

# 热带气旋的成因及其与温带气旋的比较\*

梁必骐 袁卓建

D. R. Johnson

(中山大学大气科学系)

(美国Wisconsin大学气象系)

## 摘 要

根据移动圆柱坐标系的准 Lagrangian 角动量收支方程和径向环流方程, 利用FGGE资料, 对“Nancy”台风过程进行了计算和分析, 并同温带气旋的角动量收支作了比较。诊断研究表明, 热带气旋的非绝热加热比典型温带气旋的非绝热加热大2—3倍。上述两种气旋发生发展过程中的角动量收支都主要是来自侧边界的输送, 即径向环流的作用是十分重要的, 但驱动径向环流的主要因子有所不同。驱动热带气旋的径向环流的主要因子是非绝热加热, 而在温带气旋中, 相对重要的驱动因子是同锋区斜压不稳定有关的力矩。

**关键词** 热带气旋, 温带气旋, 成因, 角动量收支, 径向环流方程

## 1 引言

用角动量原理来解释气旋的发生发展, 已取得许多重要结果<sup>[1-10]</sup>, 尤其是 Holland<sup>[7]</sup>利用随气旋移动的欧拉和拉格朗日坐标系的角动量方程, 详细诊断了热带气旋的发展过程; Johnson等<sup>[8-10]</sup>利用等熵面上的移动圆柱坐标系的拉格朗日角动量收支方程, 成功地应用于温带气旋的研究。

本文试图利用Johnson等推导出的角动量收支方程和径向环流方程, 根据FGGE资料, 对南海台风“Nancy”的发生发展过程中的质量、角动量和加热场进行计算, 并与温带气旋演变过程进行对比分析, 从而探讨它们的成因。

## 2 计算方法和资料处理

### 2.1 计算方法

根据Johnson等<sup>[8-10]</sup>给出的绝对角动量定义及其推导出的拉格朗日角动量收支方

本文1987年12月28日收到。

●参加本项工作的还有 T. K. Schaack(Wisconsin大学)

程,我们写成如下形式

$$dG_{az}/dt = LT(G_{az}) + VT(G_{az}) + S_P(G_{az}) + S_F(G_{az}) + S_I(G_{az}) + S_R(G_{az}) + S_T(G_{az}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } \quad LT(G_{az}) &= - \int_{\theta_B}^{\theta_T} \int_0^{2\pi} \rho J_\theta [\widehat{g}_{az}(v-w)_\beta + g_{az}^* (v-w)_\beta^*] a \sin \beta d\alpha d\theta |_{\beta_B} \\ VT(G_{az}) &= \int_0^{\beta_B} \int_0^{2\pi} \rho J_\theta [\widehat{g}_{az} \widehat{\theta} + g_{az}^* \widehat{\theta}^*] a^2 \sin \beta d\alpha d\beta |_\theta \\ S_P(G_{az}) &= \int_{\theta_B}^{\theta_T} \int_0^{\beta_B} \int_0^{2\pi} \frac{\partial \phi_M}{\partial \alpha \theta} \overline{\rho J_\theta} a^2 \sin \beta d\alpha d\beta d\theta \\ S_F(G_{az}) &= \int_{\theta_B}^{\theta_T} \int_0^{\beta_B} \int_0^{2\pi} \mathbf{l} \cdot \overline{\mathbf{F}} \overline{\rho J_\theta} a^3 \sin^2 \beta d\alpha d\beta d\theta \\ S_I(G_{az}) &= \int_{\theta_B}^{\theta_T} \int_0^{\beta_B} \int_0^{2\pi} \mathbf{l} \cdot \frac{d_a \overline{\mathbf{w}}_{0a}}{dt} \overline{\rho J_\theta} a^3 \sin^2 \beta d\alpha d\beta d\theta \\ S_R(G_{az}) &= - \int_{\theta_B}^{\theta_T} \int_0^{\beta_B} \int_0^{2\pi} \overline{\mathbf{K}}_0 \cdot (\overline{\boldsymbol{\Omega}} \times \overline{\mathbf{g}}_a) \overline{\rho J_\theta} a^2 \sin \beta d\alpha d\beta d\theta \\ S_T(G_{az}) &= \int_{\theta_B}^{\theta_T} \int_0^{\beta_B} \int_0^{2\pi} \frac{d \overline{\mathbf{K}}_0}{dt} \cdot \overline{\mathbf{g}}_a \overline{\rho J_\theta} a^2 \sin \beta d\alpha d\beta d\theta \end{aligned}$$

式中  $g_a$  是绝对角动量,  $g_{az}$  是  $g_a$  在  $\overline{\mathbf{K}}_0$  方向上的分量,  $\overline{\mathbf{K}}_0$ 、 $\mathbf{l}$  分别为铅直方向和切向的单位矢量,  $\theta_T$ 、 $\theta_B$  为收支柱上、下边界的位温,  $\beta_B$  为收支柱侧边界上的  $\beta$  值,  $J_\theta$  为坐标转换的雅可比行列式,  $\phi_M$  是蒙哥马利流函数,  $\widehat{\theta}$  表示非绝热加热,  $\overline{\mathbf{F}}$  表示摩擦力。其余符号的意义可见文献[9]的附录。

方程(1)各项的物理意义如下:  $dG_{az}/dt$  为绝对角动量的变化项;  $LT(G_{az})$  为角动量的侧边界输送;  $VT(G_{az})$  为角动量的垂直输送;  $S_P(G_{az})$ 、 $S_F(G_{az})$ 、 $S_I(G_{az})$ 、 $S_R(G_{az})$ 、 $S_T(G_{az})$  分别为气压力矩、摩擦力矩、惯性力矩、地转效应和垂直坐标系变动引起的角动量变化。

为了进一步探讨角动量输送的原因,有必要研究气旋径向环流的形成和维持机制。Eliasson<sup>[11]</sup>曾给出一个由非绝热加热和摩擦作用引起的轴对称涡旋的径向环流方程

$$\frac{\partial}{\partial R} \left( A \frac{\partial S}{\partial R} + B \frac{\partial S}{\partial P} \right) + \frac{\partial}{\partial P} \left( B \frac{\partial S}{\partial R} + C \frac{\partial S}{\partial P} \right) = \frac{\partial E}{\partial R} + \frac{\partial F}{\partial P} \quad (2)$$

考虑到本文研究的是移动的气旋,所以取拉格朗日坐标系,得到相应的气旋径向环流函数  $S$  所满足的二阶线性偏微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial \phi} \left( A \frac{\partial S}{\partial \phi} + B \frac{\partial S}{\partial P} \right) + \frac{\partial}{\partial P} \left( B \frac{\partial S}{\partial \phi} + C \frac{\partial S}{\partial P} \right) = \frac{\partial}{\partial P} (2 \widehat{g}_{az} \widehat{F}) + \frac{\partial}{\partial \phi} (|\alpha_0| \widehat{\theta}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \text{其中: } \quad \frac{\partial}{\partial \phi} &= \frac{1}{a} \left( \frac{\partial}{\partial \beta} \right)_P; & \hat{\omega}_P &= -\frac{1}{\sin \beta} \frac{\partial S}{\partial \phi}; & (V - w) &= \frac{1}{\sin \beta} \frac{\partial S}{\partial P}, \\
 |\alpha_\theta| &= \frac{a^3 \sin^3 \beta R}{P} \left( \frac{P}{P_{00}} \right)^{R/C_p}; & A &= -\frac{|\alpha_\theta|}{\sin \beta} \frac{\partial \theta}{\partial P}, \\
 B &= \frac{|\alpha_\theta|}{\sin \beta} \frac{\partial \theta}{\partial \phi}; & C &= - \left[ \frac{2g_{az}}{\sin \beta} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \beta} (g_{az}) + \frac{|\alpha_\theta|}{\sin \beta} \frac{\partial P}{\partial \theta} \left( \frac{\partial \theta}{\partial \phi} \right)^2 \right], \\
 \hat{F} &= -\frac{\partial \hat{\phi}_M}{\partial \alpha_B} + \hat{l} \cdot \hat{F} a \sin \beta - \hat{l} \cdot \frac{d \hat{a} w_{0a}}{dt} a \sin \beta + \frac{d \hat{K}_0}{dt} \cdot \hat{g}_a \\
 &\quad - \hat{K}_0 \cdot (\hat{\Omega} \times \hat{g}_a) - \frac{1}{a \sin \beta} \frac{\partial}{\partial \beta} [ \widehat{(V - w)}_P^* g_{az}^* \sin \beta ] - \frac{\partial}{\partial \theta} ( \hat{\theta}^* g_{az}^* ).
 \end{aligned}$$

(3)式和(2)式在形式上是一致的,因此讨论问题时,同样可以引用Eliassen<sup>(11)</sup>由(2)式得到的如下结论:①正力矩( $\hat{F} > 0$ )驱使环流指向气旋中心,负力矩( $\hat{F} < 0$ )则使环流自中心向外;②在热源处( $\hat{\theta} > 0$ ),空气上升,冷源处( $\hat{\theta} < 0$ )空气下沉;③当冷热源和力矩的强度保持不变时,流体动力稳定度越小,径向环流越强。

## 2.2 资料来源及其处理

计算所用资料主要来源于FGGE III<sub>b</sub>资料,网格距取 $1.875 \times 1.875$ 经纬距。首先按 $P^K$ ( $K = R/C_p$ )的线性插值公式将等压面上的资料插到等熵面上,然后将等熵面上的网格资料插到收支柱的网格点上。收支柱网格的确定办法是:先将横截柱面的圆周划分36等分,再自中心向外沿径向方向,按1.5纬距间隔等分为若干个同心圆,即半径为1.5、3.0、4.5、6.0、7.5、9.0、10.5纬距共7个圆环。在垂直方向上的层次划分如下:在 $\theta = 380\text{K}$ 以下按10K间距,380K以上按20K间距,划分14层,即280、290……380、400、420、440K共14个等熵面。根据南海台风“Nancy”的发生发展过程,时间尺度取1979年9月17—23日每天两个时次(08和20时)。

## 2.3 边界条件和有关参数的确定

边界条件:  $\frac{d\theta_B}{dt} = 0$ ,  $\theta_s(a, \beta, t) < \theta_B < \theta_T$  ( $\theta_s$ 为地面 $\theta$ );  $P(\theta \leq \theta_s) = P_s$ ;

$$\frac{d\theta_B}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt}(\alpha; \beta, t); \quad \theta_s \geq \theta_B; \quad \phi_M(\theta \leq \theta_s) = C_p \theta \left( \frac{P_s}{P_{00}} \right)^K + g z_s;$$

摩擦应力  $\vec{\tau} = \rho C_D u_a |\vec{V}|$ , 其拖曳系数取 $C_D = 0.039$ 。

# 3 南海台风的诊断分析

## 3.1 “Nancy”形成的环境场条件和触发机制

南海台风“Nancy”的前期低压于1979年9月17日20时在 $112.4^\circ E$ 、 $16.0^\circ N$ 附近生

成, 19日 20 时在  $111.0^{\circ}E$ 、 $18.9^{\circ}N$  发展成台风, 当日 23 时在海南岛登陆, 以后西行到越南再次登陆, 于 23 日减弱消失。该台风给海南岛带来一次全岛性的大风、暴雨过程。

“Nancy”是一个近海发展的台风, 当时南海北部的环境场条件十分有利于台风的形成。天气分析表明, 它主要是以下几方面因素共同作用的结果(图 1);

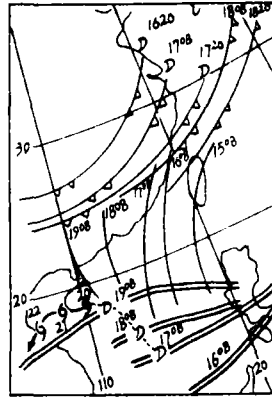


图 1 “Nancy”台风过程的综合动态图  
(带三角的实线为锋面, 粗实线为东风波, 双实线为 ITCZ, 虚线为台风路径)

Fig. 1 The motion of weather system

- ① 华南沿海和南海北部有弱冷空气侵入低压, 触发不稳定上升加强;
- ② 来自南半球越赤道气流转变成的西南季风与南海北部偏东气流辐合, 造成水平切变和水汽辐合明显加强;
- ③ 西移的东风波与南海 ITCZ 上的低压重迭, 导致该低压辐合上升加强;
- ④ 南海北部高空盛行的东风急流为低压的发展提供了高空辐散场;
- ⑤ 邻近台风 “Mac” 发生发展过程中的能量频散作用和补偿效应, 也促进了 “Nancy” 的发展;
- ⑥ 南海海域的高海温为台风的形成提供了充足的水汽和能源。

### 3.2 计算结果分析

根据角动量收支方程 (1) 和径向环流方程 (3), 我们对 “Nancy” 台风的整个发生发展过程进行了计算。图 2—6 给出了主要的计算结果。

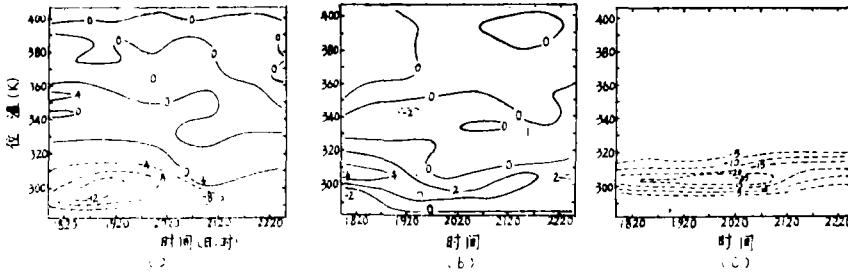


图 2 各种力矩项的时间垂直剖面 ( $R=6$  纬距, 以下同; 单位:  $10^{15}kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$ )  
(a) 气压力矩 (b) 惯性力矩 (c) 摩擦力矩

Fig. 2 Isentropic time sections of (a) pressure torque; (b) inertial torque; (c) frictional torque ( $10^{15}kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$ )

图 2 给出了各种力矩项的时间垂直剖面图。由方程 (1) 可知, 气压力矩  $[S_p(G_{az})]$  与垂直的斜压力管有关。在锋区斜压不稳定场中,  $S_p(G_{az})$  在低层为负值, 一般造成切向加权平均后的低层质量流入, 而  $S_p(G_{az}) > 0$ , 则驱使中高层质量流出。由图 2 (a) 可见, 在 “Nancy” 的初期阶段, 低层的  $S_p(G_{az}) < 0$ , 中高层则大于零, 这反映了高空东风急流造成高层辐散流出和 ITCZ 和冷空气作用造成的低层辐合流入, 可见气压力矩对

气旋初期发展的贡献是重要的。但台风形成后,  $S_p(G_{az})$  逐步减小, 甚至趋于零, 说明这时该项的作用越来越不重要。惯性力矩  $[S_l(G_{az})]$  总的变化趋势是随时间减小(图 2b)。因该项与气旋的对称性结构有关, 在“Nancy”初期因受冷空气影响, 具有不对称性特点, 随着台风的形成, 轴对称性越来越明, 故  $S_l(G_{az})$  日趋减小, 这说明该项也只是在台风前期起作用。摩擦力矩项  $[S_f(G_{az})]$  的作用相当于 Ekman 抽吸作用, 负的摩擦力矩将导致低层质量辐合上升。图 2(c) 示出, 该项最大负值出现在台风生成前后, 即其对台风的形成具有相当重要的作用。

理论分析表明, 高层正的涡动输送将引起质量辐散, 低层负的涡动输送产生质量辐合。图 3 给出了“Nancy”台风过程中角动量的侧边界输送, 由图可见, 高层为正值, 低层为负值, 最大值出现在台风形成以后。这说明该项对台风的发展和维持有着重要贡献。各种力矩和涡动输送的总和如图 4 所示。该图与图 3 相类似, 说明热带气旋发展所需的角动量主要来自侧边界的输送。各项的综合作用也是低层为负, 高层为正, 结果驱使低层质量的环流流入, 角动量向气旋中心输送, 高层质量流出, 角动量自中心向外输送(图 5)。

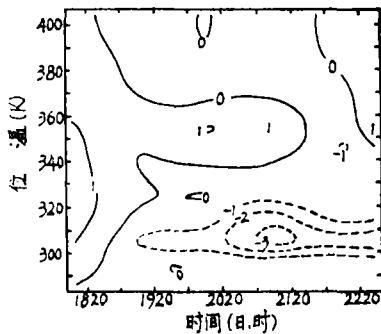


图 3 涡动角动量的侧边界输送  
(单位:  $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

Fig. 3 Isentropic time section of eddy lateral angular momentum transport ( $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

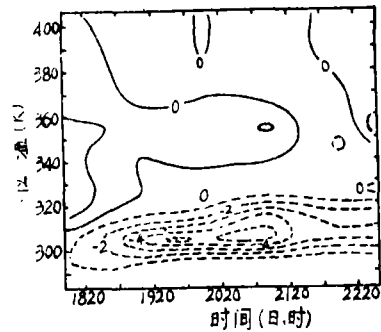


图 4 各项作用的总和  
(单位:  $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

Fig. 4 Isentropic time section of the sum of torques ( $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

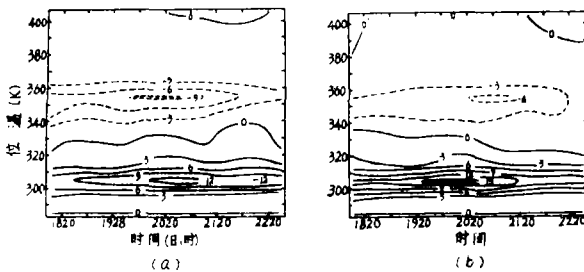


图 5 质量 ( $10^9 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ ) 和角动量 ( $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) 收支的时间垂直剖面

(a) 质量收支 (b) 角动量收支  
Fig. 5 Isentropic time sections of (a) mass budget ( $10^9 \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ ); (b) angular momentum budget ( $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

由方程 (1) 可知, 角动量的平均垂直输送  $[VT(G_{az})]$  与非绝热加热  $(\dot{\theta})$  有关, 加热越强, 垂直输送也强。由图 6 可见,  $VT(G_{az})$  随台风发生发展而逐步增大, 20 日 20 时达最

大,这意味着非绝热加热在台风成熟期达最大值。在“Nancy”发生发展过程中,角动量和加热量的变化趋势具有相似特点,即存在昼夜微振荡现象。在低层,白天(08—20时)出现负角动量,对应加热和水汽辐合场的减区,晚上(20—08时)出现正角动量,对应加热场和水汽辐合场的升值区。由图4可知,总力矩和的变化不存在这种微振荡,因此可以推论角动量的这种变化主要是由于非绝热加热不均所引起的,而加热场的昼夜变化可能是由于气旋区的深厚云区和外围少云区在白天和夜间的辐射加热差异所造成<sup>[12]</sup>。

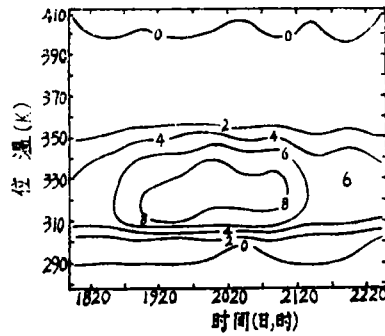
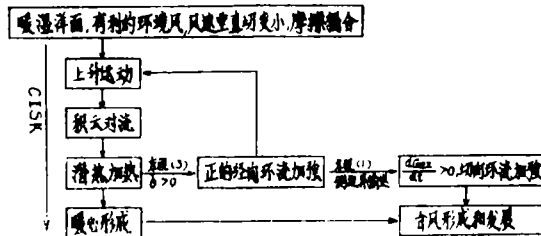


图6 角动量的平均垂直输送(单位:  $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )  
Fig. 6 Isentropic time section of the mean transport vertical angular momentum ( $10^{16} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

根据以上分析,我们可以将“Nancy”台风的发生发展过程概括为如下框图:

### 3.3 南海台风的发生发展框图

框图说明,在南海地区具备台风生成的基本条件时,通过CISK机制,将导致大气明显增暖,加热效应将驱使径向环流加强,进而使得角动量的侧边界输送加强,气旋将不断从环境场获得角动量,切向环流也随之加强,加之潜热释放导致暖心形成,因而台风形成和发展。



## 4 热带气旋与温带气旋成因的对比分析

前面已指出,许多学者用上述方法对热带气旋的研究已取得有意义的结果。七十年代以来,Johnson及其助手用类似方法对温带气旋的研究也取得成功<sup>[8-10]</sup>。为此,比较两类气旋的诊断结果是有意义的。

最近,R. Hale和J. Rosinski (1983)分别研究了发生在1978年1月和1972年6月的两个不同来源的温带气旋。1978年1月25—27日发生在美国大陆上的温带气旋是极地涡旋和温带急流相互作用的产物。计算结果表明,各种力矩的作用和角动量的侧边界输送情况与热带气旋的角动量收支变化是大致相似的,所不同的是:将该气旋的计算结果与“Nancy”相比,无论是气压力矩或惯性力矩项都更大,而且最大值出现在气旋成熟时期,这说明由于其锋区斜压不稳定和不对称结构引起的气压力矩和惯性力矩的作用对于温带气旋的发展是很重要的。在热成风作用下,温带气旋的高空(300hPa)常出现

S型流场 (图 7), 这种流场十分有利于涡动角动量的侧边界输送, 它使得温带气旋的高层质量流出比台风更明显。图 8 给出了该气旋的各种力矩总和以及侧边界输送的计算结果, 与图 4 和图 5 (b) 比较, 可清楚看出上述不同特点。

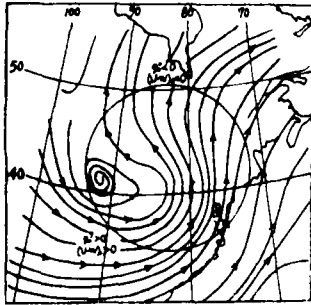


图 7 温带气旋的300hPa流场  
(1978年1月26日20时)  
Fig. 7 300hPa Streamline field at 12:00GMT 26 Jan. 1978.

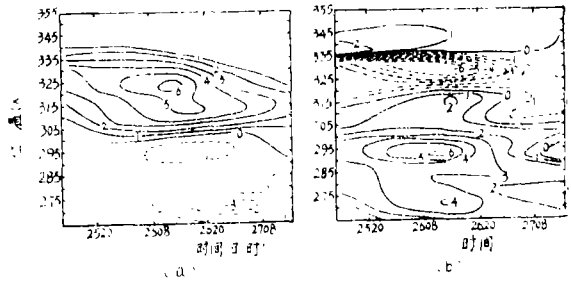
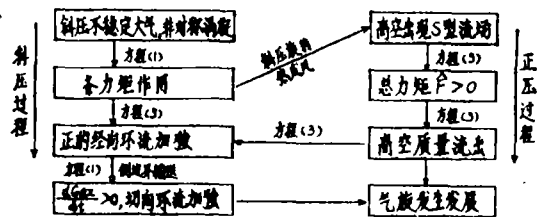


图 8 温带气旋的角动量收支变化  
(单位:  $10^{17} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )  
(a) 各力矩总和的作用 (b) 侧边界输送  
Fig. 8 Isentropic time sections of (a) total torque and eddy lateral transport; (b) lateral angular momentum transport ( $10^{17} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

1972年1月20—24日发生在美国东部的温带气旋是飓风“Agnes”登陆后在冷空气影响下重新发展而成的。对角动量收支的计算结果表明, 当飓风演变成温带气旋后, 气压力矩和惯性力矩作用显著, 而且最大值也出现在气旋强盛期。该气旋的高层流场也呈S型。总的变化趋势同前述个例类似。该两例都未出现类似“Nancy”的昼夜振荡现象, 说明温带气旋的水汽辐合和加热场都不存在明显的日变化。

J. Snook (1982) 用同样方法计算了1979年7月3—8日出现在孟加拉湾的季风低压过程。结果表明, 其具有台风“Nancy”相似的特点, 而与温带气旋的发生发展过程有所不同, 其非绝热加热比温带气旋大2—3倍。

综上所述, 可以将温带气旋的发生发展过程归纳成如上框图。



### 5 结论和讨论

(1) 无论是热带气旋或温带气旋, 其发展所需的角动量主要都是来自侧边界输送, 说明径向环流作用对气旋发展是十分重要的。但驱动径向环流的因子有所不同, 在热带气旋中, 主要因子是非绝热加热, 而温带气旋相对重要的因子是与锋区斜压不稳定的力矩。

(2) 对两类气旋而言, 各种力矩的总和都呈上正、下负分布, 促使低层质量流入, 高层质量流出, 并与角动量的侧边界输送相对应。但气压力矩和惯性力矩的作用, 对热

带气旋只在初期有贡献,而对温带气旋来说,整个发展过程都有重要作用。

(3) 在热成风作用下,温带气旋的高空出现S型流场,它将通过涡动角动量的水平输送加强高层质量辐散。而在热带气旋发展中这种作用不明显。

(4) 热带气旋的非绝热加热量比温带气旋大2—3倍,它同角动量的变化一样具有昼夜振荡的特点,在温带气旋中不具有这种特点。

### 参 考 文 献

- [1] Palmén, E. and Reihl, H., *J. Met.*, 14(1957), 150—159
- [2] Pfeffer, R. L., *J. Met.*, 15(1958), 113—120
- [3] Reihl, H. and Malkus, J. S., *Tellus*, 13(1961), 181—213
- [4] Anthes, R. A., *Mon. Wea. Rev.*, 98(1970), 520—528
- [5] Black, P. G. and Anthes, R. A., *J. Atmos. Sci.*, 28(1971), 1348—1366
- [6] Frank, M., *Mon. Wea. Rev.*, 105(1977), 1136—1150
- [7] Holland, G., *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 109(1983), 187—209
- [8] Johnson, D. R. and Downey, W. K., *Mon. Wea. Rev.*, 103(1975), 967—979
- [9] Johnson, D. R. and Downey, W. K., *Mon. Wea. Rev.*, 103(1975), 1063—1076
- [10] Johnson, D. R. and Downey, W. K., *Mon. Wea. Rev.*, 104(1976), 3—14
- [11] Eliassen, A., *Astrophysica Norvegica*, 5 (1951), 19—60
- [12] Gray, W. M. et al., *Mon. Wea. Rev.*, 105(1977), 1182—1187

## The Formation of the Tropical Cyclone and Its Comparison with the Extratropical Cyclone

Liang Biqi\* D. R. Johnson Yuan Zhuojian

### Abstract

In this paper by using FGGE data, and with the help of quasi-Lagrangian angular momentum budget equation and radial circulation equation in moving-cylindrical coordinate system, the occurrence and development of South China Sea typhoon 'Nancy' are calculated and analyzed, meanwhile the comparison between the extratropical cyclone and it is also made, furthermore, their formation is studied. The results show that, the diabatic heating of a tropical cyclone is 2 to 3 times larger than that of a typical extratropical cyclone. For both the tropical cyclone and the extratropical cyclone, the angular momentum budget required for their development is originated mainly from the lateral boundary transportation, or say that the radial circulation plays a very important role in it. But the main factors driving the radial circulation are different. In tropical cyclone, the driving factor is diabatic heating, while in extratropical cyclone, the relatively important factor is the torque relating to the baroclinic instability of frontal zone.

**Keywords** tropical cyclone, extratropical cyclone, formation, angular momentum budget, radial circulation equation

\* Department of Atmospheric Sciences