

陈雪景, 黄泓. 2018. 基于 3DVPAS 模式模拟的热力扰动在台风涡旋中的螺旋特征分析[J]. 气象与减灾研究, 41(1):1-6.
Chen Xuejing, Huang Hong. 2018. Analysis on spiral characteristics of thermal disturbance in typhoon vortex based on 3DVPAS model[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 41(1):1-6.

基于 3DVPAS 模式模拟的热力扰动在 台风涡旋中的螺旋特征分析

陈雪景¹, 黄泓²

1. 九江机场气象台, 江西 九江 332102
2. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101

摘要: 利用 WRF 模式模拟了 2007 年 04 号台风“万宜”环流, 选取发展初期的低层风场作为基本气流代入三维涡旋扰动分析和模拟模式(3DVPAS), 模拟分析了理想的热力扰动在该基本气流中的演变特征。结果表明: 基本气流的低层流场特征在热力扰动演变过程中起重要作用。虽然发生在不同径向距离处的热力扰动都会导致基本气流偏离静力平衡状态, 但在距离涡旋中心较近的地方, 静力平衡状态恢复更快。扰动的演变可分为快速调整阶段和准平衡阶段。在快速调整阶段, 扰动沿径向内外同时传播, 向外传播的扰动逐渐减弱, 向内传的扰动不断在台风眼壁附近聚集, 经过一段时间的演变, 在内聚集的热力扰动开始向外传播, 随着时间的发展向外传播的扰动逐渐减弱。同时, 伴随着螺旋带的发展及消亡, 热力扰动的演变也表现出不对称的结构。

关键词: 台风, 热力扰动, 涡旋, 3DVPAS 模式

中图分类号: P437

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2018)01-0001-06

doi: 10.12013/qxyjzjy2018-001

Analysis on Spiral Characteristics of Thermal Disturbance in Typhoon Vortex Based on 3DVPAS Model

Chen Xuejing¹, Huang Hong²

1. The Meteorological Observatory of Jiujiang Airport, Jiujiang 332102, China
2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China

Abstract: The process of typhoon “Manyi” (200704) was simulated by using WRF model. The low-level wind field of early developing Typhoon was selected as the basic flow to add into 3DVPAS, and the evolution of ideal thermal disturbance in the basic flow was simulated and discussed. The results showed that the low-level flow of the basic flow played an important role in the evolution of disturbance, although the thermal disturbance occurred at different radial distances would cause the basic flow to deviate from the static balance state, the static balance state can recover faster in the vicinity of the vortex center. The evolution of disturbance can be divided into rapid adjustment stage and quasi-equilibrium stage. In the rapid adjustment stage, the disturbance propagated along the radial and inner side, but the disturbance of outward propagation gradually weakened. The inward spread of the disturbance constantly concentrated in the eye wall. After a period of evolution, the disturbance began to spread outward, and the disturbance of the external propagation weakened gradually with time. The evolution of disturbance al-

收稿日期: 2017-10-08; **修订日期:** 2018-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41375049;40905021;41275099); 中国博士后科学基金(编号:2011M500894); 国家公益性行业(气象)科技专项(编号:GYHY201206005).

作者简介: 陈雪景, 硕士, 工程师, 主要从事中尺度天气学研究, E-mail: 240130135@qq.com.

黄泓(通信作者), 博士, 副教授, 主要从事中尺度天气学研究, E-mail: hhong7782@sina.com.

so showed asymmetric structure, accompanied with the development and extinction of spiral bands.

Key words: typhoon; thermal disturbance; vortex; 3DVPAS

0 引言

台风为一种灾害性天气,我国沿海地区每年夏秋两季都会遭受台风的侵袭,造成严重的生命财产损失。对台风的结构研究主要从动力学和热力学方面进行展开的。陈建萍等(2007)研究指出,影响台风强度变化的因子大致可以分为三类:环境气流与热带气旋环流的相互作用;下垫面与热带气旋环流的相互作用;热带气旋本身的内部结构。黄昌兴等(2014)研究台风“潭美”结构特征指出,其动力、热力结构均存在明显空心 and 不对称结构特征,与中高层气旋性环流偏离、高层辐散不对称、水汽输送不对称有关。毛连海等(2011)研究了进入江西台风特点,指出不对称结构是台风预报难点之一。希爽等(2011)认为,在台风“鹦鹉”的南北不对称结构形成过程中,主要是由于中高层高压系统的下沉气流抑制了北部云系的发展,而西南季风则造成了南部对流发展旺盛。郭达烽等(2013)研究表明,台风的路径以及台风与西风带的相互作用,也可以导致偏心结构。总体来说,台风偏心结构的形成机理仍是一个难题。Nolan 和 Montgomery(2000)研究发现,理论涡旋不对称扰动不仅在内核区域起到作用,在眼壁外侧以及较远的地方对强度的影响也扮演重要角色。Nolan 和 Lewis(2003)利用三维非静力线性

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

其中, $S(x) = 1 - 3x^2 + 2x^3$ 为三次 Hermitian 多项式,满足 $S(0) = 1, S(1) = 0, S'(0) = S'(1) = 0$,每一组值对应一类涡旋,在该模式中研究了 Cat3 和 Cat1 两类涡旋。表 1 给出了各参数的取值。TS 的涡度表达式为

$$\bar{\zeta}(r) = A \exp[-(r/b)^2] \quad (2)$$

式中, $A = 1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}, b = 45 \text{ km}$ 。

在定义了对称涡旋后,通过涡度反演得到底层水平速度场,再通过分析函数可以将风速廓线向垂直方向扩展,具体表达式为

原始涡旋模型分析了涡旋中的不稳定性问题,并进一步分析了不稳定扰动与基本气流间的相互作用。徐燧等(2007)采用高分辨率模式(GZHM)综合分析了台风“尤特”(2001),指出大多数物理量场都有明显的螺旋结构,且在径向、切向有生长趋势,表明有能力传播。因此,可以明确这是一类波动现象,然而有关其成因及动力机制,虽然已有很多气象学者开展了大量工作,并提出了一些理论,但目前仍没有达成共识。

本文利用 Nolan 和 Lewis(2003)开发的三维涡旋扰动分析和模拟模式(3DVPAS)对 2007 年 04 号台风“万宜”的基本气流进行热力扰动试验,分析不稳定热力扰动的发生发展过程,以期进一步认识热力扰动在台风发生发展过程中的作用。同时,分析热带气旋螺旋带的演变特点,探讨热带气旋螺旋带与热带气旋强度之间的关系,为实际预报中利用螺旋带结构预测台风强度变化提供参考。

1 理论涡旋模型的构造

在梯度风平衡和静力平衡条件下,可以构造接近真实的热带气旋涡旋模型,按强度分为三类涡旋:强涡旋(简称“Cat3”)、中等强度涡旋(简称“Cat1”)和弱热带风暴(简称“TS”),其中 Cat3 和 Cat1 的涡度表达式(Nolan and Lewis,2001)为

$$\bar{V}(r, z) = \bar{V}(r) \exp\left[-\left(\frac{cz}{z_{\text{top}}}\right)^\alpha\right] \times \left\{1 - \gamma \exp\left[-\left(\frac{r}{\delta + kz}\right)^\beta\right]\right\} \quad (3)$$

式中, $\bar{V}(r)$ 为地面风速, z_{top} 为风场的上边界。各参数的取值见表 2。

通过静力平衡和梯度风平衡确定气压场及温度场,即

$$\frac{\partial \bar{p}(r, z)}{\partial z} = -\bar{\rho}(r, z)g \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{p}(r, z)}{\partial r} = \bar{\rho}(r, z) \left[f \bar{V}(r, z) + \frac{\bar{V}(r, z)^2}{r} \right] \quad (5)$$

$$\frac{1}{r \bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial r} (r \bar{\rho} u_0) + \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} w_0) = 0 \quad (6)$$

文中将 Cat3、Cat1、TS 涡旋理论廓线代表基本气流,用于模拟实验,各参数取值见表 1 和表 2。三条基流廓线分别为三种强度不同的热带气旋尺度涡旋,其中 Cat3 涡旋强度最大,Cat1 其次,TS 最小。

表 1 各类涡旋模型的参数

Table 1 The parameters of the vortex models

涡旋类型	参数								
	$\zeta_1(\text{s}^{-1})$	$\zeta_2(\text{s}^{-1})$	$\zeta_3(\text{s}^{-1})$	$r_1(\text{km})$	$r_2(\text{km})$	$r_3(\text{km})$	$d_1(\text{km})$	$d_2(\text{km})$	$d_3(\text{km})$
Cat3	3.5×10^{-4}	5.27×10^{-3}	1.75×10^{-4}	20.0	33.33	120.0	5.0	5.0	60.0
Cat1	5.0×10^{-4}	2.50×10^{-3}	1.00×10^{-4}	20.0	40.00	120.0	7.5	10.0	60.0

表 2 各类涡旋风速沿垂直方向的变化参数

Table 2 The parameters of spiral wind speed along the vertical direction

涡旋类型	参数						
	$z_{\text{top}}(\text{km})$	α	c	γ	β	$\delta(\text{km})$	k
Cat3	18.0	2.7	4.0	1	3.0	1.0	4.0
Cat1	16.0	2.0	1.7	1	2.7	1.0	4.0
TS	14.0	2.0	1.7	0			

2 台风“万宜”基流的提取和数值计算

基于 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料作为初始场,利用 WRF 模拟台风“万宜”,得到高分辨率资料。模拟区域以 $(130^\circ\text{E}, 20^\circ\text{N})$ 为中心,采用双重嵌套。粗网格格点数为 200×200 ,格距为 15 km,细网格格点数为 202×202 ,格距为 5 km。粗网格积云对流采用 Kain/Fritsch 方案,细网格不采用积云参数化方案;微物理过程参数化选择 Lin 方案。模式顶为 50 hPa,垂直分层 28 层。文中采用涡旋追踪方法,该方法最大的优点是台风始终处于移动的最高分辨率网格区的中心,因此模拟区域随着模式运行自适应调整。

文中选取模拟第 40 个小时(2007 年 7 月 11 日 15 时,UTC)的低层风场作为初始涡旋,并通过经验公式(3)在垂直层次上进行扩展,由于台风“万宜”在此之后发展,因此选取不稳定 Cat3 基流参数。基于此,从台风“万宜”中提取廓线作为基本气流,同时在垂直方向进行扩展。

图 1 为台风“万宜”基本气流的相对涡度及切向速度分布。分析发现,模拟第 40 个小时最大风速半径为 174.0 km,最大风速为 36.1 m/s,涡度最大值为 $5.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,距离涡旋中心 23 km。图 2 为基本气流的切向速度垂直分布。分析台风“万宜”垂直方向扩展的结构发现,大风速区域在 5 km 高度以下,速度轴线随高度向外倾斜。

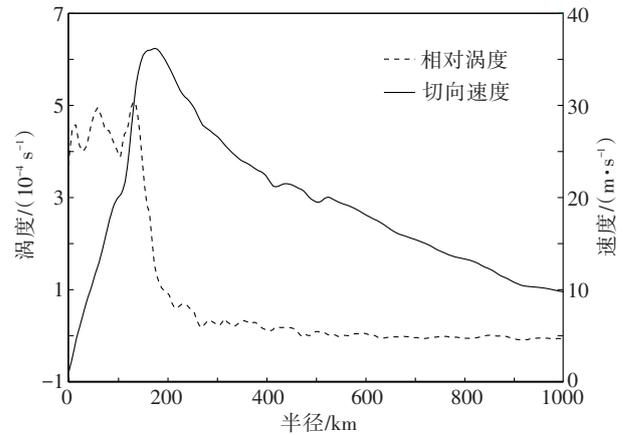


图 1 台风“万宜”基本气流的相对涡度和切向速度分布
Fig. 1 Relative vorticity and tangential velocity of Typhoon “Manyi” basic airflow (The solid line represents tangential velocity, the dotted line represents relative vorticity)

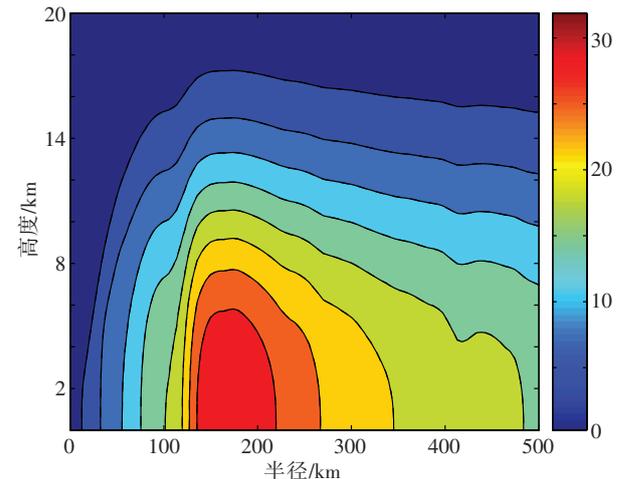


图 2 台风“万宜”基本气流的切向速度垂直分布(单位:m/s)
Fig. 2 Vertical distribution of tangential velocity of Typhoon “Manyi” basic airflow (unit: m/s)

通过静力平衡和梯度风平衡确定气压场及温度场,从而计算其他热力参数。图 3 是台风“万宜”位温差异的垂直结构,由同一水平面上,每个点的位温

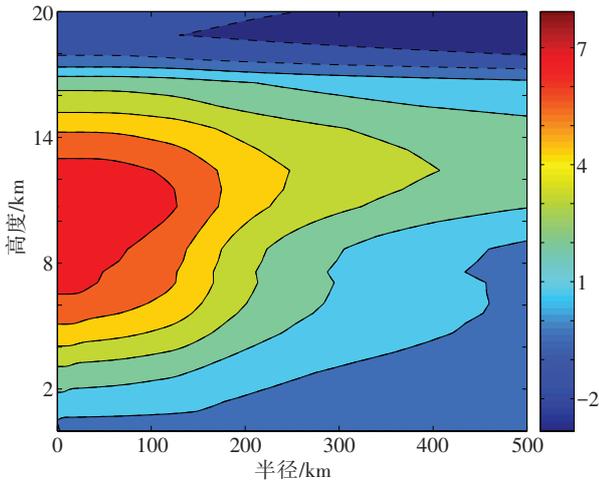


图3 台风“万宜”的暖心结构(单位:K)

Fig. 3 Warm core structure of Typhoon “Manyi” (unit: K)

减去同一水平面平均位温得到。分析发现,台风暖心结构明显,高位温区在距离台风中心 100 km 以内,高度为 6—13 km。

黄泓(2006)研究了热带气旋尺度涡旋中的扰动引起的不稳定增长率与不同波数之间的关系发现,当波数取 2 时,该基本气流的不稳定增长率最大,因此文中的实验均取波数为 2。在实际台风中,眼壁附近的波动以 1 波或者 2 波为主,为了模拟热力扰动在这种基流中的演变,引入一个 2 波的初始热力扰动,计算式为

$$\theta(r, z, t = 0) = \theta_0 \exp \left[- \left(\frac{r - r_b}{\sigma_r} \right)^2 - \left(\frac{z - z_b}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中, $\theta_0 = 1.0$ K 为初始最大位温异常; r_b 、 z_b 分别表示该热泡径向和垂直方向的位置; σ_r 、 σ_z 分别为该热泡径向和垂直方向的半幅值宽度; r 为中心径向距离; z 为高度; t 为积分时间。

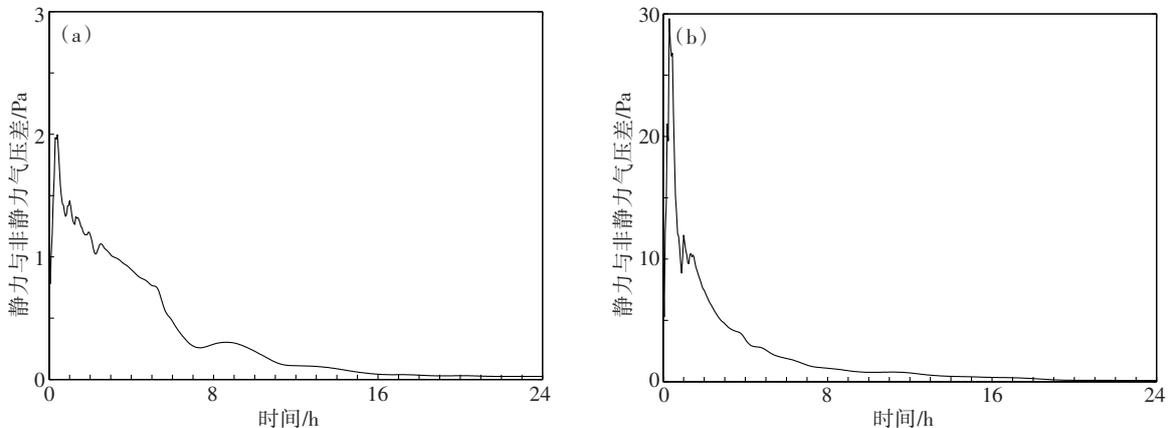


图4 径向距离为 100 km(a)和 300 km(b)扰动高度为 5 km 的静力气压与非静力气压均方差随时间变化

Fig. 4 The mean square error variation of static and non-static pressure at the radial distance of 100 km(a) and 300 km(b) at the disturbance height of 5 km

模式初始扰动的中心径向距离取 100 km 和 300 km,分别对应内雨带和外雨带的热力扰动,扰动高度取 5 km,分别代表浅对流和深对流的潜热释放高度。计算区域取为 1 000 km×1 000 km,格点数为 241×241,垂直高度为 20 km,垂直分为 31 层,积分时间为 48 h。

3 热力扰动演变特征分析

热带气旋中的潜热释放能够引起气旋内部温度异常,从而引起扰动的产生并对基本气流产生作用。文中利用 3DVPAS 模式模拟不对称热力扰动在涡旋中的演变,并分析螺旋带的发生发展。

3.1 静力平衡特征

热力扰动是叠加在满足静力平衡和梯度风平衡的对称涡旋上,当引入位温扰动以后,基本气流的静力平衡将被破坏。这种平衡能否恢复,与波动性质有关,通过计算静力气压场和非静力气压场均方差,可以分析扰动偏离静力平衡的程度。图 4 为不同径向距离扰动高度为 5 km 的静力气压与非静力气压均方差随时间变化。对于扰动高度为 5 km,取初始时刻位温为 1 K 的 2 波扰动,当扰动发生在径向距离为 100 km 时,均方差迅速增加,达到非平衡状态,此过程称为快速调整阶段,但很快均方差减小,在 2 h,均方差减到 1 Pa,随着时间的推移,均方差进一步减小,逐渐恢复静力平衡状态,此过程称为准静力平衡状态。从 24 h 开始,均方差虽有缓慢地增大趋势,但值很小,即从实际台风中提取的这条廓线,其静力平衡状态易于恢复。当扰动径向距离取 300 km 时,气压差迅速增大,在 0.4 h 达到最大,此时偏离静力平衡态最多,处于快速调整阶段,之后均

方差逐渐减小,在 2.0 h,均方差减小到 1 Pa 以下。均方差随时间的变化与扰动在径向距离为 100 km 处类似,但在 300 km 处峰值更大,因此,叠加在距离涡旋中心较远的热力扰动更易破坏基本气流静力平衡,而不同高度的扰动区别并不大。

分析扰动动能(图略)发现,扰动发生后,经过短暂的调整,能量迅速下降,6 h 后保持较长时间的稳定,于 36 h 扰动动能迅速增加,扰动再次得到发展。径向距离为 300 km 处的扰动动能大于 100 km 的扰动动能,且后期增长速度更快。

3.2 热力扰动演变特征

以高度为 5 km 的热力扰动为例,在径向距离为 100 km 处施加热力扰动后,扰动向内外同时传播(图 5),沿径向形成多波数扰动,并在中心附近形成眼壁。随着扰动的发展,不断在眼壁形成扰动并向外传播,呈螺旋结构,远离中心的扰动逐渐减弱消失。热力扰动主要集中在 500 km 以内的区域。在 8 h 时,外围的螺旋结构减弱,而眼壁区域的变化不明显。在 9.6 h,扰动仅集中在 200 km 以内的眼壁区域,且随着时间的增加,扰动范围越来越小,但扰动值不断增加。图 6 给出了径向距离为 300 km 的扰动。分析可知,径向距离为 300 km 的扰动持续

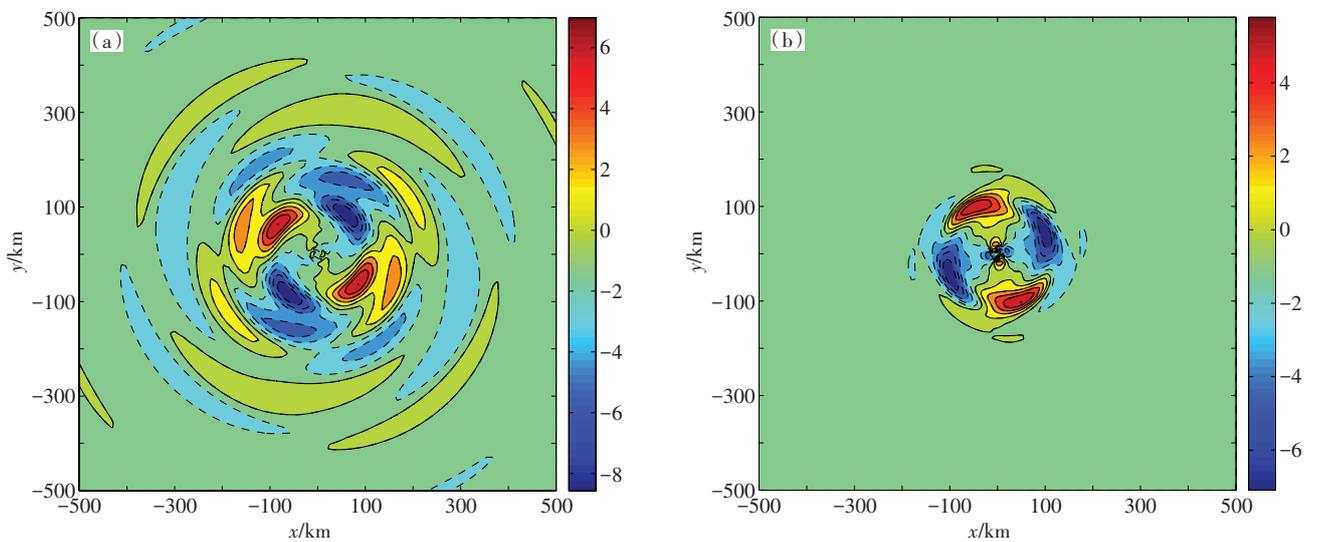


图 5 径向距离为 100 km 扰动高度为 5 km 处第 8 h(a)、9.6 h(b)位温在直角坐标系中的分布(单位: 10^{-3} K)

Fig. 5 The distribution of the potential temperature at the 8th h (a) and 9.6th h (b) of the 100 km radial distance and the disturbance height of 5 km (unit: 10^{-3} K)

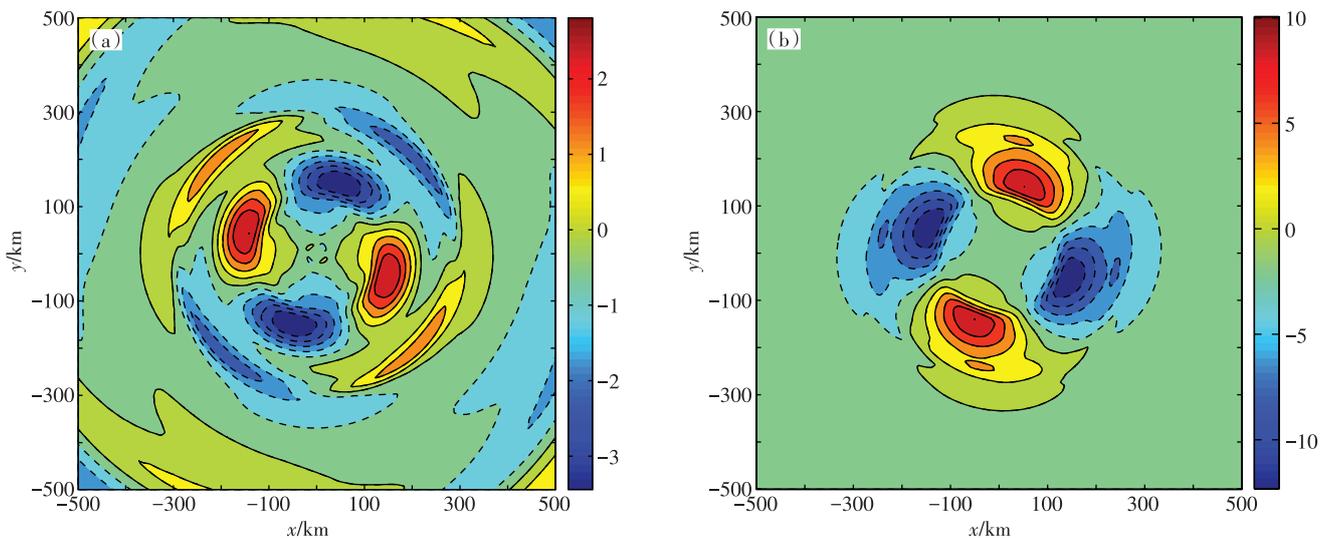


图 6 径向距离为 300 km 扰动高度为 5 km 处第 12 h(a)、30 h(b)位温在直角坐标系中的分布(单位: 10^{-3} K)

Fig. 6 The distribution of the potential temperature at the 12th h (a) and 30th h (b) at the 300 km radial distance and the disturbance height of 5 km (unit: 10^{-3} K)

时间更长,要到 12 h 开始减弱,30 h 后螺旋结构消失,扰动开始在眼壁附近增长。

4 结 论

从 WRF 模式模拟的数值结果中提取了台风“万宜”的基本气流,加入 3DVPAS 模式中,通过对基本气流施加热力扰动,分析了热力扰动的演变特征,得到结论如下:

1) 将热力扰动施加在不同的径向距离处,都会导致基本气流偏离静力平衡状态。如果将热力扰动施加在距离涡旋中心较近的地方,静力平衡状态将很快恢复。因此,基本气流的低层流场特征在扰动演变过程中起到重要作用。

2) 热力扰动的演变可分为快速调整阶段和准平衡阶段。在快速调整阶段,扰动沿径向向内外同时传播,向外传播的扰动逐渐减弱,内传的扰动不断在眼壁附近聚集。经过一段时间的演变,在内聚集的扰动开始向外传播,向外传播的扰动逐渐减弱。

3) 在热力扰动演变过程中,随着螺旋带的发展和消亡,螺旋带呈不对称结构。不同径向距离的扰动,使得螺旋带范围及维持时间不同。径向距离为 300 km 的扰动范围大于 100 km,维持时间也更长。

参考文献 (References)

- 陈建萍,周伟灿,尹洁. 2007. 国内外热带气旋强度变化研究现状[J]. 气象与减灾研究,30(3):40-47. Chen J P, Zhou W C, Yin J. 2007. Research progress on tropical cyclone intensity[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 30(3):40-47.(in Chinese)
- 郭达烽,陈翔翔,周芳,等. 2013. 台风“海葵”(2012)登陆后西折蜗行诊断分析[J]. 气象与减灾研究,36(3):25-34. Guo D F, Chen X X, Zhou F, et al. 2013. The diagnostic analysis of the westward moving path of Typhoon Haikui(2012) after landing[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 36(3):25-34.(in Chinese)
- 黄昌兴,周芳,薛湛彬. 2014. 台风“潭美”(2013)偏心不对称结构特征分析及数值模拟[J]. 气旋与减灾研究,37(2):13-18. Huang C X, Zhou F, Xue C B. 2014. Analysis numerical simulation on asymmetric structure of Typhoon TraMi[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 37(2):12-18.(in Chinese)
- 黄泓. 2006. 热带气旋尺度涡旋中扰动的研究[D]. 南京:解放军理工大学. Huang H. 2006. A study on perturbations in tropical cyclone-scale vortex[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology.(in Chinese)
- 毛连海,黄昌兴,周国良. 2011. 影响江西台风特点和成因分析[J]. 水文,31(2):89-92. Mao L H, Huang C X, Zhou G L. 2011. Characteristics and genetic analysis of the typhoon influence in JiangXi province[J]. Hydrology, 31(2):89-92.(in Chinese)
- Nolan D S, Montgomery M T. 2000. The algebraic growth of wave-number one disturbances in hurricane-like vortices[J]. J Atmos Sci, 57(21):3514-3538.
- Nolan D S, Lewis D G. 2003. Nonhydrostatic, three-dimensional perturbations to balanced, hurricane-like vortices. Part II: symmetric response and nonlinear simulations[J]. J Atmos Sci, 60(22):2718-2745.
- 希爽,马刚,张勇. 2014. ATOVS微波观测对 2008 年台风预报影响的初步评估[J]. 热带气象学报,30(4):700-706. Xi S, Ma G, Zhang Y. 2014. Evaluation of the impacts of atovs microwave observation in Typhoon numerical forecast in 2008[J]. J Trop Meteor, 30(4):700-706.(in Chinese)
- 徐燧,闫敬华,王谦谦. 2007. 南海台风“尤特”螺旋结构的综合分析[J]. 热带气象学报,23(4):366-375. Xu Y, Yan X H, W Q Q. 2007. A comparehensive analysis of the spiral structure features of Typhoon Utor(2001)[J]. J Trop Meteor, 23(4):366-375.(in Chinese)