

王烁,张佃国,郭学良,等.利用机载探测设备研究云中零度层附近云雷达反射率与液态含水量的关系[J].海洋气象学报, 2020,40(2):103-112.

WANG Shuo, ZHANG Dianguo, GUO Xueliang, et al. Research on correlation between reflectivity and liquid water content around the 0 °C layer in the clouds by airborne detection equipments[J].Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(2): 103-112. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.011.(in Chinese)

利用机载探测设备研究云中零度层附近云雷达反射率 与液态含水量的关系

王烁¹,张佃国¹,郭学良²,崔雅琴³,樊明月¹,刘泉¹

(1. 山东省人民政府人工影响天气办公室,山东 济南 250031;2. 中国科学院大气物理研究所,北京 100029;3. 山东省气象信息中心,山东 济南 250031)

摘要: 利用机载 Ka 波段云雷达 (an airborne Ka-band Precipitation cloud Radar, KPR) 与 DMT (Droplet Measurement Technologies) 粒子测量系统对山东一次积层混合云进行同步穿云观测。对获取的 KPR 资料进行飞行轨迹订正和数据插值处理,与 DMT 粒子测量系统计算的云中的液态含水量进行相关性研究。从试验飞行云层中选取了两段云区,共划分成 9 个时段(累计飞行 18 min)展开讨论,其中有 3 个时段相关性比较好,相关系数超过 0.7,并且利用相关系数最大的时段拟合出 KPR 反射率与云中液态含水量之间的关系式。针对每个时段的粒子特征参数、云滴谱型、冰晶谱型及典型粒子图像展开详细分析,结果表明,较强相关性时段内,大云滴浓度要高于小云滴,且观测粒子多为小于 100 μm 的小粒子;较弱相关性时段,CIP(Cloud Imaging Probe)探头观测到的粒子多为针状或板状冰晶,尺度为毫米量级。

关键词: 机载 Ka 波段云雷达; 雷达反射率; 液态含水量

中图分类号: P412 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)02-0103-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.011

Research on correlation between reflectivity and liquid water content around the 0 °C layer in the clouds by airborne detection equipments

WANG Shuo¹, ZHANG Dianguo¹, GUO Xueliang², CUI Yaqin³, FAN Mingyue¹, LIU Quan¹

(1. Weather Modification Office of Shandong Province, Jinan 250031, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Shandong Meteorological Information Center, Jinan 250031, China)

Abstract An in-situ observation cross convective-stratiform mixed clouds in Shandong is carried out using an airborne Ka-band Precipitation cloud Radar (KPR) and DMT (Droplet Measurement Technologies) particle measurement system. The correlation is researched between the obtained KPR data, which is processed using flight track correction and data interpolation, and the liquid water content in the clouds calculated by the DMT particle measurement system. Two cloud fields are selected from the clouds of test flight and the flight are divided into 9 periods (cumulative flight of 18 min). Three of them are relatively well correlated with correlation coefficients exceeding 0.7, and the correlation formula between KPR reflectivity and the liquid water content in the clouds is fitted using the period with the maximum correlation coefficient. Based on the analysis of characteristic parameters, cloud drop size

收稿日期:2019-08-12; 修订日期:2020-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41475028,41875172);山东省气象局科研项目(2019sdqxm11,2019SDQN09)

作者简介:王烁,男,硕士,主要从事人工影响天气和云物理研究,wskfg123@163.com。

通信作者:张佃国,男,硕士,高级工程师,主要从事人工影响天气和云物理研究,zdg131415@sohu.com。

spectrum, ice crystal spectrum, and typical particle images in each period, it is found that the concentration of large cloud droplets is higher than that of small cloud droplets during strongly correlated periods, and the observed particles are mostly smaller than $100\ \mu\text{m}$; while during weakly correlated periods, the particles observed by the CIP (cloud Imaging Probe) are mostly needle-like or plate-like millimeter-sized crystals, which results in relatively big error in the calculation of liquid water content.

Key words airborne Ka-band precipitation cloud radar; radar reflectivity; liquid water content

引言

层状云或积层混合云是实施飞机增雨的主要作业对象,云雷达观测是揭示云层微物理结构的一种重要手段。毫米波测云雷达能够穿透含水量较高的混合相云层,对非降水云及弱降水云也具有很高的探测敏感性^[1-2],可以获得云内宏微观参数及水平、垂直结构变化,对云特性研究、人影作业指挥和降水预测都具有重要意义。在层状云降水条件下,利用云雷达回波强度、速度和速度谱宽,可以准确反演降水粒子的谱分布、含水量等微物理参数,建立雷达参量与云内液态含水量之间的关系。DENG and GERALD^[3]利用多普勒功率谱和雷达反射率反演了云滴谱参数,估算了卷云的冰水含量、粒子数密度等参数;FRISCH et al.^[4]利用 Ka 波段云雷达、微波辐射计和简易的降水模型对层积云内不同粒子参数进行了分析,基于多普勒功率谱反演出粒子数浓度、液态含水量等参数;HOGAN et al.^[5-6]利用地基激光雷达结合毫米波雷达得到的光学厚度识别了过冷水存在区域,将雷达后向散射率与云中过冷水关联起来;吴举秀等^[7-8]利用毫米波雷达参量识别了层状云中过冷水,并利用多普勒速度的双峰谱反演了混合相云的过冷水含量及冰晶含水量;刘黎平等^[9]利用毫米波雷达和飞机联合观测层状云,采用 FRISCH et al.^[4]的方法反演了层状云内粒子参数,并与飞机观测进行了初步对比;苏添记等^[10]论述了双偏振雷达的质量控制方法的新进展。

在验证地基云雷达反演出的云中液态含水量时,需要飞机在云雷达体扫区域内同步观测,对时空一致性有很高要求。机载云雷达的应用,使雷达反射率与云中液态含水量的时空匹配较易实现。本文利用机载 Ka 波段云雷达(an airborne Ka-band Precipitation cloud Radar, KPR)与机载 DMT (Droplet Measurement Technologies)粒子测量系统,针对 2018 年 4 月 22 日积层混合云进行了穿云观测,就 KPR 反射率与云内液态含水量的相关性进行初步分析,为下一步用 KPR 反演云内液态含水量的

特征变化提供参考依据。

1 设备简介

Ka 波段云雷达和 DMT 粒子测量系统分别悬挂在“空中国王 350”飞机两侧机翼下方,KPR(图 1a)由 Prosensing 公司生产,工作频率为 35 GHz,发射脉冲宽度为 $20\ \mu\text{s}$,属于 Ka 波段,设备的两根天线垂直上、下指向,采用线性极化平板阵列,同时向上和向下发射脉冲对,可连续观测云的水平垂直结构变化。KPR 测得的雷达基本参量包括雷达反射率、多普勒速度及速度谱宽。KPR 具体参数如表 1 所示。图 1b 为机载 DMT 粒子测量系统,主要包括云粒子组合探头 CCP(Cloud Combination Probe)、降水粒子探头 PIP(Precipitation Imaging Probe)、综合气象要素测量系统 AIMMS30 (Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System)、热线含水量仪和积冰探测仪器,可观测云降水粒子、过冷水等云微物理参数及相关宏观信息。机载 DMT 中具体设备及功能如表 2 所示。



图 1 机载探测设备示意图(a. KPR, b. DMT)
Fig.1 Airborne detection equipment (a. KPR, b. DMT)

表 1 KPR 核心参数

Table 1 Key parameters of KPR

参数名称	参数值范围
工作频率	35.64 GHz \pm 30 MHz
发射功率	峰值功率 10 W,约 5% 占空比
发射功率损耗	约 1 dB
脉冲宽度	0.1~20 μs
发射波形	交替长脉冲/短脉冲
传输偏振	线性偏振
脉冲重复频率	20 kHz

续表

参数名称	参数值范围
天线原理	上下指向的线性极化平板阵列
天线带宽	35.5~35.9 GHz
天线增益	32.5 dB
接收回波类型	单宽带射频
接收机噪声系数	约 4 dB
动态范围	90 dB@1 MHz 带宽

2 云雷达轨迹订正及噪声滤除

KPR 探测是以飞机为基点, 向下探测高度坐标为负值, 向上为正值, 观测过程中可以设定不同的探测高度(不同探测高度对应不同距离库), 考虑春季无强对流发展, 云顶高度不高, 本次探测过程中选定了 16 km 的探测高度, 距离库为 640 个。结果如图 2a 所示, 这种显示视角为机载扫描视角, 与常

规的地基云雷达回波图存在明显差异, 为了更好地判断云顶高度等观测信息, 需进行飞行高度轨迹订正。

轨迹订正是采用数据插值的方法, 根据飞机挂载的北斗通信系统确定的飞行高度, 将 KPR 探测值订正到海拔高度上(由于北斗通信系统记录的高度信息均大于 0, 因此订正后的雷达回波图只保留了海拔大于 0 的部分), 使 KPR 产品显示视角从沿轨迹飞行的角度转换到地面。图 2b 为飞行高度订正后的雷达回波图, 图中有一条超过 40 dBZ 的回波轨迹, 这是由于在 KPR 上下扫描时, 沿飞行轨迹会存在接收增益和噪声, 在雷达控制板中可以读到该数据。为了剔除雷达飞行轨迹噪声, 获取轨迹上真实的雷达反射率, 需对数据进行预处理, 即先进行轨迹噪声滤除, 再进行轨迹订正。

表 2 DMT 设备功能及量程介绍

Table 2 Equipment function and range of DMT

仪器名称	设备功能	测量量程	分辨率及精度
云粒子组合探头 CCP	测量云和降水粒子的谱分布及数浓度, 并给出降水粒子的二维图像	CDP(云粒子探头, Cloud Droplet Probe): 2~50 μm ,	CDP: 1—12 档为 1 μm ,
		CIP(云粒子图像探头, Cloud Imaging Probe): 25~1 550 μm	13—30 档为 2 μm CIP: 25 μm
降水粒子探头 PIP	测量降水粒子的谱分布及浓度, 并给出降水粒子的二维图像	PIP: 100~6 400 μm	PIP: 100 μm
综合气象要素测量系统 AIMMS30	测量飞行高度、经纬度、温度、气压、湿度、风速、风向、垂直风速等参数	高度范围: 0~15 km; 温度范围: -20~+40 $^{\circ}\text{C}$; 相对湿度范围: 0~100%	测温精度: 0.05 $^{\circ}\text{C}$; 风速精度: 0.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 相对湿度精度: 2%

图 2c 为修正后的雷达回波图, 在处理探测值时删除与飞行轨迹宽度一致的 10 个距离库数据, 同时为了剔除近地面杂波(定义为近地面处回波强度超过 25 dBZ 的回波), 将数据列中每列数据最大值处以上 23 个距离库和以下 25 个距离库删除, 选定的 23 和 25 个距离库是近地面杂波所占的最大距离库。之后用三次样条插值(cubic spline interpolation)的方法得到去除了轨迹噪声和近地面杂波的回波图, 滤除杂波后再进行轨迹订正, 即得到修正后的雷达回波图。为了方便视图, 仅截取了地面以上 10 km 的部分进行分析讨论。

3 云雷达反射率与云中液态含水量关系研究

早期研究总结出雷达反射率和利用云滴谱型

反演出的过冷水之间的关系, ATLAS^[11] 提出了冷云中雷达反射率与液态含水量的经验公式, 表示为:

$$Z = 0.048 Q_{\text{LWC}}^2 \quad (1)$$

式中 Z 为雷达反射率(单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$), Q_{LWC} 为液态含水量(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。

随后研究中, SAUVAGEOT and OMAR^[12] 利用飞机探测到暖云中实际云滴谱型, 归纳出雷达反射率与液态含水量的关系式为:

$$Z = 0.03 Q_{\text{LWC}}^{1.31} \quad (2)$$

在应用此关系式进行计算分析时, 发现雨滴对雷达反射率大小起着重要的影响, 进而使利用雷达分析云的微物理结构的过程变得更为复杂。为了减少雨滴对雷达反射率的影响, FOX and ILLINGWORTH^[13] 归纳出雷达功率谱型中的双峰特征, 将云滴所对应的雷达反射率提取出来, 并与液

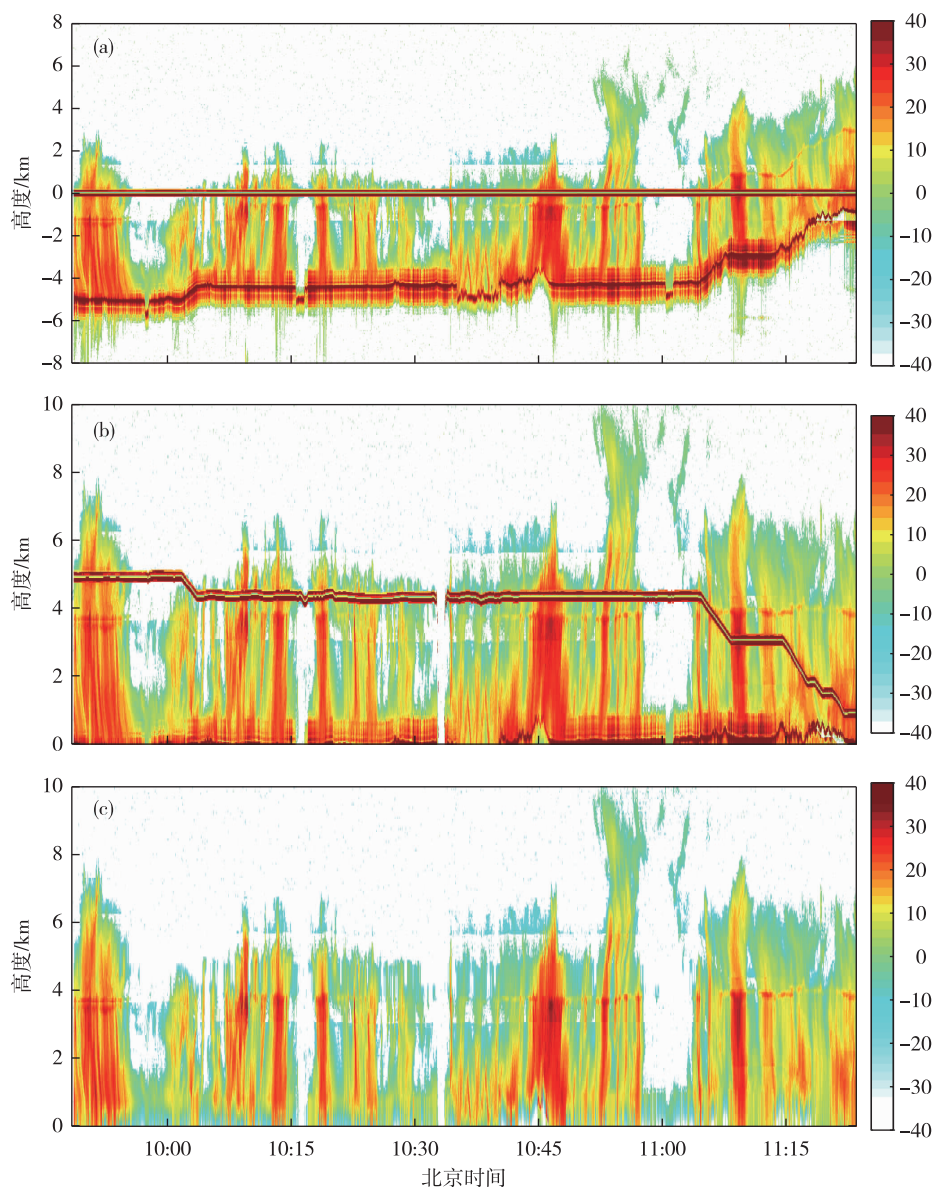


图2 KPR 反射率(单位: dBZ; a. 未经高度订正的原始数据, b. 高度订正后的数据, c. 剔除轨迹噪声及地物杂波后的数据; a, b中双实线为飞行轨迹噪声)

Fig.2 KPR reflectivity (units: dBZ; a. raw radar reflectivity without altitude correction, b. radar reflectivity after altitude correction, c. radar reflectivity after eliminating track noise and ground clutter; double solid line in Fig.2a and Fig.2b for flight track noise)

态含水量进行了对比分析。结果表明,二者相关性较高,相关系数达 0.82,用回归曲线拟合出的关系式为:

$$Z = 0.012 Q_{LWC}^{1.16} \quad (3)$$

刘黎平等^[9]参照 GOSSARD^[14]的研究方法,用地基云雷达反演得到了层状云降水过程中回波强度与液态含水量的关系为:

$$Q_{LWC} = 0.012 89Z^{0.559} \quad (4)$$

为了研究 KPR 反射率与液态含水量之间的相关性,文中选取 2018 年 4 月 22 日穿云观测的两段

(约为 108 km 范围内)数据(图 3)进行分析。图 3 中黑色曲线为飞机实际飞行轨迹,共选取了两片不同的积层混合云进行探测分析,图 3a 选取时间段为 10:05—10:15,图 3b 选取时间段为 10:21—10:29,两时段共计 18 min,飞机飞行高度在 4.3~4.4 km 之间浮动。图 3a 选取时段内的 KPR 反射率平均值为 2.9 dBZ,最大反射率为 23.46 dBZ;图 3b 选取时段内平均值为 -6.6 dBZ,最大反射率为 12.18 dBZ。两时段的云发展强度不同,图 3a 时段内的云顶高度超过 6 km,发展更为旺盛。

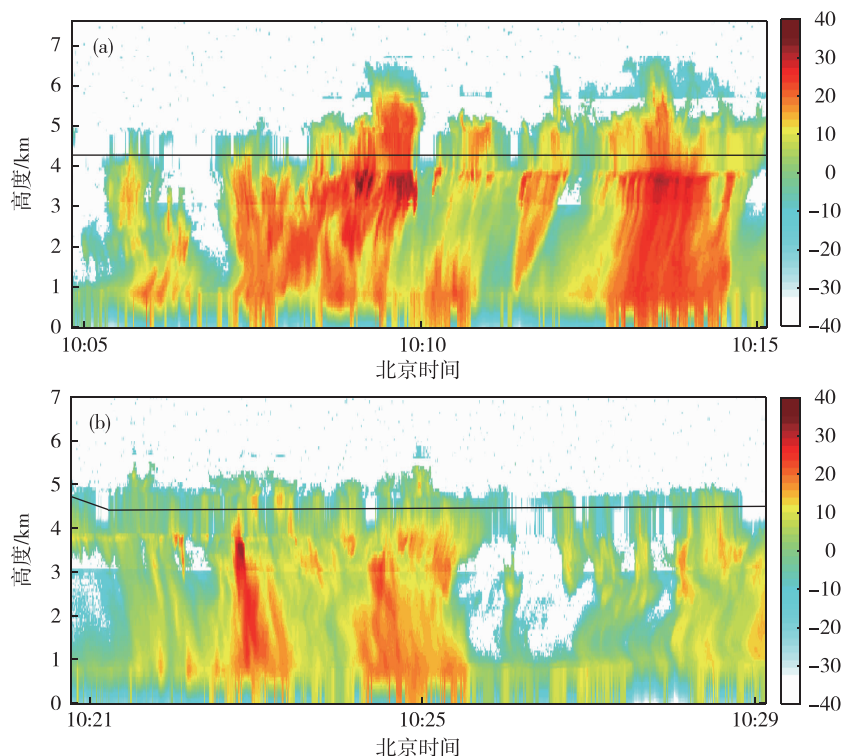


图3 KPR 反射率(填色,单位:dBZ)及飞行轨迹(黑色曲线)示意图(a. 10:05—10:15, b. 10:21—10:29)
Fig.3 KPR reflectivity (colored, units: dBZ) and flight track (black curve) (a. 10:05—10:15, b. 10:21—10:29)

液态含水量是利用 CDP 探头探测的各档粒子数浓度以及各档平均直径计算得到,计算方法如下所示:

$$W = \frac{\pi \rho_w}{6} \sum_1^{30} C_i d_i^3 \quad (5)$$

式中 W 为液态含水量, C_i 为从第 1 档到第 30 档云滴数浓度, d_i 为从第 1 档到第 30 档云滴平均直径, CDP 前 12 档的直径间隔为 $1 \mu\text{m}$, 13—30 档为 $2 \mu\text{m}$, ρ_w 为水的密度, 由于本次探测过程在 0°C 附近, 存在融化效应, 因此 ρ_w 取 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。邓育鹏等^[15]在其文章中分析了计算得到的含水量值与热线含水仪实测的有效值之间的关系, 表明二者分布趋势一致, 当粒子尺度不大时, 结果数值相当。由于此次飞行过程中热线含水仪出现故障, 无法实测云中含水量, 因此用 CDP 计算的液态含水量进行替代, 计算时使用了全谱进行统计, 由于在 0°C 层附近飞行, 尺度在 $50 \mu\text{m}$ 左右的小冰晶会发生融化, 可视为大云滴处理。

图 4 为沿飞行轨迹计算的液态含水量与 KPR 反射率之间的关系, 相关系数利用 Matlab 软件中的 Correlation coefficients 函数计算获得, 该函数可直接在函数库中进行调用。图 4a 与图 3a 的云层相对

应, 图 4b 与图 3b 的云层相对应, 云中液态含水量与 KPR 反射率之间存在一定的相关性, 相关系数最大可达 0.81, 与 FOX and ILLINGWORTH^[13] 计算结果相一致。为了细化相关性分析, 根据 KPR 反射率的谷值将时段进行划分, 共计 9 个时段, 下文将对每个时段的粒子宏微观特征进行整理分析。

9 个时段内 KPR 反射率与液态含水量之间的相关性及其宏微观参量特征值如表 3 所示。

表 3 中 KPR 反射率与液态含水量均为该时段内的平均值, 云滴数浓度从 CDP 探测结果中读取, 为各档粒子数浓度之和; 云滴平均直径计算方法如下所示:

$$\overline{D}_{\text{CDP}} = \frac{\sum_1^{30} C_i d_i}{N_{\text{CDP}}} \quad (6)$$

式中, C_i 为 CDP 各档粒子数浓度, d_i 为 CDP 各档直径, 与公式(5)计算时选取的参量相同, N_{CDP} 表示各档粒子数浓度之和; 冰晶数浓度从 CIP 探测结果中读取, 为减小仪器探测的系统误差, 参照 MCFARQUHAR et al.^[16] 和 JACKSON and MCFARQUHAR^[17] 的处理方法, 去掉了 CIP 前 4 档数据, 仅统计直径大于 $125 \mu\text{m}$ 的粒子浓度信息; 垂直风速、垂直风速范围、相对湿度、温度范围可从

AIMMS30 探头中读取,其中垂直风速与相对湿度为该时段内平均值,规定下沉气流为正值,上升气流

为负值。温度范围可以判断该时段内的液态水是否为过冷水。

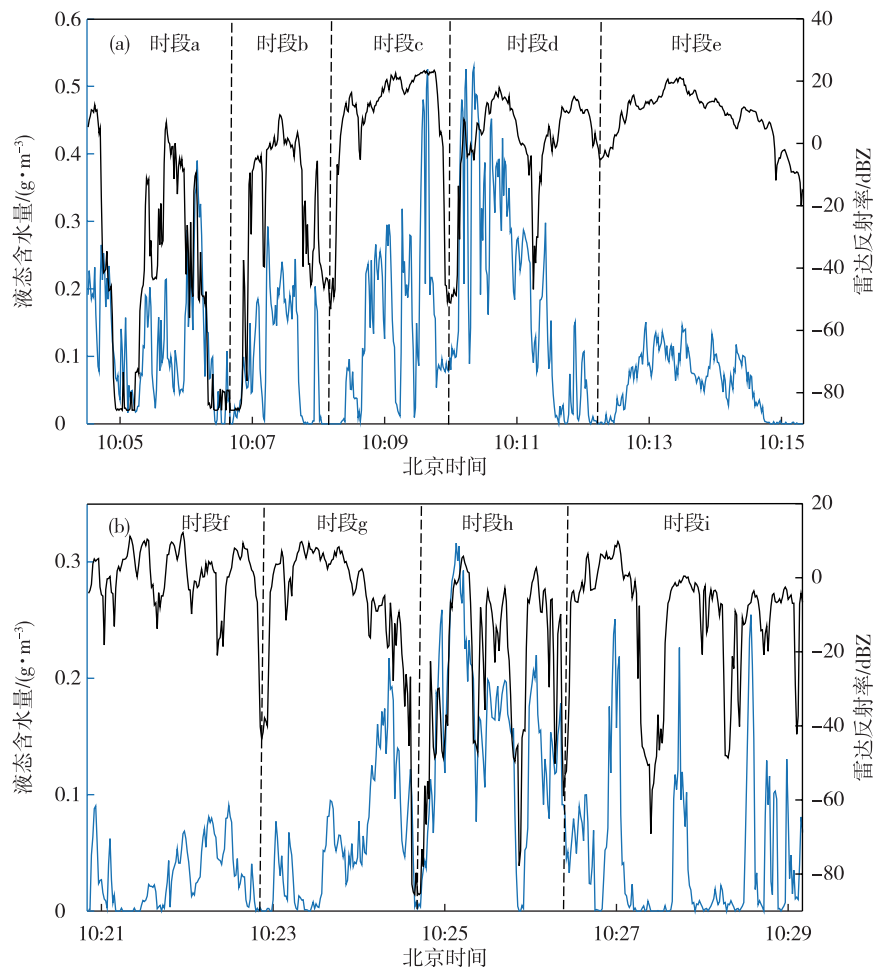


图4 沿飞行轨迹液态含水量(蓝线,单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)与KPR反射率(黑线,单位:dBZ)关系(a. 10:05—10:15; b. 10:21—10:29)

Fig.4 Correlation between liquid water content (blue line, units: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) and KPR reflectivity (black line, units: dBZ) along the flight track (a. 10:05–10:15, b. 10:21–10:29)

表3 各时段粒子特征参数及气象要素统计

Table 3 Statistics of particle characteristic parameters and meteorological elements in each period

时段 (时长)	相关 系数	平均 反射率/ dBZ	平均液态 含水量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	云滴平均数 浓度/ ($\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$)	云滴平均 直径/ μm	冰晶平均数 浓度/ ($\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均垂直 风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	垂直风速 范围/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均 相对 湿度/(%)	温度 范围/ $^{\circ}\text{C}$
时段 a (2 min)	0.46	-40.10	0.13	30.44	15.02	16	-0.27	-1.45~1.06	97.46	-1.12~-0.15
时段 b (1 min 20 s)	0.70	-30.80	0.09	14.04	10.66	32	-0.16	-0.72~0.63	98.56	-0.79~-0.01
时段 c (1 min 45 s)	0.44	7.67	0.14	39.95	17.06	47	0.06	-0.82~1.37	99.08	-0.95~-0.06
时段 d (2 min 15 s)	0.14	1.05	0.20	26.81	14.22	67	-0.08	-1.23~1.43	99.49	-0.93~0.20
时段 e (2 min 50 s)	0.81	7.73	0.06	14.06	11.20	19	-0.27	-1.00~0.85	97.52	-0.30~0.50

续表

时段 (时长)	相关 系数	平均 反射率/ dBZ	平均液态 含水量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	云滴平均数 浓度/ ($\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$)	云滴平均 直径/ μm	冰晶平均数 浓度/ ($\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均垂直 风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	垂直风速 范围/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均 相对 湿度/(%)	温度 范围/ $^{\circ}\text{C}$
时段 f (2 min 10 s)	0.23	-0.60	0.03	12.0	8.9	14	-0.28	-0.97~0.20	92.86	-0.06~0.29
时段 g (1 min 45 s)	-0.07	-7.63	0.06	17.8	10.2	23	-0.29	-0.75~0.33	93.97	-0.44~0.43
时段 h (1 min 30 s)	0.71	-24.90	0.15	20.5	21.8	81	-0.25	-0.83~0.50	99.15	-0.91~-0.34
时段 i (2 min 45 s)	0.37	-11.90	0.04	12.9	10.6	35	-0.28	-0.84~0.40	98.50	-0.74~0.06

根据表3中的相关系数,可将时段划分为强相关时段(相关系数超过0.7)、中等相关时段(相关系数介于0.3至0.7)、弱相关时段(相关系数低于0.3),其中时段b、时段e和时段h属于强相关时段。通过对比时段b、e与时段a、c、d内的粒子参数可以看出,高相关性时段的云滴数浓度与尺度低于其他时段,冰晶浓度相对较低。然而对比时段h与时段f、g、i时,发现高相关性时段云滴数浓度与尺度高于其他时段,冰晶浓度大。冰晶的存在会在一定程度上影响到KPR反射率的变化,当冰晶浓度或尺度过大时,液态含水量与KPR反射率的相关性将降低。经计算,时段h获取的CIP数据中平均直径为33.1 μm , SAUVAGEOT and OMAR^[12]指出,在分析雷达反射率与液态含水量之间的关系时,云内粒子的直径需要小于200 μm ,粒子尺度越小,两参量相关性越高,当粒子直径超过200 μm 后,雷达反射率与液态含水量之间将无法呈现明显的相关关系。垂直风速会影响云滴的碰并效率,当云内湍流发展旺盛时,小云滴将加速碰并形成大云滴。

根据表3的统计结果,选取相关系数最大的时段e来拟合KPR反射率与云中液态含水量之间的关系。将KPR反射率的单位换算为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ 后绘制出散点图和拟合曲线(图5)。

参照刘黎平等^[9]幂函数关系式,修正后的拟合结果如公式(7)所示。结果的方差为0.1471,标准差为0.03,决定系数为0.3438,拟合结果精确度得以保证。相较于公式(4),雷达反射率前的系数有所增大,指数减小。

$$Q_{\text{LWC}} = 0.11Z^{0.3} \quad (7)$$

利用时段b和时段h中的数据可以对公式(7)准确度进行验证。将两时段的KPR反射率换算为Z(单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)后代入公式(7),拟合得到时段b(图6a)和时段h(图6b)液态含水量并与机载探测

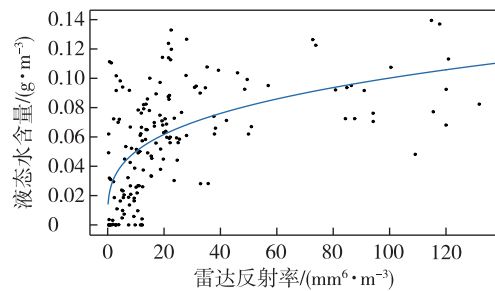


图5 KPR反射率(单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)与液态含水量(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of KPR reflectivity (units: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$) and liquid water content (units: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

结果进行对比。可以看出,利用公式(7)拟合出的液态含水量与机载探测结果整体趋势一致,拟合值略小于实际探测结果。

图7为各时段云滴谱分布,其中图7a为时段a—e,图7b为时段f—i。可以看出,在所有时段内云滴谱型均为双峰分布,第一峰值集中在9~11 μm ,第二峰值集中在16~21 μm 。不同的是,时段b、e、h的第二峰值浓度大于第一峰值,而其他时段的第一峰值均大于第二峰值。时段b、e、h内的KPR反射率与液态含水量之间均表现出强相关,由此看出,相关系数的大小与云滴谱型有关。当大云滴浓度高于小云滴时(第二峰值大于第一峰值),大尺度云滴可使后向散射截面增加,从而增大KPR反射率,实际上当粒子增大到一定程度后,决定雷达反射率大小的主要是云粒子尺度而不是浓度,结合探测到冰晶谱(图8)发现,这些时段的冰晶浓度远远低于云滴浓度,并且尺度较小的点状小冰粒占比大,此时,云内的液态含水量主要取决于数浓度较大的大云滴。因此,在大云滴占比相对较高的b、e、h时段,液态含水量与KPR反射率之间的相关系数有一定程度提升。其他时段,都出现了尺度很大的

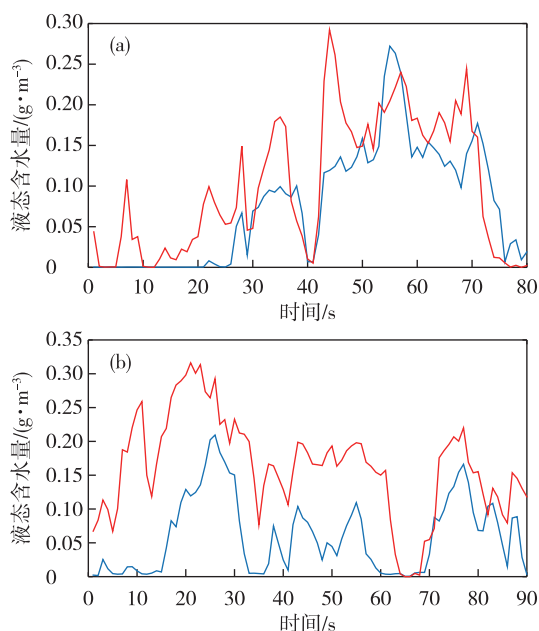


图6 液态含水量拟合结果(蓝线)与机载探测结果(红线)对比(单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; a.时段 b, b.时段 h)

Fig.6 Comparison between fitted results of liquid water content (blue line) and airborne detection results (red line) (units: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; a. Period b, b. Period h)

冰晶粒子,特别是相关性最弱的时段 g,出现了许多尺度超过 $500 \mu\text{m}$ 的冰晶聚合物,决定了反射率的大小,而云滴平均直径较小,对反射率贡献小,所以反射率和由云滴累计的液态水之间出现负相关情况。

照射体积内的云滴和冰晶粒子的谱分布及散射特性决定了 KPR 回波强度的大小。图 8 及图 9 分别给出了时段 a—i 内粒子谱型及典型冰晶粒子图片。可以看出,图 8a 中时段 b 的冰晶粒子最大不超过 $500 \mu\text{m}$,小于其他时段内的冰晶尺度,根据前文 SAUVAGEOT and OMAR^[12] 提出的理论,尺度在 $200 \mu\text{m}$ 以内的粒子对结果相关性的影响较小,可以解释时段 b 的相关系数强于其他三个时段。图 8b 中,时段 h 的冰晶尺度上限虽然超过了 $800 \mu\text{m}$,但超过 $300 \mu\text{m}$ 的冰晶浓度迅速下降,超过 $400 \mu\text{m}$ 的冰晶浓度量级仅为 10^0 。

图 9a—i 分别对应在各时段选取的具有代表性的 3 张粒子图片,在图像下方标明了图片拍摄时刻及当前时刻的温度。分析发现,图 9 中的冰晶粒子形态可以分为 3 类,第 1 类是点状小冰粒,如图 9a、b、h 中第 3 幅所示,放大后占 2~3 个像素,尺度为 $50 \sim 75 \mu\text{m}$;第 2 类是形状规则的白色或黑色的

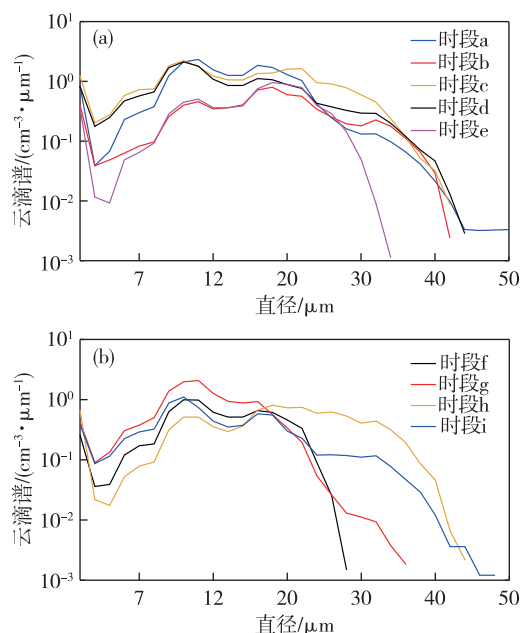


图7 各时段云滴谱型分布(单位: $\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; a.时段 a—e, b.时段 f—i)

Fig.7 Distribution of cloud drop size spectrum (units: $\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; a. Period a—e, b. Period f—i)

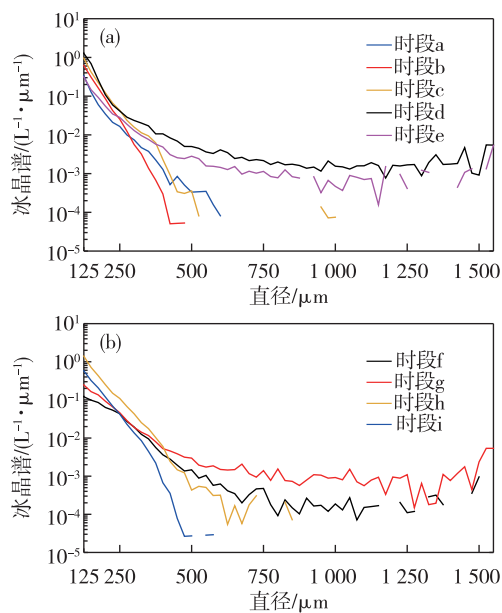


图8 各时段冰晶谱型分布(单位: $\text{L}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; a.时段 a—e, b.时段 f—i)

Fig.8 Distribution of ice crystal spectrum (units: $\text{L}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; a. Period a—e, b. Period f—i)

圆形冰粒子,如图 9a、c、i 中所示,尺度约为 $400 \mu\text{m}$;第 3 类是形状各异的针状、板状等冰晶单体或聚合物,如图 9d、g 所示,这类冰晶易于发生碰并或淞附效应,增长速度较快。

在强相关的 b、e、h 时段内(图 9b、e、h),点状小冰粒占比大,此外也有少量圆形冰粒子,可见这类粒子对相关性的影响较小,虽然时段 e 内(图 9e)出现了相互粘连的针状冰晶,但是时刻集中在 10:14:30 之后,在该时段前期仍以小冰粒为主。弱相关时段 d、f、g 内(图 9d、f、g),冰晶尺度超过毫米量级,这种粒子边生长边下落,其后向散射能力会远远大于平

均直径为十几微米以内的云滴^[18-19]。表 3 中时段 g 出现了负相关的情况,主要是时段 g 所在的温度区间稍稍超过了 0 °C,板状冰晶粒子表面融化更易发生相互碰并,增长为尺度很大的聚合物(图 9g 中有较多碰并的冰晶图像),而且冰晶外包的水膜也会使冰晶后向散射能力增大,因此 KPR 反射率与云滴决定的液态含水量之间的相关性将会急剧下降。

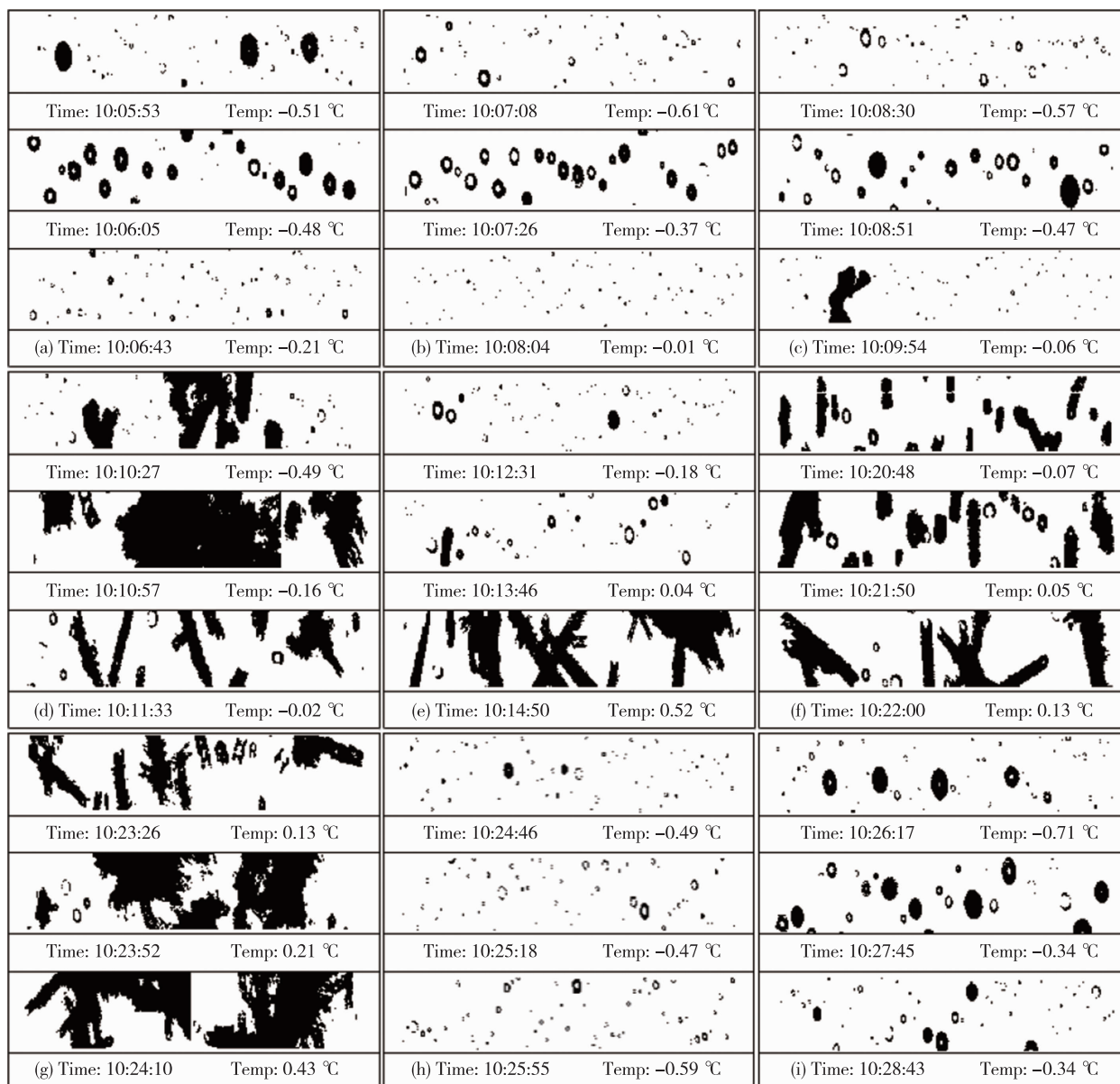


图 9 各时段典型粒子图片(a—i 分别对应 a—i 时段内 3 张具有代表性的粒子图片)

Fig.9 Typical particle image in each period (Fig.9a for three typical images in Period a, Fig.9b for three in Period b, Fig.9c for three in Period c, and so on)

4 结论与展望

利用 KPR 与 DMT 探测设备,对 2018 年 4 月 22 日积层混合云进行穿云探测,并将 KPR 资料进行轨

迹订正和插值处理,利用 CDP 探测到的云滴各档数浓度计算得到云中液态含水量,就沿飞行轨迹的雷达反射率与轨迹上液态含水量之间的相关性展开分析,结论如下:

1) KPR 反射率与云中液态含水量之间并非完全强相关关系,有些时段相关性较强,最高相关系数可达 0.81;有些时段相关性较差,甚至出现负相关。强相关时段内云滴谱型大尺度云滴浓度要高于小尺度云滴,大尺度云滴后向散射截面大,且对云中液态含水量贡献高。当云中大尺度云滴浓度相对较高时,KPR 反射率与液态含水量往往表现出较强的相关关系。

2) 冰晶的大小对 KPR 反射率与液态含水量的相关性具有重要影响。强相关时段 CIP 探头拍摄到的粒子多为点状小冰粒且尺度不超过 100 μm ,而弱相关时段拍摄到的粒子多为针状冰晶或冰晶聚集体,尺度为毫米量级,该尺度冰晶在云中大量的存在减弱了 KPR 反射率与液态含水量的相关性。

在分析 KPR 反射率与云中液态含水量之间的相关性时,应尽量避免冰晶所在的冷云云层,在暖云中寻找二者之间的关联。此次选取的个例飞行温度区间基本在 $-1\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,且以上升气流为主,对流发展较为旺盛,有一定的冰晶在云中增长,CDP 在探测云内小粒子时,包含了部分冰晶粒子,因此计算值为液态和固态含水量之和,结果高于实际液态含水量,因而对相关性的结果分析产生了一定的影响。在今后飞行试验中,计划选取合适的暖云进行穿云观测,以归纳更好的关系式;或是参照 FRISCH et al.^[4] 的方法,利用多普勒功率谱将冰晶影响效应进行剔除,再进行对比分析。

参考文献:

- [1] KROPFLI R A, MATROSOV S Y, UTTAL T, et al. Cloud physics studies with 8 mm wavelength radar [J]. Atmos Res, 1995, 35(2/3/4): 299-313.
- [2] CLOTHIAUX E E, MILLER M A, ALBRECHT B A, et al. An evaluation of 94-GHz radar for remote sensing of cloud properties [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 12(2): 201-229.
- [3] DENG M, GERALD G M. Cirrus microphysical properties and air motion statistics using cloud radar Doppler moments, part I: Algorithm description [J]. J Appl Meteor Climatol, 2006, 45(12): 1690-1709.
- [4] FRISCH A S, FAIRALL C W, SNIDER J B. Measurement of stratus cloud and drizzle parameters in ASTEX with a Ka-band Doppler radar and a microwave radiometer [J]. J Atmos Sci, 1995, 52(16): 2788-2799.
- [5] HOGAN R J, FRANCIS P N, FLENTJE H, et al. Characteristics of mixed-phase clouds. I: Lidar, radar and aircraft observations from CLARE'98 [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2010, 129(592): 2089-2116.
- [6] HOGAN R J, ILLINGWORTH A J, O'CONNOR E J, et al. Characteristics of mixed-phase clouds. II: A climatology from ground-based lidar [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2003, 129(592): 2117-2134.
- [7] 吴举秀,魏鸣,王以琳.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(2): 227-235.
- [8] 吴举秀,魏鸣,苏涛,等. W 波段和 Ka 波段云雷达探测回波对比分析[J].海洋气象学报,2017,37(2): 57-64.
- [9] 刘黎平,宗蓉,齐彦斌,等.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,2012,14(9): 64-71.
- [10] 苏添记,葛俊祥,章火宝.中国双偏振天气雷达系统发展综述[J].海洋气象学报,2018,38(1): 62-68.
- [11] ATLAS D. The estimation of cloud parameters by radar [J]. J Meteor, 1954, 11(4): 309-317.
- [12] SAUVAGEOT H, OMAR J. Radar reflectivity of cumulus clouds [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1987, 4(2): 264-272.
- [13] FOX N I, ILLINGWORTH A J. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar [J]. J Applied Meteor, 1997, 36(5): 485-492.
- [14] GOSSARD E E. Measurement of cloud droplet size spectra by Doppler radar [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1994, 11(3): 712-726.
- [15] 邓育鹏,董晓波,吕锋,等.河北省降水性层状云宏微观物理特征[J].气象与环境学报,2013,29(3): 29-34.
- [16] MCFARQUHAR G M, ZHANG G, POELLOT M R, et al. Ice properties of single-layer stratocumulus during the mixed-phase arctic cloud experiment: 1. Observations [J]. J Geophys Res Atmos, 2007, 112(D24): 1-19.
- [17] JACKSON R C, MCFARQUHAR G M. An assessment of the impact of antishattering tips and artifact removal techniques on bulk cloud ice microphysical and optical properties measured by the 2D cloud probe [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2014, 31(10): 2131-2144.
- [18] KOLLIAS P, ALBRECHT B. Why the melting layer radar reflectivity is not bright at 94 GHz [J]. Geophys Res Lett, 2005, 32(24): L24818.
- [19] HEYMSFIELD A J, BANSEMER A, MATROSOV S, et al. The 94-GHz radar dim band: relevance to ice cloud properties and cloudsat [J]. Geophys Res Lett, 2008, 35(3): L03802.