大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

从夹卷的角度探讨雾不同阶段微物理量的变化机理

吴诗晓 陆春松 朱磊 高思楠 吕晶晶

Examination of Mechanisms Underlying the Variations of Microphysical Properties in Different Fog Phases from the Perspective of Entrainment

WU Shixiao LU Chunsong ZHU Lei GAO Sinan L Jingjing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20189

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

气溶胶辐射效应对边界层结构及夹卷特征影响的观测分析

Observational Analysis of the Influence of Aerosol Radiation Effect on Planetary Boundary Layer Structure and Entrainment Characteristics

大气科学. 2020, 44(6): 1213 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19180

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

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

云粒子的破碎对积层混合云微物理参量测量的影响

Cloud Particle Shattering and Its Impact on Cloud Microphysical Parameters' Measurement in Stratiform Clouds with Embedded Convection

大气科学. 2021, 45(2): 369 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19255

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吴诗晓, 陆春松, 朱磊, 等. 2021. 从夹卷的角度探讨雾不同阶段微物理量的变化机理 [J]. 大气科学, 45(5): 1057−1070. WU Shixiao, LU Chunsong, ZHU Lei, et al. 2021. Examination of Mechanisms Underlying the Variations of Microphysical Properties in Different Fog Phases from the Perspective of Entrainment [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(5): 1057−1070. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20189

从夹卷的角度探讨雾不同阶段微物理量的变化机理

吴诗晓 陆春松 朱磊 高思楠 吕晶晶

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

摘 要 夹卷混合过程作为影响云雾的主要物理过程之一，对云雾的生命周期、云雾降水的形成过程、辐射传输过程和气溶胶间接效应等都有着重要影响。本文从微物理和动力两个方面探讨辐射雾中的夹卷混合机制，既促进对夹卷混合机制的理论认识，又从新的角度来讨论辐射雾的发展消亡过程。利用 2006 年和 2007 年冬季在南京进行的雾综合观测的资料，研究了 9 个个例中的夹卷混合机制。首先，针对 2007 年 12 月 10～11 日这一次辐射雾过程进行详细分析，探讨了不同阶段微物理量的变化和夹卷混合机制。结果表明：成熟阶段主要为极端非均匀夹卷混合机制，数浓度和含水量同时减小，体积平均半径却基本保持不变；快速消散阶段主要为均匀夹卷混合机制，各微物理量同时减小，互为正相关关系。除了微物理，本文也分析了夹卷混合机制的动力特征，计算了过渡尺度数，发现在成熟（快速消散）阶段，过渡尺度数小（大），有利于极端非均匀（均匀）夹卷混合机制的发生。其次，分析了其他 8 个个例中微物理量之间的相关关系，发现体积平均半径和含水量之间主要呈正相关关系，以均匀夹卷混合为主。所得结果有助于夹卷混合机制参数化方案的开发，同时为辐射雾的模拟预报提供参考。

关键词 夹卷混合 辐射雾 微物理关系 南京

文章编号 1006-9895(2021)05-1057-14 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20189

Examination of Mechanisms Underlying the Variations of Microphysical Properties in Different Fog Phases from the Perspective of Entrainment

WU Shixiao, LU Chunsong, ZHU Lei, GAO Sinan, and LÜ Jingjing

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 & Technology, Nanjing 210044

Abstract As one of the main processes affecting cloud and fog, the entrainment-mixing process has an important impact on the cloud/fog life cycle, precipitation formation, radiative transfer, aerosol indirect effect evaluation, and so on. This study discussed the entrainment-mixing mechanisms in a radiation fog from the microphysical and dynamical perspectives, which not only improved the theoretical understanding of entrainment-mixing mechanisms but also revealed the development and dissipation of radiation fog from a new perspective. Using the comprehensive field observational data in Nanjing during the 2006 and 2007 winter, entrainment-mixing mechanisms in nine fog cases were analyzed. First, a radiation fog event during December 10–11, 2007, was studied to understand the microphysical relationships and entrainment-mixing mechanisms during different phases in detail. Results showed that the extreme inhomogeneous

收稿日期 2020-08-05；**网络预出版日期** 2021-06-03

作者简介 吴诗晓，女，1996 年，硕士研究生，主要从事云降水物理方向研究。E-mail: wushixiao20@outlook.com

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

资助项目 国家重点研发计划项目 2019YFA0606803, 国家自然科学基金项目 41822504、41975181、41675136、41875170、42175099

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2019YFA0606803), National Natural Science Foundation of China (Grants 41822504, 41975181, 41675136, 41875170, 42175099)

entrainment-mixing was found in the mature phase, in which the volume-mean radius slightly changed as the number concentration and liquid water content decreased. The homogeneous entrainment-mixing was found in the rapid dissipation phase, in which all microphysical properties decreased simultaneously with positive correlations. Except for microphysical properties, the scale number was calculated as a dynamical measure for entrainment-mixing mechanisms. In the mature (rapid dissipation) phase, the scale number was small (large), indicating that the extreme inhomogeneous (homogeneous) entrainment-mixing was most likely to occur. The microphysical relationships of the other eight fog events were then examined, which indicated that the volume-mean radius had positive correlations with the liquid water content in general, i.e., homogeneous entrainment-mixing dominated. The research results were helpful to the development of parameterization schemes of entrainment-mixing mechanisms and provided a reference for the simulation and prediction of radiation fog.

Keywords Entrainment-mixing, Radiation fog, Microphysical relationships, Nanjing

1 引言

雾是大量水滴或冰晶微粒悬浮于大气边界层内，使水平能见距离降至 1 km 以下的天气现象（李子华等, 2008）。根据能见度可将雾分为能见度介于 0.5～1 km 的雾、0.05～0.5 km 的浓雾、小于 0.05 km 的强浓雾（中国气象局, 2003）。雾，尤其是浓雾，会使区域能见度大大降低，对人体健康、交通运输、工农业生产等等产生日益显著的不利影响，甚至会引发灾难性事故，导致重大生命财产损失（Gultepe et al., 2007; Niu et al., 2010b）。因此人们对雾这种灾害性天气现象非常重视，并开展了一系列的研究。

自上个世纪 Taylor（1917）首次对雾进行观测研究以来，许多学者开始在世界各地开展雾外场观测外场试验，如美国纽约附近的埃尔迈拉山（Pilié et al., 1975）、英国贝福德郡卡丁顿（Roach et al., 1976）、意大利波河流域（Fuzzi et al., 1992, 1998）、美国圣华金山谷（Collett et al., 2001）、加拿大东海岸和安大略省（Gultepe et al., 2009）、法国巴黎（Haeffelin et al., 2010）等。国内也在多地开展了雾的观测研究，如成都双流机场（郭恩铭等, 1989）、上海（鲍宝堂等, 1995）、西双版纳（黄玉生等, 1992）、重庆（李子华和彭中贵, 1994）、沪宁高速公路（李子华等, 1999）、广东南岭（吴兑等, 2007）、陕西（胡朝霞等, 2011）、南京市郊（陆春松等, 2010; 李子华等, 2011; 刘端阳, 2011; Liu et al., 2011, 2012; Niu et al., 2012; Li et al., 2019）、华北（Guo et al., 2015; Jia et al., 2019）等。以上学者对雾进行了大量观测研究，从不同角度深入分析了雾中的核化、凝结、碰并、蒸发等物理过程，但是对雾中的夹卷混合过程研究却很少。然而在影响云雾的主要物理过程中，夹卷混合过程也是非常重要的物理过程之一。

夹卷是指环境空气被卷入到云雾中，影响云雾中宏微观物理量的过程。Stommel（1947）首次发现干空气被卷进入积云，并提出夹卷这一概念。对于积云来说，夹卷可以在云的侧边界也可以在云顶处发生，而对于层状云或者雾来说，由于水平范围很大，夹卷主要发生在云顶，侧边界的夹卷影响很小。夹卷混合过程对云雾降水的影响具有两面性，一方面导致云雾含水量减少从而削弱降水，另一方面又使云雾滴谱增宽从而有利于降水的形成（Cooper et al., 2013）；在利用大涡模式对层积云的模拟中发现，夹卷混合过程对云雾的反照率有很大影响（Chosson et al., 2007）；夹卷混合过程对气溶胶的间接效应也有削弱和增强两种不同的影响（Kim et al., 2008）。由此可以看出夹卷混合过程对云雾降水的形成过程、云雾的生命周期、辐射传输过程和气溶胶间接效应等都有着重要影响。

夹卷混合机制关注的是干空气被卷入云雾之后微物理量的变化，关于该机制，学者们建立了多个概念模型，其中均匀/非均匀夹卷混合模型应用最为广泛（Baker et al., 1980; Yum, 1998; Lu et al., 2011, 2018a）。在湍流作用下干空气和云雾混合的同时，云雾滴会发生蒸发过程。可以通过混合和蒸发哪个过程更快，来区分不同的夹卷混合过程。均匀夹卷混合过程（Warner, 1973; Baker et al., 1980）湍流比较强，混合比蒸发快，干空气被卷入云雾中之后马上与云雾混合均匀，全部云雾滴处于相同的不饱和度中，同时蒸发尺度减小，数浓度和含水量因干空气的稀释作用也减小，云雾滴谱向左移。非均匀夹卷混合过程（Latham and Reed, 1977; Baker and Latham, 1979）湍流比较弱，蒸发比混合快，

不同云雾滴所处的不饱和度不同，云雾滴蒸发不均匀，靠近干空气的云雾滴蒸发而其余云雾滴不受影响，云雾滴尺度不变，数浓度和含水量减小，云雾滴谱向下移。

国内外通过外场观测（Lu et al., 2011, 2018a; Gerber et al., 2013）、理论推导（Jeffery, 2007）以及数值模拟（Kumar et al., 2018; Hoffmann and Feingold, 2019），对云雾中的夹卷混合过程进行了深入分析。Telford and Chai（1993）利用雾的飞机观测资料发现，雾中湍流较弱，雾滴被夹卷稀释导致雾滴尺度几乎恒定但数浓度变化很大。虽然开展了大量的研究，但是对于一个夹卷混合过程，它的均匀程度、各个影响因子的作用及相互影响的机理，仍然不清楚（Lehmann et al., 2009; Luo et al., 2020）。有些研究认为均匀夹卷混合机制占主导（Jensen et al., 1985; Burnet and Brenguier, 2007），有些认为极端非均匀夹卷混合机制占主导（Burnet and Brenguier, 2007; Gerber et al., 2008; Freud et al., 2011），有些则认为夹卷混合机制介于两者之间（Lehmann et al., 2009; Luo et al., 2020）。因此需要进一步开展云雾夹卷混合机制的观测分析。

最近，Yang and Gao（2020）考虑雾顶的夹卷后改善了海雾的模拟效果，主要是因为夹卷作用导致雾中温度增大、湿度降低、湍流增强；增温和降湿的影响从雾顶向下扩散，抬升了海雾的雾底，使海雾的模拟与观测更为接近。鉴于此，分析雾中的夹卷过程对理解雾中微物理、热力、动力过程和生消机制是非常有必要的。

本文分析了 2006 年和 2007 年南京冬季雾的微物理关系，并对 2007 年 12 月 10～11 日一次辐射雾过程进行深入分析，从微物理和动力两个方面探讨辐射雾成熟和快速消散阶段中夹卷混合机制的影响因子。一方面，本文促进对夹卷混合机制的理论认识和参数化方案的开发；另一方面，揭示雾的不同阶段夹卷混合过程对雾的影响，从新的角度来讨论辐射雾的发展消亡过程，为辐射雾的模拟预报提供参考，减少辐射雾带来的损害。

2　观测资料和研究方法

2.1　资料来源

2006 年和 2007 年冬季，在江苏省南京市北郊南京信息工程大学西苑田径场（32°12′N，118°42′E；海拔高度 25 m）进行了冬季雾的综合外场观测试验，其中部分观测仪器及其直接观测项目如表 1 所示。

水平能见度采用江苏省无线电科学研究所有限公司制造的 ZQZ-DN2 型能见度仪进行自动观测，其原理是将前向散射角 33°的散射光强度经处理后转换成能见度值。雾微物理参量（数浓度、含水量、体积平均半径等）由美国 Droplet Measurement Technologies（DMT）公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪的测量得到，其根据 Mie 散射原理，通过不同大小的雾滴形成的激光散射强度来对雾滴进行分档、计数，可测直径介于 2～50 μm 的雾滴，采样频率 1 Hz。为了更清晰地展示各个微物理量的时间演变和它们之间的关系，本文把 1 Hz 数据平均成 1 min，结论与 1 Hz 相同。温压湿风的垂直分布由芬兰 Vaisala 公司生产的系留气艇（DigiCORA）探测（1 Hz）。三维风速由美国 Campbell 公司生产的 CSAT3 超声风速仪测量（10 Hz）。地面常规气象要素（温度、气压、相对湿度、风速风向等）采用自动气象站的观测数据（1 min）。除系留气艇外，其余仪器均架设于地面上。天气图及相关产品由南京信息工程大学气象台提供。

最初的夹卷过程确实发生在雾顶，但是当干空气从雾顶卷入到雾中后，由于雾滴的蒸发冷却，干空气会下沉（Yang and Gao, 2020），从而影响雾中不同高度的微物理量。云中的夹卷混合过程也提供了佐证。利用高分辨率云模式，Krueger（1993）

表 1　观测仪器及观测项目概况

Table 1　List of instruments and items during the experiment

观测仪器	仪器生产商	直接观测项目	架设高度
能见度仪ZQZ-DN2	江苏无线电科学研究所	水平能见距离(1 min)	1.5 m
雾滴谱仪FM-100	美国DMT	雾滴直径、数浓度、含水量(1 Hz)	1 m
系留气艇DigiCORA	芬兰Vaisala	气温、气压、相对湿度、风速、风向、混合比廓线(1 Hz)	-
超声风速仪CSAT3	美国Campbell	三维风速、超声虚温(10 Hz)	3 m
自动气象站	澳大利亚ICT	气温、气压、相对湿度、风速、风向(1 min)	1.5 m

指出，被卷入的干空气不仅仅与层云云顶的云滴混合，还会影响整个云层。除了分析云顶的夹卷混合机制外，Telford（1996）、Wang et al.（2009）、Yum et al.（2015）还探讨了夹卷混合机制随高度的变化。

2.2 研究方法

本文通过微物理和动力两个方面来区分均匀夹卷混合过程和极端非均匀夹卷混合过程。微物理方法是指根据雾滴尺度和数浓度、含水量之间的关系来区分不同夹卷混合过程（Burnet and Brenguier, 2007; Lehmann et al., 2009; Lu et al., 2011）。在均匀夹卷混合过程中，干空气卷入后，由于干空气与雾滴混合的速率比雾滴蒸发快，先混合然后所有雾滴同时蒸发，尺度减小，数浓度和含水量由于稀释和完全蒸发等原因也减小，雾滴尺度和数浓度、含水量呈正相关关系。在极端非均匀夹卷混合过程中，由于蒸发比混合快，只有紧邻干空气的雾滴发生蒸发且为完全蒸发，导致干空气达到饱和，而远离干空气的雾滴不发生蒸发，整个雾的雾滴浓度和含水量减小，尺度不变。

在动力方面，本文通过计算 Lu et al.（2011）提出的无量纲数（过渡尺度数N_L）来分析夹卷混合机制。N_L定义为 Lehmann et al.（2009）提出的过渡长度（L^*）和 Kolmogorov 微尺度（η）的比值：

$$N_L = \frac{L^*}{\eta}, \tag{1}$$

$$L^* = \varepsilon^{1/2}\tau_{\mathrm{react}}{}^{3/2}, \tag{2}$$

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}, \tag{3}$$

其中，ε是湍流耗散率；τ_{react}是反应时间尺度，即云滴完全蒸发（$r=0$）或者干空气相对湿度达到99.5%（过饱和度$s>-0.005$）所需的时间；ν为运动粘度。N_L越大，夹卷混合机制越倾向于均匀，反之则趋向于极端非均匀。如果仅利用过渡尺度数，仅能分析夹卷混合机制的倾向。为了弥补该不足，除了分析过渡尺度数这个动力因子，如前所述，本文还分析微物理量之间的关系。动力和微物理相结合，可以更好地判断夹卷混合机制。

在夹卷混合研究中，τ_{react}常取成雾滴蒸发的时间尺度τ_{evap}（Burnet and Brenguier, 2007）和达到饱和的弛豫时间尺度τ_{phase}（Kumar et al., 2013）。Lu et al.（2018b）探讨了不同情况下最佳云微物理时间尺度的确定，认为当研究夹卷混合过程中云滴尺度和数浓度的变化时，τ_{evap}是实际应用中的最佳选择。因此，本文计算N_L时所使用的时间尺度为τ_{evap}，即半径为r的液滴在不饱和空气中完全蒸发所需的时间：

$$\tau_{\mathrm{evap}} = -\frac{r^2}{2As}, \tag{4}$$

其中，s是过饱和度，A是气压和温度的函数：

$$A = \frac{1}{\left(\frac{L_v}{R_v t}-1\right)\frac{L_v\rho_L}{Kt}+\frac{\rho_L R_v t}{De_s(t)}}, \tag{5}$$

式中，L_v是潜热，R_v是水汽的比气体常数，t是气温，ρ_L是水的密度，K是空气的导热系数，D是水汽扩散系数，$e_s(t)$是气温为t时的平水面饱和水汽压。

根据 Kolmogorov-Obukhov 的湍流谱理论，在惯性副区计算风速分量的湍流谱密度，由能谱密度与耗散率之间的关系式计算得到湍流耗散率ε（Champagne et al., 1977; 刘树华等, 2005）：

$$fS_{u,v,w}(f) = a_{u,v,w}\varepsilon^{2/3}\left(\frac{2\pi f}{\overline{u}}\right)^{-2/3}, \tag{6}$$

其中，f为自然频率，S为能谱密度，$a_{u,v,w}$为Kolmogorov 常数，$\overline{u}=\left(u^2+v^2+w^2\right)^{1/2}$为平均风速。在惯性副区，$S$的$v$和$w$分量是$u$分量的4/3倍，由湍流各向同性理论推知相应的$a$也应有相同的比值，即 $a_u=0.51$, $a_v=a_w=4/3\cdot a_u=0.68$。$S$是$f$的函数，与$f$的−5/3 次成正比（Stull, 1988）。本文根据涡度协方差数据处理软件 EddyPro（Version 7.0.6）由三维风速计算出的湍流谱中的f和$S_{u,v,w}$，再通过公式（6）计算得到湍流耗散率ε。

3 雾生消过程

3.1 天气形势分析

2007 年 12 月 10 日 08:00（北京时，下同），500 hPa 图上 110°E 附近有槽（图略），南京位于槽前受到西南气流影响，且槽前有上升气流，有利于形成降水，10 日 20:00，该槽东移经过 120°E（即南京附近）且强度减弱，形成下沉气流，11 日 08:00，该槽消失。700 hPa 图上 10 日 08:00 115°E 附近有槽，西南暖湿气流强劲，11 日 08:00，在（33°N，105°E）附近有低压中心和明显的切变线，切变线南侧有西南风急流，带来了大量暖湿空气。10 日 08:00 至 11 日 08:00，850 hPa 图上我国东南地区受西南气流控制，低层天气形势稳定，温

度露点差小，湿度大，容易形成雾。在地面天气图上，12 月 9 日 20:00 至 10 日 20:00，东部地区有倒槽，南京阴雨连绵，土壤和地表非常潮湿，10 日 20:00 倒槽入海，天气转晴，风速较小，等压线稀疏接近于均压场，有利于近地层辐射冷却和逆温层的形成，从而形成辐射雾。11 日 09:00 之后，由于太阳辐射增强，雾消散。

3.2　雾的宏、微观发展过程概况

根据图 1，2007 年 12 月 10 日 22:31，能见度低于 1 km，辐射雾形成，11 日 07:36，雾爆发性增强使能见度降至最低，其中能见度仅为 15 m 的强浓雾持续了 77 min，随着太阳短波辐射的增强和气温的回升，辐射雾逐渐减弱，至中午 12:30 能见度开始大于 1 km，雾消散，整个辐射雾过程持续时间 14 h。此次雾过程，相对湿度迅速上升，在 23:24 达到最大值 100% 并保持不变；气温先缓慢下降，然后再快速上升；风速很小，有利于雾的形成和维持，消散时才逐渐增大；雾爆发性增强前，以偏南风为主，之后以偏北风为主。

根据能见度、气象要素和微物理参量随时间的变化（图 1、图 2）可将这次辐射雾的强浓雾时期及其前后细分为 3 个阶段：

雾爆发性增强阶段（11 日 07:20～07:50），在很短的时间（约 30 min）内，雾由浓雾变为强浓雾，能见度从 07:20 的 100 余米突降到 07:45 的 15 m。降温率突然加大，降至低于 2°C。风速增大，风向由南风突转为西北风。数浓度、含水量、体积平均半径 3 个微物理量均迅速增大，雾滴谱迅速拓宽。

成熟阶段（11 日 07:50～09:10），07:45～9:01 共 77 min 一直保持着 15 m 的极低能见度。温度降至整个雾过程最低温 1.8°C，随后开始增大。在 07:55 左右数浓度、含水量、体积平均半径几乎同时达到最大值。随后数浓度、含水量缓慢减小，而体积平均半径几乎保持不变。

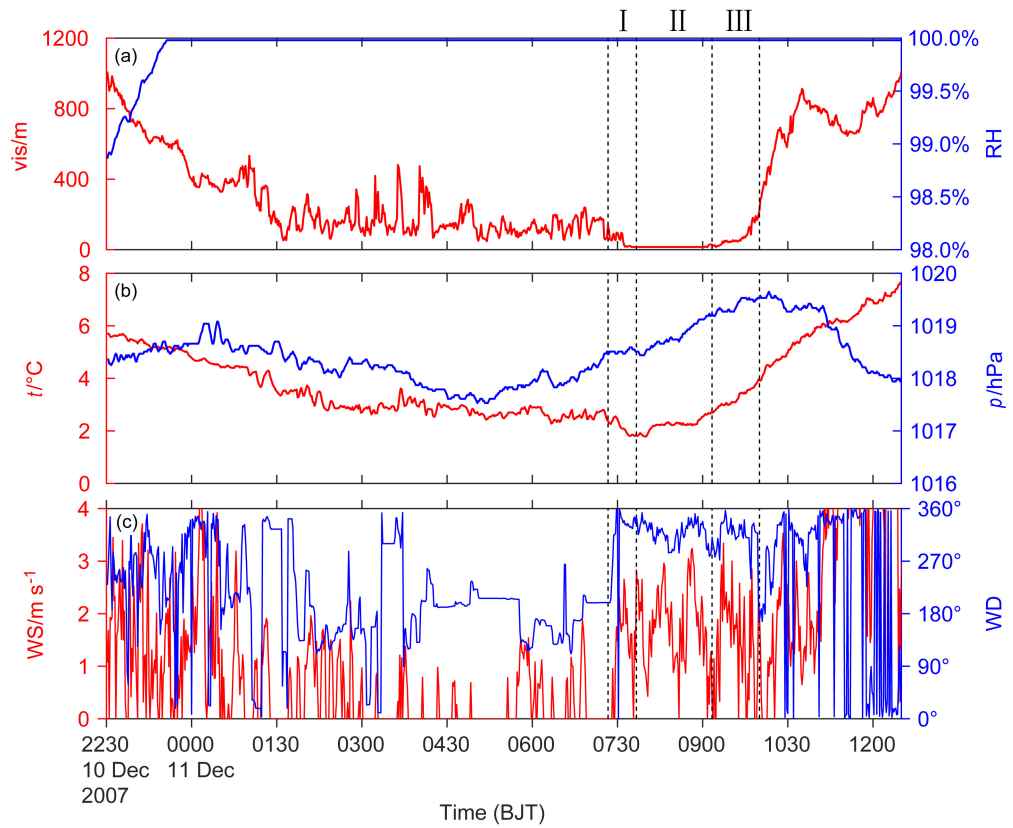

图 1　2007 年 12 月 10～11 日南京辐射雾过程中（a）能见度（vis）、相对湿度（RH）、（b）温度（t）、气压（p）、（c）风速（WS）、风向（WD）随时间的变化.图中的 I、II 和 III 分别代表雾爆发性增强阶段、成熟阶段和快速消散阶段；图中时间均为北京时，下同

Fig. 1　Temporal variations of (a) visibility (vis), relative humidity (RH), (b) temperature (t), pressure (p), (c) wind speed (WS), and wind direction (WD) in the Nanjing radiation fog during December 10–11, 2007. I, II, and III represent the burst reinforcement phase, mature phase, and rapid dissipation phase, respectively; BJT means Beijing time, the same below

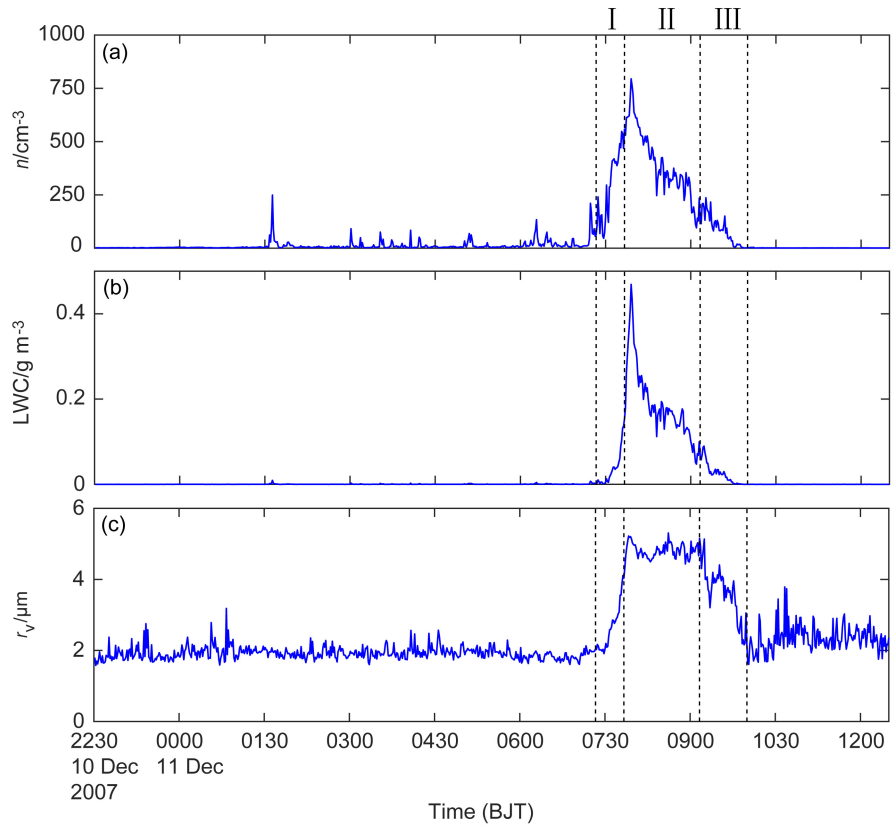

图 2 2007 年 12 月 10～11 日南京辐射雾过程中微物理量（a）数浓度（n）、（b）液态含水量（LWC）、（c）体积平均半径（r_v）随时间的变化

Fig. 2 Temporal variations of microphysical parameters (a) number concentration (n), (b) liquid water content (LWC), and (c) volume-mean radius (r_v) in the Nanjing radiation fog during December 10–11, 2007

快速消散阶段（11 日 09:10～10:00），随着太阳短波辐射增强，地面温度迅速回升，雾滴蒸发，能见度好转。数浓度、含水量、体积平均半径这 3 个微物理量都快速减小至与爆发性增长阶段接近甚至更低。

4 微物理过程

图 3 给出了体积平均半径与数浓度、含水量之间的关系。如果不分阶段做相关性分析，那么微物理量之间主要呈正相关关系，与 Lu et al.（2013c）的发现一致。但是，整个过程并不全是正相关关系。在雾刚形成和即将消散时各个物理量都很小，数据点都分布在每个子图的左下方，而散布在图中的数据点则是由正相关转为不相关再回到正相关。我们重点分析图 2 中的三个阶段。

4.1 成熟阶段的极端非均匀夹卷混合过程

4.1.1 微物理关系

由图 2 和图 3 可以看出，在雾爆发性增强阶段（07:20～07:50）结束后，数浓度达到最大值 794.5 cm^{-3}，含水量达到最大值 0.47 g m^{-3}，体积平均半径在 5 μm 左右。之后在成熟阶段（07:50～09:10）的 1 个多小时里，数浓度显著减小至 100 cm^{-3} 左右，体积平均半径维持在 5 μm 左右，随数浓度的减小没有明显的变化。与体积平均半径和数浓度的关系相似，含水量在爆发性增长后的 1 个多小时里逐渐减小至 0.1 g m^{-3} 左右，但体积平均半径变化很小。这说明成熟阶段主导的夹卷混合机制为极端非均匀夹卷混合机制（Lu et al., 2011）。Telford and Chai（1993）也曾在雾中发现数浓度变化非常大而雾滴尺度几乎不变的现象。

4.1.2 动力因子分析

由于计算动力因子N_L需要雾顶之上的气象信息，故首先分析了成熟阶段的相对湿度、温度、风速以及水汽混合比的垂直分布（图 4）。由相对湿度随高度的变化可知，本次雾是双层雾。08:40 左右地面雾的雾顶约为 100 m，09:40 左右地面雾的

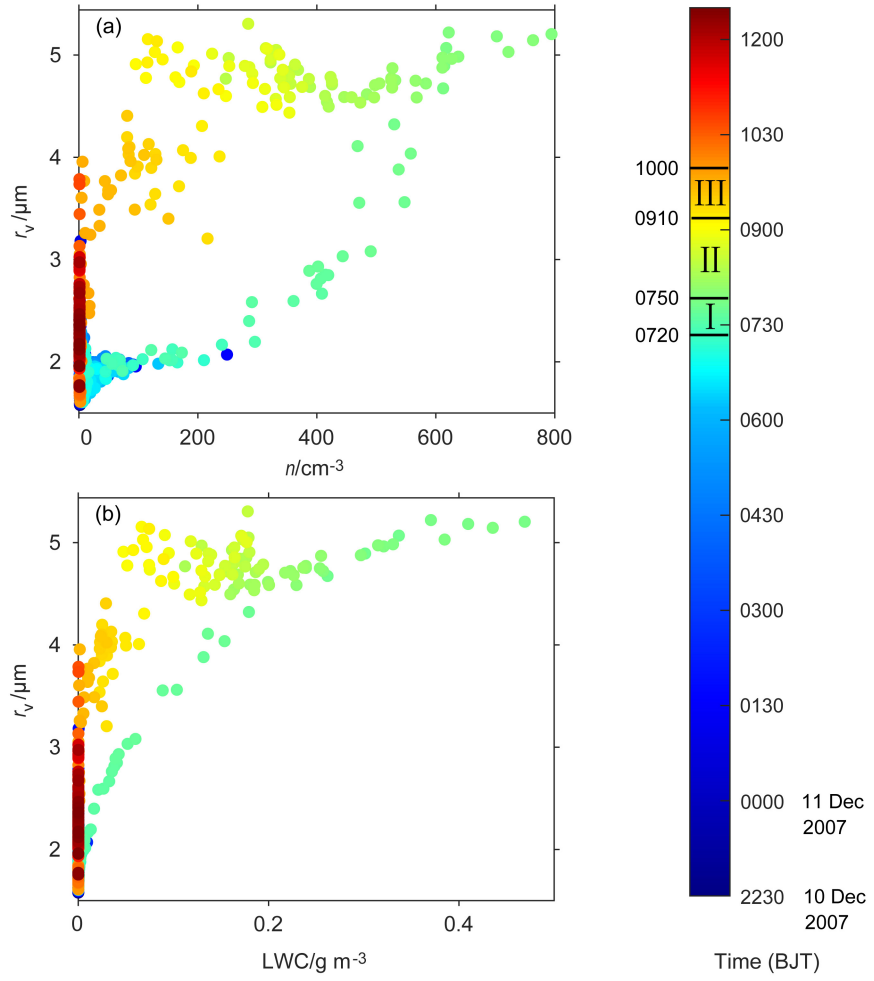

图 3　2007 年 12 月 10～11 日南京辐射雾过程中（a）体积平均半径（r_v）与数浓度（n），（b）r_v 与含水量（LWC）之间的相关关系

Fig. 3　Correlations between (a) volume-mean radius (r_v) and number concentration (n), (b) r_v and liquid water content (LWC) in the Nanjing radiation fog during December 10–11, 2007

雾顶上升至 120 m。09:00 左右上层雾的高度为 300～400 m，09:25 左右上层雾的高度下降至 260～370 m。日出之后，近地层层结趋于不稳定，湍流增强，地面雾层增厚、雾顶抬升，两层雾之间的范围减小。地面雾顶抬升亦有可能是雾顶本身有起伏，系留气艇上升和下降时穿过的区域不同，所以测到的雾顶不同。由温度廓线可知 08:40 左右地面雾顶在逆温层内，逆温层高度在 70～110 m，逆温强度达到 10°C/(100 m)，09:40 左右逆温层高度为 95～125 m，逆温强度 8.3°C/(100 m)，逆温强度和厚度减小且高度上抬。上层雾顶之上也是逆温层，但逆温强度小于地面雾顶。由风速随高度的变化得知地面雾顶风速增大，两层雾之间风速最大，达到 4～5 m s^{-1}，即存在急流区。正是急流区的存在导致了雾的分层，这与陆春松等（2010）的结果类似。从混合比廓线来看，地面雾顶之下有明显的逆湿层，雾顶之上混合比减小，上层雾混合比先增大再减小，雾顶之上则快速减小。

由以上分析可知，雾具有双层结构。假定两层雾之间的环境空气被卷入地面雾中，环境温度 [公式（5）中的t] 和相对湿度（RH）取两层雾之间的平均值，公式（4）中的$s = \mathrm{RH} - 100\%$，半径r取最大含水量对应的体积平均半径，与以往研究中的处理方式类似（陆春松等, 2011; Lu et al., 2013b; Gao et al., 2020）。

此外，N_L的计算还需要ε。利用超声风速仪的资料，画出了本次辐射雾过程成熟阶段的归一化 u、v、w 谱，图 5 中 z 为观测高度，d 为零平面位移，U 为水平风速，横坐标$f(z-d)/U$表示无量纲频率，σ^2为方差，纵坐标fS/σ^2表示风速功率谱的方差标

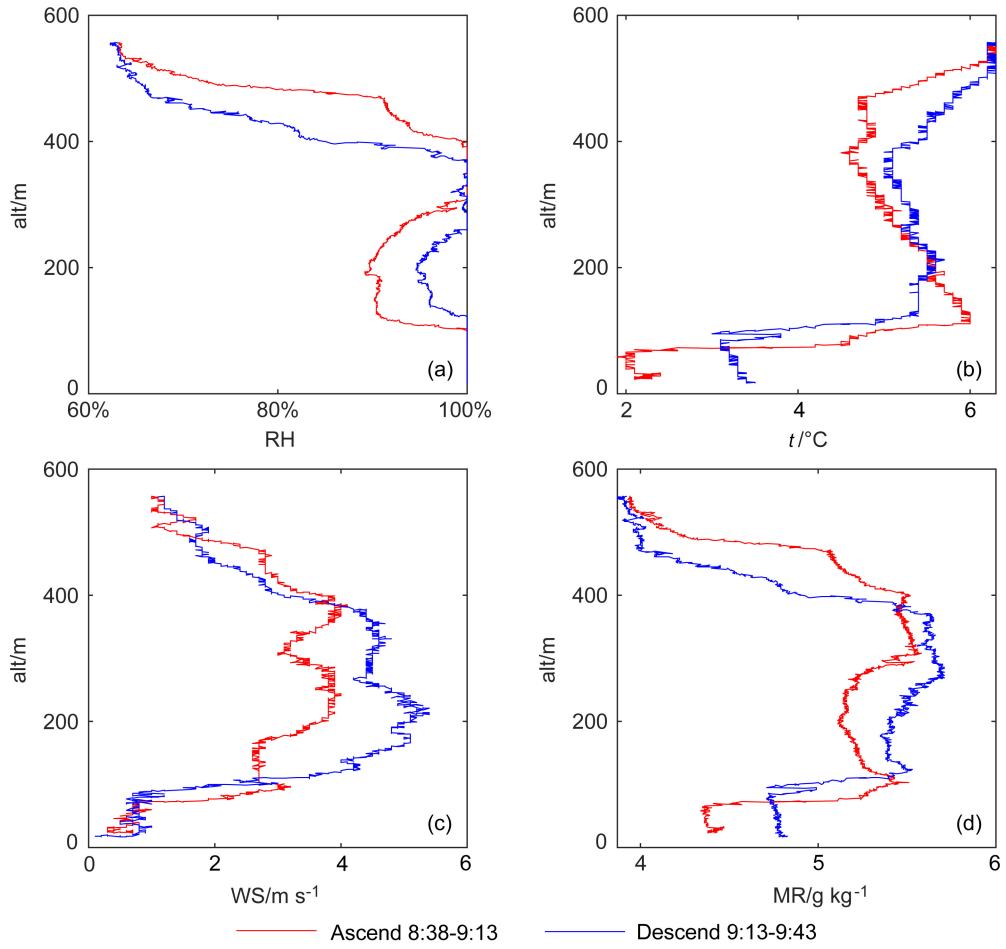

图 4　2007 年 12 月 10～11 日南京辐射雾过程中成熟阶段系留气艇上升和下降时（a）相对湿度（RH）、（b）温度（t）、（c）风速（WS）和（d）水汽混合比（MR）随高度（alt）的变化

Fig. 4　Variations of (a) relative humidity (RH), (b) temperature (t), (c) wind speed (WS), and (d) mixing ratio (MR) with altitude (alt) when the balloon ascended and descended in the mature phase in the Nanjing radiation fog during December 10–11, 2007

准化。图 5 给出了 08:30～09:00 的一个例子，图中黑色直线斜率为−2/3，可以看出湍流能谱在惯性副区符合−2/3 次律，满足 Kolmogorov 的各向同性湍流理论 (王介民等, 1990)。根据公式（6）计算得到ε。

通过计算，可得在成熟阶段，耗散率ε为 8.87×10^{-4} m^2 s^{-3}，过渡长度L^*为 0.09 m，过渡尺度数N_L为 69.80。陆春松（2013）分析的层积云中，夹卷混合机制为极端非均匀夹卷混合机制时的N_L都在 200 以下。与层积云类似，雾的N_L为 69.80 更有可能是极端非均匀夹卷混合机制。环境空气被卷入雾中后，蒸发的速度快于混合，紧邻环境空气的雾滴完全蒸发导致被卷入的环境空气达到饱和，该饱和湿空气块与未蒸发的雾继续混合时，整个雾的体积平均半径不变，数浓度和含水量减小。值得指出的是，两层雾之间急流区环境空气的相对湿度基本上在 90% 以上。如果相对湿度接近 100%，将很难区分夹卷混合机制是均匀夹卷混合还是非均匀夹卷混合，也有可能发生了稀释作用，这与以往的研究一致（Burnet and Brenguier, 2007; Gerber et al., 2008; Lu et al., 2014）。

4.2　快速消散阶段的均匀夹卷混合过程

4.2.1　微物理关系

由图 2 和图 3 可知，在消散阶段（09:10～10:00），数浓度、含水量和体积平均半径同时减小，且体积平均半径的减小速率大于数浓度和含水量的减小速率。根据均匀/非均匀夹卷混合机制的模型，雾滴尺度和数浓度、含水量之间的正相关关系表明，在消散阶段，夹卷混合机制更趋向于均匀夹卷混合机制。这主要是由于消散阶段动量下传（陆春松等, 2010），雾顶之上的环境空气被大量

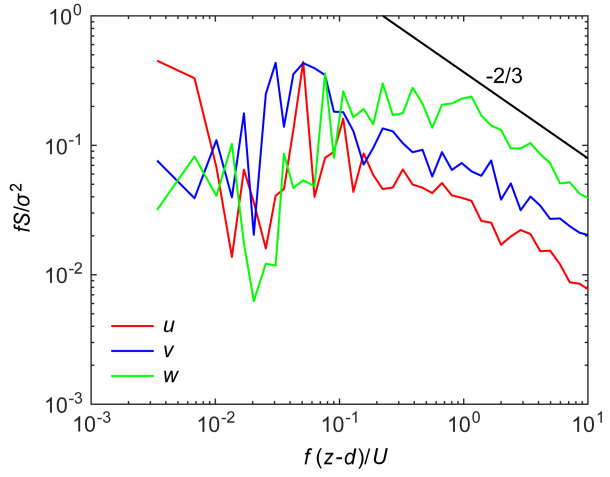

图 5　2007 年 12 月 10～11 日南京辐射雾过程 08:30～09:00 湍流能谱密度随无因次频率的变化.*u*、*v*、*w* 分别代表水平纵向、水平横向和垂直三个方向

Fig. 5　Turbulence energy spectral densities as a function of the normalized frequency during 8:30–9:00 in the Nanjing radiation fog during December 10–11, 2007. The symbols *u*, *v*, and *w* represent the horizontal longitudinal, horizontal transverse, and vertical directions, respectively

卷入到雾中，同时伴随着太阳辐射的增强，气温快速上升，大量雾滴同时蒸发，这三个物理量同时减小。

4.2.2　动力因子分析

在快速消散阶段，ε为 2.42×10^{-3} m^2 s^{-3}，大于成熟阶段的ε。由此可以看出，随着雾的发展，耗散率逐渐增大，消散阶段的耗散率明显大于成熟阶段。由于缺乏快速消散阶段雾顶之上的系留气艇观测资料，无法直接计算L^*和N_L。但如果假定快速消散阶段雾顶之上的气象信息与成熟阶段相同，那么L^*和N_L在消散阶段也将比成熟阶段时大。N_L越大意味着夹卷混合类型越倾向于均匀夹卷混合。结合微物理关系的分析，快速消散阶段以均匀夹卷混合为主。

4.3　其他微物理过程

4.3.1　核化凝结过程

如图 3 所示，在雾爆发性增强阶段（07:20～07:50），数浓度、含水量、体积平均半径都开始增大，两两之间均互为正相关关系，只是斜率有所不同，体积平均半径随数浓度增大的速率加快，随含水量增大的速率减慢。该正相关关系说明这段时间核化和凝结增长过程非常活跃，大量小雾滴形成、长大。Lu et al.（2013）和 Niu et al.（2010b）均认为核化凝结是导致这些物理量之间正相关的重要原因。

4.3.2　碰并过程

碰并过程是云雾中可能出现的一个重要过程，是否出现降水是判断碰并过程强弱的一个标准。根据自动气象站的记录，本次雾过程并没有形成降水，说明碰并过程可能不强。另一个判断标准是在碰并过程中体积平均半径和含水量为正相关关系，且体积平均半径和数浓度为负相关关系（Lu et al., 2013a）。由图 3 可知，这两个相关关系不符合碰并的条件。为了更加定量地分析碰并的强度，本文计算了 Liu et al.（2005, 2006）提出的云雨自动转化阈值函数（T）：

$$T=\left[\frac{\int_{r_c}^{\infty}r^6n_r(r)dr}{\int_0^{\infty}r^6n_r(r)dr}\right]\left[\frac{\int_{r_c}^{\infty}r^3n_r(r)dr}{\int_0^{\infty}r^3n_r(r)dr}\right],\qquad(7)$$

其中，r_c是自动转换函数的临界半径，$n_r(r)$是单位体积单位半径范围内的云雾滴个数（Liu et al., 2004）。

$$r_c\approx4.09\times10^{-4}\beta_{con}^{1/6}\frac{n^{1/6}}{\mathrm{LWC}^{1/3}},\qquad(8)$$

其中，n 为云滴谱数浓度，$\beta_{\mathrm{con}}=1.15\times10^{23}$是经验常数。$T$的取值范围为 0～1，$T$越大，碰并越强。通过计算发现，此次雾过程即使是在成熟阶段T仍非常小，最大仅为 0.05，这定量说明了碰并过程的影响很小。

5　其它雾中的夹卷混合机制

除了以上分析的个例，在 2006 年和 2007 年冬季雾的综合观测试验中观测到了多次其它雾过程。本节将分析这些雾过程中的夹卷混合机制，并与第 4 节分析的个例进行比较。表 2 为 9 个典型雾过程的形成时间、消散时间和持续时间。这些雾过程有较为明显的日变化特征，一般在日落前后至午夜形成，正午前后消散（刘端阳等, 2009; 刘端阳, 2011）。第 4 节分析的个例为表 2 中的第 2 个个例。

与第 4 节一样，我们将其它个例的雾过程分为雾增强阶段、成熟阶段和消散阶段。图 6 中蓝色、红色、黑色的点和线分别表示这 3 个阶段的数据点和线性拟合线。由图 6 可知，在这 9 次雾过程中，大部分个例的体积平均半径和含水量之间呈正相关关系（Niu et al., 2010a; Lu et al., 2013c），根据前面提到的均匀/非均匀夹卷混合模型，大部分个例

表 2　2006 年和 2007 年 9 次浓雾过程

Table 2　Nine dense fog cases in 2006 and 2007

序号	雾过程	形成时间	消散时间	持续时间
1	2006年12月24～27日	22:08	14:14	64 h 6 min
2	20071年2月10～11日	22:31	12:30	14 h
3	2007年12月13～14日	21:55	11:20	13 h 25 min
4	2007年12月14～15日	20:51	11:46	14 h 55 min
5	2007年12月18日	02:28	11:11	8 h 43 min
6	2007年12月18～19日	16:07	12:28	20 h 21 min
7	2007年12月19～20日	16:37	16:11	23 h 34 min
8	2007年12月20～21日	17:48	19:06	25 h 18 min
9	2007年12月23日	01:17	05:28	4 h 11 min

以均匀夹卷混合为主。只有个例 2 除了正相关，在成熟阶段表现出了体积平均半径不变而含水量减小的关系（即线性拟合线接近水平）。这也是第 4 节对个例 2 进行详细分析的原因。

6　结论与展望

前人对夹卷混合过程的研究主要集中在云，而对雾中的夹卷混合过程研究很少，为了弥补该不足，本文利用 2006 年和 2007 年南京冬季雾的观测资料，分析得出体积平均半径和含水量之间主要呈正相关关系，夹卷混合机制主要为均匀夹卷混合。并对

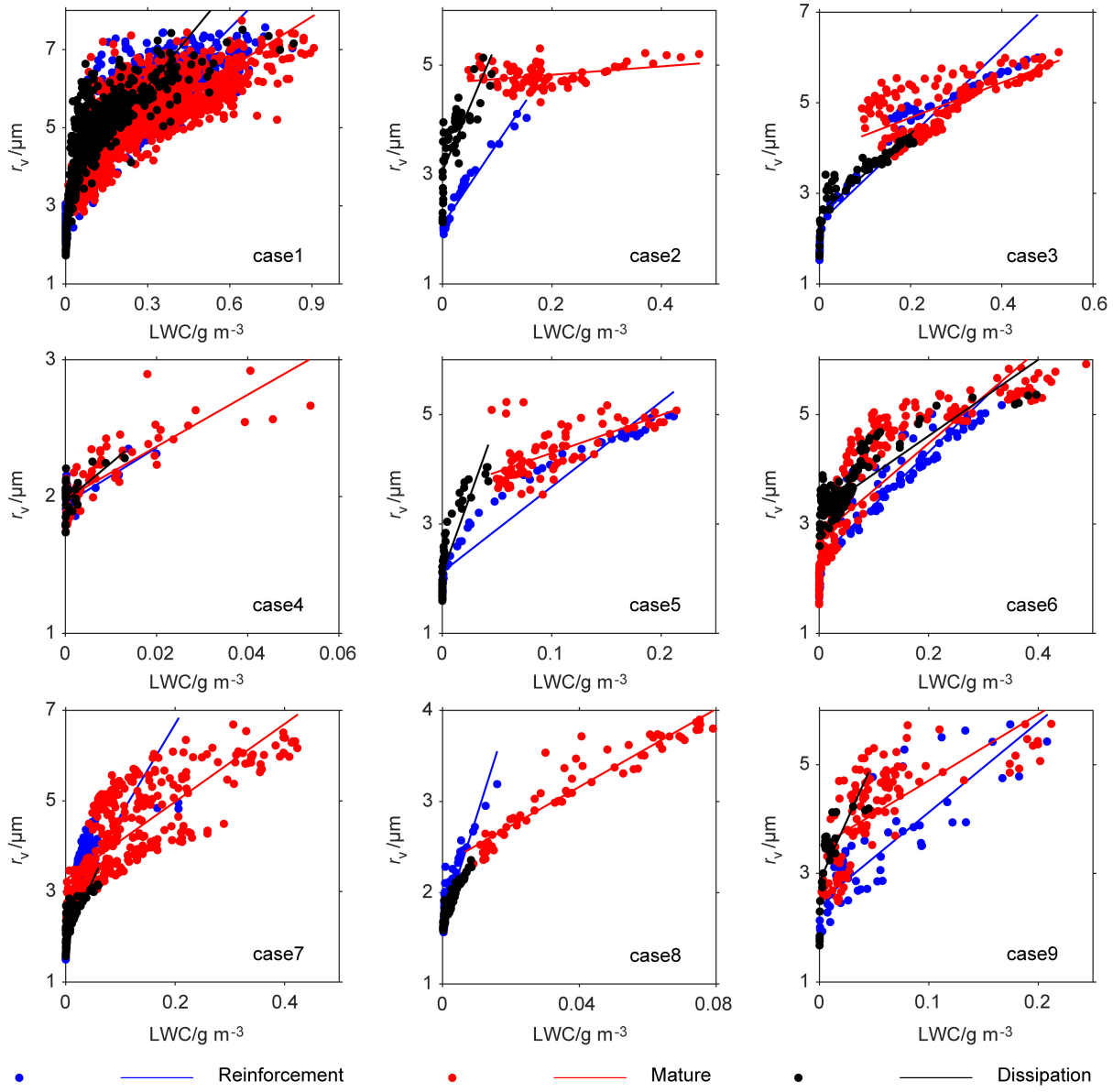

图 6　2006 年和 2007 年 9 次浓雾过程中不同阶段体积平均半径（r_v）与含水量（LWC）之间的相关关系

Fig. 6　Correlations between the volume-mean radius (r_v) and liquid water content (LWC) during different phases in nine dense fog cases in 2006 and 2007

2007 年 12 月 10 日 22:31 至 11 日 12:30 一次辐射雾过程不同阶段微物理量的变化、夹卷混合机制和其他微物理过程进行了深入分析，得出以下结论：

在辐射雾从形成到消散的整个过程中，数浓度、含水量、体积平均半径这 3 个微物理参量两两之间主要呈正相关关系。但在不同阶段，微物理参量之间的相关关系会发生变化，随着雾的发展由正相关转为不相关再回到正相关。

在爆发性增强阶段，体积平均半径、数浓度和含水量两两呈正相关关系，说明该阶段核化和凝结是主要的微物理过程。成熟阶段数浓度和含水量同时减小，而体积平均半径却基本保持不变。动力方面，过渡尺度数较小，这与较小的湍流耗散率和非常高的相对湿度有关，因此成熟阶段的夹卷混合机制主要为极端非均匀夹卷混合，稀释也可能起了很大作用。快速消散阶段各微物理参量同时减小，互为正相关关系，同时耗散率和过渡尺度数较大，因此快速消散阶段的夹卷混合机制主要为均匀夹卷混合。此外，通过体积平均半径和含水量的相关关系和自动转换阈值函数可知碰并过程非常弱，并不是重要的物理过程。

本文利用雾的外场观测数据对地面雾中的夹卷混合过程进行了分析和讨论，但是，考虑到夹卷过程始于雾顶，分析雾中不同高度的夹卷混合机制是非常重要的研究课题。此外，对雾进行外场观测和理论研究的最终目的是提高雾预报的准确性。所以，如何把夹卷混合过程与雾的数值模式相结合以优化雾的模拟预报，将是值得研究的重要方向。

致谢　本文所用观测资料来自南京信息工程大学牛生杰教授与其团队于 2006～2009 年在南京开展的冬季雾外场综合观测试验。感谢牛生杰教授及其项目组所有成员的付出！

参考文献（References）

Baker M B, Latham J. 1979. The evolution of droplet spectra and the rate of production of embryonic raindrops in small cumulus clouds [J]. J. Atmos. Sci., 36(8): 1612−1615. doi:10.1175/1520-0469(1979)036<1612:teodsa>2.0.co;2

Baker M B, Corbin R G, Latham J. 1980. The influence of entrainment on the evolution of cloud droplet spectra: I. A model of inhomogeneous mixing [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106(449): 581−598. doi:10.1002/qj.49710644914

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 Bingquan. 1995. Study on physicochemical properties of urban fog Shanghai [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 18(1): 114−118.

Burnet F, Brenguier J L. 2007. Observational study of the entrainment-mixing process in warm convective clouds [J]. J. Atmos. Sci., 64(6): 1995−2011. doi:10.1175/jas3928.1

Champagne F H, Friehe C A, Larue J C, et al. 1977. Flux measurements, flux estimation techniques, and fine-scale turbulence measurements in the unstable surface layer over land [J]. J. Atmos. Sci., 34(3): 515−530. doi:10.1175/1520-0469(1977)034<0515:fmfeta>2.0.co;2

Chosson F, Brenguier J L, Schüller L. 2007. Entrainment-mixing and radiative transfer simulation in boundary layer clouds [J]. J. Atmos. Sci., 64(7): 2670−2682. doi:10.1175/jas3975.1

Collett J L, Sherman D E, Moore K F, et al. 2001. Aerosol particle processing and removal by fogs: Observations in chemically heterogeneous central California radiation fogs [J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 1(5–6): 303−312. doi:10.1023/A:1013175709931

Cooper W A, Lasher-Trapp S G, Blyth A M. 2013. The influence of entrainment and mixing on the initial formation of rain in a warm cumulus cloud [J]. J. Atmos. Sci., 70(6): 1727−1743. doi:10.1175/jas-d-12-0128.1

Freud E, Rosenfeld D, Kulkarni J R. 2011. Resolving both entrainment-mixing and number of activated CCN in deep convective clouds [J]. Atmos. Chem. Phys., 11(24): 12887−12900. doi:10.5194/acp-11-12887-2011

Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al. 1992. The po valley fog experiment 1989 [J]. Tellus B, 44(5): 448−468. doi:10.3402/tellusb.v44i5.15561

Fuzzi S, Laj P, Ricci L, et al. 1998. Overview of the Po valley fog experiment 1994 (CHEMDROP) [J]. Contrib. Atmos. Phys., 71(1): 3−19.

Gao S N, Lu C S, Liu Y G, et al. 2020. Contrasting scale dependence of entrainment-mixing mechanisms in stratocumulus clouds [J]. Geophys. Res. Lett., 47(9): e2020GL086970. doi:10.1029/2020gl086970

Gerber H E, Frick G M, Jensen J B, et al. 2008. Entrainment, mixing, and microphysics in trade-wind cumulus [J]. J. Meteor. Soc. Japan., 86A: 87−106. doi:10.2151/jmsj.86a.87

Gerber H, Frick G, Malinowski S P, et al. 2013. Entrainment rates and microphysics in POST stratocumulus [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118(21): 12094−12109. doi:10.1002/jgrd.50878

Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure Appl. Geophys., 164(6-7): 1121−1159. doi:10.1007/s00024-007-0211-x

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

郭恩铭, 俞香仁, 李炎辉, 等. 1989. 双流机场雾宏、微观结构研究 [C]//全国云物理和人工影响天气会议文集. 北京: 气象出版社, 35–38.　Guo Enming, Yu Xiangren, Li Yanhui, et al. 1989. Study

of macro-and micro-physical structure of Shuangliu Airport[C]// National Conference on Cloud Physics and Weather Modification (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 35–38.

Guo L J, Guo X L, Fang C G, et al. 2015. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China [J]. Science China Earth Sciences, 58(3): 329−344. doi:10.1007/s11430-014-4924-2

Haeffelin M, Bergot T, Elias T, et al. 2010. Parisfog: Shedding new light on fog physical processes [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91(6): 767−783. doi:10.1175/2009bams2671.1

Hoffmann F, Feingold G. 2019. Entrainment and mixing in stratocumulus: Effects of a new explicit subgrid-scale scheme for large-eddy simulations with particle-based microphysics [J]. J. Atmos. Sci., 76(7): 1955−1973. doi:10.1175/jas-d-18-0318.1

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. Hu Zhaoxia, Lei Hengchi, Dong Jianxi, et al. 2011. Characteristic analysis and numerical simulation of a regional warm fog event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(1): 71−84. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.01.07

黄玉生, 许文荣, 李子华, 等. 1992. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究 [J]. 气象学报, 50(1): 112−117. Huang Yusheng, Xu Wenrong, Li Zihua, et al. 1992. An observation and analysis on the radiation fog in Xishuangbanna [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 50(1): 112−117. doi:10.11676/qxxb1992.013

Jeffery C A. 2007. Inhomogeneous cloud evaporation, invariance, and Damkö hler number [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 112(D24): D24S21. doi:10.1029/2007jd008789

Jensen J B, Austin P H, Baker M B, et al. 1985. Turbulent mixing, spectral evolution and dynamics in a warm cumulus cloud [J]. J. Atmos. Sci., 42(2): 173−192. doi:10.1175/1520-0469(1985)042<0173:tmsead>2.0.co;2

Jia X C, Quan J N, Zheng Z Y, et al. 2019. Impacts of anthropogenic aerosols on fog in North China Plain [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 124(1): 252−265. doi:10.1029/2018jd029437

Kim B G, Miller M A, Schwartz S E, et al. 2008. The role of adiabaticity in the aerosol first indirect effect [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 113(D5): D05210. doi:10.1029/2007jd008961

Krueger S K. 1993. Linear eddy modeling of entrainment and mixing in stratus clouds [J]. J. Atmos. Sci., 50(18): 3078−3090. doi:10.1175/1520-0469(1993)050<3078:lemoea>2.0.co;2

Kumar B, Schumacher J, Shaw R A. 2013. Cloud microphysical effects of turbulent mixing and entrainment [J]. Theor. Comput. Fluid Dyn., 27(3-4): 361−376. doi:10.1007/s00162-012-0272-z

Kumar B, Gö tzfried P, Suresh N, et al. 2018. Scale dependence of cloud microphysical response to turbulent entrainment and mixing [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10(11): 2777−2785. doi:10.1029/2018ms001487

Latham J, Reed R L. 1977. Laboratory studies of the effects of mixing on the evolution of cloud droplet spectra [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 103(436): 297−306. doi:10.1002/qj.49710343607

Lehmann K, Siebert H, Shaw R A. 2009. Homogeneous and inhomogeneous mixing in cumulus clouds: Dependence on local turbulence structure [J]. J. Atmos. Sci., 66(12): 3641−3659. doi:10.1175/2009jas3012.1

李子华, 彭中贵. 1994. 重庆市冬季雾的物理化学特性 [J]. 气象学报, 52(4): 477−483. Li Zihua, Peng Zhonggui. 1994. Physical and chemical characteristics of the Chongqing winter fog [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 52(4): 477−483. doi:10.11676/qxxb1994.058

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 Zihua, Liu Duanyang, Yang Jun. 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

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. Li Zihua, Huang Jianping, Zhou Yuquan, et al. 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 57(5): 622−631. doi:10.11676/qxxb1999.060

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, 1–14. Li Zihua, Yang Jun, Shi Chune, et al. 2008. The Physics of Regional Dense Fog (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–14.

Li Z H, Liu D Y, Yan W L, et al. 2019. Dense fog burst reinforcement over Eastern China: A review [J]. Atmos. Res., 230: 104639. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104639

刘端阳. 2011. 南京冬季雾宏微观物理结构的观测研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Liu Duanyang. 2011. Observational study on the winter fog macro-micro-physical structures in Nanjing[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

Liu Y G, Daum P H, McGraw R. 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

刘树华, 刘和平, 李洁, 等. 2005. 在 ebex-2000 实验资料中湍流耗散率、长度尺度和结构参数特征 [J]. 大气科学, 29(3): 475−481. Liu Shuhua, Liu Heping, Li Jie, et al. 2005. Characteristics of turbulence dissipation rates, characteristic length scales and structure parameters in EBEX-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(3): 475−481. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.15

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

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. Li 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, 67(1): 147−157. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.01.015

Liu D Y, Yang J, Niu S J, et al. 2011. On the evolution and structure of a radiation fog event in nanjing [J]. Adv. Atmos. Sci., 28(1): 223−237. doi:10.1007/s00376-010-0017-0

Liu D Y, Niu S J, Yang J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern nanjing, part 1: Fog boundary layer [J]. Pure Appl. Geophys., 169(5-6): 809−819. doi:10.1007/s00024-011-0343-x

陆春松. 2013. 雾和低云主要宏微观物理过程的研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Lu Chunsong. 2013. Investigation of main macro and micro physical processes in fogs and low-level clouds[D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

Lu C S, Liu Y G, Niu S J. 2011. Examination of turbulent entrainment-mixing mechanisms using a combined approach [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 116(D20): D20207. doi:10.1029/2011jd015944

Lu C S, Liu Y G, Niu S J. 2013. A method for distinguishing and linking turbulent entrainment mixing and collision-coalescence in stratocumulus clouds [J]. Chin. Sci. Bull., 58(4-5): 545−551. doi:10.1007/s11434-012-5556-6

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 Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, 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

陆春松, 牛生杰, 岳平, 等. 2011. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析 [J]. 大气科学学报, 34(1): 58−65. Lu Chunsong, Niu Shengjie, Yue Ping, et al. 2011. Observational research on boundary layer structure during high incidence period of winter fog in Nanjing [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(1): 58−65. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.01.008

Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2013. Exploring parameterization for turbulent entrainment-mixing processes in clouds [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118(1): 185−194. doi:10.1029/2012jd018464

Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2013. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs [J]. Acta Meteor. Sinica, 27(6): 832−848. doi:10.1007/s13351-013-0610-0

Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2014. Scale dependence of entrainment-mixing mechanisms in cumulus clouds [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119(24): 13877−13890. doi:10.1002/2014jd022265

Lu C S, Liu Y G, Niu S J, et al. 2018. Broadening of cloud droplet size distributions and warm rain initiation associated with turbulence: An overview [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 11(2): 123−135. doi:10.1080/16742834.2018.1410057

Lu C S, Liu Y G, Zhu B, et al. 2018. On which microphysical time scales to use in studies of entrainment-mixing mechanisms in clouds [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 123(7): 3740−3756. doi:10.1002/2017jd027985

Luo S, Lu C S, Liu Y G, et al. 2020. Parameterizations of entrainment-mixing mechanisms and their effects on cloud droplet spectral width based on numerical simulations [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 125(22): e2020JD032972. doi:10.1029/2020jd032972

Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al. 2010. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(6): 1259−1275. doi:10.1007/s00376-010-8192-6

Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview [J]. Adv. Atmos. Sci., 27(3): 639−662. doi:10.1007/s00376-009-8174-8

Niu S J, Liu D Y, Zhao L J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern nanjing. Part II: Fog microphysics [J]. Pure Appl. Geophys., 169(5-6): 1137−1155. doi:10.1007/s00024-011-0344-9

Pilié R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. 1975. The life cycle of valley fog. Part I: Micrometeorological characteristics [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 14(3): 347−363. doi:10.1175/1520-0450(1975)014<0347:tlcovf>2.0.co;2

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

Stommel H. 1947. Entrainment of air into a cumulus cloud [J]. J. Atmos. Sci., 4(3): 91−94. doi:10.1175/1520-0469(1947)004<0091:eoaiac>2.0.co;2

Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Springer, 312–318. doi:10.1007/978-94-009-3027-8

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

Telford J W. 1996. Clouds with turbulence; the role of entrainment [J]. Atmos. Res., 40(2-4): 261−282. doi:10.1016/0169-8095(95)00038-0

Telford J W, Chai S K. 1993. Marine fog and its dissipation over warm water [J]. J. Atmos. Sci., 50(19): 3336−3349. doi:10.1175/1520-0469(1993)050<3336:mfaido>2.0.co;2

王介民, 刘晓虎, 祁永强. 1990. 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究 [J]. 高原气象, 9(2): 120−129. Wang Jiemin, Liu Xiaohu, Qi Yongqiang. 1990. A preliminary study of turbulence transfer characteristics in gobi area with an eddy correlation technique [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 9(2): 120−129.

Wang J, Daum P H, Yum S S, et al. 2009. Observations of marine stratocumulus microphysics and implications for processes controlling droplet spectra: Results from the marine stratus/stratocumulus experiment [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 114(D18): D18210. doi:10.1029/2008jd011035

Warner J. 1973. The microstructure of cumulus cloud: Part IV. The effect on the droplet spectrum of mixing between cloud and environment [J]. J. Atmos. Sci., 30(2): 256−261. doi:10.1175/1520-0469(1973)030<0256:tmoccp>2.0.co;2

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 Dui, Deng Xuejiao, Mao Jietai, 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:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.03.009

Yang Y, Gao S H. 2020. The impact of turbulent diffusion driven by fog-top cooling on sea fog development [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 125(4): e2019JD031562. doi:10.1029/2019jd031562

Yum S S. 1998. Cloud droplet spectral broadening in warm clouds: An observational and model study [D]. Ph. D. dissertation, University of Nevada, 191pp.

Yum S S, Wang J, Liu Y G, et al. 2015. Cloud microphysical relationships and their implication on entrainment and mixing mechanism for the stratocumulus clouds measured during the vocals project [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 120(10): 5047−5069. doi:10.1002/2014jd022802

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 23–25. China Meteorological Administration.2003. Specifications for Surface Meteorological Observation (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 23–25.