

西北太平洋环境风垂直切变和热带气旋移动对涡旋内对流非对称分布影响的特征分析^{*}

杨璐¹ 费建芳¹ 黄小刚¹ 程小平¹ 阳向荣^{1,2} 马占宏¹

YANG Lu¹ FEI Jianfang¹ HUANG Xiaogang¹ CHENG Xiaoping¹ YANG Xiangrong^{1,2} MA Zhanhong¹

1. 国防科技大学气象海洋学院, 南京, 211101

2. 中国人民解放军 75839 部队, 广州, 510510

1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China

2. PLA, 75839 Army, Guangzhou 510510, China

2017-01-19 收稿, 2017-07-03 改回.

杨璐, 费建芳, 黄小刚, 程小平, 阳向荣, 马占宏. 2017. 西北太平洋环境风垂直切变和热带气旋移动对涡旋内对流非对称分布影响的特征分析. 气象学报, 75(6):943-954

Yang Lu, Fei Jianfang, Huang Xiaogang, Cheng Xiaoping, Yang Xiangrong, Ma Zhanhong. 2017. Effects of vertical wind shear and tropical cyclone motion on asymmetric distribution of convective clouds in TCs over the western North Pacific. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(6):943-954

Abstract The FY-2 geostationary satellite black body temperature (TBB) data and NCEP global reanalysis data were used to investigate the asymmetric distribution of convective clouds (DCC) in the outer region of tropical cyclones (TCs) over the western North Pacific during 2005–2012. It is demonstrated that the environmental vertical wind shear (VWS) and TC motion are closely related to the DCC in TCs. When VWS is weak (<5 m/s), the DCC is located to the right front quadrant of the TC path in the lower troposphere due to friction-induced asymmetric boundary layer convergence. With increases in the VWS, the main zone of DCC changes from the right to the left quadrant of the TC path. This is because the VWS becomes the dominating factor leading to TC's convection asymmetric distribution and the convection is concentrated to the left of the downshear. On one hand, how large the convections deviate from the downshear is subject to the counter-clockwise flow of TC; on the other hand, it is related to the strength of VWS. The results also show that the direction of the VWS corresponds well to the heavy TBB's onewave asymmetry. When a TC is evolving in a strong VWS, TBB's one wave asymmetry becomes more obvious. Meanwhile, convections in the outer spiral rainbands region tend to the left of the downshear. For a weakened TC, the effect of the VWS is not distinct compared with that for a stronger one.

Key words Tropical cyclones, Mesoscale convection systems, Asymmetry distribution, Environmental vertical wind shear

摘 要 热带气旋(TC)预报特别是强度预报是当今大气科学研究和业务预报的重点、难点问题, TC环流内部的对流系统对气旋的结构和强度变化有着十分重要的影响。利用 FY-2C/2E 黑体亮温(TBB)资料和 NCEP 分析资料, 研究了 2005—2012 年西北太平洋热带气旋外雨带区的对流非对称分布特征, 及其与环境风垂直切变和 TC 移动的关系。分析发现, 整层风垂直切变的方向与 TBB 一波非对称大值区关于方位角的分布有很好的对应关系。在弱整层风垂直切变条件下(<5 m/s), TC 移动引起的非对称摩擦效应会使对流易出现在移动方向的右前象限。在中强整层风垂直切变条件下(>5 m/s), 风切变成为影响对流非对称分布的主要因子, TC 外螺旋雨带区的对流集中于顺风切方向及其左侧, 对流偏离顺风切变左侧的程度一方面受

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金项目(41230421、41675058)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB430101)。

作者简介: 杨璐, 主要从事热带气旋结构特征研究。E-mail: yanglulgd@sina.com

通讯作者: 费建芳, 主要从事灾害性天气形成机理和预报研究。E-mail: feijf@sina.com

到 TC 内逆时针环流的影响,另一方面与风垂直切变的强度有关:对于发展阶段的 TC,当风垂直切变增强时,一波非对称分布更加显著,切变越强,TC 强度越大,外雨带区的对流越偏离顺风切左侧;对于消亡阶段的 TC,风垂直切变的影响作用并不明显。

关键词 热带气旋, 中尺度对流系统, 非对称分布, 环境风垂直切变

中图法分类号 P447

1 引言

近年来,热带气旋(TC)的风雨预报水平进展缓慢,主要体现在降水落区和强度预报偏差大,空报、漏报严重,经常导致过度防御。研究认为,在下垫面摩擦、环境风垂直切变、涡旋罗斯贝波、海洋状况等多种影响因子的共同作用下,TC 内的对流分布呈现非常复杂的非对称特征(费建芳等,2013),使得 TC 引发的强降水落区集中于一个或者特定的几个区域内,从而大大增加了 TC 风雨预报和强度预报的难度(Yu, et al, 2012)。

部分研究发现了 TC 内对流非对称分布与 TC 移向的关系,但却得出了不一样的结论。陈联寿等(2004)基于多年的观测资料研究指出,大部分 TC 在登录时右侧降水要明显强于左侧。而 Willoughby 等(1984)、Reasor 等(2000)和安成等(2013)分别对飓风 David(1979)、Olivia(1994)和台风 Koppu(2009)眼墙区的雷达反射率资料分析发现,强对流主要出现在 TC 移动方向的左前象限。朱佩君等(2010)、覃丽等(2015)通过研究两个影响广西的 TC 个例发现 TC 云系集中在南侧。Yang 等(2016)利用风云气象卫星 TBB 资料统计了 8 a 西北太平洋热带气旋内的对流非对称分布特征,发现对流更易出现于 TC 移动方向的左后象限及后侧。这种对流分布与 TC 移向的多种配置关系说明,TC 内对流的非对称分布并非仅归因于 TC 移动引起的非对称摩擦效应造成的右前象限强入流(Shapiro, 1983),也与不同的环境场风垂直切变和地形(Chan, 2004)有关。

环境风垂直切变是影响热带气旋结构和强度的一个重要动力学因子。在风垂直切变的作用下,TC 内部的非对称对流与热带气旋强度变化有着十分密切的关系。对于台风内核区,在干绝热条件下,风垂直切变容易使对流出现在顺切变方向(即顺风垂直切变方向)及其右侧(Jones, 1995; Demaria, 1996; Frank, et al, 1999);然而在湿绝热条件下以及实际观测研究中发现,风垂直切变首先会使得 TC 在顺

风切变方向及右侧有上升运动,随着 TC 发展,环流增强,涡度大值区和强的上升运动区逆时针旋转,强对流容易出现在顺切变方向及其左侧(Franklin, et al, 1993; 陈国民等, 2010; 许向春等, 2012), Gu (2016)指出,TC 眼墙区内的对流在顺切变右方生成,左前方发展,左后方产生降水,右后方消亡。目前针对这一现象的解释主要存在两种观点:一种是风暴相对流理论(Bender, 1997),该理论认为 TC 内核区的相对入流处,负涡度平流与辐合引起的涡旋伸展相平衡,低层入流和上层出流以及深层的垂直上升运动发生在顺切变一侧。另一种理论为涡旋倾斜理论(Jones, 1995; Frank, et al, 1999, 2001), Jones(1995)认为环境风垂直切变破坏了 TC 原来轴对称的垂直结构,高低层切向风存在差异,为达到热成风平衡,顺风切右侧自西向东为上升运动,在顺风切左侧自西向东为下沉运动,从而使得对流在顺切变方向及其右侧生成。

然而,上述结论主要都是针对 TC 内核区(3 倍最大风速半径以内)的对流分布特征得到的,外螺旋雨带区的对流形成与内雨带完全不同(Li, et al, 2012),关于外螺旋雨带区(>100 km)对流非对称分布是否满足同样的结论则尚无定论。Corbosiero 等(2003)统计了 1985—1999 年大西洋飓风内闪电分布特点,结果表明,闪电在外螺旋雨带区(100—300 km)呈现出与内核区完全不同的分布特征,其更容易出现在顺切变方向的右侧,且风垂直切变强度越强,偏离程度越大, Abarca(2011)也得到了相似的结论。

以前的大部分研究都是利用 TRMM 降水探测资料、近岸天气雷达探测资料或者闪电观测资料进行统计分析,但是其空间覆盖率均十分有限,不能完全跟踪 TC 发生、发展过程中的对流变化,常常无法捕捉一个完整的 TC 系统,目前仍然缺乏对西北太平洋上热带气旋系统内对流非对称分布的统计研究。因此,本研究利用时、空覆盖率均较高的 FY-2C/2E 卫星黑体亮温资料,选取 2005—2012 年 136 个 TC 个例为样本,研究 TC 外雨带区对流空间分

布与环境风垂直切变以及 TC 移动的关系,为进一步加深 TC 范围内对流非对称分布特征的认识提供一定的参考。

2 资料和分析方法

2.1 FY-2C/2E 卫星观测资料

使用空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的 FY-2C/2E 地球静止气象卫星高分辨率逐时黑体亮温(TBB)资料来描述对流的强度,数据的总体完整率为 94%。TBB 与强对流及对流引起的降水有很好的对应关系(Kidder, et al, 1978),TBB 值越低表示云顶伸展高度越高,对流越旺盛。其中“阈值法”也称“粗云检测”(通过经验方法选定适当的阈值以识别对流云),是识别强对流云团普遍采用的方法之一,也被广泛地应用到 TC 内对流识别中(Lee et al, 2008, 2012)。Lee 等(2008)在研究台风生成前的中尺度扰动时,将低于 -32°C 的 TBB 区域定义为普通对流区,文中在非对称分析中仅考虑低于 -32°C 的 TBB 格点数据,其他未满足阈值的格点被视为此处无对流,将其值设置为 0。

2.2 西北太平洋最佳路径集台风资料

中国气象局上海台风研究所(CMA-STI)热带气旋最佳路径数据集(www.typhoon.gov.cn),提供了西北太平洋(含中国南海,赤道以北, 180° 以西)海域热带气旋每 6 h 的中心位置和强度。文中假设在两次记录时间内 TC 是匀速运动的,通过插值得到逐时的 TC 位置和强度数据。根据《热带气旋等级》中国国家标准(GB/T 19201—2006),将 TC 分为热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风及超强台风 6 类。在剔除超出卫星观测资料范围或者未被命名的 TC 以及双台风后,文中共统计了 2005—2012 年西北太平洋 136 个 TC 个例。

2.3 一波非对称的计算

在 Yang 等(2016)的工作中发现西北太平洋 TC 内对流发生频率的概率密度曲线沿方位角近似为正弦函数,具有明显的一波特征,因此,文中将 TBB 场沿方位角进行傅里叶展开,通过计算一波非对称值来表征对流的非对称程度。一波非对称值的最大振幅越大,表示对流的分布越不均匀,一波非对称值的正值区表示非对称分布的对流更容易出现的位置。以 TC 中心为原点构建极坐标系,半径 r 方向间隔为 25 km,方位角 θ 方向间隔 1° ,卫星探测资

料被插值到 $1^\circ \times 25 \text{ km}$ 格点上。沿半径方向第 $r(r=1, \dots, 20)$ 个环形域,方位角 $\theta(\theta=1^\circ, \dots, 360^\circ)$ 处的 TBB(r, θ)值展开的三角级数形式(Boyd, 2001)为

$$\text{TBB}(r, \theta) = \bar{T}(r) + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n(r) \cos(n\theta) + b_n(r) \sin(n\theta)] \quad (1)$$

式中, $\bar{T}(r)$ 为第 r 个环形域上关于方位角平均的 TBB 值, n 为级数, $a_n(r)$ 和 $b_n(r)$ 是第 r 个环形域上的 n 级傅里叶系数。可用傅里叶的一级级数展开形式表示对流的非对称程度,一级傅里叶系数的计算式为

$$a_1(r) = \sum_{\theta=1^\circ}^{360^\circ} [\text{TBB}(r, \theta) \cos \theta] / \pi \quad (2)$$

$$b_1(r) = \sum_{\theta=1^\circ}^{360^\circ} [\text{TBB}(r, \theta) \sin \theta] / \pi \quad (3)$$

此时,第 r 个环形域、方位角 θ 处的 TBB 一波空间非对称值 $M(r, \theta)$ 为

$$M(r, \theta) = [a_1(r) \cos \theta + b_1(r) \sin \theta] / \bar{T}(r) \quad (4)$$

第 r 个环形域的 TBB 一波非对称值的最大振幅 $F(r)$ 为

$$F(r) = \sqrt{a_1^2(r) + b_1^2(r)} \quad (5)$$

2.4 风垂直切变的计算

环境场水平风的垂直切变是指在一定范围内高低层平均风的矢量差,通常情况下高层指 200 hPa 等压面,低层为 850 hPa 等压面。利用 2005—2012 年 $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐 6 h 的 NCEP/NCAR 分析风场资料,分别计算整层(200—850 hPa)、中高层(200—500 hPa)和中低层(500—850 hPa)的环境风垂直切变(Chen, et al, 2012)

$$\text{VWS} = \sqrt{(U_{200} - U_{850})^2 + (V_{200} - V_{850})^2} \quad (6)$$

$$\text{VWS}_h = \sqrt{(U_{200} - U_{500})^2 + (V_{200} - V_{500})^2} \quad (7)$$

$$\text{VWS}_l = \sqrt{(U_{500} - U_{850})^2 + (V_{500} - V_{850})^2} \quad (8)$$

计算区域采用以 TC 为中心、500 km 为半径的圆形域(Hanley, et al, 2001)。

3 风垂直切变对 TC 个例对流分布的影响

3.1 风垂直切变的统计特征

从 2005—2012 年 8 a TC 生命史阶段的整层、高层和低层风垂直切变的大小的统计结果(图 1)可以看出,风垂直切变值多集中于 10 m/s 以下,中等

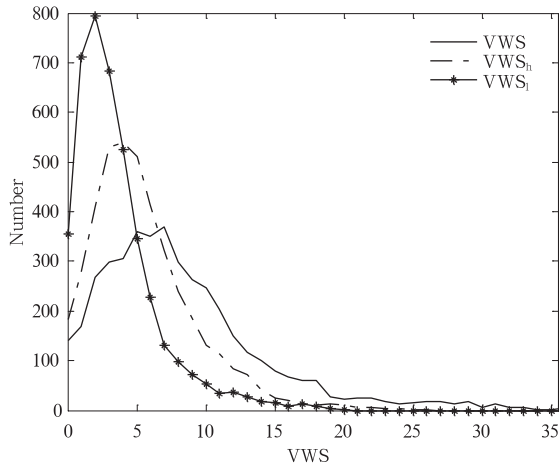


图1 风垂直切变强度频数分布
(实线为整层风垂直切变,虚线为中高层
风垂直切变,点线为中低层风垂直切变)

Fig. 1 Frequency distribution of magnitudes
of VWS (solid line), VWS_h (dashed line)
and VWS_l (dotted line)

切变(5—10 m/s)出现次数较多,这也印证了在一般情况下,强的风垂直切变不利于 TC 的发生、发展。

将 TC 方位角顺时针分为 16 等分,分别计算各层风垂直切变关于方位角分布的概率密度函数。图 2 给出了各层风垂直切变的方向(图 2a, N 表示正北方)及风垂直切变与台风移动方向夹角的概率密度分布玫瑰图(图 2b, 0 表示 TC 移动方向),半径越大表示出现在该方向上的风垂直切变频率越高。可以看出,整层风垂直切变与中高层风垂直切变的方向分布较为一致,均以东北风切变为主,西南风切变次之,西北风切变发生的频率最低,而中低层风垂直切变则以东风切变和西南风切变为主,这是因为热带气旋大多发生、发展于热带地区,该地区以东风切变为主。整层风垂直切变的方向与 TC 移动方向的夹角约为 60° ,方向主要指向移动方向的左侧,而中低层风垂直切变的方向与台风移动方向较为一致。

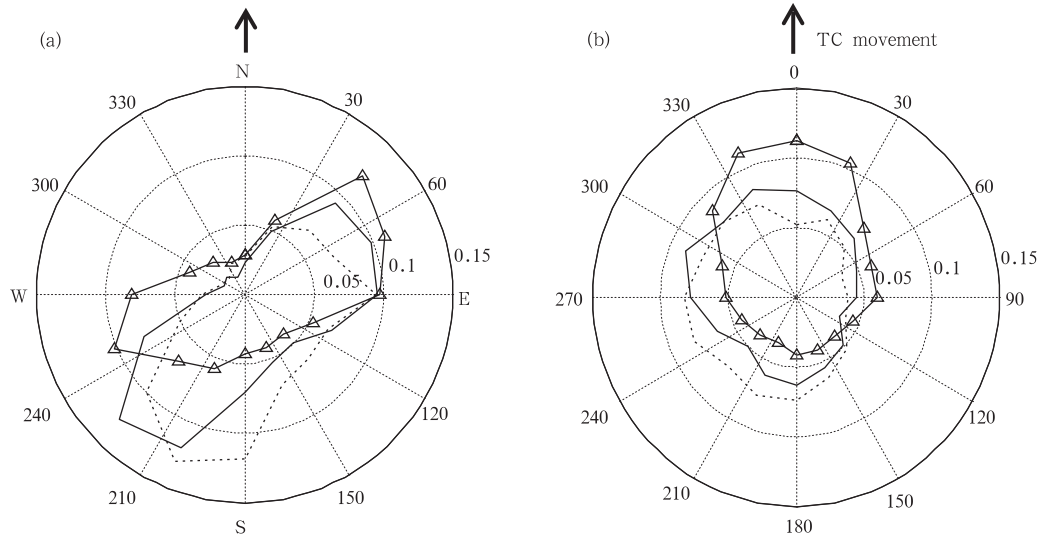


图2 风垂直切变关于方位角分布的概率密度玫瑰图

(a. 风垂直切变方向, b. 风垂直切变相对于 TC 移动的方向;圆的半径表示概率密度函数,
实线为整层风垂直切变,虚线为中高层风垂直切变,三角实线为中低层风垂直切变)

Fig. 2 Probability density functions (PDFs) of VWS direction based on azimuthal variations
(a. The direction of VWS relative to the north, b. The direction of VWS relative to the direction
of TC movement; radiuses of circles represent PDFs of VWS (solid line),
 VWS_h (dashed line) and VWS_l (dotted line))

3.2 风垂直切变与一波非对称值的关系

首先选取缓慢移动(<5 m/s),在其生命史中风垂直切变方向和强度均有较大改变且未登陆(或登陆前)的热带气旋 Banyan(2005)和 Saola(2005)作

为个例,研究不同层次的风垂直切变与 TBB 一波非对称值的关系。

图 3 为两个 TC 个例在 0—500 km 范围内关于半径平均的 TBB 一波非对称值的时间演变,一波非

对称值越大,表示该位置对流越强。图中黑色实线表示风垂直切变的方向随时间的变化,其中图 3a、b 中的实线分别表示热带气旋 Banyan 和 Saola 的整层风垂直切变,图 3c、d 中实线分别表示热带气旋

Banyan 中高层风垂直切变和中低层风垂直切变 (Saola 高低层风垂直切变与一波非对称的关系与 Banyan 类似,故未给出)。可见 Banyan 的整层和中高层风垂直切变的方向与一波非对称值大值区的走

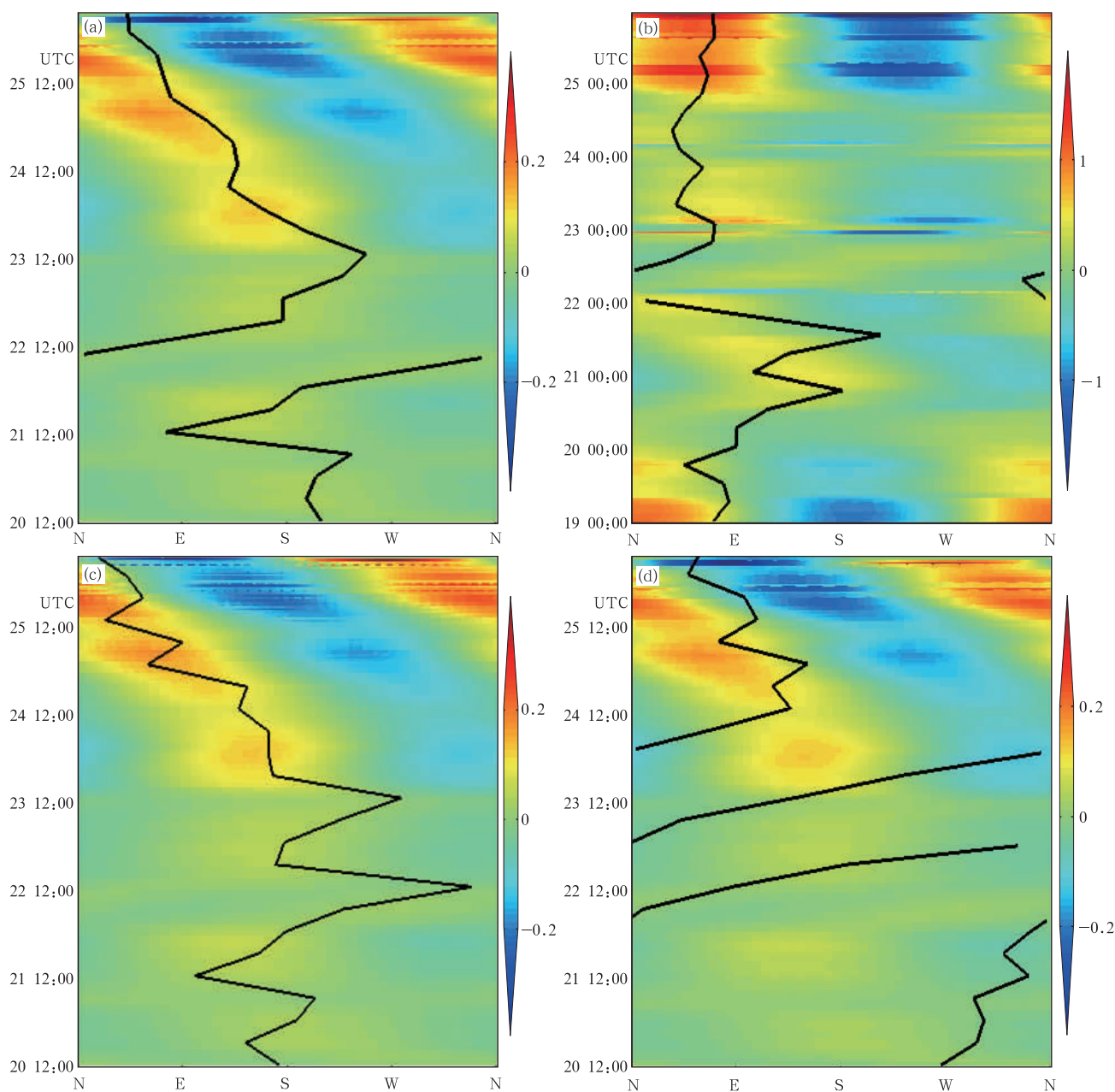


图 3 一波 TBB 非对称值的时间演变

(a. 热带气旋 Banyan 整层风垂直切变, b. 热带气旋 Saola 整层风垂直切变, c. Banyan 中高层风垂直切变, d. Banyan 中低层风垂直切变; 黑色实线为风垂直切变方向随时间演变曲线, 横坐标为方位, 纵坐标为时间)

Fig. 3 Temporal variations of onewave asymmetry of TBB (shaded)

(a. VWS of Banyan, b. VWS of Saola, c. VWS_h of Banyan, d. VWS_l of Banyan (solid line); The horizontal ordinate represents the azimuth relative to north and the vertical ordinate represents time)

势高度吻合,相反,中低层风垂直切变与对流分布没有明显的对应关系。同样,热带气旋 Saola 的整层风垂直切变的方向与一波非对称大值区较为一致。从图 3a 还可以看出,在 Banyan 成熟前(7 月 20 日 12 时—23 日 12 时;世界时,下同),一波非对称的值较小,且一波非对称的大值区与风垂直切变的方位角分布较为一致,而在其减弱阶段(7 月 23 日 12 时—26 日 08 时),由于风垂直切变值增大,一波非对称的振幅也大幅度增大,对流分布变得更加不均匀,一波非对称的大值区主要位于顺切变方向。

Wingo 等(2010)在研究不同风垂直切变条件下 TC 降水空间分布时指出,风垂直切变对降水的

作用时间是瞬时的。但是风垂直切变对于对流的影响应该有一定的作用时间,因此,文中计算了 136 个 TC 个例各层风垂直切变与滞后了 n h 径向平均的一波非对称极大值的相关系数(表 1)。不仅考虑了风垂直切变的方向变化对于一波值分布的影响,还考虑了风切变的强度对于一波非对称最大振幅的影响。结果表明,整层风垂直切变无论是方向变化还是强度变化均与 1 h 后的一波非对称值的变化有相对较强的相关,而中高层风切变虽然方向与对流分布方位角有一定的对应关系,但强度变化与一波非对称最大振幅分布基本无关,相比之下,中低层风垂直切变的方向和强度变化与对流的非对称的相关较弱。

表 1 不同层次间环境风垂直切变与一波非对称值的平均相关系数

Table 1 Average correlation coefficients between different vertical wind shears and one wave asymmetry

滞后 n h 的平均 相关系数	一波值方向与 VWS 方向	一波值方向与 VWS _h 方向	一波值方向 与 VWS _l 方向	一波值振幅 与 VWS 强度	一波值振幅与 VWS _h 强度	一波值振幅 与 VWS _l 强度
$n=0$	0.3173	0.3171	0.1237	0.2800	0.1791	0.1422
$n=1$	0.3179	0.2542	0.1294	0.2814	0.1810	0.1428
$n=2$	0.3162	0.2583	0.1251	0.2761	0.1852	0.1463
$n=3$	0.3155	0.2402	0.1332	0.2735	0.1774	0.1502

注:表中黑体字表示相关系数最大值所在位置。

4 风垂直切变与对流非对称分布的统计特征

4.1 风垂直切变对不同生命阶段 TC 影响的统计

为了仅考虑风垂直切变对 TC 非对称分布的影响,首先筛选出移动缓慢(<5 m/s)的时次作为统计样本(134 个 TC 的 12536 个时次)。近海台风登陆前,当 TC 中心位置与海岸线的距离小于其平均半径时,即 TC 雨带前沿登陆时,TC 便受到下垫面变化的影响,强度显著减弱。大部分情况下,在登陆前 TC 强度开始减弱,平均为 5 h,因此,在讨论风垂直切变和移动对对流非对称分布的影响时,将只讨论未登陆的 TC 和 TC 第 1 次登陆前 5 h 的时次。

图 4 为移动缓慢的 TC 在不同的风垂直切变环境中(后文若无特殊说明,风垂直切变均指整层风垂直切变),TBB 一波非对称值的平均空间分布。图 4a—c 为 TC 发展阶段(TC 形成至 TC 强度最强的阶段),图 4d—f 为 TC 消亡阶段(TC 强度最强至 TC 变性或消亡前的阶段)。当 TC 处于发展阶段时,弱风垂直切变环境下的一波非对称值较小(图 4a),对流分布较为对称,在 200 km 半径范围内一波非对称值近似为 0,在 200 km 之外,对流略向顺

切变方向左侧偏移;在中等风垂直切变的环境下(图 4b),任何距离半径处的对流均集中于顺切变一侧,向顺切变左侧偏离,一波非对称振幅明显大于弱切变情况下的振幅;而在强风垂直切变的环境下(图 4c),无论是内核区还是外围,对流更偏向于顺切变方向及其左侧,且外围更易受风垂直切变的影响,一波非对称值增强,对流偏离 TC 中心程度较大。

当 TC 处于减弱阶段时(图 4d—4f),一波非对称平均分布与发展阶段较为相似,均集中在顺切变方向及其左侧,随着半径的增大,一波非对称值越大,对流非对称程度越高。但减弱阶段的 TC 一波非对称的平均振幅要比发展阶段的 TC 一波值的振幅小,且一波值大值区的范围也相对较小,这说明风垂直切变在 TC 减弱阶段对 TC 内对流非对称分布的影响没有发展阶段显著。

由上述分析可知,风垂直切变对发展阶段中的 TC 非对称分布影响较大,为研究风垂直切变对不同强度 TC 的对流非对称分布的影响,统计了中等和强的整层风垂直切变条件下(图 5、6),处于不同发展阶段的 TC 一波非对称平均值。当 TC 强度增强时,一波非对称振幅逐渐减小,说明强 TC 抵御风

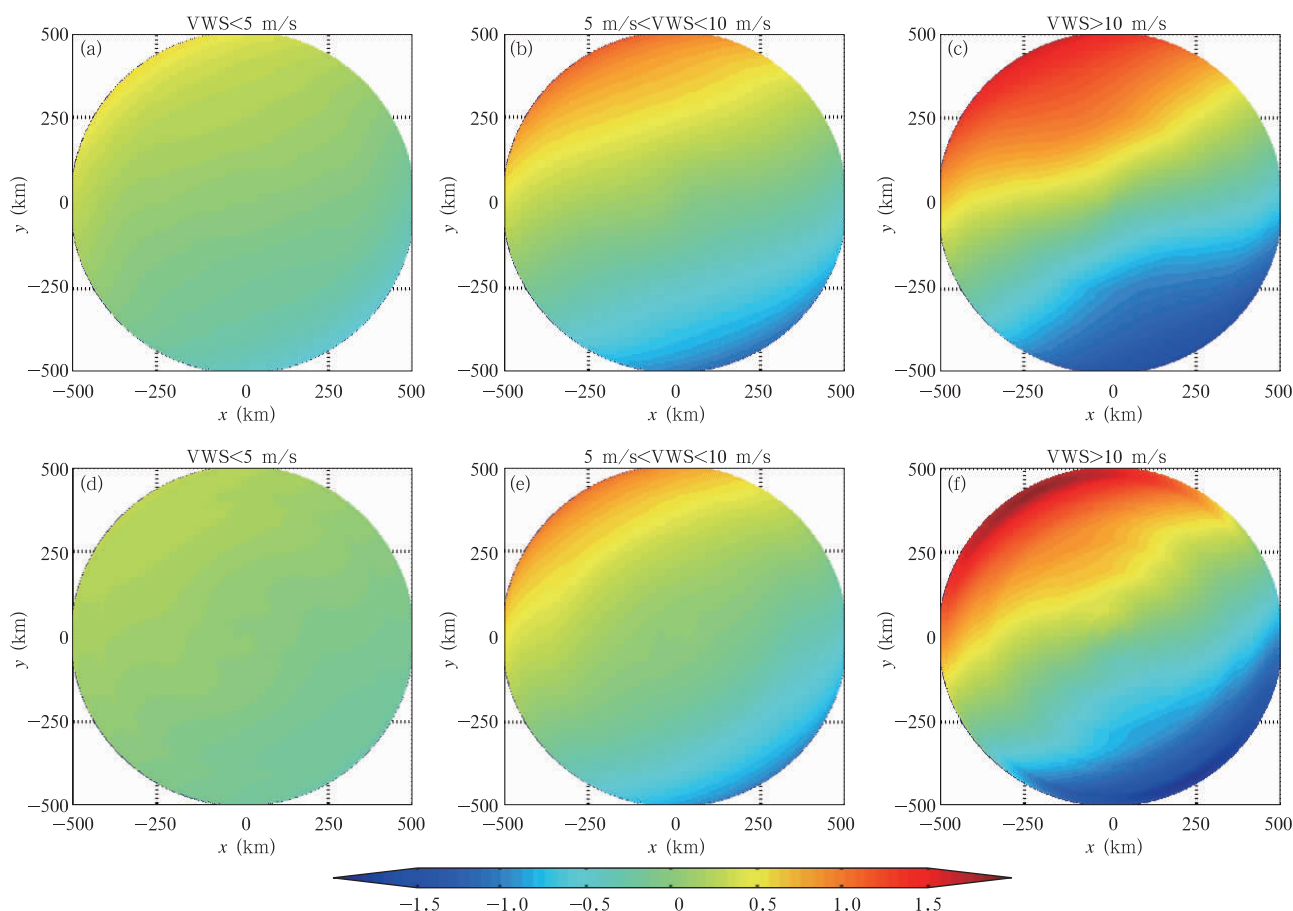


图4 不同风垂直切变条件下 TC 一波非对称平均分布
(a—c. 发展阶段的 TC, d—f. 消亡阶段的 TC; 正北方向为风垂直切变的方向,
原点为 TC 中心, 色阶表示 TBB 一波非对称值)

Fig. 4 Averaged onewave asymmetry (shaded) in different VWS environments
(a—c. are for developing TCs, d—f. are for decaying TCs; the north direction of the figures
indicates the direction of VWS, and the TC's core is at the origin)

垂直切变的能力变强。

Jones(1995)利用数值模拟研究了线性变化的风垂直切变对 TC 分布的影响,认为 TC 内核区的上升运动首先会在顺风切及其右侧有上升运动发展,随着 TC 的发展对流发展旺盛区会逆时针旋转至顺风切的左侧。图 6 也证明了实际过程中在外螺旋雨带区这一结论的正确性,当 TC 为热带低压时,TC 自身的环流较弱,外螺旋雨带区的对流主要集中在顺切变方向,随着 TC 的发展,虽然环流本身抵御风垂直切变影响的能力增强,但由于强台风涡旋性增加,对流活动逆时针旋转更显著,对流旺盛区向顺切变左侧的偏离程度更大。但是在对比图 5 和 6 时发现,当 TC 强度相同时,强的风垂直切变也会使

对流更向左偏离,对流向顺切变左侧的偏离并不仅仅是由 TC 自身环流增强造成的,也与风垂直切变强度增加有关。

4.2 移动与对流非对称分布的关系

当综合考虑风垂直切变和移动两种因子的共同作用时,Chen 等(2006)认为在风垂直切变较弱($< 5 \text{ m/s}$)的情况下,TC 的移动在影响降水的非对称结构的过程中起主要作用,并且与内核区相比,外雨带对于 TC 移动方向的变化更加敏感;当风垂直切变较强时($> 7.5 \text{ m/s}$),移动对于降水非对称结构的影响变得微乎其微。文中在讨论实际快速移动的 TC 在风垂直切变的环境下的对流分布特征时,也得到了相似的结论。

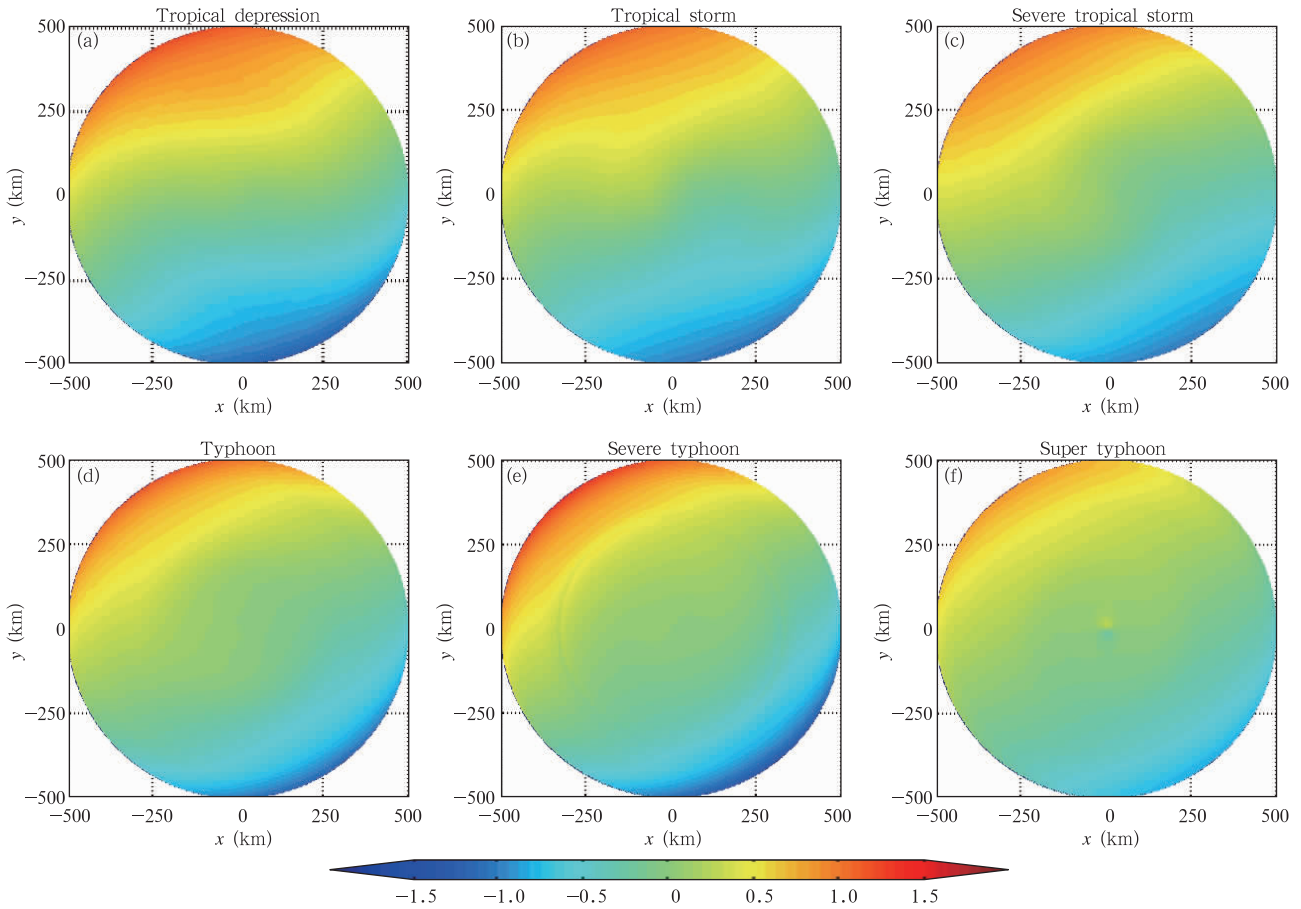


图 5 不同强度的 TC 一波非对称平均分布
($5\text{ m/s} < \text{VWS} < 10\text{ m/s}$)

Fig. 5 Averaged onewave asymmetry (shaded) corresponding to TCs of different intensity
in moderate VWS environment
($5\text{ m/s} < \text{VWS} < 10\text{ m/s}$)

图 7 为发展过程中快速移动($>5\text{ m/s}$)的 TC 在弱风垂直切变($\text{VWS} < 5\text{ m/s}$)环境下的平均一波非对称值的分布情况(47 个 TC 的 447 个时次),正北表示风垂直切变的方向,黑色箭头表示 TC 移动的方向。在弱切变环境下,无论切变方向和移动方向怎样配置,一波非对称大值区始终位于快速移动 TC 的前侧及右前侧,由于雨带是螺旋向外传播,所以距离越远对流偏离程度越大。

4.3 移动和风垂直切变共同作用下对流非对称分布的变化

在实际过程中,当风垂直切变和 TC 移动作用同时不可忽略时,风垂直切变的影响作用更加显著。快速移动($>5\text{ m/s}$)的发展阶段的 TC,在中等风垂直切变($5\text{ m/s} < \text{VWS} < 10\text{ m/s}$)条件下(51 个 TC 的 487 个时次,图 8),TBB 一波非对称大值区全部

集中在顺切变一侧,即 TC 环流内的对流主要集中于顺切变方向。虽然 TC 的移动没有影响对流关于方位角分布的特征,但也在一定程度上影响了非对称程度,当切变方向在移动方向的右侧时,顺切变的左侧即为 TC 移动的右前方最易对流的发生发展,所以最大一波非对称振幅接近 2.5,而当切变方向在移动方向的左侧时,两种因子最易产生对流的位置刚好相反,此时一波非对称振幅不超过 1。

5 总结与讨论

风垂直切变是影响热带气旋非对称分布的一个重要因子,利用 FY-2C/2E 静止气象卫星 TBB 观测资料和 NCEP 再分析资料,统计研究了 2005 年—2012 年西北太平洋 TC 的外雨带区对流非对称分布特征与环境风垂直切变以及 TC 移动的关系,得

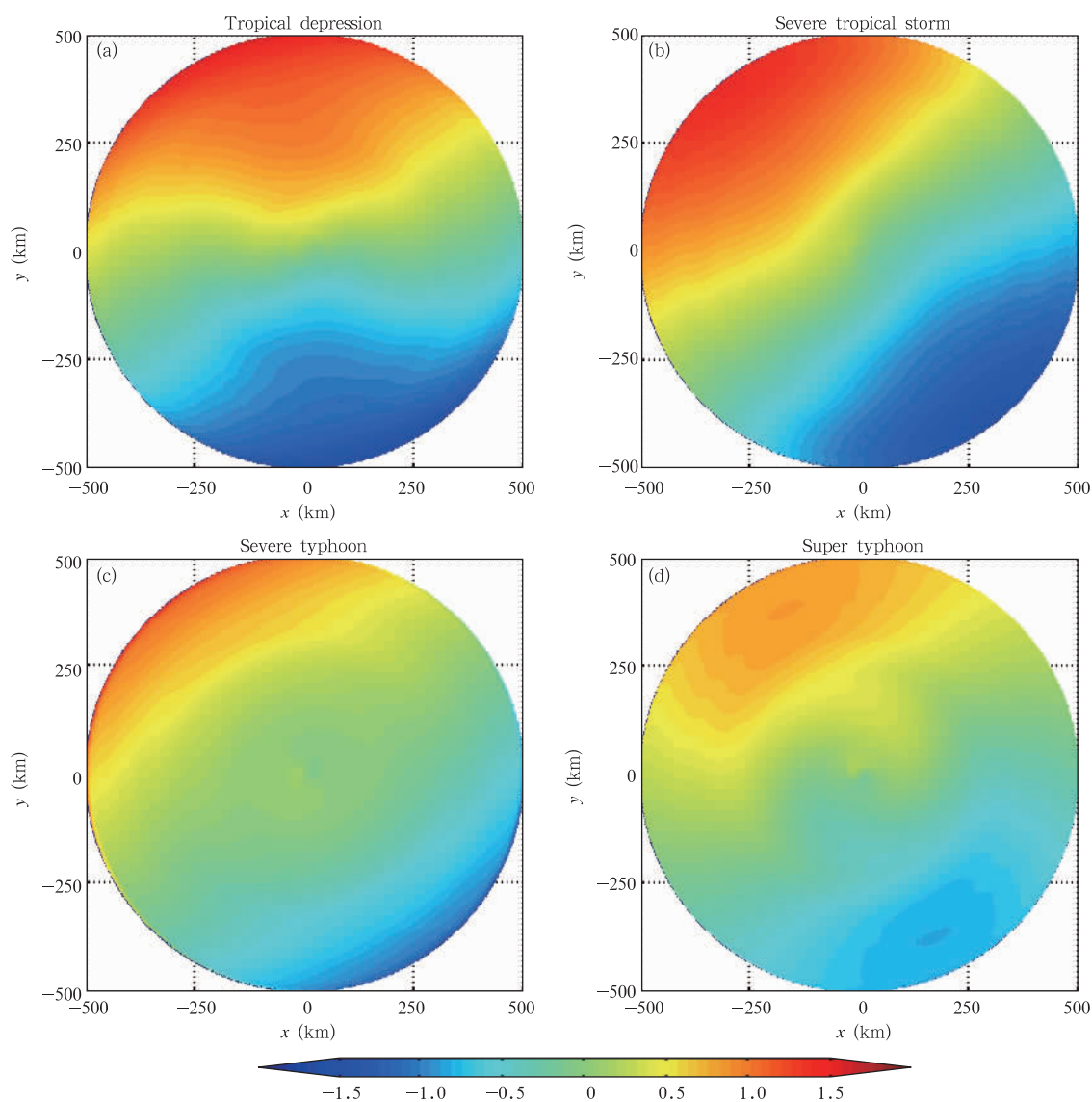


图 6 不同强度的 TC 一波非对称平均分布

(VWS>10 m/s)

Fig. 6 Averaged onewave asymmetry (shaded) for TCs of different intensity

in strong vws environment

(VWS>10 m/s)

到了以下结论:

(1) 整层风垂直切变多集中于 10 m/s 以下,以东北风切变为主,方向主要指向 TC 移动方向的左侧,中高层风垂直切变与整层风垂直切变方向较为一致,中低层风垂直切变则以东风切变和西风切变为主,与 TC 的移动方向较为一致。对于风垂直切变与对流非对称分布的关系研究,大多数认为风垂直切变影响 TC 非对称是瞬时的,但本研究发现一波非对称值的变化滞后风垂直切变的变化约 1 h,需

考虑时间延迟这一因素。

(2) 根据 TC 不同的发展阶段和强度讨论了 TC 的对流非对称分布特征。对于发展阶段的 TC,弱风垂直切变(<5 m/s)使 TC 顺切变一侧更易出现对流,影响半径有限,对流偏离 TC 中心程度较小;当风垂直切变增强时,一波非对称分布特征更加显著,与 Corbosiero 等(2003)利用闪电资料的统计结论不同的是,外螺旋雨带区内的对流更偏向于顺切变左侧,且切变强度越强,对流偏离 TC 中心程度

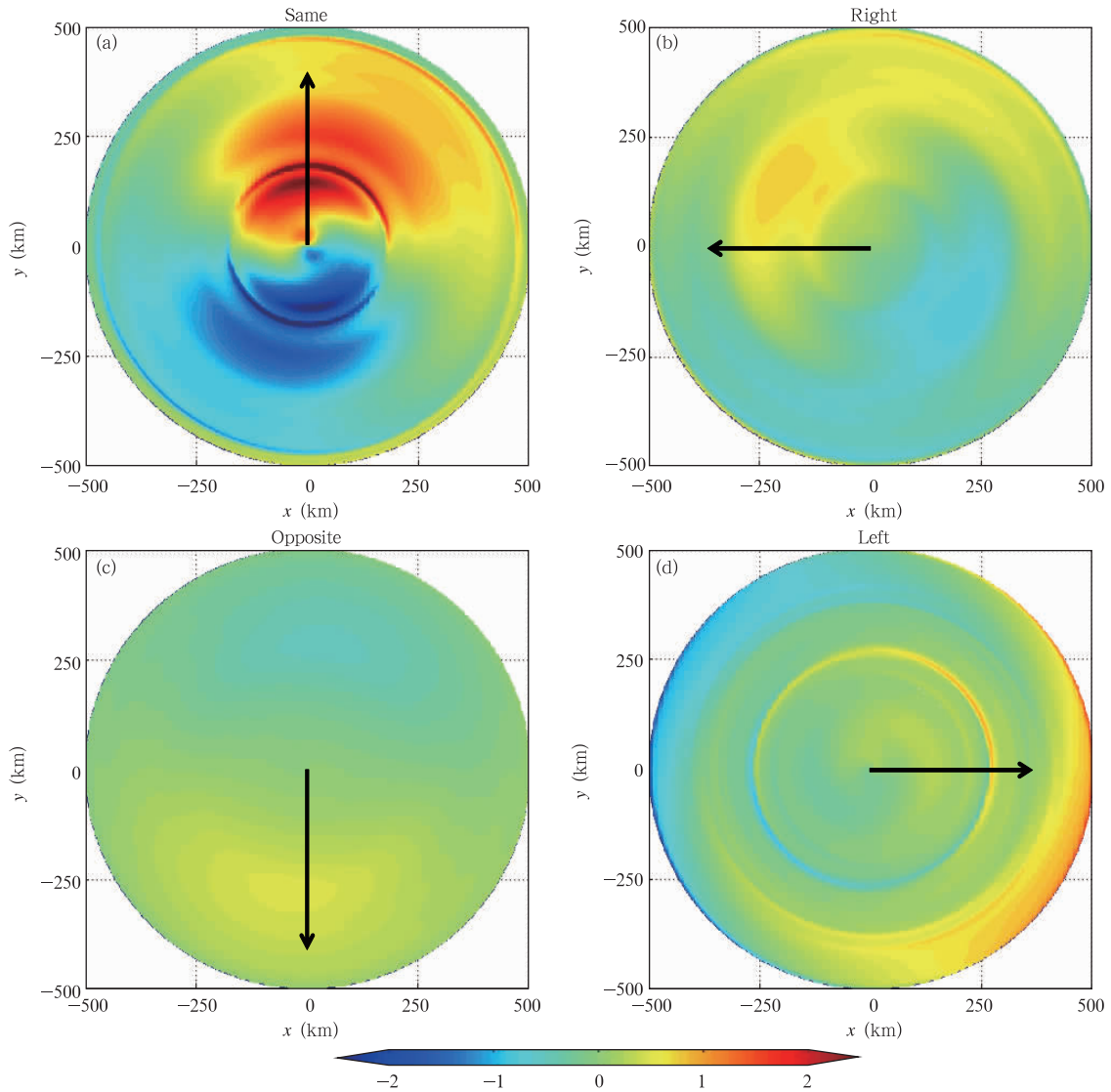


图 7 快速移动的 TC 在弱环境风垂直切变条件下一波非对称分布

(a—d. 风切方向与移动方向相同、偏右、反向、偏左; 正北表示风垂直切变的方向, 黑色箭头表示热带气旋移动的方向, 填色区表示 TBB 一波非对称值, 原点为 TC 中心)

Fig. 7 Averaged onewave asymmetry (shaded) of fast-moving TCs in weak VWS environment when the downshear is (a) the same as, (b) to the right, (c) opposite to, (d) to the left of the TC moving direction
(The north of figures points to the direction of vws and the black arrows represent the direction of TC motion, TC's core is at the origin)

越大。消亡阶段的 TC, 一波非对称平均分布与发展阶段的较为相似, 但风垂直切变在 TC 减弱阶段时对 TC 内对流非对称分布的影响没有发展阶段时显著。

(3) 以往的大部分研究认为, 对流的偏离程度与风切变的强度有关。本研究发现对流易于出现在顺切变方向的左侧, 一方面受到风垂直切变的强度

的影响, 另一方面与 TC 内逆时针环流有关。发展阶段中强度越强的 TC, 抵御风垂直切变的能力越强, 但对流旺盛区向顺切变左侧的偏离程度更大。

(4) 当风垂直切变较弱时, TC 的移动影响对流非对称分布的作用显著, 对流容易出现在移动方向的右前象限。当风垂直切变与 TC 移动速度均为大

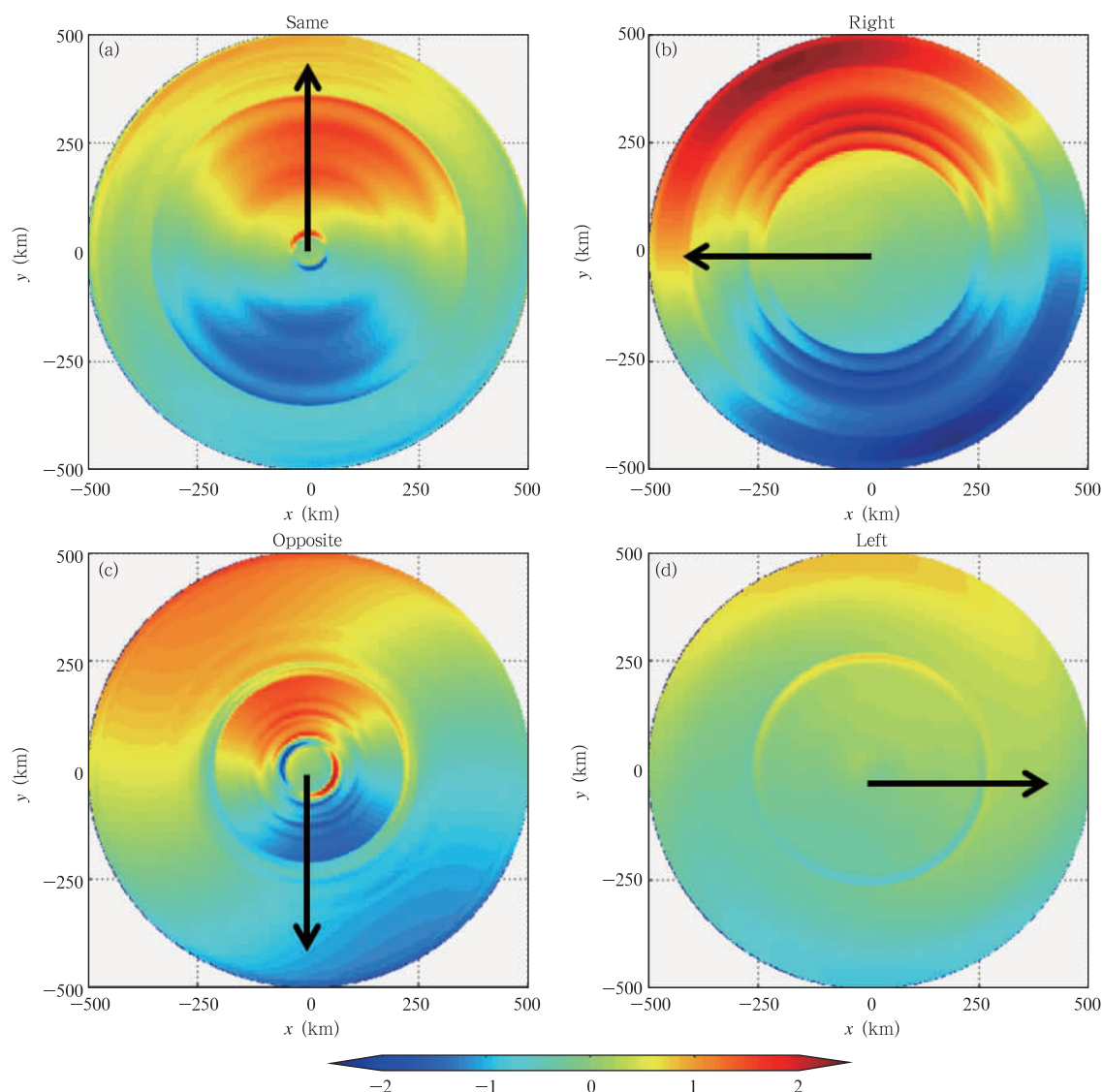


图8 同图7,但为快速移动的TC在中等环境风垂直切变条件下一波非对称分布

Fig. 8 Same as Fig. 7 but for averaged onewave asymmetry (shaded) of fast-moving TCs in strong VWS environment

值时,风垂直切变为主要影响因子,对流始终集中于顺风切及其左侧;此时,移动也有一定的影响作用,当风垂直切变指向移动方向的右侧时,TC内对流一波非对称性越大,指向左侧时,非对称性越小。

本研究利用TBB资料统计了TC内对流的非对称分布特征,虽然时间和空间覆盖范围广,但限于资料的单一,TC对流非对称分布尤其是其与环境场的关系,尚有许多待解决的问题。在今后的工作中仍需要通过数值模拟等手段获得高分辨率的三维资料,具体分析导致外螺旋雨带区的对流非对称分布的物理过程和动力机制,并综合考虑风垂直切变、

移动、下垫面变化和海温等综合影响因子对其的影响。

参考文献

- 安成,袁金南,蒙伟光等. 2013. 登陆的0915号热带气旋“巨爵”降水分布及其中尺度结构的分析. 热带气象学报, 29(5): 727-736. An C, Yuan J N, Meng W G, et al. 2013. An analysis of distribution and mesoscale structure of precipitation about land-falling tropical cyclone No. 0915-"Koppu". J Trop Meteor, 29(5): 727-736 (in Chinese)
- 陈国民,沈新勇,刘佳. 2010. 垂直风切变对热带气旋强度及结构的影响. 气象研究与应用, 31(1): 1-4, 10. Chen G M, Shen X

- Y, Liu J. 2010. Role of vertical wind shear on tropical cyclone intensity and structure. *J Meteor Res Appl*, 31(1): 1-4, 10 (in Chinese)
- 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 2004. 登陆热带气旋研究的进展. *气象学报*, 62(5): 541-549. Chen L S, Luo Z X, Li Y. 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process. *Acta Meteor Sinica*, 62(5): 541-549 (in Chinese)
- 费建芳, 刘磊, 黄小刚等. 2013. 热带气旋眼墙非对称结构的研究综述. *气象学报*, 71(5): 987-995. Fei J F, Liu L, Huang X G, et al. 2013. Review of the studies of the asymmetric structure of the eyewall of a tropical cyclone. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 987-995 (in Chinese)
- 覃丽, 黄海洪, 吴俞等. 2015. 影响广西的两个非对称结构 TC 对比分析. *热带气象学报*, 31(2): 223-236. Qin L, Huang H H, Wu Y, et al. 2015. Comparative analysis of asymmetrical tropical cyclones affecting Guangxi. *J Trop Meteor*, 31(2): 223-236 (in Chinese)
- 许向春, 于玉斌, 王式功等. 2012. “达维”(2005)台风经过海南岛过程非对称降水的成因分析. *热带气象学报*, 28(5): 687-697. Xu X C, Yu Y B, Wang S G, et al. 2012. Analysis of causation of asymmetric precipitation associated with strong typhoon "Damrey". *J Trop Meteor*, 28(5): 687-697 (in Chinese)
- 朱佩君, 郑永光, 郑沛群. 2010. 华东登陆台风的对流非对称结构分析. *热带气象学报*, 26(6): 651-658. Zhu P J, Zheng Y G, Zheng P Q. 2010. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclone making landfall along the East China coast. *J Trop Meteor*, 26(6): 651-658 (in Chinese)
- Abarca S F, Corbosiero K L, Vollaro D. 2011. The world wide lightning location network and convective activity in tropical cyclones. *Mon Wea Rev*, 139(1): 175-191
- Bender M A. 1997. The effect of relative flow on the asymmetric structure in the interior of hurricanes. *J Atmos Sci*, 54(6): 703-724
- Boyd J P. 2001. *Chebyshev and Fourier Spectral Methods*. 2nd ed. New York: Dover, 44pp
- Chan J C L, Liu K S, Ching S E, et al. 2004. Asymmetric Distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast. *Mon Wea Rev*, 132(10): 2410-2420
- Chen Q Z, Fang J. 2012. Effects of vertical wind shear on intensity and structure of tropical cyclone. *J Trop Meteor*, 18(2): 172-186
- Chen S S, Knaff J A, Marks Jr F D. 2006. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM. *Mon Wea Rev*, 134(11): 3190-3208
- Corbosiero K L, Molinari J. 2003. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones. *J Atmos Sci*, 60(2): 366-376
- DeMaria M. 1996. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change. *J Atmos Sci*, 53(14): 2076-2088
- Frank W M, Ritchie E A. 1999. Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure. *Mon Wea Rev*, 127(9): 2044-2061
- Frank W M, Ritchie E A. 2001. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. *Mon Wea Rev*, 129(9): 2249-2269
- Franklin J L, Lord S J, Feuer S E, et al. 1993. The kinematic structure of Hurricane Gloria (1985) determined from nested analyses of dropwindsonde and Doppler radar data. *Mon Wea Rev*, 121(9): 2433-2451
- Gu J F, Tan Z M, Qiu X. 2016. Quadrant-dependent evolution of low-level tangential wind of a tropical cyclone in the shear flow. *J Atmos Sci*, 73(3): 1159-1177
- Hanley D, Molinari J, Keyser D. 2001. A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper-tropospheric troughs. *Mon Wea Rev*, 129(10): 2570-2584
- Jones S C. 1995. The evolution of vortices in vertical shear. I: Initially barotropic vortices. *Quart J Roy Meteor Soc*, 121(524): 821-851
- Kidder S Q, Gray W M, Haar T H V. 1978. Estimating tropical cyclone central pressure and outer winds from satellite microwave data. *Mon Wea Rev*, 106(10): 1458-1464
- Lee C S, Cheung K K W, Hui J S N, et al. 2008. Mesoscale features associated with tropical cyclone formations in the western North Pacific. *Mon Wea Rev*, 136(6): 2006-2022
- Lee C S, Chen B, Elsberry R L. 2012. Long-lasting convective systems in the outer region of tropical cyclones in the western North Pacific. *Geophys Res Lett*, 39(21): L21812
- Li Q Q, Wang Y Q. 2012. A comparison of inner and outer spiral rainbands in a numerically simulated tropical cyclone. *Mon Wea Rev*, 140(9): 2782-2805
- Reasor P D, Montgomery M T, Marks Jr F D, et al. 2000. Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar. *Mon Wea Rev*, 128(6): 1653-1680
- Shapiro L J. 1983. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane. *J Atmos Sci*, 40(8): 1984-1998
- Willoughby H E, Marks F D Jr, Feinberg R J. 1984. Stationary and moving convective bands in hurricanes. *J Atmos Sci*, 41(22): 3189-3211
- Wingo M T, Cecil D J. 2010. Effects of vertical wind shear on tropical cyclone precipitation. *Mon Wea Rev*, 138(3): 645-662
- Yang L, Fei J F, Huang X G, et al. 2016. Asymmetric distribution of convection in tropical cyclones over the western North Pacific Ocean. *Adv Atmos Sci*, 33(11): 1306-1321
- Yu H, Lu Y, Chen P Y, et al. 2012. Intensity change characteristics of tropical cyclones in the western North Pacific as revealed by three different datasets. *J Trop Meteor*, 18(2): 119-126