大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系

张浩 石春娥 杨军 倪婷

Microphysical Characteristics of Fog with Different Intensities and Their Relationship with Visibility in Shouxian County

ZHANG Hao SHI Chun’e YANG Jun NI Ting

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20230

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

济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响

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

大气科学. 2021, 45(2): 333 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2011.19248

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

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

基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究

Numerical Simulation Study on the Microphysical Characteristics of Stratiform Clouds with Embedded Convections in Northern China based on Aircraft Measurements

大气科学. 2020, 44(5): 899 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1908.19114

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

张浩, 石春娥, 杨军, 等. 2021. 寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系 [J]. 大气科学, 45(6): 1217−1231. ZHANG Hao, SHI Chun'e, YANG Jun, et al. 2021. Microphysical Characteristics of Fog with Different Intensities and Their Relationship with Visibility in Shouxian County [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1217−1231. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20230

寿县不同强度雾的微物理特征及其与能见度的关系

张浩[1, 2] 石春娥[1, 2] 杨军[3] 倪婷[2]

1 安徽省气象科学研究所/大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室，合肥 230031
2 寿县国家气候观象台/中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地，安徽省寿县 232200
3 南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室，南京 210044

摘 要 雾对交通运输有不利影响，尤其是强浓雾。本文利用 2019 年 1 月上中旬在寿县国家气候观象台应用 FM-100 型雾滴谱仪测量的雾滴谱数据和常规气象观测数据，分析了不同强度雾的微物理特征，以及能见度与含水量、雾滴数浓度、相对湿度之间的关系，在此基础上建立了能见度参数化方案。结果表明：（1）随着雾的强度增强，雾中含水量显著增大，大雾、浓雾和强浓雾阶段含水量平均值分别为 0.003 g m^{-3}、0.01 g m^{-3} 和 0.09 g m^{-3}；当含水量大于 0.02 g m^{-3}，出现强浓雾的比例高达 95%。（2）雾滴数浓度、雾滴尺度随着雾强度增强而增大，从大雾到浓雾，雾滴数浓度显著增加（增幅 67%），而从浓雾到强浓雾，雾滴尺度显著增大，平均直径、平均有效半径分别增加 62%、135%；当雾滴有效半径大于 4.7 μm，出现强浓雾的比例高达 95%。（3）强浓雾、浓雾、大雾雾滴数浓度谱分布均为双峰结构，谱分布整体偏向小粒子一端，强浓雾谱型为 Deirmendjian 分布，浓雾、大雾均为 Junge 分布；强浓雾的雾水质量浓度谱呈现多峰特征，最大峰值出现在 21.5 μm 处，浓雾雾水质量浓度谱为双峰分布，大雾为单峰型，最大峰值均出现在 5 μm 处。（4）含水量、数浓度与能见度均呈反相关关系，含水量对能见度的影响最为显著；分别采用全样本和分段方式建立了四种能见度参数化方案，评估检验结果表明，基于含水量的能见度分段拟合方案对能见度的估算效果最好。

关键词 强浓雾 微物理特征 能见度 参数化 寿县
文章编号 1006-9895(2021)06-1217-15 **中图分类号** P426 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20230

Microphysical Characteristics of Fog with Different Intensities and Their Relationship with Visibility in Shouxian County

ZHANG Hao[1, 2], SHI Chun'e[1, 2], YANG Jun[3], and NI Ting[2]

1 *Anhui Institute of Meteorological Sciences/Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing*, *Hefei* 230031
2 *Shouxian National Climatology Observatory/Huai River Basin Typical Farm Eco-meteorological Experiment Field of China Meteorological Administration*, *Shouxian*, *Anhui* 232200
3 *Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract Fog, especially extremely dense fog, has adverse effects on transportation. This paper utilizes the fog droplet spectrum data measured using the FM-100 fog drop spectrometer at the Shouxian National Climate Observatory in January 2019 and the contemporary conventional meteorological observation data to investigate the microphysical

收稿日期 2020-11-19；**网络预出版日期** 2021-04-25
作者简介 张浩，男，1982 年出生，高级工程师，主要从事大气环境和大气成分变化研究。E-mail: hero-1225@163.com
通讯作者 石春娥，E-mail: shichune@sina.com
资助项目 国家自然科学基金项目 41875171、41675135，安徽省重点研究和开发计划项目 1804a0802215
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41875171, 41675135), Key Research and Development Project of Anhui Province (Grant 1804a0802215)

characteristics of fog with different intensities. Based on the analysis of the relationships between the visibility (V) and liquid water content (L) and the number concentration (N) of fog droplets and RH (relative humidity), various visibility parameterization schemes were established. The results showed that: (1) With the increase of fog intensity, the water content in fog increased significantly, with average values of 0.003 g m^{-3}, 0.01 g m^{-3}, and 0.09 g m^{-3} during the periods of fog, dense fog, and extremely dense fog, respectively. When the L was greater than 0.02 g m^{-3}, the proportion of extremely dense fog reached 95%. (2) The N and droplet size increased with the increase in fog intensity. From fog to dense fog, the N increased significantly by 67%, while from dense fog to extremely dense fog, the droplet size increased significantly, and the average diameter (D) and effective radius (R_e) increased by 62% and 135%, respectively. When the R_e was greater than 4.7 μm, the proportion of extremely dense fog reached 95%. (3) All spectra distributions of the droplet number concentration for fog, dense fog, and extremely dense fog exhibited a bimodal structure with major peaks close to the end of the small particles. The spectrum type of the extremely dense fog was a Deirmendjian distribution, while that of the dense fog and fog was a Junge distribution. The fog water mass concentration spectrum was characterized by multipeaks for extremely dense fog with maximum peak appearing at 21.5 μm, while the dense fog and fog exhibited a bimodal distribution and single peak type, respectively, with maximum peak at 5 μm. (4) Both L and N were inversely correlated with visibility, with L showing the highest correlation coefficient with visibility. Four kinds of visibility parameterization schemes were established using the full sample and segmented method. Test results indicated that the visibility subsection fitting scheme based on L was the best.

Keywords Extremely dense fog, Microphysical characteristic, Visibility, Parameterization, Shouxian

1 引言

雾是大量微小水滴或冰晶浮游空中，使水平能见度低于 1.0 km 的天气现象（中国气象局, 2007），其本质是及地的云。雾对社会经济的影响，主要表现在低能见度对陆、海、空交通运输的影响，随着我国交通运输业的快速发展，这种影响日益突出。根据“雾的预报等级”标准（GB/T 27964-2011）（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2012），雾可以分为大雾、浓雾、强浓雾、特强浓雾四个等级，其中，对交通运输业影响较大的是能见度低于 200 m 的强浓雾和特强浓雾。如气象行业标准“公路交通高影响天气预警等级”（QX/T 414-2018）（中国气象局, 2018）中规定，当预报未来 2 h 内出现特强浓雾、6 h 内出现强浓雾，气象部门将分别发布红色预警和橙色预警。因此，有必要研究不同强度雾的微物理特征及能见度影响因子，进一步提高强浓雾的预报、预警能力。

影响雾中大气能见度的两个主要因素是雾滴谱分布和含水量（Eldridge, 1961; Gerber, 1981; 鲍宝堂等, 1995; 李子华和吴君, 1995; Wendish et al., 1998; Ma et al., 2003; 刘端阳等, 2009; 岳岩裕等, 2013; 张曦等, 2016; 王庆等, 2019）。大量的观测表明，受不同气候条件、生态环境的影响，不同地区、不同类型的雾，甚至雾的不同发展阶段，其微物理特征有明显的差异，能见度与微物理量的关系也不相同。常见的雾滴谱分布有 Junge 分布和 Deirmendjian 分布，如李子华和吴君（1995）的研究发现重庆市冬季市区雾滴谱服从 Junge 分布，市郊符合 Deirmendjian 分布，从市郊向市区雾滴数密度愈来愈大，雾滴尺度和含水量愈来愈小；刘端阳等（2009）对发生在南京郊区的连续浓雾天气进行观测，分析发现，雾滴谱服从 Deirmendjian 分布，谱型基本呈指数下降，雾滴主要集中在小滴段；王庆等（2019）分析发现济南一次冬季雾雾滴谱谱型呈“三峰”结构，雾中以小滴为主，直径 8 μm 以下的小滴占总数的 90% 以上。Meyer et al.（1980）对一次辐射雾观测分析发现，在雾最浓的时候，雾滴谱出现多峰分布。

雾滴谱分布特征、含水量等微物理量是基于数值模式结果进行能见度参数化的重要参数。Koenig（1971）指出消光系数是雾滴谱分布和米散射消光系数的函数，Kunkel（1984）根据消光系数和含水量的关系，建立了能见度的参数化公式，并广泛应用于能见度的模拟计算（Benjamin et al., 2004; Gao et al., 2007）。Gultepe et al.（2006）研究表明能见度参数化方案中必须考虑雾滴数浓度，否则会增加能见度模拟的不确定性。国内学者分别基于广东茂名（黄辉军等, 2009）、山西（林艳等, 2010）、湖北恩施（孟蕾等, 2010）、湖北荆州（荣昕, 2013）观测的雾含水量、雾滴数浓度、有效半径等微物理量，建立了适合本地的能见度参数

化方案，取得较好的模拟效果。

淮河流域位于我国南北气候过渡带，水系纵横，河流、湖泊众多，每年秋冬季多雾、霾天气，如安徽沿淮淮北是安徽省三个雾高发区之一（Shi et al., 2008），多条高速公路贯穿该区域。安徽省 2010 年开始建设全网覆盖的高速公路自动能见度观测网络，根据 2010 年 9 月至 2011 年 12 月高速公路能见度资料，安徽高速公路强浓雾的高发路段主要位于安徽北部，由强浓雾造成的恶性交通事故时有发生。另外根据寿县国家气候观象台观测记录，2000～2018 年寿县年平均雾日数达 36.7 d。因此，值得深入研究该地区雾的边界层、微物理特征，以及探讨辐射降温、平流和逆温等因子对雾过程的影响。2019 年 1 月上中旬我们在寿县国家气候观象台开展了雾的外场观测试验，本文利用观测期间的雾滴谱资料，结合观象台常规观测资料，分析了不同强度雾的微物理特征，以及能见度与含水量、雾滴数浓度、相对湿度之间的关系，在此基础上建立能见度参数化方案，为该地区基于数值模式结果开展雾的预报、预警提供科学依据。

2　观测概况与研究方法

2.1　观测概况

观测场地位于寿县国家气候观象台内（32.43°N，116.78°E），海拔 25.7 m，观测场下垫面平坦开阔，四周为农田。寿县国家气候观象台所在的淮河流域以辐射雾为主，主要发生在冬半年。2000～2018 年寿县年平均雾日数为 36.7 d，其中 1 月最多，平均为 4.8 d。2019 年 1 月 2～15 日，项目组在观象台进行了为期两周的雾综合观测，包括大气边界层特征、雾滴谱、常规气象要素等观测，其中 1 月 4、5、7 日、9～11 日出现降水，在雨后和降雨间歇期出现了不同强度的雾过程，为排除降水对观测数据的影响，本文选取 1 月 7 日 20 时（北京时，下同）至 8 日 20 时、1 月 11 日 20 时至 15 日 06 时的观测数据进行分析。

雾滴谱的观测利用美国 DMT 公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪（Eugster et al., 2006; 刘端阳等, 2009），滴谱仪可以连续测量雾滴数量，采样频率为 1 Hz，测量粒径范围为 2～50 μm，分 20 档。能见度（V）、相对湿度（RH）、气温（T）、风速（WV）等气象要素来自于寿县国家气候观象台的常规业务观测，数据时间间隔均为 1 min。为便于比较，本文首先将雾滴谱数据进行 1 min 平均。雾滴谱仪采样口距地面高度约 1.2 m，雾滴谱仪与能见度仪等常规气象仪器之间水平距离约 150 m。

2.2　分析方法

关于雾微物理特征的研究，以往大多将雾的生消过程划分为不同发展阶段进行比较分析（刘端阳等, 2009; 方春刚和郭学良, 2019; 王庆等, 2019），而阶段的划分并无统一标准，一般划分为形成阶段、发展阶段和成熟阶段，但各阶段与雾的强度并无明确的对应关系，不能得到不同强度雾微物理特征的差异。为探寻强浓雾与普通雾微物理特征及能见度影响因子的区别，本文参考国家标准“雾的预报等级”（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会, 2012），根据能见度对雾过程进行分类，即将雾分为大雾 (500 m≤V<1000 m)、浓雾 (200 m≤V<500 m)、强浓雾（V<200 m）三个等级。

众所周知，雾滴是在充足水汽的供应下，通过气溶胶粒子核化凝结而成。在雾的生消过程中，大气气溶胶粒子吸湿增长形成雾滴，雾滴的增加一方面通过对光的衰减直接导致能见度降低，另一方面小雾滴通过碰并增长，大雾滴数浓度不断增加，Eldridge（1971）指出大雾滴的增多对含水量增加起主要贡献作用。

雾滴粒径一般在 2～50 μm，远大于可见光波长，其对光的散射属于米散射。根据 Mie 散射理论，雾滴消光系数（β）表达式为

$$\beta = \sum Q_{\mathrm{ext}} n(r) \pi r^2 \mathrm{d}r, \qquad (1)$$

式中，n是每一粒径范围内粒子数密度，Q_{ext} 是半径为 r 的雾滴的 Mie 消光系数；Q_{ext} 与粒子半径和可见光的波长有关。当雾滴直径超过 4 μm，Q_{ext} 变为 2。对于粒径小于 4 μm，其值在 3.8 至 0.9 之间波动（Koenig, 1971; Brenguier et al., 2000）。

根据消光系数可计算能见度（Stoelinga and Warner, 1999）：

$$V = -\frac{\ln 0.02}{\beta}. \qquad (2)$$

目前的数值预报业务中，一般的业务模式并没有雾滴谱的输出，因此，多采用 Kunkel（1984）给出计算β的经验公式：

$$\beta = 144.7 L^{0.88}, \qquad (3)$$

式中，L 是含水量（单位：g m^{-3}）。可见消光系数与含水量存在指数关系，即含水量的增加，使消光作用增强，导致能见度降低。

很多学者在利用中尺度气象模式结果计算能见度时使用公式（2）、（3）（Gao et al., 2007）。然而 Gultepe et al.（2006）指出，公式（3）会明显高估或低估能见度（不确定性超过 50%），具体取决于环境条件。基于对大量外场观测资料的分析，Gultepe et al.（2009）得到基于含水量和雾滴数浓度计算能见度的公式：

$$V = 0.87706 \times (L \times N)^{-0.49034}, \tag{4}$$

式中，N 是雾滴数浓度（单位：cm^{-3}）。Gultepe et al.（2009）认为用该公式计算雾中能见度更加精确，但由于一般的气象模式并不直接输出雾滴数浓度，这阻碍了该公式的推广应用。

综上所述，影响雾中能见度的微物理量包括：含水量、数浓度和雾滴尺度。本文根据雾滴谱仪观测的每档雾滴数量计算出雾滴数浓度、含水量、平均直径（D，单位：μm）、有效半径（R_e，单位：μm）等微物理量。具体计算公式如下：

$$N = \frac{\sum_{i}^{20} n_i}{S_a S}, \tag{5}$$

$$L = \rho \times 10^{-6} \times \sum_{i=1}^{20} \frac{4}{3} \pi r_i^3 n_i, \tag{6}$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{20} n_i \times d_i}{\sum_{i=1}^{20} n_i}, \tag{7}$$

$$R_e = \frac{\sum_{i}^{20} n_i r_i^3}{\sum_{i}^{20} n_i r_i^2}, \tag{8}$$

式中，n_i 为第 i 档雾滴数量；S_a 为气流速度，约为 13 m s^{-1}；S 为雾滴谱仪采样面积（S=0.24 mm^2）；ρ为水的密度（约为 1 g cm^{-3}）；d_i（单位：μm）为第 i 档雾滴直径的上限值和下限值的平均；r_i（单位：μm）为第 i 档雾滴半径的上限值和下限值的平均。

3 雾天气过程简况

图 1 为观测期间能见度、相对湿度等气象要素和雾微物理量随时间的变化。表 1 给出了图 1 中持续时间超过或接近 1 h 的不同强度雾过程的起止时间。

由图 1 可以看出，观测期间共出现 4 次雾天气过程（包括强浓雾、浓雾、大雾），分别出现在 1 月 7 日 22:01 至 8 日 11:43、1 月 12 日 00:44 至 12 日 08:42、1 月 13 日 01:48 至 13 日 11:15、1 月 13 日 19:42 至 14 日 08:29，其中第 2、3 次过程达到了强浓雾等级，两次强浓雾分别持续 399 min、421 min（表 1）。4 次雾过程都具有辐射雾的变化特征，入夜后，随着地面降温，能见度下降，雾形成，日出后随着地面升温，雾逐渐消散；第 2、3 次雾过程降温显著，如第二次雾过程中，气温从 11 日 20 时的 2.9°C 降至 12 日 05 时的−2.9°C，降温幅度接近 6°C，能见度也从 3 km 左右降至 100～200 m，雾逐渐形成并迅速变浓。同时可以看到在第 2、3 次雾过程中，能见度短时间内迅速下降，如 13 日 01:48 第 3 次雾刚形成时，能见度为 996 m，到 03:13 降至 500 m，03:43 降至 200 m 以

表 1　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间不同强度雾过程起止时间

Table 1　Start and end time of fog processes with different intensities in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

	起止时间		
	大雾	浓雾	强浓雾
雾天气过程1	7日22:01至8日06:59	8日07:00～08:45	
	8日08:46～11:43		
雾天气过程2			12日01:13～07:51
雾天气过程3	13日02:42～03:42		13日03:43～10:43
雾天气过程4	13日19:42～21:20	13日21:21～22:48	
	13日22:49至14日01:14	14日01:15～02:35	
	14日02:36～05:23	14日05:24～06:20	
	14日06:21～08:29		

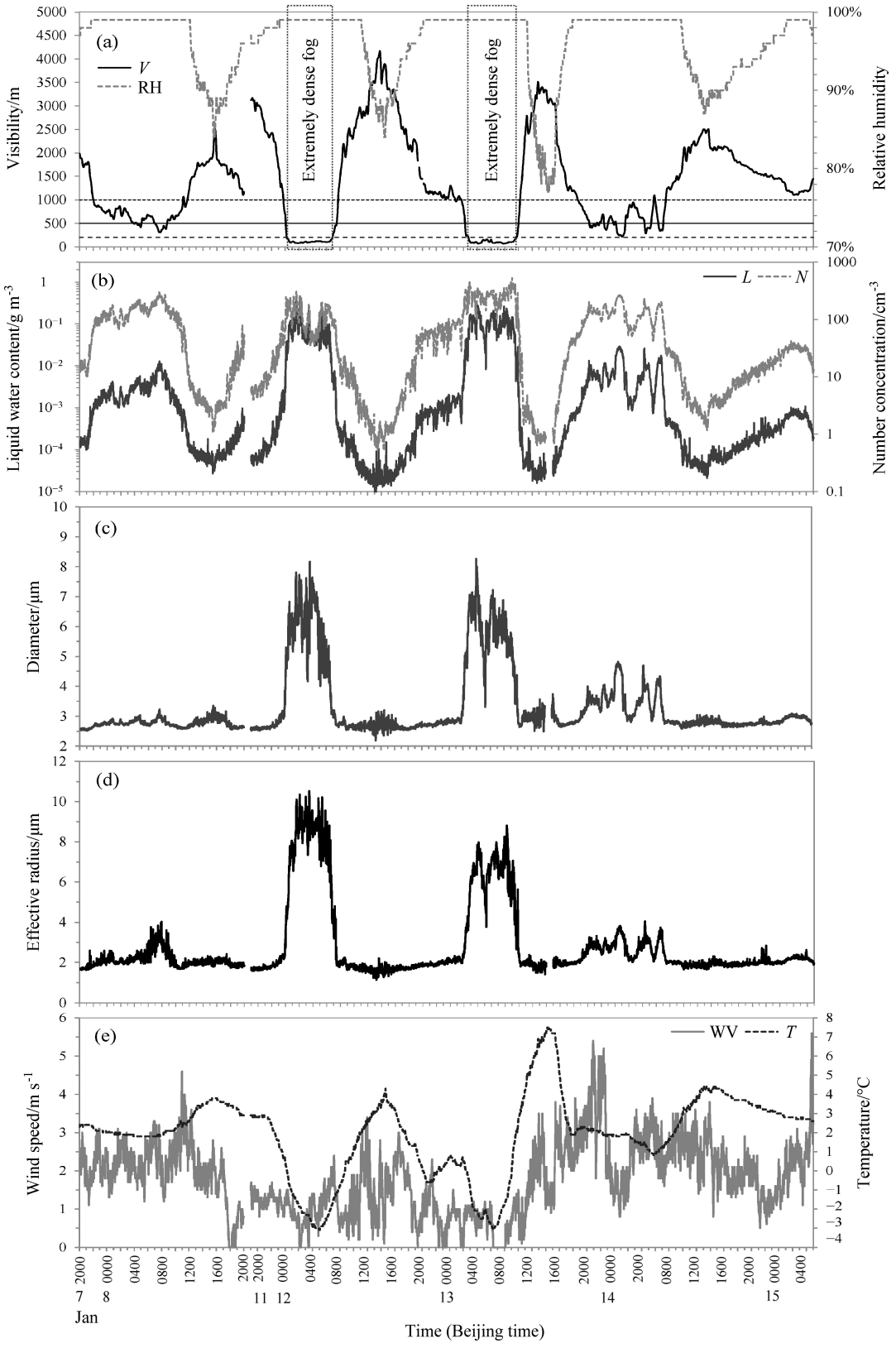

图 1　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间（a）能见度（*V*）和相对湿度（RH）、（b）含水量（*L*）和数浓度（*N*）、（c）平均直径、（d）有效半径、（e）风速（WV）和气温（*T*）随时间的变化

Fig. 1　Temporal variations of (a) visibility (*V*) and relative humidity (RH), (b) liquid water content (*L*) and number concentration (*N*), (c) mean diameter, (d) effective radius, (e) wind speed (WV) and temperature (*T*) in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

下，到 04:28，能见度下降至 86 m，从大雾（500 m≤V<1 km）到浓雾（200 m≤V<500 m）经历了 84 min，从浓雾到强浓雾（V<200 m）仅用了 30 min，体现了强浓雾的爆发性增长特征。

从能见度和相对湿度的变化可以看出，能见度与相对湿度呈反相关关系，雾过程期间，相对湿度记录最大值为 99%，说明观测仪器存在系统误差。从风速变化来看，雾时平均风速都在 3 m s^{-1} 以下，强浓雾时段风速最大只有 2.1 m s^{-1}。气温在雾过程期间明显偏低，雾天平均气温低于 1.9°C，最高不超过 2.5°C。含水量、数浓度、平均直径、有效半径等微物理量也有明显的变化，与能见度有很好的反对应关系，低能见度时各微物理量明显升高，其中在强浓雾过程中各微物理量基本达到峰值。

4 不同强度雾微物理结构特征

表 2 给出了寿县不同强度雾微物理量的统计结果，也给出了南京、济南等地雾的观测分析结果。

（1）数浓度。寿县所有雾样本的数浓度平均值为 153.7 cm^{-3}，大雾、浓雾、强浓雾的平均数浓度分别为 113.2 cm^{-3}、189.3 cm^{-3}、195.6 cm^{-3}，随着雾强度增强，雾滴数浓度增大，从大雾到浓雾，雾滴数浓度增加显著，平均值增加 76.1 cm^{-3}（增幅 67%），而从浓雾到强浓雾，数浓度增幅不大，仅增加 6.3 cm^{-3}（增幅 3%）。

（2）含水量。寿县所有雾样本的含水量平均值为 0.036 g m^{-3}，不同强度雾含水量差异显著，从大雾、浓雾到强浓雾，含水量增大，大雾、浓雾和强浓雾阶段含水量平均值分别为 0.003 g m^{-3}、0.01 g m^{-3} 和 0.09 g m^{-3}，强浓雾阶段的最大含水量为 0.38 g m^{-3}。

（3）平均直径。整个雾过程的平均直径为 4.11 μm，随着雾的强度增强，平均直径增大，大雾、浓雾、强浓雾的雾滴平均直径分别为 2.97 μm、3.62 μm 和 5.88 μm，从浓雾到强浓雾，雾滴平均直径增加 2.26 μm（增幅 62%）。

（4）最大直径。雾滴最大直径可达到 48.5 μm，不同于平均直径，强浓雾阶段的最大直径和峰值直径都不及浓雾阶段大，但比较接近，明显大于大雾阶段，说明浓雾过程中大雾滴维持时间较长，可能强浓雾阶段大雾滴沉降较快。

由图 1 和表 2 都可以看出，不同强度雾，其微物理量都存在较大起伏。如从各物理量的最大值和

表 2 2019 年 1 月寿县雾综合观测期间雾微物理特征及与其他地区的比较

Table 2 Comparisons of microphysical characteristics of fog in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019 and other areas

观测地点、日期	雾等级或阶段	能见度/m	数浓度/cm^{-3}		含水量/g m^{-3}		平均直径D/μm		最大直径D_{max}/μm	
			平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
本研究	大雾	500～998	113.16	12.57～250.92	0.002938	0.000179～0.025995	2.97	2.57～4.70	27.83	9.0～48.5
	浓雾	219～498	189.26	89.33～305.15	0.010297	0.002684～0.029185	3.62	2.71～4.82	41.80	13.0～48.5
	强浓雾	68～195	195.55	33.30～527.63	0.090455	0.004154～0.379850	5.88	3.07～8.26	35.72	21.5～48.5
济南 2017年1月3～4日（王庆等, 2019）	形成阶段	600～1018	2.06	1.39～3.31	0.000110	0.000060～0.000340			12.00	
	发展阶段	100～800	112.28	1.26～806.32	0.035510	0.000040～0.219850			46.00	
	成熟阶段	50～70	155.78	7.84～1238.25	0.042090	0.001750～0.373450			50.00	
天津市气象局 2016年12月31日至2017年1月1日（高雅, 2019）	形成、发展阶段	303～1001	2.38	1.04～14.29	0.000728	0.000053～0.007676	5.94	4.43～9.13		
	成熟阶段	65～531	22.29	1.63～181.08	0.013000	0.000344～0.055000	8.22	5.21～14.20		
河北涿州 2011年12月4日（方春刚和郭学良, 2019）	形成阶段	500～1000		0～20		0～0.010000		2.50～4.00		15.0～30.0
	发展阶段	100～400		100～500		0.010000～0.080000		4.00～5.00		20.0～40.0
	成熟阶段	70 m左右		100～700		0.020000～0.270000		4.00～5.60		30.0～50.0
南京信息工程大学 2006年12月24～27日（刘端阳等, 2009）	形成阶段	150～500	25.04	2.17～667.50	0.000500	0.000011～0.033280	2.04	1.34～3.12	23.50	11.5～23.5
	发展阶段	15～150	580.65	104.46～858.90	0.223800	0.038280～0.629600	5.85	2.81～8.10	40.97	30.5～46.5
	成熟阶段	15 m以下	488.65	95.85～786.69	0.347400	0.032700～0.899600	5.81	3.85～8.02	48.33	30.5～49.5

注：天津、济南的观测仪器为FM-120型雾滴谱仪，其他地区为FM-100型雾滴谱仪。

最小值的比值看，数浓度和平均直径都是强浓雾阶段的变化幅度最大，含水量是大雾阶段变化幅度最大，浓雾阶段的变化幅度都是居中或最小。从比值的大小看，含水量的变化幅度最大（即最大值与最小值的比值最大）。如果从强浓雾微物理量最大值与最小值的比值看，寿县强浓雾与南京雾（刘端阳等, 2009）的成熟阶段最接近，这可能与南京雾划分的成熟阶段对应强浓雾有关。为进一步了解不同强度雾过程中含水量的起伏程度及样本集中程度，分别计算了大雾、浓雾和强浓雾阶段含水量的变异系数（标准差/平均值），以及平均值±1 倍标准差的样本数占总样本的比例（表 3）。由表可见，大雾阶段含水量的变异系数和平均值±1 倍标准差的样本数占总样本的比例大于浓雾、强浓雾阶段，浓雾和强浓雾阶段差别不大，可见大雾阶段含水量的起伏更大。

综上所述，随着雾的强度增强，能见度降低，雾中含水量显著增大，雾滴数浓度、平均直径增大；从大雾到浓雾，雾滴数浓度显著增大（增幅 67%），而从浓雾到强浓雾，雾滴数浓度变化不大，但雾滴直径明显增大（增幅 62%）。表 2 中列出了近年来中国不同地区的观测结果，可以得到同样的结论，即从雾的形成阶段到成熟阶段，雾滴数浓度和含水量显著增大。

为进一步比较不同强度雾的微物理特征，图 2 用箱线图给出了大雾（Fog）、浓雾（Dense fog）、强浓雾（Extremely dense fog，简写为 ExDense fog）阶段的雾滴数浓度、含水量、有效半径的统计结果。统计量包括平均值，中位值，一、三四分位值，最大值，最小值。由图 2 可见，雾滴数浓度和有效半径的中位值与均值基本上都位于长方形的中间位置，说明这两个参量接近正态分布，而浓雾阶段含水量的均值明显偏向大值一侧，说明浓雾阶段少量大雾滴对含水量的贡献较大。根据一、三四分位的位置，可以看出含水量、有效半径在强浓雾阶段的第一四分位高于浓雾阶段的第三四分位，浓雾阶段的第一四分位高于大雾阶段的第三四分位，但从数浓度来看，强浓雾与浓雾和大雾的变化范围均有所重合，差异不明显。如果以 75% 的样本（或者一、三四分位）能区分为接受标准，大雾、浓雾、强浓雾的

表 3　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间不同强度雾阶段含水量的变异系数、平均值±1 倍标准差的样本数占总样本的比例

Table 3　Variation coefficients and proportion of sample number (within mean ± one times standard deviation) to the total sample number for liquid water content in different fog intensity stages in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

	变异系数	平均值±1倍标准差样本数占总样本的比例
大雾	0.897	88.9%
浓雾	0.678	78.6%
强浓雾	0.654	77.4%

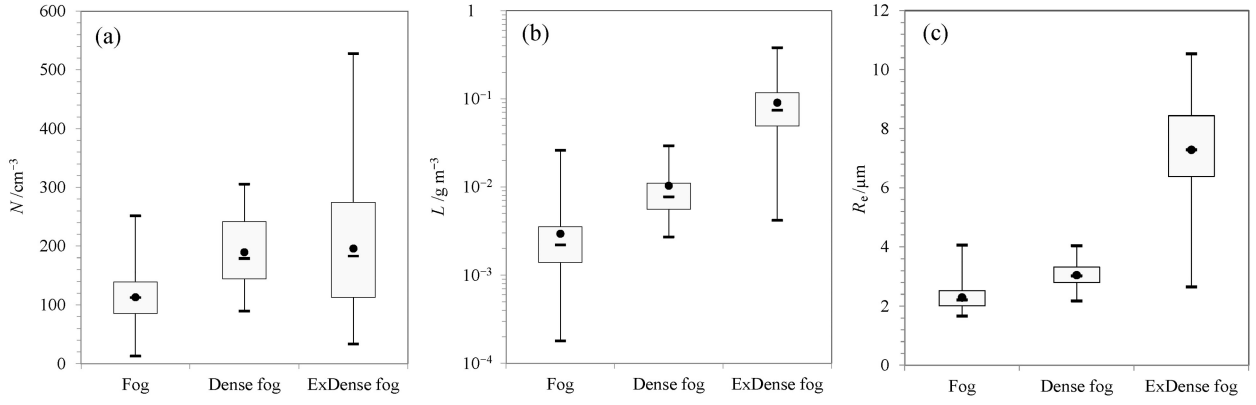

图 2　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间大雾（Fog）、浓雾（Dense fog）、强浓雾（ExDense fog）阶段（a）雾滴数浓度、（b）含水量、（c）有效半径（R_e）分布箱线图。上下两个横线分别表示最大值和最小值；长方形中的横线表示中值，实心圆表示均值；长方形的下、上边分别表示第一、三四分位值

Fig. 2　Box plots of the (a) droplet number concentration, (b) liquid water content, and (c) effective radius (R_e) for fog, dense fog, extremely dense fog (ExDense fog) in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019. The upper transverse line: maximum, the lower transverse line: minimum; transverse line within the rectangles: median; solid circle within the rectangles: mean; the upper and lower borders of the rectangles: 25th and 75th percentiles

含水量、有效半径存在显著差异，如强浓雾的含水量有 75% 以上的样本大于 0.049 g m^{-3}，浓雾的含水量有 75% 以上的样本小于 0.011 g m^{-3}，大雾的含水量有 75% 以上的样本小于 0.004 g m^{-3}，即如果含水量大于 0.049 g m^{-3}，则有 75% 的可能性会出现强浓雾。若将比例提高至 95%，对于强浓雾，含水量下限为 0.023 g m^{-3}。因此，在基于数值模式结果进行强浓雾预报、预警时，可以将 0.02 g m^{-3} 作为判别该地区强浓雾的含水量阈值。

图 2c 给出了有效半径的统计特征，雾滴有效半径是表征云雾光学特性的重要参数，已有研究表明，雾滴有效半径与含水量/数浓度呈正相关关系（Gultepe et al., 1996; Reid et al., 1999; 岳岩裕等, 2013）。从图 2c 中可以看出，强浓雾有效半径的平均值为 7.3 μm，最大值为 10.5 μm，有 75% 以上的样本大于 6.4 μm；而大雾、浓雾有效半径远远低于强浓雾，平均值分别为 2.3 μm、3.1 μm，最大值不超过 4 μm。进一步统计发现，强浓雾有效半径有超过 95% 的比例大于 4.7 μm。

5 不同强度雾滴谱分布特征

图 3a 为不同强度雾的雾滴数浓度谱分布特征，图中点线为实测的谱分布，实线和短划线为由拟合公式计算的谱分布。可以看出，强浓雾、浓雾、大雾数浓度谱分布均为双峰结构，强浓雾最大峰值出现在 3 μm 处，另一个峰值在 13 μm 处，浓雾、大雾最大峰值分别出现在 3 μm、2 μm 处，另一个峰值均在 21.5 μm 处；数浓度谱分布整体偏向小粒子一端，直径 9 μm 以下（包括 9 μm）的粒子数占总粒子数的比例，强浓雾阶段为 82.6%，浓雾、大雾阶段超过 90%。在数浓度上，强浓雾平均雾滴数浓度大于浓雾和大雾，特别是在 10～30 μm 之间差别比较大。而在 40 μm 以上，强浓雾阶段的雾滴数反而减少，这反映了雾滴吸湿增长和重力沉降的影响。

从分布的谱型来看，强浓雾、浓雾、大雾数浓度谱分布均呈指数递减，其中强浓雾的平均雾滴谱符合 Deirmendjian 分布：$N(D)=66090.49D^{4.929}\exp(-8.125D^{0.398})$，与南京（刘端阳等, 2009）、济南

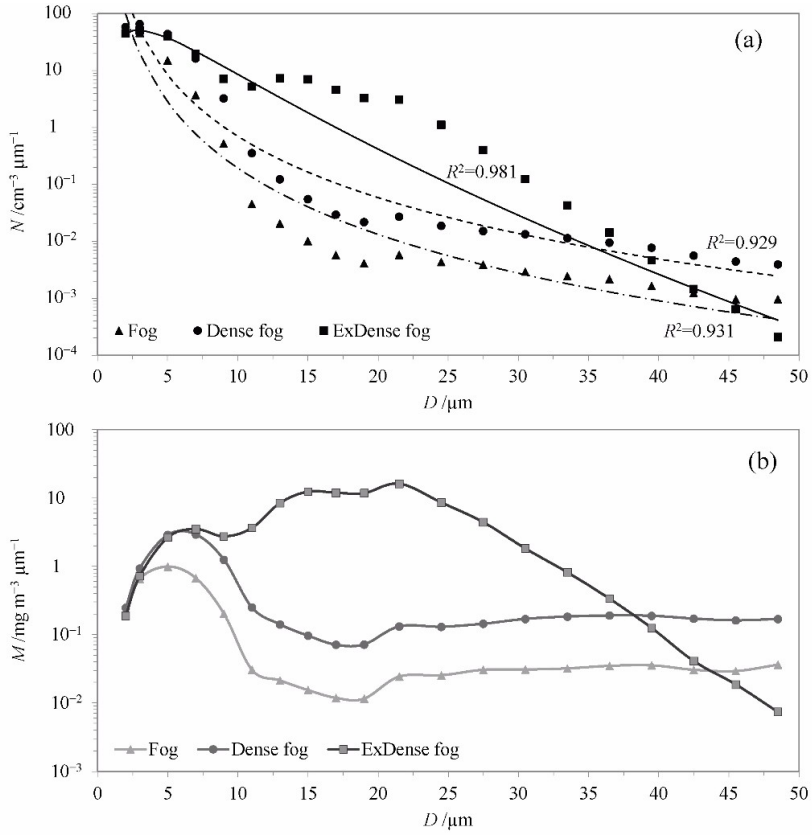

图 3 2019 年 1 月寿县雾综合观测期间不同强度雾雾滴（a）数浓度谱、（b）雾水质量浓度谱分布

Fig. 3 Distributions of (a) the droplet number concentration spectrum and (b) liquid water mass concentration spectrum for different fog intensities in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

（王庆等, 2019）和重庆沙坪坝（李子华和吴君, 1995）的雾滴谱分布特征类似；而浓雾和大雾的雾滴谱符合 Junge 分布，拟合公式分别为 $N(D)=2692.9D^{-3.584}$、$N(D)=1452.6D^{-3.875}$，与重庆陈家坪（李子华和吴君, 1995）和茂名（黄辉军等, 2009）、湛江（张舒婷等, 2013）、厦门（张曦等, 2016）的海雾谱分布特征类似。另外可以看出，拟合谱分布曲线和实测谱分布曲线比较一致，决定系数 R^2 均在 0.92 以上，说明谱分布函数能够反映雾的微物理结构特征。

图 3b 为不同强度雾的雾水质量浓度谱分布特征，可以看出，强浓雾的雾水质量浓度明显大于浓雾和大雾，强浓雾质量浓度谱呈现多峰特征，最大峰值出现在 21.5 μm 处，另两个峰值分别在 15 μm、7 μm 处，13～27.5 μm 的雾滴对含水量的贡献较大；浓雾雾水质量浓度谱呈现双峰特征，峰值分别出现在 5 μm、21.5 μm 处；大雾雾水质量浓度谱的峰值在 5 μm 处，之后没有形成峰值，浓雾、大雾基本都是 3～9 μm 的雾滴对含水量的贡献较大。

6　能见度参数化方案

雾对大气能见度的影响与雾微物理量密切相关，含水量、数浓度是影响能见度的重要因子。另外，相对湿度也对大气能见度有显著影响（张浩等, 2017; 侯梦玲等, 2017）。本节利用选取时段的综合观测资料，首先分析能见度与含水量、数浓度、相对湿度的关系，然后从原始序列中每隔 2 组数据选取一组作为验证样本，其他数据作为建模样本，分别建立基于含水量、数浓度、含水量×数浓度、相对湿度的能见度参数化方案，并对不同能见度参数化方案进行评估检验。

6.1　能见度与含水量、数浓度、相对湿度的关系

根据图 1 雾微物理量的时间变化，可以看到含水量与数浓度变化趋势基本一致，进一步统计分析二者的相关关系（图 4），可以看出，总体上含水量随着数浓度的增加而增加，当数浓度在 50 cm^{-3} 以下，含水量随数浓度的增加而迅速增加，但当数浓度大于 50 cm^{-3} 时，含水量差异比较大，对于一个给定的数浓度，含水量相差 1～2 个数量级；同样，含水量一定时，雾滴数浓度变化范围可以从几十 cm^{-3} 到几百 cm^{-3}。因此，本文在建立能见度参数化方案时，不仅建立了能见度与含水量、雾滴数浓度的单参数化方案，还尝试建立了能见度与含水量×数浓度的双参数化方案，并进行比较。

图 5 分别给出能见度与含水量（V–L）、数浓度（V–N）、含水量×数浓度（V–$L\times N$）、相对湿度（V–RH）的变化关系。可以看出，含水量与能见度呈显著的反相关关系，二者的相关系数达到 0.965，随着含水量增加，能见度逐渐下降，当含水量大于 0.02 g m^{-3} 时，能见度基本在 200 m 以下，即达到强浓雾；数浓度与能见度同样呈显著的反相关关系，但变化关系没有含水量与能见度那么

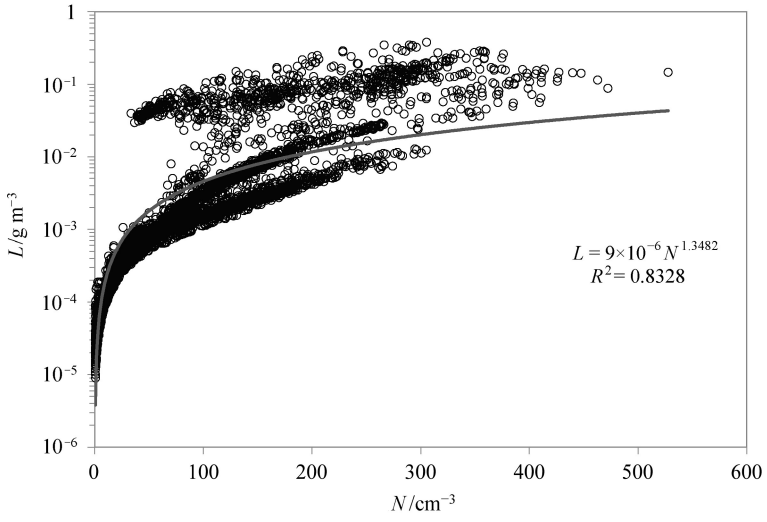

图 4　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间雾含水量与雾滴数浓度散点图

Fig. 4　Scatter plot between the liquid water content and number concentration of fog droplets in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

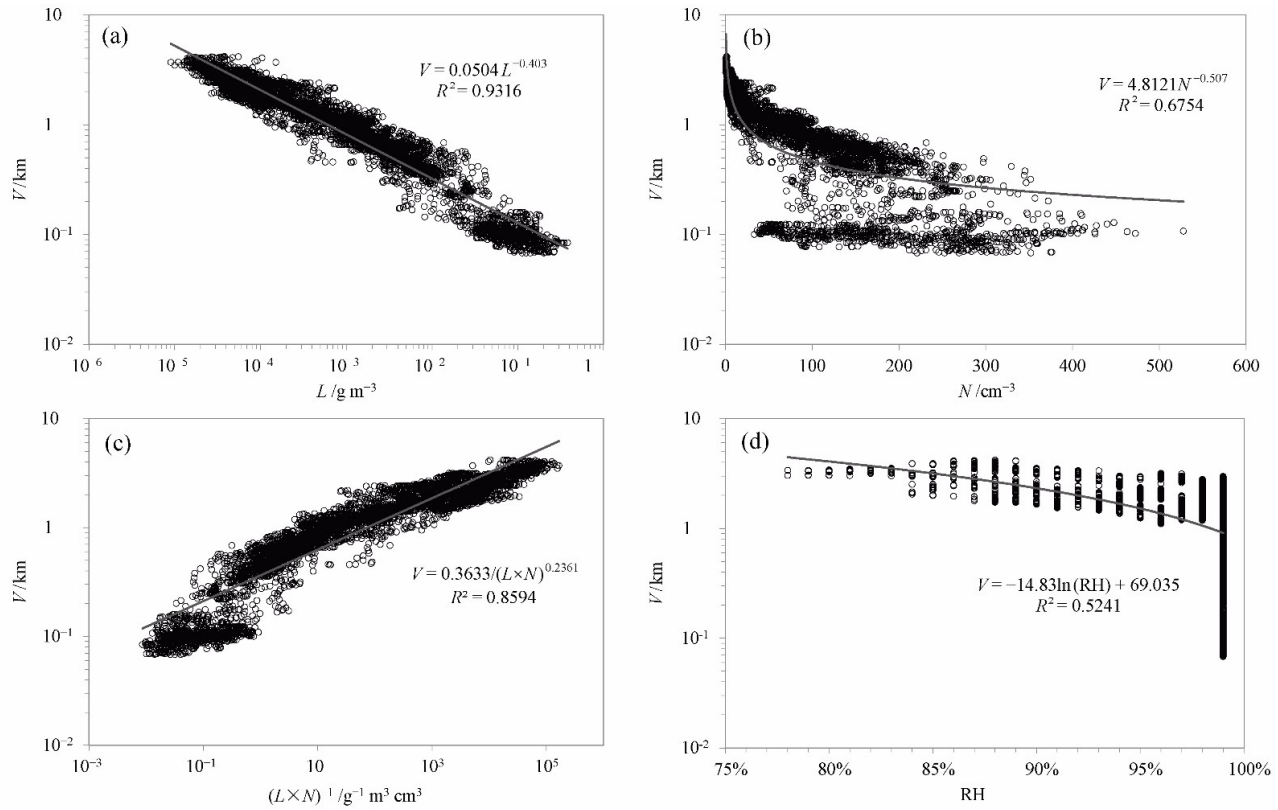

图 5 2019 年 1 月寿县雾综合观测期间（a）含水量、（b）数浓度、（c）含水量×数浓度、（d）相对湿度与能见度的关系

Fig. 5 Relationships between (a) liquid water content, (b) number concentration, (c) liquid water content×number concentration, (d) relative humidity and the visibility in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

密切，如图 5b 中的点比较分散，相关系数为 0.822，当雾滴数浓度低于 50 cm^{-3} 时，能见度随着数浓度增加迅速下降，而当数浓度大于 50 cm^{-3} 时，能见度变化比较缓慢，对于同样的数浓度，能见度变化范围比较大，如数浓度在 100 cm^{-3} 附近，能见度变化从几十米到近 1 千米。由于能见度随着含水量、数浓度增加均呈减小趋势，因此分析了能见度与（$L\times N$）$^{-1}$ 的关系，二者相关系数达到了 0.927，高于能见度与雾滴数浓度的相关性，但低于能见度与含水量之间的相关性。从相对湿度与能见度的变化关系来看，二者呈对数关系，相关系数为 0.724，明显低于能见度与含水量、雾滴数浓度间的相关性，能见度随着相对湿度增加而减小，但变化趋势比较缓慢，对于同样的相对湿度，能见度变化范围比较大，高相对湿度更加明显，如当相对湿度为 99%（可以认为饱和）时，能见度变化范围为 68～3666 m，可见，相对湿度不能作为雾的判断依据，尤其不能作为强浓雾的判断依据。

能见度与（$L\times N$）$^{-1}$ 的相关系数略低于其与 L 的相关系数，这与 Gultepe et al.（2006）的结论不同，Gultepe et al.（2006）认为要提高模式预报能见度的精准程度，必须考虑把数浓度用作一个独立变量，也即认为用 V–$L\times N$ 关系计算能见度更可靠。然而，从 Gultepe et al.（2006）的分析中，我们并没有找到作者认为的 V–$L\times N$ 关系优于 V–L 关系的依据，比如作者在拟合 V–$L\times N$ 与 V–L 关系时得到的均方根误差（RMSE）和平均相对误差（MRE）都相同（没有给出相关系数）。之后，Gultepe et al.（2009）利用一次海雾个例的秒级数据得到 V–$L\times N$ 相关系数远高于 V–L、V–N 的相关系数，并指出海雾与陆地雾的微物理特征存在显著差异，因此，需要分开建立参数化方案。而本文利用的是 1 min 平均数据对陆地雾的分析，这可能是本文结果与 Gultepe et al.（2009）结果不同的原因之一。为进一步分析能见度与含水量的相关性优于能见度与含水量乘以数浓度相关性的原因，首先根据图 5a、b 的拟合关系，基于 L、N 分别得到每一个样本的计算能见度（V_{cal}），进一步得到观测能

见度（V_{obs}）与计算能见度差值绝对值（$|V_{cal}-V_{obs}|$）的标准差，然后统计$|V_{cal}-V_{obs}|$在 1 倍标准差范围内的样本数占总样本的比例。结果表明，基于 N 的拟合关系，（$|V_{cal}-V_{obs}|$）的标准差为 0.405 km，有 61.9% 的样本在 1 倍标准差范围内；而基于 L 的拟合关系，（$|V_{cal}-V_{obs}|$）的标准差为 0.252 km，有 64.4% 的样本在 1 倍标准差范围内。说明图 5b 中 V–N 数据的离散程度更高，因此将雾滴数浓度与含水量一起作为因子对能见度进行参数化，增加了样本的离散程度，导致相关系数变差。

6.2　能见度参数化方案建立及评估

从图 4、图 5b 可以看到，有相当一部分样本偏离最佳拟合线较远，如图 4 的上半部、图 5b 的下半部，这部分样本对应着较大的含水量（基本都大于 0.02 g m^{-3}）、能见度较低（低于 150 m），属于强浓雾。另外，图 5b、c 中，最佳拟合线底端，能见度 150 m 以下的样本与总体样本之间存在明显的间隙，即能见度 150 m 与 300 m 之间样本稀疏。从图 5a–c 可以看到当能见度低于 200 m，能见度随上述物理量之间的变化比较平稳，基本呈直线。因此，我们对建模样本以能见度 200 m 为界进行分段，分别建立能见度与含水量（L）、数浓度（N）、含水量×数浓度（$L\times N$）之间的拟合方程，结果见表 4。

利用四种能见度参数化方案对验证样本进行评估检验，检验方式有两种，一种是用所有建模样本建立的拟合方程，另一种是用分段建立的拟合方程，其中当能见度低于 200 m 时（强浓雾），根据上述确定的含水量阈值为 0.02 g m^{-3}，因此，当含水量大于 0.02 g m^{-3} 时，用 V<200 m 的拟合方程，反之用 $V\geqslant$200 m 的拟合方程。各种方案的验证检验结果见表 5，从相关系数、平均相对误差、均方根误差来看，各个方案均是分段拟合的验证效果明显优于所有样本的拟合方式，除方案 4 外，其他方案分段拟合的相关系数均在 0.93 以上。如果不分段，方案 1 明显优于其他方案，分段处理后，方案 1、方案 3 拟合的相关系数、平均相对误差和均方根误差都比较接近。可见，方案 1、方案 3 分段拟合效果比较好。尽管方案 1、方案 3 分段后的效果比较接近，但仍然是 V–L 关系略优于 V–$L\times N$ 关系，根据前面的分析，将雾滴数浓度与含水量一起作为因子对能见度进行参数化时增加了样本的离散程度，导致能见度拟合效果较单独考虑含水量的略差。

图 6 给出了前 3 种方案分段拟合的能见度与观测能见度的对比。第一种、第三种能见度参数化方案拟合的能见度与观测能见度的变化趋势基本一致，并能很好地拟合出低能见度，第二种方案虽然能够拟合出与观测能见度比较一致的变化趋势，但存在高值高估现象。

为进一步比较各方案对不同能见度范围的估算能力，对 1 km 以下的能见度进行分级检验：按照 0.5 km$\leqslant V<$1 km、0.2 km$\leqslant V<$0.5 km、$V<$0.2 km 三个等级，针对不同等级，分别进行 TS 评分（Threat score, S_T）、空报率（False alarm ratio, R_{FA}）、漏报率（Missing rate, R_M）和预报偏差（Frequency bias index, I_{FB}）检验。

$$S_T=\frac{N_A}{N_A+N_B+N_C}, \tag{9}$$

表 4　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间能见度与不同微物理量之间的拟合关系式

Table 4　Fitting relationships between visibility and different fog microphysical parameters in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

参数化方案	参数	拟合方式	拟合关系式	相关系数
方案1	含水量(L)	所有建模样本	$V=0.0504L^{-0.404}$	0.965
		V<200 m	$V=0.063L^{-0.193}$	0.617
		$V\geqslant$200 m	$V=0.0923^{-0.333}$	0.948
方案2	数浓度(N)	所有建模样本	$V=4.799N^{-0.507}$	0.821
		V<200 m	$V=0.1398N^{-0.057}$	0.162
		$V\geqslant$200 m	$V=3.7925N^{-0.366}$	0.911
方案3	含水量×数浓度($L\times N$)	所有建模样本	$V=0.3632/(L\times N)^{0.236}$	0.927
		V<200 m	$V=0.1287/(L\times N)^{0.084}$	0.451
		$V\geqslant$200 m	$V=0.5334/(L\times N)^{0.177}$	0.939
方案4	相对湿度(RH)	所有建模样本	$V=69.12-14.84\times\ln(RH)$	0.724

$$R_{FA}=\frac{N_B}{N_A+N_B}, \quad (10)$$

$$R_M=\frac{N_C}{N_A+N_C}, \quad (11)$$

$$I_{FB}=\frac{N_A+N_B}{N_A+N_C}, \quad (12)$$

式中，N_A 为预报等级与实况等级相同的样本数（正确预报），N_B 为预报出现在等级内而实况未出现的样本数（空报），N_C 为预报没出现在等级内而实况出现的样本数（漏报）。从各统计量的定义可以看出，S_T 的范围是 0（最差）～1（最好），越大越好；R_{FA} 和 R_M 的取值范围是 0（最好）～1（最差），越小越好；I_{FB} 的最佳取值是 1，当 I_{FB} 大于 1，说明空报比例大于漏报比例，反之漏报比例更大。

表 6 给出了前 3 种方案分段拟合的不同等级能见度的评估检验结果，可以看出，对于大雾（0.5 km≤V<1 km），方案 1 在 TS 评分、空报率、预报偏差方面都好于其他方案，漏报率不足 0.2；对于浓雾（0.2 km≤V<0.5 km），方案 1 无论从 TS 评分、漏报率、预报偏差方面都是最优的，空报率也比较低；对强浓雾（V<0.2 km），各方案中各项检验

表 5　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间不同能见度参数化方案验证结果

Table 5　Verification results of different visibility parameterization schemes in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

参数化方案	拟合方式	相关系数	能见度平均相对误差	能见度均方根误差/km
方案1	所有样本拟合	0.948	22.2%	0.355
	分段拟合	0.954	16.6%	0.285
方案2	所有样本拟合	0.882	60.6%	0.595
	分段拟合	0.930	21.3%	0.365
方案3	所有样本拟合	0.926	34.8%	0.498
	分段拟合	0.948	18.1%	0.309
方案4	所有样本拟合	0.723	141.1%	0.655

表 6　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间不同等级能见度评估检验结果

Table 6　Evaluation and inspection results of visibility at different levels in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

	方案1				方案2				方案3			
	S_T	R_{FA}	R_M	I_{FB}	S_T	R_{FA}	R_M	I_{FB}	S_T	R_{FA}	R_M	I_{FB}
0.5 km≤V<1 km	**0.594**	**0.344**	0.137	**1.316**	0.542	0.443	**0.045**	1.716	0.574	0.392	0.090	1.498
0.2 km≤V<0.5 km	**0.377**	0.289	**0.555**	**0.626**	0.049	**0.000**	0.951	0.049	0.293	0.216	0.681	0.407
V<0.2 km	0.875	0.099	0.033	1.073	0.875	0.099	0.033	1.073	0.875	0.099	0.033	1.073

注：粗体表示各级能见度不同检验指标的最优值。

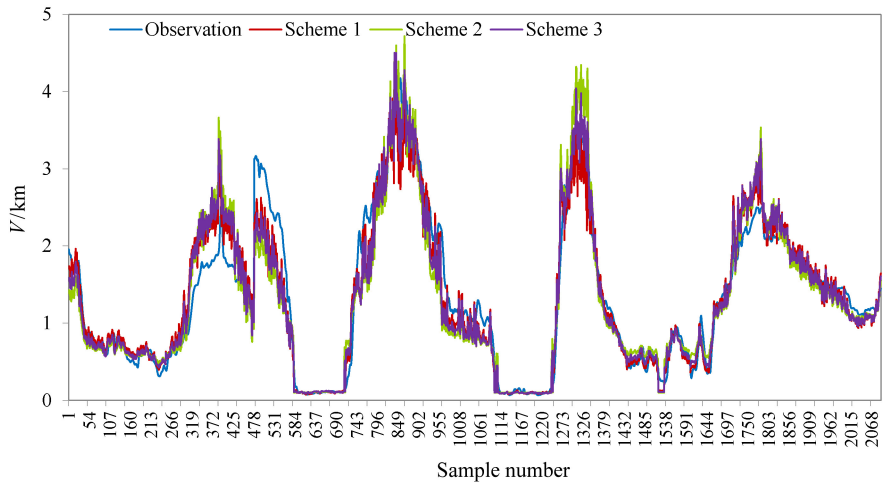

图 6　2019 年 1 月寿县雾综合观测期间不同参数化方案拟合能见度与观测能见度对比

Fig. 6　Comparison between fitting visibilities by different parameterization schemes and observed visibility in Shouxian County during fog comprehensive observation in January 2019

指标结果一致，且 TS 评分都达到 0.875，空报率、漏报率都不足 0.1，说明各个方案基本上均能准确的模拟出 0.2 km 以下的低能见度。

综合来看，方案 1 即基于含水量的分段能见度参数化方案，对能见度的估算效果最好，对 1 km 以下的低能见度具有更好的拟合效果。

7　结论与讨论

2019 年 1 月上中旬在寿县国家气候观象台开展了雾的外场观测试验，通过观测资料分析了不同强度雾的微物理特征，以及能见度与含水量、雾滴数浓度、相对湿度之间的关系，在此基础上建立能见度参数化方案，并进行检验评估。

（1）随着雾的强度增强，雾中含水量显著增大，大雾、浓雾和强浓雾阶段含水量平均值分别为 0.003 g m^{-3}、0.01 g m^{-3} 和 0.09 g m^{-3}；当含水量大于 0.02 g m^{-3}，出现强浓雾的比例高达 95%，强浓雾的含水量下限可定为 0.02 g m^{-3}。

（2）随着雾的强度增强，雾滴数浓度、雾滴尺度增加，从大雾到浓雾，雾滴数浓度显著增加（增幅 67%），而从浓雾到强浓雾，雾滴尺度显著增大，平均直径、平均有效半径分别增加 62%、135%；当雾滴有效半径大于 4.7 μm，出现强浓雾的比例高达 95%。

（3）强浓雾、浓雾、大雾雾滴数浓度谱分布均为双峰结构，谱分布整体偏向小粒子一端，谱分布均呈指数递减，但强浓雾谱型为 Deirmendjian 分布，浓雾、大雾均为 Junge 分布；强浓雾的雾水质量浓度明显大于浓雾和大雾，质量浓度谱呈现多峰特征，最大峰值出现在 21.5 μm 处，13～27.5 μm 的雾滴对含水量的贡献较大；浓雾雾水质量浓度谱为双峰分布，大雾为单峰型，最大峰值均出现在 5 μm 处。

（4）含水量、数浓度与能见度均呈反相关关系，含水量对能见度的影响最为显著；分别采用全样本和分段方式建立了四种能见度参数化方案，其中基于微物理量的参数化方案更能反映实测能见度的变化趋势；评估检验结果表明，基于含水量的能见度分段拟合方案对能见度的估算效果最好，对 1 km 以下的低能见度具有更好的拟合效果。

尽管寿县地区雾的微物理特征与其他地区略有差异，但变化规律基本一致，即随着雾强度增强，能见度降低，雾中含水量显著增大，雾滴数浓度和雾滴直径增大。通过外场观测得到的寿县地区强浓雾微物理量诊断阈值，以及建立的能见度参数化方案，可望为东部地区强浓雾监测与预报提供科学支撑。

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 Baotang, Shu Jiaxin, Zhu Binquan. 1995. Study on physicochemical properties of urban fog in Shanghai [J]. J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese), 18(1): 114−118. doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.1995.01.017

Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al. 2004. An hourly assimilation–forecast cycle: The RUC [J]. Mon. Wea. Rev., 132(2): 495−518.　doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0495:AHACTR>2.0.CO;2

Brenguier J L, Pawlowska H, Schüller L, et al. 2000. Radiative properties of boundary layer clouds: Droplet effective radius versus number concentration [J]. J. Atmos. Sci., 57(6): 803−821. doi:10.1175/1520-0469(2000)057<0803:RPOBLC>2.0.CO;2

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. 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

Eugster W, Burkard R, Holwerda F, et al. 2006. Characteristics of fog and fog water fluxes in a Puerto Rican Elfin cloud forest [J]. Agric. For. Meteor., 139(3–4): 288−306. doi:10.1016/j.agrformet.2006.07.008

方春刚, 郭学良. 2019. 华北一次浓雾过程爆发性增强的微物理特征 [J]. 应用气象学报, 30(6): 700−709.　Fang Chungang, Guo Xueliang. 2019. The microphysical structure of a heavy fog event in North China [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 30(6): 700−709. doi:10.11898/1001-7313.20190606

Gao S H, Lin H, Shen B, et al. 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: Analysis and numerical modeling [J]. Adv. Atmos. Sci., 24(1): 65−81. doi:10.1007/s00376-007-0065-2

高雅. 2019. 天津平流雾过程及其空中微物理特征研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文.　Gao Ya. 2019. Advection fog and its aerial microphysical properties in Tianjin [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.

Gerber H E. 1981. Microstructure of a radiation fog [J]. J. Atmos. Sci., 38(2): 454−458. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<0454:MOARF>2.0.CO;2

Gultepe I, Isaac G A, Leaitch W R, et al. 1996. Parameterizations of marine stratus microphysics based on in situ observations: Implications for GCMs [J]. J. Climate, 9(2): 345−357. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0345:POMSMB>2.0.CO;2

Gultepe I, Müller M. D, Boybeyi 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

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 Mengling, Wang Hong, Zhao Tianliang, 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

黄辉军, 黄健, 刘春霞, 等. 2009. 茂名地区海雾的微物理结构特征 [J]. 海洋学报, 31(2): 17−23. Huang Huijun, Huang Jian, Liu Chunxia, et al. 2009. Microphysical characteristics of the sea fog in Maoming area [J]. Acta Oceanol. Sinica (in Chinese), 31(2): 17−23. doi:10.3321/j.issn:0253-4193.2009.02.003

Koenig L R. 1971. Numerical experiments pertaining to warm fog clearing [J]. Mon. Wea. Rev., 99(3): 227−241. doi:10.1175/1520-0493(1971)099<0227:NEPTWC>2.3.CO;2

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

李子华, 吴君. 1995. 重庆市区冬季雾滴谱特征 [J]. 南京气象学院学报, 18(1): 46−51. Li Zihua, Wu Jun. 1995. Wintekfog fog droplet spectrum features in urban area of Chongqing [J]. J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese), 18(1): 46−51. doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.1995.01.007

林艳, 杨军, 鲍艳松, 等. 2010. 山西省冬季雾中能见度的数值模拟研究 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版), 2(5): 436−444. Lin Yan, Yang Jun, Bao Yansong, et al. 2010. The numerical simulation of visibility during the fog in Shanxi Province in winter [J]. J. Nanjing Univ. Inf. Sci. Technol. (Nat. Sci. Ed.) (in Chinese), 2(5): 436−444. doi:10.3969/j.issn.1674-7070.2010.05.011

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 Duanyang, Pu Meijuan, Yang Jun, 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:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.01.015

Ma C J, Kasahara M, Tohno S. 2003. Application of polymeric water absorbent film to the study of drop size-resolved fog samples [J]. Atmos. Environ., 37(26): 3749−3756. doi:10.1016/S1352-2310(03)00318-2

孟蕾, 周奇越, 牛生杰, 等. 2010. 降水对雾中能见度参数化的影响 [J]. 大气科学学报, 33(6): 731−737. Meng Lei, Zhou Qiyue, Niu Shengji, et al. 2010. Effect of rainfall on parameterization of fog visibility [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 33(6): 731−737. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.06.012

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

Reid J S, Hobbs P V, Rangno A L, et al. 1999. Relationships between cloud droplet effective radius, liquid water content, and droplet concentration for warm clouds in Brazil embedded in biomass smoke [J]. J. Geophys. Res., 104(D6): 6145−6153. doi:10.1029/1998JD200119

荣昕. 2013. 基于 WRF-CHEM 模式的连续雾霾过程数值模拟及其能见度参数化 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Rong Xin. 2013. Numerical simulation of continuous fog–haze process and visibility parameterization based on WRF-CHEM model [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.

Shi C E, Roth M, Zhang H, et al. 2008. Impacts of urbanization on long-term fog variation In Anhui Province, China [J]. Atmos. Environ., 42(36): 8484−8492. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.08.002

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

王庆, 李季, 樊明月, 等. 2019. 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 Qing, Li Ji, Fan Mingyue, et al. 2019. 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

Wendish M, Mertes S, Heintzenberg J, et al. 1998. Drop size distribution and LWC in Po valley fog [J]. Contrib. Atmos. Phys., 71(1): 87−100.

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 Yanyu, Niu Shengjie, Zhao Lijuan, 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 Shuting, Niu Shengjie, Zhao Lijuan. 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

张曦, 牛生杰, 魏锦成, 等. 2016. 厦门春季海雾天气分类及典型个例宏微观结构分析 [J]. 气象科学, 36(1): 121−127. Zhang Xi, Niu Shengjie, Wei Jincheng, et al. 2016. Classification and case study of macro and micro structures of spring sea fog in Xiamen [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 36(1): 121−127. doi:10.3969/2014jms.0108

张浩, 石春娥, 吴必文, 等. 2017. 合肥市能见度与相对湿度、$PM_{2.5}$ 质量浓度的定量关系 [J]. 生态环境学报, 26(6): 1001−1008. Zhang Hao, Shu Chune, Wu Biwen, et al. 2017. Quantified relationships

among the visibility, relative humidity and $PM_{2.5}$ mass concentration in Hefei City [J]. Ecol. Environ. Sci. (in Chinese), 26(6): 1001−1008. doi:10.16258/j.cnki.1674-5906.2017.06.013

中国气象局. 2007. QX/T 48–2007 地面气象观测规范. 第 4 部分: 天气现象观测 [S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration. 2007. QX/T 48–2007 Specifications for surface meteorological observation. Part 4: Observation of weather phenomenon (in Chinese) [S]. Beijing: Standards Press of China.

中国气象局. 2018. QX/T 414–2018 公路交通高影响天气预警等级 [S]. 北京: 中国气象出版社. China Meterological Administration. 2018. QX/T 414–2018 The warning levels of high-impact weather on highway traffic (in Chinese) [S]. Beijing: China Meteorological Press.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2012. GB/T 27964–2011 雾的预报等级 [S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration. 2012. GB/T 27964–2011. Grade of fog forecast (in Chinese) [S]. Beijing: Standards Press of China.