毫米波雷达云回波的自动分类技术研究*

杨 晓^{1,2} 黄兴友^{1,3} 杨 军¹ 李培仁² 李盈盈¹ 杨 敏¹ 刘燕斐¹ 张 帅¹ 闫文辉¹ YANG Xiao^{1,2} HUANG Xingyou^{1,3} YANG Jun¹ LI Peiren² LI Yingying¹ YANG Min¹ LIU Yanfei¹ ZHANG Shuai¹ YAN Wenhui¹

- 1. 南京信息工程大学,南京,210044
- 2. 山西省人工降雨防雹办公室,太原,030032
- 3. 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
- 1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
- 2. Weather Modification Office of Shanxi Province, Taiyuan 030032, China
- 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2018-08-21 收稿,2019-02-25 改回.

杨晓,黄兴友,杨军,李培仁,李盈盈,杨敏,刘燕斐,张帅,闫文辉. 2019. 毫米波雷达云回波的自动分类技术研究. 气象学报, 77(3):541-551

Yang Xiao, Huang Xingyou, Yang Jun, Li Peiren, Li Yingying, Yang Min, Liu Yanfei, Zhang Shuai, Yan Wenhui. 2019. A study on auto-classification of cloud types based on millimeter-wavelength cloud radar observations. *Acta Meteorologica Sinica*, 77 (3):541-551

Abstract The millimeter-wavelength cloud radar has obvious advantages over weather radar and lidar because it can provide more information on cloud particle. It becomes an effective instrument in the detection and study of cloud characteristics. This work is focused on automatic classification of cloud echoes detected by the millimeter-wavelength cloud radar. Based on 161 samples of cloud echoes, the value ranges of characteristic quantities and other parameters are obtained for six types of cloud, including cirrus, altostratus, altocumulus, stratus, stratocumulus and cumulus. Automatic classification of clouds has been realized by using the multi-parameters threshold discrimination method with these value ranges in a hierarchical order. The automatic classification results are evaluated by comparing with that of manual classification, which shows a 84% consistency between the two methods. The automatic classification method cannot well identify stratus and cumulus clouds due to the limited number of samples (6 stratus samples and 8 cumulus samples). With more samples, more reliable information of the characteristic quantities for various types of clouds will be obtained, and the accuracy of automatic classification definitely will be improved. The cloud classification technique developed in this work based on millimeter-wavelength cloud radar observations is highly expected to promote the operation of automatic cloud observations in the near future.

Key words Millimeter-wavelength radar, Multi-parameter threshold method, Cloud observation, Cloud classification, Automation

摘 要 毫米波雷达在云探测方面比厘米波天气雷达和激光雷达具有显著优势,可获得更多的云粒子信息,是研究云特性的 主要遥感探测设备。为了开展对毫米波雷达探测的云回波进行自动分类的研究,利用161次云回波的个例数据,统计得到了

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41475034、41475035)。

作者简介:杨晓,主要从事云雷达资料分析及人工影响天气方面的研究。E-mail:njxxyzy@163.com 通信作者:黄兴友,主要从事雷达气象学、雷达及其他遥感资料的处理和应用研究。E-mail:hxyradar@126.com

卷云、高层云、高积云、层云、层积云和积云6类云型的特征量和其他参量的数值范围,利用分级的多参数阈值判别方法,达到 了自动分类的目标,通过与人工分类的初步验证,两种分类结果的一致性达到84%,其中,层云和积云的识别一致较低的原因 在于样本数据有限,仅有6次层云和8次积云的个例样本数据。通过更多样本的处理,提取的特征参量更可靠,自动分类的准 确率会得到提高,以便将基于毫米波雷达的云分类技术应用于将来的云观测自动化业务。

关键词 毫米波雷达,多参数阈值法,云观测,云分类,自动化 中图法分类号 P412

1 引 言

云是大气中的水汽受大气动力和热力作用而形成的,其成分是直径微米量级的水滴或冰晶。云的 类型和变化是大气温度、湿度状况的反映,是天气监 测和天气预报以及人工影响天气作业的重要参考信息(Quante,2004;Stephens,2005),此外,云的状况 会显著影响太阳辐射和地表热辐射能量的收支, 进而影响气候,因此,进行云的观测具有重要的意义。

目前,云的观测主要有两种手段:人工观测和自 动观测。人工观测的主观性强、误差大、受能见度的 影响大,而且难以进行连续观测,在偏远地区或者无 人值守的气象台站无法进行,所以,人工观测有很大 的局限性。自动观测包括气象卫星观测、空基观测 以及地基观测。气象卫星可以实现对全球云况的观 测,但空间分辨率低,且难以观测云顶以下的云况; 利用飞机、飞艇和气球平台的空基观测可以实现对 云内部的观测,但难以进行大范围的观测,且成本较 高,难以成为业务性的日常观测;地基观测依靠地基 仪器如云高仪、云像仪或激光雷达实现对云的观测, 成本较低,使用便捷,可得到云底高度和云量。由于 激光穿云能力差,激光雷达和云高仪难以提供云的 垂直分层、云类型等重要信息;云像仪得到的是云底 信息,不能获取云特性的丰富资料。随着毫米波雷 达的应用,测云能力得到了全面提升,不仅可以测量 云底、云顶和云的垂直分布,还可以获得云的雷达反 射率、垂直速度等定量数据,是当前最有效的测云设 备。人工判别云类型的依据主要是云高、云状和云 厚等宏观特征,毫米波雷达可以探测到云高和云厚, 并且比人工观测更准确,云状实际上体现了云体的 均匀性和云滴特性,本文云分类技术中利用了云回 波的均匀性指标以及云回波强度(体现云粒子特性) 等指标。因此,文中的云分类技术是在人工分类的 基础上进行的,并且使用了更多的指标,所以只利用

云雷达进行云分类就可以获得较好的分类结果。可 以说,这是中国第一次开展利用毫米波雷达数据进 行云分类工作。此外,毫米波雷达可以进行无人值 守的连续观测,适用于云特性的自动化观测。

近些年越来越多的地面观测站点取消了云状观测,造成了云类型数据的缺失,需要进行弥补,才能保持云观测资料的连贯性。自动云分类工作不仅可以弥补地面观测记录的不足,也可以减轻人工气象观测的强度和难度,甚至还能提高云状观测的准确性。文中针对云雷达观测到的云回波数据进行了统计和分析,提取了6类云(卷云、高层云、高积云、层云、层积云、积云)的特征数据,进行了云类型的自动识别研究,以便达到云观测业务自动化的目的。

2 研究进展

由于云类型与天气演变存在一定的对应关系, "看云识天气"是经验性天气预报的基础。根据云的 形态或视觉效果判别云类型是过去很长时间以来一 直沿用的方法,早在1802—1803年法国人德拉马克 (C. de Larmarck)和英国人霍华德(L. Howard)根 据形态学就将云分为4大类:卷云、积云、层云和雨 云。1934年,挪威科学家贝吉龙将云分为积状云、 层状云和波状云(童乐天,1980)。中国地面气象观 测规范中按云底高度将云分为低、中、高3级,然后 按云的宏观特征、物理结构和成因划分10属29类 云状,成为中国云观测和分类的依据(中国气象局, 2003)。

近年来,利用气象卫星云图进行云分类的研究 工作取得很大进展。常用的云分类方法有:阈值法、 直方图法、聚类法、神经网络法等(刘扬等,2011)。 Koffler等(1973)使用阈值法识别地表和云区;Desbois等(1982)提出光谱特征空间的概念,开展了盒 式分类法;Ameur等(2004)使用 C-均值聚类法进行 云分类;师春香等(2002)利用 BP 神经网络对 NO-AA-AVHRR 卫星图像进行云分类;Tian 等(1999) 利用概率神经网络(PNN)对 GOES-8 卫星数据进 行云分类; Hong 等(1996)采用人工神经网络技术 进行 GOES 卫星 10.7 µm 通道云图的分类; 吴晓等 (2016)利用 MODIS 卫星的云光学厚度、云粒子有 效半径、云顶高度、云相态等产品进行云分类; 黄兵 等(2008)建立了自组织网络(SOFM)与概率神经网 络的综合云分类器优化模型对云进行分类, 明显优 于单一的统计分类器判别效果。利用卫星云图进行 自动分类原理上是可行的, 但不能反映中、下层云的 情况, 其代表性不足, 特别是出现多层云的情况。

与卫星获取的云顶数据相比,雷达探测的是不 同高度的云回波数据,不仅准确性高而且更丰富(包 括强度、径向速度、谱宽等),既可以用于云的分类, 也可以用来反演云微物理参数。例如, Atlas (1954)、Fox 等(1997)、Zhong 等(2009)、刘黎平等 (2012)、吴举秀等(2015)、黄佳欢等(2017)、吴琼等 (2018)、韩颂雨等(2017)、黄书荣等(2017)、孙敏等 (2015)、周生辉等(2014)利用雷达或毫米波雷达数 据反演了云微物理参数;Ceccaldi等(2013)基于 CloudSat 的激光雷达和毫米波雷达数据,给出了水 云和冰云的简单分类; Wang 等(2004)使用云雷达、 拉曼激光雷达、微波辐射计、微脉冲激光雷达等多部 仪器联合探测,对云进行分类,将云分为 St、Sc、Cu、 Ns、Ac、As、深对流以及高云,深对流云包括积云和 积雨云,高云包括卷云、卷层云和卷积云;Teschke 等(2006)从粒子尺度出发,只使用毫米波云雷达将 云分为弱降水云、降水云和非气象目标物3类,简化 了仪器装备,为单一仪器云分类的研究打下了基础; Kodilkar 等(2016)只使用 Ka 波段双偏振云雷达对 云的分类进行了初步研究,按照云的相态将云分为 弱降水云、降水云、混合相云、冰云以及非气象目标 物,任建奇等(2011)利用 CloudSat 的云雷达和激光 雷达得到的云廓线数据产品,采用模糊逻辑技术进 行云分类,研究表明,基于雷达回波的云分类具有较 高的准确性。因此,以信息更丰富的雷达探测数据 为基础而进行的云类型自动分类技术,要优于基于 卫星云图的自动分类以及人工观测的主观分类。

为了开展云分类研究,无论哪种方案,都需要将 不同云类的特性参数作为先验数据,然后采取"对 比-判断"的技术路线进行识别。因此,本研究首先 根据云的雷达回波及人工观测的云类型情况进行统 计得到云特征参数,再进行分类。 3 毫米波雷达测云的原理及特性

文中使用南京信息工程大学的 Ka 波段毫米波 雷达探测的云回波数据进行研究,雷达安放在安徽 省寿县的中国国家气候观象台,垂直分辨率为 30 m,观测盲区为近地面 30 m 内,10 km 处观测到 的最弱回波低于 - 30 dBz。毫米波雷达主要技术参 数如表1 所示。

表1 35 GHz 毫米波雷达主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of 55 G.	Table 1	Main technica	l parameters	of 35	GH:
--	---------	---------------	--------------	-------	-----

millimeter-wavelength radar			
项目	技术指标		
频段	Ka 波段(35 GHz)		
扫描方式	PPI,RHI,定点,体扫,扇扫		
测量范围及精度	强度:-45-45 dBz(误差 1 dBz) 速度:≪20 m/s(误差 1 m/s) 谱宽:≪8 m/s(误差 1 m/s) 方位角:0°-360°(误差≪0.1°) 俯仰角:-2°-92°(误差≪0.1°)		
发射机型式	磁控管脉冲发射机		
发射机峰值功率	\geqslant 30 kW		
脉冲宽度	0.4 µs/0.2 µs		
波束宽度	0.4°		
脉冲重复频率	≪4000 Hz		

根据散射理论,在瑞利散射条件下,球形粒子的 雷达截面 $\sigma(mm^2)$ 为

$$\sigma = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \tag{1}$$

式中,D 为粒子直径(mm),λ 为发射电磁波波长 (mm),m 为复折射指数,是已知量。可见粒子的雷 达截面(σ)与波长(λ)的4次方成反比,波长越短,则 截面越大,回波信号就越强。因此,相对于厘米波段 的天气雷达来说,在较小的发射功率情况下,毫米波 雷达可以探测到较强的云回波信号,所以毫米波雷 达比厘米波雷达更适合探测云。

南京信息工程大学的毫米波雷达具有多普勒探 测功能,不仅可以探测到云的底高、顶高以及回波强 度,还可以得到云的垂直速度(天顶指向观测模式) 和速度谱宽,因而可以准确地得到云高、云厚数据, 通过云层的回波强度数据及其分布情况,可以判别 出云类型。

Ka 波段信号具有很强的穿云能力,能够探测多 层云分布的情况。强降雨对 Ka 波段信号有一定的 衰减,但在进行垂直指向天顶的探测时,由于降雨路 径短,衰减有限,大功率的 Ka 波段雷达仍然具有良好的测云能力,只是云层回波强度数据偏弱,通过衰减订正,可以得到改善。与卫星云图、地面激光雷达、地面云像仪相比,毫米波雷达的测云信息最丰富、可靠,对天气的适应性最强,能够进行全天候探测,适合自动化业务测云的要求。

4 云回波样本及特征量

所用的云回波数据来源于南京信息工程大学的 Ka波段雷达在安徽寿县中国国家气候观象台的观 测,观测时段为2015年10—11月以及2017年1— 6月,考虑到在未进行衰减订正情况下降雨对Ka波 段雷达信号的衰减影响,因此,对样本进行了筛选, 去除了有降雨的云回波资料,对无降雨的云回波资 料进行处理,以便获得可靠的、不同云类型的统计特 征量。在进行云分类时,先按云底高度将云分为低、 中、高3级,再按云系的均匀性将云分为积状云和层 状云。高云就只一类——卷云(Ci);中云分为高层 云(As)和高积云(Ac);低云分为层积云(Sc)、层云 (St)和积云(Cu)。观测时段的有效个例161个,包 括19个层积云、6个层云、8个积云、11个高层云、 90个高积云和27个卷云。

根据云特性和雷达探测的云回波参数,选取了 7个用于云分类的特征参量:云回波的雷达反射率 因子、垂直速度、垂直速度谱宽、云底高度、云顶高 度、持续时间以及云层中部的雷达反射率因子范围 (表 2)。云区边界的判断使用的是反射率因子范围 (表 2)。云区边界的判断使用的是反射率因子的数 据,从地面开始向上检测,以连续 10 个格点的反射 率因子大于 - 40 dBz 为判据,得出云底和云顶高 度;以持续时间不少于 5 个扫描周期且反射率因子 大于 - 40 dBz 为判据,得出云区起始时刻。根据 云底、云顶和起始时间,可确定云区,再计算云区内

表 2 6 类云的基本特征参量的统计结果

Table 2 Statistical results of basic characteristic parameters for six types of cloud						
	Sc	St	Cu	Ac	As	Ci
	(层积云)	(层云)	(积云)	(高积云)	(高层云)	(卷云)
反射率因子(dBz)	- 13. 97	- 30. 47	- 9.85	- 14.8	- 20. 38	- 24.48
	(-30.29—	(- 38.5—	(-31.43—	(-27.39-	(-30.4-	(-31.95—
	-0.34)	- 21.16)	10.57)	- 3.35)	- 11.76)	- 17.61)
速度(m/s)	-0.77	- 0. 27	- 2.35	- 0. 77	- 0.46	- 0.68
	(-1.52—	(-0.83—	(-5.28—	(-1.42-	(-0.95—	(-1.18—
	-0.12)	0.16)	-0.48)	- 0.19)	-0.03)	-0.20)
谱宽(m/s)	0.18	0.16	0.29	0.24	0.19	0.2
	(0.06-0.32)	(0.09-0.24)	(0.12-0.46)	(0.15-0.36)	(0.13-0.29)	(0.14-0.28)
云底高度(km)	2.42	1.82	1.49	5.33	5.71	8.32
	(1.51-3.47)	(1.54-2.09)	(0.31-3.77)	(4.7-5.99)	(4.9-6.63)	(7.74-8.95)
平均云顶高度(km)	5.11	2.39	5.12	7.58	8.09	9.65
持续时间(h)	5.11	4.89	0.87	1.06	5.43	3.25
云层中部反射率	- 27.56-	- 37.53-	- 31.69-	- 25.08-	- 29.03-	- 31.56-
因子(dBz)	- 0.75	- 21.6	11.30	- 3.3	- 11. 43	- 17.81

ble 2 Statistical results of basis observatoristic personators for six types of a

注:括号内是特征参量的取值范围。

7个特征量的均值和范围(5%-95%)。

参照表 2 中的 7 个特征量,可以将云体大致分 为高云、中云、低云 3 族。对于积状云和层状云的分 类,有一定的难度,因此再计算了云厚标准差、反射 率因子标准差、云底高度标准差、云层中部反射率因 子极差(极大值和极小值的差)、云层中部反射率因 子标准差、云层中部反射率因子平均时间变化率 6 项来表征云系的均匀性,以便区分出均匀性较好的 层状云和均匀性较差的积状云(表 3)。通过对比发 现,利用某一个特征量的阈值无法区分积状云和层状云,因此,需要采用多参数、宽阈值的判别方法。

5 云分类算法及结果分析

阈值法是云分类方法中较为简单、计算量小、处 理速度快的一种分类方法,但其分类的准确率较低, 特别是在阈值附近的特征量,容易导致错误的分类 结果。所以,文中采用多参数、宽阈值法,通过增加 判别参量的数量并结合参量的宽阈值范围,进行多

Table 3	Statistical results of uniformity characteristic parameters for six types of cloud					
	Sc (层积云)	St (层云)	Cu (积云)	Ac (高积云)	As (高层云)	Ci (卷云)
云厚标准差(km)	0.83	0.32	1.45	0.68	0.74	0.55
反射率因子标准差(dBz)	9.22	5.3	12.64	7.34	5.69	4.35
云底高度标准差(km)	0.58	0.18	1.27	0.42	0.53	0.38
云层中部反射率 因子极差(dBz)	26.81	15.93	42.99	21.78	17.6	13.75
云层中部反射率 因子标准差(dBz)	8.39	4.98	13. 38	6.71	5.22	4.2
云层中部反射率 因子平均时间 变化率(dBz/s)	0.0636 (0.0038— 0.1872)	0.0335 (0.0019— 0.1018)	0. 1419 (0. 0074— 0. 3765)	0.0825 (0.0046— 0.2195)	0.0444 (0.0028— 0.1274)	0.0601 (0.0037— 0.1639)

表3 6类云的均匀性特征参量的统计结果

注:括号中为特征参量的范围。

次判别而提高分类的准确性,这与模糊逻辑法的思 路是一致的。根据这些特征量对分类的影响程度, 分配不同的权重因子,最终根据加权求和值的大小 判别出是积状云或是层状云。参量的宽阈值范围选 取的是该特征量范围的30%大值至70%大值,特征 量对分类的影响程度是根据积状云和层状云在该特 征量上的相对差的大小判断的,再经过多次敏感性 试验得到了判别云类的最优权重因子组合。

对经过一次判别之后仍不能确定的云,需要重 新确定特征值的阈值范围计算加权之和,再次判断 得到所属云类,此时参量阈值选取的是该特征量范 围的中值。以中云族的高积云和高层云为例,计算 这两类云在这些特征参量上的相对差值,如表4中 所列的对比可得,持续时间、反射率因子最大值、云 层中部反射率因子最大值、云层中部平均时间变化 率、反射率因子标准差、云层中部反射率因子标准 差、云底高度标准差、云层中部反射率因子极差这8 项的相对差值较大,根据相对差值的大小,经过多次 敏感性试验,得到最优的权重因子组合,分别赋予上 述除持续时间外的7项以3、3、2、1、1、1、1的权重, 由于持续时间这项参量对积状云和层状云的影响比 较大,将其细分为5个阈值范围,分别赋予10、5、4、 2、-10的权重。在分类时若这一参量的值在高积 云的宽阈值范围之内,则该参量的权重乘1,否则为 0,最终权重之和大于11则为高积云,小于11的为 不确定(数值11是根据以上权重因子组合计算得到 的准确率最大的值,判别不同的云类其值也不同), 高层云同理,将所有不确定的高积云和高层云再进 行上述过程,重新选择阈值范围,再次判断,直到将

云判别出来为止。判别高层云和高积云的流程如图 1,总流程如图 2。

通过使用毫米波雷达回波特征对非降水云进行 分类,最终得到一张毫米波雷达的时空分布图,图中

表 4 高层云(As)和高积云(Ac)特征参量 的相对差值统计结果

Table 4 Statistical results of relative

differences in characteristic parameters

for altostratus and altocumulus clouds

特征参量	Ac、As 相对差值
平均反射率因子	0.377064
反射率因子最小值	0.110099
反射率因子最大值	2.513609
平均谱宽	0.267089
谱宽最小值	0.175695
谱宽最大值	0.229115
平均云底高度	0.071913
云底高度最小值	0.043487
云底高度最大值	0.105959
平均云顶高度	0.067153
平均云厚	0.055902
云厚最小值	0.112325
云厚最大值	0.065876
持续时间	4.142345
云厚标准差	0.089098
反射率因子标准差	0.290726
云底高度标准差	0.276274
云中层反射率因子最小值	0.157639
云中层反射率因子最大值	2.468227
云中层反射率因子极差	0.237747
云中层反射率因子标准差	0.284263
云中层平均时间变化率	0.856712
时间变化率最小值	0.632379
时间变化率最大值	0.722087



图 1 判别高层云与高积云的流程 Fig. 1 Flowchart for distinguishing altostratus from altocumulus

不同颜色代表不同类别的云,红色为层积云(Sc),橙 色为层云(St),黄色为积云(Cu),绿色为高积云 (Ac),蓝色为高层云(As),紫色为卷云(Ci)。

图 3 为 2017 年 1 月 17 日 20 时 54 分(世界时, 下同)—18 日 02 时 34 分观测点上空云系的雷达反 射率因子和分类结果, Sc 云系平均反射率因子为 - 25.34 dBz,平均云底高度为 2.42 km,平均云顶 高度为 3.46 km,云厚 1.05 km,为层积云。

图 4 是 2015 年 11 月 5 日 02 时 30 分—04 时 25 分观测点上空云系的雷达反射率因子和分类结 果,St 云系平均反射率因子为 – 34.11 dBz,平均云 底高度为 2.2 km,平均云顶高度为 2.6 km,云厚 0.4 km,为层云。

图 5 为 2015 年 10 月 31 日 18 时 43 分—11 月 1 日 00 时 01 分观测点上空云系的雷达反射率因子 和分类结果,18 时 43 分—20 时 04 分 4 km 附近的 云系平均反射率因子为-15.65 dBz,平均云底高度 为 2.11 km, 平均云顶高度为 5.17 km, 云厚 3.069 km, 为积云; 10 km 附近的云系平均反射率 因子为-30.82 dBz, 平均云底高度为 9.63 km, 平均云顶高度为 10.57 km, 云厚 0.94 km, 为卷云。

图 6 为 2017 年 3 月 7 日 20 时 08 分—8 日 02 时 13 分观测点上空云系的雷达反射率因子和分类 结果,平均反射率因子为 - 22.45 dBz,平均云底高 度为 5.78 km,平均云顶高度为 7.87 km,云厚 2.09 km,为高层云。

图 7 是 2015 年 10 月 30 日 00 时—08 时 28 分 观测点上空云系的雷达反射率因子和分类结果, 5 km附近的云系平均反射率因子约为 - 16 dBz,平 均云底高度约为 4 km,平均云顶高度约为 7 km,云 厚 2 km,为高积云;8 km 附近的云系平均反射率因 子约为 - 27 dBz,平均云底高度约为 7.5 km,平均 云顶高度约为 9.5 km,云厚 2 km,为卷云。

通过与人工分类的统计结果对比,并结合当时

地面观测记录,验证了毫米波雷达云回波分类的正确性。评估云分类的准确率需要一种客观的标准,目前普遍采用命中率、临界成功指数和虚警率3个指标,本次验证中有效个例共161个,其中与人工分类结果一致的有135个,命中率为84%,因为在个例的选取上选择的是绝对确定的云类,其特征也比较明显,所有的云区都被识别出来,且没有多余的部分被认为是云区,只是在判别云区上有些失误,因此

虚警率为0,临界成功指数为0.84。

自动云分类与人工分类不一致的原因主要有以 下几点:(1)统计的样本量不够大,特征量及范围还 不具普遍性;(2)地面观测或者人工分类结果可能会 有错,特别是在出现多层云的情况下,人工观测很容 易误判;(3)不同季节(或不同地域)的云回波特征量 有差异。提高自动分类准确率的方法首先是增加统 计的样本数,以便涵盖更多的云回波情况,包括云的



图 2 毫米波雷达云回波自动分类技术流程 Fig. 2 Flowchart of automatic classification technology for cloud echoes observed by millimeter-wave radar







图 4 2015 年 11 月 5 日 02 时 30 分—04 时 25 分雷达反射率因子(a)和分类结果(b) (St) Fig. 4 Reflectivity (a) and classification result (b) during 02:30—04:25 UTC 5 November 2015 (St)



Fig. 5 Reflectivity (a) and classification result (b) during 18:43 UTC 31 October 2015— 00:01 UTC 1 November 2015 (Cu, Ci)

548



Fig. 6 Reflectivity (a) and classification result (b) during 20:08 UTC 7 March-







季节性变化和日变化等;其次是采用其他云观测资 料进行自动分类的验证,减少人工分类中的误判。

6 结 论

利用基于毫米波雷达云回波的特征量与多参数 阈值法相结合的技术,对安徽寿县中国国家气候观 象台上空非降水云系的回波进行了自动分类研究, 得到如下结论:

(1)毫米波雷达具有测云的优势,不仅因为波 长短(与厘米波雷达相比)而使云粒子具有更大的雷 达截面,还具备很好的穿云能力(相比激光雷达),能 够探测多层云的回波,此外,降水衰减影响小,可进 行全天候的对云观测,能够用于云观测业务的自动 化。

(2)利用云回波特征量及多参数阈值的判别技术,可以比较准确、客观地对云类型进行判别,部分数据的验证表明,准确率达到84%。

(3)判别准确率的提高主要依赖于样本数据, 通过对更多样本数据的统计,可以优化特征量和参 数阈值。

研究表明,随着更多毫米波雷达的应用和样本 数据的增大,所统计得到的特征量及参数阈值的代 表性更强,自动分类的准确率会进一步提高,并有望 实现云观测业务的自动化。此外随着后续实验样本 量的增加,对于降水云系的分类(包括雨层云、积雨 云等)以及已分类云系的更精细分类(包括淡积云和 浓积云、卷云的分类等)会在下一步工作中进行。

参考文献

- 韩颂雨, 罗昌荣, 魏鸣等. 2017. 三雷达、双雷达反演降雹超级单体 风暴三维风场结构特征研究. 气象学报, 75(5): 757-770. Han S Y, Luo C R, Wei M, et al. 2017. Research on three-dimensional wind field structure characteristic of hail supercell storm by dual-and triple-Doppler radar retrieval. Acta Meteor Sinica, 75(5): 757-770 (in Chinese)
- 黄兵,王彦磊,张韧等. 2008. 多光谱卫星云图的 SOFM-PNN 网络 耦合的云分类模型.应用基础与工程科学学报,16(5):659-670. Huang B, Wang Y L, Zhang R, et al. 2008. A cloud classification model of multi-spectrum satellite cloud images based on the network coupling SOFM with PNN. J Basic Sci Eng, 16 (5):659-670 (in Chinese)
- 黄佳欢,黄兴友,黄勇等. 2017. 2015 年 10 月 29 日弱降雨前后的 层状云微物理参数反演和分析. 气象科学, 37(4): 478-486. Huang J H, Huang X Y, Huang Y, et al. 2017. Microphysical parameters retrieval and analysis on stratus cloud before and after light rainfall on October 29, 2015. J Meteor Sci, 37(4): 478-486 (in Chinese)
- 黄书荣,吴蕾,马舒庆等. 2017. 结合毫米波雷达提取降水条件下 风廓线雷达大气垂直速度的研究. 气象学报,75(5): 823-834. Huang S R, Wu L, Ma S Q, et al. 2017. Extraction of atmospheric vertical velocity from observations of WPR combined with millimeter-wavelength radar during precipitation. Acta Meteor Sinica, 75(5): 823-834 (in Chinese)
- 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. 中国工程科学, 14(9): 64-71. Liu L P, Zong R, Qi Y B, et al. 2012. Microphysical parameters retrieval by cloud radar and comparing with aircraft observation in stratiform cloud. Eng Sci, 14(9): 64-71 (in Chinese)
- 刘扬, 王彬, 韩雷. 2011. 基于卫星云图的云分类研究. 电子设计工程, 19(10): 189-192. Liu Y, Wang B, Han L. 2011. A review study of cloud classification using satellite imagery. Electr Des Eng, 19(10): 189-192 (in Chinese)
- 任建奇, 严卫, 杨汉乐等. 2011. 基于模糊逻辑的 CloudSat 卫星资 料云分类算法. 解放军理工大学学报(自然科学版), 12(1): 90-96. Ren J Q, Yan W, Yang H L, et al. 2011. Cloud classification algorithm for CloudSat satellite based on fuzzy logic method. J PLA Univ Sci Technol Nat Sci Ed, 12(1): 90-96 (in Chinese)
- 师春香,瞿建华. 2002. 用神经网络方法对 NOAA-AVHRR 资料进 行云客观分类. 气象学报, 60(2): 250-255. Shi C X, Qu J H. 2002. Cloud classification for NOAA-AVHRR data by using a neural network. Acta Meteor Sinica, 60(2): 250-255 (in Chinese)
- 孙敏,戴建华,袁招洪等. 2015. 双多普勒雷达风场反演对一次后 向传播雷暴过程的分析. 气象学报,73(2):247-262. Sun M,

Dai J H, Yuan Z H, et al. 2015. An analysis of a back-propogating thunderstorm using the three-dimensional wind fields retrieved by the dual-Doppler radar data. Acta Meteor Sinica, 73 (2): 247-262 (in Chinese)

- 童乐天. 1980. 云的分类. 气象, 6(8): 34-36, 24. Tong L T. 1980. Cloud classification. Meteor Mon, 6(8): 34-36, 24 (in Chinese)
- 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. 干旱气象,33(2):227-235. WuJX, Wei M, Wang Y L. 2015. Retrieval of the supercooled water in stratiform clouds based on millimeter-wave cloud radar. J Arid Meteor, 33(2): 227-235 (in Chinese)
- 吴琼,仰美霖,窦芳丽等. 2018. 星载双频云雷达的云微物理参数 反演算法研究. 气象学报,76(1):160-168. Wu Q, Yang M L, Dou F L, et al. 2018. A study of cloud parameters retrieval algorithm for spaceborne millimeter wavelength cloud radar. Acta Meteor Sinica, 76(1):160-168 (in Chinese)
- 吴晓, 游然, 王旻燕等. 2016. 基于 MODIS 云宏微观特性的卫星云 分类方法. 应用气象学报, 27(2): 201-208. Wu X, You R, Wang M Y, et al. 2016. Cloud type identification based on macro and micro properties of clouds from MODIS. J Appl Meteor Sci, 27(2): 201-208 (in Chinese)
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 11-14. China Meteorological Administration. 2003. Specifications for Surface Meteorological Observation. Beijing: China Meteorological Press, 11-14 (in Chinese)
- 周生辉,魏鸣,张培昌等. 2014. 单多普勒天气雷达反演降水粒子 垂直速度 I:算法分析. 气象学报, 72(4): 760-771. Zhou S H, Wei M, Zhang P C, et al. 2014. The precipitation particles ´vertical velocity retrieval with single Doppler weather radar. Part I: Retrieval method's analysis. Acta Meteor Sinica, 72 (4): 760-771 (in Chinese)
- Ameur Z, Ameur S, Adane A, et al. 2004. Cloud classification using the textural features of Meteosat images. Int J Remote Sens, 25(21): 4491-4503
- Atlas D. 1954. The estimation of cloud parameters by radar. J Atmos Sci, 11(4): 309-317
- Ceccaldi M, Delano? J, Hogan R J, et al. 2013. From CloudSat-CALIPSO to EarthCare: Evolution of the DARDAR cloud classification and its comparison to airborne radar-lidar observations. J Geophys Res Atmos, 118(14): 7962-7981
- Desbois M, Seze G, Szejwach G. 1982. Automatic classification of clouds on METEOSAT imagery: Application to high-level clouds. J Appl Meteor, 21(3): 401-412
- Fox N I, Illingworth A J. 1997. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar. J Appl Meteor, 36(5): 485-492
- Hong Y, Hsu K, Sorooshian S. 1996. Precipitation estimation from remotely sensed information using ANN-Cloud classification system. J Appl Meteor, 36(9): 1176-1190

- Kodilkar A, Agarwal A, MCR K, et al. 2016. A preliminary analysis of cloud classification results using Ka-band polarimetric radar signatures // Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, China: IEEE, 544-547
- Koffler R, DeCotiis A G, Krishna Rao P. 1973. A procedure for estimating cloud amount and height from satellite infrared radiation data. Mon Wea Rev, 101(3): 240-243
- Quante M. 2004. The role of clouds in the climate system. J Phys IV, 121(12): 61-86
- Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review. J Climate, 18(2): 237-273
- Teschke G, Görsdorf U, Körner P, et al. 2006. A new approach for target classification of Ka-band radar data // Proceedings of the

Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Barcelona, Spain

- Tian B, Shaikh M A, Azimi-Sadjadi M R, et al. 1999. A study of cloud classification with neural networks using spectral and textural features. IEEE Trans Neural Netw, 10(1): 138-151
- Wang Z, Sassen K. 2004. An improved cloud classification algorithm based on the SGP CART site observations // Proceedings of the Fourteenth ARM Science Team Meeting. Albuquerque, New Mexico
- Zhong L Z, Liu L P, Deng M, et al. 2012. Retrieving microphysical properties and air motion of cirrus clouds based on the Doppler moments method using cloud radar. Adv Atmos Sci, 29(3): 611-622