大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响

王庆 樊明月 李季 张洪生

The Microphysical Characteristics of Winter Fog in Jinan and Its Effect on Visibility

WANG Qing FAN Mingyue LI Ji ZHANG Hongsheng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2011.19248

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究

A Modeling Study of the Visibility and PBL Key Meteorological Elements during a Heavy Fog-Haze Episode in Beijing-Tianjin-Hebei of China

大气科学. 2017, 41(6): 1177 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16211

年冬季南京三次暴雪过程微物理特征分析

大气科学. 2019, 43(5): 1095 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18189

内蒙古东部春季三类沙尘天气气溶胶散射系数及其与PM10、能见度相关性分析

Dust Aerosol Scattering Coefficient under Three Types of Sand Storm in Eastern Inner Mongolia in the Spring and Its Correlations with PM10 and Visibility

大气科学. 2017, 41(1): 121 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15289

年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析

Preliminary Analysis of Atmospheric Physical Quantity Characteristics during Haze Weather in Jinan Area in 2015

大气科学. 2019, 43(4): 705 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1808.17175

山东不同云系降水微物理参数特征

Characteristics of Rain Microphysical Parameters for Different Cloud Systems in Shandong Province

大气科学. 2020, 44(2): 315 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1905.18243

北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测—模拟研究

Numerical Simulation and Observation Study on Microphysical Formation Processes of Two Different Snowfall Cases in Northern Mountain Area of Beijing

大气科学. 2020, 44(2): 407 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18172

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王庆, 樊明月, 李季, 等. 2021. 济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响 [J]. 大气科学, 45(2): 333−354. WANG Qing, FAN Mingyue, LI Ji, et al. 2021. The Microphysical Characteristics of Winter Fog in Jinan and Its Effect on Visibility [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(2): 333−354. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.19248

济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响

王庆[1, 2] 樊明月[1] 李季[3] 张洪生[1]

1 山东省人民政府人工影响天气办公室，济南 250031
2 山东省气象科学研究所，济南 250031
3 山东省气象局大气探测保障中心，济南 250031

摘 要 2016 年 12 月 19 日至 2017 年 1 月 9 日，受静稳天气影响，济南接连出现了 10 次大雾等级以上天气过程，期间最低能见度不足 50 m，持续的大雾天气严重影响了工农业生产和人民生活。本文利用 10 次冬季雾期间雾滴谱仪、自动站等观测资料，分析了济南不同强度冬季雾的微物理结构特征，分析了其中的微物理过程及强度，探讨了微物理结构、微物理过程对能见度（V）的影响。结果表明：（1）济南冬季雾强度不同，其谱分布具有明显的差异，在雾变浓的过程中，谱型由“单峰”结构逐渐向“多峰”结构发展。（2）数浓度对能见度具有较好的指示意义，液态含水量、离散度等对能见度指示意义不稳定。（3）环境温度与核化、凝结和碰并增长（或蒸发）等微物理过程密切相关；核化、凝结增长是济南冬季雾发展过程中最主要的微物理过程，在整个雾过程中起主导作用。（4）碰并过程主要发生在发展和成熟阶段，在生成和减弱阶段很弱，以未碰并或偶发碰并为主。（5）自转化率计算结果表明，在 $V\geqslant$200 m 的雾中，碰并过程很少发生；在 100 m$\leqslant V<$200 m 的强浓雾中，以未碰并或间断碰并为主；碰并过程主要出现在 $V<$100 m 等级的强浓雾和特强浓雾中；与 $V<$50 m 的特强浓雾相比，50 m$\leqslant V<$100 m 的强浓雾中碰并过程发生的概率更大、强度更强。（6）在济南冬季特强浓雾中含有大量的小雾滴，但各微物理量的最大值、最大的起伏变化并未出现在特强浓雾中，而是出现在 50 m$\leqslant V<$100 m 强浓雾中，这可能与强浓雾中较强的碰并过程有关，碰撞过程中产生的并合和破碎可能是微物理量起伏变化最大的主要原因。（7）利用雾滴谱资料计算的能见度与实测值在变化趋势上具有较好的一致性，但比实测值大 1～2 个数量级，这可能主要与雾中大量的气溶胶粒子有关，对于污染大气，基于雾滴谱仪观测资料来估算雾中的大气能见度是不够的，必须同时考虑气溶胶粒子对能见度的影响。

关键词 济南 冬季雾 能见度 微物理结构 微物理过程
文章编号 1006-9895(2021)02-0333-22 **中图分类号** P429 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.19248

The Microphysical Characteristics of Winter Fog in Jinan and Its Effect on Visibility

WANG Qing[1, 2], FAN Mingyue[1], LI Ji[3], and ZHANG Hongsheng[1]

1 *The Weather Modification Office of Shandong Province*, *Jinan* 250031
2 *Shandong Institute of Meteorological Sciences*, *Jinan* 250031
3 *Ensuring Center of Atmospheric Sounding Technology*, *Weather Bureau of Shandong Province*, *Jinan* 250031

Abstract As affected by stable atmosphere, there had been ten fog events in Jinan from 19 December 2016 to 9 January

收稿日期 2019-12-17；**网络预出版日期** 2020-11-27
作者简介 王庆，女，1969 年出生，正研级高级工程师，主要从事云雾降水物理学研究。E-mail: 941840503@qq.com
资助项目 国家自然科学基金项目 41275148，山东省气象局气象科学技术研究项目 2015sdqxm07
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41275148), Meteorological Science and Technology Research Project of Shandong Meteorological Bureau (Grant 2015sdqxm07)

2017, during which the minimum value of visibility was below 50 m. The low visibility caused by the continuous fog events brought serious negative impacts to industrial and agricultural activities as well as to people's daily live. In this paper, based on the measurements from fog drop spectrometers, automatic weather stations, and conventional meteorological instruments during the 10 fog events, the fogs' microphysical characteristics were analyzed, microphysical processes and intensity were deduced, and their effects on visibility were discussed. The results were as follows: (1) The droplet spectrum distribution was different with different thicknesses of the winter fogs, changing from mono-modal to multi-modal as fog became thicker. (2) The droplet number concentration (N_c) had a close inverse correlation with visibility (V), while the liquid water content (LWC) and relative dispersion of the droplet size distribution (S) did not have a definite inverse relationship with V. (3) The temperature of air had an impact on the microphysical processes. The activation and condensational growth (or droplet evaporation) processes played leading roles in the whole winter fog lifecycle. (4) The collection processes arose in the development and maturation stages of the fogs, but not or very infrequently in the formation and weakening stages of the fogs. (5) The results from the autoconversion rate show that the collection rarely occurred in the fogs with V>200 m, while it was very weak or intermittent in the heavy fogs with 100 m≤V<200 m. The collection mainly occurred in the extremely dense fogs with V<50 m and heavy fogs with 50 m≤V<100 m, while it was more frequent and stronger in the heavy fogs with 50 m≤V<100 m than in the extremely dense fog with V<50 m. A larger number of small fog droplets led to poorer visibility in the extremely dense fog with V<50 m, however the maximum values of the droplet properties such as N_c, LWC appeared in the heavy fogs with 50 m≤V<100 m, in which these quantities showed the biggest variations as well. (6) The variations may be related to the more frequent and stronger collection in the heavy fogs with 50 m≤V<100 m, in which collision–coalescence and collision-fragmentation played a role in the biggest variations of microphysical quantities. (7) The trend values of calculated visibility based on the observational data from fog drop spectrometers agreed well with the actual trend values, however the calculated visibility values themselves were much greater than the actual ones, mainly caused by the large amount of aerosol particles in the fogs. In polluted fogs, observational data from fog drop spectrometers are not enough to estimate the visibility of fogs. The influence of aerosol particles on visibility must be considered at the same time.

Keywords Jinan, Winter fog, Visibility, Microphysical characteristics, Microphysical processes

1 引言

雾是近地层空气中悬浮着大量水滴、冰晶微粒而使水平能见度小于 1 km 的天气现象。雾能使大气能见度降低，特别是出现大雾等级以上天气过程时，与之相伴随的低能见度往往会对交通造成影响，甚至会出现严重的经济损失和人员伤亡（Pagowski et al., 2004; 刘端阳等, 2009; 李子华等, 2011）。秋冬季节是雾霾多发的高峰期，因大雾造成的交通事故时有发生，2018 年 11 月 12 日，青银高速山东高唐段发生 2 起因大雾引发的交通事故，造成 16 辆车碰撞起火燃烧、2 人死亡、9 人受伤（来源于聊城高速交警）。20 世纪 80 年代以来，在经济快速发展以及全球冬季变暖的气候背景下，环境污染加剧，大气污染背景场下的边界层结构可能更有利于形成强浓雾，使雾的强度更强、范围更大，持续时间更长（贾星灿和郭学良, 2012），而交通运输作为国民经济发展的命脉，对低能见度天气影响的反映愈加敏感，因此雾的预报、预警受到公众的普遍关注。由于大雾的形成、发展以及对能见度的影响等物理机理十分复杂，目前对雾的预报、预警远不能满足人们的需求，大雾的预报准确率亟待提高（马学款等, 2007; 包云轩等, 2013）。

雾中的大气能见度与其微物理结构紧密相关，雾滴大小、液态含水量等微物理量直接影响大气的消光系数（Kunkel, 1984），进而影响大气能见度，而且雾滴谱分布及其演变过程与雾的生命周期（形成、发展和消散）密切相关，但是在雾的能见度预报模式中很难得到精确体现（Müller et al., 2010），相关的数值模式需要更好的微物理参数化，这些参数优化通常需要雾的数浓度、液态含水量和平均半径等微物理特征量（Meyer et al., 1980; Stoelinga and Warner, 1999; 黄建平等, 2000; Gultepe et al., 2006, 2009; Gultepe and Milbrandt, 2007; 侯梦玲等, 2017），因此开展微物理结构特征等方面的研究对雾的预报、预警极为重要，也是很多学者研究的热点问题（岳岩裕等, 2013; 张舒婷等, 2013; 于华英等, 2015）。

国外关于雾微物理方面的研究起步较早（Taylor, 1917; Kuroiwa, 1951），20 世纪 60 年代以来，国内在衡山、舟山、重庆、上海、沪宁高速公路、南岭大瑶山、南京等地陆续开展雾的综合观测研究（许焕斌, 1964; 杨中秋等, 1989; 李子华等, 1993, 1999; 鲍宝堂等, 1995; 黄建平等, 1998; 吴兑等, 2007; 陆春松等, 2010），大大提高了对雾物理化学特性的认识。雾滴谱分布与雾的形成、发展和消散过程密切相关（Müller et al., 2010），Meyer et al.（1980）通过对一次辐射雾（霾）的研究发现，当能见度由 2.1 km 下降到 1.4 km 的时候，其谱分布在 5 min 间隔里发生了很大变化，且在雾最浓的时候，雾滴谱出现了多峰分布。Spencer et al.（1976）提出，对雾滴生长过程产生影响的原因主要是核化作用产生更多的小雾滴，导致对蒸汽的竞争加剧。Eldridge（1961, 1966, 1971）分析了雾滴谱分布、含水量以及能见度的变化特征，提出影响雾中大气能见度的两个主要因素是雾滴谱分布和液态含水量，并尝试建立了大气能见度与含水量的关系。Gultepe et al.（2006）提出了新的大气能见度参数化方案，认为大气能见度是雾滴数浓度和含水量的函数。李子华等（1993）通过对重庆冬季雾的微物理结构研究发现，重庆冬季雾中含水量虽小，但雾中能见度却很低，导致能见度低的主要因素是雾中存在着数密度很大的小雾滴。吴兑等（2007）通过对南岭大瑶山地冬季雾宏、微观结构与能见度研究发现，南岭山地浓雾实质上是出现在相对较高海拔上的低云，与中国过去研究较多的辐射雾差别较大；雾含水量与能见度呈明显的反相关关系，含水量较大时能见度较小。黄辉军等（2010）通过对茂名地区海雾含水量的演变及其与大气水平能见度的分析发现，在相同的含水量区间，不同的大气能见度样本表现出明显不同的谱分布特征，在相同高数浓度区间的情况下，导致大气能见度降低的主要原因是含水量增大。综上表明，雾滴谱分布、微物理过程以及微物理结构特征等与能见度密切相关，而雾的微物理特征具有明显的地域性特点，不同的地形和生态，不同的环境条件和气候背景，雾的微物理结构及其演变，雾的生成、消散以及对大气能见度的影响具有明显的差异。

济南位于山东半岛的中西部，地形复杂，南临泰山，北靠黄河，地势南高北低。近几年来，受经济发展以及地形影响，环境污染加剧，冬季雾增多。在 2016 年 12 月 19 日至 2017 年 1 月 9 日 22 d 的时间里，受静稳天气影响，济南接连出现大范围雾霾天气，大雾以上等级天气达 15 d，期间无影山站观测的最低能见度只有 36 m，导致作为空中交通枢纽的济南遥墙国际机场多班次航班暂停起降，多个高速路口关闭，严重影响了工农业生产和人民生活。目前针对山东内陆雾的研究主要集中在成因分析（梅婵娟和张灿, 2016; 孙兴池等, 2017; 于丽娟等, 2017）、数值预报（夏凡和杨晓霞, 2017; 夏凡和李昌义, 2018）以及冬季雾的微物理结构特征（王庆等, 2019a, 2020）、个例分析（王庆等, 2019b）等方面，关于雾中微物理结构、微物理过程及其对能见度的影响等方面的研究尚未涉及。本文利用雾滴谱仪观测的微物理资料、自动气象站（无影山站 D6066）加密观测以及常规气象观测等资料，对 2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南出现的 10 次大雾以上天气过程不同强度雾的微物理结构特征进行了分析，研究了不同强度雾中的微物理过程及强度，探讨了微物理结构、微物理过程及其对能见度的影响，以期为济南冬季雾的短临预报、相关模式的微物理参数优化提供微物理依据。

2　观测仪器及资料可靠性分析

2.1　观测仪器

2016 年，山东省人民政府人工影响天气办公室从美国 DMT 公司引进一台 FM-120 型雾滴谱仪，该仪器布设在山东省气象局（36.36°N，117°E，海拔高度 170.3 m）人影楼楼顶，是山东内陆布设的首台雾滴谱仪。观测时利用激光前向散射原理，能够实现对云雾过程微物理资料的连续观测，共分 30 档，范围为直径（D）2～50 μm 的云（雾）滴，采样面积为 0.24 mm^2、频率为 1 s^{-1}，抽气口速度约 15 m s^{-1}，观测的物理量主要有空气温度（T）、粒子数浓度（N_c）、不同尺度粒子数量、液态含水量（LWC）、粒子有效直径（ED）、中值体积直径（MVD）等。

2.2　资料说明和处理方法

本文所用的资料主要有雾滴谱仪观测资料、自动气象站加密观测资料、常规气象资料以及空气质监站观测资料等，其中自动气象站（无影山站 D6066）位于山东省气象局院内，与雾滴谱仪之间的直线距离约为 100 m，加密观测为每 5 min 1 次，能见度、风向、风速、相对湿度等宏观资料来自无

影山站（D6066）。泉城广场和蓝翔技校空气质量监测站与山东省气象局大院直线距离分别为 4.8 km、3.8 km，观测频率均为 1 h^{-1}，PM2.5 质量浓度资料来自上述两站，部分缺测时次资料用前后两个时次进行插值。温度以及数浓度、液态含水量等微物理资料来自 FM-120 型雾滴谱仪，10 次雾过程共采集样本 618737 个（见表 1），由于期间部分秒次有缺测，因此将资料进行每分钟平均，平均后获得样本 10554 个。另外，由于无影山站加密观测资料为每 5 min 1 次，因此在分析能见度与数浓度、液态含水量等的对应关系时，将数浓度、液态含水量等每分钟平均资料又进行了每 5 min 平均，共获得样本 2117 个。

利用雾滴谱仪观测资料计算的物理量主要有雾滴总数（N_s）、数浓度（N_c）、平均半径（$\bar{r}$）、平均平方半径（$\overline{r^2}$）、平均立方半径（$\overline{r^3}$）、消光系数（K_{ex}）、方差（σ^2）、离散度（S）、第 δ 阶平均半径（r_δ）、归一化雾滴谱分布函数（$f(r)$）、归一化消光系数（K_{ex1}）。

$$N_s = \int_0^\infty n(r)\mathrm{d}r, \tag{1}$$

$$N_c = \frac{N_s}{P_{as} \times S_{as}}, \tag{2}$$

$$\bar{r} = \frac{1}{N_s}\int_0^\infty rn(r)\mathrm{d}r, \tag{3}$$

$$\overline{r^2} = \frac{1}{N_s}\int_0^\infty r^2 n(r)\mathrm{d}r, \tag{4}$$

$$\overline{r^3} = \frac{1}{N_s}\int_0^\infty r^3 n(r)\mathrm{d}r, \tag{5}$$

$$K_{ex} \approx 2\pi\int_0^\infty r^2 n(r)\mathrm{d}r, \tag{6}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_s}\int_0^\infty (r-\bar{r})^2 n(r)\mathrm{d}r, \tag{7}$$

$$S = \frac{\sigma}{\bar{r}}, \tag{8}$$

$$r_\delta = \left(\frac{\int r^\delta n(r)\,dr}{N_s}\right)^{\frac{1}{\delta}}, \tag{9}$$

$$f(r) = \frac{n(r)}{N_s}, \tag{10}$$

$$K_{ex1} = 2\pi\int_0^\infty \frac{r^2 n(r)}{N_s}\mathrm{d}r, \tag{11}$$

表 1　2016 年 12 月至 2017 年 1 月观测的济南 10 次雾过程的宏观特征

Table 1　Macro-characteristics of 10-fog events observed in Jinan from December 2016 to January 2017

过程编号	雾类型	大雾开始时间	大雾消散时间	采集样本数	地面主导风向	最大风速/m s^{-1}	最小风速/m s^{-1}	平均风速/m s^{-1}	相对湿度	最低能见度/m
1	平流辐射雾	2016年12月19日15:30	2016年12月21日16:50	177660	NE	4.4	0	1.59	92.6%	36
2	平流辐射雾	2016年12月21日20:00	2016年12月22日12:45	45900	NW	2.7	0	1.10	94.3%	541
3	辐射雾	2016年12月22日22:55	2016年12月23日03:10	16560	NE和NW	2.6	0	1.05	95.0%	112
4	蒸发(雨)雾	2016年12月25日16:25	2016年12月25日17:10	4560	E	2.4	1.0	1.63	92.7%	624
5	蒸发(雨)雾	2016年12月26日01:40	2016年12月26日15:00	48060	NE	4.7	0.7	2.1	94.5%	440
6	辐射雾	2016年12月29日02:55	2016年12月29日10:00	25560	NW	1.6	0	0.72	92.8%	335
7	平流辐射雾	2017年1月2日01:30	2017年1月3日06:45	19697	NE和NW	3.3	0	1.11	94.8%	60
8	平流辐射雾	2017年1月3日22:20	2017年1月6日12:40	224520	NE和NW	3.9	0	1.13	94.8%	51
9	蒸发(雨)雾	2017年1月6日20:45	2017年1月7日06:00	33360	NE和NW	2.9	0	1.15	90.2%	595
10	辐射雾	2017年1月9日00:45	2017年1月9日07:05	22860	W	3.6	0.4	1.53	93.1%	112

注：表中时间为北京时（下同）；2017年1月2日07:00后因雾滴谱仪故障缺测11 h；大雾开始时间选取的是能见度开始呈现下降趋势、且能见度由1000 m以上首次下降到1000 m以下的时间；大雾消散时间则是能见度开始呈现上升趋势、且能见度由1000 m以下首次上升到1000 m以上的时间。

其中，r 为雾滴半径；$n(r)$ 为雾滴谱分布函数；P_{as} 为抽气口速度；S_{as} 为采样面积；$f(r)$ 为归一化雾滴谱分布函数，表示各档雾滴所占比例的分布情况；r_δ为第 δ 阶平均半径，表示雾滴总数的第 δ 个平均半径；K_{ex1}为归一化消光系数，表示单个雾滴的平均消光系数。

2.3　资料可靠性分析

考虑到观测资料准确性对分析结果的影响，本文利用雾滴谱仪观测数据对雾中大气能见度进行估算，并与自动站实测值进行对比，对雾滴谱仪观测数据的可靠性进行了初步检验。

气象能见度主要取决于大气的消光系数，根据 Koschmieder 大气能见度公式（Kunkel, 1984），雾中能见度（V）与大气消光系数（K_{ex}）之间具有如下关系：

$$V=\frac{1}{K_{ex}}\ln\frac{1}{\varepsilon} \tag{12}$$

其中，ε=0.02～0.05。如果雾滴谱已知，则液态含水量（LWC）与消光系数（K_{ex}）分别满足下列公式：

$$K_{ex}=\pi\int_0^\infty r^2Q_{ex}(r,\lambda,m)n(r)\mathrm{d}r, \tag{13}$$

$$\mathrm{LWC}=\frac{4}{3}\pi\rho_w\int_0^\infty r^3n(r)\mathrm{d}r, \tag{14}$$

其中，m 是折射率，ρ_w（ρ_w=1 g cm^{-3}）是水的密度，Q_{ex}是云或雾滴的消光效率，一般非降水云雾滴的最大半径在 15～20 μm 左右，远大于光波波长 λ，故可取$Q_{ex}\approx2$，则：

$$K_{ex}=\pi\int_0^\infty r^2Q_{ex}(r,\lambda,m)n(r)\mathrm{d}r\approx2\pi\int_0^\infty r^2n(r)\mathrm{d}r, \tag{15}$$

$$\mathrm{LWC}=\frac{2}{3}K_{ex}\frac{\int_0^\infty r^3n(r)dr}{\int_0^\infty r^2n(r)dr}=\frac{2}{3}K_{ex}r_e. \tag{16}$$

ε取 0.05，则：

$$V=2.0\frac{r_e}{\mathrm{LWC}}, \tag{17}$$

其中，r_e 为有效半径（单位：μm）。

利用公式（17）以及雾滴谱仪观测的液态含水量（LWC）、有效直径（ED）等数据，对 10 次大雾期间与无影山站能见度观测时刻相对应的 2117 个样本的能见度进行估算，并与无影山站能见度实测值进行对比（图 1）。从图 1 中可以看出，利用有效半径和液态含水量估算的能见度与实测值在变化趋势上具有较好的一致性。表明 FM-120 型雾滴谱仪在其观测范围内对 10 次大雾过程的观测资料是可靠的。

2.4　雾过程概况

表 1 列出的是 2016 年 12 月至 2017 年 1 月观测的 10 次大雾以上天气过程的宏观特征。根据雾形成的物理原因（Roach et al., 1976; 邹进上等, 1982; Meyer and Lala, 1990; 李子华等, 2008; Koračin et al., 2014），将 10 次冬季雾分为三类：平流辐射雾、辐射雾、蒸发（雨）雾。平流辐射雾持续时间最长，能见度最低，最低能见度 36 m；辐射雾次之，最低能见度 112 m；蒸发雾持续时间最短，最低能见度 440 m。雾发生时湿度较大，相对湿度均在 90% 以上，地面主导风向以偏北风为主，风速较小，平均风速一般不超过 2 m s^{-1}，10 次雾过程中只有 1 次蒸发（雨）雾平均风速达 2.1 m s^{-1}，这主要与其伴随的天气系统有关，平流辐射雾和辐射雾平均风速均在 1.6 m s^{-1} 以下。

3　结果与讨论

3.1　不同强度雾的微物理结构特征

中华人民共和国国家标准（GB/T 27964-2011）

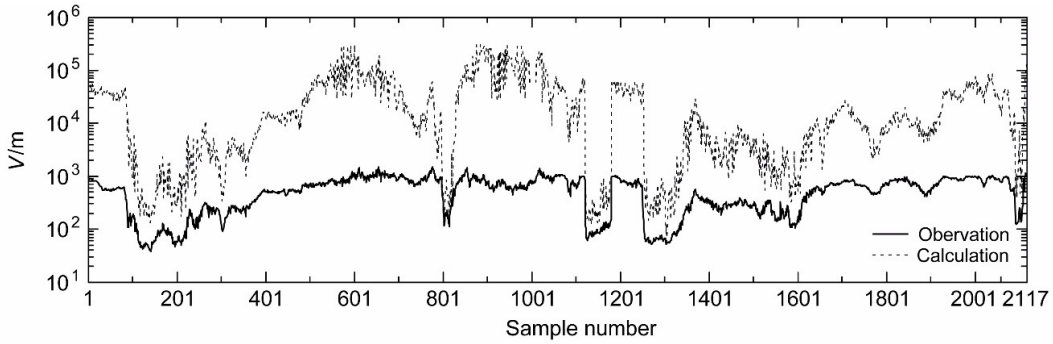

图 1　2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程 2117 个样本能见度计算值与实测值的对比

Fig. 1　The comparison of calculated values and the observed values of visibility for 2117 samples for 10-fog events in Jinan from December 2016 to January 2017

“雾的预报等级”（国家气象中心, 2012）根据能见度（V）对雾的等级进行了如下划分：1000 m≤V<10000 m 为轻雾，500 m≤V<1000 m 为大雾，200 m≤V<500 m 为浓雾，50 m≤V<200 m 为强浓雾，V<50 m 为特强浓雾。依据上述标准以及无影山站能见度实测值，对 10 次冬季雾过程收集的分钟平均资料进行雾等级划分，取得大雾样本（N）5672 个，浓雾样本 2164 个，强浓雾样本 2075 个，特强浓雾样本 226 个。表 2 和图 2 分别给出了四种等级雾的微物理量和平均谱分布特征，从中可见：

（1）大雾平均谱型呈现“单峰”结构，峰值直径为 4 μm，峰值处雾滴数为 8.24 μm^{-1}，平均滴谱最窄，最大雾滴直径只有 12 μm；浓雾平均谱型呈现“双峰”结构，峰值直径分别为 5 μm、14 μm，第一峰值直径处雾滴数为 38.41 μm^{-1}，最大雾滴直径达 32 μm；强浓雾平均谱型呈现“三峰”结构，峰值直径分别为 5 μm、14 μm、22 μm，第一峰值直径处雾滴数为 123.55 μm^{-1}，D≥26 μm 的大滴段曲线位于最上方，大滴数量最多，最大雾滴直径达 50 μm；特强浓雾平均谱型呈现“三峰”结构，峰值直径分别为 5 μm、14 μm、18～20 μm，第一峰值处雾滴数为 232.37 μm^{-1}，小滴数量最多，D<26 μm 的小滴段曲线位于最上方，最大雾滴直径为 46 μm，比强浓雾中的要小。

表 2　2016 年 12 月至 2017 年 1 月观测的济南不同强度（能见度）雾的微物理结构特征

Table 2　Microphysical characteristics for different thickness (visibility) fogs observed in Jinan from December 2016 to January 2017

	数浓度/cm^{-3}		液态含水量/g m^{-3}		中值体积直径/μm		有效直径/μm	
雾的强度	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值
特强浓雾（N=226）	205.68	7.47～820.98	0.03620	0.00341～0.14618	14.34	8.14～20.94	10.25	7.16～14.69
强浓雾（N=2075）	102.75	2.33～1238.25	0.02593	0.00018～0.37345	13.82	4.26～26.10	9.94	4.15～20.75
浓雾（N=2164）	25.69	1.98～306.42	0.00169	0.00012～0.08480	5.37	4.08～21.51	4.81	3.95～15.28
大雾（N=5672）	5.82	0.05～87.86	0.00027	0.00000～0.00668	4.62	0.68～17.43	4.28	0.68～10.36

	D≥30 μm雾滴数		平均半径/μm		平均平方半径/μm^2		离散度	
雾的强度	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值
特强浓雾（N=226）	0.52	0.05～3.50	2.66	2.26～3.22	9.02	6.26～15.64	0.52	0.39～0.77
强浓雾（N=2075）	0.79	0.0～9.62	2.61	1.86～4.55	9.29	3.73～34.43	0.52	0.20～1.00
浓雾（N=2164）	0.02	0.0～3.4	2.04	1.81～3.30	4.54	3.5～16.15	0.28	0.19～0.79
大雾（N=5672）	0.0	0.0～0.2	1.98	1.66～2.84	4.36	2.88～21.51	0.30	0.19～1.47

注：N表示样本数。

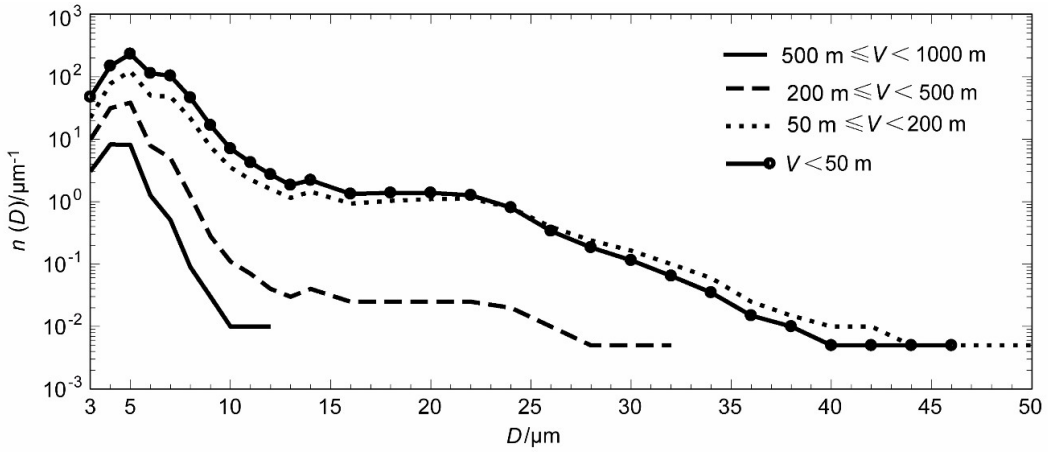

图 2　2016 年 12 月至 2017 年 1 月观测的济南不同强度（能见度）雾的平均谱分布

Fig. 2　Average droplet spectrum for different thickness (visibility) fogs observed in Jinan from December 2016 to January 2017. $n(D)$ and D represent droplet distribution function and fog droplet diameter, respectively

（2）随着雾强度增大，数浓度、液态含水量、中值体积直径、有效直径、平均半径等微物理量平均值呈现增大的趋势，特强浓雾最大，强浓雾次之，大雾最小，但是平均平方半径、D≥30 μm 特大滴平均数的最大值并未出现在特强浓雾中，而是出现在强浓雾中，说明强浓雾中存在的大雾滴较多，雾滴分布很不均匀。

（3）大雾和浓雾中平均半径和平均离散度等较小，雾中以小雾滴为主，粒子分布比较均匀，由于雾滴数量较少，个别谱出现较大的离散度；在强浓雾和特强浓雾中，平均半径和平均离散度等较大，大雾滴增多，粒子分布很不均匀。

（4）在强浓雾中，数浓度、液态含水量以及 D≥30 μm 特大滴数等微物理量起伏变化最大，各微物理量最大值均出现在强浓雾中。如强浓雾中平均数浓度仅为 102.75 cm^{-3}，明显小于特强浓雾（205.68 cm^{-3}），但数浓度范围为 2.33～1238.25 cm^{-3}，比特强浓雾起伏变化（7.47～820.98 cm^{-3}）更大，另外 2 个微物理量也存在相似的特征。

上述统计结果表明，对于 V≥200 m 的雾，能见度与数浓度、液态含水量等各微物理量均存在较好的对应关系，微物理量增大，能见度减小，但是对于 V<200 m 强浓雾等级以上的雾，谱宽、D≥30 μm 大滴数、平均平方半径等微物理量对能见度的指示意义不稳定，其最大值均出现在强浓雾中，而不是出现在特强浓雾中。因此，为了寻找对济南冬季雾中能见度具有指示意义的微物理量，重点分析 V<200 m 强浓雾等级以上雾中的微物理特征，并将强浓雾等级以上雾分为 V<50 m、50 m≤V<100 m、100 m≤V<200 m 三类进行详细分析。表 3 和图 3 分别给出了 V<50 m、50 m≤V<100 m 以及 100 m≤V<200 m 三种强度雾的微物理量和平均谱分布，从中可以发现：

（1）数浓度与消光系数具有相似的变化趋势，最大值均出现在特强浓雾中，50 m≤V<100 m 次之，100 m≤V<200 m 最小；液态含水量、中值体积直径、有效直径、D≥30 μm 特大滴数、平均半径、平均平方半径、平均立方半径等微物理量具有相似的变化趋势，其最大值均出现在 50 m≤V<100 m 的强浓雾中，特强浓雾次之，100 m≤V<200 m 最小。

（2）特强浓雾中雾滴数量最多，50 m≤V<100 m 强浓雾中液态含水量最大；与 50 m≤V<100 m 强浓雾相比，特强浓雾中雾滴更小，小雾滴所占的比例更大，粒子分布更均匀。

（3）50 m≤V<100 m 强浓雾中，数浓度、液态含水量以及 D≥30 μm 特大滴数等微物理量起伏变化最大，其最大值均出现在该强度的雾中。

（4）三种强度雾平均谱型均呈现“三峰”结构，特强浓雾峰值直径分别为 5 μm、14 μm、20 μm，50 m≤V<100 m 和 100 m≤V<200 m 强浓雾均为 5 μm、14 μm、22 μm，第三峰值直径大于特强浓

表 3　2016 年 12 月至 2017 年 1 月观测的济南强浓雾等级以上三种强度（能见度）雾的微物理结构特征

Table 3　Microphysical characteristics of three thickness (visibility) fogs in heavy or extremely dense fogs observed in Jinan from December 2016 to January 2017

	数浓度/cm^{-3}		液态含水量/g m^{-3}		中值体积直径/μm		有效直径/μm		D≥30 μm雾滴数	
雾的强度	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值
V<50 m（N=226）	205.68	7.47～820.98	0.03620	0.00341～0.14618	14.34	8.14～20.94	10.25	7.16～14.69	0.52	0.05～3.50
50 m≤V<100 m（N=907）	144.93	4.27～1238.25	0.04238	0.00061～0.37345	16.83	5.19～25.00	11.91	4.73～19.66	1.26	0.00～9.62
100 m≤V<200 m（N=1026）	64.74	2.33～361.06	0.01249	0.00019～0.12607	11.38	4.26～26.10	8.36	4.15～20.75	0.43	0.00～6.95

	平均半径/μm		平均平方半径/μm^2		平均立方半径/μm^3		离散度		消光系数/m^{-1}	
雾的强度	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值
V<50 m（N=226）	2.66	2.26～3.22	9.02	6.26～15.64	45.56	24.74～124.68	0.52	0.39～0.77	0.04123	0.00265～0.16419
50 m≤V<100 m（N=907）	2.83	1.98～4.55	11.34	4.25～32.97	73.32	10.70～351.42	0.59	0.28～0.92	0.03764	0.00108～0.16614
100 m≤V<200 m（N=1026）	2.42	1.86～4.47	7.67	3.73～34.43	40.32	7.85～381.82	0.46	0.20～1.00	0.01295	0.00038～0.09637

雾；特强浓雾中最大雾滴直径为 46 μm，小于 50 m≤V<100 m 和 100 m≤V<200 m 强浓雾（均为 50 μm）；在 D≤12 μm 的小滴段，特强浓雾的谱分布曲线位于最上方，其小滴数最多，50 m≤V<100 m 次之，100 m≤V<200 m 最少；在直径 12～34 μm 的中滴段，50 m≤V<100 m 强浓雾的谱分布曲线位于最上方，中滴数最多，特强浓雾次之，100 m≤V<200 m 最少；在直径 36～50 μm 的大滴段，50 m≤V<100 m 大滴数最大，100 m≤V<200 m 次之，特强浓雾最少，特别是直径 46 μm 以上的特大滴，特强浓雾中几乎没有。

综上可得如下初步结论：（1）济南冬季雾中，数浓度与消光系数具有较好的正相关关系，对能见度具有一定的指示意义。（2）液态含水量、离散度等对能见度的指示意义不稳定，对于 V≥100 m 的强浓雾等级以下天气，能见度与液态含水量具有一定的反相关关系，对于 V<100 m 的强浓雾等级以上天气，液态含水量、离散度的最大值均出现在 50 m≤V<100 m 强浓雾中，而不是特强浓雾中。

为了验证上述结论，图 4 给出了大雾等级以上雾中能见度（V）与数浓度（N_c）、液态含水量（LWC）、离散度（S）的相关关系（样本数 N=1974）。从中可见：

（1）在可信度 α=0.05 的情况下，能见度与数浓度、液态含水量以及离散度（S）均具有一定的反相关关系，随着能见度的增大，数浓度整体呈现逐渐减小的趋势，但是在 50 m≤V<100 m 和 V<50 m 两种强度的雾中，液态含水量和离散度随能见度的变化趋势出现异常改变，在 V<50 m 的特强浓雾中，液态含水量和离散度普遍小于 50 m≤V<100 m 强浓雾。

（2）从相关系数来看，离散度与能见度反相关程度（相关系数 R=0.4670）明显偏弱，这可能主要与 200 m≤V<1000 m 强浓雾等级以下的雾中雾滴较少、离散度较发散有关。能见度与数浓度反相关程度（R=0.8683）比与液态含水量的（R=0.8645）略偏高，这可能主要与液态含水量在 50 m≤V<200 m 和 V<50 m 两种低能见度雾中变化趋势的异常改变有关。

（3）高数浓度与低能见度具有较好的对应关系，而高液态含水量并不总是与低能见度相对应，特别是在 V<50 m 的特强浓雾中，液态含水量出现了减少的现象，这与上述结论是吻合的。

上述分析可见，FM-120 型雾滴谱仪观测的数浓度对济南冬季雾中的大气能见度具有较好的指示意义，液态含水量、离散度对能见度指示意义不稳定，其异常改变主要出现在 V<50 m 和 50 m≤V<100 m 两种强度雾中。在 V<50 m 的济南冬季特强浓雾中含有大量的小雾滴，而 50 m≤V<100 m 强浓雾中液态含水量最大，直径 30 μm 以上的大雾滴最多，最大雾滴直径最大，粒子分布很不均匀。下面主要分析 V<50 m、50 m≤V<100 m 这两种强度雾中微物理量与光学特征（有效半径、消光系数）的关系。

图 5 给出了两种强度雾中有效半径（r_e）与液态含水量（LWC）和数浓度（N_c）比值之间的拟

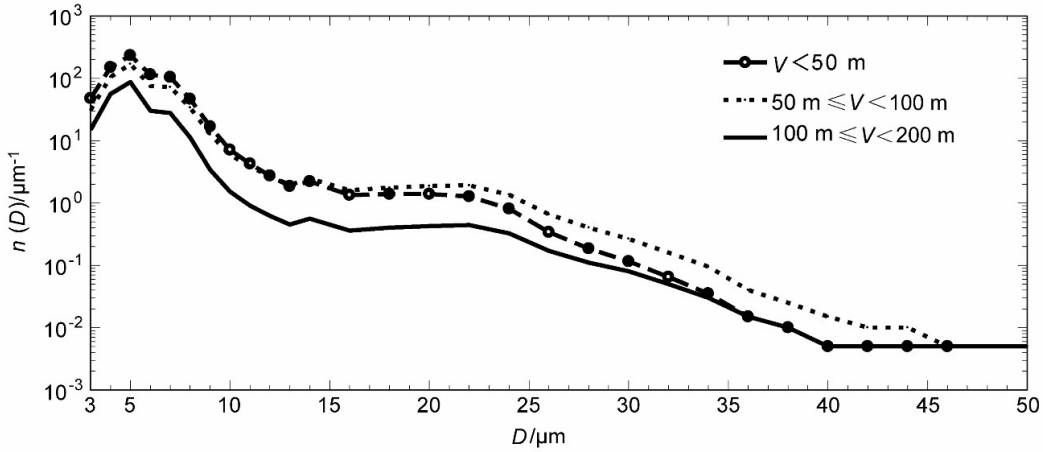

图 3 2016 年 12 月至 2017 年 1 月观测的强浓雾等级以上三种强度（能见度）济南冬季雾的平均谱分布

Fig. 3 Average droplet spectrum of three thickness (visibility) fogs in heavy or extremely dense fogs observed in Jinan from December 2016 to January 2017

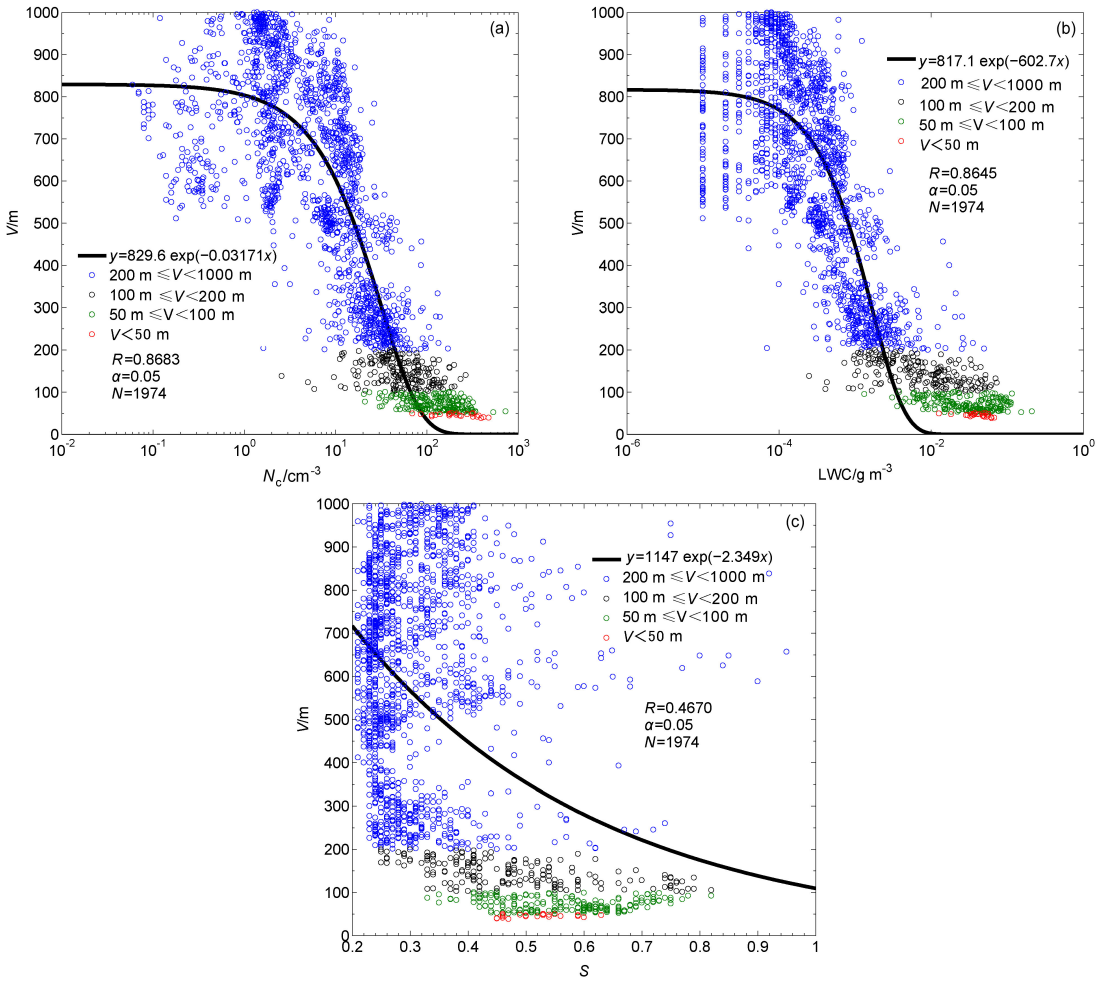

图 4　2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程能见度（V）与（a）数浓度（N_c）、（b）液态含水量（LWC）、（c）离散度（S）的散点分布及其拟合函数

Fig. 4　Scatter diagrams and fitting functions between visibility (V), and (a) numerical concentration (N_c), (b) liquid water content (LWC), (c) relative dispersion of the droplet size distribution (S) for 10-fog events in Jinan from December 2016 to January 2017. R, α, N represent correlation coefficient, significance level, sample number, respectively

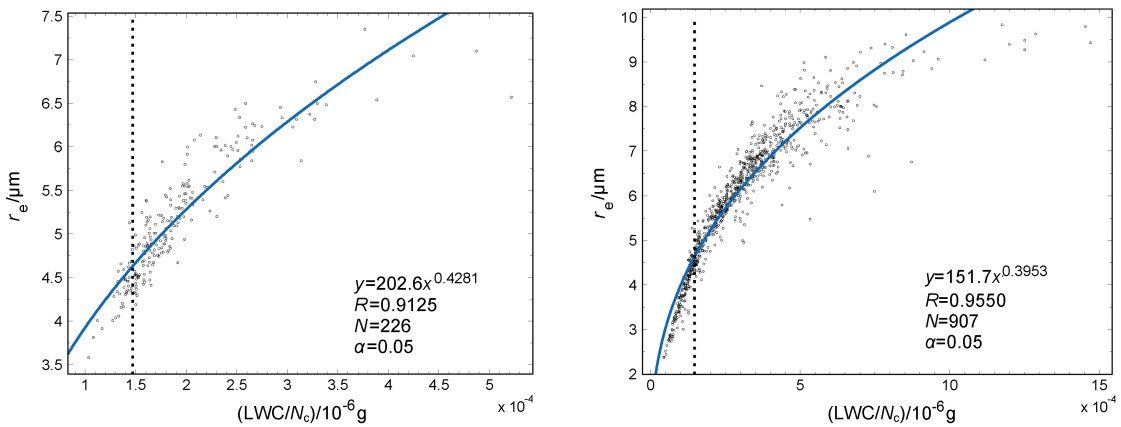

图 5　2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程两种强度雾中有效半径（r_e）与液态含水量（LWC）和数浓度（N_c）比值的散点分布及其拟合函数：（a）V<50 m；（b）50 m≤V<100 m

Fig. 5　Scatter diagrams and fitting functions between the effective radius (r_e) and the ratio of liquid water content (LWC) and number concentration (N_c) in 10-fog events with two thickness fogs in Jinan from December 2016 to January 2017: (a) V<50 m; (b) 50 m≤V<100 m

合关系。从中可见，在显著性水平 α=0.05 的情况下，有效半径与液态含水量和数浓度的比值均呈现较好的幂函数关系，相关系数 R 均在 0.9 以上。两条拟合曲线的交点分别为（0, 0）和（1.47×10^{-4}, 4.63），当液态含水量与数浓度的比值大于 1.47×10^{-4}（图 5 虚线所示）时，在有效半径相同的情况下，特强浓雾中液态含水量与数浓度的比值要小于 50 m≤V<100 m 强浓雾中的比值，即特强浓雾中雾滴更小。

图 6 给出了两种强度雾中消光系数与数浓度、液态含水量对应的散点图，从中可见，在液态含水量相同的情况下，特强浓雾中消光系数更大，在数浓度相同的情况下，50 m≤V<100 m 强浓雾中消光系数更大。分析表明，在液态含水量相同的情况下，特强浓雾中较高的数浓度导致更大的消光系数，而在数浓度相同的情况下，50 m≤V<100 m 强浓雾中较高的液态含水量导致更大的消光系数。

图 7 给出了根据公式（11）计算的两种强度雾中归一化消光系数（K_{ex1}）和离散度、有效半径对应的散点分布图。从图中可见，虽然在特强浓雾中雾滴更小，但是在离散度（或谱型）、有效半径相同的情况下，特强浓雾中归一化消光系数似乎比 50 m≤V<100 m 强浓雾偏大。

综上分析表明，与 50 m≤V<100 m 的强浓雾相比，在 V<50 m 的特强浓雾中，数浓度大，大雾滴和液态含水量偏少，雾滴平均尺度偏小，离散度小，粒子分布更加均匀，在谱型、有效半径相同的情况下其归一化消光系数似乎更大，而且雾滴数量明显偏大，消光系数大，能见度恶化。

3.2 微物理特征、微物理过程的分析

3.2.1 个例分析

3.2.1.1 不同发展阶段微物理量特征、微物理过程的反演分析

图 8 给出了过程 1 大雾持续期间能见度（V）、气温（T）、地面风速（W_s）、数浓度（N_c）、液态含水量（LWC）、D≥30 μm 大滴数、平均半径（$\bar{r}$）以及离散度（S）随时间的演变特征。从中可见，在整个雾发展过程中，微物理结构发生了明显的变化。通常，物理量随时间的变化可以用下式表示：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla, \tag{18}$$

其中，d/dt为个别变化，表示流点在运动中其物理量随时间的变化；$\partial/\partial t$为局地变化，表示固定空间点上物理量随时间的变化；$\boldsymbol{V}\cdot\nabla$为平流变化，表示沿着运动方向物理量的不均匀分布引起的平流变化。因此，对于一个固定空间点上的物理量，其变化可用下式来表示：

$$\frac{\partial}{\partial t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}-\boldsymbol{V}\cdot\nabla. \tag{19}$$

如果风速很小或者物理量分布比较均匀，则平流变化很小，有$\partial/\partial t\approx\mathrm{d}/\mathrm{d}t$。从地面风速随时间的

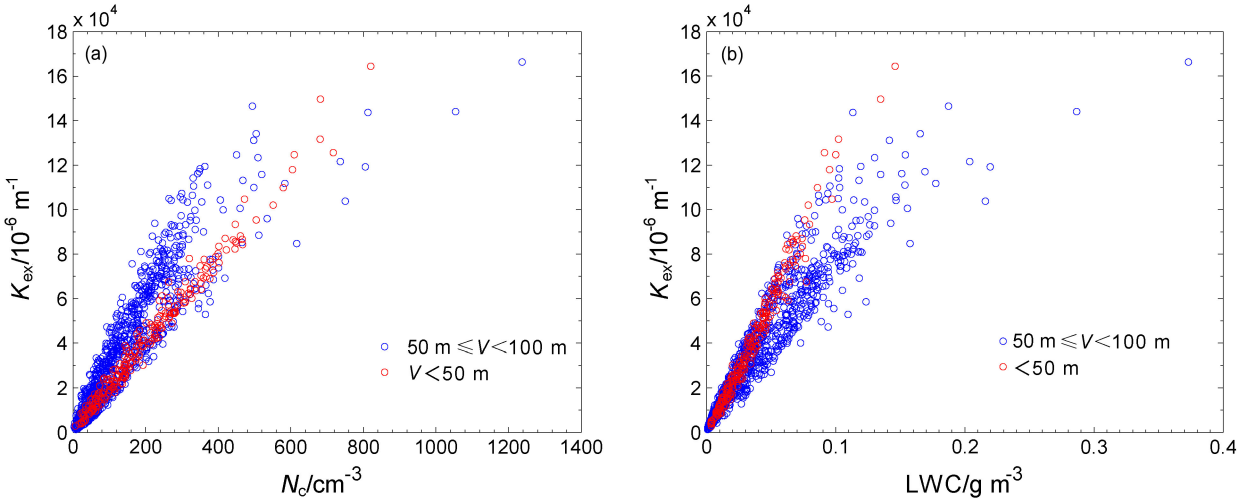

图 6 2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程两种强度（V<50 m；50 m≤V<100 m）雾中消光系数（K_{ex}）与（a）数浓度（N_c）、（b）液态含水量（LWC）对应的散点分布

Fig. 6 Scatter diagrams between extinction coefficient (K_{ex}) and (a) number concentration (N_c), (b) liquid water content (LWC) in 10-fog events with two thickness (V<50 m; 50 m≤V<100 m) fogs in Jinan from December 2016 to January 2017

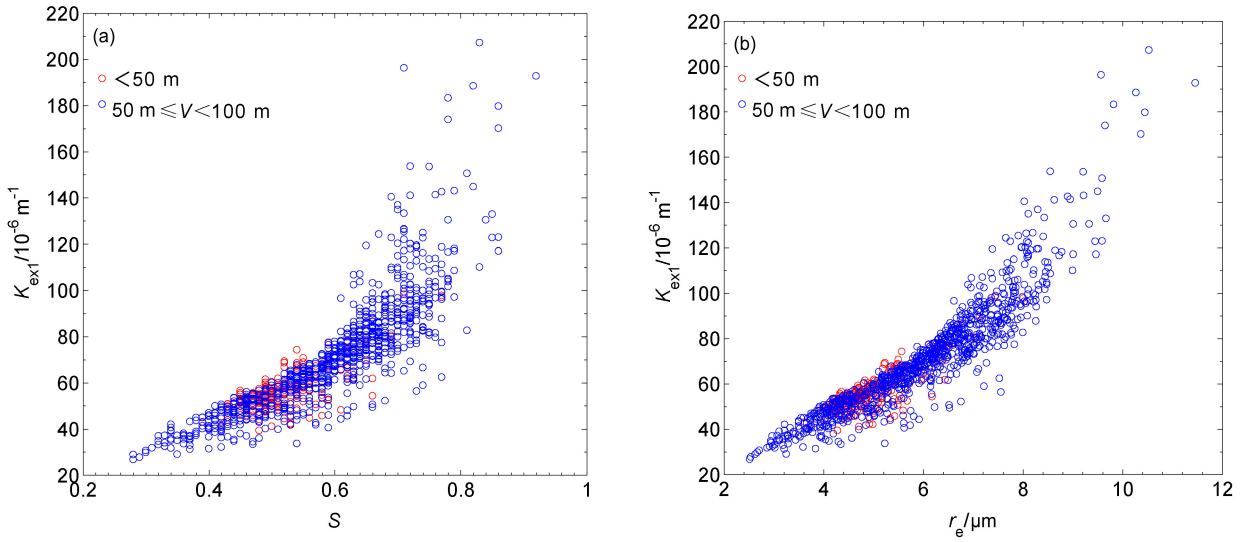

图 7　2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程两种强度（V<50 m；50 m≤V<100 m）雾中归一化消光系数（K_{ex1}）与（a）离散度（S）、（b）有效半径（r_e）对应的散点分布

Fig. 7　Scatter diagrams between normalized extinction coefficient (K_{ex1}) and (a) relative dispersion of the droplet size distribution (S), (b) effective radius (r_e) in 10-fog events with two different thickness (V<50 m; 50 m≤V<100 m) fogs in Jinan from December 2016 to January 2017

演变来看，地面风速起伏变化不大，基本不超过 4 m s^{-1}，大多在 2 m s^{-1} 以下，而且从地面风速与 D≥30 μm 大滴数随时间的演变来看，两者之间对应关系并不稳定，在发展阶段，风速较小，但是 D≥30 μm 大滴数呈现持续增多的趋势，进入成熟阶段，风速开始起伏增大，但是 D≥30 μm 大滴数却出现减少的趋势。综上分析可见，在此次雾发展过程中，平流作用对微物理结构变化影响较小，微物理结构的变化主要与雾中发生的微物理过程有关，D≥30 μm 大滴增多主要则与雾中启动的非湍流碰并（以下简称碰并）增长有关。

根据整个雾过程不同发展阶段的物理量变化特征还可以发现：

（1）形成阶段，数浓度、液态含水量较小，且呈现比较一致的缓慢增加的趋势，平均半径则呈现缓慢减小的趋势，D≥30 μm 大滴数量很少，呈现不连续的间断分布状态，离散度变化不大，说明该阶段以核化和凝结增长为主，雾滴谱较窄，碰并增长很弱，偶有间断的碰并过程发生，但连续的碰并过程并未启动；发展阶段，数浓度在初期经历了缓慢的增大后迅速增加，之后增速放缓，而液态含水量、平均半径在初期出现减小之后显著增大，D≥30 μm 大滴数呈现先间断、后连续并迅速增大的分布状态，离散度则呈现先缓慢增大，后明显增大的趋势，说明该阶段前期，核化和凝结增长仍占主导，大量的小滴争食大气中的水分导致大滴生长受限，之后随着数浓度的增大，开始启动连续的碰并增长过程，D≥30 μm 大滴数、平均半径增大，同时大雾滴在碰并过程中消耗大量的小雾滴，数浓度增幅放缓；成熟阶段，数浓度、液态含水量、D≥30 μm 大滴数、平均半径、离散度均呈现“增大—减小”的振荡变化特征，但是与其他微物理量相比，数浓度的起伏变化较小，表明该阶段碰并过程增强，与核化、凝结增长同时发挥主导作用，一方面碰并增长过程消耗大量小雾滴，使数浓度下降，另一方面，大量的凝结核通过核化和凝结增长形成新的雾滴，使数浓度总体变化不大；减弱阶段，数浓度和液态含水量均呈现起伏下降的趋势，平均半径先减小后变化平稳，离散度明显减小，平稳变化一段时间后逐渐增大，说明该阶段核化、凝结以及碰并过程迅速减弱，雾滴数量不断减少，离散度呈现增大的趋势。

（2）在整个雾过程中，数浓度与液态含水量、数浓度与平均半径呈现大致同升同降的趋势；能见度与地面温度均呈现振荡下降—振荡上升变化趋势，而数浓度、液态含水量等微物理量则呈现振荡上升—振荡下降的特征，即能见度与地面温度具有大致相同的变化趋势，与各微物理量呈现大致相反的变

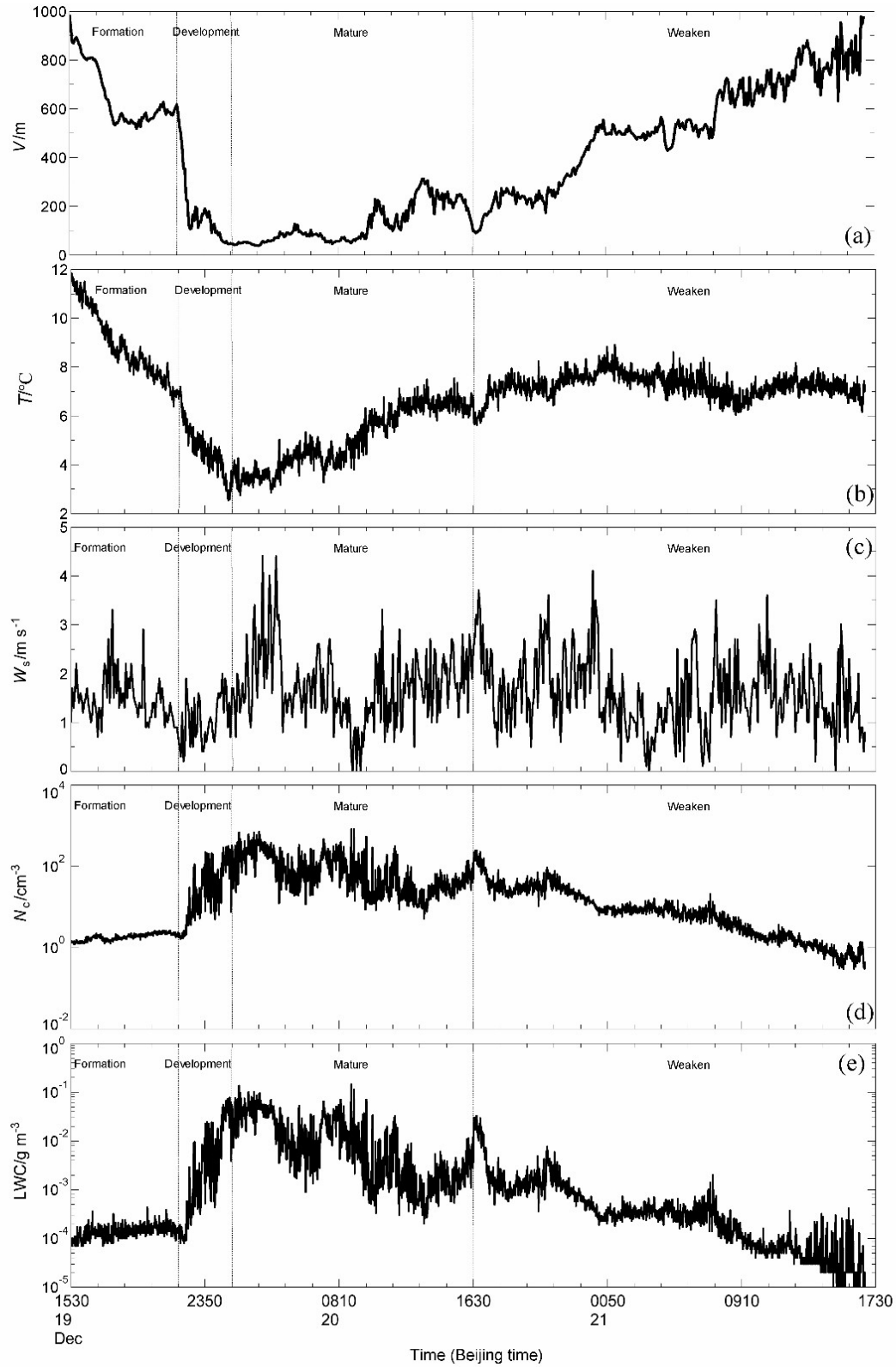

图 8　2016 年 12 月 19～21 日济南大雾过程（a）能见度（V）、（b）气温（T）、（c）地面风速（W_s）、（d）数浓度（N_c）、（e）液态含水量（LWC）、（f）D≥30 μm 大滴数、（g）平均半径（$\bar{r}$）以及（h）离散度（S）随时间的演变

Fig. 8　The evolutions of (a) visibility(V), (b) temperature (T), (c) wind speed (W_s), (d) droplet number concentration (N_c), (e) liquid water content (LWC), (f) fog droplets with diameter more than 30 μm (D≥30 μm fog droplets), (g) mean radius ($\bar{r}$), and (h) relative dispersion of the fog droplet

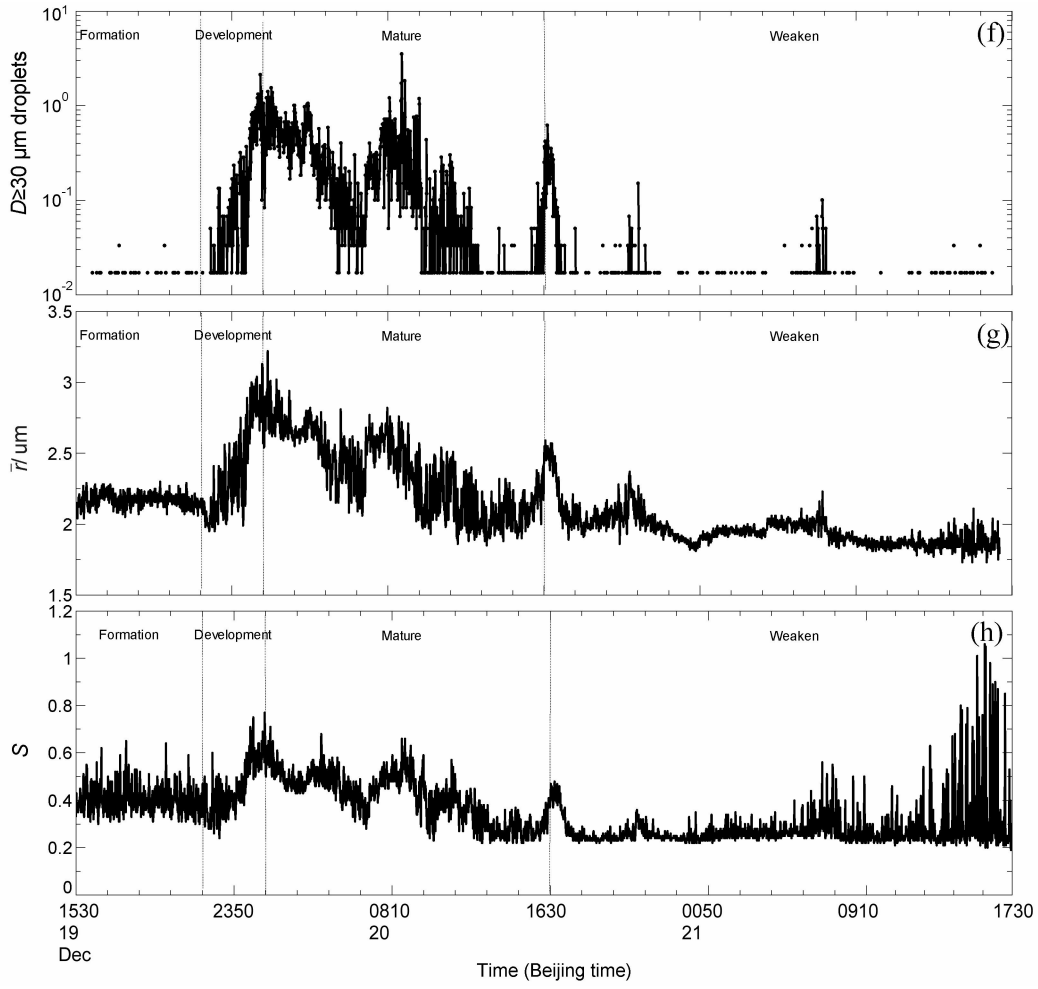

图 8　（续）

Fig. 8　(Continued)

化趋势。表明核化、凝结增长（或雾滴蒸发）是济南冬季雾发展过程中最主要的微物理过程，在整个过程中起主导作用；温度与核化、凝结增长等过程密切相关，温度下降（升高）是核化增强（减弱）、凝结增长（雾滴蒸发）的主要原因，导致数浓度、液态含水量等微物理量增加（或减少）。碰并过程主要发生在发展和成熟阶段，在生成和减弱阶段很弱，以未碰并或偶发碰并为主。

3.2.1.2　不同强度雾中微物理特征、微物理过程的反演分析

图 9 给出了过程 1 中一段强浓雾后来演变为特强浓雾期间（12 月 20 日 00:35～03:25）各物理量随时间的演变，其中 00:35～01:20 定义为强浓雾时段（50 m≤V<100 m），01:20～03:25 定义为特强浓雾时段，能见度在 50 m 以下的有 21 个时次，超过 50 m 的有 5 个时次。从中可以发现：

（1）强浓雾阶段，地面风速（W_s）起伏变化不大，一般在 2 m s^{-1} 以下，随着温度起伏下降，能见度逐渐恶化，数浓度、液态含水量、D≥30 μm 特大滴数呈现较为一致的起伏增大趋势，平均半径则呈现增大—减小—增大—平稳的变化特点，离散度起伏变化较大，粒子分布很不均匀。表明该阶段碰并过程增强，与核化、凝结过程同时发挥主导作用，D≥30 μm 特大滴数增多，离散度增大。

（2）在特强浓雾阶段，地面风速呈现起伏增大的趋势；数浓度总体呈现起伏增大趋势，但前期变化较平稳，后期明显增大；平均半径呈现起伏减小的变化趋势，说明该阶段小雾滴增多、所占比例增大；液态含水量出现了振荡变化的特点，首先呈现与数浓度相反的变化趋势，数浓度增大，液态含水量减小，然后液态含水量逐渐增大，并呈现与数浓度较为一致的变化趋势，后期液态含水量变化不

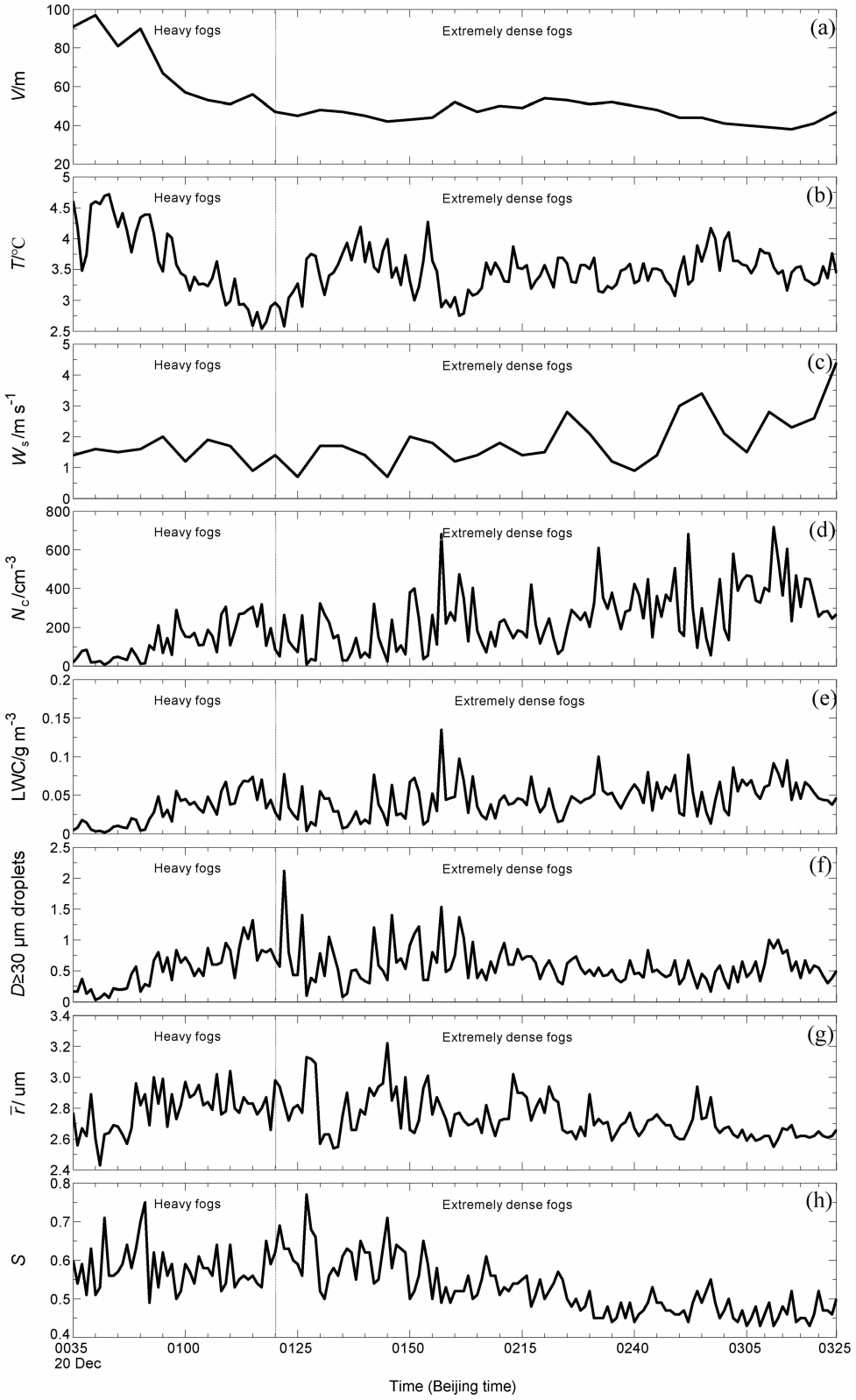

图 9 2016 年 12 月 19～21 日济南大雾过程强浓雾时段和特强浓雾时段（a）能见度（V）、（b）气温（T）、（c）地面风速（W_s）、（d）数浓度（N_c）、（e）液态含水量（LWC）、（f）D≥30 μm 大滴数、（g）平均半径（$\bar{r}$）以及（h）离散度（S）随时间的演变

Fig. 9 The evolutions of (a) visibility (V), (b) temperature (T), (c) wind speed (W_s), (d) fog droplet number concentration (N_c), (e) liquid water content (LWC), (f) fog droplets with diameter more than 30 μm (D≥30 μm fog droplets), (g) mean radius ($\bar{r}$), and (h) relative dispersion of the fog droplet size distribution (S) with time in heavy and extremely dense fogs in Jinan during 19–21 December 2016

大，但数浓度显著增大；D≥30 μm 大滴数的变化趋势与液态含水量大致相似，但后期迅速减少；离散度在前期达到最大值之后，呈现逐渐减小的变化趋势。综合数浓度与平均半径、数浓度与液态含水量、D≥30 μm 大滴数、离散度以及地面风速随时间的演变情况进行分析，该阶段核化和凝结增长仍占主导，小雾滴增多，碰并过程则呈现减弱趋势。

（3）综上分析可以推测，与强浓雾相比，特强浓雾中碰并过程可能更弱，小雾滴更多，导致能见度恶化。

3.2.2　不同强度雾中碰并过程强度分析

根据 Liu et al.（2005, 2006）研究结果，云中任意物理量自动转化率可概括为

$$P = P_0 f_{\mathrm{T}}, \tag{20}$$

其中，P 是自动转化率；P_0 是自转化开始后的率函数；f_{T} 是描述自转化过程的阈值函数，可用来表示自动转化过程的临界状态，其表达式由 Liu et al.（2006, 2007）推导得出：

$$f_{\mathrm{T}} = \frac{P}{P_0} = \frac{\int_{r_c}^{\infty} r^6 n(r)\mathrm{d}r}{\int_0^{\infty} r^6 n(r)\mathrm{d}r} \frac{\int_{r_c}^{\infty} r^3 n(r)\mathrm{d}r}{\int_0^{\infty} r^3 n(r)\mathrm{d}r}, \tag{21}$$

式中，$r_c \approx 4.09\times10^{-4}\beta_{\mathrm{con}}^{1/6}\left(N_c^{1/6}/\mathrm{LWC}^{1/3}\right)$是自动转化的临界半径，$\beta_{\mathrm{con}}$≈$1.15\times10^{23}$ 为经验常数（Liu et al., 2004）。

$$P_0 = \alpha k_2 N_c^{\,2} r_6^6 r_\delta^\delta, \tag{22}$$

其中，系数k_2≈1.9×10^{11} cm^{-3} s^{-1}，r_δ=$\left(\int r^\delta n(r)\mathrm{d}r/N_s\right)^{1/\delta}$为第 δ 阶平均半径（单位：cm）。当$\alpha = (4/3)\pi\rho_w$，δ=3 时，P_0 代表液态含水量的自动转化率函数（单位：g cm^{-3} s^{-1}）。当α = 1，δ=0 时，P_0 代表数浓度的自动转化率函数（单位：cm^{-3} s^{-1}）（Liu et al., 2007）。

通常 P 表示云滴向雨滴胚胎的自动转化率，能近似反映雾中碰并过程的强弱。利用公式（20）～（22），对济南不同强度雾中数浓度自动转化率（P_{N}）、液态含水量自动转化率（P_{L}）及其自动转化率函数（P_{N0}、P_{L0}）进行计算（结果见表 4）。从表中可见：

（1）在 500 m≤V<1000 m 的大雾中，云滴向雨滴胚胎的自动转化率均为 0；在 200 m≤V<500 m 的浓雾中，发生碰并的样本占比很小，仅为 0.98%，平均数浓度和液态含水量自转化率分别为 9.08×10^{-8} cm^{-3} s^{-1}、2.82×10^{-17} g cm^{-3} s^{-1}；在 100 m≤V<200 m 强浓雾，出现碰并的样本占比为 21.83%，平均数浓度和液态含水量自转化率分别为 7.91×10^{-6} cm^{-3} s^{-1}、4.05×10^{-15} g cm^{-3} s^{-1}；在 50 m≤V<100 m 的强浓雾中，发生碰并的样本占比为 63.07%，平均数浓度和液态含水量自转化率分别为 4.19×10^{-5} cm^{-3} s^{-1}、2.06×10^{-14} g cm^{-3} s^{-1}；在 V<50 m 的特强浓雾中，发生碰并的样本占比为 54.42%，平均数浓度和液态含水量自转化率分别为 1.28×10^{-5} cm^{-3} s^{-1}、3.10×10^{-16} g cm^{-3} s^{-1}，均小于 50 m≤V<100 m 的强浓雾。

（2）分析表明，在 V≥200 m 的济南冬季雾中，碰并过程很少发生；在 100 m≤V<200 m 的强浓雾中，以未碰并或间断碰并为主；碰并过程主要出现在 V<100 m 强浓雾和特强浓雾中，与 V<50 m 的特强浓雾相比，50 m≤V<100 m 的强浓雾中碰并过程发生的概率更大、强度更强。

表 4　2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次雾过程中不同强度（能见度）雾的自动转化率和自动转化率函数

Table 4　The autoconversion rate and autoconversion rate function in 10-fog events with different thickness (visibility) fogs observed in Jinan from December 2016 to January 2017

雾的强度	P_{N0}/cm^{-3} s^{-1}		P_{N}/cm^{-3} s^{-1}		P_{L0}/g cm^{-3} s^{-1}		P_{L}/g cm^{-3} s^{-1}		P_{N}=0样本占比
	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	
50 m≤V<100 m（N=5672）	8.88×10^{-8}	8.94×10^{-14}～2.1×10^{-5}	0	0	1.18×10^{-17}	3.28×10^{-24}～4.36×10^{-15}	0	0	100%
200 m≤V<500 m（N=2164）	6.96×10^{-6}	4.25×10^{-10}～2.52×10^{-3}	9.08×10^{-8}	0～1.08×10^{-4}	1.71×10^{-15}	1.83×10^{-20}～8.17×10^{-13}	2.82×10^{-17}	0～3.52×10^{-14}	99.08%
100 m≤V<200 m（N=1026）	1.38×10^{-4}	3.61×10^{-9}～5.33×10^{-3}	7.91×10^{-6}	0～1.01×10^{-3}	5.39×10^{-14}	1.67×10^{-19}～2.34×10^{-12}	4.50×10^{-15}	0～4.90×10^{-13}	78.17%
50 m≤V<100 m（N=907	7.87×10^{-4}	1.51×10^{-7}～3.07×10^{-2}	4.19×10^{-5}	0～3.63×10^{-3}	3.23×10^{-13}	9.51×10^{-18}～1.09×10^{-11}	2.06×10^{-14}	0～1.29×10^{-12}	36.93%
V<50 m（N=226）	4.94×10^{-4}	3.56×10^{-6}～7.37×10^{-3}	1.28×10^{-6}	0～1.09×10^{-4}	1.07×10^{-13}	9.51×10^{-16}～1.58×10^{-12}	3.10×10^{-16}	0～2.34×10^{-14}	45.58%

图 10 给出了济南特强浓雾和 50 m≤V<100 m 强浓雾中发生自转化过程的样本自转化率散点分布图。从中可见，对于发生自转化过程的样本，在率函数、数浓度以及液态含水量相同的情况下，特强浓雾中自转化率普遍小于 50 m≤V<100 m 强浓雾，即特强浓雾中碰并强度较弱，这与 3.2.1.2 节的结论是吻合。

3.2.3 进一步讨论

通过对济南不同强度济南雾中微物理结构以及数浓度、液态含水量自转化率特征分析发现，在济南冬季特强浓雾中含有大量的小雾滴，但各微物理量的最大值、最大的起伏变化并未出现在特强浓雾中，而是出现在 50 m≤V<100 m 强浓雾中，这可能与 50 m≤V<100 m 强浓雾中较强的碰并增长有关，碰撞过程中产生的并合和破碎（王鹏飞和李子华, 1989），可能是导致 50 m≤V<100 m 强浓雾中数浓度等微物理量产生较大起伏的主要原因。

另外，Liu et al.（2004, 2005, 2006）在推导自转化率公式时只考虑了小粒子之间的碰并过程，未考虑大粒子碰并小粒子的过程，虽然利用该公式计算结果分析的微物理过程能较好地解释济南不同强度冬季雾微物理结构特征的差异，但是该结果是否能真实地反映济南冬季雾中发生的微物理过程，还存在不确定性，需要在以后的试验和研究中进一步验证。

3.3 冬季雾中能见度影响因子的探讨

通过对济南 10 次冬季雾期间雾滴谱仪观测数

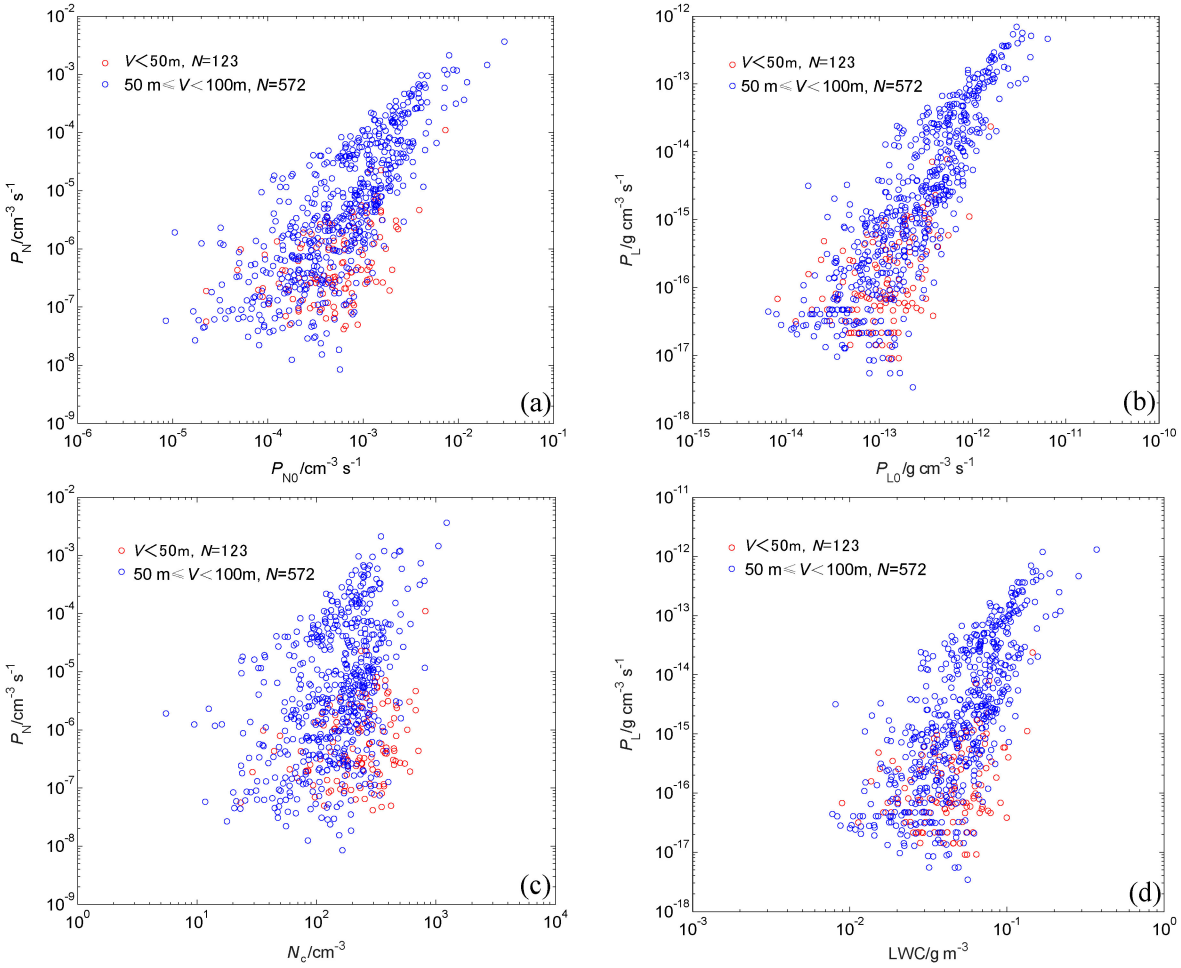

图 10 2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次雾过程中特强浓雾和强浓雾的自动转化率和自动转化率函数的散点分布：（a）P_N–P_{N0}；（b）P_L–P_{L0}；（c）P_N–N_c；（d）P_L–LWC

Fig. 10 Scatter diagrams of autoconversion rate and autoconversion rate function in 10-fog events with heavy fogs and extremely dense fogs in Jinan from December 2016 to January 2017: (a) P_N–P_{N0}; (b) P_L–P_{L0}; (c) P_N–N_c; (d) P_L–LWC. P_N and P_L represent autoconversion rate of number concentration and autoconversion rate of liquid water content, respectively; P_{N0} and P_{L0} represent autoconversion rate function of number concentration and autoconversion rate function of liquid water content, respectively

据计算的能见度理论值（V_t）与实测值（V）深入分析（图 1）发现，利用有效半径和液态含水量估算的能见度与实测值虽然在变化趋势上具有较好的一致性，但比实测值大 1～2 个数量级。图 11 给出了 V<500 m（N=866）以及 V≥500 m（N=1251）雾中能见度理论值和实测值对应的散点图及其相关关系。从中可见，两种强度雾中，其能见度理论值与实测值大致呈线性关系，在 V≥500 m 的雾中，能见度理论值比实测值约大 2 个数量级（y=72.36x−1602），在 V<500 m 的雾中，理论值比实测值约大 1 个数量级（y=22.49x−1408），而且雾强度越大，差异越小。究其原因，可能主要有两方面的原因：

（1）济南冬季雾观测期间，大气层结非常稳定，长时间的逆温结构使大量的气溶胶粒子在济南低层大气中聚集，这些气溶胶粒子所产生的消光系数是影响大气能见度的重要因素。

（2）FM-120 雾滴谱仪的观测范围为直径 2～50 μm 的雾滴，无法捕捉到直径 2 μm 以下的小雾滴，导致计算的消光系数偏小。

下面分析影响雾中能见度的主要因素。Liu（1992）引入两个统计学参量偏度（S_k）和峰度（K_u）来分析滴谱的实际分布特征，并将其运用到滴谱谱型的拟合分析中。

$$f(D)=\frac{n(D)}{\int n(D)\mathrm{d}D}, \tag{23}$$

$$S_k=\frac{\int\left(D-\overline{D}\right)^3 f(D)\mathrm{d}D}{\left[\int\left(D-\overline{D}\right)^2 f(D)\mathrm{d}D\right]^{\frac{3}{2}}}, \tag{24}$$

$$K_u=\frac{\int\left(D-\overline{D}\right)^4 f(D)\mathrm{d}D}{\left[\int\left(D-\overline{D}\right)^2 f(D)\mathrm{d}D\right]^2}-3, \tag{25}$$

当 S_k=K_u=0 时，谱型为正态分布；当 S_k>0 时，为正偏分布；当 S_k<0 时，为负偏分布；当 K_u>0 时，谱型呈现尖峰态分布；当 K_u<0 时，呈现低峰态分布。

对于 Gamma 分布，有

$$n(D)=N_0D^{\mu}\exp(-\lambda D), \tag{26}$$

其偏度和峰度分别为$S_k=2/\sqrt{1+\mu}$和$K_u=6/(1+\mu)$。

对于 M-P 分布，它是 Gamma 分布在 μ=0 时的特例，以 M-P 分布的偏度和峰度为基准引入偏度偏离系数（C_s）和峰度偏离系数（C_k），$C_s=S_k^2/4$，$C_k=K_u/6$，则对于 Gamma 分布，有 C_s=C_k。

图 12 给出了 10 次雾过程每分钟平均谱的 C_s、C_k 散点分布（N=10554），从图中可见，散点大多在 y=x 直线附近，每分钟平均谱大致符合 Gamma 分布，部分存在较大偏离可能与截断谱有关，公式推导时直径区间是（0，∞），而实际雾滴谱直径

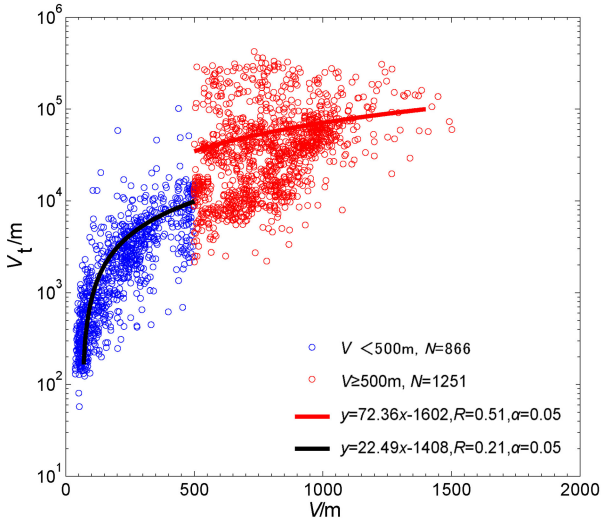

图 11　2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次雾过程中两种强度（V<500 m；V≥500 m）雾的能见度理论值（V_t）和实测值（V）对应的散点图及其拟合函数

Fig. 11　Scatter diagram and fitting functions between the calculated visibility (V_t) and the observed visibility (V) in 10-fog events with two thickness (V<500 m; V≥500 m) fogs in Jinan from December 2016 to January 2017

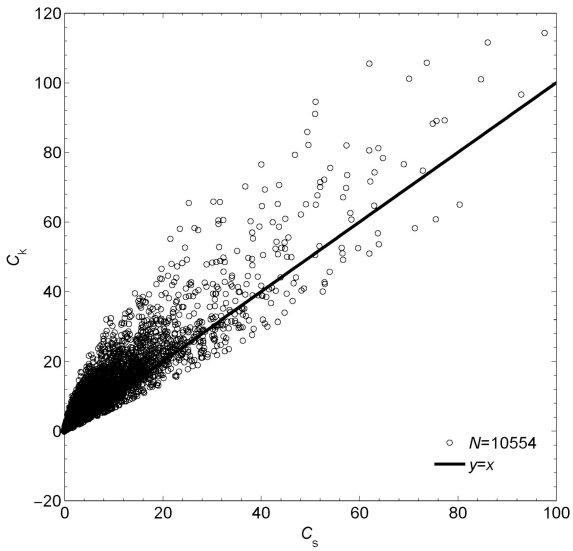

图 12　2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程每分钟平均谱偏度偏离系数（C_s）和峰度偏离系数（C_k）散点分布及拟合函数

Fig. 12　Scatter diagram and fitting function between deviation coefficients of skewness (C_s) and kurtosis(C_k) of average spectrum per minute in 10-fog events in Jinan from December 2016 to January 2017

区间是 (2, 50) μm，导致强度较弱的窄谱雾出现较大的偏离。

根据雾滴谱资料计算的能见度理论值对雾强度进行分类，并结合 S_k、K_u、C_s、C_k 以及离散度（S）等参数，来分析不同强度雾的微物理特征。表 5 给出了根据能见度理论值划分的不同强度雾的物理参数，从中可见，随着 V_t（V 的理论值）的增大，数浓度和液态含水量逐渐减小；分钟平均谱主要以正偏分布为主，但是在 V_t≥3000 m 的雾中，出现偏向小滴一端的分钟平均谱，说明在强度小的雾中，以小滴为主；在 V_t<1000 m 的雾中，数浓度和液态含水量最大，大滴较多且分布比较均匀，平均谱较好地服从 Gamma 分布。

表 6 给出了不同强度雾的 Gamma 分布拟合参数及其在不同区间的积分数浓度，从中可见，根据能见度理论值划分的不同强度雾均较好地服从 Gamma 分布，且相关程度较高（R 均在 0.97 以上）；利用拟合的 Gamma 分布函数在直径（2, 50）μm 区间对 6 种不同强度雾的积分数浓度比雾滴谱仪观测的数浓度（见表 5）略偏小，但拟合结果具有较好的代表性；直径 2 μm 以下的小雾滴所占比例很小，均小于 8%。

表 5　根据 2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程能见度理论值划分的不同强度雾的物理参量

Table 5　Physical parameters with different intensities (visibility) fogs according to the calculated values of visibility obtained from 10-fog events in Jinan from December 2016 to January 2017

	数浓度/cm^{-3}		液态含水量/g m^{-3}		离散度（S）	
雾的强度	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值
V_t<1000 m (N=1456)	161.65	18.59～1238.25	0.04056	0.00508～0.37345	0.56	0.26～0.87
1000 m≤V_t<2000 m (N=560)	47.65	5.99～87.86	0.00558	0.00235～0.01786	0.43	0.2～0.91
2000 m≤V_t<3000 m (N=520)	33.15	5.54～49.84	0.00245	0.00149～0.00815	0.36	0.2～0.92
3000 m≤V_t<12000 m (N=2694)	16.81	0.14～36.61	0.00083	0.00022～0.00457	0.29	0.19～1.53
12000 m≤V_t<30000 m (N=1680)	6.11	0.09～10.52	0.00026	0.00004～0.00047	0.32	0.2～1.39
V_t≥30000 m (N=3644)	1.51	0.05～4.33	0.00007	0～0.00020	0.32	0.18～1

	偏度（S_k）		峰度（K_u）		偏度偏离系数（C_s）		峰度偏离系数（C_k）	
雾的强度	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值
V_t<1000 m (N=1456)	3.86	1.8～8.14	23.70	2.85～140.15	3.88	0.81～16.57	3.95	0.48～23.36
1000 m≤V_t<2000 m (N=560)	4.65	0.47～9.34	47.71	0.68～222.01	5.92	0.06～21.79	7.95	0.11～37
2000 m≤V_t<3000 m (N=520)	4.67	0.36～14.95	62.91	0.8～531.03	6.76	0.03～55.89	10.49	0.13～88.51
3000 m≤V_t<12000 m (N=2694)	3.65	−0.07～20.15	58.06	−0.32～666.7	6.21	0～101.56	9.68	−0.05～111.12
12000 m≤V_t<30000 m (N=1680)	3.67	−0.21～17.23	46.62	−0.19～425.97	6.20	0～74.2	7.77	−0.03～71
V_t≥30000 m (N=3644)	2.27	−0.72～11.85	16.25	−1.69～172.18	2.33	0～35.12	2.71	−0.28～28.7

表 6　根据 2016 年 12 月至 2017 年 1 月济南 10 次大雾过程中能见度理论值划分的不同强度雾的 Gamma 分布拟合参数、数浓度拟合值和实测值的相关系数以及不同区间数浓度积分结果

Table 6　The fitting parameters of gamma distribution function, correlation coefficients between fitted number concentrations and measured ones, and integrated number concentration of different interval in different intensities (visibility) according to the calculated values of visibility of 10-fog events in Jinan from December 2016 to January 2017

	Gamma分布拟参数				D∈(2, 50)积分结果	D∈(0, 2)积分结果	
雾的强度	N_0	μ	λ	相关系数（R）	数浓度/cm^{-3}	数浓度/cm^{-3}	占比
V_t<1000 m (N=1456)	4.341×10^{-2}	13.88	2.818	0.9739	149.57	4.39	2.94%
1000 m≤V_t<2000 m (N=560)	4.078×10^{-6}	30.83	6.599	0.9803	42.39	0.33	0.78%
2000 m≤V_t<3000 m (N=520)	5.363×10^{-7}	35.15	7.643	0.9850	30.71	0.2	0.65%
3000 m≤V_t<12000 m (N=2694)	1.244×10^{-4}	25.64	5.834	0.9869	16.46	0.42	2.55%
12000 m≤V_t<30000 m (N=1680)	7.31×10^{-4}	22.06	5.266	0.9948	6.02	0.32	5.35%
V_t≥3000 0m (N=3644)	1.395×10^{-3}	17.49	4.221	0.9975	1.43	0.11	7.69%

注：表中的所有相关系数均通过显著性水平为0.05的显著性检验。

拟合和积分结果表明，雾滴谱仪无法观测的小雾滴虽然对能见度有一定影响，但由于所占比例较小，对能见度的影响不是很大。因此，对于污染大气，导致能见度理论值比实测值大很多的主要影响因子可能是低层大气存在的大量的气溶胶粒子。

图 13 给出了 2016 年 12 月 19 日 15:00 至 21 日 17:00 济南大雾过程（个例 1）无影山站能见度、泉城广场和蓝翔技校质监站 PM2.5 质量浓度随时间的演变。从图中可以看出，两站观测的 PM2.5 质量浓度在数值上虽有差异，但变化趋势具有较好的一致性。大雾期间，PM2.5 大多在 250 μg m^{-3} 以上，达到严重污染的程度，说明期间大气中存在大量的气溶胶粒子。另外 PM2.5 质量浓度大值区与能见度低值区有一定的对应关系，但是对应关系并不稳定，在雾的形成和消散阶段，两者具有较好的对应关系，但是发展和成熟阶段，两者之间的对应关系不显著，PM2.5 质量浓度明显下降，这可能与发展和成熟阶段数浓度和液态含水量增大，大雾滴增多，部分污染物随大雾滴沉降到地面引起。

上述分析表明，对于污染大气，基于雾滴谱仪观测资料来估算雾中的大气能见度是不够的，必须同时考虑气溶胶粒子的影响。Liu et al.（2017）通过对近 50 年来我国大雾微物理研究成果分析发现，随着我国经济的快速发展，在近 30 年的城市化进程中，雾的微观物理结构也出现了一些其他国家没有出现的特殊特征，城市化导致雾滴数浓度增加，雾滴大小和雾水含量降低，能见度降低。可见，对于污染大气中的雾，其能见度与大气中存在的气溶胶粒子密切相关，雾强度越大，数浓度、液态含水量以及大雾滴越多，随大雾滴沉降到地面的气溶胶粒子越多，能见度理论值与实测值的差异越小。但是，由于目前缺乏雾滴谱和气溶胶的同步观测资料，上述结论还具有不确定性，需要在以后的试验中进一步验证。

4　结论

本文利用济南 10 次冬季雾过程雾滴谱仪和自动气象站等的观测数据，分析了济南不同强度冬季雾的微物理结构特征，研究了其中的微物理过程，探讨了微物理结构、微物理过程及强度对能见度的影响，得出如下主要结论：

（1）济南冬季雾强度不同，其谱分布特征具有明显的差异，大雾平均谱型呈现“单峰”结构，浓雾平均谱型呈现“双峰”结构，强浓雾和特强浓雾平均谱型均呈现“三峰”结构，雾在变浓的过程中，谱型由“单峰”结构逐渐向“多峰”结构发展。

（2）济南冬季雾中，数浓度、液态含水量、离散度与能见度均呈现一定的反相关关系，数浓度与能见度反相关程度最高，对能见度具有较好的指示意义；液态含水量、离散度对能见度的指示意义不稳定，对于 $V \geqslant 100$ m 强浓雾等级以下的天气，液态含水量与能见度具有较好的反相关关系，对于 $V < 100$ m 强浓雾等级以上的天气，液态含水量的变化趋势出现异常改变，与能见度反相关关系不显著。

（3）在有效半径相同的情况下，特强浓雾中雾滴更小；在液态含水量一定的情况下，特强浓雾中较高的数浓度导致更大的消光系数；在数浓度一

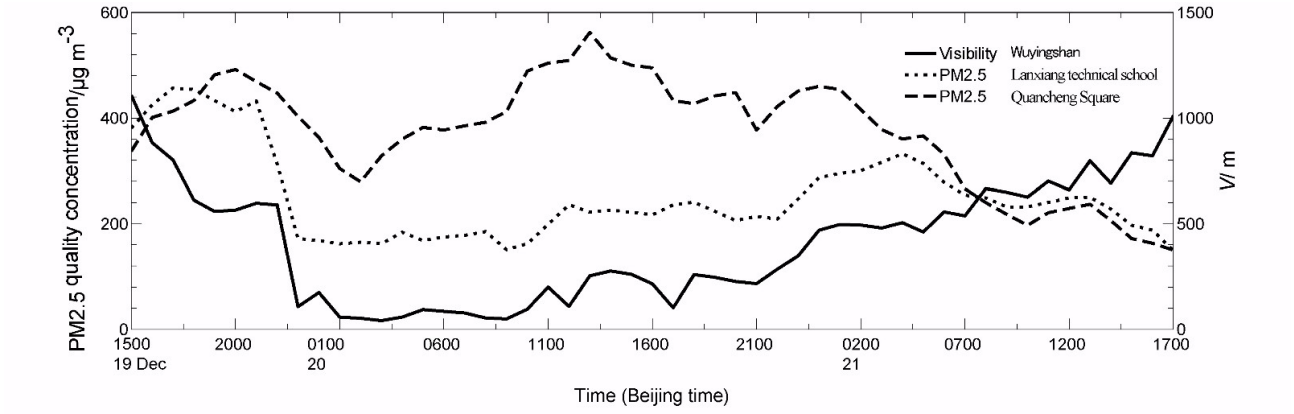

图 13　2016 年 12 月 19～21 日济南大雾过程无影山站能见度，泉城广场、蓝翔技校质监站 PM2.5 质量浓度随时间的演变

Fig. 13　The evolutions of the visibility from Wuyingshan station, and the quality concentrations of PM2.5 from Quancheng Square station and Lanxiang Technical School station during the fogs in Jinan during 19–21 December 2016

定的情况下，50 m≤V<100 m 强浓雾中较高的液态含水量导致更大的消光系数；在谱型、有效半径相同的情况下，特强浓雾中归一化消光系数似乎更大。

（4）环境温度与雾滴核化、凝结增长密切相关，温度下降（升高）导致雾滴核化增强（减弱）、凝结增长（雾滴蒸发）；核化、凝结增长是济南冬季雾中最主要的微物理过程，在整个雾过程中发挥主导作用；碰并增长主要发生在发展和成熟阶段，在生成和消散阶段很弱，以未碰并或偶发碰并为主。

（5）自转化率计算结果表明，在 V≥200 m 的济南冬季雾中，碰并过程很少发生；在 100 m≤V<200 m 的强浓雾中，以未碰并或间断碰并为主；碰并过程主要出现在 V<100 m 强浓雾和特强浓雾中；与 V<50 m 的特强浓雾相比，50 m≤V<100 m 的强浓雾中碰并过程发生的概率更大、强度更强；在济南冬季特强浓雾中含有大量的小雾滴，但各微物理量的最大值及其最大的起伏变化并未出现在特强浓雾中，而是出现在 50 m≤V<100 m 的强浓雾中，这可能与 50 m≤V<100 m 强浓雾中较强的碰并增长有关，碰撞过程中产生的并合和破碎，可能是导致 50 m≤V<100 m 强浓雾中微物理量发生较大起伏变化的主要原因。

（6）利用自转化率计算结果分析的微物理过程及其强度能较好地解释济南不同强度冬季雾中微物理结构特征的差异，但是由于自转化率公式在推导时引用了一些假定，该结果是否能真实地反映济南冬季雾中发生的微物理过程，还存在不确定性，需要在以后的试验和研究中进行进一步验证。

（7）利用雾滴谱资料计算的能见度与能见度实测值在变化趋势上具有较好的一致性，但比实测值大 1～2 个数量级，这可能主要与雾中大量的气溶胶粒子有关。对于污染大气，基于雾滴谱仪观测资料来估算雾中的大气能见度是不够的，必须同时考虑气溶胶粒子对能见度的影响。

致谢 非常感谢刘延刚博士在论文修改过程中给予的指导和帮助！同时，也非常感谢审稿专家和编辑老师为本文付出的心血和汗水！

参考文献（References）

鲍宝堂, 束家鑫, 朱炳权. 1995. 上海城市雾理化特性的研究 [J]. 南京气象学院学报, 18(1): 114−118. Bao B T, Shu J X, Zhu B Q. 1995. Study on physicochemical properties of urban fog in Shanghai [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18(1): 114−118. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1995.01.017

包云轩, 丁秋冀, 袁成松, 等. 2013. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验 [J]. 大气科学, 37(1): 124−136. Bao Y X, Ding Q J, Yuan C S, et al. 2013. Numerical simulations of a highly complex fog event on Shanghai–Nanjing expressway [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(1): 124−136. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12010

Eldridge R G. 1961. A few fog drop–size distributions [J]. J. Atmos. Sci., 18(5): 671−676. doi:10.1175/1520-0469(1961)018<0671:AFFDSD>2.0.CO;2

Eldridge R G. 1966. Haze and fog aerosol distributions [J]. J. Atmos. Sci., 23(5): 605−613. doi:10.1175/1520-0469(1966)023<0605:HAFAD>2.0.CO;2

Eldridge R G. 1971. The relationship between visibility and liquid water content in fog [J]. J. Atmos. Sci., 28(7): 1183−1186. doi:10.1175/1520-0469(1971)028<1183:TRBVAL>2.0.CO;2

Gultepe I, Milbrandt J A. 2007. Microphysical observations and mesoscale model simulation of a warm fog case during FRAM project [J]. Pure Appl. Geophys., 164(6-7): 1161−1178. doi:10.1007/s00024-007-0212-9

Gultepe I, Müller M D, Boybey Z. 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 45(11): 1469−1480. doi:10.1175/jam2423.1

Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J A, et al. 2009. The fog remote sensing and modeling field project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 90(3): 341−360. doi:10.1175/2008BAMS2354.1

国家气象中心. 2012. GB/T 27964–2011 雾的预报等级 [S]. 北京: 中国标准出版社. National Meteorological Centre. 2012. GB/T 27964–2011 Grade of fog forecast (in Chinese) [S]. Beijing: China Standard Press.

侯梦玲, 王宏, 赵天良, 等. 2017. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究 [J]. 大气科学, 41(6): 1177−1190. Hou M L, Wang H, Zhao T L, et al. 2017. A modeling study of the visibility and PBL key meteorological elements during a heavy fog–haze episode in Beijing–Tianjin–Hebei of China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 1177−1190. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16211

黄建平, 梅清银, 靳永才, 等. 1998. 沪宁地区辐射雾的微物理结构及其演变 [J]. 气象, 24(5): 3−8. Huang J P, Mei Q Y, Jin Y C, et al. 1998. Microphysical structure features and evolution processes of radiation fog in Huning region [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 24(5): 3−8. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1998.5.001

黄建平, 李子华, 黄玉仁, 等. 2000. 西双版纳地区雾的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 24(6): 821−834. Huang J P, Li Z H, Huang Y R, et al. 2000. A three-dimensional model study of complex terrain fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24(6): 821−834. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.06.09

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 [J]. 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 [J]. Acta Oceanologica Sinica (in

Chinese), 32(2): 40−53.

贾星灿, 郭学良. 2012. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究 [J]. 大气科学, 36(5): 995−1008. Jia X C, Guo X L. 2012. Impacts of anthropogenic atmospheric pollutant on formation and development of a winter heavy fog event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(5): 995−1008. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11200

Koračin D, Dorman C E, Lewis J M, et al. 2014. Marine fog: A review [J]. Atmos. Res., 143: 142−175. doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.012

Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 23(1): 34−41. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0034:PODTVA>2.0.CO;2

Kuroiwa D. 1951. Electron-M1croscope study of fog nuclei [J]. J. Atmos. Sci., 8(3): 157−160. doi:10.1175/1520-0469(1951)008<0157:EMSOFN>2.0.CO;2

李子华, 张利民, 楼小凤. 1993. 重庆市区冬季雾的宏微观结构及其物理成因 [J]. 南京气象学院学报, 16(1): 48−54. Li Z H, Zhang L M, Lou X F. 1993. The macro- and micro-structure of winter fog in the Chongqing Urban district and the physical cause of its formation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 16(1): 48−54. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.1993.01.008

李子华, 黄建平, 孙博阳, 等. 1999. 辐射雾发展的爆发性特征 [J]. 大气科学, 23(5): 623−631. Li Z H, Huang J P, Sun B Y, et al. 1999. Burst characteristics during the development of radiation fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23(5): 623−631. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.13

李子华, 杨军, 石春娥, 等. 2008. 地区性浓雾物理 [M]. 北京: 气象出版社, 160pp. Li Z H, Yang J, Shi C E, et al. 2008. The Physics of Regional Dense Fog (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 160pp.

李子华, 刘端阳, 杨军. 2011. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件 [J]. 大气科学, 35(1): 41−54. Li Z H, Liu D Y, Yang J. 2011. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(1): 41−54. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.04

Liu Y G. 1992. Skewness and kurtosis of measured raindrop size distributions [J]. Atmos. Environ. Part A Gen. Top., 26(15): 2713−2716. doi:10.1016/0960-1686(92)90005-6

Liu Y G, Daum P H, McGraw R L. 2004. An analytical expression for predicting the critical radius in the autoconversion parameterization [J]. Geophys. Res. Lett., 31(6): L06121. doi:10.1029/2003GL019117

Liu Y G, Daum P H, McGraw R L. 2005. Size truncation effect, threshold behavior, and a new type of autoconversion parameterization [J]. Geophys. Res. Lett., 32(11): L11811. doi:10.1029/2005GL022636

Liu Y G, Daum P H, McGraw R, et al. 2006. Generalized threshold function accounting for effect of relative dispersion on threshold behavior of autoconversion process [J]. Geophys. Res. Lett., 33(11): L11804. doi:10.1029/2005GL025500

Liu Y G, Daum P H, McGraw R L, et al. 2007. Theoretical expression for the autoconversion rate of the cloud droplet number concentration [J]. Geophys. Res. Lett., 34(16): L16821. doi:10.1029/2007GL030389

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 [J]. 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 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67(1): 147−157. doi:10.11676/qxxb2009.015

Liu D Y, Li Z H, Yan W L, et al. 2017. Advances in fog microphysics research in China [J]. Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 53(1): 131−148. doi:10.1007/s13143-016-0028-6

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 [J]. 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(4): 681−690. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.02

马学款, 蔡芗宁, 杨贵名, 等. 2007. 重庆市区雾的天气特征分析及预报方法研究 [J]. 气候与环境研究, 12(6): 795−803. Ma X K, Cai X N, Yang G M, et al. 2007. Study on fog synoptic characteristics and fog forecast method in Chongqing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12(6): 795−803. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.06.010

梅婵娟, 张灿. 2016. 威海沿海地区雾的气候特征及相关影响因子分析 [J]. 山东气象, 36(3): 28−35. Mei C J, Zhang C. 2016. Climatic characteristics of fog and related influencing factor analysis in Weihai coastal area [J]. Journal of Shandong Meteorology (in Chinese), 36(3): 28−35. doi:10.19513/j.cnki.issn1005-0582.2016.03.005

Meyer M B, Lala G G. 1990. Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York [J]. J. Climate, 3(5): 577−586. doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0577:CAORFO>2.0.CO;2

Meyer M B, Jiusto J E, Lala G G. 1980. Measurements of visual range and radiation–fog (haze) microphysics [J]. J. Atmos. Sci., 37(3): 622−629. doi:10.1175/1520-0469(1980)037<0622:MOVRAR>2.0.CO;2

Müller M D, Masbou M, Bott A. 2010. Three-dimensional fog forecasting in complex terrain [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 136(653): 2189−2202. doi:10.1002/qj.705

Pagowski M, Gultepe I, King P. 2004. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 43(1): 3−16. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0003:AAMOAE>2.0.CO;2

Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. 1976. The physics of radiation fog. Part Ⅰ: A field s [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 102(432): 313−333. doi:10.1002/qj.49710243204

Spencer W P, Johnson R A, Vietti M A. 1976. On fog formation in a coronal discharge: Effects of the discharge on droplet growth [J]. Journal of Aerosol Science, 7(6): 441−445. doi:10.1016/0021-8502(76)90048-3

Stoelinga M T, Warner T T. 1999. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East coast winter precipitation event [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 38(4): 385−404. doi:10.1175/1520-0450(1999)038<0385:NMSMSO>2.0.CO;2

孙兴池, 韩永清, 李静, 等. 2017. 垂直运动对雾—霾及空气污染过程的影响分析 [J]. 高原气象, 36(4): 1106−1114. Sun X C, Han Y Q,

Li J, et al. 2017. Analysis of the influence of vertical movement on the process of fog and haze with air pollution [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 36(4): 1106−1114. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00076

Taylor G I. 1917. The formation of fog and mist [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 43(183): 241−268. doi:10.1002/qj.49704318302

王鹏飞, 李子华. 1989. 微观云物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 339pp. Wang P F. 1989. Microcosmic Cloud Physics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 339pp.

王庆, 樊明月, 王健捷. 2019a. 济南冬季雾微物理结构特征 [J]. 海洋气象学报, 39(3): 84−95. Wang Q, Fan M Y, Wang J J. 2019a. Microphysical structure and characteristics of winter fog in Jinan [J]. Journal of Marine Meteorology (in Chinese), 39(3): 84−95. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.010

王庆, 李季, 樊明月. 2020. 济南爆发性增强冬季雾的物理特征分析 [J]. 海洋气象学报, 40(2): 83−95. Wang Q, Li J, Fan M Y. 2020. Physical characteristics of burst reinforcement in winter fog events that occurred in Jinan [J]. Journal of Marine Meteorology (in Chinese), 40(2): 83−95. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.009

王庆, 李季, 樊明月, 等. 2019b. 济南一次平流辐射雾的微物理结构及演变特征 [J]. 气象, 45(9): 1299−1309. Wang Q, Li J, Fan M Y, et al. 2019b. Microphysical structure and evolution characteristics of an advection–radiation fog event in Jinan [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(9): 1299−1309. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.010

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 [J]. 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 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65(3): 406−415. doi:10.11676/qxxb2007.038

夏凡, 杨晓霞. 2017. 济南一次雾过程的数值模拟试验和成因分析 [J]. 气象科技, 45(1): 165−171. Xia F, Yang X X. 2017. Numerical simulation and cause analysis of a fog event in Jinan [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 45(1): 165−171. doi:10.19517/j.1671-6345.20160086

夏凡, 李昌义. 2018. 基于 3 种能见度方案山东地区雾天气预报试验研究 [J]. 气象与环境学报, 34(3): 48−57. Xia F, Li C Y. 2018. Fog weather forecast experiments over Shandong Province based on three visibility schemes [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 34(3): 48−57. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2018.03.006

许焕斌. 1964. 衡山云雾微结构起伏的初步观测试验 [J]. 气象学报, 34(4): 539−547. Xu H B. 1964. Preliminary observation test on microstructure fluctuation of cloud and fog in Hengshan [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 34(4): 539−547. doi:10.11676/qxxb1964.053

杨中秋, 许绍祖, 耿骠. 1989. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构 [J]. 海洋学报, 11(4): 431−438. Yang Z Q, Xu S Z, Geng B. 1989. Formation and microphysical structure of spring sea fog in Zhoushan area [J]. Acta Oceanol. Sinica (in Chinese), 11(4): 431−438.

于华英, 牛生杰, 刘鹏, 等. 2015. 2007 年 12 月南京六次雨雾过程宏、微观结构演变特征 [J]. 大气科学, 39(1): 47−58. Yu H Y, Niu S J, Liu P, et al. 2015. Evolution of the macro- and microphysical properties of precipitation fog in December 2007 in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(1): 47−58. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13284

于丽娟, 尹承美, 何建军, 等. 2017. 济南雾和霾特征及其影响因素分析 [J]. 干旱气象, 35(4): 581−589. Yu L J, Yin C M, He J J, et al. 2017. Analysis of fog and haze weather characteristics and its impact factors in Ji' nan of Shandong Province [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 35(4): 581−589. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-04-0581

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 [J]. 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(3): 609−622. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12009

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 [J]. 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(3): 552−562. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11204

邹进上, 刘长盛, 刘文保. 1982. 大气物理基础 [M]. 北京: 气象出版社, 104–112. Zou J S, Liu C S, Liu W B. 1982. The Basics of Atmosphere Physics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 104–112.