

热带气旋尺度涡旋对非对称热力扰动演变的影响

黄泓^{1, 2} 王学忠¹ 姜勇强^{1, 2} 陈中一¹

(1 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101;

2 南京大学大气科学学院中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093)

摘要: 利用经验公式定义了三种不同热带气旋尺度涡旋, 然后分别在其最大风速半径处叠加非对称热力扰动, 用三维涡旋扰动分析和模拟模式 (Three-Dimensional Vortex Perturbation Analyzer and Simulator, 3DVPAS) 模拟、分析了扰动水平结构, 通量传输及能量转换的演变。研究结果显示: 在三种涡旋中, 非对称热力扰动的演变都依次经历了三个阶段, 即静力调整阶段、准静力平衡阶段和增长 (对于不稳定涡旋) 或消亡 (对于稳定涡旋) 阶段。在初始非静力状态下, 伴随着重力波的频散, 扰动位能快速衰减, 而动能快速增加, 热量和动量向外传输。完成静力调整所需的时间主要取决于基态涡旋的稳定性和强度, 强度较弱的稳定涡旋所需时间相对较长。在三个涡旋中, 前两个阶段都伴随着螺旋带结构的生成和演变; 螺旋带在静力调整阶段比准静力平衡阶段具有更大的径向尺度; 最大径向尺度和最长生命期的外围螺旋带易于在稳定涡旋中产生, 而在快速发展的不稳定涡旋中外围螺旋云带则难以形成和维持。由此可知, 热带气旋中的外围螺旋云 (雨) 带的形成伴随着静力平衡调整的过程, 在准平衡状态下, 螺旋带向热带气旋的内核区域集中, 形成眼壁—雨带复合体结构。本文的结论有助于深入理解热带气旋外围螺旋雨带的形成和演变机制。

关键词: 热带气旋强度, 螺旋云带, 热力扰动, 重力波

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.05.005

Effect of Tropical Cyclone-like Vortices on the Evolution of Asymmetric Thermal Disturbances

Huang Hong^{1, 2}, Wang Xuezhong¹, Jiang Yongqiang^{1, 2}, Chen Zhongyi¹

(1 Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

2 Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education and School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: Three tropical cyclone-like vortices (TCLV) are constructed following the empirical formulas. The asymmetrical thermal perturbations are imposed at the radius of maximum wind of those vortices. The evolution of such perturbations described by disturbed potential temperature, vertical speed and potential vorticity is simulated using Three-Dimensional Vortex Perturbation Analyzer and Simulator (3DVPAS), then the hydrostatic adjustment, the thermal and momentum fluxes, and the energy transformation are analyzed. The results show that the evolution of asymmetric thermal perturbations in three TCLV underwent three main stages, i.e. hydrostatic adjustment, quasi-hydrostatic balance, and growing (for unstable vortex) or decaying (for stable vortex) stages. At the initial non-hydrostatic status, with the dispersion of gravity wave, the perturbation potential energy decreases rapidly, whereas perturbation kinetic energy increases, and the thermal energy and momentum transmit outward. The time taken by the hydrostatic adjustment depends on the stability and intensity of the basic TCLV, and it will take much more time for the stable vortex with less stability to finish such a process. The formation and evolution of spiral band-like structures are shown in the initial two stages, which exhibit a larger radial scale in hydrostatic adjustment stage than quasi-hydrostatic balance stage. It is easier for the outer spiral bands with a longer radial scale and longer lifetime to form in stable vortices, but it is much more difficult for such bands to form and maintain in fast developing unstable vortices. The results in this paper indicate that the formation of distant spiral cloud (rain) bands goes with hydrostatic adjustment in tropical cyclones on the condition of quasi-hydrostatic balance, and spiral bands concentrate inwardly to the inner core of tropical cyclone and finally form the eye-wall and rainbands complex. This research gives a valuable insight into the mechanisms of the formation and evolution of distant spiral rainbands.

Keywords: tropical cyclone intensity, spiral bands, thermal disturbance, gravity wave

收稿日期: 2013年11月30日; 修回日期: 2014年7月31日

第一作者: 黄泓 (1977—), Email: hhong7782@163.com

资助信息: 国家自然科学基金 (40905021 和 41375049);

中国博士后科学基金 (2011M500894)

0 引言

近几十年来, 热带气旋的路径预报水平得到了很大提高^[1-3], 而对热带气旋强度和结构变化的研究进展相对缓慢^[4]。其主要原因在于对控制热带气旋强度变

化的动力机制尚不是十分了解，特别是对称涡旋与螺旋带等非对称结构之间的相互作用。这种复杂的相互作用对热带气旋整体的结构和强度演变具有非常重要的意义。

在理论研究中，通常可以将热带气旋分解为对称和非对称分量。其中，对称涡旋通常利用理论公式对涡旋的切向风速进行定义，这样定义的涡旋又称为基态涡旋。相关研究表明，涡旋中心附近快速衰减的高波数扰动有助于涡旋强度的增加^[5, 6]。衰减的涡旋罗斯贝（Rossby）波通过与基流涡度梯度相互作用产生的扰动涡度持续加强增长的离散谱扰动^[7]。螺旋带是热带气旋中非常显著的非对称结构，它可以通过一种或多种物理过程对热带气旋的结构和强度进行调制^[8-11]。螺旋雨带对飓风风场的影响是由其对非绝热对流加热的直接响应所引起的；从线性的角度而言，飓风风场对雨带加热的响应包括非对称位涡和对称次级环流两部分^[12]。外螺旋雨带中的冷却可以使热带气旋的强度及其内核的紧致性得以维持^[13]；相反，与不稳定对称气旋涡旋相联系的扰动增长是多边形台风眼和台风眼附近中尺度涡形成的原因^[14]。螺旋云带通常通过热力扰动和基流相互作用而形成^[15]：在与积云对流加热类似的非对称热力扰动的影响下所激发的重力波产生新的非对称位涡，该位涡向涡旋中心扩展，最后积聚在涡旋的最大风速半径之内。由此非对称位涡可视为螺旋带的来源。

目前，关于非对称扰动对热带气旋强度的影响已经开展了大量的研究工作，得到了很多有益结论。但是，在对称涡旋对非对称扰动的影响方面还有很多

$$\bar{\zeta}(r) = \begin{cases} \zeta_1 & 0 \leq r \leq r_1 - d_1 \\ \zeta_1 S[(r - r_1 + d_1) / 2d_1] + \zeta_2 S[(r_1 + d_1 - r) / 2d_1] & r_1 - d_1 \leq r \leq r_1 + d_1 \\ \zeta_2 & r_1 + d_1 \leq r \leq r_2 - d_2 \\ \zeta_2 S[(r - r_2 + d_2) / 2d_2] + \zeta_3 S[(r_2 + d_2 - r) / 2d_2] & r_2 - d_2 \leq r \leq r_2 + d_2 \\ \zeta_3 & r_2 + d_2 \leq r \leq r_3 - d_3 \\ \zeta_3 S[(r - r_3 + d_3) / 2d_3] & r_3 - d_3 \leq r \leq r_3 + d_3 \\ 0 & r_3 + d_3 \leq r < \infty \end{cases} \quad (1)$$

式中， $S(x)=1-3x^2+2x^3$ 是三次Hermitian多项式，具体参数取值请参阅文献[16]。其中，Cat3涡旋在最大风速半径34.5km处的风速为54.2m/s，其涡度在半径等于26.0km处达到最大值，为 $5.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 。Cat1涡旋在最大风速半径42.5km处的风速为36.0m/s，其涡度在半径等于28.0km处达到最大值，为 $2.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 。TS涡旋的最大风速为21.5m/s，对应的半径为49.0km，其最大的涡度（ $1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ）出现在涡旋中心。

问题尚未得到很好的回答。基于此，本文将利用一个三维的非静力涡旋动力模式来研究非对称热力扰动在不同强度基态涡旋中的演变。首先，利用经验公式定义三个强度不同的基态涡旋，并在其最大风速半径附近叠加一个非对称热力扰动；然后，分别研究热力扰动在不同涡旋中的结构演变，通量传播以及能量转换等；最后，进一步讨论基态涡旋的强度对螺旋带状结构的影响。

1 模式和方法

1.1 模式

本文采用的模式为三维非静力线性涡旋模型^[16]（Three-Dimensional Vortex Perturbation Analyzer and Simulator, 3DVPAS），由美国迈阿密大学David S. Nolan教授研发。该模式的出发方程为柱坐标下干滞弹性动力方程，能够模拟和分析任意给定的扰动在基本气流中的发展演变，分析扰动对基本气流的作用。本文所取的计算区域沿径向的范围为300km，垂直范围为20km，采用网格拉伸技术，对应的格点数分别为121和31。

1.2 涡旋模型的构造

在梯度风平衡和静力平衡的条件下，可以构造接近真实的热带气旋尺度涡旋。在真实的大气中，热带气旋眼区的涡度相对较低，而眼壁区域有较大的涡度值，在相对较远的地方涡度又很低，因此本文采用连接分段常值涡度廓线的方法构造了三种基态涡旋。根据强度分别称为强涡旋（简称Cat3）、中等强度涡旋（简称Cat1）和弱的热带风暴（简称TS）。具体构造方法可参阅文献[16]。其中Cat3和Cat1表达式为：

1.3 非对称热力扰动的定义

3DVPAS模式是一个非静力模型，纯热力扰动可直接作为初始条件^[17]。本文叠加的非对称热力扰动采用类似于文献[16]的方法定义，其对应的位温扰动在 $r-z$ 平面内满足高斯分布：

$$\theta_n(r, z, t = 0) = \theta_0 \exp\left[-\left(\frac{r-r_b}{\sigma_r}\right)^2 - \left(\frac{z-z_b}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中， $\theta_0=1.2\text{K}$ 是最大扰动位温的振幅； r_b 是位温扰动中心所在半径； $z_b=5\text{km}$ 是位温扰动中心所在高度；

$\sigma_r=20\text{km}$ 和 $\sigma_z=2\text{km}$ 分别为位温扰动在径向和垂直方向的半幅宽度。考虑到实际热带气旋中最大的对流加热通常发生在眼墙附近,因此为不失一般性,本文将热力扰动中心的径向位置取在基态涡旋的最大风速半径处。稳定性分析的结果表明^[16]: Cat3和Cat1涡旋不稳定增长率最大的波数分别为 $n=3$ 和 $n=2$;而TS涡旋对于任意波数的扰动均为稳定的。本文在研究热力扰动的演变时,均将切向波数 n 取为其对应基态涡旋的最不稳定波数。

2 结果分析

2.1 热力扰动的结构演变

在 $z=2330\text{m}$ 高度处,热力扰动叠加在Cat3涡旋

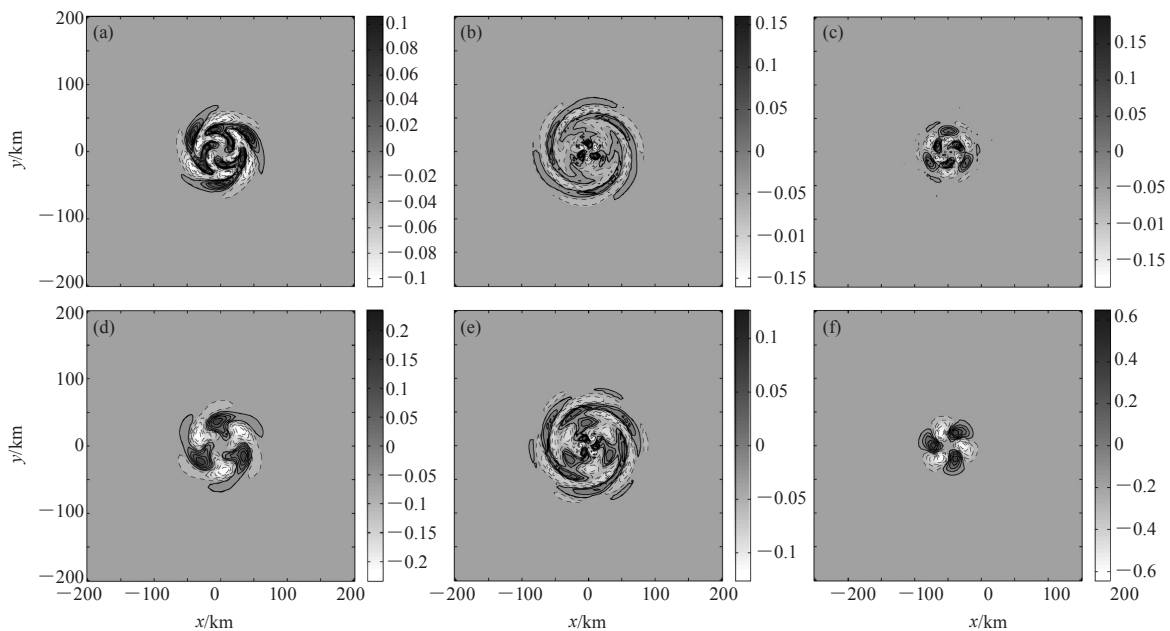


图1 Cat3涡旋垂直速度(a-c,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和扰动位温(d-f,单位: K)在 $z=2330\text{m}$ 高度的时间演变图(从左到右时间依此为0.15h、0.6h、2.0h)

样的分布被破坏,出现许多小尺度中心,上下层表现出不同相位。这是因为热力扰动引入以后,静力平衡遭到破坏,出现了重力波的频散(图2b)。随着扰动的发展,外围的扰动逐渐减弱,大值中心集中 34.5km 以内,即最大风速半径内,这个位置正好是眼壁的位置。随时间推移,外围扰动减弱,而最大风速半径以内的扰动呈增强的趋势,在距离涡旋中心 20km 附近,不断地有新的正负扰动的交替生成,并伴随向上的运动,随高度增加向外倾斜,扰动向上发展至 8km 附近衰减至消失。扰动位温的演变具有类似特点(图2d—2f)。在中等强度的Cat1基流中,热力扰动的演变与在Cat3涡旋中类似(图略),但其中螺旋带状结构的范围明显偏大,且持续时间更长,在 $t=3.0\text{h}$ 扰动

后,其垂直速度迅速发展并且中心发生分裂,在径向方向形成多个正负中心(图1a)。在基本气流的作用下,扰动随着基流旋转的同时向内外传播,形成螺旋结构(图1b)。随着时间的推移,离中心较远的螺旋带发生断裂并逐渐减弱。约 1.6h 后,外围螺旋结构基本消失;但中心附近的扰动呈不稳定增长,其后扰动快速加强,并集中在距离涡旋中心 50km 的范围内(图1c)。扰动位温的演变表现出与垂直速度一致的演变规律(图1d~1f)。

从垂直分布来看,当在Cat3涡旋的最大风速半径附近叠加热力扰动的初期,其垂直速度在上下层相位相同,在径向上呈正负交替配置(图2a)。但很快这

主要集中在 50km 范围内。

在同样的高度,即 $z=2330\text{m}$ 处,TS涡旋中扰动的演变与Cat3涡旋中差别较大。从垂直速度的分布来看,热力扰动叠加的初期,并没有立即出现螺旋带状的结构(图3a)。约 1h 以后,才开始逐渐出现螺旋带状的结构,但是螺旋臂较粗(图3b)。切向尺度大于径向尺度,并向外传播。随着时间推移,扰动被频散到更广阔空间,螺旋带宽度变窄,外围扰动强度减弱(图3c)。扰动不断向最大风速半径内聚集,且扰动的垂直速度越来越小。扰动不再发展(图3d)。在径向垂直剖面上扰动垂直速度在垂直方向最终表现为同一位相,不再存在重力波,涡旋逐渐恢复静力平衡状态(图略)。

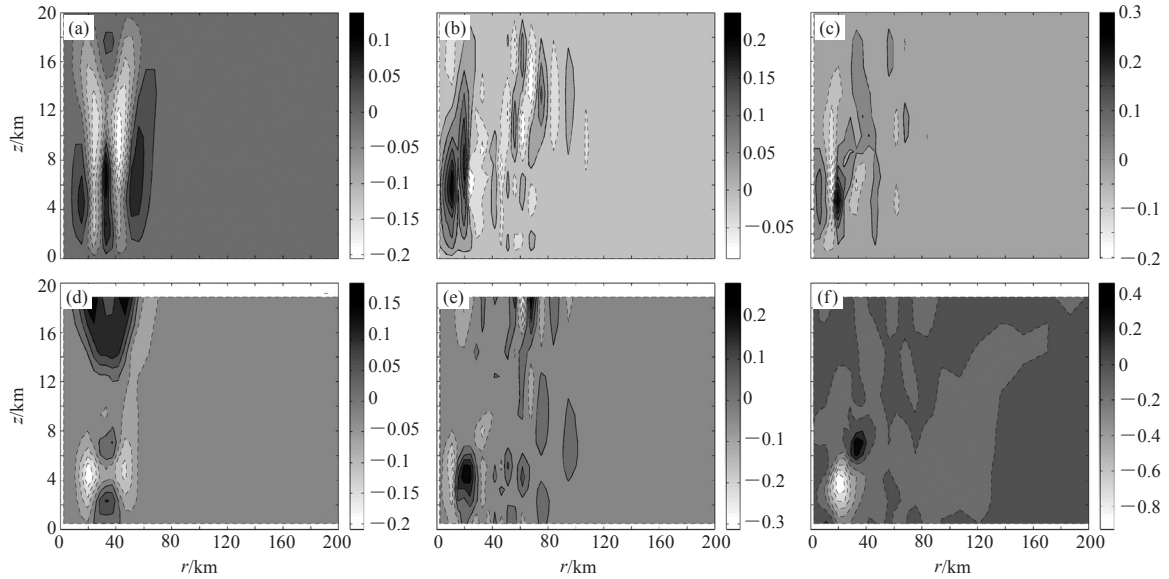


图2 Cat3涡旋中扰动垂直速度 (a-c, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和位温 (d-f, 单位: K) 在垂直剖面中的时间演变图 (从左到右时间依此为0.15h、1.0h、2.0h)

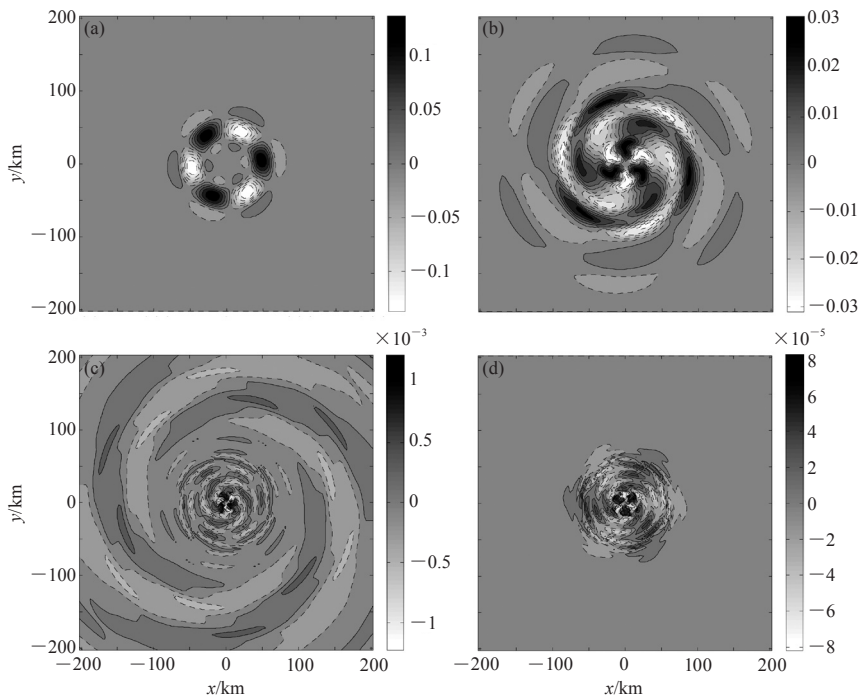


图3 TS涡旋中扰动垂直速度在 $z=2330\text{ m}$ 高度的演变 (从a到d时间依此为0.2h、1.0h、6.0h、15.0h, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.2 扰动通量分析

为了研究扰动的传播方向,对三个涡旋中扰动的热量、角动量等通量进行了分析。在Cat3涡旋叠加热力扰动的初始阶段,有垂直向上输送的热通量,但是这个时间持续很短,热通量变化很剧烈(图4a)。在 $t=0.5\text{ h}$ 时,热通量沿各个方向均有传播,这与快速调整有关,表现出无序性,在低层有向外输送的热通量,螺旋带在此阶段得到发展(图4b)。但到了

$t=1.0\text{ h}$,热通量一致向涡旋中心倾斜传播。在最大涡度半径以外,有平均向下传播的趋势,而在该半径以内,则有向上传播的分量(图4c)。此过程伴随着外围螺旋带状结构的减弱,类似于真实大气中的热带气旋组织化过程。从2.0h以后,向上的输送分量减弱消失,热通量方向为内侧输送,热通量最大中心对应于基态涡旋的最大风速半径,中心高度在5km左右(图4d)。热通量的向内输送,使得本来就比周围位温高

的涡旋中心位温升高, 涡旋的内核区域得到进一步发展。Cat1 涡旋热通量的传播与 Cat3 类似 (图略), 在扰动发生的初始阶段, 热通量向各个方向均有传播, 当 $t=2.0\text{h}$, 热通量的无序传播转变成主要向内向外两个方向, 螺旋带得到发展, 随着扰动的发展, 向外传播的分量逐渐减小, 向内的热通量增大, 外围螺旋结构消失, 扰动主要集中在基态涡旋的最大风速半径附近。对于 TS 涡旋 (图略), 扰动发生初期由于快速调

整, 位温通量方向不是很一致。在 $t=2.0\text{h}$ 时, 位温主要向外传播, 此时螺旋带状扰动逐渐加强, 随后向外的传播逐渐减弱, 只剩下低层向内的热通量, 螺旋结构减弱。

扰动角动量的演变以基态涡旋的最大涡度半径为界, 在高低层表现出不一样的传播特征。扰动发展初期, 在扰动叠加高度附近, 扰动角动量通量的值很小, 在其上下方, 则表现出基本一致的传输特征 (图

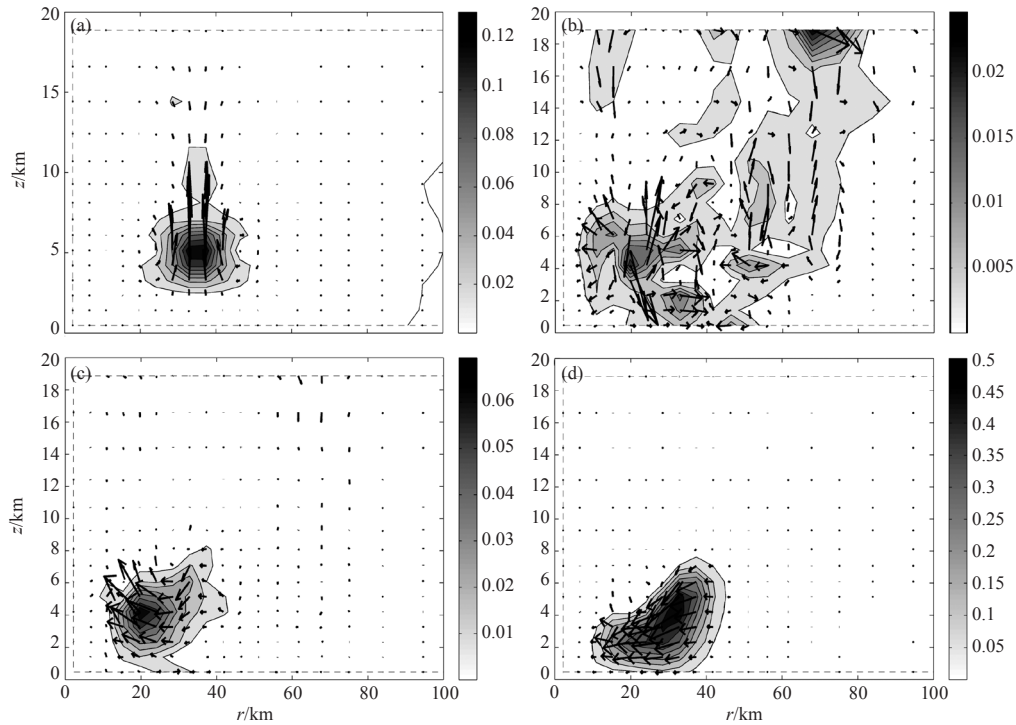


图4 Cat3 涡旋中垂直剖面内扰动热通量演变图 (a-d 分别对应 $t=0.15\text{h}$ 、 0.5h 、 1h 、 2h , 单位: $\text{K}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

5a)。在最大涡度半径内侧, 均表现出一致的向内传播, 而在该半径之外, 扰动角动量则向外传播, 在低层向外传播的扰动角动量比向内传播的大得多。在静力平衡调整的阶段, 涡旋外围的角动量传输增大, 在 8km 以下的层次, 以向外传输为主; 而在该高度以上, 则以向内传输为主 (图 5b)。此时, 在较大的径向范围内出现了螺旋带状结构 (图略)。随着时间的推移, 高层的角动量传输较低层开始削弱, 显著的角动量传输出现在最大风速半径之内的低层区域 (图 5c)。对应于扰动后期的快速发展, 向内的角动量传输集中在涡旋的内核区域, 且不断增强 (图 5d)。

Cat1 涡旋和 TS 涡旋中, 扰动角动量通量也经历了类似于 Cat3 涡旋中的演变过程 (图略), 当向外的角动量输送较大时, 螺旋带状结构明显; 而向外的角动量通量减小、向内的输送增大时, 螺旋结构减弱。与 Cat1 和 Cat3 涡旋不同, TS 涡旋中向内的角动量传输最

终不断减小至消失。

2.3 扰动能量分析

大气对流的发展与能量的转换是分不开的, 对流过程伴随着能量的转换和释放。当热力扰动施加到一个平衡的涡旋中后, 涡旋将经历一个调整过程达到新的准静力平衡状态。在 Cat3 涡旋中, $t=1.0\text{h}$ 之前, 扰动动能和有效位能有一段基本保持不变的时段, 这段时间对应于涡旋的准静力平衡阶段。之后扰动动能和有效位能均快速增长, 但前者的增长速度明显快于后者 (图 6a)。为突出初期热力扰动的变化特征, 图 6b 给出了 $0\sim 1.5\text{h}$ 的演变, 约在 0.1h 以前, 伴随着扰动有效位能的减少, 扰动动能迅速增加。在 Cat1 涡旋中, 扰动能量的演变规律类似于 Cat3 涡旋, 在 $5\sim 15\text{h}$ 这段时间, 能量变化较小, 处于平衡状态, 之后扰动能量也呈快速增长趋势 (图 7a)。但是, 在 TS 涡旋中则表现出较大的差异, 在热力扰动叠加的初期, 伴随着

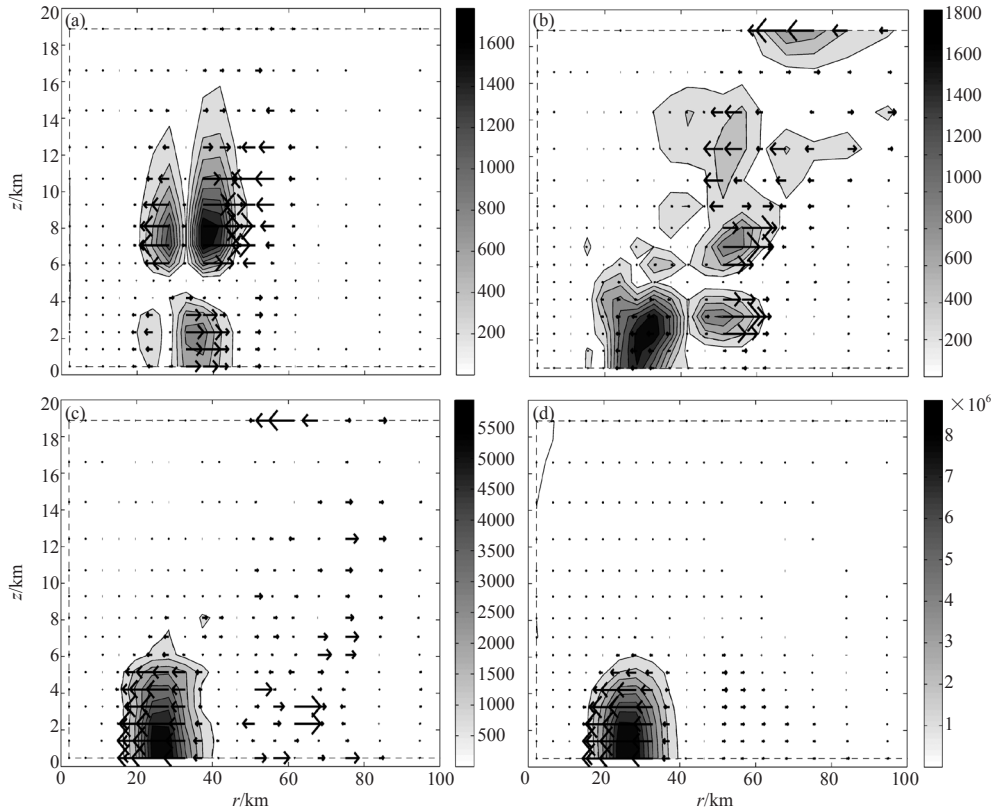


图5 Cat3涡旋中垂直剖面内扰动角动量通量演变图 (a-d分别对应 $t=0.05h$ 、 $0.5h$ 、 $1h$ 、 $4h$, 单位: $m^3 \cdot s^{-2}$)

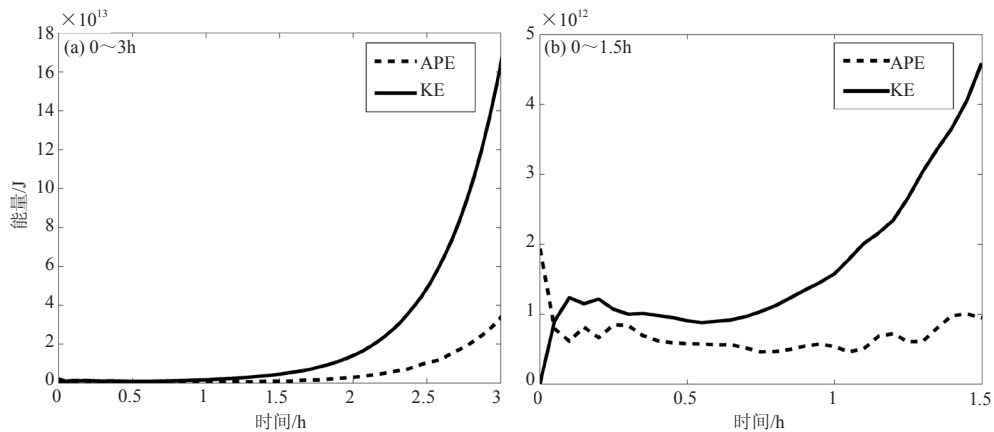


图6 Cat3涡旋中扰动动能 (实线) 与有效位能 (虚线) 随时间的演变

快速的静力平衡调整, 扰动位能减少, 而扰动动能增加, 然后在一个短暂时期两者量值保持相对稳定后, 扰动能量逐渐衰减, 直至被基流吸收 (图7b)。

3 结论

本文利用经验公式定义了三种不同强度的热带气旋尺度涡旋, 然后分别在其最大风速半径处叠加非对称热力扰动, 用3DVPAS模式模拟了扰动水平结构、通量传输以及能量转换的演变。得到了如下结论:

1) 在三种涡旋中, 非对称热力扰动的演变都依

次经历了三个阶段, 即静力调整阶段、准静力平衡阶段和增长 (对于不稳定涡旋) 或消亡 (对于稳定涡旋) 阶段。前两个阶段都伴随着螺旋带结构的生成和演变; 螺旋带在静力调整阶段比准静力平衡阶段具有更大的径向尺度。对于Cat1和Cat3涡旋而言, 经过准静力平衡过程后, 将开始新的非静力平衡状态, 此时扰动迅速增长, 主要聚集在眼壁附近, 外围螺旋带消散。

2) 热力扰动与基本气流的相互作用可以产生螺旋带, 但三种基流中的螺旋带演变特点不同, 主要是

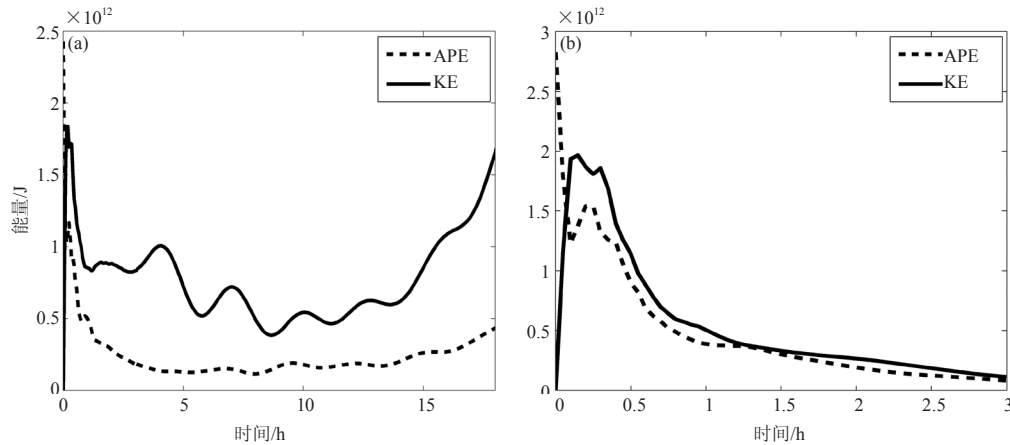


图7 扰动动能（实线）与有效位能（虚线）在Cat1（a）和TS涡旋（b）中的时间演变

表现为螺旋带的范围大小和持续时间。涡旋的强度越强，不稳定增长率越大，螺旋带的持续时间越短，范围也越小。从扰动通量分析结果可知，当螺旋带发展时，热通量和角动量通量方向向外，而当螺旋带减弱时，热通量和角动量通量方向一致向内。

3) 最大径向尺度和最长生命期的外围螺旋带常在稳定涡旋中产生，而快速发展的不稳定涡旋中外围螺旋云带则难以形成和维持。由此可知，热带气旋中的外围螺旋云（雨）带的形成伴随着静力平衡调整的过程，在准平衡状态下，螺旋带向热带气旋的内核区域集中，形成眼壁—雨带复合体结构。

本文的结论有助于深入理解热带气旋外围螺旋雨带的形成和演变机制。但是，由于本文的结论基于理论模式结果，因此还不能直接用于解释实际热带气旋中螺旋带的生消机制，需要后期结合实际观测资料和数值模式的模拟结果开展更加深入的工作。

参考文献

[1] 陈联寿. 热带气旋运动研究进展的综述. 全国热带气旋科学讨论会论文集. 北京: 气象出版社, 2001.
 [2] McAdie C, Lawrence M B. Improvements in tropical cyclone track forecasting in the Atlantic basin, 1970-1998. *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81(5): 989-998.
 [3] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. *大气科学*, 2001, 25(3): 420-432.

[4] 秦景灏, 端义宏. 我国热带气旋强度变化研究的新进展. 北京: 气象出版社, 2001.
 [5] Carr III L E, Williams R T. Barotropic vortex stability to perturbations from axisymmetry. *J Atmos Sci*, 1989, 46(20): 3177-3191.
 [6] Smith II G B, Montgomery M T. Vortex axisymmetrization: Dependence on azimuthal wave-number or asymmetric radial structure changes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1995, 121(527): 1615-1650.
 [7] Nolan D S, Montgomery M T. The algebraic growth of wavenumber one disturbances in hurricane-like vortices. *J Atmos Sci*, 2000, 57(21): 3514-3538.
 [8] Cione J J, Black P G, Houston S H. Surface observations in the hurricane environment. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(5): 1550-1561.
 [9] Kimball S. A modeling study of hurricane landfall in a dry environment. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(7): 1901-1918.
 [10] Chen Y S, Yau M K. Spiral bands in a simulated hurricane. Part I: Vortex Rossby wave verification. *J Atmos Sci*, 2001, 58(15): 2128-2145.
 [11] Franklin C N, Holland G J, May P T. Mechanisms for the generation of mesoscale vorticity features in tropical cyclone rainbands. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(10): 2649-2669.
 [12] Moon Y, Nolan D S. The dynamic response of the hurricane wind field to spiral rain band heating. *J Atmos Sci*, 2010, 67(6): 1779-1805.
 [13] Wang Y Q. How do outer spiral rain bands affect tropical cyclone structure and intensity? *J Atmos Sci*, 2009, 66(5): 1250-1273.
 [14] Schubert W H, Montgomery M T, Taft R K, et al. Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. *J Atmos Sci*, 1999, 56(9): 1197-1223.
 [15] 张铭, 黄泓, 张立凤. 大气波谱分析和不稳定性 (第三卷): 热带气旋中的扰动. 北京: 气象出版社, 2010.
 [16] Nolan D S, Montgomery M T. Nonhydrostatic, three-dimensional perturbations to balanced, hurricane-like vortices. Part I: Linearized formulation, stability, and evolution. *J Atmos Sci*, 2002, 59(21): 2989-3020.
 [17] Nolan D S, Grasso L D. Nonhydrostatic, three-dimensional perturbations to balanced, hurricane-like vortices. Part II: Symmetric response and nonlinear simulations. *J Atmos Sci*, 2003, 69(22): 2717-2745.