

上海中尺度数值预报系统 暴雨实时预报分析

马晓星¹ 王晓峰² 顾建峰¹

(1. 上海中心气象台, 200030; 2. 上海台风研究所)

提 要

简要介绍了最新研制的基于神威-I 超级计算机上的上海中尺度数值天气预报系统,其最高水平分辨率达到 3km,并利用该系统对 2002 年 5 月 29~30 日华东地区的暴雨过程进行了实时预报;根据模式输出结果,分析了大尺度环境流场及各物理诊断量,探讨了该暴雨的主要成因;同时对单个站点的要素预报做了对比分析。结果表明:该数值天气预报系统具备了一定的业务运行能力,可为预报员提供较好的参考依据。

关键词: 中尺度 数值天气预报 暴雨 实时预报 业务运行

引 言

随着数值预报技术水平的提高,它在天气预报中的应用也不断发展。但对于中尺度数值天气预报而言,其精度和准确率都还有限。要进一步提高中尺度数值预报的精度,较有效的方法是提高模式的分辨率,但由此带来的计算量是急剧增加的。目前世界上越来越多的国家使用了格距为 50km 以下的高分辨率区域预报模式,它们对大气结构、物理过程及地形作用都能较精细地描述,对中小尺度天气系统具有较强的预报能力。

上海数值天气预报业务早在 1964 年就利用 X-2 计算机开展了无辐散正压模式的试验研究工作,1974 年和 1975 年在 DJS-6 计算机上实现了第一代(准地转四层位涡守恒模式)和第二代(三层原始方程模式)数值预报系统的业务运行,1988 年利用 VAX-11/780 计算机实现了第三代数值预报系统(五层原始方程模式,水平分辨率 150km)的业务运行,1995 年先后在 CDC4680 和 ALPHA2100 计算机上实现了第四代数值预报系统(MM4 模式,水平分辨率 75km,垂直 10 层)的业务运行,1998 年和 1999 年先后利用

ALPHA2100 和 ORIGIN200 计算机实现了第五代数值预报系统(MM5 静力模式,水平分辨率 37.5km,垂直 15 层)的业务运行^[1]。2000 年底上海超级计算中心成功安装了浮点运算峰值为 3840 亿次/秒的神威-I 计算机系统,使得建立更高分辨率的中尺度数值天气预报系统成为可能。在上海市政府的大力支持下,上海市气象局以神威-I 超级并行计算机系统为基础,利用 MM5V3 建立了新一代的上海数值天气预报系统。本文利用该数值天气预报系统,对 2002 年 5 月 29~30 日华东地区的一次暴雨过程进行了预报分析,并就此次暴雨过程的成因进行了探讨;以此为例对三定(定点、定时、定量)预报的可行性做了初步分析。

1 系统简介

1.1 资料

模式预报所需的初始资料由两部分构成:NCEP 的全球模式预报场提供各层标准等压面上的高度场、温度场、风场、湿度场,海平面气压和地表温度等,作为客观分析初估场及侧边界,该资料通过科技网从 ftp.prdd.ncep.noaa.gov 下载;另外, MICAPS

资料提供各层标准等压面上高度、温度、风、湿度等要素的探空观测资料以及地面观测资料,包括云量、云状、风向、风速、气压、温度、露点温度等,采用 Cressman 方案在等压面上分别对 4 个 DOMAIN 进行客观分析,该资料由科技网 VPN 从上海市气象局获取。本次预报以 2002 年 5 月 29 日 20 点 NCEP 资料为初始场,每 12 小时提供一次侧边界,做 48 小时预报。

用于对比的实况资料主要包括:1)从 MICAPS 上得到的 5 月 29 日 08 时至 31 日 20 时的环流配置、站点降水和温度资料;2)上海地区 35 个自动雨量站降水记录,根据此次降水的分布和强度,着重选取了崇明、宝山和徐家汇三处资料进行对比。

1.2 方案设计

MM5V3 模式预报区域网格设计为四重嵌套结构(见表 1)。

表 1 中尺度数值模式系统方案设计一览表

预报区域	DOMAIN1	DOMAIN2	DOMAIN3	DOMAIN4
水平分辨率	81km	27km	9km	3km
格点数	97×97	97×97	97×97	97×97
垂直分辨率	23 层	23 层	23 层	23 层
侧边界方案	relaxation	time-dependent	time-dependent	time-dependent
地形资料	30'×30'	10'×10'	5'×5'	2'×2'
显式水汽方案	Simple ice	Simple ice	Simple ice	Simple ice
对流参数化	Grell	Grell	无	无
PBL 参数化	MRF	MRF	MRF	MRF
辐射方案	CCM2	CCM2	CCM2	CCM2
积分时间	48h	48h	48h	48h
时间步长	210s	70s	23.33s	7.78s
输出间隔	1h	1h	1h	1h

DOMAIN1 侧边界与全球数值模式预报资料采用 relaxation 方法单向嵌套,DOMAIN2、DOMAIN3、DOMAIN4 分别与 DOMAIN1、DOMAIN2、DOMAIN3 采用 time-dependent 侧边界方案双向嵌套。DOMAIN1 水平分辨率取 81km,中心点设在(40°N、100°E),网格点数为 97×97;DOMAIN2 水平分辨率取 27km,网格点数为 97×97,范围覆盖华东地区;DOMAIN3 水平分辨率取 9km,网格点数为 97×97,范围覆盖长江三角洲地区和杭州湾地区;为更好地分析出上海地区较

小尺度的对流系统,在粗网格的基础上,DOMAIN4 水平分辨率取 3km,网格点数为 97×97,范围覆盖上海地区,左下角点在(30.768°N、119.084°E),右上角点在(32.613°N、122.839°E)。DOMAIN1 地形资料取自 30'×30'(≈56km)全球地形资料,包括青藏高原和伊朗高原,最高地形为 5400m。

模式垂直分辨率设计为 23 层,整模式面的 σ 值从下至上分别为 1.00, 0.99, 0.98, 0.96, 0.93, 0.89, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.05, 0.00。

模式物理过程:显式水汽方案采用混合位相方案,在冻结层以下加入了超冷水滴和雪的融化过程;积云对流参数化在 DOMAIN1 和 DOMAIN2 采用 Grell 方案,DOMAIN3 和 DOMAIN4 不采用积云对流参数化;行星边界层参数化采用 MRF 方案,并考虑了云中垂直水汽的绝热变化;大气长、短波辐射采用 CCM2 方法,并考虑了云对辐射的影响作用;土壤温度预报采用多层土壤模式,并考虑了土壤的热通量和水汽通量;地表温度通过地表能量收支平衡方程计算;还考虑了温度扰动的水平扩散、垂直水汽平流、垂直温度平流、位温水平平流和三维科氏参数^[2]。

2 暴雨实况概述

2002 年 5 月 29~30 日,苏、沪、浙、皖、闽、赣等地区出现的降水过程是一次较为常见的华东暴雨个例。5 月 29 日 20 时环流形势基本为两槽一脊型,蒙古地区为脊,乌拉尔山以东的西伯利亚西部和亚洲东岸为低槽。东亚大槽槽底伸至 30°N 附近,槽后冷空气直驱南下,同时西南方向有暖湿气流输送,在华东地区交汇;伴随地面高压的东退,西风倒槽北顶并迅速东移形成低压;29 日 08 时在 700hPa 和 850hPa 高空图上可见,河南、湖北、安徽及江苏之间有一明显切变线,20 时该切变线略东移并加强演变成小低涡,影响华东地区,形成降水。根据上海地区的自动雨量站及基本站点的实况资料显示,29 日 08 时~30 日 08 时 24 小时降水量 27~46mm,

崇明降水量最大,为85mm,雨量主要集中在29日夜到30日清晨,部分地区在30日白天仍有较大降水。

3 模拟结果及分析

3.1 环流场

图1为5月29日21时500hPa环流形势模拟图,其中实线为高度场,虚线代表温度场,箭头线为风场流线。整体来看,模拟结果还是令人满意的。从图1可以看到,华东地区位于东亚大槽槽前,北面不断有冷空气侵入;西南面有流线从低纬暖区穿越等高线,输送暖湿气流,有利于降水的形成;700hPa的模拟图(略)上,河南、湖北、江西及安徽之间有一西风倒槽,华南华东大部地区受倒槽及西南暖湿气流的影响;在850hPa(图略)上有对应的风场切变,涡度增强,并有闭合趋势,华东地区则完全在南风气流的控制下。从这种上下层高度场、温度场和风场的相互配置,可以看出此次降水过程主要是受西风倒槽和西南暖湿气流影响。

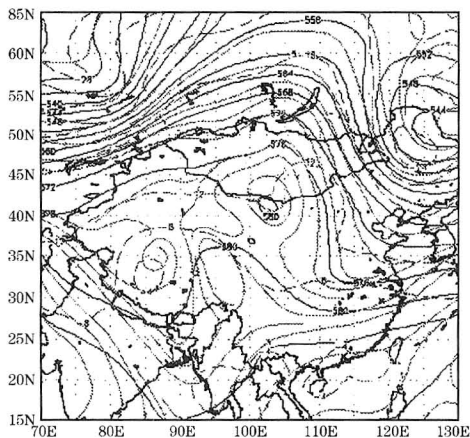


图1 2002年5月29日21时500hPa高空形势模拟图

3.2 涡度和散度

环流的涡度和散度都反映了流场的输送能力,是判断垂直运动的重要依据。我们分别模拟了29日21时500hPa散度图和30日05时850hPa的涡度图,这两个时次分别表示暴雨临近前和暴雨过程中(如图2)。从图2a可以看到,21时,在降水区500hPa高空为一辐散中心,且辐散随高度增强,为一深厚系

统,造成强烈的上升运动,有利于暴雨的形成。而此时降水区上空850hPa低层为正涡度区,中心位于安徽一带(图略),与实况的低涡环流相对应,这有利于低层的水汽辐合。至30日05时(如图2b所示),该正涡度区缓慢向东面移动,上海完全处于该正涡度区的覆盖,此时也正是上海地区降水最大的时候。降水地区上空有一气旋性环流,其东部南风气流和北部西风气流有明显辐合,并由温度高值区吹向低值区,指示此次暴雨的降水中心;同时,水汽由13.5的高值中心向上海地区源源不断的输送,为本次暴雨提供了充足的水汽条件(图略)。由此可见,高层辐散低

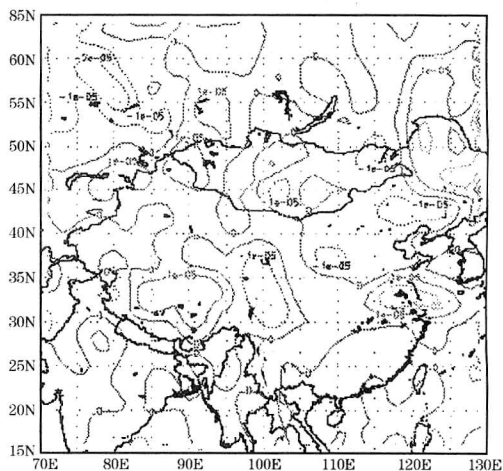


图2a 2002年5月29日21时500hPa散度分布

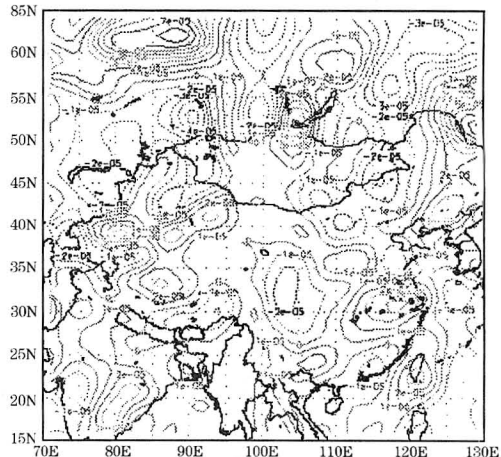


图2b 2002年5月30日05时850hPa涡度分布

层辐合所造成的上升运动以及充足的水汽输送,是本次降水的重要原因。

3.3 温度和纬向风的垂直剖面

我们沿 120°E 做南北向的垂直温度和风速剖面,正好通过降水中心,以研究降水系统的垂直结构。先看纬向风速 u 和温度 t 的垂直剖面(图3),我们选了5月29日21时、30日00时和30日20时,分别代表降水临近、降水中和降水后。三时次南北向的等温线均基本维持水平分布,而纬向等风速线变化较大,高空存在两个西风极值中心,南面的强,

北面的弱,介于两者间的低空存在东风中心,但风速较小。在东西风切变之间,即 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 为一水平气旋性涡旋,低空要比高空明显。如图3所示,30日00时低层东风比21时略有所加强,到了30日20时,降水过程基本结束,此时低纬的西风急流中心高度下降,强度由29日21时的 $39\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到了 $33\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,等值线的垂直梯度明显减小,高空水平梯度增大,说明高空气旋性涡度增强,不利于气流的垂直运动,高纬的西风中心则基本消失。

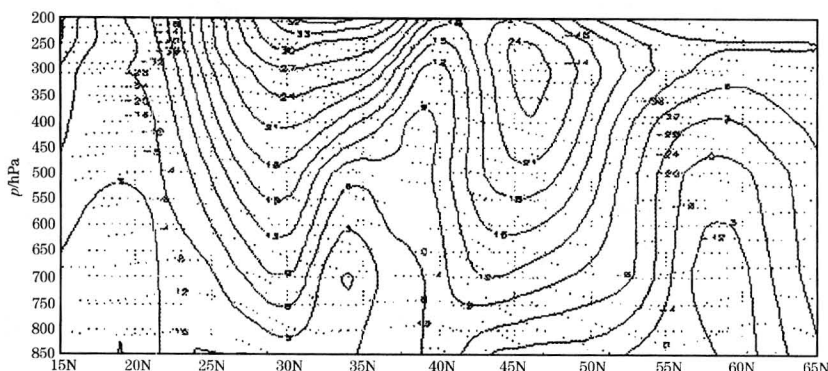


图3 2002年5月30日00时沿 120°E 温度、纬向风垂直剖面

3.4 降水强度和分布

图4给出了模拟的12小时降水强度及分布。由实况图所示(略),雨带呈东北—西南走向穿越华东地区,出现两个极值中心,分别位于上海东北部及安徽南部与江西东北部。其中上海东北部的极值为 86mm ;另一降水中心雨量极值在 50mm 左右。图4是 DOMAIN2 的雨量分布图,以 1mm 为最小绘图单位。可以清楚的看到,模拟的雨带与实况是极其相似的。模式亦模拟出两个极值中心,其中上海地区有一个 $75\sim 100\text{mm}$ 的降水中心,中心位置大致与实况相吻合;另一降水中心位于 $27.8^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$,即江西西北部,雨量在 $25\sim 50\text{mm}$ 之间。与实况相比,安徽南部一带的雨量值预报偏小。从总体来看,该系统基本成功模拟出了本次降水的分布形态和强度中心。

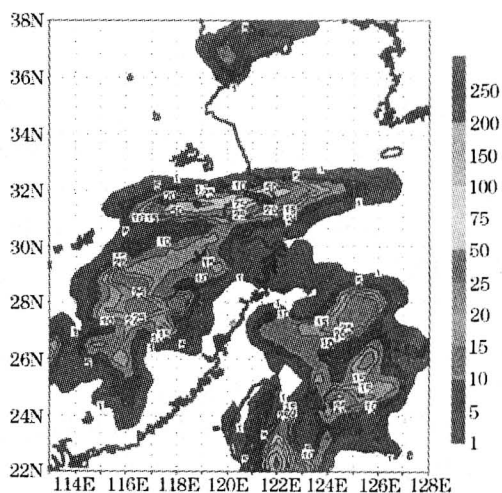


图4 2002年5月29日20时~30日08时
12小时预报模拟降水量

3.5 站点预报

应用高性能的 SW-I 超级计算机,使高分辨率的数值三定预报具备了一定的可行

性。为了检验其预报性能,本文选取了上海的崇明、宝山和徐家汇3个自动雨量站资料,对5月29日20时~5月31日20时每3小时的降水进行了比较。以崇明为例(如图5所示),主要考查了5月29日20时到31日21时48小时的降水量和温度的3小时预报情况。系统基本预报出了本次降水过程主要部分的起止时间。在雨量的预报上,总降水量基本相等,预报值为62.7mm,实况值为65mm。在分时预报上,30日2~5时预报值偏小,30日8~11时的预报量则偏大;而48

小时预报的准确性相对较小。若以日为评价单位,则预报结果是相当令人满意的。对3站降水预报评分,降水预报的准确率分别达到了70.7%、82.5%、82.4%,空报率为17.6%、11.7%、17.6%,漏报率为11.7%、5.8%、和0%,降水量的平均误差距平分别为1.6、1.8、1.7mm/3h,甚为理想。温度预报在趋势变化的模拟上较为理想,在31日中午出现了明显的提升,但温度值偏低,3个站点均存在该现象。说明模式的48小时预报准确率尚有待提高。

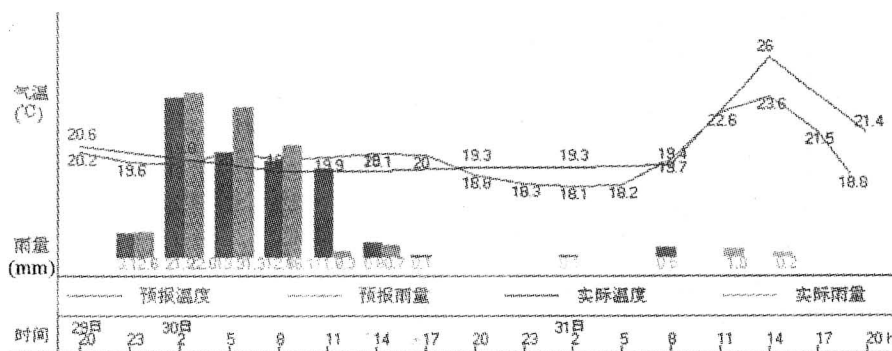


图5 上海崇明站温度和降水的预报、实况比较

4 结 语

本文通过对上海地区2002年5月29日~30日暴雨过程实时预报的分析,初步验证了上海中尺度数值天气预报系统对暴雨预报的有效性,结果表明:

(1) 西风倒槽和西南暖湿气流的共同作用,是造成本次降水的主要原因。

(2) 该系统对华东地区的暴雨过程在雨量、雨带分布及时间分布上均有较好的预报效果,具备了一定的业务运行能力。

(3) 利用上海中尺度数值天气预报系统预报结果,制作更为丰富和可靠的诊断量图表,可为预报员提供有价值的预报参考。

(4) 上海中尺度数值天气预报系统对站点的要素24小时预报有较高的准确率,但48小时温度预报有待进一步提高,可在此基

础上进一步做定时、定点、定量预报的深入研究。

当然,上述结论是在一个暴雨过程的分析中得到的,系统的准确性还需以后更多的预报实例来验证。

参考文献

- 顾建峰,殷鹤宝,徐一鸣等. MM5在上海区域气象中心数值预报中的改进和应用. 应用气象学报. 2000, 11(2): 189~198.
- 顾建峰,王晓峰. 中尺度数值模式在神威计算机上的应用研究技术报告. 上海市信息化专项资金项目(信息技术创新计划). 2002. 8.
- 赵力,赵思雄. 准拉格朗日有限区域模式用于中国夏季降水的预报实验. 台风暴雨数值预报新技术的研究. 1996. 103~109.
- PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide. MM5 Modeling System Version 3.

A Real Time Precipitation Forecast of Shanghai Mesoscale Numerical Weather Forecast System

Ma Xiaoxing

(Nanjing Meteorology Institute, 210044)

Wang Xiaofeng

(Shanghai Typhoon Institute)

Gu Jianfeng

(Shanghai Weather Forecast Center)

Abstract

After a brief introduction of Shanghai mesoscale numerical weather forecast system, a real time forecast result of a heavy rain in East China during 29/05/2002 to 30/05/2002 is analyzed with output of this forecast system. The macro-scale stream field and simulation result are analyzed and the main causes of the event are discussed. Furthermore, the predictands in correlative single stations are discussed. The results proved that the Shanghai mesoscale numerical weather forecast system has the ability at a certain extent in operation, and is worth of reference to forecasters.

Key Words: numerical weather forecast heavy rain event real time operational forecast