

一个有三重水平结构的台风数值模式及其应用*

郑庆林 吴 军 宋青丽

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

在 PSU/NCAR 的中尺度模式 MM4 的基础上, 发展了一个具有三重水平结构的台风数值模式. 模式水平方向分为高分辨率的关键区、较高分辨率的中重区及分辨率较低的外重区, 三个区之间实现了双向嵌套. 模式考虑了较完整的物理过程, 包括地形和地面摩擦、水平和垂直方向的动量、热量及水汽的扩散过程、潜热和地面感热作用、云和辐射作用以及积云对流过程等. 由多例数值研究及业务试应用结果表明, 该模式不仅能较成功地预报出台风登陆、台风转向路径、台风环流变化等, 而且对不同台风过程中的暴雨中心位置和强度、雨量、雨区范围以及雨区的扩展也能得到较好的预报结果.

关键词: 台风数值模式; 三重水平结构; 应用.

引 言

近年来我国深入进行了台风数值模拟工作. 要对台风进行数值模拟, 必须有一个较好的中尺度模式. 美国 PSU/NCAR 的中尺度模式目前处于较先进的地位, 被广泛采用, 并取得了成功^[1,2]. 模拟的成功从一个方面证明了模式的优越及其对中尺度模拟的适用性. 但是, 由于台风结构及运动的复杂性以及资料的缺乏, 对于台风路径突变、登陆后暴雨突然增幅等难题, 还需作更多深入的研究. 本文在对 MM4 模式加以改进的基础上, 发展了一个具有三重水平结构的台风数值预报模式, 得到了较好的预报结果.

1 一个三重水平结构的台风数值模式

本文所用模式是在 PSU/NCAR 中尺度模式第 4 版 MM4 的基础上加以改进而得到的. 模式能较好地考虑地形及下垫面、边界层作用以及包括云、辐射在内的较完整的物理过程. 其三重水平结构使得模式既能考虑关键区的较细致结构, 又能考虑其邻近地区(中重区)以及较大的外重区的影响. 下面分别就模式中的具体处理问题给以介绍.

1.1 气压梯度力的表示

* 本文由国家“八·五”攻关项目 85-906-07-04-04 资助.

1995-03-31 收到, 1995-08-15 收到再改稿.

原模式中,气压梯度力项表示在 σ 面上为

$$F_x = -m p^* \left[\frac{RT_v}{p^* + p_i/\sigma} \frac{\partial p^*}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]$$

$$F_y = -m p^* \left[\frac{RT_v}{p^* + p_i/\sigma} \frac{\partial p^*}{\partial y} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right]$$

但对陡峭地形会有误差. 这里,我们按郑庆林等^[3,4]提出的方法,写为:

$$F_x = -m p^* \left[\frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \right]_p - m p^* \left[\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)}{\partial x} + \frac{RT_u}{p^* + p_i/\sigma} \frac{\partial p^*}{\partial x} - \frac{RT_{u_0}}{p^* + p_i/\sigma} \frac{\partial p_{i_0}^*}{\partial x} \right]_\sigma$$

$$F_y = -m p^* \left[\frac{\partial \varphi_0}{\partial y} \right]_p - m p^* \left[\frac{\partial(\varphi - \varphi_0)}{\partial y} + \frac{RT_v}{p^* + p_i/\sigma} \frac{\partial p^*}{\partial y} - \frac{RT_{v_0}}{p_{i_0}^* + p_i/\sigma} \frac{\partial p_{i_0}^*}{\partial y} \right]_\sigma$$

其中,等式右边第一项为初始时刻 p 坐标面上的气压梯度力项,第二项通过位势场、温度场与其初始偏差来表示.

1.2 地形及下垫面拖曳效应

模式考虑了不同尺度的地形作用,在关键区应用高分辨地形;下垫面的拖曳系数 C_D 考虑与山地边界层厚度、地面粗糙度有关. 福建、浙江一带虽然地形高度不是很高,但起伏的山地地形使这一带地面粗糙度较大. 因此,增强了其地面对大气的拖曳效应,一方面使垂直运动加强,一方面也改善了积云对流条件,从而可引起台风暴雨的明显增幅. 数值研究表明,山地的拖曳效应对台风暴雨增幅有明显的作用. 由于改进了模式中的福建、浙江一带山地拖曳效应,预报的台风登陆点及其登陆后的移动有明显改进,更接近实况;暴雨区、降雨量等均与实况更吻合.

1.3 模式其它物理过程

水平与垂直扩散项采用了两种参数化形式^[5],在边界上取二阶差分格式,在内圈取四阶差分格式. 垂直扩散按 K 理论计算^[6],地面温度采用地面能量收支平衡方程来计算^[7]. 边界层内动量通量参数化采用 Deardoff^[8]的方案. 对流参数化按郭晓岚^[9]和 Anthes^[10]的方案,并采用干对流调整. 侧边界条件采用 Davies 边界^[11].

1.4 初始场形成

本文中模式初值使用的是 ECMWF 和国家气象中心的数值分析资料. 由于 p 面上的分析资料层次有限,在地形较高之处,由 p 面到 σ 面产生的坐标转换误差是明显的,特别是对于关键区. 文献[3]提出一种迭代方法可使误差减小到最低限度.

设初始时刻 p 面上的变量为 $R_{p,t_0}^{(0)}$,通过垂直插值,得到 σ 面上的变量值,记为 $R_{\sigma,t_0}^{(1)}$,将 $R_{\sigma,t_0}^{(1)}$ 反插回原来的 p 面上,记为 $R_{p,t_0}^{(1)}$. 由于存在插值误差,有:

$$\Delta R_{p,t_0}^{(1)} = R_{p,t_0}^{(0)} - R_{p,t_0}^{(1)}$$

将此误差值再插到 σ 面上,为 $R_{\sigma,t_0}^{(2)}$,有:

$$R_{\sigma,t_0}^{(2)} = R_{\sigma,t_0}^{(1)} - \Delta R_{p,t_0}^{(1)}$$

经过 N 次迭代, σ 面上的变量值为:

$$R_{\sigma,t_0}^{(N)} = R_{\sigma,t_0}^{(1)} + \sum_{i=1}^{N-1} \Delta R_{\sigma,t_0}^{(i)}$$

一般只需迭代几次就可使误差足够小,这提高了在 σ 面上特别是关键区的初始场精

度. 研究及业务应用结果表明, 利用国家气象中心日常数值分析资料($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$), 分别内插到模式三重区各区内, 并经上述处理, 可得到较好结果, 达到减小 $p \rightarrow \sigma$ 转换误差的目的.

1.5 模式的水平三重结构和时间积分

模式在水平方向分为 3 个具有不同水平分辨率的模式区, 分别为: 高分辨率的关键区(又称内重区)、较高分辨率的中重区以及分辨率较低的外重区. MM4 模式被分别用于以上 3 个区域. 其中模式的外重区覆盖了中重区, 而中重区又覆盖了关键区. 模式的中重区格距为内重区的两倍, 而外重区为中重区的两倍. 模式的外重区和中重区之间、中重区和内重区之间实现边界双向嵌套. 上述的模式结构, 考虑的水平范围大, 但格点总数少, 而且由于模式的时间积分步长 Δt 在中重区为关键区的两倍, 外重区为中重区的两倍, 所以计算量也小. 由内向外, 各区之间水平格距比例为 1:2, 所以在模式区交界附近的模式场分布(原模式为 1:3)不易出现不协调现象. 各区能分别考虑不同地形分布及其它特点. 关键区提供精度较高的预报结果, 而中重区也提供 48 h 以内的较好的预报, 外重区则能考虑较大范围内天气系统对中重区的影响.

由模式外重区先作预报, 从 t_0 进行至 t_a , 在预报过程中, 记下中重区所需边界场, 暂停(不退出); 接着中重区从 t_0 积分至 t_a , 积分过程中使用外重区提供边界, 也记下关键区所需边界, 暂停(不退出); 然后, 关键区利用中重区提供的边界, 从 t_0 积分至 t_a . 在 t_a 时刻, 由关键区反馈至中重区, 中重区反馈至外重区, 然后外重区由 t_a 积分至 t_{2a} , …… , 重复上述过程, 最终可获得预报结果.

在本文的研究和应用中, $t_a - t_0$ 可取为外重区的时间步长(取两小时). 模式关键区、中重区和外重区格距分别为 60km、120km 和 240km, 3 个区的水平格点数均为 25×25 , 垂直层次为 7 层. 结果表明, 本文的水平三重结构, 可取得较满意的结果.

2 台风路径及其暴雨的数值预报试验

2.1 台风路径预报

我们利用上述具有三重水平结构的台风数值模式, 对 9216 号台风采用 ECMWF 的数值分析资料进行了 48 h 数值模拟试验. 对 9413、9414 号台风采用国家气象中心的数值分析资料分别进行了 24 h、48 h 业务预报. 图 1 为 4 次预报的 700 hPa 台风中心移动路径及实况示意图. 由图可见, 9216 号台风, 与对应的实况比较, 预报的 24h 环流中心与实况基本一致. 48h 环流中心位置比实况偏离约 1.5 个纬距. 9413 号台风的 24h 实时预报与实况也较接近, 预报的 24h 环流中心比实况偏南约 1 个纬距. 对 9414 号台风我们进行了两次 48h 实时预报. 模式预报路径与实况总体上是吻合的. 但在 36、48h 的中心位置比实况偏东约两个纬距, 这种误差可能与洋面上的资料精度不够有关. 我们以 8 月 7 日 20 时的客观分析为初始场, 对 9414 号台风进行了第二次业务预报, 12 h 后(图 2a), 700hPa 台风环流中心移到台湾岛北端, 12~24h 在浙江东南部海面台风突然转向东北方向移动(图 2b), 36、48h(图 2c)从东海移向黄海上空. 模式预报与实况(图 2d)比较一致, 环流中心偏东约 1 个纬距. 特别值得注意的是, 模式预报出了该台风路径的转向, 为当时的业务预报

提供了依据.

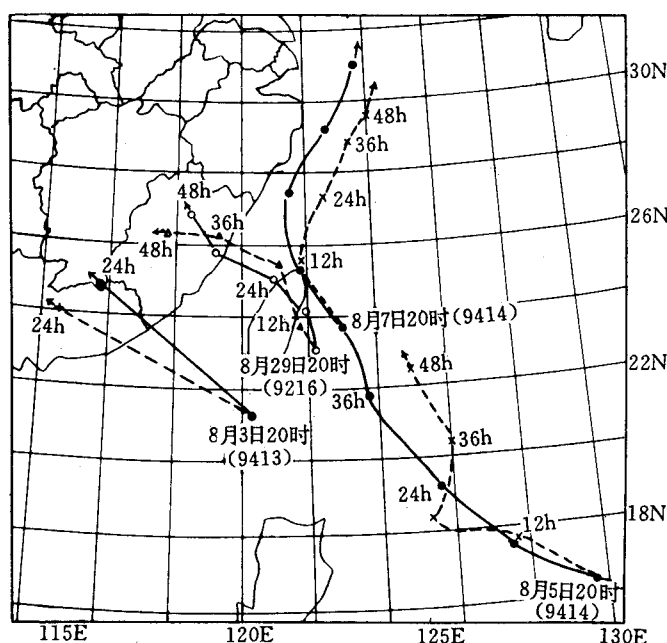


图1 700 hPa 台风环流中心移动路径实况及对应模拟结果 (——实况, ---模式预报结果)

Fig 1 The observed and predicted tracks of typhoon at 700 hPa (solid line: observation, dashed line: simulation)

在此我们将预报结果与目前台风业务预报水平^[12]作一比较. 目前台风业务预报中, 24h 台风位置平均预报误差为 1.55 纬距, 48h 为 2.75 纬距. 本文的 4 次模拟预报中, 12h 环流中心位置均相当接近实况, 24h 预报与实况相差约 1 个纬距, 48h 预报与实况偏离 1~2 个纬距. 9414 洋面预报误差稍大一些, 但这些误差均低于目前的业务平均预报误差.

2.2 台风暴雨预报

2.2.1 9216 号台风 9216 号台风是 1992 年影响我国最严重的热带气旋. 受其影响, 浙江、福建大部地区降了暴雨, 部分地区降特大暴雨. 此外, 江西、江苏、安徽、上海、山东、辽宁、吉林等 7 省市降暴雨至大暴雨. 下面给出该台风 700hPa 涡度场及暴雨预报结果.

(1) 700hPa 涡度场 由 9216 号台风中重区 700hPa 涡度场的初始场及 24、48h 预报可知(图略), 初始场正涡度中心位于台湾中部以东, 中心值 $144(10^{-6}s^{-1})$, 下同. 24h 后, 涡度中心向西北移到台湾北端, 中心值加强到 $253 \times 10^{-6}s^{-1}$. 48h 后, 涡度中心位于福建与浙江交界处, 由于台风登陆填塞而明显减弱到 $129 \times 10^{-6}s^{-1}$. 而且, 正涡度区分布在降水中心左侧(见图 3). 因此, 从涡度场变化可以看到模式预报出该台风环流在海面上的增强及登陆后的迅速减弱.

(2) 暴雨预报 图 3 给出 9216 台风关键区降水预报及对应实况. 36h(图 3a, 对应 8 月 30 日)预报的降水中心位于浙江东部 ($29^{\circ}N, 121.7^{\circ}E$), 中心强度 83mm; 主要雨区在闽浙两省, 上海、江苏、安徽、江西等省市也有不同程度的降水. 与 8 月 30 日实况(图 3c)比

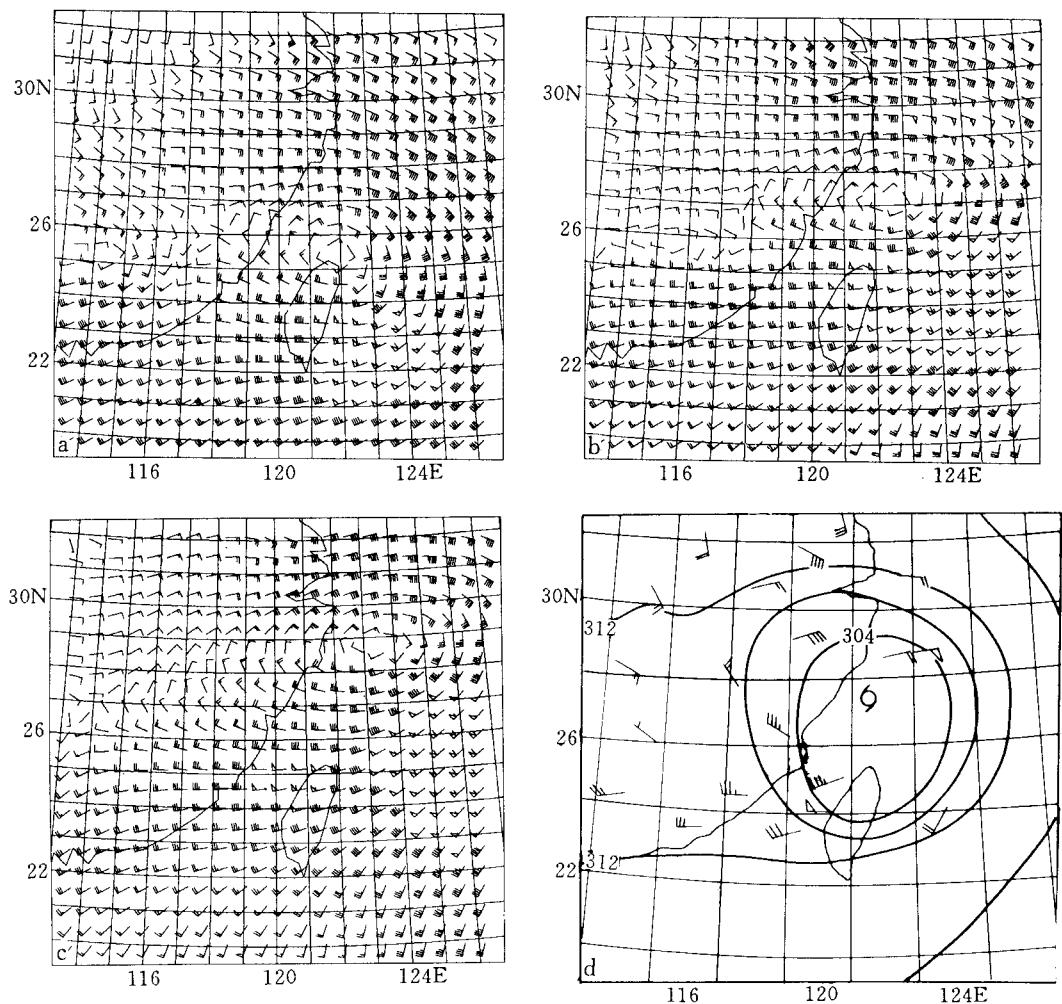


图 2 9414 台风转向前后 700hPa 环流预报与实况

(a) 1994-08-08 08 时预报 (b) 1994-08-08 20 时预报
(c) 1994-08-09 08 时预报 (d) 1994-08-08 20 时实况

Fig. 2 The circulation forecasts of typhoon 9414 at 700 hPa and the observation (a) forecast at 08 am, Aug. 8 (b) forecast at 20 pm, Aug. 8 (c) forecast at 08 am, Aug. 9 (d) observation at 20 pm, Aug. 8

较,预报的雨区范围与其相当吻合,降水中心位置也基本一致(28.9°N,121°E),只是降水强度比实况偏弱,实况最大日降水为 245mm.

48h(图 3b),由于台风的移动,预报的雨区明显扩展,闽浙两省西部降水增加. 福建西部有一降水中心出现,浙江境内的强降水中心维持,稍向南移,最大雨量 99.9mm. 由于模式仅计算到 8 月 31 日 20 时,而对应模式 24~48h 时段的实况降水图缺乏,因此我们用实况 8 月 31 日 24h 的降水(图 3 d)来代替,实况中雨区向西向北扩展,福建西南、江西上饶、九江、安徽南部均出现暴雨,浙江、福建东部暴雨维持. 与图 3 b 比较可见,模式较好地预

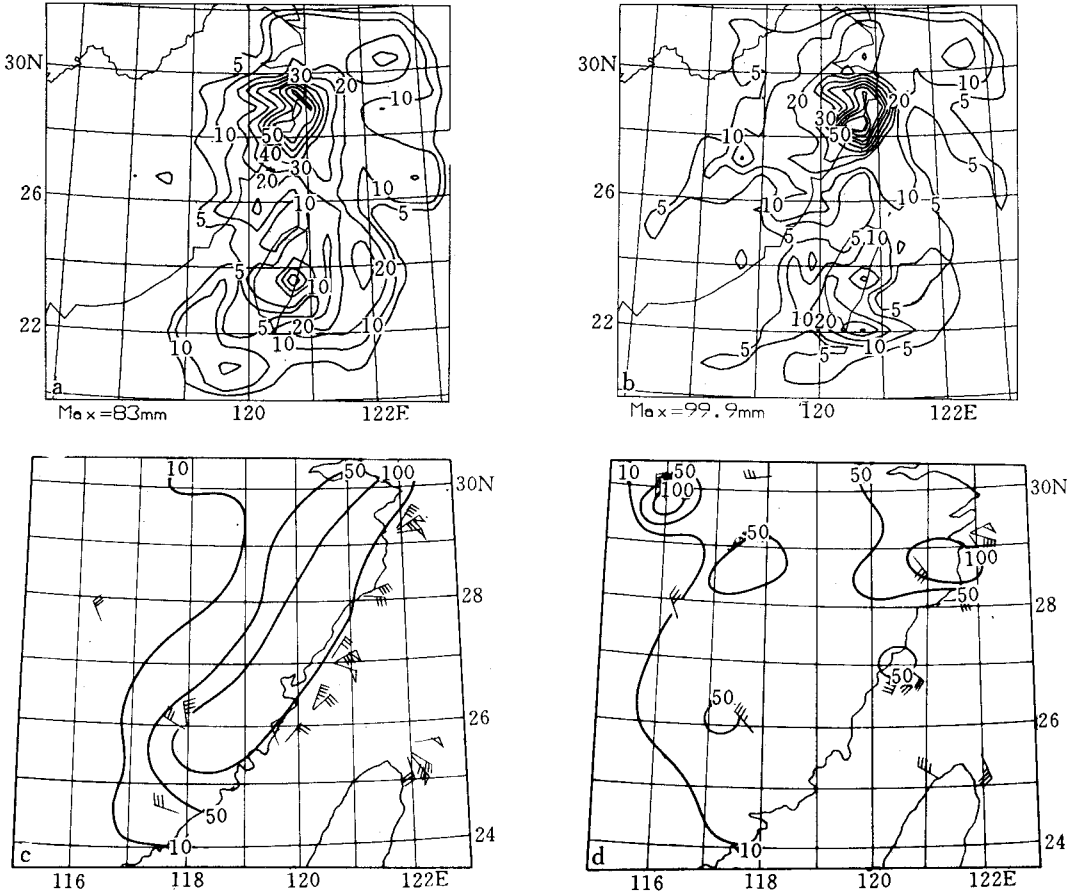


图3 9216台风关键区降水预报与实况 (a) 36h预报 (b) 48h预报 (c) 1992年8月30日实况 (d) 1992年8月31日实况

Fig. 3 The predicted and observed precipitation of typhoon 9216

(a) 36h model forecast (c) observation on Aug. 30

(b) 48h model forecast (d) observation on Aug. 31

报出上述雨区变化,雨区的扩展趋势与实况吻合较好。

2.2.2 9414号台风 由于9414号台风8月8日在东海海面转向北行,未在我国东南登陆,因此造成的降水较小,最大降水仅56mm。图4为模式预报的36、48h两时刻前24h降水及对应的实况。

8月8日,实况(图4c)有一范围较小的雨区位于福建东北及浙江东南沿海,降水中心位于(27°N,120.6°E),最大日降水为56mm。8月9日(图4d),随着台风的转向北移,雨区明显向北扩展到浙江中部和北部沿海,最大降水为51mm。从相应的预报结果来看,36h(图4a,对应8月8日)预报的中心位于浙江东部(28.6°N,120.4°E),中心强度约25mm;48h(图4b)预报的雨区变化不大,降水有所减少,最大降水约15mm。两时刻预报的雨区范围、中心位置都和实况比较吻合,但降水强度仍弱于实况。

从上可见,不论是对登陆台风造成的强暴雨还是未登陆(海面转向)台风引起的较小

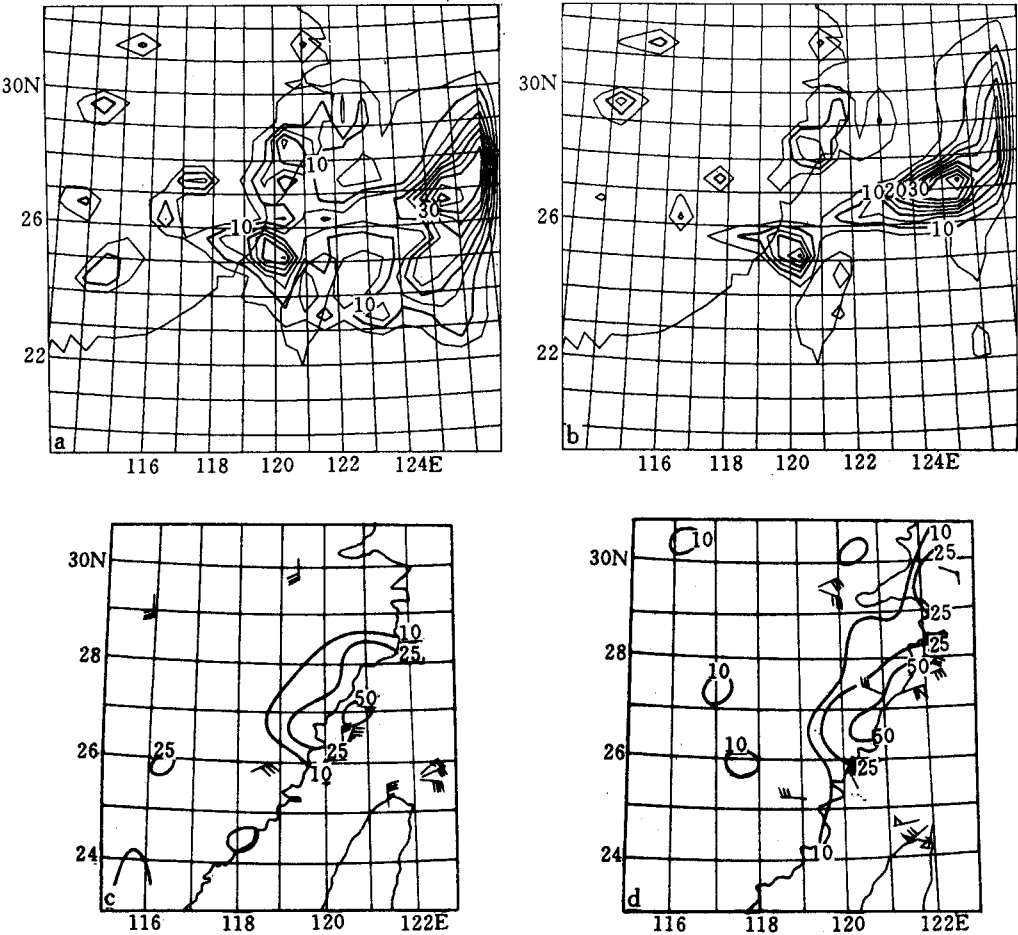


图 4 9414 号台风降水预报与实况 (a) 36h 预报 (b) 48h 预报 (c) 1994 年 8 月 8 日实况 (d) 1994 年 8 月 9 日实况

Fig. 4 The predicted and observed precipitation of typhoon 9414 (a) 36h model forecast (b) 48h model forecast (c) observation on Aug. 8, 1994 (d) observation on Aug. 9, 1994

暴雨,本文模式均具有较高的预报能力,能较好地预报出雨区分布范围、雨区扩展形势和较准确的暴雨中心位置,但在暴雨强度上尚弱于实况,有待进一步研究改进。

3 结 论

(1)本文模式包含了较完整的物理过程,并采用了三重水平结构及双向嵌套,使模式能很好地考虑关键区的细致结构.中重区适于中尺度天气系统,外重区范围较大,可以将大尺度环境场的影响考虑进去,从而能成功地预报台风路径,改善降水预报,使模式对台风的总体预报效果得到较大的提高。

(2)本模式可以较好地预报出 48 h 内 700hPa 台风环流中心的移动路径(包括台风的登陆和转向),根据本文 4 个例子预报水平,其 24h、48h 预报能力均达到或超过了目前的

业务预报水平,模式对不同个例的预报成功不仅初步验证了模式的预报能力,同时说明模式具有较稳定的预报性能,适用于台风模拟研究及预报.模式在洋面上的较大预报误差可能与模式初始场资料精度有关,进一步的准确模拟需要更精确的观测资料.

(3)模式能较成功地预报出不同台风过程中暴雨中心位置、雨区范围以及雨区的扩展,与实况的吻合程度令人满意,反映出模式对台风降水已有较高的预报能力,可用于地形对台风暴雨增幅影响等更深入的研究.目前这方面的进展见于文献[13]和[14].

参 考 文 献

- 1 李毓芳,徐燕峰,李林,卢家麟. 浙江梅雨暴雨的三支气流. 杭州大学学报,1991,12: 1~6.
- 2 李毓芳,李林. 中尺度数值模拟-梅雨暴雨模拟(毕业论文). 1992.
- 3 郑庆林. 北半球七层谱模式(三)及其五天数值预报试验. 气象科学研究院院刊,1989 4(1): 1~12.
- 4 Zhen Qinglin and Liou K N. Dynamic and thermodynamic influence of the Tibetan Plateau on the atmosphere in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43: 1340~1354.
- 5 Anthes R A and Warner T T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meteorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, 106: 1045~1078.
- 6 Anthes R A, Hsieh F Y and Ruo Y-H. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version (MM4). NCAR Technical Note NCAR/TN-282+STR. 1987.
- 7 Zhang Daling, Anthes R A. A high resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data, *J. Appl. Meteor.*, 1982, 21: 1594~1609.
- 8 Deardorff J W. Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models, *Mon. Wea. Rev.*, 1972, 100: 93~106.
- 9 Kuo H L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *J. Atmos. Sci.*, 1974, 31: 1231~1242.
- 10 Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, 105: 270~286.
- 11 Davies H C and Turner R E. Updating prediction models by dynamic relaxation, an examination of the technique. *Quart. J. Roy. Meteor. Sci.*, 1979, 103: 225~243.
- 12 王志烈,费亮. 台风预报手册. 北京:气象出版社,1987.
- 13 郑庆林,吴军. 地形对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究. 南京气象学院学报,1996(待发表).
- 14 郑庆林,吴军,蒋平. 我国东南海岸线分布对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究. 热带气象学报,1996, 19(1): 8~17.
- 15 Bleck R. Numerical simulation of lee cyclogenesis in the gulf of Genoa. *Mon. Wea. Rev.*, 1977, 105: 428~453.

A TYPHOON NUMERICAL MODEL WITH HORIZONTALLY THREEFOLD STRUCTURE AND ITS APPLICATIONS

Zheng Qinglin Wu Jun Song Qingli

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

A typhoon numerical model with horizontally threefold structure has been developed based on the MM4 model introduced from PSU/NCAR. The model was constructed of the inner, middle, outer regions with three kinds of different resolutions, respectively, and the double-way boundary feedbacks are also available between the different regions of the model. Integral physical processes are considered in the model including the effects of mountains and surface frictions, diffusions of momentum, heat and water vapor, effects of latent and sensible heat at the earth's surface, effects of cloud and radiations and cumulus convection. The studies and the operational application results have shown that the model can predict not only the landing and recurvature tracks of typhoon and their circulation changes, but also the locations and intensities of the typhoon centres, the total rainfall amount, the rain areas and its expansion in the different typhoon processes.

Key words: Typhoon numerical model; Horizontally threefold structure; Application.