

江西地区层状暖云微物理结构特征及云雨自动转化阈值函数的研究

靳雨晨¹ 牛生杰^{1,2} 吕晶晶^{1,3} 王元¹ 谢勇⁴ 林文⁵

1 南京信息工程大学大气物理学院, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 南京工业大学安全科学与工程学院, 南京 210009

3 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

4 江西省人工影响天气领导小组办公室, 南昌 330006

5 福建省灾害天气重点实验室, 福州 350003

摘要 本文利用机载云粒子探测设备对 2014 年 11 月 06 日-12 月 25 日期间在江西地区探测获得的七次暖云飞行个例资料, 详细分析降水云和非降水云的微物理结构特征。云雨自动转化阈值函数 (T) 是描述云内碰并强度的重要微物理参量。我们发现 T 值在云内分布呈现云底较小, 随着云内高度的增加 T 值逐渐增大, 并且在云中部和上部达到最大值; 研究还发现降水云的 T 值在 0.6 以上的频率远大于非降水云, 表明降水云中的碰并过程更强, 云滴更易通过凝结和碰并过程形成雨滴, 符合暖云降水机制。降水云中云滴谱相对离散度 (ε) 和云滴数浓度 (N_c) 的负相关程度较非降水云更为显著, 随着 T 的增大, 二者的负相关程度增强; 相比于云滴平均半径 (r_a) 的变化, 云滴谱标准差 (σ) 的变化主导 ε - N_c 负相关程度的增强。

关键词 层状暖云 微物理参量 云雨自动转化阈值函数

稿件编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Study on the microphysical structure characteristics and cloud-rain

autoconversion threshold function of stratiform warm clouds in

Jiangxi

Jin yuchen¹ Niu shengjie^{1,2} Lv jingjing^{1,3} Wang yuan¹ Xie yong⁴ Lin wen⁵

1 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Collaborative Innovation Center Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044

2 College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009

3 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing 210044

4 Jiangxi Weather Modification Office, Nanchang 330096

5 Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350003

收稿日期 2021-2-26; **网络预出版日期**

作者简介 靳雨晨, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事云雾降水物理学研究。E-mail: jinyuchenxiaoyu@163.com

通讯作者 牛生杰, E-mail: niushengjie@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划 2018YFC1507905, 国家自然科学基金资助项目 41775134、41822504、41675136, 江苏省研究生科研创新计划资助项目 KYCX20_0920

Funded by National Key Research and Development Program (Grant 2018YFC1507905), National Natural Science Foundation of China (Grants 41775134, 41822504, 41675136), Innovative Project of Postgraduates in Jiangsu Province (KYCX20_0920)

Abstract This study analyzes the microphysical properties of precipitating and non-precipitating warm clouds based on seven-flight cloud measurements from November 6 to December 25, 2014, in JiangXi Province, China. The autoconversion threshold function (T) represents the probability that the collision-coalescence process occurs in clouds, which is critical to determine the initial time and intensity of the precipitation. We found that, in general, the T increases with height above the cloud base, with the maximum value occurring in the middle and upper parts of clouds. The occurrence frequency with $T > 0.6$ in the precipitating clouds is larger than that in the non-precipitating clouds, indicating a stronger collision-coalescence process and a greater probability of raindrops generated by the condensation and collision-coalescence processes in the precipitating clouds. There is a negative relationship between the relative dispersion of cloud droplet size distribution (ε) and the number concentration of cloud droplet (N_c); meanwhile, the negative relationship becomes more evident with the increasing T . Compared with the average radius of cloud droplet (r_a), the standard deviation of cloud droplet size distribution (σ) dominates the enhancement of the degree of the negative relationship between ε - N_c .

Keywords Stratiform warm clouds; Microphysical parameters; Cloud-Rain autoconversion threshold function.

1 引言

云的微物理结构决定着它是否可产生降水,是研究讨论云降水物理过程的基础。目前对于云微物理特征以及云雨转化过程准确的定量化描述仍然十分稀缺。卫星和雷达等对云的遥感探测(周后福等, 2017; 黄兴友等, 2019)、数值模式对云的模拟(唐洁等, 2018; 胡嘉纓等, 2019; 黄钰等, 2020)都是研究云的有效手段。但与这些手段相比,通过载有云微物理探测仪器的飞机在云中进行飞行探测是获取云微物理资料的最直接最重要的手段(王元等, 2017; Zhao et al., 2018)。利用飞机的观测结果,详细分析云内的微物理结构特征,可对尚未完全掌握机理的云物理过程建立参数化,并可将飞机观测结果与遥感探测结果以及模式模拟结果相对比,从而改进提高遥感探测的准确性并减少模拟结果的不确定性。

云雨自动转化过程一般是指云滴碰并形成小雨滴的过程,它决定着降水的开

始时间并影响降水总量。对于云雨自动转化过程的研究有助于提高我们对云的宏观性质以及云和气溶胶气候效应的科学认识。但是对于云雨自动转化阈值函数 (T) 的关注比较少, 在许多微物理参数化方案中, 云水向雨水自动转化的阈值常常设置为定值, 这会增加模式对云降水能力预估的偏差。云雨自动转化阈值函数 T 是衡量云雨自动转化的重要参数, 其数值的大小间接表示了云中碰并过程的强弱程度 (Liu et al., 2005, 2006)。根据 T 的定义方式, 现有的自动转换参数可分为 Kessler-type 和 Sundqvist-type。Kessler(1969)假设自动转换过程表现出一种由 Heaviside 阶跃函数描述的阈值行为, $T_k=H(LWC-L_c)$, 其中 $H(LWC-L_c)$ 是表示当液水含量 (LWC) 小于液水含量阈值 (L_c) 时没有自动转换的 Heaviside 阶跃函数。后来, Kessler-type 参数化 (Liou and Ou, 1989; Baker, 1993; Liu et al., 2004) 将 LWC 替换为云滴半径 (r), $T_k=H(r_m-r_c)$ 中, r_m 和 r_c 分别表示驱动半径和临界半径。Sundqvist(1978)提出了另一个阈值函数 $T_s=1-\exp[-(LWC/L_c)^2]$ 。Del Genio et al.(1996)引入了稍微不同的阈值函数 $T_s=1-\exp[-(LWC/L_c)^4]$ 。然而, 这些阈值函数都缺乏物理基础 (Liu et al., 2005)。直到 McGraw and Liu (2003) 提出了 kinetic potential 理论才为把自动转换过程看作一个阈值过程提供了物理基础。Liu et al. (2004) 根据 kinetic potential 理论, 将 r_c 与云内液水含量 (LWC) 和云滴数浓度 (N_c) 联系起来, r_c 才被用于模式研究。Liu et al. (2005) 推导出了无需指定驱动半径 (r_m) 和临界半径 (r_c), 并且具有物理解释的新型云雨转化阈值函数 (T_{new})。本文利用飞机探测资料计算 T_{new} (下文简写为 T), 详细分析云雨自动转化过程。

云滴谱离散度 (ϵ) 定义为云滴谱标准差 (σ) 与云滴平均半径 (r_a) 的比值, 是描述云滴谱型分布的重要参数。许多学者关注离散度的变化, 并且发现离散度的变化相当复杂, 因为它取决于多种因素, 包括气溶胶物理化学性质及活化过程 (Ma et al., 2010; Wang et al., 2011; Wang et al., 2019)、云的发展阶段、大气温度、湿度、夹卷 (Lu et al., 2013) 和湍流 (Kumar et al., 2017) 等。朱磊等 (2020) 发现绝热云中垂直速度占主导, 垂直速度增大会促进云凝结核的活化使云滴数浓度增大, 促进云滴的凝结增长使云滴尺度增大、云滴谱宽度减小。Wang et al. (2019) 研究华北地区层状云观测资料发现随着气溶胶数浓度 (N_a) 的增加, 云滴谱离散度先增大后减小; 在凝结增长初期, 云滴谱观测到“凝结拓宽”现象, 这与最新的气块模型的模拟结果相近 (Chen et al., 2016, 2018)。

云滴谱离散度也是云雨自动转化过程参数化中不可忽视的重要参数,从而进一步影响暖云降水的发生和地面降水量的高低 (Liu et al., 2005, 2006)。以往的研究结果表明,云雨的自动转化率与云滴谱离散度有着很强的依赖关系(解小宁, 2015),云滴谱离散度通过改变云雨自动转化率,进而改变地表降水,影响气溶胶-云-降水的相互作用。Xie and Liu (2011) 研究发现当 ε - T 为负相关且 N_a 较高时,通过小的 ε 抑制云雨自动转化过程,使地面累积降水量减少。由于云内可以同时发生核化、凝结、碰并、蒸发以及夹卷混合等多种微物理过程, ε 与 N_c 之间的相关性关系存在很大的不确定性。近十几年来观测资料分析显示,云滴谱的相对离散度既有随 N_c 增加而增加的 (Martin et al., 1994),也有随 N_c 增加而减少的 (Lu and Seinfeld, 2006),还有观测研究表明云滴谱相对离散度随着 N_c 的增加呈收敛趋势 (Zhao et al., 2006),不同的观测地区与实验方法可以得到不同的结论。同时 Liu and Daum (2002) 考虑离散度效应时发现,当 N_c 增加 15% (当 $N_c=100\text{cm}^{-3}$) 时,辐射冷却效应仅为气溶胶第一间接效应的 10-80%。 ε 的增加会影响气溶胶间接效应的评估,充分了解 ε 和 N_c 之间的关系有助于减少这种影响中固有的不确定性。

云滴谱离散度通过改变云雨自动转化过程,进而影响气溶胶-云-降水的相互作用 (解小宁等, 2015)。准确的云雨转化过程的参数化有助于提高我们对云的宏观、微观性质以及气溶胶气候效应的科学认识。目前国内对于利用飞机观测资料计算云雨自动转化阈值的研究较少,且我国飞机云微物理观测以北方居多,本文研究可以更好地了解华东地区云微物理结构和云雨转化过程。本文利用飞机观测资料,详细分析江西地区层状暖云的微物理结构特征,并且通过对江西地区的层状暖云 T 值的计算,讨论云雨自动转化过程对微物理量的影响。

2 观测资料与数据处理

2.1 探测仪器

2014 年 11 月 6 日至 12 月 25 日,使用搭载全套气溶胶-云-降水探头的“运-12”机载观测平台,对江西省上空云区进行探测,探测设备来自美国 DMT (Droplet Measurement Technologies) 公司。云、气溶胶和降水粒子组合探头 (CAPS) 是二维云粒子图像探头 (CIP) 和云-气溶胶探头 (CAS) 的结合。其中 CIP 测量直径 25~1550 μm 的云和降水粒子,共包含 62 档,档宽 25 μm 。CAS 测量直径 0.51~50 μm 的气溶胶和云粒子,共 30 档,档宽不定。AIMMS-20 探头可精确提

供温度、相对湿度、三维风的观测数据其内嵌的 GPS 惯性子系统可提供飞行时间、位置、速度以及飞机姿态信息。上述探头的探测频率均为 1Hz。为保证观测资料准确可用，在飞行观测前对各台仪器均进行了校正，数据处理时剔除观测资料的异常值以确保数据的准确性。

2.2 飞行概况及天气背景

飞机观测区域位于江西省赣州市及周边县市（25.40°~26.45°N，114.51°~116.02°E）上空。江西省赣州市位于中国华东江西省南部，地处赣江上游，处于东南沿海地区向中部内地延伸的过渡地带，群山环绕，断陷盆地贯穿于赣州市，以山地、丘陵、盆地为主，地处中亚热带南缘属亚热带季风气候区。如表 1 所示，飞机探测时间基本为上午或中午，航行 1~3.5h 后返回，最大飞行高度 4700m 左右。本文所分析的七个架次云探测过程的温度均高于 0℃，且根据飞行轨迹，探测到的云区的最大水平范围均大于 50km，因而均为层状暖云。此外，本文所分析的云区均未受到催化作业影响。

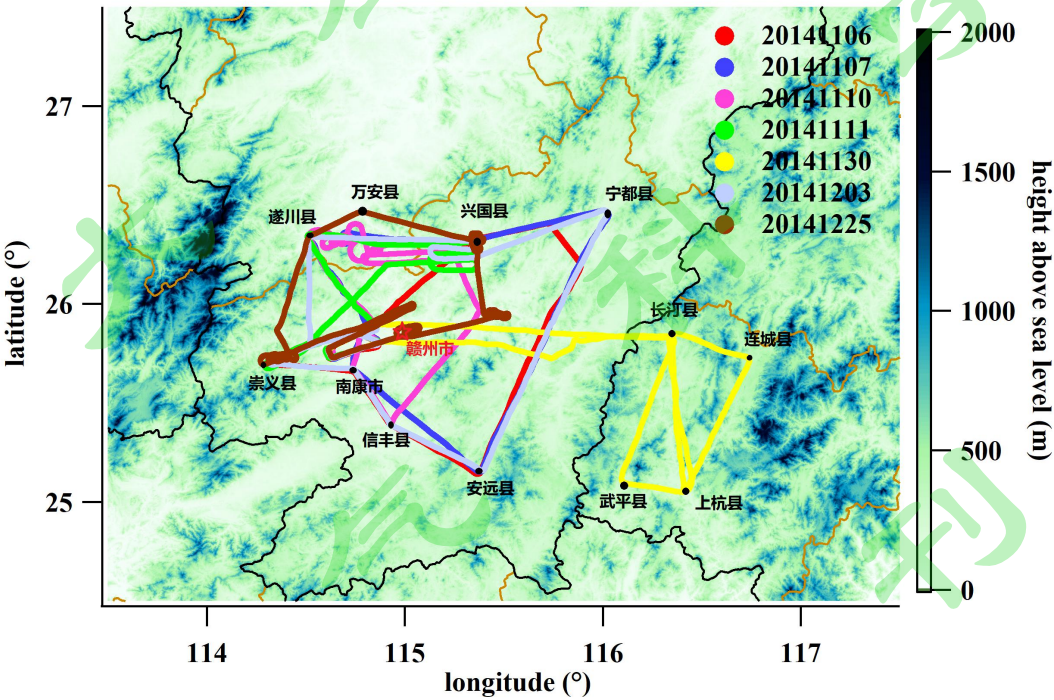


图 1 飞机探测飞行轨迹和地形图
Fig. 1 Flight trajectories and the topographic map

表 1 飞行探测概况
Tab. 1 General situation of flight detection

架次	日期	飞行时间	最大飞行高度 (m)	天气形势	降水* (mm/h)
F1	2014-11-06	13:40-16:10	3179	高空低槽东移 中层位于西南急流带, 急流较弱	0.0
F2	2014-11-07	09:55-12:45	4471	高空低槽东移, 位于西南急流带, 水汽条件较好	2.6
F3	2014-11-10	09:35-12:25	4461	高空低槽东移 中层位于西南急流带, 急流较弱	0.0
F4	2014-11-11	09:48-12:03	3808	高空低槽东移 中层位于西南急流带	0.1
F5	2014-11-30	12:54-16:25	4783	高空低槽东移, 冷空气南下	0.0
F6	2014-12-03	09:35-12:55	4410	高空低槽东移 中层位于西南急流带	0.4
F7	2014-12-25	09:29-12:45	4126	高空低槽东移 中层位于西南急流带, 急流较弱	0.0

*降水量为飞机观测期间赣州机场附近地面气象观测站的 6 小时雨量。

由于探测云区集中在赣州上空, 探测时间主要集中在 09-13 时, 并且云层主要集中在 2000-4500m 之间, 这个高度区间基本处于 700hPa, 对应天气图是切变发生和云存在区域; 选取 08 时 500hPa 天气形势叠加 700hPa 的风场进行分析, 如图 2 所示, 结果显示在 7 天层状暖云飞机探测期间在 500hPa 基本都位于南支槽前, 受到孟加拉湾水汽输送条件较好。700hPa 位于西南急流带, 急流带明显, 同时有大气上升运动, 产生降水。其中 7 次个例中 11 月 7 日急流带最为明显, 当天降水强度最大。其他个例槽线逐渐平直急流强度较弱, 降水减弱。

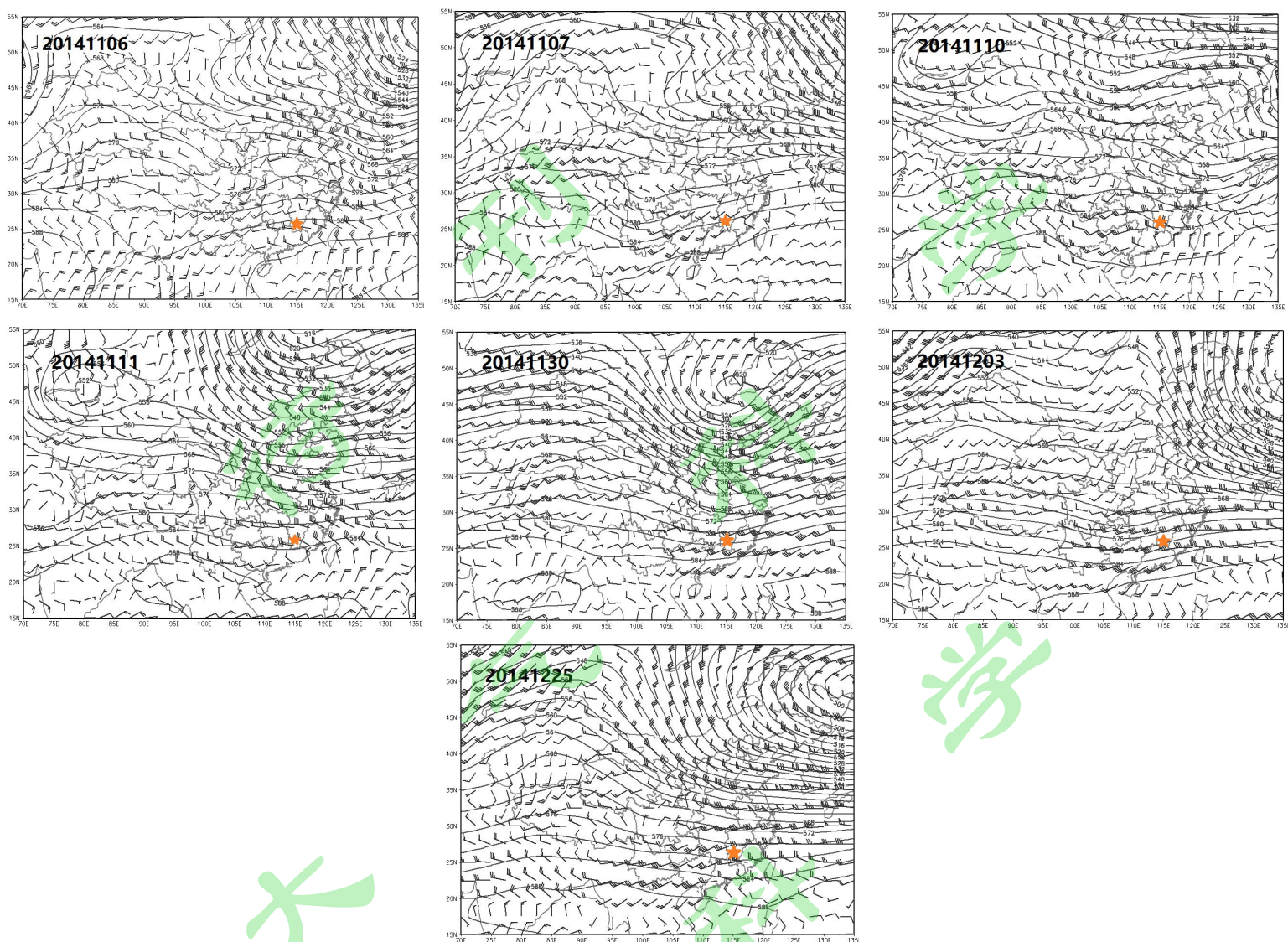


图2 2014年11月6日-12月25日08时500hPa天气图：叠加700hPa风场
Fig. 2 500hPa synoptic chart at 8AM 11/6/2014 – 12/25/2014: 700hPa wind field superimposed

2.3 分析方法

本文以云滴数浓度 (N_c) 大于 10 个/ cm^3 ，云内液水含量 (LWC) 大于 0.001 g/m^3 且连续 5 个记录满足该条件判定为云区，此标准可用于减小气溶胶对云滴样本的干扰。因在暖云中探测，探测粒子均为液滴，密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ，其中 LWC 是由 CAS 数据进行积分计算得到。本文研究江西赣州地区云的整体垂直分布特征，忽略云内水平不均匀性差异。本次观测的七次飞行中共筛选出 253 组穿云数据。图 3 显示了 2014 年 11 月 7 日的云识别示例。如图所示，在 $3.0\text{--}3.5$ 公里高度处，连续飞行的飞机高度为正方形的区域被归类为云区。本文从七次飞机观测中获得了云的特性进行研究。为了详细研究江西暖云降水过程，对本次飞机观测的所有云团进行降水云和非降水云的筛选。考虑到 CIP 探头对小于 $125\mu\text{m}$ 粒子探测结

果的不准确性，我们剔除 CIP 探头前四通道测量结果，以 CIP 探测到 $125\mu\text{m}$ 至 $1550\mu\text{m}$ 液滴的平均液水含量大于 0.005g/m^3 为阈值判定降水云，反之视为非降水云（Lu et al., 2012）。在本文使用的 253 组穿云数据中，共统计到 118 组降水云滴尺度分布和 135 组非降水云滴尺度分布。

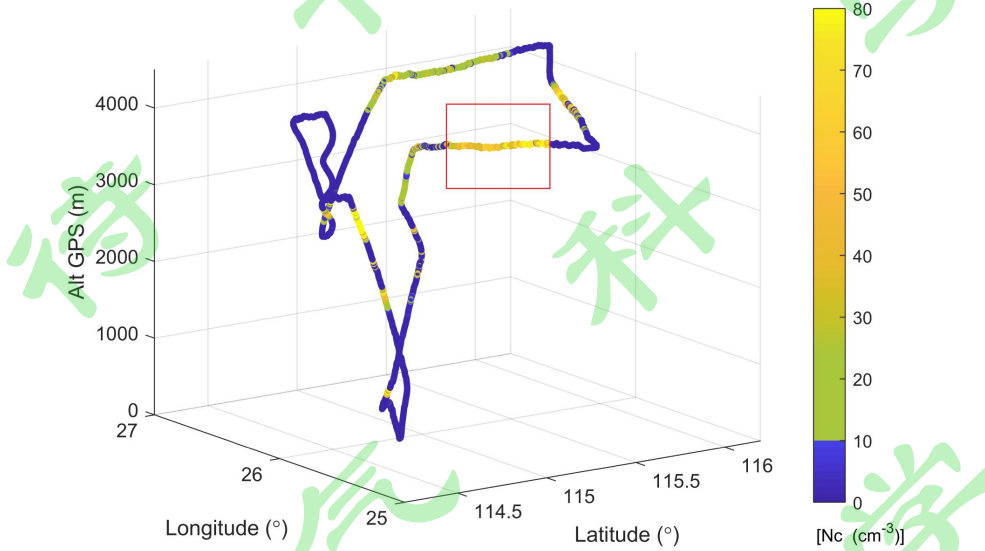


图 3 2014 年 11 月 7 日，F2 架次飞机飞行轨迹，颜色代表云滴数浓度 (N_c)

Fig. 3 F2 Flight Trace at 11/7/2014, color represents number concentration of cloud droplet (N_c)

3 云微物理参量垂直分布特征

3.1 云微物理参量垂直分布特征

将穿云数据按降水云和非降水云进行分类，并对云高进行了归一化处理。由图 4 可见，降水云与非降水云的微物理量均随高度变化明显。云滴数浓度 (N_c) 随高度呈现递减趋势，降水云 N_c 在垂直方向上的分布波动性更大，且在云中部以上高度降水云的 N_c 明显大于非降水云。图 4 (b) (e) 显示无论有无降水，云内液水含量 (LWC) 在接近地面的云底附近都较小；垂直方向上随高度先增后减，降水云在垂直方向分布范围更广并且峰值区多出现在上层云的顶部，量值远远大于非降水云。

图 4 (c) (f) 中显示两种云在云底附近存在大量小云滴，云滴平均直径 (D) 小值区都分布在云底附近，但降水云的 D 明显大于非降水云；垂直分布上非降水云和降水云都是在云下部随高度先增加后减少，当高度增加 D 峰值区基本都在云中上部附近，说明云中云滴尺度增大的区域主要集中在云中的中上部及顶

部。图 4 (a) (b) (c) 中可以看出, 非降水云中, N_c 与 D 的变化趋势相反, 而 LWC 与 D 的变化趋势相似, 在云的中部相对较大, 在云底和云顶处较小。降水云中, N_c 、 D 和 LWC 的变化趋势具有很好的一致性, 都表现为在云的中部相对较大, 在云底和云顶处较小, 大值区集中在云的中上部, 说明降水云中中上部云粒子对液态水的贡献在整层云中都比较。降水云与非降水云的 LWC 与 D 的变化趋势具有很好的一致性, 都随着高度逐渐增加, 其中, 降水云的 LWC 大于非降水云, 说明上升气流起到明显作用, 与非降水云相比降水云发展更为旺盛。

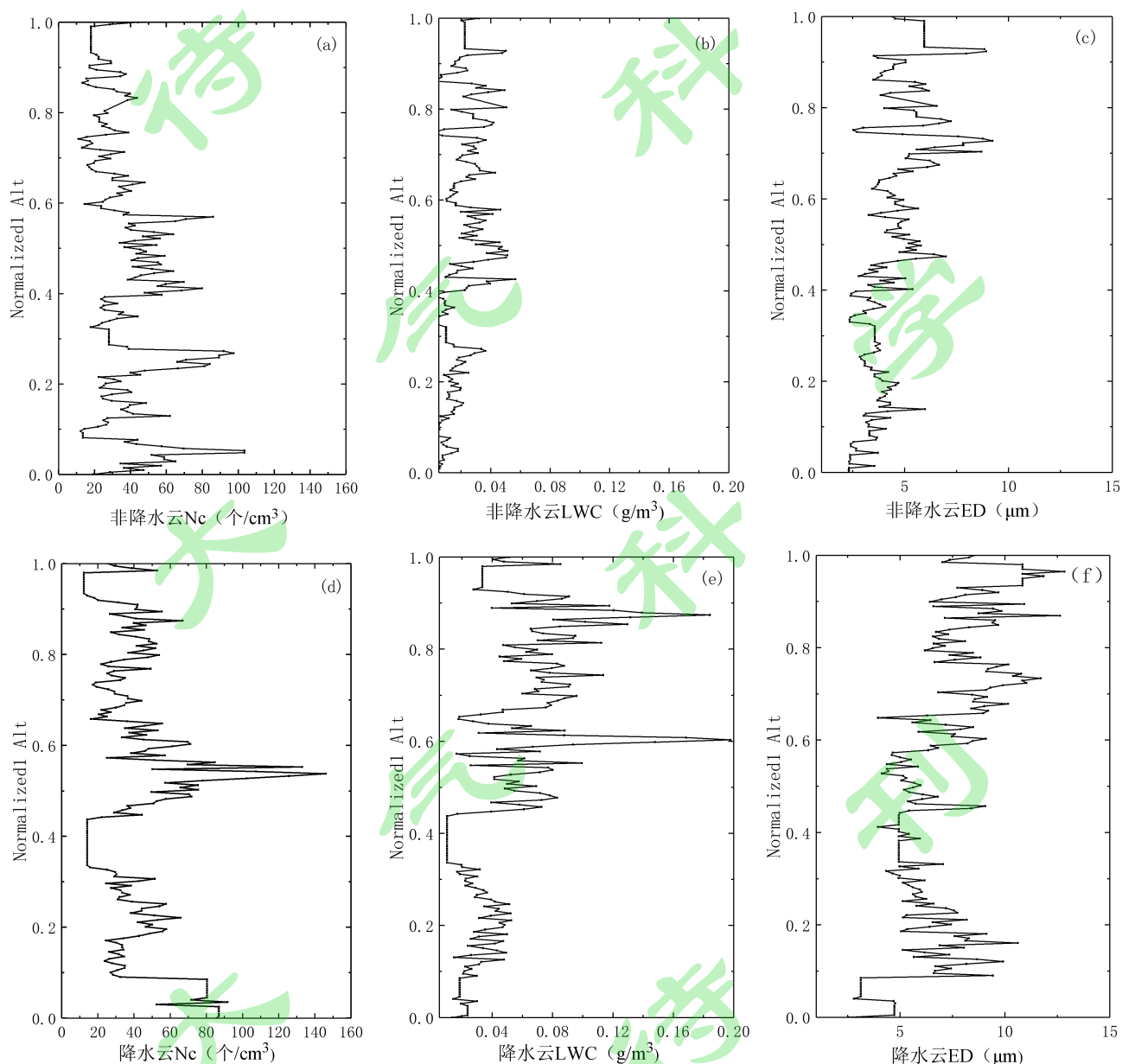


图 4 云中云滴数浓度 (N_c)、液态含水量 (LWC)、云滴平均直径 (D) 的垂直分布特征: (a-c) 表示非降水云, (d-f) 表示降水云

Fig. 4 Vertical distribution characteristics of number concentration of cloud droplet in cloud (N_c), liquid content water (LWC), average diameter of cloud droplet (D): (a-c) represents non-precipitation cloud, (d-f) represents precipitation cloud

3.2 云滴谱分布的垂直特征

CAS 探头可以给出 2~50 μm 范围段的云滴谱分布, 根据降水云和非降水云的区分, 图 5 给出两种云在 1500m 以下、1500m~3000m、3000m 以上三个不同高度层的云滴谱。从云滴谱中可以看出, 随着云滴尺寸的增加, 云滴数浓度呈指数递减。降水云中, 随着高度的降低, 大云滴逐渐增多, 说明降水云下部的大云滴多于上部。非降水云云滴直径 10 μm 以上的云粒子数浓度下降远远快于降水云, 说明非降水云主要为小云滴。

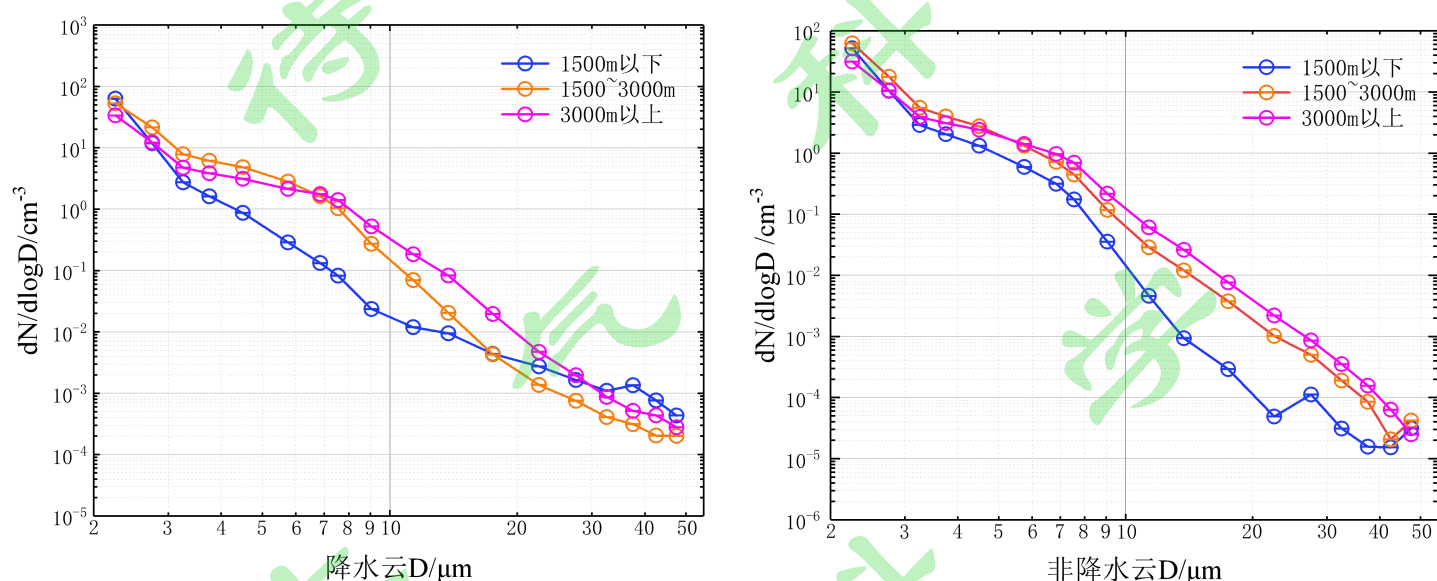


图 5 不同高度下降降水云和非降水云云滴谱分布特征

Fig. 5 Cloud droplet size distributions of precipitation cloud and non-precipitation cloud at different height

3 云雨自动转化阈值函数 (T)

3.1 降水云和非降水云的云雨自动转化阈值函数 (T)

云雨自动转化阈值函数 (T) 表示自动转化发生的概率, 可用于检验云降水过程中碰并过程的强度。根据 Liu et al. (2005, 2006), 目前云雨自动转化的参数化方案可以用如下表达式表示:

$$P = P_0 T, \quad (1)$$

其中 P 是云雨自动转化率, P_0 是比率函数, 用于描述云雨自动转化开始后的转化比率。 T 的表达式为:

$$T = \frac{P}{P_0} = \frac{\int_{r_c}^{\infty} r^6 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^6 n(r) dr} \left/ \frac{\int_{r_c}^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr} \right., \quad (2)$$

其中： r 是云滴半径； $n(r)$ 是云滴谱； r_c 是自动转化函数的临界半径。 T 的范围为 0~1： $T=0$ ，表示无碰并过程； $T=1$ ，表示完全碰并过程。 T 取值越大，表示碰并发生的概率越大。

Liu et al. (2004) 推导了 r_c 的解析表达式如下：

$$r_c \approx 4.09 \times 10^{-4} \beta_{con}^{1/6} \frac{N_c^{1/6}}{LWC^{1/3}}, \quad (3)$$

其中： $\beta_{con} = 1.15 \times 10^{23}$ 是一个经验常数； N_c 为数浓度。

计算包含降水云和非降水云的所有云区的 T 值，挑选四架次中几组云层连续且范围较大的穿云数据，分析 T 值在云内的垂直分布情况。图 6 中阴影表示 T 值的标准差。从图中可以看出， T 值在云内分布呈现云底较小，随着云内高度的增加 T 值逐渐增大在云中部和上部达到最大值，与云内 LWC 的垂直变化特征相似，反映中上部的云滴凝结增长过程活跃，从而形成大云滴更易进行碰并，得到高 T 值，云顶层因为夹卷混合导致云滴增长缓慢，因此 T 值逐渐减小。与均匀分布相比，这种平均廓线随高度呈抛物线的分布有利于较薄的云层中形成雨滴。

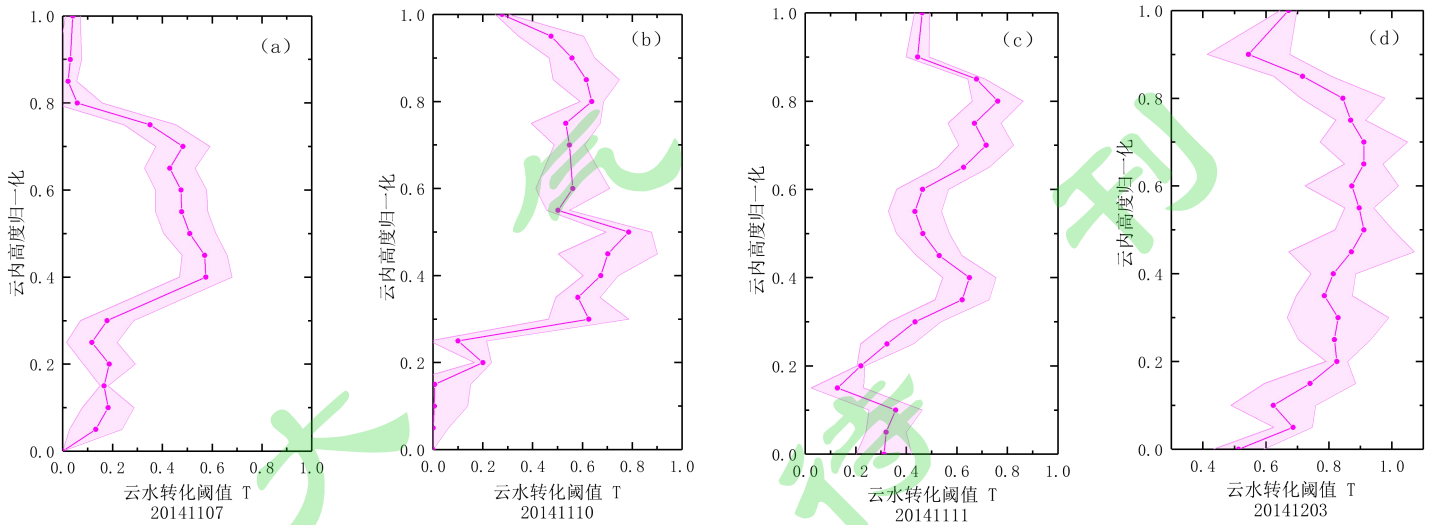


图 6 T 的云内垂直分布：阴影表示 T 值的标准差

Fig. 6 The vertical distribution of T in Cloud: shape represents standard deviation of T

随后，我们区分降水云和非降水云的 T 值，图 7 为两种云 T 值在不同范围的分布柱状图：柱状图高度代表各范围所占百分比，颜色代表海拔高度。从柱状分布图可以看出，非降水云的 T 值基本上在 0.0~0.5 的范围，降水云的 T 值基本上在 0.5~1.0 的范围，降水云的 T 值在 0.6 以上的频率远大于非降水云，说明降水云中的碰并过程较强，符合暖云降水机制。同时还可以看出降水云中的碰并过程主要集中在 3000m 以上的高度层。

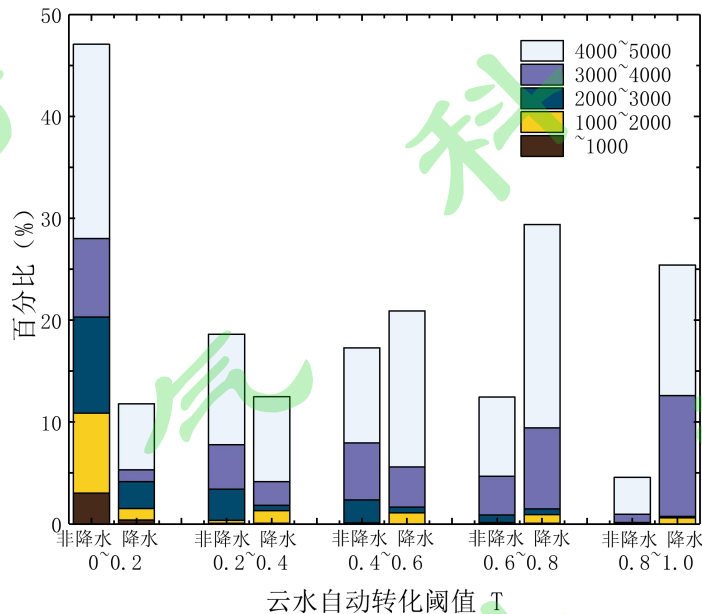


图 7 非降水云和降水云 T 的分布柱状图：高度代表各范围所占百分比，颜色代表高度
 Fig. 7 T distribution histogram of non-precipitation clouds and precipitation clouds: Height represents the percentage of each range, color represents height

4.2 碰并过程强度对云滴谱的影响

根据降水云和非降水云的区分，并按照 T 值大小将云滴谱分为三组 ($0 \leq T \leq 0.4$, $0.4 < T \leq 0.6$, $0.6 < T \leq 1$)。如图 8 所示，从云滴谱中可以看出，两种云在不同碰并强度下谱型一致，且在 $D > 7.55 \mu\text{m}$ ，由于大粒子增多，更易进行碰并，导致 T 值增大，说明碰并作用过程强度较大，有利于大云滴的形成同时也会使得碰并过程进一步增强。由于在相同 T 值范围内降水云和非降水云 T 值的频率分布存在一定差异，降水云中 T 值的大值 (0.8~1) 出现频率约为非降水云中同一 T 值区间频率的两倍，因此出现在同一范围内降水云云滴谱宽于非降水云的情况，降水云的云滴增长比较活跃。

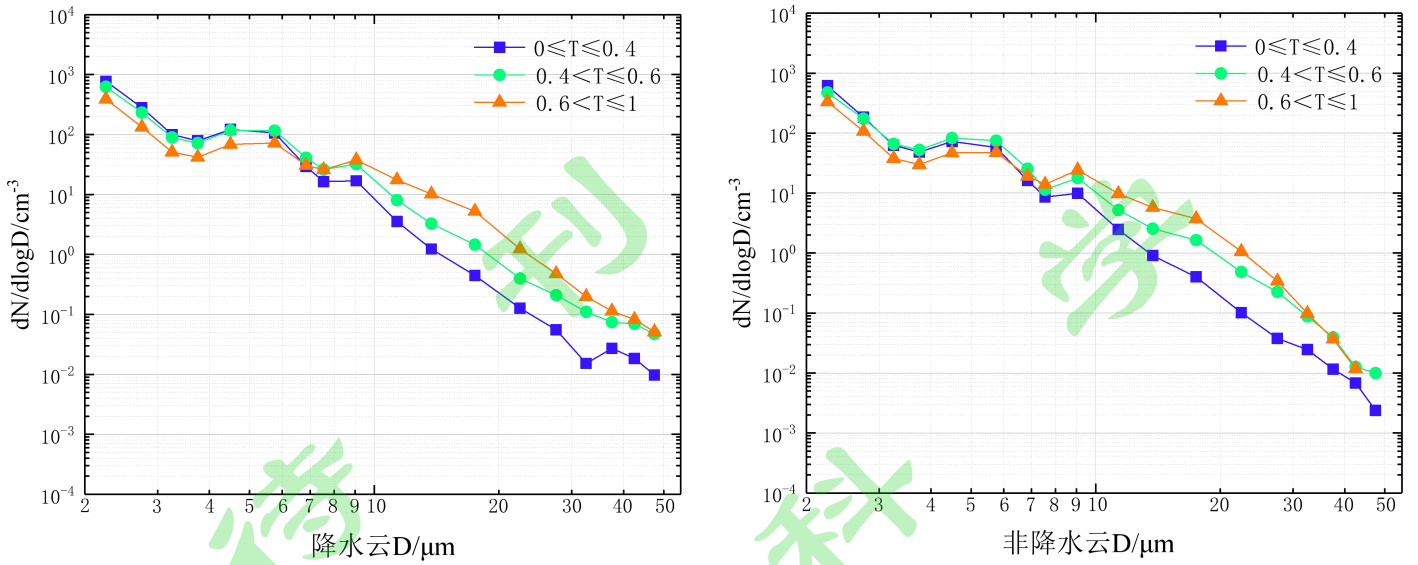


图 8 不同 T 范围内非降水云和降水云的云滴谱分布特征

Fig. 8 Cloud droplet size distributions in non-precipitation and precipitation clouds at different Range of T

4.3 云滴谱离散度 (ε) 与云滴数浓度 (N_c) 相关性关系分析

云滴谱离散度 (ε) 可以用来衡量云滴的尺度分布的离散程度, 被定义为云滴尺度分布的标准偏差 (σ) 和云滴平均半径 (r_a) 的比值, ε 的表达式为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{r_a}, \quad (4)$$

当 ε 为 0 时, 表示所有云滴都在同一尺度上; 而当 ε 大时, 表示大云滴和小云滴有着高的混合度。很多的观测结果表明 ε 并不是一个自由的参数, 该参数与 N_c 相关。但是, 目前的研究显示 ε - N_c 的关系存在很大的不确定性。

为了探究江西地区暖云中 ε 与 N_c 的相关关系, 我们给出了降水性暖云和非降水性暖云 ε 随 N_c 和 LWC 的散点相关图 (图 9)。可以看出, 降水性暖云和非降水性暖云当 N_c 较低时 ε 散落在较大的范围内, 随着 N_c 的增加 ε 逐渐收敛, 与 Zhao et al. (2006) 研究结果一致。云滴谱离散度是由气溶胶数浓度和云动力学过程共同决定, 例如 Liu and Daum (2002) 发现, 在相似的动力学条件下, 与海洋气溶胶相比人为气溶胶更复杂的化学组成和更宽的尺度分布会导致云滴谱拓宽。气溶胶和动力学过程的联合作用可能导致在云滴数浓度较高时云滴谱离散度出现整体收敛。同时可以看出, 降水性暖云和非降水性暖云随着 N_c 的增加, ε 减少, ε 与 N_c 均呈现明显的负相关关系。

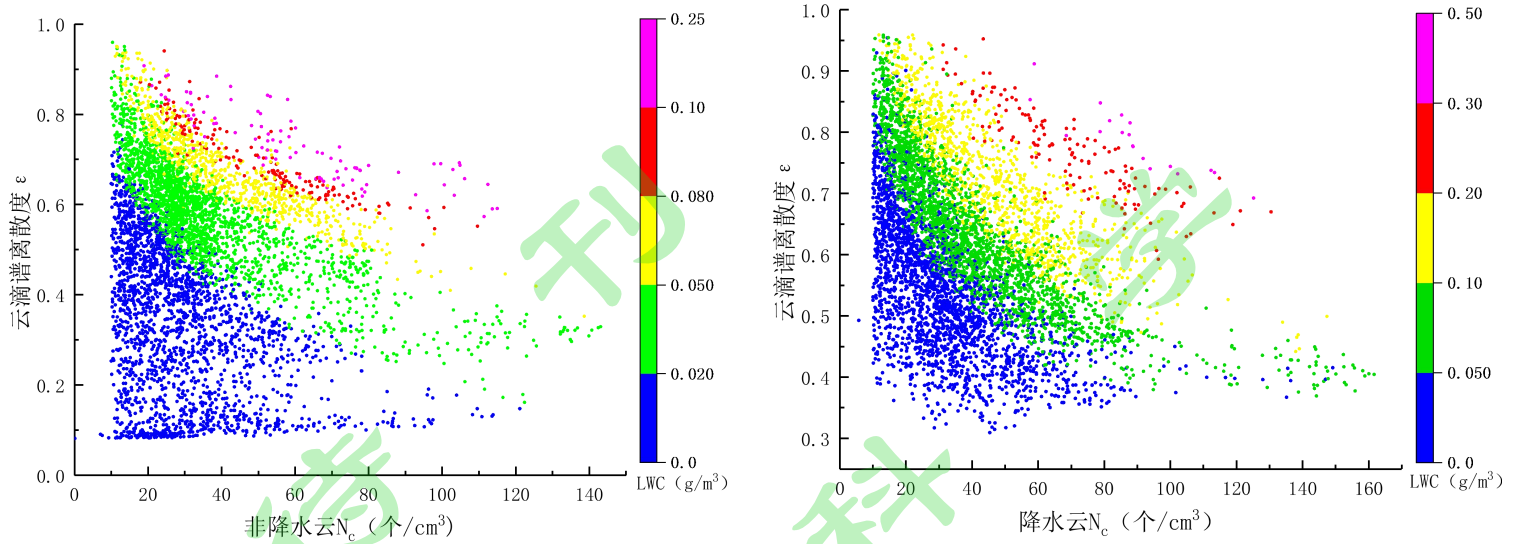


图 9 非降水云和降水云 N_c 与云滴谱离散度 ϵ 相关关系随 LWC 的分布

Fig. 9 Correlation with LWC between participation cloud and non-participation cloud N_c and and cloud droplet spectral dispersion (ϵ)

4.4 碰并过程强度对 ϵ - N_c 关系的影响

云滴谱离散度通过改变云雨自动转化过程，进而影响气溶胶-云-降水的相互作用。云雨自动转化过程是指云微物理过程中云滴碰撞合并成小雨滴的过程，它决定着暖云性降水的开始，影响降水的时空分布和降水总量，以及全球的水循环。准确的云雨转化参数化有助于提高我们对云的宏观、微观性质以及气溶胶气候效应的科学认识 (Leon et al., 2005; Xie et al., 2015)。

图 10 给出 ϵ 与 T 的关系，可以看出 T 与 ϵ 有着很强的相关性， T 随着 ϵ 的增加而增加。 ϵ 越大表示，不同粒径的云滴有更大的混合度，更利于云滴碰并。降水云的拟合线基本都高于非降水云，说明降水云启动碰并过程需要更低的 ϵ 阈值，更易启动云雨转化机制。

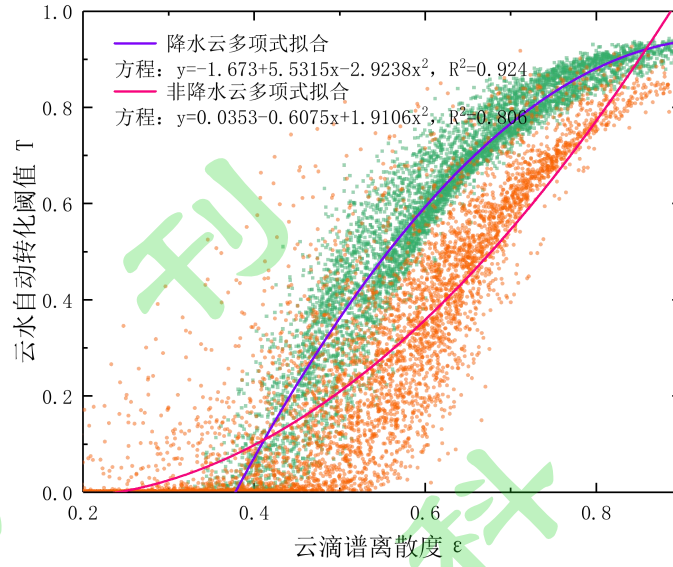


图 10 非降水云和降水云的云雨自动转化阈值 (T) 与云滴谱离散度 (ε) 的关系
Fig. 10 Relation between autoconversion threshold (T) and cloud droplet spectral dispersion (ε) of participation cloud and non-participation cloud

为进一步讨论碰并过程强度对 ε - N_c 负相关关系的影响程度, 我们计算不同 T 值下 ε - N_c 的相关关系。由图 11 可见, 不同 T 取值范围 ε 和 N_c 均为负相关关系, 且随着 T 的增大, 负相关程度普遍增强 (线性拟合直线的斜率 k 逐渐增大), 说明碰并的增强能加强 ε - N_c 负相关关系, 同时随着碰并强度的增大, ε 逐渐增大, 说明碰并过程导致云滴半径增大, 云滴谱拓宽, 离散度增大。而且可以看出非降水云的负相关程度明显强于降水云, 可能是非降水云中云滴半径较小, 如果发生较强的碰并过程就会导致云滴谱拓宽明显, 从而使得 ε - N_c 负相关关系加强。

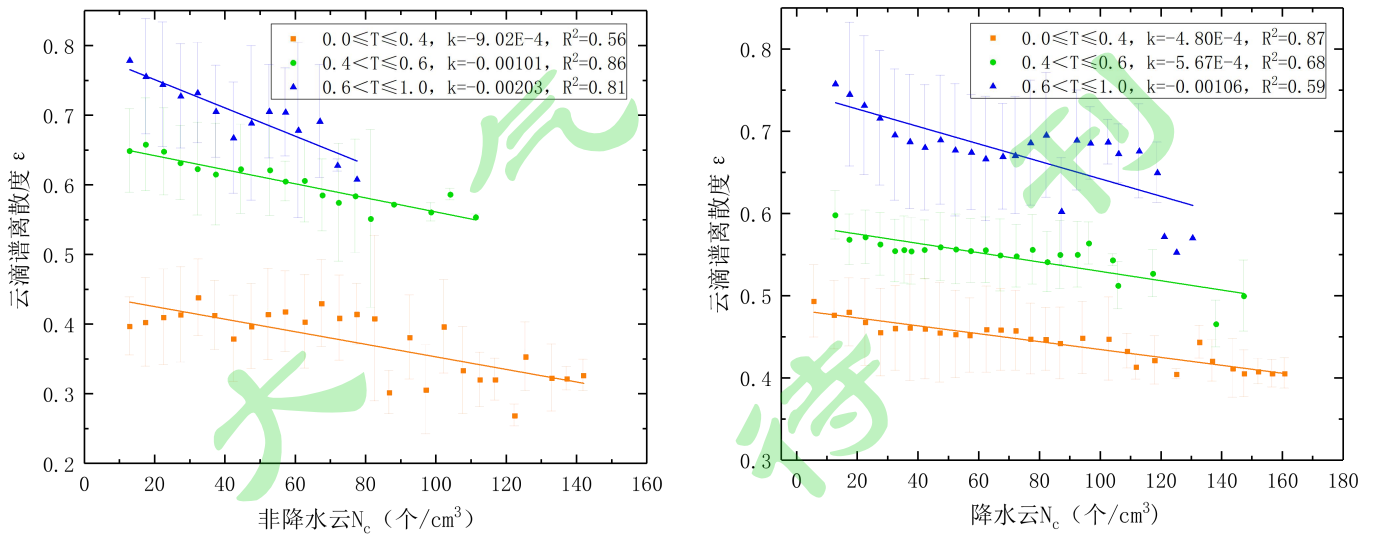


图 11 非降水云和降水云在不同 T 范围内 ε - N_c 相关关系图
Fig. 11 ε - N_c Correlation between participation cloud and non-participation cloud at different Range T

将降水云和非降水云的数据整合到一张图上并做线性拟合（图 12），我们得到了相似结果。由公式（4）可知， ε 受云滴谱标准差（ σ ）和云滴平均半径（ r_a ）的综合影响，为了进一步给出在碰并过程强度增强时 ε - N_c 负相关关系更为显著的原因，我们也给出了不同 T 背景下 σ - N_c 和 r_a - N_c 散点相关图。发现碰并发生时， σ 和 r_a 的数值都较高，且与 N_c 呈明显的负相关关系。通过对比 σ - N_c 和 r_a - N_c 拟合直线的 k 值发现，当 T 值增大时 σ - N_c 拟合直线的斜率明显增大，而 r_a - N_c 拟合直线在 $0.4 < T \leq 0.6$ 时的斜率小于 $0.0 \leq T \leq 0.4$ 时的斜率。说明 T 值的增大对 σ 的影响更为明显，在高 T 值背景时 σ - N_c 负相关的增强对于 ε - N_c 负相关关系的增大起主要贡献。总体来看，碰并过程会导致 ε - N_c 的负相关关系，随着 T 的增大，这种负相关程度增强，其中 σ 为主要贡献项。

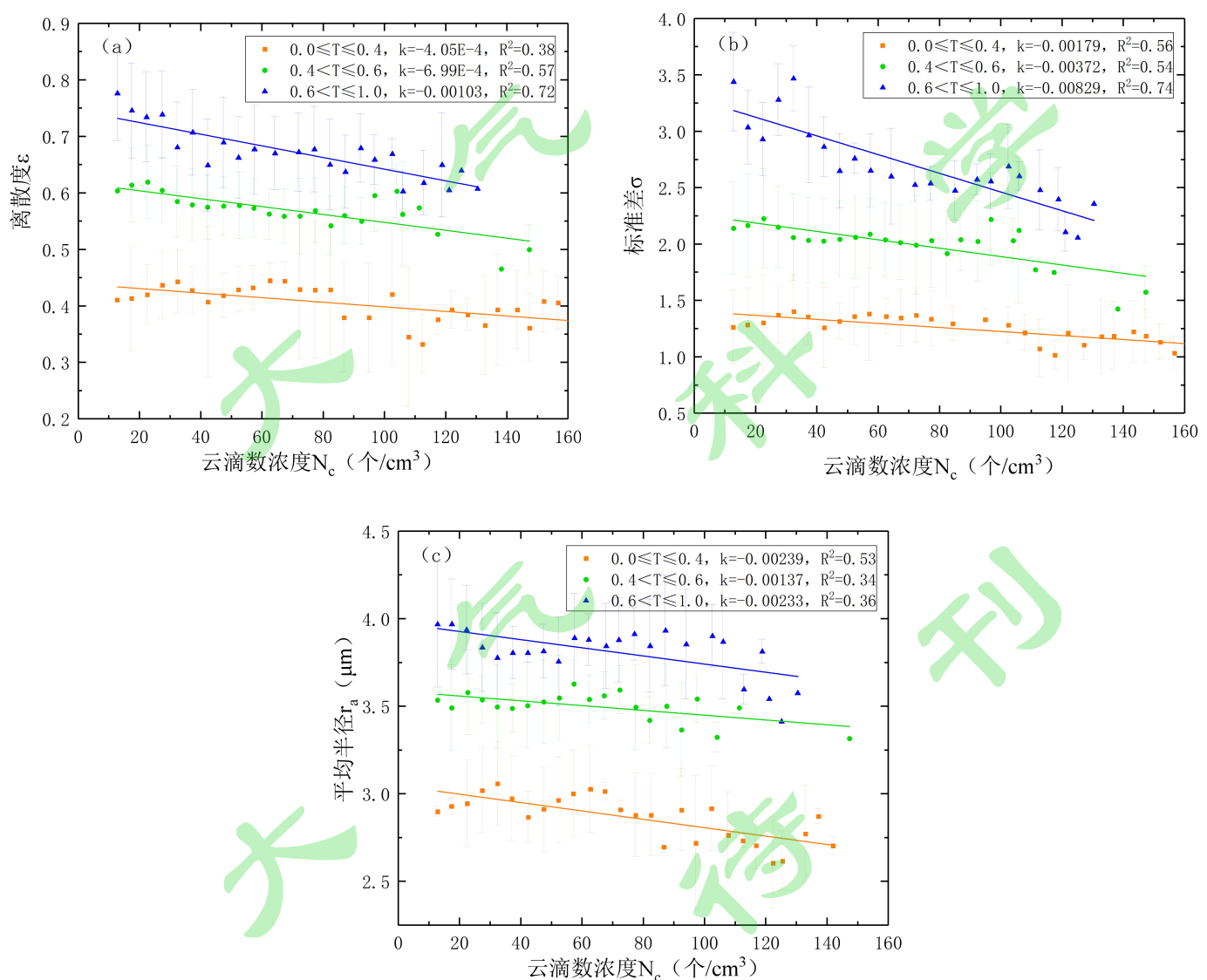


图 12 不同 T 范围内云滴微物理量与 N_c 的关系：（a） ε - N_c ，（b） σ - N_c ，（c） r_a - N_c
 Fig. 12 (a) Cloud droplet spectral dispersion (ε) as a function of number concentration (N_c),

(b)standard deviation (σ) as a function of N_c , (c)cloud droplet mean radius (r_a) as a function of N_c

5 结论

利用飞机观测资料,区分降水云与非降水云,详细对比分析江西地区两种云的微物理结构特征,并且通过对江西地区的层状暖云云雨自动转换阈值(T)的计算,讨论云雨自动转化过程对各微物理量相关关系的影响,得到以下结论。

(1) 非降水云中, N_c 与 D 的变化趋势相反,而 LWC 与 D 的变化趋势相似。降水云中, N_c 、 D 和 LWC 的变化趋势均具有很好的一致性。降水云与非降水的 LWC 与 D 都随着高度逐渐增加,其中,降水云的 LWC 大于非降水云,说明上升气流起到明显作用,与非降水云相比降水云发展旺盛。两种云在小云滴段浓度较高,随着粒径的增加, N_c 是减小的,在降水云中的大云滴多位于云的上层。

(2) T 值由于云滴在碰并增大时,将被云中上升气流携带上升,随着云滴碰并变大,大云滴具有较大的碰并小云滴的概率,更容易碰并,因此在云的中上部逐渐增大。降水云 T 值在 0.6 以上的频率都远大于非降水云,说明降水云中的碰并过程较强,云滴通过碰并形成雨滴产生降水,符合暖云降水机制。

(3) 云滴谱离散度(ϵ)与 N_c 均呈明显的负相关关系,当 N_c 较低时 ϵ 散落在较大的范围内,随着 N_c 的增加 ϵ 逐渐收敛,并且 T 与 ϵ 有着很强的依赖关系, T 随着 ϵ 的增加而增加。由于碰并过程导致云滴半径增大,云滴谱拓宽,离散度增大,因此随着碰并强度的增大, ϵ 逐渐增大。总体来看,碰并过程会导致 ϵ - N_c 的负相关关系,随着 T 的增大,这种负相关程度增强,相比于云滴平均半径(r_a)的变化,云滴谱标准差(σ)的变化主导 ϵ - N_c 负相关程度的增强。

致谢 本文所使用的飞机观测资料由江西省人工影响天气领导小组办公室组织实施,特此感谢。

参考文献 (Reference)

- Baker M B. 1993. Variability in concentrations of CCN in the marine cloud-top boundary layer[J]. Tellus, 45B: 458-472. doi: 10.1034/j.1600-0889.45.issue5.1.x.
- Chen Jingyi, Liu Yangang, Zhang Minghua, et al. 2016. New understanding and quantification of the regime dependence of aerosol-cloud interaction for studying aerosol indirect effects[J]. Geophysical Research Letters, 43(4): 1780-1787. doi: 10.1002/2016GL067683.
- Chen Jingyi, Liu Yangang, Zhang Minghua, et al. 2018. Height Dependency of Aerosol-Cloud Interaction Regimes[J]. Geophysical Research Letters, 123: 491-506. doi: 10.1002/2017JD027431.

- Del Genio A D, Yao M S, Kovari W, et al. 1996. A Prognostic Cloud Water Parameterization for Global Climate Models[J]. *Journal of Climate*, 9(2): 270-304. doi: 10.1175/1520-0442(1996)009<0270:apcwpf>2.0.co;2.
- 黄兴友, 张帅, 李盈盈, 等. 2019. 云参数的两种地基雷达反演方法对比研究[J]. *气象科学*, 39(5): 608-616. Huang Xingyou, Zhang Shuai, Li Yingying, et al. 2019. Study on the two algorithms and result comparison of retrieving cloud microphysical parameters with ground-based radar. *Journal of the Meteorological Sciences*, 39(5) : 608-616. doi: 10.3969/j.issn.1000-0535.2019jms.0007.
- 胡嘉纓, 银燕, 陈倩, 等. 2019. 深对流云对不同高度示踪气体层垂直输送的数值模拟研究[J]. *大气科学*, 43(1): 171-182. Hu Jiaying, Yin Yan, Chen Qian, et al. 2019. A numerical study on the vertical transport of tracergases at different altitudes by deep convective clouds[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43 (1): 171-182, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17290.
- 黄钰, 郭学良, 毕凯, 等. 2020. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究[J]. *大气科学*, 44(2): 356-370. Huang Yu, Guo Xueliang, Bi Kai, et al. 2020. Vertical Observation and Numerical Simulation of the Clouds Physical Characteristics of Snow-Producing over Yanqing Mountain Area in Beijing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(2): 356-370. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18258.
- Kessler E. 1995. On the continuity and distribution of water substance in atmospheric circulations[J]. *Atmospheric Research*. 38(1-4) :109-145. doi: 10.1016/0169-8095(94)00090-Z.
- Kumar B, Bera S, Prabha T V , et al. Grabowski. 2017. Cloud-edge mixing: Direct numerical simulation and observations in Indian Monsoon clouds[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(1): 332-353. doi:10.1002/2016MS000731.
- Liou K N, Ou S C. 1989. The role of cloud microphysical processes in climate: an assessment from a one-dimensional perspective. *Journal of Geophysical Research*, 94(D6): 8599. doi: 10.1029/jd094id06p08599.
- Liu Yangang, Daum P H. 2002. Anthropogenic aerosols. Indirect warming effect from dispersion forcing. *Nature*, 419(6907), 580-581. doi: 10.1038/419580a.
- Liu Yangang, Daum P H, McGraw R. 2004. An analytical expression for predicting the critical radius in the autoconversion parameterization[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(6): L06121. doi:10.1029/2003GL019117.
- Leon D, Rotstain, Liu Yangang. 2005. A smaller global estimate of the second indirect aerosol effect[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(5): L05708. doi:10.1029/2004GL021922.
- Liu Yangang, Daum P H, McGraw R. 2005. Size truncation effect, threshold behavior, and a new type of autoconversion parameterization[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(11): L11811. doi: 10.1029/2005gl022636.
- Liu Yangang, Daum P H, McGraw R, et al. 2006. Generalized threshold function accounting for effect of relative dispersion on threshold behavior of autoconversion process[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(11): L11804. doi: 10.1029/2005gl025500.
- Lu Miaoling, Seinfeld J H. 2006. Effect of aerosol number concentration on cloud droplet dispersion: A large-eddy simulation study and implications for aerosol indirect forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111: D02207. doi: 10.1029/2005JD006419.
- Lu Chunsong, Liu Yangang, Niu Shengjie, et al. 2012. Observed impacts of vertical velocity on cloud microphysics and implications for aerosol indirect effects.[J] *Geophysical Research*

- Letters,39: L21808. doi:10.1029/2012GL053599.
- Lu Chunsong, Niu Shengjie, Liu Yangang, et al. 2013. Vogelmann. Empirical relationship between entrainment rate and microphysics in cumulus clouds. *Geophysical Research Letters*, 40(10): 2333–2338. doi: 10.1002/grl.50445.
- Martin G M, Johnson D W, Spice A. 1994. The Measurement and Parameterization of Effective Radius of Droplets in Warm Stratocumulus Clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(13): 1823-1842. doi:10.1175/1520-0469(1994)051<1823:TMAPOE>2.0.CO;2.
- McGraw R, Liu Yangang. 2003. Kinetic Potential and Barrier Crossing: A Model for Warm Cloud Drizzle Formation[J]. *Physical Review Letters*, 90(1):018501. doi: 10.1103/physrevlett.90.018501.
- Ma Jianzhong, Chen Yue, Wang Wei, et al. 2010. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115: D18204. doi: 10.1029/2009JD013065.
- Sundqvist H. 1978. A parameterization scheme for non-convective condensation including prediction of cloud water content[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104: 677-690. doi: 10.1002/qj.49710444110.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. 2013. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. *computational geometry*, 18(2): 95-123. doi:10.1016/S0925-7721(01)00003-7.
- 唐洁, 郭学良, 常伟. 2018. 青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征[J]. *大气科学*, 42(06): 1327-1343. Tang Jie, Guo Xueliang, Chang Yi. 2018. Cloud microphysics and regional water budget of a summer precipitation process at Naqu over the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (6): 1327-1343. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17202.
- Wang Xiaofeng, Xue Huiwen, Fang Wen, et al. 2011. A Study of Shallow Cumulus Cloud Droplet Dispersion by Large Eddy Simulations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25(2): 166-175. doi: 10.1007/s13351-011-0024-9.
- 王元, 牛生杰, 雷恒池. 2017. 利用三架飞机联合探测资料分析层积混合云催化物理效应[J]. *大气科学学报*, 40(05): 686-696. Wang Yuan, Niu Shengjie, Lei Hengchi. 2017. An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with embedded convection using the joint observational data of three aircrafts[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 40(05):686-696. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161012002.
- Wang Yuan, Niu Shengjie, Lu Chunsong et al. 2019. An Observational Study on Cloud Spectral Width in North China[J]. *Atmosphere*, 10(3):109. doi: 10.3390/atmos10030109.
- Xie Xiaoning, Liu Xiaodong. 2011. Effects of spectral dispersion on clouds and precipitation in mesoscale convective systems[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116: D06202. doi: 10.1029/2010JD014598.
- Xie Xiaoning, Liu Xiaodong. 2015. Aerosol-Cloud-Precipitation Interactions in WRF Model: Sensitivity to Autoconversion Parameterization[J]. *Journal of Meteorological Research*, 29(1): 72-81. doi:10.1007/s13351-014-4065-8.
- 解小宁, 王昭生, 王红丽. 2015. 云滴谱离散度对气溶胶间接效应影响的研究进展 [J]. *地球环境学报*, 6(2): 127-134. Xie Xiaoning, Liu Xiaodong, Wang Zhaosheng. 2016. Review of influence of cloud droplet spectral dispersion on aerosol indirect effects[J]. *Journal of Earth Environment*, 6(2): 127-134. doi: CNKI:SUN:DQJHJ.0.2016-01-002.

- Zhao Chunsheng, Tie Xuexi, Brasseur G, et al. 2006. Aircraft measurements of cloud droplet spectral dispersion and implications for indirect aerosol radiative forcing[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(16): 373-386. doi:10.1029/2006gl026653.
- Zhao Chuanfeng, Qiu Yanmei, Dong Xiaobo, et al. 2018. Negative Aerosol-Cloud re Relationship From Aircraft Observations Over Hebei, China[J]. *Earth and Space Science*, 5(1). doi: 10.1002/2017ea000346.
- 周后福, 孔令帅, 赵倩, 等. 2017. 基于观测资料的云系分裂现象分析[J]. *气象科学*, 37(4): 535-541. Zhou Houfu, Kong Lingshuai, Zhao Qian, et al. 2017. Analysis on split phenomenon of clouds based on observation data[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 37(4): 535-541. doi: 10.3969/2016jms.0059.
- 朱磊, 陆春松, 高思楠, 等. 2020. 海洋层积云中的云滴谱宽度及其影响因子[J]. *大气科学*, 44(03): 575-590. Zhu Lei, Lu Chunsong, Gao Sinan, et al. 2020. Spectral Width of Cloud Droplet Spectra and Its Impact Factors in Marine Stratocumulus[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 44(03): 575-590. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1905.19115.