陈可鑫,陈光华,向纯怡,等. 2020. 基于 MTCSWA 风场资料对西北太平洋热带气旋风场结构的气候统计特征研究 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 588-600. CHEN Kexin, CHEN Guanghua, XIANG Chunyi, et al. 2020. Statistical Characteristics of Wind Field Structures of Tropical Cyclones over the Western North Pacific Based on MTCSWA Data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 588-600. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19122

基于 MTCSWA 风场资料对西北太平洋热带 气旋风场结构的气候统计特征研究

陈可鑫^{1,2} 陈光华¹ 向纯怡³ 李兴良³

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心,北京 100029
 2 中国科学院大学,北京 100049
 3 国家气象中心,北京 100081

摘 要 基于多平台热带气旋表面风场资料(MTCSWA),研究了 2007~2016 年 6~11 月西北太平洋上不同尺度热带气旋(TC)的气候统计特征,TC 各级风圈半径在不同象限的变化特征、风场结构的对称度及二者与强度变化之间的相关性。利用 7 级风圈半径与 TC 近中心最大持续风速(MSW)来定义 TC 的尺度和强度。结果表明,西北太平洋上 TC 的平均尺度为 221.9 km,其中小 TC 平均尺度为 96.4 km,大 TC 平均尺度为 346.4 km。大 TC 活动位置的空间分布较小 TC 更为集中,整体活动范围较小 TC 偏北。TC 尺度的峰值出现在 8 月和 10 月。在TC 的风场结构中,7 级、10 级、12 级风圈的平均半径分别为 221.9、121.0、77.4 km。TC 风圈的对称度的统计结果表明 7 级风圈的对称度最低,12 级风圈的对称度最高。相关分析表明,在 TC 的生命史中,各级风圈半径与其强度存在一定的正相关关系,其中 12 级风圈半径与强度的相关性最低;对于同一风圈而言,在 TC 的不同发展阶段中,不同象限的风圈半径与强度的相关性不同。在 TC 的风场结构中,风圈的对称度与 TC 强度的相关性随着风圈强度的增强而减弱,只有 7 级风圈的对称度在 TC 的整个生命周期中表现出与 TC 强度之间的弱的正相关关系。

关键词 MTCSWA 资料 风场插值 相关性分析 对称度
 文章编号 1006-9585(2020)06-0588-13 中图分类号 P458.1⁺24 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19122

Statistical Characteristics of Wind Field Structures of Tropical Cyclones over the Western North Pacific Based on MTCSWA Data

CHEN Kexin^{1, 2}, CHEN Guanghua¹, XIANG Chunyi³, and LI Xingliang³

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

3 National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract On the basis of the MTCSWA (Multiplatform Tropical Cyclone Surface Winds Analysis) data, the climatic statistical characteristics of tropical cyclones (TCs) at different sizes, the variation of the averaged radial extent of

收稿日期 2019-08-21; 网络预出版日期 2020-03-29

作者简介 陈可鑫,女,1997年出生,硕士研究生,主要从事热带气旋研究。E-mail: chenkexin@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈光华, E-mail: cgh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFA0603901, 国家自然科学基金项目 41975071、41775063

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFA0603901), National Natural Science Foundation of China (Grants 41975071 and 41775063)

different significant wind speed thresholds (i.e., 34, 50, and 65 kt, 1 kt≈0.514 m/s) in different quadrants, and the axisymmetricity of the radial extent of different wind speed thresholds and their correlation with TC intensity over the western North Pacific from 2007 to 2016 are investigated. In this study, the size and intensity of TCs are defined as the azimuthally averaged radius at which wind speed decreases to 34 kt (\approx 17.5 m/s) from the center and the maximum sustained winds near the TC center, respectively. The mean size of TCs over the western North Pacific Ocean is 221.9 km, with small TCs of 96.4 km and large TCs of 346.4 km. The activity location of large TCs is more concentrated, with a more northward distribution, than that of small TCs. The peak value of the mean size of all TCs occurs in August and October. The mean values of the azimuthally averaged radial extents of the 34, 50, and 65 kt wind speed thresholds are 221.9, 121.0, and 77.4 km, respectively. According to the definition of axisymmetricity, the radial extent of the 34 kt wind speed threshold has the lowest axisymmetricity and the 65 kt wind speed threshold has the highest axisymmetricity. Positive correlations exist between the radial extents of the 34, 50, and 65 kt wind speed thresholds and the TC intensity during the TC's lifetime, among which the correlation between the radial extent of the 65 kt wind speed threshold and the TC intensity is the lowest. For a certain wind speed threshold, the correlation between its radial extent and TC intensity varies in different quadrants at different stages of the TC's lifetime. The higher the wind speed is, the weaker the correlation between the axisymmetricity of its radial extent and TC intensity. Only the axisymmetricity of the radial extent of the 34 kt wind speed threshold shows a weak positive correlation with TC intensity during the TC's lifetime. Keywords MTCSWA data, Wind field interpolation, Correlation analysis, Axisymmetricity

1 引言

强度、壮度和尺度是用来描述热带气旋(TC) 特征的 3 个主要参数(Yuan et al., 2007)。在 TC 的生命周期中,一般用 TC 近中心最大持续风速 (MSW)和TC中心最低海平面气压(MSLP)来 表示 TC 的强度;用外核风速强度 (OCS),即用 距离 TC 中心 1~2.5 个纬度范围内的平均切向风速 来表示 TC 的壮度;用 TC 中心到最外围闭合等压 线的平均半径(ROCI)来表示TC的尺度 (Weatherford and Gray, 1988a, 1988b)。目前, 对 于 TC 尺度的研究,更多的是采用 R15、R17 来表 示(即在 TC 环流场中,从最大风速圈向外延伸到 风速衰减为 15 m/s、17 m/s 时距离 TC 中心的平均 距离)(Merrill, 1984)。TC这3个主要参数之间 并不是简单的相关关系。Weatherford and Gray (1988a)利用飞机侦查数据估计 TC 的壮度(OCS) 时发现,对于强度(MSW)相同的TC,其壮度的 差别可以很大。Wu et al. (2015)利用卫星风场资 料也发现了 TC 的尺度和强度之间的非线性关系, 因此不能够简单地依据 TC 的尺度来判断 TC 可能 带来的灾害的严重程度。

判断预估 TC 的影响程度一直是国内外 TC 业务预报的重点内容。仅仅依据 TC 的强度不足以来 判断 TC 的危害程度,在预估 TC 危害程度过程中, TC 的风场结构也是的一项重要指标。Chen et al.

(2011)指出,强度较弱的TC若其风场结构紧凑, 能够形成较强的降水,带来严重的泥石流、山体滑 坡等次生灾害,其危害程度远远超过那些强度较强 但风场结构松散的 TC。并且 TC 所带来的强风、 风暴潮以及大范围的洪水灾害与TC低层风场结构 密切相关 (Irish et al., 2008; Langousis and Veneziano, 2009)。对于 TC 风场结构已经开展了一系列的研 究,包括切向风的垂直结构(Knaff et al., 2004; Stern, 2010)、风场的紧凑程度(Chen et al., 2011)、风 速分布的径向变化(Chavas et al., 2015; Chavas and Lin, 2016)、风场的对称性(Klotz and Jiang, 2017) 等等。基于风场结构研究的重要性, 2004 年美国 开始在 TC 最佳路径数据集中(IBTrACS)加入了 风圈半径数据,联合台风警报中心 JTWC 也在业 务中提供了风圈预报产品。但由于 TC 观测数据分 布稀疏,质量较差,使得风圈半径的预测多依赖于 气候学方法。Knaff et al. (2007)利用 TC 气候学 以及风场结构的持续性特征,建立了统计参数模型 (CLIPER) 来预测 TC 的风场结构。之后, 基于 红外卫星图像并结合全球模式结果的分析,Knaff et al. (2015)发展了一种相对简单的利用位置、路 径、强度等 TC 观测信息来估计 TC 风场结构的客 观方法。

为了获得更加可靠的 TC 风场结构特征,就需 要更加客观、更高分辨率的 TC 风场资料。近年来, 随着观测技术的发展,TC 研究中使用的主要资料 来源于卫星资料, Lee et al. (2010)利用 QuikSCAT 资料研究发现,西北太平洋上大部分的 TC 在增强 过程中,其尺度保持不变; Chan and Chan (2013)利用 QuikSCAT 反演的风场资料,获得了更加全面的 TC 气候学特征。针对 TC 风场结构的研究,Knaff et al. (2000)利用红外卫星图像发展了最优 插值计算方法,并利用这一算法融合了多个卫星反 演风场数据,得到了多平台 TC 近地表风场资料

(Multiplatform Tropical Cyclone Surface Wind Analysis, MTCSWA)。这套资料在全球的 TC 研究中被广泛使用。向纯怡等(2016)对中国东海区域的 MTCSWA 风场资料进行了评估,并利用 MTCSWA 风场资料发现,TC 的风场结构与强度之间存在着一定的相关关系,TC 强度与最大风速 半径成反比,与各级风圈半径成正比。

随着气候变暖,TC强度呈现逐渐增强的趋势 (Elsner et al., 2008),因此对西北太平洋上TC的 风场结构进行分析和预测对于我国防范台风灾害具 有重要意义。近年来由于遥感技术的发展以及TC 观测数据的积累,使得获取并分析大量的TC样本 成为可能。本文使用的MTCSWA观测资料是覆 盖TC风场的高分辨率产品,在此基础上,我们将 进一步分析TC风圈半径在不同象限中的气候学特 征,研究不同象限中各级风圈(7级、10级、 12级)的半径大小、TC风场结构对称性的定量表 示及其二者与TC强度变化的相关关系。

2 数据介绍

2.1 最佳路径数据集(Best-track datasets)

最佳路径数据集记录了从 1999 年 7 月至 2017 年 9 月西北太平洋海域强度到达热带低压级别的 TC 数据,包括了本文研究时段 2007 年 6 月至 2016 年 11 月的 TC 数据,具体为 TC 的中心位置、 TC 近中心最大持续风速(MSW)、TC 中心最低 海平面气压(MSLP)、TC 环流最外围闭合等高 线(ROCI)等数据。时间分辨率为 6 h,即在 00:00(协调世界时,下同)、06:00、12:00、18:00 各 有一次观测记录(https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/ [2019-08-21])。

2.2 多平台热带气旋表面风场资料(MTCSWA)

本文中使用的风场资料来源于美国国家海洋和 大气管理局/国家环境卫星数据和信息署(NOAA/ NESDIS)提供的多平台 TC 风场资料的融合产品。 该风场资料覆盖了 TC 中心周围直径为 15°的区域, 水平空间分辨率为 0.1°(纬度)×0.1°(经度), 时间分辨率为 6 h (00:00、06:00、12:00、18:00)。 MTCSWA 包含了两层风场资料: 10 m 高度和 600~700 hPa 的飞行高度 (flight-level),本文使 用的是 10 m 高度上的资料 (http://www.ssd.noaa.gov/ PS/TROP/mtcswa.html[2019-08-21])。

2.2.1 MTCSWA 资料介绍

MTCSWA 风场资料是多个基于卫星的近地表 风速估计数据集的融合产品,通过各个数据集相互 弥补各自在风速估计过程中存在的不足,从而获得 更准确的高分辨率 TC 环流风场数据(Knaff and DeMaria, 2010)。用于融合的数据集主要包括微 波 AMSU、云导风 CDFT、水汽风 WV、红外风 场 IRWD 以及 QuickSCAT 和 A-SCAT 雷达反演风 场资料。

QuickSCAT 和 ASCAT 的风场高度位于海表面 (10 m)。QuickSCAT 使用一种 K 波段(13.4 GHz) 雷达,通过探测海表面粗糙度来估计海表面风速。 当风速在 30 m/s 以下时,海表面粗糙度越高,则 风速越大。但是 K 波段难以对强对流区和大风区 中的风向进行准确判断。而 ASCAT 使用 C 波段雷 达(5.225 GHz)来探测海表面粗糙度。相比 K 波 段雷达, C 波段雷达降低了对降水的敏感度, 但分 辨率较低(约25km)。ASCAT风场对大风风速 的低估现象显著,如果在融合时 ASCAT 风场覆盖 的面积越大,那么最终获得的 MTCSWA 资料对于 大风的低估偏差也会越大。其余的 AMSU、CDFT、 WV 以及 IRWD 资料均位于"飞行高度"(约 700 hPa)。 微波 AMSU 根据微波探测仪得到 700 hPa 和 850 hPa 的高度场,通过求解非线性平衡方程,来建立 TC 周围的二维风场,因此 AMSU 适用于对 TC 环境 气流的估计,而对于 TC 内核区风场估计的准确率 不高。云导风 CDFT 资料主要覆盖 TC 环流周围的 区域,由于高云的阻挡,其无法追踪到 TC 中心附 近的低层的风速特征。IRWD 根据 TC 的强度、位 置、和红外图像,能够获得最大风速半径以及距 离 TC 中心 182 km 处的风速情况。

在对各类风场资料进行融合时,需要先将位于 海表面的风场资料(QuickSCAT、ASCAT)调整 到"飞行高度"(约 700 hPa)。对各类风场资料 在同一"飞行高度"上进行客观分析时,通过进行 质量控制以及选取不同的权重系数来融合各类风场 资料,从而得到客观的分析风场。最后,根据 TC 环流中海表面风速衰减因子的分布情况,将"飞行 高度"上的客观分析风场调整至海表面高度 (10 m),得到 1 min 平均的海表面风场资料,即 本文所使用的 MTCSWA 风场资料。

2.2.2 MTCSWA 资料误差情况

田伟等(2016)通过比对 TC 活动时段内 MTCSWA 风场资料与海岛站、浮标站观测到的风 场数据,对中国东部海域的 MTCSWA 风场资料进 行了评估;并利用了 FNL 风场、红外亮温云图和 降水资料分析了 MTCSWA 风场资料在空间分布上 的可靠性。结果表明 MTCSWA 资料能够较好地再 现 TC 的水平风场结构,但是对于 TC 环流中的大 风存在一定的低估误差。之后,向纯怡等(2016) 进一步讨论了 MTCSWA 风场资料在西北太平洋上 的可靠性。他利用中国气象局整编的最佳路径资料 和中国气象局地面站点观测中我国沿海岸基气象站、 海岛自动站、海洋气象浮标以及石油平台站观测到 的风速、风向数据,根据站点位置距离 TC 中心的 距离,通过插值方法将自动站资料转换到以 TC 为 中心的极坐标风场中,比较该极坐标风场与 MTCSWA 风场数据的差异来讨论 MTCSWA 风场 资料在西北太平洋上的可靠性。研究结果表明, MTCSWA 资料能够较好地反映强 TC 的强度特征, 但对于热带风暴(STS)级别以下的 TC 强度存在 一定程度的高估。

3 数据处理

3.1 数据筛选

本文选取了西北太平洋上 2007~2016 年 6~ 11 月的 TC 最佳路径观测数据。在 TC 的整个生命 周期中,不同时刻 TC 所处地区的海洋特性和气候 背景差异会对 TC 的风场结构造成不同的影响。 Knaff et al. (2016)通过对两个路径不同的 TC 进 行讨论,认为在 TC 登陆后,地形的分布差异给 TC 风场结构不对称变化带来的影响也不同。因此 为了减小地形以及 MTCSWA 风场资料的系统性误 差等因素对 TC 风场结构的影响,在分析前需要对 TC 最佳路径数据进行严格的筛选。具体筛选条件 如下: (1)筛选强度达到热带风暴 (TS) 级别,即 MSW 大于 34 kt (1 kt≈0.514 m/s)的 TC 每 6 h 定 位时次的数据;(2)筛选 TC 中心到其附近最近 大陆的距离大于 500 km 的 TC 每 6 h 定位时次的数 据;(3)去除在整个生命周期中观测时刻少于 4 个的 TC。最后得到 113 个符合筛选条件的 TC,共 1792 个观测样本,占所有定位时次数据的 36.9%。

3.2 风圈半径的计算

利用 MTCSWA 风场资料,通过插值建立以 TC 中心为原点的极坐标系风场。在极坐标中,定 义单位方位角的大小为 5°,以正东方向为起点, 向逆时针方向旋转,每隔 1 个单位方位角取一条极 坐标半径。在极坐标半径上,取径向的格点分辨率 为 0.1°(纬度)。我们在径向上选取了 53 个格点, 因此得到一个维度为 72(逆时针方向) ×53(径 向)的极坐标网格,覆盖了 TC 周围直径约为 10.5 个纬度的区域。

将 MTCSWA 格点风场资料插值到极坐标网格中,得到各个观测时刻以 TC 中心为原点的极坐标 系风场,即可在极坐标系风场中计算各个方位角上 不同风圈(7级34kt、10级50kt、12级65kt) 的半径。例如,计算某一方位角上7级风圈的半径 时,选取该方位角上所对应的极坐标半径上,在最 大风速半径外风速最接近34kt的6个格点进行线 性拟合,根据得到的拟合方程求得该方向上7级风 圈的半径。选取6个点是因为6个点足够获得较好 的拟合效果。需要指出的是,如果在某个方位角上 找不到6个满足拟合条件的点或拟合得到的线性回 归方程未通过95%的显著性检验时,将此方位角 上的风圈半径设为缺省值。

定义第一象限(东北象限 NE)的风圈半径为 0~90°范围内的极坐标半径上的风圈半径的平均值, 第二、三、四象限(西北 NW、西南 SW、东南 SE 象限)以此类推,而整个风圈半径即为4个象 限风圈半径的平均值。需要指出的是,当某个象限 中,求得的风圈半径所对应的方位角之和小于25° 时(即方位角个数小于5时),将该象限的风圈半 径设为缺省值;当在某个观测时刻,风圈半径在两 个及以上的象限为缺省值时,将整个风圈的半径设 为缺省值。经过以上筛选得到7级、10级、12级 风圈的风场数据个数分别为1328、950、661。

3.3 TC 的强度和大小

利用最佳路径数据集中 MSW 来表示 TC 强度。 对于 TC 尺度的定义选择了与 Chan et al. (2012) 相似的方法,用最大风速圈外风速衰减为 34 kt (≈17.5 m/s)时距离 TC 中心的径向距离,即 7 级 风圈的方位平均半径来表示 TC 的大小。并用计算 得到的所有 7 级风圈半径的第 25 个百分位点和第 75 个百分位点的风圈半径作为大、中、小 TC 的分 类阈值,对西北太平洋上 2007~2016 年 6~11 月 的 TC 进行分类。即根据 7 级风圈的半径大小从小 到大进行排序,把排在前 25 个百分位点的 TC 称 为小型 TC (简称小 TC),排在第 25~75 个百分 位点的 TC 称为中型 TC,排在第 75~100 个百分 位点的 TC 称为大型 TC (简称大 TC)。

4 TC 尺度的气候统计特征

4.1 TC 尺度的季节变化特征

在研究时段内,西北太平洋上 TC 的平均尺度 存在两个峰值,分别出现在 8 月和 10 月(图 1), 与 Chan et al. (2012)利用 QuikSCAT 资料研究西 北太平洋 1999~2009 年 TC 的气候统计特征的结 果有所不同(峰值出现在 7 月和 10 月),这可能 是由于 TC 观测数目的增多以及所采用资料的差异 所造成的。从图 1 中的统计结果来看,6 月 TC 观 测样本较少,仅有 25 个。图 2 给出了 7~11 月大、 中、小 TC 所占频率的统计结果,8 月和 10 月大 TC 所占比例大(34.4%、27.6%),小 TC 所占比例小 (19.6%、20.8%)。图 3 还给出了 7~11 月大、 中、小 TC 平均尺度的统计结果,其中小、中等尺 度 TC 的平均尺度随月份的变化不显著,而大 TC 的平均尺度在 8 月和 10 月出现了两个峰值,因此 造成了 TC 平均尺度的峰值出现在 8 月和 10 月。



图 1 2007~2016 年 6~11 月西北太平上 TC 平均尺度的季节变化 (通过 90% 的显著性检验)。图中误差线表示 1 倍均方差, x 轴 上方的数据表示 TC 观测数

Fig. 1 Monthly mean sizes of tropical cyclones (TCs) over the western North Pacific (WNP) from June to November during 2007–2016. Vertical bars denote the mean square error, and numbers on the *x*-axis denote the number of cases

4.2 不同尺度 TC 活动位置的空间分布特征

Chan et al. (2012)利用 QuikSCAT 资料研究 了西北太平洋上 TC 的气候统计特征,在其研究中 用 R17(从 TC 中心沿径向向外风速衰减至 17 m/s 时的方位平均半径)来表示 TC 尺度。为了方便与 Chan et al. (2012)的统计结果进行比较,我们将 计算得到的结果转化为以纬度为单位进行表示,具 体对比如表 1 所示。西北太平洋上 TC 的平均尺度 为 221.9 km,约为 1.92°(纬度),接近 Chan et al. (2012)计算 R17 所得到的 2.13°(纬度)。7 级 风圈的均方差为 0.90°(纬度),第 25、75个百分 位数分别为 1.14、2.50°(纬度)。除了 7 级风圈 第 25个百分位点的尺度偏小,其余结果和 Chan et



图 2 2007~2016 年 7~11 月西北太平洋上大型 (L)、中型 (M)、小型 (S) TC 所占百分比的变化

Fig. 2 Monthly percentage frequencies of large-sized (L), medium-sized (M), and small-sized (S) TCs over the WNP from July to November during 2007–2016



图 3 2007~2016 年 7~11 月西北太平洋上大型、中型、小型 TC 平均尺度的变化

Fig. 3 Monthly mean size of large-sized, medium-sized, and smallsized TCs over the WNP from July to November during 2007–2016

al. (2012)的研究结果很好地吻合,误差不超过 0.2°(纬度)。

在 1328 个观测样本中,大、中、小 TC 的观测 分别有 332、665、331 个,平均尺度分别为 3.12° (纬度)(346.4 km)、2.00°(纬度)(222.0 km) 和 0.87°(纬度)(96.4 km)。由于中等 TC 活动 位置分布分散,不像大、小 TC 具有显著的空间分 布特征(图略),故在此只对大、小TC活动位置 的空间分布情况进行讨论。大、小TC在西北太平 洋上活动位置的空间分布情况如图4所示。除了 大TC的个别观测外,大、小TC的活动位置均位 于40°N以南的西北太平洋海域上。小TC平均活 动位置的经纬度为(16.0°N,141.8°E),大TC平 均活动位置的经纬度为(24.3°N,137.8°E)。大 小TC活动位置的空间分布存在显著差异,小TC 活动位置的纬度分布相较大TC呈现整体偏南的分 布特征,小TC活动位置主要分布在30°N以南, 在10°N以南几乎没有大TC活动。从TC活动的 空间分布的离散程度来看,小TC的空间分布较为 松散,而大TC的空间分布较为密集。

图 5 和图 6 分别展示了 7~10 月大、小 TC 活动位置的纬度、经度分布频率折线图。从 TC 活动位置的纬度分布随时间的变化上来看,小 TC 的活动范围在 7 月和 10 月,相较于 8 月和 9 月的分布更为集中且位置偏南,主要位于 10°N~20°N。相反,大 TC 在 7 月和 10 月相较于 8 月和 9 月的分布更为分散,8 月和 9 月大 TC 主要集中活动于 20°N~30°N。

表 1 2007 ~ 2016 年 6 ~ 11 月西北太平洋上 TC 尺度的统计特征 Table 1 Statistical attributes of tropical cyclone (TC) size over the WNP from Jun to November during 2007–2016

	观测记录数	TC粉	TC尺度/(°)(纬度)					
		IС	平均值	均方差	中位数	第25个百分位	第75个百分位	
7级风圈	1328	113	1.92	0.90	1.84	1.14	2.50	
R17	814	176	2.13	0.98	1.94	1.41	2.61	

注:7级风圈行为本文结论,R17行为Chan et al. (2012)的结论



图 4 2007~2016 年 6~11 月西北太平洋(a)小型和(b)大型 TC 活动空间分布。方括号中的数字为观测样本数、TC 个数、TC 的平均尺度以及 TC 平均活动位置的经纬度,空心圆形为大型、小型 TC 的平均活动位置

Fig. 4 Distribution of (a) small-sized and (b) large-sized TCs activities over the WNP from June to November during 2007–2016. Numbers in square brackets denote the number of cases, TCs, mean TC size, and longitude and latitude of the average position of TC activities, and the red hollow circle denotes the average position of small-sized and large-sized TC activities



图 5 2007~2016 年 7~10 月西北太平洋上(a) 小型和(b) 大型 TC 活动位置的纬度分布频率 Fig. 5 Percentage frequencies of (a) small-sized and (b) large-sized tropical cyclone (TC) activities over the WNP as a function of latitude in July, August, September, and October during 2007–2016



Fig. 6 Percentage frequencies of (a) small-sized and (b) large-sized TCs activities over the WNP as a function of longitude in July, August, September, and October during 2007–2016

TC 的活动位置与其是否能够发展成为大 TC 之间存在一定关系。图7给出了大、小TC活动时 850 hPa 的合成环流场。从环流形势来看,小 TC 活动时, 西太平洋副热带高压(简称副高)位置偏 西, 而小 TC 多活动于副高南部的东风气流里 (图 4 中 20°N 以南的区域),因此小 TC 活动位 置的纬向分布随着副高的南北移动而变化。8~9 月副高北上,所以在此期间小 TC 活动位置呈现出 向北移动的特征,10月随着副高的南落,小TC的 活动位置也随之呈现出向南移动的特征(图 5a)。 Liu(2002) et al.指出大部分大 TC 的 850 hPa 环流 场表现为"西南急流型",即在 TC 涡旋的南部有 一支强的西南急流,具有这种环流场的 TC 一般位 于 20°N 左右。从大 TC 活动的 850 hPa 合成流场 中也可以看出,大TC 活动时,副高位置偏东,季 风槽加强,季风槽西侧的西南气流加强。这与图4 中大 TC 活动位置在西太平洋西部,菲律宾群岛到 日本群岛之间的海域上分布最为密集的空间分布特 征相吻合。

从 TC 活动位置的经向分布来看(图 6),小 TC 主要活动在 120°E~170°E,其中 7 月和 10 月 集中活动在 130°E~160°E,9月集中活动在 130°E~150°E。8 月小 TC 活动的径向分布最为分 散,径向跨度为 120°E~170°E,且分布频率在 130°E~140°E 和 150°E~160°E 存在两个峰值。大 TC 活动的径向分布较小 TC 集中,主要活动在 120°E~160°E。其中 7 月大 TC 活动的径向分布最 为集中,主要活动在 120°E~140°E,8 月和 9 月的 径向分布较为松散,分布的径向跨度为 120°E~ 160°E。7月和10月大TC活动位置在径向分布上 较8月和9月更为偏西。

5 风圈半径、风圈对称度及二者与 TC 强度的关系

5.1 风圈半径与 TC 强度的相关性分析

TC 风场结构的参考指标为不同强度的风圈半 径。在我国的台风业务预报中,不同强度的风圈具 有不同的指示意义:7级风圈(34 kt)可以认为是 TC 的最外围环流,代表 TC 主体环流所带来的大 风的影响范围,所以一般以7级风圈作为衡量TC 尺度的物理量; 10级风圈(50kt)的半径大小反 映 TC 强风暴的影响范围,所以以 10 级风圈作为 TC 防御的重要参考指标;一般出现 12 级风圈 (65 kt)的 TC 都达到了台风级别,因此在台风业 务预报中,12级风圈是判断台风强灾害范围和影 响程度的重要依据(向纯怡等, 2016)。已有研究 证实了风场结构与 TC 强度之间存在一定的相关关 系, Knaff et al. (2015) 就利用了 TC 中心位置、 移动路径、强度等数据,通过客观分析的方法来预 估 TC 的风场结构,之后向纯怡等人(2016)也利 用 TC 的历史数据,寻找 TC 风场结构和其位置、 强度、移速移向以及环境风切变之间的相关关系, 构建客观估计模型来预测 TC 的风场结构。本文进 一步考虑在 TC 的生命周期中,不同象限中各级风 圈半径与 TC 强度之间的相关关系。

7级、10级、12级风圈半径与TC强度的相关 系数分别为0.38、0.36、0.21(均通过99%的显著



图 7 2007~2016 年 7~10 月西北太平洋(a) 小型和(b) 大型 TC 850 hPa 合成环流形式

Fig. 7 Composite 850-hPa flow pattern of (a) small-sized and (b) large-sized TCs over the WNP from July to October during 2007–2016

性检验),这与Merrill(1984)、Guo and Tan(2017) 的研究结果相一致。进一步计算当 TC 强度处于不 同级别时(热带风暴 ST、强热带风暴 STS、台风 TY、强台风 STY),不同象限中风圈半径与 TC 强度的相关性(表 2)。对于7级风圈而言,当 TC 处于 TY 强度时,风圈半径与 TC 强度呈正相 关,其中第三象限的风圈半径与 TC 强度的相关性 最高;当 TC 达到 STY 及以上时,7级风圈半径 与 TC 强度则呈负相关,其中第四象限的风圈半径 与 TC 强度的负相关最高。对于 10 级风圈而言, 当 TC 处于 STS 强度时,各象限中的风圈半径均 与 TC 强度呈负相关,其中第二、第四象限的风圈 半径与 TC 强度的负相关最高;当 TC 处于 TY 强 度时,10级风圈半径在各象限均与TC强度呈正相 关,但随着 TC 增强至 STY 及以上时,除了第四 象限的风圈半径仍与 TC 强度之间呈现弱的正相关 外,其余象限的相关性均不明显。对于12级风圈 而言,除了 TC 达到 TY 强度时第一象限和第四象 限的风圈半径与 TC 强度呈正相关,以及当 TC 强 度达到 STY 及以上时, 第三象限的风圈半径与 TC 强度呈负相关,其余阶段各象限的风圈半径与 TC 强度的相关性均不明显。对于各级风圈而言, 当 TC 处于 TY 强度时,各级风圈半径均与 TC 强 度呈正相关,当TC 增强至STY 强度时,各级风 圈半径与 TC 强度呈负相关。随着风圈强度的增强, 风圈半径与 TC 强度之间的相关性逐渐减弱。7级、 10级风圈半径与 TC 强度的相关性较好, 12级风 圈半径与 TC 强度的相关性不显著。

以上的分析数据表明,在利用 TC 的强度信息 构建的 TC 风场结构统计估计模型来预估 TC 风场 结构时,只有对 TC 生命周期某些阶段中的部分象 限的风场结构估计具有一定的统计意义,并且对不 同风圈或同一风圈在不同象限中半径大小的估计效 果也不相同。因此,如果考虑到这一点,在评估涉 及到利用 TC 强度数据来预估 TC 风场结构统计模 型的预测效果时,应该有选择地评估在某些象限中 的风场结构的预测效果,或者对不同象限的评估采 用不同的权重,这样的评估结果才会更为准确和 客观。

5.2 风场结构的对称度及其与 TC 强度的相关性 分析

在 TC 的生命周期中,随着 TC 强度的变化, TC 的风场结构呈现不完全对称的变化现象,本文 将进一步分析 TC 的各级风圈半径在各个象限中的 变化情况。统计结果表明,在 TC 的生命周期中, 7 级风圈的平均半径最大,均方差也最大,分别为 221.9 km、100.0 km,12 级风圈的平均半径最小, 均方差也最小,分别为 77.4 km、23.7 km(表 3)。 各级风圈的平均半径与均方差均表现出在第一象限 最大,在第三象限最小的分布情况。通过图 8 的箱 线图,我们可以更直观地比较不同象限中各级风圈 半径的统计特征。整体上看,西北太平洋地区 TC 的风圈半径呈现北部大于南部,东部大于西部的结 构特征。

TC 各级风圈半径在不同象限中的统计特征在 一定程度上体现了 TC 风场结构的不对称分布。为 了进一步定量讨论 TC 风场结构的对称性,参考 Miyamoto and Takemi (2013)对于对称度的定义, 将观测时刻各方位角上的风圈半径*r*(λ,*t*)分解为方 位平均半径*r*^λ(*t*)及其相对于方位平均半径的偏差 *r'*(λ,*t*):

$$r(\lambda, t) = \bar{r}^{\lambda}(t) + r'(\lambda, t), \tag{1}$$

其中, *λ、t*分别表示方位角与观测时刻。定义物

表 2 2007~2016年西北太平洋不同强度的 TC 4 个象限风圈半径与强度的相关系数

Table 2Correlation coefficients between TC intensities and radial extents of different wind speed thresholds in fourquadrants during different periods of TCs over the WNP during 2007–2016

	7级风圈半径与强度相关系数			10级区	10级风圈半径与强度相关系数				12级风圈半径与强度相关系数			
	NE	NW	SW	SE	NE	NW	SW	SE	NE	NW	SW	SE
TS	0.12*	0.12	-0.03	0.09	_	_	_		_		_	—
STS	-0.01	0.11	-0.03	-0.06*	-0.05	-0.20*	-0.05	-0.20**	_	_	_	_
TY	0.20**	0.23**	0.26**	0.17**	0.27**	0.28**	0.26*	0.21**	0.19**	0.07	0.03	0.16*
STY及以上	-0.19**	-0.22**	-0.20**	-0.28**	-0.04	-0.05	-0.09	-0.12**	0.04	0.01	-0.12*	-0.03

注: NE、NW、SW、SE分别表示东北(第一)、西北(第二)、西南(第三)、东南(第四)象限,**、*分别表示通过99%和95%显著性检验,"—"表示风圈不存在

表 3 2007 ~ 2016 年 6 ~ 11 月西北太平洋 TC 7 级、10 级、12 级风圈半径在 4 个象限的平均值和均方差

Table 3Mean radius and mean square error of the 34, 50, and 65 kt wind speed thresholds in four quadrants of TCs over theWNP from June to November during 2007–2016

	7级风圈半径/km		10级风圈半径/km		12级风圈半径/km	
	平均值	均方差	平均值	均方差	平均值	均方差
整体	221.9	100.0	121.0	47.8	77.4	23.7
第一象限 (NE)	237.3	126.0	131.6	59.5	85.8	36.1
第二象限(NW)	220.6	105.4	128.0	52.0	80.9	27.2
第三象限(SW)	181.6	87.6	105.7	47.6	74.8	27.1
第四象限(SE)	206.4	120.6	115.8	56.1	75.9	27.0



图 8 2007~2016 年 6~11 月西北太平洋(a) 7 级(34 kt)、(b) 10 级(50 kt)、(c) 12 级(65 kt)风圈半径箱线图。箱子中线为风圈半径的第 50 个百分位点,箱子上下端分别为位于第 75、25 个百分位点的风圈半径值,虚线的上下端分别为最大、最小值。NE、NW、SW、SE 分别表示东北、西北、西南、东南象限

Fig. 8 Boxplot of the radial extents of the (a) 34 kt, (b) 50 kt, and (c) 65 kt wind speeds over the WNP frome June to November during 2007–2016. The centerline in the box denotes the 50th percentile point; the top and bottom of the box denote the 75th and 25th percentile points, respectively; the top and bottom of the dashed line denote the maximum and minimum values, respectively. NE, NW, SW, and SE denote the northeast, northwest, southwest, and southeast quadrants, respectively

理量γ来衡量风圈的对称度,具体定义如下:

$$\gamma(t) = \frac{\bar{r}^{\lambda}(t)}{\bar{r}^{\lambda}(t) + \int_{0}^{2\pi} |r'(\lambda, t)| d\lambda/2\pi}.$$
 (2)

γ(*t*)越大,则*t*时刻风圈的方位对称度越高,当γ(*t*) 接近1时,则表示*t*时刻各方位角上风圈半径相对 于方位平均半径的偏差和较小。

在 TC 生命周期的不同阶段中,各级风圈平均 对称度的变化情况如图 9 所示。对于各级风圈而言, 7 级风圈的对称度最低,12 级风圈的对称度最高。 随着 TC 强度的增强,7级、10 级风圈的对称度表 现出先减小后增大的变化特征。而 12 级风圈只存 在于 TY 强度以上的 TC 中,当 TC 由 TY 增强为 STY 时,12 级风圈的对称度也随之增大。图 10 给 出了各级风圈半径随 TC 强度变化的箱线图。在各 个象限中,各级风圈半径随着 TC 强度的增强而增 大,风圈半径的变化范围(最大值最小值之间的距





Fig. 9 Mean axisymmetricity of the radial extents of the 34, 50, and 65 kt wind speeds in TCs of different intensities over the WNP from June to November during 2007–2016



图 10 2007~2016 年 6~11 月西北太平洋不同 TC 强度各级风圈半径箱线图。(a-d)分别为 TC 强度为 ST、STS、TY、STY 时的 7 级 (34 kt)风圈半径;(e-g)分别为 TC 强度为 STS、TY、STY 时的 10 级 (50 kt)风圈半径;(h-i)分别为 TC 强度为 TY、STY 时的 12 级 (65 kt)风圈半径

Fig. 10 Boxplots of the radial extents of the 34, 50, and 65 kt wind speeds in TCs of different intensities over the WNP from June to November during 2007–2016: (a)–(d) radial extent of the 34 kt wind speed in TCs of TS, STS, TY, and STY intensities; (e)–(g) radial extent of the 50 kt wind speed in TCs of STS, TY, and STY intensities; (h)–(i) radial extent of the 65 kt wind speed in TCs of TY and STY intensities

离)随着 TC 强度的增强而减小,但整体表现出不 对称增大的变化特征。对于 7 级风圈和 10 级风圈 而言,当 TC 分别由 TS 加强为 STS、由 STS 加强 为 TY 时,第三象限中的风圈半径的增长幅度明显 小于其他 3 个象限,从而导致了风圈的对称度下降。 之后随着 TC 强度的加强,7 级风圈和 10 级风圈在 第三象限中的风圈半径与其他 3 个象限中的风圈半 径的差距逐渐减小,风圈对称度也由之增大。12 级风圈半径在 TC 处于 TY 强度时,第三象限中的 风圈半径略小于其他 3 个象限,随着 TC 强度增强 至 STY,第三象限的风圈半径与其他 3 个象限中 的风圈半径的差距逐渐减小,风圈对称度也随之增大。

整体而言,在 TC 生命周期的不同阶段中,各 级风圈的对称度与 TC 强度的相关性不同,但各级 风圈的对称度与 TC 强度的相关性均不高(表 4)。

表 4 2007~2016 年 6~11 月西北太平洋风圈对称度与 TC 强度的相关系数

Table 4Correlation coefficients between the axisymme-
tricity of the radial extent of different wind speed thresholds
and the intensity of TCs over the WNP from June to
November during 2007–2016

	团圈对我由上TC程由的相关系数						
	八個八个	风圈刈林度与IC强度的相关系数					
	7级风圈	10级风圈	12级风圈				
TS	-0.15*						
STS	-0.03	-0.20*					
TY	0.23**	0.06	-0.07				
STY及以上	0.17**	0.08	-0.02				
TC生命周期	0.13**	-0.02	-0.01				

**、*分别表示通过99%、95%显著性检验。

当 TC 为 TS 强度时,7级风圈的对称度与强度呈 负相关,当 TC 增强至 TY 及以上时,7级风圈的

对称度与 TC 强度呈正相关。而只有在 TC 处于 STS 强度时,10级风圈的对称度与 TC 强度呈负相 关,其余阶段其与 TC 强度的相关性都不大。12级 风圈在 TC 的整个生命史中都没有表现出与 TC 强 度的相关性。在 TC 整个生命周期中,只有 7级风 圈的对称度与 TC 强度之间呈现弱的正相关关系, 表明 7级风圈的对称度会随着 TC 强度的增强而逐 渐趋于对称分布,而 10级、12级风圈的对称度没 有表现出与 TC 强度之间存在相关关系。

6 总结与讨论

本文利用具有较高分辨率(0.1°×0.1°)的多 平台热带气旋表面风场资料(MTCSWA),对 2007~2016年6~11月西北太平洋上TC风圈半径 的气候学特征进行了定量分析,讨论了在TC生命 周期中,不同象限中各级风圈半径(7级、10级、 12级)的变化情况、风场结构的对称度及其二者 与TC强度变化的相关性。

西北太平洋上 TC 平均尺度为 221.9 km。小 TC 活动位置相较于大 TC 呈现整体偏南的分布特 征,且小 TC 的活动位置分布较大 TC 更为密集, 在 10°N 以南几乎没有大 TC 活动。TC 尺度随时间 的变化特征表现为在 8 月和 10 月存在两个峰值。 在 TC 的风场结构中,7级、10级、12级风圈的平 均半径分别为 221.9、121.0、77.4 km。总体来说, TC 的风场结构呈现北部大于南部,东部大于西部 的结构特征。

TC 的风圈半径与强度之间存在一定的正相关, 其中 12 级风圈半径与强度的相关性最低。当 TC 处于不同强度级别时,不同象限的风圈半径与 TC 强度的相关性不同。7 级风圈的对称度最低,12 级 风圈的对称度最高,TC 风场结构随着 TC 强度的 变化呈现不对称变化的特征。7 级、10 级风圈的对 称度在 TC 生命周期的某些阶段与 TC 强度之间存 在一定的相关性,12 级风圈的对称度没有表现出 与 TC 强度之间显著的相关性。在 TC 的整个生命 周期中,只有 7 级风圈的对称度与强度呈现弱的正 相关关系,表明 7 级风圈的对称度会随着 TC 强度 的增强而逐渐趋于对称分布。

在本文的研究过程中,通过风场插值建立了 TC 极坐标系风场,得到了研究时段内所有观测时 刻不同象限中的7级、10级、12级风圈半径,在 此基础上进一步讨论了各个象限中风圈半径与 TC 强度的相关性,所得出的结论对于如何利用 TC 强度变化来构建预测 TC 风场结构的预报模型具有一定指示意义。但是由于影响 TC 风场结构的因素有 很多(如纬度、移速、移向),并且在 TC 消亡过程中,地形对 TC 强度及其风场结构的影响更为重要,如何研究 TC 强度及其他因子与 TC 风场结构 之间的非线性变化值得进一步探索。

参考文献(References)

- Chan K T F, Chan J C L. 2012. Size and strength of tropical cyclones as inferred from QuikSCAT data [J]. Mon. Wea. Rev., 140(3): 811–824. doi:10.1175/MWR-D-10-05062.1
- Chan K T F, Chan J C L. 2013. Angular momentum transports and synoptic flow patterns associated with tropical cyclone size change [J]. Mon. Wea. Rev., 141(11): 3985–4007. doi:10.1175/MWR-D-12-00204.1
- Chavas D R, Lin N. 2016. A model for the complete radial structure of the tropical cyclone wind field. Part II: Wind field variability [J]. J. Atmos. Sci., 73(9): 3093–3113. doi:10.1175/JAS-D-15-0185.1
- Chavas D R, Lin N, Emanuel K A. 2015. A model for the complete radial structure of the tropical cyclone wind field. Part I: Comparison with observed structure [J]. J. Atmos. Sci., 72(9): 3647–3662. doi:10.1175/JAS-D-15-0014.1
- Chen D Y C, Cheung K K W, Lee C S. 2011. Some implications of core regime wind structures in western North Pacific tropical cyclones [J]. Wea. Forecasting, 26(1): 61–75. doi:10.1175/2010WAF2222420.1
- Elsner J B, Kossin J P, Jagger T H. 2008. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones [J]. Nature, 455(7209): 92–95. doi:10.1038/nature07234
- Guo X, Tan Z M. 2017. Tropical cyclone fullness: A new concept for interpreting storm intensity [J]. Geophys. Res. Lett., 44(9): 4324–4331. doi:10.1002/2017GL073680
- Irish J L, Resio D T, Ratcliff J J. 2008. The influence of storm size on hurricane surge [J]. J. Phys. Oceanogr., 38(9): 2003–2013. doi:10.1175/2008JPO3727.1
- Klotz B W, Jiang H Y. 2017. Examination of surface wind asymmetries in tropical cyclones. Part I: General structure and wind shear impacts [J]. Mon. Wea. Rev., 145(10): 3989–4009. doi:10.1175/MWR-D-17-0019.1
- Knaff J A, DeMaria M. 2010. NOAA/NESDIS multiplatform tropical cyclone surface wind analysis [Z]. Fort Collins, Colorado: NESDIS/STAR
- 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 [J]. Wea. Forecasting, 15(4): 476–483. doi:10.1175/1520-0434(2000)015<0476:AEOTSD> 2.0.CO;2
- Knaff J A, Seseske S A, DeMaria M, et al. 2004. On the influences of

vertical wind shear on symmetric tropical cyclone structure derived from AMSU [J]. Mon.thly Wea.ther Rev.iew, 132(10): 2503–2510. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<2503:OTIOVW>2.0.CO;2

- Knaff J A, Sampson C R, DeMaria M, et al. 2007. Statistical tropical cyclone wind radii prediction using climatology and persistence [J]. Wea. Forecasting, 22(4): 781–791. doi:10.1175/WAF1026.1
- Knaff J A, Longmore S P, Demaria R T, et al. 2015. Improved tropicalcyclone flight-level wind estimates using routine infrared satellite reconnaissance [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 54(2): 463–478. doi:10.1175/JAMC-D-14-0112.1
- Knaff J A, Slocum C J, Musgrave K D, et al. 2016. Using routinely available information to estimate tropical cyclone wind structure [J]. Mon. Wea. Rev., 144(4): 1233–1247. doi:10.1175/MWR-D-15-0267.1
- Langousis A, Veneziano D. 2009. Theoretical model of rainfall in tropical cyclones for the assessment of long - term risk [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 114(D2): D02106. doi:10.1029/2008JD0 10080
- Lee C S, Cheung K K W, Fang W T, et al. 2010. Initial maintenance of tropical cyclone size in the western North Pacific [J]. Mon. Wea. Rev., 138(8): 3207–3223. doi:10.1175/2010MWR3023.1
- Liu K S, Chan C L. 2002. Synoptic flow patterns associated with small and large tropical cyclones over the western North Pacific [J]. Mon.
 Wea. Rev., 130(8): 2134–2142. doi:10.1175/1520-0493(2002) 130<2134:SFPAWS>2.0.CO;2
- Merrill R T. 1984. A comparison of large and small tropical cyclones [J]. Mon. Wea. Rev., 112(7): 1408–1418. doi:10.1175/1520-0493(1984)112<1408:ACOLAS>2.0.CO;2
- Miyamoto Y, Takemi T. 2013. A transition mechanism for the spontaneous axisymmetric intensification of tropical cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 70(1): 112–129. doi:10.1175/JAS-D-11-0285.1

- Stern D P. 2010. The vertical structure of tangential winds in tropical cyclones: Observations, theory, and numerical simulations [D]. Ph. D. dissertation, University of Miami
- 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 [J]. 热带气象学报, 32(1): 63-72. Tian Wei, Wu Liguang, Liu Qingyuan, et al. 2016. Evaluation of tropical cyclone surface wind analysis in East China Sea with NOAA/NESDIS multiplatform [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 32(1): 63-72. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016. 01.007
- Weatherford C L, Gray W M. 1988a. Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part I: Data analysis and climatology [J]. Mon. Wea. Rev., 116(5): 1032–1043. doi:10.1175/1520-0493(1988) 116<1032:TSARBA>2.0.CO;2
- Weatherford C L, Gray W M. 1988b. Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part II: Structural variability [J]. Mon. Wea. Rev., 116(5): 1044–1056. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<1044: TSARBA>2.0.CO;2
- Wu L G, Tian W, Liu Q Y, et al. 2015. Implications of the observed relationship between tropical cyclone size and intensity over the western North Pacific [J]. J. Climate, 28(24): 9501–9506. doi:10.1175/JCLI-D-15-0628.1
- 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 [J]. 气象, 42(11): 1315-1324. Xiang Chunyi, Wu Liguang, Tian Wei, et al. 2016. Applications of MTCSWA data to the characteristic analysis of tropical cyclone structure [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(11): 1315-1324. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.003
- Yuan J N, Wang D X, Wan Q L, et al. 2007. A 28-year climatological analysis of size parameters for northwestern pacific tropical cyclones [J]. Adv. Atmos. Sci., 24(1): 24–34. doi:10.1007/s00376-007-0024-y