

文章编号: 2096-1618(2021)06-0655-11

基于双偏振雷达对一次多单体雹暴微物理特征的观测及数值模拟研究

周峰¹, 周筠珺^{1,2}, 邹书平³, 杨哲³, 曾勇³

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 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, 江苏 南京 210044; 3. 贵州省人工影响天气办公室, 贵州 贵阳 550081)

摘要:为了解多单体合并作用对雹胚及冰雹演变的微物理特征, 利用位于贵州威宁县雪山镇的 X 波段双偏振雷达, 在观测资料质量控制的基础上, 结合模糊逻辑粒子相态识别算法(HID)和 WRF 中尺度模式, 对 2018 年 6 月 28 日云南鲁甸县的一次多单体合并降雹天气过程进行分析。结果表明: 此次多单体合并过程, 观测识别与模式模拟结果整体一致, 经历 3 个主要阶段: 合并前阶段、合并中阶段(合并初期)、合并后阶段(合并后期)。合并前阶段: 低密度雹(LDG)由雪晶(AG)和冰晶(CR)作为共同低密度雹胚源进行淞附增长; 高密度雹(HDG)的两种源项分别为 LDG 粒子撞冻过冷云水和以 AG 为高密度雹胚的淞附增长。合并阶段: AG 主要由 CR 为晶核聚合而成, CR 的凝华增长参与较小; 雹粒子主要以 AG 为胚源, 形成于 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层, 为过冷云水与 AG 的混合相态区。合并后期: 合并作用促进了单体内 HDG 的碰并增长, 并最终 HDG 为雹胚源形成冰雹(RH), 在 RH 下落过程中继续撞冻过冷水保持增长并及地。合并作用使单体内部产生新的动力, 使处于衰减状态的单体出现新的发展趋势; 合并作用导致降雹过程产生, 且降雹过程出现在多单体合并的第三个阶段, 即合并后阶段(合并后期)。

关键词: 大气科学; 大气物理与大气环境; 多单体合并; 冰雹; 双偏振; 粒子识别; WRF 数值模拟

中图分类号: P426

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.06.012

0 引言

强风暴云、雹暴等极端天气的产生往往造成巨大的经济损失, 甚至对人民的生命财产安全产生严重威胁^[1-2]。而多单体合并则是强风暴云形成的重要方式之一, 合并过程本身会促进两个或多个单体的融合, 从而使新合并的单体具有更大尺度和强度, 产生更强的短时降水、冰雹、大风等极端天气^[3-5]。而从微物理机制层面对多单体雹云的合并进行研究, 将对合并所带来的危害做到提前预防。

近年来, 在对流云合并机制层面的探索, 国内外学者的相关研究主要集中在云内热动力、微物理机制和一些基于观测事实的统计性研究, 王昂生等^[6]在昔阳地区的一些观测研究中发现: 合并过程是雹云出现跃增的重要因素, 同时也为后续的降雹提供条件。黄美元^[7]认为对流云合并是两单体间气压梯度力和辐合抬升综合作用的结果。付丹红等^[8]得出在两单体靠近合并的过程中, 由下沉辐散出流形成的上升气流与

环境风场间的相互作用, 对合并本身有促进作用。李艳伟等^[9]认为在合并过程中环境风切变与云内上升气流的大小关系密切。候淑梅等^[10]对山东省的一次飏线内单体合并过程做分析, 发现弓型回波和单体之间的合并会造成独立的垂直环流, 同时在合并中水平风速和上升运动都有明显增强。

而在合并机制方面的研究中, 甄长忠^[11]对一次超级单体降雹过程进行追踪分析, 认为此超级单体是由多块小的单体进行合并后形成的。易笑园等^[12]对一次海风锋触发的多单体雹暴合并过程进行分析, 为独立型合并过程, 降雹一般发生在合并后。合并的内在本质是云内不同相态水成物粒子的相互作用。Carey 等^[13]对混合相态云团的合并进行划分, 认为 97% 的混合型冰团降水都产生于合并后对流系统。Lee 等^[14-15]在对一次龙卷合并过程的统计事实中得出结论, 龙卷出现合并后的 15 min 内, 单位体积内各类液相及冰相粒子均出现不同程度的增加。而黄勇等^[16]在对江淮地区夏季的 35 次暴雨和 43 次冰雹的合并机理进行统计分析, 得出结论暴雨的合并频次为 11.6 次, 较冰雹过程的合并频次高的多。

随着现代技术的发展, 如双偏振(双极化)雷达、卫星、微波辐射计等高时空分辨率现代观测手段相继

收稿日期: 2020-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41875169); 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1505702); 贵州省科技计划资助项目(黔科合支撑[2019]2387号); 四川省教育厅资助项目(16CZ0021)

使用,能够对合并过程云内粒子相态、转化机理进行研究。双偏振雷达能够发射并接收水平和垂直两种偏振波,较普通多普勒(单偏振)雷达可探测到更多的偏振参量,从而反演出水成物粒子的多种性质(形状、大小、相态、空间取向和降水类型等)。就目前而言,利用双偏振雷达资料对云内粒子进行识别的相关研究,在国内外已经有很多成功的先例^[17-19]。文中,特别考虑到雷达波在传播过程中的衰减作用,因此,对所用相关偏振资料进行质量控制,其中包括差分相移退折叠,滤波及对反射率(Z_H)和差分反射率(Z_{DR})的衰减订正,其中滤波方法采用赵川鸿等^[20]改进的综合小波去噪算法,滤波效果良好;衰减订正则采用目前较主流的自适应衰减订正方法(SCWC)。贵州威宁双偏振雷达探测半径为150 km,当目标物靠近探测远端,或超出探测有效范围时,探测精度及数据质量会逐渐降低。蔡森等^[21]利用FY-2C卫星资料分析了一次强降水过程的合并过程,得出在合并初期,云底的粒子半径较小,随着合并的深入,云内粒子半径逐渐增长,增长区域包括混合相态区和冻结区。黄勇等^[22]利用双偏振雷达资料对安徽寿阳县的两次多单体合并过程进行识别分析,得出在单体间在合并时的确存在大片雨区,同时在合并过程中的中下部出现了大量冰相粒子。

受观测水平的限制,完全依靠观测很难全面的分析对流云合并前后的全部过程。数值模式因其具有高时空分辨率和精度,能够对多单体合并前后的机理进行全面分析,弥补观测的不足。Pozo等^[23-24]利用ARPS模式对一次对流云合并过程进行模拟,认为对流云在合并过程中最显著的特征是云桥建立后新生云塔的出现。翟菁等^[25]利用MM5模式对一次强对流天气中的合并现象进行模拟,结果表明,两单体在合并下层的低压辐合区内有新的云水中心产生,同时伴随着冰相粒子及地面降水的产生。但是,以上针对观测和模拟机理的研究中,都只是针对合并过程中某一时段的分析,缺乏全阶段系统性的观测,特别是针对雹云合并过程中,微物理演变的特征缺乏系统完整的研究,而利用模式对合并本身微物理特征的分析,又缺乏观测结果佐证。同时,利用模式对合并过程中微物理机制的探索也缺乏系统性、连续性的研究。

基于上述问题,利用贵州威宁的双偏振雷达资料,通过模糊逻辑算法(HID)对一次雹云合并过程中,雹云单体合并前后的全阶段进行粒子识别,同时利用WRF中尺度数值模式对全过程成进行数值模拟,以佐证观测结果的准确性。

1 数据来源及方法介绍

所使用的资料有:雷达数据采用贵州省威宁县雪山镇(104.08 °E,27.05 °N)的X波段双偏振多普勒天气雷达(YLD1-D),雷达具体指标参数参照表1。WRF模式初始场和侧边界条件采用美国国家大气研究中心(NCAR)FNL(final operational global analysis)资料,时间分辨率为6 h,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,以及当地探空资料。

表1 YLD1-D型X波段双线偏振雷达主要参数

指标名称	主要参数值
波长/cm	3.2
库长/m	75
天线直径/m	2.4
天线增益/dB	44
波束宽度	0.97°
主要探测量	$Z_H, Z_{DR}, \varphi_{DP}, K_{DP}, \rho_{HV}, V, W$
探测范围/km	0 ~ 150
雷达波极化状态	水平、垂直
采样方式	PPI、RHI、VOL

研究方法包括基于模糊逻辑的粒子相态识别算法(HID),模糊逻辑法是由Zadeh^[26]在1968年提出,并由Vivekanandan^[27]和Straka et al^[28]引入到雷达气象领域,并首次应用于S波段双偏振雷达测试。Dolan等^[29]将基于T矩阵散射模式的模糊逻辑算法应用于X波段双偏振雷达,测试结果较理想。模糊逻辑方法主要涉及3个步骤,包括模糊化、集成聚合、退模糊,即利用隶属函数(本文采用不对称梯形函数)对雷达偏振参量($Z_H, Z_{DR}, K_{DP}, \rho_{HV}$)进行模糊化,做范围限定;得到每一个隶属函数值后按照权重进行累加聚合,得到观测量的贡献,并对应到输出分类;最后进行退模糊,即将得到的聚合值做比较,筛选出最大聚合值作为最终分类的输出结果。雷达所在位置(威宁雪山镇)与研究区域(鲁甸县域)相对位置如图1所示。

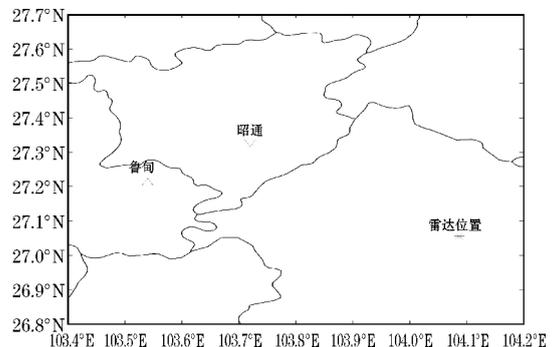


图1 雷达位置与研究区域相对位置

2 实况与模拟结果对比分析

本次降雹过程受亚洲东部西风槽和西南涡共同影响所致(图略),昭通市鲁甸地区处在西风槽后,由槽后引导的冷空气与西南涡带来的西南暖湿气流汇聚在云南东北侧上空,形成明显的切变线系统,低涡切变线是云贵高原夏季经常出现的一种降雹天气类型,即低压辐合线降雹。2018年6月28日13时20分,昭通市气象台发布强对流黄色预警,预警未来12 h市大部地区将出现强对流天气,局地可能伴有强降水、冰雹。鲁甸县气象台于14时15分发布雷电黄色预警,预计未来6 h县区将出现雷电活动,并伴有强降水、大风、冰雹。

此次多单体合并过程共分为合并前、合并中(合并初期)、合并后(合并后期)3个阶段,在合并过程中,两单体强中心红色部分($Z_H \geq 45$ dBZ)并未产生融合,但黄色部分($Z_H \geq 30$ dBZ)产生合并。通过模式组合

反射率与观测组合反射率结果对比,可以看到,模拟结果成功的再现了本次多单体合并过程,其中观测结果的13:05(图2a)、13:19(图2c)、13:32(图2e)与模式结果的13:10(图2b)(北京时,下同)、13:30(图2d)、13:40(图2f)相对应,且分别对应合并前阶段、合并中阶段、合并后阶段,模式结果对各单体的在不同阶段的发展趋势,强度及空间位置都模拟较好,只是在合并后阶段,对单体2大于45 dBZ强中心的模拟存在偏差。

如图2所示,合并前13:05,单体1位于水磨镇与龙树镇交界上空,处于发展阶段,单体2位于苏甲乡上空,处于衰减阶段。在13:19单体1与单体2进入合初期,单体2强中心移入南街乡上空,单体1进入成熟阶段。随着合并过程的深入,合并作用对两单体发展逐渐产生影响,进入合并后期13:32时刻,处于衰减阶段的单体2重新有了新的发展趋势,强中心向西南方向的水磨镇移动,反射率强度达50 dBZ,单体1的发展逐渐成东北西南向带状分布。

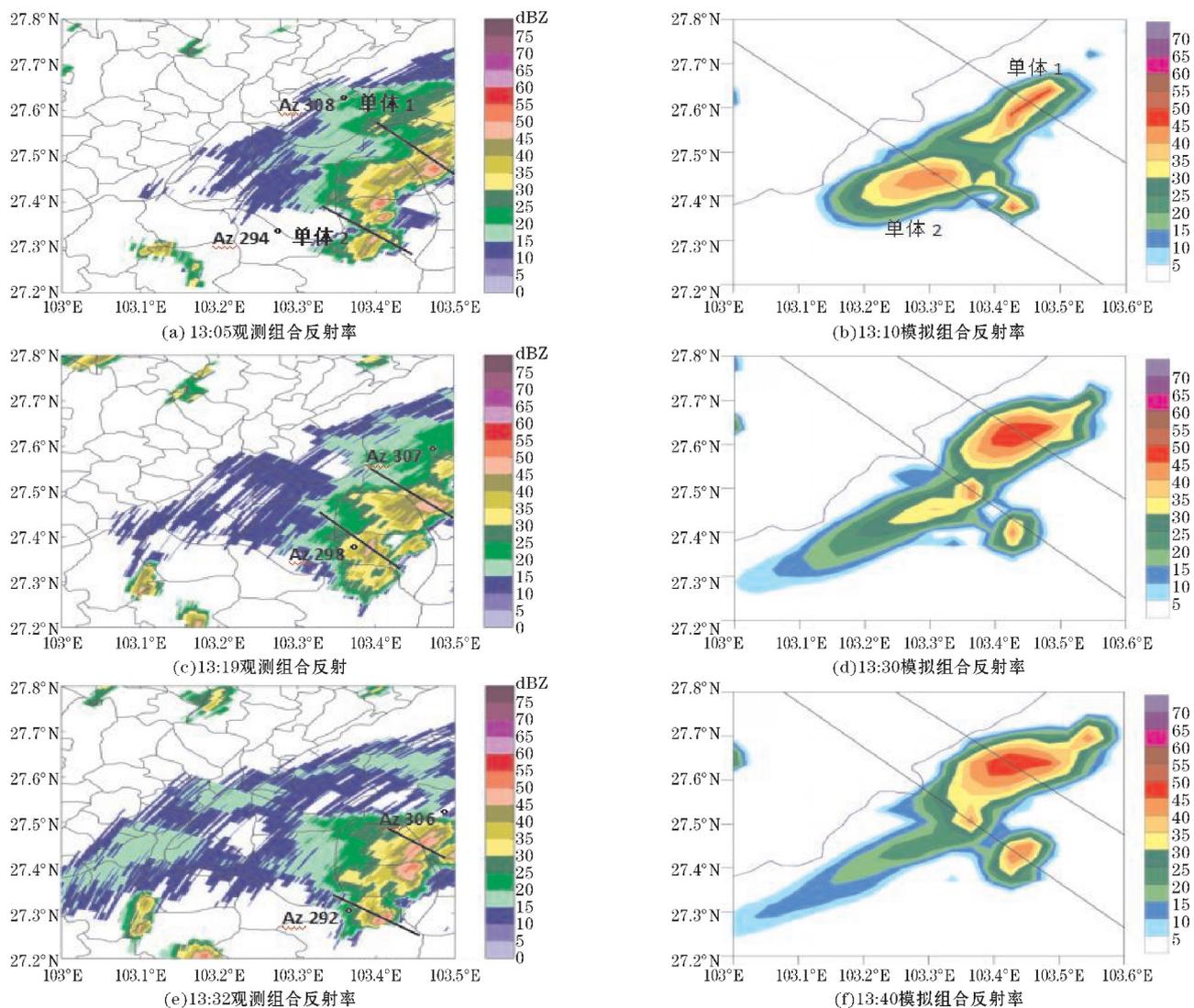


图2 2018年6月28日威宁雷达组合反射率因子

3 HID 反演微物理场分析

在对粒子相态反演识别的研究中, 现已知的相关算法共有 5 种, 包括决策树法、基于统计理论的统计决策模型算法、较新的聚类分析法、人工神经网络算法及目前使用较成熟的模糊逻辑识别算法。由于模糊逻辑算法是利用隶属函数对参数阈值范围限定的一种方法, 不完全参考具体的参数量值, 某个参数设置的不精确, 不会对最终识别结果产生特别大的影响。这就优于决策树算法。而相对于统计决策树法, 模糊逻辑方法不易受测量误差和统计误差的影响, 利用隶属函数建立的数学模型则更简便, 对粒子相态的识别更有效。而人工神经网络算法和聚类分析法都需要大量的观测资料进行训练和学习^[30]。因此, 可以说, 模糊逻辑算法是当前使用最优的一种识别方法。

3.1 合并前阶段

如图 3(a) 所示, 合并前, 处于发展阶段的单体 1

回波顶高度上升至 13 km 以上, 强回波柱接近 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层。对比图 3(b), 单体 2 处于衰减阶段, 在形态上已有塌陷趋势, 回波整体范围较窄, 回波顶高度处在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层(9.3 km)下方, 强中心高度($Z_{\text{H}} \geq 45\text{ dBZ}$)位于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层附近(3.4 km)处; 在 HID 识别结果中: 如图 3(c), 处于发展阶段的单体 1, 在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层上方识别出大量 CR 粒子, LDG 粒子分布范围较单体 2 更广, 在 5~8 km; 部分 LDG 粒子是由包裹在外围的 AG 粒子和 CR 粒子为霰胚源凝附过冷水形成。在识别结果中可以看到, 位于 1.1~2.3 km 已经识别出零星 RH 粒子, 这是由 HDG 为霰胚源在重力沉降过程中凝附过冷水所致; 如图 3(d), 在 6~7.5 km 存在由 CR 粒子为霰胚源形成的少量 LDG 粒子。处于衰减阶段的单体 2 内以下沉气流为主, 位于 2~4.6 km 的少量 HDG 由两种源项, 一部分是由下沉中的 LDG 粒子撞冻过冷水增长形成, 另一部分是由 3.4~5 km 的 AG 作为霰胚源凝附周围过冷水形成。在合并前处于衰减阶段的单体 2 内部动力作用较弱, 无法通过碰并作用形成 RH 粒子。

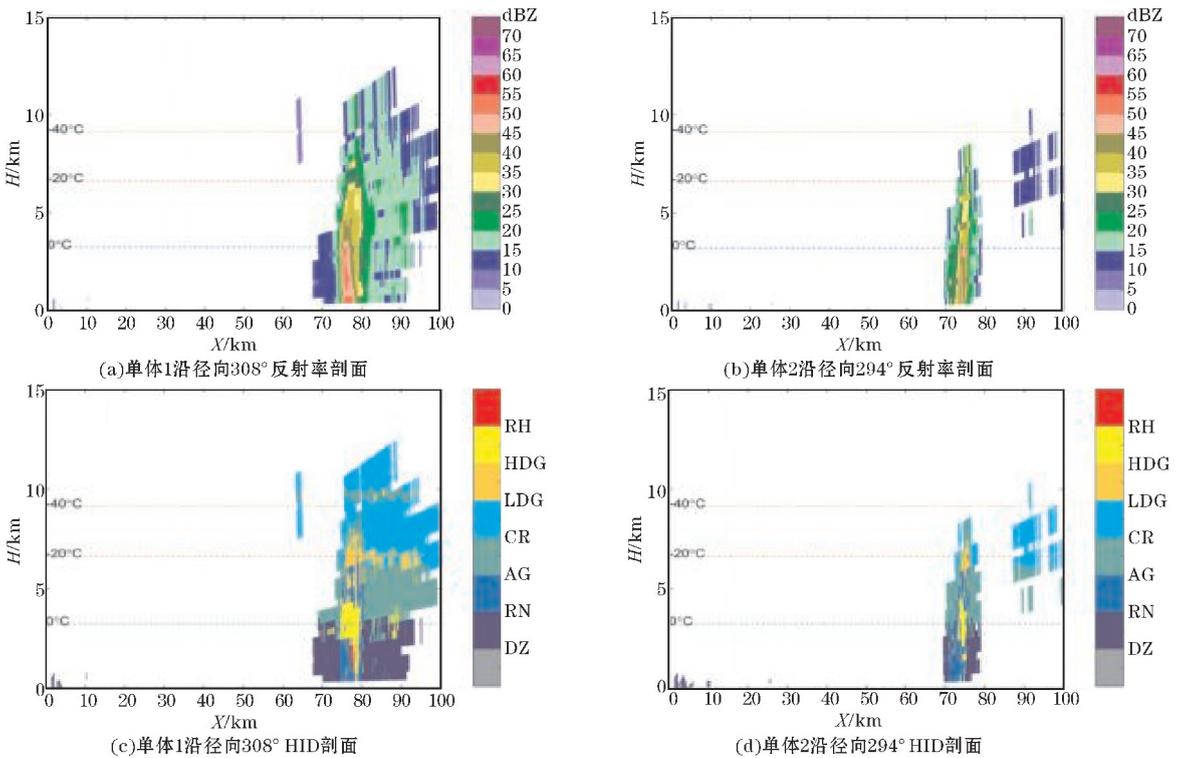


图 3 合并前阶段雷达反射率与粒子识别径向剖面图

3.2 合并阶段

如图 4(a) 所示, 在合并初期, 受合并作用影响, 单体 1 进入成熟阶段, 回波范围较合并前没有明显变化, 但强回波中心上升到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层(9.3 km)附近。处于衰减阶段的单体 2 (图 4b) 受合并产生的动力影响, 回波范围扩展到距雷达站 85 km 处, 回波顶高度上升到 10 km 以上, 但较强回波中心 ($Z_{\text{H}} \geq 30\text{ dBZ}$) 下降至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以下, 单体内部基本不存在 $Z_{\text{H}} \geq 45\text{ dBZ}$ 的强

中心。对应粒子识别结果: 如图 4(c), 在单体 1 中 6.8~9.3 km LDG 粒子较合并前阶段明显增多, 由合并过程导致 LDG 粒子自身的碰并增长作用, 在其内部识别出少量 HDG。在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层附近 HDG 粒子数量较合并前增加明显; 在合并初期, 位于 4.2~6.8 km 已经识别出少量 RH 粒子, 并有零星 RH 粒子及地。在单体 2 内部 (图 4d) 各冰相粒子基本消失, 但在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层上方生成了大量 CR 粒子, 考虑为由合并作用使得 CR 粒子间繁生作用增强, 导致大量 CR 产生。

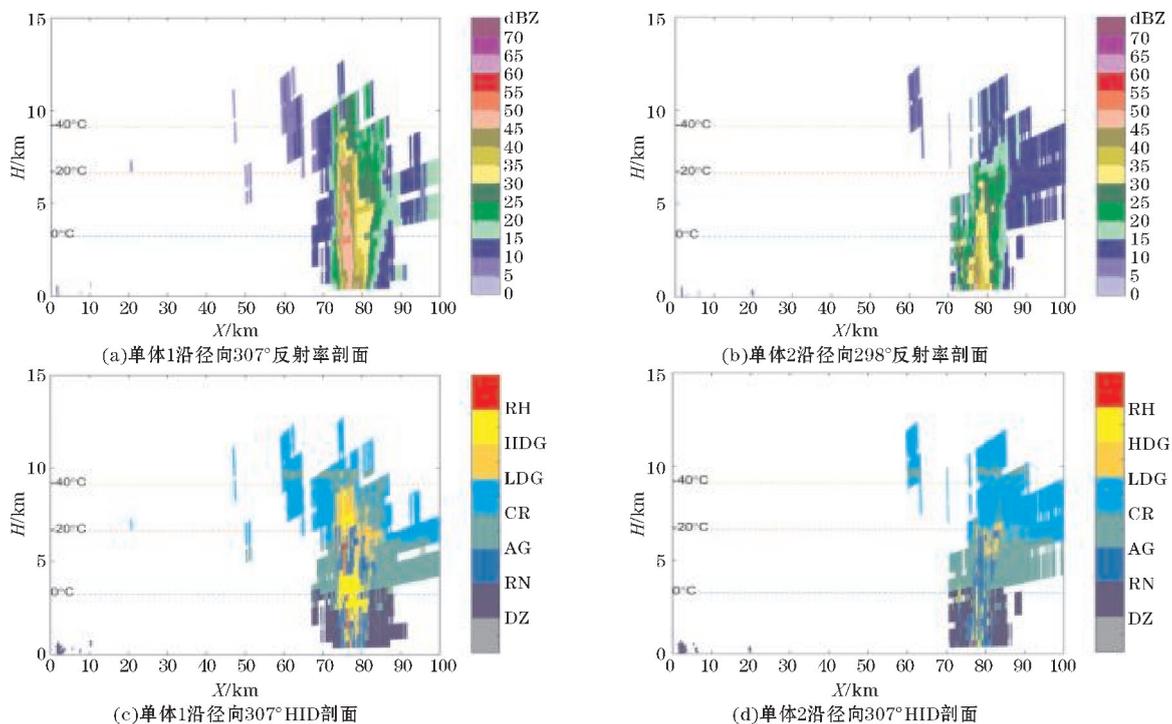


图 4 合并阶段雷达反射率与粒子识别径向剖面图

3.3 合并后阶段

合并后阶段:如图 5 (a) 所示,在合并后期单体 1 进入成熟降雹阶段,内部以下沉气流为主,回波顶及强回波中心均明显下降;在合并后期,原本处于衰减阶段的单体 2 (图 5b) 内部有了明显的动力抬升作用,使得单体 2 有了新的发展趋势,在近地层到 0 °C 层下方 2 km 的范围内重新出现了强回波核。HID 粒子识别结果:如图 5 (c) 所示,LDG 及 HDG 较上一阶段大量减

少,而在距雷达站径向距离 76 ~ 78 km 处识别出较多 RH 粒子并已及地,说明在合并后期,合并作用促使单体 1 内部 HDG 的大量碰并增长,并最终达到冰雹粒子的量级;同时,以下沉气流为主的单体 1 内部。在对单体 2 的识别结果中,如图 5 (d) 所示,可以看到在距雷达 70 ~ 72 km 处近地层上方也识别出部分 RH 粒子但未及地。即受合并影响,在两单体合并后期,处于衰减阶段的单体会产生新的发展趋势,同时,由合并作用产生了降雹。

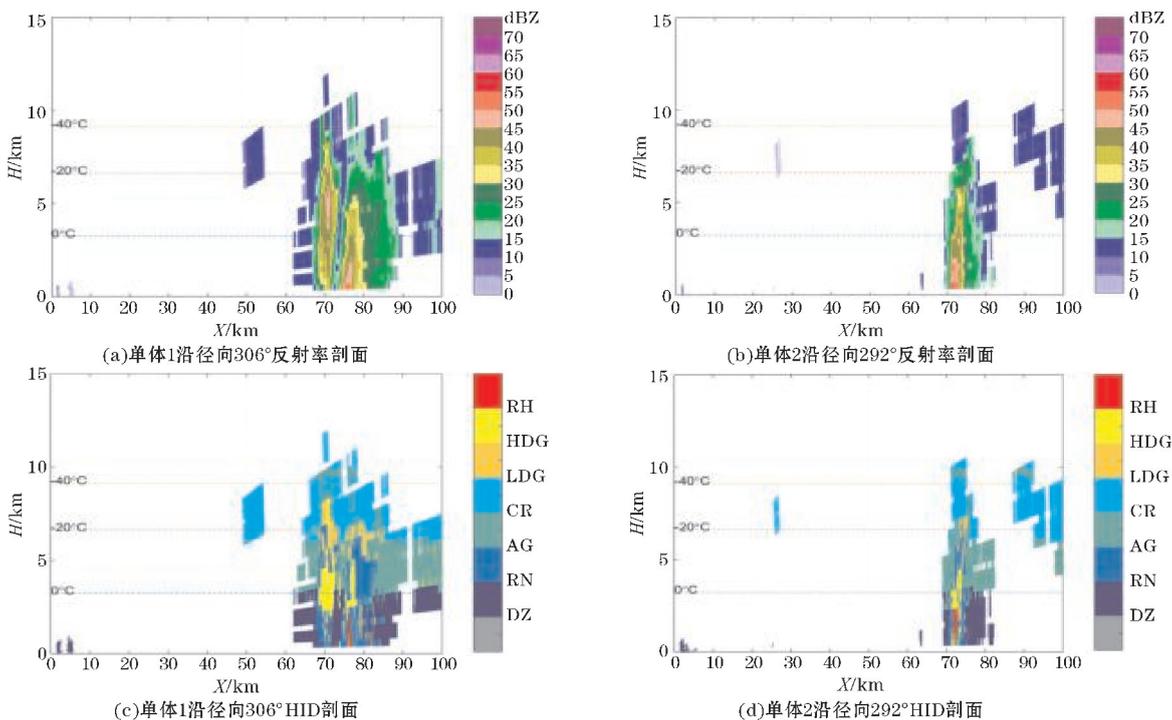


图 5 合并后阶段雷达反射率与粒子识别径向剖面图

4 模式结果分析

4.1 模式参数设置

采用中尺度数值模式 WRF3.4.1, 分辨率 1 ~

10 km, 三层双向嵌套, 具体设计方案如表 2 所示。模拟时段为 2018 年 6 月 27 日 20 时-6 月 29 日 08 时 (BJT), 共 36 h, 由于模式本身存在初始磨合期, spin-up 时间设置为 12 h, 初始背景场采用 FNL 资料 ($1^\circ \times 1^\circ$), 积云对流参数化方案只在最外层和第二层开启, 第二层嵌套区域为研究区域。

表 2 三层嵌套模拟方案设计

参数化方案	第一层嵌套	第二层嵌套	第三层嵌套
网格距/km	9	3	1
格点数	160×160	154×154	79×79
垂直层数	50	50	50
积云对流参数化方案	KFeta	KFeta	
长波辐射方案	rrtm	rrtm	rrtm
短波辐射方案	Dudhia	Dudhia	Dudhia
边界层参数化方案	YSU	YSU	YSU
云微物理参数化方案	Morrison-two-mom	Morrison-two-mom	Morrison-two-mom
陆面过程方案	Noah	Noah	Noah
近地面层方案	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov

4.2 模式动力场分析

如图 6(a) 所示, 在合并前阶段, 单体 1 内部主上升气流达到 5 m/s, 周围为 -1 m/s 的弱下沉气流; 随着单体 1 进入合并阶段, 在合并初期单体内部上升气流明显增强, 向上伸展到 13 km, 上升气流极大值达到 8 m/s (图 6b); 进入合并后阶段, 此阶段单体 1 内部已经存在部分较大的霰/雹粒子, 在下沉拖曳作用下, 整

体以下沉气流为主, 只有在 $-10^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ 层存在 2 m/s 的弱上升气流 (图 6c)。在合并前阶段, 单体 2 已处于衰减期, 内部以 -2 m/s 的下沉气流为主 (图 6d、e); 进入合并后阶段, 由于合并带来的较强劲上升动力, 可以明显看到在单体 2 内部 $-5^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ 层出现 5 m/s 的较强上升气流 (图 6f), 这有利于将更多的过冷云水送入高层, 参与霰/雹粒子的形成和增长。

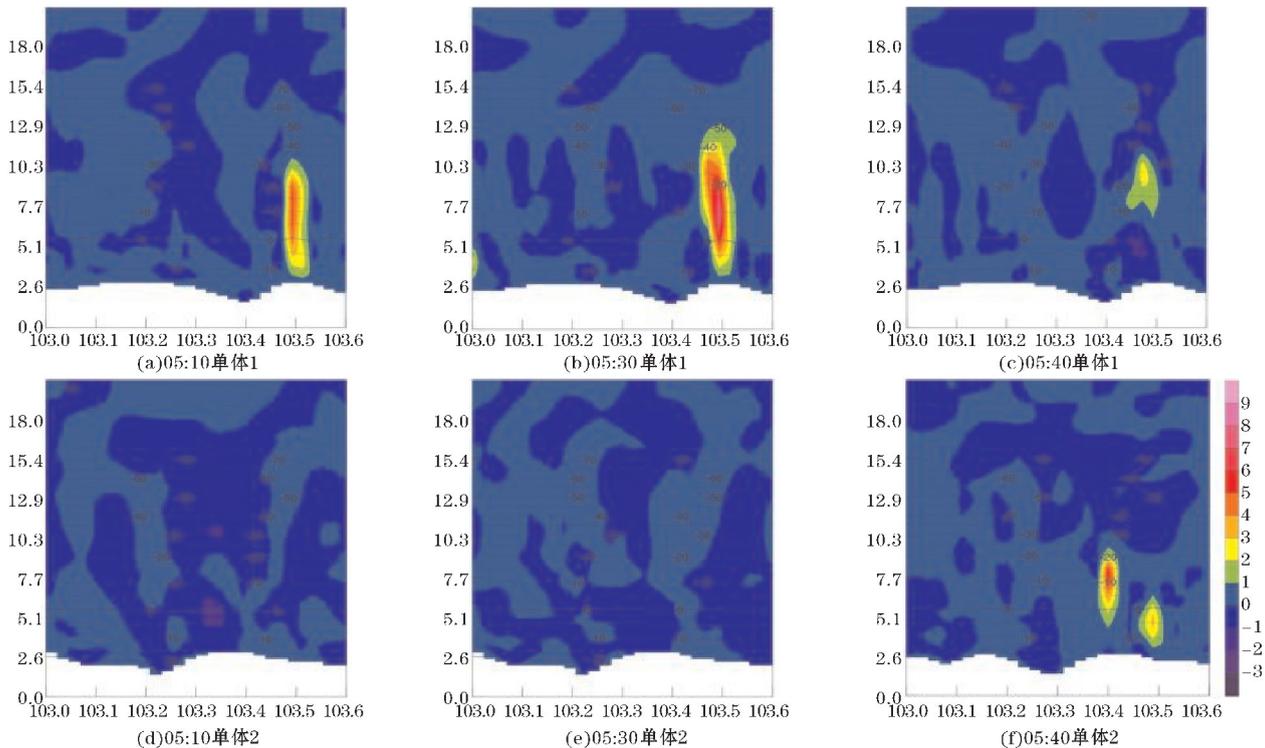


图 6 合并各阶段沿图 2 模拟黑线所作垂直速度剖面图

4.3 高原地形强迫作用分析

在降雹前,由于云南东北部整体处在东亚西风槽后的偏西北气流中,受云贵高原大地形阻挡,气流强迫抬升。在13:19,通过组合反射率确定单体演变趋势,如图2(c)中所示,单体1与单体2开始进入合并阶段,并持续到13:32合并完成(图2e)。对比模式模拟结果可知,沿单体强反射率中心做速度垂直剖面(图2

模拟黑线)。在合并初期,受地形抬升作用,如图7(a)所示。单体1内部上升气流明显,进入合并后期,通过分析HID粒子识别结果(图5c),可以看到降雹已及地;受降雹拖曳作用,单体内部出现上升与下沉气流对峙的状态(图7b)。由于在合并初期,单体2仍处于衰减阶段(图7c),受地形影响并不明显;但进入合并后期,受合并影响,单体2回波顶高度明显上升,单体内部出现较强上升气流(图7d)。

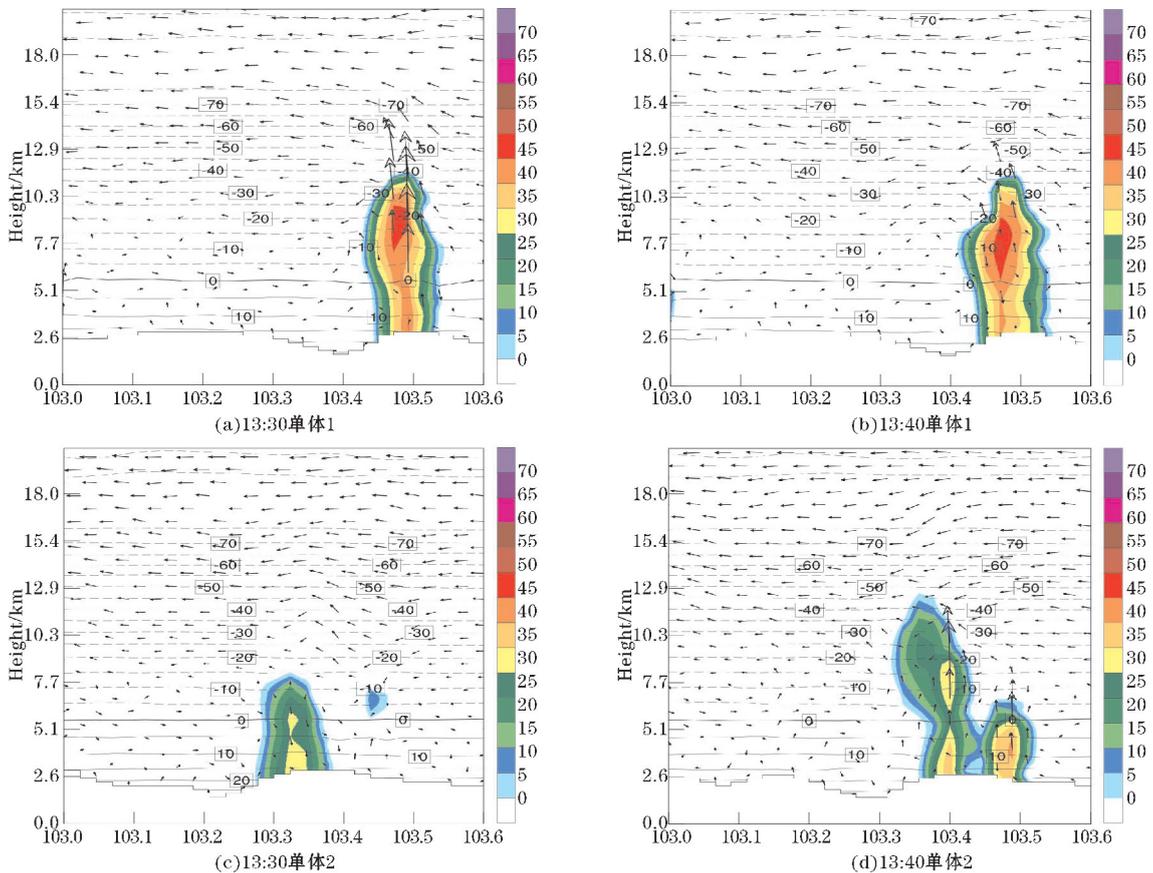


图7 合并单体反射率空间分布剖面图

4.4 模式微物理场分析

4.4.1 合并前阶段

合并前阶段,在合并前,处于发展阶段的单体1内部云水(图8a)分布较广,以 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层为界有两个大值中心, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层上方大值中心分布在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层,混合比极大值 1.3 g/kg ;霰粒子(图8b)大值中心分布较高在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层,霰粒子量值较小,极值为 2.2 g/kg ;雪晶(图8c)大值区分布较低,位于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以下;冰晶除了分布在 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层上方的冰晶带之外,在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层存在一个小值区,为 0.02 g/kg 。可以看到,霰粒子大值中心是在冰晶、雪晶、过冷云滴三者共存的位置,说明在合并前,处于发展阶段的单体1内部,霰粒子是以冰晶、雪晶共同作为霰胚源凝附过

冷云水产生增长。在合并前,由于单体2已经处于衰减期,单体内部以下沉气流为主,因此各冰液相粒子整体分布位置均较低,云滴(图8e)与霰粒子(图8f)的分布位置基本一致,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下都有分布,即单体内部在衰减期是一种混合相态的云体,融化作用明显。处于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层的雪晶(图8g)由冰晶的聚并作用形成。

4.4.2 合并阶段

在合并阶段,处于成熟阶段的单体1中,云水(图9a)以 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层为界分为两个大值中心在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层上方的过冷云水大值区主要分布在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层,混合比极大值达 1.8 g/kg ;霰粒子(图9b)主要分布在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层,在合并初期的极大值达到 7.5 g/kg ;雪晶粒子(图9c)在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层上方与云滴一致,也出现两个

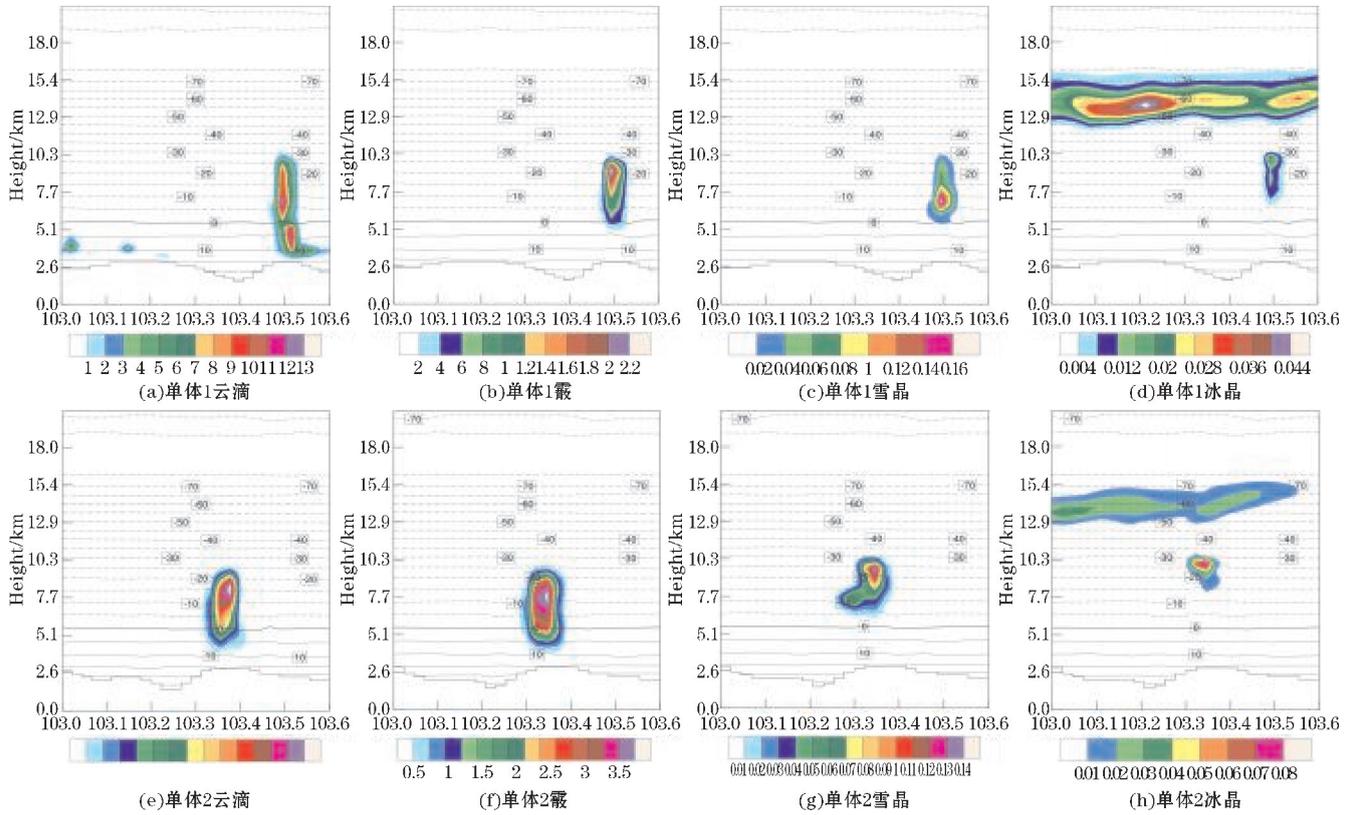


图8 13:10各水成物粒子质量混合比沿图2模拟黑线所作剖面图

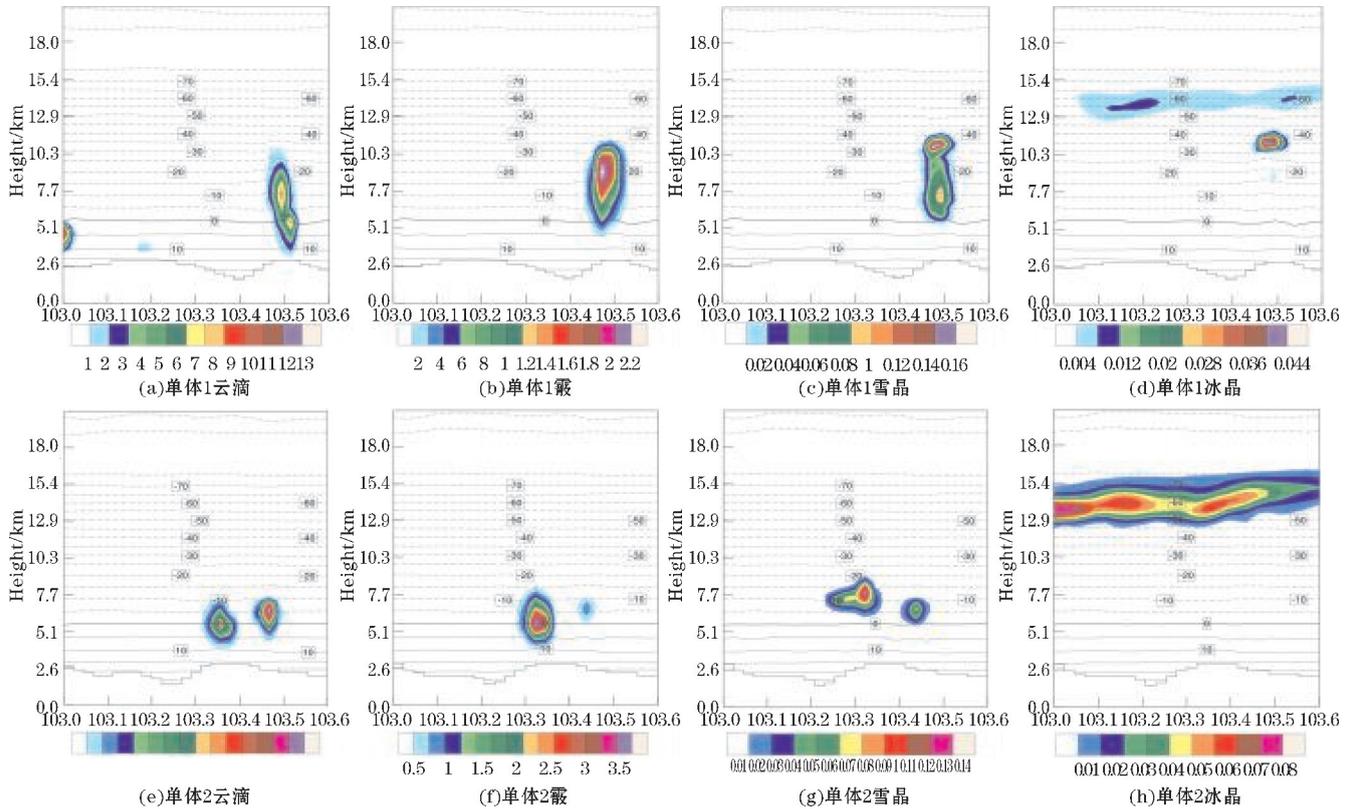


图9 13:30各水成物粒子质量混合比沿图2模拟黑线所作剖面图剖面图

大值中心,大值带分布位置较广,在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层都有分布。可以明显看到:在合并阶段的霰粒子大值中心所在位置,为过冷云滴与雪晶的混合相态区,说明

在合并初期,处于成熟阶段的单体1内部霰/雹是以雪晶为霰胚源通过淞附过冷云水达到大幅增长。在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层间存在冰晶(图9d)的大值中心与

雪晶的最大值中心位置高度重合,说明此层雪晶的生成主要是由大量冰晶聚合而成,冰雪晶的凝华作用较小。处于衰减阶段的单体2在合并初期,各冰雪晶大值中心进一步降低,云滴与霰粒子中心基本位于0℃层附近(图9e、f),混合比极值衰减明显,分别降至0.5 g/kg和0.75 g/kg;雪晶(图9g)大值区降至-10℃~15℃,处于-20℃~-30℃层的冰晶(图9h)大值中心已完全消失。

4.4.3 合并后阶段

合并后阶段:如图10(a)所示,在合并后阶段单体1内部云滴的两个大值中心合并为一个,并降至-10℃层以下,混合比极大值降至0.9 g/kg,霰粒子(图10b)的分布位置和合并前变化不明显,但量值由峰值的7.5 g/kg降到7.0 g/kg,其他冰相粒子也有不同程度的减少(图10c、d)。说明在合并后期,由合并作用导致单体内部微物理作用增强,特别是霰粒子间的

碰并增长,导致产生更大的霰/雹粒子。原本处于衰减阶段的单体2有新发展趋势,合并后带来的较强上升气流将过冷云水(图10e)重新带入-10℃~-20℃层参与霰粒子的形成。上升到-15℃层附近的霰粒子大值中心由0.75 g/kg迅速增至2 g/kg(图10f),量值增加2倍以上。在合并后期,雪晶(图10g)出现两个大值中心,霰粒子通过在-5℃~-20℃层间次大值区内的雪晶为主要霰胚源,淞附周围过冷云水增长,而位于-30℃层的雪晶参与较少,在此层的雪晶主要是由冰晶聚合作用所形成(图10h)。通过对比HID粒子识别结果(图5c、d),可以看到在合并后阶段,单体1和单体2中都出现了不同程度的降雹,说明在合并后期,合并使单体内部产生更强的动力作用,促使单体产生新的发展,并有降雹过程的产生,这与前人对多单体合并方面的研究一致。

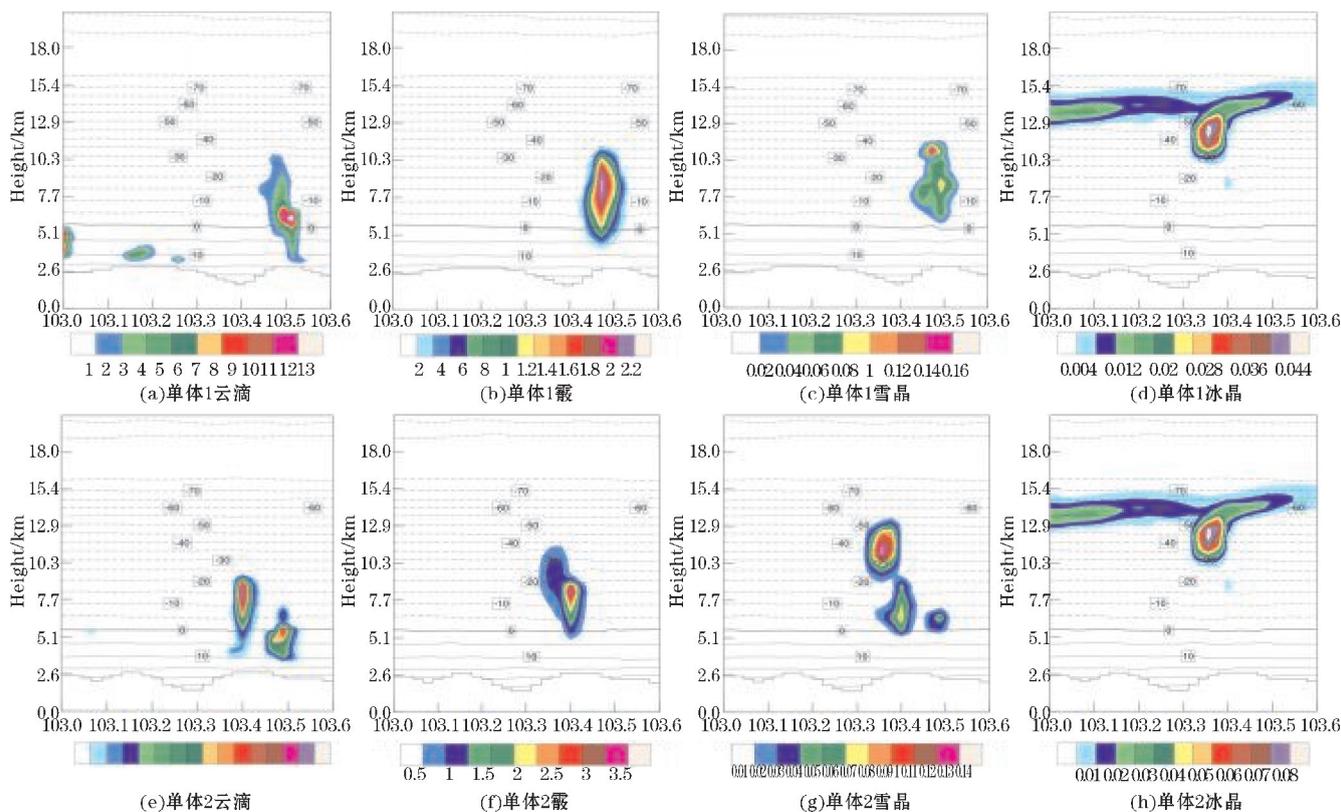


图10 13:40各水成物粒子质量混合比剖面图沿图2模拟黑线所作剖面图

5 结论与讨论

利用位于贵州省威宁县雪山镇的X波段双偏振雷达相关偏振参量(Z_H 、 Z_{DR} 、 φ_{DP} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV}),并通过模糊逻辑粒子相态识别算法(HID)对2018年6月28日云南省昭通市鲁甸县的一次多单体合并降雹过程进行粒子识别。并利用WRF中尺度数值模式对识别结果进行模拟分析,得到了各阶段水成物粒子的微观物理

机制,明确了合并对多单体发展演变的作用,得到主要结论如下:

(1)通过基于模糊逻辑的粒子相态识别算法,得到多单体在合并前阶段、合并中阶段(合并初期)、合并后阶段(合并后期)雹胚及冰雹的时空演变特征,并通过WRF中尺度模式(3.4.1版本)对此次处于云贵高原抬升地带环境下,合并作用对多单体发展、降雹等动力及微物理特征有较好的模拟能力。

(2)此次多单体合并过程经历3个主要阶段,分

别是合并前阶段、合并中阶段(合并初期)、合并后阶段(合并后期)。合并前阶段:低密度霰粒子(LDG)由雪晶(AG)和冰晶(CR)共同作为低密度霰胚源通过淞附作用增长;高密度霰粒子(HDG)有两种源项,一部分由下落过程中的LDG粒子撞冻过冷水形成,另一部分是由AG粒子为高密度霰胚源淞附过冷云水形成。合并阶段:雪晶以冰晶为晶核聚合而成,冰晶的凝华作用较小;霰粒子的形成位置在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层,为过冷云水与雪晶的混合相态区;此阶段中,霰的形成主要是由雪晶为胚源的。合并后期:合并作用促进了单体内部霰粒子(HDG)的碰并增长作用,并最终由HDG为霰胚源形成冰雹(RH),在冰雹下落过程中会通过继续撞冻过冷水继续增大并最终及地。

(3)多单体的合并作用使单体内部产生新的动力作用,使处于衰减阶段的单体有新发展趋势;同时合并作用会导致降雹等极端天气过程的产生,并且这些过程基本出现在多单体合并的第三个阶段,即合并后阶段(合并后期)。

综上,通过模糊逻辑粒子相态识别算法以及WRF模式模拟结果,明确了多单体合过程中,各阶段单体内部水成物粒子的微物理转化机制,明确了合并作用对雹胚的形成和冰雹增长的微物理作用。本文只针对云南东北部地区,云贵高原抬升带的特殊山地环境下,一次多单体合并降雹过程做出分析,所得结论的普适性有待验证。还需要各种山地环境下的多单体合并个例进行观测和模拟的验证。由于模糊逻辑算法需要根据不同地域对偏振阈值参数进行调整,因此有一定的模糊域,因此在后续研究中会对更多特殊高原山地环境下多单体合并过程进行粒子识别,以期改进相关算法。同时,由于WRF模式对模拟多单体合并过程的能力也需要大量个例进行验证。

致谢:感谢成都市科技治霾新技术新产品应用示范资助项目(2018-ZM01-00038-SN)对本文的资助

参考文献:

- [1] Simposon J S, Westcott N E, Clerman R J, et al. On Cumulus Mergers [J]. Arch Met Geoph Biokl, 1980, 29: 1-40.
- [2] 顾亚进, 党人庆, 唐洵昌, 等. 一次MCS过程的卫星云图和数值模拟分析[J]. 气象科学, 2002(2): 197-204.
- [3] Orville H D, Kuo Y H, Farley R D, et al. Numerical simulation of cloud interactions [J]. J. Rech. Atmos, 1980, 14: 499-516.
- [4] Wiggert V, Lockett G J, Ostlund S S. Radar rain-shower growth histories and variations with wind speed, echomotion, location and merger status [J]. Mon. Wea. Rev, 1981, 109: 1467-1494.
- [5] 叶宗秀, 陈倩, 郭昌明, 等. 冰雹云的闪电频数特征及其在防雷中的应用 [J]. 高原气象, 1982(2): 53-59.
- [6] 王昂生, 赵小宁, 康玉霞, 等. 昔阳地区冰雹云形成过程的一些特征 [J]. 大气科学, 1980(2): 186-194.
- [7] 黄美元, 徐华英, 吉武胜. 积云并合及相互影响的数值模拟研究 [J]. 中国科学(B辑), 1987(2): 214-224.
- [8] 付丹红, 郭学良. 积云并合在强对流系统形成中的作用 [J]. 大气科学, 2007(4): 635-644.
- [9] 李艳伟, 牛生杰, 姚展予, 等. 云并合的初始位置探讨 [J]. 大气科学, 2009, 33(5): 1015-1026.
- [10] 侯淑梅, 闵锦忠, 王改利, 等. 传播运动在对流风暴合并过程中的作用 [J]. 大气科学学报, 2020, 43(2): 347-357.
- [11] 甄长忠. 78810冰雹过程的分析 [J]. 大气科学, 1981(4): 456-460.
- [12] 易笑园, 张义军, 沈永海. 一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析 [J]. 气象学报, 2012, 70(5): 974-985.
- [13] Carey L D, Rutledge S A. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: A C-band polarimetric rader study [J]. Mon Wea Rev, 2000, 128(8): 2687-2710.
- [14] Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R R. The 19 April 1996 Illinoistornado outbreak. Park I: Cell evolution and supercell isolation [J]. Wea. Forecasting, 2006, 21(4): 433-448.
- [15] Lee B D, Jewett B F, Wilhelmson R R. The 19 April 1996 Illinoistornado outbreak. Park II: Cell mergers and associated tornado incidence [J]. Wea. Forecasting, 2006, 21(4): 449-464.
- [16] 黄勇, 王雪芹, 苏爱芳, 等. 江淮夏季强天气过程中对流云合并现象的卫星观测 [J]. 遥感学报, 2013, 17(2): 355-360.
- [17] 曹俊武, 刘黎平. 双线偏振雷达判别降水粒子类型技术及其检验 [J]. 高原气象, 2007(1): 116-127.
- [18] Park H S, A V Ryzhkov, D S Zmic, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS [J]. Wea. Forecasting, 2009, 24: 730-748.
- [19] 王德旺, 刘黎平, 宗蓉, 等. 基于模糊逻辑的大气云粒子相态反演和效果分析 [J]. 气象, 2015, 41(2): 171-181.
- [20] 赵川鸿, 周筠珺, 肖辉, 等. X波段双线偏振多

- 普勒雷达共极化差分相移资料的滤波方法研究[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 285-296.
- [21] 蔡森, 周毓荃, 朱彬. 一次对流云团合并的卫星等综合观测分析[J]. 大气科学学报, 2011, 34(2): 170-179.
- [22] 黄勇, 吴林林, 冯妍, 等. 两次对流云合并过程的双偏振雷达观测研究[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1474-1485.
- [23] Pozo D, Borrajero I, Marin J C. A numerical study of cell merger over Cuba-Part I: Implementation of the ARPS/MM5 models[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(11): 2781-2792.
- [24] Pozo D, Borrajero I, Marin J C. A numerical study of cell merger over Cuba-Part II: Sensitivity to environmental conditions[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(11): 2793-2808.
- [25] 翟菁, 胡雯, 冯妍, 等. 不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 697-712.
- [26] Zadeh L A. Fuzzy algorithms[J]. *Information & Control*, 1968, 12(2): 94-102.
- [27] Vivekanandan J, Ellis S M, Oye R, et al. Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80: 381-388.
- [28] Straka J M, Zrnić D S, Ryzhkov A V. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: Synthesis of relations[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2000, 39: 1341-1372.
- [29] Dolan B, S A Rutledge. A theory-based hydrometeor identification algorithm for X-band polarimetric radars[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009, 26: 2071-2088.
- [30] 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]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2015, 32(7): 1320-1340.

Observation and Numerical Simulation of Microphysical Characteristics of a Multi-cell Hail Storm based on Dual Polarization Radar

ZHOU Feng¹, ZHOU Yunjun^{1,2}, ZOU Shuping³, YANG Zhe³, ZENG Yong³

(1. College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information & Technology, Chengdu 610225, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Artificial Weather Office of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

Abstract: For understanding the microphysical characteristics of hail embryo and hail evolution by multi-cell interaction, by the X band double polarization radar located in Xueshan Town, Weining County, Guizhou Province, on the basis of quality control of observation data, combined with fuzzy logic particle phase state recognition algorithm (HID) and WRF mesoscale model, the hail weather process of a multi-cell merger in Ludian County, Yunnan Province on June 28, 2018 was analyzed. The results show that the multi-cell merging process, the observation recognition and pattern simulation results are the same as the whole, a total of three main stages, which contains the pre-merger stage, the merging stage (the initial stage of the merger) and the post-merger stage (the late phase of the merger). The pre-merger stage: snow crystal (AG) and ice crystal (CR) are used as the common source of low-density graupel (LDG) embryo to carry out the growth of riming adhesion, the two source terms of high density graupel (HDG) are respectively LDG particle collision with frozen supercold cloud water and growth of riming with AG as high density graupel embryo. The merging stage: the AG is mainly composed of CR nucleation polymerization, and the CR condensation growth is less involved; the graupel particles are mainly AG as the embryo source and formed between the $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -- $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ layers, which are the mixed phase region of super-cooled cloud water and AG. The post-merger stage: the combination promoted the collision and growth of the HDG in the monomer, and finally took the HDG as the source of hail embryo to form hail (RH), and continued to collide with the cold water to maintain the growth and reach the ground during the RH falling process. Merger will create a new dynamic inside the monomer and a new development trend of the attenuated monomer. Merger will lead to hail, and this processes appear in the third stage of multi-cell merging, that is, the post-merger stage (the late phase of the merger).

Keywords: atmospheric science; atmospheric physics and environment; multiple-cell merging; hail; dual-polarization; particle identification; WRF numerical simulation