

文章编号: 1004-4965 (2009) 04-0427-08

## 基于雷达资料同化的 2003 年 7 月一次 暴雨过程的数值模拟及分析

徐广阔<sup>1,2</sup>, 孙建华<sup>1</sup>, 赵思雄<sup>1</sup>

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 利用我国 CINRAD/SA 多普勒雷达资料与中尺度模式 ARPS 的资料分析系统 ADAS, 对初始场进行调整, 然后利用高分辨率的中尺度模式 WRF 对 2003 年 7 月 4—5 日的暴雨过程进行了数值模拟, 在模拟结果可信的前提下, 对暴雨过程中的中尺度对流系统 (MCS) 的结构及演变过程进行了分析。表明: 多普勒雷达资料有助于提高暴雨模拟的精确度, 利用其对中尺度系统进行高分辨率数值模拟, 可以进一步认识中尺度系统的细致结构及演变情况; 在中 - 对流系统发展的过程中, 大尺度环境场的有利条件可以对其发展起到促进作用, 但具有中尺度特征的水汽条件、上升运动等因素也会起到关键的作用; 中 - 对流系统中可以同时有一支或多支的上升气流支出现, 与降水有密切关系; 2003 年 7 月 4—5 日的两个中 - 对流系统在发展过程中有从低空向高空移动的现象, 即在发展初期, 系统的中心位于低空, 而在其旺盛时期则移至高空。

**关 键 词:** 雷达资料同化; 数值模拟; 中尺度对流系统; 演变过程

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

Doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2009.04.007

## 1 引 言

梅雨锋上的暴雨过程多数与中尺度对流系统 (MCS) 的发生、发展有关<sup>[1]</sup>。关于中尺度对流系统的结构、发生、发展规律等已有不少的研究。Zhang 等<sup>[2]</sup>对中 - 对流系统的结构及演变机制进行了数值模拟研究, 指出对流层中低层的潜热释放、对流层低层的质量辐合及水汽辐合、地面气压下降之间存在正反馈过程, 是影响中尺度涡旋发生发展的重要因素; William 等<sup>[3]</sup>的研究则表明, 中尺度对流复合体 (MCC) 在发展初期, 对流层低层有空气辐合、上升运动等特征出现, 在成熟期上升运动则会发展到对流层的高层。国内在这方面的研究有: 赵思雄<sup>[4-5]</sup>从动力学诊断、扰动能量等方面对中尺度对流系统进行了研究, 指出中尺度低压区的涡度、散度和垂直运动的垂直廓线与其周围环境有明显的差异; 丁一汇<sup>[6]</sup>对 1991 年淮河暴雨的中 - 尺度雨带、中尺度云团等进行了特征分析, 并对中尺度暴雨形成的机制进行

了分析; 孙建华等<sup>[7]</sup>对 2002 年“973”中国暴雨试验期间一次由中尺度对流系统发展而产生的低涡及其伴随其发展的对流系统进行了分析和模拟研究, 结果表明低层暖平流可能是低涡东移发展的原因之一。

以上研究为中尺度对流系统的结构特征和发展机理等问题作了很好的探索, 取得了卓有成效的成果。但是由于受到观测资料精度的限制, 用于数值模拟的初始场往往不能较好包含具有中尺度特征的信息, 使得模拟难以再现中尺度系统的发生、发展的细致情况。近年来, 雷达资料同化的研究越来越受到重视, 万齐林等<sup>[8]</sup>通过对一个热带气旋变性过程的数值试验, 研究了雷达 TREC 风场在三维变分同化试验中的作用; 王峰云等<sup>[9]</sup>对单多普勒天气雷达的中尺度风场探测技术进行了研究, 指出利用 UW 方法能够从多普勒速度繁衍出风场中的中 - 以上尺度的切变线系统; 刘黎平等<sup>[10]</sup>对雷达遥感新技术及其在灾害天气探测中的应用进行了分析和总结。

本文首先对雷达资料进行同化, 以改进模拟初始场, 提高数值模拟的精确度, 然后在模拟结果可信的

收稿日期: 2008-01-09; 修订日期: 2008-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40405008; 40620120437); 国家重点基础研究发展规划项目 (2004CB418301) 共同资助

通讯作者: 徐广阔, 男, 山东省人, 在读博士研究生, 主要从事数值天气预报和灾害天气动力学的研究。E-mail: xgkuo@post.iap.ac.cn

情况下,利用模式输出结果,对 2003 年 7 月 4—5 日造成强暴雨的中 - 尺度对流系统的结构及演变过程进行研究。

### 2 ADAS 系统及同化方案简介

作为 ARPS 模式的资料分析系统,ADAS 是一个能同化常规和一些非常规资料的中尺度分析系统。它采用 Bratseth 提出的连续迭代方法<sup>[11]</sup>,将观测资料中的物理量(如温度、压强、湿度和风场等)直接转化到模式三维网格空间,形成模式初始场变量。ADAS 直接利用雷达径向风和反射率资料对初始场在三维空间中进行模式变量调整,得到一个热力和动力平衡的初始场。在调整过程中,初始热量场根据云凝结的潜热释放进行调整,相对湿度场则重点对常规资料中湿度量观测缺少处进行调整。

在本文试验中,初始场采用 NCEP 1°×1°再分析资料作为背景场,利用 ADAS 系统在背景场基础上对常规观测资料和雷达资料进行同化,根据所加入初始资料的不同,设计了四组试验:试验 CNTL 只加入常规观测资料,试验 RADAR-R 加入常规观测资

料和雷达反射率资料,试验 RADAR-V 加入常规观测资料和雷达径向风资料,试验 RADAR-RV 同时加入三种资料,然后将经过调整后的初始场应用于高分辨率的 WRF 模式进行数值模拟。模拟的初始时刻为 2003 年 7 月 4 日 12 时,共积分 24 小时,采用三重单向嵌套网格,网格距分别为 36、12 和 4 km。

### 3 降水模拟结果

图 1 是采用 36 km 网格模拟的 7 月 4 日 12—18 时(世界时,下同)降水结果与实况的对比。可以看出,与实况相比,试验 CNTL(图 1a)模拟结果雨带范围较小、雨量较弱。加入雷达资料的三组试验(图 1b~1d)的模拟结果则有较明显的改进,加入雷达反射率资料的试验 RADAR-R 和同时加入雷达径向风和反射率资料的试验 RADAR-RV 较为相像,均模拟出一个范围较大的降水中心,但对更为细致的降水情况的模拟显得略有不足;而加入雷达径向风资料的试验 RADAR-V 则在(117°E,32.0°N)和(119°E,32.0°N)附近模拟出两个降水中心,与实际观测的滁州、南京两个站的降水情况更为接近,模拟效果更好。

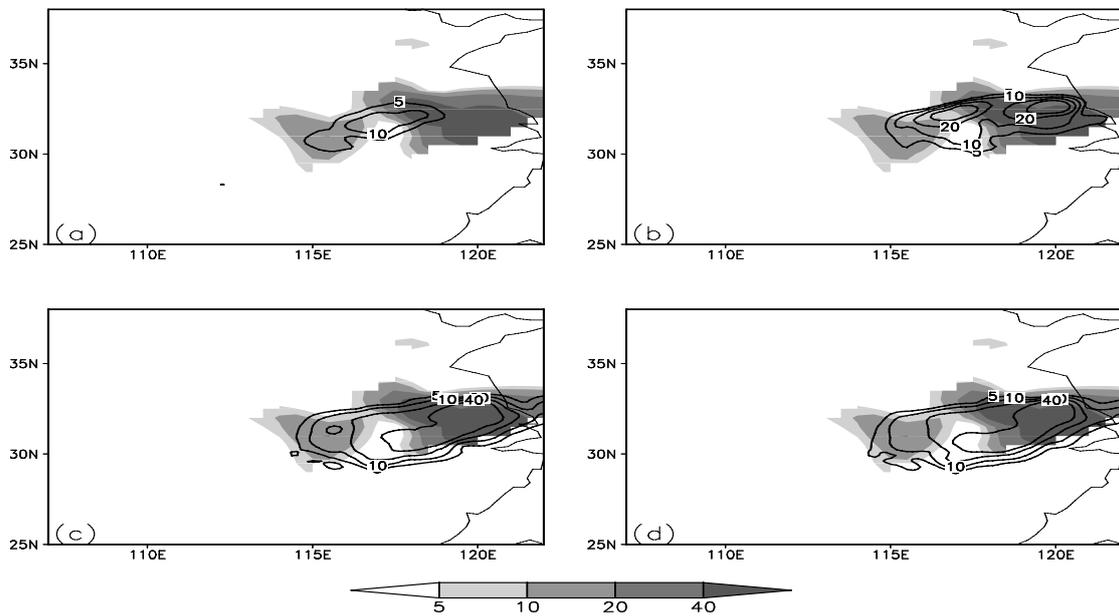


图 1 7 月 4 日 12:00—18:00 UTC 降水模拟结果(实线)与实况(阴影)对比  
单位: mm。a. 试验 CNTL; b. 试验 RADAR-V; c. 试验 RADAR-R; d. 试验 RADAR-RV。

料和雷达反射率资料,试验 RADAR-V 加入常规观测资料和雷达径向风资料,试验 RADAR-RV 同时加入三种资料,然后将经过调整后的初始场应用于高分辨率的 WRF 模式进行数值模拟。模拟的初始时刻为 2003 年 7 月 4 日 12 时,共积分 24 小时,采用三重单向嵌套网格,网格距分别为 36、12 和 4 km。

图 2 为采用 36 km 格距模拟的 7 月 4 日 12 时—5 日 12 时的降水结果与实际观测的对比,其中图 2a 为试验 CNTL 的模拟结果,图 2b~2d 分别为试验 RADAR-V、RADAR-R、RADAR-RV 的模拟结果。可以看出,四组试验均模拟出与实况较为接近的 24

小时雨带形状与位置,明显的差别是试验 CNTL 模拟的降水强度偏弱,而加入雷达资料的试验与实际的降水强度更为一致,其中,试验 RADAR-V 模拟出了雨带中更为细致的降水分布情况,降水大值中心的位置与实况更为相符。下面将采用试验 RADAR-V 的模

拟结果进行分析。

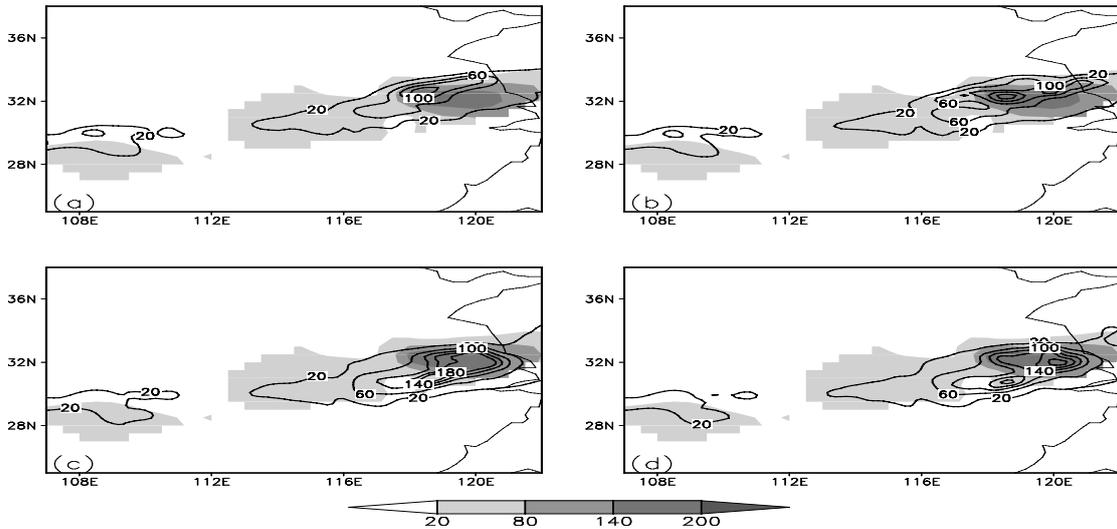


图 2 7 月 4 日 12 时—5 日 12 时降水模拟结果 (实线) 与实况 (阴影) 对比 说明同图 1。

### 4 中尺度系统发展与演变分析

#### 4.1 物理量的时间演变分析

图 3 是利用 12 km 格距数值模拟结果, 对散度、涡度进行区域 (116~121 °E, 30~33 °N) 平均的时间-高度剖面图。从图 3a 可看出, 在 4 日 15 时—5 日 00 时, 在 600 hPa 以下的低层存在较强的辐合区, 此时段的 400~200 hPa 的高空则表现为较大的辐散区,

在整个模拟时段 (4 日 12 时—5 日 12 时), 600~400 hPa 之间的散度随时间变化不明显, 其值基本在零值附近。从图 3b 可看出, 在 600 hPa 以下的低空, 存在较强的正涡度区, 在 400~200 hPa 之间为较强的负涡度区, 而在 400~200 hPa 之间涡度随时间基本无变化。在时间上, 正涡度区主要存在于 4 日 21 时—5 日 03 时和 5 日 09—12 时, 在 5 日 01—05 时有负涡度中心存在。

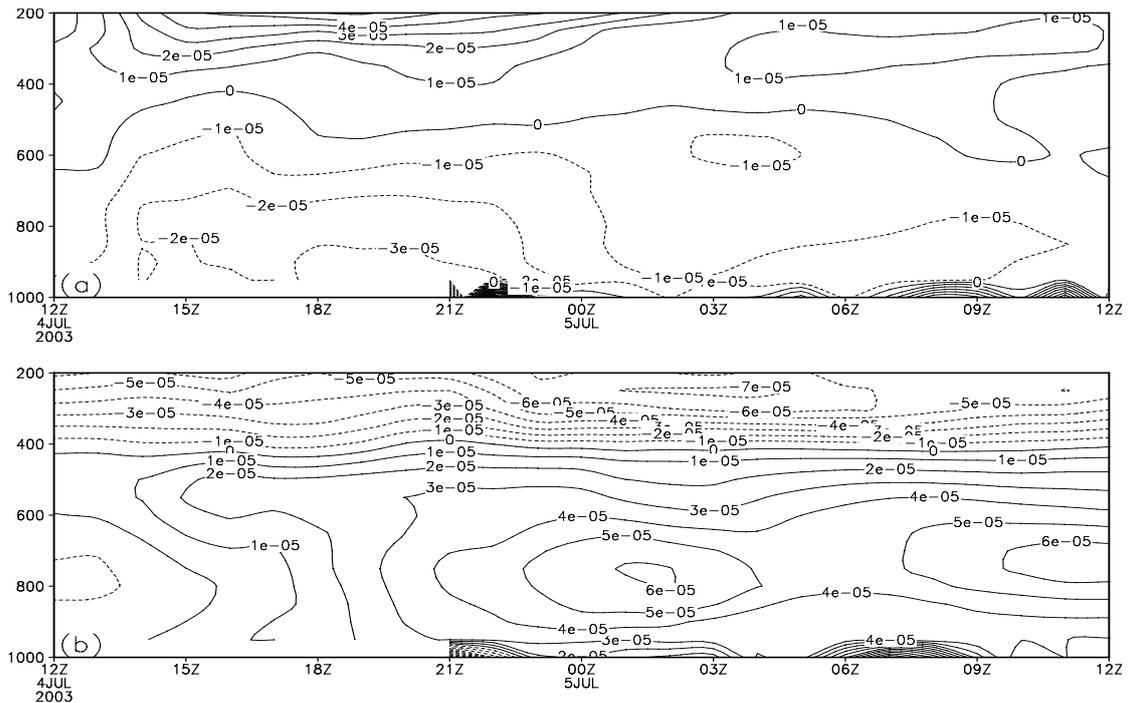


图 3 区域平均 (116~121 °E, 30~33 °N) 的散度 (a) 和涡度 (b) 的时间-高度剖面 单位: s<sup>-1</sup>。

图 4 是区域平均的相当位温 and 垂直速度的时间-高度剖面图,从图 4a 可看出,在 1 000~700 hPa 之间的低层大气处于高相当位温区,一方面对流系统的发生、发展及降水的出现使得低层大气具有较大的湿度,另一方面低层的暖湿空气对对流系统的发生、发展也起到促进作用。在对流层高层,相当位温随时间无明显变化,处于较高相当位温区,说明对流系统通过凝结潜热释放,对高层空气的变暖增湿起到一定的作用。从图 4b 可看出,4 日 13 时—5 日 00 时,整层都有较强的上升运动,其中 4 日 15—21 时,在 400~200 hPa 的高空有大值区出现,在 5 日 02—12 时,整层大气也表现为较明显的上升运动,说明在整个模拟时段,大气中主要以上升运动为主,继而说明对流运动在此区域的强烈发展。

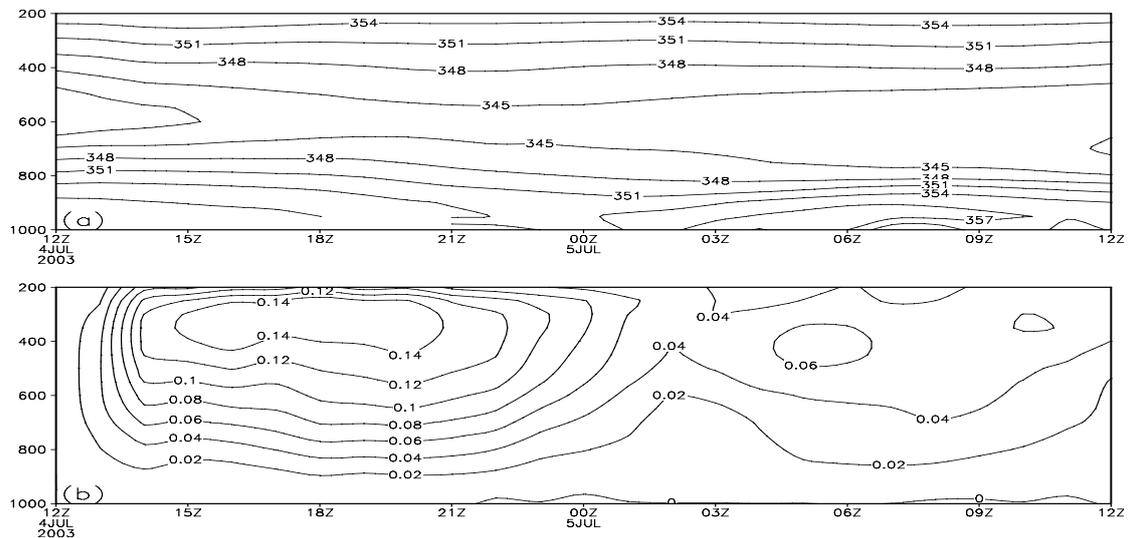


图 4 区域平均 (116~121°E, 30~33°N) 的相当位温 (a, 单位: K) 和垂直速度 (b, 单位: m/s) 的时间-高度剖面

图 5b 是 850 hPa 上升运动、水汽场以及温度场分布情况,可以看出,低空的水汽大值中心明显减弱,为 15 g/kg,温度场则出现冷区,其值约为 293 K 左右;此时上升运动已较弱,上升运动的区域也较小,综合图 5a、5b,可看出中-对流系统在发展的最旺盛时刻,虽然仍具有较有利的大尺度环流形势作为背景,但由于水汽条件、上升运动的减弱等因素的影响,对流系统已经开始由强变弱,进入了消亡阶段。

下面采用较高模式分辨率(4 km 格距)的模拟结果对中-对流系统的结构及演变情况进行细致的分析。强降水的发生通常与降水持续的时间、水汽供应以及上升运动有关<sup>[14]</sup>;文献<sup>[15]</sup>表明,水汽、雨水的强度与垂直廓线也是影响对流系统降水的重要因子。图 6

## 4.2 中尺度对流系统的演变分析

有研究表明<sup>[12]</sup>,低空急流的脉动及向地面扩展程度与暴雨之间存在密切关系。图 5a 是 7 月 5 日 00 时降水率分布情况以及 850 hPa 的位势高度场和风场。可以看出,降水率主要分布于约 116~121°E, 31~33.5°N 范围内,有两个较为明显的大值中心,分别位于 (118.5°E, 32°N) 和 (120.5°E, 32.5°N) 附近,均达到 16 mm/h 以上。在 850 hPa 低空有一个闭合的低中心,而此降水率分布区正位于低中心的前方,风场则在此区域有较强的切变发生,西南、西北气流汇集于此,说明此时对流系统发展已达到最旺盛时刻,虽然仍表现为较有利的发展形势。有研究表明<sup>[13]</sup>,中-对流系统中垂直运动和水汽对其自身的发展也有着重要的作用。

是沿图 5 中直线 X1X2 对水汽、雨水和上升运动的垂直剖面图,可以看出,在 4 日 18 时(图 6a)、20 时(图 6b)两个时刻,沿 X1X2 直线有两处强上升气流,其中 18 时对流层低层对应的水汽有两个大值区,与两处上升气流位置对应,而雨水也有两个大值中心,分别达 0.5 g/kg 和 0.9 g/kg,雨水成片出现,说明已经存在两个独立的中-对流系统(为方便叙述,用 MCS1、MCS2 表示),且正处于发展期。在 20 时,低空水汽不再有较大波动,在两支上升气流处分别有独立的雨水中心相对应,说明两个中-对流系统得到持续发展,且造成降水的出现。值得注意的是,这两个时刻的上升运动主要在 500 hPa 以下,说明对流系统的高度也局限于 500 hPa 以下,并未在对流层高层形成。在 4 日 22 时(图 6c)和 5

日 00 时(图 6d), 上升气流变为一支, 雨水的大值中心也变为一个, 二者区域相重合, 雨水中心最大值达 3.2 g/kg,

说明这两个时刻主要是 MCS2 在发展, 且由此形成了更强的降水。

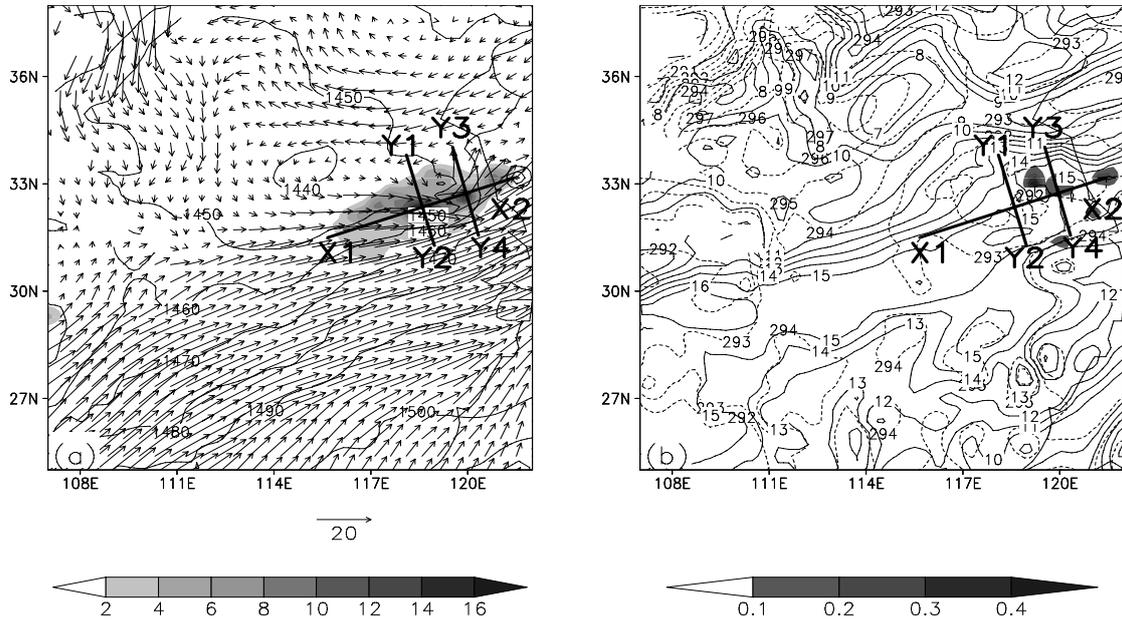


图 5 7月5日00时850 hPa物理量场 a. 降水率(阴影, 单位: mm/h)、位势高度场(实线, 单位: gpm)、风场(矢量箭头); b. 上升运动(阴影, 单位: m/s)、水汽(实线, 单位: g/kg)、温度场(虚线, 单位: K)。

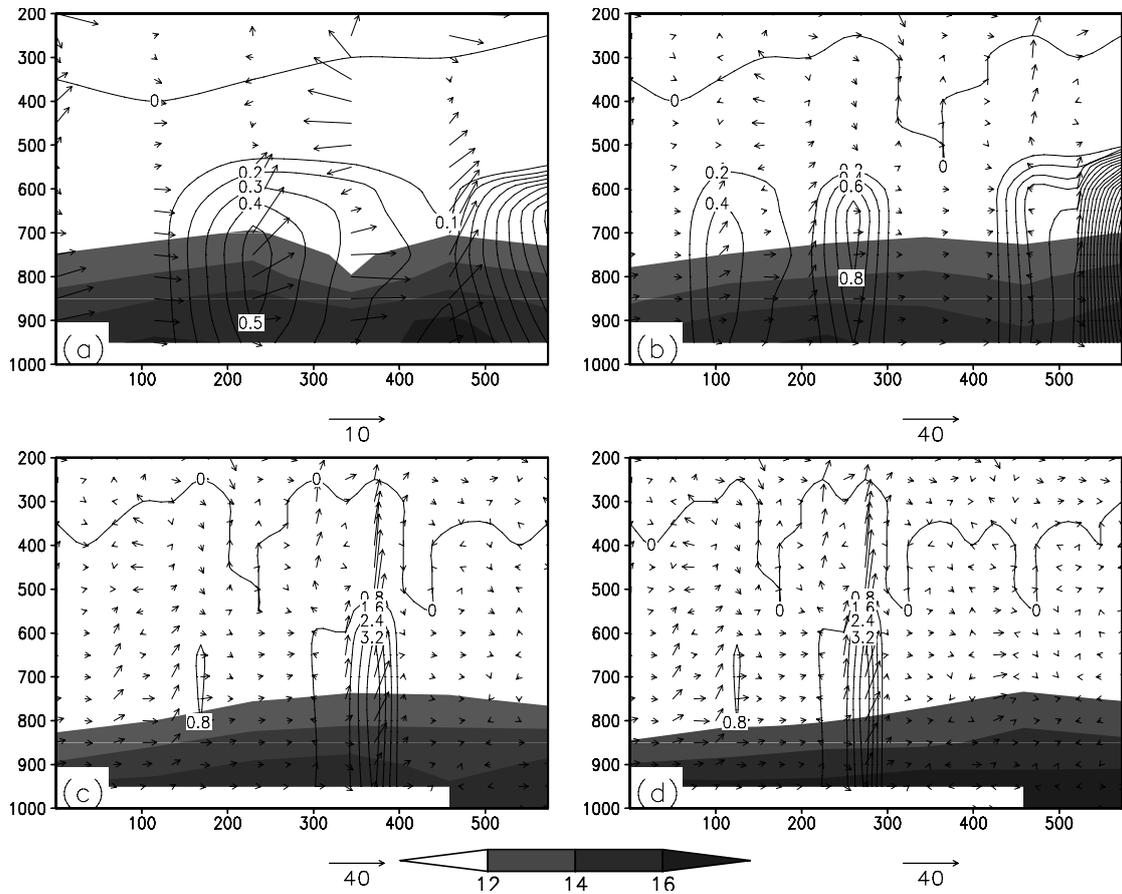


图 6 沿图 5 中直线 X1X2 的水汽(阴影, 单位: g/kg)、雨水(实线, 单位: g/kg)和 v-w 风场(矢量箭头)垂直剖面 横坐标刻度为距 X1 的距离, 单位: km。a. 4 日 18 时; b. 4 日 20 时; c. 4 日 22 时; d. 5 日 00 时。

图 7 是沿图 5 中直线 Y1Y2 对水汽、雨水和上升运动的垂直剖面图。可以看出,在 4 日 18 时(图 7a),上升气流支较弱,低空对应的水汽较小(800 hPa 高度约为 14 g/kg),雨水较小(大值中心为 0.2 g/kg),说明此时 MCS1 仍处于较弱的发展时期,未造成较大的降水。20 时(图 7b),在距 Y1 点约 250 km 处出现较强的上升气流支,对应的低空水汽也有所增强(850 hPa 高度达 16 g/kg),上升气流支区域有明显的雨水大值中心,约为 3.2 g/kg,说明经过 2 小时的发展,此中-对流系统发展强盛。22 时(图 7c),上升气流支继续加强,并在 400~200 hPa 高空达到最大,说明此时对流系统已经从低层发展到高层。值得注意的是,上升气流支在高空强于低空,说明对流系统在发展过程中,其中心位置向上运动的情况出现。

此时低空对应的水汽也有个上凸的大值中心,雨水大值区集中于距 Y1 点 150~200 km 范围内,强度达 3.2 g/kg。5 日 00 时(图 7d)出现两支上升气流,分别位于距 Y1 点 130 km 和 220 km 处,且分别有对应的雨水大值区出现。与 4 日 22 时相同,两支上升气流的强度在高空强于低空,说明此时对流系统的发展中心仍处于高空。综合图 7 可看出,在 MCS1 发展过程中,同时有一支或两支强上升气流出现,每支上升气流持续时间并不长,一般小于 2 小时,当一支上升气流消失后会有其它上升气流出现;上升气流区与雨水大值区重合,随着上升气流的形成与消失,雨区也相应有所移动;中-对流系统随着时间的发展,系统中心会从低空向高空移动。

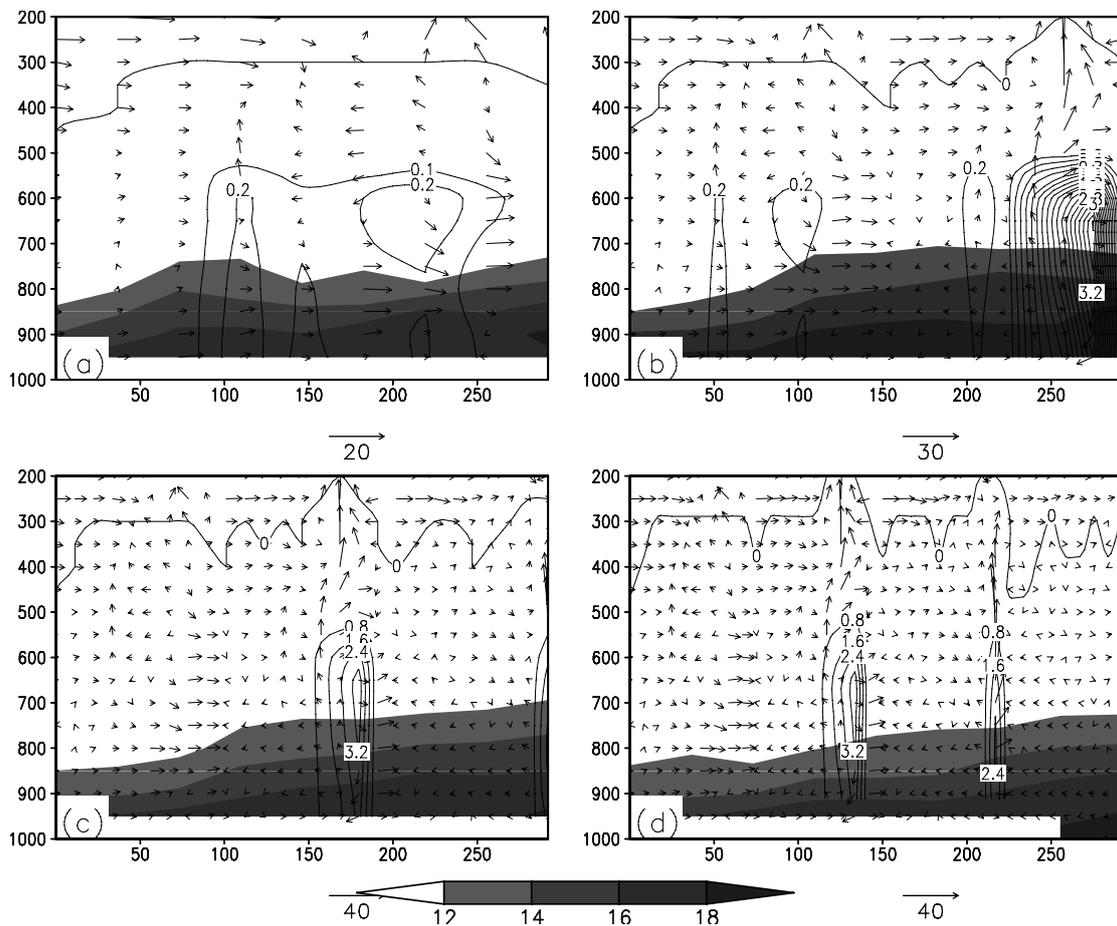


图 7 沿图 5 中直线 Y1Y2 的垂直剖面

横坐标刻度为距 Y1 的距离,单位:km。其余说明同图 6。

图 8 是沿图 5 中直线 Y3Y4 对水汽、雨水和上升运动的垂直剖面图。4 日 18 时(图 8a),MCS2 内部有多支上升气流,距 Y3 点 100~250 km 范围内出现较大雨水中心,与 MCS1 不同的是,此时已经有较强

的雨水出现(1.5 g/kg),说明 MCS2 已得到较大的发展,同时也说明, MCS2 的形成在时间上要早于 MCS1。20 时(图 8b),对流系统内部出现多个上升气流支,较强的雨水出现于距 Y3 点 50~250 km 和

240~260 km 范围之间,大值中心分别为 1.5 g/kg 和 2 g/kg。在 4 日 22 时 (图 8c)、5 日 00 时 (8d), 上升气流支在高空发展, 主要位于 500~300 hPa 之间, 这说明 MCS2 也具有系统中心随时间向高空移动的特征, 与此同时, 雨水比 20 时有所减弱, 说明 20 时以后, MCS2 已经开始减弱。综合图 8 可看出, 与

MCS1 不同的是, 在 MCS1 发展的初始时刻, MCS2 已得到发展; MCS2 发展过程较短, 在 4 日 20 时发展到至旺盛后便开始减弱, 但其发展过程中有多支上升气流出现, 造成降水连续出现, 由此也造成了一个雨强较大的降水中心。

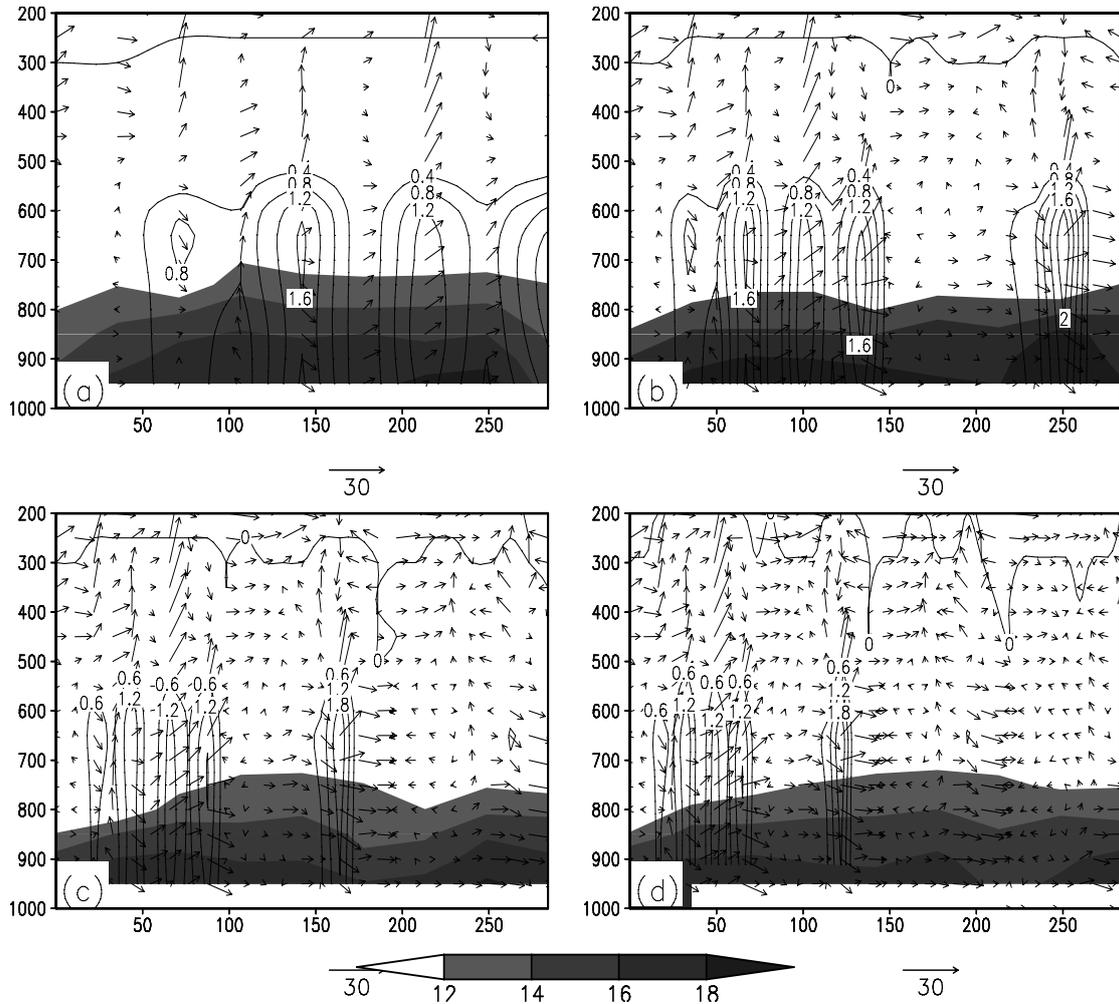


图 8 沿图 5 中直线 Y3Y4 的垂直剖面  
横坐标刻度为距 Y3 的距离, 单位: km。其余说明同图 6。

### 5 结论与讨论

本文在常规观测资料基础上同化多普勒雷达资料, 将形成的初始场应用高分辨率的 WRF 模式, 对 2003 年梅雨期一次暴雨过程进行了数值模拟, 然后利用模拟结果对引发此次暴雨的中尺度对流系统结构及演变过程进行分析研究, 主要结论如下。

(1) 在常规观测资料的基础上同化多普勒雷达资料, 有助于提高暴雨模拟的精确度。同时, 利用高空分辨率的雷达资料对中尺度系统进行高分辨率

数值模拟, 也有助于对中尺度系统进行更细致地分析。

(2) 2003 年 7 月 4—5 日的暴雨过程, 主要是由梅雨锋上两个独立的中 - 对流系统造成。在中 - 对流系统发展的过程中, 大尺度环境场的有利条件可以对其发展起到促进作用, 但具有中尺度特征的水汽条件、上升运动等因素也会起到关键的作用。这次过程中, 在大尺度环流形势仍然有利的情况下, 由于水汽、上升运动减弱等原因, 而导致了中 - 对流系统的减弱。

(3) 中 - 对流系统中可以同时有一支或多支

的上升气流支出现,上升气流支生命史较短,且具有移动的特征,与有利的水汽条件配合,其下方易形成降水。

(4) 2003年7月4—5日的两个中尺度对流系统在发展过程中都有明显的从低空向高空移动的现象。

在发展初期,系统的中心位于低空,而在其旺盛时期则移至高空。考虑其原因:在强烈的对流系统中,随着上升运动的加强及对流有效位能的释放,对流系统会不断突破高空干冷空气的制约,使整个系统由低空发展至高空。

## 参 考 文 献:

- [1] 赵思雄,陶祖钰,孙建华,等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M]. 北京:气象出版社,2004:67-144.
- [2] ZHANG D L, FRITSCH J M. Numerical simulation of the meso-scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood, Part II: Inertially stable warm-core vortex and the mesoscale convective complex[J]. J Atmos Sci, 1987, 44(18): 2 593-2 612.
- [3] WILLIAM R C, LIN M S, RAY L M, et al. A composite model of mesoscale convective complexes[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(4): 765-783.
- [4] 赵思雄. 中尺度动力学与暴雨等灾害性天气预测理论的研究[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 503-510.
- [5] 赵思雄. 梅雨锋上扰动发生发展的能量分析[J]. 大气科学, 1988, 特刊: 191-201.
- [6] 丁一汇. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京:气象出版社,1993:108-136.
- [7] 孙建华,张小玲,齐琳琳,等. 2002年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 675-691.
- [8] 万齐林,薛纪善,陈子通,等. 雷达 TREC 风的三维变分同化应用与试验[J]. 热带气象学报, 2005, 21(5): 449-457.
- [9] 王峰云,王燕雄,陶祖钰. 单多普勒天气雷达的中尺度风场探测技术研究[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 291-298.
- [10] 刘黎平,曹俊武,莫月琴,等. 雷达遥感新技术及其在灾害性天气探测中的应用[J]. 热带气象学报, 2006, 22(1): 1-9.
- [11] BRATSETH A. Statistical interpolation by means of successive corrections[J]. Tellus, 1986, 38A(4): 439-447.
- [12] 刘淑媛,郑永光,陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 285-290.
- [13] YOSHIKAWA S, X-BAIU-01 observation group. Reason for failure of the simulation of heavy rainfall during X-BAIU-01—Importance of a vertical profile of water vapor for numerical simulations[J]. J Meteor Soc Japan, 2003, 81(5): 993-1 013.
- [14] 张小玲,陶诗言,张顺利. 梅雨锋上的三类暴雨[J]. 大气科学, 2004, 28(2): 187-205.
- [15] QOOSAKU M, HIROSHI U, TAKESHI M, et al. Structure and development of two merged rainbands observed over the east China Sea during X-BAIU-99, Part I: Meso-scale structure and development processes[J]. J Meteor Soc Japan, 2004, 82(1): 19-44.

## THE NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS OF A HEAVY RAINFALL IN JULY 2003 BASED ON RADAR DATA ASSIMILATION

XU Guang-kuo<sup>1,2</sup>, SUN Jian-hua<sup>1</sup>, ZHAO Si-xiong<sup>1</sup>

(1. Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** CINRAD/SA Doppler radar data and ARPS data analysis system(ADAS) were used to adjust the initial field. Then the adjusted initial field was used as initial field for the mesoscale model WRF(The Weather Research and Forecasting Model) to simulate a rainstorm process which occurred on 4—5 July 2003. Then the creditable simulated results were used for analysis of mesoscale convective systems. The analysis results show that Doppler radar data are helpful for the accuracy of simulated heavy rainfall and in turn the high resolution simulation is helpful for the analysis of the structure and evolvement of mesoscale systems. Large scale background is helpful for the convective system, but vapor and ascending movement have strong impact on the development of mesoscale systems. The convective system has one or more branches of ascending movement, which is related with the rainfall. Two convective systems developed during the process of rainfall and the centres of the systems were moving from low to high level during their development.

**Key words:** radar data assimilation; numerical simulation; mesoscale convective system; process of evolvement