

# 9406 号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征\*

孟智勇 徐祥德 陈联寿

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘 要

利用非静力中尺度模式 MM5, 对 9406 号台风从 1994 年 7 月 11 日 12 时(世界时, 下同)到 12 日 12 时之间的 24 h 降水进行了模拟, 采用滤波分析方法对模式结果进行了尺度分离。中尺度场的分析表明: 台风与中纬度系统的相互作用非常显著地表现在中尺度系统的活动上; 高低空中尺度散度场的分布对中低纬系统相互作用所产生的降水具有一定的指示意义; 台风及西风槽强度的改变将直接导致中尺度系统强度的变化, 从而造成降水强度的不同。另外, 还从能量学角度对不同尺度系统的能量变化进行了分析。结果表明, 中尺度场的能量变化极值区与中低纬度系统的强度变化密切相关, 且与降水的变化有较好的对应关系。

关键词: 台风, 西风槽, 中低纬系统相互作用, 中尺度特征。

## 1 引 言

根据统计, 平均每年约有 30~40 个台风从赤道西太平洋或南海形成, 其中近 25% 的台风会移入中纬度地区。台风造成的灾害不仅仅出现在其登陆点附近, 台风登陆后与中纬度系统发生相互作用有时也会在内陆造成更加严重的灾害。例如, 7503 号台风在登陆后减弱为低压移至河南省, 与南下冷空气相互作用加之有利的地形条件造成了大范围的持续性暴雨<sup>[1]</sup>, 致使十余万人丧生于洪水之中。因而台风与中纬度系统的相互作用越来越引起人们的重视。

台风与中纬度系统的相互作用主要包括:

(1) 中低纬之间系统的变换。如台风移至中纬度地区的变性以及高原涡移到南海发展为热带气旋;

(2) 中低纬系统间能量和水汽的输送。有关中低纬度系统相互作用的研究方面, 许多作者在大尺度波-波及波-流相互作用方面已取得不少成果<sup>[2~6]</sup>。早在 20 世纪 50 年代初, 仇永炎<sup>[4]</sup>就注意到了台风与中纬度系统的相互作用对北方盛夏特大暴雨的影响, 他认为日本海渤海高压起着阻塞、阻挡

作用, 使东移的西风槽减速并向南延伸, 当与台风相遇, 三方面的共同作用可导致特大暴雨的发生。到了 90 年代, 仇永炎<sup>[5]</sup>又对 1949~1996 年中国北方地区 10 次过程雨量最大值大于 400 mm 的台风暴雨实例进行了统计分析, 发现一半的个例降水是由中低纬度系统相互作用造成的。

台风与西风槽相互作用造成的暴雨与中尺度系统的变化密切相关, 中尺度系统的活动特征对暴雨的预报至关重要。然而, 对中低纬度系统相互作用的中尺度特征的研究尚不多见, 本文将着重分析台风与西风槽相互作用过程中的中尺度特征。

## 2 9406 号台风的天气过程

9406 号台风(TIM)于 1994 年 7 月 8 日生成于菲律宾以东洋面, 在以后的 2 d 里稳定地向西北方向移动, 于 10 日 12 时在中国台湾省东南部沿海登陆, 然后穿过台湾海峡于 11 日晨在福建晋江再次登陆。登陆后继续向西北方向移动, 并于当天晚上在江西省境内减弱为低气压。在有利的大尺度环境场中, 该低压首先沿 115°E 向偏北方向移动, 11 日晚

\* 初稿时间: 2000 年 2 月 15 日; 修改稿时间: 2001 年 2 月 22 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40175019, 49975013)。

受西风槽的影响转向东北方向(图1)。该台风与西风槽发生相互作用在华中至华北等地造成了大范围的降雨。

从9406号台风的总雨量图(图1)来看,由于台风与西风槽的相互作用,在远离台风中心的西风槽前,32~40°N的数省市出现了呈西南—东北向分布的大范围降水区,100 mm的等雨量线从南到北达1000 km以上。这些降水并非台风本体降水,而

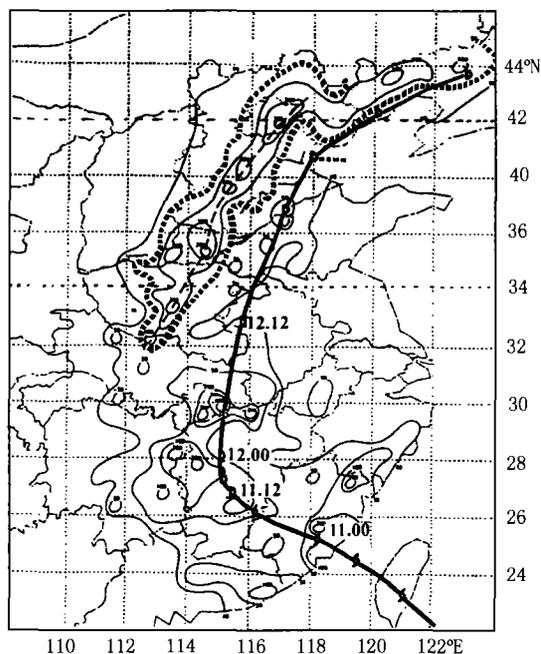


图1 9406号台风总雨量及路径图  
(雨量单位:mm;粗实线表示台风路径)

### 3 模式和资料简介

本文所用模式为PSU/NCAR的中尺度模式MM5第二版本的非静力模块。积分区域为 $3294\text{ km} \times 3294\text{ km}$ ,中心为 $35^{\circ}\text{N}$ , $115^{\circ}\text{E}$ ,格距为 $54\text{ km}$ ,垂直方向为23层 $\sigma$ 坐标,侧边界采用12 h时变边界,水循环采用郭晓岚参数化方案<sup>[7]</sup>。

所用资料为中国国家气象中心提供的T42全球分析场,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ,垂直方向有12层,分别为1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50 hPa,以及常规的地面和探空资料。文中以7月11日12时为起始时刻对这次台风与西风槽相互作用造成的远距离降水进行模拟试验研究。

是中低纬度系统相互作用造成的,一般称之为台风远距离降水。这部分降水主要发生在11日12时以后,从该台风11日12时~12日12时的24 h雨量实况(图2)可以看出,河南省郑州一带有一个200 mm的雨量中心,河北省中部( $38 \sim 39^{\circ}\text{N}$ , $115 \sim 117^{\circ}\text{E}$ )有两个150 mm的雨量中心,在 $40^{\circ}\text{N}$ 以北还有一个80 mm的雨量中心。这一雨带对应于图1中粗实线所包围的雨区,即台风的远距离降水。

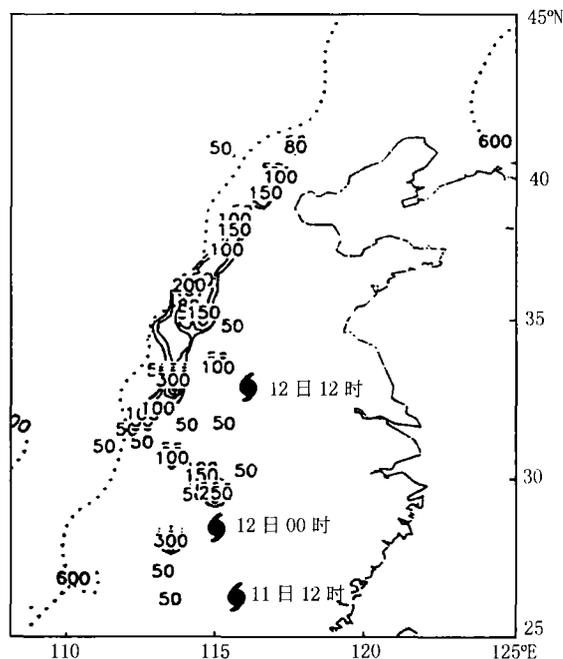


图2 1994年7月11日12时~12日12时的24 h雨量实况  
(雨量单位:mm;虚线表示地形等高线,单位:m)

### 4 试验方案

台风与西风槽相互作用所造成的暴雨强度与台风和西风槽的各自强度均有一定关系。为了考察台风与西风槽相互作用中的中尺度特征及其随台风与西风槽强度不同所产生的变化,本文设计了以下4个试验。

试验1:仅用原始T42分析场(图3c,d)和常规地面及探空资料形成模式初始场,把此试验作为控制试验。

试验2:把试验1初始场中9406号台风西北方向的西风槽加深(图3a)。利用卢咸池1992年提出的Legendre滤波方法<sup>[8]</sup>,改变槽的强度,即采用Legendre球谐函数对初始场进行波谱分析,通过不

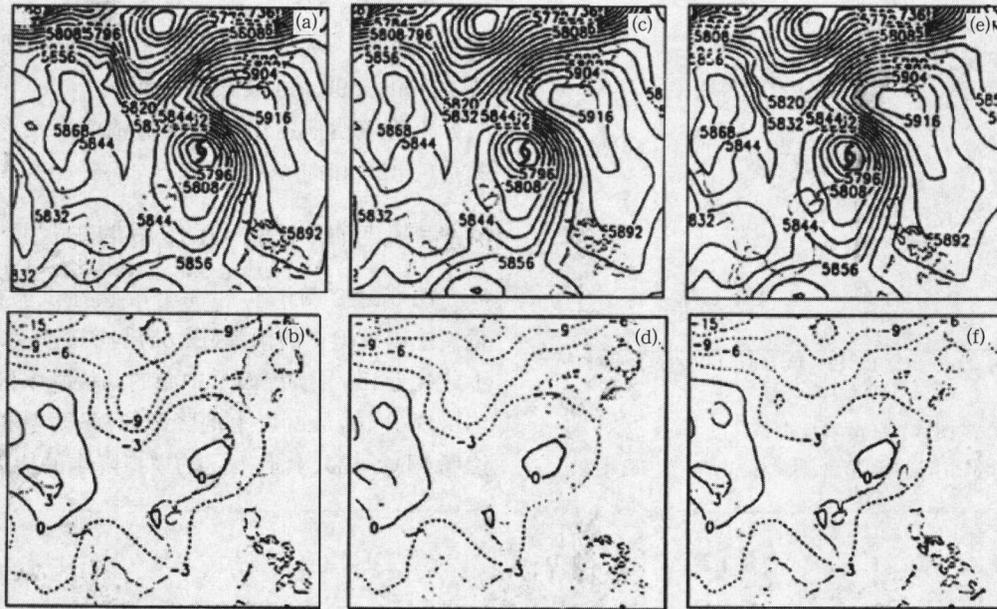


图3 数值试验所用1994年7月11日12时的T42分析场  
(a.深槽试验的高度场,b.深槽试验的温度场,c.控制试验的高度场  
d.控制试验的温度场,e.浅槽试验的高度场,f.浅槽试验的温度场)

同的波谱截断得出中纬度西风系统的高频和低频波谱。然后把高低频波谱进行重新组合。

根据上述方法,纬向取6波截断,把初始风场和高度场分解为高频场( $H_h$ )和低频场( $H_d$ )。则加强后的西风槽区的要素场由下式求得:

$$H = H_0 + 50\%H_h \quad (1)$$

其中, $H_0$ 代表原始分析场。

为了保证物理量的协调性,地面气压和温度场由风压关系和热成风关系求出。西风槽强度的变化在温度场上表现得尤为显著。深槽试验的温度(图3b)比控制试验有较强的温度梯度。

试验3:利用试验2的方法,把T42分析场中9406号台风西北方向的西风槽减弱(图3e,f),西风槽区要素场的组合按下式进行:

$$H = H_0 + 20\%H_d \quad (2)$$

由试验可见,浅槽的温度梯度(图3f)比控制试验(图3d)的梯度明显减弱。

试验4:把台风强度加强,台风中心海平面气压由992 hPa下降到978 hPa。

本文采用Chan和William<sup>[9]</sup>提出的台风切向风廓线来构造台风区域的水平风场。垂直方向上通过对流层中上层风场随高度气旋性减小而形成300 hPa附近的暖心结构。然后利用王玉清的修正平衡方程方案<sup>[10]</sup>,由风场得出温度场和气压场,湿

度采用下湿上干的结构。最后把上述人造台风按一定权重与原始分析场进行叠加,即可得到包含任意强度台风的模式初始场(图略)。

## 5 尺度分离方案

大气环流系统是极为复杂的,它包含着从湍流到超长波等各种尺度的运动系统。不同尺度的系统有着不同的物理性质。同时,它们之间又存在着复杂的相互作用。要分析大气系统相互作用的多尺度特征必须对大气环流进行尺度分离。Orlanski<sup>[11]</sup>根据观测和理论分析结果,提出了一个比较细致的尺度划分方案,得到了比较普遍的采用。他把天气系统分为大、中、小3种尺度。其中中尺度系统的水平尺度为20~2000 km。对中国的夏季暴雨来讲,它们通常是叠加在大尺度气象场上的水平尺度为200~500 km的中尺度或次天气尺度系统造成的。在常规观测的气象场上很难辨认出中尺度系统。为了分离中尺度天气系统,这里采用夏大庆<sup>[12]</sup>提出的25点平滑算子对各要素场进行尺度分离,首先滤掉2,3,4和5倍格距波得到低通滤波场,然后由原场减去低通滤波场即可得到中尺度场,用来研究中低纬度系统相互作用过程的中尺度特征。

图4给出了平滑响应曲线。从图4可以看出,经过本平滑方案,气象场的主要部分(约80%)是波

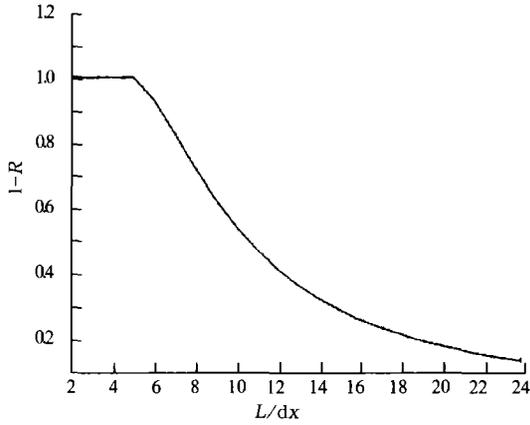


图4 平滑响应曲线

(横坐标:波长  $L$  对格距  $dx$  的倍数,纵坐标: $1-R$  为响应函数)

长小于 500 km 的系统,波长大于 500 km 的系统基本平滑掉了。从图 5 可以看出,滤波扰动场基本反映了 200~500 km 波段的中尺度信息。而且,后面的分析将表明该中尺度系统与槽前降水存在密切的关系(图 5b 和图 6a)。

### 6 台风与西风槽相互作用的中尺度特征

图 6 为控制试验和 3 个敏感性试验的 24 h 雨量。控制试验 1 的雨带(图 6a)与实况降水区(图 1b)十分接近,24 h 实况雨量中心的几块降水区所在位置均出现了 100 mm 以上的降水,只是雨量稍偏小。这说明 MM5 模式具有一定的模拟降水的能力。

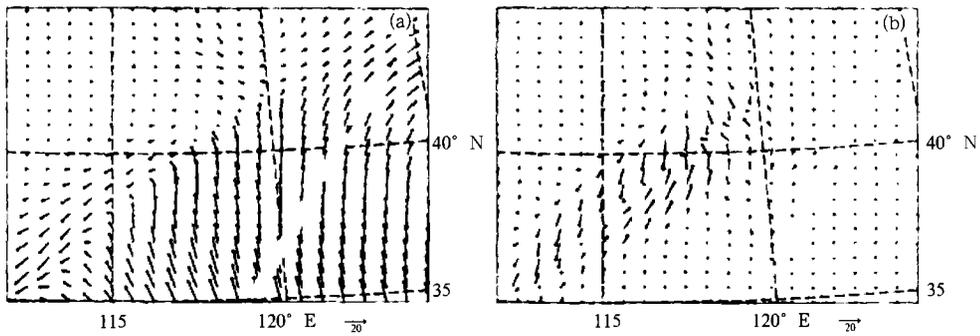


图5 1994年7月12日04时850 hPa 风场

(a. 天气尺度,b. 经滤波后的中尺度)

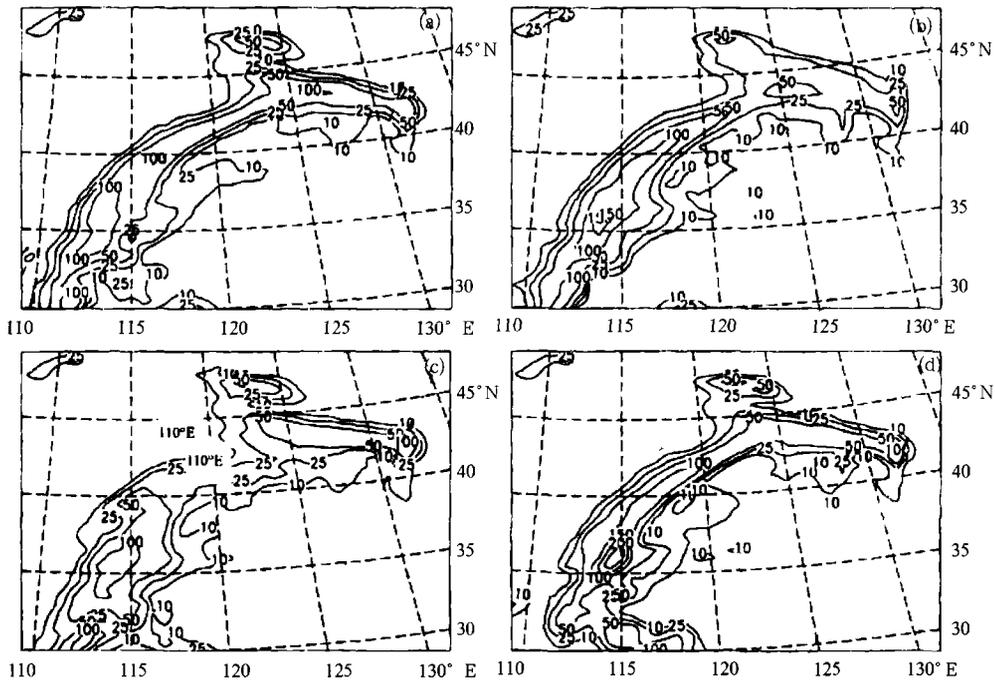


图6 控制试验和3个敏感性试验的24 h雨量

(a. 控制试验, b. 深槽试验, c. 浅槽试验, d. 台风加强试验;单位:mm)

敏感性试验 2,3,4 的结果表明,当台风加强(图 6d)及槽加深(图 6b)时,降水增多,30~40°N 的 100 mm 降水区有所扩大,且出现了 200 和 150 mm 的雨量中心。而槽减弱时,则降水减少(图 6c),30~40°N 的 50 及 100 mm 雨区明显缩小。

本文的研究重点是分析台风强度及西风槽深度的变化在中低纬度系统相互作用中的中尺度特征及其与暴雨的关系。

### 6.1 中尺度场与降水的对应关系

对控制试验每小时模拟场的分析表明,分离出的中尺度场与降水区有非常好的对应关系。中尺度流场上降水区上空低层均为辐合,高层为明显的辐散。这种特征在散度场上表现得尤为显著(图 8)。1994 年 7 月 12 日 04 时的中尺度散度场中 40°N 附近台风远距离降水处低层(850 hPa)为辐合(图 8a),高层(200 hPa)为辐散(图 8b)。这说明,台风与西风槽相互作用所产生的槽前降水与中尺度系统存在十分密切的关系。高低空散度场的配置对中低纬度系统相互作用所产生的降水有很好的指示意义。

### 6.2 西风槽强度的变化

对每小时的模拟雨量的分析表明,西风槽强度的改变所造成总降水量的改变在某些时段上表现得非常明显。由于篇幅有限,本文仅就其中某一个时段加以分析。

从敏感性试验 2 和 3 的模拟结果来看,西风槽强度的变化所引起降水的变化主要是通过中尺度系统的改变来实现的。1994 年 7 月 12 日 04~05 时的 1 h 降水(图 7)表明,深槽试验的降水(图 7b)要比控制试验(图 7a)的多,40°N 附近雨量中心达到 20 mm。浅槽的刚好相反(图 7c),10 mm 雨区明显缩小。从该时刻的中尺度 200 hPa 及 850 hPa 散度场(图 8c,d,e,f)可以看出,大尺度槽的加深(减弱)会造成中尺度高低层辐散、辐合的加强(减弱)。深槽试验中,40°N 附近的雨区处 850 hPa 辐合最大值达到  $-20 \times 10^{-5} s^{-1}$ (图 8c),200 hPa 辐散达到  $20 \times 10^{-5} s^{-1}$ (图 8d),均约为控制试验(图 8a,b)的 2 倍。在槽减弱的试验中,低层的辐合明显减弱(图 8e),但高层辐散变化不太明显。试验 2,3 说明天气尺度的西风槽强度的变化明显地影响中尺度系统的特征。

本文还从能量学角度对台风与西风槽的相互作用进行了分析。图 9 为 7 月 12 日 04 时尺度分离后大尺度和中尺度场中敏感性试验的动能与控制试验的动能之间的差值场。在差值场中,正负值表示敏感性试验的动能大(小)于控制试验的功能。从中尺度差值场的结果可以看出,槽的强度变化所引起的中尺度能量变化大值区与降水变化的大值区基本一致(图 10a,b),槽的加强造成了降水区中尺度动能的增加(图 9a),从而造成降水的增加(图 10a);槽的

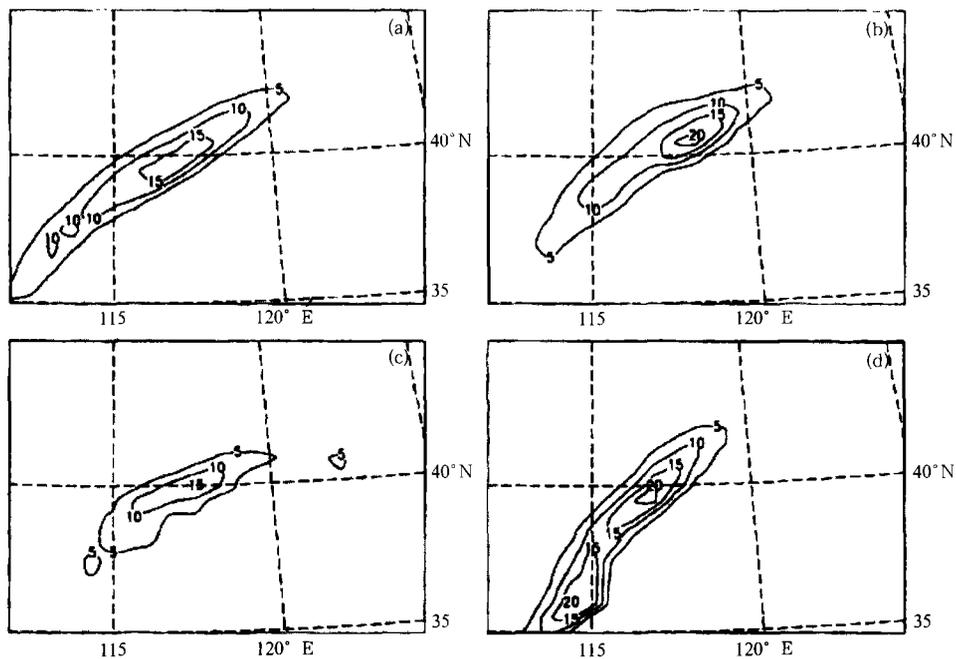


图 7 1994 年 7 月 12 日 04~05 时的 1 h 雨量  
(a. 控制试验, b. 深槽试验, c. 浅槽试验, d. 台风加强试验; 单位: mm)

减弱则造成了降水区中尺度动能的减少(图 9c), 并从而造成降水的减少(图 10b)。而大尺度场动能的改变(图 9b,d)与降水变化关系不大。这种特征在降水较大的时段均有反应。这更进一步说明了台风与西风槽相互作用所致降水主要是通过中尺度系统

来实现的。西风槽强度的改变将直接导致中尺度系统的变化, 并从而造成降水量的不同。

### 6.3 台风强度的变化

在台风与西风槽的相互作用过程中, 台风强度的变化同样会造成台风远距离降水的改变。

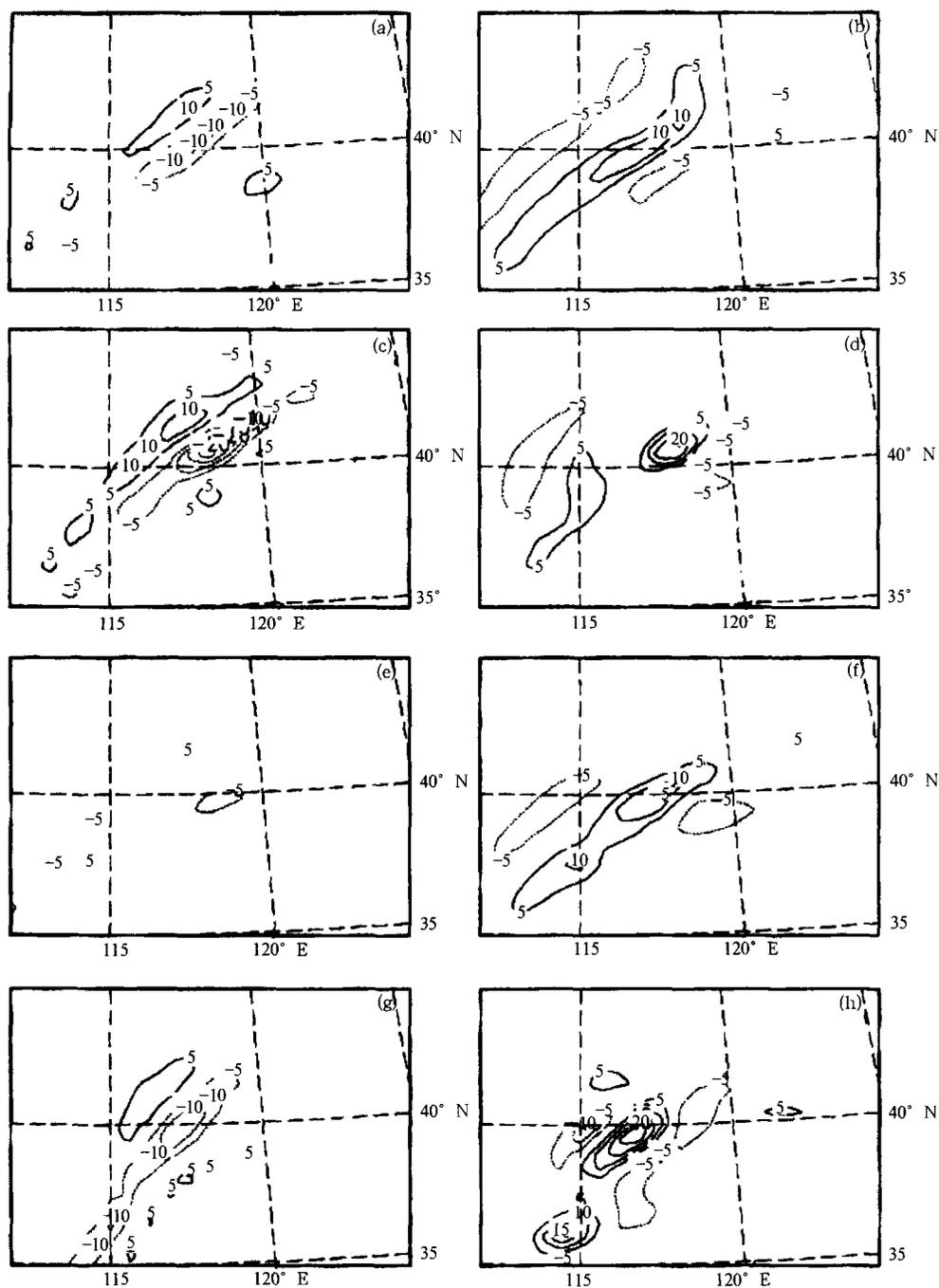


图 8 1994年7月12日04时的高低层中尺度散度场

(a. 控制试验, 850 hPa, b. 控制试验, 200 hPa, c. 槽加强, 850 hPa, d. 槽加强, 200 hPa, e. 槽减弱, 850 hPa, f. 槽减弱, 200 hPa, g. 台风加强, 850 hPa, h. 台风加强, 200 hPa。单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ )

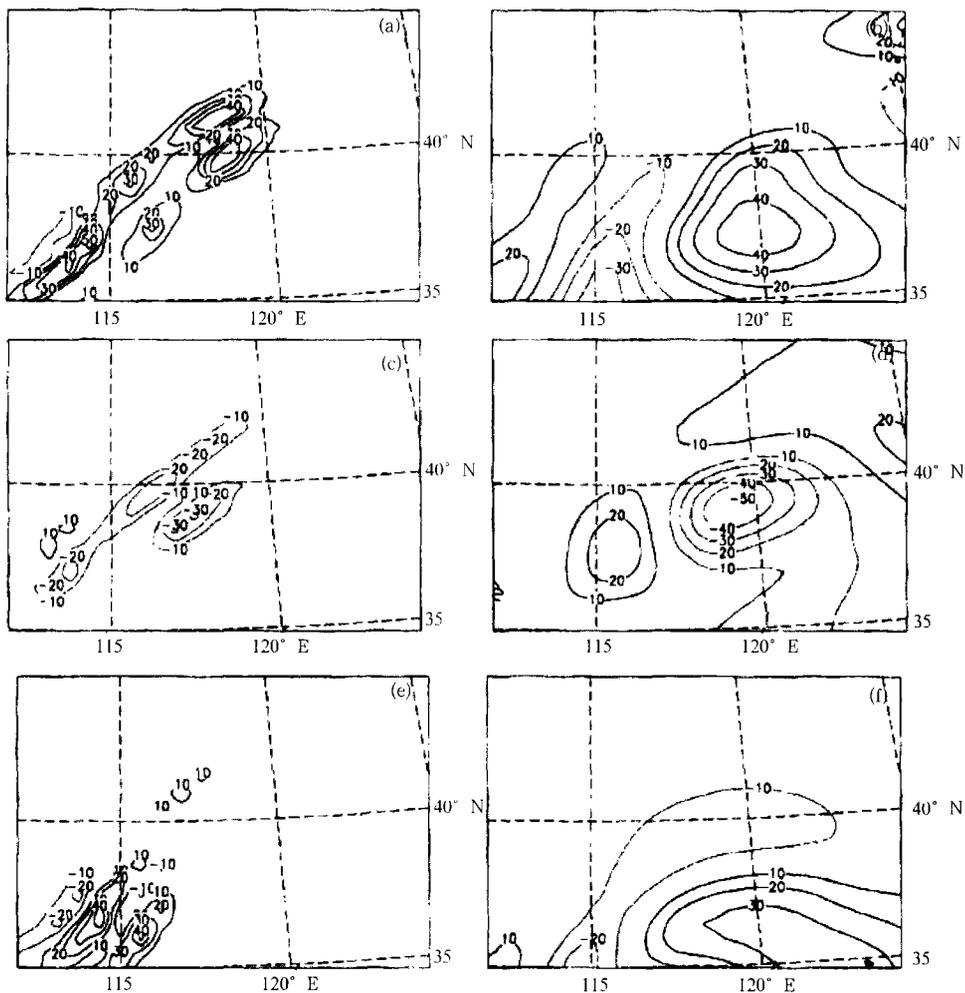


图 9 1994 年 7 月 12 日 04 时 850 hPa 上不同尺度系统的动能变化  
 (a. 中尺度场, 深槽试验 - 控制试验, b. 大尺度场, 深槽试验 - 控制试验, c. 中尺度场, 浅槽试验 - 控制试验, d. 大尺度场, 浅槽试验 - 控制试验, e. 中尺度场, 台风加强试验 - 控制试验, f. 大尺度场, 台风加强试验 - 控制试验; 实线为正, 表示动能增加, 虚线为负, 表示动能减少; 单位:  $m^2/s^2$ )

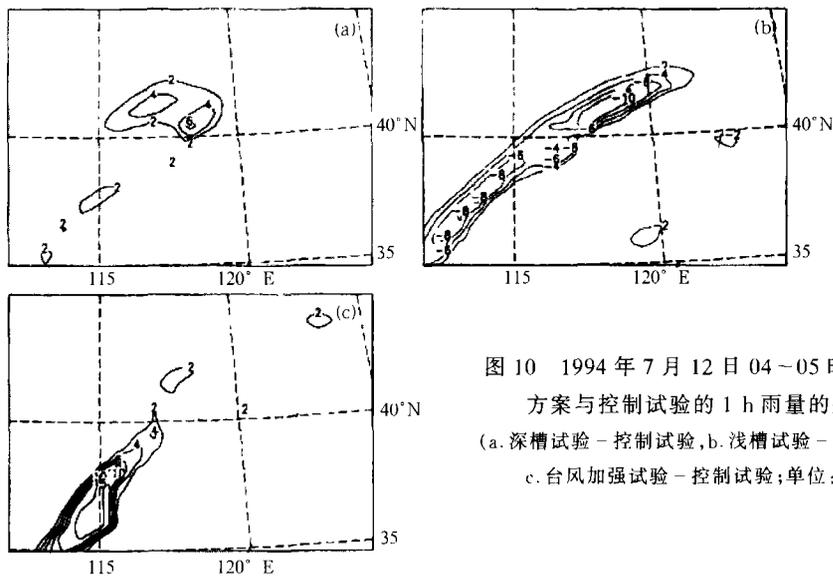


图 10 1994 年 7 月 12 日 04 ~ 05 时的不同  
 方案与控制试验的 1 h 雨量的差值  
 (a. 深槽试验 - 控制试验, b. 浅槽试验 - 控制试验, c. 台风加强试验 - 控制试验; 单位: mm)

试验 4 的 7 月 12 日 04~05 时的降水(图 7d)表明该时段台风加强后降水有所增加。40°N 和 36°N 附近均出现了大于 20 mm 的雨量中心。这说明台风的强度是影响台风与西风槽相互作用所致降水的另一个重要因子。

从该时刻的中尺度散度场来看,台风的加强同样造成了降水区低层辐合和高层辐散的加强(图 8g,h)。而且台风加强试验的中尺度动能与控制试验的中尺度动能之间的差值场中的大值区(图 9e),也恰好为降水变化大值区所在位置(图 10c)。而大尺度的差值区(图 9f)则与降水变化关系不大。这说明台风强度的增大通过与中纬度槽的相互作用会造成降水区中尺度动能的增加,从而造成降水的增加。

以上试验分析表明,台风与中纬度系统的相互作用非常显著地表现在中尺度系统的活动上。台风及西风槽强度的改变将直接导致中尺度系统强度及

能量的变化,从而导致降水量的改变。

## 7 结 论

本文利用非静力中尺度模式 MM5,对 9406 号台风从 11 日 12 时~12 日 12 时的 24 h 降水进行了模拟。利用滤波分析方法对模式结果进行了尺度分离。中尺度场的分析表明台风与中纬度系统的相互作用非常显著地表现在中尺度系统的活动上。高低空中尺度散度场的分布对中低纬系统相互作用所产生的降水具有一定的指示意义。而且台风及西风槽强度的改变将直接导致中尺度系统强度的变化,并从而造成降水的不同。文中还从能量学角度对不同尺度系统的能量变化进行了分析。结果表明,中尺度场的能量变化极值区与中低纬度系统的强度变化密切相关,且与降水的变化有较好的对应关系。本文的研究结果预示着中低纬度系统相互作用中的中尺度特征对其暴雨的发生有一定的指示意义。

## 参考文献

- 1 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论.北京:科学出版社,1979.491pp
- 2 Cheng Zhaohui, Kang Di, Chen Lianshou, et al. Interaction between Tropical Cyclone and Meiyu Front. *Acta Meteor Sinica*, 1998, 13(1): 35~46
- 3 华北暴雨研究组.华北暴雨.北京:气象出版社,1992.24~53
- 4 仇永炎.夏季西太平洋及东亚热带波动的运行及结构. *气象学报*, 1952, 23(1,2): 85~98
- 5 仇永炎.北方盛夏台风暴雨的天气型及其年际变率. *气象*, 1997, 23(7): 3~9
- 6 晁淑懿,仇永炎,汪迎辉.9608号台风登陆北上总能量变化及渤海高压维持. *气象*, 1998, 24(6): 3~10
- 7 Georg A Grell, Jimy Dudhia, David R Stauffer. A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 1995. 46pp.
- 8 卢咸池,何斌.初值格谱变换的分析比较. *计算物理*, 1992, 9(4): 768~770
- 9 Chan J C-L, Williams R T. Analytical and numerical studies of the beta-effect in tropical cyclone motion. Part 1: Zero mean flow. *J Atmos Sci*, 1987, 44: 1257~1265
- 10 Yuqing Wang. An inverse balance equation in sigma coordinates for model initialization. *Mon Wea Rev*, 1995, 123: 482~488
- 11 Orlanski I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull Amer Meteor Soc*, 1975, 56: 527~530
- 12 夏大庆,郑良杰,董双林等.气象场的几种中尺度分离算子及其比较. *大气科学*, 1983, 7(3): 303~311

## MESOSCALE CHARACTERISTICS OF THE INTERACTION BETWEEN TC TIM(9406) AND MID - LATITUDE CIRCULATION

Meng Zhiyong Xu Xiangde Chen Lianshou

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

### Abstract

With PSU/NCAR nonhydrostatic mesoscale model MM5, the 24 h rainfall during 12 UTC 11 - 12 UTC 12 July 1994 caused by Typhoon Tim (9406) is simulated in this paper. Scale discretizing is performed on the results with filtering scheme. Analyses on the mesoscale fields show that the interaction between typhoon and westerly trough is apparently manifested by mesoscale activities. The distribution of divergence fields at lower and upper levels can have a kind of indication meaning for the rainfall caused by the interaction between mid and low latitude circulations. Furthermore, intensity changes of westerly trough would directly lead to intensity changes of mesoscale systems and thus lead to different rainfall. Besides, energy change features of different motion scales are also investigated from energetics point of view. The result shows that the maximum and minimum value areas of energy change on mesoscale fields are closely related to the intensity changes of mid and low latitude systems, and have rather good correlation with precipitation changes.

**Key words:** Typhoon, Westerly trough, Interaction between mid and low latitude circulations, Mesoscale characteristics.