

应俊, 陈光华, 黄荣辉, 等. 2013. 西北太平洋热带气旋变性阶段强度变化的比较研究 [J]. 大气科学, 37 (4): 773–785, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12117. Ying Jun, Chen Guanghua, Huang Ronghui, et al. 2013. Comparison of intensity changes of western North Pacific tropical cyclones during extratropical transition [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 773–785.

西北太平洋热带气旋变性阶段强度变化的比较研究

应俊^{1,2} 陈光华² 黄荣辉² 曹杰¹

¹ 云南大学大气科学系, 昆明 650091

² 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

摘 要 选取西北太平洋上两个生命史中发生变性的热带气旋 Yagi 和 Francisco, 前者变性后有一个 24 小时的再增强过程, 而后者则继续减弱直至消亡。利用日本气象厅提供的热带气旋资料和美国环境预报中心 (NCEP) 提供的 FNL 全球分析资料, 对比分析两个 TC 在变性阶段的形势场, 发现两者在高低层的环境场均具有明显的差异: Yagi 在变性阶段其高空槽较强且在低层有一个与中纬度原先存在的温带气旋合并的过程; 而 Francisco 在变性阶段其高空槽较弱, 且变性后自行消亡。另外探讨了导致 Yagi 变性增强的原因, 结果表明: (1) Yagi 变性阶段与高空槽前的急流相互作用时, 高空急流入口区左侧和出口区右侧的次级环流将产生高空辐散低空辐合的趋势, 有利于低层 TC 低压的发展。同时, 当 Yagi 在穿越急流的过程当中, 垂直风切变的增加将导致斜压不稳定增强, 低层锋区强烈发展, 锋区内的斜压能量可能向 TC 动能转化, 从而使得 Yagi 发展增强; (2) 高空槽所对应的高层湿位涡下传可使得低层正涡度增长, 从而在低层诱生出气旋性环流, 有利于 Yagi 变性后重新发展; (3) Yagi 与中纬度原先存在的温带气旋发生合并, 温带气旋所带来的较高纬度冷空气的入侵增强了低层的水平温度梯度, 使得低层锋区强烈发展, 从 Yagi 以一个锋面气旋的形式而再度发展, 促使其变性后进一步增强。而这些特征都是 Francisco 所不具备的。

关键词 热带气旋 变性 高空槽 急流 湿位涡

文章编号 1006-9895(2013)04-0773-13

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12117

Comparison of Intensity Changes of Western North Pacific Tropical Cyclones during Extratropical Transition

YING Jun^{1,2}, CHEN Guanghua², HUANG Ronghui², and CAO Jie¹

¹ Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650091

² Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Two tropical cyclones over the western North Pacific that experienced an extratropical transition (ET), Yagi and Francisco, are examined in this study. The former underwent a 24-h reintensification process after the ET, whereas the latter continued to weaken until dissipation. On the basis of tropical cyclone data from the Japan Meteorological Agency and Final Operational Global Analysis data from the National Centers for Environmental Prediction, a comparison of the upper- and lower-level environmental fields during the ET revealed clear differences. A strong upper-level trough existed during the ET for Yagi; moreover, Yagi merged with a preexisting extratropical cyclone at the lower level during the ET.

收稿日期 2012-07-30, 2012-12-21 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421505

作者简介 应俊, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事热带气旋变性方面的研究。E-mail: handsomeyingjun@qq.com

In contrast, the upper-level trough related to Francisco was weak during the ET, and Francisco dissipated after the ET. In addition, the reintensification of Yagi could be attributed to the following causes: (1) Yagi interacted with the upper-level jet stream ahead of the trough during the ET stage and was influenced by the upper-level divergence and lower-level convergence tendency caused by the jet stream, which was favorable for reintensification after the ET. Furthermore, the vertical wind shear increased when Yagi was crossing the jet stream, which can lead to baroclinic instability and the development of a lower-level frontal zone. The baroclinic energy in the frontal zone may have been converted into kinetic energy through this process and contributed to the reintensification of Yagi. (2) The downward extension of the moist potential vorticity related to the upper-level trough could have increased the positive vorticity in the lower level and induced cyclonic circulation, which strengthened Yagi after the ET. (3) The merging of Yagi with a preexisting extratropical cyclone brought cold air from high latitudes, which can enhance the horizontal temperature gradient and cause intense development of the lower-level frontal zone. Thus, Yagi evolved into a frontal cyclone and reintensified after the ET. In contrast, these patterns mentioned above did not exist for Francisco.

Keywords Tropical cyclone, Extratropical transition, Upper-level trough, Jet stream, Moist potential vorticity

1 引言

热带气旋(以下简称 TC)在向极移动到中纬度地区时,由于斜压系统和 TC 相互作用的复杂过程,TC 相对对称的暖心结构往往被破坏而呈现出类似于温带气旋的非对称斜压结构。李英等(2006)认为这种旧的 TC 消亡与新的温带气旋在一定环境下的发展过程即是所谓的 TC 变性。从卫星云图上看,TC 变性是以深对流的减弱,TC 高层云消失,低层环流中心的显现以及逗点状云或者锋面结构的出现为特征(Chen, 2011)。虽然这些变性的 TC 没有像台风一样有强烈的内核风场,但其大范围风场和降水的非对称分布仍然对预报产生了较大的挑战,因此 TC 变性一直是业务预报和数值模拟的难点,而由于该过程的复杂性,目前对 TC 变性还没有一个具有普适性的定义,并且对 TC 的变性过程及其后发展阶段的研究也仍处于探索阶段。Sekioka et al. (1956) 和 Matano et al. (1971a, 1971b) 首次将西北太平洋变性 TC 分成两种类型,即一个相对较强的 TC 移入较弱的斜压环境场而变性的复合型和一个相对较弱的 TC 靠近一个中纬度已经存在的温带气旋并最终与之发生合并的混合型。两种类型在变性过程中均有中纬度锋面系统对 TC 的作用。Klein et al. (2000) 将西北太平洋 TC 变性过程分为两个阶段,即先是逐渐发展成为斜压风暴的转换(transformation)阶段,以及其后作为温带气旋的再发展(reintensification)阶段。Harr et al. (2000a, 2000b) 分析了台风 David (1997) 和台风 Opal (1997) 变性阶段环境场的锋生过程和热力、动力特征,表明中纬度环流型对 TC 变性再发展阶段起

关键作用。Klein et al. (2002) 进而通过数值模拟将中纬度环流和 TC 残余系统对 TC 变性后再发展的作用分开讨论,发现 TC 变性再增强过程是由中纬度环流中的中高层动力过程、残余 TC 低层中的热力过程和外流层特征等共同控制。朱佩君等(2003)对台风 Winnie (9711) 的变性加强过程进行了分析,结果表明,低层的暖平流、高空的散度及涡度平流是导致气旋重新发展的重要物理因子。李英等(2005)则从湿位涡的角度对比分析了变性后加强的台风 Winnie (9711) 和变性后减弱的台风 Bilis (0010),发现 Winnie 变性再加强表现为一个温带气旋在锋面上发展的过程,并主要与高层正位涡扰动下传、残余的 TC 低压环流及低层锋面系统三者之间的相互作用有关。Evans et al. (2004) 运用中尺度模式 MM5 模拟飓风 Irene (1999) 变性及其后再发展阶段与环境场的相互作用,并利用准地转 ω 方程和位涡进行诊断,结果表明高空槽及槽前的急流是导致 Irene 变性后再发展的原因。目前,系统性反映高低层环境场各种影响因子和作用过程的工作还相对较少。因此,从动力与热力角度来综合考察 TC 变性过程中高空槽前的急流、高层散度、中低层冷暖平流,以及低层锋区和锋面气旋的发展过程,对了解 TC 中纬度变性再发展的机理尤为必要。

西北太平洋是 TC 发生变性较多的海域,且由于受到副热带高压外围引导气流的影响,TC 移动多以抛物路径为主。本文选取了西北太平洋上发生变性的 0614 号热带气旋 Yagi 和 0118 号热带气旋 Francisco,两者的轨迹均为抛物路径且整个生命史均存在于洋面上,这就避免了因登陆而造成的地面摩擦和因移动而造成的下垫面变换的影响,但前者

在变性后重新发展, 后者则继续减弱至消亡。本文对比分析两个 TC 的变性过程, 从大尺度斜压环境场的角度探讨 TC 变性再加强和变性减弱的原因。

2 资料简介

本文采用 NCEP 提供的一日 4 次, 水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向 26 层的 FNL (Final Operational Global Analysis) 全球分析资料, 该资料同化了多套观测资料和卫星反演资料。红外线影像资料由国际卫星云气候工程 (ISCCP) B1 提供。鉴于选取的两个 TC 均位于西北太平洋洋面上, 且变性时的位置距日本较近, 因此 TC 路径和强度资料取自日本气象厅 (JMA) 提供的每 6 小时一次的最佳路径分析资料, 包括 TC 中心位置和中心最低气压, 以及 TC 的编号、名称和发生变性的时刻。根据该套资料, 本文所选取的两个 TC 均发生变性过程, 其中 0614 号 TC Yagi 于 2006 年 9 月 25 日 06 时(协调世界时, 下同)完成变性, 0118 号 TC Francisco 于 2001 年 9 月 25 日 18 时完成变性。

3 结果分析

3.1 Yagi 和 Francisco 的基本特征

Yagi 于 2006 年 9 月 16 日 12 时以热带低压形式在西北太平洋洋面上生成, 受副高外围引导气流的影响, Yagi 的运动轨迹呈现出典型的抛物路径, 并且在其后的生命史中经历了热带风暴、强热带风暴及台风强度(图 1a, 见文后彩图), 按照 JMA 的定义, Yagi 于 9 月 25 日 06 时变性为温带气旋。在其变性后的 24 小时内, TC 中心最低气压持续降低, 至 9 月 26 日 06 时, 中心气压低至 968 hPa, 相当于台风强度。之后 TC 迅速减弱消亡。

Francisco 于 2001 年 9 月 18 日 00 时生成, 其后的运动轨迹以及变性前所经历的风暴强度均与 Yagi 类似(图 1b, 见文后彩图), JMA 定义 9 月 25 日 18 时为 Francisco 完成从热带气旋变性为温带气旋的时刻。与 Yagi 相比, Francisco 在变性后的 24 小时其中心最低气压仍保持升高的趋势, 强度持续减弱直至消亡。

鉴于本文所选取的两个 TC 强度变化的主要差别在于变性完成后的 24 小时内, 因此本文拟选取台风变性时刻至变性后 24 小时作为本文所研究的 TC 变性阶段。另外, 需要指出的是, Yagi 和 Francisco 均发生于 9 月份, 且在变性时刻及其后的 24 小时

两者的经纬度差别不大, 同时两个 TC 在移动过程中有比较一致的抛物路径, 因而在分析两者变性阶段的环境场时即可滤去季节和地域不同所造成的差别, 有利于比较研究。

3.2 Yagi 和 Francisco 变性阶段的环流背景

图 2 给出了 Yagi 和 Francisco 变性阶段 200 hPa 的形势场。可以看出, Yagi 在变性阶段有显著的高空槽活动, 高空槽的经向环流度大, 呈东北—西南向倾斜, 且槽前有狭长的高空西南风急流配合(阴影区)。变性时刻(图 2a), Yagi 位于槽前急流入口区左侧, 急流中心的最大风速达 76 m/s, 与急流相对应的辐散场呈纬向带状且强度较大, 散度中心强度最大值可达 $6.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 变性后 12 小时(图 2c), Yagi 移入急流区, 散度场有所减弱但仍能维持一定的强度, 急流中心最大风速继续增加至 80 m/s。至变性后 24 小时(图 2e), Yagi 穿过急流到达其北侧并与槽区发生耦合, 此时的高空辐散中心达到整个变性阶段的峰值, 为 $6.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 而急流相比前一时刻有所减弱, 但中心最大风速仍维持有 77 m/s。相比于 Yagi, Francisco 在变性阶段高空槽较浅, 经向环流较弱, 虽然在变性时刻(图 2b)其槽前有范围更广强度更大的高空急流, 但 Francisco 与急流相距甚远, 且随着高空槽的东移以及 TC 的东北向移动, 高空急流的强度和范围均开始减弱, 急流中心最大风速在变性后 12 小时减至 74 m/s, 到变性后 24 小时仅为 68 m/s。综观整个变性阶段可以看到, Francisco 始终处于急流的南侧而并未穿越急流, 也没有与槽区相耦合。另外也可以发现, 在 Francisco 的整个变性阶段, 其高层散度持续减弱, 从变性时刻(图 2b)辐散中心的 $6.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 一直降至变性后 24 小时(图 2f)的 $2.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。综上所述, TC 在变性阶段与高空槽的配置情况、与槽前急流是否发生相互作用以及急流所对应的散度区的变化对 TC 变性后的强度变化均有一定的影响。

图 3 描述了两个 TC 变性阶段的低层风场和温度平流以及中层垂直运动的情况。可以看到, Yagi 在变性时刻(图 3a), 低层的 925 hPa 风场存在两个气旋中心, 一个对应 TC 低压, 另一个位于 TC 低压的西北侧约 1000 km 处。从 500 hPa 的垂直运动上也可以看出两个上升运动中心, 其中 TC 中心附近的上升运动与低层 850 hPa 的暖平流对应较好; 另一上升区则位于 TC 西北侧气旋性环流上空偏东位置, 表明该处的地面气旋是具有一定斜压性

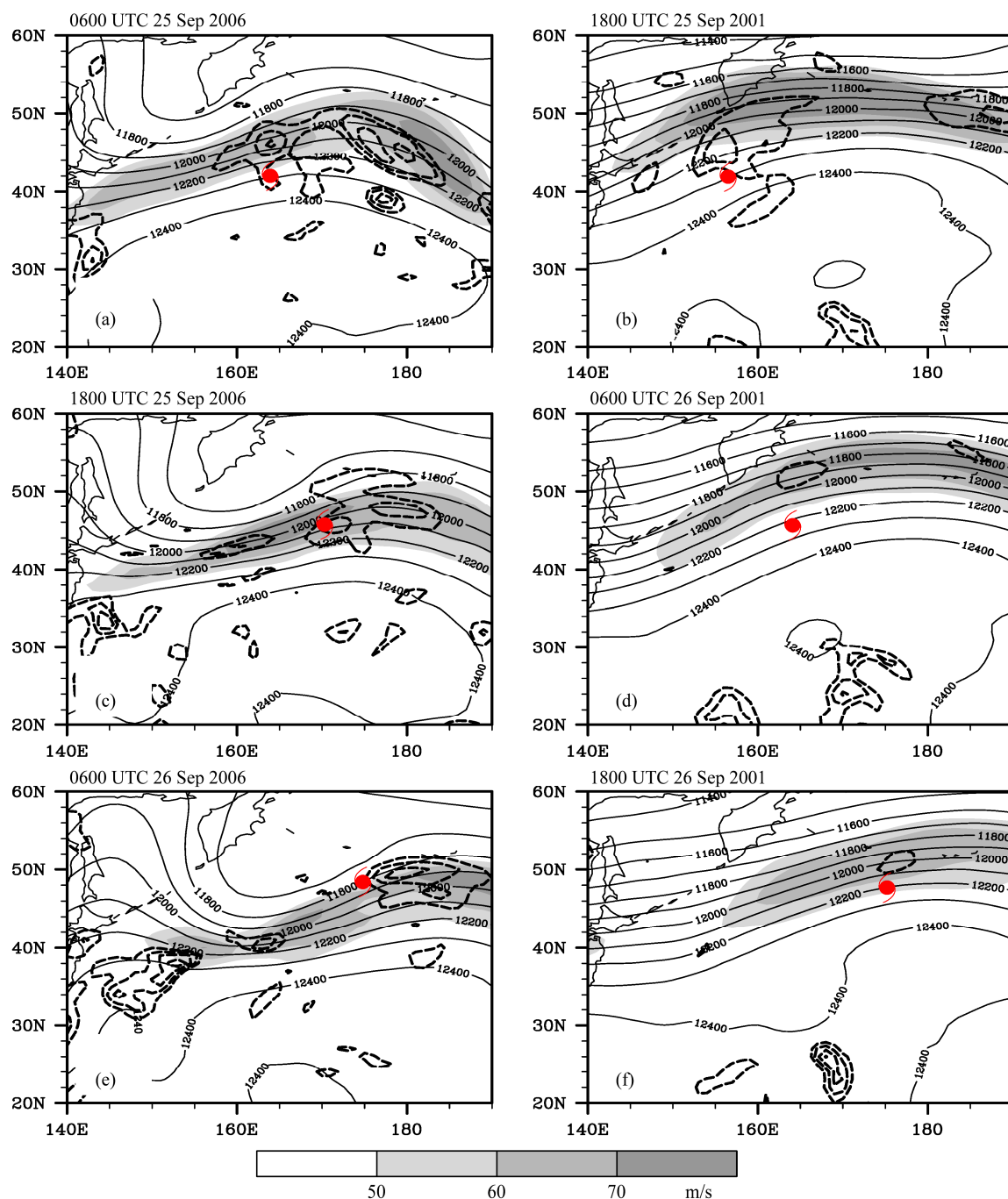


图2 Yagi (a, c, e) 和 Francisco (b, d, f) 200 hPa 位势高度场(实线, 单位: gpm), 散度场(虚线, 范围: $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 间隔: $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) 和急流(阴影区, 单位: m/s)。(a, b)、(c, d) 和 (e, f) 和分别表示变性时刻、变性后 12 小时及变性后 24 小时, 台风符号表示 TC 中心(下同)

Fig. 2 The 200-hPa geopotential height (solid contour, units: gpm), divergence (dashed contour, from $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ with interval $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), and jet stream (shaded, units: m/s) for (a, c, e) Yagi and (b, d, f) Francisco. (a, b), (c, d), and (e, f) represent transition time, 12 h after transition, and 24 h after transition, respectively. The typhoon symbols denote the TC centers (the same below)

质的温带气旋。从温带气旋环流外围带来的高纬度较冷的空气使得 TC 低压西侧的冷平流得到发展, 冷平流增强所造成的水平温度梯度加大容易导致该处的冷锋锋生。此时 Yagi 与该温带气旋在低层 925 hPa 的风场以及中层 500 hPa 的垂直运动场上已

经有一定的相连。变性后 12 小时(图 3c), 低层的风场和 500 hPa 垂直运动均从之前的两个中心演变成一个中心, 表明 Yagi 已与其西北侧的温带气旋发生合并。此时低层的环流和中层的垂直运动范围都有一定的扩大, 500 hPa 上升运动中心强度达

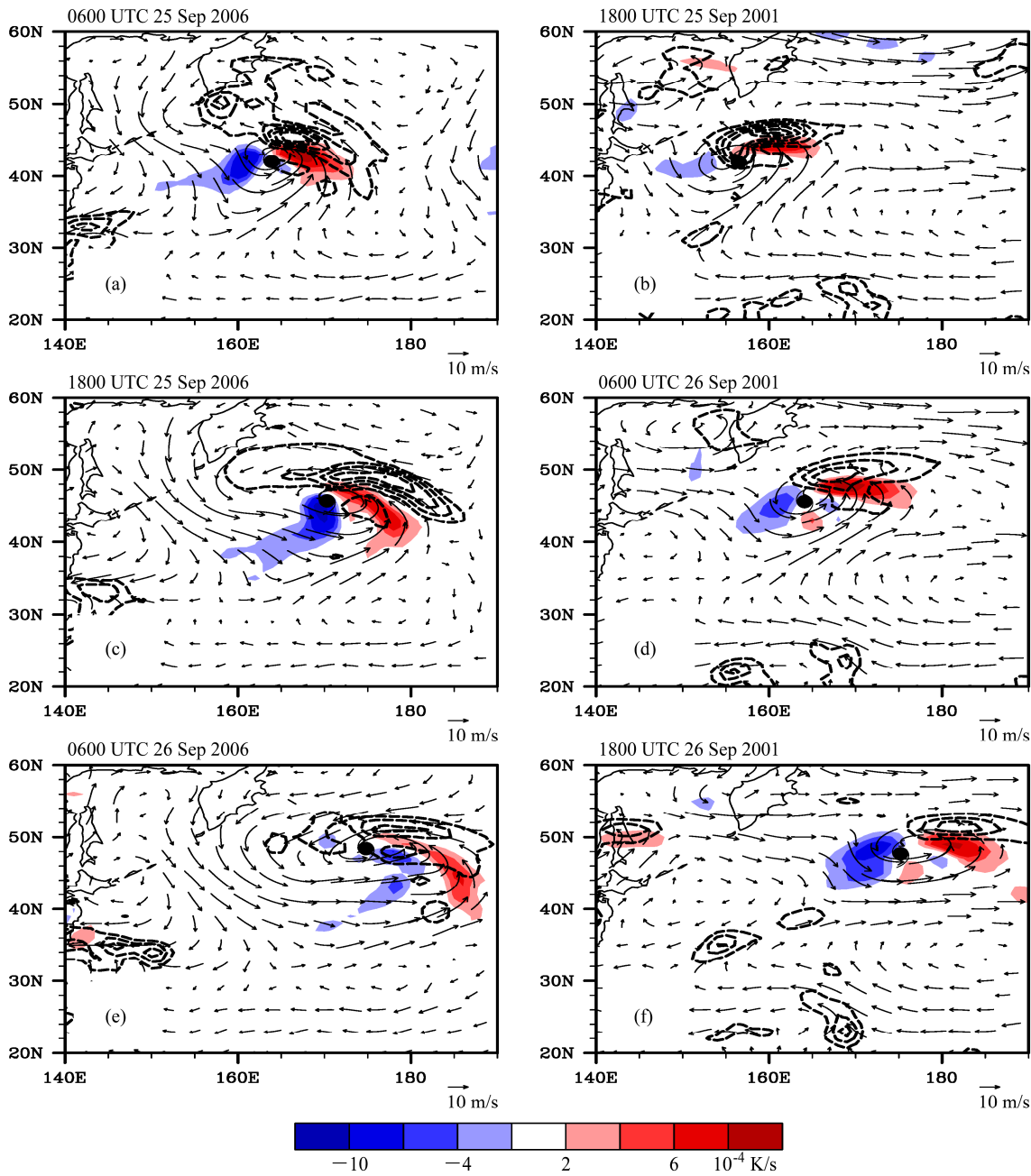


图3 Yagi (a, c, e) 和 Francisco (b, d, f) 925 hPa 风场 (单位: m/s), 500 hPa 垂直速度 (虚线, 等值线从 -0.2 Pa/s 到 -2.2 Pa/s, 间隔 0.4 Pa/s) 和 850 hPa 温度平流 (阴影区, 单位: 10^{-4} K/s)。 (a, b)、(c, d) 和 (e, f) 分别表示变性时刻、变性后 12 小时及变性后 24 小时

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for 925-hPa wind (vector, units: m/s), 500-hPa vertical velocity (dashed contour, from -0.2 Pa/s to -2.2 Pa/s with interval 0.4 Pa/s), and 850 hPa temperature advection (shaded, units: 10^{-4} K/s)

-1.8 Pa/s, 同时 850 hPa 冷暖平流也加强外扩, Yagi 的斜压性越来越强。至变性后 24 小时 (图 3e), Yagi 附近上空 500 hPa 垂直上升运动中心较之前有所减弱, 但仍维持有 -1.1 Pa/s, 同时低层的冷暖平流也相对减弱, 暖平流以暖舌的形式从东南侧伸向 Yagi。随后 Yagi 减弱消亡。

与 Yagi 相比, Francisco 在变性阶段其西北侧

同样存在温带气旋 (图 3b-f), 不同的是, 此温带气旋与 Francisco 距离较远, 在整个变性阶段并没有与 Francisco 发生合并。从 500 hPa 垂直运动上看, Francisco 西北侧的温带气旋上空的上升运动中心在变性时刻 (图 3b) 达 -0.4 Pa/s, 此后一直减弱, 上升运动范围也持续缩小, 变性后 24 小时 (图 3f) 上升运动中心已低至 -0.2 Pa/s, 此时低层

925 hPa 风场上已看不出明显的气旋性环流, 温带气旋自行消亡。因此, Francisco 在变性阶段其低层风场和 500 hPa 垂直上升运动范围相比于 Yagi 均较小, 850 hPa 上的冷暖平流也较弱。

卫星云图(图 4, 见文后彩图)上也表明, Yagi 在变性时刻(图 4a)其西北侧有一云簇靠近与 Yagi 相对应的云簇, 至变性后 12 小时(图 4c), 两个云簇相合并, 成为一个西北—东南走向的较大的云团。这个现象与 Yagi 在变性阶段跟其西北侧的温带气旋相合并的结论一致。而 Francisco 在变性阶段与其西北侧的云簇相互独立(图 4b, d), 这也与 Francisco 在变性阶段没有与其西北侧的温带气旋合并一致。且从变性时刻至变性后 12 小时, 与 Francisco 相对应的云簇越来越稀疏, 表明 Francisco 对流减弱, 强度减小。

综合分析两个 TC 变性阶段的环流演变特征来看, Yagi 在变性阶段由于其所处环境场的强斜压性, 且与中纬度原先存在的温带气旋靠近并最终合并成一个温带气旋, 这类似于 Matano et al. (1971a, 1971b) 提出的混合型(compound)变性; 而 Francisco 在变性阶段其环境场斜压性较弱, 且变性后自行消亡, 整个过程类似于 Sekioka et al. (1956) 提出的复合型(complex)变性。

3.3 高空槽对 TC 变性阶段强度变化的影响

较多的研究表明(Evans and Prater-Mayes, 2004; 李英等, 2006; 李侃和徐海明, 2012), 高空槽作为中纬度典型的斜压系统, 与变性 TC 相互作用时有利于其变性后重新发展, 且这种影响主要是通过动力过程来体现。以下分别从槽前的高空急流和高空的湿位涡两个方面展开进行分析。

3.3.1 高空急流

Cressman (1981) 在对西太平洋高空急流的研究中指出: 急流入口区的南侧和出口区的北侧容易产生高空辐散, 进而出现上升气流, 诱发地面辐合。Shi et al. (1990) 的数值模拟研究也表明: TC 高层强烈的急流可激发出一个次级环流, 并且在急流出口区的左侧(右侧)伴随有增强的上升(下沉)运动。对于变性的 TC 而言, 由于本身结构的斜压性质, 其与高空急流的相互作用显得更为复杂。从图 2 可以看出 Yagi 在变性阶段有一个从急流入口区南侧穿越到出口区北侧的过程, 而 Francisco 则没有此过程, 变性阶段只是一直沿急流南侧移动且相对于急流有一定距离。为了揭示两个不同过程中急流对

TC 变性阶段的影响机制, 我们计算了非线性平衡方程剩余项(Zhang et al., 2001):

$$\Delta N = 2J(u, v) + f\zeta - \nabla^2\Phi - \beta u, \quad (1)$$

其中, u , v , f , ζ 和 Φ 分别表示纬向风速、经向风速、科氏参数、相对涡度和位势高度, $\beta = \partial f / \partial y$ 。该剩余项(ΔN)是由 p 坐标系下的散度方程通过尺度分析并做一级近似而得到, 它在一定程度上能够表征某一区域水平散度的趋势, 正的 ΔN 值表示辐散趋势, 负的 ΔN 值表示辐合趋势。

图 5 给出了 Yagi 和 Francisco 变性时刻及变性后 12 小时外流层(200 hPa) ΔN 的分布情况。可以看出, Yagi 在变性时刻位于其西北侧约 500 km 处有一强辐散趋势区(图 5a), 该区域的大值中心位于高空槽前急流的北侧, 与槽的位置较为匹配, 此时 Yagi 处于急流入口区的南侧。至变性后 12 小时(图 5c), Yagi 进入急流内部并靠近辐散趋势区, 同时该区域中心的辐散趋势最大值从变性时刻的 $20 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 增加到 $24 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 。反观 Francisco, 在变性时刻(图 5b)位于其西北侧的辐散趋势区距离较远且中心强度也相对弱很多, 仅为 $12 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, 此时 Francisco 距离辐散趋势区尚有近 1000 km, 与急流也有近 500 km 的距离。变性后 12 小时(图 5d), Francisco 接近但仍未到达急流区, 其西北侧的辐散趋势区范围有所扩大, 但中心强度减至 $10 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 。

从以上的对比分析我们看到两个 TC 在变性阶段其高层呈现出不同的散度趋势强度, 同时 TC 与高层辐散趋势区的距离也有所不同, 这些不同的特征必然会在低层有所反应, 进而影响到 TC 变性阶段的发展。为进一步说明这种影响机理, 我们沿着 TC 移动路径在其前方做一个穿越急流的剖面(图 5 中粗虚线所示)。如图 6a 所示, 在 Yagi 下游(移动路径前方)中层至高层为一个东南—西北向倾斜的辐散趋势区, 低层受此辐散趋势的影响而相应地呈现为一个较强的辐合趋势区, 最大辐合趋势中心位于 850 hPa 至 700 hPa 之间。变性后 12 小时(图 6c), Yagi 移至急流区, 其下游中高层的辐散趋势范围进一步扩大, 中心强度也得到增强, 而低层仍然维持了一个辐合趋势区。这种由高空急流所产生的高层辐散低层辐合趋势的环境场有利于低层 TC 低压的发展增强。与之呈明显对比的是, 由于 Francisco 始终位于急流的南侧, 其下游的高低层散度趋势与 Yagi 恰恰相反(图 6b, d), 位于急流南侧的高层为一明显的辐合趋势区, 而在低层则始终为一辐散趋

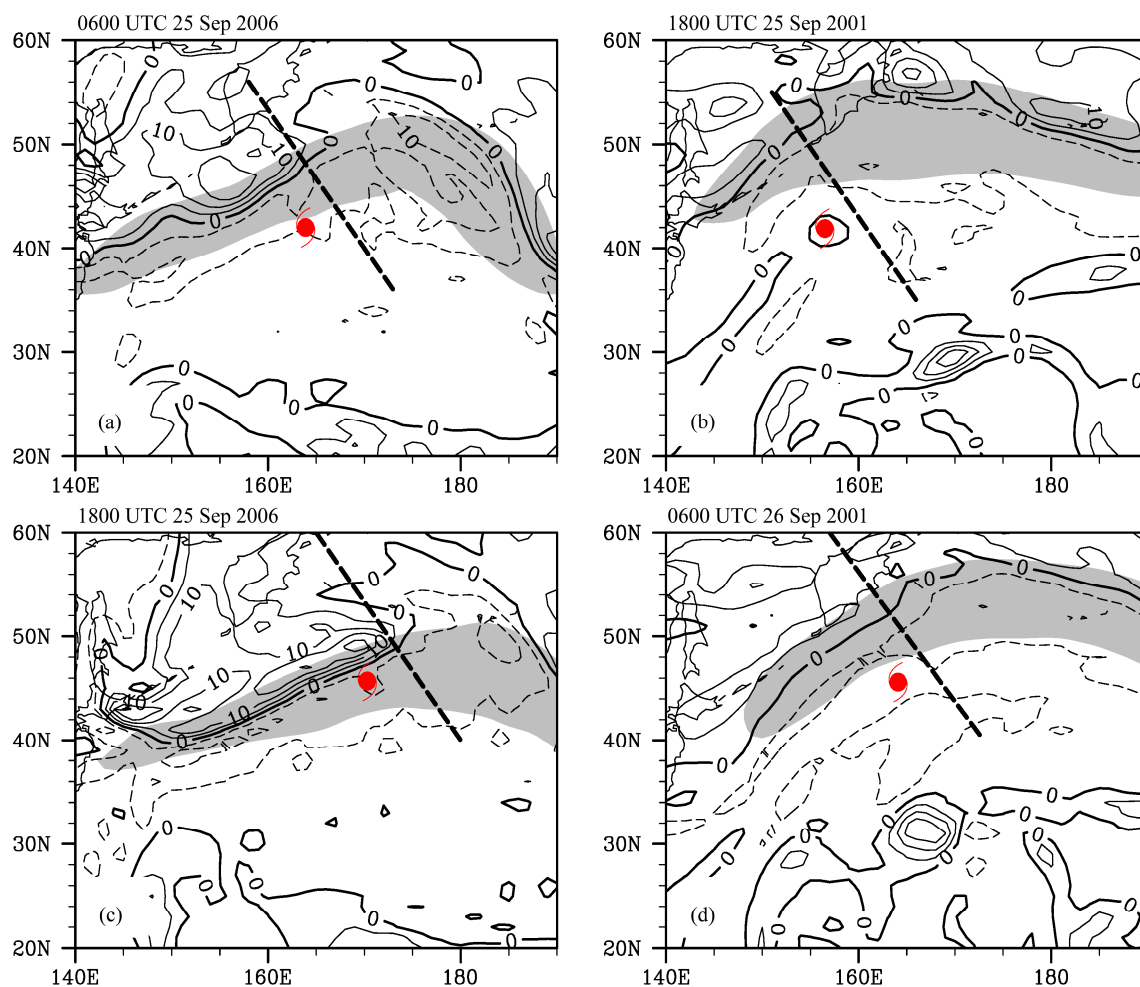


图5 Yagi (a, c) 和 Francisco (b, d) 200 hPa ΔN 值 (实线表示正值, 虚线表示负值, 等值线间隔为 $5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$), 阴影区表示风速 $\geq 50 \text{ m/s}$ 的急流区, (a, b)、(c, d) 分别表示变性时刻和变性后 12 小时。粗虚线为图 6 的剖面位置

Fig. 5 The 200-hPa ΔN distribution (contour, units: $5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$) for (a, c) Yagi and (b, d) Francisco. The regions with wind speed $\geq 50 \text{ m/s}$ are shaded. (a, b) and (c, d) represent transition time and 12 h after transition, respectively. The thick dashed line represents the cross section shown in Fig. 6

势区, 这种低层辐散高层辐合趋势的环境场使得移入的台风低压减弱消亡。

3.3.2 湿位涡分析

众所周知, 位涡是一个可以综合表征大气热力和动力状态的物理量。Hoskins et al. (1985) 揭示了对流层高层的位涡扰动下传并叠加于地面锋区上空可引发地面气旋发展。吴国雄等 (1995) 从严格的原始方程出发, 推导出湿位涡方程, 并证明了在绝热无摩擦的情况下, 饱和大气中的湿位涡是一个守恒量。Yagi 和 Francisco 的变性阶段均位于洋面上, 水汽充足, 因此本文从湿过程的角度, 利用湿位涡来综合考察两个 TC 在变性阶段由高空槽所引起的动力和热力过程的差异。

在 p 坐标系下, 忽略 ω 的水平变化, 绝热无摩擦的饱和湿位涡表达式可近似写为:

$$M = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right), \quad (2)$$

式中, g 为重力加速度, ζ 为相对涡度, f 为科氏参数, θ_e 为饱和湿空气的相当位温, u 和 v 分别为纬向和经向风。

从两个 TC 中高层 (500~300 hPa) 湿位涡分布的情况看 (图略), Yagi 在变性阶段位于其上空西侧的湿位涡大值区东移并最终与 TC 低压上下叠置。而 Francisco 在变性阶段则没有此过程, 高空的湿位涡大值区始终与 TC 低压存有一定距离。

为进一步揭示高层湿位涡对低层气旋强度的影响, 我们沿 TC 中心做了一个湿位涡和相当位温的纬向垂直剖面图。如图 7a, 变性时刻 Yagi 西侧上方高空槽所对应的湿位涡大值区位于 300 hPa 附近, 相当位温线在该处有一个明显的凸起, 表明高

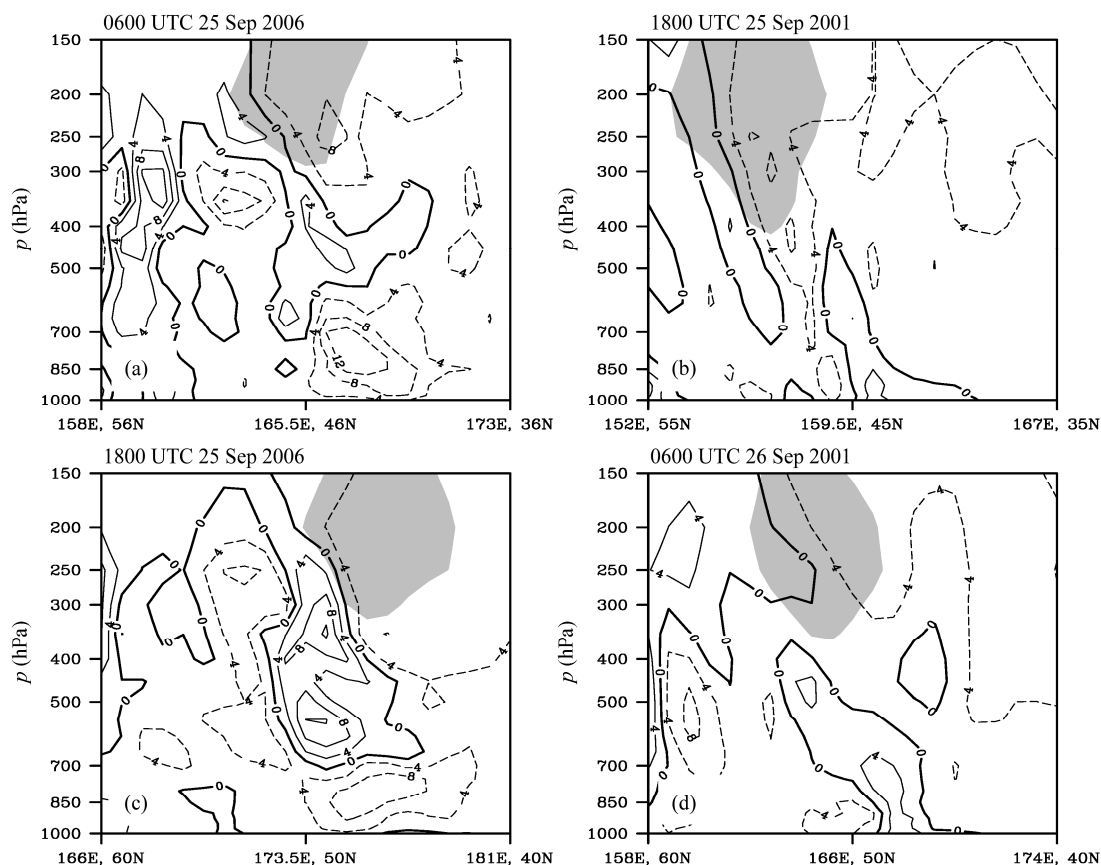


图6 Yagi (a, c) 和 Francisco (b, d) 沿图 5 中的粗虚线所画的 ΔN 剖面 (实线表示正值, 虚线表示负值, 等值线间隔为 $4 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$), 阴影区表示风速 $\geq 50 \text{ m/s}$ 的急流区, (a, b)、(c, d) 分别表示变性时刻和变性后 12 小时

Fig. 6 Cross section of ΔN (contour, units: $4 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$) along the thick dashed line in Fig. 5 for (a, c) Yagi and (b, d) Francisco. The regions with wind speed $\geq 50 \text{ m/s}$ are shaded. (a, b) and (c, d) represent transition time and 12 h after transition, respectively

空槽的强冷心结构。此时低层的相当位温线已经非常密集, 锋区发展强烈。变性后 12 小时 (图 7c), 高层湿位涡呈漏斗状下传至 500 hPa 附近, 同时靠近 Yagi 正上方, Yagi 上方的相当位温线近乎陡立, 而低层的锋区则继续维持。至变性后 24 小时 (图 7e), 高层湿位涡移动至 Yagi 正上方并下传到 500 hPa 以下, 低层的锋区发展有所减弱, 但条件不稳定得到发展 ($\partial \theta_e / \partial z < 0$), 有利于激发对流运动。与 Yagi 的情况相似, Francisco 在变性过程中 (图 7b-f) 也存在与高空冷槽相对应的湿位涡大值区, 但并无明显下传的过程, 而始终处于对流层高层。从位置上看, 高层的湿位涡始终处于 Francisco 的西侧而并没有叠加到其上空。同时低层的相当位温线也较为稀疏, 说明低层锋区发展不够强烈。

从湿位涡守恒的角度看, 高层的湿位涡下传可在低层诱生出气旋性环流 (李英等, 2005), 因而有利于低层变性气旋的重新发展。上述分析表明了 Yagi 和 Francisco 环境场高层湿位涡下传的差异,

在变性过程中 (尤其是变性后 12 小时及其后), Yagi 环境场高层的湿位涡下传可导致其变性后增强, 而 Francisco 则缺少这种增强的机制。

3.4 TC 变性阶段低层锋生的作用

李英等 (2008) 采用非地转湿 Q 矢量对登陆台风 Winnie 变性加强过程中的锋生现象进行了诊断分析, 结果表明, Winnie 变性加强过程中具有包围台风中心的环状锋生现象。李侃等 (2012) 最近的数值模拟研究表明, TC 变性过程中低层锋区的强烈发展是由高空槽所对应的正位涡下传诱发低层正位涡增长而引起。从上文的基本特征分析我们看到, Yagi 和 Francisco 在低层的显著差别是前者在变性阶段有一个与中纬度原先存在的温带气旋相合并的过程, 而后者没有。温带气旋西侧所带来的冷空气与 TC 环流东侧的暖湿气流相遇容易造成强烈的锋生过程, 因此两个 TC 在低层的锋区发展必然有明显的不同。为揭示两者的区别, 本文引用 Kitabatake (2008) 提出的定义在相当位温面上的矢

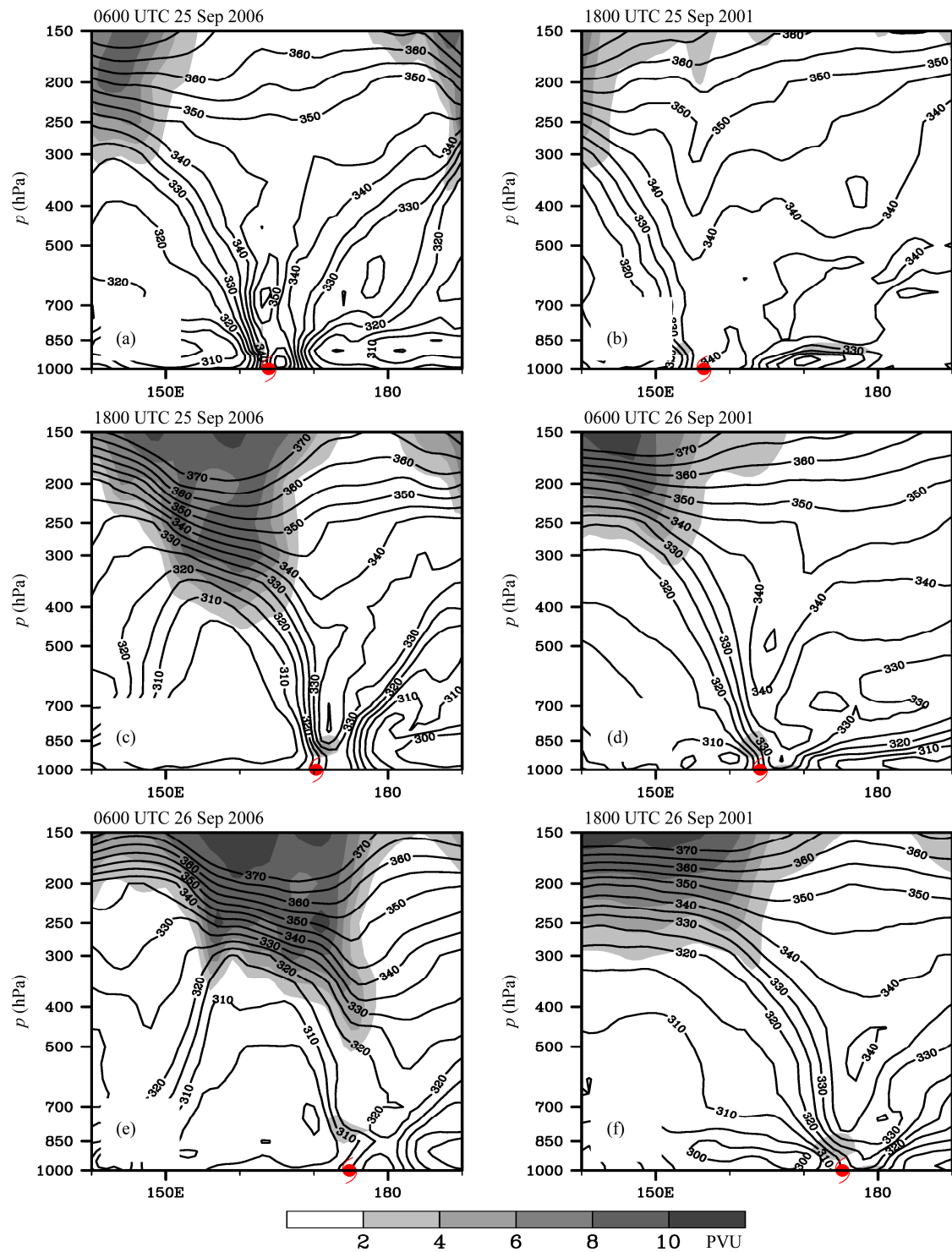


图7 Yagi (a, c, e) 和 Francisco (b, d, f) 过 TC 中心湿位涡 (阴影区, 单位: PVU, $1\text{PVU}=10^{-6}\text{K kg}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-1}$) 和相当位温 (等值线, 单位: K) 的纬向—垂直剖面。(a, b)、(c, d) 和 (e, f) 分别表示变性时刻、变性后 12 小时和变性后 24 小时

Fig. 7 Zonal-vertical cross section of M (shaded, units: PVU, $1\text{PVU}=10^{-6}\text{K kg}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-1}$) and equivalent potential temperature (contour, units: K) for (a, c, e) Yagi and (b, d, f) Francisco. (a, b), (c, d) and (e, f) represent transition time, 12 h after transition, and 24 h after transition, respectively

量锋生函数:

$$F = \frac{d}{dt} \nabla_p \theta_e, \quad (3)$$

其中:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}, \quad (4)$$

$$\nabla_p = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y}. \quad (5)$$

将 (2) 式在自然坐标系下展开:

$$F = F_n \mathbf{n} + F_s \mathbf{s}, \quad (6)$$

其中:

$$\mathbf{n} = -|\nabla_p \theta_e|^{-1} \nabla_p \theta_e, \quad (7)$$

$$\mathbf{s} = \mathbf{n} \times \mathbf{k}. \quad (8)$$

则 (6) 式中沿自然坐标各个方向的分量可写为如下形式:

$$F_n = \frac{1}{|\nabla_p \theta_e|} \left[\frac{\partial \theta_e}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \right], \quad (9)$$

$$F_s = \frac{1}{|\nabla_p \theta_e|} \left[\frac{\partial \theta_e}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) - \frac{\partial \theta_e}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \left(-\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \right], \quad (10)$$

其中 (9) 式即为传统意义上的锋生与锋消, $-F_n > 0$ 表示锋生, 相当位温线有变密集的趋势; $-F_n < 0$ 表示锋消, 相当位温线有变稀疏的趋势。(10) 式为旋转锋生, 旨在表明锋面的旋转方向, $F_s > 0$ 表示气旋式旋转锋生; $F_s < 0$ 表示反气旋式旋转锋生。

图 8 给出了 Yagi 和 Francisco 变性阶段 850 hPa 上 $-F_n$ 的分布。从 Yagi 的情况看, 位于其东西两侧均有一明显的相当位温线密集带, TC 低压刚好处于两个密集带的中间。从低层的环流和温度平流上可以看出 (图 3), 位于 Yagi 西侧的密集带是一冷锋性质的锋区, 这与原先存在的西北侧温带气旋靠近 Yagi 而带来北方冷空气的过程有关。而位于其东侧的密集带则是一暖锋性质的锋区。受 TC 环流暖湿空气的影响, Yagi 东侧的暖锋锋生剧烈 (图 8a), 同时, 暖锋处伴有强烈的气旋式旋转锋生 (图略)。随着变性过程的进行, Yagi 西侧的冷锋向东侧弯曲推进, 东侧的暖锋锋生进一步加强 (图 8c), 与之相伴随的气旋式旋转锋生则继续维持 (图略)。至变性后 24 小时, 暖锋锋生和气旋式旋转锋生均减弱, 且 Yagi 环流区域出现锋面锢囚的结构特征 (图 8e)。

从 Francisco 的情况看, 整个变性阶段位于其西侧的相当位温线比较稀疏, 说明此处没有冷锋性质的锋区。在 Francisco 东侧则由于 TC 环流中暖湿空气的存在而具有一定的暖锋锋生, 但强度相比于

Yagi 明显偏弱 (图 8b-f)。并且暖锋处的气旋式旋转锋生相对较小 (图略)。另外还可以看到, 在整个变性过程中 Francisco 东西两侧的相当位温线曲率较小, 近乎呈纬向带状, 表明 Francisco 附近的锋面稳定少变。

TC 环流内低层锋区的强烈发展使得变性气旋以锋面气旋的发展形式而重新加强。对比两个 TC 可以发现, Yagi 在变性阶段表现出明显的冷暖锋结构, 同时有明显的冷锋追上暖锋并最终使 Yagi 锢囚的典型锋面气旋发展过程。而 Francisco 只是在其环流内有一定程度的暖锋结构以及暖锋锋生, 并没有锋面气旋的发展过程。

4 小结与展望

本文对比分析了两个西北太平洋上的热带气旋 (Yagi 和 Francisco) 在变性阶段呈现出不同强度变化的过程, 发现两者在变性过程中高低层的环境场均存在显著差异: Yagi 在变性阶段其高空槽较强, 同时在低层有一个与中纬度原先存在的温带气旋合并的过程; 而 Francisco 在变性阶段其高空槽较弱, 且变性后自行消亡。另外着重探讨了可导致热带气旋变性后重新发展的几点机制, 得出如下主要结论:

(1) TC 变性阶段与高空槽前的急流相互作用时, 高空急流入口区左侧和出口区右侧的次级环流将产生高空辐散低空辐合的趋势, 有利于低层 TC 低压的发展。同时, 当 TC 在穿越急流的过程当中, 垂直风切变的增加将导致斜压不稳定增强, 低层锋区强烈发展, 锋区内的斜压能量可能向 TC 动能转化, 从而使得变性 TC 发展增强。

(2) TC 在变性阶段接近高空槽时, 高空槽所对应的高层湿位涡大值区下传可使得低层正涡度增长, 从而在 TC 低层诱生出气旋性环流, 有利于 TC 变性后重新发展。

(3) 变性 TC 与中纬度原先存在的温带气旋发生合并, 温带气旋所带来的较高纬度冷空气的入侵增强了低层的水平温度梯度, 使得低层锋区强烈发展, 从而变性 TC 以一个锋面气旋的形式而再度发展, 促使 TC 变性后进一步增强。

需要注意的是, 本文仅选取了西北太平洋上两个背景场较为一致的 TC 作为研究个例, 由于局限了研究区域而缺乏普适性。更多的个例以及更广泛的区域需要在今后继续研究。此外, 对于高空槽强

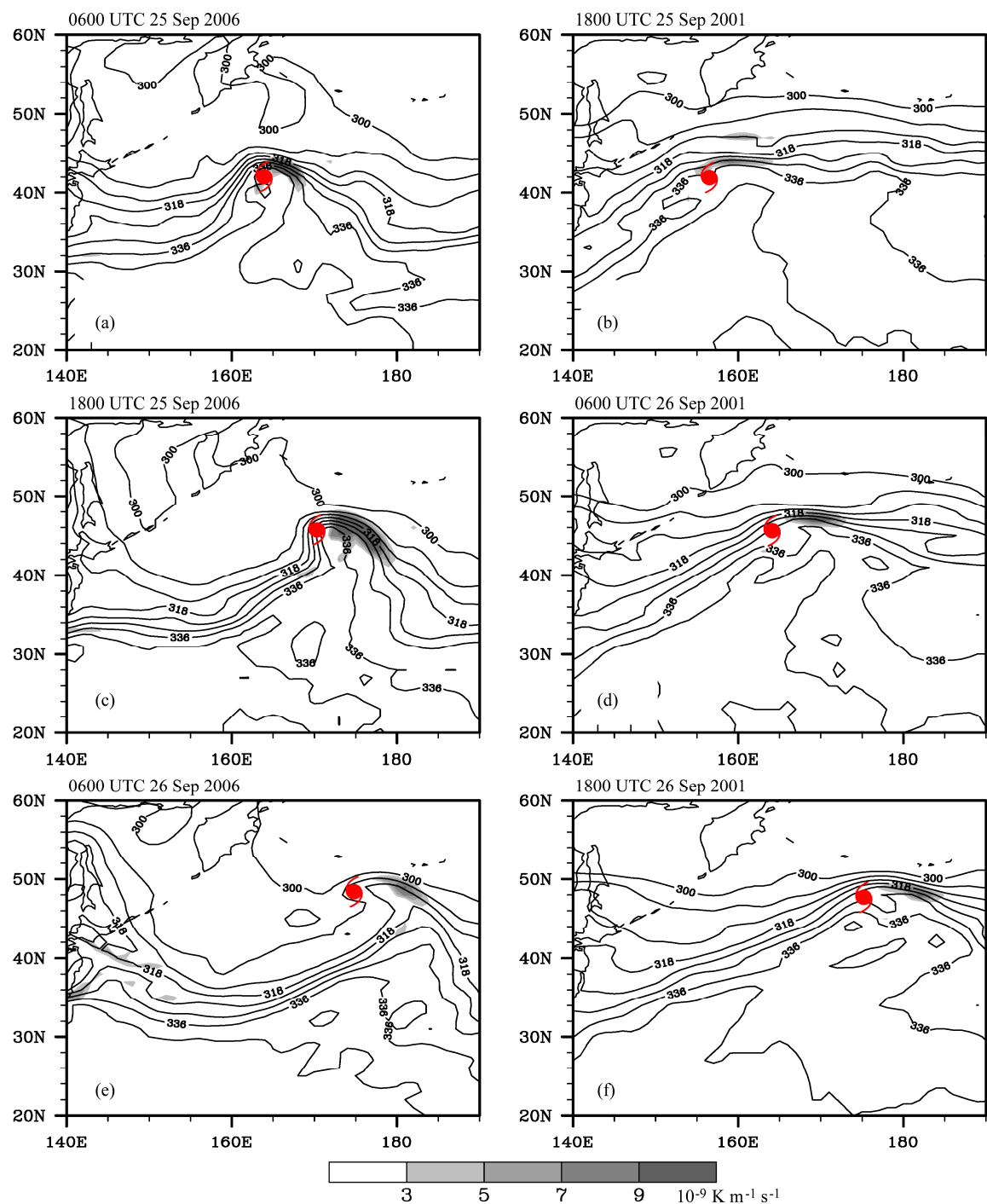


图 8 台风 Yagi (a, c, e) 和台风 Francisco (b, d, f) 850 hPa 相当位温 (等值线, 间隔为 6 K) 和 $-F_n$ (阴影区, 单位: $10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 分布情况。
(a, b), (c, d), (e, f) 分别表示变性时刻, 变性后 12 小时和变性后 24 小时
Fig. 8 The distribution of 850-hPa equivalent potential temperature (contour, units: K) and $-F_n$ (shaded, units: $10^{-9} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) for (a, c, e) Yagi and (b, d, f) Francisco. (a, b), (c, d) and (e, f) represent transition time, 12 h after transition and 24 h after transition, respectively

度和急流与变性 TC 的距离上也只停留在定性的层面。因此, 定量探讨高空槽的强度对 TC 变性后强度变化的影响和槽前急流与变性 TC 的相互作用, 将在进一步的数值模拟工作中展开。

参考文献 (References)

Chen G H. 2011. A comparison of precipitation distribution of two landfalling tropical cyclones during the extratropical transition [J]. Adv.

- Atmos. Sci., 28 (6): 1390–1404.
- Cressman G P. 1981. Circulation of the West Pacific jet stream [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 2450–2463.
- Evans J L, Prater-Mayes B E. 2004. Factors affecting the posttransition intensification of hurricane Irene (1999) [J]. Mon. Wea. Rev., 132 (6): 1355–1368.
- Harr P A, Elsberry R L. 2000a. 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 (8): 2613–2633.
- Harr P A, Elsberry R L. 2000b. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part II: The impact of midlatitude circulation characteristics [J]. Mon. Wea. Rev., 128 (8): 2634–2653.
- Hoskins B J, McIntyre M, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111: 877–946.
- Kitabatake N. 2008. Extratropical transition of tropical cyclones in the western North Pacific: Their frontal evolution [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (6): 2066–2090.
- 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: 373–396.
- 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. 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.
- 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 transitions 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. 2006. 高空槽对9711号台风变性加强影响的数值研究 [J]. 气象学报, 64 (5): 552–563. Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2006. Numerical study on impacts of upper-level westerly trough on the extratropical transition process of typhoon Winnie (1997) [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (5): 552–563.
- 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.
- Matano H, Sekioka M. 1971a. On the synoptic structure of Typhoon Cora, 1969, as the compound system of tropical and extratropical cyclones [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 49: 282–295.
- Matano H, Sekioka M. 1971b. Some aspects of the extratropical transformation of a tropical cyclone [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 49: 736–743.
- Sekioka M. 1956. A hypothesis on complex of tropical and extratropical cyclones for typhoon in the middle latitudes, Part I: Synoptic structure of Typhoon Marie passing over the Japan Sea [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 34: 276–287.
- Shi J J, Chang W S, Raman S. 1990. A numerical study of the outflow of tropical cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 47: 2042–2055.
- 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓箐, 等. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展 [J]. 气象学报, 53 (4): 387–405. Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaoqing, et al. 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 387–405.
- Zhang F Q, Koch S E, Davis C A, et al. 2001. Wavelet analysis and the governing dynamics of a large-amplitude mesoscale gravity-wave event along the East Coast of the United States [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 127: 2209–2245.
- 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.

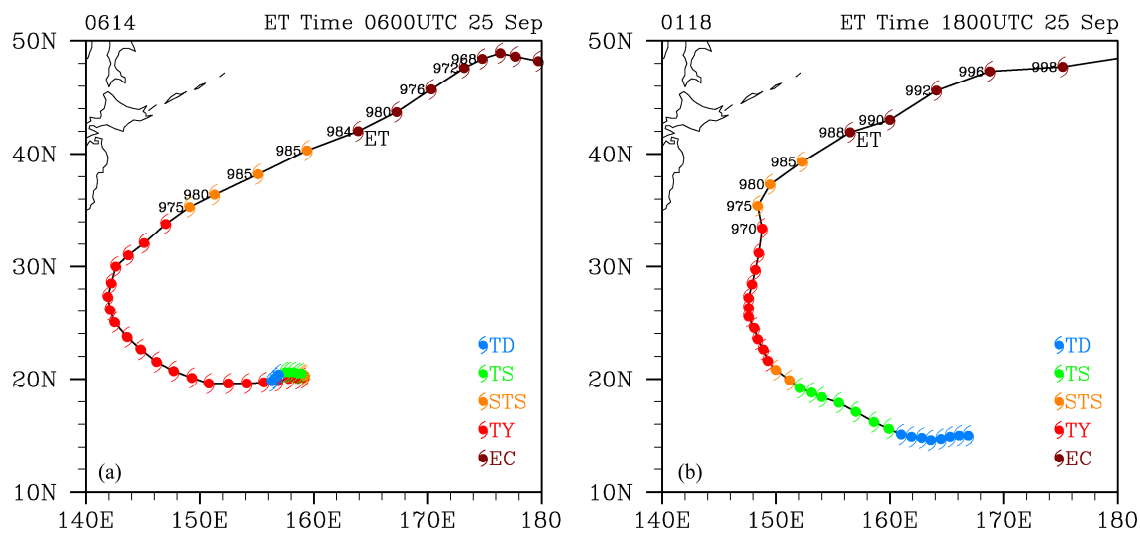


图 1 Yagi (a) 和 Francisco (b) 每 6 小时一次的移动路径。路径左侧数字为 TC 中心附近海平面气压值 (hPa)，图中 TD、TS、STS、TY、EC 分别表示热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风和温带气旋

Fig. 1 (a) Yagi's and (b) Francisco's tracks with six hour interval. Digits on the left side of the track show the minimum sea level pressure (hPa) of the TC (tropical cyclone); TD, TS, STS, TY, and EC represent tropical depression, tropical storm, severe tropical storm, typhoon, and extratropical cyclone, respectively

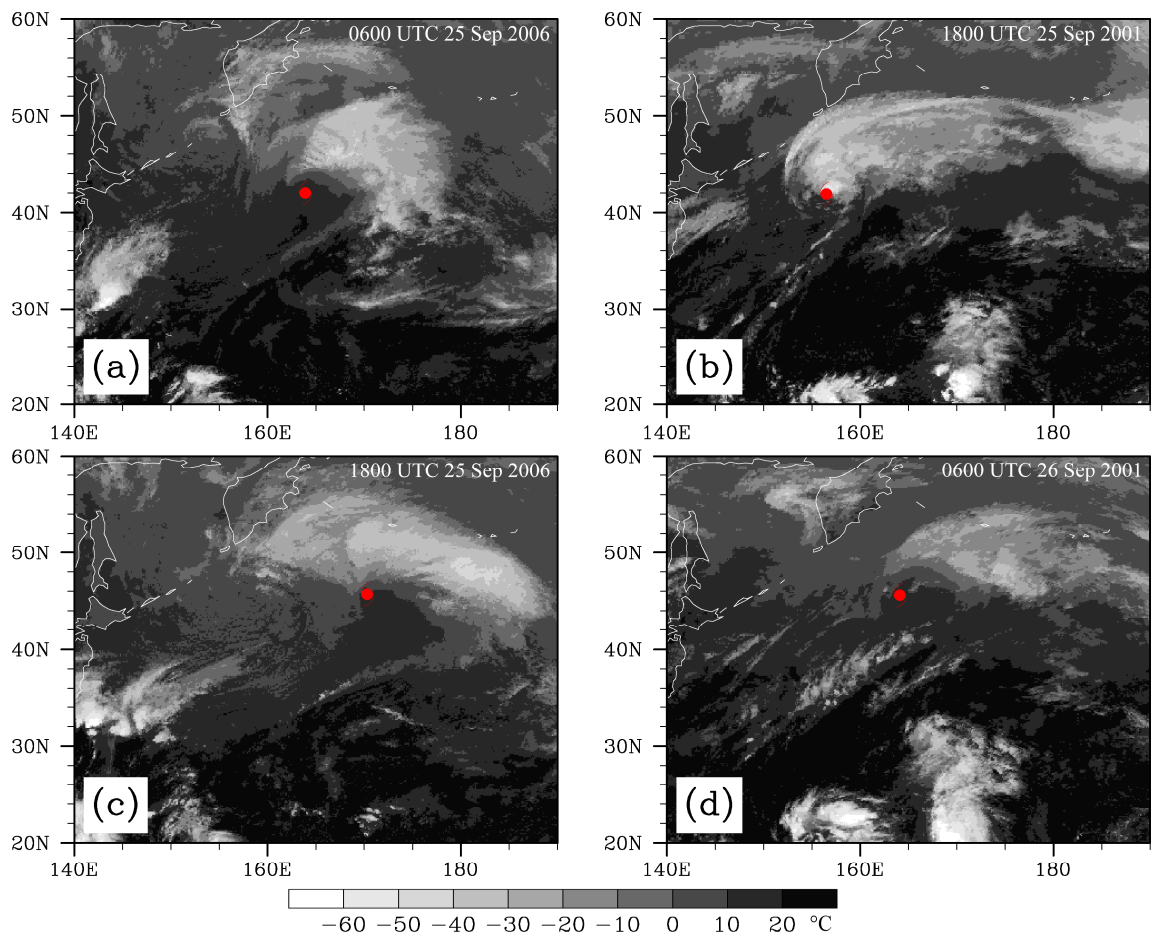


图 4 国际卫星气候工程 (ISCCP) B1 提供的 Yagi (a, c) 和 Francisco (b, d) 的红线影像 (单位: $^{\circ}\text{C}$)。 (a, b)、(c, d) 分别表示变性时刻和变性后 12 小时

Fig. 4 Infrared imagery for (a, c) Yagi and (b, d) Francisco from ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) B1. (a, b) and (c, d) represent transition time and 12 h after transition, respectively