

# 基于多源数据的云中过冷水反演方法研究

王金虎<sup>1,2,3,4</sup>,肖安虹<sup>1,2</sup>,王宇豪<sup>1,2</sup>,王昊亮<sup>1,2</sup>,包金旺<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044;2.中国气象局 气溶胶与云降水重点开放实验室,南京 210044;3.中国科学院 中层大气和全球环境探测重点实验室,北京 100029;4.南京信大安全应急管理研究院,南京 210044)

**摘要:**云中过冷水的含量及分布是造成飞机积冰的主要原因,因此准确识别云中过冷水区域尤为重要.利用英国 Chilbolton 观测场的 35 GHz、94 GHz 毫米波测云雷达、激光雷达以及微波辐射计,结合探空资料,对阈值法和模糊逻辑算法识别云中过冷水分布情况进行对比研究,以及利用多普勒密度算法对不同水凝物含水量情况进行计算.结果表明:1)对比阈值法以及微波辐射计液态水路径的反演结果后认为模糊逻辑算法对水凝物的识别具有更高的反演精度;2)混合相态云中由于冰晶粒子主导雷达回波强度,会导致云中液态水含量被低估,需分别计算不同水凝物的雷达反射率因子.

**关键词:**过冷水;毫米波雷达;模糊逻辑;多普勒谱

**中图分类号:**P413

**文献标志码:**A

过冷水极不稳定,是人工影响天气以及飞机安全飞行的重要影响因素<sup>[1]</sup>.目前对过冷水的探测方法具有多样性.如 HOGAN 等<sup>[2-4]</sup>为了估计层状云中的过冷水在全球的分布,首次采用航天飞机携带的雷达系统用于反演光学厚度;MCFARQUHAR 等<sup>[5]</sup>为了获得混合相态云中不同尺度粒子的含水量,利用云粒子成像仪成功反演出过冷水中的液态水含量;而 SHUPE 等<sup>[6-8]</sup>通过激光雷达、毫米波雷达以及微波辐射计对混合相态云进行联合观测,获得各种水凝物相态的阈值.国内学者对过冷水的识别也取得了一定的进展,如 WANG 等<sup>[9]</sup>利用 Himawari-8 卫星构建了一种测量过冷水云检测算法;宋继焯等<sup>[10]</sup>基于微脉冲激光雷达后向散射信号,并结合大气温度廓线有效识别了云中过冷水层;而袁敏等<sup>[11]</sup>则利用 CloudSat 卫星资料识别了当飞机处于积冰环境中的过冷水分布区域.在过冷水的识别算法上,彭亮等<sup>[12]</sup>在 SHUPE 研究<sup>[6-8]</sup>的基础上,通过不同相态粒子的散射性能和聚合状态,添加线性退极化比,建立了模糊逻辑算法;吴举秀等<sup>[13]</sup>则利用各项研究所得的水凝物阈值,通过阈值法成功分离出层状云中的过冷水;而王金虎等<sup>[14]</sup>利用毫米波雷达联合微波辐射计研究了一种识别过冷水的算法,可避免飞机因结冰而发生意外;李玉莲等<sup>[15]</sup>为了准确识别过冷水滴的光谱峰值,采用最小二乘法对局部谱峰进行多项式拟合,成功构建了一种谱峰识别算法,能够准确分离不同粒子谱峰.以上研究为本文几种过冷水识别算法提供了理论依据.

综上所述,众多学者对过冷水的成功识别,为后续的研究提供了不同数据处理方法及经验积累.但是探测手段较为单一,也缺乏不同算法之间的对比研究,因此本文利用英国 Chilbolton 观测场的 35 GHz Copernicus 雷达、94 GHz Galileo 雷达、激光雷达、微波辐射计以及探空资料,通过阈值法与模糊逻辑算法反演过冷水区域,与微波辐射计反演的液态水路径结果相互验证,同时利用多普勒谱密度法反演混合相态云中不同粒子的过冷水质量浓度及有效半径.

**收稿日期:**2022-06-14;**修回日期:**2022-08-12.

**基金项目:**国家自然科学基金(41905026);江苏省自然科学基金(BK20170945);南京信息工程大学人才启动基金资助项目(2016r028);江苏省 333 工程高层次人才培养资助(第三层次);中国博士后科学基金第 63 批面上资助(2018M631554).

**作者简介(通信作者):**王金虎(1987-),男,江苏南通人,南京信息工程大学教授,博士,研究方向为气象灾害监测预警、毫米波气象雷达、大气粒子散射以及微波遥感,E-mail:goldtigerwang@nuist.edu.cn.

## 1 数据来源及处理

雷达数据来源于英国 Chilbolton 观测场(51.144 5°N, 1.437 0°W)的 35 GHz Copernicus 雷达、94 GHz Galileo 雷达以及波段为 905 nm 的激光雷达,其中 35 GHz Copernicus 雷达有两种脉冲宽度(0.4  $\mu$ s(uncoded)和 4  $\mu$ s(coded)),在宽脉冲模式下,距离分辨率更高.两部毫米波雷达部分参数如下表 1 所示.使用的微波辐射计位于同一观测场,共提供 21 个通道数据,中心频率范围为 22.200~30.000 GHz,其中前 14 个通道为水汽吸收通道,用于大气水汽的探测,后 7 个通道为氧气的吸收通道,用于大气温度的探测,大约每 2 min 输出一组数据.探空温度则由怀俄明州立大学提供(www.weather.uwyo.edu).

为了尽可能的研究阈值法与模糊逻辑算法在云中过冷水识别情况,本文选取时间为 2003-06-08 的降水性层状云.而在多普勒谱密度法中一般不选取降水性云,选取时间为 2010-10-28 层状云资料.鉴于实际情况中,微波辐射计测量高度一般为 10 km 左右,为了使所有数据高度保持一致,均采用 MATLAB 中自带的 interp 线性插值函数统一插值到与毫米波雷达数据对应的 30 m 库长,再进行反演研究.

表 1 Copernicus 雷达与 Galileo 雷达部分参数

Tab. 1 Partial parameters of Copernicus radar and Galileo radar

雷达名称	工作频率/Hz	探测方式	脉冲宽度/ $\mu$ s	发射功率/kW	天线直径/m	脉冲频率/kHz	距离分辨率/m	系统噪声系数/dB
Copernicus	34.960	垂直天顶向上	0.4(uncoded), 4(coded)	1.5	2.4	10	30	10
Galileo	94	垂直天顶向上	0.5	1.6	0.46	6.25	60	10

## 2 算法介绍

### 2.1 阈值法

识别云中过冷水的阈值法如下所示<sup>[13]</sup>:1)过冷水存在于 $-40\sim 0$  °C 的温度中;2)激光雷达后向散射系数 $>5\times 10^{-5}(\text{m}\cdot\text{sr})^{-1}$ 的区域为过冷水;3)不考虑大的湍流以及风切变的影响,当激光雷达探测不了时可以利用雷达谱宽 $>0.4$  m/s 同时线性退化比(LDR) $<-15$  dBZ 的区域;4)激光雷达以及毫米波雷达识别的所有区域定义为过冷水.

### 2.2 模糊逻辑算法

模糊逻辑算法识别粒子相态是利用雷达探测的参数矩阵以及所得到的探空数据,通过由隶属函数所描述的转换规则,最终反演得到粒子相态的矩阵<sup>[16]</sup>,主要分为模糊化、规则推导、集成和退模糊 4 个步骤.参考文献[6-8]给出的阈值构造具体的不同隶属函数.

### 2.3 多普勒谱密度法

多普勒谱密度法是指将单个的多普勒谱密度谱当成高斯分布  $S_G(v) = S_0 e^{-\frac{(v-v_0)^2}{2\sigma^2}}$ ,其中  $S_0$  是最大信号功率值, $v_0$  是  $S_0$  对应的多普勒速度, $\sigma$  是谱宽.

但事实上输出的多普勒谱含有一定的噪声,需要剔除噪声对有效信号的干扰,首先对多普勒谱进行 5 点平滑处理,使得谱峰特征更加清晰;然后利用 HILDEBRAND 等<sup>[17]</sup>提出的客观法计算噪声电平.该方法是假设噪声来源于系统热噪声,具有高斯白噪声的特点.得到实际的多普勒谱密度值后,需要计算每种粒子对应

的反射率因子、多普勒速度、谱宽,公式为<sup>[18]</sup>:  $Z = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{v_D}(v_D)dv_D$ ,  $\bar{v}_D = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} v_D S_{v_D}(v_D)dv_D}{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{v_D}(v_D)dv_D}$ ,  $\sigma_D^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (v_D - \bar{v}_D)^2 S_{v_D}(v_D)dv_D}{\int_{-\infty}^{+\infty} S_{v_D}(v_D)dv_D}$ ,其中  $S_{v_D}$  是多普勒密度函数, $v_D$  是指最大尺度为  $D$  的粒子的多普勒速度,

$\sigma_D \geq 0$  是指速度谱宽.

在粒子谱分布为高斯分布的情况下,雷达反射率因子与粒子有效半径  $r_e$ 、液态水质量浓度  $C_{LW}$  的关系可表示为<sup>[19]</sup>:  $r_e = 50 \exp(-0.5\sigma^2) N^{-1/6} Z^{1/6}$ ,  $C_{LW} = \rho(\pi/6) \exp(-4.5\sigma^2) N^{1/2} Z^{1/2}$  其中  $Z$  是雷达反射率因子,  $\rho$  是水或冰的密度,  $\sigma$  是谱宽,  $N$  是粒子数浓度。

在不发生降水时,如果雷达照射区域存在多种粒子时,多普勒谱密度谱表现为多峰特征<sup>[20]</sup>。

### 3 过冷水反演算法的对比分析

毫米波雷达相比于激光雷达可以穿透降水层,连续测量云的各个参数,识别出激光雷达探测不到的云相态.雷达反射率因子表示单位体积内云粒子直径 6 次方的总和.图 1(a)结果表明 2003-06-08 0:00—3:00(协调世界时,UTC)在 3 km 以下,雷达反射率因子达到 10 dBZ 以上(该时刻发生了降水,云内主要为较大直径的降水粒子).在 3:00 时 4~8 km 上,雷达反射率因子呈现中间大两端小.因为随着高度的下降,冰晶粒子发生碰并增长,形成了较大的降水粒子,但由于高度越来越低,温度逐渐上升,结合探空温度,0 °C 亮温层在 3.5 km 附近,导致的降水粒子水分蒸发,直径减小,下降至 3.5 km 时又变为冰晶粒子,在亮温层以下,冰晶粒子表面开始融化,导致雷达反射率因子变大.在 3:00—18:00 时还有少量雨水下落.直至 18:00—21:00 时探测到位于 4.5~10 km 的非降水云.多普勒速度代表目标物相对于毫米波雷达的径向速度,其中正号代表远离雷达,负号代表靠近雷达.从图 1(b)中可以看出在降雨区域,多普勒速度为 -5 m/s.对比雷达反射率因子较大的云层,多普勒速度也较大.雷达有效照射体积内不同粒子直径相差越大,谱宽则越大.反演结果表明在降水区域谱宽较大.因为不同直径的降水粒子产生下落速度的不均匀分布导致.云顶都是直径分布均匀的冰晶粒子,以致谱宽较小,而云的中部为混合相态,导致谱宽介于两者之间.905 nm 激光雷达后向散射系数如图 1(d)所示,由于 0:00—3:00 时发生了强降水,激光雷达由于衰减严重,没有探测到降水云的上部,直到 21:00 出现非降水云,根据激光雷达的回波信号 ( $>5 \times 10^{-5} (\text{m} \cdot \text{sr})^{-1}$ ) 可知过冷水主要集中在 5 km 的高度上。

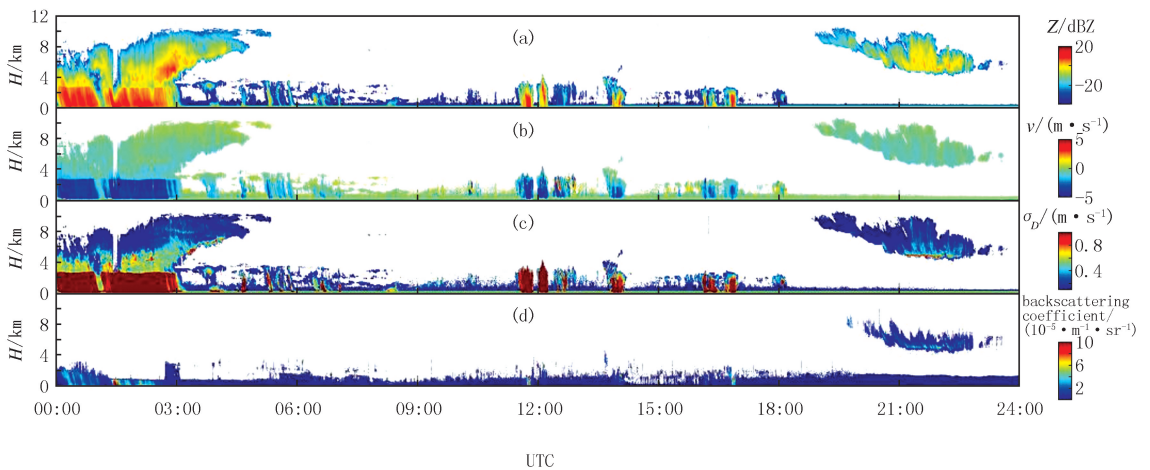


图1 2003-06-08 94 GHz毫米波雷达dBZ,  $v$ ,  $\sigma_D$ 和905 nm激光雷达后向散射系数

Fig.1 2003-06-08 94 GHz millimeter wave radar  $Z$ ,  $v$ ,  $\sigma_D$  and 905 nm lidar backscattering coefficient

由于 94 GHz 雷达缺少线性退极化比(LDR)数据,将  $Z$ 、 $\sigma_D$  和探空温度作为阈值法的 3 个参数,将  $Z$ 、 $\sigma_D$ 、多普勒速度以及探空温度作为模糊逻辑算法中的 4 个参数,其中温度样本采用插值法完成高度上数据的匹配,对 2003-06-08 云中过冷水进行识别.阈值法识别的结果如图 2(a)所示,其中第一根黑色虚线为 0 °C 温度线,高度为 3.3 km,依次向上高度为 4 km、6 km、8 km、9.3 km 高度线,9.3 km 为反演过冷水存在的最高高度,0:00—5:00 时过冷水主要集中于 3.3~8 km 范围,21:00—24:00 时集中于 4~6 km 范围.模糊逻辑算法识别结果如图 2(b),黑色虚线为 0 °C 温度线,向上蓝色虚线依次为 4 km、6 km、7 km、8 km,大部分过冷水最高高度低于 7 km,可见飞机安全飞行高度至少在 7 km 以上,该结论与其他学者的结果一致<sup>[21]</sup>.从过冷水的分布上看,与阈值法图 2(a)反演结果基本一致,但是图 2(a)中将云层中含有液态水的水凝物全部归

类为过冷水,而图 2(b)中仅为过冷水的部分分布在云层底部,在 4~6 km 高度上以混合相态云为主体,且精确识别出在 3:00 时刻上“柳叶状”的相态为雪的粒子。可见模糊逻辑算法将云层中过冷水、混合相态、雪粒子划分清晰,根据后文第四部分多普勒谱密度法得出的结论,不同的相态水凝物含水量相差较大,因此可以得出在过冷水的反演上,模糊逻辑算法精确度高于阈值法。微波辐射计探测的液态水路径如图 2(c)所示,结果表明 0:00—3:00 和 12:00 附近两个时间段天顶单位处的集成液态水质量浓度最高,21:00—23:00 时天顶单位处的集成液态水质量浓度不为 0。在该时刻下,云中可能存在一定过冷水。反演结果与图 2(a-b) 识别结果相吻合。

### 4 混合相态云中过冷水的反演

从图 3 来看,过冷水可能存在的 4.5~5 km 云层中,由于过冷水质量浓度极少,多普勒速度以及谱宽变化情况不明显。由于 2010-10-28 靠近地面有浓雾,导致激光雷达衰减严重,只有较大后向散射回波被接收到,结果表明过冷水可能存在于 4.5~5.5 km 附近。LDR 的物理意义为发射的线性极化信号探测到云内球形粒子与非球形粒子的比值,反演结果表明在 5 km 附近可能存在过冷水。

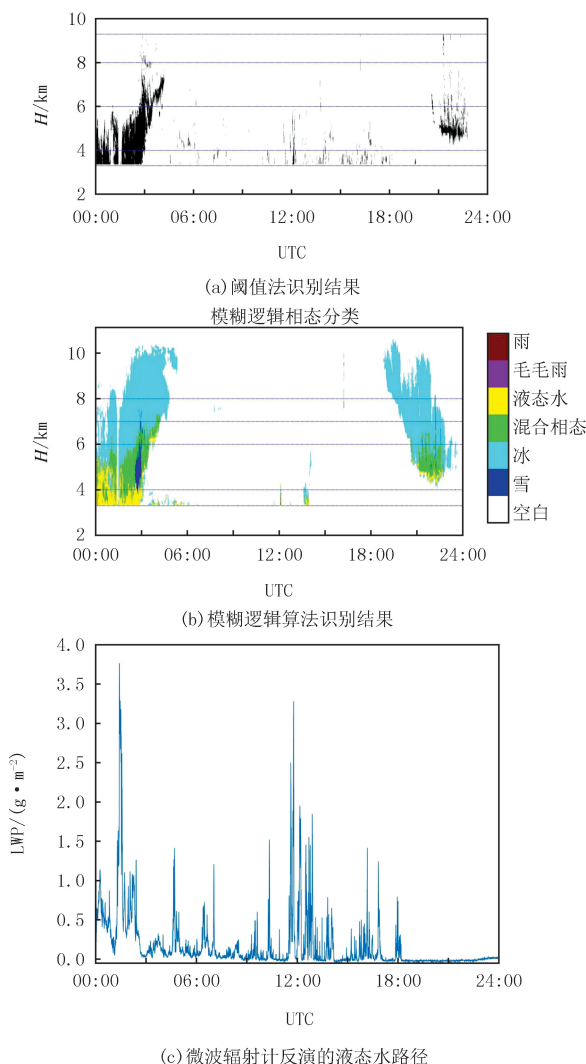


图2 识别结果及微波辐射计反演的液态水路径  
Fig.2 Recognition results and liquid water path retrieved by microwave radiometer

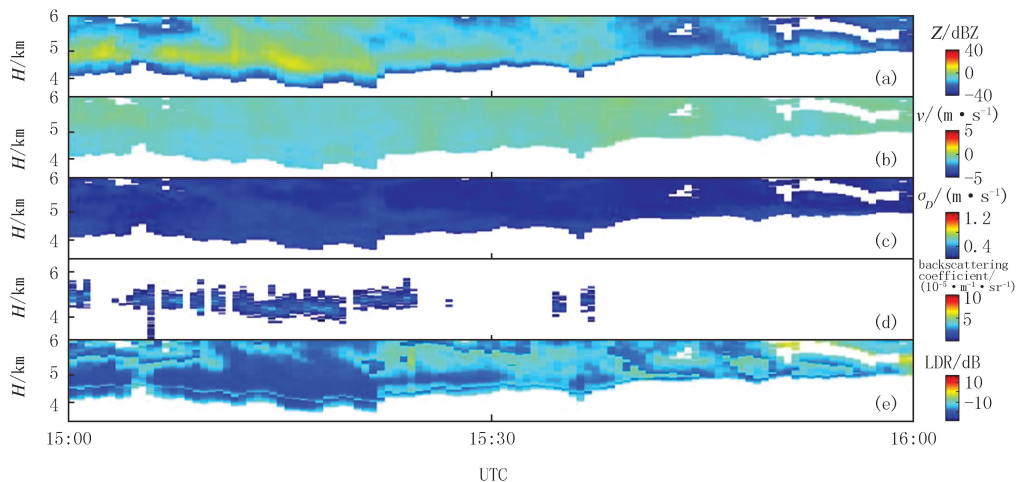


图3 2010-10-28 35 GHz毫米波雷达Z, v,  $\sigma_D$ , 905 nm激光雷达后向散射系数和LDR  
Fig.3 2010-10-28 35 GHz millimeter wave radar Z, v,  $\sigma_D$ , 905 nm lidar backscattering coefficient and LDR

将 2010-10-28, 905 nm 激光雷达后向散射系数, LDR 和探空温度作为阈值法参数得到图 4(a) 识别结果, 将  $Z, v, \sigma_D$  和探空温度作为模糊逻辑算法参数得到图 4(b) 识别结果. 对比图 4(a) 和 (b) 过冷水主要集中在云层底部和 4.5~5 km 附近, 其中阈值法结果图经多次验证, 在谱宽为 0.3 时, 结果拟合情况最好.

35 GHz 雷达的两种脉模式的多普勒谱分别有 128、256 个傅里叶变换点, 间隔 0.041 9 m/s, 速度范围为  $-5.363\ 3 \sim 5.321\ 4$  m/s(coded)、 $-2.681\ 6 \sim 2.639\ 7$  m/s(uncoded), 宽脉冲模式(coded)的谱密度比窄脉冲模式(uncoded)高约 10 dB, 因此能更灵敏地探测到混合相态云中的少量过冷水. 如图 4(c) 表明 15:00 宽脉冲模式的多普勒谱有较为明显的双峰谱, 而窄脉冲模式的多普勒谱仅识别出了单峰谱, 在 4.5 km 左右存在极少量的过冷水. 这与图 4(a) 阈值法以及图 4(b) 模糊逻辑法识别的过冷水基本对应.

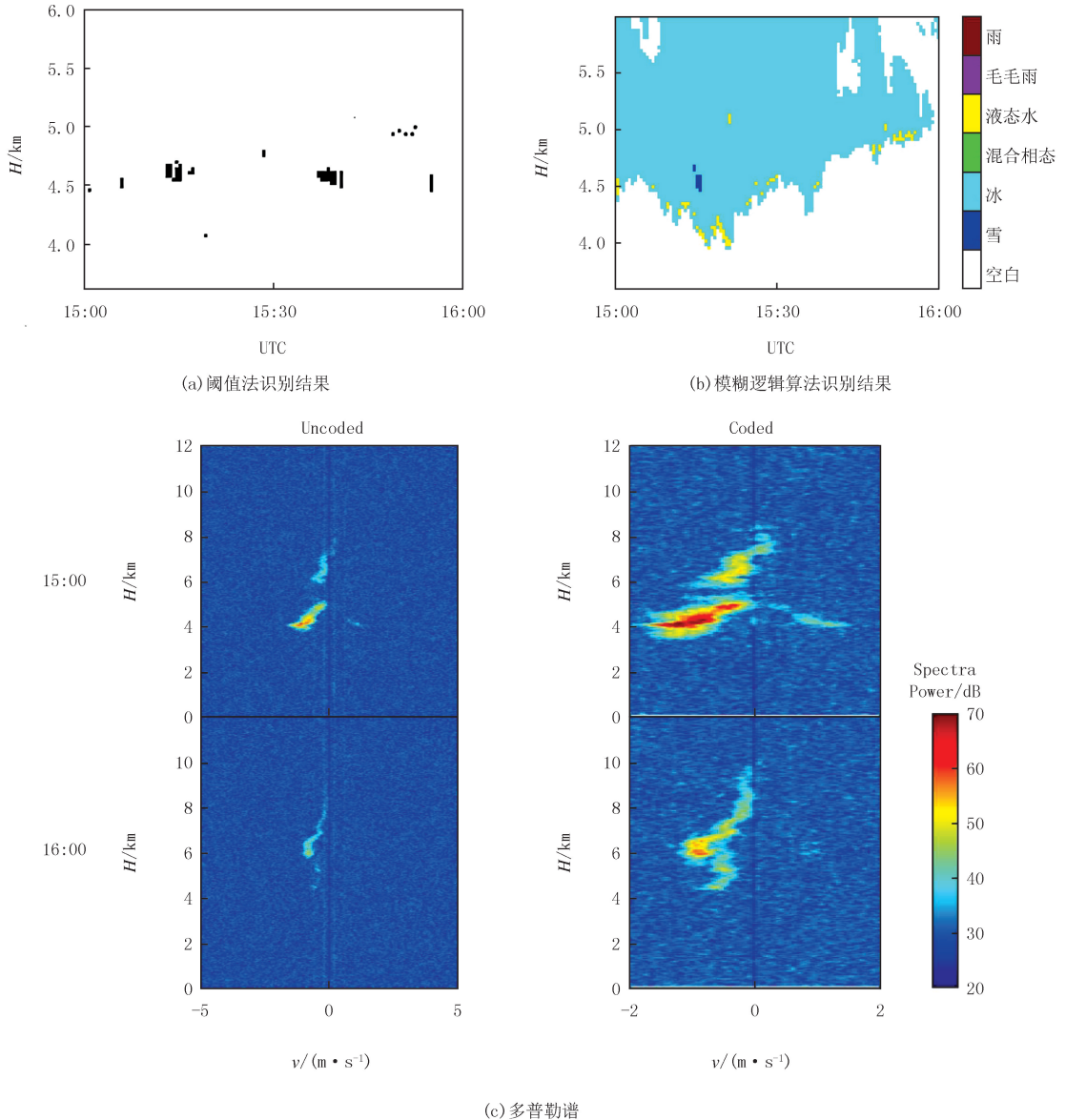


图4 2010-10-28识别结果和多普勒谱

Fig.4 Identification results and Doppler spectrum on 2010-10-28

2010-10-28 15:00(UTC)4.44~4.56 km 高度的原始多普勒密度(code)如图 5(a) 所示. 在保证多普勒谱有超过 7 个连续的速度点基础上, 本文采用 5 点平滑处理去噪处理, 结果如图 5(b). 结果表明多普勒谱对应的过冷水从 4.44 km 开始逐渐增多, 直至 4.56 km 处消失, 对比图 4(b) 显示的模糊逻辑识别结果可知该结论符合实际情况. 图 5 所示的结果中左边速度为负是冰晶的多普勒谱, 粒子下落速度在 1 m/s 左右, 说明冰

晶粒子尺度较大,谱宽>1 dB,右边正速度区为液态水的多普勒谱,粒子的上升速度为 0.5~1 m/s,表明空气存在垂直弱上升运动。

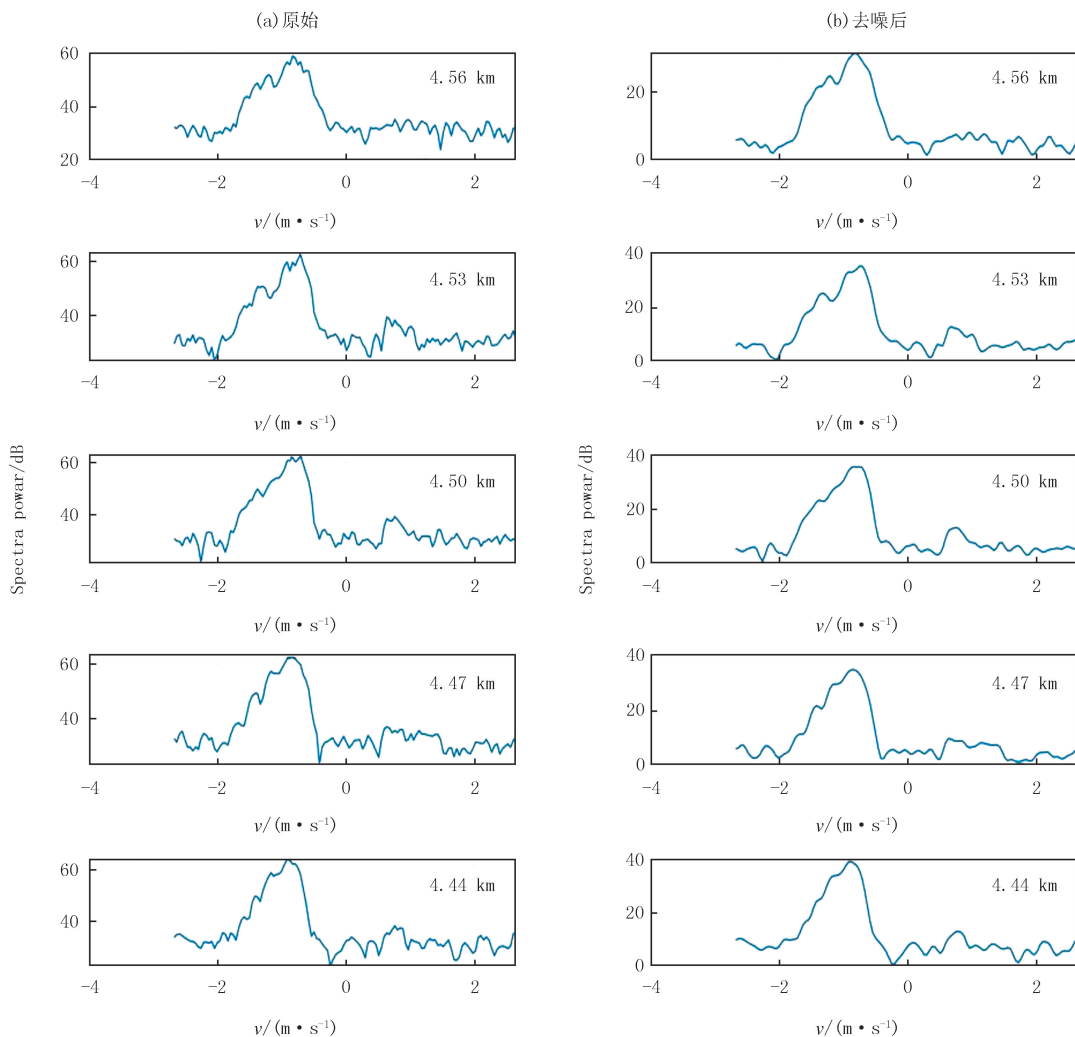


图5 2010-10-28多普勒谱密度  
Fig.5 Doppler spectral density on 2010-10-28

对多普勒速度参数进行校正后,利用  $Z = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{v_D}(v_D)dv_D$  分别求取不同粒子的雷达回波. 假设粒子浓度及对数谱宽随高度不变, $\sigma$  取 0.31,冰晶数浓度取  $0.1 \text{ m}^{-3}$ ,云滴数浓度取  $35 \text{ cm}^{-3}$ [13],分别求取不同粒子的有效半径  $r_e = 50\exp(-0.5\sigma^2)N^{-1/6}Z^{1/6}$  和液态水质量浓度  $C_{LW} = \rho(\pi/6)\exp(-4.5\sigma^2)N^{1/2}Z^{1/2}$ .

反演结果如图 6 所示,图 6(a)为分离出的冰晶粒子与过冷水粒子的液态水质量浓度,经过与全局谱反演的液态水质量浓度的结果对比.在混合相态云中液态水质量浓度主要来自过冷水( $0.027 \text{ 3} \sim 0.064 \text{ 4 g/m}^3$ ),在 4.53 km 附近达到最大,而冰晶粒子的液态水质量浓度很低,为  $0.011 \text{ 9 g/m}^3$ .过冷水的有效半径为  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,而冰晶的有效半径可达  $35 \sim 40 \mu\text{m}$ .由于雷达反射率因子由云中较大的冰晶粒子决定,因此当云为混合相态时,实际液态水质量浓度会被低估。

## 5 结 论

基于毫米波雷达、激光雷达、微波辐射计以及探空温度的数据,利用阈值法,模糊逻辑算法和多普勒谱密度法对云中过冷水分布和液态水含量进行了研究,结果表明:1)通过对阈值法以及微波辐射计反演的液态水

路径对比可知,阈值法与模糊逻辑算法都能较好地识别云中过冷水区域,但模糊逻辑算法具有更高的反演精度.2)在混合相态云中,由于雷达反射率因子取决于较大的粒子,而混合相态云中冰晶粒子主导了雷达的回波强度,所以利用全局谱的雷达反射率因子反演液态水含量会存在低估现象,需要利用双峰谱进行功率谱密度分离,分别计算不同相态下粒子的含水量和有效半径.

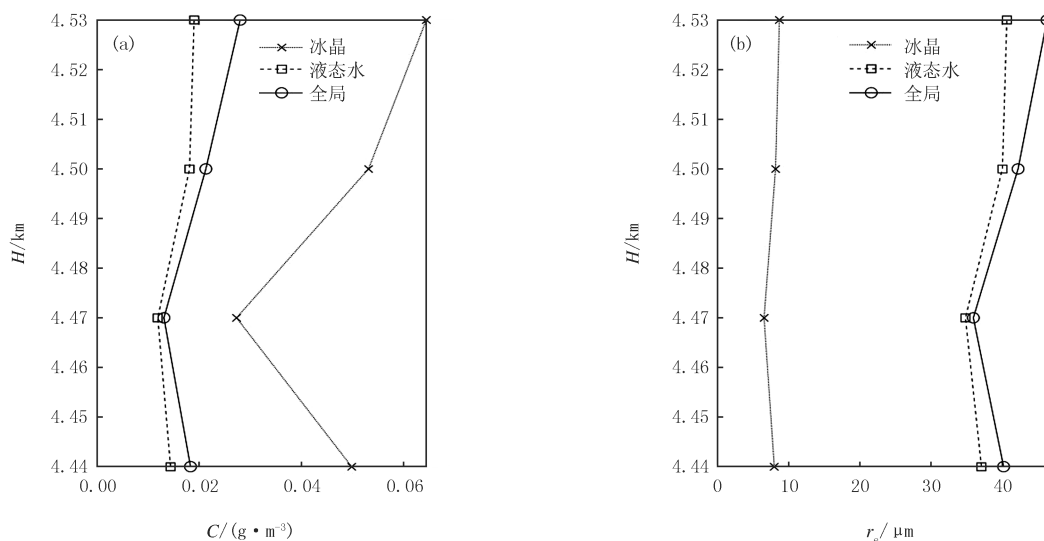


图6 过冷水谱、冰晶谱及全局谱(a)液态水质量浓度、冰水质量浓度;(b)粒子有效半径

Fig.6 Supercooled water spectrum,ice crystal spectrum and global spectrum(a) liquid water content and ice water content;(b)effective radius of particle

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] HOGAN R J,BEHERA M D,OCONNOR E J,et al.Estimate of the global distribution of stratiform supercooled liquid water clouds using the LITE lidar[J].Geophysical Research Letters,2004,31(5):D00h34.
- [3] HOGAN R J,FRANCIS P N,FLENTJE H,et al.Characteristics of mixed-phase clouds.I:Lidar,radar and aircraft observations from CLARE98[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2003,129(592):2089-2116.
- [4] HOGAN R J,ILLINGWORTH A J,OCONNOR E J,et al.Characteristics of mixed-phase clouds.II:a climatology from ground-based lidar[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2003,129(592):2117-2134.
- [5] MCFARQUHAR G M,UM J,JACKSON R.Small cloud particle shapes in mixed-phase clouds[J].Journal of Applied Meteorology and Climatology,2013,52(5):1277-1293.
- [6] SHUPE M D,MATROSOV S Y,UTTAL T.Arctic mixed-phase cloud properties derived from surface-based sensors at SHEBA[J].Journal of the Atmospheric Sciences,2006,63(2):697-711.
- [7] SHUPE M D.A ground-based multisensor cloud phase classifier[J].Geophysical Research Letters,2007,34(22):L22809.
- [8] SHUPE M D,DANIEL J S,DE BOER G,et al.A focus on mixed-phase clouds[J].Bulletin of the American Meteorological Society,2008,89(10):1549-1562.
- [9] WANG Z M,LETU H S,SHANG H Z,et al.A supercooled water cloud detection algorithm using Himawari-8 satellite measurements [J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2019,124(5):2724-2738.
- [10] 宋继焯,檀望舒,李成才,等.利用微脉冲激光雷达识别过冷水云层[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(5):961-969.  
SONG J Y,TAN W S,LI C C,et al.Identification of supercooled water clouds by using micro pulse lidar[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2018,54(5):961-969.
- [11] 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.  
YUAN M,DUAN L,PING F,et al.Identifying the supercooled liquid water in aircraft icing condition using CloudSat satellite data[J].Meteorological Monthly,2017,43(2):206-212.
- [12] 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.  
PENG L,CHEN H B,LI B.An application of fuzzy logic method to cloud hydrometeor classifications using the ARM WACR data[J].Re-

- remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(5): 655-663.
- [13] 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.  
WU J X, WEI M, WANG Y L. Retrieval of the supercooled water in stratiform clouds based on millimeter-wave cloud radar[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(2): 227-235.
- [14] WANG J H, GE J X, ZHANG Q L, et al. Study of aircraft icing warning algorithm based on millimeter wave radar[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(6): 1034-1044.
- [15] 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.  
LI Y L, SUN X J, ZHAO S J, et al. Analysis of snowfall's microphysical process from Doppler spectrum using Ka-band millimeter-wave cloud radar[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(2): 245-253.
- [16] AL-SAKKA H, BOUMAHMOUD A A, FRADON B, et al. A new fuzzy logic hydrometeor classification scheme applied to the French X-, C-, and S-band polarimetric radars[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(10): 2328-2344.
- [17] HILDEBRAND P H, SEKHON R S. Objective determination of the noise level in Doppler spectra[J]. Journal of Applied Meteorology, 1974, 13(7): 808-811.
- [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 the Atmospheric Sciences, 1995, 52(16): 2788-2799.
- [19] KOLLIAS P, SZYRMER W, RÈMILLARD J, et al. Cloud radar Doppler spectra in drizzling stratiform clouds: 2. observations and microphysical modeling of drizzle evolution[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(D13): D13203
- [20] 范盼,王金虎,陈军.基于模糊逻辑法的粒子识别研究[J].河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 47-52.  
FAN P, WANG J H, CHEN J. Particle identification based on fuzzy logic method[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2016, 44(3): 47-52.

## Inversion of supercooled water in clouds using multi-source data

Wang Jinhui<sup>1,2,3,4</sup>, Xiao Anhong<sup>1,2</sup>, Wang Yuhao<sup>1,2</sup>, Wang Haoliang<sup>1,2</sup>, Bao Jinwang<sup>1</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Open Laboratory of Aerosol and Cloud Precipitation, China Meteorological Administration, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Nanjing Xinda Institute of Safety and Emergency Management, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The content and distribution of supercooled water in the cloud are the main reasons for aircraft icing, so it is particularly important to accurately identify the supercooled water area in the cloud. In this paper, the 35 GHz and 94 GHz millimeter wave cloud radar and lidar of chilbolton observation field in Britain are used to compare the distribution of supercooled water in clouds identified by threshold method and fuzzy logic algorithm, and the water content of different water condensates is calculated by Doppler density algorithm. The results show that: 1) compared with the inversion results of threshold method and microwave radiometer, the fuzzy logic algorithm has higher inversion accuracy for the identification of water condensate; 2) In mixed phase clouds, because ice crystal particles dominate the radar echo intensity, the liquid water content in the clouds will be underestimated. It is necessary to calculate the radar reflectivity factors of different water condensates.

**Keywords:** supercooled water; millimeter wave radar; fuzzy logic; Doppler spectrum

[责任编辑 杨浦 刘洋]