

基于雾微物理观测改进能见度诊断方案

芮雪^{1,2}, 陆春松^{1,*}, 银燕¹, 吕晶晶¹, 陈魁¹, 薛宇琦^{1,3}, 王元¹, 许潇锋¹, 王静¹

1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 徐州市气象局, 徐州 221000

3 无锡中科光电技术有限公司, 无锡 214000

摘要: 为进一步提高雾中能见度的预报准确度, 本研究基于安徽黄山光明顶 2008 年 4~7 月、2009 年 5~8 月、2011 年 5~9 月和湖北恩施山顶 2009 年 1~3 月的雾微物理等观测资料, 建立了新的雾中能见度诊断方案, 并加以检验。首先, 对已有的能见度诊断方案进行比较, 验证了能见度方案同时包含数浓度和含水量的重要性。其次, 在已有的方案中, 能见度与微物理量之间函数关系式的系数往往取作常数, 但研究发现这些系数与微物理量本身紧密相关。本研究利用黄山 2008 年一半的雾观测数据建立了拟合系数与数浓度之间的关系, 改进了能见度的诊断方案。最后, 把黄山 2008 年另一半、2009、2011 年和恩施 2009 年的数据作为独立数据, 对改进后新方案进行验证, 结果均表明新方案能更好的计算能见度。

关键词: 雾; 能见度; 微物理; 诊断方案

文章编号: 中图分类号 P401

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21138

Improved Visibility Diagnostic Scheme Based on Fog Microphysical

Observation

RUI Xue^{1,2}, LU Chunsong^{1,*}, YIN Yan¹, LV Jingjing¹, CHEN Kui¹, XUE Yuqi^{1,3}, WANG Yuan¹, XU Xiaofeng¹, WANG Jing¹

1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, and Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Xuzhou Meteorological Office, Xuzhou 221000

3 Wuxi CAS Photonics Co., Ltd, Wuxi 214000

Abstract: In order to further improve the forecast accuracy of fog visibility, a new fog visibility diagnostic scheme was established and tested based on the observational data of fog microphysics from April to July in 2008, May to August in 2009, May to September in 2011 at the Bright Summit of Mount Huangshan, and January to March in 2009 in Enshi, Hubei Province. First, previously developed visibility diagnostic

收稿日期 2021-07-27; 网络预出版日期 2022-**-**

作者简介 芮雪, 女, 1996 年 12 月生, 硕士, 主要从事云降水物理方向研究, E-mail: ruixuepz@163.com

通讯作者 陆春松, E-mail: luchunsong110@163.com

资助项目 国家重点研发计划(2019YFA0606803); 国家自然科学基金(42027804, 41675136, 42075073, 41975181)

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFA0606803), National Natural Science Foundation of China (Grant 42027804, 41675136, 42075073, 41975181)

schemes were compared and the importance of considering both liquid water content and droplet number concentration was confirmed in visibility schemes. Second, the coefficients in the previous diagnostic schemes are often taken as constants, but the close relationship between these coefficients and microphysics was found in this study. The relationships between the fitting coefficients and the droplet number concentration were established by half of Mount Huangshan's data in 2008 and the visibility diagnostic schemes were improved. The effect of the new scheme has been verified by independent data, which include the other half of Mount Huangshan's data in 2008, the whole of 2009 and 2011 and Enshi's data in 2009.

Keywords: Fog; Visibility; Microphysics; Diagnostic Scheme

1 引言

雾是由水汽凝结或者凝华物悬浮于大气边界层内,使大气水平能见度(简称能见度,Vis)降至 1 km 以下时的天气现象(杨军等, 2011)。雾中能见度的降低可直接导致交通事故,从而造成严重的危害。据统计,发生的交通事故中,由于雾天能见度降低造成严重后果的交通事故数量远远超过其他恶劣天气,且死伤人数占了交通事故总人数的三分之一(郗岩, 2018)。

鉴于此,很多学者通过分析观测资料和数值模式模拟,对雾开展了大量研究(张庆鸿和杨期丰, 1992; Shi et al., 2010; 林艳等, 2010; 胡朝霞等, 2011; Gultepe et al., 2014; 庞成明, 2014; Jia et al., 2019; 王体健等, 2019; Peng et al., 2020; 濮梅娟等, 2008; 牛生杰等, 2010; Niu et al., 2012; Lu et al., 2013),尤其在雾中能见度诊断方面。目前,中尺度模式对雾中能见度的预报方法主要有湿度诊断方法和雾微物理特征诊断方法(曹祥村等, 2014)。在湿度诊断方法中,预先设定当相对湿度为 95% 时,能见度为 5 km,随着湿度的增大,能见度呈指数递减(Smirnova et al., 2000; 林艳等, 2010)。湿度诊断方法存在的问题是,当雾中相对湿度接近 100%,能见度与相对湿度等气象要素的相关性变差,在低能见度时存在较大偏差(曹祥村等, 2014; 张浩等, 2021)。

相比于湿度诊断方法,雾微物理特征诊断方法更为常见。该诊断方法是基于大量的观测结果建立的。Tampieri and Tomasi (1976)对雾滴谱分布进行了拟合分析,揭示了雾滴的散射和吸收消光能力,以及对能见度的削弱作用。Eldridge (1961)在雾的观测中分析了雾滴谱分布、含水量以及能见度的变化特征,并提出能见度与雾含水量(LWC)之间存在紧密的负相关性。Kunkel (1984)对雾的微物理特征进行了深入研究,揭示了含水量的增大对能见度的削弱作用。除了含水量, Meyer et al. (1980)认为,雾中能见度与雾滴数浓度(N_D)之间存在紧密的负相关关系。王庆等 (2019, 2021)通过分析 2016 年~2017 年济南冬季雾,指出济南的雾较南方雾数浓度更小,并强调液滴数浓度相较于其他微物理量对能见度有更好的指示意义。2005 年~2006 年冬季,在加拿大东海岸和安大略省开展冬季雾的外场试验(FRAM 计划)(Gultepe et al., 2006; Gultepe et al., 2007; Gultepe et al., 2009),提出了一种新的诊断方案,即 Vis-LWC· N_D 方案,该方案同时考虑了雾的含水量和数浓度对雾中能见度的影响,这种方案比仅考虑含水量的方案预报准确度更高(Zhang et al., 2014)。孟蕾等(2010)根据雾和降水等的观测资料分析指出,当降水和雾共存时,能见度主要跟雾的含水量和数浓度有关,降水对能见度的影响可以忽略不计。也有学者认为能见度不仅与含水量、数浓度有关,同时也与雾滴的粒径大小有关。例如, Song et al. (2019)根据韩国山地雾观测资料,在 Gultepe 提出的 Vis-LWC· N_D 方案基础上,加入了有效直径(D_E),提出了 Vis-(LWC· N_D , D_E)方案。此外,李子华等(1999)利用能见度与含水量、有效半径的关系来估算能见度。唐浩华等(2002)计算能见度时,考虑了含水量和平均半径对能见度的共同影响。

以往的研究常假定,能见度诊断方案中,能见度与雾微物理量之间函数关系式的系数为常数,缺少对影响这些系数的因子的细致分析。这些系数是否跟雾的微物理量本身有关?能否通过微物理量更加准确地获得这些系数?为了回答这个问题,本文探究了这些系数与微物理量之间的关系,并改进了雾中能见度的诊断方案,提高了能见度的计算精度,这对于提高雾中能见度的预报准确度有

重要意义。

2 资料与方法

2008 年 4~7 月、2009 年 5~8 月和 2011 年 5~9 月, 在黄山光明顶气象站 ($30^{\circ}08'N$, $118^{\circ}09'E$, 海拔 1840m) 对雾和大气气溶胶微观特性开展了连续的观测实验。利用美国 DMT 公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪 (Beiderwieden et al., 2005) 测量雾微物理结构, 直径范围为 $2\sim 50\ \mu m$, 最大数密度为 $10^4\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。2008 年 4 月 18~22 日, 每秒钟产生一组数据, 4 月 22 日 16:00 之后将仪器采集数据频率调整为两秒钟一次。

在 2008 年和 2009 年观测期间, 使用 WPS-1000XP 型宽范围粒谱仪 (MSP, 美国), 测量 $10\sim 10000\text{ nm}$ 气溶胶粒子尺度谱分布, 每 5 分钟可得一组数据。仪器主要由静电分级器 (DMA)、凝结核计数器 (CPC) 和激光颗粒物分光计 (LPS) 3 个部分组成, 前两者的测量范围为 $10\sim 500\text{ nm}$, 后者为 $350\sim 10000\text{ nm}$ 。由于测量原理的不同, 因此在其交叉测量范围内 ($350\sim 500\text{ nm}$) 的观测值也有所差异 (尚倩等, 2011; 张璐瑶等, 2019)。

2009 年 1 月 19 日~3 月 5 日, 在湖北恩施山顶雷达站 ($30^{\circ}03'N$, $109^{\circ}03'E$, 海拔 1722m) 对雾进行了连续观测 (周悦等, 2012), 测量雾微物理结构的仪器同样为 FM-100 型雾滴谱仪, 仪器设置与黄山一致, 观测期间每秒钟产生一组数据。

为选取有效可靠的数据, 减小器测误差, 本文只选取数浓度大于 10 cm^{-3} , 且含水量高于 $0.01\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的雾滴谱进行研究。在处理气溶胶资料时, 将电压异常的气溶胶谱剔除。由于在高相对湿度条件下, 能见度的观测误差比较大。所以, 本研究基于 Mie 散射理论计算能见度 (Vis_{Mie}), 尽可能避免能见度观测误差的干扰, 从而更好地改进能见度方案。

3 结果与讨论

3.1 雾微物理和能见度特征描述

图 1 是黄山光明顶 2008 年、2009 年和 2011 年和恩施 2009 年雾观测期间, 雾滴基本微物理特征量 (LWC 、 N_D 、 D_E 和体积平均直径 D_V) 的概率密度分布 (PDF) 图。根据黄山 2008 年和 2009 年的统计数据, LWC 基本在 $0\sim 1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内 (占总样本 99%以上), 主要集中在 $0.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 两个峰值分别位于接近 $0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的小值处和 $0.1\sim 0.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间。平均含水量分别为 $0.24\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.23\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 与其他山地雾的含水量相比偏小 (彭虎和李子华, 1992; Burkard et al., 2003; Aikawa et al., 2005; Holwerda et al., 2006; Gonser et al., 2012; Simon et al., 2016), 比雨林地区雾的含水量偏大很多 (王元等, 2021)。而在黄山 2011 年和恩施的雾观测中, LWC 平均值仅为 $0.09\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.11\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远小于黄山 2008 年和 2009 年的结果, PDF 也仅在小值处存在单峰。黄山 2008 年和 2009 年的 N_D 较其他山地雾偏大, 直到 1500 cm^{-3} 处, PDF 依然有较为明显的分布。黄山 2011 年和恩施 2009 年雾观测期间, N_D 大小分布与 Song et al. (2019) 的结果相当, N_D 多居于 1000 cm^{-3} 以下, PDF 峰值在 $30\sim 300\text{ cm}^{-3}$ 之间。有效直径和体积平均直径主要集中在 $10\ \mu m$ 附近, 呈双峰甚至多峰分布。其中尤以黄山 2008 年 D_E 的 PDF 分布与 Song et al. (2019) 最为相似, 均为双峰分布, 较大的那个峰值均处于 $20\ \mu m$ 附近。黄山 2008 年、2009 年、2011 年和恩施 2009 年观测的雾中, D_E 平均值分别为 $13.83\ \mu m$ 、 $10.73\ \mu m$ 、 $10\ \mu m$ 和 $11.39\ \mu m$, 与 Stolaki et al. (2015) 在巴黎附近辐射雾中的 $7.2\ \mu m$ 相比较, 与 Eugster et al. (2006) 研究中森林雾的 $14\ \mu m$ 相比较小。通过对比恩施和黄山各年份的山顶雾微物理量统计特征分析可知, 在不同的雾观测期间, 这四组雾资料之间的相似性与差异性并存, 为能见度诊断方案的建立和验证提供了很好的数据。

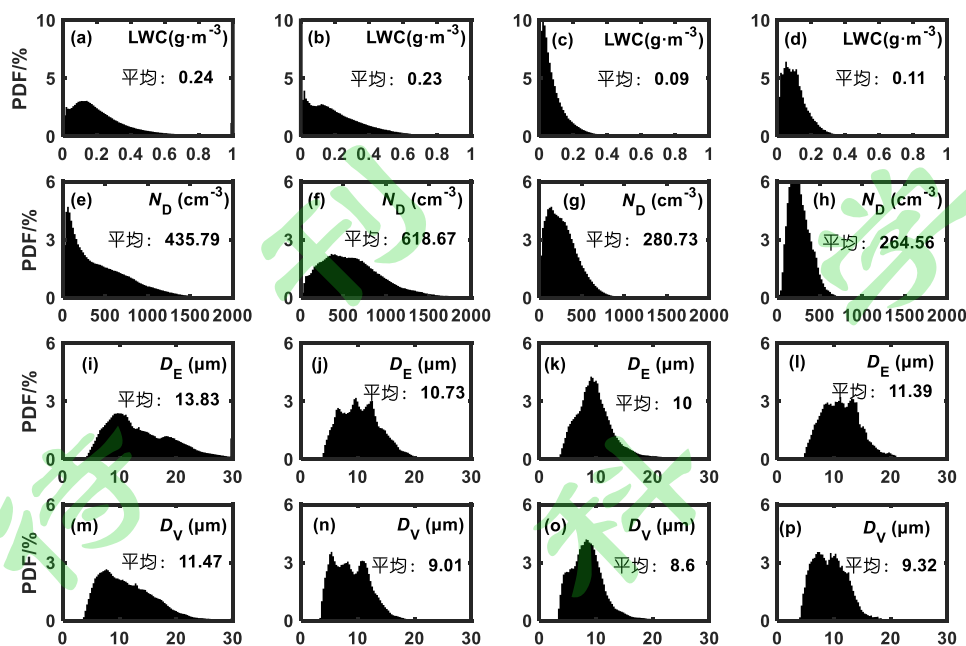


图 1 黄山光明顶 2008 年（第一列）、2009 年（第二列）、2011 年（第三列）和恩施山顶 2009 年（第四列）雾观测期间，相关微物理量的概率密度分布（PDF）示意图：雾滴含水量 LWC（第一行，a~c）、数浓度 N_D （第二行，d~f）、有效直径 D_E （第三行，g~i）、体积平均直径 D_V （第四行，j~l），标注了微物理量的平均值。

Fig.1 Probability density function (PDF) of relevant microphysical variables: liquid water content LWC (first row, a~c), number concentration N_c (second row, d~f), effective radius r_e (third row, g~i), volume-mean radius r_v (fourth row, j~l) during the fog observation period at the Guangming peak of Mount Huangshan in 2008 (first column), 2009 (second column), 2011 (third column) and the hilltop in Enshi in 2009. The average value of each microphysical variable is marked in each figure.

根据 Koschmieder 能见度公式（Koschmieder, 1924），标准大气能见度 Vis 和消光系数 β_{ext} 之间满足以下关系：

$$Vis = \frac{-\ln(0.02)}{\beta_{ext}} \quad (1)$$

式中，0.02 为标准大气能见度视感阈值（盛裴轩等, 2003），消光系数 β_{ext} 由粒子的消光效率 Q_{ext} 积分计算得到（李万彪, 2010）：

$$\beta_{ext} = \sum Q_{ext} n(D) \frac{1}{4} \pi D^2 \Delta D \quad (2)$$

式中，粒子的消光效率 Q_{ext} 是复折射指数 (m)、粒子直径 (D) 和可见光波长的函数，需由 Mie 散射理论计算得到。 β_{ext} 主要为气溶胶的消光系数 (β_A) 和雾滴的消光系数 (β_D) 之和。550 nm 是可见光平均波长，也是人眼最敏感的波长（张易君等, 2017），一般选取 550 nm 处粒子消光进行能见度研究（饶瑞中, 2010）。因此本文选取粒子在波长 550 nm 处的消光，计算粒子的消光系数，进而计算雾中的能见度。假设本研究中气溶胶的组分符合山地气溶胶（沈小静, 2012），那么气溶胶的复折射指数 $m = 1.5533 + 0.0221i$ 。液滴视为纯水，复折射指数取 $m = 1.33560 + 2.47 \times 10^{-9}i$ （盛裴轩等, 2003）。

为了比较雾过程中液滴与气溶胶对消光的贡献，图 2 为黄山 2008 年 4~7 月和 2009 年 5~8 月观测过程中，雾中气溶胶粒子的平均数浓度谱分布。南京冬季雾观测期间的气溶胶平均总数浓度达到 19178.7 cm^{-3} （余洋, 2016），而黄山 2008 和 2009 年观测期间平均总数浓度分别为 1609.3 cm^{-3} 和 1449.9 cm^{-3} ，远远低于南京的浓度。黄山气溶胶谱分布的峰值浓度分别为 67.2 cm^{-3} 和 56.5 cm^{-3} ，比南京的结果 (625.9 cm^{-3}) 低得多。图 3 展示了黄山 2008 年和 2009 年雾观测期间，气溶胶与雾滴的

消光占比随能见度取值范围的变化。消光占比为 β_A 或 β_D 与二者之和的比值（余洋, 2016），即气溶胶的消光占比 $ER_A = \beta_A / (\beta_A + \beta_D)$ ，雾滴的消光占比 $ER_D = \beta_D / (\beta_A + \beta_D)$ 。本研究所使用的雾观测资料中，气溶胶的消光占比很小，2008 年全部样本中 ER_A 的平均值仅为 0.12%，2009 年的平均 ER_A 为 0.23%。在黄山雾观测期间，气溶胶的消光作用基本可以忽略。可见，在山地雾中，主要是雾滴消光起作用，气溶胶的消光贡献非常小，与南京雾中的结果不同（余洋和杨军, 2016）。因此，本文将重点使用雾的观测数据对雾中的能见度进行讨论，不再考虑气溶胶的消光作用，即将雾滴粒子 Mie 散射消光计算的能见度作为雾中能见度参考值。需要特别说明的是，黄山 2011 年和恩施 2009 年的雾观测过程中，没有同步进行气溶胶观测。恩施和黄山同属清洁的山区，故恩施雾过程中气溶胶的消光作用也应较小，与黄山雾类似。

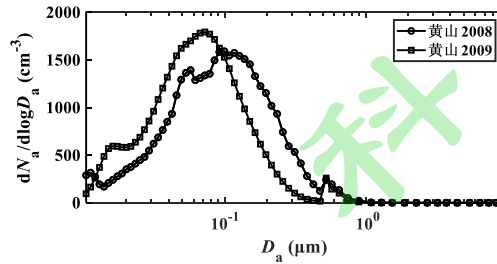


图 2 黄山光明顶 2008 年和 2009 年雾观测期间气溶胶平均数浓度谱分布，其中 D_a 为气溶胶粒子直径、 N_a 为每一档的浓度

Fig.2 Average aerosol number size distributions at the Guangming peak of Mount Huangshan during the fog observation periods in 2008 and 2009, with D_a and N_a representing aerosol diameter and number concentration of each bin.

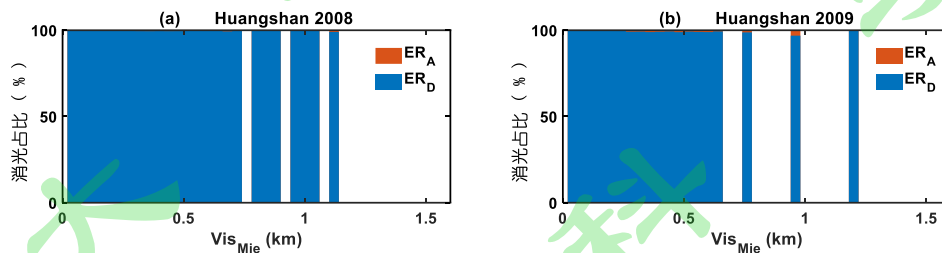


图 3 黄山光明顶 2008 年 (a) 和 2009 年 (b) 雾观测期间雾滴(ER_D)与气溶胶(ER_A)的消光占比与能见度(Vis_{Mie})的关系（图中空白部分表示该能见度无对应的观测数据）

Fig.3 The extinction ratio of aerosols (ER_A) and fog droplets (ER_D) as a function of visibility (Vis_{Mie}) during the fog observation period at the Guangming peak of Mount Huangshan in 2008(a) and 2009(b). (The white part in the figure indicates that the corresponding observation data of the visibility is missing.)

3.2 已有能见度方案的测试

目前有以下两种被广泛使用的雾中能见度的方案： $Vis-LWC$ 方案和 $Vis-LWC \cdot N_D$ 方案。这两种方案在计算雾中能见度时考虑到了雾主要微物理量，即雾滴含水量和雾滴数浓度。

(1) $Vis-LWC$ 方案

1966 年，Eldridge (1966) 提出雾中能见度 Vis (km) 与液滴含水量 LWC ($g \cdot m^{-3}$) 之间满足以下关系：

$$Vis = \frac{a}{LWC^b} \quad (3)$$

1984 年，Kunkel (1984) 通过分析研究得出 $a = 0.027$ 、 $b = 0.88$ 。这一能见度诊断方案简称 K84 方案，目前在数值模式中广泛应用。

(2) $Vis-LWC \cdot N_D$ 方案

2006 年，Gultepe et al. (2006) 通过雾观测资料建立了 Vis (km) 关于 LWC ($g \cdot m^{-3}$) 与 N_D

(cm^{-3}) 乘积的诊断方案:

$$\text{Vis} = \frac{c}{(\text{LWC} \cdot N_D)^d} \quad (4)$$

式中, $c = 1.002$ 、 $d = 0.6473$ (G1); 2007 年, Gultepe and Milbrandt (2007) 根据 FRAM 冬季雾观测资料对系数进行了修正, 指出 $c = 1.13$ 、 $d = 0.51$ (G2); 2009 年, Gultepe et al. (2009) 根据 FRAM 夏季雾资料对系数进行进一步更正, $c = 0.87706$ 、 $d = 0.49034$ (G3)。2019 年, Song et al. (2019) 通过韩国山地观测的液态雾资料, 指出式 (4) 中的系数 d 是液滴有效直径 D_E 的函数, 并满足 $c=0.507$ 、 $d=0.4 \cdot \exp(-0.09 \cdot D_E) + 0.22$ (Song 2019)。

将以上几种诊断方案分别应用于黄山 2008 年雾观测资料, 测试效果如表 1 所示。表 1 中的决定系数 (R^2) 描述了各方案计算的能见度结果 (预测值) 与真实值之间的相关程度, R^2 越大说明与真实值之间的结果越接近, 该方案越可靠 (孙诗睿等, 2019; 赵杨, 2012; 吴瑾光, 1994)。均方根误差 (RMSE) 则表示预测值与真实值的误差均值的平方根, 描述了预测值与真实值之间的偏差 (梁晋文等, 1989)。K84 方案的决定系数为 0.642, 均方根误差为 0.143 km。而 G1、G2、G3 方案的决定系数高于 0.89, 均方根误差在 0.084~0.112 km 之间, 优于 K84 方案。该结果再一次印证了, 同时考虑 LWC 和 N_D 的诊断方案可以更好的诊断雾中的能见度。此外, Song 2019 方案的决定系数为 0.743, 低于 G1、G2、G3 方案, 可能与 Song 2019 方案更适用于雨雾有关。但 Song 2019 方案的均方根误差为 0.082, 小于 G1、G2、G3 方案。这个加入有效直径的能见度诊断方案的普适性, 在未来的研究中值得进一步分析。

表 1 已有能见度诊断方案应用于黄山 2008 年数据的测试结果

Table 1 Testing previous visibility diagnostic schemes based on the Mount Huangshan's data in 2008.

方案	表达式	系数	决定系数 R^2 ($p < 0.001$)	均方根误差 RMSE (km)
K84	$\text{Vis} = \frac{a}{\text{LWC}^b}$	$a = 0.027, b = 0.88$	0.642	0.143
G1	$\text{Vis} = \frac{c}{(\text{LWC} \cdot N_D)^d}$	$c = 1.002, d = 0.6473$	0.891	0.112
G2		$c = 1.13, d = 0.51$	0.913	0.149
G3		$c = 0.87706, d = 0.49034$	0.913	0.084
Song 2019		$c = 0.507,$ $d = 0.4 \cdot \exp(-0.09 \cdot D_E) + 0.22$	0.743	0.082

注: 雾中的能见度 Vis (km), 雾滴含水量 LWC ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 雾滴数浓度 N_D (cm^{-3})

3.3 诊断方案系数的优化及存在的问题

利用黄山 2008 年的雾观测数据, 根据 Mie 散射理论计算得到 Vis, 记为 Vis_{Mie} , 按公式 (3) 对 Vis_{Mie} 和 LWC 的关系进行拟合, 得到新系数 $a=0.026$ 、 $b=0.747$ (图 3a)。根据该新系数, 利用公式 (3) 计算能见度, 计算结果与根据 Mie 计算得到的结果之间的决定系数为 0.647, 均方根误差为 0.088 km。决定系数与 K84 方案相当, 但均方根误差大幅减小, 可见新系数得到的诊断方案比 K84 方案有显著改善。同样, 基于公式 (4), 对 Vis_{Mie} 和 $\text{LWC} \cdot N_D$ 之间的关系进行拟合, 得到新系数 $c=0.644$ 、 $d=0.502$ (图 4b), 将新系数应用于公式 (4) 计算得到的能见度, 与根据 Mie 计算得到的能见度之间的决定系数为 0.913, 均方根误差为 0.044 km。决定系数比 G1 大, 与 G2 和 G3 方案相当, 但是均方根误差大幅减小。

综上, 本研究中观测数据拟合得到的方案系数, 更能描述这一观测过程中能见度与微物理量之间的关系, 根据相应的诊断方案计算得到的能见度也更接近原值。但是存在一个问题, 公式 (3) 和 (4) 中的系数在不同的雾过程中不同。由此我们推测, 能见度诊断方案的系数是否与雾的微物理量 (如 N_D) 有关?

为了回答这个问题, 进一步改善能见度诊断方案的准确性, 接下来将对雾含水量大小进行分

类, 分别探讨在不同的含水量条件下, 系数与 N_D 之间的关系, 进而得到改进的雾中能能见度的诊断方案。

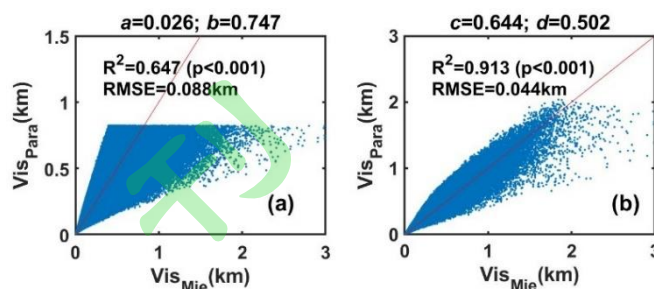


图 4 根据黄山 2008 年雾微物理拟合计算得到的能见度 (Vis_{Para}) 与基于 Mie 散射理论计算的能见度 (Vis_{Mie}) 之间的关系: (a) 拟合公式为公式 (3); (b) 拟合公式为公式 (4)。红色实线为 $x=y$ 参考线。

Fig.4 The relationships between the visibility calculated according to the microphysics (Vis_{Para}) and the visibility calculated based on Mie theory (Vis_{Mie}) by the Mount Huangshan's data in 2008: (a) The fitting formula is Equation (3); (b) The fitting formula is Equation (4). The red solid line is $x=y$.

3.4 新能见度诊断方案的建立

将黄山 2008 年雾观测资料按时间平均分为两部分, 将前半部分数据记作第一组数据, 后半部分数据记作第二组数据。第一组数据用于新能见度诊断方案的建立, 第二组数据用于验证该方案计算效果。以 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为界, 将第一组数据按含水量大小分为 $LWC < 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $LWC \geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 两种情况。在每一种情况下按照数浓度大小进行排序, 每 1000 个点作为一档, 每档分别按公式 (3) 和公式 (4) 的形式对资料进行拟合, 得到每一档的系数 a 、 b 、 c 、 d 。把这些系数与该档的数浓度平均值一一对应, 进而得到系数与数浓度之间的相关关系。

图 5 为 $LWC < 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $LWC \geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时系数 a 、 b 、 c 、 d 随 N_D 的变化趋势图。 a 、 b 、 c 、 d 与 N_D 之间均存在较好的相关关系, 分别利用幂函数拟合。由于不同含水量条件下, a 、 b 、 c 、 d 与 N_D 之间的函数解析式各不相同, 所以将系数 a 、 b 、 c 、 d 与 N_D 之间的函数关系分别记作 $f_a(N_D)$ 、 $f_b(N_D)$ 、 $f_c(N_D)$ 、 $f_d(N_D)$, 表示为以下形式:

$$f_x(N_D) = p_1 \cdot N_D^{p_2} + p_3 \quad (5)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 用 x 表示, p_1 、 p_2 、 p_3 在不同含水量条件下对应的值不同, 详见表 2。

将 a 、 b 、 c 、 d 与 N_D 之间的函数关系 $f_x(N_D)$ 与公式 (3)、(4) 结合, 得到新的能见度诊断方案:

$$Vis = \frac{f_a(N_D)}{LWC^{f_b(N_D)}} \quad (6)$$

$$Vis = \frac{f_c(N_D)}{(LWC \cdot N_D)^{f_d(N_D)}} \quad (7)$$

表 2 给出了在不同含水量条件下, 基于第一组数据得到的新方案表达式。表 3 为假定系数 a 、 b 、 c 、 d 为常数时, 使用第一组数据按公式 (3)、(4) 进行拟合的结果。表 4 为使用第一组数据分别利用表 2 和表 3 中的表达式计算的能见度, 与根据 Mie 散射理论计算的能见度之间的决定系数和均方根误差。可见新的能见度诊断方案 (表 2 方案) 比 a 、 b 、 c 、 d 为常数的方案 (表 3 方案) 计算的能见度结果有显著改善。例如, 当 $LWC < 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 表 2 中两个方案的决定系数仅为 0.527 和 0.896, 而表 3 中的决定系数则分别达到了 0.964 和 0.951; 表 3 方案的均方根误差 (0.048 和 0.065) 比表 2 方案 (0.176 和 0.082) 大幅减小。

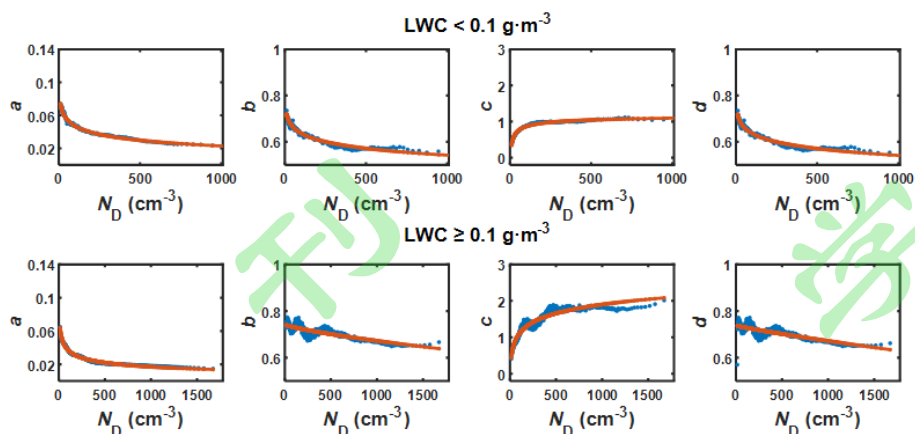


图 5 不同含水量 (LWC) 条件下, 公式 (3) 和 (4) 中的系数 a 、 b 、 c 、 d 与雾滴数浓度 (N_D) 之间的关系。红色实线为系数与 N_D 之间的拟合曲线。

Fig.5 The parameters a , b , c , d of Equation (3) and (4) as functions of droplet number concentration (N_D) in different LWC ranges. The red solid lines are the fitting curves between the parameters and N_D .

表 2 不同含水量条件下, 黄山 2008 年第一组数据拟合得到的新能见度诊断方案 (公式 (6) 和 (7))

Table 2 New visibility diagnostic schemes fitted with the first part of the Mount Huangshan's data in 2008 within each LWC range (Equation (6) and (7))

含水量范围	$\text{Vis} = \frac{f_a(N_D)}{\text{LWC}^{f_b(N_D)}}$	$\text{Vis} = \frac{f_c(N_D)}{(\text{LWC} \cdot N_D)^{f_d(N_D)}}$
$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$f_a(N_D)=0.242N_D^{-0.0617}-0.1351$; $f_b(N_D)=-0.857N_D^{0.0385}+1.66$.	$f_c(N_D)=-2.22N_D^{-0.373}+1.264$; $f_d(N_D)=-0.6936N_D^{0.046}-1.492$.
$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$f_a(N_D)=0.14N_D^{-0.226}-0.0123$; $f_b(N_D)=-0.00039N_D^{0.7525}+0.743$.	$f_c(N_D)=33.68N_D^{0.0098}-34.13$; $f_d(N_D)=-0.000165N_D^{0.8686}+0.7385$.

注: 能见度 Vis (km), 雾滴含水量 LWC ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 雾滴数浓度 N_D (cm^{-3})

表 3 不同含水量条件下, 黄山 2008 年第一组数据拟合得到的能见度诊断方案 (公式 (3) 和 (4))

Table 3 Visibility diagnostic schemes fitted with the first part of the Mount Huangshan's data in 2008 within each LWC range (Equation (3) and (4))

含水量范围	$\text{Vis} = \frac{a}{\text{LWC}^b}$		$\text{Vis} = \frac{c}{(\text{LWC} \cdot N_D)^d}$	
	a	b	c	d
$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	0.032	0.756	0.642	0.466
$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	0.025	0.835	0.429	0.424

注: 能见度 Vis (km), 雾滴含水量 LWC ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 雾滴数浓度 N_D (cm^{-3})

表 4 不同含水量条件下, 黄山 2008 年第一组数据对表 2 和表 3 中能见度方案的测试结果
Table 4 Testing the new visibility schemes in Tables 2 and 3 with the first part of the Mount Huangshan's data in 2008 within each LWC range

含水量范围	$Vis = \frac{a}{LWC^b}$	$Vis = \frac{f_a(N_D)}{LWC^{f_b(N_D)}}$	$Vis = \frac{c}{(LWC \cdot N_D)^d}$	$Vis = \frac{f_c(N_D)}{(LWC \cdot N_D)^{f_d(N_D)}}$
$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.527$ (0.176)	$R^2=0.965$ (0.048)	$R^2=0.896$ (0.082)	$R^2=0.959$ (0.052)
$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.517$ (0.034)	$R^2=0.96$ (0.010)	$R^2=0.884$ (0.017)	$R^2=0.958$ (0.011)

注: 本表中的 a 、 b 、 c 、 d 为常数时的大小见表 3; $f_x(N_D)$ 的表达式见表 2 (x 表示参数 a 、 b 、 c 、 d)。

3.5 新方案计算效果的验证

在之前的研究中, 建立方案和验证方案往往使用的是同一组观测资料 (Gultepe et al., 2006; Gultepe and Milbrandt, 2007; Gultepe et al., 2009; Song et al., 2019)。为验证新方案在其他资料中的效果, 本研究将黄山 2008 年第一组数据拟合得到的诊断方案 (表 2 和表 3), 应用于第二组数据中。表 5 给出了使用第二组数据, 根据表 2 和表 3 方案计算得到的能见度与 Mie 计算能见度之间的相关性与均方根误差。由此可见, 与表 3 方案相比, 新方案 (表 2 方案) 计算的能见度与 Mie 计算能见度之间的相关性更强 (R^2 更大), 偏差更小 (RMSE 更小)。

本研究进一步利用黄山 2009 年 5~8 月、2011 年 5~9 月和恩施 2009 年 1~3 月的雾观测资料, 验证新方案的计算效果。表 2 和表 3 方案计算的能见度与 Mie 散射理论计算的能见度之间的关系如表 6~8 所示。对于黄山其他年份甚至其他地区的雾观测资料, 新方案同样有更加优越的表现。可见, 新方案不仅对建立该方案所用的数据有好的测试效果, 而且对其他数据的能见度诊断同样有着很好的改进作用, 因此新方案相较于以往的方案具有更好的计算效果。此外, 表 8 中的决定系数普遍比表 6、表 7 对应方案的值小, 可能跟微物理过程有关, 而微物理过程又与地域、季节有关。如果能获得其他地域和季节资料, 可进一步评估新方案。如前所述, 新方案和旧方案之间的主要差异是新方案中的系数是 N_D 的函数。不管是观测, 还是模拟, N_D 都存在一定的误差, 因此有必要分析新方案对 N_D 的敏感性。把黄山和恩施雾中的数浓度均增大 10%, 利用新方案计算该敏感性试验中的能见度 (Vis_T), 并计算能见度的相对偏差 (RD):

$$RD = \frac{Vis_T - Vis}{Vis} \quad (8)$$

其中 Vis 为不增大数浓度时的能见度。表 9 给出了不同含水量条件下, 黄山不同年份和恩施雾中能见度相对偏差的平均值和标准差。总体而言, RD 的平均值均在 -4.5% 以内, 标准差在 1.1% 以下。同样地, 把黄山和恩施雾中的数浓度减小 10%, 能见度相对偏差的平均值在 5.1% 以下, 标准差在 1.2% 以下 (表略)。

此外, 本文所用的能见度根据雾滴谱计算得到, 以往研究表明, 计算能见度与观测能见度存在一定的差异。Zhang et al. (2014) 指出, 根据谱分布计算的能见度, 在浓雾时跟观测能见度接近, 在轻雾时高于观测能见度。Spiegel et al. (2012) 发现, 由于观测时雾滴谱仪的进气口固定, 所以采样效率受到风向的影响, 尤其是大滴。此外, 大滴的数浓度低, 也影响数浓度的准确测量。Song et al. (2019) 指出雾中除了米散射, 还存在其他类型的散射, 这也是导致计算能见度和观测能见度存在差异的原因。在后续的研究中, 需要把根据新方案和谱分布计算的能见度, 与观测的能见度作对比, 进一步评估和改进新方案。

表 5 不同含水量条件下, 黄山 2008 年第二组数据对表 2 和表 3 中能见度方案的测试结果
Table 5 Testing the new visibility schemes in Tables 2 and 3 the second part of with the Mount Huangshan's data in 2008
within each LWC range

含水量范围	$Vis = \frac{a}{LWC^b}$	$Vis = \frac{f_a(N_D)}{LWC^{f_b(N_D)}}$	$Vis = \frac{c}{(LWC \cdot N_D)^d}$	$Vis = \frac{f_c(N_D)}{(LWC \cdot N_D)^{f_d(N_D)}}$
$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.464$ (0.195)	$R^2=0.966$ (0.036)	$R^2=0.896$ (0.069)	$R^2=0.963$ (0.038)
$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.437$ (0.039)	$R^2=0.967$ (0.007)	$R^2=0.903$ (0.013)	$R^2=0.965$ (0.008)

注: 本表中的 a 、 b 、 c 、 d 为常数时的大小见表 3; $f_x(N_D)$ 的表达式见表 2 (x 表示参数 a 、 b 、 c 、 d)。

表 6 不同含水量条件下, 黄山 2009 年数据对表 2 和表 3 中能见度方案的测试结果
Table 6 Testing the new visibility schemes in Tables 2 and 3 with the Mount Huangshan's data in 2009 within each LWC
range

含水量范围	$Vis = \frac{a}{LWC^b}$	$Vis = \frac{f_a(N_D)}{LWC^{f_b(N_D)}}$	$Vis = \frac{c}{(LWC \cdot N_D)^d}$	$Vis = \frac{f_c(N_D)}{(LWC \cdot N_D)^{f_d(N_D)}}$
$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.575$ (0.214)	$R^2=0.974$ (0.029)	$R^2=0.94$ (0.067)	$R^2=0.972$ (0.032)
$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.549$ (0.036)	$R^2=0.967$ (0.006)	$R^2=0.876$ (0.011)	$R^2=0.963$ (0.006)

注: 本表中的 a 、 b 、 c 、 d 为常数时的大小见表 3; $f_x(N_D)$ 的表达式见表 2 (x 表示参数 a 、 b 、 c 、 d)。

表 7 不同含水量条件下, 黄山 2011 年数据对表 2 和表 3 中能见度方案的测试结果
Table 7 Testing the new visibility schemes in Tables 2 and 3 with the Mount Huangshan's data in 2011 within each LWC
range

含水量范围	$Vis = \frac{a}{LWC^b}$	$Vis = \frac{f_a(N_D)}{LWC^{f_b(N_D)}}$	$Vis = \frac{c}{(LWC \cdot N_D)^d}$	$Vis = \frac{f_c(N_D)}{(LWC \cdot N_D)^{f_d(N_D)}}$
$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.531$ (0.195)	$R^2=0.968$ (0.043)	$R^2=0.905$ (0.068)	$R^2=0.965$ (0.042)
$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.451$ (0.037)	$R^2=0.962$ (0.013)	$R^2=0.916$ (0.011)	$R^2=0.97$ (0.012)

注: 本表中的 a 、 b 、 c 、 d 为常数时的大小见表 3; $f_x(N_D)$ 的表达式见表 2 (x 表示参数 a 、 b 、 c 、 d)。

表 8 不同含水量条件下, 恩施 2009 年雾资料对表 2 和表 3 中能见度方案的测试结果
Table 8 Testing the new visibility schemes in Tables 2 and 3 with the Enshi's data in 2009 within each LWC range

含水量范围	$Vis = \frac{a}{LWC^b}$	$Vis = \frac{f_a(N_D)}{LWC^{f_b(N_D)}}$	$Vis = \frac{c}{(LWC \cdot N_D)^d}$	$Vis = \frac{f_c(N_D)}{(LWC \cdot N_D)^{f_d(N_D)}}$
$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.674$ (0.147)	$R^2=0.967$ (0.029)	$R^2=0.921$ (0.065)	$R^2=0.967$ (0.03)
$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$R^2=0.582$ (0.025)	$R^2=0.88$ (0.013)	$R^2=0.765$ (0.016)	$R^2=0.869$ (0.013)

注: 本表中的 a 、 b 、 c 、 d 为常数时的大小见表 3; $f_x(N_D)$ 的表达式见表 2 (x 表示参数 a 、 b 、 c 、 d)。

表 9 不同含水量条件下, 黄山和恩施雾中能见度对数浓度增大 10% 的敏感性
Table 9 Sensitivity of fog visibility to Number concentration increased by 10% within each LWC range in Mount
Huangshan and Enshi

	含水量范围	$Vis = \frac{f_e(N_D)}{LWC^{f_e(N_D)}}$	$Vis = \frac{f_e(N_D)}{(LWC \cdot N_D)^{f_e(N_D)}}$
黄山 2008 年第一组数据	$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.6\% \pm 0.6\%$	$-3.2\% \pm 0.9\%$
	$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.4\% \pm 0.5\%$	$-3.1\% \pm 0.8\%$
黄山 2008 年第二组数据	$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-4.2\% \pm 0.7\%$	$-3.3\% \pm 0.5\%$
	$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.8\% \pm 0.6\%$	$-2.6\% \pm 1.0\%$
黄山 2009 年数据	$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-4.5\% \pm 0.7\%$	$-3.3\% \pm 0.5\%$
	$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.9\% \pm 0.6\%$	$-2.6\% \pm 1.1\%$
黄山 2011 年数据	$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.9\% \pm 0.5\%$	$-3.6\% \pm 0.4\%$
	$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.5\% \pm 0.3\%$	$-3.5\% \pm 0.4\%$
恩施 2009 年数据	$<0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.9\% \pm 0.4\%$	$-3.6\% \pm 0.3\%$
	$\geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	$-3.4\% \pm 0.2\%$	$-3.4\% \pm 0.2\%$

注: 表中数字表示平均值±标准差

4 结论与总结

本文利用黄山光明顶 2008 年 4~7 月、2009 年 5~8 月、2011 年 5~9 月和恩施山顶 2009 年 1~3 月的雾和气溶胶观测数据, 对雾和气溶胶的消光特性进行了深入分析, 改进了雾中能见度的诊断方案。主要结论如下:

(1) 在黄山和恩施的清洁背景下, 气溶胶粒子的消光对雾中能见度的影响非常小, 雾中能见度的降低主要由雾滴的消光造成。

(2) 本文进一步验证了 $Vis-LWC \cdot N_D$ 诊断方案相比于 $Vis-LWC$ 诊断方案的计算效果更好, N_D 是能见度诊断方案中的重要物理量。

(3) 本文改进了 $Vis-LWC$ 与 $Vis-LWC \cdot N_D$ 这两种能见度的诊断方案。使用黄山 2008 年第一组数据, 在不同的含水量条件下 ($LWC < 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $LWC \geq 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), 分别建立了方案中的系数与雾滴数浓度 N_D 之间的幂函数关系, 由此建立了雾能见度的含水量分段诊断方案 (表 2)。测试结果表明, 与已有能见度方案相比, 新方案计算的能见度效果更好。利用黄山 2008 年第二组数据、2009 年、2011 年和恩施 2009 年的山地雾资料作为独立数据测试, 同样也支持该结论, 说明新方案具有更好的模拟效果。另外, 本文还验证了新方案对数浓度的敏感性。数浓度提高 (或降低) 10%, 由新方案计算的能见度也随之减小 (或增大), 变化幅度的平均值在 -4.5% (5.1%) 以内。

致谢: 非常感谢张泽锋副教授在论文修改过程中给予的指导和帮助!

参考文献 (References)

- Aikawa M, Hiraki T, Shoga M, et al. 2005. Chemistry of Fog Water Collected in the Mt. Rokko Area (Kobe City, Japan) between April 1997 and March 2001[J]. Water Air Soil Pollut. 160(1): 373-393.
- Beiderwieden E, Wrzesinsky T, Klemm O. 2005. Chemical characterization of fog and rain water collected at the eastern Andes cordillera[J]. Hydrol Earth Syst Sc. 9(3): 185-191.
- Burkard R, Butzberger P, Eugster W. 2003. Vertical fogwater flux measurements above an elevated forest canopy at the Lageren research site, Switzerland[J]. Atmos Environ. 37(21): 2979-2990.

曹祥村, 邵利民, 李晓东. 2014. 雾模式中能见度参数化方案研究[C]. 第 31 届中国气象学会年会 S2 灾害天气监测、分析与预报, 北京: 中国气象学会.

Eldridge R G. 1961. A few fog drop-size distributions[J]. *J Meteor.* 18(5): 671-676.

Eldridge R G. 1966. Haze and Fog Aerosol Distributions[J]. *J Atmos Sci.* 23(5): 605-613.

Eugster W, Burkard R, Holwerda F, et al. 2006. Characteristics of fog and fogwater fluxes in a Puerto Rican elfin cloud forest[J]. *Agr Forest Meteor.* 139(3-4): 288-306.

Gonser S G, Klemm O, Griessbaum F, et al. 2012. The Relation Between Humidity and Liquid Water Content in Fog: An Experimental Approach[J]. *Pure Appl Geophys.* 169(5): 821-833.

Gultepe I, Kuhn T, Pavolonis M, et al. 2014. Ice fog in Arctic during FRAM-Ice Fog Project: Aviation and nowcasting applications[J]. *Bull Amer Meteor Soc.* 95(2): 211-226.

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.

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.

Gultepe I, Pagowski M, Reid J. 2007. A satellite-based fog detection scheme using screen air temperature[J]. *Wea Forecasting.* 22(3): 444-456.

Gultepe I, Pearson G, Milbrandt J, et al. 2009. The fog remote sensing and modeling field project[J]. *Bull Amer Meteor Soc.* 90(3): 341-360.

Holwerda F, Burkard R, Eugster W, et al. 2006. Estimating fog deposition at a Puerto Rican elfin cloud forest site: comparison of the water budget and eddy covariance methods[J]. *Hydrol Process.* 20(13): 2669-2692.

胡朝霞, 雷恒池, 董剑希, 等. 2011. 一次区域暖雾的特征分析及数值模拟[J]. *气候与环境研究.* 16(1): 71-84.

Jia X, Quan J, Zheng Z, et al. 2019. Impacts of Anthropogenic Aerosols on Fog in North China Plain[J]. *J Geophys Res: Atmos.* 124(1): 252-265.

Koschmieder H. 1924. Theorie der horizontalen Sichtweite[J]. *Beitr Phys frei Atmos.* 12: 33-53.

Kunkel B A. 1984. Parameterization of Droplet Terminal Velocity and Extinction Coefficient in Fog Models[J]. *J Appl Meteor.* 23(1): 34-41.

李万彪. 2010. 大气物理[M]. 北京: 北京大学出版社.

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[J]. *气象学报.* 57(5): 622-631.

梁晋文, 陈林才, 何贡. 1989. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 中国计量出版社, 19.

林艳. 2010. 南京冬季雾过程能见度的参数化方案及数值模拟研究.

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.

Lu C, Liu Y, Niu S, et al. 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs[J]. *Acta Meteorol Sin.* 27(6): 832-848.

Meyer M B, Justo J E, Garland L G. 1980. Measurements of Visual Range and Radiation-Fog (Haze) Microphysics[J]. *J Atmos Sci.* 37(3): 622-629.

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.* 10(6): 731-737.

Niu S, Liu D, Zhao L, Lu C, et al. 2012. Summary of a 4-Year Fog Field Study in Northern Nanjing, Part 2: Fog Microphysics[J]. *Pure Appl Geophys.* 169(5-6): 1137-1155.

Niu S, Lu C, Yu H, et al. 2010. Fog Research in China: An Overview[J]. *Adv Atmos Sci.* 27(3): 639-662.

庞成明. 2014. 雾过程模拟分析及能见度预报方法研究[C]. 第八届全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会, 江苏宜兴: 中国气象学会.

彭虎, 李子华. 1992. 包含详细微物理过程的一维辐射雾模式[J]. *重庆环境科学.* 14(3): 49-54.

Peng Y, Wang H, Hou M, et al. Improved method of visibility parameterization focusing on high humidity and

376 aerosol concentrations during fog-haze events: Application in the GRAPES_CAUCE model in Jing-Jin-Ji,
 377 China[J]. Atmos Environ. 222: 117139.

378 濮梅娟, 张国正, 严文莲, 等. 2008. 一次罕见的平流辐射雾过程的特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学. 38(6):
 379 776-783.

380 郅岩. 2018. 雾天能见度检测与预测方法研究[D], 河北: 河北科技大学.

381 饶瑞中. 2010. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报. 30(9): 2486-2492.

382 尚倩, 李子华, 杨军, 等. 2011. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. 环境科学. 32(9):
 383 256-266.

384 沈小静. 2012. 泰山大气气溶胶数谱分布特征及光学特性研究[D], 北京: 中国气象科学研究院.

385 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学[C]. 北京: 北京大学出版社.

386 Shi C, Yang J, Qiu M, et al. 2010. Analysis of an extremely dense regional fog event in Eastern China using a
 387 mesoscale model[J]. Atmos Res. 95(4): 428-440.

388 Simon S, Klemm O, El-Madany T, et al. 2016. Chemical composition of fog water at four sites in Taiwan[J].
 389 Aerosol Air Qual Res. 16(3): 618-631.

390 Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M. 2000. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility
 391 forecasts[C]. Preprints, 9 th Conf on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Soc: 31-36.

392 Song J, Yum S, Gultepe I, et al. 2019. Development of a new visibility parameterization based on the
 393 measurement of fog microphysics at a mountain site in Korea[J]. Atmos Res. 229: 115-126.

394 Spiegel J K, Zieger P, Bukowiecki N, et al. 2012. Evaluating the capabilities and uncertainties of droplet
 395 measurements for the fog droplet spectrometer (FM-100)[J]. Atmos Meas Tech. 5(9): 2237-2260.

396 Stolaki S, Haeffelin M, Lac C, et al. 2015. Influence of aerosols on the life cycle of a radiation fog event. A
 397 numerical and observational study[J]. Atmos Res. 151(1): 146-161.

398 孙诗睿, 赵艳玲, 王亚娟, 等. 2019. 基于无人机多光谱遥感的冬小麦叶面积指数反演[J]. 中国农业大学学
 399 报. 24(11): 51-58.

400 Tampieri F, Tomasi C. 1976. Size distribution models of fog and cloud droplets and their volume extinction
 401 coefficients at visible and infrared wavelengths[J]. Pure Appl Geophys. 114(4): 571-586.

402 唐浩华, 范绍佳, 吴兑, 等. 2002. 南岭山地浓雾的微物理结构及演变过程[J]. 中山大学学报(自然科学版).
 403 41(004): 92-96.

404 王体健, 高太长, 张宏昇, 等. 2019. 新中国成立 70 年来的中国大气科学研究: 大气物理与大气环境篇[J]. 中
 405 国科学: 地球科学. 49(12): 1833-1874.

406 王元, 牛生杰, 陆春松, 等. 2021. 西双版纳热带雨林地区冬季辐射雾理化特征的观测研究[J]. 中国科学: 地
 407 球科学. <https://doi.org/10.1360/SSTe-2020-0332>

408 吴瑾光. 1994. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 252.

409 杨军, 陈宝君, 银燕. 2011. 云降水物理学[M]. 北京: 气象出版社.

410 余洋. 2016. 南京冬季雾霾过程的消光特性研究[D], 南京: 南京信息工程大学.

411 余洋, 杨军. 2016. 南京 2007 年 12 月持续雾霾过程的大气消光特性[J]. 环境科学学报. 36(7): 2305-2313.

412 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.
 413 10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20230

414 张璐瑶, 牛生杰, 王天舒, 等. 2019. 南京冬季晴天及雾-霾天气纳米气溶胶粒子谱日变化比较[J]. 中国环境
 415 科学. 39(7): 2699-2709.

416 张庆鸿, 杨期丰. 1992. 重庆市雾害与能见度的变化分析[J]. 重庆环境科学. 4(3): 22-24.

417 张易君, 张栖程, 栾明显, 等. 2017. NbSiN 薄膜的制备及光学性能研究[J]. 激光与光电子学进展. 54(3): 310-
 418 316.

419 周悦, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2012. 基于高压输电线路实时观测的电线积冰条件[J]. 科学通报. 57(4): 276 ~ 281.

- 420 Zhang J, Xue H, Deng Z, et al. 2014. A comparison of the parameterization schemes of fog visibility using the
421 in-situ measurements in the North China Plain[J]. Atmos Environ. 92: 44-50.
422 赵杨. 2012. 国家创新系统中的信息资源协同配置研究[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 187.

刊

务

情

科

风

务

方

科

风

刊

方

情