

利用非常规观测资料对上海特大暴雨过程的模拟研究*

齐琳琳 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 2001年8月5~6日, 上海市区出现了建国以来破记录的一次特大暴雨。天气形势分析表明, 停滞在上海的热带低压和主体位于海上的西太平洋副热带高压为此次特大暴雨的发生提供了有利的环流背景, 而低压内部特有的动力、热力结构及在其内发生发展的一系列中尺度对流云团与此次暴雨的发生有直接的关系。作者利用非静力中尺度数值模式 MM5V3 对此次暴雨过程进行了数值模拟研究, 结果表明: 在非静力中尺度模式全物理过程的模拟中, 采用牛顿张弛逼近法的四维资料同化方案来同化分析场和云顶亮温及上海地面气象自动站等非常规观测资料, 模拟结果不仅基本上再现出大尺度及天气尺度系统的发展演变过程, 而且还较好地模拟出了此次城市强暴雨过程的雨量空间分布及时序变化。因此, 将较高时空密度的非常规观测资料用于高分辨率 MM5 中尺度数值模式, 对于有效地预报城市灾害性暴雨是必要和有益的。研究还揭示: 与热带低压相伴的偏南暖湿气流不仅是此次暴雨过程的强水汽及热量输送带, 而且也是热带低压和其内中尺度对流系统维持发展的必要条件; 造成暴雨的中尺度对流系统垂直向上是一具有相对暖心、高湿且低空湿对流不稳定结构的气旋性涡旋, 其内强上升运动与涡柱内低空辐合、高空强辐散密切联系。

关键词: 暴雨; 中尺度对流系统; 四维同化; 数值模拟

1 引言

2001年8月5~6日上海市区普降大暴雨。强暴雨期间, 雨强平均可达 $50 \sim 80 \text{ mm h}^{-1}$, 降雨以黄浦附近为最强, 24 h 累计降雨量可达 328.9 mm。由于降雨发生突然, 且雨量集中, 因此对上海的经济和人民生活造成严重影响。对于此次降雨过程, 我们已利用上海雨量自动站的逐时降雨资料、卫星云图和多普勒雷达图像资料对造成暴雨的中尺度对流系统作了较细致的分析。但由于造成暴雨的中尺度系统时空尺度小, 目前的观测网很难捕捉到它, 即使是加密观测实验取得的资料, 对研究这类较小的中尺度系统仍显不够。因此在一定条件下, 对于中尺度强对流天气系统的深入研究, 还需借助于时空分布连续的高时空分辨率模式模拟结果。目前, 国内外不断发展的各种中尺度数值模式对不同的中尺度现象已有较好的模拟能力, 其中非静力中尺度数值模

2003-02-11 收到, 2003-08-11 收到再改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49875011 和国家重点基础研究发展规划项目“我国重大灾害天气机理和预测理论研究”(G1998040907) 共同资助

式 MM5 就是一个物理过程较为完善的模式^[1~3]。过去的 10 余年间,气象工作者已将该模式广泛用于热带风暴、中纬度气旋锋面系统、暴雨、沙尘暴等中尺度对流系统天气过程的研究中,并已取得较好的结果^[4~8]。本文采用双向三重嵌套的非静力中尺度模式 MM5V3,对此次城市暴雨过程进行了模拟研究。模拟时模式的四维资料同化系统对较高时空分辨率的非常规观测资料进行同化,在模拟基本合理的前提下,利用模式输出的高时空分辨率模拟结果,对暴雨过程中水汽输送、聚集能力及造成暴雨的中尺度对流系统的结构、演变进行了深入研究。

2 暴雨过程的雨情和天气形势

此次上海特大暴雨主要发生在 2001 年 8 月 5 日 1200 UTC 至 6 日 0000 UTC 12 h 内。据观测,8 月 5 日 0000 UTC 至 6 日 0000 UTC,上海地区累计降雨量普遍大于 100 mm (图 1a),降雨具有明显的局地性和突发性。其中,5 日 1400~1600 UTC、5 日 2200~6 日 0000 UTC 时段内还出现了雨量大于 50 mm h⁻¹ 的降雨。另外,上海雨量自动站 24 h 降雨记录显示 (图 1b),暴雨主要集中在上海市区 (31~31.3°N, 121~121.35°E) 内,黄浦、徐家汇等地 24 h 的累计降雨量可达 200~300 mm,是典型的“城市暴雨灾害”。

天气形势分析表明,此次上海暴雨的主要影响系统为 8 月 4 日 0000 UTC 在我国闽北地区登陆的热带低压。登陆后的热带低压在西太平洋副热带高压内缓慢向西北偏西方向移动,当其移到江西、安徽两省交界处附近时转向,之后向东北偏东方向移动,并于 5 日午后移入上海地区。由于受东面海上稳定的西太平洋副热带高压阻挡,5 日 1200 UTC~6 日 0000 UTC 期间,位于上海且移动缓慢的热带低压在入海前得以重新加强。与此同时,一场强暴雨出现在上海地区。

对流层中层 500 hPa 上 (图 2),8 月 5 日 0000 UTC 热带低压正逐渐向东移近上海,闭合低压中心为 5890 gpm;而 6 日 0000 UTC,已基本东移出上海的热带低压,中心强度可达 5850 gpm。位势高度场的变化表明,热带低压在上海停滞期间的确有所

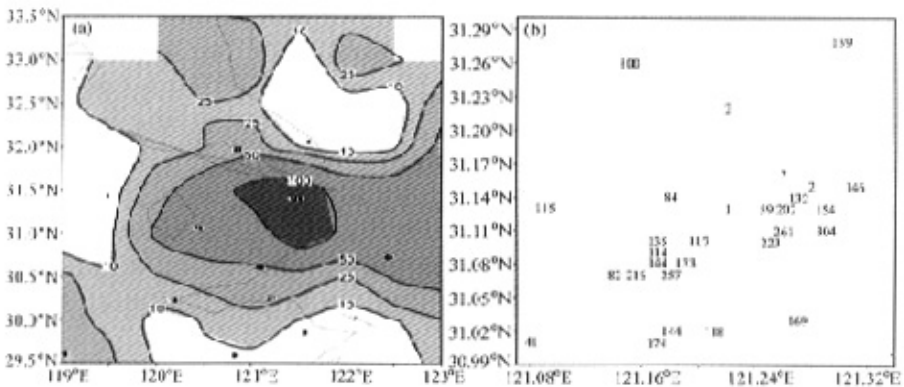


图 1 2001 年 8 月 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 24 h 累计降雨分布 (单位: mm)

(a) 实况; (b) 上海雨量自动站记录

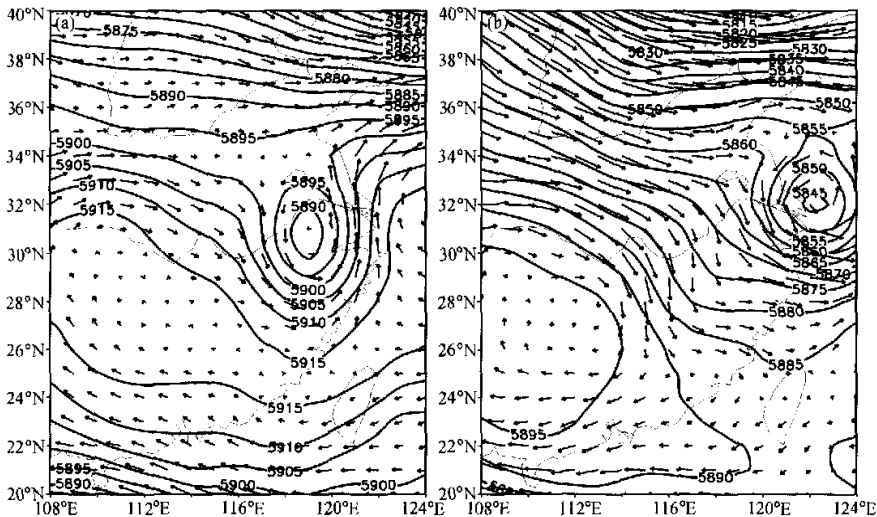


图2 500 hPa 位势高度场(单位: gpm)和风场(单位: m s^{-1})分布
(a) 5日0000 UTC; (b) 6日0000 UTC

加强。另外, 稳定在海上的西太平洋副热带高压西侧强的偏南暖湿气流一直从海上延伸伸到内陆, 该水汽通道一直与登陆后的热带低压相伴随, 使来自南海和西太平洋的水汽得以源源不断地输送, 这对登陆后热带低压的维持、加强及上海地区暴雨的发生具有重要意义。

3 中尺度对流云团的演变

暴雨期间 GMS (Geostationary Meteorological Satellite) 红外云图上云顶亮温的分布和演变表明, 5日1000 UTC~6日0000 UTC期间, 一涡旋状对流云系稳定维持在上海上空, 其内不断有一些小的中尺度对流系统发生、发展、合并、消散。正是这些相继发生发展的中尺度对流云团使得热带低压内的对流活动得以迅速发展、旺盛。

5日1000 UTC, 涡旋状对流云内存在若干分布较为零散的对流单体, 之后, 零星分部的对流单体逐渐合并发展, 5日1200 UTC形成一云顶亮温约为 -60°C 且尺度相对较大并基本位于上海的中 β 尺度对流云团(图3a), 与此同时上海强暴雨也拉开了序幕。此后, 中尺度对流云团在东移过程中迅速发展, 冷云顶温度逐渐降低, 云团逐渐增强。5日1600 UTC(图3b), 发展深厚的中尺度对流云团达到鼎盛, 云团内的云顶亮温低于 -70°C 。这表明中尺度对流云团的云顶可伸展至对流层高层200 hPa附近, 而此阶段上海地区的降雨也逐渐增强, 对流云团基本上与降雨过程中最强的一次雨峰相对应。该中尺度对流云团维持至1700 UTC后逐渐减弱消亡, 上海地区的降雨也相应出现间歇。但5日2000 UTC(图3c), 在东移的涡旋云系后部再次出现尺度相对很小的新对流单体, 小对流单体在东移过程中逐渐发展, 2300 UTC时形成一向西开口,

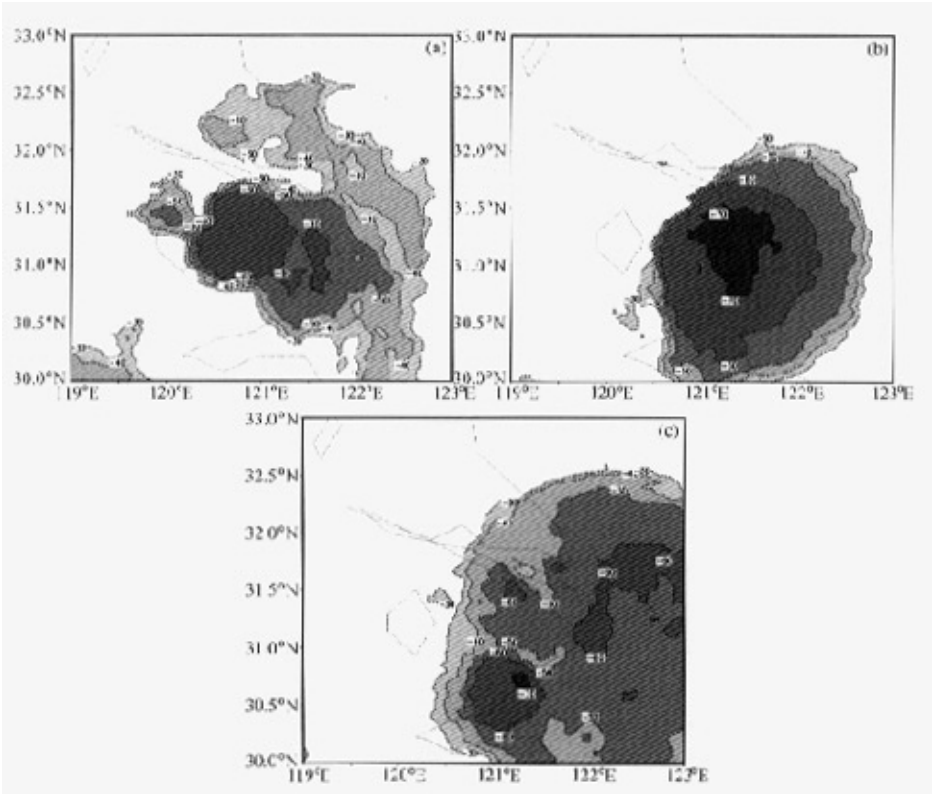


图3 GMS 红外卫星云图上云顶亮温分布(单位:℃)
(a) 5日 1200 UTC; (b) 5日 1600 UTC; (c) 5日 2000 UTC

云顶亮温约为-60℃的凹形中尺度对流云团,此对流云团使得上海城区再次出现短时局地强暴雨。6日 0000 UTC,随着涡旋云系的东移入海,其内中尺度对流云团也减弱消亡,上海地区的强暴雨结束。

上述分析再次表明,此次暴雨过程具有时效短、强度大的特点。目前获取的观测资料对充分了解暴雨中尺度对流系统的发生发展和结构演变是很不够的,因此下面我们将利用非静力中尺度数值模式 MM5V3 对此次暴雨过程进行模拟研究。由于此次降雨云团具有明显的强局地性中尺度特征,且与降雨分布有相当好的对应关系,因此,若能在模拟中充分利用暴雨期间获取到的各种非常规资料,对于较好地模拟出此次城市局地强暴雨可能会有一定益处。

4 非静力中尺度数值模式 MM5 和数值模拟方案设计

4.1 非静力中尺度数值模式 MM5

非静力中尺度数值模式 MM5V3^[9,10] 是 PSU (Pennsylvania State University) 和

NCAR 在原有静力中尺度数值模式 MM4 基础上发展起来的有限区域中尺度预报系统。模式的主要特点是: (1) 具有非静力动力框架, 模式方程采用非静力的流体可压缩原始方程组; (2) 具有云物理和行星边界层等多种物理过程, 对隐式对流云参数化和可分辨尺度降水以及行星边界层过程参数化和大气辐射发展了多种方案; (3) 灵活的多重可移动嵌套能力; (4) 通过连续的张弛逼近, 实现模式的四维资料同化。

另外, 除了主模式外, MM5 模式还包括以下几个辅助程序: 地形参数处理程序—TERRAIN 模块; 格点资料处理程序—REGRID 模块; 站点资料处理程序—LITTLE_R 模块; 标准前插值处理程序—INTERPF 模块; 标准后插值处理程序—INTERPB 模块。这些辅助程序用以完成模式内资料的输入、输出。

4.2 数值模拟方案设计

在利用中尺度数值模式 MM5V3 模拟此次上海暴雨过程中, 我们还针对模式的四维同化系统进行了 3 种方案的对比研究。研究中除四维同化方案有所不同外, 其他方案设计均如下: (1) 双向三重嵌套网格系统, 粗、细网格距分别为 54 km、18 km、6 km (图 4); (2) 初始场采用每 6 h 一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP 格点资料, 以及国家气象中心提供的每 3 h 一次的地面观测资料和每 12 h 一次的探空资料; (3) 物理过程采用 Blackadar 边界层参数化方案、云辐射方案、Grell 积云对流参数化方案, 以及新版的 Kain-Fritsch 积云参数化方案、Reisner 2 显式方案; (4) 区域 1 的积分时间为 2001 年 8 月 4 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC, 区域 2、3 的积分时间为 2001 年 8 月 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC。

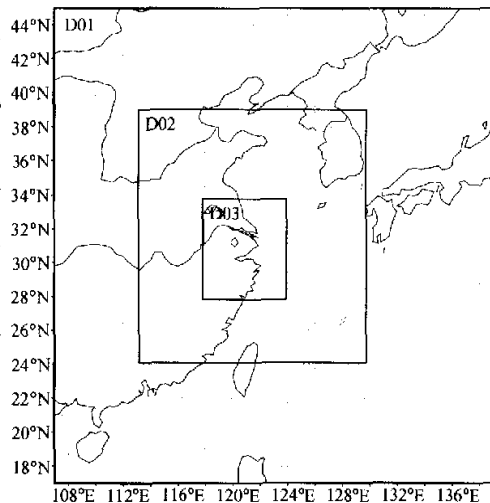


图 4 双向三重嵌套网格模拟区域

模拟研究中针对模式四维资料同化系统采用的 3 种不同方案分别是:

(1) analysisobs-nudging 模拟分析, 即同时采用模式中向分析场和观测场张弛逼近的四维资料同化方案; (2) analysis-nudging 模拟分析, 即仅采用模式中向分析场张弛逼近的四维资料同化方案; (3) no-nudging 模拟分析, 不采用模式中四维资料同化方案。

模式四维资料同化系统中采用的非常规观测资料为国家卫星中心提供的红外云图逐时云顶亮温资料 ($18.35 \sim 43.35^\circ\text{N}$, $106.22 \sim 130.22^\circ\text{E}$) 及上海 16 个地面自动站温度、相对湿度和风场资料。

4.3 牛顿张弛逼近四维同化方案的特点

MM5 模式的四维同化系统采用的牛顿张弛逼近法 (nudging) 是四维资料同化方案中比较简单且易于实现的一种。研究证明该方法具有一定改善预报的能力^[11~14]。

牛顿张弛逼近法是一种连续性的动力同化方法, 它通过在模式控制方程中加入一个

强迫函数,从而使模式状态向观测状态逼近。这种修正过程中的每一时间步长内模式都保持了各要素场之间的平衡。已有的研究表明,该方法可用来同化任何时空分布与模式变量相对应的资料^[15~18]。MM5 模式中四维同化方案有两种方式,一种是向分析场的张弛逼近,另一种是向观测场的张弛逼近,两种方法可同时使用,也可分别使用。研究表明,向分析场的张弛逼近对大尺度场很有效,且适用于空间分辨率较低的情况;而向观测场的张弛逼近适用于时间分辨率较高的非常规观测资料,对中小尺度场很有效,但要注意用这种方法时对每个观测值都必须确定其影响的时间范围和空间范围。

4.4 非常规观测资料在模式中的同化

由于红外云图上的云顶亮温是能够反映降水强弱的最为重要的云团特征量,因此对于将云顶亮温这一非常规观测资料用于数值模式已有一些研究。Mills 等^[19]的研究表明非常规资料的同化在南半球对于数值模拟结果有重要影响;Davidson 等^[20]及周霞琼等^[21]将卫星反演的云顶温度用以改进模式物理过程参数化的加热廓线分布,进而模拟出热带气旋的运动;孟智勇等^[22]利用站点 nudging 四维同化方案将 TBB (black-body temperature) 资料直接用于 MM5V2 中,从而成功模拟出 1998 年夏季一次暴雨过程。此次上海强暴雨过程中,由于降雨云团尺度不大,且发生突然,模式同化各种非常规观测资料后的模拟效果如何?本文将就此进行分析,以探讨将较高时空密度的非常规观测资料用于高分辨中尺度数值模式来研究“城市暴雨灾害”的可能性。

模拟研究中我们利用模式四维同化系统的站点 nudging 方式,将非常规观测资料同化进 MM5 模式中。由于站点 nudging 同化输入文件是依时间顺序将每一观测值在 σ 坐标系中按三维空间分布列出的,因此在构造该文件时必须将观测时间转化成模式时间,将拟同化资料的经纬度坐标转换为其在模式网格点对应的格点坐标,而且所要同化的要素均应与模式中的变量相对应。

另外,由于资料中云顶亮温所对应的云顶高度是不精确的,因此,对于云顶亮温的同化还需谨慎行事。或者说目前云顶亮温的同化更多的还只是用于数值模拟研究中,而对于实时预报则要有更多的研究试验来支持。文中我们采用与文献[22]类似的方法来确定云顶亮温相应高度,在确定云顶亮温及其对应高度后,就可将其用于模式四维同化系统中。

5 模拟效果的检验分析

5.1 位势高度场及流场的模拟检验

采用 3 种不同四维同化方案模式积分 24 h 和 48 h 后,将区域 D01 模拟的 500 hPa 上 5 日 0000 UTC 及 6 日 0000 UTC 位势高度场及流场与相应时刻客观分析场对比分析,结果显示,采用 no-nudging 方案模式模拟的天气形势与客观分析场相差较大(图 5)。模式积分 24 h 后即 5 日 0000 UTC,500 hPa 形势场上热带低压已不存在,仅仅表现为一弱低槽;而模式积分 48 h 后即 6 日 0000 UTC 500 hPa 形势场上低槽也已不存在。因此可以说,采用该方案对此次暴雨过程的模拟效果不好,模拟的形势场太弱。由此也可以知道,模式中四维资料同化的运用对于模拟这种局地天气系统及暴雨是必要的。模式分别采用 analysis-nudging 与 analysisobs-nudging 方案模拟的形势场上,热

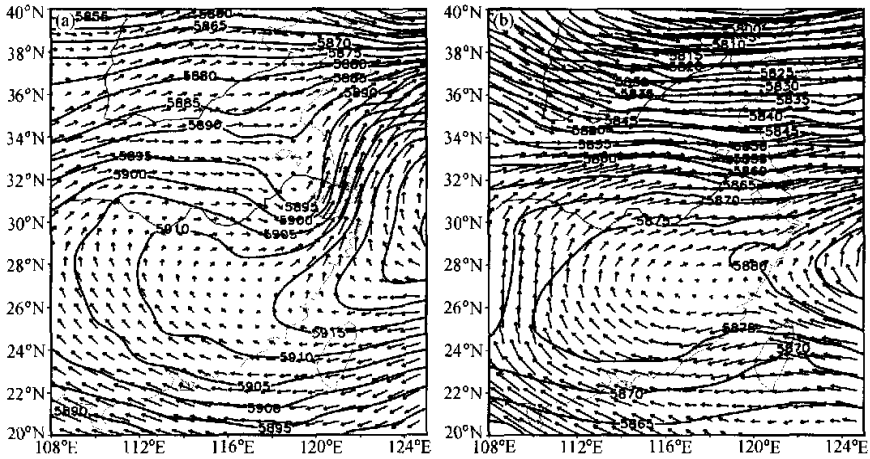


图5 采用 no-nudging 方案区域 D01 积分 (a) 24 h (5日 0000 UTC) 和 (b) 48 h (6日 0000 UTC)

模拟的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 与流场 (单位: m s^{-1}) 分布

带低压偏强, 而副热带高压偏弱。这可能是由于模式中采用了积云对流参数化, 该过程的考虑有可能加大降雨凝结释放的潜热与热带低压系统间的互馈作用, 从而使模拟的热带低压偏强。而模式中对动量的垂直输送过程未进行参数化, 这样就有可能影响到整个形势场的模拟效果, 对模式中动量垂直输送过程的考虑是中尺度数值模式中亟待解决的一个共同问题。因此, 本文模拟的形势场与相应的客观分析场也存在一定差异, 但从整体上看, 模拟的形势场上还是较好地再现出热带低压的移动及其在上海的停滞过程, 而且对暴雨发生前后各尺度天气系统的位置、分布也有较好的再现。因此, 应该说模式采用上述两种方案的模拟效果还是比较令人满意的。另外, 模式模拟的对流层各层流场同样较好地再现了客观分析场上流型分布 (图略), 尤其是 5 日 1200 UTC~6 日 0000 UTC 期间, 模式模拟出的 300 hPa 以下强的气旋性环流与其上反气旋性环流的配置, 有利于热带低压内中尺度系统的发生发展。尽管模式采用上述两种方案对形势场的模拟均较为成功, 但仔细比较还是不难发现, 采用 analysis-nudging 方案对热带低压位置的模拟 (图 6), 比 analysisobs-nudging 方案 (图 7) 和客观分析场均偏西、偏北些。相对而言, 模式采用 analysisobs-nudging 方案模拟的结果与客观分析场更为相近。

5.2 假相当位温场的模拟检验

假相当位温场是温度、湿度场的热力综合场, 分析假相当位温场可反映出模式对此次暴雨过程温、湿场的模拟效果。从模式分别采用 analysisobs-nudging 与 analysis-nudging 方案区域 D01 模拟的 500 hPa 假相当位温分布可知 (图略), 两种同化方案模拟的假相当位温场相近, 均较准确地模拟出降雨发生前上海地区处于深厚的暖湿气流控制区内。特别是 5 日 1200 UTC 500 hPa 上模拟的暖湿中心正位于上海, 约为 350 K, 且与位势高度场和流场上低压中心基本重合, 模拟效果与假相当位温客观分析场基本吻合。因此, 可以说模式采用这两种同化方案均可较好地反映出暴雨过程大尺度温、

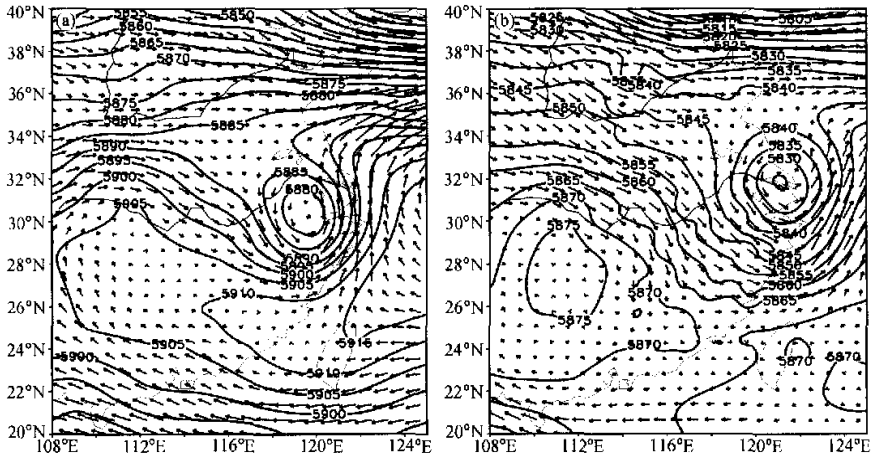


图6 采用 analysis-nudging 方案区域 D01 积分 (a) 24 h (5日 0000 UTC) 和 (b) 48 h (6日 0000 UTC) 模拟的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 与流场 (单位: m s^{-1}) 分布

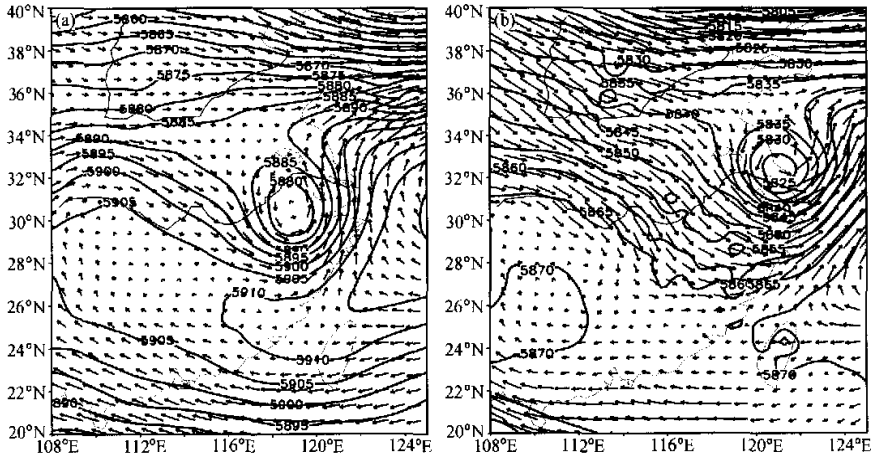


图7 采用 analysisobs-nudging 方案区域 D01 积分 (a) 24 h (5日 0000 UTC) 和 (b) 48 h (6日 0000 UTC) 模拟的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 与流场 (单位: m s^{-1}) 分布

湿场分布及热带低压的暖湿结构特征。

5.3 降雨的模拟检验

图8是模式分别采用 analysisobs-nudging 方案与 analysis-nudging 方案区域 D03 模拟的 2001 年 8 月 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 24 h 降水分布。从图中可以清晰看到, 虽然两种同化方案均模拟出上海市区 24 h 雨量普遍大于 100 mm 的暴雨过程, 对降雨强度的模拟也基本相当, 但采用 analysis-nudging 方案模拟的强降雨中心范围小, 强降雨区较实际暴雨区偏差约 50 km 左右; 而采用 analysisobs-nudging 方案模拟的雨区范围和暴雨中心强度、范围均较前者有所改善, 24 h 降雨达 200 mm 的强降雨区基本

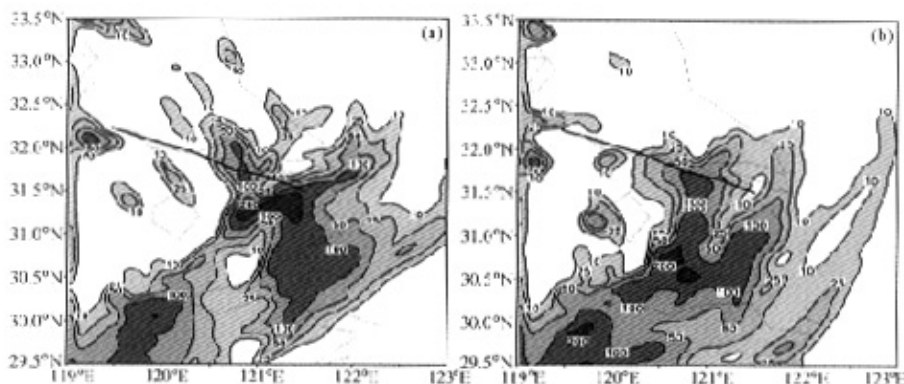


图8 区域D03模拟的5日0000 UTC~6日0000 UTC降雨分布(单位: mm)

(a) analysisobs-nudging 方案; (b) analysis-nudging 方案

位于(31~31.3°N, 120.8~121.4°E)附近,与上海自动雨量站观测到的暴雨集中在上海市区,24 h 累计雨量在200~300 mm 间基本吻合。因此可以说,模式采用 analysisobs-nudging 方案对此次暴雨过程雨区、雨强的模拟还是较为令人满意的。

判断模式模拟降雨是否成功,在分析降雨落区和雨量模拟结果的同时,还应注意到模拟雨区内雨量的时序变化。为此我们分别分析了上述两种方案模拟的上海南市(31.11°N, 121.29°E)、杨浦(31.15°N, 121.31°E)测站附近雨量的时序变化(图9、图10),并与测站观测到的雨量分布(图11)进行了比较分析。宏观上看,两种方案均模拟出此次降雨过程的局地性和突发性。具体而言,采用 analysis-nudging 方案模拟的降雨(图10),尽管也反映出此次降雨过程的演变趋势,但模拟的雨强较实际明显偏弱,最强降雨仅在35~40 mm h⁻¹,且强降雨出现时段较实际提前近5 h。因此,四维同化系统仅采用向分析场的张弛逼近来模拟这种强局地性和时效性的降雨过程是远远不够的。相比而言,采用 analysisobs-nudging 方案模拟的雨量时序变化(图9)与观测降雨更为相近。该方案对5日2100 UTC~6日0000 UTC时段内局地降雨模拟的不理想,这可能与此时段降雨云团尺度相对较小,强度相对较弱,以致降雨范围具有更强的局地性有关。总的来看,模式采用该方案模拟的降雨还是较好地反映出暴雨过程中降雨随时间的演变特征,特别是对5日1400~1700 UTC时段内的强降雨过程,无论是雨强还是时效上均有较好的模拟效果。强降雨集中出现在5日1500 UTC~1600 UTC,且最大降水量可达50 mm h⁻¹左右。模拟的降雨不仅在落区、强度上与实况较为吻合,而且强降雨峰出现时间与实况也基本一致。所以可以说,将非常规观测资料用于模式的四维同化系统,对于成功地模拟出此次强局地性突发暴雨过程是有一定意义的。

通过以上对MM5V3模式采用3种不同四维同化方案模拟的位势高度场、流场、假相当位温场及降雨场的检验分析,我们可以认为,在包含全物理过程的非静力中尺度数值模式中采用 analysisobs-nudging 方案,不仅基本上再现出大、中尺度天气系统的结构与演变过程,而且模拟的降雨效果可信度也最高。这为我们进一步利用此方案模拟结果进行暴雨中尺度系统的结构及发生发展研究提供了合理的依据。

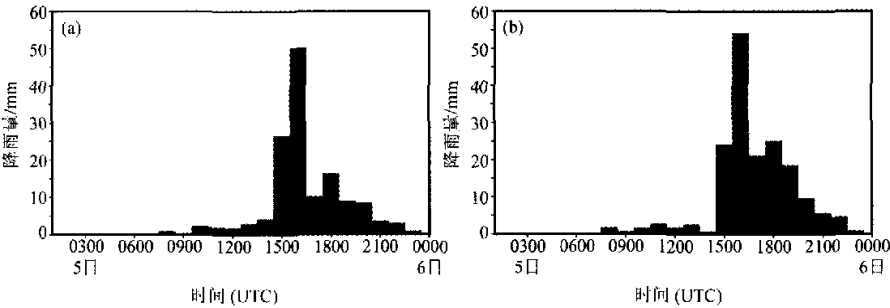


图 9 采用 analysisobs-nudging 方案区域 D03 模拟的 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC
(a) 南市和 (b) 杨浦附近逐时降雨分布 (单位: mm)

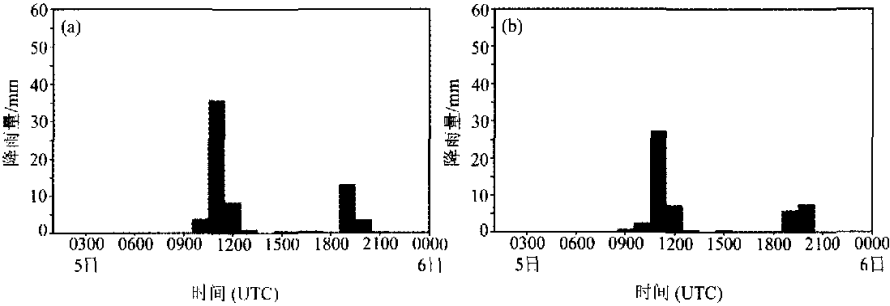


图 10 采用 analysis-nudging 方案区域 D03 模拟的 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC
(a) 南市和 (b) 杨浦附近逐时降雨分布 (单位: mm)

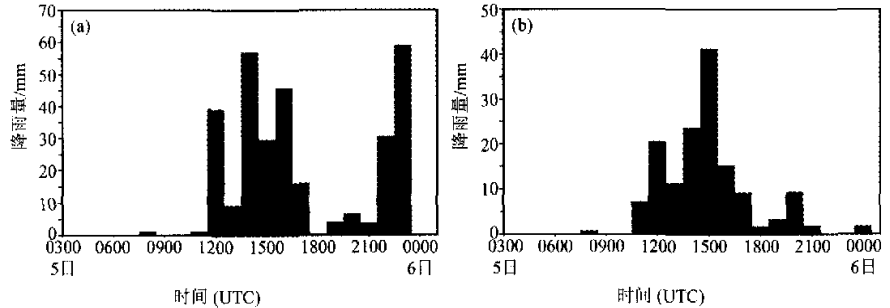


图 11 5 日 0000 UTC~6 日 0000 UTC 上海 (a) 南市和
(b) 杨浦雨量自动站逐时观测降雨分布 (单位: mm)

6 水汽的输送与聚集

大量水汽源源不断地供应不仅是热带低压登陆后得以维持和重新发展的必要条件,

而且充沛的水汽在上海地区的聚集程度对暴雨中尺度系统的发生发展也是至关重要的。为了解暴雨中尺度系统发生发展过程中水汽供应状况, 现利用区域 D03 的模拟结果对暴雨过程中水汽通量及其散度进行分析。从 850 hPa 上的水汽通量及其散度分布 (图略) 可以知道, 登陆后的热带低压一直与一强水汽输送带相伴随, 从而为热带低压的维持提供了必要的水汽、能量。初期, 强风速区位于低压的底部, 上海地区虽然处于强风区内, 水汽供应充足, 但水汽聚集能力却较弱。随着热带低压移入上海, 上海地区不仅水汽供应逐渐加大, 而且水汽在此聚集的能力也逐渐加强。图 12 是区域 D03 模拟的 5 日 1500~1600 UTC 水汽通量及其散度沿 121.25°E 的垂直分布, 可以看到强降雨期间, 上海地区的水汽确实存在快速、强烈的集中过程。暴雨期间, 水汽通量大值区位于对流层低层, 中心强度约为 $35\sim 40 \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$; 850 hPa 附近的强水汽辐合区, 与强风速区和水汽通量大值区位置基本一致, 中心强度可达 $-20.0 \times 10^{-7} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$ 。这表明充沛的水汽由偏南低空急流源源不断地输送至上海得以聚集, 聚集的水汽在向上输送过程中, 除小部分在对流层高层流出外其余均凝结成降雨落下。

为了解水汽快速集中的机制, 我们将水汽通量散度项分解成风场散度和水汽平流两项, 即

$$\frac{1}{g} \nabla \cdot (qv) = \frac{1}{g} q \nabla \cdot v + \frac{1}{g} v \cdot \nabla q,$$

其中, $\frac{1}{g} \nabla \cdot (qv)$ 为水汽通量散度; $\frac{1}{g} q \nabla \cdot v$ 为风场散度项; $\frac{1}{g} v \cdot \nabla q$ 为水汽平流项。图 13 是区域 D03 模拟的 5 日 1500~1600 UTC 风场散度项和水汽平流项沿 121.25°E 的垂直分布, 可以看出, 水汽的快速集中主要是由风场散度项造成。暴雨时段内, 上海地区的风场散度项约为 $-20.0 \times 10^{-7} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$, 与水汽通量辐合场基本相当; 而水汽平流项仅为 $(-1.5 \sim -3.0) \times 10^{-7} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$, 约为风场散度项的 1/6 左右。由此可以认为, 虽然上海一直处于暖湿偏南气流中, 尽管强风速区和水汽大值区明显, 但由于比湿的水平梯度很小, 因此水汽平流项的作用相对较小。

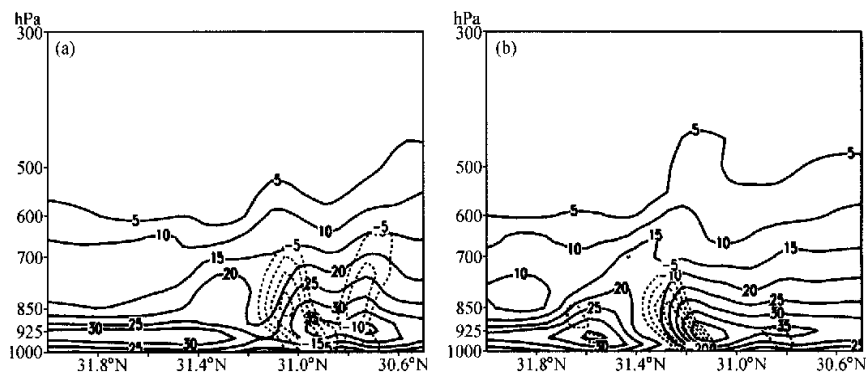


图 12 区域 D03 模拟的水汽通量及其散度沿 121.25°E 的垂直分布

(a) 5 日 1500 UTC; (b) 5 日 1600 UTC

实线: 水汽通量, 单位: $\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$; 虚线: 水汽通量散度, 单位: $10^{-7} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$

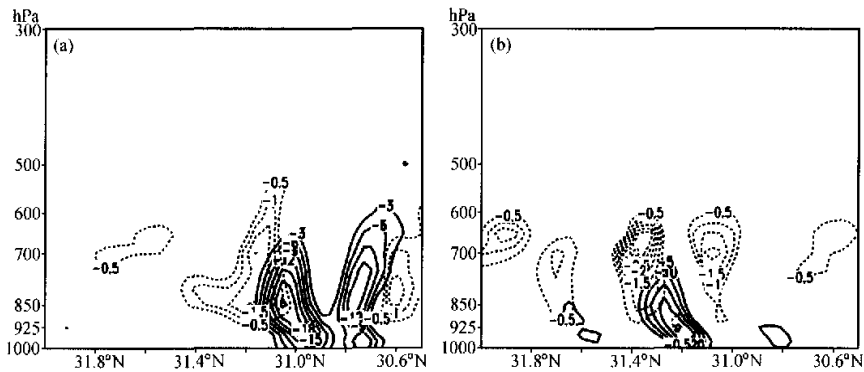


图 13 区域 D03 模拟的风场散度项和水汽平流项沿 121.25°E 的垂直分布

(a) 5 日 1500 UTC; (b) 5 日 1600 UTC

实线: 风场散度项; 虚线: 水汽平流项, 单位: $10^{-7} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$

当热带低压移入上海后, 水汽大值区内还出现了风场上的辐合, 风场散度项是造成水汽快速集中进而形成暴雨的主要原因。

通过以上分析可以认为, 来自南海和西太平洋的暖湿气流通过西南(偏)南水汽输送带将洋面上充沛的水汽源源不断地提供给热带低压和暴雨区; 强风速区轴线与水汽通量舌轴线一致, 使得湿舌走向与低空急流一致; 热带低压移近上海后, 低空急流左侧风场的辐合使得上海附近对流层低层水汽通量辐合; 聚集的水汽被上升气流输送到对流层中上层, 用以维持对流云团发展, 产生暴雨。相比而言, 水汽平流项对水汽集中的贡献仅占很小的一部分。

7 中尺度对流系统的结构、演变

7.1 相对暖心的气旋性湿涡旋

由前面的分析知道, 热带低压在上海停滞期间有所加强, 并造成强暴雨。虽然暴雨是多尺度天气系统相互作用的产品, 但中尺度系统则是暴雨的主要触发机制^[23,24]。为此, 利用区域 D03 的模拟结果, 我们就热带低压内发展起来的中尺度系统的结构和演变作一分析。

热带低压逐渐移近上海后, 其北侧对流层高层有相对干冷空气的入侵, 下沉的干冷空气强迫抬升低压内部低层的暖湿空气, 低压内部大气斜压不稳定结构使得中尺度系统得以发生发展。图 14 是 5 日 1700 UTC 涡度与温度经向偏差沿 121.25°E 的垂直分布。可以看到, 强暴雨期间, 200 hPa 以下热带低压所在区域内有一明显的气旋性涡旋, 涡旋的水平尺度约为数十公里, 垂直向上基本垂直, 表明其结构深厚稳定, 是典型的中尺度对流系统。中尺度涡旋的强中心位于 700 hPa 附近, 约为 $15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 发展达到鼎盛。涡旋内对流层中上层温度经向偏差为正, 而涡旋内对流层低层温度偏差为负的结构, 表明该中尺度涡旋在对流层中上层具有相对暖心的结构; 而且随着暴雨的发生, 暖心有所加强、下降, 这可能与降雨释放的凝结潜热有关。另外, 中尺度涡

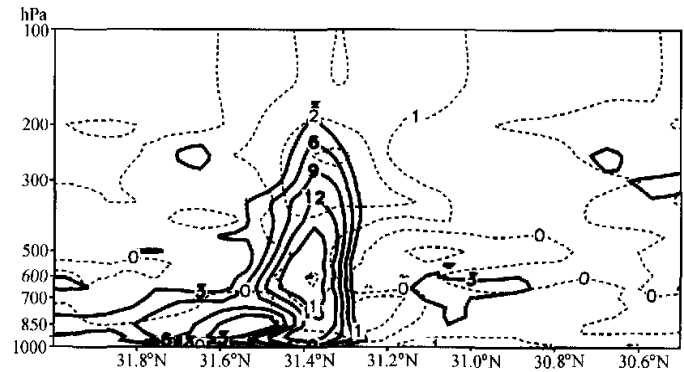


图 14 区域 D03 模拟的 5 日 1700 UTC 涡度、温度经向偏差沿 121.25°E 垂直分布
实线：涡度，单位： 10^{-4} s^{-1} ；虚线：温度经向偏差，单位： $^{\circ}\text{C}$

旋内 300 hPa 以下相对湿度大于 90%，具有明显的高湿性，这说明低层充沛的水汽不断被涡柱内强上升气流输送到对流层中高层，以维持中尺度对流云团的活动（图略）。以上分析表明，在热带低压内发生发展起来的中尺度系统为一垂直结构较为深厚且高湿、暖心的气旋性涡旋，其在对流层中上层的相对高湿、暖心结构利于系统的维持。

7.2 高层强辐散与强上升运动的耦合发展

中尺度系统内散度与垂直速度场的分布显示，中尺度气旋性涡旋内存在一高空强辐散与低空辐合相伴的强垂直上升气柱。耦合发展的涡旋内上升运动及高空强辐散、低空辐合的散度场随着中尺度系统的发展而逐渐增强。图 15 是区域 D03 模拟得出的 5 日 1700 UTC 散度和垂直速度沿 121.25°E 的垂直分布。从图中可以看出，系统发展强盛时，上升运动与低层的辐合、高层的辐散均达到最强，强上升运动中心位于对流层中上层，约为 10 m s^{-1} 。涡柱内低层辐合、高层辐散，且高层辐散一直大于低层辐合的结构，不仅利于上升运动的加强，而且还利于涡柱上空抽吸作用的加强，进而促进

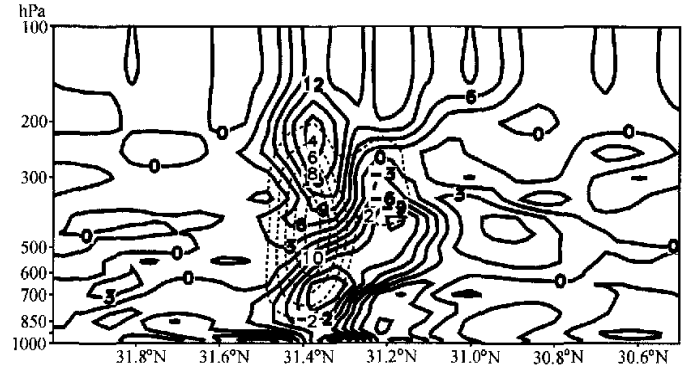


图 15 区域 D03 模拟的 5 日 1700 UTC 散度、垂直速度沿 121.25°E 垂直分布
实线：散度，单位： 10^{-4} s^{-1} ；虚线：垂直速度，单位： m s^{-1}

中尺度系统的发展。另外,强上升气柱还与涡旋内深厚湿舌相伴,这种相伴互耦的结构使得低层水汽、能量可以不断输送至系统高层,从而维持系统的发展,并产生暴雨。

7.3 中尺度系统的发展演变

由于合理的模拟结果可提供一些常规观测网无法观测到的物理量,如大气中各种形态的水物质含量。因此利用这些模拟结果,我们有可能对中尺度系统的发展演变过程作进一步的研究。

雷达回波强度的变化与中尺度系统的发展演变具有较好的对应关系,因此常通过模拟雷达回波的分析来作中尺度系统发展演变分析。利用模式输出的气压、温度、水汽、雨水、雪、霰的混合比计算模拟雷达回波的方法如下^[25],

$$R_F = 10 \times \lg 10 \times \max\{1, [\rho q_r]^{1.75} \times 3.630803 \times 10^{-9} + (\rho q_s)^{1.75} \times 2.18500 \times 10^{-10} + (\rho q_g)^{1.75} \times 1.033267 \times 10^{-9}\} \times 10^{18}\},$$

其中, R_F 为模拟的雷达回波, ρ 为大气密度 ($\rho = p/(R_d T_v)$), p 为气压, R_d 为空气气体常数, T_v 为虚温,可由模式输出的温度、水汽混合比计算得出。), q_r 、 q_s 、 q_g 分别为模式输出的雨水、雪水、霰混合比。

通过分析强降水期间区域 D03 模拟的雷达回波发现,尽管模式模拟中存在虚假的降水,使得模拟的雷达回波范围偏大,且可能还有虚假的强回波出现,但利用其对暴雨期间结构稳定且发展明显的中尺度系统进行分析还是可行的。模拟的雷达回波图上,5日0800 UTC以后强度大于20 dBZ的回波出现在上海西侧及南部,回波在迅速移向上海东部和北部过程中造成上海地区局地降雨的开始;之后,随着新生小回波的不断东移合并,5日1600~1700 UTC形成一基本覆盖了整个上海地区中心强度达55 dBZ的强回波,回波可伸至200 hPa附近(图16)。虽然模拟的回波尺度、强度弱于上海雷达观测到的,雷达观测显示,1614 UTC覆盖了整个上海地区且发展成熟的螺旋状对流云团强度为65 dBZ,最强回波顶高可伸至17 km左右。但模拟的雷达回波连续演变对于揭示中尺度系统的发展演变还是具有较好指示意义的。

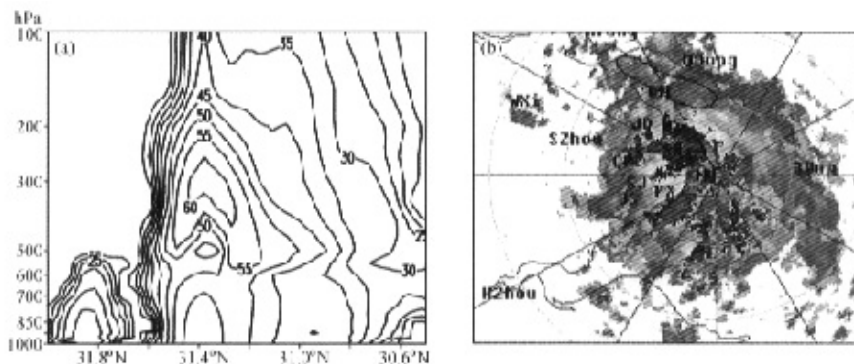


图16 (a) 区域D03模拟的5日1700 UTC雷达回波沿121.25°E垂直分布
和 (b) 观测的5日1632 UTC多普勒雷达组合反射率分布(单位: dBZ)

CS: 川沙, SH: 上海, NH: 南汇, FX: 奉贤, BS: 宝山, SJ: 松江, JS: 金山, QP: 青浦, JD: 嘉定,
CM: 崇明, SZhou: 苏州, WXi: 无锡, HZhou: 杭州, NBo: 宁波, QDong: 启东, NTong: 南通

7.4 中尺度系统发展过程中局地环境变量分析

中尺度系统的发生发展,除有利的大尺度环流背景外,当地的天气形势及大气变量更为重要。因此,对于此次强局地性中尺度系统,了解上海当地的大气变量分布和演变对于弄清这场暴雨为何发生在上海市区以及暴雨发生的有利环境条件是十分必要的。为此,利用区域 D03 的模拟结果,我们分析了中尺度系统发生发展过程中上海局地 A 点 (31.12°N , 121.26°E) 附近温、湿、风的分布演变。

从风场的变化可知,初期,除边界层低层为东南风和对流层高层为西北风外,上海地区 500 hPa 以下一直为南风控制,有利的风场使得上海地区具备充沛的水汽;之后,随着热带低压的移近,各层风场均发生变化,除对流层低层风速加强外,各层风向也随时间逐渐顺转;暴雨期间,该地区的风场结构为对流层中下层西南风,对流层高层西(西北北)风。局地风场的演变表明上海地区不仅对流层低层存在较强的暖平流,而且对流层中下层还存在较强的水汽输送。风速的增强和风向的转变略早于热带低压内中尺度系统发生。

另外,从温度、露点、相对湿度曲线变化来看,降雨前,上海地区对流层中下层的温度露点差较大,且相对湿度基本在 75% 以下;随着降雨的发生, A 点的温度露点差明显减小,特别是强降雨后对流层中上层,温度露点差接近于零,而且相对湿度也加强接近 90%。

局地水汽、能量的分布对于中尺度系统发展是极为重要的。在水汽充足的有利条件下,中尺度系统内的强上升运动与局地对流有效位能密切相关。分析 A 点状态与层结曲线的分布发现,5 日 0000~0700 UTC 中尺度系统发生前的时段内,该处的湿空气层逐渐增厚,同时对流有效位能也不断增大;5 日 0700 UTC 对流有效位能 (CAPE) 可达 $2\,144\text{ J kg}^{-1}$,表明上海地区已具备暴雨中尺度系统发生发展所需的水汽、能量条件(图 17);之后,随着中尺度系统的发生,该地聚集的对流有效位能不断得以释放,从而维持、加强中尺度系统内的强上升运动和强暴雨的发生;5 日 1900 UTC 趋于结束的强降雨使得该处对流层各层的温度、露点相差无异(图略),此时,对流有效位能约为 277 J kg^{-1} ,表明聚集的对流有效位能绝大部分得以释放,释放的对流有效位能为暴雨中尺度系统发生发展提供了必要的能源。

通过对暴雨期间热带低压内中尺度系统的结构和演变分析,可以知道,中尺度系统具有强上升运动与整层饱和气柱互伴,低空辐合、高空强辐散的散度柱与强涡度柱互耦发展,涡旋内低层湿静力不稳定和对流层高层较暖的结构。中尺度系统的强上升运动中心位于 500 hPa 附近,上升气柱内相对湿度基本上整层均达 90%,即中尺度系统的强上升运动与整层饱和气柱的互伴,这可能是导致上海地区突发特大暴雨的关键。另外,相互叠置的对流层低层辐合区、对流层高层强辐散区,形成一与强上升运动相伴的散度柱,在涡度方程的动力约束下,该散度柱与强烈发展的气旋性涡柱互耦,这种互伴互耦的结构是上升运动加强和暴雨持续的重要机制。再者,暴雨过程中,涡柱下部 850 hPa 以下假相当位温随高度的降低即 $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$,表明涡柱低层为湿静力不稳定层,而其上 700~500 hPa 附近则为湿中性层,强烈发展的涡柱下部的热力结构,也可能是中尺度系统湿对流运动发展的一重要因素。而涡旋内对流层中上层“相对暖心”的加强应与强降雨释放的凝结潜热有关。

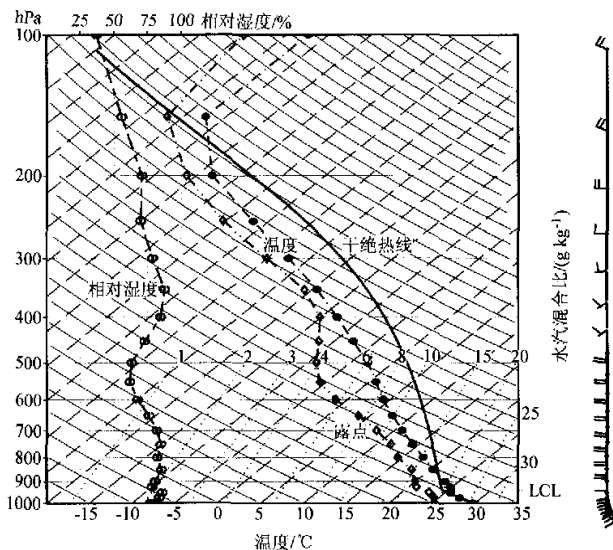


图 17 DO3 模拟的 5 日 0700 UTC A 点 (31.12°N, 121.26°E) 状态与层结分布
K 指数为 38, 对流有效位能为 2 144 J

8 结论与讨论

本文将逐时卫星红外云图中的云顶亮温及上海地面自动站温度等非常规观测资料, 直接用于非静力中尺度数值模式 MM5V3 的四维同化系统中, 并利用该模式对 2001 年 8 月 5~6 日上海特大暴雨过程进行了模拟研究。研究表明, 在包含全物理过程的非静力中尺度数值模式中, 同时采用向分析场张弛逼近和向非常规观测值张弛逼近的四维资料同化方案, 不仅可以较好地再现出大、中尺度天气系统的结构与演变过程, 而且模拟的降雨效果可信度也较好。在充分验证该方案对此次降雨过程具有较好模拟能力的情况下, 认为将较高时空密度的非常规观测资料用于高分辨率的 MM5 中尺度数值模式, 对于改进城市灾害性暴雨的落区及强度等预报是必要和有意义的。在此基础上我们还利用模式输出的高时空分辨率模拟结果, 对暴雨过程中水汽输送、集中能力及热带低压内中尺度系统的结构和发生发展演变进行了细致分析, 得到以下结论:

(1) 8 月 5 日午后移入上海地区的热带低压, 受稳定在海上的西太平洋副热带高压的“阻挡”在上海地区停滞了一夜, 并于次日晨东移入海。入海前低纬海洋源源不断的暖湿空气输送使得热带低压重新加强, 为暴雨提供了十分有利的环流背景, 而热带低压内中尺度系统特有的动力、热力结构更有利于暴雨的发生。

(2) 将 GMS 红外云图的云顶亮温及上海地面自动站温度等非常规观测资料, 直接用于非静力中尺度数值模式 MM5V3 的四维同化系统中的模拟研究表明, 模式中非常规观测资料的同化不仅可以成功地模拟出降雨过程各种尺度系统的发展、演变, 而且还较好地模拟出此次强局地突发暴雨的落区、雨强, 特别是局地降雨随时间的演变。

这对利用高分辨模式模拟结果来研究城市暴雨灾害是有益的尝试。

(3) 大量水汽的源源不断供应及其在上海地区的聚集对于热带低压登陆后的维持、加强和上海暴雨的发生具有重要意义。强风速区轴线与水汽通量舌轴线一致, 使得湿舌走向与低空急流一致。热带低压移近上海后, 低空急流左侧风场的辐合使得上海附近对流层低层水汽通量辐合。低层水汽通量的辐合集中在强水汽输送带上大风速区的左侧。聚集的水汽被上升气流输送到对流层中上层, 用以维持对流云团发展, 产生暴雨。

(4) 中尺度系统的结构和发展演变分析显示, 直接造成暴雨的中尺度系统在垂直向上是一具有强上升运动与整层饱和气柱互伴, 散度柱与强湿度柱互耦发展, 低层湿静力不稳定, 涡旋内高层相对较暖结构的气旋性涡柱。暴雨发生前上海地区聚集的对流有效位能为其发展提供了必要的能源。尽管模拟的雷达回波对中尺度系统的描述较上海雷达观测的偏弱, 但对于揭示中尺度系统发展、演变仍具有较好的指示意义。

总之, 利用非静力中尺度数值模式 MM5V3 对此次上海特大暴雨过程的模拟研究表明, 研究城市灾害性暴雨天气系统、暴雨落区及雨强时, 将具有较高时空分辨率的非常规观测资料恰当地用于非静力中尺度数值模式, 不仅可以成功地模拟出各种尺度系统的发展、演变及暴雨的分布, 而且可为探索城市暴雨灾害的成因提供更多有用的信息和思路。

致 谢 曾庆存院士对本研究工作给予了热情指导和帮助, 并提出了宝贵的意见; 中国气象科学研究院“973”资料项目组及上海市气象局为研究工作提供了特殊加密观测资料, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Bei Naifang, Zhao Sixiong, and Gao Shouting, Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998, *Meteor. Atmos. Phys.*, 2000, **80**, 153~164.
- 2 Anthes, R. A., E. Y Hsie, and Kuo Yinghua, Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4), NACR Technical Note, NCAR/TN-282+STR, 1987, 66pp.
- 3 贝耐芳、赵思雄, 初值及物理过程对“98·7”暴雨预报结果的影响, *气候与环境研究*, 2002, **7** (4), 386~396.
- 4 王鹏云、刘春涛, 1996年第8号台风中尺度结构的数值模拟研究, *气象学报*, 1998, **56** (3), 296~311.
- 5 Chen Shoujun, Kuo Yinghua, Wang Wei, Tao Zuyu, and Cui Bo, A modeling case study of heavy rainstorms along the MeiYu front, *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**, 2330~2351.
- 6 孙建华、赵思雄, 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究, *大气科学*, 2000, **24** (3), 381~392.
- 7 陈红、孙建华、赵思雄、曾庆存, 青藏高原人工水汽通道对西北地区夏季降水及环流的影响, *气候与环境研究*, 2001, **6** (4), 371~379.
- 8 赵琳娜、孙建华、赵思雄, 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究, *气候与环境研究*, 2002, **7** (3), 279~294.
- 9 Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NACR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 1994, 138pp.
- 10 Dudhia, J., A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR meoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**, 1493~1513.
- 11 Anthes, R. A., Data assimilation and initialization of hurricane prediction models, *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**, 702~719.

- 12 Kistler, R. E. . A study of data assimilation techniques in an autobarotropic primitive equation channel model, M. S. thesis, The Pennsylvania State University, 1974, 84pp.
- 13 Davis, H. C. , and R. E. Turner, Updating prediction models by dynamical relaxation, An examination of the technique, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* , 1977, **103**, 225~245.
- 14 Hoke, J. E. , and R. A. Anthes, The initialization of numerical models by a dynamical initialization technique, *Mon. Wea. Rev.* , 1976, **104**, 1551~1556.
- 15 Stauffer, D. R. , and N. L. Seaman, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model, Part I : Experiments with synoptic-scale data, *Mon. Wea. Rev.* , 1990, **118**, 1250~1277.
- 16 Bell, R. S. , The meteorological office fine-mesh data assimilation scheme, *Meteor. Mag.* , 1986, **115**, 161~177.
- 17 Stauffer, D. R. , N. L. Seaman, Aal-data numerical study and four-dimensional data assimilation application for mesobeta-scale flow in complex terrain, Proc. Symp. Mesoscale Analysis and Forecasting, Vancouver, ESA, 1987, 533~538.
- 18 Kuo Yinghwa, and Guo Yongrun, Dynamic initialization using observations from a hypothetical network of profiles, *Mon. Wea. Rev.* , 1989, **117**, 1975~1998.
- 19 Mills, G. A. , and S. X. Zhao, A study of a monsoon depression bring record rainfall over Australia. Part I : Numerical predictability experiments, *Mon. Wea. Rev.* , 1991, **119**, 2053~2073.
- 20 Davidson, N. E. , and Kamal Puri, Tropical prediction using dynamical nudging, satellite-defined convective heat sources and a cyclone bogus, *Mon. Wea. Rev.* , 1992, **120**, 2501~2522.
- 21 周霞琼、朱永提, 非对称的非绝热加热对热带气旋移动影响的数值研究, 应用气象学报, 1999, **10** (3), 283~291.
- 22 孟智勇、徐祥德、陈联寿, 卫星亮温资料四维同化方案及其对“7·20”武汉特大暴雨的模拟试验, 大气科学, 2002, **26** (5), 663~676.
- 23 程麟生、郭英华, “81·7”四川暴雨期西南涡生成和发展的涡源诊断, 大气科学, 1988, **12** (1), 18~26.
- 24 程麟生、Kuo YingHwa、彭新东, 中国暴雨中尺度系统发生与发展的诊断分析和数值模拟. II: 数值模拟, 应用气象学报, 1993, **4** (3), 269~277.
- 25 张庆红, 台湾海峡上空中尺度对流系统的数值研究, 北京大学博士学位论文, 143pp.

A Numerical Simulation of the Heavy Rainfall in Shanghai Using Non-conventional Observational Data

Qi Linlin, and Zhao Sixiong

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The strong heavy rainfall occurred in Shanghai during 5~6 August 2001. Synoptic analyses indicate that the landed tropical cyclone (TC) and east to it, the western Pacific subtropical high were the favorable circulation conditions to this extraordinary heavy rainfall. The heavy rainfall was mainly associated with the mesoscale convective systems developing in TC. The nonhydrostatic mesoscale numerical model MM5V3 was applied to simulate this case. During the simulation, the non-conventional observational data, including automatic meteorological stations data and satellite data were directly adopted in nudging four-dimension data assimilation process of MM5V3. The simulated results implied that the prediction of heavy rainfall may be improved when non-conventional observational data were assimilated into numerical model. The simulation of the full physics processes of MM5V3 was basically possessed of a ca-

pability to reproduce the development and evolution of large-scale weather systems and tropical cyclone. The analysis of simulated results revealed that the specific dynamical and thermodynamical structures of mesoscale convective system in tropical cyclone were directly related to this heavy rainfall. The intense south wind jet stream below 500 hPa accompanying with the tropical cyclone was not only the favorable condition of the development and maintenance of the TC and convective cloud clusters, but also the moisture source and heat energy transport belt of this heavy rainfall.

Key words: heavy rainfall; mesoscale convective system four-dimensional data assimilation; numerical simulation