

引用格式: Lin Qingyun, He Jianxin, Wang Hao, *et al.* The Review of Hydrometeor Phase Identification Technology based on Dual-polarization Weather Radar[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(3): 517-526.
[林青云, 何建新, 王皓, 等. 基于双偏振天气雷达的水凝物相态识别技术研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(3): 517-526.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.3.0517

基于双偏振天气雷达的水凝物相态识别技术研究进展

林青云, 何建新, 王皓, 史朝, 陈婉婷
(成都信息工程大学, 四川 成都 610225)

摘要: 水凝物相态识别 (Hydrometeor Classification Algorithm, HCA) 是从微物理角度分析天气特征的一个重要研究方向, 研究水凝物粒子的分类, 对于冰雹、降雨、降雪的观测均有重大意义。分析并总结了目前模糊逻辑水汽分类算法 (Fuzzy logic Hydrometeor Classification, FHC) 的优势, 但是其局限性在于 FHC 较大地依赖于散射模拟, 对冰相粒子相态识别的结果不确定。此外, 目前也缺少有效的相态识别验证方法, 这进一步限制了雷达双极化特征的应用。因此, 发展其他聚类算法进行相态识别并建立分类标准体系是未来主要研究方向。

关键词: 水凝物相态识别; 双偏振天气雷达; 模糊逻辑

中图分类号: TN959.4; P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)03-0517-10

1 引言

水凝物相态识别即通过观测雷达的偏振参量对不同水凝物进行分类, 从分类结果中可以获得层状云中降水粒子的结构与分布特征, 通过观测降水粒子的大小、形状、相态和空间上的差别, 揭示了各种降水系统中小雨滴、大雨滴、霰、冰雹、雪花和冰晶等多种水凝物粒子的分布^[1], 有效提升了双极化雷达对降水粒子相态识别与估测降水的能力, 对探索天气过程的微物理机制, 改善数值模式预报效果等均有非常重要的促进作用。近年来, 水凝物相态识别在气象科学领域、交通安全领域以及社会领域均受到极大关注^[2-6]。

目前水凝物相态识别的核心算法以模糊逻辑水汽分类算法 (Fuzzy logic Hydrometeor Classification, FHC) 为主^[7-11], 由于不同的水凝物信号集合有

一定的兼容性, 模糊逻辑通过简单的规则而不是公式来描述分类系统, 这一点对于水凝物分类有优势。然而, 从算法本身而言, 模糊逻辑算法在使用中需要设定各偏振参量的权重系数, 在不同的天气过程分析中其判定规则不完全相同, 这增加了粒子分类的不确定性。另外, 在分类的基础上, 如何对结果进行验证与应用也是需要重点研究的问题。从当前水凝物相态识别算法以及应用情况出发, 提出算法研究和验证工作中存在的问题以及对未来该领域研究工作的展望, 进一步为双偏振雷达产品的应用提供相应的科学参考。

2 相态识别技术研究进展

早期相态识别技术大多基于布尔决策树, 并主要应用于冰雹的识别^[12]。然而, 布尔决策树方法需要预先假设偏振参数互斥, 测量波动也会导致误

收稿日期: 2019-04-27; 修订日期: 2020-05-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1506104), 四川省科技厅应用基础研究项目 (2019YJ0316), 成都信息工程大学科研基金 (J201502)。

作者简介: 林青云 (1995—), 女, 广东中山人, 硕士研究生, 主要从事雷达系统及信号处理研究。Email: 51018526@qq.com

通讯作者: 何建新 (1966—), 男, 安徽池州人, 教授, 主要从事信号采集与处理研究。Email: hjx@cuit.edu.cn

差,因此不具有充分探索偏振测量的潜力。模糊逻辑算法(FHC)可以根据模糊对象进行精确的描述和处理,即将重叠隶属的函数参数进行组合、推理得到相应匹配的分组,这能够很好的克服布尔决策树这一缺陷,FHC在粒子的相态识别研究中应用广泛。

2.1 基于模糊逻辑模型的水凝物相态识别(HCA)

模糊逻辑算法最早由 Zadeh^[13]在1965年提出,通过诺曼和博尔德雷达社区之间的联合努力引入到雷达气象学中^[14-16],传统的模糊逻辑法包括四个过程:模糊化、规则推断、集成和退模糊。模糊化是将精确输入测量值换成具有相应隶属度的模糊集合,每一个参量针对待识别的粒子建立了模糊基,每个模糊基可用隶属函数 MBF_{ij} 表示, i 表示偏振参量, j 表示粒子类型。隶属函数的特性决定分类效果,隶属函数通常有三角函数、梯形函数^[10,15,17]、高斯函数^[9]和beta函数^[7]。规则推断“IF-THEN”规则可以用下面语句来描述:IF ($Z_h = MFB_{1,j}$ AND $Z_{dr} = MFB_{2,j}$ AND $K_{dp} = MFB_{3,j}$ AND $\rho_{hv} = MFB_{4,j}$ AND 高度 = $MFB_{5,j}$) THEN 水凝物 $LDR = MFB_{6,j}$ 类型 = j 。最后,把最大真值作为集成的最终结果,即可找到最大规则强度所对应的索引值,得到最后的分类效果。

传统的FHC模型在早期的粒子识别中应用广泛,2003年,Schuur等^[18]提出FHC模型优于传统的HDA冰雹识别模型。2005年,曹俊武等^[10]提出的FHC用于美国S波段KOUN雷达强风暴单体和降雪数据进行分析,得到的结果基本能反映相态,但其数据的特征值并不明确。2009年,Park等^[9]在Schuur等^[18]的基础上进行优化,考虑了测量误差、波束展宽效应、融化层位置和降水类型,该算法区分了对流层和层状降水类型以及暖季和冷季降水系统中的水汽类型,能识别降水等级,被美国国家气象局所推荐,并用于WSR-88D网的双偏振升级改造中。2010年,何宇翔等^[19]使用大气物理研究所的新装备X波段双线偏振多普勒雷达(IAP-714XDP-A),对RHI资料进行观测,并建立了15种降水粒子的FHC。2014年,郭凤霞等^[11]对每个识别参量赋予权重值,在X波段对降水粒子识别,得到水平反射率因子 Z_H 的识别能力最强。2013年,Al-Sakka等^[20]在S、C、X波段均建立了FHC,并加入了3D温度信息。2014年,Mahale等^[21]对Park^[9]算法进行了改进以便识别三体散射特征(TBSS),使得

FHC在冰雹的识别上得到好的应用。

2.2 基于神经网络模型的水凝物相态识别(HCA)

模糊逻辑算法(FHC)的性能主要取决于隶属函数参数的设定,传统的FHC模型需要人为地根据不同天气系统来设置隶属函数,其结果不具有客观性。2000年,Liu等^[7]提出神经-模糊水凝物分类法(NFHC),通过神经网络来获悉系统参数进而确定隶属函数,利用CSU-CHILL S波段雷达进行了水凝物相态识别。2005年,Lim等^[8]在Liu等^[7]提出的算法基础上做进一步改进,通过交叉偏振信号的方式来提高信噪比,该算法现已被移植到由Vaisala公司生产的商用气象雷达中。然而S波段的探测参量的阈值不能用于C波段^[11]。2005年,Baldini等^[22]将NFHC分类算法进行了调整,用于Polar 55和CAR-MOR的C波段雷达观测。考虑到C波段双雷达网络路径集成衰减(PIA)的影响,Marzano等^[23]于2007年提出基于双雷达复合场的PIA订正方法。同年,Jonathan^[24]指出,Liu等所用的Beta函数不适用于不同散射体或不同波长操作的另一个雷达,他在C波段使用高斯核密度估计的经验导出的密度函数直接用作NFHC中的隶属函数,消除了降雨雷达估计的杂波,其结果较为客观,且算法容易应用于任何扫描性的雷达。2017年,李海等^[25]提出了基于T-S模型的模糊神经网络(FNN)的粒子识别方法,用美国WSR-88D雷达KTLX对降水粒子进行相态识别,能够自适应地调节各偏振参量隶属函数的参数,其结果与美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)所提供数据结果相一致。2018年,李海等^[26]又提出了基于模糊神经网络-模糊C均值(FNN-FCM)算法,该方法能够通过晴空模式进行训练来确定隶属函数参数,其分类效果也得到NOAA数据的验证。2017年,王海江等^[27]提出基于深度学习的模糊聚类识别算法,用卷积神经网络(CNN)进行初始聚类,消除了偏振参数测量误差造成的影响,自动提出有用特征值,然后用FHC进行精确分类,其识别结果与其他极化产品一致。

2.3 基于聚类模型的水凝物相态识别(HCA)

近年来,有学者通过聚类来确定模糊逻辑算法(FHC)的隶属函数参数,来对算法进行优化。2015年,Bechini等^[28]发现之前的研究中所提出的算法并未有效的进行噪声消除,他利用改进的K-means聚

类分析算法确定隶属函数,用CASA IP1雷达的X波段分析了层状降水和对流降水的异同。同时,他提出了基于区域的水汽凝结分类,用马哈拉比斯距离进行向量归一化,这克服了K-means产生球形聚类的趋势。2017年,Roberto等^[29]提出支持向量机的水汽分类模型(SVM),他利用SVM模型^[30]对模糊逻辑进行训练,得出之前算法的未知线性关系,与Luca Baldini等^[22]所提出的FL-HCA算法相比,SVM模型能够对FL-HCA未被分类的数据进行分类。

综上,模糊逻辑算法(FHC)从最开始提出,到后来运用均经过了学者们不断地完善,经改善的FHC在雷达系统中得到了应用。通过研究,目前主流的FHC算法还有以下缺陷:①FHC对假定的电磁行为有依赖性,即分类结果在很大程度上依赖散射模拟,虽然散射模拟结果对于降雨而言通常比较准确,但对于冰相水凝混合物分类来说,其结果是不确定的^[1,31];②FHC在模糊化过程中,隶属函数参数的设置不容忽视,参数的设置不当,导致了水汽分类不稳定;③国内主流算法的隶属函数参数还根据经验值人为设定,由于不同地区的降水受气候、地形等多方面的影响,降水特性不一致,无法用经验值来评估,因此其分类效果不具有客观性。

2.4 其他智能算法

由于FHC存在一定的不足,研究者期望从其他算法入手,提出新的水凝物相态识别算法。2015年,Grazioli^[31]等开创了无监督的聚类算法,他对温度分区,通过每个区域偏振数据的相似性得到聚类结果,该方法有效避免了对水汽类型的主观选择,他利用该方法对湿雪进行分类。2015年,Wen等^[32-33]用期望最大化(EM)算法和K-means聚类算法生成CP-2雷达S波段数据模型,并通过最大原型似然分类器(MPLC)和贝叶斯分类器进行水汽分类,他提出国家大气研究中心(NCAR)的FHC无法识别雨和霰的混合物,并针对这一点进行改进。2016年,Besic等^[1]提出了K-medoids聚类算法和KS统计检验的算法,该算法结合了监督和非监督方法的主要优点,可从微观物理的角度进行粒子分类,又可以基于统计检验的方法来得到数据集。Besic提出的算法在C波段、X波段的雷达均可得到分类效果,但还存在对远距离水凝物识别不确定的问题。2018年,Besic等^[34]又提出了熵的补充测量,该方法建立在合成孔径雷达(SAR)的相干极化分

解和高光谱线性解^[35]的基础上,并对之前算法不确定部分进行估计,在MXPOL和Plaine Morte雷达上进行试验,对离散水汽分类的不连续进行改进。同年,Kumpf等^[36]对聚类算法进行可视化分析,为研究聚类算法的稳定性打下基础。

目前水凝物的识别分类算法仍具有探索性,推断水凝物完全独立是不可能的,在今后的研究中,应侧重于水凝物本身的物理特性来分类^[33],譬如在分类的规则中加入一定的自由度。因此,有必要开发不同的算法来研究水凝物分类特性,这将有助于对复杂的天气过程进行观测和分析。

3 相态识别应用研究进展

双偏振雷达降水分类技术有助于从微观角度研究天气特征。其分类结果对于检测冰雹、定量降水估算(QPE)、冬季降雪观测等方面有实际意义,对大气动力的理解、数值天气预报模型的验证和同化都非常重要,下面分别从冰雹观测、降雨观测、降雪观测3个方面介绍相态识别的应用研究进展。

3.1 冰雹观测

研究表明,受米氏散射的影响,冰雹的3~10 cm波长的雷达反射率比雨大得多,这种比率可用于冰雹探测^[37]。继双偏振雷达研制成功后,有学者开始利用偏振参量进行冰雹的检测,起初的粒子相态识别对冰雹的检测基于决策树理论^[13,38-41]。在Liu等^[7]的算法提出后,水凝物相态识别(HCA)在识别冰雹中得以应用,2006年,Heinselman等^[42]验证HCA优于传统的冰雹检测(HDA),主要优于虚警率的下降。由于HCA模型对于三体散射特征(TBSS)有错误的回波分类,(TBSS归因于具有相当大的有效水厚度(即湿冰雹)的海绵状冰球组成的大型水凝物区域的非瑞利散射(即米散射或共振散射)),即在低于融化层和高于凝结高度的观测中无法识别出TBSS。2014年,Mahale等^[20]对HCA进行改进来识别TBSS,他对Park等^[9]的HCA算法的识别能力进行了增强,应用于S波段雷达WSR-88D网络,这一改进提高了对湿冰雹的检测,其改进的分类在下击暴流的观测中取得了良好效果^[43]。2018年,Capozzi等^[44]对比了基于线性判别分析和HCA识别冰雹,HCA在识别冰雹过程中表现良好。同年,Schmidt等^[45]证明未被修改参数的HCA不能用于C波段雷达上的观测应用,他认为Park等^[9]所提出的算法不适合C波段的冰雹观测,在C波段观测下几

表 1 部分水凝物分类算法总结

Table 1 Summary of partial hydrometeor type classification algorithm

作者	雷达波段	算法	极化参量	识别出的水凝物类型	加入参考量	验证方式
Liu (2000)	S	NFHC	$Z_H; Z_{DR}; K_{DP}$ $\rho_{HV}; LDR$	10:DR;RA;LDDIC;HDDIC;WI;DG; WG;SH;LH;RH	高度(与融化层 有关)	飞机验证
曹俊武(2005)	S	FHC	$Z_H; Z_{DR}; \rho_{HV}$ K_{DP}	10:DR;RA;DS;DC;WS;DG;WG;SH; LH;HR	无	与地面观测资料 对比
Park(2009)	S	FHC	$Z_H; Z_{DR}; \rho_{HV}$ $LK_{DP}; SD(Z) SD(\varphi_{DP})$	8:DS;WS;I;G;BD;RA;HR;RH	高度(与融化层 有关)	实际测量
Bechini(2015)	S,X,C	FHC、K-means 聚类	$Z_H; Z_{DR}; K_{DP} \rho_{HV}$	13:BD;DR;RA;HR;RH;HA;G;WI; DI;CR;DN;CL;CA	温度	算法评估
李海(2017)	S	FNN	$Z_H; Z_{DR}; K_{DP} \rho_{HV}$	8:DR;RA;I;DS;WS;HDG;HA;BD	无	与 NOAA 数据 对比
Roberto (2017)	C;X	SVM	$Z_H; Z_{DR}; \rho_{HV} K_{DP}; \varphi_{DP}$	6:RA;DS;WS;G;H;HM	高度(与融化层 有关)	模拟场景;实际 测量
Wen (2015)	S	K-means 聚类、MPLC 和 贝叶斯分类器	$Z_H; Z_{DR}; K_{DP} \rho_{HV}$	10:H;HR;G/R;G/HS;I;MI;IA;RH; MR;I/RA	高度(与融化层 有关)	与 NCAR 数据对 比
Besic (2016)	X;C	K-medios 聚类、质心推 导	$Z_H; Z_{DR}; K_{DP} \rho_{HV}$	9:I;AG;DR;RA;RP;VI;WS;MH; HDG	温度	实际测量

注:极化参量识别出的水凝物类型有雨(RA)、中雨(MR)、大雨(BD)、毛毛雨(DR)、冰晶(I)、干冰(DC)、垂直冰晶(VI)、水平冰晶(CR)、低/高密度干冰晶(LDDIC/HDDIC)、湿冰晶(WI)、干冰晶(DI)、霰(G)、干霰(DG)、湿霰(WG)、高密度霰(HDG)、低密度霰(LDG)、冰雹(H)、冰雹混合物(HM)、小冰雹(SH)、大冰雹(LH)、雨夹雹(RH)、雨+雹(HR)、雨夹小雹(RSH)、雨夹大雹(RLH)、雪(S)、干雪(DS)、湿雪(WS)、冻雨(FR)、霰/小冰雹聚集体(G/HS)、小冰晶聚集体(MI)、聚合体(AG)、高密度霰/冰粒子+冰雹(RP)、融化冰雹(MH)

乎没有分类情况。他提出使用双层 T 矩阵来获得干冰和冰雹的后向散射幅度。2019 年,Simona 等^[46]将 Besic 等^[1]的算法用于观测冰雹区,并用于雷达的校准及验证。

国内也开发了 HCA 识别冰雹,2006 年,曹俊武等^[47]对比了几种冰雹识别的算法,得出 HCA 的效果最佳,不仅可以识别出冰雹具体位置,还可以对降雹粒子进行分类。2014 年,张秉祥等^[48]建立了适用于华北地区的 HCA,该算法的建立明显降低了冰雹识别的虚警率,减少了预报员的工作量。2018 年,武崇等^[49]对 2016 年 5 月 9 日发生的超级单体进行讨论,用 HCA 识别出雨及冰雹混合物(RH)区域,并指明 HCA 是一种简单的方法来整合偏振信息,比传统的风暴跟踪更可靠。同年,他在 2014 年 5 月 11 日飑线过程进行分析中^[50],基于 Heinselman 等^[42]的理论对 HCA 算法优化改进,对算法的参数和阈值优化,得到适用于华南珠海的偏振算法,该研究为发展适合中国降水特征的 HCA 算法奠定基础。2018 年,王洪等^[51]将 Park 等^[9]的算法简化移植到珠澳偏振雷达中,通过 S 波段雷达对 2015 年 4 月 20 日的一次春季冷锋触发的超级单体进行分析,有效识别出冰雹区,由于仅从一次观测中得出结论,对各偏振量之间的定量关系亦需进一步研究。

粒子的相态识别在防雹方面也得到重要应用,目前人工防雹主要是防雹炮弹爆炸将碘化银(AgI)在云内播撒,使大量人工冰核去“争食”作业区的水汽,进而限制小冰雹增长。运用经典 HCA 算法对防雹作业区前后进行相态分析,观测得出原形成冰雹的粒子下落到暖区融化成雨滴降落。判断云粒子的构成和取向可以确定防雹作业效果评价指标^[52]。

综上,目前粒子分类算法仅有 HCA 算法用于冰雹检测,国内的冰雹检测大多基于传统算法,基于 HCA 的冰雹检测个例研究太少,因此研究结果说服力较弱。在今后的研究中,应增加冰雹个例的研究,针对某一地区的降雹特征建立 HCA 算法,从而更有效地检测冰雹。

3.2 降雨观测

通过双偏振雷达能够提高对降水量的估计,定量降水的估计对于暴雨的预警有着很大作用,从而能够做出正确的应对措施,使洪涝灾害最大程度的缩小。在双偏振雷达探测中,偏振参量 K_{DP} 不受绝对雷达校准和部分光束阻挡的影响,并且可用于强降水的衰减校正,在早期研究中被用作雨量的估计^[53-56]。2003 年,Cifelli 等^[57]开发了一种基于 Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 值的阈值的混合算法(CSU-ICE)来估算的

降雨率。2011年,他开发出基于粒子识别的降水估算算法(CSU-HIDRO)^[58],经验证,该算法能够应用于高原环境中,且较之前算法优于强降水的估算。由于CSU-HIDRO算法中的降雨关系是基于模拟的液滴分布(DSD)数据得出。2017年,Carr等^[59]研究中纬度暖雨的三维极化特征,液滴聚结为主要微物理过程,该研究结果在复杂地形的降水分类得以应用^[60]。同年,Chen等^[61]提出了基于区域的水文气象分类方法^[27],并采用了NASA IFloodS期间的真实观测数据,通过比较,在轻度降雨区的性能优于CSU-HIDRO算法。

近年,国内提出了基于相态识别的S波段双偏振雷达最优化定量降水估测算法HCA-LIQ^[62],较Cifelli等^[57]所提出的CSU-ICE算法能更加精确的估计暴雨。2018年,杨章等^[63]基于优化算法HCA-LIQ对广州9次降雨评估,得到该算法低估了中小颗粒的沉淀,但过高估计了中等和大颗粒的沉淀,这导致对大雨的严重低估,需要研究极大雨来进一步验证改进算法。

粒子识别在人工降雨也有所运用,通过HCA来估计积层混合云中各粒子的含水量,根据其降水类型来对其增雨潜力进行分类,较早期基于数值模拟结果和经验值得出的结果更准确。对流区增雨潜力大于层云区,霰粒子附近的区域有较好的增雨能力^[64]。

3.3 降雪观测

雷达观测取决于沉淀颗粒的尺寸,形状和密度。这些物理性质的变化是雷达定量降雪估算的主要误差来源之一^[65-66]。传统的水汽分类算法主要用于暖季天气(主要是夏季)^[8-9],由于传统算法排除了低于融化水平的任何冰相沉淀类型,从而排除了诸如雨夹雪等降水类型,因此,对冰相降水的分类通常需要通过探测雷达亮带来准确估算融化层高度^[67-68]。

早期的识别算法使用融化层检测技术和外部温度信息来识别冬季水文气象类型^[69-71]。其中,Elmore等^[70]的算法无法对雨滴的再冻结进行识别,Schuur等^[71]使用的快速更新模型输出温度信息改善了雨滴再冻结的识别,然而,在该算法无法分辨低仰角的天气状况。2014年,Thompson等^[72]提出不依赖外界温度信息来识别粒子相态,他通过多个双偏振雷达提炼出适用于S、X、C波段的识别算法,基于Dolan等^[73]的算法进行改进,识别得到冬季风

暴中的5个微物理特征:树枝状晶体生长区、板状晶体生长区、雪花聚集、细粒融化层波动、融化层下降到垂直亮带。

由于冬季零度层亮带的识别较夏季困难,对降雪过程粒子识别较为复杂,需要对其天气特征进行连续分析,来得到相应的识别结果,HCA主导的分类算法依赖散射模拟,对于冰相水凝混合物分类来说,其结果是不确定的^[1,30]。国内缺乏冬季粒子识别研究个例,因此,有必要建立冰相粒子识别算法来进行降雪天气的分析。

4 水凝物相态识别的验证方式

4.1 飞机测量验证

飞机测量验证被作为验证水凝物相态分类最为直观准确的验证方式,目前主流的HCA均得到了验证^[7-8],Lim等^[8]用T-28飞机飞过风暴,对Liu等^[7]等应用于CSU-CHILL雷达数据的分类算法进行验证,Liu等^[7]的分类数据与飞机模型十分相似,特别是分类结果的霰/小冰雹区域与冰雹光谱仪的冰雹总数和冰雹平均直径很好地匹配。2012年,刘亚男等^[74]用机载粒子测量系统(PMS)对何宇翔等^[18]所提出的层状云相态识别进行验证,其分类结果与飞机实时观测结果相一致。2016年,Finlon等^[75]利用光学阵列探针(OAP)对冬季气旋进行微物理观测,并与X波段雷达数据观测结果对比。2018年,Maheskumar等^[76]对2009年印度度季风的降水增强实验(CAIPPEX)进行测量验证,使用了Cloud Droplet Probe(CDP)和Cloud Imaging Probe(CIP)仪器进行的云测量的数据进行分析,得出云滴的有效半径对云微物理参数的验证是有用的。

4.2 设置模拟天气场景验证

20世纪80年代,有学者利用数值模式对天气现象进行模拟观测^[77-78],早期的算法只能预测出一个时刻的水滴尺寸分布情况。2005年,Milbrandt等^[79-80]提出了新的方法能够运用于3D大气模型中,并在SVM算法的验证过程中得以运用^[28]。郭凤霞等^[11]基于数值模式^[81]模拟验证雷暴云粒子的识别结果。模拟天气观测在天气研究与预测(WRF)中运用广泛,但在水凝物的识别验证中应用较少,有必要用最新天气模拟系统对粒子相态识别结果进行验证。

4.3 与地面观测对比验证

飞机穿云验证粒子相态其结果虽然准确,但其

成本较高,模拟天气场景与真实天气状况可能不相符而导致结果有误差,地面观测结果分析为验证水凝物的分类的主要手段。如:冰雹检测报告与风暴的匹配,能够得到验证^[20,42,44]。目前对水凝物相态进行详细观测的仪器有:二维视频光谱仪(2-DVD)和多角度雪花相机(MASC),这两种仪器均通过地面观测数据来鉴别相态识别分类结果的准确度。

二维视频光谱仪(2-DVD)可定量研究降雪状况与分类群集之间的关系,并把晶体(CR)、聚集体(AG)和冰晶颗粒(RI)分类的准确度做评估,特别是对冰粒子进行综合验证,得到粒子识别的性能^[1,30,82-83]。Grazioli等^[82]利用2-DVD对SVM算法进行评估验证,Besic等^[1]在Grazioli等^[82]的基础上使用2-D视频测量数据集分析了半监督方法的性能,并用雨量计观测降雨状况,对降雨的分类做比较。Lee等^[83]观测到4种不同的雪花类型(树枝状、板状、针状和霰状),得到速度-直径(V-D)关系。

多角度雪花相机(MASC)是自由落体水凝物成像仪器,用于捕捉水凝物的高分辨率照片,可以得出下降速度、水凝胶尺寸、形状、方向和纵横比的统计数据^[84]。Garrett等^[85]通过MASC观测得出,霰粒片比聚集体或更轻微的颗粒更紧凑并且下降得更快。Christophe等^[86]提出基于图像的固体水凝物分类方法,可以验证数据评估的鲁棒性,Besic等^[33]用该方法进行数据分类的评估。

5 结 语

尽管研究粒子相态的算法已近发展成熟,但仍存在一定局限性:①对处理水凝物分类的不连续性还没有得到很好的改善,水凝物的分类还较为独立。由于水凝物本身不具有分类的属性,因此,可以开发一种新的方法来反映水凝物本身的物理特性;②部分自适应算法使时间复杂化,如Besic等^[1]所提出的自适应算法;③目前水凝物相态的连续演变特征在天气分析中的应用较少;④国内的算法局限于个例研究,缺乏极端天气数据的统计研究。

针对以上问题,水凝物相态识别分类在以下3个方面有待研究。①算法研究领域:目前粒子的聚类分析已有一定的天气预测可视化价值,但还需研究其算法的鲁棒性信息以及时间依赖的数据,目前其他聚类算法(如层次聚类)在别的领域已有应用,因此,进一步研究聚类参数还有扩展性^[36];②气象探测领域:提高对双偏振雷达分辨率,如定量矫正

衰减误差和系统偏差^[87],以证明数据质量和精度准确性,增加相态识别的准确度^[88];③气象学领域:有必要通过各个时间段粒子相态的特征,对天气的连续演变过程进行机理分析,进一步验证模式结果的正确性从而改善模式的预报准确率。

对于降水粒子识别的验证方式而言,目前水凝物分布特性的验证方式有局限性,尤其是验证垂直分布特性,仅有飞机观测验证较准确,但其验证成本太高,应当建立一套准确的分类标准来作为分类效果的评价。

参考文献(References):

- [1] Besic N, Grazioli J, Gabella M, *et al.* Hydrometeor Classification through Statistical Clustering of Polarimetric Radar Measurements: a Semi-supervised Approach[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9 (9): 4425-4445. doi: 10.5194/amt-9-4425-2016.
- [2] Cui Jing, Zhou Xiaoshan, Yan Qi, *et al.* Impact of Different Microphysical Processes of WRF Model on Precipitation Phase Forecasting in Northeast China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014(5): 1-6. [崔锦, 周晓珊, 阎琦, 等. WRF模式不同微物理过程对东北降水相态预报的影响[J]. *气象与环境学报*, 2014(5): 1-6.]
- [3] Zhang Lina, Zhang Chaolin, Wang Bizheng, *et al.* Evolution Characteristics of Atmospheric Visibility in the Beijing Expressway and the Corresponding Physical Analysis[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2008, 32 (6): 1229-1240. [张利娜, 张朝林, 王必正, 等. 北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析[J]. *大气科学*, 2008, 32 (6): 1229-1240.]
- [4] Zhou Liming, Niu Shengjie, Wang Jun. Case Analysis on Microphysical Characteristics of Stratiform Cloud Under Synoptic Systems[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, 40 (3): 327-335. [周黎明, 牛生杰, 王俊. 不同天气系统层状云微物理特征个例分析[J]. *气象*, 2014, 40 (3): 327-335.]
- [5] Zeng Mingjian, Wang Guichen, Wu Haiying, *et al.* Study of The Forecasting Method for The Classified Severe Convection Weather based on A Meso-scale Numerical Model[J]. *Acta Meteorologica*, 2015, 73 (5): 868-882. [曾明剑, 王桂臣, 吴海英, 等. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究[J]. *气象学报*, 2015, 73 (5): 868-882.]
- [6] Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, *et al.* Studies on Microphysical Processes in Hail Cloud[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26 (3): 421-432. [洪延超, 肖辉, 李宏宇, *et al.* 冰雹云中微物理过程研究[J]. *大气科学*, 2002, 26 (3): 421-432.]
- [7] Liu H, Chandrasekar V. Classification of Hydrometeors based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-fuzzy Systems, and In-situ Verification[J].

- Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17 (2):140-164.
- [8] Lim S, Chandrasekar V, Bringi V N. Hydrometeor Classification System Using Dual-polarization Radar Measurements: Model Improvements and In-situ Verification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43 (4):792-801.
- [9] Park H S, Ryzhkov A V, Zrni D S, *et al.* The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS [J]. Weather and Forecasting, 2009, 24 (3): 730-748. doi: 10.1175/2008WAF2222.205.1.
- [10] Cao Junwu, Liu Liping, Ge Runsheng. A Study of Fuzzy Logic Method in Classification of Hydrometeors based on Polarimetric Radar Measurement [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(5): 827-836. [曹俊武, 刘黎平, 葛润生. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究 [J]. 大气科学, 2005, 29(5): 827-836.]
- [11] Guo Fengxia, Ma Xueqian, Wang Tao, *et al.* An Approach to The Hydrometeors Classification For Thunderclouds based on The X-band Dual-polarization Doppler Weather Radar. [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1231-1244. [郭凤霞, 马学谦, 王涛, 等. 基于X波段双线偏振天气雷达的雷暴云粒子识别 [J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1231-1244.]
- [12] Aydin K, Seliga T A, Balaji V. Remote Sensing of Hail with a Dual Linear Polarization Radar [J]. Climate Applied Meteorological, 1986, 25(11):1475 - 1484.
- [13] Zadeh L A. Fuzzy algorithms [J]. Information and Control, doi: 10.1016/S0019-9958(68) 90211-8, 1968, 12:94-102.
- [14] Straka J M, Zrnic D S, Ryzhkov A V. Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations [J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(8):1341-1372.
- [15] Vivekanandan J, Zrnic D S, Ellis S M, *et al.* Cloud Microphysics Retrieval Using S-band Dual-polarization Radar Measurements [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3):381-388.
- [16] Zrnic D S, Ryzhkov A, Straka J, *et al.* Testing a Procedure for Automatic Classification of Hydrometeor Types [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(6): 892-913.
- [17] Peng Liang, Chen Hongbin, 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3mm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.]
- [18] Schuur T, Ryzhkov A, Heinselman P, *et al.* Observations and Classification of Echoes with the Polarimetric WSR-88D Radar [R]. Report of the National Severe Storms Laboratory, Norman, OK, 2003, 73069:46.
- [19] He Yuxiang, Xiao Hui, Lü Daren. Analysis of Hydrometeor Distribution Characteristics in Stratiform Clouds Using Polarization Radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(1):23-34. [何宇翔, 肖辉, 吕达仁. 利用极化雷达分析层状云中水凝物粒子性状分布 [J]. 大气科学, 2010, 34(1):23-34.]
- [20] 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.
- [21] Mahale V N, Zhang G, Xue M. Fuzzy Logic Classification of S-band Polarimetric Radar Echoes to Identify Three-body Scattering and Improve Data Quality [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(8): 2017-2033. doi: 10.1175/JAMC-D-13-0358.1
- [22] Baldini L, Gorgucci E, Chandrasekar V, *et al.* Implementations of CSU Hydrometeor Classification Scheme for C-band Polarimetric Radars [C]//Preprints, 32nd Conf. on Radar Meteorology, Albuquerque, NM, Amer. Meteor. Soc., P11R. 2005, 4.]
- [23] Marzano F S, Scaranari D, Vulpiani G. Supervised Fuzzy-Logic Classification of Hydrometeors Using C-Band Weather Radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11):3784-3799.
- [24] Gourley J J, Tabary P, Parent du Chatelet J. A Fuzzy Logic Algorithm for The Separation of Precipitating from Nonprecipitating Echoes Using Polarimetric Radar Observations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007, 24 (8): 1439-1451.
- [25] Li Hai, Shao Haizhou, Zhang Tao, *et al.* A Fuzzy Neural Network Method based on T-S Model In Identification of Hydrometeors [J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(6): 607-616. [李海, 邵海洲, 章涛, 等. 基于T-S模型的FNN降水粒子相态识别方法 [J]. 雷达科学与技术, 2017, 15(6): 607-616. doi:10.3969/ji.ssn.1672-2337.2017.06.006.]
- [26] Li Hai, Ren Jiawei, Shang Jinlei. Hydrometeor Classification Method in Dual-polarization Weather Radar based on Fuzzy Neural Network-fuzzy C-means [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(4): 809-815. [李海, 任嘉伟, 尚金雷. 一种基于模糊神经网络-模糊C均值聚类的双偏振气象雷达降水粒子分类方法 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 809-815.]
- [27] Wang H, Ran Y, Deng Y, *et al.* Study on Deep-learning-based Identification of Hydrometeors Observed by Dual Polarization Doppler Weather Radars [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017, 2017(1): 173. doi:10.1186/s13638-017-0965-5.
- [28] Bechini R, Chandrasekar V. A Semisupervised Robust Hydrometeor Classification Method for Dual-polarization Radar Applications [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(1):22-47. doi:10.1175/JTECH-D-14-00097.1.
- [29] Roberto N, Baldini L, Adirosi E, *et al.* A Support Vector

- Machine Hydrometeor Classification Algorithm for Dual-polarization Radar [J]. *Atmosphere*, 2017, 8 (8) : 134. doi: 10.3390/atmos8080134.
- [30] Camps-Valls G. Support Vector Machines in Remote Sensing: the Tricks of the Trade [C]//Image and Signal Processing for Remote Sensing XVII. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8180: 81800B.
- [31] Grazioli J, Tuia D, Berne A. Hydrometeor Classification From Polarimetric Radar Measurements: A Clustering Approach [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8 (1): 149. doi: 10.5194/amt-8-149-2015
- [32] Wen G, Protat A, May P T, *et al.* A Cluster-based Method for Hydrometeor Classification Using Polarimetric Variables. Part I: Interpretation And Analysis [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32 (7): 1320-1340.
- [33] Wen G, Protat A, May P T, *et al.* A Cluster-based Method for Hydrometeor Classification Using Polarimetric Variables. Part II: Classification [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33 (1): 45-60. doi: 10.1175/JTECH-D-14-00084.1
- [34] Besic N, Gehring J, Praz C, *et al.* Unraveling Hydrometeor Mixtures in Polarimetric Radar Measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11 (8): 4847-4866. doi: 10.5194/amt-2018-58.
- [35] Bioucas-Dias J M, Plaza A, Camps-Valls G, *et al.* Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1 (2): 6-36.
- [36] Kumpf A, Tost B, Baumgart M, *et al.* Visualizing Confidence in Cluster-based Ensemble Weather Forecast Analyses [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24 (1): 109-119.
- [37] Atlas D, Ludlam F H. Multi-wavelength Radar Reflectivity of Hailstorms [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1961, 87 (374): 523-534.
- [38] Bringi V N, Vivekanandan J, Tuttle J D. Multiparameter Radar Measurements in Colorado Convective Storms. Part II: Hail Detection Studies [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43 (22): 2564-2577.
- [39] Liu Liping, Xu Baoxiang, Wang Zhijun. Study of Hail with C-B and Dual Linear Polarization Radar [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16 (3): 370-376. [刘黎平, 徐宝祥, 王致君. 用C波段双线偏振雷达研究冰雹云 [J]. *大气科学*, 1992, 16 (3): 370-376.]
- [40] Yu Qing, Wang Yuzeng. Synthetic Identification of Hail Clouds [J]. *Meteorological Monthly*, 1995, 21 (7): 26-28. [郁青, 王雨曾. 综合识别冰雹云 [J]. *气象*, 1995, 21 (7): 26-28.]
- [41] Qi Liangbo, Xiao Hui, Huang Meiyuan, *et al.* A Numeric Study of Hail Identification Using Dual-polarization Radar [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 2002, 26 (2): 230-240. [漆梁波, 肖辉, 黄美元, *et al.* 双线偏振雷达识别冰雹的数值研究 [J]. *大气科学*, 2002, 26 (2): 230-240.]
- [42] Heinselman P L, Ryzhkov A V. Validation of Polarimetric Hail Detection [J]. *Weather and Forecasting*, 2006, 21 (5): 839-850.
- [43] Mahale V N, Zhang G, Xue M. Characterization of the 14 June 2011 Norman, Oklahoma, Downburst Through Dual-polarization Radar Observations and Hydrometeor Classification [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2016, 55 (12): 2635-2655.
- [44] Capozzi V, Picciotti E, Mazzarella V, *et al.* Fuzzy-logic Detection and Probability of Hail Exploiting Short-range X-band Weather Radar [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 201: 17-33.
- [45] Schmidt M, Tromel S, Ryzhkov A V, *et al.* Severe Hail Detection: Hydrometeor Classification for Polarimetric C-band Radars Using Fuzzy-logic and T-matrix Scattering Simulations [C]//2018 19th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2018: 1-7.
- [46] Trefalt S, Martynov A, Hélène B, *et al.* A Severe Hail Storm in Complex Topography in Switzerland—observations and Processes [J]. *Atmospheric Research*, 2018: 76-94. doi: 10.1016/j.atmosres.2018.03.007.
- [47] Cao Junwu, Liu Liping. Hail Identification with Dual-Linear Polarimetric Radar Observations [J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32 (6): 13-19. [曹俊武, 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达识别冰雹区方法研究 [J]. *气象*, 2006, 32 (6): 13-19.]
- [48] Zhang Bingxiang, Li Guocui, Liu Liping, *et al.* Identification Method of Hail Weather based on Fuzzy-logical Principle [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25 (4): 415-426. [张秉祥, 李国翠, 刘黎平, *等*. 基于模糊逻辑的冰雹天气雷达识别算法 [J]. *应用气象学报*, 2014, 25 (4): 415-426.]
- [49] Wu C, Liu L, Liu X, *et al.* Advances in Chinese Dual-polarization and Phased-array Weather Radars: Observational Analysis of a Supercell in Southern China [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35 (9): 1785-1806. doi: 10.1175/JTECH-D-17-0078.1.
- [50] Chong W, Liu L, Wei M, *et al.* Statistics-based Optimization of the Polarimetric Radar Hydrometeor Classification Algorithm and Its Application for a Squall Line in South China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35 (3): 296-316. doi: org/10.1007/s00376-017-6241-0.
- [51] Wang Hong, Wu Naigeng, Wan Qilin, *et al.* Analysis of S-band Polarimetric Radar Observations of a Hail-producing Supercell [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76 (1): 92-103. [王洪, 吴乃庚, 万齐林, *等*. 一次华南超级单体风暴的S波段偏振雷达观测分析 [J]. *气象学报*, 2018, 76 (1): 92-103.]
- [52] Chen Yichen, Zhang Longbin, Jin Yongli, *et al.* A Case Study of Effectiveness of Artificial Hail Suppression based on Dual Polarization Radar Data [J]. *Meteorological Science And Technology*, 2016, 44 (3): 1671-6345. [陈羿辰, 张龙斌, 金永利, *等*. 利用双线偏振雷达分析人工防雹作业效果 [J]. *气象科技*, 2016, 44 (3): 1671-6345.]
- [53] Ryzhkov A V, Zrnicek D S. Comparison of Dual-polarization Radar Estimators of Rain [J]. *Journal of Atmospheric and Oce-*

- anic Technology, 1995, 12(2): 249-256.
- [54] Zrníc D S, Ryzhkov A. Advantages of Rain Measurements Using Specific Differential Phase [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1996, 13(2): 454-464.
- [55] Ryzhkov A, Zrníc D, Atlas D. Polarimetrically Tuned R (Z) Relations and Comparison of Radar Rainfall Methods [J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(4): 340-349.
- [56] Vivekanandan J, Yates D N, Brandes E A. The Influence of Terrain on Rainfall Estimates from Radar Reflectivity and Specific Propagation Phase Observations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(7): 837-845.
- [57] Cifelli R, Barjenbruch D, Brunkow D, *et al.* Evaluation of an Operational Polarimetric Rainfall Algorithm [C] // Preprints, 31 Conf. on Radar Meteorology, Seattle, Washington. 2003.
- [58] Cifelli R, Chandrasekar V, Lim S, *et al.* A New Dual-Polarization Radar Rainfall Algorithm: Application in Colorado Precipitation Events [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011, 28(3): 352-364.
- [59] Carr N, Kirstetter P E, Gourley J J, *et al.* Polarimetric Signatures of Midlatitude Warm-rain Precipitation Events [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56(3): 697-711.
- [60] Porcaccia L, Kirstetter P E, Gourley J J, *et al.* Toward a Polarimetric Radar Classification Scheme for Coalescence-Dominant Precipitation: Application to Complex Terrain [J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(12): 3199-3215.
- [61] Chen H, Chandrasekar V, Bechini R. An Improved Dual-polarization Radar Rainfall Algorithm (DROPS2.0): Application in NASA IFloodS Field Campaign [J]. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(4): 917-937.
- [62] Wang Duo, Liu Liping, Wu Cong. An Optimization Rainfall Algorithm of S-band Dual-polarization Radar based on Hydrometeor Identification [J]. Meteorological Monthly, 2017(9): 1040-1051. [汪舵, 刘黎平, 吴翀. 基于相态识别的S波段双极化雷达最优量化定量降水估测方法研究 [J]. 气象, 2017(9): 1040-1051.]
- [63] Zhang Y, Liu L, Wen H, *et al.* Evaluation of the Polarimetric-radar Quantitative Precipitation Estimates of an Extremely Heavy Rainfall Event and Nine Common Rainfall Events in Guangzhou [J]. Atmosphere, 2018, 9(9): 330. doi: 10.3390/atmos9090330.
- [64] Chen Yichen, He Hui. A Study to Determine Enhancement Potential for Convective - Stratiform Mixed Precipitation Based on Polarimetric Radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(3): 578 - 592. [陈羿辰, 何晖. 基于偏振雷达的积层混合云降水增雨潜力识别方法研究 [J]. 大气科学, 2017, 41(3): 161-175.]
- [65] Mitchell D L, Zhang R, Pitter R L. Mass-dimensional Relationships for Ice Particles and The Influence of Riming on Snowfall Rates [J]. Journal of Applied Meteorology, 1990, 29(2): 153-163.
- [66] Chandrasekar V, Keranen R, Lim S, *et al.* Recent Advances in Classification of Observations from Dual Polarization Weather Radars [J]. Atmospheric Research, 2013, 119: 97-111.
- [67] Giangrande S E, Krause J M, Ryzhkov A V. Automatic Designation of the Melting Layer with a Polarimetric Prototype of The WSR-88D Radar [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(5): 1354-1364.
- [68] Boodoo S, Hudak D, Donaldson N, *et al.* Application of Dual-polarization Radar Melting-layer Detection Algorithm [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(8): 1779-1793.
- [69] Kouketsu T, Uyeda H. Validation of Hydrometeor Classification Method for X-band Polarimetric Radar—Comparison with Ground Observation of Solid Hydrometeor [C] // Proc. Sixth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology. 2010.
- [70] Elmore K L. The NSSL Hydrometeor Classification Algorithm in Winter Surface Precipitation: Evaluation and Future Development [J]. Weather and Forecasting, 2011, 26(5): 756-765.
- [71] Schuur T J, Park H S, Ryzhkov A V, *et al.* Classification of Precipitation Types During Transitional Winter Weather Using the RUC Model and Polarimetric Radar Retrievals [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(4): 763-779.
- [72] Thompson E J, Rutledge S A, Dolan B, *et al.* A Dual-polarization Radar Hydrometeor Classification Algorithm for Winter Precipitation [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(7): 1457-1481.
- [73] Dolan B, Rutledge S A. A Theory-based Hydrometeor Identification Algorithm for X-band Polarimetric Radars [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(10): 2071-2088.
- [74] Liu Yanan, Xiao Hui, Yao Zhendong, *et al.* Analyses of Hydrometeor Identification based on X-band Polarimetric Radar [J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(6): 925 - 936. [刘亚男, 肖辉, 姚振东, 等. X波段双极化雷达对云中水凝物粒子的相态识别 [J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 925-936.]
- [75] Finlon J A, McFarquhar G M, Rauber R M, *et al.* A Comparison of X-band Polarization Parameters with in Situ Microphysical Measurements in the Comma Head of Two Winter Cyclones [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2016, 55(12): 2549-2574.
- [76] Maheskumar R S, Padmakumari B, Konwar M, *et al.* Characterization of Hydrometeors and Precipitation over The Indian Monsoon Region Using Aircraft Measurements [J]. Atmospheric Research, 2018, 205: 147-154. doi: 10.1016/j.atmosres.2018.02.012.
- [77] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk Parameterization of The Snow Field in A Cloud Model [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(6): 1065-1092.

- [78] Cotton W R, Tripoli G J, Rauber R M, *et al.* Numerical Simulation of The Effects of Varying Ice Crystal Nucleation Rates and Aggregation Processes on Orographic Snowfall[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1986, 25(11): 1658-1680.
- [79] Milbrandt J A, Yau M K. A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part I: Analysis of The Role of The Spectral Shape Parameter[J]. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 2005, 62(9): 3051-3064.
- [80] Milbrandt J A, Yau M K. A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization. Part II: A Proposed Three-moment Closure and Scheme Description[J]. *Journal of The Atmospheric Sciences*, 2005, 62(9): 3065-3081.
- [81] Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. Three-dimensional Numerical Simulation of Ice Phase Microphysics in Cumulus Clouds. Part II : Effects of Multiplication Processes[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1991, 15(6): 78-88.[孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值模拟 II. 繁生过程作用[J]. *大气科学*, 1991, 15(6): 78-88.]
- [82] Grazioli J, Tuia D, Monhart S, *et al.* Hydrometeor Classification from Two-dimensional Video Disdrometer Data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(9): 2869-2882.
- [83] Lee J E, Jung S H, Park H M, *et al.* Classification of Precipitation Types Using Fall Velocity-diameter Relationships from 2D-video Disdrometer Measurements[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(9): 1277-1290.
- [84] Garrett T J, Fallgatter C, Shkurko K, *et al.* Fall Speed Measurement and High-resolution Multi-angle Photography of Hydrometeors in Free Fall[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(11): 2625-2633.
- [85] Garrett T J, Yuter S E. Observed Influence of Riming, Temperature, and Turbulence on The Fallspeed of Solid Precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(18): 6515-6522.
- [86] Praz C, Roulet Y A, Berne A. Solid Hydrometeor Classification and Riming Degree Estimation from Pictures Collected with a Multi-angle Snowflake Camera[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(4): 1335-1357.
- [87] Shi Z, Chen H N, Chandrasekar V, *et al.* Deployment and Performance of an X-band Dual-polarization Radar during the Southern China Monsoon Rainfall Experiment [J]. *Atmosphere*, 2018, 9(1): 20. doi:10.3390/atmos901004.
- [88] Tang Shunxian, Lü Daren, He Jianxin, *et al.* Research of Weather Radar Technology and Application on Chinese Weather Observation[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 3(1): 1-13.[唐顺仙, 吕达人, 何建新, 等. 天气雷达技术研究进展及其在我国天气探测中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 3(1): 1-13.

The Review of Hydrometeor Phase Identification Technology based on Dual-polarization Weather Radar

Lin Qingyun, He Jianxin, Wang Hao, Shi Zhao, Chen Wanting

(Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The Hydrometeor Classification Algorithm(HCA) is one of the main vegetation research direction to analyze weather characteristics from microphysical perspective. The hydrometeor classification algorithm is of great significance for the observation of hail, rainfall and snowfall. This paper reviewed the advantages of the classical Fuzzy logic Hydrometeor Classification (FHC), including Neuro-Fuzzy Hydrometeor Classification (NF-HC), Support Vector Machine Hydrometeor Classification (SVM-HC) and deep learning methods. We also introduced the details of the application of hydrometeor classification in the hail, rainfall and snowfall and summarized the verification method, including aircraft measurement verification, numerical simulation verification, and ground observation comparison. In addition, the current problems of FHC are proposed, including the setting of membership function parameters and the hydrometeor phase identification of ice phase particles. The current research lacks an effective and convenient method for HCA, which limits the application of dual-polarization weather radar. Finally, directions for future research to HCA were forecasted.

Key words: Hydrometeor phase identification; Dual-polarization weather radar; Fuzzy logic