翟菁, 胡雯, 冯妍, 等. 2012. 不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟 [J]. 大气科学, 36 (4): 697-712, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11096. Zhai Jing, Hu Wen, Feng Yan, et al. 2012. Numerical simulations of convective cloud merging processes at different development stages [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 697-712.

# 不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟

翟菁<sup>1,2,3,4</sup> 胡雯<sup>1</sup> 冯妍<sup>1,4</sup> 黄勇<sup>1,4</sup>

1 安徽省气象科学研究所,合肥 230031

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室,北京 100081

4 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

**摘 要** 使用 MM5 (Mesoscale Model 5, 简称 MM5) 中尺度模式和雷达组网产品,对 2008 年 7 月 22 日发生在安徽等地的一次强对流天气过程中对流云合并现象进行观测和数值模拟分析。观测结果表明,30 dBZ 以上回波水平 尺度约 10 km,回波中心相距近 20 km 的小单体通过合并形成了水平尺度几十公里的大单体。首先是外围较弱的回波相连接,其次是中低层的强回波中心发生合并,合并后有雷达回波中的强回波面积增加等现象出现。对模拟结果和观测资料进行的对比验证的结果表明,模拟结果和实况特征基本一致。基于雷达观测结果和第三层细网格模拟结果,对两类不同发展阶段的对流单体之间的合并过程分析结果表明,当两个单体都处于相近的发展阶段,合并后单体发展增强;当一个单体强度大于另一个单体时,合并后一个单体得到增强,另一个单体减弱消亡。合并时,两云间下部的低压辐合区会有新的云水中心产生,前一类合并过程中,新产生的云水中心代替了原有的两个云水中心,而后者在合并时,新产生的云水和其中一个原有的云水发生了合并,而另一个云水中心减弱消散了。模拟分析结果还表明,对流云合并过程可引起回波增强、云顶抬高、云水、冰相物质含量增加、地面降水增加现象。 关键词 强对流 对流云 合并 云水

文章编号 1006-9895(2012)04-0697-16 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11096

中图分类号 P426 文献标识码 A

# Numerical Simulations of Convective Cloud Merging Processes at Different Development Stages

ZHAI Jing<sup>1, 2, 3, 4</sup>, HU Wen<sup>1</sup>, FENG Yan<sup>1, 3</sup>, and HUANG Yong<sup>1, 3</sup>

1 Anhui Institute of Meteorological Science, Hefei 230031

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 Anhui Key Lab of Atmosphere Science & Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

**Abstract** Mergers of cells in a severe convective weather on 22 July 2008 are simulated and analyzed by Mesoscale Model 5 (referred to as MM5) and radar network data. Observation results show that, the horizontal scale of the echo above 30 dBZ, which represent the small cells, is about 10 km, and the small cells that the echo centers are 20 km apart merge into a larger cell at dozens of km of horizontal scale. Mergers begin from the peripheral radar echo, and then strong central radar echo merges at the low level, at last, the acreage of strong radar echo increases after the merger. The contrast between the observations and the simulation results shows that they are consistent. Analysis on the simulation results of

收稿日期 2011-05-20, 2012-02-28 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 41105098、40675001、40905019、40875012, 淮河流域气象开放研究基金 HRM201005, 中国气象局云雾物理 环境重点开放实验室开放课题 2009008

作者简介 翟菁, 女, 1980年出生, 硕士, 主要从事云降水物理和中尺度模拟研究。E-mail: zj8732709@163.com

two kinds of cell mergers at different development stages based on the third network model output shows that, while the cell pairs are with almost the same intensity, cells would develop after merger; while one of the cell pairs is in stronger development however the other one weaker, the stronger cell would keep on development and the weaker cell would die out. During the merger, a new cloud water center appears in the low convergence region between the cell pairs, and would replace the two cloud water centers of the former cells, or the new cloud water center would merger with one of the old cloud water center disappears. The analysis of the simulation results also shows that, the cell merger would lead to the cloud top lifting and the increase in the radar echo, content of cloud water and ice, surface rainfall.

Key words severe convective weather, cell, merger, cloud water

# 1 引言

对流云合并是影响对流云发展和降水持续增 强的重要过程,是中尺度强对流风暴形成的主要方 式之一,并引起冰雹、雷电、暴雨等灾害性天气的 发生。自20世纪以来,国内外有大量的观测表明, 对流云合并后会引起云体增强、降水增加和强对流 等(Simpson and Woodley, 1971; 王昂生和赵小宁, 1983; 甄长忠, 1981; 李艳伟等, 2009a; 胡雯等, 2010; 徐八林等, 2010; 翟菁等, 2011)。在大量 观测事实的基础上,学者们还提出一些合并的机理 假设((Simpson et al., 1980),以及开展数值模拟研 究。早期的模拟研究主要是基于云模式进行 (Oriville et al., 1987; Turpeinen et al., 1981; 黄美 元等, 1987),从积云尺度来研究对流云合并的条 件和机理,结果表明合并受低空辐合、云的水平气 压梯度力、云的环流等因素影响,而合并的条件和 云发展的强度和单体之间的距离等因素有关。通过 数值模拟,学者们还对合并的条件进行了研究,得 到了一些有意义的研究结论,但对合并的两块云究 竟相距多远、处于什么发展阶段时会发生合并,各 位学者的研究结论不全然相同。其中, Oriville et al. (1987) 采用二维模式模拟了云并合过程,认为强度 不等的两块云的中心距离小于 7 km 时才能合并, 而强度相同的云之间由于水平气压梯度力为零不 能合并。而 Turpeinen and Yan (1981)利用三维滞 弹性积云模式进行合并的模拟结果表明,发展强度 相同的积云发生了合并,而非同时发展或强度不同 的积云却不易发生合并。黄美元等(1987)用二维 非定常暖积云模式讨论了不同强度(不同发展阶 段)的合并条件和合并机理,认为同时形成的两块 云当强度相近,且距离接近,相距约小于2.1 km时, 才能发生并合,当两块云的强度相差较大时,云不 发生并合,但两块云有相互影响,弱云受到抑制,

强云得到增强;同时形成的云,只有当两块云都同时处于发展阶段时才有可能并合,形成时间超过20 min 就不大可能发生并合。

随着数值模式技术的不断发展,中尺度数值模 式逐渐被用来探讨并合机制。如 Pozo et al. (2006a, 2006b) 利用 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式对合并过程进行模拟研究,认为地面 辐合和风切变对并合是必要的,而云的阵风锋之间 以及与周围环境风的相互作用是形成地面辐合的 主要因素, 云桥上新的积云塔的形成是对流云合并 的主要特征。付丹红和郭学良(2007)使用 MM5 模式对北京的一次强对流天气过程进行了模拟,指 出积云并合在这次强对流系统形成中有非常重要 的作用,由强辐散出流形成的上升气流及与环境风 相互作用有利于并合发展,并合可导致对流运动发 展加强,形成大量过冷云水和冰相粒子,从而有利 于强降水的产生。付丹红和郭学良还指出,单一流 型的并合只发生在两个小的非降水性单体之间,而 降水性的强单体的并合有两种情形:一种是一个单 体的强下沉气流加强了另一个单体的上升气流,单 体间通过云桥实现并合,另一种是由于云体的扩大 导致与另一云体的连接,最后实现并合。李艳伟等 (2009b) 使用 WRF 模式对一次对流云并合过程的 模拟研究表明, 云并合不同阶段的并合机制不同: 从云中下部开始的并合是由于并合部位上升倾向 很大 (上升气流速度大), 有利于相邻云上升区的扩 展,形成"动力云桥"促进了并合:从云中上部开 始的并合是云团上部较强的风切变造成云团的旋 转倾向大,同样促进了并合。这些工作通过对合并 个例的模拟研究,说明了合并是云自身的环流与周 围环境风的相互作用的结果,单体的辐散出流、动 力云桥等因素在合并中起到重要的作用,并对不同 类型合并的机制进行了探讨。

江淮流域是对流云合并的高发区,对江淮流域

2001~2006年的观测分析结果表明(胡雯等,2010) 在夏季,江淮流域对流云合并频发,该地区夏季 80%以上的合并过程会引起云体增强发展;该地区 的对流云合并有明显的时空分布规律,其中以大别 山区、皖南山区及洪泽湖一皖东丘陵区域这三个区 域的合并发生最多。在合并类型方面,两云团或多 云团的简单一次合并最多。基于此,本研究使用中 尺度模式 MM5 (Mesoscale Model 5),结合实况雷达 观测结果,通过对发生在临近大别山区的对流单体 之间的合并及相互作用过程的模拟分析,探讨积云 发生合并和相互作用的过程及云物理特征。这一工 作对强对流天气预警预报研究以及人工影响局部 对流云系很有意义。

# 2 天气概况及对流单体合并过程观测分析

2008年7月22日,安徽、湖北、江苏等地发生 暴雨以及雷雨大风等强对流天气。22日00时(协 调世界时,下同)500hPa湖北、河南一带为低涡控 制,低涡东北为暖锋云系,低涡南部为冷锋云系。 此时高层200hPa山东半岛以北有高空急流,500 hPa受西北气流控制,700hPa、850hPa在河南靠 近安徽交界处均有风切变,700hPa、850hPa冷锋 前侧有西南风低空急流,低空急流造成暖湿空气的 输送,高空急流则带来干冷平流,风随高度顺转, 大气层结处于不稳定状态。在这种有利于对流性天 气发生的形势下,22日00时之后安徽北部、河南、 湖北部分地区陆续生成一些对流单体,其中一些单 体合并形成较大对流云团,之后继续合并发展成中 尺度对流系统,并引发强对流天气。

使用新一代天气雷达组网产品(包含武汉和阜阳雷达拼图,水平图为3 km高度雷达回波强度拼图产品,剖面图也是回波强度)对当天一段对流云合并过程进行观测分析。22 日约 03 时,在大别山区西侧开始出现一些零星的对流性的回波,其中一些回波不断的合并发展,形成较大的回波块。图1 给出 22 日 04:18~05:36 这一时段内,一些小对流云团合并发展成大对流云团的过程的3 km高度雷达回波强度拼图 (图 1a),以及沿图中黑线指示的雷达回波剖面图 (图 1b)。文中以不同云团间 30 dBZ 以上的回波合并连接在一起时定义为合并开始发生,以两个或多个独立的回波中心合并为一个回波中心定义为合并的完成。

04:18,湖北与河南交界处有一些零星的回波已 经在发展中,平面图沿 AB 线位置有 2 个独立的对 流单体,从剖面图中可以看出两个单体 40 dBZ 的 回波顶高都在约 4~5 km 高度。04:24, 随着回波不 断发展, 对应 AB 线的剖面图中两个单体的 40 dBZ 以上回波强度面积都有所增大,且剖面图中40dBZ 的回波顶高都抬升到 5~6 km 高度,说明两个单体 都处于相近的发展阶段。04:36,平面图上可以看到 沿 AB 线上两个单体合并成微微呈弧形的回波,由 于不在一条直线的方向上, 剖面图中仍有两个强回 波中心,只能看出 35 dBZ 以上的回波合并,实际 两个单体的强回波中心已经合并连接在一起。此 时, 剖面图中出现了水平尺度约 5~8 km 的 45 dBZ 以上的回波。05:06,沿 AB 线位置的剖面中能看到 靠近 A 端的单体得到了进一步的发展增强, 45 dBZ 以上回波的水平尺度达到 10 km 以上, 整个云团水 平尺度达到约 20 km, 云顶抬高。但是这一云体的发 展增强不止有 AB 方向的合并贡献,还有沿 CD 线 方向的合并贡献,稍后再分析 CD 方向的合并过程。

05:12 后,沿 AB 线方向的剖面图中出现了若干 个 50 dBZ 以上的强回波中心,说明合并后对流云 团继续发展,云团结构不均匀。从 05:36 沿 AB 方 向的剖面图中看,这一回波带中,回波顶高最高处、 强回波的中心逐渐向 AB 线的 B 端发展。事实上, 这一合并过程中云系整体向东北方向移动,在其移 动方向的右侧不断有单体生成并逐渐合并进来,直 至系统发展成一个西北—东南走向的云带,而这一 云带中回波最强的地方一直位于其移动方向的右 侧。这样不断的合并过程促使对流系统逐渐形成。

另一个方向的合并也在同时发生着。04:24 平 面图中有几个较弱的小云团和一个较强的大云团, 沿 CD 线方向的剖面图中有几个较弱的小云团和一 个最大回波强度 40 dBZ 的较强大云团。04:36,这 几个云团的回波都有所增强,较大云团最大回波强 度为 45 dBZ,云团之间 30 dBZ 以上的回波之间开 始合并。05:06,沿 CD 线的剖面图中原有的两个回 波中心合为一个且出现了 45 dBZ 以上强回波中心。 合并后,云团的回波结构仍在不断发展变化,05:18 沿 CD 线方向的剖面图中,最强回波中心位于靠近 D 端,同时靠近 C 端约 5 km 高度处有另一个强回 波中心。05:24 沿 CD 线的剖面图中,云团中的两 个强回波中心又再次合并为一个靠近 D 端的强回 波中心。



在这个西北一东南走向的大云团发展的同时, 其移动方向的前方也有平行的三个单体出现,其 中两个单体在西北一东南方向上发生合并。沿 05:12的EF线做剖面,图中有两个最大回波已经达 到50dBZ的强单体,其中靠近F端的单体回波强度 减弱,中心强度45dBZ,45dBZ回波顶高在4~5km 之间,而靠近F端的单体增强,回波中心强度加强 到55dBZ,45dBZ回波顶高约在6km,回波强度 和强回波顶高都高于另一个单体。05:24,靠近 E 端的单体减弱至几乎消散,而F端的单体仍保持发 展,且35dBZ以上回波的面积略有增加。在这个 过程中,原本相对较弱的单体消散了,而原本发展 更强的单体得到了维系发展,两个云团变成了一个 云团,同样完成了合并。

4 期

No. 4

沿 GH 线方向同样有合并在发生。05:24 平面 图中可以看到和整个西北一东南走向的大云团和 平行的小云团外围的回波开始合并,沿 GH 线的剖 面图中有两个单体外围 30 dBZ 以上的回波已经合 并在一起。05:36,平面图中沿 GH 线位置的回波已 完全合并在一起,剖面图中也可以看到仅有一个强 回波中心。这一合并过程中,靠近 H 端的云团本身 处于发展增强的阶段,而靠近 G 端的云团由于 AB 方向上强回波中心的发展合并也在不断增强之中, 两个云团也是处于接近的发展增强阶段,合并后强 回波面积增加、回波顶抬高。

这一合并过程中, 云系整体向东北方向移动。 这几次合并的单体, 30 dBZ 以上回波的水平尺度 约 5~10 km, 合并单体中心相距约 10~20 km, 通 过合并形成了30dBZ以上回波水平尺度约几十公 里的较大单体,合并后强回波面积增加,有些还 有回波顶抬高的现象。经过仔细分析,可以看出 这些合并过程可以分为两类:一类是强度接近的 单体之间的并合,一类是和发展强度不同单体之 间的并合现象。其中,04:24~04:36 AB 方向上两 个单体的合并过程和 05:24~05:36 GH 方向发生的 合并,都是属于第一类发展强度相同或接近的合 并;而在04:24~05:06的CD线、05:12~05:24 EF 方向上发生的合并,都是属于第二类发展强度不 同单体之间的合并,合并过程中一个单体强度较 强,另一个单体的强度相对较弱的。其中,04:24~ 05:06 CD 线合并的云团都处在发展增强阶段,但 是合并的云团大小差异明显; 而如 05:12~05:24 EF 线方向的合并过程,虽然回波特征差异不大,但 一个单体正在减弱,另一个正在增强。这两次合 并后弱的单体消散而强的单体继续发展。在后面 的数值模拟工作中,将重点对这两类合并过程进 行模拟分析。

### 3 模拟方案设计及检验

基于三维非静力平衡中尺度数值模式 MM5 对 这次过程进行了模拟。显式方案选用霰方案。霰方 案包含了冰晶、雪、霰、云水和雨水共 5 种水成物 的比质量,可较为详尽地描述云降水过程。采用三 层双向嵌套,网格距依次是 27 km、9 km、3 km。 第 1 层网格采用积云对流参数化方案和显式方案, 第 2 和第 3 层网格不采用积云对流参数化方案,仅 采用显式方案。模式初始场为 NCEP FNL (http://dss. ucar.edu/dsszone/ds083.2/[2011-08-17]) 每隔 6 小时 一次的 1°×1°格点资料。模拟时间从 2008 年 7 月 21 日 12 时开始,第 1、2 层共模拟了 30 个小时, 当模拟到 21 日 22:00 开始第三层的模拟,每隔 10 分钟输出一次模拟结果。

为了对数值模式模拟结果进行深入分析,首 先需要将观测资料与模拟结果进行对比验证。首 先,在天气形势方面,对模拟结果的分析表明, 22日00~06时,湖北、河南一带被西南涡控制,高 层山东半岛以北为高空急流,700 hPa、850 hPa为 低空急流, 500 hPa为西北风, 700 hPa、850 hPa 在对流性天气发生处有风切变。模式对西南涡的 位置和强度模拟结果与实况分析结果很相近,大 尺度形势场特征差异很小。其次,对云系整体分 布的对比结果表明,模式模拟的云系分布、位置 和实况基本一致,但云系中强对流系统的分布存 在一些差异。图2给出风云2号C卫星观测所得22 日06时的云顶亮温图(图2a),以及同时刻模拟总 水物质柱含量分布图(图2b)。从云顶亮温图中可 以看出,云系大致分为上下两段,云系上半段为 暖锋云系跨陕西、河南、安徽、山东等省,云系 下半段为冷锋跨湖北、湖南、贵州等省。从模拟 总水物质柱含量分布来看,模拟云系分布也大致 分为上下两段云系, 云系上段同样覆盖了陕西、 河南、安徽、山东等省, 云系下半段中有一条狭 窄的云带经过湖北湖南以及贵州与广西交界处, 但在暖锋云系中云水含量最大的地方与实况云顶 低亮温对流中心的位置有偏差。

# 4 较小对流单体合并成较大对流单 体过程及云微物理特征分析

在前面对实况对流单体合并过程进行观测分 析时,发现有两种典型合并过程:一类是发展强度 接近的两个单体之间的合并,一类是发展强度不同 的两个单体之间的合并。基于第三层网格模拟结 果,对在实况合并发生相近位置,模拟得到的这两 种类型的合并过程进行分析。

#### 4.1 两个发展强度接近的对流单体之间的合并

首先,为便于对比实况雷达资料,对模拟合并 过程雷达回波特征进行分析。图3给出基于第三层 网格模拟结果的750 hPa回波强度分布图,从中可 以看到两个发展强度接近的小单体的合并过程。这 两个单体在21日23:00之前生成,其中东侧的一个 单体较早生成,而另一个单体稍晚出现在西侧,云 系整体向东北方向移动。图3中,23:10两个单体 的中心强度都在30 dBZ 以上;23:20两个单体发展 增强;23:30两个单体30 dBZ 以上回波的水平尺度 约为 10 km,中心距离为 0.2 个经度 (约 20 km), 此时两个单体的发展强度接近,回波中心强度都已 增强到 50 dBZ 以上,同时外围的 40 dBZ 的回波已 开始合并;至 23:50 两个单体的中心 50 dBZ 回波强 度面积增加;23:40~22 日 0:00,两个单体中 50 dBZ 以上的强回波面积继续增加,整个回波继续缓慢的 向东北方向移动,同时西南方有回波也在移动中; 00:10,两个单体的 50 dBZ 以上的回波中心开始合 并为一个中心;00:20 合并后的 50 dBZ 以上的回波 面积增加,形状也从狭长的带状逐渐变成了接近椭 圆的形状。

为了进一步分析合并过程雷达回波特征,沿图 3 中黑线所示位置进行雷达回波剖面图分析 (图4)。 21 日 23:10,沿图 3a 中 AB 线所示位置进行剖面, 可以看到西侧单体10 dBZ以上的回波位于550~900 hPa 之间,东侧的单体回波已经及地,说明此时东 侧单体比西侧单体发展的更成熟一些。此时,在650 hPa 的位置 20 dBZ 的回波廓线已经相连; 23:30 两 个单体的回波强度同时增强,都在650~850 hPa 之



图 3 2008 年 7 月模拟 750 hPa 回波强度分布(单位: dBZ): (a) 21 日 23:10; (b) 21 日 23:30; (c) 21 日 23:50; (d) 22 日 00:20 Fig.3 Simulated radar echo intensity at 750 hPa in Jul 2008 (units: dBZ): (a) 2310 UTC 21 Jul; (b) 2330 UTC 21 Jul; (c) 2350 UTC 21 Jul; (d) 0020 UTC 22 Jul



图 4 沿图 3 所示剖面位置回波强度分布(单位: dBZ): (a) 21 日 23:10 沿 AB 线; (b) 21 日 23:30 沿 CD 线; (c) 21 日 23:50 沿 EF 线; (d) 22 日 00:20 沿 GH 线

Fig.4 Echo intensity cross sections along the lines in Fig.3 (units: dBZ): (a) 2310 UTC 21 Jul 2008, alone line AB; (b) 2330 UTC 21 Jul 2008, alone line CD; (c) 2350 UTC 21 Jul 2008, alone line EF; (d) 0020 UTC 22 Jul 2008, alone line GH

间出现了 50 dBZ 以上的强回波,且强回波面积很接近,但此时 50 dBZ 强回波中心还没有发生合并,仅 40 dBZ 的回波相连;23:50,两个单体内 50 dBZ 以上的强回波中心已经及地,说明对流发展的很旺盛,单体发展到了成熟阶段,此时仍是 40 dBZ 的回波廓线相连;22 日 00:20,两个单体内部的强回波中心也发生了合并,50 dBZ 的回波中心合并为一体,且 50 dBZ 以上的回波面积增加。

综合 750 hPa 和对应剖面图的回波特征上来 看,这次合并发生在两个发展强度接近的单体之 间,合并前两个单体的水平回波近似圆形,30 dBZ 以上的水平尺度约 10 km,中心距离约 20 km。合 并后整个云体呈椭圆形,强回波面积明显的增加, 30 dBZ 以上的回波在东西方向上的的水平尺度增 加到几十公里。合并首先从两个单体外围的回波之 间开始发生,最后是回波中心的合并。合并过程中 回波不断增强。

对比发展强度接近这一类型合并过程的模拟 回波和实况观测回波特征,可发现一些共同点:(1) 合并前,实况单体 30 dBZ 以上的水平尺度约 5~ 10 km,模拟单体则约 10 km,水平尺度接近;(2) 合并前回波中心相距都在 20 km 左右;(3) 都是发 展强度接近的单体之间发生了合并;(4)合并过程 中,首先是外围的较弱回波合并,然后是强回波 中心在中低层合并;(5)合并后强回波的面积增加。

仅凭回波特征看不出合并的云物理特征变化, 需要对模拟的合并过程进一步分析。图 5 给出了 对应图 3 中 CD、EF、GH 三条线以及相应时次的 水成物分布剖面图,图中色斑图对应的是云水含 量,黑色线对应雨水等值线(1 g/kg、3 g/kg),蓝 色对应 0.01 g/kg 的冰晶等值线, 红色对应雪晶 0.01 g/kg 的等值线, 橘黄色对应 0.1 g/kg 的霰等值线, 同时给出垂直风场的分布,紫色线标注了零度线位 置。23:30,零度线位于 550 hPa 附近,两个单体分 别有独立的云水、雨水和霰中心,云水中心略高于 零度线位于 500 hPa 高度, 大多为过冷云水, 0.1 g/kg 以上含量的霰分布在 450~550 hPa 之间,雨水位 于零度线以下。此时 500~850 hPa 之间为上升气 流,500 hPa 之上为偏西风,而 850 hPa 之下为偏东 风,垂直方向上存在着风切变。此时,两个单体的 水成物在含量、分布各方面都很接近。23:50,随着 两个单体的发展,两个云水中心抬升到 450 hPa 高 度,其中西侧的云水含量略高于东侧,最大值为

2 g/kg, 霰的分布抬升至 250~600 hPa 之间, 250~350 hPa 之间出现了少量含量在 0.01 g/kg 以上的冰晶, 西侧单体在 300~350 hPa 高度还出现了 0.1 g/kg 以 上的雪晶。从3g/kg的雨水廓线可以看出,两个单 体的降雨比合并前都增加了,西侧单体3g/kg的雨 水廓线已经及地。对应图 5 中同时刻、同位置的雷 达回波剖面图,可以看到雷达回波的强中心主要对 应的是雨水的中心。此时, 西侧单体的发展强度比 东侧单体略强,西侧单体 350~750 hPa 之间都为上 升气流,东侧单体 350~700 hPa 之间都为上升气流, 此时由于两个合并的单体的上升气流随着单体的 发展而增强,对低层空气的抽吸作用,引起了低层 气流辐合,同时,西侧单体在450 hPa 附近出流的 下沉气流,也进一步加剧了垂直方向的气流辐合。 而低层的气流辐合又抬升产生新的上升气流,从而 在 600 hPa 附近产生了新的云水中心。由于此时雨 水对应的雷达回波强度比云水大,因此在雷达回波 图中看不出这个变化。00:20,原有的两个云水中心 很快被新的、不断发展的云水中心取代,整个云体 对应着统一的环流,云水、雨水、雪晶、霰合并后 都只有一个中心,只有冰晶还保留着两个中心。此 时,0.01 g/kg 以上含量的冰晶位于 300 hPa~200 hPa 之间, 0.01 g/kg 以上含量的雪晶位于 200~500 hPa 之间, 0.1 g/kg 以上含量的霰位于 250~650 hPa 之 间,合并使新生的云水中心含量很快增加,并引起 了雨水以及霰、雪晶、冰晶等冰相物质含量的增加, 对应的及地的雨水面积也增加了。此时,雷达回波 剖面图上的回波也已合并成一体。

结合对模拟合并过程的降水情况的分析表明, 当新的云水中心出现后,地面降水就开始增加。合 并前 21 日 23:10~23:20 的 10 分钟降水强度约为 0.1 mm,随着单体的发展降水强度逐渐增加,至 23:30~23:40,图 6a 中的降水强度中心达到 0.7 mm/10 min 以上。而当新的云水中心出现后,降水 强度进一步增加,22 日 00:00~00:10 地面降水中心 合二为一,中心降水强度达到 1.0 mm/10 min 以上, 此后,降水强度在新的云水中心取代原有老云水中心 的合并过程中进一步增加,00:20~00:30 达 1.2 mm/ 10 min 以上。对应图 5 中云微物理特征的变化可 以发现,新的云水中心出现后,地面降水增加了, 对应新的降水中心位置处,冰相物质含量很少仅 有云水,此时应是暖云过程为主;随后,冰相物 质很快增加,地面降水强度也进一步增加,说明 合并后期有冷云过程加入后,使得降水进一步发 展并持续。

在这个合并过程中,新的云水中心的产生、发 展,对合并起到了关键的作用。进一步的分析发现, 合并前两个单体都处于强度近似的新生--发展阶 段。两个单体自身发展过程中,低层两个单体之间 产生辐合上升气流,从而产生一个新的云水中心, 随后这两个单体自身减弱,新生的云体不断抬升发 展,从而在原有的两个单体之间形成一个新的单 体,合并完成。进一步的分析表明,对应着新的云 水中心发生的位置, 650 hPa--近地面层之间为辐 合中心,650 hPa之上为辐散中心。图 7 给出 21 日 23:50 的 600 hPa 和 900 hPa 的散度,从图中可以看 到,合并发生处在 600 hPa 为两个辐合中心中间夹 着一个辐散中心, 而低层 900 hPa 有一个辐合中心。 图 8 给出这两个高度的气压分布,可见 600 hPa 辐 散处对应一个高压中心, 而低层为两个高压中心夹 着一个低压中心。900 hPa 的低压以及辐合,以及 600 hPa 的高压辐散环境,有利于新的云水中心的



图 6 2008 年 7 月模拟地面 10 分钟降水量(单位: mm): (a) 21 日 23:40; (b) 22 日 00:10; (c) 22 日 00:30 Fig.6 Simulated surface rainfall for 10 minutes in Jul 2008 (units: mm): (a) 2340 UTC 21 Jul; (b) 0010 UTC 22 Jul; (c) 0030 UTC 22 Jul



图 7 2008 年 7 月 21 日 23:50 模拟散度(阴影)及回波强度(单位: dBZ)分布: (a) 600 hPa; (b) 900 hPa

Fig.7 Simulated divergence (shading) and echo intensity (dBZ) distribution at 2350 UTC 21 Jul 2008: (a) 600 hPa; (b) 900 hPa





形成,而原有的两个单体处于低层辐散低层辐合的 环境下,其发展被抑制,因而新的云水中心很快发 展并取代了原有的两个老单体,从而促使合并很快 的完成。

#### 4.2 两个发展强度不同的对流单体之间的合并

在实况雷达观测到的另一种情形的合并中,两 个单体之间处于一个较强一个较弱的情形。模拟 中,也发现有这样的单体之间发生合并,并且其中 一个单体处在对流增长的发展期,而另一个单体正 处于从对流旺盛期减弱到对流衰弱的阶段。模拟结 果表明,合并后,处于衰弱期的单体减弱甚至消失, 发展期的单体增强,看起来似乎是小单体被大单体 "吞并"了。同样,基于第三层网格结果,首先对这 一合并过程的回波特征进行分析。图 9 中给出了 22 日 04:10 至 04:40 合并单体在 750 hPa 水平回波分布 图。22 日 04:10,两个水平尺度约 10 km 的单体, 其中心相距约 20 km,回波中心强度都在 50 dBZ 以 上;04:20,东侧的单体中心 50 dBZ 以上的回波面 积减小,单体已处于衰减之中,西侧的单体 50 dBZ 以上的面积增加,处于发展阶段,此时两个单体 的发展阶段已有所不同;04:30,西侧单体继续发展, 而东侧单体继续衰减,30 dBZ 以上的回波合并; 04:40,进一步发展增强的西侧单体保留有 50 dBZ 以上的回波中心,而东侧单体中心回波强度已经在 50 dBZ 以下,两个单体合并为一体。从回波特征上 来看,同样水平尺度,相距同样距离但发展强度不 同的两个单体,在靠近后处于发展期的单体增强 了,而处于衰弱期的单体减弱了。

为了进一步分析合并过程中的回波结构变 化,图 10 给出沿图 9 中黑线位置的雷达回波剖面



Fig.9 Simulated radar echo intensity at 750 hPa on 22 Jul 2008 (units: dBZ): (a) 0410 UTC; (b) 0420 UTC; (c) 0430 UTC; (d) 0440 UTC

图,04:10 西侧单体 10 dBZ 以上回波高度约 450 hPa,东侧单体 10 dBZ 以上回波高度约 400 hPa;04:20,西侧单体 10 dBZ 以上回波高度抬升到 400 hPa,50 dBZ 以上的面积在增加,东侧单体回波高度基本不变,50 dBZ 以上的回波面积减小,这种回波强度的变化同样说明西侧单体处于发展增强阶段,东侧单体处于衰减之中;04:30,西侧单体的10 dBZ 以上回波高度抬升到 350 hPa,50 dBZ 以上的回波已经合并相连;04:40,整个回波只有一个 50 dBZ 以上强回波的中心,40 dBZ 和 50 dBZ 以上的强回波面积明显增加。从剖面图中,可以更清楚地看到西侧单体发展增强和东侧单体减弱衰退的过程。

对比发展强度不同这一类型合并过程的模拟 回波和实况观测回波特征,发现实况和模拟回波在 合并前后的水平尺度特征一致,合并过程同样先是 外围的较弱回波合并,然后是强回波中心在中低层 合并,合并后强回波的面积也同样增加。

为了对合并的物理过程进行进一步分析,给出 剖面位置的云水等水成物的分布图 (图 11)。在图 11 中,04:10 西侧单体的云水中心在零度层所在高度

即 550 hPa 附近,此时高层气流偏西风,低层气流 偏东风,西侧单体的中下部,600 hPa 到近地层有 倾斜的上升气流,其东侧 600 hPa 高度附近为出流, 而东侧单体云水中心在 450 hPa 附近, 400~800 hPa 之间为更强一些的上升气流。04:20 由于倾斜的上 升气流的抽吸以及垂直风切变,引起低层气流的辐 合上升, 西侧单体下部略偏东 750 hPa 的位置产生 了一个新的云水中心,此时西侧单体的出流对东侧 单体的发展也起到一定的抑制作用;04:30 新的云 水中心在倾斜上升气流的作用下,与西侧单体原有 的云水中心发生倾斜的垂直方向上的合并, 而在这 个过程中, 东侧的单体由于其西侧单体的出流影 响,不断减弱至消散。04:40合并已经基本完成,合 并后的云水中心呈倾斜的形态,对应的雨水廓线的 面积增加, 霰、雪等冰相物质的分布范围也增加了, 云体得到了增强和发展。对不同高度的散度和气压 分布情况进行分析,可发现新的云水中心产生处同 样是在低层辐合为低压,而高层辐散为高压的环境 下形成,但两个单体发展强度的不同,对应的上升 气流强度也不同,同时在垂直风切变的影响下,引 起的地面辐合中心的位置更偏向发展阶段的单体。

合并前,04:00~04:10 西侧单体的10分钟降水

翟菁等:不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟 ZHAI Jing et al. Numerical Simulations of Convective Cloud Merging Processes at Different ...



图 10 2008 年 7 月 22 日沿图 9 所示位置回波强度的剖面 (单位: dBZ): (a) 04:10 沿 AB 线; (b) 04:20 沿 CD 线; (c) 04:30 沿 EF 线; (d) 04:40 沿 GH 线

Fig.10 Echo intensity cross sections along the lines in Fig.9 on 22 Jul 2008 (units: dBZ): (a) 0410 UTC, alone line AB; (b) 0420 UTC, alone line CD; (c) 0430 UTC, alone line EF; (d) 0440 UTC, alone line GH



图 11 同图 5,但为 2008 年 7 月 22 日模拟的沿图 9 所示位置水成物含量和风场的剖面: (a) 04:10 沿 AB 线; (b) 04:20 沿 CD 线; (c) 04:30 沿 EF 线; (d) 04:40 沿 GH 线

Fig.11 Same as Fig.5, but for simulated cross sections of hydrometeor content and wind distribution along the lines in Fig.9 on 22 Jul 2008: (a) 0410 UTC, alone line AB; (b) 0420 UTC, alone line CD; (c) 0430 UTC, alone line EF; (d) 0440 UTC, alone line GH

量要小于东侧单体,随着西侧单体的增强发展,图 12a 中西侧单体的 10 分钟降水量又大于东侧单体, 当新的云水中心在低层出现后,西侧单体的地面降 水强度开始增加,图 12b 中可见中心降水强度在 2mm/10min 以上。在随后新的云水中心与西侧老的 云水中心合并的过程中,10 分钟降水强度保持在这 一水平并一直维系到合并完成。与 4.1 节中的合并 过程有所不同的是,合并后期的降水强度没有进一 步增加。这可能是因为新的云水中心出现后,在较 强的倾斜上升气流的作用下,很快地与西侧的老的 云水中心发生了合并,对西侧老单体的降水过程起 到一个补充云水的作用,而没有独立的降水过程发 生,和 4.1 节中的合并过程相比,缺少了一段以暖 云过程为主的降水过程。

图 13 给出合并中新的云水中心出现的时刻 650 hPa 和 950 hPa 的散度分布,由图可见,950 hPa 的 辐合中心位置和 650 hPa 的辐散中心都更偏向西侧 单体一些,在倾斜的上升气流的作用下,使得新生 的云水中心和原有的西侧单体的云水中心发生了 倾斜的垂直方向上的合并,而东侧单体却受到西侧 单体出流的抑制而逐步减弱消散。这一过程使得在 雷达回波上看起来的合并过程似乎是小单体被大 的单体给"吞并"了。

#### 4.3 两类合并过程的异同点

不论是哪一类的合并过程,有利的天气层结特 征对整个系统的发展演变都起到重要的作用。对第



图 12 2008 年 7 月 22 日模拟地面 10 分钟降水量 (单位: mm): (a) 04:20; (b) 04:30; (c) 04:40; (d) 04:50 Fig.12 Simulated surface rainfall for 10 minutes on 22 Jul 2008 (units: mm): (a) 0420 UTC; (b) 0430 UTC; (c) 0440 UTC; (d) 0450 UTC



三层网格的模拟结果进行分析,发现高层主要为西风,200 hPa风速约 12~15 m/s,有弱冷空气自北向南契入;中层为西北风,500 hPa约 8~12 m/s;低层为南风到东风的切变辐合区,北纬 32.4°附近形成了一条水汽辐合带,925 hPa风速约 2~8 m/s 的低层 850 hPa 的风场切变。而对第一层网格的模拟分析表明,高低空同时有急流存在。这种高层冷空气 契入、低层水汽辐合、风随高度顺转且风速增加的垂直风切变配合高低空急流,所引起的大气不稳定性十分有利于对流性天气的发展。尤其是风随高度顺转且风速增加的垂直风切变,使得在云体移动方向的右侧,低空有辐合(相对流入),高空有辐散(相对流出),有利于新单体的形成,在风场的辐合作用下,有利于新单体和老单体之间发生合并。

根据模拟结果计算了 K 指数、沙氏指数、对流 有效位能,发现在 4.1 节和 4.2 节中模拟的对流发 生区域内,K 指数都达到 37 以上,沙氏指数都在 -1 以下,但对流有效位能的值在两次合并过程中的 合并发生区域内为 0,说明合并是在层结不稳定条 件下发生的。以 4.2 节中合并过程为例,图 14 给出 合并区域内的 K 指数、沙氏指数在合并过程中的分 布情况。图 14a、b 中,K 指数、沙氏指数所指示的 对流较强的位置与合并前的两个单体的位置有较 好的对应关系,而图 14c、d 中,10 分钟后 04:20 的 *K* 指数、沙氏指数均较好地指示出新生云水的 发生位置,04:30 所指示的位置即有新的云水中心 产生并发生合并,说明 *K* 指数、沙氏指数对合并 中新生云团的发生位置是有一定指示意义的,但 时效较短。

两类合并过程在以下几个方面具有共同点:

(1)合并发生的天气层结的特征相同,具备高层冷空气契入、低层水汽辐合、风随高度顺转且风速增加的垂直风切变、高低空急流存在这些大气层结不稳定条件。

(2) 实况雷达回波特征的共同点:实况雷达回 波特征的分析表明,合并过程中云系整体向东北方 向移动,单体 30 dBZ 以上回波的水平尺度约几公 里至 10 公里尺度,相距约 20 km 的小单体通过合 并形成了水平尺度几十公里的大单体,合并后雷达 回波的强回波面积增加,回波顶高抬升。合并时首 先是外围较弱回波合并,然后是强回波中心合并。 合并后有强回波面积增加,回波顶抬高现象。

(3) 基于中尺度数值模式 MM5 对模拟得到的 对流云合并过程的雷达回波特征和实况基本一致: 合并的单体 30 dBZ 以上的水平尺度约 10 km,单体 中心相距都约 20 km 左右。合并时首先是外围较弱 回波合并,然后是强回波中心合并。合并后雷达回



图 14 模拟 2008 年 7 月 22 日 (a、c) K 指数和 (b、d) 沙氏指数: (a、b) 04:10; (c、d) 04:20 Fig.14 Simulated (a, c) K index and (b, d) Showalter index on 22 Jul 2008: (a, b) 0410 UTC; (c, d) 0420 UTC

波的强回波面积增加,回波顶高抬升。

(4) 通过数值模拟结果对合并过程的云物理特 征进行分析,发现在合并的过程中,有新的云水中 心产生,合并过程中云水、雨水、冰相物质含量和 地面降水都增加。

(5) 对模拟结果的分析还表明,合并过程中新的 云水中心的产生机制为,在相邻的两块云中上升气流 以及垂直风切变的共同作用下,使得两块云之间下部 形成低压辐合区,从而促使新的云水中心的生成。

两类合并过程具有以下几点不同点:

(1) 两类合并过程中,两个单体的发展阶段不同。第一个合并过程中两个单体的发展强度非常接近,都处于增强阶段,而在后一个合并过程中,其中一个单体处于发展期,而另一个单体处于发展成熟至成熟后的衰减期。

(2) 对模拟结果的分析表明,第一类合并过程 中,新产生的云水中心代替了原有的两个云水中 心,而第二类合并过程中,新产生的云水中心和其 中一个原有的云水中心发生了合并,而另一个单体 减弱消散了。两种合并方式不同的原因在于,第二 类合并中由于单体发展强度的不同,引起地面辐合 中心的位置不同,会偏向发展强度较强的单体更多 一些,使得新生的云水中心和原有的较强单体的云 水中心发生了倾斜的垂直方向上的合并,同时较强 单体的出流抑制了较弱单体的发展。而在第一类合 并过程中新生的云水中心没有和原有的云水中心 发生合并,而是抑制了原有的两个单体的发展并取 代了它们,从而完成合并。

(3) 第一类合并过程中,新生云水的发展过程 中首先经历了以暖云为主的降水过程,随后冷云过 程加入,整个过程伴随着地面降水的持续增加。第 二类合并过程中,新的云水中心和老的云水中心发 生了合并,因此没有经历以暖云过程为主的降水过 程,而是对西侧老单体的降水过程起到一个补充云 水的作用。

# 5 结论和讨论

本文基于雷达观测结果和数值模拟结果,对一次强对流天气过程进行模拟。在将模拟结果与观测 结果对比验证的基础上,对两个对流云团之间的两 种不同类型的对流云合并过程进行了分析,重点分 析了合并过程的回波结构和云物理变化特征,得到 以下结论: (1) 基于中尺度数值模式 MM5 模拟得到的雷达回波特征在水平尺度、合并过程的回波变化特征 等方面和实况基本一致。

(2) 模拟和实况合并过程的分析表明,可以把 两个对流单体云团之间的合并分为两类:一类是发 展强度接近的单体之间的合并,一类是发展强度不 同的单体之间的合并。

(3)两类合并过程在层结条件、云物理特征方面具有一些共同点:都处于大气层结不稳定条件下,合并同样引起了一系列云体发展和降水增强现象,合并的过程中,在两个老单体之间低层的低压辐合区有新的云水中心产生,合并过程中云水、雨水、冰相物质含量以及地面降水增加。

(4) 两类合并过程在合并方式方面不同: 第一类 合并过程中新产生的云水中心代替了原有的两个云 水中心,新生云水的发展过程中首先经历了以暖云为 主的降水过程,随后冷云过程加入,整个过程伴随着 地面降水的持续增加; 第二类合并中,新产生的云水 中心和其中一个原有的云水中心发生了合并,而另 一个单体减弱消散了,新的云水中心对西侧老单体 的降水过程起到一个补充水汽和云水的作用。

前人曾基于云模式进行合并过程的模拟研究, 认为同时形成的两块云,当强度相近,都同时处于 发展阶段时才有可能并合,而当两块云的强度相差 较大时,云不发生并合,弱云受到抑制而强云得到 增强。本文对两次对流单体之间的合并过程的分析 也表明,发展强度不同的单体之间的合并有不同的 形式:一种情形中,两个单体都处于相近的发展增 强阶段,则合并后单体发展增强;另一种情形中, 其中一个单体处于发展期,而另一个单体处于发展 成熟至成熟后的衰减期,合并过程中一个单体得到 增强,而另一个单体却减弱。这一点和前人的研究 结果基本一致。但在本文分析的合并过程中,观测 事实和模拟得到的合并的对流云相距约 20 km,这 一距离大于前人基于云模式所得到的适宜合并发 生的距离。

另外,本文是仅针对一次天气过程开展的对流 云合并模拟研究,未对合并的条件进行深入探讨, 这些都有待于将来进一步研究。

#### 参考文献 (References)

付丹红, 郭学良. 2007. 积云并合在强对流系统形成中的作用 [J]. 大气

科学, 31 (4): 635-644. Fu Danhong, Guo Xueliang. 2007. The role of cumulus merger in a severe mesoscale convective system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 635-644.

- 黄美元,徐华英,吉武胜. 1987. 积云并合及相互影响的数值模拟研究 [J]. 中国科学 (B 辑), 17 (2): 214–224. Huang Meiyuan, Xu Huaying, Ji Wusheng. 1987. Simulation of cell mergers and its interaction [J]. Science in China (Series B) (in Chinese), 17 (2): 214–224.
- 胡雯, 黄勇, 汪腊宝. 2010. 夏季江淮区域对流云合并的基本特征及影响 [J]. 高原气象, 29 (1): 206-213. Hu Wen, Huang Yong, Wang Labao. 2010. Characteristic and effect of convective cloud merger in Yangtze and Huaihe River basins in summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (1): 206-213.
- 李艳伟, 牛生杰, 罗宁, 等. 2009a. 山地对流云并合形成积层混合云的 过程分析 [J]. 气象科学, 29 (2): 157–164. Li Yanwei, Niu Shengjie, Luo Ning, et al. 2009a. Convective clouds merger into convective and stratiform mixed clouds in mountainous area [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (2): 157–164.
- 李艳伟, 牛生杰, 姚展予, 等. 2009b. 云并合的初始位置探讨 [J]. 大气 科学, 33 (5): 1015–1026. Li Yanwei, Niu Shengjie, Yao Zhanyu, et al. 2009b. Initial part discussion of cloud merger [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 1015–1026.
- Orville H D, Hirsch J H, Farely R D. 1987. Further results on numerical cloud seeding simulations of stratiform-type clouds [J]. The Journal of Weather Modification, 19 (1): 57–61.
- Pozo D, Borrajero I, Marín J C, et al. 2006a. A numerical study of cell merger over Cuba—Part I: Implementation of the ARPS/MM5 models [J]. Ann. Geophys., 24 (11): 2781–2792.

- Pozo D, Borrajero I, Marín J C, et al. 2006b. A numerical study of cell merger over Cuba—Part II: Sensitivity to environmental conditions [J]. Ann. Geophys., 24 (11): 2793–2808.
- Simpson J, Woodley W L. 1971. Seeding cumulus in Florida: New 1970 results [J]. Science, 172 (3979): 117–126.
- Simpson J, Westcott N E, Clerman R J, et al. 1980. On cumulus mergers [J]. Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol., 29 (1-2): 1–40.
- Turpeinen O, Yan M K. 1981. Comparisons of results from a threedimensional cloud model with statistics of radar echoes on day 261 of GATE [J]. Mon. Wea. Rev., 109 (7): 1495–1511.
- 王昂生,赵小宁. 1983. 云体併合及雹云形成 [J]. 气象学报, 41 (2): 204-210. Wang Angsheng, Zhao Xiaoning. 1983. The merging of clouds and formation of hailcloud [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41 (2): 204-210.
- 徐八林, 刘黎平, 王改利, 等. 2010. 低纬高原中-γ 尺度微单体暴雨个例 的观测分析 [J]. 高原气象, 29 (3): 778–785. Xu Balin, Liu Liping, Wang Gaili, et al. 2010. Analysis on the observation of a meso-γ-scale microcell rainstorm case in low-latitude plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (3): 778–785.
- 甄长忠. 1981. 78810 冰雹过程的分析 [J]. 大气科学, 5 (4): 456–460. Zhen Changzhong. 1981. Analysis on '78810' hailstorm [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 5 (4): 456–460.
- 翟菁,黄勇,胡雯,等. 2011. 强对流系统中对流云合并的观测分析 [J]. 气象科学, 31 (1): 100–106. Zhai Jing, Huang Yong, Hu Wen, et al. 2011. Observation and analysis on cumulus merging in severe mesoscale convective system [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 31 (1): 100–106.



图2 2008年7月22日06时实况云系与模拟云系对比: (a) 云顶亮温; (b) 模拟总水物质柱含量 Fig.2 Contrast between observed and simulated cloud distribution at 0600 UTC 22 Jul 2008: (a) Equivalent black body temperature; (b) simulated

hydrometeor column content



图 5 2008 年 7 月模拟水成物含量分布以及风场的剖面: (a) 21 日 23:30 沿图 3b CD 线; (b) 21 日 23:50 沿图 3c EF 线; (c) 22 日 0:20 沿图 3d GH 线。彩色阴影: 云水含量; 紫色虚线: 零度线位置; 黑线: 1、3 g/kg 雨水等值线; 蓝线: 0.01 g/kg 冰晶等值线; 红线: 雪晶 0.01 g/kg 等值线; 橘 黄色虚线: 0.1 g/kg 霰等值线

Fig. 5 Simulated cross sections of hydrometeor content and wind distribution in Jul 2008: (a) 2330 UTC 21 Jul, along line CD in Fig.3b; (b) 2350 UTC 21 Jul, along line EF in Fig.3c; (c) 0020 UTC 22 Jul, along line GH in Fig.3d. Color shading: cloud water; purple dashed line: the isotherm of 0°C; black line: rain water contour of 1, 3 g/kg; blue line: 0.01 g/kg ice water contour; red line: 0.01 g/kg snow water contour; orange dashed line: 0.1 g/kg graupel contour