

张德林, 马雷鸣. “0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J]. 气象, 2010, 36(3): 62-69.

“0730”上海强对流天气个例的 中尺度观测分析及数值模拟^{*1}

张德林¹ 马雷鸣²

¹ 上海市青浦区气象局, 上海 201700

² 上海台风研究所, 上海 200030

提 要: 利用上海多普勒雷达、中尺度自动站等资料和中尺度数值模式 WRF 模拟结果, 分析了 2005 年 7 月 30 日发生、在上海地区的一次强对流天气(简称“0730”)的发生、发展过程。结果表明, 边界层中尺度辐合线和扰动能够在弱冷空气南下和局地中小尺度斜压不稳定的背景下产生, 中尺度扰动不稳定随垂直运动上传, 触发对流; 低层高湿度梯度的大气层结、垂直风向剧烈非均匀切变和能量锋区的耦合配置, 促进了强对流的迅速发展。结合数值模拟和诊断分析初步揭示了这次强对流过程发生冰雹、暴雨、大风等天气的原因。

关键词: 强对流天气, 数值模拟, 诊断分析

Mesoscale Observation and Simulation on 30 July 2005 Severe Convective Case in Shanghai

ZHANG Delin¹ MA Leiming²

¹ Qingpu Weather Office, Shanghai 201700

² Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030

Abstract: A severe convective case, occurring in Shanghai on 30 July 2005, is examined with the composite datasets from WSR-88D Doppler radar, automatic weather stations and mesoscale numerical model WRF. It is found that the occurrence of mesoscale convergence lines was mainly induced by the southward intrusion of weak cold front and the pre-existed local mesoscale baroclinic instability. The growth of these mesoscale boundary layer disturbances within the convergence lines was favored by the dynamical cooperation among high gradient of moisture, strong vertical wind shear, and energy front within the lower troposphere, resulting in the abrupt growth of the convection. Mechanisms for the simultaneous occurrence of hail, heavy rainfall and gale during this severe convection are also analyzed.

Key words: severe convective weather, numerical simulation, diagnostic analysis

引 言

雷雨大风、强雷暴、冰雹、龙卷等强对流天气由于生命史短、空间范围小、天气变化剧烈, 是目前国内外天气预报中的一大难题。对于强对流天气过程

特征的研究, 过去较多采用常规观测资料进行诊断分析, 但是由于常规资料时空分辨率较低, 诊断结果具有一定局限性。近年来高分辨率的中尺度数值模式的迅速发展, 使通过数值模拟揭示强对流天气过程的结构特征和发生机制成为可能。毛冬艳等^[1]运用非静力中尺度数值模式对 2004 年 7 月 10 日北京

* 上海市气象局 2005 年预报员研究专项(项目编号 2005Y1)和上海市科委重大项目(06DZ12011)联合资助
2008 年 11 月 27 日收稿; 2010 年 1 月 29 日收修定稿
第一作者: 张德林, 主要从事天气预报工作. Email: zdl_qp@163.com

局地暴雨的中尺度系统进行数值模拟和分析,模拟结果反映了中低层中尺度辐合线和低压,在发展旺盛阶段具有低层辐合、高层辐散及暴雨区上空垂直上升运动强烈发展的结构特征;齐琳琳等^[2]用中尺度数值模式模拟了2003年7月4—5日南京地区的一次强雷雨过程,较好地模拟出降雨过程中各尺度天气系统的发展、演变和雨强、落区;马雷鸣等^[3]通过高分辨率数值模式模拟了2004年7月12日发生在上海地区的“飏线”强对流天气过程,分析了地表能量输送和对流层中高层位涡下传对这次过程的作用;吴涛等^[4]用数值模式模拟出十堰市一次强对流天气过程中的中尺度天气系统,对于强对流天气的识别和预报有一定的指导意义;隋东等^[5]对沈阳地区一次冰雹天气过程形成机制进行了数值模拟和分析,并与实况观测资料作比较,成功地模拟出中尺度强对流天气系统演变规律、触发机制,为冰雹强对流天气的预报提供有应用价值的思路和方法;付丹红等^[6]较好地模拟了北京地区一次强风暴的生命史、降水、降雹的分布、伴随强风暴过程所产生的下击暴流及近地面强风速切变,对该地区大风和冰雹天气形成的机理研究具有重要的意义。此外,许多文献应用数值模式对风暴系统发生、发展机制、结构与环境的关系进行了理论研究^[7-12]。这些研究无疑对我们认识强对流天气提供了重要参考。近年来,上海接连发生了多次强对流天气过程,对该地区的人民生活造成了严重影响。为提高预报能力,亟需对这些过程进行深入分析,了解其发生、发展机制。本文选择了2005年7月30日上海地区的一次典型强对流天气过程,利用多普勒雷达、自动气象站等观测资料和WRF中尺度数值预报模式,分析和揭示了这次中尺度强对流天气发生、发展的物理机制,检验了高分辨率模式对这次过程的预报能力,为提高上海地区强对流预报能力积累了经验。

1 天气实况和环流背景

2005年7月30日上海地区出现了大暴雨和大风天气(图1)。由图1可见,青浦东部、闵行、市区南部、南汇北部以及浦东南部有一条自西向东横穿上海中部的暴雨带(30日08时至31日08时雨量超过50 mm/24 h)。其中浦东部分地区雨量超过100 mm/24 h。浦东南浦大桥16时14分出现了 $29.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风;嘉定朱桥、江桥等地15时30

分至16时也先后出现8~9级大风。浦东机场镇16时05—16分甚至出现冰雹。

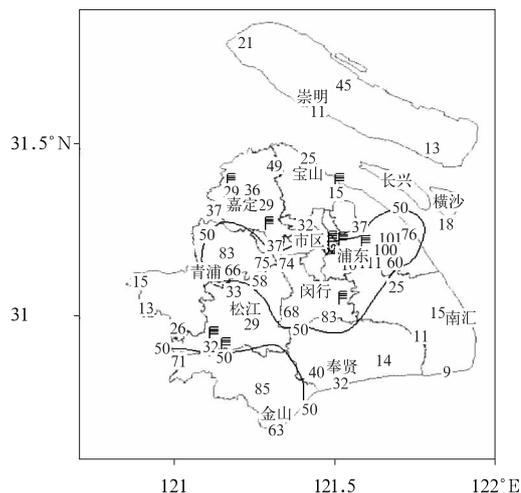


图1 上海地区7月30日08时至31日08时
况雨量(实线及数字,单位:mm)和8级大风布图
Fig. 1 Observed 24-h accumulated precipitation
(real line, unit:mm, 00 UTC 30 July—00 UTC 31 July)
and 8-grade gale in Shanghai

分析这次强对流天气的环流背景(图2a)。2005年7月29日起,副热带高压加强并西伸,到7月30日08时,副热带高压控制华东南部地区,588 dagpm等高度线从闽南经赣西、皖南延伸到上海,120°E的副高脊线在28°N附近。同时,在副高西北侧从辽东经渤海、鲁中、皖西到鄂中有一支西风槽。上海及江苏中南部地区处于副高北侧、西风槽前的上升运动区,槽前西南气流平均风速为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有利于水汽输送。30日20时西风槽东移至辽东到黄海一带,上海500 hPa高空风向由30日08时的西南偏西到30日20时转为西北偏西,西风槽东移引导弱冷空气向东南方向输送。

30日08时华东地区处于弱低气压区内,弱冷空气沿吕泗、常州、南京南下,呈一条风场辐合线;到14时弱冷空气南移至上海、苏州、溧阳(图2b)。同时,上海及江苏中南部地区地面露点温度26~28℃,近地层水汽条件较好。可以看出,这种中高纬度高低空环流的配置,为强对流的发生提供了较有利的背景条件。

2 强对流中尺度特征观测

2.1 上海南汇多普勒雷达回波特征

对南汇WSR-88D多普勒雷达回波基本反射率

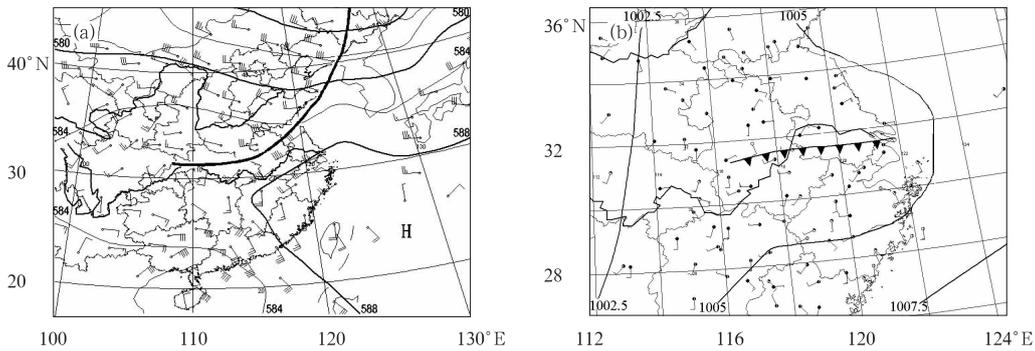


图 2 2005 年 7 月 30 日 08 时 500 hPa 高度场分析(a,粗实线为槽线)、14 时地面天气图(b)

Fig. 2 Observed 500 hPa heights (a, bold for the trough line)

at 00 UTC 30 July and the surface synoptic analysis (b) at 06 UTC 30 July 2005

因子(图略)进行了分析。30 日 12 时 36 分宝山北部生成第一块回波,该回波强度 40 dBz、回波直径 5~10 km、持续约 20 分钟。13 时浦东东部沿江到长兴岛间生成第二块回波,强度为 50 dBz;15 时 15 分该回波与浦东西南地区 15 时 03 分生成的回波连成一片,形成第三块回波,强度 45~50 dBz、回波直径约 30 km,覆盖浦东大部地区,并持续 4 h 左右。这三块强回波随后继续发展,其风雨影响范围覆盖了上海市区及其所有区县。除了这三块具有明显的 β 中尺度强对流天气特征的回波外,还有一些分布较散,空间尺度在 10 km 以下,时间尺度在 1 h 以内具有 γ 中尺度甚至更小尺度的强回波区。而在三块 β 中尺度雷达回波区内还有呈有组织排列的更小尺度、强度更强的回波中心。当回波强度 50 dBz 以上或出现弓状回波时,对流发展旺盛,出现雷雨大风、强降水等。

2.2 上海地区自动站风场资料分析

利用上海 59 个中尺度自动站逐小时风场资料分析了地面矢量风场辐合特征。30 日 08 时上海地区以偏南气流为主,地面无辐合线或辐合区;09 时起,宝山沿江到崇明之间有一条长约 40 km 的东南—西北向中尺度辐合线;在松江东南部和金山东北部有中尺度辐合区;10—16 时是上海地区地面中尺度辐合发展比较旺盛的时段。图 3 给出了 30 日 10 时、12 时和 14 时上海地面矢量风场变化。10 时,自浦东中北部沿江、宝山沿江到嘉定北部、以及从嘉定东南部到市区北部各有一条中尺度辐合线;12 时,从崇明、嘉定、宝山经市区北部到浦东北部发展为最强的中尺度辐合线;14 时,从南汇北部经浦东中部、市区中部到嘉定南部为一条中尺度辐合线,长约 50 km;17 时后,

上海地区地面辐合逐渐减弱消失。

自动站资料与雷达回波对比分析发现,自动站中尺度辐合线或辐合区出现后 0.5~3 h,其附近地区出现雷达回波,这可能对雷暴天气的临近预报有一定的指示作用。

2.3 上海宝山探空资料诊断分析

当中尺度辐合触发上升运动后,空气质块所受到的浮力作用(可用对流有效位能 CAPE 表示)决定了对流的强弱和冰雹出现的可能性;已有研究还表明,适宜的 0 °C 和 -20 °C 层高度也是决定冰雹生长的重要因子;冰雹发生时,0 °C 层高度一般在 4 km(600 hPa)上下,-20 °C 层高度在 7.5 km(400 hPa)附近^[13]。利用上海宝山探空站 7 月 30 日 08 时资料计算的 CAPE 为 3474 J·kg⁻¹,14 时达 4169 J·kg⁻¹(表 1);而两个时刻的 0 °C 层高度为 5 km,-20 °C 层高度为 8.2 km,提供了强对流和冰雹生长的条件。

表 1 上海宝山探空站 7 月 30 日诊断物理量

Table 1 Diagnostic physical variables (30 July) at the Baoshan Station of Shanghai

时次	H	CAPE	EHI
08 时	125.2	3474	2.7
14 时	150.3	4169	3.9
20 时	42.0	1183	0.3

强对流与超级单体的存在密不可分。Davies 等^[14]定义了能量螺旋度指数: $EHI = CAPE \times H$ (风暴相对螺旋度)/ 1.6×10^{-5} ,并将该指数用于超级单体预报。他们的研究表明:当 $EHI > 2 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-4}$ 时,出现超级单体的可能性极大,而 EHI 的值越大,出现超级单体的可能性越大。表 1 为根

据上海宝山探空站7月30日资料计算的 H 、 $CAPE$ 、 EHI 等环境参数值变化情况,从中可以看出,从08时到14时, H 、 EHI 和 $CAPE$ 都有明显增长的过程;14时 H 为 $150.3\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $CAPE$ 为 $4169\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 EHI 为 $3.9\text{ m}^4\cdot\text{s}^{-4}$,高能量螺旋度的环境提供了超级单体发展的可能;而14时之后到20时又迅速减弱,这种能量变化过程也对应了强对流的迅速发展和减弱过程。

3 数值模拟结果及诊断分析

3.1 数值模拟方案设计和降水模拟

在观测验证的基础上结合高分辨率数值模式分析了这次强对流过程的成因。模式选用美国大气科学研究中心(NCAR)开发的天气研究和预报模式(WRF)V2.1版本。采用 $27\text{ km}-9\text{ km}-3\text{ km}$ 三重双向嵌套区域,垂直方向设为31层,模式顶取为 10 hPa 。其中 27 km 外区格点数 271×271 、覆盖整个中国和西北太平洋; 9 km 内区格点数 241×241 、覆盖华东地区; 3 km 内区格点数 241×241 、水平分辨率 3 km 。边界层取YSU参数化方案,模式背景场资料由美国NCEP/GFS模式水平分辨率为 $1^\circ\times 1^\circ$ 的全球分析场提供。模拟的时段为2005年7月30日08时至31日08时,为分析强对流系统的精细结构,以下结果主要由 3 km 内区模拟得出。

比较30日08—20时模式模拟和实况累计降水量(图略)表明,模拟雨带范围和时段与实况比较接近,但累计降水量是实况的约 $1/3$ 。模拟最大降水在崇明西北部地区和该地以南地区,雨量中心 $>30\text{ mm}/12\text{ h}$,比实况最大降水位置偏西北约 50 km ;模拟的次大雨量中心($>25\text{ mm}/12\text{ h}$)在青浦以西地区,比实况位置亦偏西北约 30 km ;模拟的降水时段主要集中在15—18时,与实况基本一致。尽管模式模拟结果偏弱,但已经模拟出了上海地区的强降水分布范围和发生时段,其模式分析结果已可供参考。

3.2 边界层中尺度辐合线

图3给出了 3 km 模式区域模拟的30日10—14时地面风场矢量图。10时,崇明岛、宝山北部沿江和嘉定北部沿江各有一条东南—西北向中尺度辐合线;这与雷达观测的第一块回波相对应。12时,崇明岛内辐合线维持,另一条中尺度辐合线在浦东、宝山、嘉定沿江地区,辐合线南侧的偏南暖湿气流与

辐合线北侧的东北干冷气流辐合,对应于雷达观测的第二块、第三块回波(位置略有差异)。14时,崇明岛内中尺度辐合线继续维持;浦东、宝山和嘉定沿江的辐合线南移至浦东中部、市区中部、宝山南部及嘉定南部。16时崇明岛内的辐合线明显减弱;而浦东中部、市区中部为东西向辐合线;金山西部、青浦和嘉定西南部的中尺度辐合线仍维持;嘉定西北部出现辐散气流(上海自动站观测最先出现大风的位置也在该地)。综上所述,数值模式基本模拟出了三块强对流区(回波区)的发展过程和分布特征,但模拟的中尺度辐合线(辐合区)出现时间早于相应雷达回波和雷暴 $1\sim 3\text{ h}$ 。

与中尺度自动站资料分析的地面矢量风场比较,模式模拟的中尺度辐合线(辐合区)最早出现于09时,17时起明显减弱;主要的辐合线(如浦东、宝山和嘉定沿江的辐合线,崇明岛内的辐合线等)模拟结果与自动站观测辐合线(辐合区)空间分布基本一致,时间比观测提前半小时左右。同时分析地面、 1000 hPa 、 950 hPa 、 925 hPa 和 900 hPa 流场发现,各层的辐合线(辐合区)位置与地面都比较接近,但高层与低层相比辐合线(辐合区)出现的时间依次有不超 1 h 的滞后,强度依次减弱,说明气流辐合和扰动主要从边界层开始,然后逐渐上传。

以上数值模式结合自动站资料、雷达中尺度分析证明了边界层中尺度辐合线的存在,提供了暴雨等强对流天气发生的基本条件^[15-16]。

3.3 上升运动特征

图4是 3 km 模式区域模拟的30日14—17时强对流位置处的垂直速度纬向剖面图。可以看出,14时上海西部(121°E 附近)低层为上升运动,主要上升运动在 850 hPa 以下,垂直速度 $0\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;15时上升运动中心位置东移,上升运动迅速加强,主要上升运动在 $850\sim 500\text{ hPa}$ 高度,垂直速度 $>1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,上升运动最强在 700 hPa 高度,垂直速度达 $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上;此时对流旺盛,在上升运动前方出现下沉运动,也是出现强回波和集中降水时段。16时对流加强,上升运动中心位置继续东移,在前方出现强下沉气流, 600 hPa 高度垂直速度达到 $-2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在强上升气流的前方出现干冷下沉气流,这是风暴内部降水质粒的重力拖曳和云下的融化、蒸发冷却过程驱动并加强下沉气流的结果,强下沉气流到达地面后形成很强的地面流出

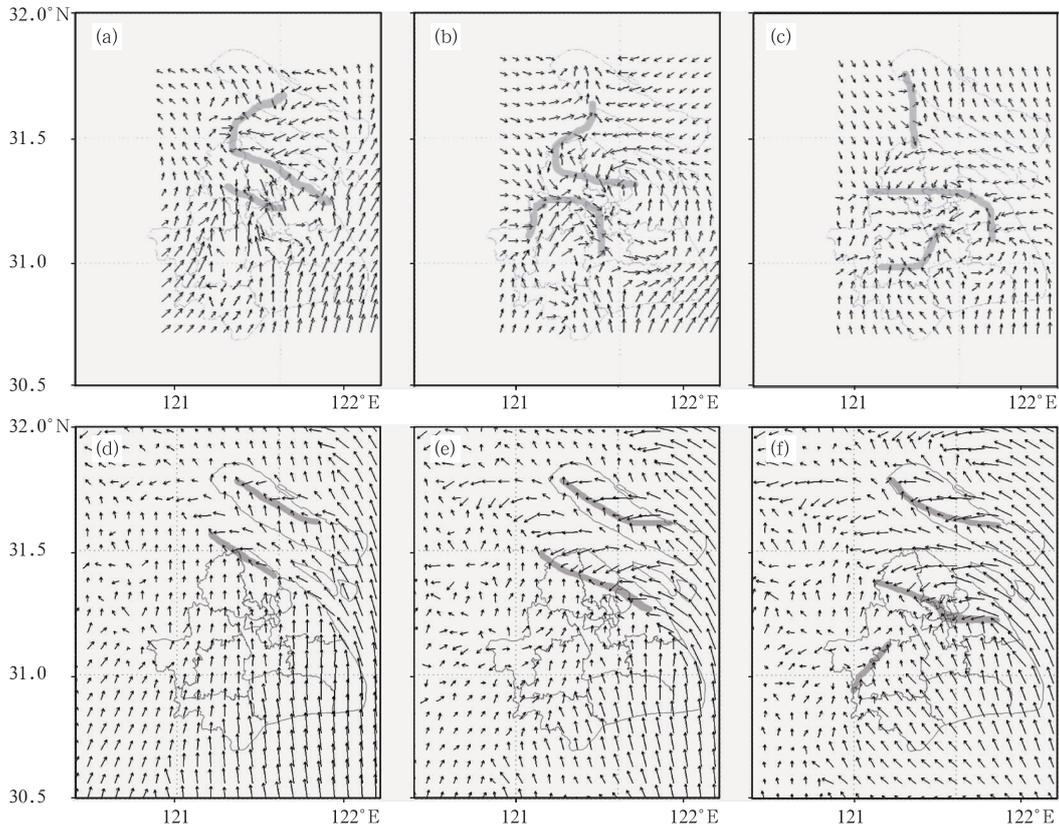


图 3 自动站观测 2005 年 7 月 30 日 10 时(a)、12 时(b)、14 时(c)上海地面水平风场
和数值模拟的 30 日 10 时(e)、12 时(f)、14 时(g)地面风场矢量图(粗线为辐合线)

Fig. 3 Surface horizontal wind fields observed by automatic weather station on 30 July 2005 (a; 02 UTC; b; 04 UTC; c; 06 UTC) and wind vectors simulated by WRF (e; 02 UTC; f; 04 UTC; g; 06 UTC) (the convergence line is indicated by the shaded bold line)

并向四周辐散,导致了局地地面强阵风。17 时上升运动和下沉气流明显减弱。从垂直速度纬向剖面图的时间变化看,强上升运动由边界层辐合线或辐合区触发,垂直速度时空变化较好地反映了对流的发展过程。而分析散度纬向剖面图发现(图略),14—17 时上海地区 900 hPa 以下各层为辐合区(散度为 $0 \sim -2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$),900 hPa~400 hPa 为弱辐散区(散度为 $0 \sim 0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$),400 hPa 以上为强辐散区($>0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$),有利于上升运动的维持和对流发展。分析还发现,这次强对流是有组织而深厚的系统,其对流高度达到 300 hPa,且持续时间长(2 h 以上),提供了产生强雷暴、冰雹等强对流天气有利条件^[17]。

3.4 水汽条件

850 hPa 相对湿度模拟结果(图略)表明,30 日 13—17 时,从金山西部、经松江南部、闵行南部、南

汇西北部、浦东中部为一西南—东北向等湿线密集带(露点锋),从浦东中部经浦东、宝山、嘉定沿江一线为东南—西北向等湿线密集带,两条等湿线密集带所围的区域相对湿度 85% 以上,为湿区;所围的区域以外相对湿度 75% 以下,为相对干区;另外崇明中部到西部为东南—西北向等湿线密集带和相对湿度 85% 以上的湿区。可以发现,宝山北部、浦东东部、西部、崇明东部等的强回波都出现在等湿线密集带上或附近,或发生在湿区。可见等湿线密集带和湿区位置与回波发展及强对流发生区基本一致;等湿线密集带和湿区出现的时间基本在回波发生前约 2 小时到强对流发展较旺盛的时段。与地面矢量风场比较,崇明岛内辐合线,浦东沿江、宝山沿江和嘉定北部沿江一线辐合线,金山西部、松江东南部辐合区等与露点锋位置有较好的对应关系。

图 5 为 30 日 14—17 时沿 31.5°N 相对湿度纬向剖面图,14 时上海西部 900~800 hPa 层为湿层,

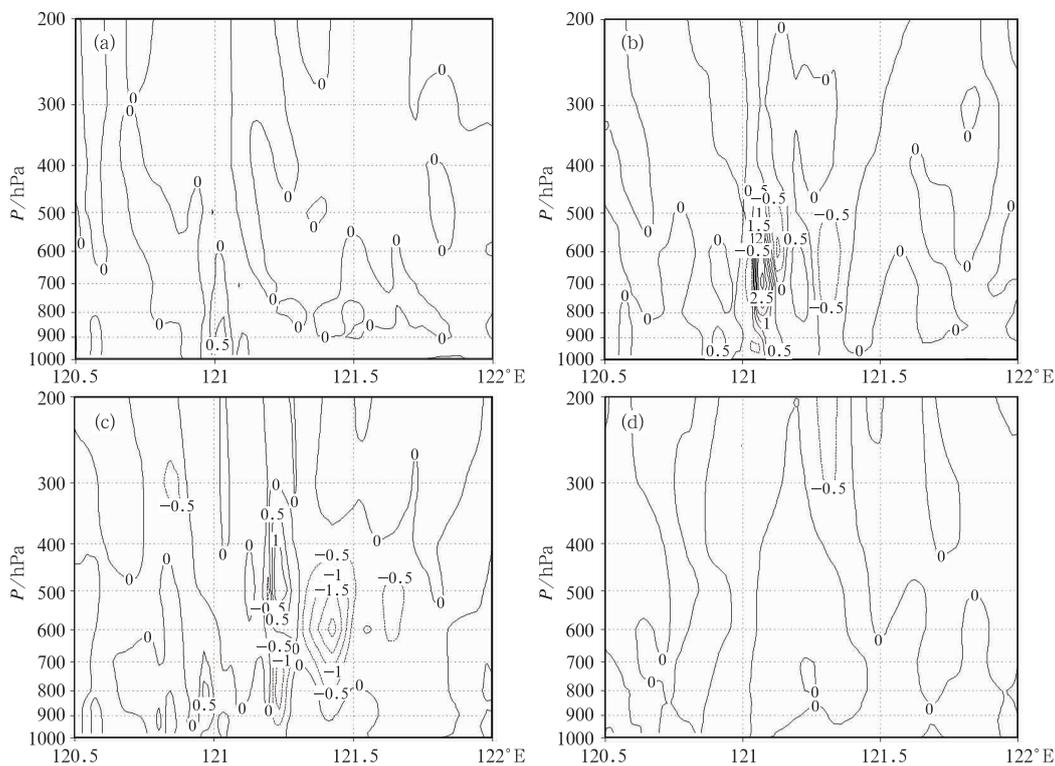


图 4 2005 年 7 月 30 日 14—17 时沿 31.5°N 垂直速度纬向剖面图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a)14 时; (b)15 时; (c)16 时; (d)17 时

Fig. 4 The zonal cross-section of vertical velocity on 30 July 2005 along 31.5°N (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; (a) 06 UTC; (b) 07 UTC; (c) 08 UTC; (d) 09 UTC)

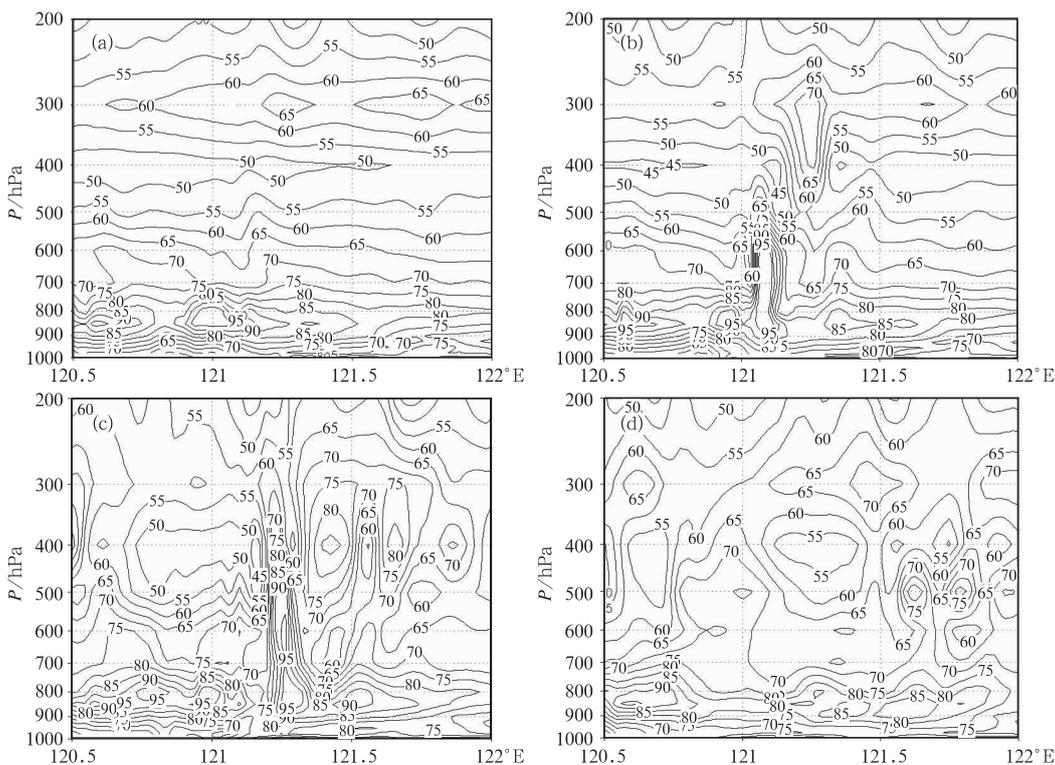


图 5 2005 年 7 月 30 日 14—17 时沿 31.5°N 相对湿度纬向剖面图(单位: %)

(a)14 时; (b)15 时; (c)16 时; (d)17 时

Fig. 5 The zonal cross-section of relative humidity on 30 July 2005 along 31.5°N (unit: %; (a) 06 UTC; (b) 07 UTC; (c) 08 UTC; (d) 09 UTC)

相对湿度大于 85%，湿中心在 850 hPa；700 hPa 以上相对湿度小于 70%，500~400 hPa 相对湿度小于 55%；同时，从 850 hPa 到 700 hPa 表现为“上干下湿”的高湿度梯度特征，有利于水汽平流垂直输送。15 时，在 121.0°~121.2°E 从 800~500 hPa 高度层有一柱状湿区，直径约 20 km；16 时柱状湿区东移至 121.4°~121.7°E，对流高度达到 300 hPa，中高层湿度增大；17 时柱状湿区消失，相对湿度大于 85% 的湿层又降到 900~800 hPa。相对湿度垂直结构的剧烈变化反映了对流迅速发展的特征。从相对湿度剖面图分析可见，700 hPa 以下（特别是 900~850 hPa）高湿，700 hPa 以上较干有利于上升运动蒸发冷却，并形成对流下曳气流和地面大风。

综上所述，对流层低层到中高层高湿度梯度（水汽递减率）和不稳定的垂直结构特征形成了有利于水汽垂直输送、强降水和大风。

3.5 低层能量锋区

图 6 是 30 日 14—16 时 1000 hPa 假相当位温 (θ_{sc}) 分布图。可以看出，主要有三条 θ_{sc} 等值线密集带，并与观测的 3 条雷达回波带和总体有组织但局部分散的自动站辐合带相对应。等 θ_{sc} 线密集区是位势不稳定和斜压不稳定集中的能量锋区，蕴藏着可供中尺度对流发展必需的湿斜压不稳定能量^[18]。可以看出，能量锋区与中尺度辐合线分布、露点锋位置耦合，与这次强对流天气发生区域有较好的对应关系。

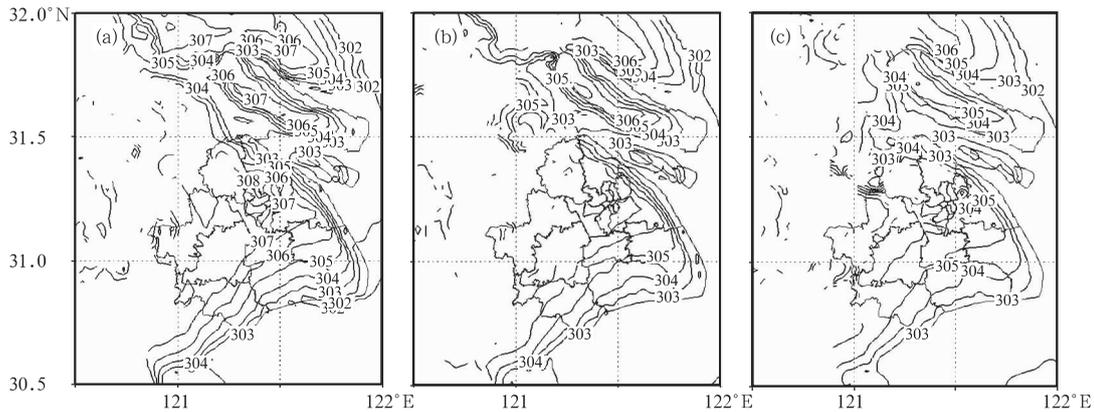


图 6 2005 年 7 月 30 日 14—16 时 1000 hPa 高度 θ_{sc} 分布图(单位:K)

(a)14 时;(b)15 时;(c)16 时

Fig. 6 The distribution of θ_{sc} at 1000 hPa on 30 July 2005

(unit: K; a: 06 UTC; b: 07 UTC; c: 08 UTC)

4 结 语

上海地区“0730”暴雨、大风、冰雹强对流过程发生在西风槽引导弱冷空气南下和副热带高压加强西伸的大尺度环流背景下。在强对流发生时，由上海地区雷达观测资料分析可见，有多块空间尺度 20 km 以上、强度达到 45 dBz、时间尺度为 1~4 h 的 β 中尺度雷达回波出现。当回波强度 50 dBz 以上或出现弓状回波时，对流发展旺盛，出现雷雨大风、强降水等。由上海地区自动站资料分析表明，地面中尺度辐合线（辐合区）出现后 0.5~3 h，其附近地区出现雷达回波，这可能对强对流天气预报有一定指示作用。

为更加清楚地揭示这次强对流系统的结构特征

和发展机制，使用水平分辨率 3 km 的 WRF 中尺度模式对这次过程进行了数值模拟，结果表明，模拟的中尺度辐合线、露点锋和湿区位置等与雷达回波发展、强对流天气发生时空变化基本一致；露点锋和湿区出现的时间在回波发生前约 2 小时到强对流发展较旺盛的时段。对这次强对流发生机制的分析表明，边界层中尺度扰动能够在弱冷空气南下和局地中小尺度斜压不稳定的背景下产生，逐渐上传并触发对流；同时，低层高湿度梯度的大气层结、垂直风向剧烈切变和能量锋区的耦合配置促进了强对流的迅速发展。

在强对流天气预报中，除综合利用雷达、自动站等高时空分辨率探测资料外，深入总结本地区强对流过程的天气学和动力学特征，加强诊断分析高分辨率数值预报产品（尤其是边界层、锋面中小尺度过

程能量、水汽等诊断量),针对性地检验和了解模式性能,对提高强对流天气预报准确率具有实际意义。

参考文献

- [1] 毛冬艳,乔林,陈涛,等. 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨数值模拟分析[J]. 气象,2008,34(2):25-32.
- [2] 齐琳琳,刘玉玲,赵思雄. 一次强雷雨过程中对流参数对潜势预测影响的分析[J]. 大气科学,2005,29(4):536-548.
- [3] 马雷鸣,梁旭东,端义宏,等. 对 2004 年 7 月 12 日上海强对流天气过程的数值试验[R]. 2005 年全国重大天气过程总结与预报技术经验交流会报告,2005.
- [4] 吴涛,黄锐,舒防国,等. “2003. 6. 2”十堰强对流天气雷达回波和数值模拟分析[J]. 气象科学,2005,25(6):629-637.
- [5] 隋东,沈桐立,张涛. 沈阳地区一次冰雹天气过程形成机制的数值模拟[J]. 气象,2005,31(7):20-23.
- [6] 付丹红,郭学良,肖稳安,等. 北京一次大风和强降水天气过程形成机理的数值模拟[J]. 南京气象学院学报,2003,26(2):190-200.
- [7] 陈力强,周小珊,杨森. 一次强风暴的垂直环境特征数值模拟分析[J]. 气象,2004,30(9):3-8.
- [8] 刘峰. 一次强对流天气过程的诊断分析和数值模拟[J]. 气象,2008,34(2):18-24.
- [9] 龚佃利,吴增茂,傅刚. 一次华北强对流风暴的中尺度特征分析[J]. 大气科学,2005,29(3):453-464.
- [10] 张春喜,朱佩君,郑永光,等. 一次春季暴雨不稳定条件和对流触发机制的数值模拟研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2005,41(5):746-753.
- [11] 慕熙显,党人庆,陈秋萍,等. 一次飚线过程的雷达回波分析与数值模拟[J]. 应用气象学报,2007,18(1):42-49.
- [12] 慕建利,杜继稳,张弘,等. 一次诱发山地灾害突发性暴雨数值模拟及诊断分析[J]. 气象,2005,31(12):36-40.
- [13] 张杰. 中小尺度天气学. 北京,气象出版社,2006:89-95.
- [14] Davies J M, Hourly H. Instability, and EH I in forecasting supercell tornadoes[R]. 17 th Conference on Severe Local Storms. St. Louis, MO. Amer Meteor Soc, 1993: 107-111.
- [15] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京,气象出版社,2000: 383-388.
- [16] 李廷福,廖晓农,俞连芬. “98·7”北京大暴雨的中尺度分析[J]. 气象,1999,25(5):44-48.
- [17] 李耀东,刘健文,高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究[J]. 气象学报,2004,62(4):401-409.
- [18] 郑仙照,寿绍文,沈新勇. 一次暴雨天气过程的物理量分析[J]. 气象,2006,32(1):102-106.

征稿简则

- 1 《气象》主要刊登气象科学研究领域的综合评述及研究论文;天气、气候诊断分析与预报技术;气象业务技术及业务现代化建设经验;气象灾害的规律及防灾减灾决策;公共气象服务和专业气象服务技术方法;气象科技信息动态等。
- 2 来稿注意事项
 - 2.1 来稿务必论点明确,数据可靠,文字精炼。文章的书写顺序为:中文题目(不超过 20 个汉字)、作者姓名、单位名称、邮政编码、中文提要(200~300 字)、关键词(3~8 个);英文题目、作者姓名、单位名称、邮政编码、英文提要及英文关键词;引言;正文;结论和讨论;致谢;参考文献。文章首页页脚处附作者信息,即姓名、从事专业工作和研究方向, Email 等。
 - 2.2 正文标题用阿拉伯数字连续编号,不同层次数字间用圆点间隔,如“1”,“1.2”,“2.1.3”等。标题左顶格,在数字编号后空一格再写标题,末尾不加标点符号。
 - 2.3 基金资助的研究项目,请注明省部级以上基金名称和项目编号。
 - 2.4 文稿的单位制采用《中华人民共和国法定计量单位》。图、表中量和单位间用“/”隔开,表示物理量的符号用斜体表示,并注意文种、大小写、正斜体、上下角码等。
 - 2.5 科技术语和名词应使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。
 - 2.6 文稿只附必要的图表。图、表要求准确,清晰,美观。在文中相应的位置插入图、表。图、表附相应的中英文图题、表题。附表请使用三线表。
 - 2.7 参考文献按在文内出现顺序连续编码。在期刊上发表的文献书写格式为:[序号] 作者姓名(列出前 3 位). 题名[J]. 期刊名,年,卷(期):页码. 在专著、教科书上发表的文献书写次序为:[序号] 作者姓名,译者姓名,文题名,书名[M]. 出版地:出版社,出版年:页码.
- 3 请勿一稿两投。本刊一般不退稿,若 6 个月内未见刊用通知,可自行处理。
- 4 本刊收取发表费,并付稿酬,所付稿酬包含纸质版、数字版稿酬和刊物内容网络服务报酬等。凡不同意将其稿件纳入此两种版本进行交流者,请书面说明。
- 5 通讯地址:北京市中关村南大街 46 号《气象》编辑部 邮政编码:100081
网上投稿地址: <http://219.234.83.5>
电话:(010)68407936 58993789 68407336 Email:qixiang@cams.cma.gov.cn