

# 青藏高原那曲对流云中过冷水的毫米波雷达反演研究

任涛<sup>1</sup>, 郑佳锋<sup>1\*</sup>, 刘黎平<sup>2</sup>, 邹明龙<sup>1</sup>, 陈绍婕<sup>1</sup>, 贺婧姝<sup>1</sup>, 李剑婕<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;

2. 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 对流云中过冷水的识别一直是气象探测的难点。基于Ka波段毫米波雷达功率谱数据, 结合探空资料, 提出了高原对流云内过冷水的识别和反演算法; 利用那曲两个个例对算法效果进行了分析, 并结合同址的微波辐射计资料对雷达结果进行了初步验证; 最后, 探讨了算法与以往方法的差异。结果表明: 高原层积云、浓积云和高积云内由上升气流主导, 云内粒子相态变化快, 过冷水粒子的回波强度、粒径和含水量分布较广。对于不同云类, 过冷水的空间分布存在一定差异。过冷水的回波强度、粒径和含水量都与上升气流速度呈正相关, 在时间变化趋势和空间分布上都有很好的对应。微波辐射计和雷达的液态水路径在时间变化趋势和峰值大小上都较为一致, 相关系数为0.63~0.79。与以往方法相比, 算法对过冷水位置和参数反演的结果更为合理。

**关键词:** 毫米波雷达; 过冷水识别和反演; 功率谱; 对流云

中图分类号: P407.7

文献标识码: A

## Retrieval of supercooled water in convective clouds over Nagqu of the Tibetan Plateau using millimeter-wave radar measurements

REN Tao<sup>1</sup>, ZHENG Jia-Feng<sup>1\*</sup>, LIU Li-Ping<sup>2</sup>, ZOU Ming-Long<sup>1</sup>, CHEN Shao-Jie<sup>1</sup>, HE Jing-Shu<sup>1</sup>, LI Jian-Jie<sup>1</sup>

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The identification of supercooled water in convective clouds has always been a difficult point in meteorological sounding. Based on Doppler spectra of a Ka-band millimeter-wave radar and relevant radiosonde data, an algorithm for identifying and retrieving supercooled water in convective clouds of the Tibetan Plateau was proposed. Subsequently, retrieval effects of the algorithm were analyzed using two convective cases, and verified by comparing with measurements of a co-located microwave radiometer (MWR). Finally, the difference in results of the algorithm and other three previous methods was also discussed. The main findings are as follows: the stratocumulus, cumulus congestus, and altocumulus clouds over Nagqu are dominated by updrafts with rapid changes on the hydrometeor phase in the vertical orientation, resulting in widely distributions of the formed supercooled particles in terms of their reflectivity, effective radius and liquid water content. Supercooled particles of different convective cloud types also locate at different cloud body positions. The velocity of the in-cloud updraft is highly and positively correlated with the reflectivity, effective radius and liquid water content of supercooled water. They possess similar temporal variations and coincident spatial distributions. The radar-derived liquid water path is also proved to agree well with the counterparts of MWR with similar temporal variations and value peaks. Their correlation coefficients can approach 0.63~0.79. Compare with three previous methods, results from the proposed algorithm can be more reasonable on the retrieved supercooled water positions and

收稿日期: 2021-08-30, 修回日期: 2021-10-08

Received date: 2021-08-30, revised date: 2021-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(91837310), 国家重点研发计划项目(2018YFC1505702), 江苏省气象科学研究所北极阁基金项目(BJC201901), 成都信息工程大学人才引进项目(KYTZ201728)

**Foundation items:** The National Natural Science Foundation of China (91837310), supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1505702), Beijing foundation of Jiangsu Institute of Meteorological Sciences (BJG201901), and Scientific Research Foundation of Chengdu University of Information Technology (KYTZ201728).

作者简介(Biography): 任涛(1998-), 男, 四川乐山人, 硕士研究生, 主要从事雷达方面的研究, Email: 3200101031@stu.cuit.edu.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zjf1988@cuit.edu.cn

parameters.

**Key words:** millimeter-wave radar, supercooled water recognition and retrieval, radar Doppler spectral, convective clouds

## 引言

云中过冷水是指在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下环境中依然保持液态的云滴或雨滴,通常是因云层清洁而缺乏冻结核或存在强烈上升气流使液滴来不及冻结而形成。对于冷云,过冷水的存在会使其液态水含量远高于纯冰相云,进而对云辐射效应、水汽收支和降水过程等产生重要影响<sup>[1-5]</sup>。同时,云中过冷水也是人工增雨和民航飞行等领域关注的重点<sup>[4-5]</sup>。

云中过冷水的探测较为困难,目前潜在的手段有飞机、卫星、微波辐射计和雷达等。飞机探测是依靠搭载的云雨粒子成像仪等设备,其可信度较高,但代价大且难以连续观测。卫星探测主要利用温湿辐射计和星载雷达,具有空间覆盖广和不受地域限制等优势。如袁敏等<sup>[6]</sup>利用 CloudSat 星载雷达资料研究了云中过冷水的分布特征,发现过冷水含量和分布范围都随温度的降低而减小。Hu 等<sup>[7]</sup>利用 CALIOP 结合 MODIS 红外辐射计资料,研究了全球过冷水云的分布及其液态水含量,结果表明,东亚陆地上空过冷水云的液态水含量较高且符合 Gamma 分布特征,平均含水量为  $0.14\text{ g/m}^3$ 。

相较而言,地基毫米波云雷达是定点探测云中过冷水更有潜力的设备。它具有波长短、灵敏度高、时空分辨率高和连续观测能力强等优势,能有效穿透云层内部进而获取粒子的回波强度和运动状态等信息。如 Shupe<sup>[8]</sup>利用 Ka 波段云雷达结合激光雷达和微波辐射计对北极层积云内的过冷水进行了研究,总结出了识别云中过冷水的雷达参量阈值。彭亮等<sup>[9]</sup>也利用 W 波段云雷达结合探空,基于 Shupe 所提的参量阈值建立模糊逻辑识别算法,识别了安徽寿县地区厚的中低云和弱降水云内的过冷水。地基毫米波云雷达采用垂直指向探测,其功率谱资料对云动力和微物理参数的研究具有重要价值。观测发现,当云内有过冷水滴与冰晶或霰等共存时,由于其下落末速度存在显著差异,在功率谱形态上通常会呈现多峰结构,这也是识别过冷水的重要依据。如 Rambukkange 等<sup>[10]</sup>利用 Ka 波段云雷达功率谱的双峰特征识别冰云中的过冷水层,并利用激光雷达资料进行验证,结果表明两者十分一致。Shupe 等<sup>[11]</sup>也通过该方法识别云中过冷水,并

从功率谱中分离出了过冷水信号进而计算得到液态水路径。将其与微波辐射计探测结果进行对比,结果表明二者也非常吻合。此外,也有其他学者基于功率谱识别过冷水。如 Riihimaki 等<sup>[12]</sup>利用 Ka 波段云雷达的谱宽和偏斜度等参量,使用 K 均值聚类法识别混合相云中的过冷水。李玉莲等<sup>[13]</sup>和 Wang 等<sup>[14]</sup>也基于功率谱资料识别过冷水,并利用微波辐射计数据对结果进行验证,都证实了这种方法的可行性。

同时,反演相关微物理参数在过冷水研究中也具有重要意义。对实测数据进行拟合,得到有效半径/液态水含量-雷达反射率因子的经验关系,从而实现参数反演,是最早提出的方法<sup>[15-17]</sup>。Frisch 等<sup>[18]</sup>利用 Ka 波段云雷达资料,在假设云滴谱符合高斯分布的基础上,进一步提出了反射率因子与数浓度、有效半径以及液态水含量的经验关系,成为国内外学者针对不同云类进行参数反演的主要手段<sup>[11,13-14]</sup>。刘黎平等<sup>[19]</sup>基于云雷达功率谱资料反演弱降水粒子的微物理参数,结合微雨雷达和雨滴谱仪资料验证了该方法的可行性。

青藏高原那曲地区平均海拔在  $4550\text{ m}$  以上,大气洁净,气溶胶含量较低。在夏季,该地区是对流的频发区,且在对流云内十分容易形成过冷水,而目前对高原对流云内过冷水的探测和研究几乎未见。因此,本文利用第三次青藏高原大气科学试验 TIPEX-III 的 Ka 波段毫米波云雷达资料,结合探空资料,提出了对流云内过冷水的识别算法,算法包含了数据处理、质量控制、过冷水识别和微物理参数反演等部分。为验证算法的合理性,分析了对流云中过冷水含量与大气上升气流的关系,与前人的理论结果进行定性对比,并结合同址的微波辐射计资料,对两次典型对流云个例(包含层积云、浓积云和高积云)的识别效果进行了分析和定量检验。最后,讨论了本文算法与以往方法的差异。本文旨在为高原云-降水中过冷水的探测和数值模拟等相关研究提供参考。

## 1 设备与资料

本文使用的雷达和微波辐射计为 TIPEX-III 试

验期间安置在西藏那曲的设备。观测站点海拔为 4507 m, 位于 92°04' E 和 32°19' N。雷达由中国气象科学研究所和航空科工集团第 23 研究所联合研制, 是一部固态多普勒体制的 Ka 波段毫米波云雷达 (以下简称 Ka-MMCR)。雷达工作频率为 33.44 GHz, 垂直指向工作, 波束宽度为 0.3°, 时空分辨率为 9 s 和 30 m。为满足不同云类的观测需求, 雷达设计了三种观测模式 M1\M2\M3, 三种观测模式的详细差异可见 Liu 等<sup>[20]</sup> 中的描述。考虑到 M1 模式下功率谱的速度分辨率最高, 当云中有过冷水和冰相粒子共存时, 其信号区分度更大, 因此本文选用 M1 模式的观测资料, 包括功率谱 ( $SP$ , dB)、等效反射率因子 ( $Z_e$ , dBZ)、平均多普勒速度 ( $V_M$ , m/s) 和谱宽 ( $\sigma_v$ , m/s)。M1 模式的主要性能参数如表 1 所示。

表 1 Ka-MMCR M1 模式的主要性能参数

Table 1 Ka-MMCR main performance parameters of M1 operational mode

序号	参数名	参数值
1	脉冲宽度	0.2 $\mu$ s
2	谱分析方法	快速傅里叶变换 (FFT)
3	谱采样点数	256
4	相干积累数	4
5	非相干积累数	16
6	高度探测范围	0.12~10 km
7	时间分辨率	9 s
8	空间分辨率	30 m
9	速度探测范围	-4.635~4.635 m/s
10	速度分辨率	3.62 cm/s

同址的微波辐射计为美国 Radiometric 公司生产的 MP3000A 型设备 (以下简称 MWR)。MWR 是一种无源微波遥感探测设备, 有效探测高度为 0~10 km, 空间分辨率为 50~200 m, 共分为 58 层, 时间分辨率为 2~3 min。MWR 工作时天线以一定角度或垂直指向天空, 测量来自天空特定频率下的微波辐射能, 经过处理后转化成亮温, 最后通过神经网络算法反演得到温度廓线、相对湿度廓线、液态水含量廓线和液态水路径等。

## 2 基于 Ka-MMCR 资料的过冷水识别和参数反演算法

本文基于 Ka-MMCR 探测对流云中过冷水的回波特征, 提出过冷水的识别和反演算法。算法的主要内容和步骤如图 1 所示, 包含“数据处理和质量控

制”、“过冷水识别和提取”和“过冷水微物理参数反演”三部分。“数据处理和质量控制”旨在准确提取功率谱中有效的云雨信号并进行质量控制; “过冷水识别和提取”利用环境温度条件、双峰谱和高谱宽等特征, 实现过冷水识别和提取; “过冷水微物理参数反演”是基于上述结果, 进一步计算得到过冷水的有效粒子半径  $R_e$ 、液态水含量  $LWC$  和液态水路径  $LWP$  等微物理参数。各部分详细介绍如下:

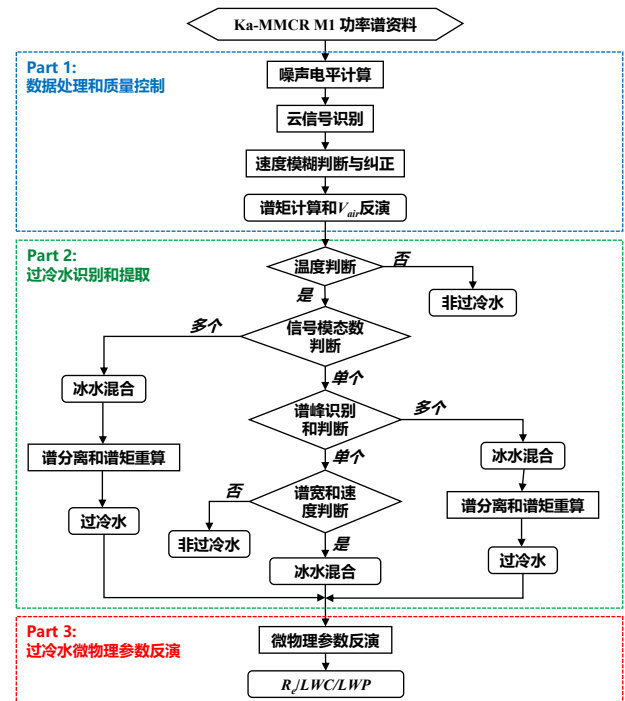


图 1 基于 Ka-MMCR 资料的云中过冷水识别算法流程图

Fig. 1 Flowchart of in-cloud supercooled water identification algorithm based on Ka-MMCR measurements

### 2.1 数据处理和质量控制

功率谱反映了雷达探测单元内粒子后向散射能量随多普勒速度的分布。雷达实测的功率谱同时包含了云雨信号和噪声, 因此采用以下方法进行处理:

(1) 噪声电平计算: 噪声电平指谱中噪声的平均功率, 本文采用 Petitdidier 等<sup>[21]</sup> 提出的分段法计算噪声电平 ( $P_N$ )。

(2) 云信号提取: 检索谱中所有高于  $P_N$  的连续信号段, 由于云雨信号的信噪比通常高于噪声且分布范围更宽, 因此设定信噪比阈值 ( $TS_{snr} = -12$  dB) 和谱点数阈值 ( $TS_{num} = 5$ ) 来识别有效的云雨信号段<sup>[22]</sup>。将不满足条件的谱点都视为噪声, 并计算出噪声功率最大值作为噪声与信号的分界 ( $P_B$ )。将  $P_B$  与云

雨信号两端的交点作为起点和终点,将两者之间的峰值作为谱峰。

(3) 速度模糊纠正: M1 模式的最高可测速度 ( $V_{max}$ ) 较小, 当云雨较强时会出现速度模糊, 表现为部分云雨信号超过了  $\pm V_{max}$  从而被反向折叠, 该问题会严重影响后续微物理参数的反演精度。因此, 本文采用郑佳锋<sup>[23]</sup> 提出的退模糊方法进行纠正, 即根据风随高度连续变化原则, 从云顶往下通过逐库对比来判断速度模糊及其类型, 最终通过平移纠正谱模糊。图 2 为那曲 2015 年 8 月 2 日 23:21 (北京时间, 下同) 雷达在层积云 3.06 km 探测的功率谱和速度模糊纠正结果, 图中叉号为云雨信号的起终点, 圆圈为谱峰。对比可见, 由于粒子落速较快, 图 2 (a) 中部分谱信号超出了雷达  $+V_{max}$ , 导致右侧部分信号被反向折叠到左侧。如图 2(b) 所示, 纠正速度模糊后, 左段模糊信号被平移到右端, 整个谱的正速度范围也被扩大。

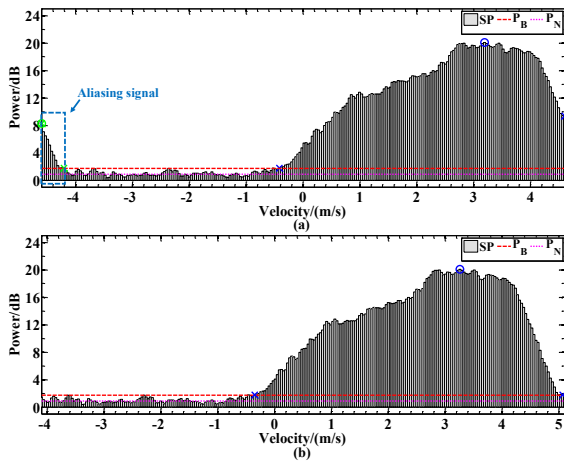


图2 那曲 2015 年 8 月 2 日 23:21 雷达在层积云 3.06 km 处探测的功率谱, (a) 和 (b) 分别为原始谱和纠正后的谱, 图中叉号和圆圈分别代表云雨信号的起终端点和谱峰

Fig. 2 Radar Doppler spectra detected at 23:21 on August 2, 2015 over Nagqu at 3.06 km of the stratocumulus, (a) and (b) are spectra before and after dealiasing, respectively, the crosses and circles in figures represent start and end points and peaks of the cloud-precipitation signal

(4) 谱矩计算: 经上述处理后, 通过局部积分计算出雷达谱矩, 包括回波功率  $P_r$  (dBm)、 $Z_e$  (dBZ)、 $V_M$  (m/s) 和  $\sigma_v$  (m/s), 公式如(1—4)所示。式中  $v_i$  和  $v_e$  为云雨信号起终点的多普勒速度 (m/s),  $P_i$  为云雨信号功率 (dBm),  $C$  为雷达常数,  $R$  为探测距离 (m),  $P_t$  为发射功率 (W),  $G$  为天线增益 (dB),  $\theta$  和  $\varphi$  为水

平和垂直波束宽度 (deg),  $h$  为照射深度 (m),  $\lambda$  为波长 (mm),  $|k|^2$  为复折射指数,  $L_e$  为馈线损耗 (dB)。

$$P_r = \sum_{i=v_i}^{v_e} (P_i - P_N) \quad (1)$$

$$Z_e = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P_r \times R^2}{C} \right),$$

$$C = \frac{P_t \times G^2 \times \theta \times \varphi \times h \times \pi^3 \times |k|^2}{1024 \times \ln 2 \times \lambda^2 \times L_e} \quad (2)$$

$$V_M = \frac{\sum_{i=v_i}^{v_e} i \times (P_i - P_N)}{\sum_{i=v_i}^{v_e} (P_i - P_N)} \quad (3)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=v_i}^{v_e} (i - \bar{V})^2 \times (P_i - P_N)}{\sum_{i=v_i}^{v_e} (P_i - P_N)}} \quad (4)$$

(5) 大气垂直速度和粒子平均下落末速度反演: Ka-MMCR 垂直指向探测时, 多普勒速度包含了粒子下落末速度 ( $\bar{V}_t$ , m/s) 和大气垂直速度 ( $V_{air}$ , m/s)。  $V_{air}$  是重要的云动力参数, 其不仅与过冷水形成密切联系, 同时也会影响后续云滴谱的反演。本文采用 Gossard<sup>[24]</sup> 和 Kollias 等<sup>[25]</sup> 提出的小粒子示踪法反演  $V_{air}$ , 基本原理是: 对于高灵敏度毫米波雷达可测量的最小粒子, 其自身落速相较于对流风速基本可忽略, 因此它们的信号可用于示踪, 从而反演出大气垂直速度。Shupe 等<sup>[26]</sup> 和 Zheng 等<sup>[27]</sup> 分别利用飞机资料和地基资料, 验证了该方法的有效性。

小粒子示踪法的误差与雷达灵敏度和云内最小粒子的尺寸有关。因此, 本文为了尽可能减小误差, 先估算出示踪粒子的下落末速度  $V_{trace}$ 。将示踪粒子的反射率因子视为  $Z_{trace}$ , 假设其数浓度为  $N_{trace}$ 。研究表明, 不同云雨过程中粒子数浓度变化较大, Sauvageot 和 Omar<sup>[16]</sup> 认为 -15 dBZ 可以作为云滴和降水粒子的分界; 宗蓉发现 -5 dBZ 是毛毛雨形成的阈值<sup>[28]</sup>; Chen 等<sup>[29]</sup> 研究表明, 小雨滴形成时  $Z_e$  约为 10 dBZ。根据这些结论, 我们将示踪粒子分为如下类别:  $Z_e$  小于 -15 dBZ, 认为是云滴,  $N_{trace}$  取  $10^8 \text{ m}^{-3}$ ;  $Z_e$  为 -5 dBZ, 认为是毛毛雨,  $N_{trace}$  取  $10^6 \text{ m}^{-3}$ ;  $Z_e$  高于 10 dBZ, 认为是小雨滴,  $N_{trace}$  取  $10^4 \text{ m}^{-3}$ ; 当粒子  $Z_e$  位于上述梯度之间时, 采用反距离加权法计算  $N_{trace}$ 。结合示踪粒子  $Z_{trace}$ , 通过以下公式估算得到示踪粒子的直径  $D_{trace}$ :

$$D_{trace} = \left( \frac{Z_{trace}}{N_{trace}} \right)^{1/6} \quad (5)$$

再根据粒子下落末速度与直径的关系式(详见后文的式8-9)得到示踪粒子下落末速度 $V_{trace}$ 。最后,如式(6-7)所示,从功率谱中示踪粒子的多普勒速度 $\omega_0$ 中扣除示踪粒子下落末速度 $V_{trace}$ 即可得到 $V_{air}$ ,进一步从 $V_M$ 中扣除 $V_{air}$ ,即可得到 $\bar{V}_t$ 。

$$V_{air} = \omega_0 - V_{trace} \quad (6)$$

$$\bar{V}_t = V_M - V_{air} \quad (7)$$

## 2.2 过冷水识别和提取

研究表明,云中过冷水存在的环境温度为 $-40^\circ\text{C}$ 至 $0^\circ\text{C}$ 之间,并且过冷水大多以冰水混合的形式存在<sup>[8,30]</sup>。当雷达探测体积内仅存在一种相态的粒子时,功率谱通常只包含一段云雨信号,且近似呈单峰的高斯分布;而当有两种不同相态的粒子(如过冷水和大冰晶或霰)共存时,由于其落速差异明显,谱将出现多段信号,我们将这种情况称为多模态,如图3(a)所示。在实际情况中,当不同相态粒子的落速差异不足以形成多模态时,功率谱更容易出现多个局部谱峰,谱峰之间还存在一定深度的鞍点,我们将这种情况称为多谱峰,如图3(b)所示。研究表明,Ka-MMCR功率谱中的多模态和多谱峰特征可以作为判断云内过冷水的有效依据<sup>[13-14,31]</sup>。综合上述特征,采用以下方法识别云内的过冷水:

(1) 温度判断:根据探空获取的温度信息,判断雷达距离库的温度 $T$ ,若 $-40^\circ\text{C} < T \leq 0^\circ\text{C}$ ,则进入下一步,否则直接视为非过冷水。

(2) 模态数判断:根据云雨信号的起终点信息,判断信号的模态数,若不少于两个模态,则认为存在冰水混合,将其标记并在后续进行谱分离;反之,则视为单模态,进一步判断谱峰数。

(3) 谱峰数判断:谱峰判断采用临近功率对比法,若存在某谱点功率都高于两侧若干点,则其被识别为一个谱峰。但考虑到云内湍流等引起的谱脉动,本文借鉴Shupe等<sup>[11]</sup>的约束条件,进一步排除假谱峰:

A. 任意局部谱应具有连续5个以上谱点(宽度为 $0.181\text{ m/s}$ );

B. 临近谱峰对应的多普勒速度间隔应大于 $0.145\text{ m/s}$ ;

C. 任意谱峰的峰值功率应高于 $2.5$ 倍 $P_B$ ;

D. 连续谱峰之间的鞍点功率小于 $0.75$ 倍次峰的峰值功率;

当谱峰数不少于两个时,视为存在冰水混合,将其标记并在后续进行谱分离;反之,则进入下一步判断。

(4) 谱宽和速度判断:研究发现,不同相态粒子构成的谱信号较为分散,若其谱宽超过 $0.4\text{ m/s}$ ,即使谱呈单峰形态也可表征云内存在冰水混合<sup>[2,8,14]</sup>。但考虑到该方法的精确性,本文仅将谱宽超过 $0.4\text{ m/s}$ 的距离库标记为冰水混合。另外,由于谱宽还受到垂直风切变和湍流的影响,该情况也必须排除。因此以当前库为中心,检测与临近八个库的大气垂直速度差,若差异绝对值超过 $1\text{ m/s}$ ,则也标记为非过冷水。

(5) 过冷水谱分离:为精确计算过冷水的微物理参数,将功率谱中过冷水信号从鞍点处向下根据高斯对称分布进行分离。图3(a-b)给出了分离后的过冷水(左侧)与冰晶(右侧)的独立谱。将过冷水信号分离后,可根据公式(1-5)重新算出过冷水的谱矩。

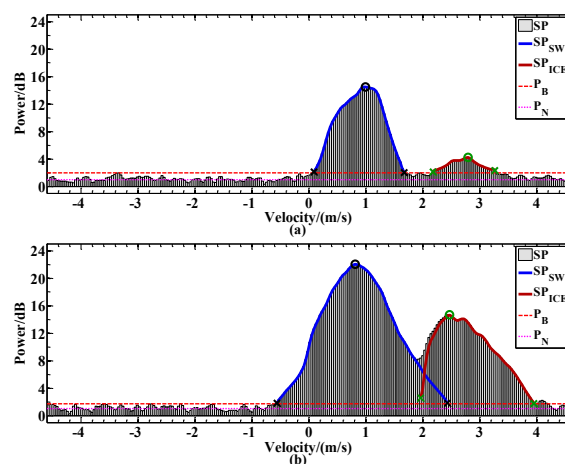


图3 那曲2015年8月2日23:22雷达在层积云2.7 km和2.91 km探测的功率谱,(a)和(b)分别为多模态和多谱峰现象, $SP$ 、 $SP_{sw}$ 和 $SP_{ice}$ 分别为原始谱和分离的过冷水和冰晶谱  
Fig. 3 Radar Doppler spectra detected at 23:22 on August 2, 2015 over Nagqu at 2.7 km and 2.91 km of the stratocumulus, (a) and (b) reflect phenomena of multiple modals and multiple peaks,  $SP$ ,  $SP_{sw}$ , and  $SP_{ice}$  represent the original spectra, supercooled water spectra, and ice crystal spectra

## 2.3 过冷水微物理参数反演

以往一些研究直接将雷达探测的 $Z_e$ 通过经验关系式来估算过冷水的微物理参数<sup>[13,18,32]</sup>,这种方法需提前假设粒子谱模型和数浓度,或直接采用其他地区的经验公式,因此具有较大的不确定性,也

缺乏普适性。本文基于上述的数据处理和过冷水识别,从功率谱角度来反演过冷水滴的微物理参数:

将功率谱中的过冷水信号按照  $V_{air}$  进行平移得到静止空气条件下的过冷水信号谱  $P_{ri} - V_{ii}$ ,  $P_{ri}$  和  $V_{ii}$  分别代表谱点功率和下落末速度。再将  $P_{ri}$  带入雷达气象方程(2)得到过冷水的回波强度谱  $Z_i - V_{ii}$ 。研究表明,液态粒子的下落末速度与直径存在以下关系<sup>[24,33]</sup>:

$$D = \begin{cases} \left( \frac{18\mu}{g} \times V_{ii} \right)^{0.5}, D < 0.1 \text{ mm} \\ \frac{1}{0.6} \times \ln \frac{10.3}{9.65 - \frac{V_{ii}}{\delta(H)}}, D \geq 0.1 \text{ mm} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\delta(H) = 1 + 3.68 \times 10^{-5}H + 1.71 \times 10^{-9}H^2$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $\mu$  为大气粘性系数,取  $0.01615 \text{ g/m/s}$ ,  $H$  为海拔高度(m)。利用式(9)进一步将  $Z_i - V_{ii}$  转化得到  $Z_i - D_i$ ,再根据 Rayleigh 条件下  $Z$  的定义式即可计算得到过冷水滴谱  $N(D_i)$  ( $\text{m}^{-3}/\text{mm}$ ):

$$N(D_i) = \frac{Z_i}{D_i^6 \times \Delta D_i}, \quad (9)$$

式中  $\Delta D_i$  (mm) 为粒子直径间隔。在反演出过冷水滴谱后,进一步积分得到有效粒子半径  $R_e$  (mm) 和液态水含量  $LWC$  ( $\text{g/m}^3$ ):

$$R_e = \frac{\sum_{r_i=r_{min}}^{r_{max}} r_i^3 \times n(r_i) \times \Delta r_i}{\sum_{r_i=r_{min}}^{r_{max}} r_i^2 \times n(r_i) \times \Delta r_i}, \quad (10)$$

$$LWC = \frac{\pi}{6} \sum_{D_i=D_{min}}^{D_{max}} \rho \times N(D_i) \times D_i^3 \times \Delta D_i, \quad (11)$$

式中  $\rho$  为液态水的密度。液态水路径  $LWP$  ( $\text{g/m}^2$ ) 反映云体垂直柱上的总液水含量,  $LWP$  计算如式(12)所示,式中  $n$  代表垂直方向上过冷水的库数,  $\Delta z$  为距离库高度。

$$LWP = \sum_{i=1}^n LWC(i) \times \Delta z. \quad (12)$$

### 3 反演结果分析和初步验证

选取 TIPEX-III 期间在那曲观测的层积云、浓积云、高积云和淡积云个例,对云中过冷水的识别结果和反演效果进行分析,并探究过冷水和上升气流的关系,最后利用同址 MWR 观测的  $LWP$  对雷达反演结果进行初步验证。

#### 3.1 对流云中过冷水的雷达识别和反演效果

如图4为那曲2015年8月2-3日22:45-01:00层积云(个例一)的雷达探测和反演结果,图4(a

-h)依次为  $Z_e$ 、 $\sigma_v$ 、 $V_{air}$ 、 $\bar{V}_t$ 、过冷水标记、过冷水  $Z_e$ 、过冷水  $R_e$  和  $LWC$ 。从全局谱的  $Z_e$  回波来看,层积云在本站上空维持2小时15分钟,云顶高约4.5 km、起伏较小,但云内存在明显的回波强度梯度,强中心可达15 dBZ以上。云层在空中产生降水,回波呈下挂特点。 $\sigma_v$  回波表明,除00:20-00:35时段以外,靠近云顶的强回波区(虚线框)均对应较大谱宽值,  $\sigma_v$  基本都超过0.4 m/s,反映出这些区域可能有过冷水与冰粒子共存。反演的  $V_{air}$  和  $\bar{V}_t$  表明,层积云基本受上升气流控制,上升气流较强的位置与高谱宽区非常一致,且对应的  $Z_e$  都比较大,上升气流最快可超4 m/s,而云体中下部和弱回波区域的上升运动则较弱,基本不超过1 m/s。水凝物平均落速  $\bar{V}_t$  的分布也基本与  $Z_e$  对应,符合两者均由粒子尺寸直接决定的理论结果。 $\bar{V}_t$  大负值区与  $V_{air}$  和  $\sigma_v$  大值区也非常对应,反映了上升气流促使大冰晶或液态水凝物形成,  $\bar{V}_t$  最小可达-4 m/s。

在图4(e)中,红、蓝和灰三色分别代表雷达识别的过冷水区域、冰水混合区域和非过冷水区域。由结果可见,过冷水和冰水混合区都位于-20~0 °C,且云顶温度高于-27 °C,这与 Westbrook 和 Illingworth 研究得到的过冷水存在的环境温度结果相一致<sup>[34]</sup>。在强上升气流作用下,层积云的上部产生了丰富的过冷水,同时也使过冷水滴和冰晶的谱信号混合,难以形成明显的多峰特征,因此算法依靠高谱宽特征将该区域识别为冰水混合。在3~3.5 km 高度层及其附近区域,上升气流减弱,水凝物主要为经过淞附增长而沉降的冰雪晶粒子,因此被识别为非过冷水区。而在云体下部,上升气流微弱,冰晶与过冷水滴落速差异明显,从而形成了显著的多峰信号,算法从中分离出过冷水信号并将其识别为过冷水区域。从过冷水  $Z_e$  可见,过冷水回波强度为-25~20 dBZ,大部分高于-5 dBZ,尤其在高谱宽和强上升气流出现的时刻(虚线框),  $Z_e$  最大可接近20 dBZ。说明在强上升气流作用下,层积云中的过冷水滴可通过暖雨的增长机制碰并至较大尺度,甚至演变成毛毛雨滴和小雨滴<sup>[35]</sup>。反演的  $R_e$  和  $LWC$  表明,层积云中过冷水滴的粒径分布较广,在云体边缘和弱回波区较小,  $R_e$  基本小于50  $\mu\text{m}$ ;而在云内强回波区则较大,  $R_e$  可达100~225  $\mu\text{m}$ 。  $LWC$  的分布基本与  $R_e$  一致,在云体边缘和弱回波区基本小于0.1  $\text{g/m}^3$ ,而在回波较强的区域,尤其是23:10和00:38左右,  $LWC$  可高达0.2~1  $\text{g/m}^3$ 。

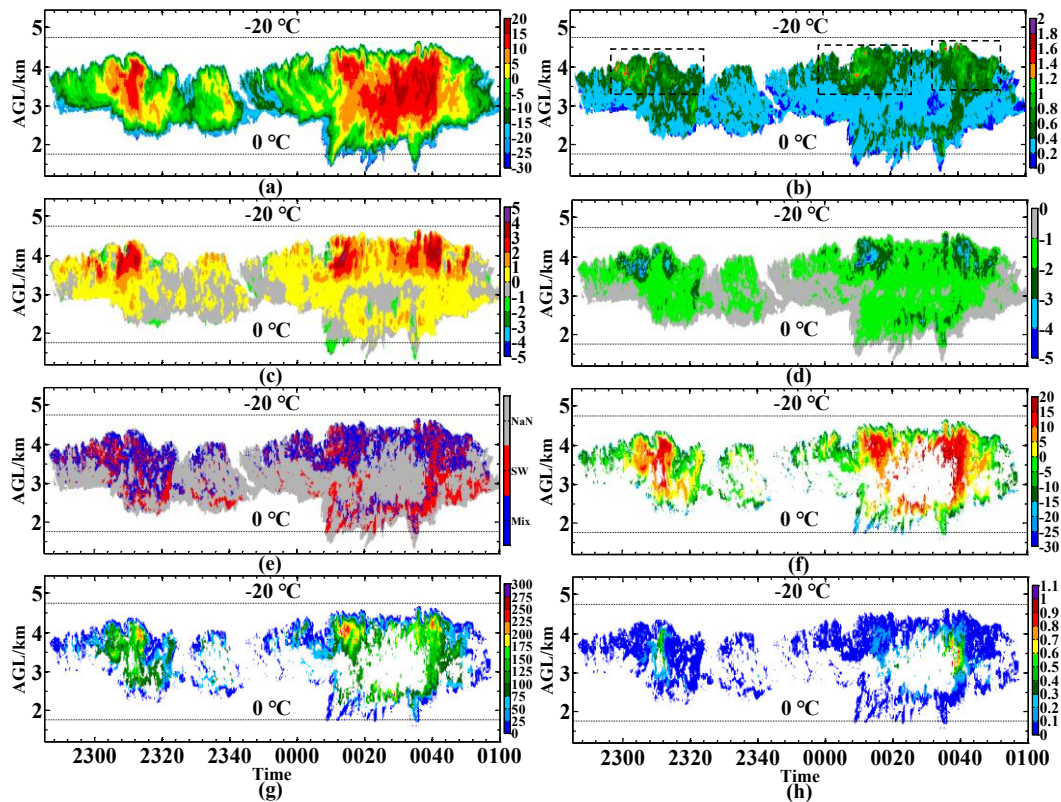


图4 那曲2015年8月2-3日22:45-01:00层积云(个例一)的雷达探测和反演结果,(a-h)分别为反射率因子 $Z_e$  (dBZ)、谱宽 $\sigma_v$  (m/s)、大气垂直速度 $V_{air}$  (m/s)、粒子平均下落末速度 $\bar{V}_t$  (m/s)、过冷水识别标记、过冷水的 $Z_e$ 、有效半径 $R_e$  ( $\mu\text{m}$ )和含水量 $LWC$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), Non代表非过冷水、SW代表过冷水、Mix代表冰水混合,横直虚线为那曲站探空得到的 $-20^\circ\text{C}$ 和 $0^\circ\text{C}$ 层高度

Fig. 4 Radar observations and retrievals of the stratocumulus cloud (case one) observed at Nagqu during 22:45 - 01:00 on August 2 - 3, 2015, (a) - (h) are radar reflectivity factor  $Z_e$  (dBZ), spectrum width  $\sigma_v$  (m/s), vertical air velocity  $V_{air}$  (m/s), particle mean terminal velocity  $\bar{V}_t$  (m/s), remarks of particle phase, supercooled water  $Z_e$ , effective radius  $R_e$  ( $\mu\text{m}$ ), and liquid water content  $LWC$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ), the 'Non', 'SW', and 'Mix' denote non-supercooled water, supercooled water, and mix of ice and supercooled water, the horizontal dashed lines are heights of isothermal layers observed by radiosonde

如图5为那曲2015年8月25日15:45~17:30浓积云、高积云和淡积云(个例二)的雷达探测和反演结果,各子图含义同图4。从全局谱 $Z_e$ 可见,浓积云出现在15:50~16:40,持续近50分钟。云层发展较高,云顶最高可超过7.5 km,垂直尺度约5 km,云顶起伏明显且云内回波强度梯度大,强中心可达15~10 dBZ。高积云出现在17:00~17:30,持续时间稍短,约30分钟,云底基本超过4 km,云顶可达7.5 km,云体倾斜,回波强度相较浓积云弱且强中心范围更小,但最强回波也在5 dBZ以上。淡积云位于高积云之下,尺度最小、回波最弱。探空表明,三块云的云底都在 $0^\circ\text{C}$ 高度以上,大部分回波在 $-40^\circ\text{C}$ 高度以下。 $\sigma_v$ 回波表明,浓积云顶部和底部主要受夹卷和升华作用影响,冰晶较小、粒子谱较窄,对应谱宽值较小;而云中部的冰晶尺寸较大且与过冷水混合,造成谱宽增大,基本都超过0.4 m/s。高积云大

部分区域的谱宽值也都较大,反映了云内水凝物多为冰水混合的状态。低空淡积云的谱宽值都很小,粒子谱较窄。算法反演的 $V_{air}$ 和 $\bar{V}_t$ 表明,浓积云大部分区域受上升气流控制,但中部强回波区存在明显的垂直风切变,强上升和下沉气流交错,最大速度都接近4 m/s。高积云也基本由上升气流控制,且上升速度整体较浓积云更大,与倾斜上冲的外观结构相对应。淡积云内对流则最弱。浓积云强回波区的水凝物粒子拥有最大的 $\bar{V}_t$ ,高积云次之,而淡积云最小。

从雷达识别的过冷水标记来看,浓积云、高积云和淡积云内过冷水的分布特征与层积云明显不同,这是由于不同类型云体的发展高度和上升气流作用区域存在差异。层积云内的上升气流主要位于云顶,因此该区域存在连续的过冷水层,过冷水

含量也最丰富。而在浓积云和高积云的顶部附近,由于温度较低,不利于过冷水形成,云粒子基本呈冰相。云体中下部则在强上升气流作用下形成过冷水,同时冰晶经过淞附增长使功率谱谱宽增大或出现显著的多峰信号,大部分区域为过冷水和冰水混合。淡积云内由于上升运动很弱,水凝物基本为尺寸较小的冰晶。此外,由于浓积云内存在更强的风切变和湍流,因此其冰水混合区域的比例较层积云更高,过冷水的空间分布也相对更均匀<sup>[36]</sup>。从过冷水  $Z_e$ 、 $R_e$  和  $LWC$  可见,浓积云和高积云内过冷水的回波强度分布也较广,为  $-20\sim 15$  dBZ。与层积云类似,浓积云和高积云内过冷水滴也通过类似暖雨过程的碰并增长产生降水。但与层积云相比,后者中过冷水滴的尺寸和含水量较小, $R_e$  和  $LWC$  基本不超过  $150\ \mu\text{m}$  和  $0.2\ \text{g}/\text{m}^3$ 。

### 3.2 过冷水与上升气流的关系

大气上升运动对云内过冷水的形成有重要作用,齐彦斌等<sup>[37]</sup>的研究表明,在  $0\ ^\circ\text{C}$  层以上的云体内,在上升气流速度较大的高度上存在丰富的过冷

水;Shupe 等<sup>[11]</sup>认为上升气流与混合相云中液滴的形成有密切关系;飞机穿越对流云的观测结果也证明较大的上升气流速度会使云体内产生较多的过冷水<sup>[38]</sup>。通过分析上升气流与过冷水微物理参数的关系,并与前人的结论进行对比,可定性说明本文反演结果的科学性。图6给出了上述两个个例中过冷水区域的上升气流  $+V_{air}$  (正代表上升运动)和过冷水  $Z_e$ 、 $LWC$ 、 $R_e$  的平均值时序图。结果可见,  $+V_{air}$  与过冷水的三个参数都呈明显的正相关,在过冷水反射率因子、粒径和含水量的峰值时刻,对应的  $+V_{air}$  也明显更大。两次个例中,  $+V_{air}$  与  $Z_e$ 、 $LWC$ 、 $R_e$  的相关系数分别为  $0.75$ 、 $0.68$ 、 $0.82$  和  $0.84$ 、 $0.83$ 、 $0.78$ ,表现出良好的一致性。此外,由图4和5可见,上升气流与过冷水三个参数的大值区在空间位置上也十分对应。因此,本文算法的识别和反演结果与上述前人的研究结论是相吻合的。不难发现,上升气流对过冷水的影响,一方面是使水汽抬升凝结后来不及冻结,从而维持在液态;另一方面是通过托举作用使过冷水滴碰并增长。

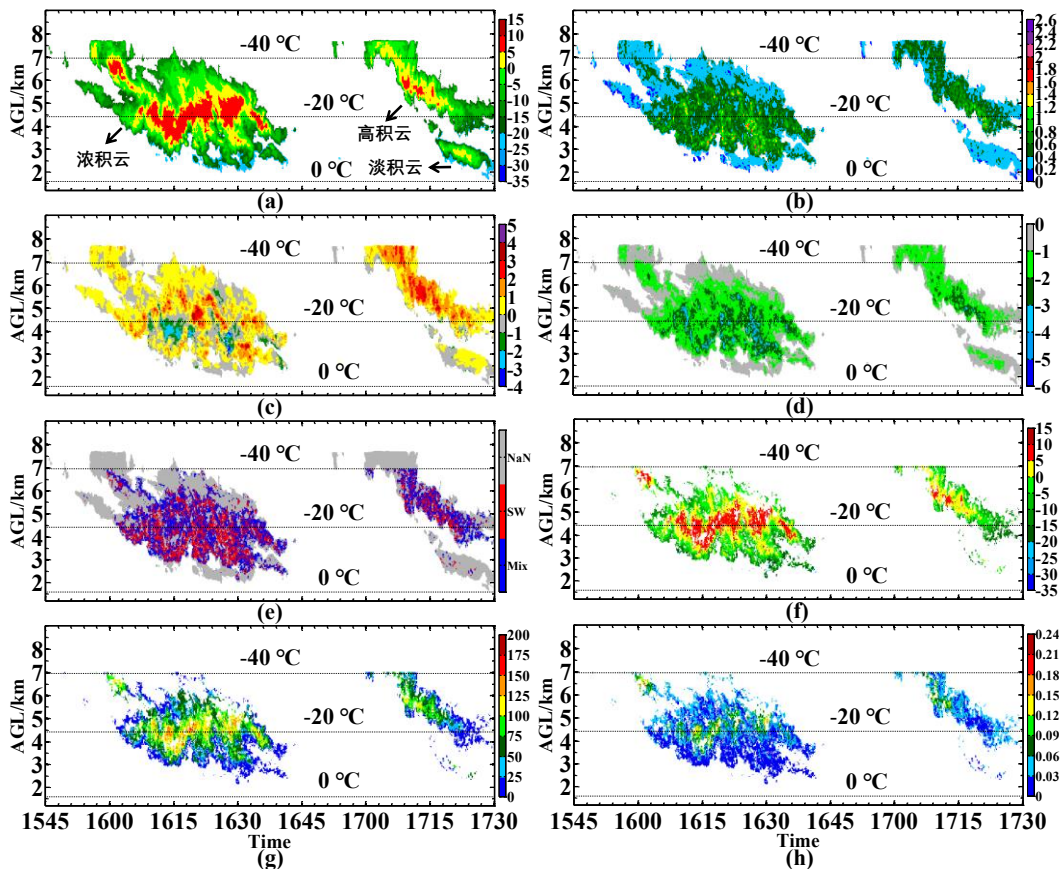


图5 那曲2015年8月25日15:45 - 17:30浓积云、高积云和淡积云(个例二)的雷达探测和反演结果,各子图含义同图4

Fig. 5 Radar observations and retrievals of a cumulus congestus, an altocumulus, and a cumulus humilis observed at Nagqu during 15:45 - 17:30 on August 25, 2015, the meaning of each subgraph is the same as described in captions of Fig. 4



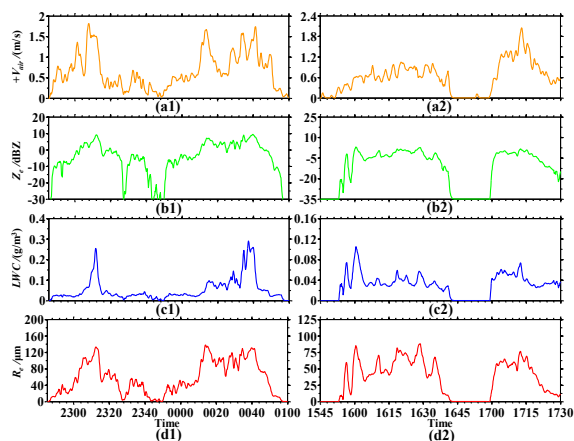


图6 对应图4(左排)和图5(右排)两个个例的过冷水区上升气流速度 $+V_{air}$  (m/s)及相应的过冷水反射率因子 $Z_e$  (dBZ)、液态水含量 $LWC$  ( $g/m^3$ )和有效半径 $R_e$  ( $\mu m$ )的平均值时序图

Fig. 6 Time series of average updraft speed  $+V_{air}$  (m/s) and corresponding supercooled water reflectivity  $Z_e$  (dBZ), liquid water content  $LWC$  ( $g/m^3$ ), and effective radius  $R_e$  ( $\mu m$ ) for two cases as shown in Fig. 4 (the left-panel subgraphs) and Fig. 5 (the right-panel subgraphs)

### 3.3 雷达反演结果初步验证

Marchand 等<sup>[39]</sup>和Löhnert 等<sup>[40]</sup>的评估表明, MWR针对非降水云的 $LWP$ 测量结果具有较好的可靠性。在对流云中过冷水的直接探测是十分困难的,过去一些研究也主要借助MWR的 $LWP$ 来检验雷达的反演结果<sup>[11-14]</sup>。因此,本文也利用一部同址的MP3000A型MWR的 $LWP$ 资料对雷达结果进行初步检验。

针对以上个例,两个设备的 $LWP$ 对比结果如图7所示,其中黑色实线为MWR结果,红色点线(“SW&MIX”)和蓝色虚线(“SW”)为雷达结果。SW&MIX为纯过冷水(从谱中被分离)和冰水混合(过冷水无法被分离)一起贡献的 $LWP$ ,SW则仅代表纯过冷水独立计算的 $LWP$ 。对比可见,两个设备的结果随时间的变化趋势基本一致。两个个例中,雷达SW&MIX与MWR结果的相关系数分别为0.63和0.79;雷达SW与MWR结果的相关系数则分别为0.56和0.74。雷达结果较MWR整体表现为低估,但在几个过冷水含量大值区(如图中圈出)的误差相对较小。雷达SW结果漏识别了更多过冷水,而SW&MIX漏识别较少,相关性也更高。造成雷达低估的原因可能有两方面,一是由于雷达灵敏度的限制导致空中一些弱的云层或云体边缘部位无法被探测到;二是MWR存在探测误差,如有些 $LWP$ 峰值

时刻对应云层的雷达回波强度很弱,甚至没有雷达回波。值得注意的是,温度和粒子相态变化也会导致辐射特性变化,进而使MWR探测的 $LWP$ 产生误差<sup>[41]</sup>。Westwater 等<sup>[42]</sup>还发现当 $LWP$ 超过 $100 g/m^2$ 时,MWR的探测结果会存在较大高估。综上所述,本文算法识别和反演的过冷水基本是可信的,雷达 $LWP$ 与MWR测量的结果,从随时间的变化趋势和峰值大小方面来看都较为吻合。

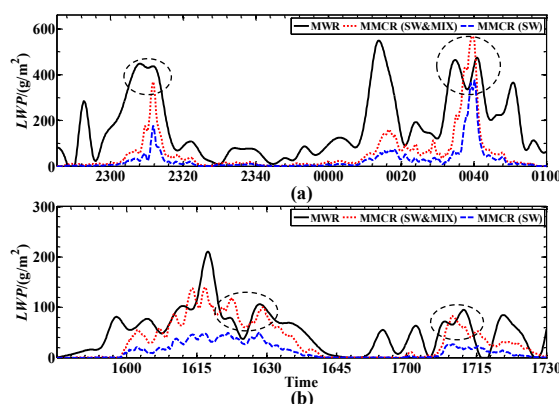


图7 雷达(MMCR)和微波辐射计(MWR)反演的液态水路径 $LWP$  ( $g/m^2$ )对比,(a)和(b)分别为个例一和个例二

Fig. 7 Comparisons of liquid water paths  $LWPs$  retrieved radar (MMCR) and microwave radiometer (MWR), (a) and (b) are results of case one and case two, respectively

## 4 讨论

利用本文算法得到的过冷水空间分布和微物理参数反演结果(Our Method),与以往研究中的典型方法,包括模糊逻辑算法(FHC)、阈值法(Threshold)、K-均值聚类算法(K-means)<sup>[8-9,12]</sup>在本文个例上的应用结果进行对比分析,进一步讨论本文识别和反演算法的准确度。

### 4.1 过冷水空间分布对比

图8给出了两次个例分别采用四种算法识别得到的过冷水空间分布结果。总体来看,四种方法识别的过冷水分布具有一定的一致性。对于个例一中的层积云(左排),过冷水主要分布于云顶,而在个例二的浓积云和高积云(右排)中过冷水分布相对均匀。同时,不同方法的识别结果也存在明显的差异性。由图8(a1-b2)可见,FHC和Threshold将云体 $Z$ 较高的位置识别为非过冷水,而本文算法则多识别为过冷水或冰水混合;这是由于这两种方法的参数设置主要针对弱对流云,因此将高 $Z_e$ 的位置认为是碰并聚合的冰雪晶粒子。但是齐彦斌等<sup>[37]</sup>的

研究发现,在强上升气流的作用下,对流云内会形成粒径大、数浓度高的过冷水,从而出现 $Z_e$ 大值区,并且 Threshold 由于刚性的阈值,几乎不能在强对流云中识别出纯过冷水。由图 8(c1-c2)可见,K-means 识别的过冷水分布与本文方法最为接近,但前者的结果更加离散。这是由于高原对流云内粒子的增长和变化较快,而 K-means 没有固定的约束标准所导致。因此,综合来看,利用本文算法识别得到的过冷水空间分布更加合理。

#### 4.2 过冷水参数反演结果对比

为进一步定量对比本文算法与其他方法的差异,基于以上过冷水识别方法所得到的空间分布结果,利用经验公式反演微物理参数(其他三种方法无法从谱反演),具体如式(13-14)所示。式中 $\rho$ 为液态水密度( $g/m^3$ ), $\sigma$ 为对数谱宽, $N$ 为粒子浓度( $m^{-3}$ ), $Z_e$ 为反射率因子( $mm^6/m^3$ )。结合前文对本文个例的分析,个例一中 $N$ 取 $10^5 m^{-3}$ ,个例二中取 $5 \times 10^4 m^{-3}$ , $\sigma$ 取 $0.34^{[28]}$ 。 $LWP$ 反演公式见式(12)。

$$LWC = \rho \left( \frac{\pi}{6} \right) \exp(-4.5\sigma^2) N^{1/2} Z_e^{1/2}, \quad (13)$$

$$R_e = 50 \exp(-0.5\sigma^2) N^{-1/6} Z_e^{1/6}. \quad (14)$$

图 9 给出了反演得到的过冷水 $LWC$ 、 $R_e$ 和 $LWP$ 参数的平均值时序图,并与微波辐射计和本文算法得到的 $LWP$ 结果进行对比。由图 9 可见,在个例一中由于 FHC 和 Threshold 漏识别了较多高 $Z_e$ 区域内发展旺盛的过冷水,因此反演的 $LWC$ 、 $R_e$ 以及 $LWP$ 都较小。而个例二中云体的发展弱于个例一,因此参数的演变趋势比较一致。K-means 识别的过冷水区域较广,因此其参数也基本较大。值得注意的是,FHC、Threshold 和 K-means 反演的 $LWC$ 和 $R_e$ 起伏较为一致,并且相对本文的结果更加平缓。这是由于以上方法采用固定数浓度的经验公式反演参数,结果仅随 $Z_e$ 变化;而本文基于功率谱实测数据反演,能在一定程度上减小因假设数浓度而造成的误差。总体而言, $LWC$ 和 $R_e$ 与 $LWP$ 基本呈正相关,三者的变化趋势存在一致性。而从两次个例来看,

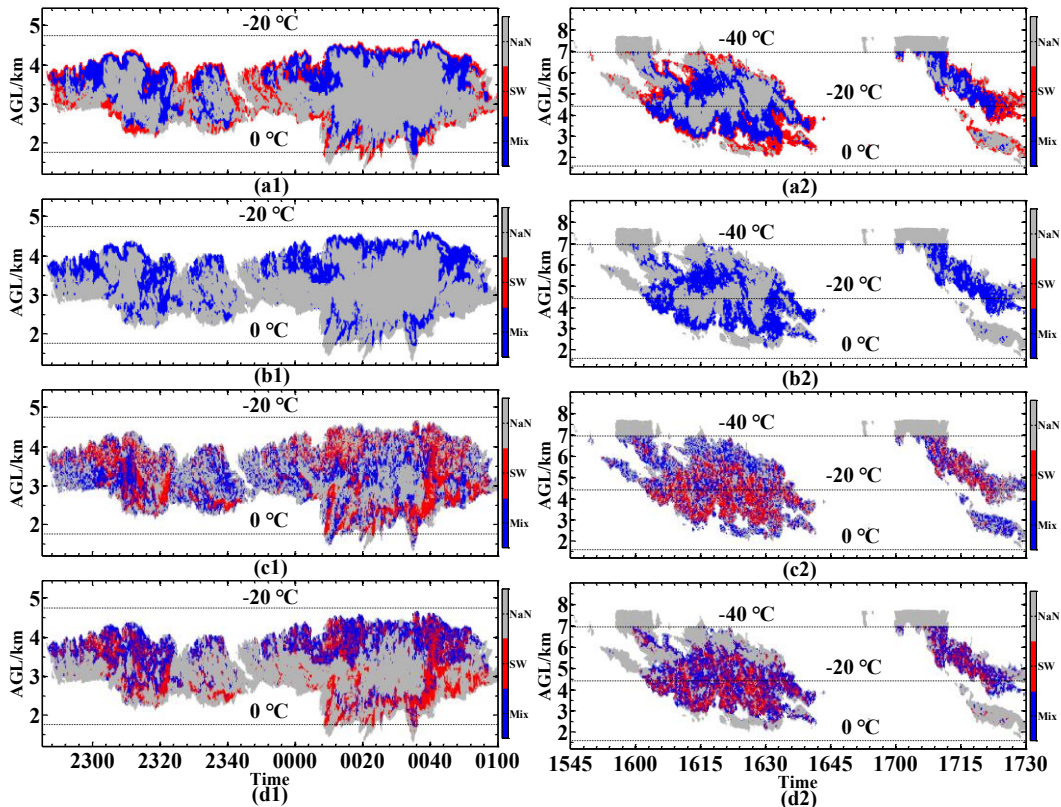


图 8 两次个例使用不同方法反演的过冷水空间分布结果,(a1, a2) 模糊逻辑算法 FHC,(b1, b2) 阈值法 Threshold,(c1, c2) K-均值聚类算法 K-means,(d1, d2) 本文方法 Our Method

Fig. 8 The spatial distributions of supercooled water retrieving by different methods of two cases, (a1, a2) Fuzzy hydrometeor classification method (FHC), (b1, b2) Threshold method (Threshold), (c1, c2) K-means classification method (K-means), (d1, d2) our algorithm (Our Method)

本文算法反演的参数结果与MWR的LWP变化趋势以及数值大小最吻合。个例一中FHC、Threshold、K-means三种方法反演的LWP与MWR结果的相关系数分别为0.28、0.39和0.70,可见现有FHC和Threshold的参数设置不适合应用于高原强对流云。而K-means的结果与MWR相对一致,但从数值大小来看,存在明显的高估;个例二中则分别为0.68、0.62和0.75,低于本文算法的0.79。综上对比结果表明,本文的算法更适合应用于高原对流云,能够一定程度上提升过冷水的识别效果和相关参数的反演精度。

## 5 总结与展望

识别对流云中的过冷水一直是大气探测的难点,同时也是人工影响天气、云-降水物理学、数值模式和民航飞行安全等领域迫切需要的工作。本文利用TIPEX-III试验的Ka波段毫米波雷达功率谱数据,结合探空资料,提出了高原对流云中过冷水的识别和反演算法;并利用那两个个例对算法的识别和反演结果进行了分析,探讨了云内上升气流与过冷水的关系,基于同址微波辐射计的LWP资料对雷达结果进行了初步检验;最后,通过与现有识别算法的对比,讨论了过冷水的识别效果和反演精度。主要结论总结如下:

(1) 高原层积云、浓积云和高积云内由上升气流主导,水汽被抬升凝结为过冷云滴,并通过碰并增长至毛毛雨滴,沉降过程中又会因冰晶淞附和蒸发而逐渐减少乃至消散。云内粒子相态变化较快,过冷水粒子的回波强度、粒径和含水量分布较广, $Z_e$ 、 $R_e$ 和LWC主要分布在-25~20 dBZ、8~250  $\mu\text{m}$ 和0.01~1.0  $\text{g}/\text{m}^3$ 。对于不同类型的对流云,其过冷水分布位置有所区别,层积云主要分布在云顶至中部,而浓积云和高积云则偏向于云中下部。低空淡积云中对流微弱,过冷水极少。

(2) 上升气流对过冷水的形成和发展起决定性作用。层积云、浓积云和高积云中的上升气流最快可达4 m/s,在气流的抬升凝结、水汽输送和托举作用下,过冷云滴可快速转化为毛毛雨滴。过冷水回波强度、粒径和含水量都与上升气流速度呈正相关,前三者与后者随时间的变化趋势基本一致,相关系数可达0.68~0.84;其空间分布也有很好的对应关系,即上升速度较快区域,过冷水的 $Z_e$ 、 $R_e$ 和LWC也较大,这与前人的研究结论一致。

(3) 微波辐射计LWP对雷达结果的初步验证表明,两者随时间的变化趋势和峰值大小都较为一致,两个个例的相关系数为0.63和0.79。在LWP较大时刻,两者误差较小;而在其他时刻,雷达表现为低估,这与雷达灵敏度及MWR的测量误差等有

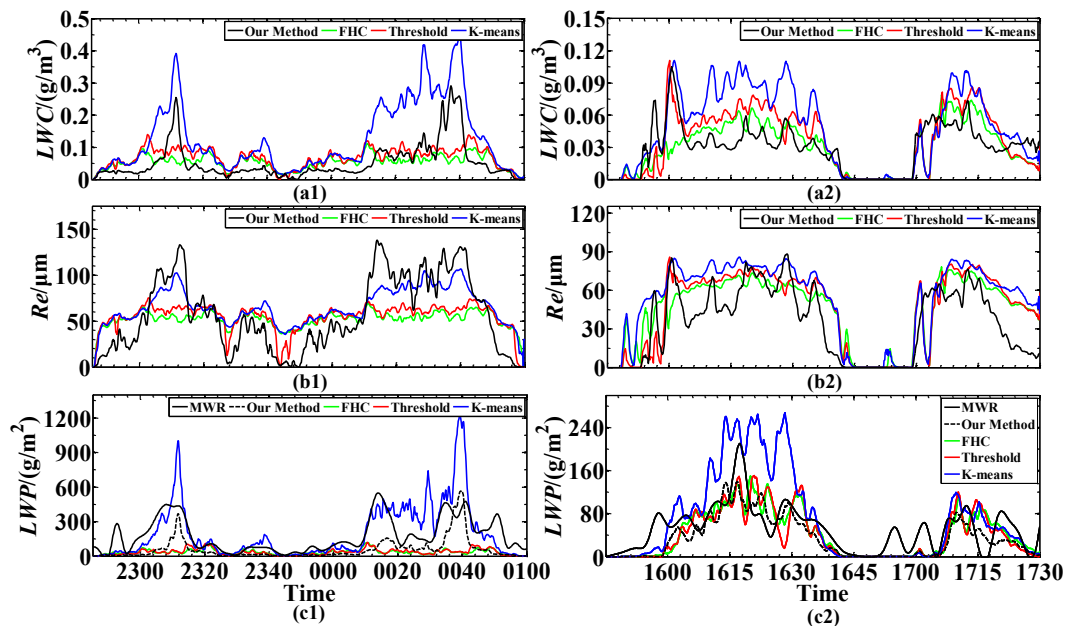


图9 两次个例使用不同方法反演的过冷水微物理参数的平均值时序图,(a1, a2) 液态水含量LWC,(b1, b2) 过冷水等效半径 $R_e$ ,(c1, c2) 液态水路径LWP

Fig. 9 Time series of average microphysical parameters of supercooled water using diverse methods of two cases, (a1, a2) liquid water content LWC, (b1, b2) liquid water effective radius  $R_e$ , (c1, c2) liquid water path LWP

关。定性分析和MWR初步检验综合说明,雷达反演结果具有一定的可靠性。

(4) 本文主要基于云雷达功率谱资料提出过冷水的识别算法。算法首先进行谱数据处理和质量控制,并反演出大气垂直速度,进而根据谱的多模态/多谱峰和高谱宽特征识别过冷水,此外还考虑了湍流和垂直风切变造成的影响。讨论和对比结果表明,本文算法与以往的逻辑模糊算法、阈值法和K-均值聚类算法相比,得到的过冷水空间分布和微物理参数结果更为合理准确,一定程度上克服了以往方法刚性的参数设定和无标准约束条件的问题。最后需要说明的是,本文对雷达反演结果的检验手段主要是与以往的研究结论定性对照、根据云-降水物理学现有理论进行客观分析和与微波辐射计LWP结果对比,若未来条件允许,将以传感器穿云试验或飞机观测资料作为更加有效的检验手段。

## References

- [1] Stephens G L, Vane D G, Boain R J, *et al.* The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, **83** (12): 1771-1790.
- [2] WU Ju-Xiu, WEI Ming, WANG Yi-Lin. Retrieval of the Supercooled Water in Stratiform Clouds Based on Millimeter-wave Cloud Radar [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, **33**(2): 227-235. (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.
- [3] McCoy D T, Tan I, Hartmann D L, *et al.* On the relationships among cloud cover, mixed-phase partitioning, and planetary albedo in GCMs [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, **8**(2): 650-668.
- [4] Cober S G, Isaac G A, Strapp J W. Characterizations of aircraft icing environments that include supercooled large drops [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, **40**(11): 1984-2002.
- [5] JIANG Fang, WEI Chong, LEI Hen-chi, *et al.* Measurement of Column Cloud Liquid Water Content by Airborne Upward-Looking Microwave Radiometer ( II ): Retrieval Method. [J]. *Plateau Meteorological*, 2004, **23**(1): 33-39. (江芳, 魏重, 雷恒池, 等. 机载微波辐射计测云中液态水含量( II ): 反演方法[J]. *高原气象*), 2004, **23**(1): 33-39.
- [6] YUAN Min, DUAN Lian, PING Fan, *et al.* Identifying the Supercooled Liquid Water in Aircraft Icing Condition Using CloudSat Satellite Data [J]. *Meteor Mon*, 2017, **43** (2): 206-212. (袁敏, 段炼, 平凡, 等. 基于CloudSat识别飞机积冰环境中的过冷水滴[J]. *气象*), 2017, **43**(2): 206-212.
- [7] Hu Y, Rodier S, Xu K, *et al.* Occurrence, liquid water content, and fraction of supercooled water clouds from combined CALIOP/IIR/MODIS measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D4).
- [8] Shupe M D. A ground-based multisensor cloud phase classifier [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(22).
- [9] PENG Liang, CHEN Hong-Bin, LI Bai. An Application of Fuzzy Logic Method to Cloud Hydrometeor Classifications Using the ARM WACR Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, **26**(5): 655-663. (彭亮, 陈洪滨, 李柏. 模糊逻辑法在3 mm云雷达反演云中水凝物粒子相态中的应用[J]. *遥感技术与应用*), 2011, **26**(5): 655-663.
- [10] Rambukkange M P, Verlinde J, Eloranta E W, *et al.* Using Doppler spectra to separate hydrometeor populations and analyze ice precipitation in multilayered mixed-phase clouds [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, **8**(1): 108-112.
- [11] Shupe M D, Kollias P, Matrosov S Y, *et al.* Deriving mixed-phase cloud properties from Doppler radar spectra [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, **21**(4): 660-670.
- [12] Riihimaki L D, Comstock J M, Luke E, *et al.* A case study of microphysical structures and hydrometeor phase in convection using radar Doppler spectra at Darwin, Australia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(14): 7519-7527.
- [13] LI Yu-Lian, SUN Xue-Jin, ZHAO Shi-Jun, *et al.* Analysis of snow microphysical process from Doppler spectra of the Ka-band millimeter-wave cloud radar [J]. *Journal of Infrared and millimeter Waves*, 2019, **38**(2): 245-253. (李玉莲, 孙学金, 赵世军, 等. Ka波段毫米波云雷达多普勒谱降雪微物理特征分析[J]. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(2): 245-253.
- [14] WANG J, GE J, ZHANG Q, *et al.* Study of Aircraft Icing Warning Algorithm Based on Millimeter Wave Radar [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, **31** (06): 1034-1044.
- [15] Atlas D. The estimation of cloud parameters by radar [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1954, **11**(4): 309-317.
- [16] Sauvageot H, Omar J. Radar reflectivity of cumulus clouds [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1987, **4**(2): 264-272.
- [17] Fox N I, Illingworth A J. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, **36**(5): 485-492.
- [18] 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]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, **52**(16): 2788-2799.
- [19] LIU Li-Ping, XIE Lei, CUI Zhe-Hu. Examination and Application of Doppler Spectral Density Data in Drop Size Distribution Retrieval in Weak Precipitation by Cloud Radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, **38**(2): 223-236. (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.
- [20] Liu L, Zheng J, Wu J. A Ka-band solid-state transmitter cloud radar and data merging algorithm for its measurements [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, **34** (4): 545-558.
- [21] Petitdidier M, Sy A, Garrouste A, *et al.* Statistical charac-

- teristics of the noise power spectral density in UHF and VHF wind profilers [J]. *Radio Science*, 1997, **32**(3): 1229–1247.
- [22] Zheng J, Liu L, Chen H, *et al.* Characteristics of Warm Clouds and Precipitation in South China during the Pre-Flood Season Using Datasets from a Cloud Radar, a Ceilometer, and a Disdrometer [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(24): 3045.
- [23] Zheng J F. Doppler Spectral Data Processing Methods of Ka-band Multi-mode Mm-wave Radar and Air Vertical Speed Retrieval in Clouds [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2016.(郑佳锋. Ka波段—多模式毫米波雷达功率谱数据处理方法及云内大气垂直速度反演研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2016.)
- [24] Gossard E E. Measurement of cloud droplet size spectra by Doppler radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, **11**(3): 712–726.
- [25] Kollias P, Albrecht B A, Lhermitte R, *et al.* Radar observations of updrafts, downdrafts, and turbulence in fair-weather cumuli [J]. *Journal of the atmospheric sciences*, 2001, **58**(13): 1750–1766.
- [26] Shupe M D, Kollias P, Poellot M, *et al.* On Deriving Vertical Air Motions from Cloud Radar Doppler Spectra [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, **25**, 547–557.
- [27] Zheng J, Liu L, Zhu K, *et al.* A method for retrieving vertical air velocities in convective clouds over the Tibetan Plateau from TIPEX-III cloud radar Doppler spectra [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(9): 964.
- [28] Zong R. Studies of Cloud Macro- and Microphysical Properties using China New Generation Millimeter-wavelength Radar [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013.(宗蓉. 毫米波雷达对云宏观特性的探测和研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.)
- [29] Chen B, Hu Z, Liu L, *et al.* Raindrop size distribution measurements at 4, 500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX-III [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(20): 11,092–11,106.
- [30] Oue M, Kollias P, Ryzhkov A, *et al.* Toward exploring the synergy between cloud radar polarimetry and Doppler spectral analysis in deep cold precipitating systems in the Arctic [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(5): 2797–2815.
- [31] Verlinde J, Rambukkange M P, Clothiaux E E, *et al.* Arctic multilayered, mixed-phase cloud processes revealed in millimeter-wave cloud radar Doppler spectra [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(23): 13,199–13,213.
- [32] WANG Liuliu, LIU Liping, YU Jizhou, *et al.* Microphysical and Dynamic Characteristic Analysis of Freezing Rain and Snow Observed by Millimeter Wave Radar [J]. *Meteor Mon*, 2017, **43**(12): 1473–1486.(王柳柳, 刘黎平, 余继周, 等. 毫米波云雷达冻雨-降雪微物理和动力特征分析[J]. *气象*), 2017, **43**(12): 1473–1486.
- [33] Gunn R, Kinzer G D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1949, **6**(4): 243–248.
- [34] Westbrook C D, Illingworth A J. Evidence that ice forms primarily in supercooled liquid clouds at temperatures  $> -27\text{ }^{\circ}\text{C}$  [J]. *Geophysical research letters*, 2011, **38**(14).
- [35] Xu X, Lu C, Liu Y, *et al.* Effects of cloud liquid-phase microphysical processes in mixed-phase cumuli over the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(19): e2020JD033371.
- [36] Zhu Y J. Retrieval of cloud parameters in summer in Nagqu, Qinghai Tibet Plateau based on millimeter wave radar data [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019. 朱怡杰. 基于毫米波云雷达的青藏高原那曲夏季云参量分布特征 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.)
- [37] QI Yan-Bin, GUO Xue-Liang, JIN De-Zhen. An Observational Study of Macro/Microphysical Structures of Convective Rainbands of a Cold Vortex over Northeast China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, **31**(4): 621–634.(齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究[J]. *大气科学*), 2007, **31**(4): 621–634.
- [38] Rosenfeld D, Woodley W L. Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to  $-37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [J]. *Nature*, 2017, **405**(6785): 440–442.
- [39] Marchand R, Ackerman T, Westwater E R, *et al.* An assessment of microwave absorption models and retrievals of cloud liquid water using clear-sky data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D24).
- [40] Löhnert U, Crewell S. Accuracy of cloud liquid water path from ground-based microwave radiometry 1. Dependency on cloud model statistics [J]. *Radio Science*, 2003, **38**(3).
- [41] Wei K H. Preliminary Study of Cloud Parameters Based on Ground-Based Remote Sensing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2015.(韦凯华. 地基遥感云特征参数的初步研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.)
- [42] Westwater E R, Han Y, Shupe M D, *et al.* Analysis of integrated cloud liquid and precipitable water vapor retrievals from microwave radiometers during the Surface Heat Budget of the Arctic Ocean project [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D23): 32019–32030.