基于多源资料的积层混合云降水微物理 1 特征 2 3 王洪^{1,2,3} 王文青^{1,2} 张佃国 干俊 4 5 1) 山东省气象科学研究所, 济南 250031 6 2) 山东省人民政府人工影响天气办公室, 济南 250031 3) 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081 7 8 西安华腾微波有限责任公司,西安 710119 4) 9 要 10 摘 11 基于地基云雷达、微雨雷达和天气雷达等遥测设备观测资料,结合挂载 KPR 云雷达和 DMT 粒子测量 12 系统的飞机平台,详细分析了山东积层混合云降水过程的云降水微物理结构特征。结果表明,积层混合 13 云降水过程呈现层状云和对流云降水特征。零度层以上,5~6km 高度层内,对流云降水多普勒速度和谱 14 宽均大于层状云,说明对流云降水环境垂直气流、粒子尺度等均大于层状云。对流云降水,云雷达和微 雨雷达时空剖面上出现由衰减造成的"V"字形缺口,云雷达衰减程度大于微雨雷达,且随高度增加,衰 15 16 减越大。层状云降水,零度层亮带附近,雷达反射率因子跃增高度比多普勒速度高 80 m,多普勒速度跃 17 增高度又比谱宽高 20 m。降水云系零度层附近降水机制复杂,粒子形态有辐枝冰晶聚合物、针状冰晶聚 18 合物和云滴;零度层以上,5~6km处,对流云降水的多普勒速度和谱宽均大于层状云降水,即对流云降 19 水环境垂直气流、粒子尺度范围等均大于层状云降水。 20 关键词 积层混合云 微物理特征 微雨雷达 云雷达 机载观测 21 文章编号 中图分类号 P401 文献标识码 A 22 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2107.21043 23

收稿日期 2021-03-12; 网络预出版日期:

作者简介 王洪,博士,高级工程师,主要从事云降水物理的研究。E-mail:wh42233691@163.com 通讯作者 张佃国,男,1977 年出生,高级工程师,主要是从事人工影响天气和云物理研究。E-mail:zdg131415@sohu.com 资助项目 山东省自然科学基金项目 ZR2020MD054,国家重点研发计划项目 2018YFC1507903,国家自然科学基金 41875172、42075192,中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题 2019Z01607,山东省气象局项目 2020sdqxz08 Funded by Shandong Provincial Natural Science Foundation(Grant ZR2020MD054), National Key Research and Development Program of China(Grant 2018YFC1507903), National Natural Science Foundation of China (Grants 41875172 and 42075192), Open Project of Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration (Grant 2019Z01607), Program of Shandong Province Meteorological Bureau (Grant 2020sdqxz08) 24 1 引言

积层混合云指大范围层状云中镶嵌多个对流单体,其生命周期长,常常带来大范围的持 25 续性或间歇性降水。积层混合云是我国北方地区重要的降水系统(亓鹏, 2019a),也是缓解 26 北方春季干旱开展人工增雨的主要作业对象(林磊和姚展予,2011)。在积层混合云降水中, 27 大范围湿润的层状云为对流云提供饱和的水汽条件,伴随着层状云中的水汽辐合场,促使对 28 流云的发展以及降水的维持(洪延超, 1996a, 1996b)。因此,积层混合云降水的效率较高, 29 而针对积层混合云降水的研究一直是云降水研究的重点和难点。近年来,随着利用空中水资 30 31 源需求的增加,积层混合云系作为一种增雨潜力较大的降水云系,研究其云微物理结构和降 水机制是研究人工增雨作业及其效果评估的有效途径,对提高我国北方地区人工影响天气水 32 平有重要意义。 33

对积层混合云宏观特征的研究表明,大量降水云系的雷达反射率都表现出积层混合云降 34 35 水云系的回波特征,如层状云前后的对流云带、多单体及镶嵌着对流云回波的层云等 (Anagnostou, 2004)。而我国北方的积层混合云降水云系大多是西风带长波系统及副热带 36 环流系统相互作用产生的,冷锋、切变线和低槽等天气系统往往是积层混合云降水的成因(林 37 磊和姚展予,2011)。对积层混合云微物理特征的研究,我国不同地区表现出不同特征。对 38 39 东北的层状云分析发现云中冰晶浓度和云顶温度有关(孙可富和游来光, 1965),对河套低 40 压的降水性层状云做了 21 架次的飞机探测,发现-10℃以上很少有液态水存在,降水强度与 云层厚度、暖云厚度、云底温度及液态水含量的相关性较好(汪学林等, 1982)。环北京地 41 区的3架飞机对华北地区积层混合云进行联合探测,结果表明,云顶温度、云中所处位置等 42 43 因素均对云内冰晶的形状、分布及增长有影响(朱士超,2014)。国外学者认为认为浅对流 云系上部的冰晶在宽冷锋雨带及暖锋雨带降水过程中起到关键的作用。高层向下播撒的冰晶 44 在经过下层供给云区时聚合水汽增长(Herzegh and Hobbs, 1980)。 45

46 云的生消演变通常很难迅速在宏观特性上有所体现,要研究云滴的核化、凝结凝华增长、 47 蒸发、碰并等云微物理过程,就需要用微观特征参数来表示不同阶段的云特性,从而更深层 次揭示云微物理过程。目前,基于各种人影特种观测设备以及常规探测仪器开展的观测为云 48 降水的研究积累了大量宝贵的资料,但是受仪器探测原理的制约,很难找出一种设备适用于 49 所有类型云的观测,都有自身的观测优势和缺点。毫米波云雷达可以穿透含水量高的混合相 50 51 云,对弱降水云和非降水云也有较高的灵敏性(Kropfli et al., 1995),是探测云和弱降水三维 52 结构和微物理参数非常重要的手段(刘黎平等,2014),机载和基地云雷达的联合应用可以 53 弥补和验证两者的空间资料,但由于降水粒子对毫米波云雷达的衰减(吴举秀等,2015),

限制了其在强降水中的应用。微雨雷达可以弥补一般的圆锥扫描式雷达在底层资料的不足, 54 得到垂直方向上的雨滴谱资料,但其反演算法受米散射、垂直气流(王洪等,2017;王洪等, 55 2020)以及固态降水 (Peters et al., 2002)等的影响。尤其是当近地层环境下沉气流大于 2.00 56 m s⁻¹时,理论上反演的直径超出了微雨雷达探测的阈值,雨滴谱数据不可用。因此,上述 57 误差源限制了微雨雷达产品在零度层以上、强垂直气流以及降雪等场景的应用。地基天气雷 58 59 达S波长信号的衰减虽然很少(张培昌等,2001),但影响其可靠性的因素中,除了常见 的超折射、地物杂波等, 雷达反射率本身的也存在误差(张帅等, 2019), 再者, 相对于 60 Ka和 Ku波长的雷达,S波长天气雷达的时空分辨率也不占优势。各种遥感设备的联合观测 61 能更准确地了解云特性,更好地研究云物理过程。为人工影响天气作业及其研究提供全方位 62 的观测资料,对于把握人工影响天气作业时机和条件,提高人工影响天气作业的效率和科学 63 性非常重要;为实现云的业务自动化、精细化观测提供基础支持(黄佳欢,2016)。 64

65 积层混合云降水中不同云系的微物理特征反映了云动力学与微物理学之间的相互制约, 对了解降水产生的物理机制有重要作用。本文选取 2018 年 4 月 22 日一次典型积层混合云降 66 水,采用地基云雷达、微雨雷达、S 波段天气雷达等地基观测手段,配合机载 Ka 波段云雷 67 达和 DMT 云降水粒子探测系统等机载探测资料获取的云微物理参数,张佃国等(2020)基 68 69 于机载探测设备对本个例对流泡中的微物理参数进行了详细统计和分析,本文以地基探测设 70 备为主, 深入分析本个例中层状云降水、对流云降水不同阶段的微物理特征以及零度层亮带 的微物理特征,剖析典型积层混合云降水微物理过程的发展演变特征,深入研究积层混合云 71 降水的垂直结构,以期对积层混合云降水微物理过程有更深入的认识,对云的观测及揭示积 72 73 层混合云降水生消演变和大气中热力、动力过程提供科技支撑。

74

75 2 仪器介绍





76 2.1 地基观测设备

77 地基观测设备有 8 mm 波长云雷达, 1.25 cm 波长微雨雷达, 以及 S 波段天气雷达。其
78 中云雷达和微雨雷达安装在山东省气象局楼顶, 为同址观测, S 波段雷达位于山东齐河, 距
79 离云雷达和微雨雷达的直线距离约 20 km。

80 地基云雷达为 HT101 型全固态 Ka 波段测云仪,中心频率 35 GHz,天线口径 2.4 m,采
81 用全固态、准连续波体制和脉冲压缩的信号,顶空垂直探测,获取云顶高、云底高、雷达反
82 射率因子、多普勒速度和谱宽等,实现云降水连续演变过程的探测。

83 微雨雷达波长 1.25 cm (K 波段, 24.23Ghz),采用连续调频技术 (FM-CW),电磁波

84 在调波器里震荡后发射,传输的电磁波强度约为 50 mW,天线直径约为 60 cm。波束宽度
85 为 2°,在振荡器内将散射回来的电磁波在信号处理器中比较其频率的变化,即多普勒频移,
86 可以得到降水粒子的下落速度。假设环境空气的垂直速度为零,根据液态雨滴直径与下落末
87 速之间的关系可以获取雨滴谱的垂直分布,通过雨滴谱可反演得到雷达反射率因子、雨强、
88 液态含水量等降水参数的廓线信息(王洪等,2017)。为避免垂直气流和冰相对微雨雷达反
89 演参数的影响,只分析层状云降水时零度层以下的微雨雷达参数。

90 S 波段天气雷达为 CINRAD/SA 多普勒天气雷达,波长 10 cm,采用 VCP21 模式进行
 91 观测,9个仰角,体扫时间约6 min。上述雷达的具体参数如表 1.

92

93

94

表1 观测设备参数

Table 1 Parameters of observation equipment 微雨雷达 地基云雷达 天气雷达 机载云雷达 波长 10 cm 1.25 cm 8 mm 8 mm 时间分辨率 5 s 0.2 S 1 min 6 min 垂直分辨率 200 m 9个仰角扫描 30~40 m 30 m 最大探测高度 6,000 m 15,810 m 飞机轨迹上下约 7,582 m 11.9 km 垂直距离库个数 20 527 640

95 2.2 机载观测设备

96 机载 Ka 波段云雷达(Airborne Ka-Band Precipitation Cloud Radar, KPR)和 DMT
97 (Droplet Measurement Technologies)粒子测量系统为同步观测,分别挂载于空中国王 350
98 飞机机翼两侧下方,云雷达由美国 Prosensing 公司生产,是国内外先进的云物理探测装备。
99 KPR 工作波段为 Ka 波段,工作频率 35 GHz,发射脉冲宽度为 20 µs。采用线性极化平板
100 阵列,两根天线同时向上和向下发生脉冲对,得到飞机上下剖面的雷达反射率因子、多普勒
101 速度以及谱宽等云微物理信息,其参数与三种地基雷达比对如表 1 所示。

102 机载 DMT 粒子测量系统,包括云凝结核计数器 CCN (Cloud Condensation Nuclei
103 Counter)、被动腔气溶胶探头 PCASP (Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe)、云粒
104 子组合探头 CCP (Cloud Combination Probe) (包括云粒子探头 (CDP, Cloud Droplet Probe)
105 和 云 粒 子 图 像 探 头 (CIP,Cloud Imaging Probe))、降水粒子探头 PIP (Precipitation
106 Imaging Probe)、综合气象要素测量系统 AIMMS30 (Aircraft-Integrated Meteorological

107 Measurement System),可获取云中粒子二维图像,气溶胶、云滴、雨滴等云微物理参数及相

108 关宏观信息(详细见表 2)。

109 表 2 机载 DMT 粒子测量设备参数

110	Table 2 Parameters of airborne	Sal	
	仪器名称	量程	分辨率
	云粒子组合探头 CCP	CDP: 2~50 um; CIP: 25~1550 um; LWC: 0.01~3 g m ³	粒子: 2 um; 25 um; LWC: 0.01g m ³
	降水粒子探头 PIP	100~6400 um	100 um
	综合气象要素测量系统	高度 0~15 km; 温度	温度 0.05℃; 相对
	AIMMS30	-20~40℃;相对湿度 0~100%	湿度 2%

111 地基云雷达和机载云雷达均为垂直观测,因此多普勒速度即为粒子的垂直速度,包含了
112 粒子本身的下落速度和环境空气的垂直速度,而与环境空气的水平速度无关;忽略湍流的前
113 提下,谱宽主要反映了散射体内部降水粒子下落速度的差异和空气湍流的差异(刘黎平,
114 2012)。其中多普勒速度值朝向雷达为负,远离雷达为正。

115

116 3. 数据处理

为了便于资料分析,对机载云雷达进行了地面回波滤除与高度订正。图 1a 给出了机载 117 云雷达原始反射率因子随时空变化图,可以看出机载云雷达是以飞机飞行高度为基准(即零 118 点高度),上下两束脉冲分别对天顶和地面进行垂直观测,图 1a 中 0 km 高度的水平直线即 119 为飞机的飞行轨迹,轨迹上方高度为正,轨迹下方高度为负。轨迹上下雷达回波即为飞机飞 120 行过程中上下云层的回波,-5 km 左右强回波为地面回波。分析发现地面强回波有一定的规 121 律可循,地面强回波值大小不固定,其值一般为 60 dBZ 以上,另外,且其显著的特点是以 122 地面为基准,地面上下同样库数的距离内存在同样强度大小的雷达反射率因子。为了直观地 123 124 分析不同高度上机载云雷达的反射率因子的时空变化,基于飞机的飞行高度,对机载云雷达 回波进行高度订正和地面回波去除。 125

126 首先剔除沿飞机飞行轨迹上的强回波,即剔除第 316~325 个距离库上的雷达反射率因
127 子;其次进行地面强回波订正,已知飞机飞行的海拔高度为h,原始回波的探测高度为 X_i
128 (i=1~640, i 为第 i 个距离库,下同),计算 h+X_i=0 时的距离库 I,将 Z(I-10:I+10)的值赋空,
129 即剔除该值;最后进行回波高度订正,在前两步基础上,已知飞机飞行的海拔高度为 h,原
130 始回波的探测高度为 X_i (i=1~640),则实际回波的相对于地面的高度 H_i=h+X_i(i=1~640),机

131 载云雷达探测到的雷达反射率因子 Z_i对应的高度则由原来的 X_i转换为 H_i(i=1~640)。经过上
132 述三步订正后得到图 1b 机载云雷达反射率因子在时间和高度轴上的剖面,图中白色曲线即

133 为飞机的飞行高度,此处不进行插值处理,方便更好地了解每个时次飞机高度。



Fig.1 (a)The raw radar reflectivity presented in time vs height coordinates measured by airborne cloud
radar.(b) is same as (a), but for the corrected radar reflectivity.

139 在对机载云雷达进行了地面回波滤除与高度订正的基础上,本文直接使用了微雨雷达
140 和云雷达的反演产品,如雷达反射率因子、多普勒速度和谱宽等参数,检验不同波长雷达在
141 探测对流云降水、层状云降水时的能力,讨论各种遥感设备联合观测的必要性。

142 4 天气背景

134

135

136

143 2018年4月21~22日受低层倒槽,低空急流及低层切变线共同影响,一次积层混合云
144 降水影响山东,云系自西向东移动。此次降水从21日16时(北京时,下同)开始,持续至
145 22日16时,持续约24小时,济南地区累计降水量57.8 mm。

146 山东省人工影响天气办公室租用探测飞机空中国王 350 (编号 10JQ)于4月22日上午147 实施飞机探测试验,探测飞行轨迹及地基遥感探测设备位置如图2所示。其中黑色实线为飞

148 机飞行轨迹,箭头为飞机飞行方向;黑色三角位云雷达、微雨雷达的位置;黑色实心圆代表149 起降机场(济南遥墙机场)位置。



150

151 图 2 2018 年 4 月 22 日 10:20 齐河天气雷达组合反射率,其中黑色实线为飞机飞行轨迹,箭头代表了飞

152 机的飞行方向;黑色三角位云雷达、微雨雷达的位置;黑色实心圆代表起降机场(遥墙机场)位置。

153 Fig.2 Composite reflectivity factor of Qihe weather radar at 10:20 on April 22, 2018. Unit: dBZ. The black

154 solid line is the flight path of the aircraft, and the arrow represents the flight direction of the aircraft. The

155 black triangular shows the positions of cloud radar and micro rain radar; The black solid circle represents

156 the location of the takeoff and landing airport (Jinan Yaoqiang Airport).

157 图 3 给出了飞机飞行高度、机载 AIMMS30 系统探测到的温度随时间变化趋势,飞机从
158 济南遥墙机场起飞后,高度直线上升,9:45 左右上升到此次飞行最大高度 4900m,2018 年
159 4月 22 日 08 时 L 波段探空显示 0℃层高度在 4202m,4900m 高度温度在-6℃左右。值得注
160 意的是,9:33 飞机处于地面开机状态,起飞后温度下降了约 3℃,迅速回升后又开始持续
161 下降,从而造成了温度的"V"字型。结合探空温度廓线和附近微波辐射计温度廓线(图略)
162 可知,此次过程山东中部区域在 500 m 至 1 km 多的高度上存在逆温层,即随着高度的增加,
163 温度经历"降低一升高——持续降低"的过程。







- 164 165
- 166 167

168 5 结果分析

169 5.1 不同降水类型微物理过程

170 2018年4月21日16:00时至4月22日16:00时降水,济南地区云雷达和微雨雷达均观
测到一个长时间跨度层状云降水,镶嵌着短时对流云降水。该时段,天气雷达上可见大范围
积层混合云系自西南向东北经过济南地区,其中短时强降水雨强最大可达30mmh⁻¹。图4
(a~c)给出了天气雷达、微雨雷达、地基云雷达在山东省气象局这一位置雷达反射率因子
随时空变化趋势,可以看出三者随时间变化大体趋势一致,微雨雷达和天气雷达由于探测高
度的限制,无法观测云顶信息。从云雷达时空剖面可看出云顶高度随时间演变,4月22日
176 08时开始,云顶高度开始下降,12时以后降水趋于减弱至结束。

177 由图 4(a~c)可知, 三部雷达在约 4 km 高度上均出现零度层亮带, 微雨雷达在 3.5 km~4 km高度上存在零度层亮带,厚度约500m;云雷达零度层雷达反射率因子梯度较大,厚度 178 难辨,与亮带下部降水雷达反射率因子值相当。天气雷达虽然也能观测到零度层亮带,但由 179 180 于其垂直分辨率限制,亮带上下边界模糊。值得注意的是,地基云雷达为脉冲压缩雷达,其 发射宽的脉冲波,在接收机中对收到的回波信号加以压缩处理,以得到窄脉冲。脉冲压缩能 181 解决距离分辨率和作用距离之间的矛盾。在宽窄脉冲切换时因为不同的脉宽在同一距离库上 182 探测灵敏度不同,会形成脉冲拼接缝,文中地基云雷达采用1us、5us和20us的组合脉冲 183 184 压缩到 0.2 us 进行探测。综合考虑作用距离、分辨率、以及灵敏度之间的特点,采用在 1.2 km 185 和 3.6 km 对雷达反射率因子进行拼接(图 4b),而速度和谱宽则由频率偏移计算得到,因 186 此不存在拼接的问题。此个例中,从地基云雷达的粒子下落速度(图 8b)和谱宽(图 8c)

中可以看到, 雷达反射率因子在 3.6 km 高度的拼接缝与零度层亮带重合。相对于云雷达, 187 188 微雨雷达在观测零度层亮带的厚度上较为明显,因此,微雨雷达可以用来判断零度层亮带厚 度(Wang et al., 2017)。零度层亮带以下, 雷达反射率因子呈增大趋势。分析时间序列表明, 189 零度层亮带间歇性缺失,即中间间歇性的存在对流性降水且降水不连续。值得注意 4 月 21 190 日 23:10~23:45 时段,天气雷达反射率因子较大,最大可达 40 dBZ,此时地面雨强最大为 191 25 mm h⁻¹(图 4d), 雷达反射率因子大值区一直伸展到 7.2 km, 7.2 km 以上由于天气雷达 192 在微雨雷达这个位置探测高度限制,无法探测到云顶,FY2 卫星反演云顶高度(ztop)显示 193 微雨雷达这个位置云顶高度大于11 km (图 4e),说明此时对流发展旺盛,云顶高度较高, 194 195 云顶温度(ttop)较低,约为-60 ℃(图4e)。而同样时段(23:10~23:45)微雨雷达反射率 因子时空剖面显示 2.5 km 以上雷达反射率因子呈 "V" 字形缺口; 地基云雷达反射率因子时 196 空剖面显示1km以上雷达反射率因子呈"V"字形缺口,说明此时间段降水粒子的尺度较 197 大,对微雨雷达和云雷达衰减较严重,云雷达衰减程度大于微雨雷达,即波长越短受衰减影 198 响越大。可见,在雨强较大时,云雷达和微雨雷达由于波长限制,受粒子衰减影响较大,文 199 200 中进一步验证了随着高度升高,衰减影响越大(孙豪等,2017)。图4(f~i)分别给出了 23:10~23:45 时段微雨雷达、地基云雷达、天气雷达和地面雨强的放大图,在此时段,天气 201 雷达的最大反射率因子达到了 46.87 dBZ, 能观测到的云顶回波高度在 7.6 km 以上 (图 4h), 202 地面雨强 24 mm h⁻¹(图 4i),而微雨雷达和地基云雷达分别只能观测到 2.5 km(图 4f)和 203 1 km (图 4g), 2.5 km 高度以下, 微雨雷达的最大反射率因子为 42.89 dBZ; 1 km 高度以 204 下,地基云雷达的最大反射率因子为12 dBZ。 205

IN



X



207 图 4(a) 微雨雷达的反射率因子时空演变趋势; (b) 地基云雷达的反射率因子时空演变趋势; (c) 天气雷
208 达的反射率因子时空演变趋势; (d) 微雨雷达探测到的地面雨强随时间演变; (e) FY2 卫星反演的云顶高
209 度(ztop)、云顶温度(ttop)随时间演变; (f)[~](i)分别给出了 23:10[~]23:45 时段微雨雷达、地基云雷达、

210 天气雷达和地面雨强

211 Fig. 4 Radar reflectivity presented in time vs height coordinates during the passage of the rain period over 212 the CINRAD-SA Doppler weather radar(a) micro rain radar (b) and ground-based cloud radar (c). The 213 CINRAD-SA Doppler weather radar, located at Jinan (36°48' N, 116°47' E), is 20 km away from the site of 214 micro rain radar and cloud radars. Figure 3a shows a time-height cross section from the CINRAD-SA over 215 the location of the micro rain radar and cloud radar. (d) Rain rate near the ground observed by micro rain 216 radar. (e)The cloud-top altitude (ztop) and cloud-top temperature (ttop) retrieved by FY2 satellite. (f)~(i) 217 represent the Micro Rain Radar, ground-based cloud radar, weather radar and surface rain rate during 218 23:10~23:45 respectively.

219 从机载云雷达反射率因子时空剖面(图 1b)上看,此次降水为明显的积层混合云降水,
220 回波结构中对流泡明显,云顶高度最高约 10 km,且云顶边界呈丝缕状,表明已冰晶化,这
221 些均与地基云雷达观测(图 4b)一致。由于飞机观测地域范围比地基设备大,时间跨度比
222 地基设备小,且此次积层混合云过程降水存在着不均匀性,因此机载与地基设备观测样本存
223 在着较大时空差异。

为了进一步分析不同降水阶段、不同降水类型微物理过程差异,将本次天气过程分为5 224 个典型时段,时段一(T1):4月21日16:30~16:55,短时强降水,云雷达反射率因子时空 225 剖面上观测不到零度层亮带,云雷达多普勒速度、谱宽时空剖面上均无明显跃增线;时段二 226 227 (T2):4月21日21:00~21:40,稳定性降水,云雷达反射率因子时空剖面上观测到明显零 228 度层亮带,亮带下回波较强,云雷达多普勒速度、谱宽时空剖面图上均存在明显跃增线;时 段三(T3):4月21日23:20~23:35,短时强降水,S波段天气雷达时空剖面上回波较强且 229 无零度层亮带,微雨雷达和云雷达反射率因子在时空剖面上均出现"V"字形缺口;云雷达 230 231 多普勒速度、谱宽时空剖面图上也存在"V"字形缺口;时段四(T4):4月22日00:00~01:00, 稳定性弱降水,S波段天气雷达、微雨雷达和云雷达反射率因子在时空剖面上均能观测到零 232 度层亮带,云雷达反射率因子在亮带下的强度较其他时次较弱,云雷达多普勒速度、谱宽时 233 234 空剖面图上均存在明显跃增线;时段五(T5):4月22日06:00~06:40,地面为小到中雨量 235 级,三种不同波长雷达均观测不到无零度层亮带,云雷达多普勒速度、谱宽时空剖面图上均
236 无明显跃增线,且图形存在上凸边界。分类结果如图 4b,五个时段均存在典型特征,下面
237 对五个典型时段进行特征分析。其中 T2 和 T4 两个时段零度层亮带较明显,T1、T3、T5 三
238 个时段亮带缺失,分别进行合并分析。在此基础上,对层状云降水和对流云降水进行对比分

- 239 析。
- 240 5.1.1 典型层状云降水

T2 和 T4 两个时段零度层亮带较明显,为典型的层状云降水。从云雷达时空剖面上可以 241 看出 4 月 21 日 21:00 时前,云顶高度约 12 km,云顶呈现丝缕状,表明已冰晶化(黄毅梅 242 等,2017),回波强度从云顶往下逐渐增强,对T2、T4两个时间段雷达反射率因子、多普 243 勒速度和谱宽三个量在不同高度上平均,得到图5廓线图。通常情况下,在混合云中,过冷 244 水滴直径小而浓度大,冰雪晶直径大而浓度小(李玉莲,2018)。过冷水滴与云冰雪晶粒子 245 的粒子尺度差异较大,对应下落末速度差异也较大,因此当水凝物相态为过冷水滴与云冰雪 246 晶粒子共存的混合态时,对应谱宽相对较大。若谱宽较小,接近 0 m s⁻¹,理论上只有冰晶 247 粒子或过冷水滴一种,然而自然界中很难观测到纯过冷水,一般是和冰雪晶粒子混合存在 248 (Shupe et al., 2004)。结合下落末速度的大小来判断粒子相态,通常当反射率因子小于-17 249 250 dBZ, 下落速度小于 0.7 m s⁻¹作为判断过冷水滴存在的条件(李玉莲, 2018; Shupe, 2007; 盛裴轩, 2003)。分析图 5a 表明 T2 和 T4 雷达反射率因子都从云顶开始增大, T2 从 12.72 km 251 的-21.10 dBZ 逐渐增大到 3.13 km 的 3.81 dBZ, T4 从 11.70 km 的-24.67 dBZ 逐渐增大到 3.72 252 km 的-1.96 dBZ, T2 时段云顶高度更高, 云顶雷达反射率因子值更大(图 5b、c), 可见粒 253 254 子在下落中微物理过程发展与 T4 时段有差异。从多普勒速度上看, T2 和 T4 时段粒子在从 12 km 左右下落到 6 km 的高度过程中,多普勒速度变化很小,约为 1 m s-1,说明在这个过 255 程中粒子下落以雪花形态下落,冰相粒子碰并以攀附聚并为主,粒子的下落速度改变较小。 256 在 6 km 高度处, T2 时段粒子的多普勒速度增大,到 4.8 km 处出现一个峰值,约 4.86 m s⁻¹, 257 258 根据探空曲线,这个高度温度为-4.3℃,这个温度在大雪团易出现温度区(0~-5℃)内(杨军 等, 2011), 碰并效率较高(0.1~0.6), 且有凇附过程存在, 使得冰晶多普勒速度和谱宽都达 259 到了极大值。粒子从6km下落到4km过程中,T2、T4都存在明显的零度层亮带。由于T4 260 阶段粒子在从6km下落到4km时反射率因子和下落速度的增长均相对缓慢,分别增加了1 261 262 dBZ 和 0.5 m s⁻¹, 雪花主要是靠冰雪晶粒子的丛集碰并增长。但是由于在 T2 时段多普勒速 度和谱宽的增大速度和幅度明显大于 T4,由于冰雪晶粒子的增长速率在过冷水层中通过淞 263 附增长比在冰雪层中通过碰并增长更快(李玉莲, 2018), T2 时段有过冷水参与, 而 T4 264



286 1995)。这种现象主要原因是当有环境风存在时,降水粒子下落路径会从垂直轨道偏离到倾
287 斜轨道(Friedrich et al., 2013),此时,粒子运动取决于重力和风导致的阻力,这个阻力来
288 源于空气运动和粒子运动速度之差。

289 与图 5 对比,对流云降水由于观测不到明显的零度层亮带,因此其雷达反射率因子、多
290 普勒速度和谱宽的垂直廓线上也观测不到值得跃增区。在零度层以上,尤其是在 5、6km 处,
291 对流云降水多普勒速度和谱宽均大于层状云降水,说明在对流云降水时环境的垂直气流、粒
292 子尺度范围等均大于层状云降水。



Fig.6 Vertical distribution of mean radar reflectivity(a), Doppler velocities(b) and spectrum width(c) of ground-based cloud radar at the time periods T1, T3 and T5.



293 294





308 结果如图 4b。从地基云雷达反射率因子、多普勒速度和谱宽的垂直剖面(图 8a~c)可以看
309 出,雷达反射率因子、多普勒速度和谱宽都垂直方向上都存在观测值的变率跃增线。为了更
310 清楚地显示零度层附近参量的特征,图 8 只给出了 3~5 km 高度的剖面图。

图9给出了地基云雷达反射率因子、多普勒速度和谱宽在 S1 和 S2 两个时间段的平均 311 值廓线。分析表明, S1 和 S2 的廓线趋势以及三个参量变率跃增高度极其一致(图 9)。可 312 以看到粒子在从高层下落过程中,穿过 3.8 km 的 0 ℃层,雷达反射率因子在 3.68 km 高度 313 开始显著增大, 3.40 km 高度达最大值, 厚度为 0.28 km; 多普勒速度的绝对值从 3.62 km 高 314 度开始显著增大, 3.30 km 高度达最大值, 厚度为 0.32 km; 谱宽从 6 km 左右开始逐渐增大, 315 3.6 km 高度显著增大, 跃增明显, 3.3 km 高度达最大值, 厚度约为 0.3 km。观测结果与黄 316 毅梅等(2017)的结论近似,即亮带中雷达反射率因子跃增高度比多普勒速度高 80 m,多 317 普勒速度跃增高度又比谱宽高 20 m。三个变量跃增高度差异的可能原因:雪花降落到 0℃层, 318 319 由于温度升高,表面开始融化,其表面具有了水滴反射特性,雷达反射率因子开始跃增,但 其下落速度增大不明显,因此多普勒速度未产生较大变化。当雪晶进一步融化,下落速度增 320 大导致粒子多普勒速度跃增,因此多普勒速度跃增高度低于雷达反射率因子的跃增高度 80 321 m。从谱宽角度上分析,雪花穿过零度层时,由于表面融化程度较小,仍然具有雪花下落速 322 323 度, 目大小雪花下落速度近似, 当粒子进一步下落并融化时, 小雪花融化快, 大雪花融化慢, 当大小雪花全部融化时,他们具有大小雨滴下落速度,大小雨滴的下落速度差异明显,导致 324 此时谱宽达到极值,因此谱宽的跃增高度略低于雷达反射率因子和多普勒速度。上述微物理 325 过程与黄毅梅等(2017)的分析近似,但值得注意的是, 谱宽从 6 km 左右开始逐渐增大, 326 327 推断 6 km 高度左右由于过冷水存在而发生凇附过程,使得粒子虽然其下落速度变化不大, 但谱宽增大明显。4月22日9:30~11:30期间飞机探测飞行,虽然机载设备与地基云雷达观 328 测的时间和空间均存在差异,但机载 CIP 和 PIP 探头可提供不同飞行高度的粒子图像,可 329 为地基云雷达的观测提供更为直观地观测验证。根据 CIP 图像记录, 4.3 km 高度上冰雪晶 330 331 和过冷水同时存在,雪花呈攀附状,且存在大量的枝状冰晶。 随着粒子的下落, 雪花之间 的攀附黏连增多,且雪花边缘逐渐光滑,为融化和淞附所致。当雪花完全融化时,其粒子较 332 小,随着下落碰并过程导致雨滴增大。 333

XO





云滴和雨滴。10:05:53 至 10:47:24 时间段内,飞行高度都在 4330 m 左右,温度范围在-0.78 ℃ 355 356 到 0.30 ℃,即均在 0 ℃层上下飞行。 如图 1 (b) 所示,该时间段,飞机飞行姿态参数基本 不变,在这种水平飞行状态下,其测量结果更为准确(亓鹏等,2019b; Muhlbauer et al., 2014)。 357 由于探测飞机飞行高度在零度层附近,有利于进一步分析零度层附近粒子微物理特征。而这 358 段时间内粒子图像差异较大,粒子形态有云滴、雨滴、针状冰晶、平板状冰晶以及不规则状 359 冰晶等,粒子不同形态反映了降水粒子形成的不同机制和微物理过程。CIP 和 PIP 粒子图像 360 (表 3)反映了飞行区域粒子形态,而这些粒子是从飞机轨迹上方掉落、局地生成或上升气 361 流带到轨迹高度,因此粒子形态与粒子的来源、粒子运动区域过冷水含量、上升气流速度等 362 方面密切相关(张佃国等, 2020)。在负温度接近0℃时, 10:05:53 时次, CIP 图像显示粒 363 子形态为云滴,尺度多为 25~75 um。10:12:03 时次, CIP 图像上显示明显辐枝冰晶聚合物, 364 即互相攀连的雪花黏附成雪片和雪团,这与 Magono (1953) 和 Pruppacher (2010) 等的观 365 366 测结论较为一致,即在 0~-5℃的范围内,易出现大雪团,且在-1℃雪花有较大尺度。在同样 温度和高度下,10:38:13 时次 CIP 观测到了针状冰晶的聚合物。这两类冰晶的出现可用准液 367 膜理论解释,准液膜理论认为在0℃高度层附近,冰表面存在准液膜,即冰表面与潮湿表面 368 的特性类似,与表面能有关。这种准液膜在并与空气的界面上存在,两个冰晶碰撞时,准液 369 370 膜被夹于两层冰之间,就会固体化,并使冰晶粘合在一起(Hobbs et al., 1964;杨军等, 2011)。 在正温度接近0℃时,如10:15:22 和10:21:22 时次,雪晶则因融化而合并,即融连成针状或 371 辐枝状雪晶聚合物。10:47:24 时次,对流降水,CIP 和 PIP 粒子图像均显示出聚合冰晶结构, 372 存在凇附过程和冰晶间的攀附,结合图 1b 可以看到,该时次飞机飞过区域为对流泡区,其 373 374 雷达反射率因子明显大于对流泡区域以外约 10 dBZ,且零度层亮带不明显,在对流区内上 升气流明显,将下层水汽抬升带到0℃层以上,使得该区域冰晶在从高层下落过程中,除了 375 聚并增长过程外,由于高过冷水含量使得凇附增长也很明显。因此0℃层附近粒子形态有不 376 同形状的聚合状冰晶和云滴,这与杨洁帆等(2021)在太行山东麓对层状云的飞机观测较为 377 一致。当粒子下落到温度约 5℃层时,11:07:59 时次,CIP 图像上可以观测到雪晶已经完全 378 融化,其尺度约为 125~500 um(根据该时次 CIP 图像像素点确定,下同)。当粒子下落到 379 近地面层温度约为10℃时,11:27:43时次,CIP图像显示粒子尺度明显增大,约为700~1775 380 um,因此液态粒子在从零度层以下降落到地面的过程中,碰并即碰撞合并过程显著。 381

382 表 3 不同时次飞机轨迹上的高度、温度以及 CIP 和 PIP 粒子图像

383 Table 3 Altitude, temperature, CIP and PIP particle images on different aircraft tracks

时间 高度 温度 图像 (CIP) 图像 (PIP))
--------------------------------	---

	(\mathbf{m})	(°C)	
09:38:46	24	10.7	• • . · · · · · · · · · · · · · · · · ·
10:05:53	4336	-0.78	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •
10:12:03	4335	-0.17	A CONTRACTOR OF THE SALE
10:15:22	4337	0.30	
10:21:22	4335	0.22	·X
10:38:13	4338	-0.05	
10:47:24	4331	-0.23	All at the Area A
11:07:59	3250	5.81	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••
11:27:43	201	9.57	•••••••

384 6 结论与讨论

385 基于机载云雷达 KPR 和 DMT 粒子测量系统,结合地基云雷达、微雨雷达和天气雷达
386 等设备,对 2018 年 4 月 21~22 日影响山东的一次积层混合云降水微物理过程进行了分析,
387 结论如下:

388 (1) 地基云雷达、微雨雷达和天气雷达反射率因子要素在单点位置上随时间变化大体趋势
389 一致。微雨雷达和天气雷达由于探测高度限制,探测不到云顶信息,但在探测零度层亮带高
390 度和厚度上有优势;云雷达可以清楚地观测到云顶高度随时间演变;当雨强大于 25 mm h⁻¹
391 时,微雨雷达和云雷达因衰减造成时空剖面上探测量的"V"字形缺口。波长越短衰减越大,
392 天气雷达受衰减影响相对较小。

393 (2) 层状云降水,虽然都有明显的零度层亮带存在,但是云顶高度,云顶的雷达反射率因
394 子、粒子的多普勒速度和谱宽等参量,反映了粒子下落微物理过程的差异。层状云降水不同
395 阶段,零度层以上存在着雪花的攀附及凇附等不同的微物理过程;对流云降水阶段,零度层
396 以上,尤其是 5、6km 的高度,多普勒速度和谱宽均大于层状云降水,说明在对流云降水时
397 环境的垂直气流、大小粒子的尺度范围等均大于层状云降水。

398 (3) 高层卷云粒子尺度很小,粒子多普勒速度约为0ms⁻¹,谱宽较小,约为0ms⁻¹。

399 (4) 对于零度层亮带的观测,云雷达反射率因子跃增高度比多普勒速度高 80 m,多普勒

400 速度跃增高度又比谱宽高 20 m。该现象反映了当高层雪花降落到 0℃层,表面融化使其表面
401 具有了水滴反射特性,雷达反射率因子开始跃增,但仍具有雪花的下落速度,且大小雪花下
402 落速度近似,谱宽变化不大。当雪晶进一步融化,下落速度增大导致粒子多普勒速度跃增,小雪花融化快,大雪花融化慢,当大小雪花全部融化时,他们具有大小雨滴下落速度,大小
403 雨滴的下落速度差异明显,谱宽达到极值,因此谱宽的跃增高度略低于反射率因子和多普勒
405 速度。

406 (5) 机载资料显示,自 10:05 开始,飞机一直在约 4330 m 的高度上飞行,温度均在 0 ℃
407 层上下飞行,CIP 和 PIP 粒子图像显示粒子的形态有云滴、雨滴、针状冰晶、辐枝状冰晶以
408 及不规则状冰晶等,这些粒子是从飞机轨迹上方掉落、局地生成或上升气流带到轨迹高度,
409 因此粒子形态与粒子的来源、粒子运动区域过冷水含量、上升气流速度等方面密切相关。

410 联合观测对仪器同步性要求很高(韦凯华等,2015),由于受机载和地基资料时空匹配
411 度的限制,仅对对地基资料和机载资料进行了初步的分析,所得结论还需更多的飞行架次和
412 地面观测资料进行比对验证。此外,数值预报模式中微物理过程的模拟与实况的检验分析,
413 也是今后的研究方向,可进一步了解微物理模拟特征误差的可能来源,有利于加深对此类积
414 层混合云降水微物理结构的认识,从而为提高降水的定量预报奠定基础。

415

- 416 参考文献
- Anagnostou E N, 2004. A convective/stratiform precipitation classification algorithm for volume scanning weather radar observations [J].
 Meteorol Appl, 11, 291-300. doi:10.1017/S1350482704001409
- 419 Atlas D, Srivasta Rc, and Sekhon R S, 1973. Doppler Radar Characteristics of Precipitation at Vertical Incidence [J]. Rev Geophys, 11,
- 420 1-35. doi:10.1029/RG011i001p00001
- 421 Fabry F, Zawadzki T, 1995. Long-Term Radar Observations of the Melting Layer of Precipitation and Their Interpretation [J]. J Atmos Sci,
- 422 52, 838-851. doi:10.1175/1520-0469(1995)0522.0.CO;2

423 Friedrich K, Higgins S, Masters F J, et al. 2013. Articulating and Stationary PARSIVEL Disdrometer Measurements in Conditions with

- 424 Strong Winds and Heavy Rainfall [J]. J Atmos Ocean Tech, 30, 2063-2080. doi:10.1175/JTECH-D-12-00254.1
- 425 Gunn R, Kinzer G D, 1949. The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air [J]. J Meteorol, 6, 243-248. doi:
- 426 10.1175/1520-0469(1949)006<0243:TTVOFF>2.0.CO;2
- 427 Herzegh P H, Hobbs P V. 1980. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude
- 428 cyclones. II: Warm-frontal cloud[J]. J. Atmos. Sci., 37: 597. doi:10.1175/1520-0469(1980)0372.0.CO;2

- 429 Hobbs P V, Mason B J. 1964. The sintering and adhesion of Ice [J]. Philosophical Magazine, 9:181-197. doi:
- 430 10.1080/14786436408229184
- 431 洪延超.1996a.积层混合云数值模拟研究(II)一云相互作用及暴雨产生机制[J].气象学报,(06):661-665+667-674. Hong Yanchao.
- 432 1996a. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud, part (II)-Interaction of clouds and formative mechanism
- 433 of the heavy rain [J]. Acta Meteorologica sinica (in Chinese), (06):661-665+667-674.
- 434 洪延超.1996b.积层混合云数值模拟研究(I)—模式及其微物理过程参数化[J].气象学报,54(5):544-557. Hong Yanchao. 1996b.The
- 435 numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud, part (I)-The model and parameterization of microphysical
- 436 processes[J]. Acta Meteorologica sinica (in Chinese), (05):544-557. doi:10.11676/qxxb1996.057.
- 437 黄佳欢. 2016. 联合地基遥感云微物理参数的研究 [D].南京信息工程大学硕士学位论文. Huang Jiahuan. 2016. Study of cloud
- 438 microphysical parameters retrieval based on synergic ground-based observation[D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of
- 439 Information Science and Technology.
- 440 黄毅梅,周毓荃,杨敏. 2017.利用 3 mm 云雷达资料分析混合相云垂直结构及过冷水分布 [J].高原气象,36(01):219-228. Huang
- 441 Yimei, Zhou Yuquan, Yang Min. 2017. Using 3 mm cloud radar data to analyze frontal mixed cloud vertical structure and supercooled
- 442 water [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(01) : 219–228. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00119
- 443 Kropfli R A, Matrosov S Y, Uttal T, et al. 1995. Cloud physics studies with 8 mm wavelength radar[J]. Atmos Res, 35, 299-313. doi:
- 444 10.1016/0169-8095(94)00025-9
- 445 李玉莲. 2018. 基于 Ka 波段毫米波云雷达的云微物理特性研究[D].国防科技大学硕士学位论文, Li Yulian. 2018. Studies of Cloud
- 446 Microphysical Properties based on Ka-band millimerter wave cloud radar[D].M. S. thesis (in Chinese).National University of Defense
- 447 Technology.
- 448 林磊,姚展予. 2011. 华北地区一次积层混合云降水的数值模拟研究 [J]. 气象, 37 (12): 1473-1480. Lin Lei, Yao Zhanyu. 2011.
- 449 Numerical study on the complex of the stratiform clouds and embedded convective clouds of north China [J]. Meteorological
 450 Monthly (in Chinese), 37 (12): 1473-1480. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.12.001
- 451 刘黎平,谢蕾,崔哲虎. 2014. 毫米波云雷达功率谱密度数据的检验和在弱降水滴谱反演中的应用研究 [J]. 大气科学, 38 (2):
- 452 223-236. Liu Liping, Xie Lei, Cui Zhehu. 2014. Examination and application of Doppler spectral density data in drop size distribution
- 453 retrieval in weak precipitation by cloud radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 223-236.
- 454 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12207.
- 455 刘黎平, 宗蓉, 齐彦斌, 等. 2012. 云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比 [J].中国工程科学,14(09):64-71. Liu
- 456 Liping, Zong Rong, Qi Yanbin, et al. 2012. Microphysical parameters retrieval by cloud radar and comparing with aircraft observation
- 457 in stratiform cloud [J]. China Engineering Sciences (in Chinese),14(09):64-71. doi:10.3969/j.issn.1009-1742.2012.09.008
- 458 Magono C, 1953. On the growth of snowflake and grauple [D]. Science reports of the Yokohama National University, Sec. I. No. 2:2-3

- 459 Muhlbauer A, Kalesse H, Kollias P. 2014. Vertical velocities and turbulence in midlatitude anvil cirrus: A comparison between in situ
- 460 aircraft measurements and ground-based Doppler cloud radar retrievals [J]. Geophys Res Lett, 41, 7814-7821. doi:
- 461 10.1002/2014GL062279.
- 462 Peters, G., B. Fischer, T. Andersson, 2002. Rain observations with a vertically looking Micro Rain Radar (MRR) [C]. Boreal Environ Res,
 463 7, 353-362.
- 464 Pruppacher H, Klett J. 2010. Microphysics of clouds and precipitation [M]. Atmospheric and oceanographic sciences library Vol. 18,
- 465 Kluwer Academic Publishers,954pp. doi:10.1007/978-0-306-48100-0
- 466 亓鹏. 2019a. 太行山东麓积层混合云微物理特征与降水形成机制研究 [D].中国气象科学研究院硕士学位论文. Qi Peng. 2019a.
 467 Microphysical characteristics and precipitation formation mechanism of stratiform cloud with embedded convections in eastern
- 468 Taihang mountain [D]. M. S. thesis (in Chinese). Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 469 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 2019b. 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].
- 470 大气科学,43(06):1365-1384. QI Peng, Guo Xueliang, LuGuangxian, et al.2019b. Aircraft Measurements of a Stable Stratiform Cloud
- 471 with Embedded Convection in Eastern Taihang Mountain of North China: Characteristics of Embedded Convection and Melting Layer
- 472 Structure [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),43(6): 1365-1384. doi:CNKI:SUN:DQXK.0.2019-06-012
- 473 盛裹轩,毛节泰,李建国,等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京:北京大学出版社. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003.
- 474 Atmospheric physics [M]. Beijing: Peking University Press.
- 475 Shupe, M. D. 2007. A ground-based multisensor cloud phase classifier [J]. Geophys Res Lett, 34.L22809, doi:10.1029/2007GL031008
- 476 Shupe, M. D., P. Kollias, S. Y. Matrosov, and T. L. Schneider, 2004. Deriving mixed-phase cloud properties from Doppler radar spectra
- 477 [J]. J Atmos Ocean Tech, 21, 660-670.doi:10.1175/1520-0426(2004)021<0660:DMCPFD>2.0.CO;2
- 478 孙豪, 刘黎平, 郑佳锋. 2017. 不同波段垂直指向雷达功率谱密度对比 [J].应用气象学报, 28(04):447-457. Sun Hao, Liu Liping,
- 479 Zheng Jiafeng. 2017.Comparisons of doppler spectral density data by different bands pointing vertically radars [J]. Journal of Applied
- 480 Meteorological Science (in Chinese), 28(04):447-457. doi:10.11898/1001-7313.20170406

481 孙可富, 游来光. 1965.1963 年 4-6 月吉林地区降水性层状冷云中的冰晶与雪晶 [J].气象学报,1965(03):265-272. Sun Kefu, You

- 482 Laiguang. 1965. Ice crystals and snow crystals in precipitus stratiform cold cloud in jilin area from April to June 1963 [J]. Acta
- 483 Meteorologica sinica (in Chinese),(03):265-272. doi:10.11676/qxxb1965.030
- Wang H, Lei H C, Yang J F, 2017. Microphysical processes of a stratiform precipitation event over eastern China: analysis using micro
 rain radar data [J]. Adv Atmos Sci, 34, 1472-1482.doi:10.1007/s00376-017-7005-6
- 486 王洪, 雷恒池, 杨洁帆. 2017. 微降水雷达测量精度分析 [J].气候与环境研究, 22(04): 392-404. Wang Hong, Lei Hengchi and Yang
- 487 Jiefan. 2017. Analysis of measurement accuracy of Micro Rain Radar [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),
- 488 22(04):392-404. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16166

- 489 王洪, 雷恒池, 杨洁帆, 等. 2020.山东不同云系降水微物理参数特征 [J]. 大气科学,44(2): 315-326. Wang Hong, Lei Hengchi, Yang
- 490 Jiefan, et al. 2020. Characteristics of rain microphysical parameters for different cloud systems in Shandong Province [J]. Chinese
- 491 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 315–326. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1905.18243
- 492 汪学林, 陆煜钧, 李占柱, 等.1982.河套低压降水性层状元的云雨特征 [J].大气科学,6(004):432-441. Wang Xuelin, Lu Yujun, Li
- 493 Zhanzhu et al. 1982. The characteristics of cloud and precipitation for precipitus stratiform cloud in He-Tao cyclone [J]. Scientia
- 494 Atmospherica Sinica (in Chinese), 6(04):432-441.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1982.04.10
- 495 韦凯华,黄兴友,管理,等. 2015. 毫米波云雷达与地基微波辐射计联合反演云微物理参数 [J].科学技术与工程,15(24):8-17. Wei
- Kaihua, Huang Xingyou, Guan Li, et al. 2015. Experiment of retrieving cloud microphysics parameters by combining
 millimeter-wave cloud radar and ground-based microwave radiometer [J]. Science Technology and Engineering (in
 Chinese), 15(24):8-17.doi:10.3969/j.issn.1671-1815.2015.24.002.
- 499 吴举秀,魏鸣,王以琳. 2015. 利用毫米波测云雷达反演层状云中过冷水 [J]. 干旱气象, 2015, 33(02): 227-235. Wu Juxiu, Wei
- 500 Ming, Wang Yi lin. 2015. Retrieval of the Supercooled Water in Stratiform Clouds Based on Millimeter-wave Cloud Radar [J].
- 501 Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 33(2): 227-235, doi:10.11755 /j.issn.1006-7639(2015)-02-0227
- 502 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(1): 88-106. Yang Jiefan, Hu
- 503 Xiangfeng, Lei Hengchi, et al. 2021. Airborne Observations of Microphysical Characteristics of Stratiform Cloud Over Eastern Side
- 504 of Taihang Mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 88-106. 505 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19202
- 506 杨军, 陈宝军, 银燕, 等. 2011. 云降水物理学 [M], 北京: 气象出版社. 193pp. Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan, et al. 2011. Cloud
- 507 precipitation physics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological press, 193pp.
- 508 游来光, 熊光莹, 高明忍, 等. 1965. 春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶增长特点 [J].气象学报, 35(04): 423-433. You
- 509 Laiguang, Xiong Guangying, Gao Mingren, et al. 1965. Characteristics of ice crystal formation and snow crystal growth in stratified
- 510 cold clouds over Jilin in spring [J]. Acta Meteorologica sinica (in Chinese). 35(04):423-433. doi:10.11676/qxxb1965.049

511 张佃国, 王烁, 郭学良, 等. 2020. 基于机载 Ka 波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征 [J]. 大气科学,

- 512 44(5):1023-1038. Zhang Dianguo, Wang Shuo, Guo Xueliang, et al. 2020. The Properties of Convective Generating Cells Embedded
- 513 in the stratiform Cloud on Basis of Airborne Ka-Band Precipitation Cloud Radar and Droplet Measurement Technologies [J].
- 514 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1023-1038. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19185
- 515 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 171-271. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. Radar
- 516 Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 171-271

- 517 朱士超. 2014. 华北积层混合云微物理特征的飞机观测分析及数值模拟研究 [D].中国气象科学研究院博士学位论文, Zhu Shichao.
- 518 2014. Microphysical characteristics of stratiform clouds with embedded convection derived from aircraft observation and numerical
- 519 simulation in northern China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 520 张帅, 王振会, 赵兵科, 等. 2019. 星载雷达在订正地基天气雷达标定误差中的应用 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 576-584. Zhang
- 521 Shuai, Wang Zhenhui, Zhao Bingke, et al. 2019. Using Space-Borne Radar Data to Correcting Calibration Errors in Ground-Based
- 522 Radar [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 576-584. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18118
- 523
- 524 525 526















527	Microphysical characteristics of a stratiform precipitation with embedded
528	convection based on multi-source data
529	WANG Hong ^{1,2,3} ZHANG Dianguo ^{1,2*} WANG Wenqing ^{1,2} WANG Jun ^{1,2} LI Yi ⁴ WANG shuo ^{1,2}
530	¹⁾ Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031
531	²⁾ Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031
532	³⁾ Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081
533	4) Xi'an HUATENG Microwave Co., LTD, Xi'an 710119
534	
535	Abstract

Based on ground-based micro-rain radar and cloud radar, combined with aircraft observation, 536 537 a stratiform precipitation with embedded convection is analyzed to study the cloud-precipitation microphysical structure accurately. The results show that: 1) The selected precipitation process is 538 539 divided into stratified cloud and convective cloud. Above zero layer, especially on the height of 540 $5 \sim 6$ km, doppler velocity and spectrum width of convective precipitation are greater than that of 541 the stratiform cloud precipitation, which indicates that vertical wind of environment, the size 542 range of the particle occurred in convective precipitation are greater than the stratiform precipitation. 2) At the period of convective precipitation, there is a "V" glyph gap caused by 543 544 attenuation in radar reflectivity of cloud radar and micro rain radar in time and height profiles. The 545 attenuation of cloud radar is grater than that of micro rain radar, the higher the height, the greater 546 the attenuation. 3) At the period of stratiform precipitation, near the bright band, the leap increase 547 height of radar reflectivity factor is 80m higher than the Doppler velocity, and the leap increase 548 height of Doppler velocity is 20m higher than the spectral width. 4) The precipitation mechanism 549 near the zero degree layer of is complex. When the negative temperature is close to 0°C, the particle morphology includes radiated dendritic ice crystals, acicular ice crystals and cloud 550 551 droplets. The Doppler velocity and spectral width of convective cloud precipitation are greater 552 than that of stratiform precipitation above the zero degree layer, especially at the altitude of 5 and 553 6km. The vertical airflow and the scale range of small and large particles in convective precipitation are greater than that of stratiform cloud precipitation. 554

555 Key words Stratiform cloud with embedded convection, Microphysical Characteristics, Micro

556 rain radar, Cloud radar, Aircraft measurements

557