

向纯怡, 吴立广, 田伟, 等. 2016. 多平台热带气旋表面风场资料在台风结构分析中的应用. 气象, 42(11):1315-1324.

# 多平台热带气旋表面风场资料在台风结构 分析中的应用<sup>\* 1</sup>

向纯怡<sup>1, 2</sup> 吴立广<sup>1</sup> 田伟<sup>1</sup> 刘青元<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 本文利用 2007—2014 年美国海洋和大气管理局的多平台热带气旋表面风场资料 (Multiplatform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis, MTCSWA) 对西北太平洋和南海区域内共 210 个编号热带气旋进行了统计分析。结果表明, MTCSWA 资料中的最大风速 ( $V_{MAX}$ ) 相较最佳路径强度偏弱 10%~15%, 对于较弱的台风存在一定的高估。最大风速半径 ( $R_{MAX}$ ) 与台风强度之间存在一定的线性关系且在不同区域具有不同的分布特征。由于  $R_{MAX}$  与台风的强度有关, 对于强度达到强热带风暴以上级别的各个海区内台风其结构差异不明显, 而对于强度较弱的台风 (强热带风暴以下) 其最大风速半径具有一定的区域分布差异。对台风各级风圈半径的分析结果显示: 7 级风圈半径通常是东部大于西部, 而 10 和 12 级风区半径没有这种现象。利用 MTCSWA 的内核区高分辨率对 1215 号超强台风布拉万分析发现, 在其内外眼墙置换过程中, 内外眼墙之间的距离 ( $R_2 - R_1$ ) 逐渐减小, 内眼墙的风速 ( $V_1$ ) 逐渐减小, 而外眼墙的风速 ( $V_2$ ) 逐渐增加, 且在此过程中伴随有台风强度的短暂波动。最后结合 MTCSWA 资料和数值预报讨论了一种台风结构参数的客观估计方法, 其检验结果表明该方法对  $R_{MAX}$  和各级风圈半径均有一定的估计能力。

**关键词:** MTCSWA, 最大风速半径, 结构特征, 眼墙置换, 客观估计

**中图分类号:** P444

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2016. 11. 003

## Applications of MTCSWA Data to the Characteristic Analysis of Tropical Cyclone Structure

XIANG Chunyi<sup>1, 2</sup> WU Liguang<sup>1</sup> TIAN Wei<sup>1</sup> LIU Qingyuan<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjiang University of  
Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Based on Multiplatform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis (MTCSWA) data from NOAA/NESDIS during 2007—2014, statistic characteristics of 210 named TCs' structures in the North Western Pacific and the South China Sea are analyzed. Compared with the maximum wind speed ( $V_{MAX}$ ) from CMA-best tracks, the  $V_{MAX}$  from MTCSWA is 10%—15% smaller on average. Overestimation, especially for weaker TCs, is observed. Statistical relationship is provided between radius of maximum wind speed ( $R_{MAX}$ ) and  $V_{MAX}$ , and the density distributions of  $R_{MAX}$  in different regions are calculated. For those TCs stronger than STS, the density distributions show no regional differences while the less intensified groups show obvious structure distributions in the North Western Pacific, the Northern and Eastern China Seas and the South China Sea. Especially, in the South China Sea, the distribution difference gets much broadly from 50 to 100 km. By analyzing the distributions of four quadrants, the eastern parts of  $R_{34}$  is comparably larger than that in western parts, but there is no such a character in both  $R_{50}$  and

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430103 和 2015CB452803)及国家气象中心预报员专项(Y201405)共同资助  
2016 年 4 月 15 日收稿; 2016 年 8 月 29 日收修定稿  
第一作者: 向纯怡, 主要从事台风预报工作. Email: xiangcy@cma. gov. cn

$R_{65}$ . From the case study of Super-TY Bolavan (1215), an eye-wall replacement and inner-core structure change can be observed. During that ERC period, the distance between inner and outer eye-wall ( $R_2 - R_1$ ) is reduced along with  $V_1$ 's decreasing and  $V_2$ 's increasing. Meanwhile the original intensity shows temporary fluctuation.

**Key words:** Multiplatform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis (MTCSWA),  $R_{MAX}$ , structure characteristics, eye-wall replacement, objective estimation

## 引 言

台风是影响我国的重要灾害性天气系统之一。台风强度是由其中心附近最大风速( $V_{MAX}$ )和海平面最低气压(MSLP)表示,再通过蒲氏风力等级划分为热带低压(TD)、热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)和超强台风(Super TY)。实际上多数台风都是非对称结构,即使强度相同的台风也会出现不同的结构特征。因此,包括最大风速半径( $R_{MAX}$ ),7级( $R_{34}$ )、10级( $R_{50}$ )和12级( $R_{65}$ )风速半径在内的台风风圈结构特征,决定一个台风潜在破坏力和可能影响范围。许映龙等(2010)指出目前我国对于台风风雨短临预报业务尚未建立,风雨预报特别是强风范围和落区预报水平远不能满足防台抗台的需求。提高台风预报的准确性不仅应该包括其路径和强度,也应包括其可能的风雨影响范围、持续时间以及台风内部中尺度过程造成的强风雨局地性分布等,为更准确地做出台风风雨预报以及精细化灾害防御提供可能。

如何准确分析和预报台风风场结构是目前国内外台风业务预报领域的难点之一。Knaff等(2000)认为台风的风场结构是估计其潜在威胁的重要因素,对于登陆台风而言由于海陆分布和地形差异的影响,更容易造成台风三维结构的不对称分布。Mueller等(2006)研究指出相同强度的台风由于环境风场的垂直分布差异以及台风自身的移动方向差异,可能存在差别很大的风场结构。雷小途等(2005)利用热带气旋风场分布的经验模型估计其8级大风圈半径。方翔等(2008)和王新等(2009)利用AMSU-B微波资料分析了热带气旋不同高度的水汽分布特征和水汽输送。Kelvin等(2011)运用QuikSCAT反演的风场资料对比分析了西北太平洋和大西洋区域内热带气旋的大风圈半径分布特征。Delia等(2011)也用了QuikSCAT反演的风场资料计算了可以反映热带气旋结构紧密程度的参数。潘旻等(2011)利用地面降水分析产品和卫星反演降水产品分别分析了台风莫拉克登陆过程中的降

水空间结构及其演变特征。赵放等(2012)利用多普勒雷达组网资料和四维变分风场反演技术研究了登陆台风的结构演变过程。严卫等(2013)利用CloudSat卫星反演的热带气旋过境数据资料分析了大西洋飓风的云、降水和热力结构在不同演变阶段内的结构分布特征。钱燕珍等(2013)利用红外云顶亮温资料和雷达观测资料研究了强台风海葵登陆前后的结构和强度变化。张增海等(2014)用MetOP-A极轨卫星搭载的ASCAT散射计反演的风场资料与沿岸浮标站观测进行了对比分析。Wu等(2015)利用观测资料和卫星反演的风场资料研究发现台风强度和结构之间存在非线性相关关系。柴乾明等(2016)利用CloudSat和TRMM卫星数据分析了热带气旋眼壁及螺旋云带中的云宏微观结构特征。Knaff等(2016)运用红外卫星资料和全球数值模式发展了利用热带气旋的位置、强度和移动路径估计台风风场结构的客观方法。

由于缺少常规观测,远海台风的监测主要还是依赖于卫星资料。20世纪70年代开始,美国国家海洋和大气管理局(以下简称NOAA)的Dvorak(1975;1984)利用可见光和红外卫星图像分析技术和有限的飞机观测资料,开展了利用卫星红外和可见光图像的台风分析技术,简称德沃夏克(Dvorak)技术。随着微波遥感资料的广泛应用,Demuth等(2004)利用AMSU微波资料建立台风风圈半径的统计方法。Mueller等(2006)利用多年的飞机观测资料和红外卫星资料对大西洋和东太平洋的台风风场结构进行了客观估计。Knaff等(2007a;2007b)在此基础上改进了红外反演风场算法,发展了多源卫星资料融合技术,将红外风场(IRWD)、云导风(CDFT)、洋面风(QuikSCAT、ASCAT)等资料通过最小代价法融合成台风表面风场。该算法逐渐发展成为多平台热带气旋表面风场资料(Multiplatform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis, MTC-SWA)。目前该技术已经被应用到全球各个海域台风的客观风场反演中(Knaff et al, 2011)。在北大西洋地区已使用了热带气旋风场观测再分析资料H\* wind (Powell et al, 1998)对MTCSWA资料进

行了验证和评估,两者平均误差在距离台风中心 50 km 范围以外小于  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在距离台风中心 50 km 范围以外偏离程度较大,超过  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Knaff et al, 2010)。田伟等(2016)利用卫星资料和近海浮标资料对该套资料在中国东部海域的效果进行了评估,结果表明 MTCSWA 资料所表现的台风非对称结构特征与卫星观测一致。

目前,在西北太平洋及南海地区仍然缺少可靠的台风结构观测资料,现有资料的时空分辨率并不能满足实际台风结构分析和预报的需要。MTC-SWA 资料集的引入可弥补台风结构观测资料的不足,为量化分析台风结构特征提供了可能。

## 1 资料及方法

### 1.1 MTCSWA 资料说明

本文中用到的西北太平洋和南海区域的海表面风场资料 MTCSWA 资料来源于 NOAA/MESDI-S<sup>①</sup>,可通过 FTP 准实时下载(滞后 1~2 h)。该资料覆盖了台风中心周围直径为  $15^\circ$  的区域,水平分辨率达  $0.1^\circ$ ,时间间隔为 6 h,即世界时 00,06,12 和 18 时。风场资料包括两层:10 m 高度和飞行高度(即飞机观测资料可达到的一般高度,约 600~700 hPa)。

### 1.2 MTCSWA 资料融合技术

MTCSWA 资料主要包括了以下四类卫星反演风场资料(表 1)。

表 1 MTCSWA 中使用的不同卫星资料的传感器类型和观测高度

数据类型	传感器类型	资料高度
微波 AMSU	NOAA-15, 16, 18	850~700 hPa
云导风 CDFT	GOES 静止卫星	600 hPa
QuikSCAT	K 波段雷达(13.4 GHz)	10 m
A-SCAT	C 波段雷达(5.22 GHz)	10 m
红外风场 IRWD	GOES 静止卫星	700~850 hPa

其中,微波(AMSU)是通过平衡方程利用温度反演得到风场,在台风内核区的准确度较低,因而适合对环境气流进行估计;云导风(CDFT)在高云覆盖时资料空缺率高,通常只能反映台风外围雨带结构;QuikSCAT 和 A-SCAT 资料是利用观测海表粗糙度来反映表面风场,但其估计准确度在强降水条

件下有所降低。以上三类资料主要用于反映外核区和外围螺旋雨带的风场结构,并不能反映台风内核区风场结构特征。红外风场(IRWD)是利用 Mueller 等(2006)基于飞机观测资料和红外图像建立统计关系,通过计算最大风速半径( $R_{\text{MAX}}$ )和尺度参数( $V_{182}$ )构建出 Rankine 涡旋模型,并得出台风的对称风场,最后叠加上台风自身的运动矢量得到台风内核区风场。上述四类观测资料由于不同来源的卫星风场资料观测起始时间、时间间隔和空间分辨率均不一致,在风场资料融合时采用时间权重函数和最优插值方法以达到数据时空的统一。另一方面,不同类型卫星风场资料高度也不一致,其中 QuikSCAT 和 ASCAT 风场资料均是 10 m 高度上的风场资料,而其他三种卫星风场资料在近飞行高度,其中红外风场(IRWD)的算法中直接用到了飞机观测资料作拟合真值,因此反演出来的风场并不是台风底层风速大小,而是与飞行高度相当约 600~700 hPa 高度上的风场。Franklin 等(2003)利用 GPS 下投式探空研究了大西洋飓风的风场结构特征,提出了将飞行高度(约 700 hPa)转换到 10 m 风场的转换因子,利用该转换因子将飞行高度的资料转订正到 10 m 高度,同时将风场向低压区旋转  $20^\circ$  以增加低层的涡度。

### 1.3 MTCSWA 资料适用性分析

首先利用收集整理的 2007—2014 年的 MTC-SWA 资料和用中国气象局整编的最佳路径资料(Ying et al, 2014),对该资料在西北太平洋和南海区域内的资料可靠性和估计误差进行初步分析。

为检验该资料对热带气旋强度的估计效果,用最佳路径资料中的最大风速( $S_{\text{MAX}}$ )与 MTCSWA 资料的最大风速( $V_{\text{MAX}}$ )结果进行了对比分析(图 1)。总体上看,MTCSWA 资料计算得到的最大风速相较于最佳路径数据中的强度结果偏弱,两者的平均相对误差(MREs)为 12.5%。对于强台风及以上级别的热带气旋,两套资料的一致性较好,说明对于强度越强的台风 MTCSWA 卫星资料可以更好地反映其强度特征,而较弱的热带气旋(STS 级别以下)该资料相对于最佳路径中的强度存在一定的高估。

进一步检验该套资料对西北太平洋和南海台风的估计效果,利用 2013—2014 年中国气象局地面自

① <http://www.ssd.noaa.gov/PS/TROP/mcswa.html>

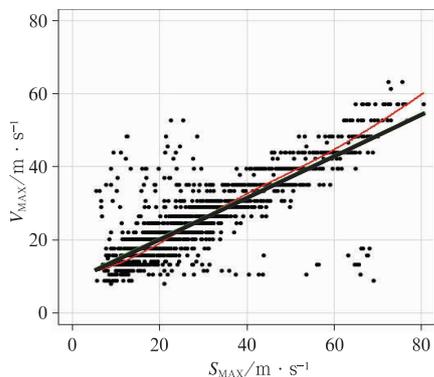


图 1 最佳路径资料的最大风速( $S_{MAX}$ )与 MTCSWA 最大风速( $V_{MAX}$ )的散点分布图 (粗线为一元线性拟合线, 细线为多元线性拟合线)

Fig. 1 Scatter plot of CMA  $S_{MAX}$  from best track and  $V_{MAX}$  from MTCSWA (Thick line is one element linear fitting; thin line is multi-element linear fitting)

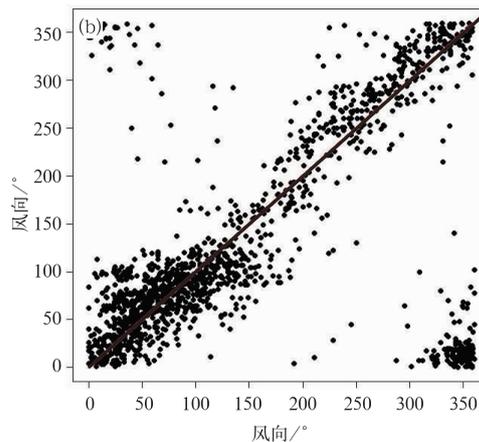
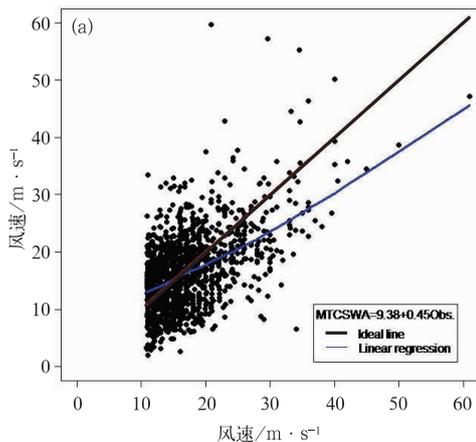


图 2 地面观测资料(横轴)与 MTCSWA 资料(纵轴)同样本的风速(a)及风向(b)散点分布图 (粗线为理想曲线, 细线为线性一元拟合)

Fig. 2 Scatter plot of surface observations (lateral axis) and MTCSWA (vertical axis)

(a) wind velocity, (b) wind direction

(Thick line is ideal line, thin line is one element linear fitting)

这可能与观测站点的风向受到站点海拔高度和局地地形的影响有关。

## 2 台风结构特征分析

台风强度是由其中心最大风速( $V_{MAX}$ )和最低气压(MSLP)来确定,然而台风结构不仅与台风自身强度有关,还与台风大小、移动以及环境气流有关。Holland 等(1984)提出了台风切向风分布的概

念模型,认为台风的结构从里到外可以分为内核区(眼区环流)、外核区(眼墙环流)以及尺寸变化(外围环流)等,本节将利用 MTCSWA 资料具体分析台风的大风圈结构、眼墙区结构及其内核区演变的特征。

动站逐小时站点观测资料的风速、风向进行了定量检验。首先提取了我国沿海岸基气象站、海岛自动站、海洋气象浮标、石油平台站,同时剔除了风速观测的不合理值。再根据站点位置距离台风中心的相对距离将自动站观测资料转换到以台风中心为原点,相对距离为半径的极坐标系中。同时提取对应时刻的 MTCSWA 资料中 10 m 风场中相对位置上的风向和风速进行比较,结果如图 2 所示。MTCSWA 的风速估计(图 2a)与观测样本的线性拟合方程为:  $MTCSWA = 9.38 + 0.45OBS$ , 标准残差为 3.58, 拟合曲线(虚线)偏向理想直线(实线)的右侧,说明对比地面观测风速 MTCSWA 存在整体低估,且对于风速值越大的热带气旋估计误差越大。整体而言,平均绝对误差(MAEs)为  $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  与 Knaff 等(2014)之前对大西洋飓风的检验结果相当。图 2b 说明两者在风向上的一致性较好,大量样本均集中于理想直线(实线)的两侧,两者的(MAEs)为  $11.6^\circ$ ,

念模型,认为台风的结构从里到外可以分为内核区(眼区环流)、外核区(眼墙环流)以及尺寸变化(外围环流)等,本节将利用 MTCSWA 资料具体分析台风的大风圈结构、眼墙区结构及其内核区演变的特征。

### 2.1 大风圈结构特征

目前,国际上通常采用台风不同风速等级的半径作为反映台风风圈结构的参考指标,包括 7 级风

圈半径( $R_{34}$ )、10 级风圈半径( $R_{50}$ )和 12 级风圈半径( $R_{65}$ )。7 级风圈可以认为是台风最外围环流,与台风的尺度大小有关, $R_{34}$ 半径大小可以认为是台风主体环流所带来的大风影响范围;10 级风圈半径反映了台风强风雨的影响范围,因为根据蒲氏风力等级,10 级风可以造成树木倒伏和建筑遭到破坏, $R_{50}$ 被认为是台风防御的重要参考指标;最内圈的 12 级风圈出现时强度都达到台风级以上,此时的台风内核区环流对称,眼墙区结构完整,因此  $R_{65}$  半径所影响的地区将受到台风猛烈风雨袭击,有时瞬时风力远超过平均风力,破坏程度极强,因此  $R_{65}$  是判断台风

强灾害范围和影响程度的重要依据。

为进一步认识热带气旋不同象限风圈半径的分布规律,先对各个象限的风圈半径做统计分析,结果如图 3 所示。可以发现:在西北太平洋和南海地区出现的热带气旋,平均而言 7 级风圈半径东部大于西部,而 10 和 12 级则没有这个特征,这可能跟季风环流与台风本体环流的结合有关。10 和 12 级风圈东北象限的平均值最大,而东南象限的平均值小于其他象限,这可能与西北太平洋和南海台风多以西北路径移动有关。

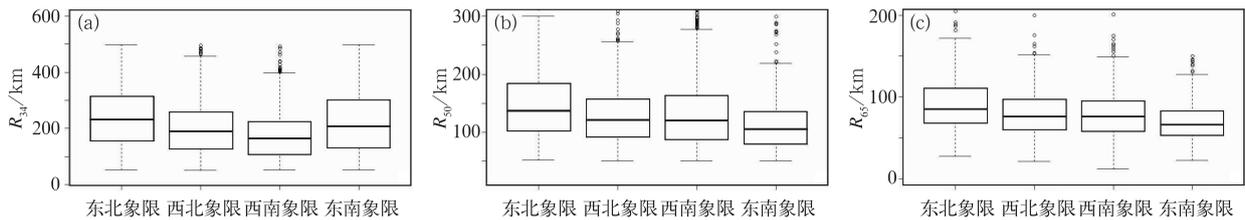


图 3 不同象限的台风 7 级(a)、10 级(b)和 12 级(c)风圈半径箱线图

Fig. 3 Box-plot of 34 kt (a), 50 kt (b), 65 kt (c) radii at four quadrants (1 kt=1.852 km·h<sup>-1</sup>)

### 2.2 台风眼墙区结构特征

不同强度热带气旋的眼墙(外核区)分布特征,如图 4 所示。最大风速( $V_{MAX}$ )和最大风速半径( $R_{MAX}$ )之间存在一定的相关性,从其一元线性拟合关系可以看出最大风速半径随着热带气旋的加强而减小,而两者的多元线性拟合趋势线说明对于强热带风暴级( $V_{MAX} < 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )以下台风最大风速半径随强度增加而减小的趋势越快,而随着强度增大,其最大风速半径减小的趋势减慢。而对于超强台

风( $V_{MAX} > 51.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )其最大风速半径主要集中在 60 km 以内。分析结果表明台风强度越强,台风眼墙最大风速带越向台风中心收缩,即最大风速半径越小,但这种趋势并不是线性的。

如前所述,台风最大风速半径与台风强度存在一定的相关性,在具体台风分析中发现由于不同海区的海洋特性和所处区域的气候背景差异会造成生成于此的热带气旋也具有不同的结构特征。按台风强度分为强热带风暴以上( $V_{MAX} \geq 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 图 5 中实线)与强热带风暴以下( $V_{MAX} < 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 图中虚线),再对其最大风速半径( $R_{MAX}$ )的概率密度分布进行对比,可以发现对于强热带风暴以上强度其  $R_{MAX}$  的概率密度分布差异不大(峰值均在 50 km 左右),而对于强热带风暴以下强度三个区域内  $R_{MAX}$  的峰值分布从小到大依次为西北太平洋、我国南海海域、我国东部和北部海域。其中出现在西北太平洋的台风  $R_{MAX}$  概率密度分布范围更广(60~120 km),说明其结构的差异性更大;南海区域台风的最大风速半径概率密度分布在 80~100 km;而与西北太平洋和南海台风相比,位于中国东部和北部海域的台风的最大风速半径概率密度分布峰值在 100 km 附近。这说明由于  $R_{MAX}$  本身就与台风的强度有关,对于强度达到强热带风暴以上级别的台风

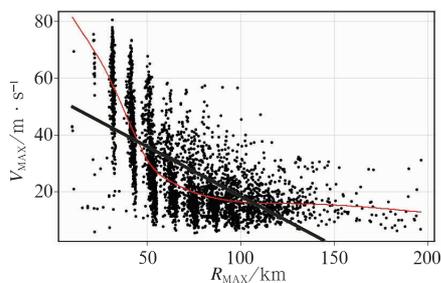


图 4 最大风速( $V_{MAX}$ )和最大风速半径( $R_{MAX}$ )的散点分布图

(粗线为一元线性拟合线,细线为多元线性拟合线)

Fig. 4 Scatter plot of  $V_{MAX}$  and  $R_{MAX}$  (Thick line is one element linear fitting, thin line is multi-element linear fitting)

其结构差异不明显。而对于强度较弱的台风,最大风速半径的发散程度更大。这样一方面与不同海域台风自身的强度分布有关,另一方面也是因为热带气旋靠近中国东部大陆时往往处于其生命发展后期,台风结构发展成熟(有的已逐渐减弱变性),结构趋于松散。另外,值得注意的是南海台风具有更为复杂的眼墙结构分布特征,这主要由于南海台风中除了在南海本地生成外,另有一部分从西北太平洋移入到南海,因此具有与西北太平洋台风相似的结构特征,同时受到南海局地海洋热力和季风环流等作用的共同影响,南海台风往往会出现近海急剧加强的现象(林良勋等,2006),因而也伴随着台风结构的变化。

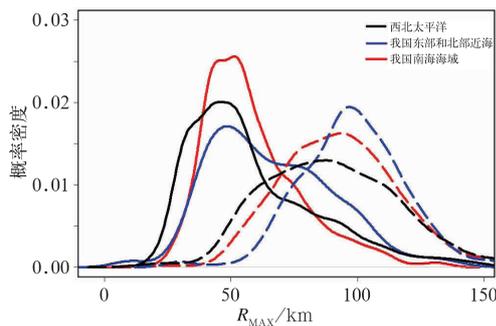


图 5 不同海域的最大风速半径 ( $R_{MAX}$ ) 概率密度分布图

(实线, 强热带风暴以上  $V_{MAX} \geq 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
虚线, 强热带风暴以下  $V_{MAX} < 24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 Distribution of probability density of  $R_{MAX}$  in different regions

(Solid line/dotted line is  $V_{MAX}$  stronger/less than  $24.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

### 2.3 台风眼墙置换过程

台风眼(内核区)的形成和变化通常伴随着台风强度而变化。Stikowski 等(2011)利用飞机观测资料研究发现眼墙的置换(eyewall replacement, ERC)过程中台风的风场结构会发生明显变化,统计发现 ERC 过程平均经历约 36 h。Kossin 等(2011)、Kossin (2014)研究发现 ERC 过程中台风的强度通常经历增强、减弱和再度增强三个阶段,其眼区的风场结构也随之发生明显的内外眼墙交替过程。也有不少研究利用高分辨率的数值模式来模拟台风的双眼墙结构和置换过程(李宁等,2007;康建伟等,2007;Zhou

et al, 2011)。

为探讨 MTCSWA 资料对台风眼墙结构特征,特别是对眼墙置换过程的表现效果,选取了 2012 年第 15 号超强台风布拉万做具体分析。“布拉万”2012 年 8 月 20 日 14 时(北京时,下同)在西北太平洋上生成,之后缓慢向西北方向移动,并于 25 日 17 时加强为超强台风,25 日 20 时达到其强度极值( $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 920 hPa),之后以超强台风的强度进入我国东海海面,并转为偏北方向移动,强度开始减弱(任丽等,2013;陶亦为,2012)。通过微波资料分析可以发现(图略)，“布拉万”的 ERC 过程开始于 26 日 02 时前后,24 h 后完成眼墙置换过程。因此利用这个时段内的 MTCSWA 资料对“布拉万”的 ERC 过程做具体分析。

首先,对 MTCSWA 资料做了极坐标转换,计算其切向风的内外眼墙结构参数:内眼墙用  $V_1$  和  $R_1$  表示,外眼墙用  $V_2$  和  $R_2$  表示。结果如表 2 所示,可以看到 26 日 02 时外眼墙刚刚出现,距离台风中心约 70 km,且风速相对内眼墙较小,随着 ERC 过程的发展内外眼墙之间的距离( $R_2 - R_1$ )逐渐减小;到 26 日 20 时两者已经非常接近,此后内眼墙被外眼墙所替代,逐渐完成了眼墙的置换过程。在整个 ERC 过程中,内眼墙的风速( $V_1$ )逐渐减小,而外眼墙风速( $V_2$ )逐渐增加,其演变特征与前人对于 ERC 过程的观测研究及模拟的结果相似。

为了分析 ERC 过程中台风强度的变化情况,给出了对应时刻基于红外卫星资料和德沃夏克技术开发的客观自动分析系统 ADT (advanced dvorak technique)(Timothy et al, 2007)和卫星资料集成产品 SATCON(CIMSS Satellite Consensus)的强度分析结果。可以发现两者对于“布拉万”的强度估计值在这个时段内均有一个明显减弱阶段(26 日 08 时),ADT 的最终强度指数下降 0.9,ADT 和 SATCON 的  $V_{MAX}$  估计值分别下降 22.4 和 15 kt;再次增强阶段(26 日 14 时)强度有所回升,但均弱于减弱之前。通过卫星资料分析发现在 ERC 过程中台风的强度会出现短暂阶段性波动。而在实际业务中由于观测资料的有限,对 ERC 过程的强度的波动往往缺乏有利的观测证据和预测手段。通过上述分析发现 MTCSWA 资料在热带气旋的 ERC 过程中较好地描述了其结果的演变特征,可以被用于对于台风眼墙结构变化的分析中。

表 2 2012 年 8 月 26 日 02 时至 27 日 02 时 1215 号超强台风布拉万 ERC 过程  
MTCSWA 内外眼墙结构变化及卫星分析结果对比

Table 2 Comparison of MTCSWA inner-outer eye-wall structure change and satellite analysis for Bolaven's ERC  
from 02:00 BT 26 to 02:00 BT 27 August 2012

时间	$V_1$ /m·s <sup>-1</sup>	$R_1$ /km	$V_2$ /m·s <sup>-1</sup>	$R_2$ /km	ADT			SATCON	
					CI	MSLP/hPa	$V_{MAX}$ /kt	MSLP/hPa	$V_{MAX}$ /kt
26 日 02 时	53.4	47.7	38.2	72.1	5.8	931.1	109.8	914.0	125.0
26 日 08 时	50.9	48.5	40.4	59.2	4.9	951.6	87.4	927.0	110.0
26 日 14 时	45.2	46.3	44.2	55.3	5.4	944.0	99.6	929.0	116.0
26 日 20 时	31.6	50.7	47.2	52.9	5.4	943.8	99.6	923.0	118.0
27 日 02 时	—	—	48.3	50.3	4.6	957.2	79.6	935.0	101.0

### 3 台风结构客观估计

#### 3.1 台风结构客观估计方法

本文将利用 MTCSWA 热带气旋表面风场、欧洲中心再分析资料和中国气象局整编的最佳路径资料集构建简单的台风大风圈半径( $R_{MAX}$ )和各级风圈半径的客观估计方法,并建立台风结构参数的统计估计模型。Knaff 等(2016)最新的研究中利用常规的热带气旋位置、强度和移动路径等常规参数结合红外卫星资料客观估计热带气旋的结构特征,并假设热带气旋的非对称结构仅是由其移动和位置造成的。在此基础上,本文也试图通过建立客观估计模型来找到台风结构与其位置、强度、移速移向以及环境风切变之间的相关性,从而利用台风本身的强度及运动信息来客观估计其结构特征。与前人研究工作不同的是本文采用广义加性模型来构建台风结构参数与各物理量之间的估计模型。广义加性模型实际上是对传统线性模型的推广,在气象领域该模型可以用于对某个气象物理量进行极大似然估计。在广义线性模型的基本假设中各个预报因子之间必

须是相对独立的,而在广义加性模型中各个因子之间可以存在线性相关,因此更适合做气象要素的客观估计。

首先将 MTCSWA 原始资料转换到以台风中心为原点的极坐标系,并通过计算其切向风的轴对称平均得到其最大风速半径( $R_{MAX}$ )和 7 级( $R_{34}$ )、10 级( $R_{50}$ )和 12 级( $R_{65}$ )在各个象限(分别为东北、东南、西南和西北)的风圈半径;再根据整编后的热带气旋最佳路径资料和 EC 再分析资料计算台风移向、移速和环境垂直切变(取台风中心 600 km 半径范围内的平均)等物理量。具体各个物理量与结构参数之间的相关系数和总解释方差如表 3 所示。可以看到,环境风垂直切变与最大风速半径( $R_{MAX}$ )和 7、10、12 级风速半径均呈反比,且通过 0.05 的显著性水平检验,说明环境风场的大小可以直接影响台风的结构特征。另外,热带气旋的强度( $V_{MAX}$ )与最大风速半径( $R_{MAX}$ )呈反比,而与各级风圈半径成正比,说明台风越强则台风眼墙结构越紧密,且大风半径越大。值得注意的是,对于最大风速半径( $R_{MAX}$ )而言热带气旋所处的纬度较其经度的相关性更为显著,这说明台风的最大风速半径具有明显的纬向分布特征。

表 3 台风结构特征参数与环境物理量之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between several structure parameters and environmental parameters

结构参数	总解释方差	经度	纬度	强度	移向	移速	整层切变	中低层切变
$R_{MAX}$	56.7%	-0.098	0.229**	-0.754**	0.212*	0.051	0.160*	0.134*
$R_{34}$	62.8%	0.199*	0.201*	0.862**	-0.182	0.083*	-0.159*	-0.167*
$R_{50}$	73.9%	0.171*	0.086*	0.815**	-0.199*	0.063*	-0.140*	-0.176*
$R_{65}$	82.2%	0.133*	0.032*	0.738**	-0.188*	0.032	-0.212**	-0.149*

\*\*,\* 分别表示通过 0.01 和 0.05 的显著性水平检验。

\*\* and \* represent those having passed the 0.01 and 0.05 significance test levels, respectively.

#### 3.2 最大风速半径估计结果

利用上述方法对 2014 年的样本进行了独立样

本检验(即建模采用 2007—2013 年资料,未包含 2014 年样本数据)。首先,讨论对最大风速半径( $R_{MAX}$ )的估计结果( $pR_{MAX}$ )进行检验。结果如图 6

所示,通过比较  $pR_{MAX}$  和  $R_{MAX}$  发现其趋势一致性在 100 km 范围内比较好,而大半径的估计性能上差异较大,整体的平均误差值为 17.3 km。

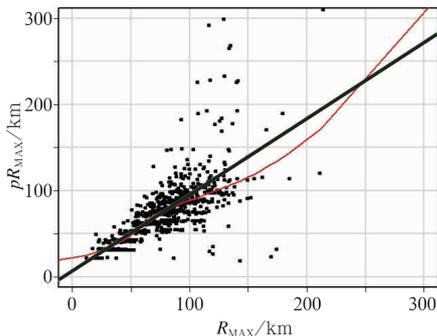


图 6 模型预报结果  $pR_{MAX}$  与分析结果  $R_{MAX}$  的散点分布图  
(粗线为一元线性拟合线,细线为多元线性拟合线)  
Fig. 6 Scatter plot of prediction model's  $pR_{MAX}$  and  $R_{MAX}$   
(Thick line is one element linear fitting; thin line is multi-element linear fitting)

图 7 是  $R_{MAX}$  估计误差随台风强度 ( $V_{MAX}$ ) 的分布,可以看出较大的误差分布在热带风暴到强热带风暴以下级别,这与前面的讨论结果一致,说明越弱的台风最大风速半径的发散度越大,可预测性越低。

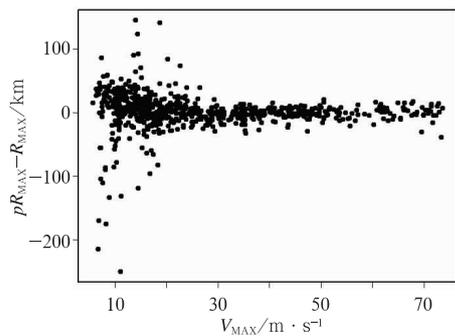


图 7 模型预报  $pR_{MAX} - R_{MAX}$  误差随台风强度的分布  
Fig. 7 Scatter plot of prediction model's  $pR_{MAX} - R_{MAX}$  at different TCs intensity

### 3.3 各级风圈半径估计结果

以 7 级风西北象限 ( $R_{34NW}$ ) 的估计结果检验为例(图 8),通过比较  $pP_{34NW}$  和  $R_{34NW}$  发现其趋势整体一致,平均误差值为 36.2 km(图 9)。误差随强度

的分布得较  $pR_{MAX}$  的估计结果发散度更大,说明  $R_{34NW}$  的可预测性较最大风速半径要低。

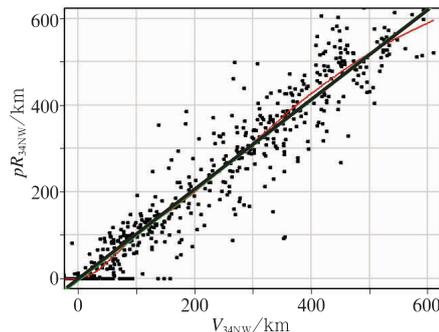


图 8 同图 6,但为 7 级风西北象限 ( $R_{34NW}$ )  
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for  $pR_{34}$  and  $R_{34NW}$

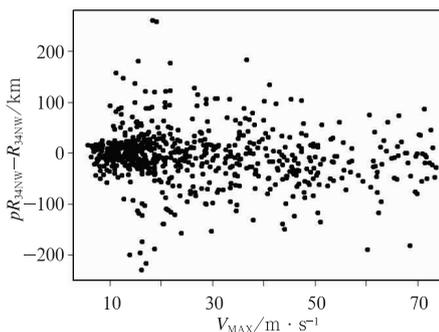


图 9 同图 7,但为 7 级风西北象限  
Fig. 9 Same as Fig. 7, but for  $pR_{34NW} - R_{34NW}$  at different TCs intensities

最后给出所有象限不同风速半径估计结果的平均绝对误差(MAEs)如表 4 所示。从结果检验来看 7 级风圈 ( $R_{34}$ ) 的估计误差平均在 30 km 左右,10 级 ( $R_{50}$ ) 风圈半径的估计误差在 20~25 km,12 级风圈 ( $R_{65}$ ) 半径的估计误差在 15~20 km。其中,西南象限整体误差较小,而西北象限和东南象限误差相对较大。

表 4 独立样本检验的平均误差检验(MAEs)(单位:km)  
Table 4 MAEs of Independent sample test (unit: km)

	西北象限	东北象限	东南象限	西南象限
$R_{34}$	36.2	31.3	39.9	23.3
$R_{50}$	23.8	22.1	29.4	20.1
$R_{65}$	20.3	15.4	17.9	16.7

通过对独立样本检验分析结果可以看出该方法具有一定的客观估计能力,对于不同半径的风圈半径预报能力略有差别。

## 4 结论和讨论

本文重点介绍了一种用多种卫星资料和融合技术开发的高分辨率热带气旋表面风场资料,并运用该资料分析了西北太平洋和南海台风的结构特征,为认识台风风场结构特征提供参考。

首先,分析发现台风最大风速( $V_{MAX}$ )和最大风速半径( $R_{MAX}$ )之间存在一定的线性关系,即台风强度越强,台风眼墙最大风速带往台风中心收缩,但收缩的趋势并不是线性的。由于 $R_{MAX}$ 本身就与台风的强度有关,对于强度达到强热带风暴以上级别的台风其结构差异不明显。而对于强度较弱的台风,最大风速半径的发散程度更大。对于强热带风暴以下强度三个区域内 $R_{MAX}$ 的峰值分布从小到大依次为西北太平洋、我国南海海域、我国东部和北部海域。其中出现在西北太平洋的台风 $R_{MAX}$ 概率密度分布范围最广(60~120 km),说明其结构的差异性大;南海区域台风的最大风速半径概率密度分布在80~100 km;而与西北太平洋和南海台风相比,位于中国东部和北部海域的台风的最大风速半径概率密度分布峰值在100 km附近。对台风各级风圈半径的分析发现,平均而言7级风圈半径( $R_{34}$ )东部大于西部,而10级风圈半径( $R_{50}$ )和12级风圈半径( $R_{65}$ )则没有这个现象,这可能跟季风环流与台风本体环流的结合有关。台风眼墙置换过程往往配合着台风强度的短暂性波动,在ERC演变过程中,内外眼墙之间的距离逐渐减小,内眼墙风速逐渐减小,外眼墙风速逐渐增大,最终完成眼墙的替换过程。

本文最后探讨了一种利用MTCSWA资料和数值模式产品的台风结构客观估计方法,将台风的位置、移动和环境场切变与其结构特征联系起来,建立了 $R_{MAX}$ 和各级风圈半径的估计模型。对独立样本的检验结果说明该方法具有一定的估计能力,可用于台风强度的客观分析和预报中。但是由于MTCSWA资料本身存在一定的局限性和分析误差,对强台风级以上的热带气旋存在低估,因此其风场结构也存在较大的误差。由于单纯的卫星反演资料并不能完整地反映台风低层风场特征,仍需要补充结合地面观测、探空和廓线雷达等资料进行订正。在观测手段不断发展的情况下,如何有效利用多源资料进行台风强度和风雨结构的分析及其融合理论和方法研究值得不断探索。

## 参考文献

- 柴乾明,王文彩,黄忠伟. 2016. 基于卫星数据研究热带气旋眼壁及周围螺旋云带宏观结构特征. 热带气象学报, 32(2):172-182.
- 方翔,邱红,曹志强,等. 2008. 应用 AMSU-B 微波资料识别强对流云区的研究. 气象, 34(3):22-29.
- 康建伟,陆汉城,钟科,等. 2007. 台风内部的中尺度波动与多边形眼墙的形成. 热带气象学报, 23(1):21-26.
- 雷小途,陈联寿. 2005. 热带气旋风场模型构造及特征参数估算. 地球物理学报, 48(1):25-31.
- 李宁,王国,闵颖. 2007. 台风双眼墙结构的数值模拟及分析. 气象, 33(T1):189-196.
- 林良助,梁巧倩,黄忠. 2006. 华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析. 气象, 32(2):14-18.
- 潘畅,宇婧婧,廖捷,等. 2011. 地面和卫星降水产品对台风莫拉克降水监测能力的对比分析. 气象, 37(5):564-570.
- 钱燕珍,高拴柱,黄思源,等. 2013. 强台风海鹰登陆前后强度变化的观测分析. 气象, 39(10):1265-1274.
- 任丽,王承伟,张桂华,等. 2013. 台风布拉万(1215)深入内陆所致的大暴雨成因分析. 气象, 39(12):1561-1569.
- 陶亦为. 2012. 2012年8月大气环流和天气分析. 气象, 38(11):1429-1435.
- 田伟,吴立广,刘青元,等. 2016. NOAA/NESDIS 多平台热带气旋风场资料在中国东海区域评估. 热带气象学报, 32(1):63-72.
- 王新,方翔,邱红,等. 2009. 应用 AMSU B 微波资料分析 0509 号 Matsa 台风水汽场分布特征. 气象, 35(12):30-36.
- 许映龙,张玲,高拴柱. 2010. 我国台风预报业务的现状及思考. 气象, 36(7):43-49.
- 严卫,韩丁,周小珂,等. 2013. 利用 CloudSat 卫星资料分析热带气旋的结果特征. 地球物理学报, 56(6):1809-1824.
- 赵放,冀春晓,高守亭,等. 2012. 浙江沿海登陆台风结构特性的多普勒雷达资料分析. 气象学报, 70(1):15-29.
- 张增海,曹越男,刘涛,等. 2014. ASCAT 散射计风场在我国近海的初步检验与应用. 气象, 40(4):473-481.
- Delia Y C, Kevin K M, Cheng S L. 2011. Some Implications of core regime wind structure in western north pacific tropical cyclones. Wea Forecasting, 26:61-75.
- Demuth J K, DeMaria M, Knaff J A, et al. 2004. Validation of and advanced microwave sounder units (AMSU) tropical cyclone intensity and size estimation algorithms. J Appl Meteor, 43:282-296.
- Dvorak V F. 1975. Tropical Cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery. Mon Wea Rev, 103:1333-1346.
- Dvorak V F. 1984. Tropical Cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech Rep NESDIS, 11-47.
- Franklin J L, Black M L, Valde K. 2003. GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications. Wea Forecasting, 18:32-44.
- Holland G I, Merrill, R T. 1984. On the dynamics of tropical cyclone structural changes. Quart J Roy Meteor Soci, 110:723-745.
- Kelvin T F C, Johnny C L C. 2011. Size and strength of tropical cy-

- clones as inferred from QuikSCAT data. *Mon Wea Rev*, 140: 811-824.
- Knaff J A, DeMaria M. 2010. NOAA/NESDIS Multiplatform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis Users Manual. NOAA Tech Rep NESDIS.
- Knaff J A, DeMaria M, Molenaar D A, et al. 2011. An automated, objective, multi-satellite platform tropical cyclone surface wind analysis. *J Appl Meteor Clim*, 50: 2149-2166.
- Knaff J A, Longmore S P, Molenaar D A. 2014. An objective satellite-based tropical cyclone size climatology. *J Climate*, 27: 455-476.
- Knaff J A, Sampson C R, et al. 2007a. Statistical tropical cyclone wind radii prediction using climatology and persistence. *Wea Forecasting*, 22(4): 781-791.
- Knaff J A, Slocum C J, Musgrave C R et al. 2016. Using routinely available information to estimate tropical wind structure. *Mon Wea Rev*, 144: 1233-1247.
- Knaff J A, Zehr R M. 2007b. Reexamination of tropical cyclone wind-pressure relationship. *Wea Forecasting*, 22(1): 71-88.
- Knaff J A, Zehr R M, Goldberg M D, et al. 2000. An example of temperature structure differences in two cyclone systems derived from the advanced microwave sounder unit. *Wea Forecasting*, 15: 476-483.
- Kossin J P. 2014. Hurricane wind-pressure relationship and eyewall replacement cycles. *Wea Forecasting*, 30: 177-181.
- Kossin J P, Sitkowski M. 2011. Predicting hurricane intensity and structure changes associated with eyewall replacement cycles. *Wea Forecasting*, 27: 484-488.
- Mueller K J, Demaria M, Knaff J A, et al. 2006. Objective estimation of tropical cyclone wind structure from infrared satellite data. *Wea Forecasting*, 21(6): 990-1005.
- Powell M D, Houston S H, Amat L R, et al. 1998. The HRD real-time hurricane wind analysis system. *J Wind Eng Ind Aerod*, 77: 53-64.
- Stikowski M, Kossin J P, Rozoff C M. 2011. Intensity and structure change during Hurricane eyewall replacement cycles. *Mon Wea Rev*, 139: 3829-3845.
- Timothy L O, Christopher S V. 2007. The advanced dvorak technique; continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery. *Wea Forecasting*, 22: 287-298.
- Wu L G, Tian W, Liu Q Y, et al. 2015. Implication of the observed relationship between tropical cyclone size and intensity over the western north pacific. *J Climate*, 28: 9501-9506.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *J Atmos Oceanic Technol*, 31: 287-301.
- Zhou X Q, Wang B. 2011. Mechanism of concentric eyewall replacement cycles and associated intensity change. *J Atmos Sci*, 68: 972-988.