李侃,徐海明. 2012. 西风带高空槽对登陆我国变性热带气旋的影响及其机理研究 [J]. 大气科学, 36 (3): 607-618, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895.2011.11076. Li Kan, Xu Haiming. 2012. The impacts of westerly upper-level trough on the extratropical transition of tropical cyclones landing over China and its possible mechanisms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 607-618.

西风带高空槽对登陆我国变性热带气旋的 影响及其机理研究

李侃^{1,2} 徐海明^{2,3}

1 江西省萍乡市气象局, 萍乡 337002

2南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044

3南京信息工程大学/气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044

摘 要应用日本气象厅 1979~2008 年的热带气旋资料以及日本 25 年(JRA-25)再分析资料,本文首先对登陆 我国变性加强和变性减弱的两类热带气旋进行了合成对比分析,发现热带气旋变性后的强度变化与相应的西风 带高空槽的强弱有很好的对应关系。然后,我们选取了 2004 年登陆我国的热带气旋 Haima 为研究对象,通过中 尺度模式模拟再现了其登陆后变性演变过程,采用片段位涡反演方法改变了模式初始高空槽的强度,研究了高空 槽强度的变化对 Haima 变性过程的影响。研究表明:(1)高空槽加强(减弱)后,Haima 移速明显加快(减慢), 此外深(浅)槽对应的 Haima 变性加强过程中心气压降幅较大(小);(2)不同强度的高空槽与 Haima 相互作用 的过程中,深槽对应的高空急流范围较大,强度更强,相应的高空强辐散有利于 Haima 明显的再发展;(3)另外 深槽对应着较强的高层正位涡带,正位涡向下伸展诱发低层 Haima 正位涡明显增长,从而导致低层锋区的强烈发 展和低层气旋的明显加强。

关键词 热带气旋 高空槽 变性 片段位涡反演
文章编号 1006 - 9895 (2012) 03 - 0607 - 12
中图分类号 P444
文献标识码 A doi: 10.3878/j.issn.1006 - 9895.2011.11076

The Impacts of Westerly Upper-Level Trough on the Extratropical Transition of Tropical Cyclones Landing over China and its Possible Mechanisms

LI Kan^{1, 2} and XU Haiming^{2, 3}

1 Pingxiang Meteorological Bureau of Jiangxi Province, Pingxiang 337002

2 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the Tropical Cyclone (TC) data and Japanese 25-year reanalysis data of Japan Meteorological Agency from 1979 to 2008, compositing and comparative analysis was firstly performed to study the intensifying and weakening TC during the Extratropical Transition (ET) over China. The analyses reveal a nice corresponding relationship between the variation of TC's intensity after ET and initial strength of the westerly upper-level trough. Then TC Haima which made landfall on China in 2004 was taken as an example, the evolution of its transition

收稿日期 2011-04-13, 2011-12-15 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40830958、40975024

作者简介 李侃, 男, 1985年出生, 硕士, 主要从事短期天气预报工作以及热带气旋的研究。E-mail:litianhao12@yahoo.com. cn

大 气 科 学 Chinese Journal of Atmospheric Sciences

process was reproduced by the mesoscale atmospheric model. The authors modified the intensity of upper-level trough in the initial fields using the method of piecewise potential vorticity (PV) inversion and investigated the impacts of different troughs on Haima's re-intensification process during ET. The results indicate that Haima moved quickly (slowly) when the trough enhanced (weakened), furthermore, the deeper (shallower) the upper trough is, the stronger (weaker) the Haima re-intensifies; the deeper trough shows wide and strong upper-level jet and enhanced divergence, which is favorable for Haima's redevelopment; besides, the deeper upper trough was accompanied by stronger positive belt of PV, the upper-level positive PV propagated downward to lower levels to result in the growth of Haima's positive PV and the intense development of low-level baroclinic frontal zone, finally, the low-level cyclone was reinforced obviously.

Key words tropical cyclone, upper-level trough, extratropical transition, piecewise potential vorticity inversion

1 引言

热带气旋(简称 TC) 移入中纬度西风带后,受 中纬度斜压系统的环境风场、温度场、湿度场等影 响,TC 相对对称的暖心结构往往会转变为不对称 的斜压结构。一般来说,TC这种结构的改变会导 致 TC 演变为温带气旋, 这就是所谓的 TC 变性。 Klein et al. (2000) 将 TC 的温带转变分为变性和 再发展两个阶段,他们通过对西北太平洋上 30 个 变性 TC 的研究指出: TC 北上与斜压区的相互作 用导致了 TC 的变性, 而再发展阶段 TC 的演变则 取决于中纬度环流的结构以及 TC 与中纬度环流相 互作用的方式。Harr and Elsberry (2000) 和 Harr et al. (2000) 认为残余 TC 自身的结构对再发展阶 段的影响较小,中纬度环境场的结构决定了 TC 再 发展阶段的本质,他们还指出 TC 再发展阶段的强 度和路径难以准确预报的原因是预报模式对与 TC 相互作用的中纬度环境场处理不当。Klein et al. (2002)研究了 TC 变性过程中高层的动力过程和 TC 低层热力过程对其影响,结果表明当 TC 高层 外围环流使高空急流增强、低层残余 TC 与低层锋 区相互作用时,TC 易变性再加强。Evans and Prater-Mayes (2004) 则运用数值模拟的方法描述 了变性飓风 Irene 地表和高空环流特征的相互作 用,并且用准地转ω方程和位涡诊断方法检验了这 种相互作用,分析表明 Irene 的变性受高空槽及高 空急流的影响。朱佩君等(2003)通过对登陆中国 的台风 Winnie 变性演变过程的研究, 认为低层暖 平流、高空急流相对应的散度区和高空涡度平流是 导致 Winnie 变性加强的重要物理因子。李英等 (2005)则从湿位涡理论出发,发现台风 Winnie 变 性后再加强主要与高层正位涡扰动下传, 低层锋区

及 TC 环流之间的相互作用有关。从以往的研究来 看,国内外专家在中纬度系统与 TC 之间相互作用 的大多数研究中均强调高空槽、高空急流等系统对 TC 变性过程,尤其是 TC 变性后再加强过程起重 要的作用。

本文的目的就是要利用合成分析的方法,对比 分析登陆我国变性加强和减弱两类 TC 变性过程中 的高层环境场,针对对比分析所揭示的两类变性 TC 的高层环境场特征,采用中尺度模式 WRF (Weather Research and Forecasting modeling system)来研究高层环境场对 TC 变性的影响及其机 理。

2 观测资料分析

2.1 资料和方法简介

本文采用的 TC 路径和强度资料来自日本气象 厅 (JMA)每6小时一次的最佳路径分析资料,该 资料包括 TC 的中心位置和中心最低气压。使用 JMA 一日4次,水平分辨率1.25°×1.25°,垂直方 向共23层的全球格点JRA-25再分析资料(Onogi et al., 2007),利用跟随 TC 中心坐标动态合成法 (李英等, 2004)分别合成两类变性 TC 环境场。文 中变性 TC 的资料综合了JMA 热带气旋资料与宋 金杰和王元(2010)所统计的西北太平洋变性 TC 资料(包括变性 TC 编号,名称以及变性发生的时 间)。

2.2 登陆我国两类变性 TC 的对比分析

Klein et al. (2000) 曾指出广义上的 TC 变性 包含两个阶段:变性阶段和再发展阶段(再发展阶 段 TC 可能衰弱或再加强)。文中将变性阶段完成 的时刻称为 T-end (简写为 Te),"变性前"指的是 Te 之前的时刻,"变性后"指的是 Te 之后的时刻。 变性阶段完成之前的 12 小时表示为 Te-12, 变性 阶段完成之后的 12 小时则表示为 Te+12。

本文统计了 1979~2008 年的 30 年间, 登陆我 国的变性 TC 共有 30 个。定义 TC 变性后中心所 达到的最低气压与 TC 变性前 6 小时的中心气压之 差小于 0 hPa 的样本为变性加强样本 (IET), 反之 则为变性减弱样本 (WET)。按照此标准, 变性加 强样本为 10 个, 变性减弱样本为 20 个。为了减少 地域不同所引起的差异, 更好的突出环境场的影 响, 本文的合成分析选取了在山东、江淮及其近海 地区变性加强和变性减弱的 TC 各 6 个样本 [8109 (Nina)、8921 (Vera)、9219 (Ted)、0420 (Haima)、0509 (Matsa)、0807 (Kalmaegi) 和 8505 (Hal)、9005 (Ofelia)、9216 (Polly)、0010 (Bilis)、 0102 (Chebi)、0515 (Khanun)]。图 1 为所选的 6 个变性加强和 6 个变性减弱 TC 登陆后的路径, 图 中黑点表示 TC 变性阶段完成时的地理位置。

2.2.1 高层形势场

从合成的 300 hPa 位势高度场来看(图 2),两 类 TC 变性前,中高纬均有西风带高空槽活动,槽 前有高空急流区配合(风速≥30 m/s 的阴影区)。 对比变性前 IET (图 2a)与 WET (图 2d)西北侧的 高空槽可以看出,IET 的高空槽环流的经向度更 大,高空槽更强。随着高空槽东移以及 TC 的北 上,两类 TC 均逐渐接近高空急流区。Te 时刻, IET (图 2b)对应高空槽进一步加深明显强于 WET (图 2e)的高空槽,且 IET 槽前高空急流的 范围更广。变性后,IET (图 2c)与高空槽耦合, IET 环流处于槽前高空急流入口的强辐散区,而 WET (图 2f)与高空槽耦合不明显,槽较浅,高空 急流的范围明显缩小,对应的高空辐散也较弱。此 外 400 hPa 以上的高层, IET 对应的西风带高空槽 均明显强于 WET 所对应的高空槽 (图略),所以本 文所指的西风带高空槽主要是位于 400~150 hPa 的高层。

2.2.2 散度场和垂直运动

从图 2 中我们可以看到变性后两类 TC 均位于 高空急流入口区右侧的辐散区,相关研究表明,高 空的强辐散能够加强 TC 中层上升运动, 而上升运 动又通过加强低层辐合从而加强 TC 的强度 (Bosart et al., 1998)。图3给出了两类 TC 变性前后散 度差的垂直剖面,即用 Te-12 时的散度减去 Te+ 12 时的散度。IET 与 WET 变性后均移入高空急 流入口区右侧的辐散区,高层辐散均加强(高层散 度差值均为负),但变性后 IET 对应的高空辐散比 WET 增强更加明显 ($|-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}| > |-1 \times$ 10^{-5} s⁻¹),且 IET 低层中心附近散度差的极值 中心达 4×10⁻⁵ s⁻¹, 低层辐合明显增强 (图 3a), 而 WET 中低层辐合辐散变化不大 (图 3b)。图 4 则给出了两类 TC 变性前后垂直速度之差 (Te-12 时减去 Te+12 时) 纬向垂直剖面。变性后, IET 近中心附近的上升运动明显加强,中低层垂直速度 差的极值中心达 0.6 Pa/s (图 4a); WET 近中心附 近上升运动增强并不明显(图 4b)。

IET (WET) 对应着较深(浅)的高空槽以及 较强(弱)的高空急流。IET 变性后再加强,相应



图 1 (a) 变性加强和 (b) 变性减弱的 TC 登陆后的路径以及变性阶段完成时的地理位置(黑点)

Fig. 1 The paths of (a) intensifying and (b) weakening tropical cyclones during the extratropical transition (IET and WET) after landfall and the locations at the end of transition stage (black dots)



图 2 (a-c) IET 和 (d-f) WET 的 300 hPa 位势高度 (实线,单位:gpm)、辐散 (虚线, ≥1×10⁻⁵ s⁻¹) 以及高空急流 (阴影, ≥30 m/s): (a, d) Te-12; (b, e) Te; (c, f) Te+12。TC 标志为 TC 中心 (向北、向东为正,向西、向南为负); 横、纵坐标的单位为 1.25°经、 纬度 (下同)

Fig. 2 The geopotential height (solid line, units: gpm), divergence (dashed line, $\ge 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and high-level jet (shading, $\ge 30 \text{ m/s}$) of (a - c) IET and (d - f)) WET at 300 hPa: (a, d) Te-12; (b, e) Te; (c, f) Te+12. The coordinate origin is the centre of TC (northward and eastward are positive, westward and southward are negative) and the horizontal resolution is 1.25° (longitude) $\times 1.25^{\circ}$ (latitude) (the same below)

的其低层辐合以及上升运动明显加强;WET 变性 后则不再发展,其低层辐合辐散和上升运动无明显 变化。这表明 TC 变性后的强度变化与相应的高空 槽的强弱有很好的对应关系。

3 数值模拟

上文的分析表明,登陆我国 TC 变性后的强度

变化与其对应的高层环境场(高空槽、高空急流) 密切相关,而高空槽的强度往往决定了槽前急流的 强度。基于此,下文选取了2004年登陆我国变性 TC"Haima"为研究对象,通过中尺度模式WRF 模拟再现了其登陆后变性的演变过程,并采用片段 位涡反演的方法改变了模式初始高空槽的强度,设 计了高空槽加强和减弱的两组敏感性试验来探求高



图 3 (a) IET 和 (b) WET 变性前后的散度差纬向垂直剖面 (单位: 10⁻⁵ s⁻¹)。横坐标 0 点表示 TC 中心位置 Fig. 3 The zonal cross sections of the divergence (units: 10⁻⁵ s⁻¹) differences of (a) IET and (b) WET between Te-12 and Te+12



图 4 同图 3, 但为垂直速度差(单位: Pa/s) Fig. 4 The same as Fig. 3, but for the vertical velocity differences (units: Pa/s)

空槽强度变化对 Haima 变性过程的影响。

Haima 于 2004 年 9 月 13 日 04 时(协调世界 时,下同)左右在浙江温州沿岸登陆,登陆后先是 短暂的西北路径后转为偏北路径,并迅速地减弱为 热带低压。14 日 00 时 Haima 在江苏境内发生变 性,14 日 00~18 时 Haima 变性后继续加强,期间 与中纬度系统相互作用,造成浙江东北部、安徽东 北部、江苏北部、山东中部、天津、河北东北部等 地产生强降水天气。随后,Haima 变性加强过程结 束,并于 19 日在俄罗斯远东地区消亡(15 日 06 时 之后 Haima 的演变过程本文暂未研究)。相对于大 多数登陆我国的变性 TC(图 1),Haima 变性后并 未入海,且在陆地上没有充足水汽供应的条件下仍 能持续加强,同时降水强度也加强,移速也加大。 因此,选取 Haima 为例进行相关的数值试验。

3.1 模式与控制试验结果

采用 WRF3.2 中尺度模式 (Joseph, 2004),以 2004 年 9 月 13 日 12 时为初始时刻,对登陆后的 "Haima"变性加强过程进行了 42 小时的模拟。模 拟采用双重嵌套网格方案,水平范围以(35° N, 120°E)为中心,粗、细网格格距分别为 27 km、 9 km,格点数分别为 186×191、439×334,垂直方 向为 35 层。模拟区域的范围:粗网格(9.2° N~ 59.8°N, 79.2°E~160.8°E),细网格(19.3° N~ 49.1°N, 92.7°E~146.9°E)。粗细网格均采用了 Kain-Fritsch积云对流参数化方案、Lin微物理方 案、Yonsei University行星边界层参数化方案。模 式的初始猜测场和边界条件采用美国国家环境预报 中心(NCEP)分辨率为 1°×1°每 6 小时一次的输 出场。

从模拟的 Haima 路径(实心圆)与观测路径 (叉号)的对比(图 5a)可以看出:积分前 18 小时 模拟的 TC 路径比实际偏西,但走向基本一致,后 24 小时模拟路径与实况路径则非常接近。这次模 拟基本上把握了 Haima 登陆后的移动趋势。此外, 积分 12 小时(14 日 00 时) Haima 低压附近已无闭



图 5 (a、b) 观测 (Obs) 和控制试验以及 (c、d) 高空槽加强试验 (SEN1) 和减弱试验 (SEN2) 每 6 小时一次的 Haima (a、c) 路径和 (b、d) 海平面中心气压的变化

Fig. 5 (a, c) The paths and (b, d) the sea-level central pressure for Haima from (a, b) the observation and the control experiment (CTL), and (c, d) the enhanced trough experiment (SEN1) and the weakened trough experiment (SEN2) every six hours

合的 600~900 hPa 等厚度线 (图略),即它低层暖 心已消失, Haima 发生变性 (与实况类似)。这表 明模拟的变性时间与实况一致,但模拟的变性地点 偏西南。图 5b 为 6 小时一次 Haima 中心海平面气 压变化图。总的来说,模拟和实况气压变化还是基 本一致的,积分至 30 小时两者的再加强过程均结 束,只是模拟的气压比实况偏低。此次模拟可作为 控制试验 (CTL)。

3.2 高空槽加强和减弱试验的结果分析

通过片段位涡反演的方法(见附录),我们设 计了两组敏感性试验:高空槽加强试验(简称 SEN1试验),高空槽减弱试验(简称 SEN2 试验)。 两组敏感性试验模拟过程中的物理过程以及方案设 计均与控制试验相同。图 6 分别为反演后得到的 300 hPa上增强的高空槽以及减弱的高空槽与初始 高空槽的对比图(高空槽的修改层次为 400~150 hPa,仅以 300 hPa为例)。

3.2.1 TC 路径和强度变化

图 5c 给出了 CTL、SEN1 和 SEN2 三组试验 中 TC 的移动路径,从图中可以看到三组试验中 TC 移动趋势均非常接近,但 SEN1 试验中(三角) TC 的移动速度最快,其次是 CTL 试验(实心圆), SEN2 试验中(方块) TC 移速最慢。这可能是因为 初始高空槽加强后相应的高层引导风也增强,导致 SEN1 试验中 TC 的移速较快。

图 5d 为三组试验 TC 中心海平面最低气压的



图 6 2004 年 9 月 13 日 12 时 300 hPa 位势高度(单位: gpm): (a) 高空槽加强试验; (b) 高空槽减弱试验。实线:修改后的高空槽,虚线: 原始高空槽

Fig. 6 The geopotential height (units: gpm) at 300 hPa at 1200 UTC 13 Sep 2004: (a) The enhanced trough experiment; (b) the weakened trough experiment. Solid line: the modified trough; dashed line: the original trough

演变图,从图中可以看到,三组试验中 TC 均是在 积分 30 小时的变性加强过程结束,且 TC 积分前 12 小时的中心气压均非常接近。不同的是积分 12 小时后 SEN1 试验中 TC 中心气压降幅明显要更 大,其次是 CTL 试验,而 SEN2 试验中 TC 中心气 压降幅最小。这表明高空槽越强,越有利于 Haima 的再加强。

3.2.2 高层环境场

图 7 分别为 CTL、SEN1 和 SEN2 三组试验 300 hPa 高度场,高空急流以及散度场的分布。积 分至 12 小时 (2004 年 9 月 14 日 00 时), 三组试验 中 TC 西北侧均有高空槽活动, 槽前有近乎南北向 的高空急流区(风速≥30 m/s的阴影区)配合(图 7a-c)。SEN1 试验中, TC 所对应的高空槽最深, 其槽前高空急流强度也更强且范围也更大(图 7b)。随着 TC 的北上以及高空槽的东移, 积分至 24 小时, TC 已经移至高空急流入口区右侧的强辐 散区,其中心附近为6×10⁻⁵ s⁻¹强辐散(图7d)。 SEN1 试验中 TC 中心附近则对应 12×10⁻⁵ s⁻¹的 强辐散(图 7e),而 SEN2 试验中急流带范围相对 较小、强度较弱,TC中心附近对应的辐散仅为3× 10⁻⁵ s⁻¹(图 7f)。积分 12 小时至 30 小时, CTL 试 验中 TC 中心气压下降了 8 hPa; SEN1 试验中 TC 中心气压下降了 12 hPa; SEN2 试验中 TC 中心气 压下降了4 hPa (图 5d)。这就表明 Haima 与不同 强度的高空槽相互作用时,对应的高空辐散强度也 会变化,从而影响 Haima 的再加强。

3.2.3 TC 变性加强的位涡分析

在 p 坐标系中, 忽略 ω 的水平变化, 在绝热、

无摩擦条件下,位涡可表示为:

PV = $-g(\zeta + f) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial p} + \left(g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y}\right),$ 式中, g 为重力加速度, ζ 为绝对涡度, f 为科氏参数, θ 为位温, p 为气压, u 纬向风, v 经向风。PV 的第一项为正压项, 与大气稳定度有关; 第二项为 斜压项, 含有风速的垂直切变和位温的水平梯度。

图 8a-c分别为积分 24 小时的 CTL、SEN1 和 SEN2 试验 300 hPa 上的位涡分布。三组试验中 TC 西侧均有高空槽活动(图 7d-f),而高空槽均 对应着范围较广的正位涡区(图 8a-c)。SEN1 试 验中高空槽最深,其对应的高层正位涡区也最强, 中心极值达 10 PVU(图 8b); SEN2 试验中高空槽 最浅,高层正位涡区中心极值仅为 4 PVU(图 8c); 而 CTL 试验中高层正位涡区强度介于 SEN1 和 SEN2 试验之间(图 8a)。

为了进一步探讨 Haima 变性加强过程中高低 层位涡演变规律,图 8d-f分别给出了积分 24 小时 的 CTL、SEN1 和 SEN2 试验过 TC 中心位涡的纬 向垂直剖面。CTL 试验中,TC 中心上空 900~400 hPa 附近有一条呈管状的正位涡柱,其西侧对流层 上部的正位涡带则向下延伸至低层,在 700 hPa 附 近与 TC 上空的正位涡柱有小范围的连接(图 8d)。 SEN1 试验中,TC 对应的高空槽最深,对流层上部 较强的正位涡带向下伸展也更明显,并与低层 TC 上空的正位涡柱大范围联通(图 8e),相应的低层 气旋加强的幅度也较大。SEN2 试验中,高层的正 位涡区较弱,下传不明显(图 8f),低层气旋再加强 的幅度较小。

高空正位涡气块下传至低层将引起低层冷空气



图 7 (a-c) 积分 12 小时和 (d-f) 积分 24 小时的 300 hPa 位势高度 (短虚线,单位:gpm)、高空急流 (阴影和长虚线, ≥30 m/s) 和辐散场 (实线, ≥3×10⁻⁵ s⁻¹) 的分布: (a, d) CTL; (b, e) SEN1; (c, f) SEN2 Fig. 7 The distribution of geopotential height (short dashed line, units: gpm), high-level jet (shading and long dashed line, ≥30 m/s) and divergence (solid line, ≥3×10⁻⁵ s⁻¹) at 300 hPa after integrating (a-c) 12 hours and (d-f) 24 hours: (a, d) CTL; (b, e) SEN1; (c, f) SEN2

加强,斜压性增强,根据位涡守恒原理,气块必然 在垂直方向拉长,水平方向收缩,使其斜压性减 小,因此必有正涡度的增长,有利于低层气旋的发 展加强。对比图 8d 和 8e 可以发现,SEN1 试验中 TC 中心上空的正位涡柱要强于 CTL 试验中 TC 中 心上空的正位涡柱(2 PVU 的正位涡在 SEN1 试验 中可 伸 至 500 hPa,而在 CTL 试验中 仅 伸 至 800 hPa)。这表明高层较强的正位涡下传至低层, 在 TC 中心上空诱发出的正位涡带也相对较强。 3.2.4 TC 变性加强时的低层锋生

上文的分析表明,高层正位涡下传易诱发 TC 低层正位涡的增长,而低层较强的正位涡往往与强

的斜压锋区相联系。一些关于变性 TC 的研究(韩 桂荣等,2007;李英等,2008)也表明,TC 的变性 以及再加强与其环流内的锋生过程有关。为了进一 步了解三组试验中 TC 的变性加强与低层锋生的关 系,本文计算了低层的锋生函数。不考虑非绝热加 热的锋生函数计算公式(Hoskins and Bretherton, 1972)可表示为:

$$\begin{split} F &= -\frac{1}{|\nabla \theta_{sc}|} \cdot \\ & \left[\left(\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial x} \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] - \\ & \frac{1}{|\nabla \theta_{sc}|} \left(\frac{\partial \theta_{sc}}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p}, \end{split}$$



图 8 积分 24 小时的 (a-c) 300 hPa 位涡的分布和 (d-f) 过 TC 中心 (标注 "C"的经度) 位涡的纬向垂直剖面[单位: PVU (1 PVU= 10⁻⁶ K·m²·kg⁻¹·s⁻¹)]。其余同图 7

Fig. 8 (a, b, c) The potential vorticity at 300 hPa and (d, e, f) the zonal cross section of potential vorticity through the TC centre (marked by C) after integrating 24 hours (units: PVU, $1 \text{ PVU}=10^{-6} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (a, d) CTL; (b, e) SEN1; (c, f) SEN2

其中,θ_{**}表示假相当位温,ω表示 p 坐标系下的垂 直速度,p 表示气压。上式中右边第一部分表示空 气的水平运动对锋生作用,第二部分表示垂直运动 对锋生的作用。当锋生函数 F 大于零时,有利于锋 生。

图 9 为 850 hPa 的假相当位温场和锋生函数。 从图 9a、d、g 中可以看到,积分 12 小时,随着冷空 气侵入三组试验中 TC 西北侧环流,TC 中心与冷 空气之间的假相当位温梯度增加,产生锋生(阴影 区)。积分至 24 小时,TC 东侧暖气团与西侧冷气 团的强烈对比形成了一条近乎南北向的锋区,锋生 函数极值达 45×10⁻⁹ K·m⁻¹·s⁻²(图 9b); SEN1 试验中,TC 中心附近假相当位温线更密集,锋生 范围更广、锋生函数中心极值更大,表明其低层锋 区发展更强烈(图 9e); SEN2 试验在三组试验中低 层锋生范围最小、强度最弱(图 9h)。积分至 30 小 时,CTL(图 9c)和 SEN1(图 9f)试验中 TC 西侧 的冷空气向 TC 中心包裹,东侧暖气团则有伸向西 北的明显的暖舌,TC 中心处于假相当位温线的最 大曲率附近,这个过程类似于锋面气旋形成时低层 锋区的发展过程。SEN1试验中 TC 中心附近锋生 函数极值为 90×10^{-9} K·m⁻¹·s⁻²,仍然要高于 CTL 试验中的 60×10^{-9} K·m⁻¹·s⁻²,而 SEN2 试 验中锋区的发展明显不如 CTL 和 SEN1 试验(图 9i)。TC 环流内锋区强烈的发展会使得低层辐合增 强、正涡度增长,有利于低层气旋的加强。SEN1



图 9 (a-c) CTL、(d-f) SEN1 和 (g-i) SEN2 三组试验的 850 hPa 假相当位温 (实线,单位:K) 和锋生函数 (阴影, ≥5×10⁻⁹ K·m⁻¹·s⁻²) 的分布: (a、d、g) 积分 12 小时; (b、e、h) 积分 24 小时; (c、f、i) 积分 30 小时

Fig. 9 The distribution of pseudo equivalent potential temperature (solid line, units: K) and frontogenesis function (shading, $\geq 5 \times 10^{-9}$ K·m⁻¹·s⁻²) at 850 hPa in experiments (a-c) CTL, (d-f) SEN1, and (g-i) SEN2: (a, d, g) Integrating 12 hours; (b, e, h) integrating 24 hours; (c, f, i) integrating 30 hours

试验在三组试验中,TC变性加强阶段锋生最剧烈, 其低层气旋也最强。

4 小结

本文首先对登陆我国变性加强和变性减弱的两 类热带气旋进行了合成对比分析,发现热带气旋变 性后的强度变化与相应的西风带高空槽的强弱有很 好的对应关系。然后,我们选取了 2004 年登陆我 国的热带气旋 Haima 为研究对象,通过中尺度模 式 WRF 模拟再现了其登陆后变性演变过程,采用 片段位涡反演方法改变了模式初始高空槽的强度, 研究了高空槽强度的变化对 Haima 变性过程的影 响。得到了以下结论:

(1) WRF 中尺度模式能较好地模拟再现 Haima 变性加强过程中的强度演变以及移动路径。高 空槽强度的改变直接影响到 Haima 的移动路径以 及强度变化,具体表现为:高空槽加强(减弱)后, Haima 移速明显加快(减慢),此外深(浅)槽对应 的 TC 变性加强过程中心气压降幅更大(小)。

(2)不同强度的高空槽与TC相互作用的过程 中,深槽对应的高空急流范围较大、强度更强,相 应的高空强辐散有利于TC明显的再发展;浅槽对 应的高空辐散相对较弱,TC加强的幅度偏小。

(3) TC 变性加强过程中接近高空槽时,高空 槽所对应的高层正位涡下传至低层易诱发 TC 低层 正位涡的增长,从而导致低层 TC 环流内斜压锋区 的发展、低层辐合增强以及正涡度的增长,有利于 低层气旋的发展。深槽对应着较强的高层正位涡 带,正位涡向下伸展诱发低层 TC 正位涡明显增 长,从而导致低层锋区的强烈发展和低层气旋的明 显加强。

附录:片段位涡反演改变高空槽强度

(I) 片段位涡反演原理。本文采用了 Davis and Emanuel (1991) 所提出的片段位涡反演方法改变 高空槽的强度。方程 (A1) 和 (A2) 分别为球坐标

下的非线性平衡方程和 Etrel 位涡方程。

$$\nabla^{2}\phi = \nabla \cdot (f \nabla \Psi) + \frac{2}{a^{4} \cos^{2}\varphi} \frac{\partial (\partial \Psi/\partial \lambda, \partial \Psi/\partial \varphi)}{\partial (\lambda, \varphi)},$$
(A1)

$$q = \frac{g\kappa\pi}{p} \Big[(f + \nabla^2 \Psi) \frac{\partial^2 \phi}{\partial \pi^2} - \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \lambda \partial \pi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \lambda \partial \pi} - \frac{1}{a^2 \varphi^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi \partial \pi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi \partial \pi} \Big], \tag{A2}$$

其中, ϕ 为重力位势, Ψ 为无辐散流函数, λ 为经 度, φ 是纬度, a 是地球半径, $\kappa = R_d/c_p$, $\pi =$ $c_n(p/p_0)^*$ 是垂直坐标 Exner 函数。

Etrel 位涡可分解为平均场与扰动场: $q=\bar{q}+$ q'。同理, $\Psi = \Psi + \Psi'$, $\phi = \overline{\phi} + \phi'$ 。

假定 $q' = \sum_{n=1}^{N} q_n$,其中 q'为总位涡扰动, q_n 则 为某一特定动力学过程相对应的位涡扰动,同样 地, $\Psi' = \sum_{n=1}^{N} \Psi_n$, $\phi' = \sum_{n=1}^{N} \phi_n$ 。引入关系式 $\begin{bmatrix} \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} - \end{bmatrix} + 1/2 \sum_{n=1}^{N} \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix}_n, \quad (A3)$

(A1)和(A2)经变换得:

$$\nabla^{2} \phi_{n} = \nabla \cdot (f \nabla \Psi_{n}) + \frac{2}{a^{4} \cos^{2} \varphi} \times \left(\frac{\partial^{2} \Psi^{*}}{\partial \lambda^{2}} \frac{\partial^{2} \Psi_{n}}{\partial \varphi^{2}} + \frac{\partial^{2} \Psi^{*}}{\partial \varphi^{2}} \frac{\partial^{2} \Psi_{n}}{\partial \lambda^{2}} - 2 \frac{\partial^{2} \Psi^{*}}{\partial \lambda \partial \varphi} \frac{\partial^{2} \Psi_{n}}{\partial \lambda \partial \varphi} \right),$$
(A4)

$$q_{n} = \frac{g\kappa\pi}{p} \bigg[(f + \nabla^{2}\Psi^{*}) \frac{\partial^{2}\phi_{n}}{\partial\pi^{2}} + \frac{\partial^{2}\phi^{*}}{\partial\pi^{2}} \nabla^{2}\Psi_{n} - \frac{1}{a^{2}\cos^{2}\varphi} \bigg(\frac{\partial^{2}\Psi^{*}}{\partial\lambda\partial\pi} \frac{\partial^{2}\phi_{n}}{\partial\lambda\partial\pi} + \frac{\partial^{2}\phi^{*}}{\partial\lambda\partial\pi} \frac{\partial^{2}\Psi_{n}}{\partial\lambda\partial\pi} \bigg) - \frac{1}{a^{2}} \bigg(\frac{\partial^{2}\Psi^{*}}{\partial\varphi\partial\pi} \frac{\partial^{2}\phi_{n}}{\partial\varphi\partial\pi} + \frac{\partial^{2}\phi^{*}}{\partial\varphi\partial\pi} \frac{\partial^{2}\Psi_{n}}{\partial\varphi\partial\pi} \bigg) \bigg].$$
(A5)

详细的推导参阅 Davis and Emanuel (1991)。方程 (A4) 和 (A5) 组成的片段位涡方程组 (Ψ * 和 ϕ * 已知),若给定某一位涡扰动(q_n)与边界条件,则 可求出与该扰动相对应的重力位势(f,)与流函数 (Ψ_n)分布。

(II) 改变模式初始场中高空槽强度。本文中 初始高空槽强度的改变借鉴了季亮和费建芳 (2009)运用片段位涡反演修改副热带高压强度的 方法。①首先求出模拟区域内流函数和重力位势的 纬向平均场 ($\overline{\Psi}$, $\overline{\phi}$) 以及扰动场 (Ψ' , ϕ'), 利用关 系式 (A3) 求出Ψ*和 φ*。②保留初始时刻高空槽 范围内(30°N~50°N, 81°E~115°E)与其对应的 正位涡扰动 (q_n) , 实际的计算中选取 400~ 150 hPa 上高空槽所对应的正位涡扰动进行反演。 ③应用上节中片段位涡反演的方法求得与保留的正 位涡扰动相对应的空间三维分布的高度场和流函数 分布,再由流函数与无辐散风的关系 ($u=-\partial \Psi$ / $\partial_{y}, v = \partial \Psi / \partial_{x}$) 得到风场分布, 温度场可由 π 坐标 系下的静力平衡关系 $\theta = -\partial \Phi / \partial \pi$ 求得。④ 将求得 的风场和温度场与模式的初始场相加或相减,就得 到了增强或减弱高空槽的新初始场。

参考文献 (References)

- Bosart L F, Velden C S, Bracken W E, et al. 1998. Environmental influences on the rapid intensification of hurricane Opal (1995) over the Gulf of Mexico [J]. Mon. Wea. Rev., 128: 322-352.
- Davis C A, Emanuel K A. 1991. Potential vorticity diagnostics of cvclogenesis [J]. Mon. Wea. Rev., 119, 1929-1953.
- Evans J L, Prater-Mayes B E. 2004. Factors affecting the posttransition intensification of hurricane Irene (1999) [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 1355-1368.
- 韩桂荣, 唐晓文, 魏建苏. 2007. 登陆台风变性发展与消亡的对比 分析 [J]. 气象科学, 27 (1): 35-41. Han Guirong, Tang Xiaowen, Wei Jiansu. 2007. The extratropical transition analyses on two landfall typhoons [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (1): 35-41.
- Harr P A, Elsberry R L. 2000. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process [J]. Mon. Wea. Rev., 128: 2613-2633.
- Harr P A, Elsberry R L, Hogan T F. 2000. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part II : The impact of midlatitude circulation characteristics [J]. Mon. Wea. Rev., 128: 2634-2653.
- Hoskins B J, Bretherton F P. 1972. Atmospheric frontogenesis models: Mathematical formulation and solution [J]. J. Atmos. Sci., 29: 11-37.
- 季亮,费建芳. 2009. 副热带高压对登陆台风等熵面位涡演变影响 的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1297-1308. Ji Liang, Fei Jianfang. 2009. Numerical simulation of the effect of subtropical anticyclone on the evolvement of potential vorticity of landfall Typhoon on isentropic surface [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1297-1308.
- Joseph B K. 2004. Weather research and forecasting model: A technical overview [C]. 84th AMS Annual Meeting, 10-15.
- Klein P M, Harr P A, Elsberry R L. 2000. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: An overview and conceptual model of the transformation stage [J]. Wea. Forecasting, $15 \cdot 373 - 395.$
- Klein P M, Harr P A, Elsberry R L. 2002. Extratropical transition

of western North Pacific tropical cyclones: Midlatitude and tropical cyclone contributions to reintensification [J]. Mon. Wea. Rev., 130: 2240 – 2259.

- 李英,陈联寿,雷小途. 2005. Winnie (1997)和 Bilis (2000)变性 过程的湿位涡分析 [J]. 热带气象学报,21 (2):142-152. Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2005. Moisture potential vorticity analysis on the extratropical transition processes of Winnie (1997) and Bilis (2000) [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (2): 142-152.
- 李英,陈联寿,雷小途. 2008. 变性台风 Winnie (9711) 环流中的锋 生现象 [J]. 大气科学, 32 (3): 629-639. Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2008. Frontogenesis in the circulation of typhoon Winnie (1997) during its extratropical transition process [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 629-639.
- 李英,陈联寿,王继志.2004.登陆热带气旋长久维持与迅速消亡 的大尺度环流特征 [J]. 气象学报,62(2):167-179. Li Ying,

Chen Lianshou, Wang Jizhi. 2004. The diagnostic analysis on the characteristics of large scale circulation corresponding to the sustaining and decaying of tropical cyclone after its landfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (2): 167–179.

- Onogi K, Tsutsni J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85: 369-432.
- 宋金杰,王元. 2010. 西北太平洋变性热带气旋的若干特征 [J]. 南 京大学学报(自然科学版),46(3):328-336. Song Jinjie, Wang Yuan. 2010. Some characteristics on extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese),46 (3):328-336.
- 朱佩君,郑永光,陶祖钰. 2003. 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,19 (2):157-162. Zhu Peijun, Zheng Yongguang, Tao Zuyu. 2003. Analysis of the extratropical transition of tropical cyclone over mainland of China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (2):157-162.