

王佳琪, 李英. 2019. 西北太平洋热带气旋变性过程中的风及降水分布变化特征分析 [J]. 大气科学, 43(6): 1329-1343. WANG Jiaqi and LI Ying. 2019. Characteristics of Wind and Rainfall Distribution of Tropical Cyclones during Their Extratropical Transition Processes over the Western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1329-1343. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18213

# 西北太平洋热带气旋变性过程中的风及降水 分布变化特征分析

王佳琪 李英

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

**摘要** 利用中国气象局上海台风研究所 (CMA/STI) 整编的热带气旋最佳路径资料、美国飓风联合警报中心 (JTWC) 最佳路径资料、美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 的全球多平台热带气旋风场资料 (MTC SWA) 和 CMORPH 降水资料、日本卫星云顶黑体辐射温度 ( $T_{bb}$ ) 资料等, 分析 1987~2016 年 30 年间西北太平洋 228 个变性热带气旋 (ETTC) 的活动规律、风与降水分布及其演变特征。结果表明: (1) ETTC 年均 7.6 个, 除 1~2 月, 各月均有分布, 峰值在 9 月。约 90.4% 的 ETTC 变性位置在 30°N 以北, 仅约 9.6% 在 30°N 以南较低纬度, 且多发生于春夏和秋冬交替季节。(2) TC (热带气旋) 变性通常发生在其转向后, 半数以上移速加快, 大多数中心气压升高或维持, 仅 10.5% 降低。(3) 变性过程中 ETTC 近中心最大风速减小, 最大风速半径增大, 内核趋于松散。其 34 节风圈半径北侧明显大于南侧, 风场结构非对称性增强。(4) ETTC 强风和强降水呈显著非对称性分布, 其强风区主要出现在 ETTC 中心东侧, 即路径右后方; 强降水区主要出现在北侧, 且变性后在东北象限向外扩张。(5) 较强的环境水平风垂直切变 (VWS) 是影响 ETTC 风及降水分布的重要因子。强降水主要出现在顺风切方向及其左侧, 强风 (去除 TC 移速时) 出现在切变左侧。

**关键词** 热带气旋 变性 活动特征 风及降水分布

文章编号 1006-9895(2019)06-1329-15

中图分类号 P444

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18213

## Characteristics of Wind and Rainfall Distribution of Tropical Cyclones during Their Extratropical Transition Processes over the Western North Pacific

WANG Jiaqi and LI Ying

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract** The characteristics of ETTCs (extratropical transitioned tropical cyclones) activities and their wind and rainfall distribution were studied based on the best track data from CMA/STI (China Meteorological Administration and Joint Typhoon Warning Center), the multiplatform tropical cyclone surface wind analysis product, CMORPH (Climate

收稿日期 2018-08-05; 网络预出版日期 2019-04-09

作者简介 王佳琪, 女, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要从事热带气旋研究。E-mail: wangjq693@163.com

通讯作者 李英, E-mail: yli@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2015CB452804, 国家自然科学基金项目 41475055、41475061, 气象预报业务关键技术发展专项 YBGJXM (2018) 1B-08、2018KJ027

**Funded by** National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2015CB452804), National Natural Science Foundation of China (Grants 41475055, 41475061), Meteorological Forecasting Operation Key Technology Development Program (Grants YBGJXM (2018) 1B-08, 2018KJ027)

Prediction Center morphing technique) satellite data provided by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) and  $T_{BB}$  (cloud-top black body temperature) calculated by satellite observation during 1987 to 2016 over the western North Pacific. The results show that: (1) The average annual number of ETTCs was 7.6. The ETTCs could appear in every month except January and February, and peak in September. About 90.4% of the ETTCs occurring to the north of 30°N, while the others (9.6%) to the south of 30°N always occurred in the alternation of spring and summer or autumn and winter. (2) The major tracks of the ETTCs were northwestward in their early stage and then later turned northeastward or northward, and the extratropical transitions occurred after their turning. After ETs, most TCs moved faster and became weaker or maintained their intensity. Only 10.5% of ETTCs were strengthened. (3) The maximum wind of ETTCs decreased rapidly with its radius increasing, and the 34-knot wind radius of the ETTC was larger in the northern quadrant than in the southern quadrant. These indicate that the TC structure became much asymmetric and the inner core became loose during the extratropical transition. (4) The asymmetry of the ETTCs wind and rainfall distribution was enhanced during the ET process. The stronger wind tended to be on the east side of the ETTCs (right or back side along TC track, while the stronger rainfall tended to be on the north side, and the strongest rainfall moved to the outer region from the inner-core region in the northeast quadrants. (5) The asymmetric characteristics of wind and rainfall distribution had a close relationship with the strong VWS (vertical wind shear). Strong rainfall tended to be in the downshear to downshear left, and strong wind (motion-removed) tended to be in the shear left.

**Keywords** Tropical cyclone, Extratropical transition, Activity characteristics, Wind and rainfall distribution change

## 1 引言

热带气旋(TC)向极运动过程中,环境斜压性增强,海温变低。若TC与中纬度天气系统发生相互作用,暖心结构被破坏,垂直方向低压中心倾斜,失去热带特征而出现温带特征,则认为其发生温带变性(Klein et al., 2000; Jones et al., 2003)。钟颖旻等(2009)统计发现,1961~2000年西北太平洋上变性热带气旋(ETTC)共329例,占该区域TC总数的23.1%。袁娟娟等(2011)统计1949~2007年间登陆我国的TC发现,其中16.63%的TC发生变性。孙莎莎等(2017)指出,1949~2014年间有80个变性TC影响山东地区,年均1.2个。可见,西北太平洋TC变性频繁,对我国天气有重要影响。

TC变性涉及TC涡旋与中纬度系统的复杂相互作用。飓风“Michael”(2000)与北大西洋西部斜压槽合并,发生变性并在冷海面快速加强。其西北方向有较强的干空气吸入,东南方向有很强的低空西南急流(Abraham et al., 2004; Fogarty et al., 2007)。台风“Matsa”(2005)和“Wipha”(2007)变性过程中均与中纬度高空锋区发生作用(李侃, 2012)。而中纬度高空急流对台风“Yagi”(2006)再次发展起到重要作用(Sun et al., 2012)。台风“Winnie”(1997)变性过程中,冷空气与其环流的暖平流在对流层低层形成锋面(Zhu et al.,

2005),其变性加强和降水的非均匀分布与其环流的中尺度锋生过程密切相关(李英等, 2008, 2013)。朱先德等(2010)发现冷空气侵入台风“Mindulle”(2004)西侧和西北侧,使系统斜压性增强,垂直涡度发展加强,气旋变性发展。Quinting et al. (2014)指出,中纬度干冷空气存在于“Sinlaku”(2008)暖湿热带空气上方导致强烈的位势不稳定,触发了暖锋区不稳定环境中的深对流发展。

而在TC与中纬度系统发生相互作用过程中,其动力、热力结构特征都会改变。如由整层对称的正涡度变为自低到高向西倾斜,暖心的对称分布变为相对暖区倾斜的非对称分布(张迎新等, 2008; 钟颖旻等, 2008; 危国飞等, 2014),从而影响到其风及降水的强度和分布。一般认为变性TC强风覆盖范围以及降水区域更大。Hart and Evans (2001)对大西洋热带气旋温带变性的统计研究发现,变性TC的强风覆盖面积一般是同等强度TC的2~3倍,强降水在北半球主要分布于路径左侧,在南半球主要分布于路径右侧。Qian et al. (2016)的研究认为,中纬度低压系统与飓风“Sandy”(2012)涡旋合并导致后者变性,TC涡旋上的异常暖气柱及异常上升气流与中纬度槽下的异常冷气柱及异常下沉气流将势能转化为动能,导致其风场扩张。Loridan et al. (2015)发现日本附近ETTC的风场表现为马蹄形,强风出现在移动方向的两侧。

Matyas (2013) 计算 45 个登陆美国 TC 的降水区域, 指出, 其中 20 个登陆后变性的 TC 降水区域更大。Liu and Smith (2016) 指出飓风 “Irene” (2011) 降水最强时正经历变性, 其左前象限降雨量集中。

TC 变性过程中其风及降水的强度和分布变化比较复杂, 是热带气旋研究和预报关注的焦点。而目前关于 TC 变性过程中风及降水变化特征的统计研究较少。本文采用中国气象局上海台风研究所 (CMA/STI) 热带气旋最佳路径、美国飓风联合警报中心 (JTWC) 最佳路径资料等, 对 1987~2016 年西北太平洋热带气旋变性活动进行统计分析, 并探讨 TC 变性过程中风及降水的变化特征及其与环境风垂直切变的联系。

## 2 资料与方法

采用 1987~2016 年 CMA/STI 整编的热带气旋最佳路径资料, 包括热带气旋中心最低气压、位置信息及变性时刻等信息, 统计西北太平洋 ETTC 活动特征。该资料中对 TC 变性的判定是卫星云图结合高空天气图, 以冷空气侵入 TC 中心区域或锋面云系融入 TC 环流中心区域作为变性判据 (孙红梅等, 2014), 记录的变性时刻为变性完成时刻。

ETTC 风场结构采用美国飓风联合警报中心 (JTWC) 最佳路径资料中最大风圈半径、特定强度风圈半径以及美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 的全球多平台热带气旋风场资料 (MTCSWA) 进行分析。JTWC 最佳路径资料从 2001 年开始记录 TC 特定风速圈半径 (2001 年记录 35 节特定风速强度半径, 2002 年以后记录 34 节、65 节、100 节特定风速强度半径) 以及最大风速半径。由于变性 TC 大多强度较弱, 本文选取 2002~2016 年 34 节风圈半径和最大风速半径进行统计。NOAA/NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service) 全球多平台热带气旋风场资料 (MTCSWA) 始于 2007 年, 覆盖距台风中心周围直径  $15^\circ$  区域 (距 TC 中心  $-7.5^\circ$  至  $7.5^\circ$ , 以北、东为正方向), 水平分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 时间分辨率 6 h, 提供 10 m 高度和飞行高度 (约 700 hPa) 的数据。

降水资料取 1998~2016 年 CMORPH (Climate Prediction Center morphing technique) 降水原始数

据, 该数据覆盖  $60^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$  区域, 水平分辨率  $0.073^\circ \times 0.073^\circ$ , 每 30 min 一次。云顶黑体辐射温度 ( $T_{\text{BB}}$ ) 信息来自日本 MTSAT-2 (2000 年 1 月至 2015 年 5 月) 和 Himawari-8 (2015 年 6 月至 2016 年 12 月) 两颗卫星, 水平分辨率为  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。环境风矢量取自 1987~2016 年欧洲中心再分析资料, 水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 每 6 h 一次。

由于资料所限, 本文采用多源资料开展研究。不同资料的覆盖时段及其对 TC 的记录存在一定差异。说明如下: (1) 本文采用长时间序列的 CMA 资料阐述 ETTC 的活动特征。其他资料, 如 JTWC 最佳路径资料对 TC 中心定位与之存在一定差异。但本文对 TC 结构变化的描述采用 TC 中心为原点的动态坐标, 风圈半径以及风与降水分布均是相对 TC 中心而言, 不同资料对 TC 中心定位的差异对 ETTC 风与降水的结构变化影响不大。(2) 对于 TC 的强度, 也是采用 CMA 资料的中心最低气压和近中心最大风速变化来研究, 虽然 CMA 资料风速为 2 min 平均风速, JTWC 资料风速为 1 min 平均风速, 但本文重点研究的是强度变化, 量值上的差异对变化趋势影响不大。另外, JTWC 最佳路径资料与 MTCSWA 风场资料对风速的记录均为 1 min 平均风速, 此两套资料分析 ETTC 风场结构不存在平均时间导致的差异。(3) 文中所用不同资料的时段、长度存在不一致, 统计样本数有所变化, 具体情况将在文中加以说明。

## 3 ETTC 活动特征

### 3.1 ETTC 时空分布

1987~2016 年 30 年间西北太平洋 ETTC 共 228 个, 年均 7.6 个, 占 TC 总数的 26.2%。从年变化 (图 1a) 来看, ETTC 频数有 10 年左右的活动周期。1988~1989 年为低值, 仅有 2 个, 之后增多, 至 1992 年达到峰值 12 个。1999 年无 ETTC 出现, 2004 年 ETTC 频数再达峰值 15 个, 至 2010 年再次出现低值 3 个。从月变化 (图 1b 深蓝色柱) 来看, 除 1~2 月, 全年均有 ETTC 出现, 峰值出现在 9 月。出现在 5~10 月的 ETTC 约占总数的 93.4%, 8~10 月约占总数的 66.0%。

图 1c 给出 1987~2016 年西北太平洋 ETTC 路径分布, 其中黑线表示变性前路径, 红点表示变性完成时 TC 中心位置, 红线表示变性后路径。可见

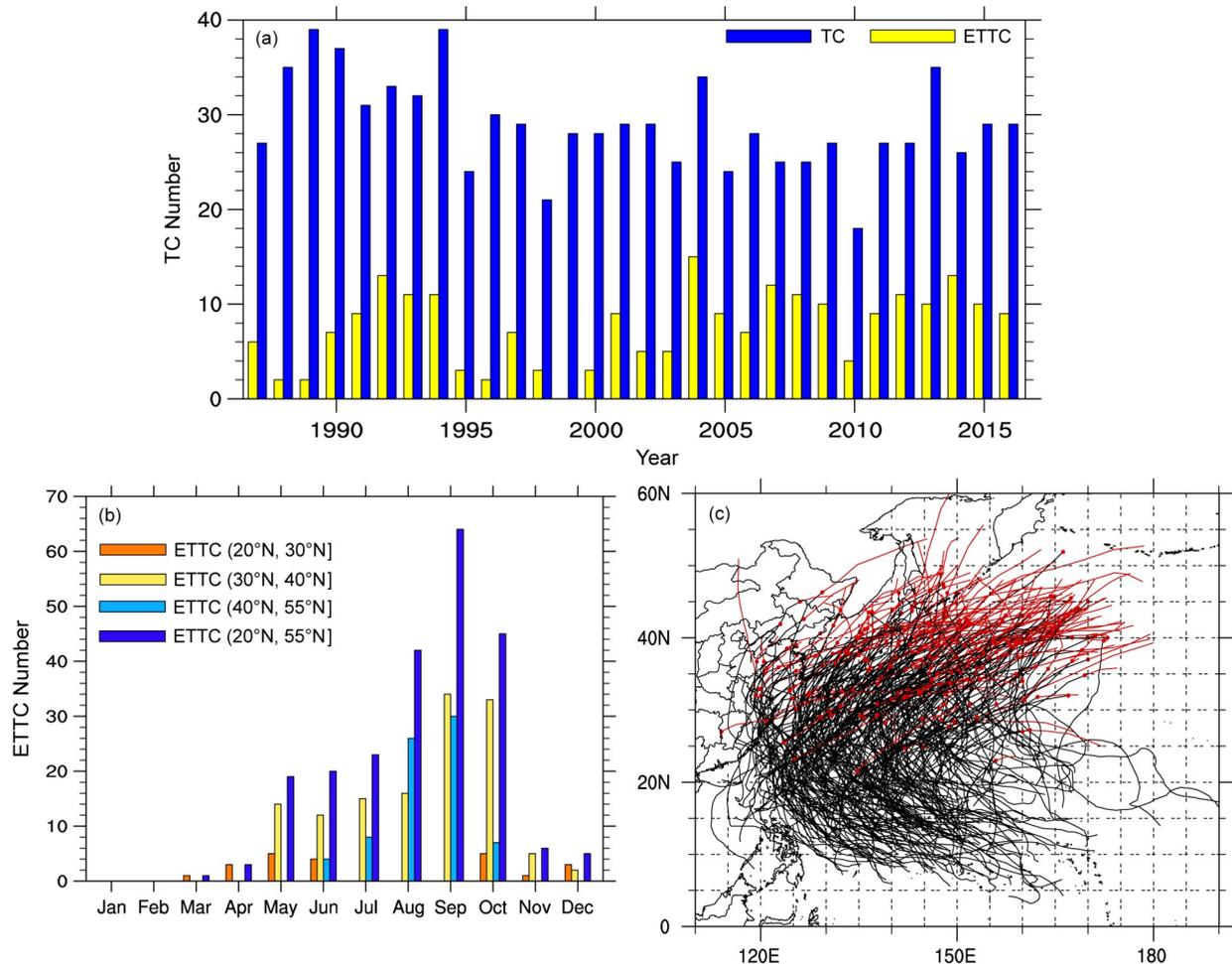


图1 1987~2016年 (a) ETTC、总TC频数的年际分布, (b) ETTC变性时其频数的纬度一月际分布, 以及 (c) TC路径分布。图c中黑线为变性前, 红线为变性后, 红色点为变性位置

Fig. 1 (a) Interannual variations of ETTCs (extratropical transitioned tropical cyclones) and total TCs (tropical cyclones) numbers, (b) monthly-zonal variation of ETTCs number at the extratropical transition (ET) time, (c) tracks of TCs during 1987-2016. Black (red) lines represent tracks before (after) ET, and red points represent geographic positions of the ET

ETTC路径大多为西北行转向东北行或偏北行。TC发生变性, 通常在其转向后东北行或偏北行过程中, 位置分布在(20°~55°N, 110°~175°E)范围内。TC完成变性时, 其中心位置最南到达21.5°N, 是9436号台风“Bobbie”, 发生在12月; 最东到达173°E, 是9215号台风“Nina”, 发生在8月。在20°~30°N较低纬度变性的TC仅占ETTC的9.6%, 主要出现在3~6月及10~12月(图1b橘色柱); 在30°~40°N变性的TC占比达57.5%, 5~12月均有出现(图1b浅黄色柱); 在40°N以北变性的TC占32.9%, 出现在6~10月(图1b浅蓝色柱)。

### 3.2 ETTC移速和强度变化

计算1987~2016年TC变性期间228个ETTC

样本逐6h移速。变性完成时和变性完成前6h移速相比, 移速增加的TC约占57%, 移速减慢约占43%, 分布均匀(图2a); 约86.4%的样本6h移速差值集中在 $\pm 20 \text{ km h}^{-1}$ 以内(图2b), 个别可达到 $\pm 45 \text{ km h}^{-1}$ 。

从228个ETTC中心气压及其近中心最大风速来看, TC变性期间其强度大部分减弱或维持(图略)。变性完成时与变性完成前6h相比, 中心最低气压降低的仅占10.5%, 而升高的占55.4%, 其余维持不变; 近中心最大风速增大的仅占1.8%, 减小的占57.9%, 其余维持不变。变性后各时次与变性时相比, 强度减弱或维持的占大多数(图略)。变性前后以TC中心最低气压和TC近中心最大风

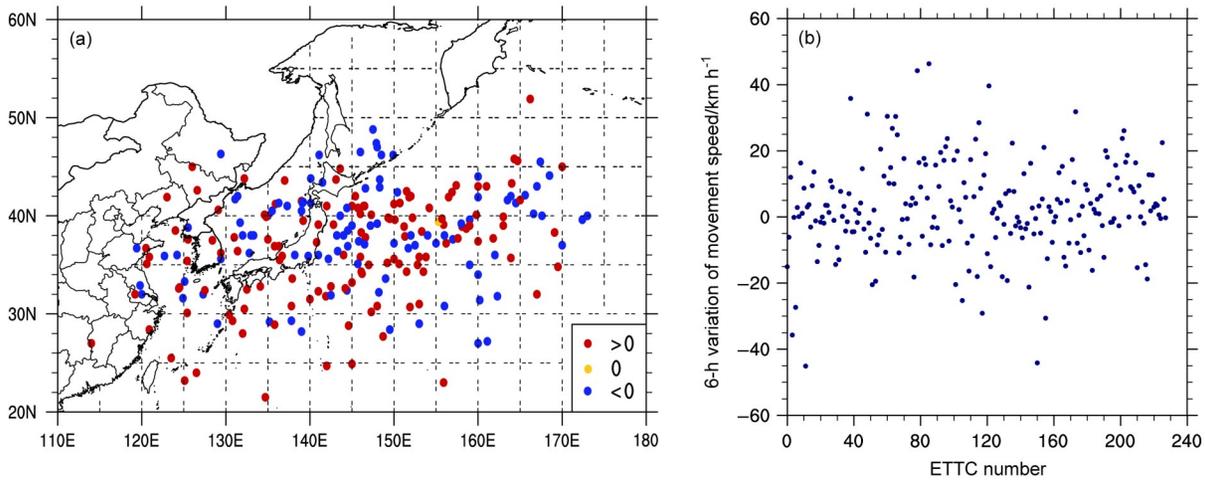


图2 1987~2016年TC变性时移速6 h变化的 (a) 空间分布 (红点: 变性时移速增大; 黄点: 变性时移速不变; 蓝点: 变性时移速减小), (b) 散点图, 纵轴为ETTC移速6 h变化, 单位:  $\text{km h}^{-1}$

Fig. 2 6-h variation of the movement speed of TC at ET time during 1987–2016: (a) Extratropical transitioned positions (red points: moving faster at ET time; yellow points: speed keeping constant at ET time; blue points: moving slower at ET time); (b) scatter diagram, y-axis indicates 6-h variation of ETTCs movement speed (units:  $\text{km h}^{-1}$ )

速变化描述的TC强度变化比例存在一定差异, 这主要因为中心最低气压由近中心最大风速根据风压关系推算而来, 而风压关系并不是严格的一一对应, 且风压关系在热带气旋阶段和温带变性阶段遵从不同规则 (Ying et al., 2014), 但二者的变化皆显示, TC变性期间强度大多减弱或维持。

西北太平洋TC变性主要发生在夏季和秋季的中纬度地区, 低纬度变性的情况占比较少, 且主要出现在春夏和秋冬交替季节。TC变性大多发生在其转向后东北行或偏北行中, 变性时移速加快的略偏多, 超过半数, 而强度减弱或维持的占大多数, 仅约10.5%中心气压降低。

## 4 风及降水分布变化

### 4.1 风场结构变化

#### 4.1.1 特定风速圈半径与最大风速半径

利用2002~2016年JTWC最佳路径资料中的特定风速圈半径以及最大风速半径信息, 分析变性过程中TC东北 (NE)、西北 (NW)、西南 (SW)、东南 (SE) 四象限34节风圈半径及最大风速半径的变化。其间包含71个ETTC, 但不同时次34节风圈半径有效记录数不定, 样本量有所变化 (参见图3b)。

图3a显示变性前36 h至变性后6 h的34节风圈

样本平均半径值的分布, 可见其在东北象限和西北象限明显大于西南象限和东南象限。且四象限中的最大值 (出现在东北象限) 与最小值 (变性前6 h及变性时为东南象限, 其他时次为西南象限) 的差值在变性前36 h不足40 km, 而变性后6 h增大到55 km以上。说明变性过程中, 34节风圈半径在TC中心北侧明显大于南侧, 且差异略有增大, 即TC非对称性略有增强。另外, TC东北、西北及东南象限34节风圈半径均在变性前6 h减小到最低值 (西南象限在变性前12 h减小到最低值), 其后有回升趋势。由于变性后样本数锐减, 后期趋势可信度较低。

而TC最大风速样本平均半径总体呈现增大的趋势 (图3b), 从变性前12 h以后增大明显, 由57 km (变性前18 h) 增大到66 km (变性前12 h)。而近中心最大风速呈现减小的趋势, 变性前减小更迅速, 变性后减小明显变缓。由于变性后样本数锐减, 后期趋势变化可信度较低。

TC从变性前36 h至变性后6 h, 各象限34节风圈半径大致趋于减小后期略增, 其中北侧半径大于南侧, 象限间半径差异趋于增大, TC非对称性略有增强。TC近中心最大风速减小, 最大风速半径呈现增大的趋势, 说明TC变性过程中强度减弱, 内核结构趋于松散。

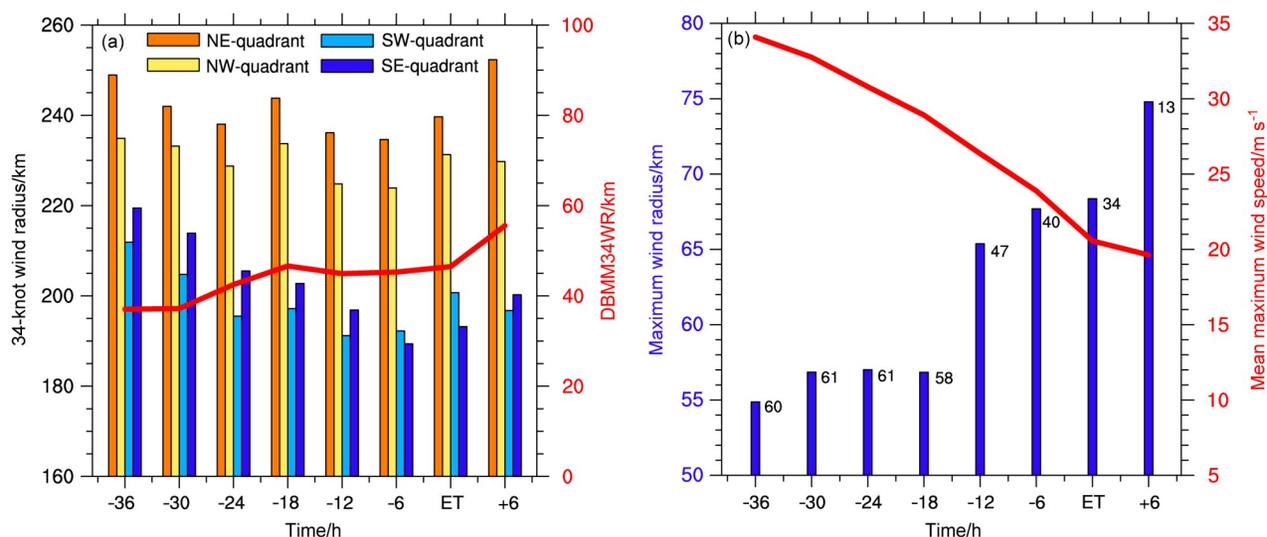


图3 2002~2016年TC变性前36 h至变性后6 h样本平均的 (a) 34节风圈半径(柱, 单位: km)、(b) 最大风速半径均值(柱, 单位: km) 随时间的变化。图a中, 红色线为最大值与最小值之差(右侧纵坐标, 单位: km)。图b中, 红线为中心最大风速均值(右侧纵坐标, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), 柱状顶端右侧数字为该时次的样本数

Fig. 3 Temporal variations of mean (a) 34-knot wind radius (bars, units: km), (b) the maximum wind radius (bars, units: km) from 36 h before ET to 6 h after ET during 2002–2016. In Fig. a, the red line represents the difference between the minimum and maximum 34-knot wind radiuses (DBMM34WR, right y-axis, units: km) at each time. In Fig. b, the red line represents mean maximum wind speed (right y-axis, units:  $\text{m s}^{-1}$ ), and the number at the right top of each bar is the sample number of ETTCs

#### 4.1.2 平均风速及强风分布变化

采用NOAA/NESDIS全球多平台热带气旋风场资料(MTCSWA), 计算2007~2016年55个ETTC(由于TC变性后维持时间不同及资料限制, 变性后参与计算的样本数减少: 变性后6 h样本数33个; 变性后12 h样本数15个; 变性后18 h样本数5个; 变性后24 h样本数1个)距TC中心100 km、300 km、500 km半径范围内东北、西北、西南、东南四象限10 m高度上风速( $V_{10}$ )的格点平均值及大风(风速 $\geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$ )出现比率(风速 $\geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$ 格点数除以该象限总格点数)。

从变性前24 h到变性后24 h各象限格点平均的 $V_{10}$ 来看, 100 km(图4a)、300 km(图4b)、500 km(图4c)不同半径范围内各时次均为东南象限最大, 东北象限次之, 西侧两象限则较小, 即TC中心东侧平均风速比西侧大。变性过程中, 各象限风速大体呈减小趋势, 其中100 km范围内减小趋势最为明显, 300 km次之, 500 km最弱。以东南象限为例, 变性前24 h至变性后24 h, 距TC中心100 km范围内, 格点平均 $V_{10}$ 从 $25 \text{ m s}^{-1}$ 减弱到不足 $10 \text{ m s}^{-1}$ ; 300 km范围内, 从 $21 \text{ m s}^{-1}$ 减弱到 $15 \text{ m s}^{-1}$ ; 500 km范围内, 则一直在 $17 \text{ m s}^{-1}$

左右。变性前, 距TC中心100 km范围内平均风速最大, 300 km范围内次之, 500 km范围内最小; 而变性后, 距TC中心100 km范围内平均风速最小, 300 km、500 km范围内平均风速值相当。

各象限大风出现比率及其随时间的变化特征与之类似。在距TC中心100 km(图4d)、300 km(图4e)、500 km(图4f)范围内, ETTC东侧大风出现比率均显著高于西侧。TC变性过程中, 不同范围内各象限大风出现比率有减小的趋势, 且100 km范围内减小趋势最为明显。

TC变性过程中, 各象限格点平均的 $V_{10}$ 以及大风出现比率均有减小趋势, 且内核区域减小最为明显, TC强风速区在径向上有一定外移。

为进一步探究西北太平洋TC变性过程中强风空间分布变化, 选取变性前24 h至变性后6 h均有数据的33个ETTC, 在距TC中心500 km范围内, 挑选10 m风速排序前20%的强值, 并累计其在各格点上的出现频数。

图5中暖色显示强风出现频数 $\geq 16$ 次的区域, 可见变性前24 h(图5a), 强风频数较高的区域主要在ETTC中心以西 $1^\circ$ 至以东 $3^\circ$ , 以南 $2^\circ$ 至以北 $2^\circ$

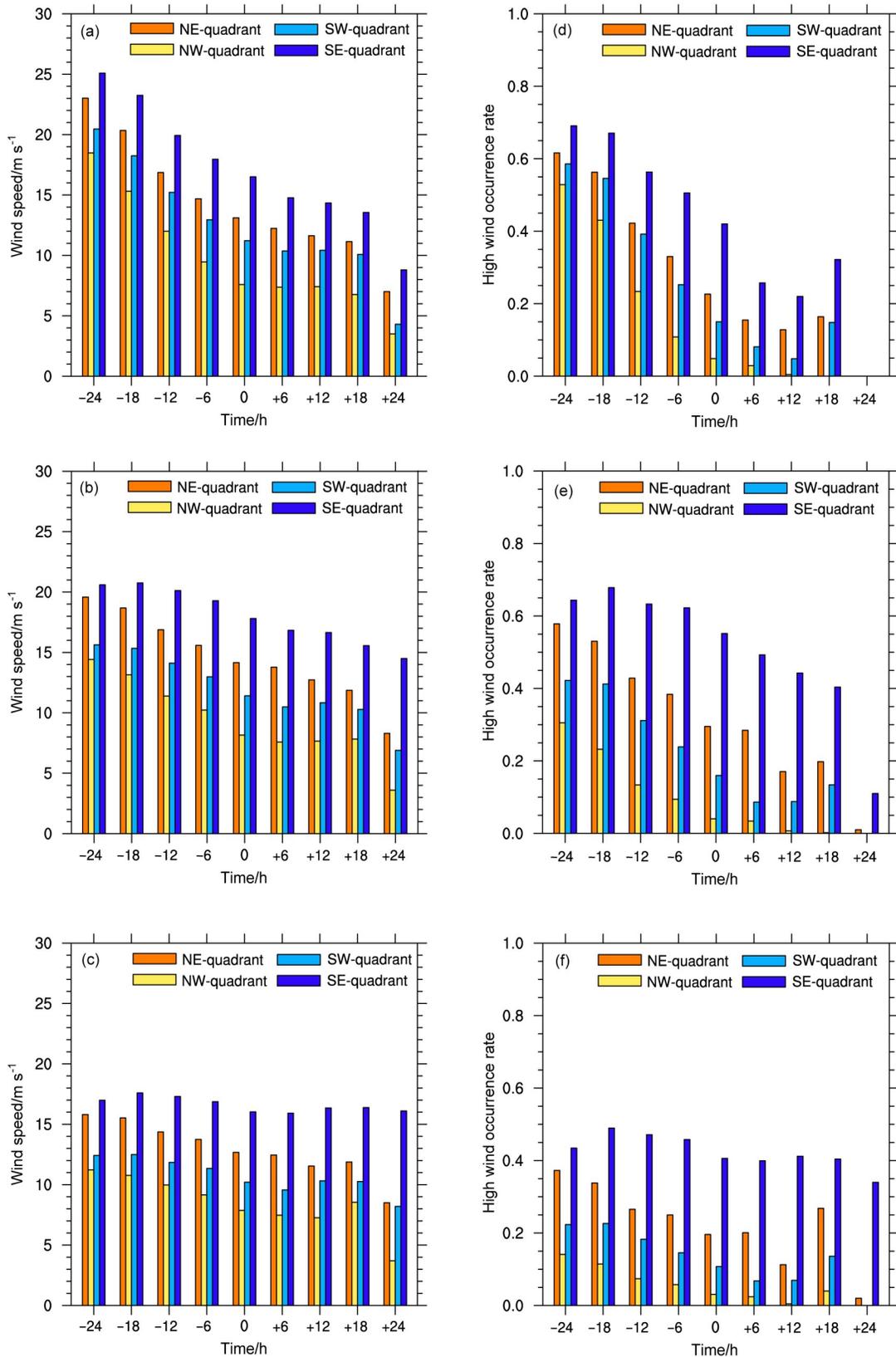


图4 2007~2016年TC变性前24 h至变性后24 h距TC中心 (a、d) 100 km、(b、e) 300 km、(c、f) 500 km 范围内各象限格点平均10 m 高度的 (a、b、c) 风速以及 (d、e、f) 大风 ( $\geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$ ) 出现比率随时间的变化

Fig.4 Temporal variation of (a, b, c) wind speed (units:  $\text{m s}^{-1}$ ) and (d, e, f) high wind ( $\geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$ ) occurrence rate in four quadrants at 10-m height from 24 h before ET to 24 h after ET within (a, d) 100 km, (b, e) 300 km, (c, f) 500 km from the TC center during 2007–2016

的椭圆范围内（中心附近圆形区域除外）。即变性前 24 h 强风更多出现在 TC 中心东北象限，其次是东南象限，其中大于 30 次的高频中心基本出现在东北象限。而西北象限与西南象限的高频区仅出现在近中心附近，2 个经纬度以外的区域仅有频数 5 次以下的零星分布。此后强风出现高频区在东北、西北、西南象限均有一定减小，而在东南象限则有一定的扩张（图略）。至变性前 6 h（图 5b），强风高频区主要出现在东南象限，高频中心（频数大于 30 次）也转移至东南象限。之后至变性后 6 h（图 5c、d），强风高频区维持在东南象限。但最高频数

减小，即不同样本 TC 强风出现位置（相对 TC 中心）的重合率降低。

TC 变性前 24 h 至变性后 6 h，大风出现高频区从东北象限转至东南象限，即强风区趋向出现在 TC 路径右、后侧，这与 Rogers and Uhlhorn (2008)、Uhlhorn et al. (2014) 研究结论相符。这种特征与大多 ETTC 为西北转向东北或偏北的移动路径有关。期间 TC 从副热带高压西南侧或西侧移至其西北侧，两者之间的气压梯度大值也随之变化，由 TC 东北侧或东侧转向东南侧，进而造成强风速高频区的相应改变。

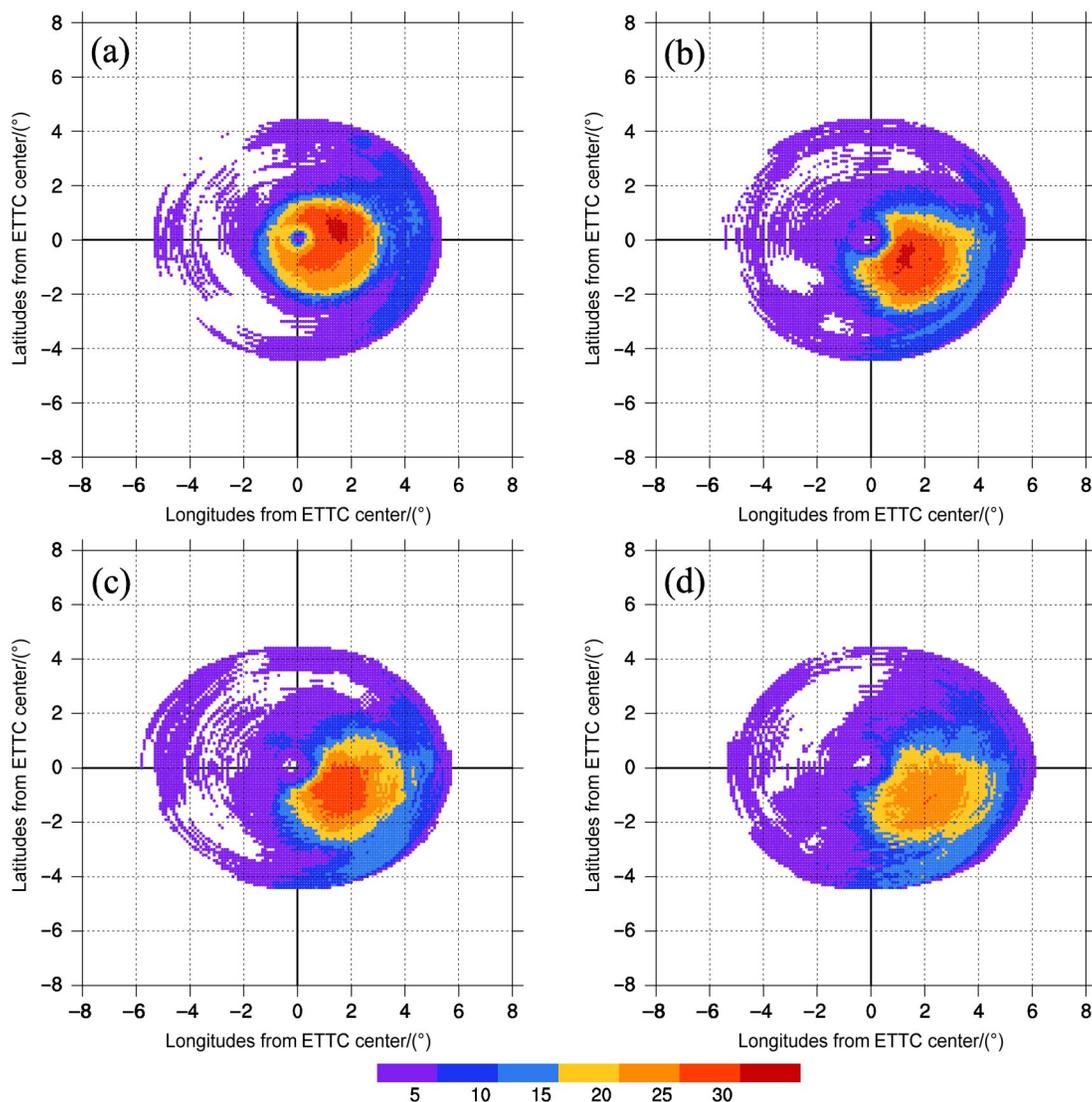


图5 2007~2016年距ETTC中心500 km范围内前20%强风频数（彩色阴影）分布：(a) 变性前24 h；(b) 变性前6 h；(c) 变性时；(d) 变性后6 h。横、纵轴分别代表距离ETTC中心经、纬度数

Fig. 5 Distribution of the top 20% high wind frequency (color shadings) within 500 km from the ETTCs center during 2007–2016: (a) 24 h before ET; (b) 6 h before ET; (c) ET time; (d) 6 hours after ET. The x-axis and y-axis represent longitudes and latitudes from ETTC center, respectively

## 4.2 降水变化

### 4.2.1 对流活动变化

利用MTSAT-2及Himawari-8卫星资料云顶黑体辐射温度( $T_{BB}$ )信息,统计2000~2016年90个ETTC(由于TC变性后维持时间不同,变性后参与计算的样本数减少:变性后6h样本数70个;变性后12h样本数49个;变性后18h样本数37个;变性后24h样本数23个)距TC中心100 km、300 km、500 km范围内东北、西北、西南、东南四个象限强对流点( $T_{BB} \leq -32^\circ\text{C}$ )出现比率(该象限 $T_{BB} \leq -32^\circ\text{C}$ 的格点数除以该象限总格点数),探讨TC变性过程中对流活动的演变。

从TC变性前24 h至变性后24 h不同象限分布来看,距TC中心100 km(图6a)、300 km(图略)、500 km(图6b)范围内,强对流点出现比率呈现减小的趋势,且以100 km范围内最为显著,变性前24 h为0.6左右,至变性后12 h不足0.1,而变性后18 h有微弱回升。强对流点比率由距TC中心100 km范围内最高,500 km范围内最低,逐渐转化为500 km范围内最高,100 km范围内最低。这说明变性过程中对流活动以减弱为主,且在内核区域减弱最为显著。比较不同象限强对流比率发现,各范围均在东北象限最高,西北象限次之,且随范围增大,不同象限间差异也增大。距TC中心100 km范围内,东北、西南象限强对流

点比率差异不足0.2,且从变性前18 h起基本呈现减小趋势;而500 km范围内,变性前12 h东北、西南象限强对流点比率差异达0.4,变性后24 h减小到0.2。即ETTC各象限对流活动分布在内核区差异较小,而在外围则差异明显,非对称性明显。

### 4.2.2 降水量变化

利用CMORPH降水资料,计算1998~2016年155个ETTC变性过程中(变性后TC维持时间不一致,参与计算的样本数减少:变性后6 h样本数135个;变性后12 h样本数115个;变性后18 h样本数76个;变性后24 h样本数49个)距TC中心100 km、300 km、500 km范围各象限6 h降水的格点累积总量和降水强度(降水量大于0 mm的格点降水平均值)。

从变性前24 h至变性后24 h格点累计6 h降水量的样本平均来看,距TC中心100 km(图7a)、300 km(图略)、500 km(图7b)范围内各时次均表现为东北象限最高,西北象限次之,西南象限最低的空间特征。且随范围增大,这种象限间的差异表现得愈加明显。500 km范围内,TC北侧降水量比南侧多1倍以上。

在变性过程中距TC中心100 km(图7a)和300 km(图略)范围内各象限降水量以减小为主,100 km范围内,变性后24 h各象限降水总量

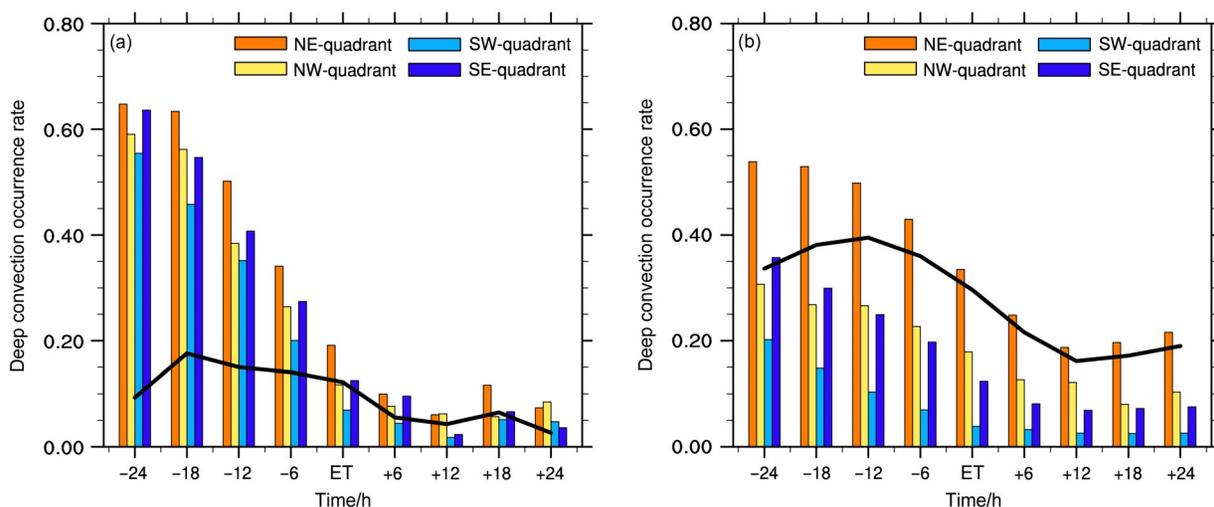


图6 2000~2016年TC变性前24 h至变性后24 h距TC中心(a)100 km、(b)500 km内四个象限强对流点( $T_{BB} \leq -32^\circ\text{C}$ )出现比率随时间的变化。黑线为NE象限和SW象限出现比率的差值

Fig. 6 Temporal variation of deep convection ( $T_{BB} \leq -32^\circ\text{C}$ ) occurrence rate in four quadrants from 24 h before ET to 24 h after ET within (a) 100 km and (b) 500 km from the TC center. The black line represents the difference of deep convection rates between the NE quadrant and SW quadrant

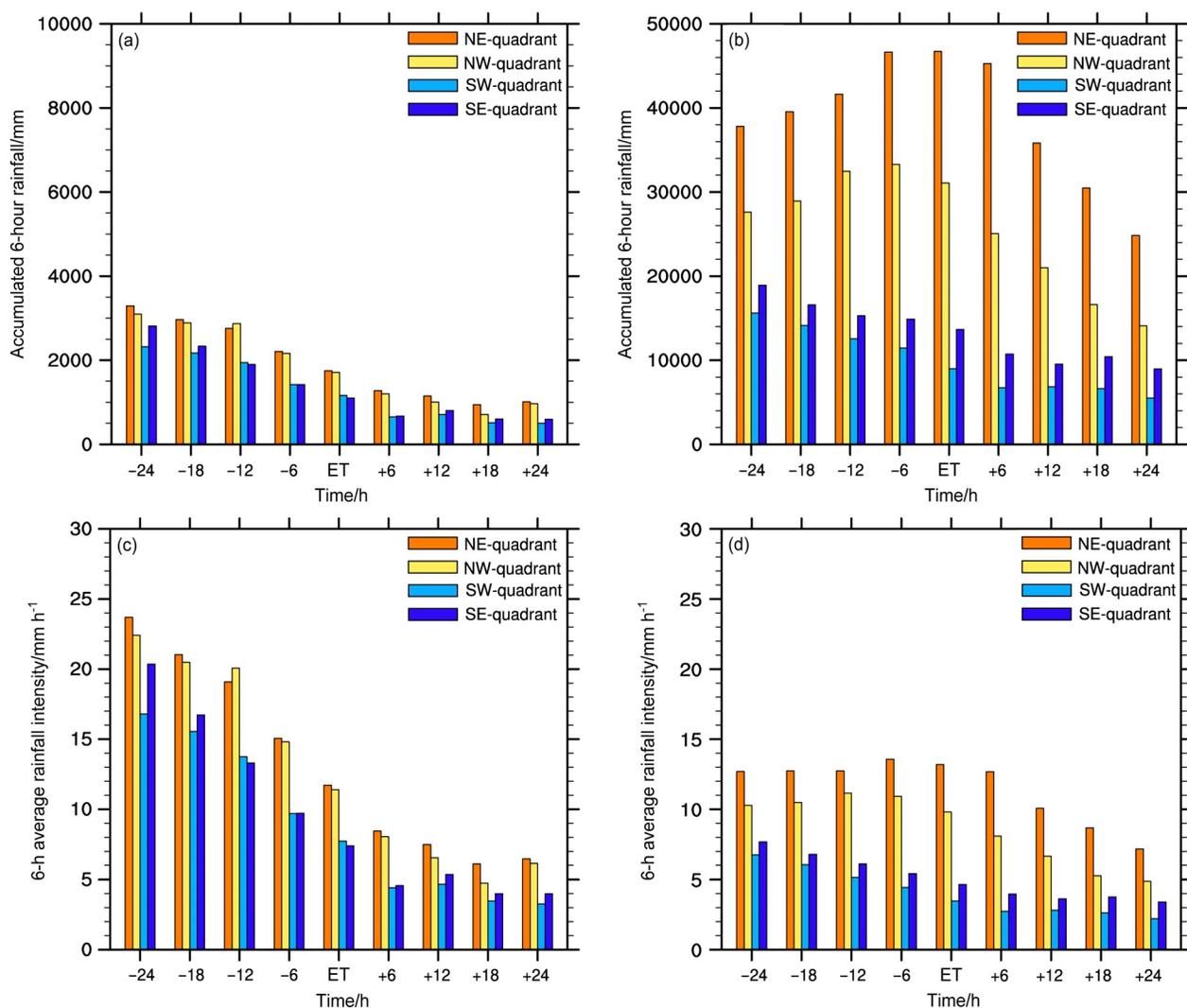


图7 1998~2016年TC变性前后24 h间距TC中心 (a、c) 100 km、(b、d) 500 km 范围内样本平均的各象限格点 (a、b) 累计6 h降水量以及 (c、d) 6 h降水强度随时间的变化

Fig. 7 Temporal variation of (a, b) accumulated 6-hour rainfall (units: mm) and (c, d) 6-h average rainfall intensity (units: mm h<sup>-1</sup>) in four quadrants from 24 h before ET to 24 h after ET within (a, c) 100 km and (b, d) 500 km from the TC center

不足变性前24 h的三分之一。以东北象限为例，变性前24 h降水总量3300 mm左右，变性后24 h，降水总量1000 mm左右。而500 km范围内(图7b)，东北、西北象限降水总量呈现先增大后减小的趋势。以东北象限为例，降水总量在变性前6 h达到峰值，至变性后6 h略减小，之后减小趋势明显。而南侧两象限降水总量则呈现随时间减小的趋势。

不同范围内各象限格点平均降水强度时间变化与其累计降水类似(图7c、d)。各时次降水强度都呈现TC中心北侧象限大于南侧象限的分布特征，变性过程中都有减小的趋势。距TC中心100

km范围内降水强度减小趋势最为显著，从20 mm左右减小到不足10 mm。而500 km范围内，在变性前6 h左右，TC中心北侧象限有小幅增大，之后缓慢减小。说明台风变性期间其北侧外围降水强度略有增强。

#### 4.2.3 强降水分布

为研究TC变性过程中强降水分布的变化，选取1998~2016年变性维持至少18 h的76个样本，利用CMORPH降水资料，挑选变性前24 h至变性后18 h距TC中心800 km范围内格点6 h降水量排序前20%强值，统计各格点上强降水出现频数(图8)。

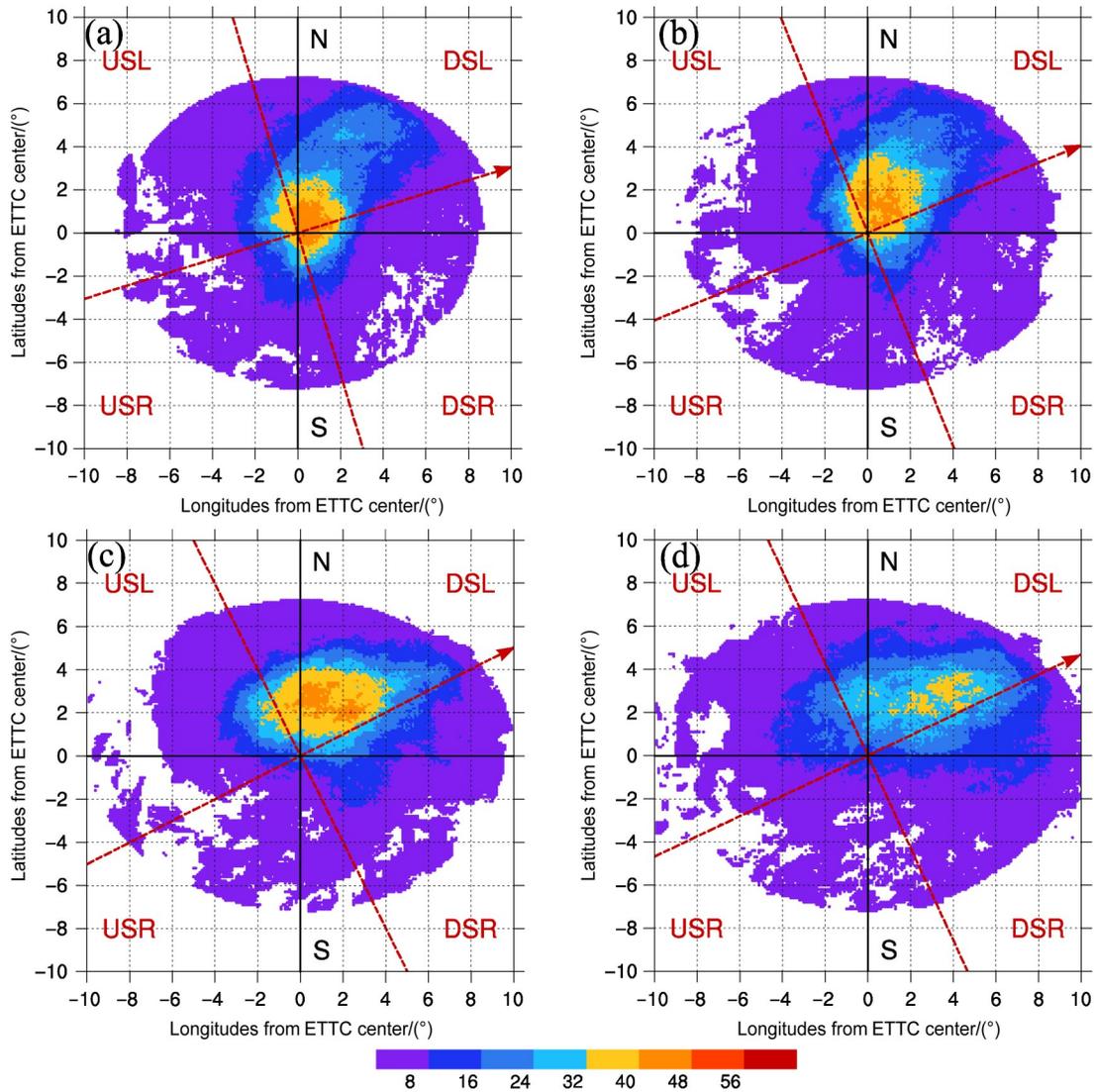


图8 1998~2016年距ETTC中心500 km范围内前20%强降水频数(彩色阴影)分布:(a)变性前24 h;(b)变性前12 h;(c)变性时;(d)变性后12 h。横、纵轴分别表示距离ETTC中心经、纬度数,红色箭头为合成环境风垂直切变(VWS)方向,USL、DSL、USR、DSR分别代表逆切变左侧、顺切变左侧、逆切变右侧和顺切变右侧

Fig. 8 Distribution of the top 20% strong rainfall frequency (color shadings) within 500 km from the ETTC center during 1998–2016: (a) 24 h before ET; (b) 12 h before ET; (c) ET time; (d) 12 hours after ET. The x-axis and y-axis represent longitudes and latitudes from ETTC center, respectively. The red arrows represent the direction of composite environmental VWS (vertical wind shear). USL, DSL, USR, DSR represent upshear left, downshear left, upshear right, downshear right, respectively

图8中暖色显示强降水出现频数 $\geq 33$ 次的区域。变性前24 h(图8a),强降水高频区主要分布在ETTC中心以西 $1^\circ$ 至以东 $2^\circ$ ,以南 $2^\circ$ 至以北 $2^\circ$ 的范围内,其中东北象限占比最多,西南象限占比最少。变性过程中,强降水高频区明显向北移,主要位于TC东北象限。至变性时(图8c),高频区全部移至TC中心北侧,且范围向东北方向扩展,南侧区域频数皆小于25次。变性后(图8d)强降水高频区主要在东北象限,频数大于32次的格点数

明显减小,TC中心以南强降水频数皆小于17次。说明TC变性后,强降水大都出现在中心北侧,尤其是其东北象限,而中心南侧出现强降水的频数则较小。这与强风频数的分布演变有所不同。

TC变性过程中,风及降水的强度和分布都发生了明显变化。TC内核区风力、对流活动及降水量均明显减弱;强风及强降水高频区向外围不对称扩张,强风主要出现在ETTC东侧,而强降水主要出现在ETTC北侧。

### 4.3 ETTC风及降水分布与环境水平风垂直切变

不少研究表明,环境水平风垂直切变(VWS)影响TC的风及降水分布。较强的降水及对流活动主要发生在顺切变及顺切变左侧(Chen et al., 2006; Klotz and Jiang, 2016)。而对于风分布,VWS的影响次于TC运动的影响,在去除TC运动矢量后,强风亦主要出现在顺切变左侧(Uhlhorn et al., 2014; Klotz and Jiang, 2016)。

选取1987~2016年变性后至少维持18 h的118个ETTC,分别计算变性前24 h至变性后18 h距TC其中心800 km范围内环境风的整层(200~850 hPa)、高层(200~500 hPa)及低层(500~850 hPa)垂直切变,探讨变性过程中环境风垂直切变与ETTC风及降水分布的关系。

图9给出TC变性前24 h、变性时、变性后18 h的VWS分布盒须图。变性前24 h(图9a),整层VWS值主要集中在 $10 \text{ m s}^{-1}$ 至 $20 \text{ m s}^{-1}$ 之间,最大值不超过 $30 \text{ m s}^{-1}$ 。高层、低层VWS均小于整层,主要集中在 $4 \text{ m s}^{-1}$ 至 $10 \text{ m s}^{-1}$ ,最大值不足 $20 \text{ m s}^{-1}$ 。变性时(图9b),整层VWS有明显的增大,50%(第25~75百分位)集中在 $20 \text{ m s}^{-1}$ 至 $30 \text{ m s}^{-1}$ ,最大值超过 $40 \text{ m s}^{-1}$ 。高层、低层VWS也有 $6 \text{ m s}^{-1}$ 左右的增大。变性后18 h(图9c),50%(第25~75百分位)集中在 $20 \text{ m s}^{-1}$ 至 $40 \text{ m s}^{-1}$ 区间内,整层VWS最大值超过 $50 \text{ m s}^{-1}$ ,高层VWS增大,低层变化不明显。说明变性过程中TC环境风垂直

切变增大,其中高层增大更明显。

变性前24 h至变性后18 h,不同层次VWS方向均指向东北或东南,其中指向东南的占比较少。变性前24 h,整层VWS指向东南的TC占32%,至变性后18 h减少至17%(图略)。而指向东北的由变性前的68%增大到83%。这有利于TC云系趋向于TC北侧。

为研究VWS对变性TC强风分布的影响,将4.1.2节中探究强风分布变化的33个样本,去除TC移动速度后,计算距TC中心500 km范围内10 m高度风速排序前20%的强风在格点上的出现频数(图10)。图10中红色箭头代表该时次33个样本的合成VWS(整层)方向。可见去掉TC移动速度后,较强风速更趋于出现在西北象限和东北象限,即切变左侧(SL)。变性后主要出现在是顺切变左侧(DSL)(图10c、d);且从变性前24 h至变性后6 h较强风重合频数明显减小。此分布与不去除TC移动速度时有所不同(参见图5),后者的强风主要分布在东南象限即TC运动方向右侧,反映出TC的运动对其强风分布的重要影响。

而变性TC的对流活动与强降水分布受较强的VWS影响,ETTC对流活动在东北象限更为旺盛,强降水也主要出现在东北象限,西北象限次之。即出现在顺风切方向以及顺风切左侧(图8)。可见VWS对ETTC强降水的非对称分布有十分重要的影响。

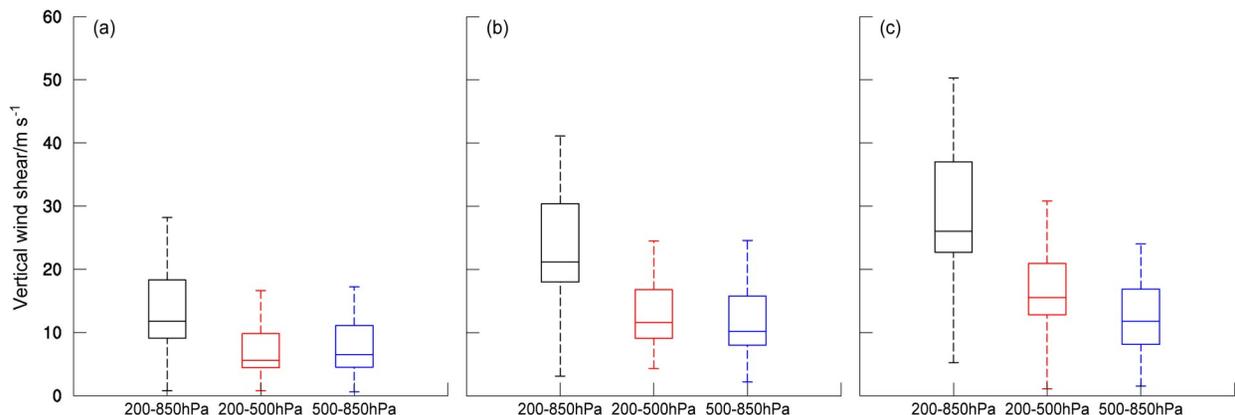


图9 1987~2016年距TC中心800 km范围内环境水平风垂直切变盒须图:(a)变性前24 h;(b)变性时;(c)变性后18 h。盒内横线为中位数,盒上下边界分别为上下四分之一分位点

Fig. 9 Box plot of VWS within 800 km from the TC center during 1987–2016: (a) 24 h before ET; (b) ET; (c) 18 h after ET. The line in the box represents the median, the top and the base of the box represent lower quartile and upper quartile

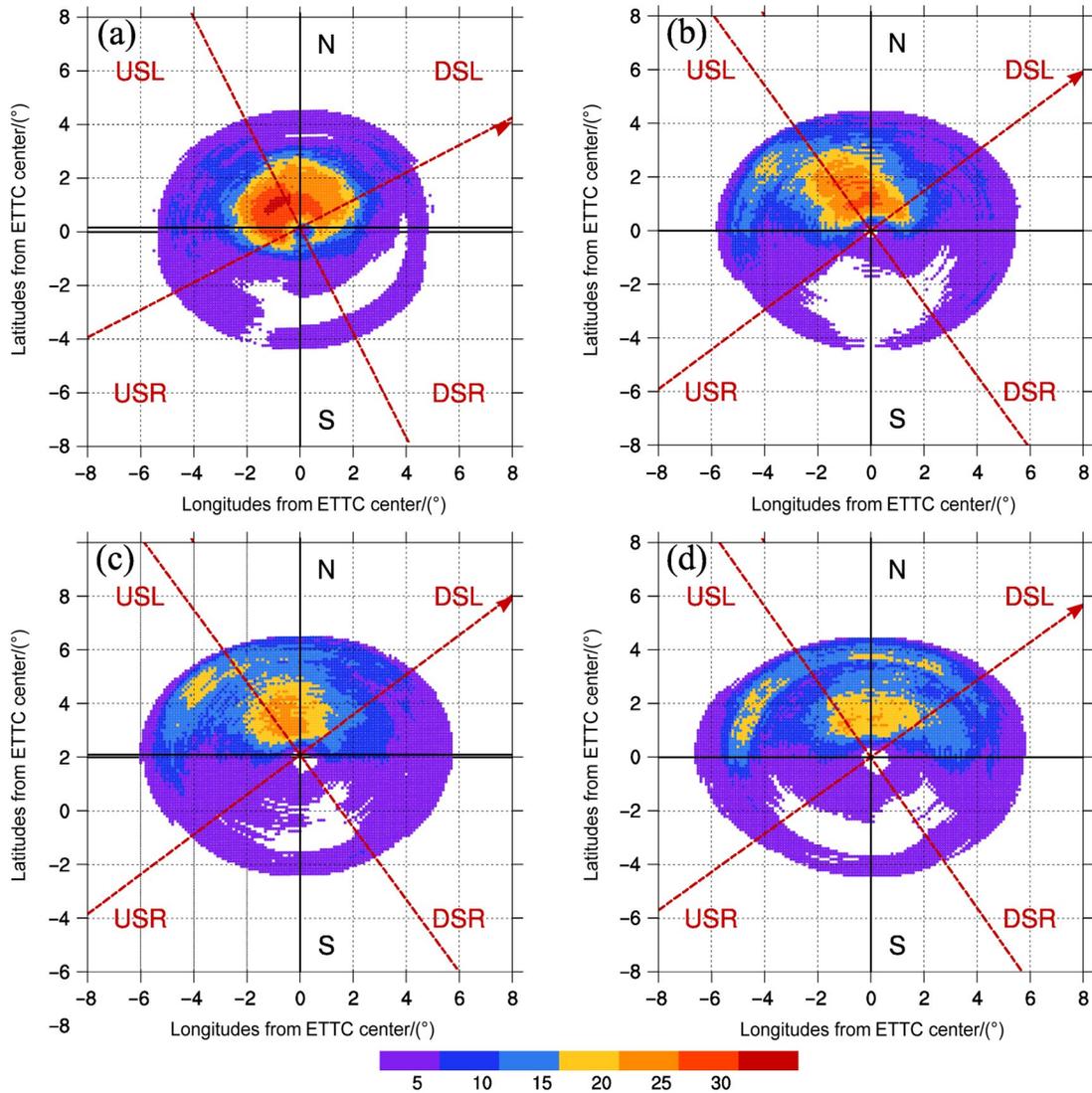


图10 1987~2016年去掉ETTC运动后,距ETTC中心500 km范围内强风(前20%)频数(彩色阴影)分布:(a)变性前24 h;(b)变性前6 h;(c)变性时;(d)变性后6 h。横、纵轴分别表示距ETTC中心经、纬度数,红色箭头代表合成的VWS方向,USL、DSL、USR、DSR分别代表逆切变左侧、顺切变左侧、逆切变右侧和顺切变右侧

Fig. 10 Distribution of top 20% high wind (removing ETTC motion) frequency within 500 km from the ETTC center during 1987–2016: (a) 24 h before ET; (b) 6 h before ET; (c) ET time; (d) 6 hours after ET. The x-axis and y-axis represent longitudes and latitudes from ETTC center, respectively. The red arrows represent the directions of composite environmental VWS. USL, DSL, USR, DSR represent upshear left, downshear left, upshear right, downshear right, respectively

## 5 小结与讨论

利用CMA、JTWC最佳路径资料,NOAA的MTCSWA资料、CMORPH卫星降水资料以及日本卫星云顶黑体辐射温度( $T_{BB}$ )资料等,分析1987~2016年西北太平洋近30年内228个ETTC的活动特征,风及降水分布及其演变特征。结果表明:

(1) 西北太平洋ETTC年均7.6个,主要出现在5~10月,其中8~10月占全年的66%,峰值出

现在9月。ETTC约90%出现在30°N以北,主要发生在夏季和秋季;约10%出现在30°N以南较低纬度,主要发生在春夏和秋冬交替季节。

(2) ETTC大多为西北行转向东北行或偏北行路径。变性通常发生在其转向后东北行或偏北行过程中。变性时半数以上TC移速加快,大多数强度减弱或维持,仅约10.5%中心气压降低。

(3) TC变性过程中最大风速半径增大,近中心附近最大风速减小,内核结构趋于松散。其各象

限平均 34 节风圈半径北侧明显大于南侧且差异逐渐增大, 风场结构非对称性增强。变性过程中, 强风区主要出现在 ETTC 东侧, 其高频中心从东北象限转向东南象限。即强风趋向于出现在路径的右、后侧。

(4) TC 变性过程中的对流分布、降水强度都发生明显变化。内核区对流活动、降水量均明显减弱, 强降水主要出现在 ETTC 北侧, 且其高频区向东北象限外围扩张, 非对称性分布特征明显。

(5) 环境水平风垂直切变 (VWS) 对 ETTC 的风及降水分布有重要影响。ETTC 大多处于较强的西南风 VWS 中, 强降水出现在顺风切方向以及顺风切左侧, 不考虑 TC 移速时, ETTC 强风出现在风切左侧。

值得注意的是, 目前对于 TC 是否发生变性以及变性时刻的判定, 日本气象厅 (JMA)、JTWC、CMA 采用方法不同, 结果有一定差异。本文采用 CMA 最佳路径资料, 所得研究结果也存在一定的资料误差。但考虑 TC 变性是一个过程, 对这一过程中 TC 风及降水分布变化的统计结果仍有一定参考价值。同时, 由于 ETTC 维持的时间不同, 变性后各时次统计样本数有所减少, 变化趋势可信度也有所降低。另外, 本文采用多种资料进行分析, 不同资料对 TC 中心的定位也存在一定的差异。这里采取以 TC 中心为原点的坐标系进行分析, 在一定程度上减小了定位误差。

### 参考文献 (References)

- Abraham J, Strapp W J, Fogarty C, et al. 2004. Extratropical transition of hurricane Michael: An aircraft investigation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(9): 1323–1339. doi:10.1175/BAMS-85-9-1323
- Chen S S, Knaff J A, and Marks F D 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 3190–3208.
- Fogarty C T, Greatbatch R J, Ritchie H. 2007. The use of a vortex insertion technique to simulate the extratropical transition of hurricane Michael (2000) [J]. *Wea. Forecasting*, 22(3): 480–500. doi: 10.1175/WAF1014.1
- Hart R E, Evans J L. 2001. A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones [J]. *J. Climate*, 14(4): 546–564. doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<0546:ACOTET>2.0.CO;2
- Jones S C, Harr P A, Abraham J, et al. 2003. The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions [J]. *Wea. Forecasting*, 18(6): 1052–1092. doi: 10.1175/1520-0434(2003)018<1052:TETOTC>2.0.CO;2
- 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(4): 373–395. doi:10.1175/1520-0434(2000)015<0373:ETOWNP>2.0.CO;2
- Klotz B W, Jiang H Y. 2016. Global composites of surface wind speeds in tropical cyclones based on a 12 year scatterometer database [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(19): 10480–10488. doi:10.1002/2016GL071066
- 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 (9711) during its extratropical transition process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(3): 629–639. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.18
- 李英, 陈联寿, 雷小途. 2013. Winnie (9711) 台风变性加强过程中的降水变化研究 [J]. *大气科学*, 37(3): 623–633. Li Ying, Chen Lianshou, Lei Xiaotu. 2013. Study on rainfall variation associated with typhoon Winnie (9711) during its extratropical transition process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(3): 623–633. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11.213
- 李侃, 彭义峰, 王吉明, 等. 2012. 台风 Matsa (2005) 和 Wipha (2007) 变性过程对比分析 [J]. *气象与减灾研究*, 35(3): 26–32. Li Kan, Peng Yifeng, Wang Jiming, et al. 2012. Comparative analysis on the extratropical transition processes of typhoons Matsa (2005) and Wipha (2007) [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese)*, 35(3): 26–32. doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2012.03.004
- Liu M F, Smith J A. 2016. Extreme rainfall from landfalling tropical cyclones in the eastern United States: Hurricane Irene (2011) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 17(11): 2883–2904. doi:10.1175/JHM-D-16-0072.1
- Loridan T, Khare S, Scherer E, et al. 2015. Parametric modeling of transitioning cyclone wind fields for risk assessment studies in the western North Pacific [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(3): 624–642. doi:10.1175/JAMC-D-14-0095.1
- Matyas C J. 2013. Processes influencing rain-field growth and decay after tropical cyclone landfall in the United States [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(5): 1085–1096. doi: 10.1175/JAMC-D-12-0153.1
- Qian W H, Huang J, Du J. 2016. Examination of hurricane Sandy's (2012) structure and intensity evolution from full-field and anomaly-field analyses [J]. *Tellus*, 68(1): 29029. doi: 10.3402/tellusa.v68.29029
- Quinting J F, Bell M M, Harr P A, et al. 2014. Structural characteristics of T-PARC typhoon Sinlaku during its extratropical transition [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142(5): 1945–1961. doi: 10.1175/MWR-D-13-00306.1
- Rogers R, Uhlhorn E. 2008. Observations of the structure and evolution of surface and flight-level wind asymmetries in hurricane Rita (2005) [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(22): L22811. doi: 10.1029/

- 2008GL034774
- 孙红梅, 汤杰, 雷小途. 2014. 不同数据集下西北太平洋热带气旋变性特征比较 [J]. 热带气象学报, 30(3): 443-454. Sun Hongmei, Tang Jie, Lei Xiaotu. 2014. Comparisons of the characteristics of tropical cyclones experiencing transition in the western North Pacific based on different datasets [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30(3): 443-454. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.03.005
- 孙莎莎, 丛春华, 魏萌, 等. 2017. 1949~2014年影响山东的变性台风特征分析 [J]. 气象科技, 45(1): 158-164. Sun Shasha, Cong Chunhua, Wei Meng, et al. 2017. Characteristics of extratropical transitional typhoons from 1949 to 2014 affecting Shandong Province [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 45(1): 158-164. doi:10.19517/j.1671-6345.20160006
- Sun Y, Zhong Z, Wang Y. 2012. Kinetic energy budget of typhoon Yagi (2006) during its extratropical transition [J]. Meteor. Atmos. Phys., 118(1-2): 65-78. doi:10.1007/s00703-012-0200-1
- Uhlhorn E W, Klotz B W, Vukicevic T, et al. 2014. Observed hurricane wind speed asymmetries and relationships to motion and environmental shear [J]. Mon. Wea. Rev., 142(3): 1290-1311. doi:10.1175/MWR-D-13-00249.1
- 危国飞, 朱佩君, 江佳. 2014. 西北太平洋热带气旋变性过程结构演变及其环境分析 [J]. 热带气象学报, 30(3): 473-482. Wei Guofei, Zhu Peijun, Jiang Jia. 2014. Analysis of structure evolution and environmental conditions of tropical cyclones over the western North Pacific during extratropical transition [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 30(3): 473-482. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.03.008
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(2): 287-301. doi:10.1175/JTECH-D-12-00119.1
- 袁娟娟, 丁治英, 王莉. 2011. 1949~2007年登陆我国变性热带气旋的特征统计及合成分析 [J]. 热带气象学报, 27(4): 529-541. Yuan Juanjuan, Ding Zhiying, Wang Li. 2011. A statistical study and composite analysis on the characteristics of the extratropical transition of landfall typhoons during 1949-2007 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27(4): 529-541. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.010
- 张迎新, 李根娥, 张守保. 2008. 热带风暴海马变性前后的物理量诊断分析 [J]. 气象, 34(3): 49-55. Zhang Yingxin, Li Gen'e, Zhang Shoubao. 2008. Diagnoses analysis of physical characteristic changes of tropical storm Haima before and after its transformation [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34(3): 49-55. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.03.008
- 钟颖旻, 徐明, 王元. 2008. Chaba (0417) 台风变性前后热力结构特征 [J]. 应用气象学报, 19(5): 588-594. Zhong Yingmin, Xu Ming, Wang Yuan. 2008. Thermal structure characteristics of the extratropical transition of tropical cyclone Chaba (0417) [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19(5): 588-594. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2008.05.010
- 钟颖旻, 徐明, 王元. 2009. 西北太平洋变性台风时空分布特征 [J]. 气象学报, 67(5): 697-707. Zhong Yingmin, Xu Ming, Wang Yuan. 2009. Spatio-temporal distributive characteristics of extratropically transitioning tropical cyclones over the Northwest Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(5): 697-707. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.05.003
- Zhu P J, Zheng Y G, Zhang C X, et al. 2005. A study of the extratropical transformation of typhoon Winnie (1997) [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22(5): 730-740. doi:10.1007/BF02918716
- 朱先德, 王启, 陈优宽. 2010. 台风Mindulle变性再发展的特征及机理研究 [J]. 中国海洋大学学报, 40(8): 18-26. Zhu Xiande, Wang Qi, Chen Youkuan. 2010. Characteristics and mechanism analysis of extratropical transition and reintensification of Mindulle (2004) [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 40(8): 18-26. doi:10.3969/j.issn.1672-5174.2010.08.003