

文章编号: 1004-4965 (2003) 02-0157-06

## 发生在中国大陆的台风变性加强过程分析

朱佩君, 郑永光, 陶祖钰

(北京大学物理学院大气科学系暴雨监测和预测国家重点实验室, 北京 100871)

**摘 要:**通过对登陆台风 Winnie(1997)的演变过程分析, 发现登陆后的台风经历三个阶段: 衰减阶段、变性阶段、重新加强阶段。其变性过程类似于 Sekioka 等人提出的复合型, 变性后逐渐演变为 Shapiro-Keyser 气旋模型。通过对物理量的诊断分析发现, 对流层中高层冷空气的下沉入侵以及对流层低层的暖平流是热带气旋变性的原因。冷空气的入侵使具有暖心结构的热带气旋演变为斜压结构的温带气旋。变性后气旋得到了重新发展, 低层维持的较明显暖平流以及与高空急流相对应的散度区和高空涡度平流是导致气旋重新发展的重要物理因子。

**关 键 词:** 台风; 温带转变; 诊断分析

**中图分类号:** P444

**文献标识码:** A

### 1 引 言

关于台风温带转变过程 (Extratropical Transition, 简称 ET) 很早就被人们普遍关注, 早期较有影响的研究主要集中在西北太平洋地区, Sekioka<sup>[1~2]</sup>和 Matano<sup>[3]</sup>在陆续的研究中提出, 转向的热带气旋和中纬度天气系统相互作用后可以形成两种类型的系统: 复合型 (complex) 和混合型 (compound)。Brand 和 Guard<sup>[4]</sup>增加了第三种类型——消亡型。最近, Klein 等<sup>[5]</sup>通过回顾 1994~1998 年间发生在西北太平洋的热带气旋温带转变后, 提出了一个关于变性过程的三维概念模型, 主要考虑了环境冷暖气流、与斜压带的关系、系统的减弱和暖心的倾斜、不对称结构的发展四个方面的物理过程。Harr 等<sup>[6~7]</sup>把与温带转变相关的中纬度环流形势分别定义为西北型、东北型。另外, 对深入北美的飓风的温带转变过程研究也较早较多<sup>[8~11]</sup>, 研究主要侧重于对物理量的诊断以及三维动力特征的分析。对于发生在中国的登陆台风温带转变问题, 过去研究主要以伴随出现的暴雨为主, 1990 年代后对变性过程的研究逐渐增多<sup>[12~14]</sup>。本文着重于对台风登陆后的变性重新加强过程的分析, 以及变性演变机制和重新加强机制的分析。

收稿日期: 2001-09-21; 修订日期: 2002-02-22

基金项目: 国家重点基础研究项目 (G1998040907); 高等学校重点实验室访问学者基金资助

作者简介: 朱佩君 (1973-), 女, 浙江人, 在读博士生, 主要研究台风的变性问题。

## 2 Winnie 台风的变性加强过程分析

统计从 1970~1999 的 30 年间, 发生在中国大陆的登陆台风的变性过程有 17 例,

相对于登陆的台风, 变性概率约为 6.3%, 属于小概率事件, 但相对于消亡减弱的登陆台风来说, 它们更值得人们的关注。Winnie(1997) 台风是在 30 年间发生的最近的一个变性个例, 它的演变过程具有一定的代表性(图 1)。它于 8 月 18 日 13 时 30 分(世界时, 下同)在中国东部的浙江省登陆, 登陆后朝西北方向移动并持续衰减, 在 19 日 12 时转向偏北方向移动, 中心气压继续升高, 到 20 日 00 时, 在气旋上已出现锋面的特征, 说明热带气旋变性阶段的结束。同时在地面图上可以看到, 在原中心北侧的泰山北麓诱生出一个副中心, 该副中心逐渐取代原有中心并向东北方向移动且逐渐加强, 最后在 21 日 12 时演变为成熟的温带气旋。从 Winnie 的变性过程看, 类似于 Sekioka 等人提出的复合

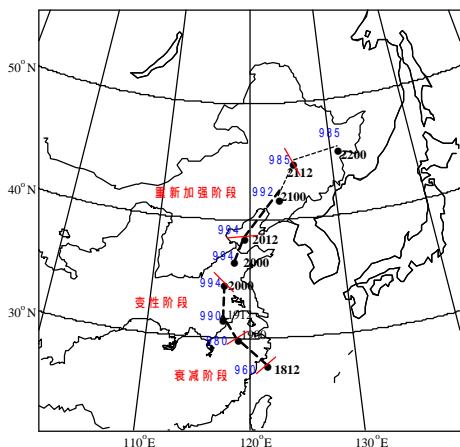


图 1 Winnie 的路径以及气压变化和所划分的阶段

型热带气旋的变性过程。

### 2.1 天气过程分析

在 Winnie 台风登陆前 1 小时的 18 日 12 时, 台风在温度场上从低层到高层都有暖中心相配置, 而中纬度锋区位于其外围北侧的黄河下游一带, 两者之间各自独立, 还未有相互作用(图 2a), 这在相应的云图上也可以得到反映(图 2d)。到 18 日 18 时, 在 Winnie 中心西侧对流云系开始有明显衰减, 其南侧出现干缝(图 2e), 根据 Klein(2000) 提出的变性阶段定义, Winnie 此时外围环流已开始进入中纬度锋区, 并有相互作用, 热带气旋发展已进入变性阶段。在 19 日 00 时, 倒槽云系和中纬度的云系相合并, 从天气图上可以看到 Winnie 的外围环流已进入中纬度锋区, 西侧出现了冷平流。在中低纬云系合并后, 气旋北侧的冷云盖范围明显扩大, 而且冷云中心北移, 这是由于气旋东侧向极的气流呈气旋性弯曲后和斜压带相互作用, 增强上升运动的结果。随着 Winnie 的继续北上, 其外围环流进一步进入到中纬度锋区, 20 日 00 时气旋中心也已进入锋区(图 2b), 热带气旋西侧的偏北气流使冷空气入侵到气旋的西侧和西南侧, 东侧的偏南气流向北输送暖湿空气, 使中纬度锋区由锋生作用得到加强。在低层(图略)由于强降水的下沉拖曳作用而形成了明显的冷温度槽。此时在 Winnie 上形成西冷东暖的热力分布结构, 在卫星云图上, 随着冷平流的进一步加强, 气旋西侧的云系迅速消亡, 逐渐形成了一个以宽广的暖锋云系和狭长的冷锋云系(图 2f)为特征的锋面气旋, 这个转变过程称为变性过程, 也即从热力基本对称的热带气旋向非对称的锋面气旋转变。在其后的发展中,

斜压的锋面气旋有所发展, 21 日 12 时达到最强, 地面中心气压下降了 9 hPa。分析变性后云图演变过程可以看到更详细的变化信息, 在变性后, 气旋的冷锋区域有锋消, 只保留嵌有强对流的暖锋云系, 并有向后弯曲的趋势, 21 日 12 时形成类似于 Shapiro-Keyser 气旋模式的结构特征(图 2g)。在相对应的天气形势图上有暖脊(图 2c)。在以后的演变过程中, 气旋西侧的云系继续气旋性弯曲, 到 22 日 00 时已基本形成了环状的云系特征, 说明气旋已经锢囚。

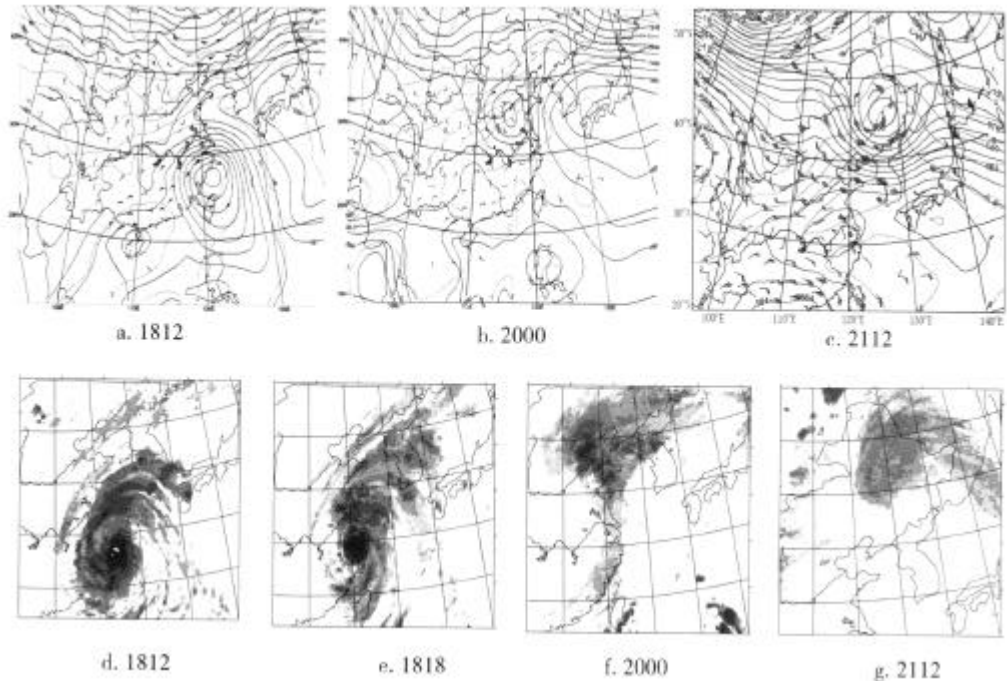


图2 500 hPa 天气图(a~c)和红外云图的TBB等值线分析(d~g)

## 2.2 登陆台风变性加强的机制分析

有较多的研究指出, 登陆后台风的衰减主要是动能供应不足, 即主要是热量和水汽供应的减少, 从而导致对流活动的减弱。那么是什么使减弱的台风在陆地上长时间地维持呢? 由于暖心的维持是台风发展的关键因子, 而且暖心也是台风的一个明显的特征。所以本文利用温度距平来具体地探讨变性过程以及变性机制问题。

温度距平的计算在一个以气旋中心为中心的  $11 \times 11$  的网格区域内进行, 网格距为 100 km, 垂直从下到上分别为 1000、925、850、700、500、400、300、200、100 hPa 共 9 层。图 3 为过气旋中心的西北-东南向的垂直剖面, 从图的左侧到右侧代表西北至东南。

在登陆前夕的 18 日 12 时(图 3a), 在气旋中心的对流层中高层维持一个呈垂直向分布的暖心结构, 中心位于 200 hPa 附近, 而对流层的低层, 温度距平的正中心位于气旋的西南一侧, 这可能与台风北侧位于相对冷水域有关, 所以在西北-东南向的垂直剖面上, 低层仅表现为弱的温度距平区。在其后的 12 小时中, 暖心变化较小, 只是位置略有下沉东偏, 最明显的变化发生在暖心西北侧的对流层中高层, 出现了负的温度距平的密集区, 但还未向低层扩展。到 19 日 12 时(图 3b), 暖心继续下沉并减弱,

而西北侧的温度负距平区处于加强之中,并向对流层低层倾斜扩展,一直伸到气旋的中心。但由于此时东南象限的正温度距平不明显,所以未能形成锋区。但有一点我们注意到,此时在东南侧出现了微弱的大于  $0.5$  的正温度距平中心。分析该过程的水平温度平流可以看到,低层的暖温度平流正在加强,且已达到过程的最大值  $39.5 \times 10^{-5}$  /s (图 4a),预示未来的正温度距平将加强,最终导致锋区的加强。20 日 00 时是一个特殊时刻,从垂直剖面可以看到,对流层低层的冷暖对峙已经很明显(图 3c),在冷空气倾斜下沉和低层的暖平流作用下使锋生加强,最终使 Winnie 变性成一个温带气旋。对流层中高层的垂直向暖心结构此时已经演变成随气压向东南方向倾斜的暖区,其倾斜轴线几乎与负温度距平的中心轴线平行。在进一步的发展演变中(图 3d),气旋中心的对流层低层逐渐形成一个相对的冷中心,而对流层高层则发展为一个温度的正距平中心,两个中心近于垂直,说明斜压系统此时已经锢囚。

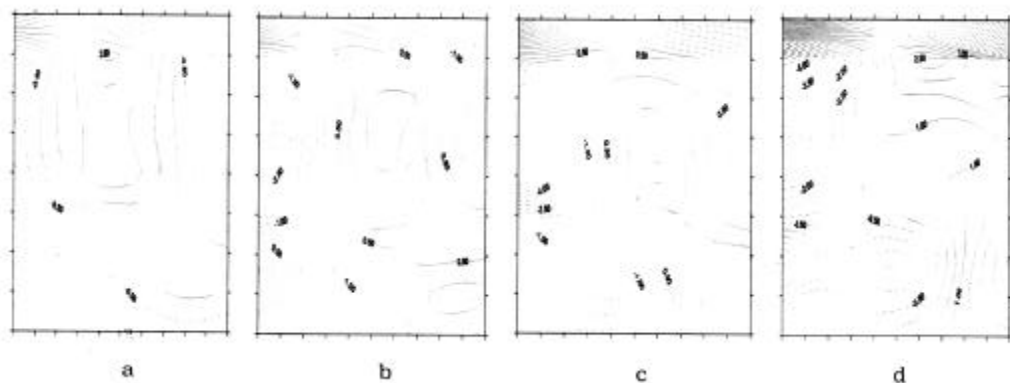


图 3 过气旋中心的西北-东南向温度距平垂直剖面

a. 18 日 12 时; b. 19 日 12 时; c. 20 日 00 时; d. 22 日 00 时。

在气旋变性后,斜压不稳定能量的加强使它重新得到发展。低层的暖温度平流不仅对热带气旋的变性起到了加速并加强的作用,而且在重新加强过程中,低层一直维持着一个较明显的暖温度平流,暖平流所形成的上升运动有利于降水的发生和有利于低值系统的维持。

分析高层 300 hPa 的散度和风场,19 日 00 时,高空急流入口区右侧的辐散区和热带气旋上空的辐散区是两个独立的区域,在 Winnie 向北移动过程中,随着高层相对应辐散区的减弱,中心气压也逐渐填塞,减弱的辐散区与北边急流右侧所形成的辐散区合并。19 日 12 时 Winnie 处于合并辐散区的南缘,随着减弱气旋的继续向北移动,进入北边的辐散区中。20 日 00 时的辐散中心强度达到  $67.4 \times 10^{-6}$  /s,到 20 日 12 时辐散中心有所加强,达到过程的极大值  $68.4 \times 10^{-6}$  /s (图 4b)。此后,伴随着急流的明显东移,气旋中心又处于辐散区的南缘,以后 Winnie 上空的散度维持一个弱的辐散区,对应气

旋中心的演变情况,说明高空急流入口区右侧的辐散不失为一个气旋重新加强的动力因子。

通过分析高层 300 hPa 涡度平流的随时间演变发现,在 21 日 00 时之前,气旋中心上空的涡度平流较弱,到 21 日 00 时(图 4c)气旋上空才有较明显的一致的气旋性涡度平流,此时平流中心强度为  $72.6 \times 10^{-10}/s^2$ ,到下一个时次,中心略有减弱,但仍有  $64.3 \times 10^{-10}/s^2$ ,以后快速减弱。这表明高空的涡度平流对气旋在 20 日 12 时以后的重新加强过程起到关键的作用。

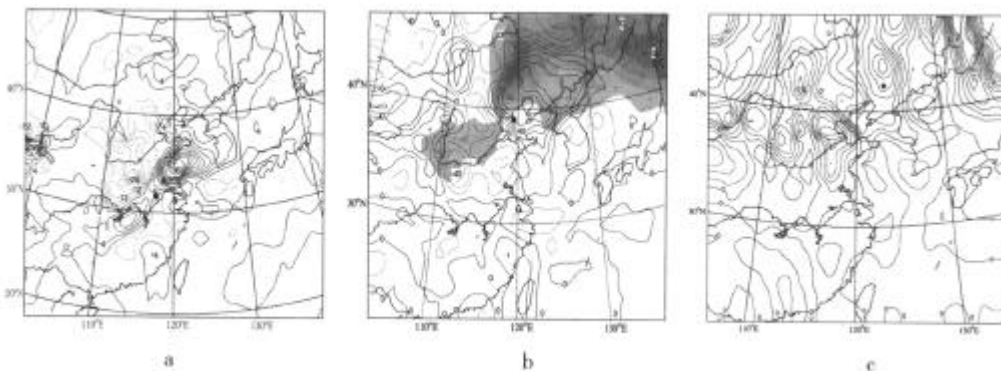


图 4 a. 19 日 12 时 850 hPa 温度平流(实线为暖平流,虚线为冷平流); b. 20 日 12 时 300 hPa 散度(实线大于零,虚线小于零)和急流(阴影); c. 21 日 00 时的 300 hPa 涡度平流(实线大于零,虚线小于零)

综合考虑各个物理量在不同阶段的表现,可以说明减弱台风在陆地上长时间维持的机制。在变性阶段,对流层中高层冷空气的下沉入侵是变性的关键。在 Winnie 进入中纬度锋区后,使锋区加强,从而使气旋东侧的暖平流加强,而暖平流又加速了低层的锋生,最终使暖心的热带气旋演变成一个斜压温带气旋。到气旋的重新加强阶段,除了低层的温度平流外,高层由急流引起的辐散以及该阶段后期的高层涡度平流,都对变性后的气旋的重新加强起关键性的作用。

### 3 结 论

通过对登陆台风 Winnie 的演变过程分析,得出热带气旋变性发展的一些特征:

- (1) 登陆后的台风经历三个阶段:衰减阶段、变性阶段、重新加强阶段。
- (2) 从天气形势的演变过程看,类似于 Sekioka 等人提出的复合型的变性过程,通过云图可以清楚地看到 Winnie 变性后演变为 Shapiro-Keyser 气旋模型的过程。
- (3) 通过对物理量的诊断分析,发现在此次过程中,对流层中高层的冷空气倾斜下沉入侵和低层的暖平流是热带气旋变性的关键。而低层所维持的较明显的暖平流,与高空急流相对应的散度区以及高空涡度平流是气旋重新发展的重要物理因子。

## 参 考 文 献:

- [1] SEKIOKA M. Synoptic structure of typhoon marie passing over the Japan sea[J]. *J Meteor Soc Japan*, 1956, 34: 276-287.
- [2] SEKIOKA M. On the behaviour of cloud pattern as seen on satellite photographs in the transformation of a typhoon into an extratropical cyclone[J]. *J Meteor Soc Japan*, 1970, 48: 224-233.
- [3] MATANO H. On the synoptic structure of typhoon Cora 1969 as the compound system of tropical and extratropical cyclone[J]. *J Meteor Soc Japan*, 1971, 49: 282-294.
- [4] BRAND S, GUARD C P. An observational study of extratropical storms evolved from tropical cyclones in the western North Pacific[J]. *J Meteor Soc Japan*, 1979, 57: 479-482.
- [5] KLEIN P M, HARR P A, ELSEBERRY 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.
- [6] HARR P A, ELSEBERRY 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.
- [7] HARR P A, ELSEBERRY R L. Extratropical transition of tropical cyclones over the Western North Pacific. Part II: The impact of midlatitude circulation characteristics[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128: 2634-2653.
- [8] PALMEN E. Vertical circulation and release of kinetic energy during the development of hurricane hazel into an extratropical storm[J]. *Tellus*, 1958, 10: 1-23.
- [9] DIMEGO G J, BOSART L F. The transformation of tropical storm agnes into an extratropical cyclone. Part I: The observed fields and vertical motion computations[J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 385-411.
- [10] DIMEGO G J, BOSART L F. The transformation of tropical storm agnes into an extratropical cyclone. Part II: Moisture, vorticity and kinetic energy budgets[J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 412-433.
- [11] BORAST L F, LACKMANN G M. Postlandfall tropical cyclone reintensification in a weakly baroclinic environment: A case study of hurricane David (September 1979)[J]. *Mon Wea Rev*, 1998, 126: 3268-3291.
- [12] 谭锐志, 梁必骥. 登陆台风变性过程的诊断研究[J]. *大气科学*, 1990, 14: 422-431.
- [13] 徐祥德, 陈联寿, 解以扬, 等. 环境场大尺度锋面系统与变性台风结构特征及其暴雨的形成[J]. *大气科学*. 1998, 22: 744-752.
- [14] 孙建华, 赵思雄. 登陆台风引发的暴雨过程之诊断研究[J]. *大气科学*, 2000, 24: 223-237.

## ANALYSIS OF THE EXTRATROPICAL TRANSITION OF TROPICAL CYCLONE OVER MAINLAND OF CHINA

ZHU Pei-jun, ZHENG Yong-guang, TAO Zu-yu

(Key Laboratory of Severe Storm Research, Department of Atmosphere Science, Physics School,  
Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Typhoon Winnie(1997) experienced three stages after its landfall on China: weakening, transformation, and re-intensification. The characteristic of transformation is similar to the “complex transition” model proposed by Matano and Sekioka. During the re-intensification stage, the transformed cyclone developed into a pattern of Shapiro-Keyser Cyclone model. From the diagnosis we can find that the cause of Winnie’s transformation is the intrusion of cold air from the middle-upper troposphere and the warm temperature advection in the lower. Winnie redeveloped after transformation, which is the result of three vital factors: the warm temperature advection in the lower troposphere, the divergence located on the right side of the entry of upper jet and the cyclonic vorticity advection in the upper.

**Key words:** typhoon; extratropical transition; diagnostic analysis