

高空槽脊对台风“天兔”（0705）变性过程中非对称降水的影响

吴丹^{1,2}, 黄泓¹, 王春明¹, 马申佳³

1. 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211100

2. 解放军 31631 部队, 惠州 广州 516000

3. 解放军 78127 部队, 四川 成都 610000

摘 要: 本文基于 NCEP 再分析资料、TRMM 卫星降水资料和 RSMC 最佳路径集 (Best-track Dataset) 资料, 分析了热带气旋 (TC) “天兔”变性过程中降水分布和大尺度环流的演变, 并结合片段位涡反演进行修改槽脊的数值试验, 研究了环流调整对 TC 变性前非对称降水的影响, 结果表明: (1) “天兔”变性前降水集中在路径左侧, 伴随着纬向型向经向型调整的背景环流, 副高南退的同时减弱西进; (2) TC 降水的非对称分布与冷暖锋的相对强弱、水汽输送情况以及高空冷空气下传的落区有直接关系; (3) 加强环流调整后, 系统斜压性加强, 与 LOT (降水集中于 TC 路径左侧) 型降水相关的环流指数增大过程随之加强, 有利于 LOT 型降水分布进一步加强。

关键词: 高空槽脊 台风 变性 非对称降水

文章编号

中图分类号 P447

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1900.16000

Influence of the High-altitude Trough and Ridge on the Asymmetric Precipitation of Typhoon Usagi before Extratropical Transition ¹

收稿日期 2019-12-30; 网络预出版日期

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1506905); 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: 吴丹, 女, 1994 年生于陕西汉中, 硕士研究生, 主要研究热带气旋及其降水。E-mail: 190944522@qq.com

WU Dan^{1,2}, HUANG Hong¹, WANG Chunming¹, MA Shenjia³

1 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211100

2 No.31631 Army of PLA, Huizhou 516000

3 No. 78127 Army of PLA, Chengdu 610000

Abstract Based on the data of reanalysis data from NCEP/NCAR, rainfall data from TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) and RSMC Best-track database, the evaluation of precipitation distribution and large-scale circulation of tropical cyclone (TC) Usagi before extratropical transition (ET) has been analyzed. On this basis, the numerical experiment of modifying the high-latitude trough and ridge were carried out using the piecewise potential vorticity inversion, to discuss the influence of the trough and ridge on the asymmetric precipitation of TC before ET process. The results are as follows: (1) The precipitation of Usagi before ET is concentrated on the left side of the path, accompanied by meridional to zonal circulation adjustment, at the mean time the subtropical high retreats southward while weakening and propelling westward; (2) The asymmetric distribution of TC precipitation is directly related to the relative strength of the cold and warm front, the water vapor transport and the falling area of the upper-level cold air. (3) After the circulation adjustment was strengthened, the baroclinity of system was enhanced, which means the increased westerly showed by increased circulation index is beneficial to increase the LOT (left of track) rainfall.

Keywords High-altitude Trough and Ridge, Typhoon, Extratropical Transition, Asymmetric Precipitation

引言

中国近海所处的西北太平洋, 是世界上发生 TC 变性最多的地区, 每年大约有 24 个 TC 在此区域生成, 其中几乎半数 TC 会向北或东北方向转向并发生变性 (Extratropical Transition, ET) (Deng et al., 2018; Kitabatake, 2008)。TC 变性过程中, 其暖心结构会遭到破坏, 趋于向半冷半暖的温带气旋转变, 同时 TC 常常会产生显著的非对称降水。这种非对称性会增加数值天气预报的不确定性, 预报难度更大, 有时其引发的风雨灾害甚至会超过变性前 (Anwender et al, 2008; Jones et al, 2003; 陈联寿和丁一汇, 1979; Han J J et al, 2007), 因此, 相关的诊断和分析工作对于理解 TC 的发展和提高预报准确性有着重要的意义 (Chen et al, 2005; DeMaria et al, 2005)。

有很多因素可能导致 TC 降水分布出现不对称现象。一些学者利用多年的

TRMM 卫星微波反演降水资料指出非对称的分布主要受到垂直环境风切变和 TC 移动影响 (Lonfat et al, 2004; Hence and Houze, 2011)。在北半球, 大值位于相对 TC 移动方向的前象限和顺风切左侧, 而非对称的程度则随 TC 移动速度增强、距离 TC 中心的距离加大而变大。表面摩擦引起的边界流入也有可能引起非对称的低层辐合和对流活动, 易于产生在 TC 的右前方 (北半球) 象限内 (Corbosiero and Molinari, 2003; Shapiro, 1983)。岳彩军 (2009) 指出垂直上升运动条件可能是造成“海棠”台风降水非对称分布特征的主要因素。Atallah 等 (2007) 通过对西北大西洋 TC 研究发现, TC 经历变性过程中, 降水多集中于热带气旋中心左侧, 将该类 TC 简称为 LOC (left of center) 型; 降水集中于中心右侧的 ROC (right of center) 型 TC 则主要与下游脊相互作用。

前人对 TC 降水的研究多集中在其登陆阶段, 但无论是否登陆, TC 本身的巨大能量与中高纬斜压能量的结合过程对周边地区都会带来严重的风雨灾害。研究表明 (Chen, 2011; 颜琳, 2019; 王科程, 2006), TC 上下游的槽脊引起的温度平流、位涡分配等因素对降水的分布起着重要的作用, 但不同降水分型的主导系统是什么, 环流调整会产生什么影响的研究极为少见。同时, 与其它中小尺度要素相比, 大尺度背景环流的调整与变化相对稳定, 且预报准确率相对较高。因此本文将采用天气学分析与数值试验相结合的方法, 研究 0705 号台风“天兔” (Usagi) 变性过程中环流背景场与非对称降水分布的关系。

二、资料及个例介绍

台风“天兔” (Usagi) 中心位置、强度等数据来自于日本气象厅提供的 Best_Track 资料, 时间分辨率为 6 小时, 实况降水采用的是 TRMM 卫星反演的逐 3 小时降水数据, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$; 实况背景场及 WRF 模式初始场资料均为 NCEP/NCAR 提供的 FNL 逐 6 小时再分析资料, 空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

2.1 “天兔”的降水非对称性

图 1 为“天兔”的移动路径以及强度变化图。如图所示, 7 月 27 日 12 时 (UTC, 下同) “天兔”在南鸟岛附近海域生成, 先向西移动 3 日后强度达到台风级别, 同时转向西北移动, 1 日 00 时至 2 日 00 时维持其最低中心气压 945hPa; 2 日 06 时台风在日本九州东南部登陆后转为北行, 强度开始减弱; 3 日降为热带风暴, 从北海道南段离开日本海, 同时转向东北方向移动。随后在

8月4日12时变性为温带气旋，中心气压增至1000hPa，这个时刻我们称其为变性完成时刻，记为ETtime。如图1所示，在天兔变性完成之前的24小时内，主要降水呈带状沿东西方向分布在台风路径的左侧，伸展方向近似平行于与移动路径，两个强降水（24h 累计降水量>60mm）中心均位于TC北侧，移动路径的右侧存在小范围的零散降水（24h 累计降水量 <40mm），降水分布呈现显著的非对称特征。

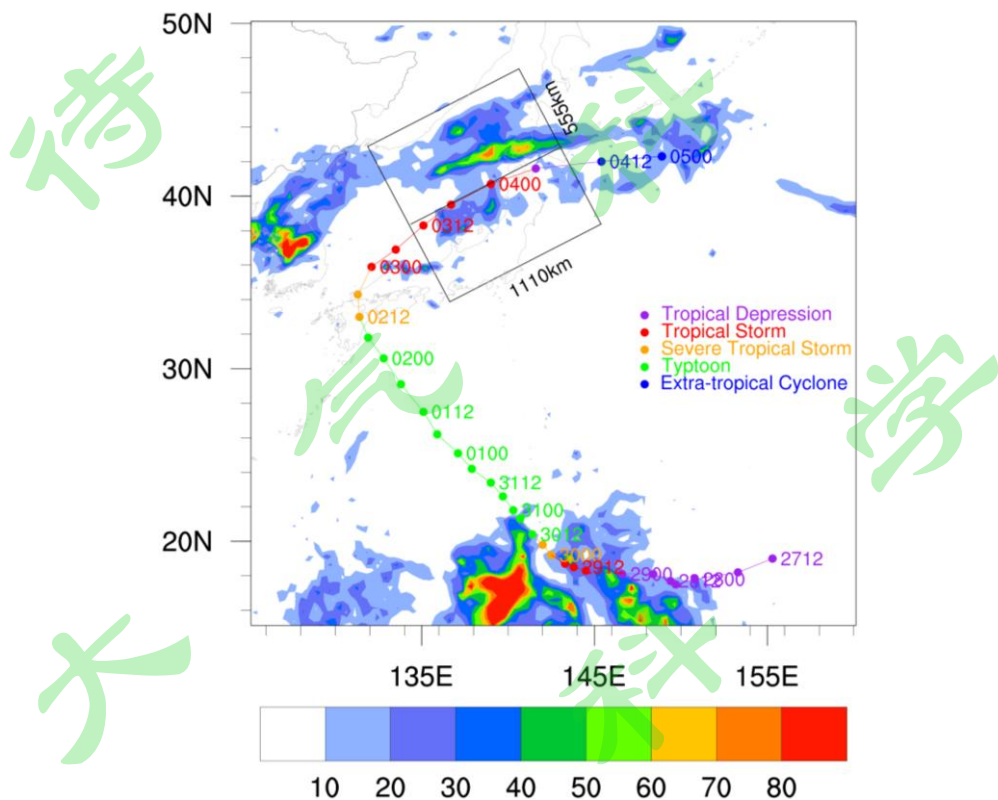


图1 台风“天兔”移动路径及3日12时至4日12时的累积降水分布（黑色方框为降水分区计算示意图，数字代表时间（DDHH，UTC）；阴影区为降水量，单位：mm/24h）

Fig. 1 Moving path of Usagi and distribution of accumulated precipitation from ET-24h to ETtime (a, Black box is schematic diagram for the calculation of precipitation partition, digits represent DDHH; shaded area is the amount of precipitation, unit: mm/24h)

为研究 TC 降水的非对称性随时间演变情况，并与该段时间内 TC 背景场的环流形势做对比，本文利用 TRMM 卫星降水资料，以 TC 所在位置为中心，当前时刻的移动方向为轴，在边长为 10 个经距的正方形范围内，将左区与右区的

24 小时格点累积降水量之差定义为 Brain; 如果 Brain>0, 则定义为 LOT (Left of Track) 型, 反之则定义为 ROT (Right of Track) 型。利用 NCEP 再分析资料, 参考国家气候中心的计算方法, 选取 35° N 与 55° N 两条纬线上东经 60° -150° E 区域内 500hPa 等压面上位势高度平均值之差计算亚洲环流指数。再以 TC 所在位置为中心, 分别向两侧扩展 45 个经度, 计算 TC 两侧的环流指数, 定义为其上下游的西风指数。以上各参数计算结果如图 2 所示。

Brain 与环流指数的变化趋势是相似的, 说明 TC 降水的非对称性与背景场的环流调整有密切关系。“天兔”形成初期就呈现出典型的 LOT 型降水特征, 7 月 30 日 Brain 达最大值 18032.5mm, 当日 12 时加强为台风级别后, 降水不对称性开始减弱, 甚至逐渐向右侧集中, 8 月 2 日 12 时“天兔”强度降为强热带风暴以后, LOT 型分布重新出现, 并持续加强, 至变性完成时刻 (ETtime) Brain 增至 7960mm。亚洲环流指数和上下游西风指数的变化均呈现准周期性波动的趋势, 下游西风指数远大于上游, TC 变性前, 亚洲环流指数有一次明显的减弱, 说明 TC 变性前背景环流由纬向型调整为经向型, 其中上游槽脊的发展是主要的贡献项。

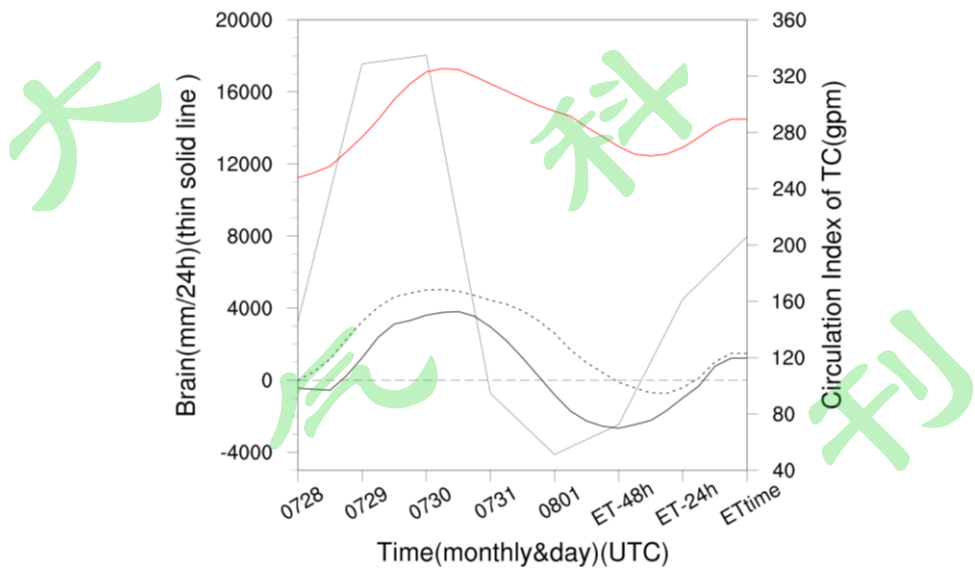


图 2 Brain (黑色细实线)、亚洲环流指数 (黑色点线) 及 TC 上下游西风指数 (上游: 黑色实线, 下游: 红色实线) 随时间变化曲线 (横坐标代表 24h 累积结束时刻 (月份日期))

Fig. 2 Evaluation of Brain (black fine solid line), Asian Circulation Index (black dotted line) and west wind index (upstream: black solid line, downstream: red solid

line) over time (X-axis coordinate is the end time of the 24h accumulation period
(month-day))

2.2 “天兔”的热力非对称性

相空间 (Cyclone Phase Space, 简称 CPS) 方法由三个参数组成, 主要包括表征热力结构非对称性的参数 B , 表征低层热力异常的参数 $-V_T^L$ 和表征高层热力异常的参数 $-V_T^U$, 根据 Hart(2003)的研究结果: $|B| \leq 10$ 表示台风是热力对称的, $-V_T^U \geq 0 (< 0)$ 表示台风在高层具有暖 (冷) 心结构, $-V_T^L \geq 0 (< 0)$ 表示台风在低层具有暖 (冷) 心结构, 可以直观地分析 TC 热力结构的变化情况。三个参数任意一个满足“异常条件”的时候, 表征“变性开始”。

$$B = h \left(\overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}} \Big|_R - \overline{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}} \Big|_L \right)$$
$$-V_T^L = \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \Big|_{900hPa}^{600hPa}$$
$$-V_T^U = \frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln p} \Big|_{600hPa}^{300hPa}$$

其中 Z 是位势高度, R 和 L (即 right 与 left) 分别表示当前台风前进方向的右侧和左侧, 上方横线表示以台风中心为圆心, 半径 500km 范围内的半圆面积平均, h 在北半球取+1, 南半球取-1, 所以在本文中 h 取+1; ΔZ 表示台风中心半径 500km 范围内位势高度最大值和最小值之差, p 表示气压。

计算“天兔”1日00时至4日18时的相空间参数, 如图 3a 及 3b 所示: 2日06时至18时, 高层与低层暖心相继达到最大值, 2日18时 B 值最小(0.699), 这段时间内, 热带风暴“天兔”处于不断增强过程中, 逐渐形成对称的热力结构和成熟的高低层暖心; 3日起 B 值不断增大的同时高低层暖心逐渐减弱, 3日12时至18时 TC 首先失去热力对称结构, 紧接着高低层热力异常参数降为负值, 3日18时“天兔”强度降为热带低压, 逐渐变为一个右侧暖左侧冷 ($B > 0$) 的温带气旋。

综上所述, Brain 于 ETime 前 48h 开始变为正值, 即表现出显著的 LOT 型降水, 并且非对称性逐渐加强; 热力非对称出现较晚 (ETime 前 24h), 但热力学特征向温带气旋转变过程非常迅速 ($< 6h$), 变性前背景场由纬向型调整为经向型, 变性过程中经向型缓慢减弱。

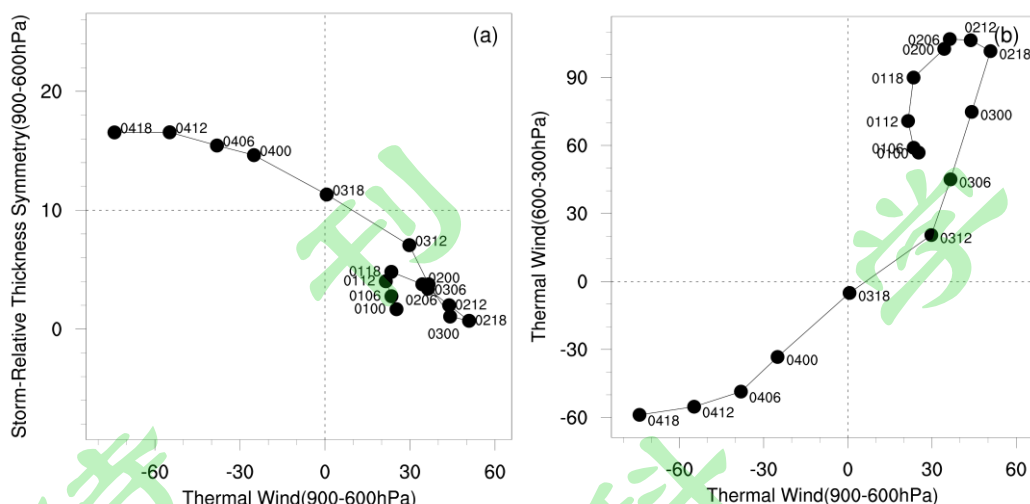


图 3 “天兔”“相空间”分布图 (a, $-V_T^L$ vs. B , b, $-V_T^L$ vs. $-V_T^U$, 图内数字代表 DDHH)

Fig. 3 Distribution of CPS (a, $-V_T^L$ vs. B , b, $-V_T^L$ vs. $-V_T^U$, digits inside represent DDHH), the mark in the figure indicates the center location of TC)

三、大尺度环流分析

分析 2007 年 8 月 3 日 18 时空 (图 4a) 天气形势可知: “天兔” 位于副高的西北侧, 40°N 以北的高纬地区为一系列低压系统形成的横槽, 对应一条东西方向分布的高位涡带, 110°E 附近存在引导冷空气南下的经向浅槽, 低纬的等压线十分稀疏, 以均压场控制为主。 “天兔” 位于高空急流入口区的右侧和低空急流轴附近, 因此 TC 东北侧具有高层辐散低层辐合的配置, 更有利于降水。 850hPa 高度上可以看到 (图 4b): 来自于副高南侧和西南季风汇合形成的偏南气流, 以顺时针方向旋转汇入 TC 环流, 水汽通量大值区与低空急流重合, 位于 TC 路径右侧, 与降水区不重合。

结合环流指数的演变可知, “天兔” 的变性前背景环流由纬向型调整为经向型, 其上游有强烈的冷空气随槽南下, 随着副高减弱南退, 低纬两路暖湿空气以顺时针旋转汇入 TC 南侧, 但该纬度暖空气势力相对较弱, 因此受冷空气主导, 降水集中产生在 TC 北侧的高空辐散场中。

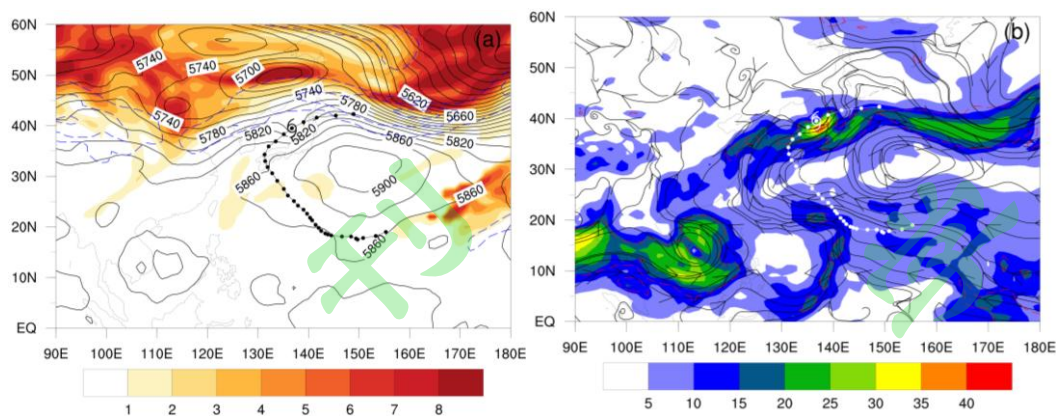


图 4 2007 年 8 月 3 日 18 时中高空形势场(a, 345K 等熵位涡(阴影, 单位: PVU), 500hPa 位势高度(黑色实线), 200hPa 急流(蓝色实线, >30m/s)), 850hPa (b, 水汽通量(阴影, 单位: $10^{-4}\text{g}/(\text{s cm}^2 \text{ hPa})$), 水平流场(黑色实线, 单位: m/s), 急流(红色虚线, >12m/s)), 图中标记表示台风中心所在位置。

Fig. 4 distribution of 500hPa potential height (a, black solid line, unit: gpm) , 345K Isentropic potential vorticity (a, shaded, unit: PVU) , 200hPa High-level-jet (a, blue dash line, >30m/s) and Distribution of 850hPa water vapor flux (b, shaded, unit: $\text{g}/(\text{s cm hPa})$), Low-level jet (b, red dash line, >12m/s) , 850hPa flow field at 1800

四、数值试验设计及模拟结果

本文采用 WRFV3.6 版本来模拟 “天兔” 变性过程的降水分布, 模式的初始条件和侧边界条件均采用 NCAR/NCEP 提供的逐 6 小时全球再分析资料, 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。在模式中采用单重水平网格, 模拟方案设置如表 1 所示:

表 1 模式运行的参数化方案

Table 1 Parameterization schemes used in the model

WRF 参数	“天兔”
积分区域中心位置	130.0 E, 35.0 N
水平分辨率	$\Delta x = \Delta y = 30\text{km}$
格点数目	$368 \times 257 \times 35$
初始时刻	2007 年 8 月 1 日 06UTC
积分步长/时间	$\Delta t = 60\text{s}/78\text{h}$
微物理方案	Ferrier(new Eta)方案
长波辐射方案	Rrtm 方案
短波辐射方案	Dudhia 方案
近地面层方案	Monin-Obukhov 方案

陆面过程方案	Noah 方案
边界层方案	Mellor 方案
积云参数化方案	Grell-Devenyi 方案

模拟结果如图 5 所示：从图 5a 中逐 6 小时的 Brain 曲线可以看出，与实况相比，2 日 00 时至 12 时模拟的降水异常地向 TC 左侧集中，之后又重新变为右型降水，直到 3 日 12 时，Brain 开始变为正值，3 日 18 时 TC 的左型降水特征达到最强，同时，与实况相似，3 日 12 时之前亚洲环流指数有显著的减弱过程，42 小时内（1 日 12 时-3 日 06 时）指数下降约 50gpm。图 5b 中模拟的路径与实况基本重合，3 日以后模拟路径略向北偏，误差范围不超过 2 个纬距，TC 的移动速度与实况基本一致，再结合 24h 格点累积降水量的分布可以发现：模式很好的模拟出了“天兔”变性过程中左型降水的非对称特征，降水带中大于 40mm/24h 的纬向范围略大于实况，但仍重现了两个大于 60mm/24h 的极大值中心。同时，3 日 12 时至 4 日 12 时内 TC 的活动主要受西北侧的槽脊和副高的影响，以上三个系统呈西北-东南向排列在 TC 的两侧。综上，以上模拟方案较好地再现了“天兔”在经向型向纬向型转换的环流背景场中发生变性并产生显著左型降水的过程，可以作为本文控制试验（CTL 试验）。

本文采用片段位涡反演的方法修改初始场（8 月 1 日 06 时），即保持其他系统不变的前提下，从环境位涡场中提取出槽脊对应的位涡扰动，给定合适的边界条件可以反演出满足平衡关系的风场、气压场和温度场。图 5c 给出的是片段位涡反演结果，黑色方框代表初始场修改区域（ $41^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 142^{\circ}\text{E}$ ），该区域包括了具有正的位涡扰动低压槽和负的高度扰动，及其西侧的脊区。以初始场修改前后亚洲环流指数变化趋势的相似程度作为标准，多次试验后确定初始场修改系数为 0.2，即在初始场的基础上加上或扣除 0.2 倍的扰动场，分别记为加强试验（Usa_TR+0.2）和减弱试验（Usa_TR-0.2）。

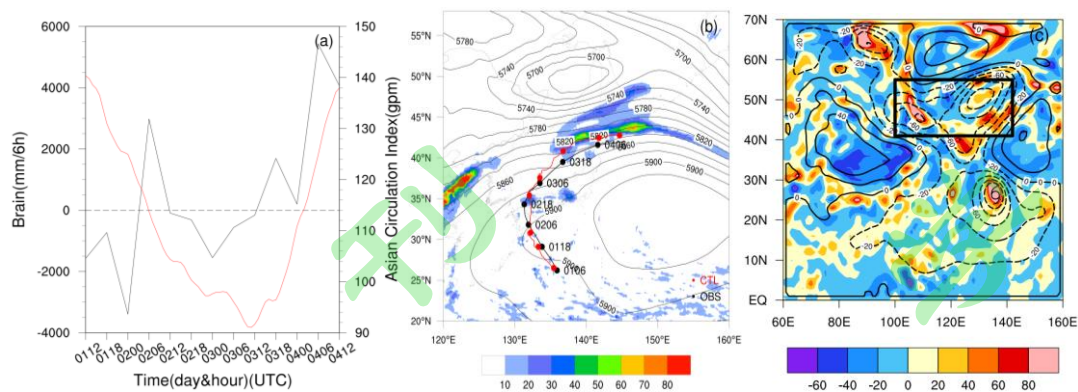


图 5 CTL 试验中亚洲环流指数（红色实线）和 Brain（黑色实线）随时间演变（a）；实况（黑色粗实线）和 CTL 试验（红色粗实线）中 TC 的移动路径（b，曲线，图内数字代表 DDHH），CTL 试验 3 日 12 时至 4 日 12 时 500hPa 平均位势高度场（b，黑色实线，单位：gpm）及 24 小时累计降水（阴影，单位：mm）；初始场片段位涡反演结果（c，8 月 1 日 06 时，扰动位势高度（黑色实线，单位：gpm），扰动位势涡度（阴影，单位：PVU），黑色方框代表修改初始场区域，图中标记代表台风中心位置）

Fig. 5 Evaluation of Asian Circulation Index (red line) and Brain (black line) in CTL test over time (a) ; Moving paths of Usagi in observation (black line) and CTL test (red line)(b, curve, digits inside indicate DDHH), CTL test distribution of averaged potential height (b , black line, unit: gpm) and accumulated precipitation(shadow, unit: mm) from 12:00 UTC 3 to 12:00 UTC 4 August 2007; piecewise potential vorticity inversion result (c, 06:00 UTC 1 August 2007, disturbed potential height (black line, unit: gpm) , disturbed potential vorticity (shaded, unit: PVU) , black box represents Initial field modification range, the mark in the figure indicates the center location of TC)

五、结果分析

敏感性试验的亚洲环流指数如图 6a 所示，加强初始槽脊，初始时刻的环流指数减小约 20gpm，积分 24 小时后，指数减小的趋势变慢，即“天兔”变性前背景场由纬向型向经向型转换的趋势减弱。在这种环流背景中，（图 7a）“天兔”从 2 日 06 时起移速逐渐加快，移动方向变化不大，积分结束时刻 TC 位置与 CTL 试验相距近 10 个纬距，3 日 12 时至 4 日 12 时的累积降水显示，路径左侧降水减少，右侧降水加强，总降水的带状特征显著减弱，降水落区比较均匀地分布在 TC 路径的左右两侧。相反地，减弱初始槽脊后（图 6a），亚洲环流指数

增加约 24gpm 后迅速减弱，说明环流调整的趋势变强。图 7b 中 TC 移速不变，但自 3 日起移动方向向南偏转，降水区域随之向南平移，仍然以带状特征集中在路径的左侧，且强度加强。对比敏感性试验和控制试验的降水分布演变（图 6b），4 日之前，除加强试验中 3 日 06 时 Brain 的值异常地由负转正以外，三条曲线的变化趋势基本一致：2 日与 3 日内各有一个极小值和极大值点，曲线总体为上升趋势。但是 4 日 00 时开始，CTL 试验中降水左型特征越来越显著，加强试验中左型变为右型，减弱试验中 Brain 再次减弱，6 小时后重新加强，形成较弱的左型降水。因此本文接下来将选择降水分布出现显著差异的时刻（4 日 06 时），进行对比分析。

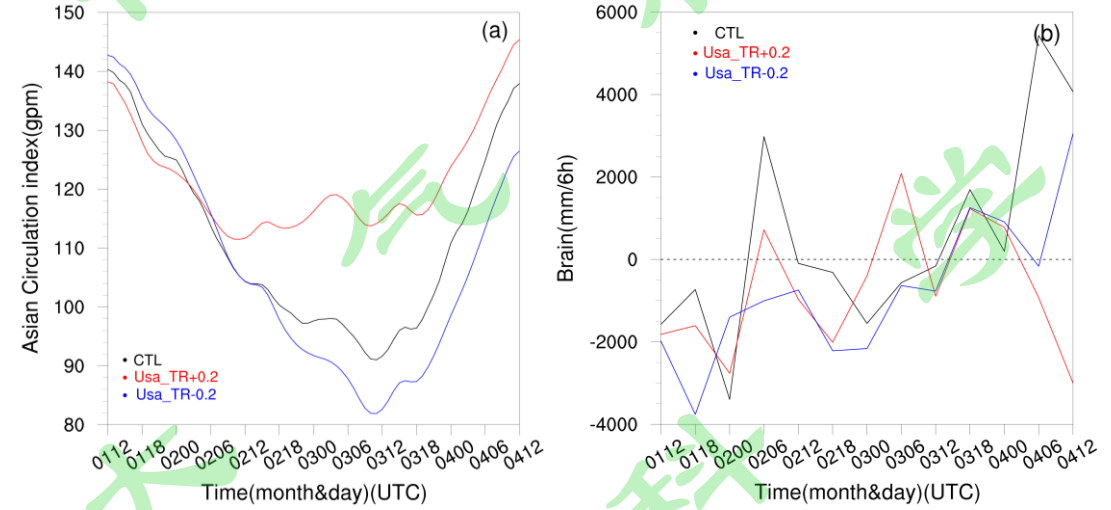


图 6 CTL 试验（黑色实线）、加强试验（红色实线）和减弱试验（蓝色实线）
中亚洲环流指数（a）和 Brain（b）随时间演变

Fig. 6 Evaluation of Asian Circulation Index (a) and Brain (b) in CTL test (black line), Usa_TR+0.2 test (red line) and Usa_TR-0.2 test (blue line)

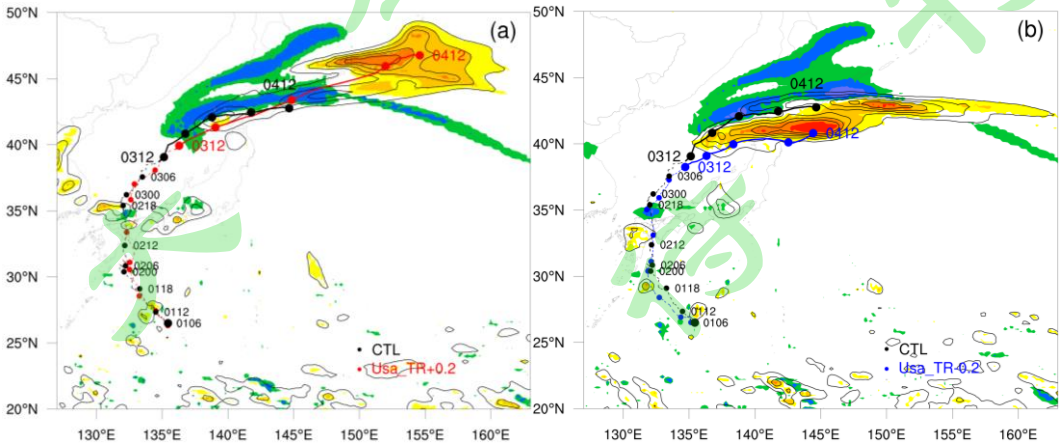




图 7 3 日 12 时至 4 日 12 时 CTL 试验与敏感性试验 (a: 加强试验; b: 减弱试验) 的累计降水量差值 (阴影区), 敏感性试验降水量 (黑色实线), 单位: mm/24h, 曲线与圆点表示 TC 移动路径, 数字表示 DDHH, 其中实线表示降水累计时段内的路径。

Fig. 7 Distribution of difference value of accumulated precipitation from 12:00 UTC 3 to 12:00 UTC 4 August 2007 between sensitivity tests (a: Usa_TR+0.2 test; b: Usa_TR-0.2 test) and CTL test (shaded) , and precipitation amount in sensitivity tests (black line) , unit: mm/24h, curve and dots indicate the track of TC, digits indicate DDHH, and solid curves represent the track within precipitation accumulated period.

为研究出现以上现象的原因, 本文将从大尺度环流形势和物理量分布特征两个方面, 对比分析变性 TC 的降水分布与高纬度槽脊之间的关系。4 日 06 时 500hPa 高度场分布显示, 加强试验中 (图 8b), TC 以北的低压中心显著加强, 槽前有大范围的偏北风, 槽前加强的暖平流导致副高显著加强, 因此副高与低压槽之间的等高线十分密集, 引导气流的加强直接导致 TC 移速加快, 路径左侧的降水区位于槽前偏南风中, 右侧降水区则位于副高北侧的西风区中。减弱试验中 (图 8c) 高压脊显著加强并向东推进, 低压中心消失, 退化为脊前东西分布的横槽, 来自中高纬的西北风绕过高压脊后风向基本不变, 少部分转为东北风经过横槽汇入 TC 环流。副高北部等高线变平, 略有南退, TC 的移动方向也随之更倾向于向东, 路径偏南。较强的降水区位于脊前偏北风中, 较弱的降水区位于槽前偏西风内。由此可见, 4 日 06 时 TC 均位于高纬槽前, 但槽脊发展的不同影响了 TC 两侧的风压场, 导致 TC 移动方向和速度产生显著差异。

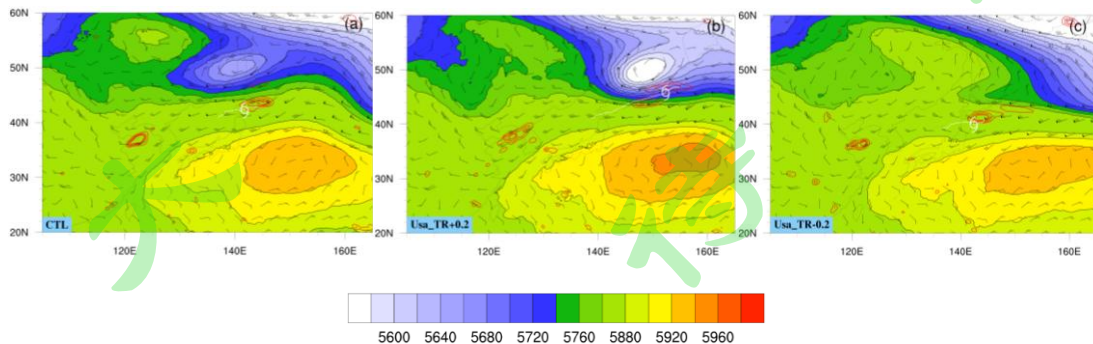


图 8 CTL 试验 (a)、加强试验 (b) 和减弱试验 (c) 4 日 06 时 500hPa 位势高

度场（阴影区，单位：gpm）和 4 日 00 时至 06 时累积降水（红色实线，单位：mm/6h）以及 TC 移动路径（白色实线）

Fig. 8 500hPa potential height (shaded, unit: gpm) at 0600 UTC 4 August 2007, accumulated precipitation from 00:00 to 06:00 UTC 4 August (red line, unit: mm/6h), and moving path of TC (white line) in CTL test (a), Usa_TR+0.2 test (b) and Usa_TR-0.2 test (c)

低层温湿场可以反映 TC 两侧的热力学条件，锋生则是 TC 在中纬度环境场中 TC 变性常伴随的过程，计算公式（Patrick and Elsberry, 2000）如下：

$$F = -|\nabla_h \theta_{se}|^{-1} \left[\frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \right]$$

其中 θ_{se} 为假相当位温， $|\nabla_h \theta_{se}| = \sqrt{(\partial \theta_{se} / \partial x)^2 + (\partial \theta_{se} / \partial y)^2}$ 。

在前人研究基础上(李英等, 2006)，本文采用 339K 的假相当位温等值线代表冷空气的前沿。在控制试验中（图 9a），4 日 06 时 TC 位于暖区中，暖空气向北凸出，来自东北方向的冷空气以逆时针方向侵入 TC 环流，冷锋追上暖锋形成锢囚锋（图 10a），两个降水区呈南北分布，较强的南侧降水区位于冷锋一侧，而北侧降水区位于暖锋侧，西路和南路两个水汽通道在暖锋附近汇合，呈西南风汇入 TC 环流。加强试验中（图 9b），4 日 06 时 TC 和降水均位于冷区内，冷暖空气分别位于 TC 的西北和东南侧，西北侧大量偏北风与暖区西南风形成冷锋（图 10b），同时低压中心前东南风与暖区西南风之间形成暖锋风切，路径两侧降水区呈西南-东北向分布，两个降水区分别位于冷锋与暖锋附近，西路和南路水汽均略有加强，在低纬汇合形成西南急流向高纬输送，与 CTL 试验相比，TC 附近温度场偏冷但水汽加强，暖锋减弱，南侧降水减弱但北侧降水加强。减弱试验中（图 9c, 10c），冷暖空气分别分布在 TC 的北、南两侧，TC 位于大于 349K 的暖区内，高纬横槽槽前的大范围偏东风与暖区内的偏南风之间形成东西向分布的暖锋，部分冷空气向西旋转进入 TC 环流形成弱的冷锋，这样的低层形势与 CTL 试验相似，但是冷锋偏弱，无法追上暖锋形成锢囚，西路水汽略有减弱而南路加强，因此两个降水区由 CTL 试验中的南北分布变为东西分布，TC 附近温度场更暖但水汽中心偏弱。最终冷区内的降水强度减弱，暖区内加强。综上所述，热力场中水汽输送与冷暖空气的强弱直接影响着锋生过程，导致 TC 降水强度和分布发生明显差异。

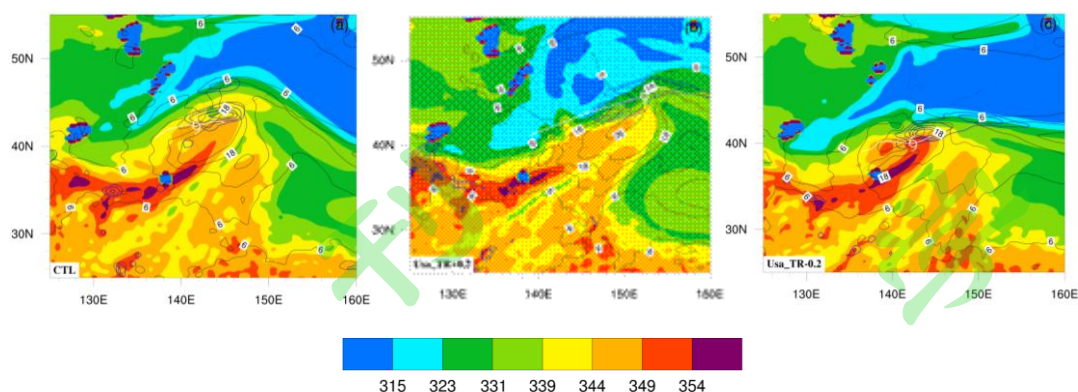


图 9 CTL 试验 (a)、加强试验 (b) 和减弱试验 (c) 4 日 06 时 850hPa 假相当
位温 (阴影区, 单位: K), 水汽通量 (黑色实线, 单位: $\text{g}/(\text{s cm hPa})$) 和 4
日 00 时至 06 时累积降水 (蓝色实线, 单位: $\text{mm}/6\text{h}$) 以及 TC 移动路径 (白色
实线))

Fig. 9 850hPa pseudoequivalent potential temperature (shaded, unit: K) , water vapor
flux (shaded, unit: $\text{g}/(\text{s cm hPa})$) at 0600 UTC 4 August 2007, accumulated
precipitation from 00:00 to 06:00 UTC 4 August (blue line, unit: $\text{mm}/6\text{h}$) , and
moving path of TC (white line) in CTL test (a) , Usa_TR+0.2 test (b) and Usa_TR-0.2
test (c)

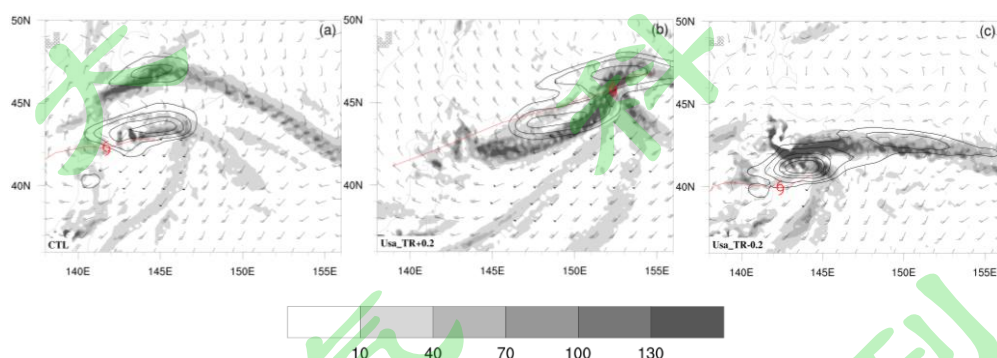


图 10 CTL 试验 (a)、加强试验 (b) 和减弱试验 (c) 4 日 06 时 950hPa 锋生函
数 (阴影区, 单位: K), 水平风场 (单位: m/s) 和 4 日 00 时至 06 时累积降水
(黑实线, 单位: $\text{mm}/6\text{h}$) 以及 TC 移动路径 (红色实线))

Fig. 10 950hPa function of frontogenesis (black line, unit: $10\text{-}4\text{g}/(\text{s cm}^2 \text{ hPa})$) ,
horizontal wind field (unit: m/s) at to 06:00 UTC 4 August 2007 , accumulated
precipitation from 00:00 to 06:00 UTC 4 August (black line, unit: $\text{mm}/6\text{h}$) , and
moving path of TC (red line) in CTL test (a) , Usa_TR+0.2 test (b) and Usa_TR-0.2
test (c)

为了研究 TC 引发降水的动力学条件，将两个降水中心的连线作为剖面，计算每个剖面点在垂直于剖面方向上的累积降水量，对比分析三个试验中降水发生的垂直环境特征。本文使用 MPV 来表征气层稳定度，其中 MPV1 是湿位涡的正压项，表示惯性稳定性和对流稳定性的作用，当大气对流不稳定时，MPV1<0，有利于暴雨的发生发展，MPV2 是湿位涡的斜压项，该项负值越大，表示大气斜压性越强，具体计算方法如下（吴国雄等，1995）：

$$MPV = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}$$

其中， θ_{se} 为假相当位温， ξ_p 是垂直涡度， f 是地转涡度。其分量形式为：

$$MPV1 = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}$$

控制试验中，由于冷暖锋发生锢囚，两个降水中心附近均有倾斜分布的锋面（图 11b），对应 MPV1 正值和 MPV2 负值中心，暖空气被南北两侧冷空气挤压至 45°N 附近的中空，形成弱的不稳定层结。高层冷空气由北至南逐渐下传（图 11c），集中在南侧降水中心附近，随着 TC 环流进一步向北卷入另一个降水中心，形成一强一弱两个位涡柱，加强了低层扰动，上升运动集中在 500hPa 以下，有利于剖面以南的大量暖湿空气沿锋面爬升，大于 10 g/(s·cm·hPa) 的水汽通量大值区在南侧降水区中爬升至 250hPa，北侧降水中爬升至 400hPa 附近（图 11b）。

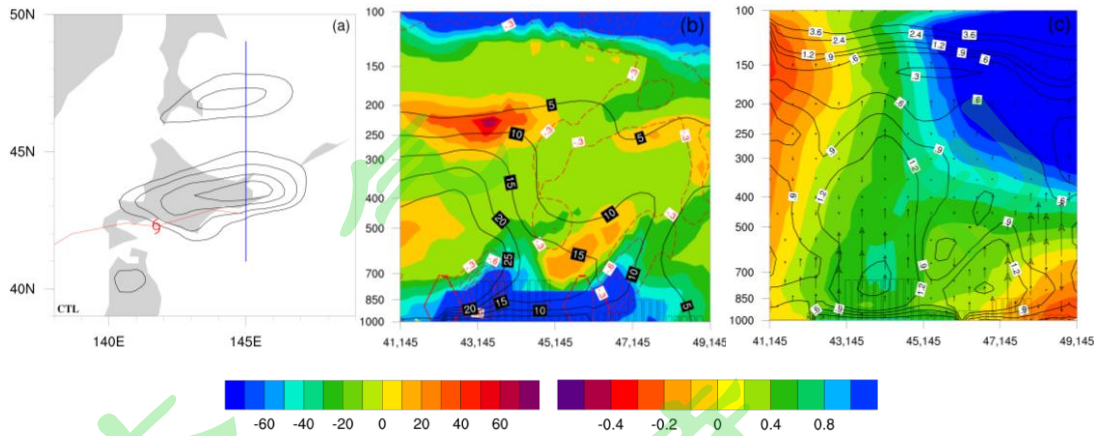


图 11 4 日 00 时至 06 时 CTL 试验累积降水剖面示意图（a，蓝色实线为剖面，黑色实线为累计降水量，红色实线为台风路径，台风标志为 4 日 06 时台风中心位置）；湿位涡（MPV1（阴影），MPV2（红色虚线），单位：PVU）和水汽通量（黑色实线，单位：g/(s cm hPa)）的垂直分布（b）；位势高度距平（阴影，

单位: gpm), 位涡 (黑色实线, 单位: PVU), 垂直速度 (箭头, 单位: m/s)

的垂直分布 (c) 以及每个剖点的降水累积值 (柱状图, 单位: mm/6h)

Fig. 11 Profile schematic diagrams of accumulated precipitation from 00:00 UTC 4 to 06:00 UTC 4 August 2007 of CTL test (a, blue line indicates profile line, black line indicates accumulated precipitation, red line indicates TC Track and the mark indicates the center location of TC at 06:00 UTC 4 August 2007) ; (b) vertical distribution of humidity potential vorticity (MPV (shaded), MPV2 (red dash line), unit: PVU) and water flux (black line, unit: $g/(s \cdot cm \cdot hPa)$) accumulated precipitation from 00:00 to 06:00 UTC 4 August (black line, unit: mm/6h) ; (c) vertical distribution of potential height anomaly (shaded, unit: gpm), potential vorticity (black line, unit: PVU) and vertical velocity (arrows, unit: m/s), and precipitation accumulation of profile points (histograms, unit: mm/6h)

加强试验中, 由于 TC 北侧低压略有东退但强度加强, 剖面北端高层的冷空气下传位置偏北但强度加强 ($45^{\circ}N$ 附近) (图 12c), 北侧降水区附近的低层扰动也随之加强, $45^{\circ}N$ 及其以北上升运动可伸展至 200hPa, 并在 $47^{\circ}N$ 附近出现宽度窄但强度强的位涡柱, 但南侧降水区没有位涡柱和强上升运动。由于低层水汽输送加强, 使得两个强降水中心上空均出现 $15g/(s \cdot cm \cdot hPa)$ 的湿中心 (图 12b), 尤其位于暖锋附近的北侧降水中心, 大于 $10 g/(s \cdot cm \cdot hPa)$ 湿区范围也爬升至 250hPa, 湿区的外缘对应着不稳定层结, 低层均为锋区中的稳定层结, 因此与 CTL 试验相比, 北侧降水区内高层冷空气下传加强, 低层水汽输送加强, 共同作用下使得降水显著加强, 而南侧降水区内暖空气加强, 在冷锋抬升作用下暖湿空气向上爬升, 进入不稳定气层进一步促使降水产生。

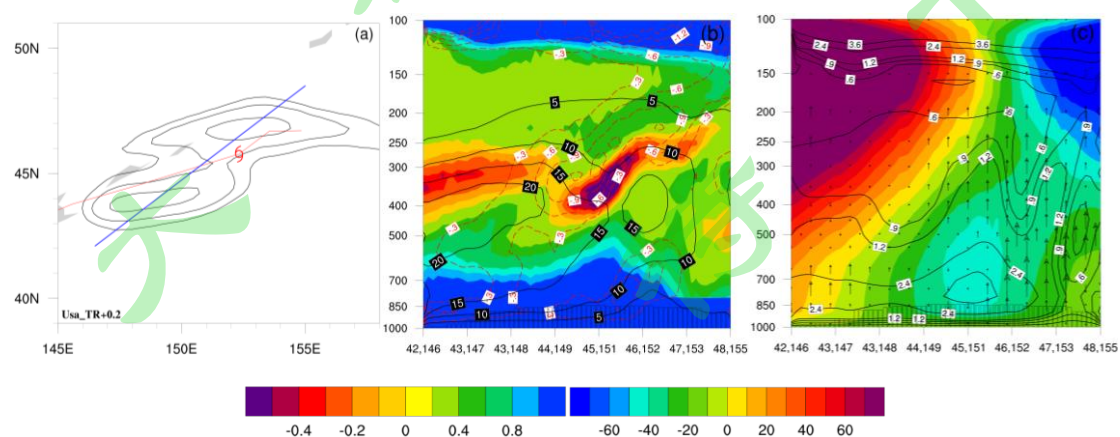


图 12 同图 11，但为加强试验

Fig. 12 Same as Fig11, but vertical profile of Usa_TR+0.2 test

减弱试验中，高纬低压中心退化为横槽，利于更多的冷空气向西传播，在垂直剖面图中高空冷空气下传的落区也随之西移，位于偏东的降水中心西侧，显著地加强了冷区西侧的上升运动（图 13c）。低层除了从西向东凸起的水汽输送带明显减弱外，由于南路水汽输送加强，有部分水汽由东向西回流，西侧降水中心的水汽通量大值中心为 $15 \text{ g/(s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa)}$ ，大于 $10 \text{ g/(s} \cdot \text{cm} \cdot \text{hPa)}$ 的湿区范围接近 300hPa （图 13b）。因此与 CTL 相比，高空冷空气向西下传加强，低层南路暖湿空气也加强向西输送，二者一同有利于西侧的强降水产生，东侧降水区内温度更高但水汽略弱，而暖锋锋后的暖湿空气主动抬升，产生了强度弱但范围大的暖锋降水。

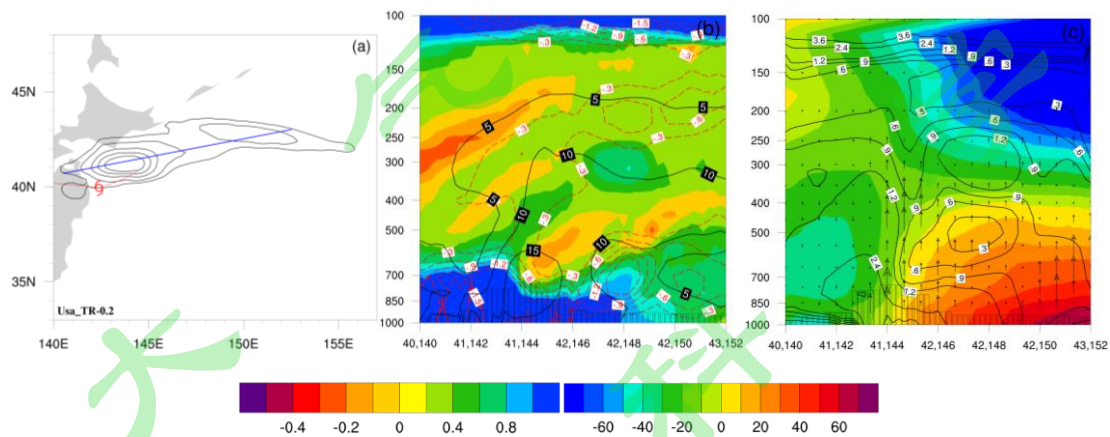


图 13 同图 11，但为减弱试验

Fig. 13 Same as Fig11, but vertical profile of Usa_TR-0.2 test

六、结论

本文利用 Brain、环流指数和副高指数对台风“天兔”变性过程中降水分布以及背景环流场进行了定量分析，并结合一系列的数值试验，研究了环流调整对“天兔”变性过程降水非对称分布的影响，得到的主要结论如下：

(1) “天兔”变性完成前约 48 小时出现降水向移动路径左侧集中的现象，且非对称性逐渐加强；变性前大尺度背景场经历了由纬向型向经向型转换的过程，副高南退的同时减弱西进，TC 降水受冷空气主导更易发生在左侧。

(2) 数值模拟结果表明“天兔”变性过程中，低层冷暖气团之间形成锢囚锋，6 小时降水呈南北向分别分布在冷暖锋附近，高层冷平流下传至南侧降水中心附

近,与锢囚锋一起加强低层扰动,促使暖湿空气抬升,在 TC 路径左侧产生降水。

(3) 敏感性试验表明“天兔”变性过程中背景环流的调整对其降水分布形态的改变有明显影响。初始时刻加强槽脊会阻碍高纬背景环流的经向发展,槽脊发展减慢,环流调整减弱后(即加强试验),变性完成前约 12 小时转变为 ROT 型降水。500hPa 引导气流加强,TC 移动加快,低层 TC 附近变冷但水汽加强,暖锋减弱,高层冷空气下传至两侧降水连线的中心附近,6 小时降水分布呈东北-西南分布在路径的左右两侧;反之,初始时刻减弱槽脊会有利于高纬背景环流的经向发展,槽脊发展加快,环流调整加强后(即减弱试验),变性完成前约 48 小时转变为左型降水。500hPa 系统南压,TC 路径偏南,低层 TC 附近变暖且水汽减弱,冷锋减弱,高层冷空气下传至降水区西端,6 小时降水分布呈东西向分布在路径的左侧。

本文讨论了高纬度槽脊对天兔变性前大尺度降水非对称性的影响,实际上,此时天兔的降水分布在更小的空间尺度还可能受到地形 风切变等的影响(Tang, X. D. et al., 2012, 2019),也就是说,天兔降水的各种尺度非对称特征受到多种因子的影响,各种因子的相对贡献如何,值得我们继续研究。

参考文献 (References)

Chen Guanghua. 2011. A Comparison of Precipitation Distribution of Two Landfalling Tropical Cyclones during the Extratropical Transition[J]. *Advances in Atmosphere Science*, 28(6): 1390-1404.

陈联寿, 丁一汇. 1979. 西北太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 511.
Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. Survey of Typhoons over the West Pacific (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 511.

Chen S S, Knaff J A, Jr F D M. 2005. Effects of Vertical Wind Shear and Storm Motion on Tropical Cyclone Rainfall Asymmetries Deduced from TRMM[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(11): 3190-3208.

DeMaria, M., Mainelli, M., Shay, L. K., Knaff, J. A., and Kaplan, J. 2005. Further improvements to the statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) [J]. *Weather Forecasting*. 20(4): 531-543.

Difei Deng, Elizabeth A Ritchie. 2018. Rainfall Characteristics of Recurving

Tropical Cyclones over the Western North Pacific [J]. *J. Climate*, 31(2): 575–592.

Doris Anwender, Patrick A. Harr, Sarah C. Jones. 2008. Predictability Associated with the Downstream Impacts of the Extratropical Transition of Tropical Cyclones: Case Studies [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(9): 3226–3247.

Han J J , Bai L N , Wang D et al. 2007. Insights from publications in Nature and Science [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 43(6): 681–694.

Hart R. E. 2003. A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 585–616.

Hence D A, Houze R A J. 2011. Vertical Structure of Hurricane Eyewalls as Seen by the TRMM Precipitation Radar[J]. *J. Atmos. Sci.*, 68(68): 1637–1652.

Kristen L. Corbosiero, and John Molinari. 2003. The Relationship between Storm Motion, Vertical Wind Shear, and Convective Asymmetries in Tropical Cyclones[J]. *J. Atmos. Sci.*, 60(2): 366–376.

Lance F. Bosart and Anantha. R. Aiyer. 2007. Precipitation Distribution Associated with Landfalling Tropical Cyclones over the Eastern United States [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 2185–2206.

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):552–562. Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2006. Numerical Study on Impacts of Upper-Level Westerly Trough in the Extratropical Transition Process of Typhoon WINNIE(1997) [J]. *Acta Meteorol Sin.*, 5: 552–563.

Lloyd J. Shapiro. 1983. The Asymmetric Boundary Layer Flow under a Translating Hurricane[J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 1984–1998.

Manuel Lonfat, Frank D. Marks, Shuyi S. Chen. 2004. Precipitation Distribution in Tropical Cyclones Using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager: A Global Perspective [J]. *Health Research Policy and Systems*, 11(1): 40–40.

Napko Kitabatake. 2008. Extratropical Transition of Tropical Cyclones in the Western North Pacific: Their Frontal Evolution [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(6): 2066–2090.

Patrick A. Harr, Russell L. Elsberry. 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.

Sarah C Jones, Patrick Harr, P. A., Jim Abraham et al. 2003. The Extratropical Transition of Tropical Cyclones: Forecast challenges, current understanding and future directions[J]. *Weather Forecasting*, 18(6), 1052–1092.

Tang, X., Cai, Q., Fang, J., & Tan, Z. M. 2019. Land-sea contrast in the diurnal variation of precipitation from landfalling tropical cyclones[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(22): 12010–12021.

Tang, X. D., Yang, M. J., & Tan, Z. M. 2012. A modeling study of orographic convection and mountain waves in the landfalling typhoon Nari (2001) [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 138(663): 419–438.

吴国雄,蔡雅萍,唐晓普. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. *气象学报*, 53(4):387–404. Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaopu. 1995. Development of Moist Potential Vorticity (MPV) and Slantwise Vorticity[J]. *Acta Meteorol Sin*, 53(4):387–404.

王科程. 2006. 变性台风前期降水的分布特征及其与变性再发展的关系研究[D].南京:解放军理工大学. Wang Kecheng. 2006. The distribution characteristics of rainfall of Tropical Cyclones over Northwest Pacific before Extratropical Transition and the relationship between it with the redevelopment afterwards[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology.

颜玲, 周玉淑, 王咏青. 2019. 相似路径台风 Soudelor(1513)与 Matmo(1410) 登陆前后的降水分布特征及成因的对比分析[J]. *大气科学*, 43(2): 297–310. Yan Ling, Zhou Yushu, Wang Yongqing. 2019. Analysis on Different Characteristics and Causes of Precipitation Distribution during the Landing of Typhoon “Soudelor” (1513) and Typhoon “Matmo” (1410) with Similar Tracks[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(2): 297–310.

岳彩军. 2009. “海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析[J]. *大气科学*, 33(1): 51–70. Yue Caijun. 2009. A Quantitative Study of Asymmetric Characteristic Genesis of Precipitation Associated with Typhoon Haitang[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(1): 51–70.