

# 登陆台风等熵面位涡演变的数值模拟研究

季 亮<sup>1</sup> 费建芳<sup>2,3</sup>

(1. 解放军理工大学理学院, 南京 211101;  
2. 解放军理工大学气象学院; 3. 南京大学大气科学系)

**提 要:** 选取 1997 年第 11 号台风温妮为研究个例, 通过中尺度模式 MM5 模拟再现了该台风登陆后经历初期减弱、变性及变性后再次发展的演变过程。引入 Ertel 等熵面位涡收支方程, 深入分析了登陆台风结构演变的过程中绝热与非绝热作用对对流层低层位涡局地变化的影响。研究表明: 台风温妮深入内陆的过程中, 对流层低层台风中心西北侧位涡增长, 且大值中心不再与台风中心重合; 由于摩擦和非绝热加热的存在, 对流层低层位涡不守恒, 其局地变化主要决定于位涡的水平平流(守恒项)、位涡的垂直平流、加热的垂直微分(非守恒项)的分布; 台风温妮变性前后, 对流层低层位涡的守恒性逐渐减弱, 非守恒项尤其是加热的垂直微分对位涡的局地增长的正贡献不断增强直至占有主导地位。

**关键词:** 台风 变性 等熵面 位涡收支

## Numerical Simulation of the Evolvement of Potential Vorticity of Landfall Tropical Cyclone on Isentropic Surface

Ji Liang<sup>1</sup> Fei Jianfang<sup>2,3</sup>

(1. Institute of Philosophy, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101;  
2. Institute of Meteorology, PLA Univ. of Sci. & Tech.; 3. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

**Abstract:** The maintenance process of typhoon Winnie (1997) after landfall was reappeared by using the MM5 model. The numerical simulations cover the entire process including initial weakening, extratropical transition and redeveloping. The adiabatic and diabatic effect on the local change of potential vorticity (PV) at lower troposphere was analyzed, during the entire process using Ertel potential vorticity budget equation on isentropic surface. The results show that the PV increases in the west and north of tropical cyclone at lower troposphere and the location of core is not the same to the typhoon. Because of the existence of friction and diabatic heating, the PV changed at lower troposphere. The local change is

mainly decided by the horizontal advection of PV (conservation term), vertical advection of PV, vertical differential of heating (non-conservation terms). With the happening of extratropical transition, the PV at lower troposphere changed further and the positive effect of diabatic terms especially vertical differential of heating on the local increase of PV dominated.

**Key Words:** tropical cyclone extratropical transition isentropic surface potential vorticity budget

## 引言

我国夏季频发登陆台风,由此带来的暴雨、狂风等自然灾害给人民生命财产安全带来巨大威胁,特别是登陆后深入内陆长久不消或再次发展的台风,往往与中纬度环流系统发生相互作用,热力、动力结构发生明显变化,即台风变性,其预报准确性较低。Klein<sup>[1]</sup>等通过对西北太平洋30个台风的合成研究,提出了台风变性过程的概念模型,Dimigo等<sup>[2]</sup>指出低层热量和气旋性涡度与高层西风槽带来的正涡度平流的结合和复杂的交换促使飓风最终变性为温带气旋。李英等<sup>[3-5]</sup>对NCEP资料进行尺度分析,指出登陆后长久维持的台风位于长波槽前并有向偏北移动靠近中纬度斜压锋区的趋势,且从次天气尺度环流中获得动能补充,进而采用卢咸池的波谱分析方法,通过改变高空槽强度探求该环流系统对登陆台风变性的影响。

1942年,Ertel提出了等熵位涡的概念,并指出在绝热、无摩擦的情况下,对于空气团的二维轨迹来说位涡是守恒的。吴国雄<sup>[6]</sup>提出了关于“倾斜涡度发展”的观点,分析研究了等熵面上位涡变化与涡度发展的关系,指出当空气块沿等熵面下滑时,涡度的垂直分量将增加,即系统涡旋性增强。登陆台风北上深入内陆的过程中,常伴有降水凝结潜热释放、非绝热加热等非守恒作用,由此引发对流层低层的位涡异常,进而影响台风动力结构的演变。基于此,本文选取9711号台风温妮为研究个例,引入Ertel等熵面位涡收支

方程,通过数值模拟的方法探求登陆台风结构变化的不同时期对流层低层等熵面位涡的守恒性,同时探讨守恒性与非守恒性相对作用的大小。

## 1 模拟方案设计与初步结果

台风温妮在源地生成后,强度迅速增强,在登陆我国大陆后继续北上的过程中,受中纬度环流系统影响发生变性,热力结构转为西冷东暖的不对称结构。经历变性后,“温妮”强度再次增强,中心气压降幅达到10hPa/12h。伴随台风强度的变化,其移动路径、动力结构等也发生较大变化。本文利用MM5 V3.6中尺度模式对登陆后的台风温妮进行72小时模拟,模拟过程涵盖了台风初期减弱、经历变性以及变性后再次增强的全过程,模式初始场由1997年8月19日00时(UTC)的常规资料经客观分析后插值到中尺度网格上构成,对台风未进行人工处理。模拟采用双重嵌套网格技术,区域中心点位于35.5°N、117.3°E,粗、细网格格距分别为45km、15km,格点数分别为151×151和199×151,垂直方向分为不等距23层。粗、细网格分别选用Kuo和Grell对流参数化方案,均应用高分辨率的Blackadar边界层方案。

图1给出19日00时300hPa流场形势。此时台风温妮强度较强,中心气压为975hPa。从动力结构上看,台风中心上空300hPa仍为气旋结构,最大正涡度中心较地面环流中心偏南。值得注意的是,台风温妮西北侧高空存在宽广的西风槽,随着台风温

妮进一步北上深入内陆,槽前冷空气侵入台风中心,促使台风变性。这之后,“温妮”强度再次增强,中心气压降幅达到 10hPa/12h,此时台风温妮已成功变性为温带气旋。

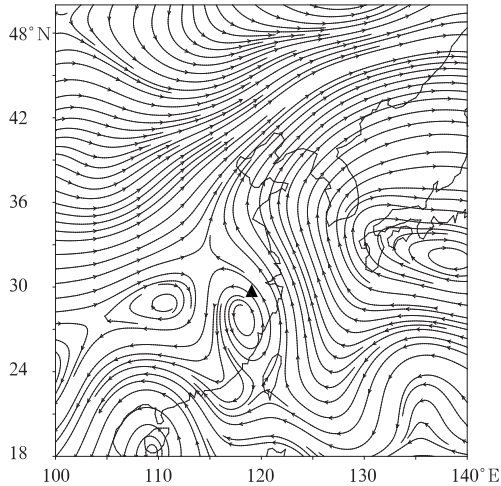


图 1 1997 年 8 月 19 日 00 时 300hPa 流场图  
图中三角标注为模拟台风中心

图 2 为 19 日 00 时至 22 日 00 时每 6 小时一次的台风中心移动路径和中心气压变化图,图中叠加了实况。从 72 小时台风移动路径来看,本次数值模拟基本把握了这段时期台风温妮的移动趋势,即先北行直至进入山东省,而后转向偏东北行入渤海,最后在辽宁再次登陆并保持东北行深入东北境内。

模拟台风中心气压的变化也捕捉到了实际台风中心气压先升高再降低的演变趋势。积分前 12 小时,模拟台风和实况一样表现为台风中心气压的升高,只是实况的升高速度更快些。之后,台风强度持续减弱,中心气压不断升高,这一过程在数值模拟结果中得到较好再现。20 日 18 时开始,实况台风出现增强,中心气压于 21 日 12 时达到最低值,为 984hPa。模拟台风的再次加强与实况基本

同步,只是中心气压的降幅要小。

通过对台风移动路径和中心气压变化的分析,我们认为此次对“温妮”登陆过程的数值模拟是比较成功的,数值模拟能够再现台风在 19 日 00 时至 22 日 00 时 72 小时内的强度变化趋势和移向。

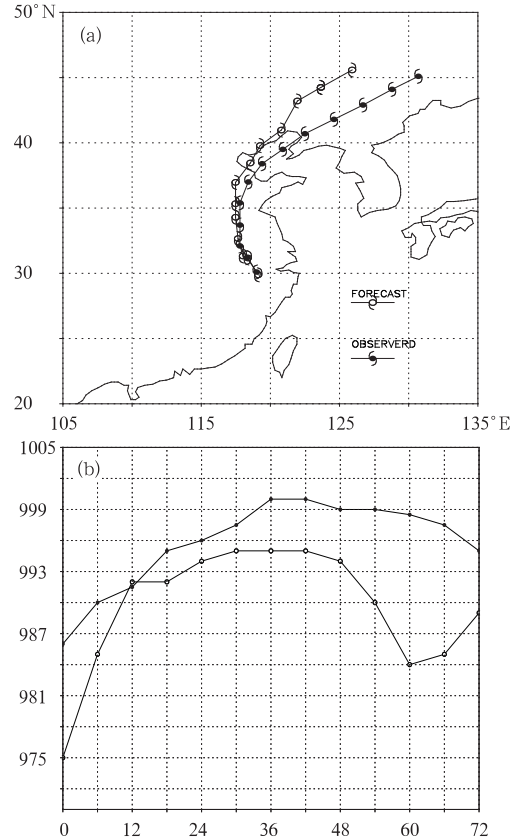


图 2 台风温妮路径(a)和中心气压变化(b)图  
图 b 中空心圆为实况,实心圆为模拟,  
时间自 1997 年 8 月 19 日 00:00  
UTC 至 22 日 00:00UTC,时间间隔为 6h

## 2 位涡收支方程

准静力的 Ertel 位涡方程表达式为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ -\zeta_{eff} g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right\} = -V_H \cdot \nabla_{\theta} \left\{ -\zeta_{eff} g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right\} - \frac{d\theta}{dt} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ -\zeta_{eff} g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right\}$$

位涡的局地变化      位涡的水平平流      位涡的垂直平流

(1)

$$\begin{aligned}
 & + \left\{ -\zeta_{ad}g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right\} \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} + \nabla \cdot \left\{ \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{\partial (\mathbf{V} \times \hat{\mathbf{k}})_\theta}{\partial \theta} \right\} g \frac{\partial \theta}{\partial p} - \nabla \cdot \left\{ (\mathbf{F} \times \hat{\mathbf{k}}) \right\} g \frac{\partial \theta}{\partial p} \\
 & \text{加热的垂直微分} \qquad \qquad \text{加热的水平微分} \qquad \qquad \text{摩擦项}
 \end{aligned}$$

其中  $\zeta_{ad} = (\zeta_\theta + f)$  为等熵面上绝对涡度,  $-g \frac{\partial \theta}{\partial p}$  为静力稳定度。对于位涡的守恒性来说,所有包含加热和摩擦的项都为零,则方程(1)变为  $\frac{\partial PV}{\partial t} = -V_H \cdot \nabla_\theta PV$ ,即位涡的局地变化单纯地决定于位涡的水平平流,因此,我们称位涡的水平平流为守恒项,而将方程(1)右边剩余四项称为非守恒项。

利用模式粗网格输出的高分辨率资料,计算了等熵面上方程(1)中各项分布,通过计算发现,加热的水平微分项分布主要集中在台风中心附近,且较其他非守恒项小1个量级,对位涡的局地变化影响较小,因此后面的分析中不考虑该项。在等熵面的选取上,考虑到对流层低层存在比较强的加热和热量输送,位涡异常受非绝热影响较大,因此选定位于800~700hPa的310K等熵面作为研究参考等熵面。具体的步骤为:建立空间  $\theta$  坐标系,将模式输出的等  $\sigma$  面资料插值到各等熵面上, $\theta$  坐标系最低层设为300K,每层之间间隔为5K,等间距共15层,在  $\theta$  坐标系下计算方程(1)中各项大小。

### 3 等熵面位涡收支分析

本节利用 MM5 粗网格模拟输出产品,

主要分析包括310K等熵面上风场、位涡分布的演变与该等熵面上方程(1)中守恒项与非守恒项的对比与演变,目的在于探求在登陆台风结构变化的不同时期守恒项与非守恒项对台风低层位涡分布的影响。

#### 3.1 310K等熵面风场分布

图3为每24小时积分一次的310K等熵面上水平风速的分布图。可以看出,积分开始12小时后即19日12时,台风温妮地面气旋中心位于32°N、118°E附近,台风中心气压逐渐升高,此时对流层低层台风中心附近风场的分布形势是右侧大风区较强,最大风速为  $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而左侧相对较弱。随着台风逐渐北上进入山东省,到20日12时台风能量由于摩擦等逐渐消耗,台风中心附近最大风速有所减小,中心值为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但风场分布形势变化不大。随着西北侧高空槽的移近,强盛的西风环流削弱了台风中心北侧的东风,21日12时,伴随着台风温妮的再次加强,对流层低层风场形势发生显著改变,最明显的是原先位于台风中心右侧的大风速区环绕台风中心反气旋式旋转,移至台风中心的东南侧,这种风场形势一直持续到积分结束。造成这种变化的主要原因是台风北上深

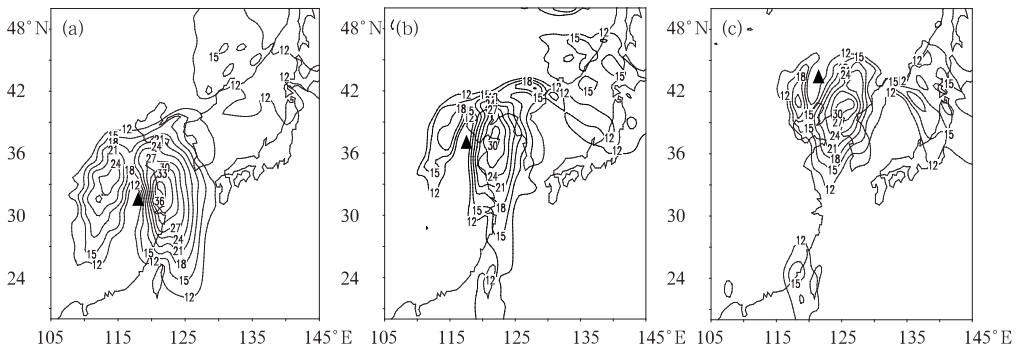


图3 310K等熵面上水平风速强度场分布图(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a) 19日12时, (b) 20日12时, (c) 21日12时,图中三角标注各时刻模拟台风中心,下同)

入内陆的过程中,台风中心南侧西风环流明显加强,强度超过北侧的东风区,因此台风中心附近的风场强度的低值区由南转向北。

### 3.2 310K 等熵面位涡分布

图4为各时次的310K等熵面位涡分布图。19日12时,台风中心对应一个中心值为2.2PVU的位涡大值区,对比模式积分初始时刻310K等熵面位涡分布(图略),可以看出此时台风中心北侧出现了一狭长螺旋形的位涡带,这种趋势随积分时间增长变得越来越明显,对照卫星云图可以发现,该螺旋形位涡带形状类似于台风中心北侧的暖锋云系。伴随着对流层低层螺旋形位涡带的增强,台风中心对应的位涡区域逐渐呈南北向

伸展、东西向收缩。20日12时,原先近乎为圆形的位涡区已经因向北伸展而变得细长。21日00时,台风中心加速北上,穿越渤海再次登陆进入东北境内,此时台风中心附近位涡分布发生了非常明显的变化,主要表现为台风中心西北侧和东南侧各存在一个较大的位涡正值区,其中西北侧的强度较强,中心值达到2.7PVU,而东南侧的则相对较弱,但中心值仍超过2.1PVU。从模拟台风中心气压变化趋势来看,此时台风已开始增强。对比21日00时、21日12时位涡的分布图(图4c,d),我们发现环绕台风中心的位涡区呈现气旋式旋转,同时强度有所减弱,积分结束时(图略)台风中心附近较强位涡正值区已位于其正南侧。

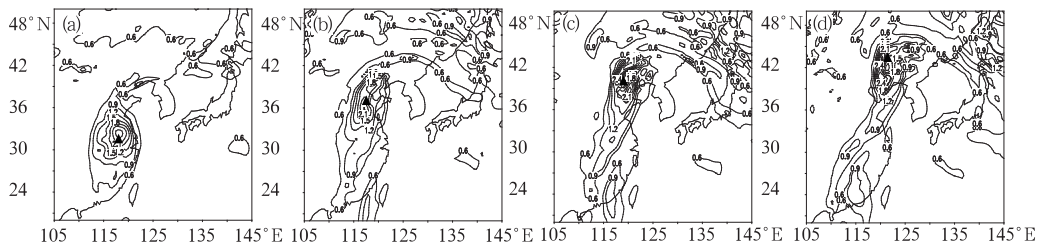


图4 310K等熵面上位涡分布图(单位:PVU)  
(a) 19日12时, (b) 20日12时, (c) 21日00时, (d) 21日12时

### 3.3 310K 等熵面上位涡方程各项演变

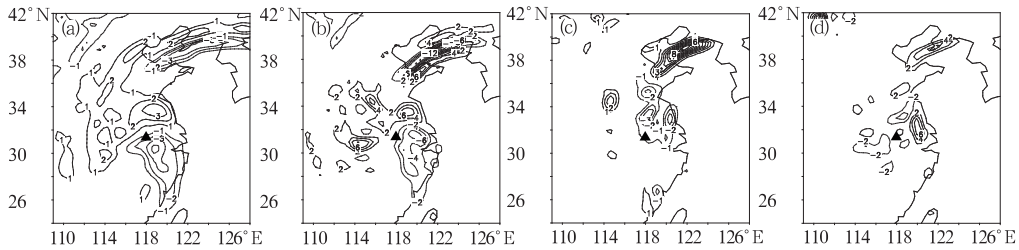
积分72小时中,模拟台风经历了初期减弱、变性及变性后再次加强的过程。通过对模拟台风中心气压演变分析,我们选取19日12时、20日12时、21日12时三个时次作为模拟台风结构演变不同时期的代表时刻。通过分析这三个时刻等熵面位涡收支,进一步探求登陆台风结构演变的过程中,守恒项和非守恒项对位涡变化的不同影响。

图5、6、7分别为上述三个时次的310K等熵面位涡方程(1)中各项分布图。19日12时,模拟台风处于减弱期,位涡的局地变化分布表现为环绕台风中心的一对偶极子,台风中心北侧有位涡的增长,而东南侧有位涡的

减小(如图5a)。从强度上看,南侧位涡的减少大于北侧的增加,但就范围来讲,前者又小于后者。观察方程(1)右边各项分布看出,守恒项即位涡的水平平流项的分布与位涡的局地变化很相似(图5b),同样为台风中心北侧位涡增长,而东南侧位涡减少,这说明在积分初期台风发生变性前,位涡的水平平流项对台风中心附近位涡的局地变化有重要的贡献。但我们注意到,守恒项并没有描述出台风北侧远距离向下游的位涡伸展,该项在此区域为较大的负值,必然需要来自非守恒项的正值补充。位涡的垂直平流项在该区域为较强的正值(图5c),削弱了位涡水平平流项的负值,但在台风中心北侧该项却为负值。此时加热的垂直微分项在台风中心东侧及北

侧均为正值(图 5d), 削弱甚至抵消了位涡垂

直平流项在上述区域的负值。



5 1997 年 8 月 19 日 12 时 310K 等熵面上位涡方程各项分布图(单位:  $10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$ )  
(a) 位涡局地变化, (b) 位涡水平平流, (c) 位涡垂直平流, (d) 加热垂直微分

20 日 12 时, 模拟台风北上深入高空槽, 冷空气入侵使得台风热力结构发生变化, 台风经历变性。此时对流层低层位涡局地变化主要集中在台风中心北侧, 增长区中心值由  $3 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$  加强为  $6 \times 10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$ , 且台风中心东偏南侧由 24 小时前的位涡减少转为增长(如图 6a)。尽管位涡水平平流项的分布形势仍与位涡的局地变化相似(如图 6b), 但与之相比该项在台风中心北侧出现了较强的负值

区, 中心强度大于  $6 \times 10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$ , 同时位涡的垂直平流项在该区域的负值加大了与位涡局地增长的差异(图 6c)。值得注意的是, 加热的垂直微分项在前两项为较强的负值区域均为强度更强的正值分布(图 6d), 中心值约为  $25 \times 10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$ , 从而有效补偿了守恒项和位涡的垂直平流对位涡局地增长的削弱, 该非守恒项对位涡局地增长的正贡献逐渐加强。

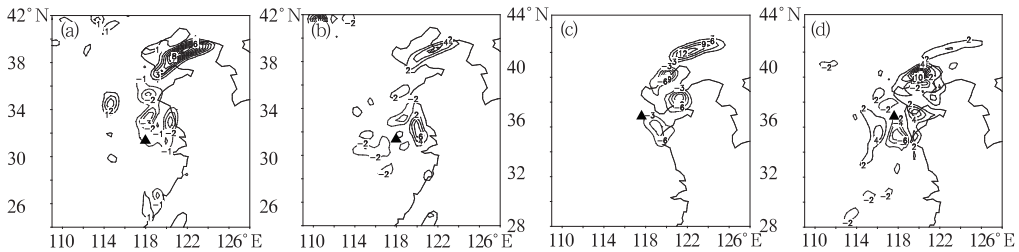


图 6 1997 年 8 月 20 日 12 时 310K 等熵面上位涡方程各项分布图  
说明同图 5

21 日 12 时, 台风温妮经历变性后再次加强, 对流层低层 310K 等熵面上台风中心东南侧的位涡局地增长加强, 强度达到  $4 \times 10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$  的范围明显扩大, 而台风中心东北侧的正值区范围缩小, 强度减弱(图 7a)。同时台风中心西南侧位涡增长区外侧的负值区明显增强, 中心值达到  $-10 \times 10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$ 。位涡的水平平流项即守恒项较好的描述了两个位涡增长区和一个减弱区, 但没有很好的对应出台风东北侧的一个位涡增长

区(图 7b)。在该位涡增长区, 位涡的垂直平流项表现为正负相间分布(图 7c), 而加热的垂直微分项在此处存在一个强度很强的正值区, 中心值约为  $18 \times 10 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}$ (图 7d)。对应 21 日 00 时至 21 日 12 时的 12 小时模拟降水图(图略)可以看出, 强降水区位于台风中心北侧, 12 小时最大降水量达到 90mm。强降水引发的凝结潜热释放, 使该地区加热率增大, 加热的垂直微分项正值区与强降水区有很好的对应。

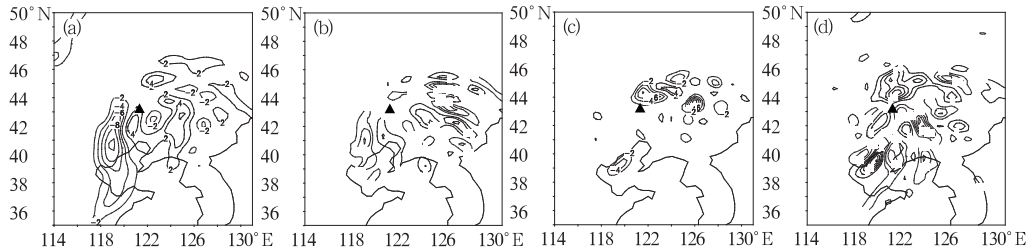


图7 1997年8月21日12时310K等熵面上位涡方程各项分布图  
说明同图5

#### 4 结论

本文选取台风温妮为研究个例,通过MM5 72小时的数值模拟,较好地再现了台风温妮登陆后路径、强度的演变过程。在此基础上,利用模式输出结果深入分析了登陆台风结构演变过程中对流层低层等熵面位涡守恒性质,得到如下结论:

(1) 引入等熵面位涡收支方程,采用数值模拟输出的高分辨率资料,能够细致地考察台风温妮结构变化的过程中,绝热与非绝热作用对对流层低层位涡局地变化的影响。

(2) 台风温妮深入内陆的过程中,与其西北侧高空槽相互作用逐渐增强,对流层低层台风中心西北侧位涡增长。除此之外,台风中心附近的位涡分布也有较明显的变化,主要表现为形状由圆形逐渐变为南北长、东西窄的长条形,且大值中心不再与台风中心重合。

(3) 台风温妮登陆后结构演变的过程中,由于摩擦和非绝热加热的存在,对流层低层位涡不守恒,其局地变化主要决定于位涡的水平平流(守恒项)、位涡的垂直平流、加热的垂直微分(非守恒项)的分布。

(4) 台风温妮变性前,仍保留着台风的热力结构特征,对流层低层位涡的守恒性较

强,但非守恒项尤其是加热的垂直微分对位涡的局地增长有不可忽视的补偿作用。随着台风变性及再次加强,对流层低层位涡的守恒性不断减弱,加热的垂直微分项增长速度很快,对位涡的局地增长有最大的正贡献。

#### 参考文献

- [1] Klein P. M., P. A. Harr, R. L. Elsberry. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage[J]. *Weather and Forecasting*, 2000; 15: 373-396.
- [2] Dimego D J, Bosart L F. The transformation of tropical storm Agnes into extratropical cyclone. Part I: The observed fields and vertical motion computations; Part II: Moisture vorticity and kinetic energy budgets[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, 110: 385-441.
- [3] 李英, 陈联寿, 王继志. 登陆热带气旋长久维持的迅速消亡的大尺度环流特征[J]. *气象学报*, 2004, 62(2): 167-179.
- [4] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 登陆热带气旋维持的次天气尺度环流特征. *气象学报*, 2004, 62(3): 257-268.
- [5] 李英, 陈联寿, 雷小途. 高空槽对9711号台风变性加强影响的数值研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(5): 552-563.
- [6] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. *气象学报*, 1995, 53(4): 378-405.
- [7] Bluestein, H. B. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Mid-latitudes: Principles of Kinematics and dynamics* [J]. 1992, Vol. 1. Oxford University Press, 448.