Ⅳ-1 时段, t 检验中的 p 值未能通过 0.001 显著性水平检验。在不同的雾等级下, $10 \mu\text{m}$ 以下谱线形状相似(图 1a),

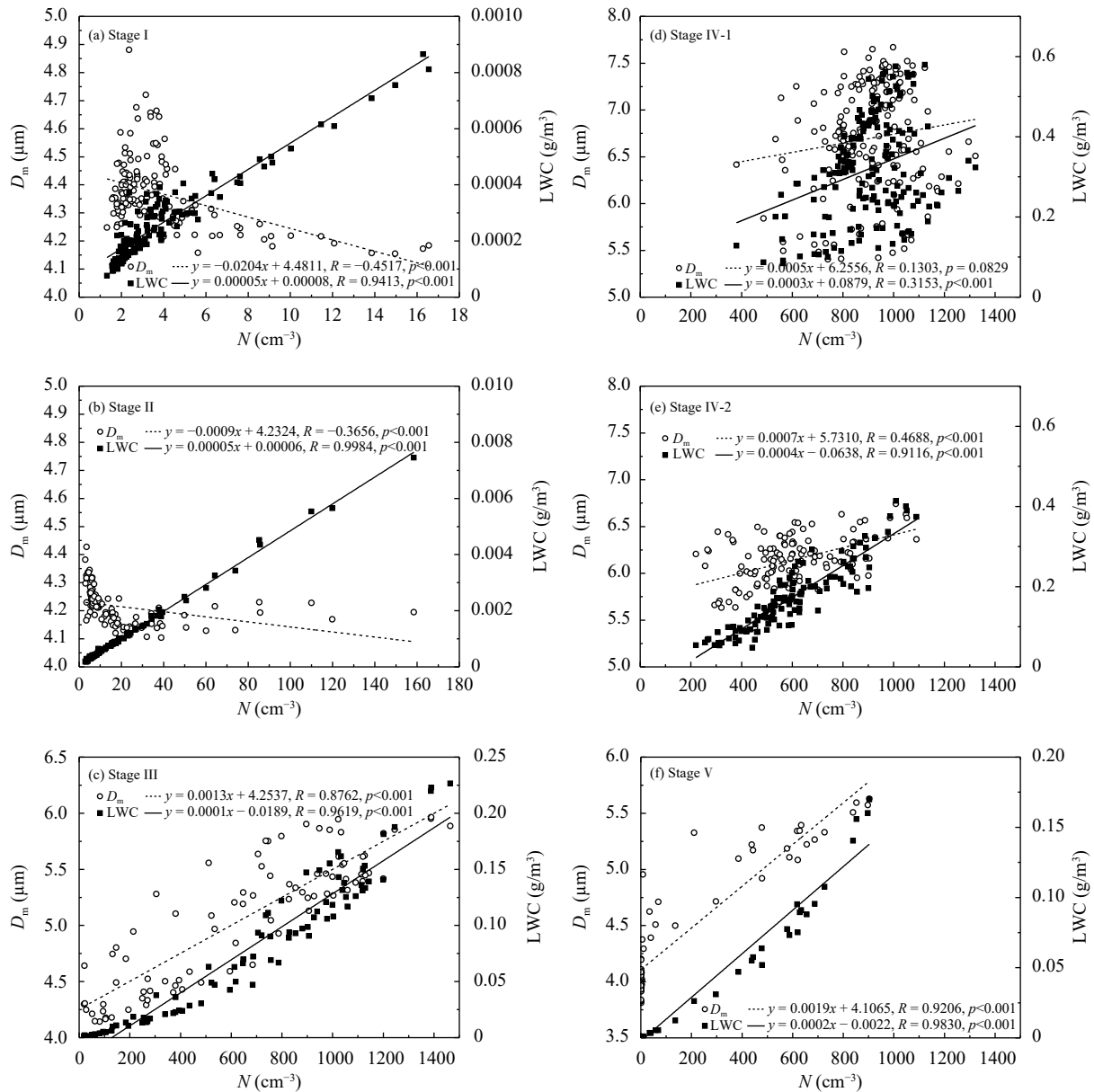


图5 不同阶段(阶段 I—V)(a—f) 雾滴数浓度分别与平均直径和液态含水量的关系

Fig. 5 Relationships between number concentration (N) and mean diameter (D_m), and number concentration (N) and liquid water content (LWC) during different stages (stage I - V) (a-f)

雾滴也很可能具有相同的性质,因此采用与张舒婷等(2013)一致的定义,以粒径 $10 \mu\text{m}$ 为界,将雾滴划分为小粒径段雾滴($D \leq 10 \mu\text{m}$)和大粒径段雾滴($D > 10 \mu\text{m}$)。通过大、小粒径段雾滴数浓度随时间变化(图8)可以看出,IV-1时段,在小粒径段雾滴数浓度呈现降低趋势的同时,大粒径段雾滴数浓度却在升高,表明碰并过程作用明显,大雾滴通过碰并收集小液滴而增长。IV-2时段,大、小粒径段雾滴数浓度同步波动,总体上均呈轻微下降趋势,可

能是蒸发作用的结果。

值得关注的是,与IV-2时段大、小粒径段雾滴数浓度的快速波动相一致,图3a中尺度分档的各档数浓度和含水量也存在峰谷相继的周期波动特征,为了研究准周期振荡现象,采用可识别时间序列变化周期及其位置的 Morlet 小波 (Torrence, et al, 1998) 对雾滴数浓度进行分析。从阶段IV雾滴数浓度的小波功率谱(图9)可以看出,IV-2时段雾滴数浓度存在较长时间、通过显著性检验(红噪声过程

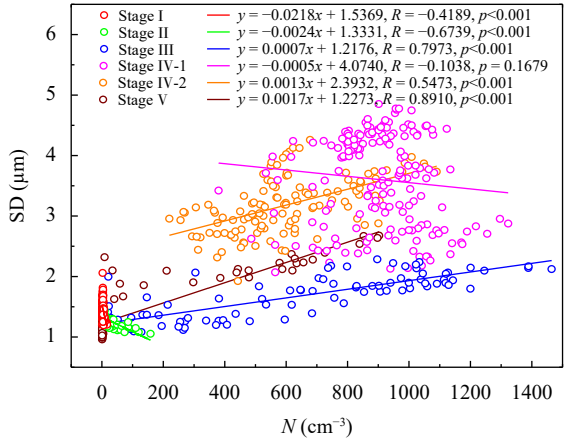


图 6 不同阶段雾滴数浓度与滴谱标准差的关系

Fig. 6 Relationships between number concentration (N) and standard deviation of droplet size distribution (SD) during different stages

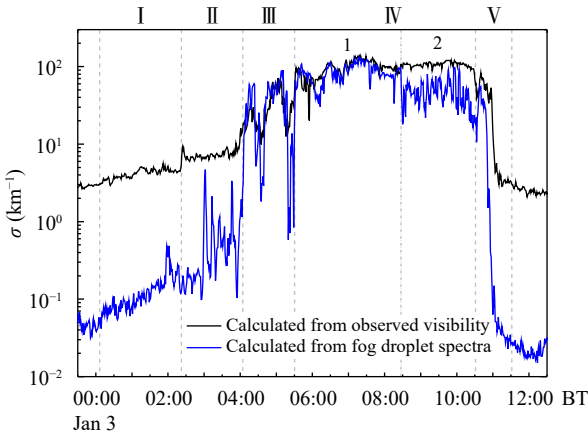


图 7 雾滴谱计算消光系数与能见度仪观测消光系数的比较

Fig. 7 Comparison between extinction coefficients calculated from fog droplets spectra and from observed visibility

检验)的准周期振荡,振荡周期 6—10 min。造成该现象的原因可能是,在雾顶持续辐射冷却和日出后地表加热的共同作用下,部分雾体夹卷蒸发,出现与层积云结构类似的胞状结构(Welch, et al, 1986),当小尺度不均匀雾体在平流作用下通过观测站点时,观测站点观测到的雾微物理量就出现了较高频率的振荡现象,而在这种高频振荡周期内,各粒径尺度上的雾滴数浓度尺度分布(dN/dD)和含水量尺度分布($d(LWC)/dD$)几乎是同步增大或减小。

阶段 V 与阶段 III 微物理关系类似,雾滴数浓度与平均直径、液态含水量、滴谱标准差也都呈现出

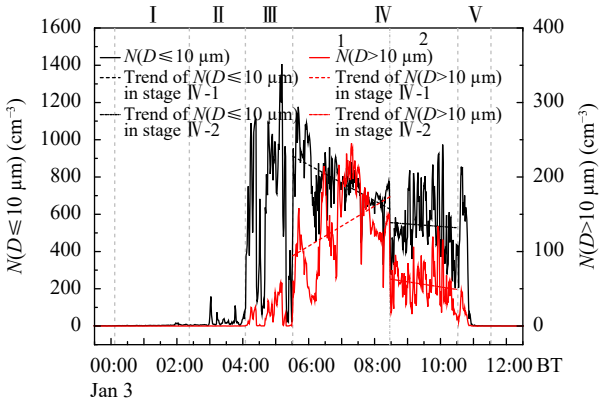


图 8 个例 9 中 $D \leq 10 \mu\text{m}$ 和 $D > 10 \mu\text{m}$ 雾滴数浓度随时间的变化

Fig. 8 Temporal evolutions of number concentrations for small droplets (diameter $\leq 10 \mu\text{m}$) and big droplets (diameter $> 10 \mu\text{m}$) during Case 9

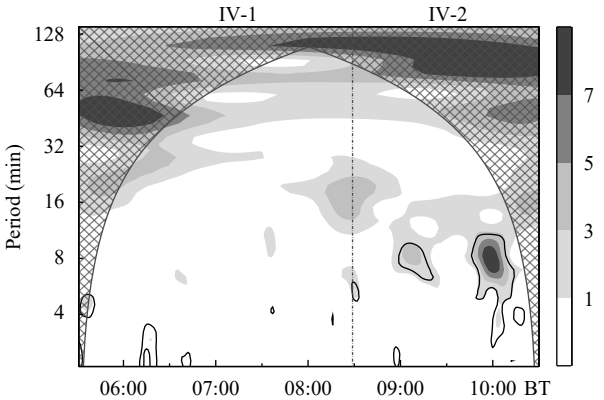


图 9 阶段 IV 中雾滴数浓度小波功率谱 (灰阶) 的时频分布 (实线包括的区域表示置信水平达到 95%, 顶部两边斜线交叉区域表示边界效应的影响域)

Fig. 9 Time-frequency diagrams for wavelet power spectrum (shaded) of the number concentration during the stage IV (The solid line encloses regions of greater than 95% confidence level and the cross-hatched regions on both ends indicate the areas with edge effects)

良好的正相关,但这显然不能归因于凝结核活化并凝结增长,而是与其相反的蒸发作用的结果。该阶段中,各档数浓度和含水量不再振荡,而是快速的同步减小,说明蒸发作用在 IV-2 时段的基础上继续加强,凝结核表面水汽扩散,回到霾粒子状态。

综合以上的分析可见,从阶段 I 到阶段 III,能见度从 1000 m 下降到 50 m,凝结核活化并凝结增长是主要的微物理过程,但可凝结水汽是影响该过程效果的一个重要因子。大雾和浓雾等级下,有限

的水汽抑制了这一过程的发展,雾滴数浓度的升高会降低平均直径和滴谱标准差;强浓度等级下,充足的水汽使大滴形成的同时,凝结核仍在持续活化生成小滴,雾滴数浓度与平均直径、液态含水量、滴谱标准差呈现良好的正相关。而在雾体发展最为旺盛的阶段Ⅳ,特强浓雾等级下,碰并过程作用显著,大滴的形成消耗小滴,破坏了雾滴数浓度与平均直径、滴谱标准差良好的正相关,但随着日出后湍流混合增强,雾滴蒸发作用开始显现,雾滴数浓度与平均直径又呈现弱的正相关关系。在雾体快速消散的阶段Ⅴ,雾滴蒸发作用更加明显,雾微物理量同步减小,雾滴数浓度与平均直径、液态含水量、滴谱标准差再次呈现良好的正相关关系。

4 结 论

利用2015—2017年秋冬季在江苏北部观测到12次雾过程的雾滴谱数据及常规气象观测资料,统计轻雾、大雾、浓雾、强浓雾和特强浓雾5个等级下的微物理特征量及雾滴谱分布,比较了不同地区雾微物理特征量的差异,并对2017年1月3日一次雾过程进行重点分析,得到以下结论:

(1)随着雾等级的提升,雾滴数浓度、含水量增长明显,而从大雾到浓雾,雾滴平均直径却并未增大;轻雾、大雾和浓雾的平均最大直径差异并不大,在20 μm 左右,而当能见度小于200 m时,最大直径显著增大。

(2)随着能见度的下降,平均数浓度谱和含水量谱的谱线上抬,从浓雾到强浓雾,10 μm 以上谱线抬升尤为明显;雾滴数浓度谱总呈现偏态分布,最大峰值直径总是集中在小粒子段,而雾滴含水量谱呈现为多峰分布,表明雾滴数浓度主要由小雾滴控制,雾滴含水量受大雾滴影响。

(3)东海县郊观测到的雾液态含水量平均值为0.0693 g/m^3 ,与南京的观测结果相差不大,但雾滴数浓度仅为南京的一半左右,平均直径大约是南京的2.3倍,这与采样点所处的背景环境有密切关系。

(4)个例分析中,能见度从1000 m下降到50 m,凝结核活化并凝结增长是主要微物理过程,但可凝结水汽是影响该过程效果的一个重要因子。大雾和浓雾等级下,有限的水汽使雾滴数浓度与平均直径成负相关;强浓度等级下,充足的水汽使雾滴数浓度与平均直径成正相关。而能见度降到50 m以

下时,碰并过程效果显著,破坏了雾滴数浓度与平均直径的正相关关系,但随着日出后雾滴蒸发作用增强,雾滴数浓度与平均直径再次呈现良好的正相关关系。

致 谢:感谢东海县气象局在观测期间给予的帮助与支持。

参考文献

- 蔡兆鑫,蔡森,李培仁等. 2019. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究. 大气科学, 43(6): 1191-1203. Cai Z X, Cai M, Li P R, et al. 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages. Chinese J Atmos Sci, 43(6): 1191-1203 (in Chinese)
- 黄辉军,黄健,刘春霞等. 2009. 茂名地区海雾的微物理结构特征. 海洋学报, 31(2): 17-23. Huang H J, Huang J, Liu C X, et al. 2009. Microphysical characteristics of the sea fog in Maoming area. Acta Oceanol Sinica, 31(2): 17-23 (in Chinese)
- 黄辉军,黄健,毛伟康等. 2010. 茂名地区海雾含水量的演变特征及其与大气水平能见度的关系. 海洋学报, 32(2): 40-53. Huang H J, Huang J, Mao W K, et al. 2010. Characteristics of liquid water content of sea fog in Maoming area and its relationship with atmospheric horizontal visibility. Acta Oceanol Sinica, 32(2): 40-53 (in Chinese)
- 黄玉生,黄玉仁,李子华等. 2000. 西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程. 气象学报, 58(6): 715-725. Huang Y S, Huang Y R, Li Z H, et al. 2000. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna. Acta Meteor Sinica, 58(6): 715-725 (in Chinese)
- 康博识,樊曙先,张悦等. 2017. 南京冬季持续性强浓雾天气中三级分档雾水的理化特性分析. 气象学报, 75(2): 356-370. Kang B S, Fan S X, Zhang Y, et al. 2017. Physical and chemical characteristics of three-stage fog water in deep dense fog during the winter in Nanjing. Acta Meteor Sinica, 75(2): 356-370 (in Chinese)
- 李子华,黄建平,周毓荃等. 1999. 1996年南京连续5天浓雾的物理结构特征. 气象学报, 57(5): 622-631. Li Z H, Huang J P, Zhou Y Q, et al. 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996. Acta Meteor Sinica, 57(5): 622-631 (in Chinese)
- 李子华,刘端阳,杨军等. 2011a. 南京市冬季雾的物理化学特征. 气象学报, 69(4): 706-718. Li Z H, Liu D Y, Yang J, et al. 2011a. Physical and chemical characteristics of winter fogs in Nanjing. Acta Meteor Sinica, 69(4): 706-718 (in Chinese)
- 李子华,刘端阳,杨军. 2011b. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件. 大气科学, 35(1): 41-54. Li Z H, Liu D Y, Yang J. 2011b. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening. Chinese J Atmos Sci, 35(1): 41-54 (in Chinese)
- 刘端阳. 2008. 南京地区冬季雾的微物理特征 [D]. 南京: 南京信息工程大

- 学. Liu D Y. 2008. The micro-physical characteristic of winter's fog in Nanjing area [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)
- 刘端阳, 濮梅娟, 杨军等. 2009. 2006 年 12 月南京连续 4 天浓雾的微物理结构及演变特征. *气象学报*, 67(1): 147-157. Liu D Y, Pu M J, Yang J, et al. 2009. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006. *Acta Meteor Sinica*, 67(1): 147-157 (in Chinese)
- 陆春松, 牛生杰, 杨军等. 2010. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析. *大气科学*, 34(4): 681-690. Lu C S, Niu S J, Yang J, et al. 2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing. *Chinese J Atmos Sci*, 34(4): 681-690 (in Chinese)
- 吕晶晶, 牛生杰, 张羽等. 2014. 湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构及边界层演变特征. *气象学报*, 72(2): 350-365. Lü J J, Niu S J, Zhang Y, et al. 2014. Evolution characteristics of the macro-/micro- structure and the boundary layer during a spring heavy sea fog episode in Donghai Island in Zhanjiang. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 350-365 (in Chinese)
- 濮梅娟, 严文莲, 商兆堂等. 2008. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究. *高原气象*, 27(5): 1111-1118. Pu M J, Yan W L, Shang Z T, et al. 2008. Study on the physical characteristics of burst reinforcement during the winter fog of Nanjing. *Plateau Meteor*, 27(5): 1111-1118 (in Chinese)
- 吴兑, 邓雪娇, 毛节泰等. 2007. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏微观结构与能见度研究. *气象学报*, 65(3): 406-415. Wu D, Deng X J, Mao J T, et al. 2007. A study on macro- and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain. *Acta Meteor Sinica*, 65(3): 406-415 (in Chinese)
- 严文莲, 朱承瑛, 朱毓颖等. 2018. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究. *气象*, 44(7): 892-901. Yan W L, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al. 2018. Study on a wide range of explosive heavy fog in Jiangsu. *Meteor Mon*, 44(7): 892-901 (in Chinese)
- 杨军, 王蕾, 刘端阳等. 2010. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制. *气象学报*, 68(6): 998-1006. Yang J, Wang L, Liu D Y, et al. 2010. The boundary layer structure and the evolution mechanisms of a deep dense fog event. *Acta Meteor Sinica*, 68(6): 998-1006 (in Chinese)
- 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟等. 2013. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析. *大气科学*, 37(3): 609-622. Yue Y Y, Niu S J, Zhao L J, et al. 2013. Study on the synoptic system and macro-micro characteristics of sea fog along the Zhanjiang coastal area. *Chinese J Atmos Sci*, 37(3): 609-622 (in Chinese)
- 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 2013. 一次南海海雾微物理结构个例分析. *大气科学*, 37(3): 552-562. Zhang S T, Niu S J, Zhao L J. 2013. The microphysical structure of fog droplets in a sea fog event in the South China Sea. *Chinese J Atmos Sci*, 37(3): 552-562 (in Chinese)
- 张悦, 樊曙先, 张舒婷等. 2015. 海峡西岸一次雾过程微结构及其起伏特征研究. *热带气象学报*, 31(3): 385-394. Zhang Y, Fan S X, Zhang S T, et al. 2015. The microstructure and characteristics of fluctuation of a sea fog along the west coast of Taiwan Strait. *J Trop Meteor*, 31(3): 385-394 (in Chinese)
- 中国气象局. 2012. 雾的预报等级: GB/T 27964-2011. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration. 2012. Grade of fog forecast: GB/T 27964-2011. Beijing: Standards Press of China (in Chinese)
- 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁等. 2018. 江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征. *气象*, 44(9): 1208-1219. Zhu C Y, Zhu Y Y, Zu F, et al. 2018. Some characteristics of the development of heavy fog in autumn and winter in Jiangsu Province. *Meteor Mon*, 44(9): 1208-1219 (in Chinese)
- Bott A, Sievers U, Zdunkowski W. 1990. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics. *J Atmos Sci*, 47(18): 2153-2166
- Brown R, Roach W T. 1976. The physics of radiation fog II: A numerical study. *Quart J Roy Meteor Soc*, 102(432): 335-354
- Degeffie D T, El-Madany T S, Hejkal J, et al. 2015. Microphysics and energy and water fluxes of various fog types at SIRT, France. *Atmos Res*, 151: 162-175
- Devenish B J, Bartello P, Brenguier J L, et al. 2012. Droplet growth in warm turbulent clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138(667): 1401-1429
- Duynkerke P G. 1991. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations. *Mon Wea Rev*, 119(2): 324-341
- Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. 1992. The Po Valley fog experiment 1989. *Tellus B*, 44(5): 448-468
- Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z. 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models. *J Appl Meteor Climatol*, 45(11): 1469-1480
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure Appl Geophys*, 164(6): 1121-1159
- Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J A, et al. 2009. The fog remote sensing and modeling field project. *Bull Amer Meteor Soc*, 90(3): 341-360
- Guo L J, Guo X L, Fang C G, et al. 2015. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China. *Sci China Earth Sci*, 58(3): 329-344
- Haefelin M, Bergot T, Elias T, et al. 2010. PARISFOG: Shedding new light on fog physical processes. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(6): 767-783
- Hammer E, Gysel M, Roberts G C, et al. 2014. Size-dependent particle activation properties in fog during the Paris Fog 2012/13 field campaign. *Atmos Chem Phys*, 14(19): 10517-10533
- Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *J Climate Appl Meteor*, 23(1): 34-41
- Li Z H, Huang J P, Huang Y S, et al. 1999. Study on the physical process of winter valley fog in Xishuangbanna Region. *Acta Meteor Sinica*, 13(4): 494-508
- Liu D Y, Li Z H, Yan W L, et al. 2017. Advances in fog microphysics research

- in China. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 53(1): 131-148
- Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs. *Acta Meteor Sinica*, 27(6): 832-848
- Meyers M P, Walko R L, Harrington J Y, et al. 1997. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. *Atmos Res*, 45(1): 3-39
- Morrison H, Gettelman A. 2008. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model, version 3 (CAM3). Part I: Description and numerical tests. *J Climate*, 21(15): 3642-3659
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010a. Fog research in China: An overview. *Adv Atmos Sci*, 27(3): 639-662
- Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al. 2010b. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study. *Adv Atmos Sci*, 27(6): 1259-1275
- Niu S J, Liu D Y, Zhao L J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing. Part 2: Fog microphysics. *Pure Appl Geophys*, 169(5): 1137-1155
- Patterson E M, Gillette D A, Grams G W. 1976. The relation between visibility and the size-number distribution of airborne soil particles. *J Appl Meteor*, 15(5): 470-478
- Price J. 2011. Radiation fog. Part I: Observations of stability and drop size distributions. *Bound Layer Meteor*, 139(2): 167-191
- Spiegel J K, Zieger P, Bukowiecki N, et al. 2012. Evaluating the capabilities and uncertainties of droplet measurements for the fog droplet spectrometer (FM-100). *Atmos Meas Tech*, 5(9): 2237-2260
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(1): 61-78
- Wallace J M, Hobbs P V. 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 221-224
- Welch R M, Wielicki B A. 1986. The stratocumulus nature of fog. *J Climate Appl Meteor*, 25(2): 101-111
- Zhang J, Xue H, Deng Z, et al. 2014. A comparison of the parameterization schemes of fog visibility using the in-situ measurements in the North China Plain. *Atmos Environ*, 92: 44-50
- Zhao L J, Niu S J, Zhang Y, et al. 2013. Microphysical characteristics of sea fog over the east coast of Leizhou Peninsula, China. *Adv Atmos Sci*, 30(4): 1154-1172
- Zhou B B, Du J, Gultepe I, et al. 2012. Forecast of low visibility and fog from NCEP: Current status and efforts. *Pure Appl Geophys*, 169(5/6): 895-909