

# 9617 号热带风暴 Tom 变性过程数值模拟分析

尹尽勇<sup>1</sup> 李泽椿<sup>1</sup> 杜秉玉<sup>2</sup>

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学)

**提 要:** 利用中尺度模式 MM5 对西北太平洋 9617 号热带风暴 Tom 转变温带气旋的变性过程进行了模拟。通过对其变性过程的模拟分析发现: 热带风暴 Tom 与西风槽相互作用, 风暴东侧低层暖湿气流与槽前正涡度平流发生耦合有利于气旋发展; 槽前暖平流与槽后冷平流使风暴形成具有西冷东暖的热力分布结构, 诱使风暴向斜压转变; 高空急流入口处右侧的气旋式切变及出口处右侧的反气旋式切变有利于风暴右侧气流上升和左侧气流下沉运动, 有利于风暴由正压向斜压性转变; 来自风暴西北侧的干冷空气自 700hPa 附近向风暴中心侵入, 使风暴中心暖柱体发生自低层向高层的西北—东南向的倾斜, 其暖性特征遭到破坏; 由于干冷空气的侵入, 低层 700hPa 分为南北两个暖中心, 北侧暖中心北侧出现了明显的暖锋锋生, 西南侧另一个暖心附近有冷锋锋生迹象; 平流层高值 PV 异常下传有利于变性后的热带风暴的再次加强。

**关键词:** 热带风暴 变性 模拟分析

## Numerical Simulation on the Process of Tropical Storm (Tom) Transformation to Extratropical Cyclone

Yin Jinyong<sup>1</sup> Li Zechun<sup>1</sup> Du Bingyu<sup>2</sup>

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Nanjing University of Information Science and Technology)

**Abstract:** By using MM5, the transition of Tom (a tropical storm in 1996 in Northwestern Pacific Ocean) from the tropical storm to the extratropical cyclone is simulated. The result shows that: (1) when Tom entered mid-high latitude of baroclinic zone, it interacted with the 500hPa westerly trough. The coupling of the warm and moist air of low level at the east of the storm and the positive vorticity advection before the trough made it possible for the cyclone to develop. The cold advection after the trough and warm advection before the trough made Tom with cold feature in the west and warm feature in the east. And this thermodynamic structure transformed Tom into a baroclinic cyclone. (2) The cyclonic shear left to

资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB421504)资助

收稿日期: 2008 年 10 月 17 日; 修定稿日期: 2009 年 4 月 3 日

the upper-level jet stream entrance and the anti-cyclonic shear right to the upper-level jet stream exit were favorable for the upward movement right to Tom and downward movement left to Tom, which made Tom transform from a barotropic structure to a baroclinic one. (3) The invasion of the cold and dry air in 700hPa level into Tom's warm core made the storm axis tilt NW-SE from lower to upper level and destructed Tom's warm core. (4) Because of the invasion of the cold and dry air in 700hPa level, two warm cores appeared. At the north of the northern warm core a significant warm front was born and a cold front seemed to appear near the northwest warm core. (5) The subtropical cyclone's re-intensification was related to the downward transmission of high potential vortex from stratosphere.

**Key Words:** tropical storm transformation simulation analysis

## 引 言

西北太平洋热带风暴进入中高纬度后有些会转变为温带气旋并再次加强, Klein 等人<sup>[1]</sup>曾对西北太平洋 1994—1998 年 1—10 月这一期间的 112 个热带气旋进行了分析研究, 发现共有 30 个热带气旋在北上进入中高纬度时发生了变性, 约占总个数的 27%。李英等<sup>[2]</sup>对 1970—2001 年间 256 个登陆中国的热带气旋进行了分析统计, 其中有 30 例发生变性, 占总个数的 12%。热带气旋转变为温带气旋过程及其后再发展过程所造成的影响不容忽视, 热带风暴北上减弱后, 在中高纬度与不同尺度的天气系统相互作用, 加上周边地理环境的影响有可能产生异常特大风暴, 给人民的生产和生活带来巨大的损失。其中, 影响最为严重的是 7503 号热带气旋的变性过程, 引发了“75.8”特大洪水, 造成 2.6 万余人丧生, 直接损失达到 100 多亿元。过去的一些研究主要集中于登陆后的台风变性问题<sup>[2-11]</sup>研究认为热带气旋登陆后进入中高纬度与西风带作用使气旋向斜压性转变, 同时冷空气的侵入造成大气层结不稳定, 诱发强对流发生, 潜热释放有利于气旋再次加强。由于海上观测资料匮乏, 对减弱后的热带气旋在海上转向后进入中高纬度转变为温带气旋并再次加强的过程的研究较少。这种西北太平洋转向的热带气旋在进入中高纬度以

后, 往往移动速度加快, 由于其强度已经减弱, 对我国的影响已经消除, 在研究和预报服务中往往容易忽视。但这种海上突发性加强系统对海上航行船只安全却构成巨大的威胁, 特别是在海洋气象导航实时业务中, 由于预报员不能及时对海上船只发出风暴警报, 延误了船舶撤离风暴的最佳时机, 对航行安全构成威胁。

本文从预报业务角度出发, 针对 9617 号热带气旋 Tom 转变温带气旋的变性过程进行了数值模拟分析, 试图探讨和研究这一变性过程的演变规律, 提高我们对这一过程的认识和预报能力。

## 1 研究方案

### 1.1 个例背景

回顾 9617 号热带风暴 Tom 转向北上演变过程<sup>[21]</sup>, 9 月 17 日 18 时(世界时, 下同)风暴开始减弱, 18 日 02 时至 19 日 12 时, 风暴中心气压一直维持 995hPa 不变, 风暴外围 8 级风圈有所加大(表 1)。Klein 等<sup>[1]</sup>在对西北太平洋 1994—1998 年 1—10 月 112 个热带气旋进行了卫星云图分析后指出, 热带风暴 Tom 开始变性时间为 18 日 00 时, 风暴中心气压从 980hPa 经过 72 小时, 完成变性过程到 998hPa, 期间再次加强为 977hPa, 完成再加强的时间是 21 日 00 时。中远公司“胶

州海”轮 18 日 21 时 50 分航至日本东京湾东南方 620 海里处,即 31.0°N、151.7°E 附近,突然遭遇异常强烈的狂风暴雨袭击。19 日 00 时,船舶上蒲氏风力仪已超过 12 级的极

限刻度,风速表测得北风风速高达 98 节,海上掀起 10m 浪高,并伴有特大暴雨。分析认为,“胶州海”所遇到的恶劣天气正是由于热带风暴 Tom 变性过程引起的。

表 1 1996 年 9 月 17—19 日热带气旋 Tom 概况(来源于 1996 年热带气旋年鉴)

月	日	时 (北京时)	中心位置		中心气压 /hPa	最大风速 /m·s <sup>-1</sup>
			纬度/°N	经度/°E		
9	17	20	24.7	148.1	985	25
9	18	02	25.3	148.8	985	25
9	18	08	25.8	149.3	990	23
9	18	14	26.8	150.1	995	20
9	18	20	27.7	151.0	995	20
9	19	02	28.9	152.2	995	20
9	19	08	30.1	153.8	995	20
9	19	14	31.5	154.7	995	20
9	19	20	33.1	156.3	995	20

## 1.2 方案设计

采用中尺度模式 MM5-V3 非静力版本,在兰勃托正交投影基础上,垂直方向以模式顶  $p_t = 30\text{hPa}$ , $\sigma$  面垂直分层为  $K_\sigma = 24$  (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),半  $\sigma$  层为 23 层。正方形网格嵌套,母域与子域同中心,中心定位于 30°N、150°E,二重嵌套格距分别为 90km、30km,对应格点数为 69×69、61×61。模拟时段主要放在“胶州海”轮受风暴影响前后 48 小时内,即 17 日 12 时至 19 日 12 时。

资料采用 NCEP 再分析资料作为初始场,并在模拟区中添加海上船舶观测资料。研究主要内容放在:(1)风暴进入斜压带后与西风槽及西风急流的相互作用;(2)干冷空气在热带风暴变性过程中的作用;(3)热带风暴转变为温带气旋过程中锋面形成过程;(4)热带风暴变性过程与平流层位涡异常的关系。

## 2 热带风暴 Tom 变性过程数值模拟分析

Klein 等<sup>[1]</sup>在研究西北太平洋台风变性

过程中,曾采用 IR 云图对其演变过程进行了很好的描述。本文利用日本气象研究学会提供的 IR 云图 1.0°×1.0°,1996 年 9 月 17 日 12 时至 19 日 12 时,每隔 6 小时的 TBB 资料,对中尺度模式 MM5 的模拟预报结果进行比较分析。图 1 给出了 18 日 18 时和 19 日 06 时二个时次的 IR 云图 TBB 云顶温度及模式模拟海平面气压场与细网格降水量预报结果<sup>[20]</sup>,可以看出风暴在 18 日 18 时,强对流天气主要发生在风暴的东北侧,云图显示云顶温度达 -70°C 以下,且风暴的外围云系呈现出非对称形态,以风暴中心为原点,南北向云团北多南少,东西向云团东多西少,在南北两个强对流云团的中间形成了一个自西向东的楔形切口,表明有冷空气的卷入(图 1a)。19 日 06 时,风暴的对称性进一步被破坏,在其北侧形成的云盖范围进一步加大,但对流强度有所减弱,云系已经开始表现出温带气旋特征,东—西走向的云系形成温带气旋的暖锋云系,南—北走向的云系为温带气旋的冷锋云系,这部分将在后面进一步进行讨论(图 1b)。

对比海平面气压场与细网格降水落区模拟结果发现,经过 42 小时的模拟预报,19 日 06 时模拟风暴中心位置较中央气象台定位

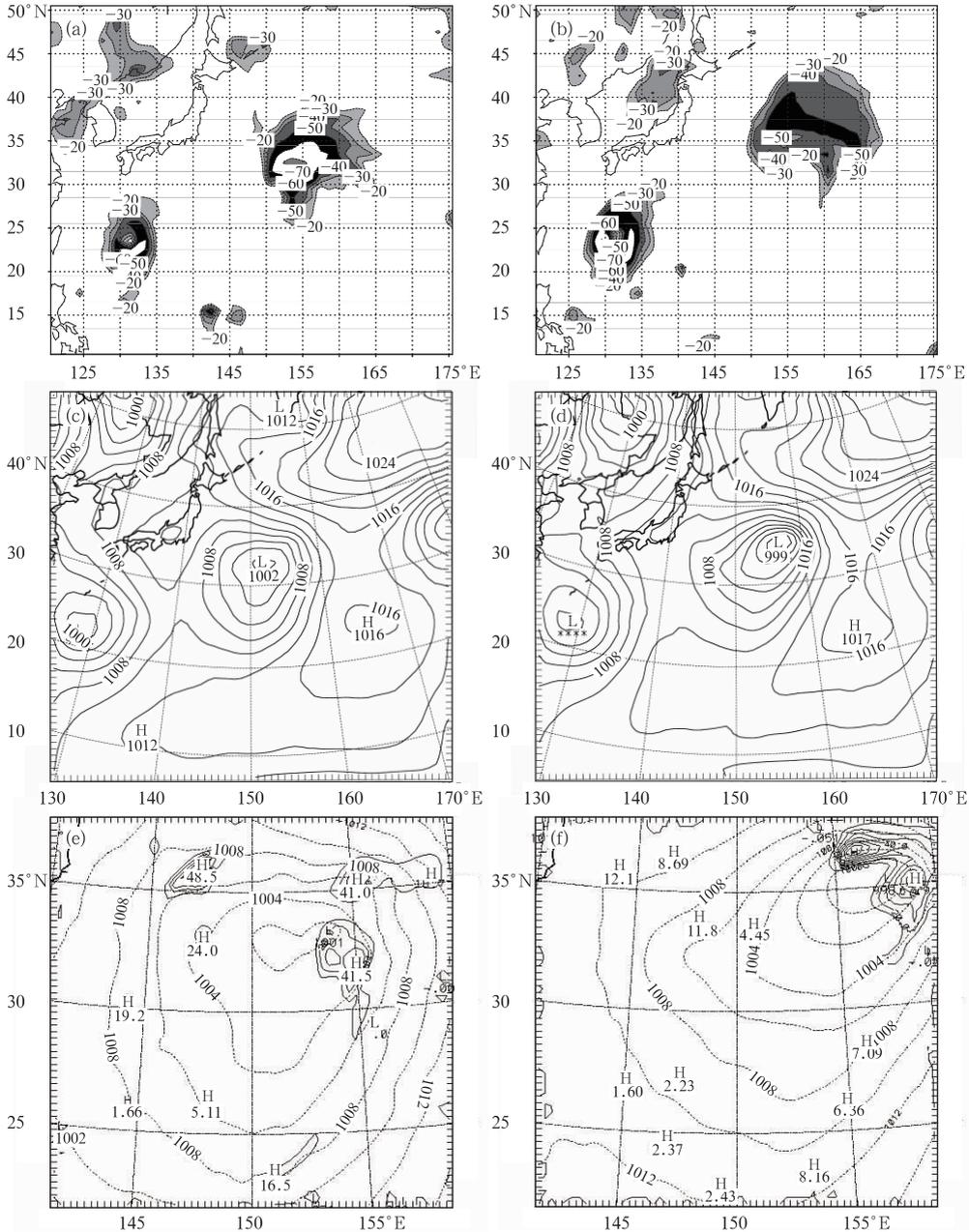


图 1 1997 年 9 月 18 时 (a)和 19 日 06 时(b)IR—TBB 云图(等值线间隔为 10℃), 1996 年 9 月 18 时(c)和 19 日 06 时(d)海平面气压预报场(等值线间隔为 4hPa), 1996 年 9 月 18 时(e)和 19 日 06 时(f)细网格海平面气压预报场与稳定性降水量预报叠加图(实线为降水量,等值线间隔为 10mm,虚线为等压线,等值线间隔为 2hPa)

位置偏向西北近一个纬度,同时中心气压由起报初期 17 日 12 时的 998hPa(图略),18 日 18 时减弱到 1002hPa,19 日 06 时再加强到 999hPa(图 1c~1d)。三个主要的降雨落区

分别位于风暴的东侧、东北侧和西北侧。19 日 06 时位于风暴北侧降水落区 6 小时雨量达到 70mm(图 1e~1f)。上述结果分析表明,模式较好地模拟了热带风暴 Tom 的变性

过程。另外,通过网格加密,降水预报结果与实际情况更为接近。

### 3 热带风暴 Tom 变性过程的物理量诊断分析

#### 3.1 西风槽及西风急流在变性过程中的作用

一些研究表明<sup>[1-18]</sup>,西风槽与西风急流在热带气旋变性过程中起重要作用,当高空槽移近低层暖平流的上空时,槽前正涡度平流与低层暖平流相互作用有利于气旋发展。在热带气旋变性过程中,作为具有暖湿特性的减弱性热带气旋,其气旋东侧的低层暖湿气流与高空槽前正涡度平流相互作用,减弱性气旋将重新获得能量,加强并发展。西风急流入口区右侧形成的反气旋风切变有利于辐散。研究表明,该处是强的动能制造区,而在西风急流出口有强的动能向位能转换。

对比 17 日 12 时至 19 日 12 时 500hPa 与 850hPa 温压场模拟结果可以看到,模拟初期,17 日 12 时,500hPa 高空槽自鄂霍次克海,经日本海向西南延伸至朝鲜海峡,槽前日本东侧的低层 850hPa 有暖平流,风暴基本呈正压结构(图 2a,d)。随着风暴中心向东北移动及高空槽的东移,18 日 18 时,500hPa 风暴北侧环流已经进入斜压带,风暴温压中心呈斜压性;低层 850hPa 温压场基本保持正压形态,风暴东侧有较好的暖平流(图 2b,e)。19 日 12 时,500hPa 风暴中心完全与西风槽合并,850hPa 风暴中心也进入北侧锋区,风暴中心的正压结构被进一步破坏,形成具有西冷东暖的热力分布结构,表明热带风暴 Tom 已具有斜压特性,变性为温带气旋并得到加强(图 2c,f)。

由  $\sigma=0.375$  与  $\sigma=0.995$  高度层矢量风的模拟结果看(图略),早期 17 日 12 时,在  $\sigma=0.375$  高度层,风暴北侧西风带有三个急流中心分别位于  $32^{\circ}\text{N}$ 、 $168^{\circ}\text{E}$  附近,最大风速为  $24.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $36^{\circ}\text{N}$ 、 $139^{\circ}\text{E}$  附近,最大风

速为  $24.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;鄂霍次克海上空,最大风速为  $26.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。以后伴随着风暴向东北方向移动,风暴中心逐渐接近西风带,并位于西风带东侧急流中心的入口处,使得风暴中心东侧的西南风速进一步加大,18 日 06 时的最大风速值达  $30.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。而在低层  $\sigma=0.995$ ,此时风暴中心东侧的最大风速值仅为  $14.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高低层这种强大的垂直切变,使得风暴 Tom 呈东北—西南向倾斜。18 日 12 时,东侧的急流中心向东移出模拟区,西侧的急流中心向东移动,风暴中心位于西侧急流中心的出口处,其反气旋风切变有利于风暴东侧的气流下沉。在其后的干冷空气对风暴 Tom 变性作用的分析中可以看到,东西两侧西风急流入出口的这种作用非常有利于风暴东侧暖湿气流上升与西侧冷气流的下沉,造成了风暴东西两侧热力分布的不均匀性,使得热带风暴 Tom 向温带气旋转变。

#### 3.2 干冷空气对热带风暴 Tom 结构特征的影响

亢迪、陈联寿、徐祥德等在热带气旋变性的结构特征和能量分析中指出<sup>[3-4]</sup>:热带气旋登陆后北上转向后在中高纬冷空气作用下,其对称性结构往往被破坏,从而变成冷暖结构热力分布不均的温带气旋,这种结构使得涡旋获得斜压能量,位能转化成动能而使涡旋再次得到发展。朱佩君等分析 Winnie (1971)的变性加强机制发现<sup>[5]</sup>,对流层中高层的冷空气下沉和低层的暖平流是 Winnie 变性发展的关键。为了分析干冷空气在这次变性过程中的作用,本文选择了模式输出的 400hPa 和 700hPa 温湿场进行对比分析,以说明干冷空气对热带风暴 Tom 暖性结构的破坏作用。

17 日 12 时,400hPa 的相当位温场及相对湿度场显示(图 3a1,b1),风暴中心的相当位温为 351K,相对湿度达 90%以上,风暴中心的暖湿特征明显。冷空气团(336K)位于

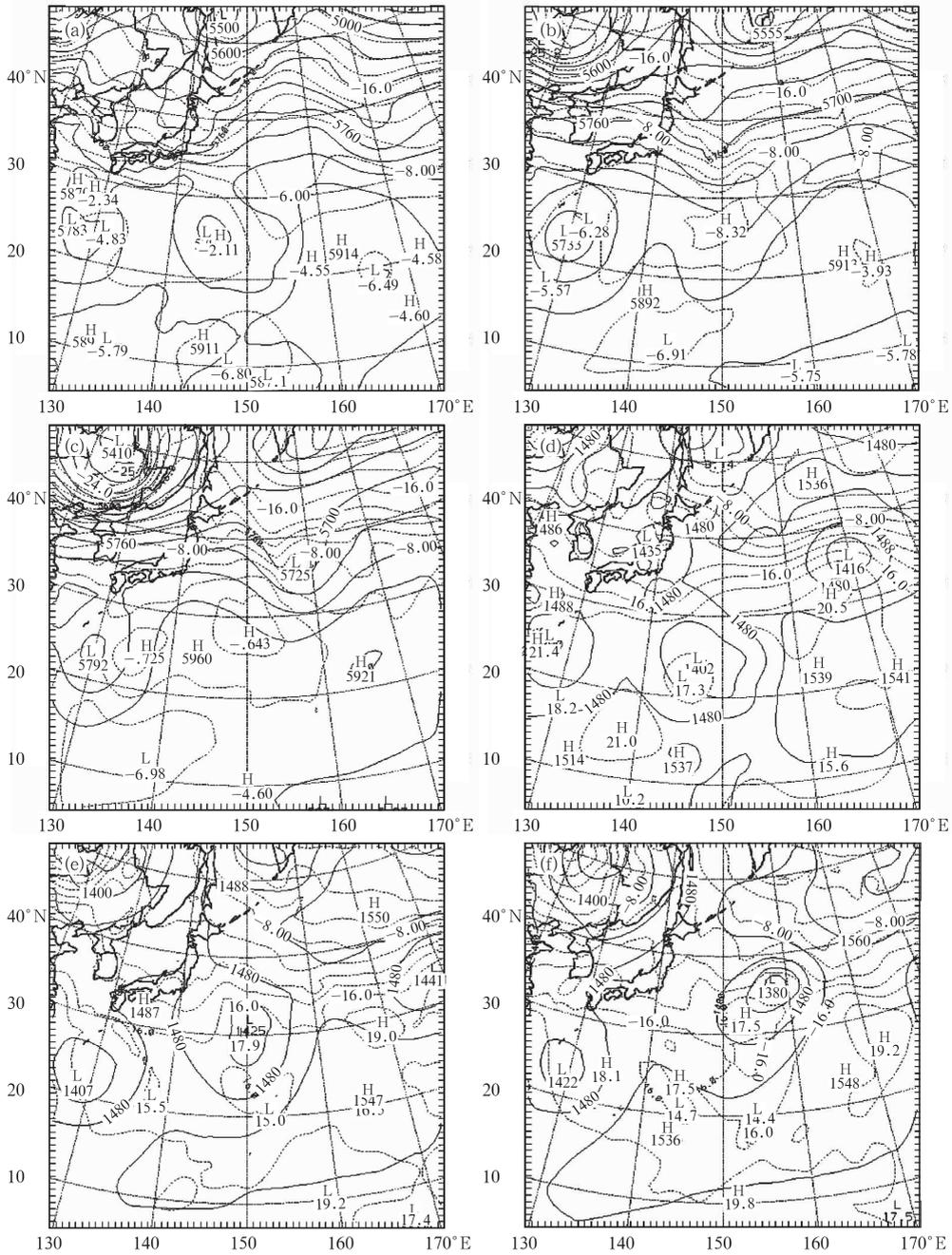


图 2 1996 年 9 月 17 日 12 时(a)、18 日 18 时(b)和 19 日 12 时(c)500hPa 温压场和 1996 年 9 月 17 日 12 时(d)、18 日 18 时(e)和 19 日 12 时(f)850hPa 温压场  
 实线为等高线,间隔为 40gpm;虚线为等温线,间隔为 4℃

30°N 以北,在风暴的西北侧和东北侧均有冷槽存在。在 700hPa 上(图 4a1, b1),风暴中心呈现出双暖心结构,北侧暖心(343K)的位

置与风暴的定位中心相一致,在其南侧约 10 纬距附近有另一个暖心(344K),两个暖心的相对湿度都在 85% 以上,表明两个暖心均具

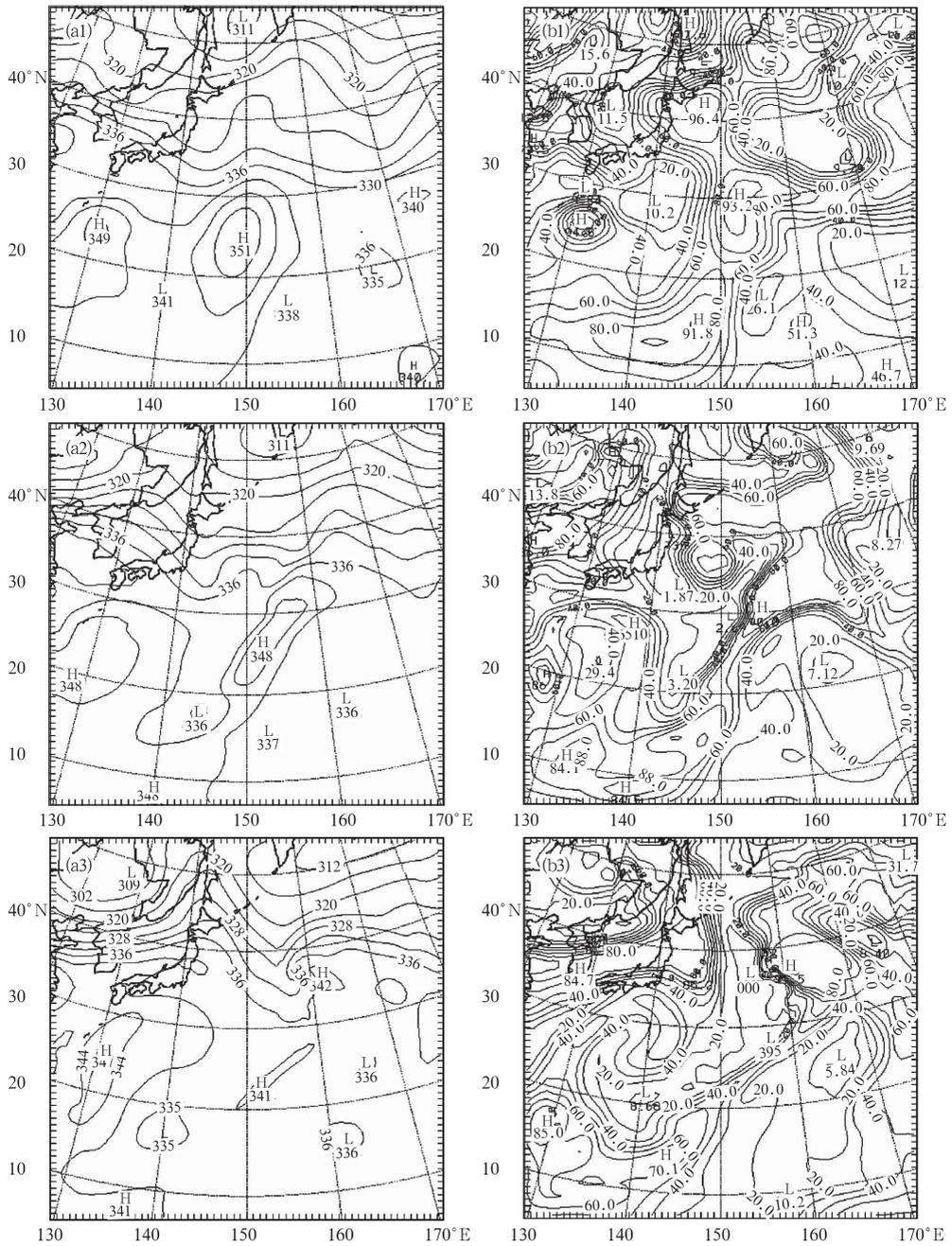


图 3 1996 年 9 月 17 日 12 时(a1)、18 日 12 时(a2)、19 日 12 时(a3)400hPa 相当位温场(等值线间隔 4K);1996 年 9 月 17 日 12 时(b1)、18 日 12 时(b2)、19 日 12 时(b3)400hPa 相对湿度场(等值线间隔 10%)

有暖湿特性。干冷空气沿风暴西北侧向风暴中心侵入,造成了低层风暴中心的南北双暖

心结构。

18 日 12 时,伴随风暴中心向东北移动,

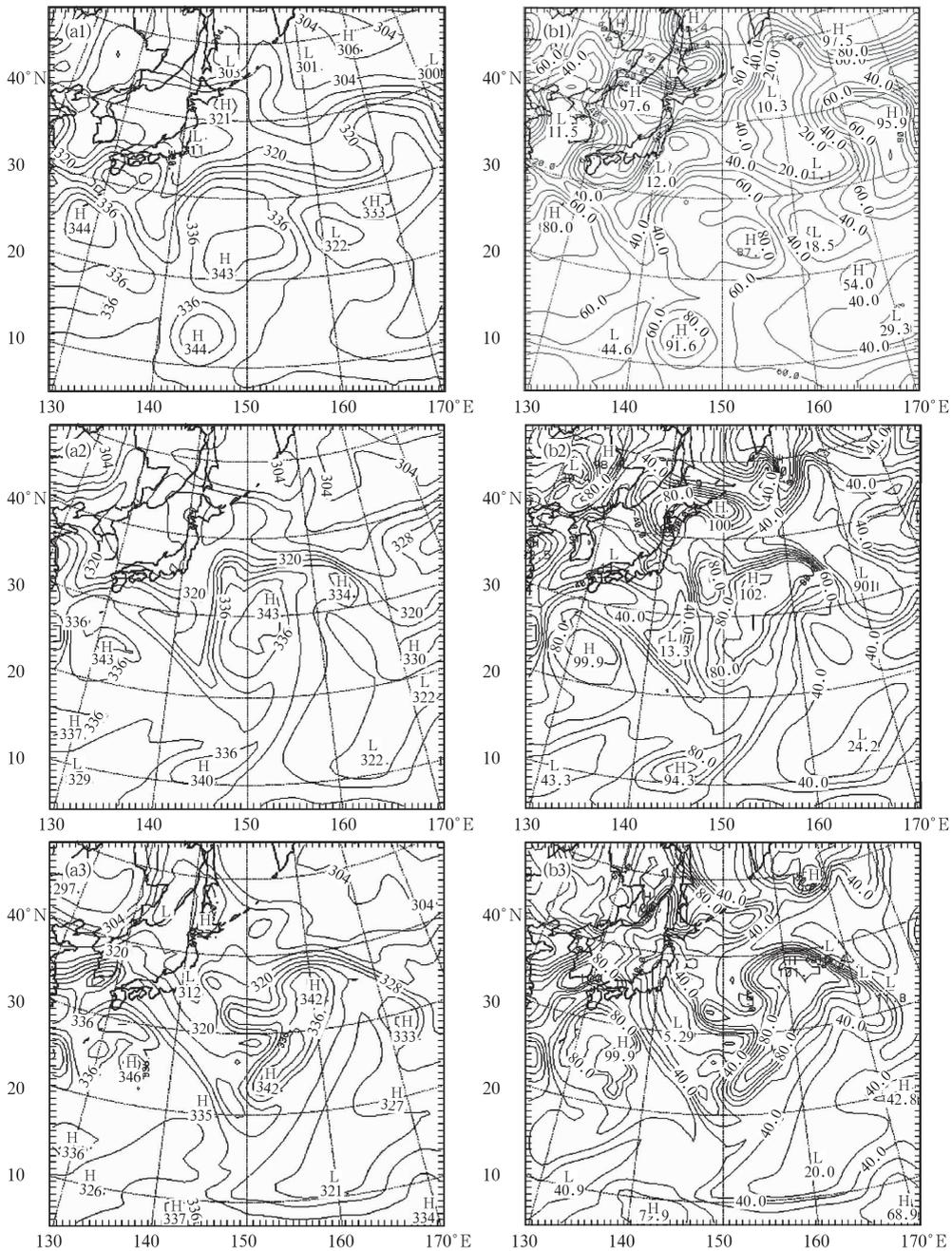


图 4 1996 年 9 月 17 日 12 时(a1)、18 日 12 时(a2)、19 日 12 时(a3)700hPa 相当位温场 (等值线间隔 4K);1996 年 9 月 17 日 12 时(b1)、18 日 12 时(b2)、19 日 12 时(b3) 700hPa 相对湿度场(等值线间隔 10%)

高空槽后引导的冷空气进一步南下,400hPa 干冷空气沿风暴西北侧向风暴中心侵入,使风暴中心呈东北—西南走向(图 3a2, b2)。

低层 700hPa 显示干冷空气对其暖心的侵入较高层更为强烈,在风暴中心的东南侧已经出现明显的被冷空气侵入的切口,表明此时

在低层干冷空气已经从风暴的西侧, 绕过风暴中心到达风暴的南侧, 并从风暴的东南侧侵入暖心(图 4a2, b2), 这与该时刻云图所反映的实际情况相一致(图略)。

19 日 12 时, 高层 400hPa 风暴中心被干冷空气分为南北两个暖心, 北侧暖心 342K, 相对湿度 80%; 南侧暖心 341K, 相对湿度仅为 20%(图 3a3, b3)。低层 700hPa 风暴北侧暖心再次被干冷空气侵蚀分为南北两个中心。同时, 以北侧暖中心为中心, 其北侧形成东—西向密集位温梯度区, 出现了明显的暖锋锋生, 而残留在西南侧另一个暖心西侧位温锋区很可能形成冷锋锋生(图 4a3, b3)。

为了更直观地了解热带风暴 Tom 变性过程中垂直各层相当位温的分布特征以及冷空气侵入风暴暖心的路径, 取 17 日 12 时、18 日 12 时和 19 日 12 时三个时次, 以风暴中心为原点, 做西北—东南向的垂直剖面(图 5)。初期, 17 日 12 时, 风暴中心暖柱体较为对称(图 5a)。18 日 12 时, 冷空气(336K)沿 700hPa 层面向暖心侵入。由于风暴中心的暖性特征, 使得侵入中心附近的冷空气逐渐上抬, 形成自下至上的倾斜性侵入。风暴中心暖柱体发生自低层向高层的西北—东南向的倾斜。同时, 风暴西北和东南侧的热力分布表现为不均匀性, 西北侧冷, 东南侧暖(图 5b)。19 日 12 时, 冷空气已经侵入暖心, 自 500hPa 至 700hPa 附近, 风暴中心已经开始具有冷性特征(336K), 高层 500hPa 以上和低层 800hPa 以下仍有暖性特征(图 5c)。

### 3.3 热带风暴 Tom 变性过程与平流层位涡(PV)异常

Browning 等对 1996 年 10 月北大西洋热带风暴 Lili 的研究指出<sup>[15]</sup>, 热带风暴 Lili 变性为温带气旋后重新发展加强与平流层的位涡(PV)异常有关。李英、陈联寿等在研究 Winnie(1997)和 Bilis(2000)变性过程的湿位涡分析时指出<sup>[9]</sup>, Winnie(1997)变性加强主要与高层正位涡扰动下传, 低层锋区及热带

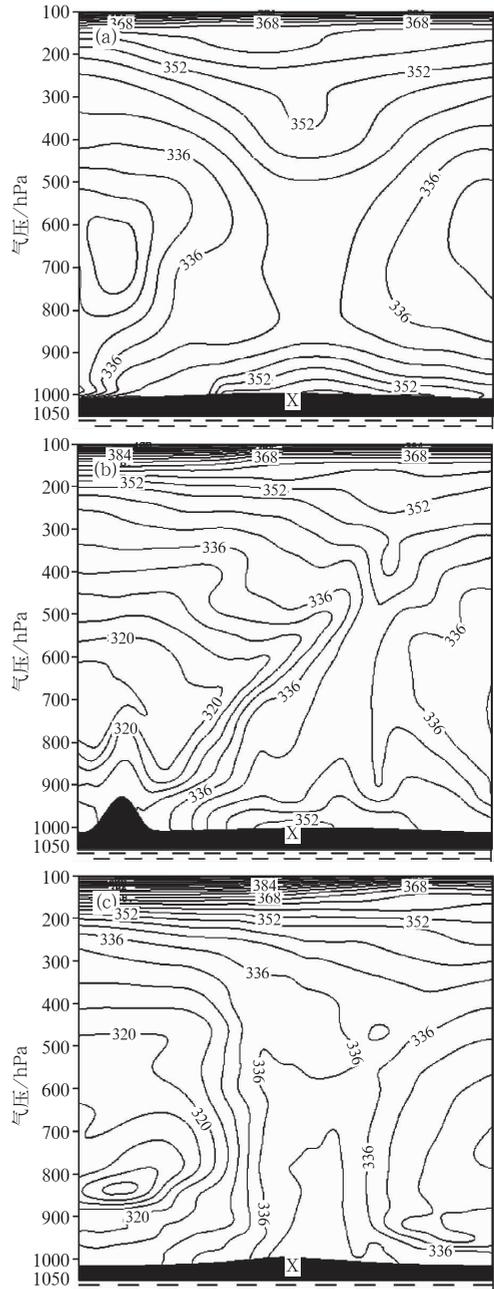


图 5 1996 年 9 月 17 日 12 时(a)、18 日 12 时(b)、19 日 12 时(c)经风暴中心 NW—SE 向相当位温垂直剖面 X 示意风暴中心位置, 等值线间隔 4K

气旋低压环流之间的相互作用有关。为探讨热带风暴 Tom 变性温带气旋过程中与平流层 PV 异常的关系, 本文以风暴中心为原点, 做西北—东南向的位涡垂直剖面(图 6)可以

看出,在 800~400hPa 对流层附近,17 日 12 时,平流层 200hPa 以上具有高值 PV(>2.0 PVU,单位: $10^{-6} \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,下同),高值

中心位于风暴的西北侧,风暴中心 400~500hPa 附近存在着高 PV 中心(>1.5 PVU) (图 6a)。此时段,高空槽与风暴还未相互作用(图 2a)。18 日 18 时,来自风暴西北侧平流层的高位涡在风暴西北侧向下扰动,伴有“漏斗式”下垂,向下伸至 500hPa 附近(图 6b)。此时 500hPa 风暴北侧环流已进入西风槽与西风槽相互作用(图 2b)。19 日 12 时,来自平流层的高位涡值向下输送,并分别在 500~600hPa 附近和 800~900hPa 附近的对流层内形成二个 PV=2.0PVU 的高位涡中心(图 6c)。此时 500hPa 风暴中心完全嵌入西风槽,风暴强度得到加强(图 2c)。

分析认为,当热带风暴逐渐接近西风带时,强劲的偏西气流与风暴中心的风速低值中心形成反气旋环流有利于风暴西侧高层冷空气的下沉,西侧的冷气团与东侧的暖气团之间的位温梯度增大,风暴斜压性加大。由位涡理论研究表明<sup>[19]</sup>,当一个高空正 PV 异常平流到低层强斜压区上方时,可激发气旋性涡旋一直向下伸展到底层。由于风暴东西热力结构的不均匀性,在风暴东侧暖平流与西侧冷平流作用下,强对流造成的潜热释放更增加了 500hPa 附近的气旋性涡旋。高层正 PV 平流到下层(900hPa 附近)锋面上诱出气旋性涡旋,形成低层高 PV 中心。

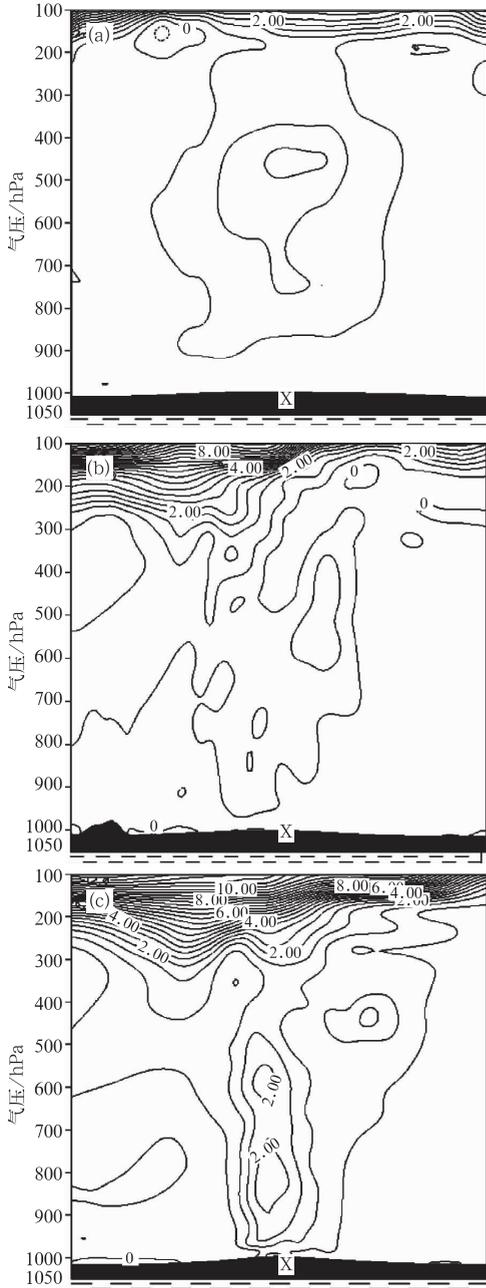


图 6 1996 年 9 月 17 日 12 时(a)、18 日 18 时(b)、19 日 12 时(c) 经风暴中心 NW—SE 向位涡垂直剖面 X 示意风暴中心位置,等值线 间隔 0.5PVU,单位: $10^{-6} \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### 4 总结与讨论

本文利用美国国家气象局 NCEP 再分析资料作为模式运算的初始场,运用中尺度模式 MM5-V3 版,对 1996 年热带风暴 Tom 变性温带气旋过程进行了模拟分析。通过模拟分析,得出以下结论:

(1) 热带风暴 Tom 在接近西风槽时,风暴东侧低层偏南暖湿气流与槽前正涡度平流发生耦合有利于气旋发展。当风暴中心完全嵌入西风槽中,槽前暖平流与槽后冷平流使风暴形成具有西冷东暖的热力分布结构,诱使热带风暴由正压向斜压转变。

(2) 高空急流入口处右侧的气旋式切变起辐散作用,有利于风暴右侧暖湿气流的辐合上升;高空急流出口处右侧的反气旋式切变起辐合作用,有利于风暴左侧干空气流辐合下沉。这种右上左下的运动,有利于热带风暴向斜压性转变。

(3) 干冷空气自 700hPa 附近开始自风暴西北侧向风暴中心侵入,由于风暴中心的热力作用,形成自下至上的倾斜性侵入,使得风暴中心暖柱体发生自低层向高层的西北—东南向的倾斜。由于干冷空气的侵入,热带风暴的暖性结构遭到破坏,造成风暴的热力分布不均匀。低层 700hPa 风暴暖心由于干冷空气侵入分为南北两个中心,在北侧暖中心的北侧形成东—西向密集位温梯度区,出现了明显的暖锋锋生;而残留在西南侧另一个暖心的西侧位温锋区有冷锋锋生迹象。

(4) 模拟结果显示,当热带风暴 Tom 进入西风带并与西风槽相互作用时,平流层高值 PV 异常下传。根据相关理论分析认为,其作用是激发气旋性涡旋的形成,使变性后的热带风暴再次加强。

## 参考文献

- [1] Klein P M, Harr P A, and Elsberry R L. Extratropical transition of Western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage[J]. *Wea. Forecasting*, 2000, 15: 373-395.
- [2] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. *热带气象学报*, 2004, 20(1): 14-23.
- [3] 亢迪, 陈联寿, 徐祥德. 热带气旋变性的结构特征和能量分析. 85-906-07 课题组, 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究[M]. 北京: 气象出版社, 第三分册: 59-61.
- [4] 徐祥德. 台风变性对台风强度突变影响的研究. 85-906-07 课题组, 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究[M]. 北京: 气象出版社, 第三分册: 58-59.
- [5] 朱佩君, 郑祖光, 陶祖钰. 发生在中国大陆的台风变性加强过程分析 [J]. *热带气象学报*, 2003, 19(2): 157-162.
- [6] 张迎新, 李根娥, 张守保. 热带气旋变性过程客观判别方法在“海马”变性过程中的应用[J]. *气象*, 2008, 34(3): 49-55.
- [7] 何丽华, 孔凡超, 李江波, 等. 影响河北两次相似路径台风的湿位涡对比分析[J]. *气象*, 2007, 33(4): 65-70.
- [8] 孙力, 郑秀雅. 北上热带气旋变性发展过程的诊断分析[J]. *气象*, 1991, 17(10): 3-8.
- [9] 李英, 陈联寿, 雷小途. Winnie(1997)和 Bilis(2000)变性过程的湿位涡分析 [J]. *热带气象学报*, 2005, 21(2): 142-152.
- [10] 马福全, 沈桐立, 张子峰. 一次热带风暴造成辽宁暴雨的数值模拟研究[J]. *气象*, 2005, 31(9): 8-12.
- [11] 袁子鹏, 王元, 陈艳秋, 等. 高空急流对黄渤海登陆热带气旋三维运动结构的影响[J]. *气象*, 2006, 32(5): 3-9.
- [12] Browning K A. The dry intrusion perspective of extratropical cyclone development[J]. *Meteorol Appl*, 1997, 4: 229-234.
- [13] Harr P A, Elsberry R L. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, (128): 2613-2633.
- [14] Harr P A, Elsberry R L, Hogan T F. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part II: Evolution of structural characteristics during the transition process [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, (128): 2634-2653.
- [15] Browning K A, Vaughan G, Panagi P. Analysis of an extratropical cyclone after its reintensification as a warm-core extratropical cyclone [J]. *Met Sec*, 1998, 124: 2329-2356.
- [16] 袁子鹏, 王元, 陈艳秋. 高空急流对黄渤海登陆热带气旋三维运动结构的影响[J]. *气象*, 2006, 32(5): 4-9.
- [17] 张兴, 丁治英, 王焱. 高空急流与中尺度系统影响下台风暴雨的研究现状[J]. *气象*, 2001, 27(8): 47-50.
- [18] 陈联寿, 丁一汇. 西北太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 423-428.
- [19] 丁一汇. 高等天气学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 174-178.
- [20] 陈渭民, 夏浣清, 陈光宇. 卫星气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1989: 210-212.
- [21] 中国气象局. 热带气旋年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 1996: 9-81.