

基于飞机观测的华北降水云系上升气流区 微结构研究

王心怡¹, 牛生杰^{1,2*}, 吕晶晶¹, 王元¹, 靳雨晨¹, 邬昊鹏¹

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

2. 南京工业大学安全科学与工程学院, 南京 211816

摘要: 上升气流是成云致雨的基本条件之一。本文利用河北省 2017 年 5 月一次层积混合云的机载云物理探测系统测量资料, 研究了云中上升气流速度分布, 云微结构特征以及二者的相关性。结果表明: 云中上升气流速度随高度呈抛物线型分布, 云底部较小 ($0.75 \pm 0.52 \text{ m s}^{-1}$), 云中部最大 ($3.64 \pm 2 \text{ m s}^{-1}$), 云顶部最小 ($0.32 \pm 0.29 \text{ m s}^{-1}$); 发现随高度增加, 云中上升气流区内冰粒子形状依次以片状、针状、柱状为主; 暖云上升气流区中, 上升气流速度与液态含水量正相关, 相关系数为 0.61; 强垂直气流条件下云滴数浓度、最大云滴尺度大于弱垂直气流相应的数值, 强垂直气流云粒子谱更符合 Γ 函数分布。

关键词 降水云系 飞机观测 上升气流区 云微物理结构

文章编号: 2021244C

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2207.21244

Microstructure study of updraft zone of precipitation cloud system in North China based on aircraft observation

Xinyi Wang¹, Shengjie Niu^{1,2*}, Jingjing Lv¹, Yuan Wang¹, Yuchen Jin¹, Haopeng Wu¹

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Collaborative Innovation Center on

Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Key Laboratory for

Aerosol-Cloud-Precipitation of China

收稿日期: 2022-07-29; 网络预初版日期:

作者简介: 王心怡, 女, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要从事云降水物理学与人工影响天气研究。E-mail: wxy199708@126.com

*通讯作者: 牛生杰, E-mail: niusj@njtech.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目(2018YFC1507905), 国家自然科学基金面上项目(42075063、42075066), 广西重点研发计划项目(桂科 AB20159013)资助

Meteorological Administration, Nanjing, China Nanjing 210044

2 College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816

Abstract: Updraft is one of the preconditions for cloud formation to cause precipitation. The vertical velocity distribution, cloud microstructure characteristics, and their correlation were analyzed based on the observations of the airborne cloud physical detection system for a stratocumulus cloud in Hebei Province in May 2017. The results show that the updraft velocity in the cloud has a parabolic distribution with height, that is, the cloud bottom is small ($0.75\pm 0.52\text{m s}^{-1}$), the cloud middle is the largest ($3.64\pm 2\text{m s}^{-1}$), and the cloud top is the smallest ($0.32\pm 0.29\text{m s}^{-1}$). In addition, with the increase in height, the ice particles in the updraft area of the cloud are mainly shaped like sheets, needles, and columns. The updraft velocity in the warm cloud updraft region is positively correlated with liquid water content, and the correlation coefficient is 0.61. Compared with the weak updraft condition, the stronger vertical airflow tends to form higher cloud droplet number concentration and larger cloud drop diameter. The cloud droplet size distribution more follows the Γ function distribution.

Keywords: Precipitation cloud system, Aircraft observation, Updraft area, Cloud microphysical structure

1. 引言

云内上升气流速度的大小、分布、微结构特征对云中降水的形成有重要影响。近几十年来,国内学者对云中上升气流展开了一系列研究。顾震潮和詹丽珊(1962)对上升气流起伏时的云雾滴生长进行计算,利用云滴的理论分布发现起伏条件下云滴生长比较快,在较短的时间和比较薄的云中有可能形成半径 $50\mu\text{m}$ 乃至 $100\mu\text{m}$ 以上的云滴。徐华英和顾震潮(1963)用求数值解的方法研究垂直气流起伏的云中降水形成的过程,发现上升气流起伏的环境下,同样大小的云滴在云中可以长成不同大小的较大云滴。以往的研究结果多为理论计算,早期对于垂直气流速度的研究缺乏实际观测数据的支持验证。与卫星、雷达、数值模拟等研究云的手段相比,利用载有云微物理探测仪器的飞机进行入云探测是获取云微物理资料最直接的手段(Bühl et al.,2019; 雷恒池等, 2008; 王元等, 2017)。随着机载云物理探测系统的应用,国内开展了大量云微物理探测试验,促进了我国云降水研究的发展(王谦等, 1987; 范

焯等, 2010; 靳雨晨等, 2021)。Peng 等 (2005) 利用飞机在北大西洋的穿云探测数据, 发现垂直气流速度分布的概率密度函数用于绝热模型后可以预测云内云滴数浓度。Zhao 等 (2006) 利用东亚不同气溶胶背景区 (清洁、污染和海洋区域) 的飞机穿云观测数据研究云滴数浓度和上升气流速度与离散度的关系, 发现当云滴数浓度较低时, 云滴离散度的分布范围较大; 当云滴数浓度增加时, 滴谱离散度收敛于均值。Lu 等 (2012) 探究了垂直速度对液滴数浓度、离散度及其关系的影响。结果表明, 随着垂直速度的增加, 液滴数浓度增加, 离散度降低。

国外学者利用机载微物理资料对降水云系云微物理结构研究同样取得了一系列丰富成果 (Yeom et al., 2017; Patade et al., 2016; Adebisi et al., 2020)。Warner (1969) 发现海洋积云中上升气流与液态含水量变化同步。Hobbs 和 Persson (1982) 利用机载探测仪器发现窄冷锋雨带中冰晶在上升气流顶部区域富集。Locatelli 等 (1987) 发现暖锋锋面区内云和降水形成是由锋前上升气流主导, 随着暖锋的移动降水增加。Lucas 等 (1993) 基于三架次飞机对太平洋上空积雨云的探测结果发现云中垂直气流速度符合对数正态分布, 垂直速度的最大值出现在 2-3km 之间。Hudson 等 (2012) 发现海洋积雨中云滴谱宽度与云凝结核数浓度成反比, 与云内垂直速度、云滴数浓度、平均直径有较好的一致性。

国内外针对不同地区的降水云系开展了一系列飞机观测试验, 探究不同地区的上升气流和云微物理结构的变化规律 (Stark et al., 2013; Lloyd et al., 2018)。但是, 不同条件下上升气流分布、云微物理结构往往存在较大差异, 随着机载探测设备的升级, 质控算法的优化, 观测方案的完善, 机载探测逐渐精细化。目前, 国内将云中上升气流与微物理结构关系结合起来的研究很少。同一架次资料已经发表了一些文章, 孙玉稳等 (2019) 研究了适宜人工增雨作业的温度范围与雷达回波区域; 亓鹏等 (2019) 分析了积层混合云内微物理特征, 主要是融化层特征及形成机理; Hou 等 (2021) 讨论了不同云区 (对流云区、层状云区) 过冷水含量、冰粒子大小分布特征。

与之前的研究不同, 本文利用 2017 年 5 月 22 日积层混合云飞机探测个例进行分析研究, 旨在进一步揭示华北地区降水云系上升气流分布特征及变化规律, 重点研究云内上升气流区内微物理结构变化特征, 定量分析了垂直气流对云内微结构的影响关系, 提出了垂直气流速度与有效半径的拟合关系式, 这对优化数值模式模拟方案, 提高华北地区人工影响天气水平有重要意义。

2. 资料来源

2.1 探测仪器

本文主要利用河北省人工影响天气办公室人工增雨飞机 King-air 350ER (编号 3523) 的机载云微物理探测数据进行研究, 包括云粒子探头 CDP、二维冰晶粒子探头 CIP、云粒子成像探头 CPI、被动腔气溶胶分光仪 PCASP-100X、热线含水量仪 Hotwire LWC、综合气象测量系统 AIMMS-20 的探测结果。AIMMS-20 可以测量大气温压湿风和飞机飞行时间、位置、上升气流速度、飞机姿态参数。其中 CDP 测量直径 2~50 μm 云粒子, 共分 30 档。CIP 测量直径 25~1550 μm 的云和降水粒子, 共包含 62 档, 档宽 25 μm 。PCASP-100X 测量 0.1~3 μm 的气溶胶粒子, 共 30 档。云内的液态水含水量 LWC 是通过 Hotwire LWC 探头测量得到, Hotwire LWC 测量范围为 0~3 g m^{-3} 。上述探头的探测频率均为 1Hz。试验开始前相关探测设备均进行了校正, 数据处理时剔除资料的异常值以确保数据准确性。考虑到由于 CIP 探头景深问题, 对于直径小于 125 μm 的粒子探测具有不准确性, 数据处理过程中剔除了 125 μm 以下的数据 (杨洁帆等, 2021)。

2.2 探测飞行概况

自 2017 年 5 月起, 河北省“十三五”气象重点工程——“太行山东麓人工增雨防雹作业技术实验”正式开展外场科学试验。太行山脉位于山西省与华北平原之间, 西接山西高原, 东临华北平原, 呈东北—西南走向, 总体呈北高南低, 海拔在 1200 米以上, 长约 400 余公里。此次试验区域主要为太行山东麓, 地势落差大, 起伏较为陡峭, 主要为温带季风气候。

2017 年 5 月 22 日飞机从石家庄北部的正定机场起飞, 飞行区域在华北地区上空, 探测方式包括垂直和水平探测 (探测轨迹见孙玉稳等, 2019), 即从地面至云顶采用盘旋上升、下降和不同高度的平飞探测。此次探测在下午 14:39:50~18:28:33, 探测时长 229min, 获取 13724 个有效样本, 探测垂直范围 55~7442m, 温度范围-16.4~17.2 $^{\circ}\text{C}$, 是一次低槽冷锋天气系统下的积层混合云探测过程, 积层混合云云体在垂直方向分布不均, 对流云主要集中在 2000~5000m 高度处。

2.3 分析方法

本文综合考虑飞行记录、降水情况以及雷达回波情况, 参照范焯等 (2010) 判断云系发展阶段。2017 年 5 月 22 日探测飞行前有小雨, 飞行探测作业时根据飞行方案、该时刻天气

系统和天气雷达回波选择了正在发展的云进行探测，结合 Ka 云雷达、邢台地面雨量站资料（孙玉稳等，2019）与卫星云图（亓鹏等，2019）发现飞行探测期间 5min 降水量从 0.2mm 迅速跃升到 1.5mm，云顶抬升，云变厚，因此 2017 年 5 月 22 日探测到的云处于发展阶段。

本文云区的判断标准是连续 10 个探测记录满足云滴数浓度 (N_c) 大于 10cm^{-3} 且云内液态水含量 (LWC) 大于 0.001g m^{-3} ，采用 N_c 和 LWC 两个标准可以消除气溶胶对云滴样本的影响 (Lu et al., 2012)。云滴谱离散度 (ε) 为标准偏差 (σ) 和云滴算数平均半径 (r) 的比值，即

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{r} \quad (1)$$

由于垂直气流速度的测量受飞机飞行姿态的影响，因此当飞机保持水平飞行时测量结果更准确 (Beswick et al., 2007)。平飞过程指单向平飞，利用 AIMMS-20 系统测得高度数据同时结合经纬度数据进行判断，不存在往返或者转弯。上升气流区的筛选标准是：在平飞过程中，云区内满足连续 5 个记录垂直气流速度大于 0m s^{-1} 的区域，文中垂直气流速度的正负分别对应矢量方向上的上升和下降。因此分析过程中，上升气流区水平尺度以飞机平飞的时间和航速 (105m s^{-1}) 进行估算 (Yang et al., 2019)。

3. 结果与讨论

3.1 上升气流分布特征

图 1 是 2017 年 5 月 22 日上升气流与微物理参量时间序列变化图，云内有着较高的含水量， N_c 、LWC 云内分布极其不均，F1-F4 为飞机平飞过程 (图 1a)。图 1b 表明云底附近 (2000~2300m)，上升气流速度较弱； 0°C 层附近 (F1 过程 3627m 左右)，上升气流速度变化趋势与云中液态水含量变化较为一致，存在明显上升气流区，最大上升气流速度为 5.5m s^{-1} ，对应 LWC 为 1.81g m^{-3} ；F3 过程是飞机在云顶 7200m 左右进行平飞探测，该过程可以看到云顶有明显旺盛的下沉气流区域，上升气流较小。云顶冰晶的数量较少，导致液态水在云顶可以持续存在 (Fleishauer et al., 2002)。与 Zhu 等 (2014) 研究结果 ($0\sim 0.01\text{g m}^{-3}$) 相比，云顶平飞过程计算得 LWC 平均值较大为 0.1g m^{-3} ，可能是天气系统不同，云况不同 (温度、云厚、云顶、云的发展阶段) 造成的。17:27~17:19 为高度为 7239m~2019m 的垂直下降探测 (F4 附近)，此过程中出现云内最大上升气流速度为 7.7m s^{-1} (17:50:28 时)，距云底约 1000m，该时刻温度大于 0°C 。观测期间，PCASP-100 测得的最大气溶胶浓度为 3700cm^{-3} ，离散度主要在 0.25~0.75 之间变化；随着 N_c 增加， ε 整体逐渐收敛。

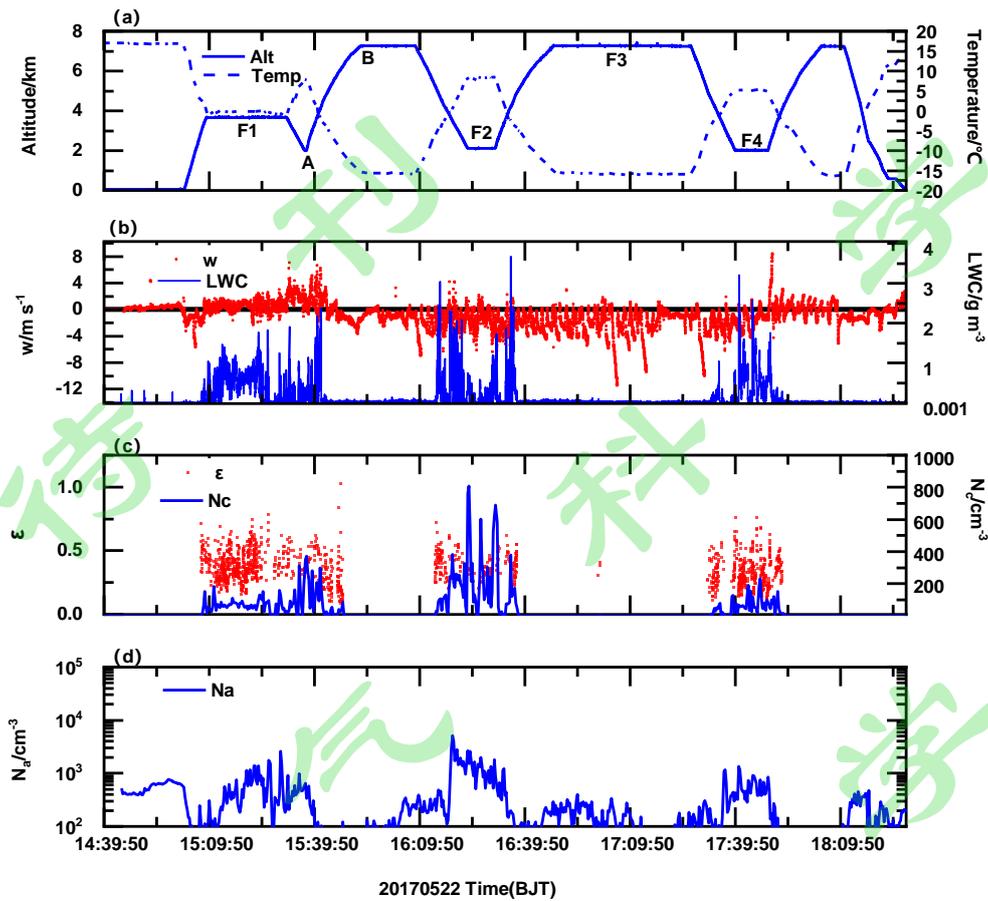


图1 2017年5月22日飞机探测微物理量的时间序列分布特征：(a)飞机飞行高度(Alt)、温度(T)；(b)垂直气流速度(w)，其中黑线为0值、云中液态水含量(LWC)；(c)云滴离散度(ϵ)、云滴数浓度(N_c)；(d)气溶胶数浓度(N_a)

Fig 1 The distribution characteristics of the time series of microphysical quantities detected by the aircraft on May 22, 2017: (a) aircraft altitude (Alt) and temperature(T); (b) vertical air velocity (w), the black line is 0, and the liquid water content in the cloud (LWC); (c) Cloud droplet dispersion (ϵ), cloud droplet number concentration (N_c); (d) aerosol number concentration(N_a)

图2、图3是在该云系内不同高度的平飞部分探测结果，其中F2、F1分别为云底位置(2100m左右)，云中上部(3600m左右)。云底位置(F2)的平飞过程温度变化范围为7.8~8.5℃，CPI粒子图像显示云内此时主要包含大量云滴、雨滴和未完全融化的冰粒子。垂直气流速度变化范围为-2.2~2.1m s⁻¹，平均上升气流速度为0.73m s⁻¹，在8km的水平范围内上升气流区为5.8km。图2可以看出云底云滴数浓度、液态水含量水平分布呈现出显著的不均匀性。LWC较低，半数未超过0.2g m⁻³，最大为1g m⁻³，平均值为0.13g m⁻³； N_c 起伏变化大，变化范围在0~1000cm⁻³。由CDP测量的云滴谱(图2d)可以看到，云滴直径基本集中在15μm以下，为双峰结构，谱宽不超过20μm，以小云滴为主。由CIP粒子谱(图2c)可以看到，粒子在900μm以上时粒子尺度增大，主要原因是云雨滴的碰并增长。

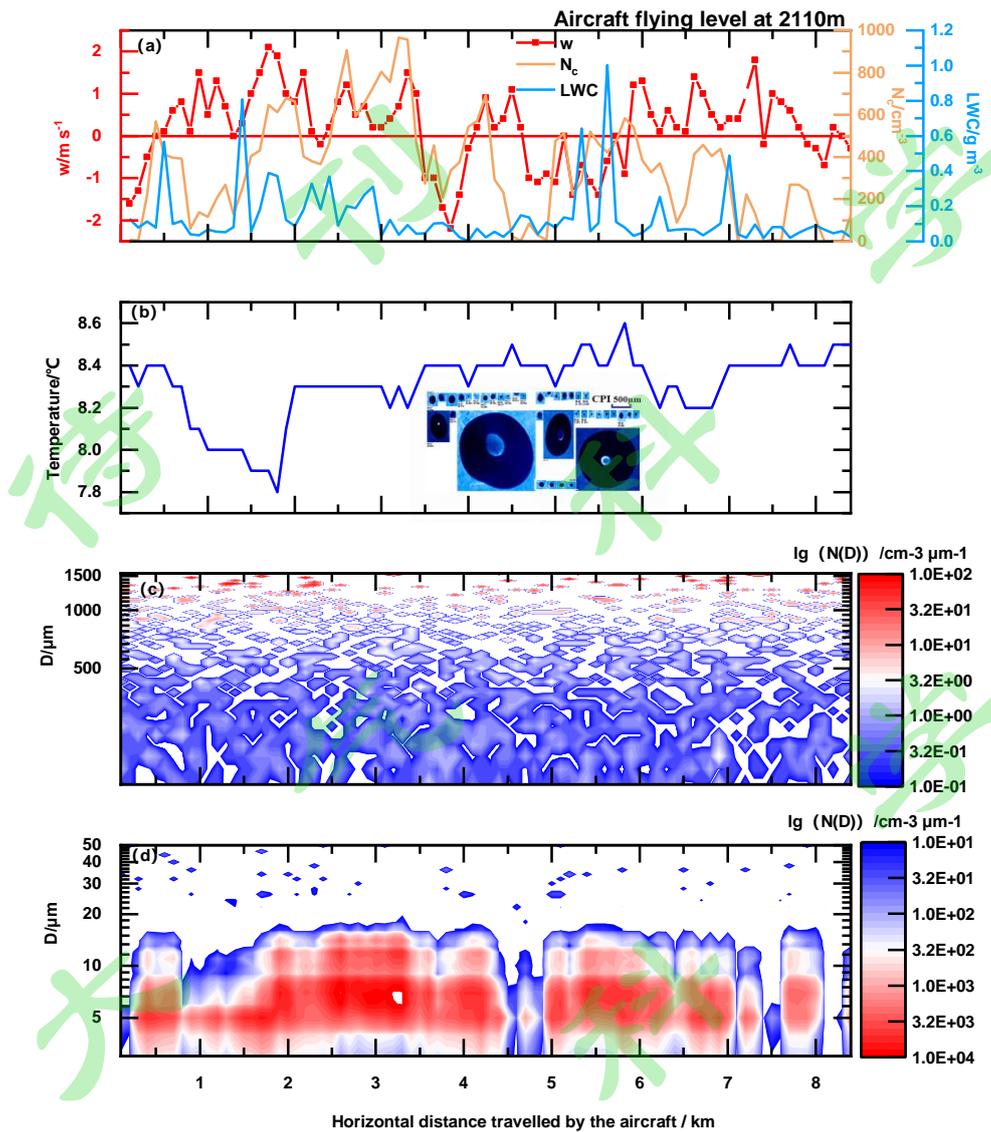


图2 F2过程在云底2110m左右平飞探测结果，横坐标为飞机水平飞行距离：(a)垂直气流速度(w) (红线为0值)、云滴数浓度(N_c)、云中液态水含量(LWC)；(b)温度(T)、CPI图像；(c)CIP粒子谱；(d)CDP粒子谱

Fig 2 F2 process level flight detection results at about 2110m of cloud base, the horizontal coordinate is the horizontal flight distance of the aircraft: (a) vertical air velocity (w) (red line is 0 value), cloud droplet number concentration (N_c), cloud liquid water content (LWC); (b) temperature (T), CPI image (c) CIP particle spectrum; (d) CDP particle spectrum

图3是3670m高度(距云底1560m)平飞探测结果，飞机基本沿 $0^{\circ}C$ 层上下水平飞行，由CPI粒子图像可以看到该过程中存在大量小云滴和部分雨滴、霰粒子和正在融化的冰粒子聚合物。云中最大上升气流速度为 $7.8m s^{-1}$ ，平均上升气流速度为 $3.8m s^{-1}$ ，上升气流的水平空间尺度为1.4km，云中上升气流水平分布不均匀。CDP谱(图3d)呈双峰结构，谱宽不超过 $30\mu m$ 。CIP粒子谱与上升气流关系不明显，CIP平均谱呈单峰结构，在 $1100\mu m$ 以上

浓度上升，主要是云雨滴在 0°C 层附近发生碰并增长，以及冰粒子到达 0°C 层附近聚并增长导致的。在水平飞行距离为 0.5~2km 之内，上升气流速度和液水含量有相似的变化趋势。说明在 0°C 层附近，当气团上升时，由于气团密度高于环境大气密度，气团膨胀，对外做功，温度下降，饱和水汽压降低，出现过饱和度，使得 CCN 活化形成云滴，云滴在过饱和条件下凝结增长，湍流碰并和启发重力碰并，形成雨滴。较大的上升气流增加气团内的过饱和度，促进了活化过程和凝结增长过程，导致 LWC 升高。

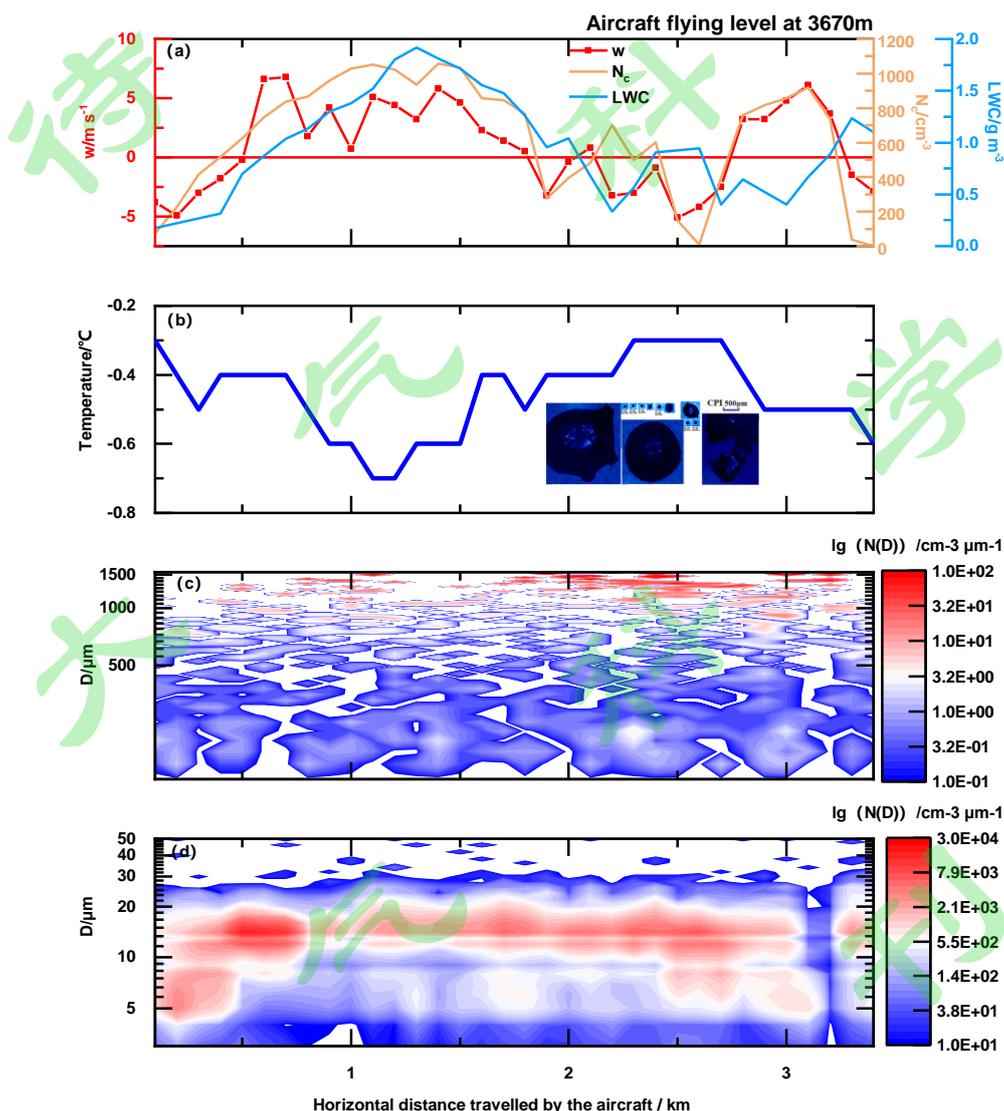


图 3 F1 过程在云中上部 3670m 左右平飞探测结果：(a) 垂直气流速度 (w) (红线为 0 值)、云滴数浓度 (N_c)、云中液态水含量 (LWC)；(b) 温度 (T)、CPI 图像；(c) CIP 粒子谱；(d) CDP 粒子谱

Fig 3 F1 process level flight detection results at about 3670m in the middle of the cloud: (a) vertical air velocity (w)(red line is 0 value), cloud droplet number concentration(N_c), cloud liquid water content(LWC); (b) temperature(T), CPI image (c) CIP particle spectrum; (d) CDP particle spectrum

图 4 进一步总结了云内垂直气流速度整体的概率密度分布，云底高度 2110m，图示高度为距地面高度。整体来看，云内以上升气流区域为主，下沉气流多位于云边界，而上升气流对云滴增长起着重要作用。云顶上升气流速度变化范围为 0~2m s⁻¹，与云内其他位置相比上升气流最小。这是因为云内空气一般已达饱和，随着空气继续上升，就会继续凝结，因而使云扩展到上升气流所及的范围，当发生混合时才会减弱（顾震潮，1980）。云底、云中部、云顶平均上升气流速度分别为 0.75±0.52m s⁻¹、3.64±2m s⁻¹、0.32±0.29m s⁻¹。云中部上升气流速度强于云底，是因为凝结高度以上由于凝结潜热的释放，上升气流速度随高度增加，而混合作用等使它不能不断增加到云顶，造成云的中部上升气流最强，所以该积层混合云中上升气流分布呈现出在云的中部达到最大，云底上升气流较小，云顶最小的特点。当云滴上升到云的上部后并不容易被气流带出云外，而在云内上升气流速度最大时高度的上方，云滴降落已经变得缓慢（云滴最大下落末速度约等于上升气流速度），云滴在这高度以上就能增大很多。

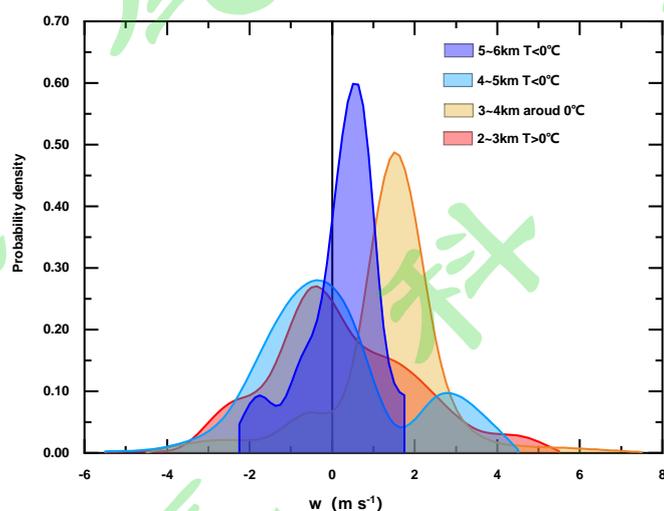


图 4 云内不同高度垂直气流速度概率密度分布

Fig 4 Probability distribution of vertical air velocity at different heights in the cloud

3.2 云内微物理结构特征

图 5a 是 AB 过程上升垂直探测的综合图像，紫色三角表示轨迹中上升气流所在位置，每个温度层结的平均上升气流速度在图中用红字标出，图 5b 为对应三维飞行轨迹。上升垂直飞行探测高度范围为 2000~7200m，温度为 2~-15.6℃，飞行穿过了云的暖层、0℃层和冷层直到云顶，0℃层位于 3700m 左右。由图 5 给出的上升气流区 CPI 图像可以发现不同高度粒子主要形态不同：在 3.7~5.9km (0~-9℃) 范围内以聚合态冰粒子为主，上升气流速度整

体较小，其中平均上升气流速度为 $0\sim 1\text{m s}^{-1}$ ； 3.7km (0°C 层) 以下粒子主要是云滴、雨滴和正在融化的冰粒子，平均上升气流速度在 $1\sim 2\text{m s}^{-1}$ 之间。具体来看，在 4km (-2.5°C) 以下存在大量云滴，冰晶以片状为主，包含少量枝状；在 4.5km (-3.9°C) 以下存在数量很少的过冷云滴，冰晶主要为枝状； 4.5km 明显以针状冰晶为主，符合该冰晶类型的形成区间，由局地生成；在 $4\text{--}5.9\text{km}$ ($-2.5\sim -9^\circ\text{C}$)，伴随上升气流变化大多为聚合态冰粒子，同时 5.9km (-9°C) 以柱状冰晶为主，与冰晶由柱状转为片状的转换温度相符； 5.7km 存在板状冰晶，可能是由高处掉落。

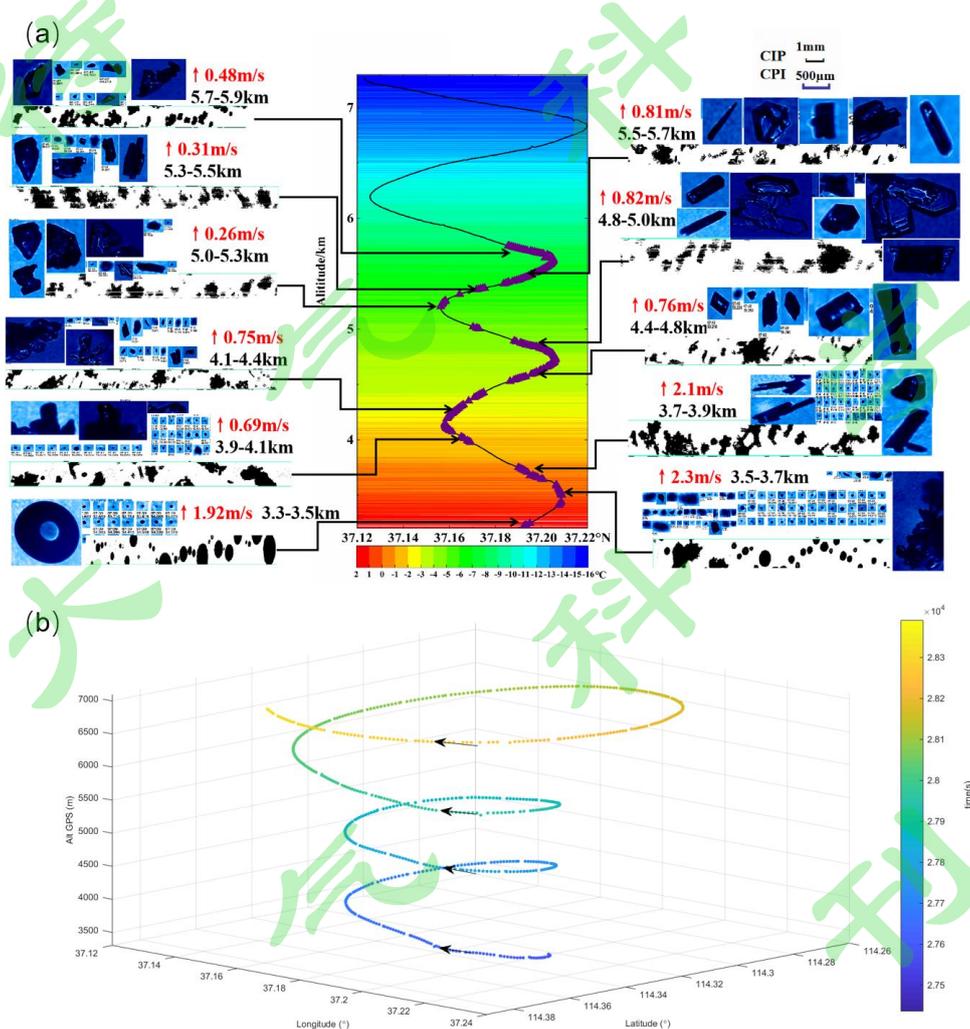


图 5 (a)飞机在 AB 区的垂直探测飞行轨迹(黑线)、温度垂直分布($2\sim -16^\circ\text{C}$)以及每个温度层上升气流区的 CIP、CPI 探头的粒子图像,紫色三角表示上升气流位置,红字为每个温度层平均上升气流速度大小。(b) AB 区三维轨迹图,箭头表示飞行方向

Fig 5 (a) Vertical probe flight trajectory (black line), vertical temperature distribution ($2\sim -16^\circ\text{C}$) and particle images of CIP and CPI probes in each temperature layer updraft zone of the aircraft in AB zone, purple triangle indicates the updraft position, and red letters show the average updraft velocity magnitude in each temperature layer. (b) Three-dimensional trajectory map of AB area, arrows indicate the flight direction

图 6a 显示云内主要存在 5 个上升气流区域，最高的位于 5.7km 处，而垂直方向最大上升气流为 5 m s^{-1} (3.6km 处)，对应 LWC 为 0.66 g m^{-3} 。LWC 主要分布在 6km 以下，在垂直方向上 LWC 较高的区域与上升气流区域相对应。从 CDP 粒子谱图像 (图 6d) 可以看出上升气流区内小粒子浓度高，谱呈双峰结构，谱宽在 $30\mu\text{m}$ 以下。CIP 谱在 0°C 层及以下明显变窄，说明大粒子浓度降低，是因为冰粒子的融化会使其体积变小。在 4.6~5.0km (-3.5~-4.9 $^\circ\text{C}$) 范围内，冰粒子浓度明显升高，与 4.7km 高度上升气流区对应，CIP 粒子图像显示有较大尺度的板状和柱状冰晶，应该是较强的贝吉隆过程使得过冷水转换为冰晶。

综上，云内冰粒子通过冰核核化以及水汽凝华产生冰晶，通过贝吉隆过程、聚并过程和淞附过程增长，冰晶多呈聚合态，随高度增加上升气流区冰粒子主要为片状、针状、柱状。从垂直探测结果来看，4.5km 以上随高度增加小云粒子浓度减少；冰粒子浓度从 0°C 层附近开始增加。由冰粒子谱的垂直分布可以看出，较高浓度的大冰粒子分布在高层，在下落过程中通过凝华过程和聚并过程增长，由于液态水含量较小冰粒子淞附增长过程较弱，形成的冰晶密度小，下落速度慢，融化时间长，造成 0°C 层以下融化现象明显，这与元鹏等 (2019) 得到的结论相同。

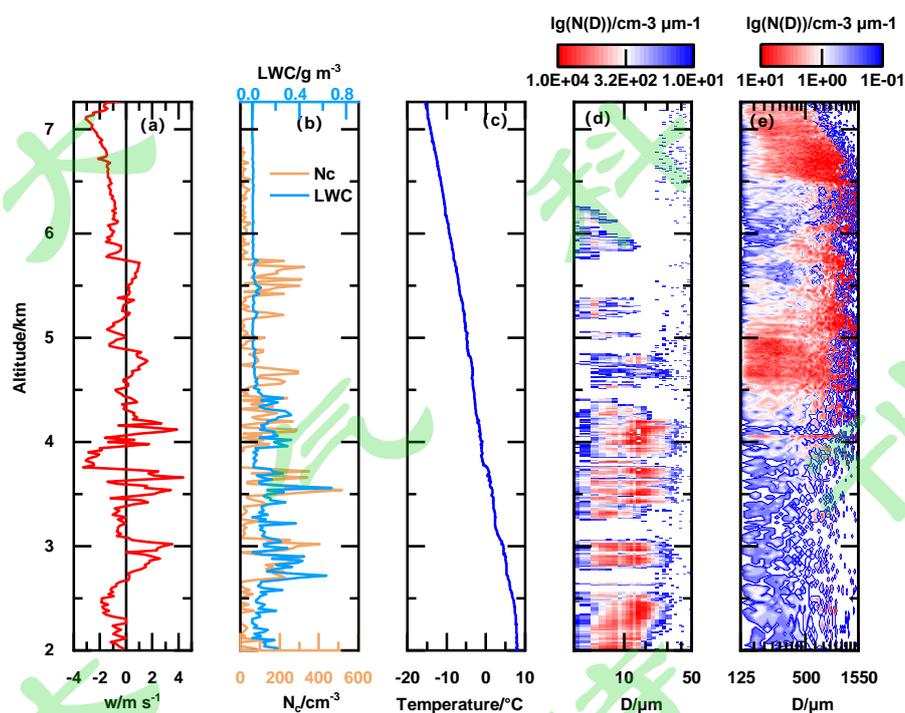


图 6 AB 段垂直探测结果：(a) 垂直气流速度 (w) (黑线为 0 值)；(b) 云滴数浓度 (N_c)、云中液态水含量 (LWC)；(c) 温度 (T)；(d) CDP 粒子谱；(e) CIP 粒子谱

Fig 6 Vertical detection result of section AB:(a) Vertical air velocity (w) (black line is 0 value); (b) Cloud droplet number concentration(N_c), cloud liquid water content(LWC);(c) Temperature (T); (d) CDP particle spectrum; (e) CIP particle spectrum

3.3 上升气流速度与云微物理量的相关性分析

此次飞行探测过程共筛选出 13 个上升气流区，考虑到温度对云滴相态变化的影响，我们挑选了暖云上升气流区微结构进行具体分析。该上升气流区是在云厚 5000m 时云底以上 1600m 处测得的，云此时正处于发展阶段，温度变化范围为 0.5~1.1℃，上升气流速度变化范围为 0.2~5.1m s⁻¹，平均上升气流速度为 2.13m s⁻¹，上升气流速度整体较强。

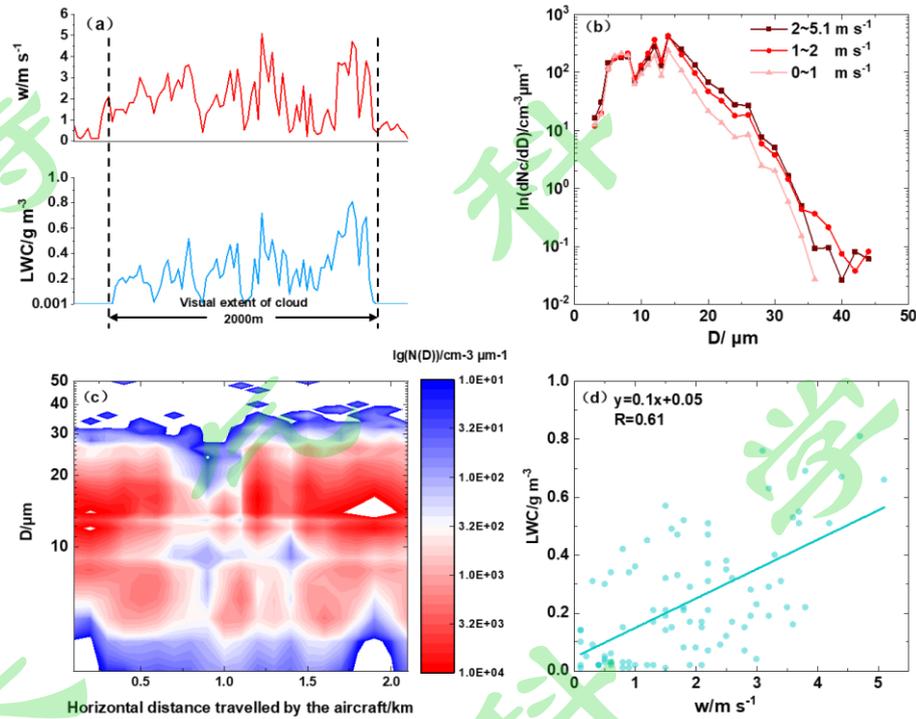


图 7 上升气流区内微物理量分布：(a) 上升气流速度 (w)、云中液态水含量 (LWC)；(b) 平均云滴谱；(c) CDP 粒子谱；(d) 上升气流速度与云中液态水含量相关关系拟合

Fig 7 Distribution of microphysical quantities in the updraft region: (a) Updraft velocity(w), Liquid water content in the cloud(LWC); (b) Average cloud droplet spectrum; (c) CDP particle spectrum; (d) Fitting the correlation between updraft velocity and dispersion; (f) Fitting the correlation between updraft velocity and the content of liquid water in the cloud

由飞机航速可以估算出云内存在水平范围为 2000m 的上升气流区，从上升气流区 LWC 测量结果（图 7a）可以看出，LWC 在 0.01~0.81g m⁻³ 的范围内变化，云内 LWC 水平分布非常不均匀，包含一些高 LWC 区域，LWC 较高的区域与上升气流较强的区域相互对应，图 7d 显示上升气流与 LWC 存在正相关关系（ $r=0.61$ ）。由图 7c 可知 CDP 谱宽不超过 40μm，谱呈双峰分布，主要集中在 20μm 以下的小粒子端。我们将上升气流速度分为 0~1m s⁻¹（弱上升气流速度），1~2m s⁻¹（较强上升气流速度），2~5.1m s⁻¹（强上升气流速度）三档，绘制平均云滴谱(图 7c)发现：不同强弱的上升气流速度云滴谱均呈双峰分布，谱峰分别在 8μm、14μm。强上升气流速度的谱宽大于弱上升气流速度的，这是因为上升气流速度的增大促进

过饱和度增加使云凝结核活化，云滴数浓度增大，促进凝结增长使云滴尺度增大。

暖云上升气流区内云滴谱分布显示了不同上升气流速度大小的影响，我们还深入研究了上升气流速度与下沉气流速度的影响，绘制了不同大小垂直气流速度下云滴谱的分布（图 8），其中强上升气流速度大小在 $2\sim 6\text{ m s}^{-1}$ ，强下沉气流在 $-2\sim -6\text{ m s}^{-1}$ ，弱垂直气流速度绝对值小于 1 m s^{-1} 。对于不同大小垂直气流速度进行了 Γ 函数拟合，发现强垂直气流的云粒子谱更符合 Γ 函数分布。图 8 表明强垂直气流速度条件下的云滴数浓度大于弱垂直气流速度的，更强的垂直速度导致云中存在更大的水汽过饱和度，垂直的空气运动还可能导致云层与云层下的空气层交换，使更多气溶胶进入云内，这些气溶胶能够活化成为 CCN 并产生更多的云滴。同时发现强垂直气流速度的最大云滴尺度大于弱垂直气流速度，强的垂直气流速度会影响云内悬浮降水粒子的大小，进而促进碰并增长过程，使得云滴长大。

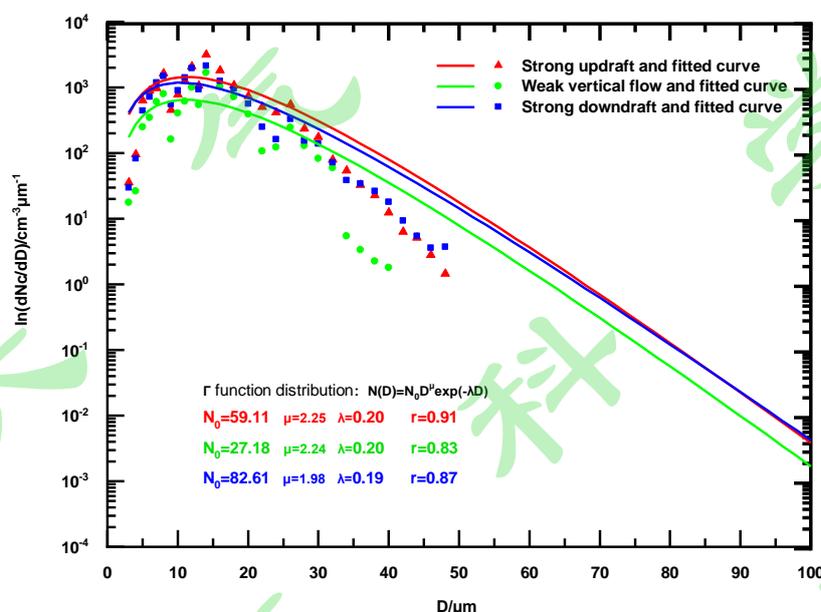


图 8 不同垂直气流速度的云滴谱分布

Fig8 Cloud droplet spectrum distribution of different vertical air velocity

Chen 等（2016）研究发现给定上升气流速度时云滴离散度随气溶胶数浓度增加而增加，并区分了云内气溶胶限制区和上升气流速度限制区。因此随着上升气流速度增加，云滴有效半径（ r_e ）的变化除了受含水量影响外，也可能受气溶胶影响，我们综合分析了垂直气流速度与气溶胶数浓度对云微物理量的影响。当大气中含有较多气溶胶（受到污染等）时，若垂直气流速度很大，就可能有更多气溶胶被输送到云内，并充当 CCN 来相互争夺水，这可能使得云滴尺寸变小。图 9 进一步研究了 r_e 随气溶胶数浓度和垂直气流速度的变化情况，当 $-2 < w < 2\text{ m s}^{-1}$ 时， r_e 随着 w 的增大而增大；当 $N_a < 400\text{ cm}^{-3}$ 时， r_e 随着 N_a 的增加而略微增加，

随后随气溶胶的增加而减少。这与 Yang 等（2019）分析积云时得到的结论相似：云滴大小受气溶胶量和温度影响，因为更强的上升气流可以将大滴携带到空中。

继 Yang 等（2019）之后，我们推导出了云滴有效半径 r_e 与气溶胶数浓度 N_a 、垂直气流速度 w 之间的定量关系式：

$$r_e = 7.584N_a^{0.008}\exp(0.0134w) \quad (2)$$

式 2 建立了积层混合云内气溶胶浓度和垂直气流速度与云滴有效半径的关系，这有利于改进模式对云滴有效半径的模拟效果。

整体来看，在 LWC 充足的情况下，气溶胶的增加可以增加云滴数浓度，强烈的垂直气流可以增加碰并效率从而导致云滴有效半径增大。相比之下，若 LWC 含量较低，气溶胶的增加以及强烈的垂直运动可能会导致 Twomey 效应而造成更小的云滴有效半径。

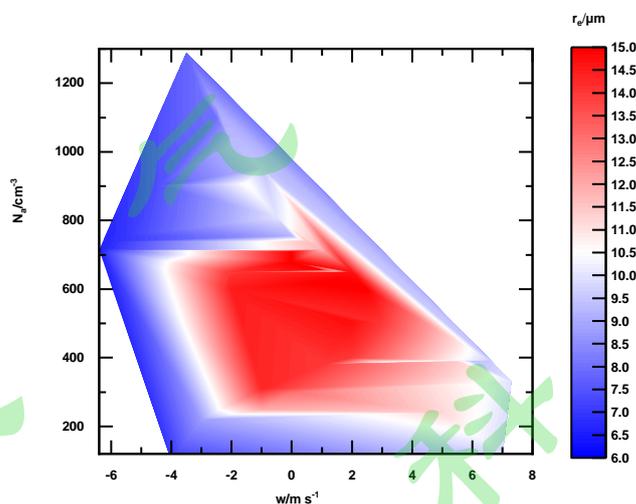


图 9 云滴有效半径随垂直速度和气溶胶数浓度变化

Fig 9 The effective radius of cloud droplets varies with vertical velocity and aerosol number concentration

4 总结

本文对 2017 年 5 月 22 日华北地区降水云系飞机观测资料进行了研究，就上升气流速度分布特征、上升气流区内云微结构及二者之间的关系。得到了以下结论：

(1) 华北地区飞机观测降水云系中最大上升气流速度为 7.7m s^{-1} ，上升气流呈抛物线型分布：云中上升气流达到最大 ($3.64\pm 2\text{m s}^{-1}$)，云底上升气流较小 ($0.75\pm 0.52\text{m s}^{-1}$)，云顶最小 ($0.32\pm 0.29\text{m s}^{-1}$)。

(2) 上升气流区内随高度增加冰晶形状依次为片状、针状、柱状。不同于层状云的播撒-供给机制，云内大量冰晶分布在高层，冰粒子主要通过聚并过程增长， 0°C 层以下融化现

象明显。

(3) 在云底以上 1600m 处(云厚 5000m)存在水平范围至少为 2000m 的云内上升气流区。暖云上升气流区内,云液态水含量水平分布非常不均匀,但是上升气流速度的变化与液态水含量的变化有非常好的一致性,相关系数为 0.6。

(4) 分析不同大小垂直气流速度云滴谱分布,发现强垂直气流的云粒子谱更符合 Γ 函数分布,强垂直气流条件下云滴数浓度、最大云滴直径大于弱上升气流相应的数值。导出了云滴有效半径与垂直气流速度和气溶胶浓度的关系式,发现在 LWC 充足的情况下,气溶胶的增加可以增加云滴数浓度,强烈的垂直气流可以增加碰并效率从而导致云滴有效半径增大。

致谢 本文所使用的飞机观测资料由河北省人工影响天气领导小组办公室提供,特此感谢。

参考文献

- Adebiyi A A , Zuidema P , Chang I , et al. 2020. Mid-level clouds are frequent above the southeast Atlantic stratocumulus clouds[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(18):11025-11043. doi: 10.5194/acp-20-11025-2020
- Beswick K M , Gallagher M W , Webb A R , et al. 2007. Application of the Aventech AIMMS20AQ airborne probe for turbulence measurements during the Convective Storm Initiation Project[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 8:5449-5463. doi:10.5194/acpd-7-3519-2007
- Bühl, Johannes; Seifert, Patric; Engelmann, Ronny, et al. 2019. Impact of vertical air motions on ice formation rate in mixed-phase cloud layers[J]. *Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 36-. doi:10.1038/s41612-019-0092-6
- 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
- Fleishauer R P , Larson V E , Haar T H V . 2002. Observed Microphysical Structure of Midlevel, Mixed-Phase Clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(11):1779-1804. doi: 10.1175/1520-0469(2002)059<1779:CO>2
- 范焯,郭学良,张佃国,等. 2010.北京及周边地区 2004 年 8、9 月层积云结构及谱分析飞机探测研究[J]. *大气科学*, 34(06):1187-1200. FAN Ye, GUO Xueliang, ZHANG Dianguo, et al. 2010. Airborne Particle Measuring System Measurement on Structure and Size Distribution of Stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and Its Surrounding Areas[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese)*, 34(6): 1187-1200. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.12
- 顾震潮,詹丽珊. 1962.起伏条件下云雾的重力碰并生长[J]. *气象学报*, (04):301-307. Gu Zhenchao , Zhan Lishan. 1962. On the growth of the droplets under gravitational coalescence in a fluctuating environment [J]. *Acta Meteorologica Sinica(in Chinese)*, (04): 301-307. doi: 10.11676/qxxb1962.029
- 顾震潮. 1980.云雾降水物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 215pp. Gu Zhenchao. 1980. Physical basis of cloud, fog and precipitation(in Chinese)[M]. Beijing: Science Press, 215pp.
- Hobbs P V , Persson P . 1982. The Mesoscale and Microscale Structure and organization of Clouds and precipitation in Midlatitude Cyclones. Part V: The Substructure of Narrow Cold-Frontal Rainbands[J]. *Journal*

- of the Atmospheric Sciences, 39(2):280-295. doi: 10.1175/1520-0469(1982)0392.0.CO;2
- Hou T , Lei H , Youjiang H E , et al. 2021. Aircraft Measurements of the Microphysical Properties of Stratiform Clouds with Embedded Convection[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(6):17. doi: 10.1007/s00376-021-0287-8
- Hudson J G, Noble S, Jha V. 2012. Cloud droplet spectral width relationship to CCN spectra and vertical velocity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 117(D11), D11211-. doi:10.1029/2012jd017546
- 靳雨晨, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2021. 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[J]. *大气科学*, 45(5): 981–993 .JIN Yuchen, NIU Shengjie, LÜ Jingjing, et al. 2021. Study of the Microphysical Structural Characteristics and Cloud–Rain Autoconversion Threshold Function of Stratiform Warm Clouds in Jiangxi [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(5): 981–993 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2102.20166 shu
- Lloyd G , Choullarton T W , Bower K N , et al. 2018. In-Situ Measurements of Cloud Microphysical and Aerosol Properties during the Breakup of Stratocumulus Cloud Layers in Cold Air Outbreaks over the North Atlantic[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 18(23):17191-17206. doi: 10.5194/acp-18-17191-2018
- Locatelli J D, Hobbs P V. 1987. The Mesoscale and Microscale Structure and Organization of Clouds and Precipitation in Midlatitude Cyclones. XIII: Structure of a Warm Front[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44(16), 2290–2309. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<2290:tmamsa>2.0.co;2
- Lu C , Liu Y , Niu S , et al. 2012. Observed impacts of vertical velocity on cloud microphysics and implications for aerosol indirect effects[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(21), n/a–n/a. doi:10.1029/2012gl053599
- Lucas C , Zipser E J , Lemone M A . 1994. Vertical Velocity in Oceanic Convection off Tropical Australia[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51(21), 3183–3193. doi:10.1175/1520-0469(1994)051<3183:vvioco>2.0.co;2
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. *大气科学*, 32(4):967-974. Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. *Advances in Cloud and Precipitation Physics and Weather Modification in Recent Years*[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 967-974. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.21
- Patade S, Shete S, Malap N, et al. 2016. Observational and simulated cloud microphysical features of rain formation in the mixed phase clouds observed during CAIPEEX [J]. *Atmospheric Research*, 169:32–45. doi:10.1016/j.atmosres.2015.09.018
- Peng, Yiran; Lohmann, Ulrike; Leaitch, Richard .2005. Importance of vertical velocity variations in the cloud droplet nucleation process of marine stratus clouds. *Journal of Geophysical Research*, 110(D21), D21213-. doi:10.1029/2004jd004922
- 元鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 2019. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特征[J]. *大气科学*, v.43(06):178-197. QI Peng, GUO Xueliang, LU Guangxian, et al. 2019. Aircraft Measurements of a Stable Stratiform Cloud with Embedded Convection in Eastern Taihang Mountain of North China: Characteristics of Embedded Convection and Melting Layer Structure[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(6): 1365-1384. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18220
- Stark D, Colle B A, Yuter S E. 2013. Observed microphysical evolution for two east coast winter storms and the associated snow bands [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141(6): 2037–2057. doi:10.1175/mwr-d-12-00276.1
- 孙玉稳, 董晓波, 李宝东, 等. 2019. 太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究 [J]. *高原气象*, 2019, 38(05):971-982. Sun Yuwen, Dong Xiaobo, Li Baodong, et al. 2019. The physical properties and Seeding potential analysis of a Low Trough cold front cloud system at mountain Taihang based on aircraft observations[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 38(5):971-982. doi:

CNKI:SUN:GYQX.0.2019-05-006

- Warner J . 1969.The Microstructure of Cumulus Cloud. Part I. General Features of the Droplet Spectrum[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 26(5):1049-1059.doi: 10.1175/1520-0469(1969)026<0.CO;2
- 王谦,游来光,胡志晋.1987.新疆乌鲁木齐地区冬季层积云研究——一个例的观测结果与分析[J].气象学报,(1):2-12. Wang Qian, You Laiguang, Hu Zhijin.1987.The Study on Stratocumulus Clouds in Winter in Urumqi, Xinjiang,China: Structure and Evolution[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), (1): 2-12. doi: 10.11676/qxxb1987.001
- 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(in Chinese), 40(05):686-696.doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161012002
- 徐华英,顾震潮.1963.起伏条件下重力碰并造成的暖性薄云降水[J].气象学报.(1):108-114. Xu Huaying,Gu Zhenchao.1963.On The formation of the precipitation element in a shallow warm-cloud[J].Acta Meteorologica Sinica(in Chinese)(1): 108-114. doi: 10.11676/qxxb1963.009
- Yang Y , Zhao C , Dong X , et al.2019. Toward understanding the process-level impacts of aerosols on microphysical properties of shallow cumulus cloud using aircraft observations[J]. Atmospheric Research, 221(JUN.):27-33.doi:10.1016/j.atmosres.2019.01.027
- Yeom J M , Yum S S , Liu Y , et al. 2017. A study on the entrainment and mixing process in the continental stratocumulus clouds measured during the RACORO campaign[J]. Atmospheric Research, 194(sep.):89-99. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.04.028
- 杨洁帆,胡向峰,雷恒池,等.2021.太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究[J].大气科学,45(01):88-106. YANG Jiefan, HU Xiangfeng, LEI Hengchi, et al. 2021. Airborne Observations of Microphysical Characteristics of Stratiform Cloud Over Eastern Side of Taihang Mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 88–106 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19202
- Zhao C, Tie X, 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).doi: 10.1029/2006GL026653
- Zhu S , Guo X , Lu G , et al. 2014. Ice Crystal Habits and Growth Processes in Stratiform Clouds with Embedded Convection Examined through Aircraft Observation in Northern China[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 72(5):150127131640004. doi: 10.1175/JAS-D-14-0194.1