

孙国德,蔡兆鑫,张佃国,等.一次层状云弱降水过程的机载 Ka 波段云雷达探测特征分析[J].海洋气象学报,2024,44(3): 107-114.

SUN Guode, CAI Zhaoxin, ZHANG Dianguo, et al. Detection characteristics of stratiform cloud during a weak precipitation process by airborne Ka-band precipitation cloud radar[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 107-114. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxb.20231104001. (in Chinese)

## 一次层状云弱降水过程的机载 Ka 波段云雷达探测特征分析

孙国德<sup>1,2,3</sup>, 蔡兆鑫<sup>4,5</sup>, 张佃国<sup>6</sup>, 王烁<sup>6</sup>, 易田<sup>1,2</sup>

(1. 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147; 2. 重庆市黔江区气象局, 重庆 黔江 404100; 3. 渝东南强天气研究黔江区重点实验室, 重庆 黔江 404100; 4. 山西省气象灾害防御技术中心, 山西 太原 030032; 5. 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081; 6. 山东省人民政府人工影响天气办公室, 山东 济南 250031)

**摘要** 利用 2019 年 11 月 17 日一次层状云系弱降水过程中获取的机载 Ka 波段云雷达 (Ka-band precipitation cloud radar, KPR) 和云粒子测量系统 (droplet measurement technologies, DMT) 资料, 将利用云粒子谱正演得到的雷达反射率因子 ( $Z_c$ ) 与 KPR 探测值 ( $Z_m$ ) 进行对比, 并对影响两者偏差的成因进行探讨分析。结果发现: (1) 在层状云内部,  $Z_c$  与  $Z_m$  有很好的 consistency, 两者之间的偏差和均方根偏差分别为 4.1 dBZ 和 4.3 dBZ。 (2) 在 KPR 径向速度变化和速度谱宽较大的区域, 或在云层比较薄的区域,  $Z_c$  与  $Z_m$  之间的偏差和均方根偏差变大, 但在雷达反射率因子的变化趋势上有较好的一致性。 (3) 云粒子数浓度 ( $N_c$ )、云粒子有效直径和云中液态水含量的变化均对  $Z_c$  与  $Z_m$  之间的偏差有一定的影响, 但偏差总体控制在  $\pm 10$  dBZ 范围内。随着  $N_c$  的增大, 两者之间的偏差变小, 当  $N_c > 200 \text{ cm}^{-3}$  时, 偏差大于 10 dBZ 的时次极少。当有效直径在  $50 \sim 230 \mu\text{m}$ 、液态水含量在  $0.15 \sim 0.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  范围内时,  $Z_c < Z_m$ ; 当有效直径大于  $230 \mu\text{m}$ 、液态水含量大于  $0.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  时,  $Z_c > Z_m$ 。

**关键词** Ka 波段云雷达 (KPR); 飞机观测; 云微物理结构

中图分类号: P426.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0107-08

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxb.20231104001

## Detection characteristics of stratiform cloud during a weak precipitation process by airborne Ka-band precipitation cloud radar

SUN Guode<sup>1,2,3</sup>, CAI Zhaoxin<sup>4,5</sup>, ZHANG Dianguo<sup>6</sup>, WANG Shuo<sup>6</sup>, YI Tian<sup>1,2</sup>

(1. CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147, China; 2. Qianjiang Meteorological Bureau of Chongqing, Chongqing 404100, China; 3. Qianjiang District Key Laboratory of Strong Weather Research in Southeast Chongqing, Chongqing 404100, China; 4. Shanxi Meteorological Disasters Defense Technology Center, Taiyuan 030032, China; 5. CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081, China; 6. Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China)

**Abstract** Based on the data of airborne Ka-band precipitation cloud radar (KPR) and droplet measurement technologies (DMT) obtained during a weak precipitation process of stratiform cloud system on 17 November 2019, the radar reflectivity ( $Z_c$ ) calculated with the detected cloud particle spectrum is

收稿日期: 2023-11-04; 修回日期: 2024-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42175099); 重庆市气象部门业务技术攻关项目 (YWJSGG-202217); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020MD054)

第一作者简介: 孙国德, 男, 高级工程师, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究, 472167594@qq.com。

通信作者简介: 蔡兆鑫, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究, caizhaoxin1234@163.com。

compared with the KPR observation ( $Z_m$ ), and the causes of the deviation are discussed. The results are as follows. (1) Inside the stratiform cloud,  $Z_c$  and  $Z_m$  are in good agreement with a deviation and root mean square error of 4.1 dBZ and 4.3 dBZ, respectively. (2) The deviation and root mean square error between  $Z_c$  and  $Z_m$  are larger in areas with larger variation of KPR's radial velocity and velocity spectrum width, or in thin cloud area, but there is a good consistency in the variation trend of radar reflectivity. (3) The variation of cloud particle number concentration ( $N_c$ ), cloud particle effective diameter and cloud liquid water content all have certain influence on the deviation between  $Z_c$  and  $Z_m$ , but the deviation is generally controlled within the range of  $\pm 10$  dBZ. With the increase of  $N_c$ , the deviation between the two becomes smaller; when  $N_c$  is greater than  $200 \text{ cm}^{-3}$ , the deviation greater than 10 dBZ is rare.  $Z_c$  is smaller than  $Z_m$  when the effective diameter is between 50 and  $230 \mu\text{m}$  and the liquid water content is between  $0.15$  and  $0.50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $Z_c$  is greater than  $Z_m$  when the effective diameter is greater than  $230 \mu\text{m}$  and the liquid water content is greater than  $0.50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

**Keywords** Ka-band precipitation cloud radar (KPR); aircraft observation; cloud microphysical structure

## 引言

准确获取连续的云微物理参数垂直结构信息对提高短期临近预报准确率和认识云-降水微物理过程具有重要意义。Ka波段云雷达(Ka-band precipitation cloud radar, KPR)通过朝特定方向发射毫米波电磁波脉冲,并接收云和降水散射回的电磁波,从而探测云的微小粒子结构和微物理特征,用于云宏观结构探测和微物理参数反演<sup>[1-2]</sup>。Ka波段云雷达具有较高的灵敏度和时空分辨率,且可以直接探测云的垂直结构<sup>[3-4]</sup>,从而成为研究云和降水微物理特征的有效工具之一。

美国大气辐射测量计划利用研发的Ka波段云雷达和双波长(Ka/W波段)云雷达长期探测云的宏观特征<sup>[5]</sup>;在假设粒子谱分布的基础上,利用雷达反射率因子、平均多普勒速度对层状云的微物理参数进行了反演<sup>[6-7]</sup>。刘黎平等<sup>[8]</sup>利用数值模拟的方法,分析了降水粒子米散射效应、空气湍流、空气上升速度等对雨滴谱和液态水含量等参数反演的影响,建立了功率谱密度处理及其直接反演雨滴谱、液态水含量、降水强度和空气上升速度的方法。李曦等<sup>[9]</sup>研究发现层状云反演的反射率谱分布与毫米波雷达实测的反射率谱分布基本一致。吴举秀等<sup>[10]</sup>利用云雷达,结合地面雨滴谱仪、雨量计和探空资料等,分析了云雷达的回波特征及测云能力。黄兴友等<sup>[11]</sup>利用35 GHz测云雷达研究了层状云和对流云降水衰减订正个例,并对毫米波雷达的数据质量进行了改善。宗蓉等<sup>[12]</sup>利用飞机观测的连续粒子谱资料和米散射理论反演等效反射率因子,与

地基毫米波云雷达回波强度对比分析,发现由云内滴谱计算的反射率因子值与雷达探测值有较好的一致性,但随着两者距离的增加,误差逐渐增大。

飞机探测可以直接获取云系内部微物理参量信息<sup>[13-15]</sup>,如云中液态水含量、云粒子谱等信息,然而其获取的只是一维线性资料,具有较大的局限性,如果能够将飞机观测结果与云雷达探测数据相结合,可以获取云层内部二维时空变化资料,更好地分析云层内部信息。地基云雷达虽然功率较强,探测性能更好,然而与飞机观测结果难以实现较好的时空匹配,机载KPR能够与机载粒子探测系统同时悬挂在飞机上,同步开展观测,满足时空匹配的要求,现已逐步应用在云物理探测试验中<sup>[16-18]</sup>。张佃国等<sup>[19]</sup>利用KPR和云粒子测量系统(droplet measurement technologies, DMT)资料,对山东积层混合云中对流泡特征开展研究;王洪等<sup>[20]</sup>利用KPR和DMT观测结果,结合地基云雷达、微雨雷达和天气雷达等多源观测资料,对山东2018年一次积层混合云降水过程的云降水微物理结构特征开展详细分析;Sheng等<sup>[21]</sup>利用KPR和DMT观测结果,对华北大陆性对流云的微物理结构和垂直发展结构特征开展分析。

以往的研究主要利用云雷达观测数据对不同地区的云宏观特性开展分析,或利用经验公式对云降水的滴谱参数及液态水含量进行反演,在利用云粒子谱资料正演回波强度与Ka波段云雷达实测回波强度对比分析方面的研究还很少。本文利用空中国王350飞机云物理探测平台获取的一次弱降水天气过程粒子谱资料,利用米散射理论计算雷达等效

反射率因子,并与同一探测平台挂载的 KPR 探测回波强度进行对比分析,探讨云微物理参数对两者偏差的影响,检验机载云雷达探测数据的可用性,分析其探测精度的变化特征,以期对应用地基毫米波云雷达资料反演云微物理参数提供参考,并为构建精细的垂直探测体系提供帮助。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 机载探测设备和探测概况

利用空中国王 350 飞机云物理探测平台搭载的机载探测设备对特定云系进行云微物理观测,主要搭载的探测设备有:垂直指向双天线 Ka 波段云雷达、云物理探测系统和北斗通信系统。文中主要使用其中的 KPR、云粒子探头 (cloud droplet probe, CDP)、二维云粒子图像探头 (cloud imaging probe, CIP) 和飞机综合气象探测系统 (aircraft-integrated meteorological measurement system, AIMMS-30) 等机载探测设备获取的资料,需要注意的是,此次观测使用 DMT 新一代的探测设备,探头前端经过尖锐化处理,可以降低粒子破碎的影响。

机载 KPR 由美国 Prosensing 公司生产,是装在粒子监测系统 (particle measurement system, PMS) 套筒中的紧凑型、双波束、固态发射机的多普勒雷达。其典型的观测范围为 6.5~13.0 km,垂直分辨率为 30~40 m,根据雷达配置,1.0 km 处的最低可探测信号为 -30~-5 dBZ,主要技术参数见表 1。

CDP 探测云粒子的直径测量范围为 2~50  $\mu\text{m}$ ,分 30 档,随探测粒径的增加分辨率降低,1~12 档的直径间隔为 1  $\mu\text{m}$ ,13~30 档的直径间隔为 2  $\mu\text{m}$ ,粒子采样时间分辨率为 1 s。CIP 探测云粒子直径测量范围为 25~1 550  $\mu\text{m}$ ,分 62 档,粒径分辨率为 25  $\mu\text{m}$ ,粒子采样时间分辨率为 1 s。AIMMS-30 用于测量空气温度、湿度、风向、风速、飞行状态和飞行轨迹等,详细参数说明见文献 [16] 和 [19]。

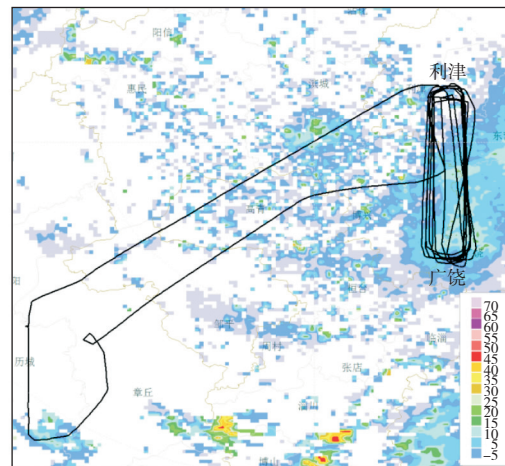
2019 年 11 月 17 日,探测飞机于 13:10 从济南遥墙机场起飞,13:40 飞至 6 200 m (海拔高度,下同) 到达利津上空,保持高度平飞至广饶,随后下降 600 m,保持高度平飞至利津,再次下降 600 m 高度,如此在利津至广饶之间做不同高度层的往返平飞探测。当飞机高度下降至 4 200 m,进入探测目标云中,下降高度间隔改为 300 m,直至下降到安全飞行高度后结束

对目标云探测,然后上升至巡航高度返回起飞机场。整个探测过程的最高探测高度为 6 200 m,最低探测高度为 900 m,探测飞行轨迹如图 1 所示。

表 1 机载 Ka 波段云雷达参数

Table 1 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
发射功率损耗	约 1 dB
脉冲宽度	0.1~20.0 s
发射波形	交替长脉冲或短脉冲
传输偏振	线性偏振
脉冲重复频率	20 kHz
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
天线罩材料	聚苯乙烯 (单向损耗 0.1 dB)
天线外形	直径为 14 cm, 4.2° 半功率波束宽度
天线增益	32.5 dB
第一旁瓣电平	-23 dB
接收器类型	单宽带射频
接收机噪声系数	约 4 dB
雷达中频频率	90 或 150 MHz
数字接收机	双通道, 16 位单极性编码输出
动态范围	90 dB@1 MHz 带宽



色阶—2019年11月17日15:04滨州雷达组合反射率因子,单位为dBZ。

图 1 2019 年 11 月 17 日探测飞机飞行轨迹

Fig.1 Flight trajectory on 17 November 2019

### 1.2 数据处理和反演算法

#### 1.2.1 探测数据处理方法

由于 KPR 存在探测盲区,导致飞行轨迹上、下各有 5 个距离库为无效探测数据,取飞行轨迹上、下各 2 个有效数据的均值作为飞行高度上 KPR 的探测值,该结果与 DMT 探测的云粒子谱在空间上相吻合。此外, KPR 数据采集时间频率为 0.2 s,云粒子

探头采样时间分辨率为 1.0 s, 取该秒内云雷达有效数据的平均值作为该时间的观测结果, 确保该结果与粒子谱数据时间一致。

计算飞机探测粒子谱的反射率因子时, 需要连续的云粒子谱分布。由于 CDP 和 CIP 粒径探测范围存在重叠区域, 且粒径探测分辨率不一致, 为了确定连续云粒子谱分布, 需去掉 2 个探头的重叠探测区域, 考虑到 CDP 和 CIP 第一通道数据的探测精度较低和 2 个探头探测区间连接处的间隙尽量小, 最后得到的粒子谱数据由 2 段构成: 第 1 段取 CDP 的 2—24 通道, 粒径范围为 3.0~38.0  $\mu\text{m}$ , 第 2 段取 CIP 的 2—62 通道, 粒径范围为 37.5~1 550.0  $\mu\text{m}$ 。合成的云粒子连续谱的粒径通道数为 84, 测量范围为 3.0~1 550.0  $\mu\text{m}$ 。

### 1.2.2 数据处理计算公式

利用米散射公式和连续粒子谱资料计算等效反射率因子  $Z_e$  [22-23]:

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{4\pi^5 K^2} \sum_{i=1}^{84} N(D_i) \sigma(D_i) D_i \quad (1)$$

其中:  $\lambda$  是雷达波长, 单位为 mm;  $K^2$  是等效介电常数, Ka 波段云雷达的取值为 0.879 7;  $N(D_i)$  是对应通道的粒子数浓度, 单位为  $\text{cm}^{-3}$ ;  $\sigma(D_i)$  是对应通道粒子的后向散射截面, 单位为  $\text{mm}^2$ ;  $D_i$  是对应通道粒子的平均直径, 单位为  $\mu\text{m}$ 。

利用 DMT 获取的云粒子谱资料, 根据公式(1) 计算得到等效反射率因子, 取其常用对数并乘以 10 得到以 dBZ 为单位的反射率  $Z$  值。

连续粒子谱粒子总数浓度  $C$  为

$$C = \sum_{i=1}^{84} \frac{n_i}{S_i \times v} = \sum_{i=1}^{84} C_i \quad (2)$$

粒子有效直径  $D_e$  为

$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^{84} C_i \times D_i^3}{\sum_{i=1}^{84} C_i \times D_i^2} \quad (3)$$

液态水含量  $Q_{\text{LWC}}$  为

$$Q_{\text{LWC}} = \frac{\pi \rho_w}{6} \sum_{i=1}^{84} C_i \times D_i^3 \quad (4)$$

其中:  $n_i$ 、 $C_i$ 、 $S_i$ 、 $D_i$  分别为第  $i$  通道粒子数量、粒子数浓度(单位为  $\text{cm}^{-3}$ )、采样面积(单位为  $\text{mm}^2$ )、平均直径(单位为  $\mu\text{m}$ )、 $v$  为真空速(单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、 $\rho_w$  为水的密度(单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

## 2 雷达反射因子正演值与探测值的分析

参考前人研究成果, 将粒子尺度大于 2  $\mu\text{m}$  且总数浓度大于 10  $\text{cm}^{-3}$  的区域判断为云区 [24-25]。大冰晶和雪晶粒子对粒子谱计算的雷达反射率因子影响较大, 由于 KPR 垂直向上向下的方向发射毫米波电磁波脉冲与斜向云粒子谱差异较大, 为了降低飞行姿态对分析结果的影响, 筛选在云中平飞探测时段, 且至少要有 20 s 的连续有效粒子谱数据开展分析。根据该原则, 可以筛选出 2 个时段 (15:09:34—15:17:34、15:28:04—15:31:34, 如图 2 中虚线框部分所示)。在第一个探测时段内, 飞机在 2 100 m 高度上平飞探测, 云内温度在  $-4.2 \sim -2.5$   $^{\circ}\text{C}$ 。在第二个探测时段内, 飞机在 1 800 m 高度上平飞探测, 后下降到 1 500 m 高度上探测, 云内温度为  $-2.0 \sim 0$   $^{\circ}\text{C}$ , 机上宏观记录显示所选取的有效数据段均在云中探测。

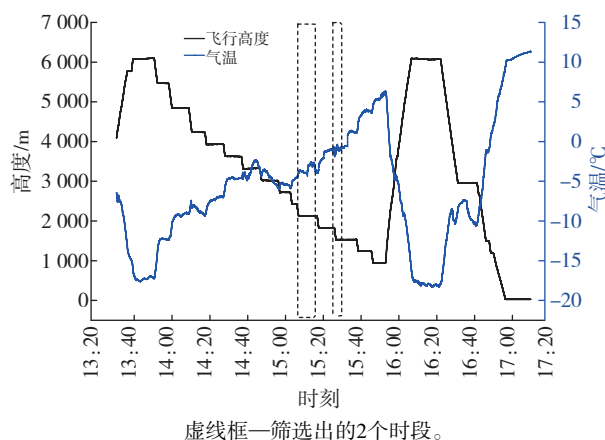


图 2 飞行高度和气温随时间的变化  
Fig. 2 Time series of flight altitude and air temperature

### 2.1 对比分析

第一个探测时段内云粒子谱正演得到的雷达反射率因子 ( $Z_e$ ) 与机载 KPR 探测值 ( $Z_m$ ) 对比结果如图 3 所示。可以看出, 在第一个云中平飞探测时段内, 探测的回波为云内回波, 回波强度为  $-10 \sim 10$  dBZ, 此时间段内  $Z_e$  略高于  $Z_m$ , 两者之间具有较强的一致性。15:09:34—15:16:34 云中平飞时间内, 探测高度距离云顶 500 m 左右, 径向速度和速度谱宽在窄幅范围内波动 (速度谱宽约为  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 径向速度为  $-1.0 \sim 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 此时的  $Z_e$  和  $Z_m$  十分吻合, 平均偏差为 4.1 dBZ, 均方根偏差为 4.3 dBZ。随着探测云体厚度逐渐变薄, 云内也随之变得不太稳定, 径向速度

和速度谱宽的波动范围变宽,扰动造成粒子谱分布不均匀,飞机探测的滴谱受局部粒子谱分布影响大,导

致  $Z_c$  波动范围变大,与  $Z_m$  偏差最大达 10.4 dBZ,均方根偏差达5.22 dBZ。

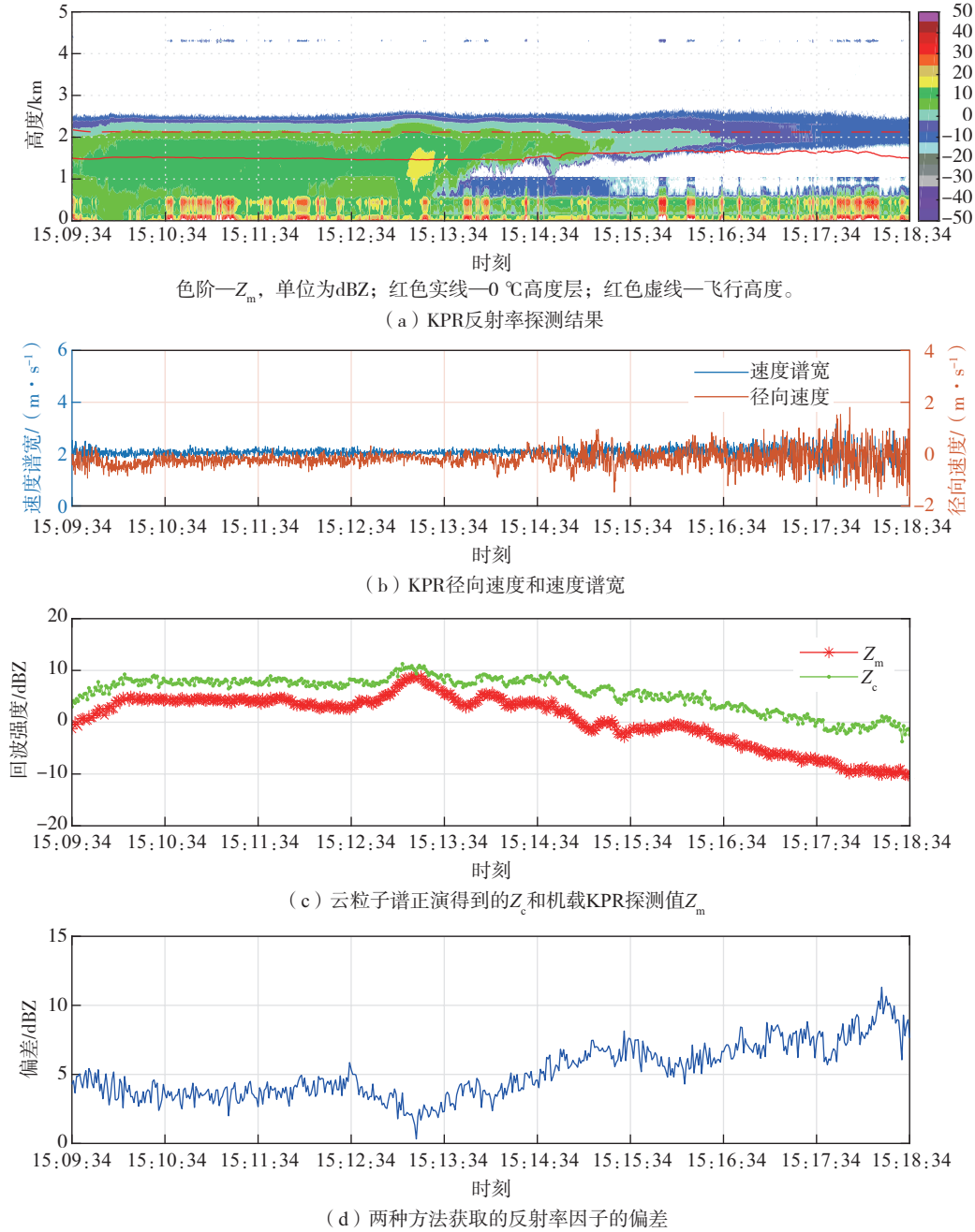
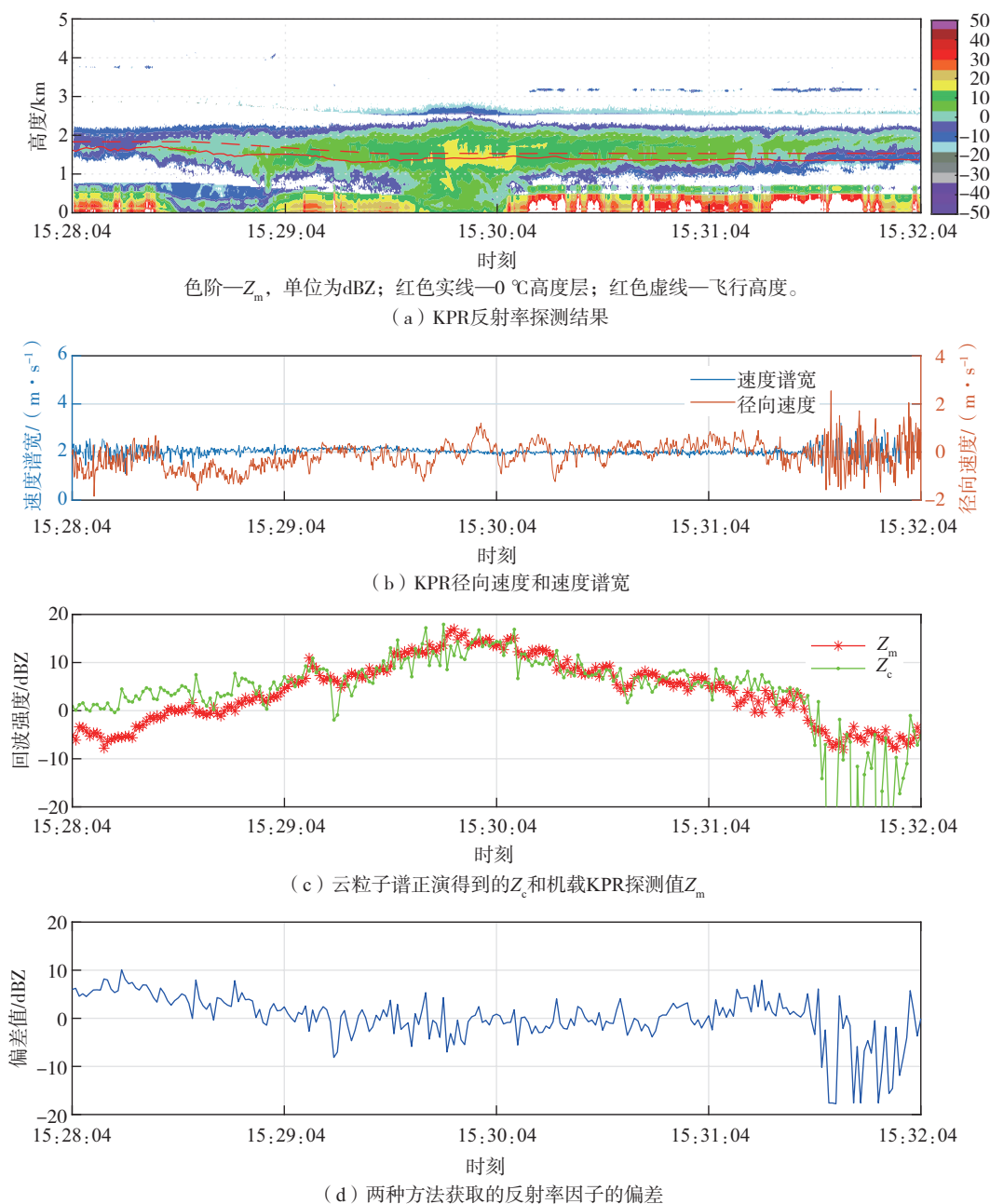


图3 第一个探测时段内  $Z_c$  与  $Z_m$  的对比

Fig.3 Comparison between  $Z_c$  and  $Z_m$  in the first detection period

第二个探测时段内云粒子谱正演得到的雷达反射率因子( $Z_c$ )与机载 KPR 探测值( $Z_m$ )的对比如图 4 所示。可以看出,在第二个云中平飞探测时段内,探测的回波为云内回波,回波强度为-10~20 dBZ,进入云体内部后,径向速度在-1.2~1.2  $m \cdot s^{-1}$  范围内波动,速度谱宽基本维持在2.0  $m \cdot s^{-1}$ ,此时段内  $Z_c$  与  $Z_m$  也

具有较好的一致性,偏差小于 10 dBZ,均方根偏差为 8.34 dBZ。随着飞机飞行到云体下边界,云中冰晶下落到云体下边界时已完全融化,具备相应大水滴的下落速度并持续加速,而小雨滴因蒸发导致尺度变小,下落速度也随之减小,出现速度谱宽跃增,导致两者的误差增大。

图4 第二个探测时间段内 $Z_c$ 与 $Z_m$ 对比结果Fig.4 Comparison between  $Z_c$  and  $Z_m$  in the second detection period

## 2.2 偏差分析

由云微物理参数和云粒子谱正演得到的雷达反射率因子( $Z_c$ )与机载KPR探测值( $Z_m$ )之间偏差的散点分布(图5)可以看出,探测时段内,粒子总数浓度为 $0\sim 450\text{ cm}^{-3}$ ,绝大部分落在 $50\sim 200\text{ cm}^{-3}$ 范围内, $Z_c$ 与 $Z_m$ 之间的偏差绝大部分落在 $\pm 10\text{ dBZ}$ 范围内,且随着总数浓度的增加,两者的偏差变小,当总数浓度大于 $200\text{ cm}^{-3}$ 时,偏差大

于 $10\text{ dBZ}$ 的样本数变得很少(图5a)。探测时段内大部分云粒子有效直径小于 $50\ \mu\text{m}$ ,偏差有90%以上的分布在 $\pm 10\text{ dBZ}$ 范围内;有效直径为 $50\sim 230\ \mu\text{m}$ 时, $Z_c < Z_m$ ;有效直径大于 $230\ \mu\text{m}$ 时, $Z_c > Z_m$ ,并随有效直径的增大而增大(图5b)。探测时段内的液态水含量小于 $0.90\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,随着云中液态水含量的增加,偏差控制在一定范围内。当云中液态水含量大于 $0.20\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, $Z_c$ 与 $Z_m$ 的偏差均落

在 $\pm 10$  dBZ范围内,云内含水量较小时,两者之间的偏差较大;当云中液态水含量为 $0.15 \sim 0.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$

时,有90%以上的 $Z_c < Z_m$ ;当云中液态水含量大于 $0.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,有98%以上的 $Z_c > Z_m$ (图5c)。

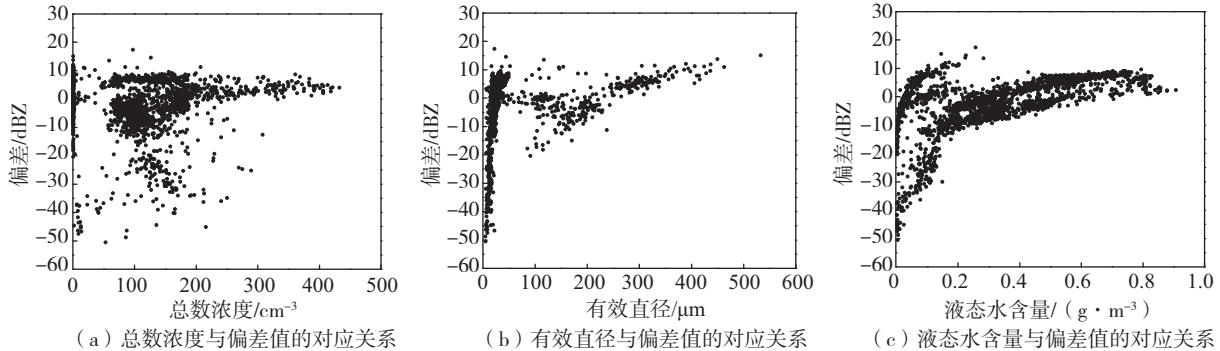


图5 不同云微物理参数的KPR探测值与粒子谱计算值之间的偏差分布

Fig.5 Scatter plot of deviation between KPR detection value and particle spectrum calculation value of different cloud microphysical parameters

综合以上分析,云微物理参数(粒子总数浓度、有效直径和液态水含量)的变化均对 $Z_c$ 与 $Z_m$ 之间的偏差有一定的影响,总体控制在 $\pm 10$  dBZ范围内。产生偏差的主要原因可能是粒子探头的采样体积很小,云内粒子分布的不均匀性易在探测的粒子谱上体现出来,而KPR的采样体积相对来说较大,探测结果是体积内平均值,特别是在总数浓度较小或在云的边界处,云的不稳定性更易影响云粒子谱,从而易于影响到正演得到的雷达反射率因子。

### 3 结论

利用空中国王350飞机探测平台获取的机载KPR探测资料和DMT云微物理探测资料,针对2019年11月17日山东一次层状云系弱降水过程,根据米散射理论通过云粒子谱计算雷达反射率因子,与机载KPR实测资料进行了对比分析,并对影响两者偏差的云微物理参数进行了探讨分析。得到以下主要结论:

(1)选取2个云中探测时段内采集的云粒子谱计算雷达反射率值,与同一机载探测平台KPR探测值对比分析,发现两者有很好的一致性。在层状云内探测时,两者之间的偏差和均方根偏差与云边界处的结果相比较小,分别为4.1 dBZ和4.3 dBZ。这说明KPR对层状云探测结果可信,可为地基云雷达反演云微物理参数提供参考依据。

(2)在KPR径向速度变化和速度谱宽较大的

区域,或在云层比较薄的区域,云粒子谱计算的雷达反射率因子值与机载云雷达探测值之间的偏差和均方根偏差变大,但在反射率因子的变化趋势上有较好的一致性。

(3)云微物理参数的变化均对雷达反射率因子计算值有一定的影响,与探测值的偏差总体控制在 $\pm 10$  dBZ范围内。随着总数浓度的增加,两者的偏差变小,当总数浓度大于 $200 \text{ cm}^{-3}$ 时,偏差大于10 dBZ的样本数较少;有效直径在 $50 \sim 230 \mu\text{m}$ 、液态水含量在 $0.15 \sim 0.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围内,计算值低于探测值,有效直径大于 $230 \mu\text{m}$ 、液态水含量大于 $0.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,计算值高于探测值。

(4)根据CIP图像显示,云中主要为过冷水,因此文中计算 $Z_c$ 采用的是水的等效介电常数 $K^2$ 。实际上由于云场分布不均,飞机探测处温度低于 $0^\circ\text{C}$ 时,仍存在一定的冰水混合区,这会导致粒子谱计算的反射率因子偏小。在后续的研究中,需要更为细致地分析机载探测粒子的大小和形态,区分冰晶和水滴,利用不同的等效介电常数进行计算,以期获得更为准确的结果。

**致谢:**山东省人民政府人工影响天气办公室天气与业务保障科各位专家负责飞行航线设计和飞行指挥,外场作业科参加了飞机探测试验工作,收集了珍贵的机载观测数据,为研究提供了关键探测数据支持,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] KOLLIAS P, SZYRMER W, RÉMILLARD J, et al. Cloud radar Doppler spectra in drizzling stratiform clouds; 2. observations and microphysical modeling of drizzle evolution[J]. *J Geophys Res*, 2011, 116(D13): D13203.
- [2] 李海飞, 乐满, 杨飞跃, 等. 基于地基云雷达资料的淮南地区冬季云宏观特征[J]. *干旱气象*, 2017, 35(6): 1011-1014.
- [3] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 383-391.
- [4] 武静雅, 刘黎平, 郑佳锋. 固态毫米波雷达探测模式的对比评估与分析[J]. *气象*, 2016, 42(7): 790-798.
- [5] STOKES G M, SCHWARTZ S E. The atmospheric radiation measurement (ARM) program: programmatic background and design of the cloud and radiation test bed[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1994, 75(7): 1201-1221.
- [6] SHUPE M D, MATROSOV S Y, UTTAL T. Arctic mixed-phase cloud properties derived from surface-based sensors at SHEBA[J]. *J Atmos Sci*, 2006, 63(2): 697-711.
- [7] 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.
- [8] 刘黎平, 谢蕾, 崔哲虎. 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*, 2014, 38(2): 223-236.
- [9] 李曦, 周筠珺, 刘黎平, 等. 毫米波云雷达反演层云微物理参数的个例试验[J]. *成都信息工程学院学报*, 2013, 28(3): 274-283.
- [10] 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.
- [11] 黄兴友, 樊雅文, 李峰, 等. 地基35 GHz测云雷达回波强度的衰减订正研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(4): 325-330.
- [12] 宗蓉, 刘黎平, 银燕. 基于飞机观测资料的降水粒子反射率因子阈值分析[J]. *大气科学学报*, 2014, 37(4): 469-475.
- [13] 蔡兆鑫, 周毓荃, 蔡森. 一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(5): 1460-1469.
- [14] CAI Z X, LI Z Q, LI P R, et al. Vertical distributions of aerosol and cloud microphysical properties and the aerosol impact on a continental cumulus cloud based on aircraft measurements from the Loess Plateau of China[J]. *Front Environ Sci*, 2022, 9: 808861.
- [15] CAI Z X, LI Z Q, LI P R, et al. Vertical distributions of aerosol microphysical and optical properties based on aircraft measurements made over the Loess Plateau in China[J]. *Atmos Environ*, 2022, 270: 118888.
- [16] 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.
- [17] NGUYEN C M, WOLDE M, BATTAGLIA A, et al. Coincident in situ and triple-frequency radar airborne observations in the Arctic[J]. *Atmos Meas Tech*, 2022, 15(3): 775-795.
- [18] LI D J, ZHAO C F, LI P R, et al. Macro- and microphysical characteristics of different parts of mixed convective-stratiform clouds and differences in their responses to seeding[J]. *Adv Atmos Sci*, 2022, 39(12): 2040-2055.
- [19] 张佃国, 王烁, 郭学良, 等. 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*, 2020, 44(5): 1023-1038.
- [20] 王洪, 张佃国, 王文青, 等. 基于多源资料的积层混合云降水微物理特征[J]. *大气科学*, 2022, 46(4): 886-902.
- [21] SHENG J J, ZHAO D L, WANG F, et al. Microphysical structure and vertical evolution of continental cumulus clouds from analysis of aircraft measurements in Northern China[J]. *Atmos Res*, 2022, 277: 106305.
- [22] PAZMANY A L, HAIMOV S J. Coherent power measurements with a compact airborne Ka-band precipitation radar[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 2018, 35(1): 3-20.
- [23] YUM S S, HUDSON J G. Maritime/continental microphysical contrasts in stratus[J]. *Tellus Ser B Chem Phys Meteorol B*, 2002, 54(1): 61-73.
- [24] ZHANG Q, QUAN J N, TIE X X, et al. Impact of aerosol particles on cloud formation: aircraft measurements in China[J]. *Atmos Environ*, 2011, 45(3): 665-672.
- [25] 蔡兆鑫, 蔡森, 李培仁, 等. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. *大气科学*, 2019, 43(6): 1191-1203.