

西北太平洋台风同心眼墙影响因子的初步分析

管靓^{①②},张宇昕^③,葛旭阳^{②*},姜有山^④

① 上海海洋中心气象台,上海 200030;

② 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室,江苏 南京 210044;

③ 镇江市气象局,江苏 镇江 212001;

④ 南京市气象台,江苏 南京 210019

* 联系人,E-mail:xuyang@nuist.edu.cn

2018-03-16 收稿,2018-05-10 接受

国家自然科学基金资助项目(41575056);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB452803);江苏省高校自然科学研究重点项目(14KJA170005)

摘要 利用美国威斯康星大学气象卫星研究合作院提供的集成微波图像资料和联合台风预警中心的最佳路径资料,普查2005—2014年西北太平洋地区具有同心眼墙结构的35个强台风个例。对比分析了有、无同心眼墙及同心眼墙生成快、慢的样本的环境场和自身初始结构差异。结果表明:环境场要素对同心眼墙形成与否具有重要调制作用,环境场相对湿度越大,海温越高,同心眼墙越易生成;而同心眼墙的形成速率与自身结构存在密切关系,初始涡旋尺度越大,同心眼墙生成越快,外眼墙位置距离台风中心越远,眼墙替换时间越长,眼墙替换前后强度变化越明显。

关键词同心眼墙;
热带气旋;
初始结构;
环境场要素

热带气旋的强度预报是目前业务预报和理论研究中的重点难点问题,强度变化会影响台风造成的大风和降水的预报水平(吴海英等,2014;蔡菁等,2017;王晓峰等,2017;陈德花等,2018)。热带气旋的结构变化与其强度存在密切关系(雷小途和陈联寿,2001;余晖和吴国雄,2001;陈光华和裘国庆,2005;李英等,2009;Xu and Wang,2010;Zhou and Wang,2011,2013)。当台风最大风速大于 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其内区经常会出现同心眼墙结构,并经历眼墙替换过程(Willoughby et al.,1982;陈善敏,1986;Black and Willoughby,1992;Hawkins et al.,2006;Qiu et al.,2010)。所谓同心眼墙(Concentric Eyewall,CE),是指一个热带气旋具有两个或两个以上的眼墙,并具有相对应的最大风速。眼墙替换过程(Eyewall Replacement Cycle,ERC)是指外眼墙生成以后,逐步向内收缩,内眼墙渐渐消亡,最终被外眼墙取代的过程。在此过程中,热带气旋往往会经历强

度和结构的剧烈变化(Willoughby et al.,1982;Houze et al.,2007;Kuo et al.,2009;Zhou et al.,2011;Zhou and Wang,2011,2013;Kossin and Sitkowski,2012;Yang et al.,2013,2014;Ge,2015;陈小宇等,2019)。因此,加强对这类具有“同心眼墙”台风的研究有助于台风强度和尺度的业务预报。

国内外大量研究关注的是同心眼墙的形成机制问题(Willoughby et al.,1984;Nong and Emanuel,2003;Kuo et al.,2004,2008;Qiu et al.,2010;Zhou and Wang,2011;Huang et al.,2012;Rozoff et al.,2012;Wu et al.,2012;Wang et al.,2016)。同心眼墙的生成主要受内部动力、热力强迫和大尺度环境场的影响。Nong and Emanuel(2003)认为一个具有一定振幅的初始扰动是同心眼墙生成的必要条件。Montgomery and Kallenbach(1997)指出,涡旋Rossby波(Vortex Rossby Wave,VRW)对外眼墙的生成有重要影响。涡旋Rossby波在径向向外传播

引用格式:管靓,张宇昕,葛旭阳,等,2019.西北太平洋台风同心眼墙影响因子的初步分析[J].大气科学学报,42(4):492-501.

Guan L,Zhang Y X,Ge X Y,et al.,2019.Preliminary analysis on influencing factors of secondary eyewall formation over Northwest Pacific[J].Trans Atmos Sci,42(4):492-501.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180316002.(in Chinese).

的过程中在某一半径处产生能量积聚,最终生成同心眼墙。但是,关于涡旋 Rossby 波在同心双眼墙形成中的作用还存在一些争议。Kuo et al. (2004, 2008) 利用二维正压模式发现涡旋之间的轴对称化作用可以生成同心眼墙。Terwey and Montgomery (2008) 提出了所谓的“Beta Skirt Axisymmetrization (BSA)”的假设来解释同心眼墙的生成。Wu et al. (2012) 和 Huang et al. (2012) 强调了边界层中非平衡动力过程在台风同心眼墙中的作用。Rozoff et al. (2012) 则从非绝热加热的平衡反馈的角度来说明同心眼墙的生成。此外,部分研究表明云物理过程对同心眼墙的形成和结构也有一定的影响(Wiloughby et al., 1984; Zhou and Wang, 2011)。Ge (2015) 利用敏感性试验证实了环境场水汽条件是影响强台风同心眼墙形成和结构的重要因子之一。环境场相对湿度越高,同心眼墙生成越快,外眼墙生成位置距离台风中心则越远。

相较于同心眼墙生成机制的研究,针对其结构、强度变化的研究甚少。Yang et al. (2013) 研究了 1997—2011 年西北太平洋的同心眼墙台风,将其按照眼墙替换方式分成 3 类,发现眼墙替换时间较长的个例尺度较大,环境场湿度较高,海温较高,风切变较小。Zhou and Wang (2013) 统计分析表明,环境场湿度、海平面气压、低层涡度以及台风所在纬度均会影响同心眼墙的结构和尺度。因此,本研究拟利用再分析资料和卫星资料,从环境场和热带气旋自身结构出发,探讨影响同心眼墙生成的可能因子。

1 数据资料和方法

针对西北太平洋地区台风。首先,利用联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的最佳路径资料,选取 2005—2014 年期间所有的台风(TY)或超强台风(STY)样本,共计 135 个样本。以样本的命名时刻(即初次达到热带风暴 TS 强度的时刻)为初始时刻,取该时刻对应的最大风速半径(RMW)和 34 节(kt)风圈半径(R34)来表征初始涡旋结构。同时还应用了台风移速、强度变化等参数。

由于缺乏远海常规观测资料,利用美国威斯康星大学气象卫星研究合作院(Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, CIMSS)的集成微波图像(Morphed Integrated Microwave Imagery, MIMIC)资料。该资料时间分辨率为 15 min,空间分辨率为 4 km,可以有效地表征同心眼墙演变特

征。本文中,若某台风的外区环状对流区域至少占 2/3 个圆,则定义为同心眼墙台风。在西北太平洋地区,2005—2014 年共有 35 个同心眼墙样本(共 45 次眼墙替换过程),这与前人结果(Yang et al., 2013; Zhou and Wang, 2013)基本一致。需要指出的是,由于缺乏风场资料,我们无法判断是否存在两个相对应的最大风速区。

图 1 给出了 MIMIC 卫星资料揭示的 2006 年强台风 Chanchu 的同心眼墙替换过程。利用该资料建立一系列台风同心眼墙结构特征的参数,如:同心眼墙生成时刻;形成地点(经、纬度);内、外眼墙半径;眼墙之间的宽度(moat 宽度);眼墙替换过程持续时间等。在本文中,同心眼墙的生成时间定义为外眼墙生成时刻与其初始命名时刻的时间间隔;眼墙半径为对流环的平均半径,而内、外眼墙半径之差即为 moat 宽度;持续时间定义为眼墙替换过程所需要的时间,即从外眼墙生成至内眼墙消亡的时间间隔;强度变化指眼墙替换过程中最大风速值的变化。

大尺度环境场要素取自美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球客观分析资料(FNL 资料)。该资料水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直层次从 1 000 hPa 到 10 hPa 共 26 层,间隔为 6 h。海温场则为美国国家海洋和大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的逐日最优插值海温资料(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature, OISST)。为更好地表征大尺度环境场信息,本文将对分析资料中的台风环流和大尺度环境气流进行尺度分离。分离方法具体参见 Ge et al. (2013),将滤波后波长大于 1 000 km 的分量作为大尺度环境场。

2 统计对比分析

热带气旋同心眼墙的生成是外部大尺度环境场和其自身的共同作用,因此,将从这两个方面探究同心眼墙生成的可能影响因子。对比分析将分两种情形:1)有、无同心眼墙生成的样本之间的比较;2)对于有同心眼墙生成的样本,按其生成速度差异进行对比。

2.1 有、无同心眼墙生成的样本的对比分析

根据生命史期间有、无双眼墙结构,将所有样本分为两组。在统计期间不具有同心眼墙的样本共 100 个,具有同心眼墙特征的则为 35 个。统计分析表明,有同心眼墙的个例,其经历快速增长(Rapid

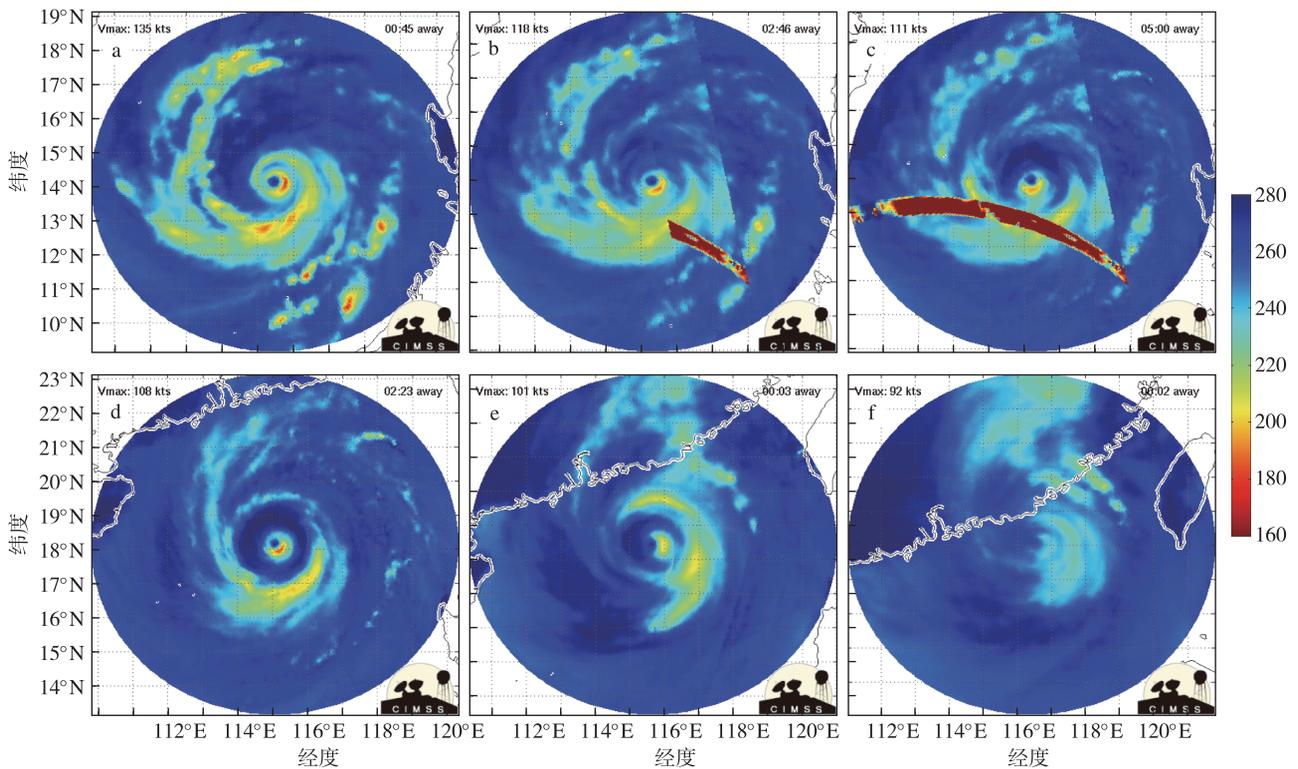


图1 MIMIC卫星资料揭示的2006年强台风Chanchu同心眼墙的演变过程:(a)5月15日00时;(b)5月15日08时;(c)5月15日16时;(d)5月16日08时;(e)5月16日23时15分;(f)5月17日10时30分

Fig.1 Evolution of the secondary eyewall in the severe typhoon Chanchu (2006) characterized by MIMIC satellite images: (a)0000 UTC on 15 May;(b)0800 UTC on 15 May;(c)1600 UTC on 15 May;(d)0800 UTC on 16 May;(e)2315 UTC on 16 May;(f)1030 UTC on 17 May;

Intensification, RI)过程的比例达83%,而没有同心眼墙生成的个例,其快速增长比例仅为29%。另一方面,最大强度达TY及以上且经历RI过程的个例共82个,其中有33个为同心眼墙台风,占40.2%;强度达STY及以上且经历RI过程的个例共39个,其中有26个为同心眼墙台风,占66.7%。由此可见,经历RI过程的强台风形成同心眼墙的概率明显高于非同心眼墙的一组。而前人研究(黄荣成和雷小途,2010)指出,环境场的湿度、垂直风切变、海温等因子会影响台风的快速增长过程,因此,对于环境场因素的探讨将从这几个方面着手讨论。具体统计方法如下:对于有同心眼墙生成的样本,选取其眼墙生成时刻为标准时刻(“0”时刻);而对于没有同心眼墙样本,选择其强度(如:近中心最大风速)达到最强的时刻为标准时刻。需要指出的是,大尺度环境要素均以台风中心1000 km×1000 km区域平均值来表征。为清楚起见,以两组样本各自环境场变量的距平(相对所有样本平均值的偏差值)来反映其之间的差异。

2.1.1 相对湿度

图2给出了两组样本在标准时刻前两天的合成的相对湿度距平值随高度的变化趋势,可见,具有同心眼墙生成的样本,整个对流层中层的环境场相对湿度要高于没有同心眼墙生成的样本。具体来说,对流层中高层两者相对湿度之差大于4%,两者最大差值(5%)出现在400 hPa。两组样本的相对湿度差异通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。可见,环境场相对湿度可以影响同心眼墙是否生成。环境场相对湿度越大,越利于台风同心眼墙的生成。这与Ge(2015)的理想试验结果一致。当水汽充足时,热带气旋区域强对流活动活跃。外围雨带中的潜热加热致使位涡(PV)分布径向扩大,导致切向风场也不断外扩(Hill and Lackmann, 2009)。伴随切向风场的外扩,边界层出现不平衡,产生了外围超梯度风,进而激发强对流活动(Huang et al., 2012)。与此同时,随着外围惯性稳定度增加,潜热能向动能的转化率提高,从而促进外眼墙的生成。

图3给出了两组个例环境场中层相对湿度距平的时间变化,“0”时刻表示同心眼墙的生成时刻,可

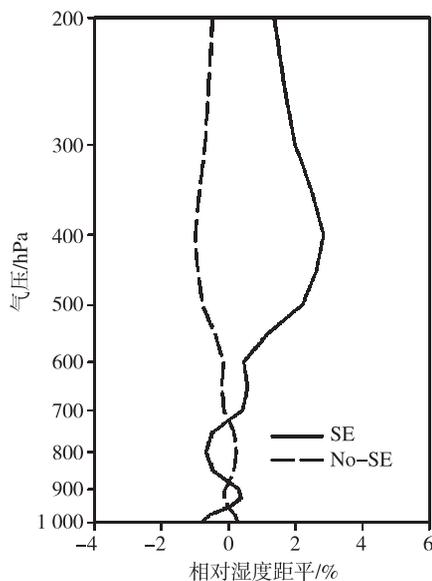


图2 有、无同心眼墙的样本环境场相对湿度距平随气压的变化(单位:%)

Fig. 2 Variation of environmental relative humidity anomaly of tropical cyclone cases with and without secondary eyewall with air pressure (units:%)

见,两组间的相对湿度差随时间逐渐增大,到一天前趋于稳定(约6%),两者差异通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。这表明对流层中层的环境场湿度有利于同心眼墙的生成。

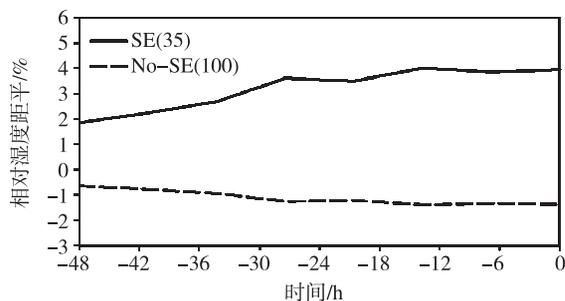


图3 有、无同心眼墙的样本环境场中层平均的相对湿度距平随时间变化(单位:%)

Fig. 3 Time variation of mid-level average environmental relative humidity anomaly of tropical cyclone cases with and without secondary eyewall (units:%)

2.1.2 垂直风切变

众所周知,环境场垂直风切变会影响台风的发生发展。为此,本文对比分析两组样本所对应的垂直风切变情况。垂直风切变为高层(200 hPa)与底层(850 hPa)全风速之差。图4给出了有、无同心眼墙的样本的环境场垂直风切变随时间的演变情况,可知,两者对应的垂直风切变大小维持在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

左右,有利于台风发展。此外,两者对应的垂直风切变随时间逐渐减小。具有同心眼墙的样本对应的垂直风切变略大,但差异并未通过显著性检验,这说明两组样本间的环境垂直风切变差异并不显著。

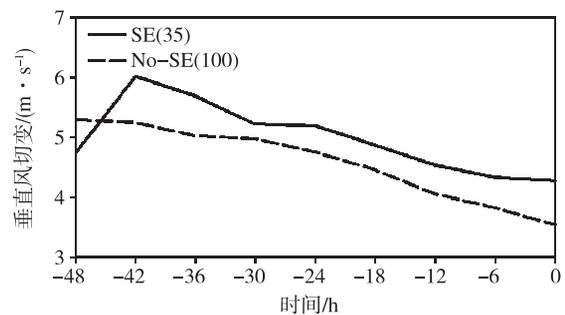


图4 有、无同心眼墙的样本环境场垂直风切变的时间变化(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Time variation of environmental vertical wind shear of tropical cyclone cases with and without secondary eyewall (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.1.3 海表面温度

以热带气旋中心所在位置为(0,0)点,比较两组样本标准时刻两天前在 $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$ 正方形区域内平均海温的差异(图5)。显而易见,具有同心眼墙生成的样本的环境海温偏高,中心位置偏高1 K;没有同心眼墙生成的样本环境海温较平均场偏低0.4 K左右;此外,有同心眼墙生成的样本的海温距平自南向北迅速增加;无同心眼墙生成的海温则呈现相反的现象,等距平海温线较为稀疏,即海温梯度较小,自南向北海温距平减小。标准时刻前一天的海温场分布也存在这一差异(图略)。考虑到大多数热带气旋向西北方向移动,因此若移动过程中海温偏高,台风可以从洋面得到更多的热量从而有利于其快速增长(郑峰等,2016)。总之,较高环境场海温有利于同心眼墙形成。

2.1.4 移速

对于快速增长台风,其移速也是一个重要因子(Zeng et al., 2007)。Zhao and Chan (2017)理想试验结果表明,台风最佳移速可能在 $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如果台风移速过快,会造成台风移动前后方向出现不对称性,而这些非对称结构与对称分量之间的相互作用会影响强度变化。快速移动一般对应着较强的环境气流,若环境场引导气流作用明显,热带气旋发展易受到影响;相反,如果移速过慢,台风环流会造成冷水上翻,削弱海表热通量,从而致使台风本身强度减弱。基于以上考虑,利用JTWC的最佳路径资料,统计了有、无同心眼墙生成的样本的移速差异

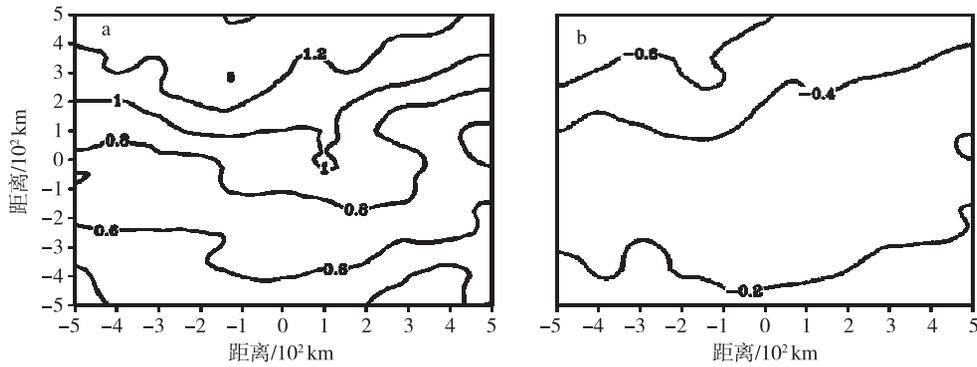


图5 有(a)、无(b)同心眼墙的热带气旋样本合成的海温距平(单位:K)
 Fig.5 Composited sea surface temperature anomalies of tropical cyclone cases (a) with and (b) without secondary eyewall(units:K)

(表1)。从表1可以看到对于有同心眼墙生成的样本,眼墙生成前平均移速达 $4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其量值更接近前人结果。而无同心眼墙生成的样本移速为 $5.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,比有同心眼墙生成的样本移速快近 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,两者差异通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。这表明移速适度缓慢的强台风更容易生成同心眼墙。

表1 有、无同心眼墙的热带气旋样本的移速对比
 Table 1 Comparison of moving speed between tropical cyclone cases with and without secondary eyewall
 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

个例	平均值	标准差
有同心眼墙	4.4	1.7
无同心眼墙	5.1	2.2

2.1.5 自身初始尺度

一些研究(Xu and Wang,2010;Chan and Chan,2014)指出,热带气旋的强度及结构与其初始涡旋的大小存在密切关系。热带气旋同心眼墙的形成对其初始结构的依赖性尚不清楚,这值得进一步研究。根据JTWC的最佳路径资料,本文对两组样本的初始结构(RMW和R34)进行统计合成(表2)。

表2 有、无同心眼墙的热带气旋样本的初始结构对比
 Table 2 Comparison of initial structure between tropical cyclone cases with and without secondary eyewall
 km

同心眼墙的样本	RMW		R34	
	平均值	标准差	平均值	标准差
有	76	15	106	28
无	61	19	96	36

从表2可以看出,有同心眼墙生成的样本的RMW达76 km,比无同心眼墙生成的样本大近

15 km;R34则要比后者大10 km。两组样本中RMW和R34差异均通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验。这说明热带气旋初始结构尺度越大,同心眼墙越容易生成。

综上所述,环境场因素(如:相对湿度、海温)和热带气旋自身尺度均会影响同心眼墙的生成。由于西北太平洋同心眼墙台风一般为强台风,它们基本会经历快速增长过程,因此其影响机制与影响台风快速增长过程类似。Kaplan and DeMaria(2003)比较了大西洋的快速增长和非快速增长的飓风的影响机制,发现快速增长的飓风的环境场海温更高,相对湿度也更大,移速较慢,此结论与本研究一致。可见环境场因子对同心眼墙的生成有重要的调制作用。此外,热带气旋初始尺度越大,有利于外围海表热量增加从而激发对流。同时外围惯性稳定度也越大,这有助于潜热能向动能的转化(Rozoff et al.,2012)。

2.2 同心眼墙台风特征分析

上文对比分析了有、无同心眼墙台风之间的影响因子的差异。本节将讨论对于具有同心眼墙结构的台风之间的差异情况。统计分析表明,对于具有同心眼墙的台风个例,其特征参数存在较大的差异性。这主要表现在生成时间、moat宽度和持续时间几个方面。例如,2013年超强台风Soulik约27 h就生成了外眼墙,而2006年超强台风Durian经历155 h才生成;moat宽度最小只有10 km左右(2013超强台风Haiyan),最宽可达73 km(2007超强台风Korosa);持续时间也存在较大差距,眼墙替换时间最短只有不到3 h(2005超强台风Nabi),最长可将近2 d(2009超强台风Choi-wan)。Zhou and Wang(2013)也指出同心眼墙结构(主要指moat的宽度)

具有很大的差异,其宽度大小可以在 10~100 km 之间。影响 moat 大小的原因尚不清楚,这需要进一步研究。总之,同心眼墙台风的结构、强度变化的多变性为台风的预报增加了难度。因此,研究同心眼墙台风的结构和强度变化具有重要意义。

表 3 概括了 2005—2014 年期间 35 个同心眼墙

表 3 2005—2014 年同心眼墙台风各要素的统计结果

Table 3 Statistics results of parameters of typhoons with secondary eyewall from 2005 to 2014

统计值	生成时间/h	moat/km	内眼墙半径/km	外眼墙半径/km	持续时间/h	强度变化/kt
平均值	85	29	45	74	20	-12
标准差	33	9	13	18	11	17

为探讨双眼墙台风各基本要素之间的联系,图 6 给出了眼墙替换过程中 moat 宽度与持续时间的相关关系。可以看到,moat 宽度与同心眼墙替换过程持续时间呈明显的正相关关系,相关系数可达 0.52,两者相关关系通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验。说明当两个眼墙之间的宽度越大,眼墙替换持续时间越长。

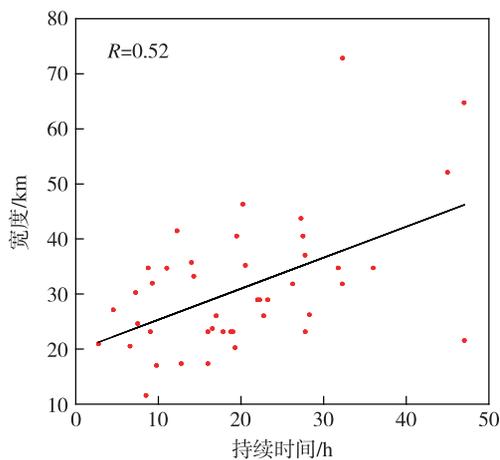


图 6 同心眼墙台风 moat 宽度与眼墙替换持续时间的相关关系

Fig.6 Correlation between moat width of typhoons with secondary eyewall and duration of eyewall replacement

图 7 给出了同心眼墙的 moat 宽度和眼墙替换前后的强度变化幅度的相关关系。结果表明,moat 宽度与强度变化存在负相关关系(相关性通过 $\alpha = 0.1$ 的显著性检验)。表 3 中可以看到,眼墙替换过程之后,台风强度都有减弱的趋势。本文统计表明,moat 宽度越大,其眼墙替换过程持续时间越长,强度变化幅度则越明显,这与 Zhou and Wang (2011) 的结论相符。可能原因是:由于在眼墙替换过程中,

台风的一些基本特征。需要指出的是,不同观测资料得到的眼墙替换过程可能存在差异,但是就平均值而言,本文结论与 Yang et al. (2013) 的研究结果较为一致:西北太平洋地区的同心眼墙台风内外眼墙平均宽度(moat)大约为 30 km,眼墙替换时间约为 21 h。

随着内眼墙消亡,外眼墙虽然向内收缩但不足以收缩至原来内眼墙所在位置。这意味着部分 moat 区域转变为眼区,而 moat 区域中相当位温较低,从而导致台风暖心范围变宽但强度减弱。

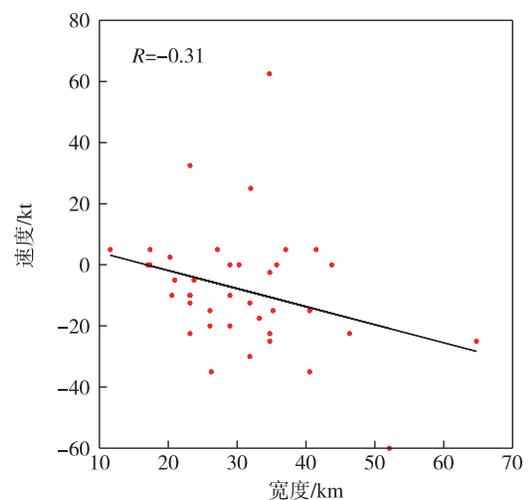


图 7 同心眼墙台风 moat 宽度与强度变化的相关关系

Fig.7 Correlation between moat width and intensity change of typhoons with secondary eyewall

综上所述,同心眼墙台风的 moat 宽度、眼墙替换持续时间、强度变化等各要素存在一定的相关性。同心眼墙台风的 moat 宽度越大,眼墙替换的持续时间越长,强度变化也就越明显。具体物理机制有待于进一步研究。

2.3 同心眼墙生成快、慢的样本对比分析

上述统计结果表明,同心眼墙的生成时间存在很大差异。一个值得关注的问题是:什么因素影响了其生成速率?为此,本节将从环境场和台风自身结构两方面对同心眼墙生成快、慢的样本进行对比分析。首先对这些样本的双眼墙形成时间进行标准化处理,并以 ± 0.5 作为分界线,选取了 12(10)个样

本,分别作为同心眼墙生成较快(慢)的样本。以双眼墙的生成时刻作为标准时刻(“0”时刻)。

2.3.1 环境场因子

图8给出了同心眼墙生成快、慢的两组个例合成的环境场中层相对湿度随时间的演变情况。两组样本的相对湿度最明显的差异发生在-42 h,约3%,其他时刻差异均不明显。-18 h后的相对湿度差异并未通过显著性检验,说明环境场的相对湿度对双眼墙的生成速率影响并不大。

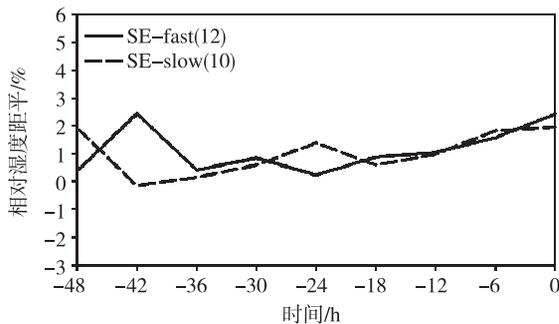


图8 同心眼墙生成快、慢的样本环境场中层平均的相对湿度距平的时间变化(单位:%)

Fig.8 Time variation of mid-level average environmental relative humidity anomaly in tropical cyclone cases with fast and slow secondary eyewall formation (units:%)

图9给出了同心眼墙生成快、慢的两组个例合成的环境场垂直风切变的时间变化。在-12 h之前,外眼墙生成较快的个例的风切变要小于外眼墙生成较慢的个例,以后的时间段外眼墙生成较快的个例的垂直风切变逐渐增加,甚至超过外眼墙生成较慢的个例。以上结果除了-42 h和-36 h通过 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,其他均未通过显著性检验。说明两组间环境场垂直风切变对同心眼墙的生成速率影响主要体现在前期,而在前24 h内并不显著。同样结论也体现在海温场(图10),可以看到,两组样本中心附近海温距平基本维持在0 K上下,即没有明显的差异。

由此可见,对具有双眼墙结构的台风来说,环境场对外眼墙生成快慢的影响较小。由于同心眼墙台风基本都是强台风,其对应的大尺度环境场要素均有利,这可能导致同心眼墙生成速度快、慢的样本之间环境场差异较小的原因。

2.3.2 初始结构

图11给出了热带气旋初始结构(RMW和R34)与同心眼墙生成时间的相关关系。显而易见,初始RMW和R34与同心眼墙的生成时间存在显

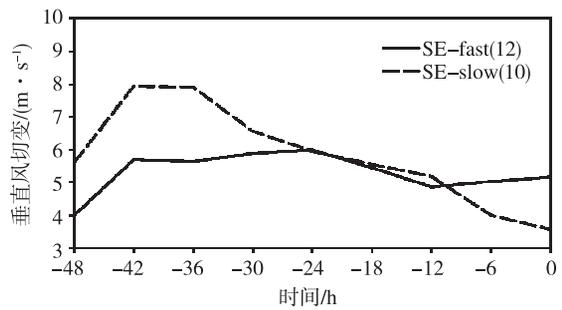


图9 同心眼墙生成快、慢的样本环境场垂直风切变的时间变化(单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig.9 Time variation of environmental vertical wind shear of tropical cyclone cases with fast and slow secondary eyewall formation (units: $m \cdot s^{-1}$)

著的负相关(通过了 $\alpha=0.1$ 的显著性检验)。这表明:热带气旋初始RMW或者R34越大,同心眼墙生成越快。

图12普查了初始涡旋结构和moat宽度的相关关系,可知,moat宽度与初始RMW和R34呈明显的正相关关系,统计结果分别通过 $\alpha=0.1$ 和0.01的显著性检验。这表明:初始涡旋的RMW和R34越大,其眼墙生成以后的moat宽度越大。表3中可以看到,相较于外眼墙,内眼墙的标准差更小,说明外眼墙具有较大的变化性。这意味着双眼墙结构差异主要受外眼墙位置影响。

3 结论和讨论

利用美国威斯康星大学气象卫星研究合作院的集成微波图像资料,普查了2005—2014年具有同心眼墙的台风样本,建立了其同心眼墙的生成、消亡时间、内外眼墙半径等参数;结合JTWC最佳路径资料以及分析资料、海温资料对影响同心眼墙台风形成的环境场及自身结构进行了对比分析,具体结论如下:

1)环境场和自身结构均会影响同心眼墙的生成。从环境场作用来看,环境场相对湿度越大,海温越高,同心眼墙越容易生成。鉴于具有同心眼墙的台风强度一般都达到强台风及以上等级,它们基本上会经历快速增长过程。因此环境场因子对其的影响作用与快速增长台风的机理类似。此外,两组样本的初始涡旋最大风速半径(RMW)和34 kt风圈半径(R34)也存在差异,有同心眼墙生成的个例初始涡旋的RMW和R34更大。

2)对具有同心眼墙生成的台风而言,其生成时间、结构和强度变化存在一定的差异。台风初始结

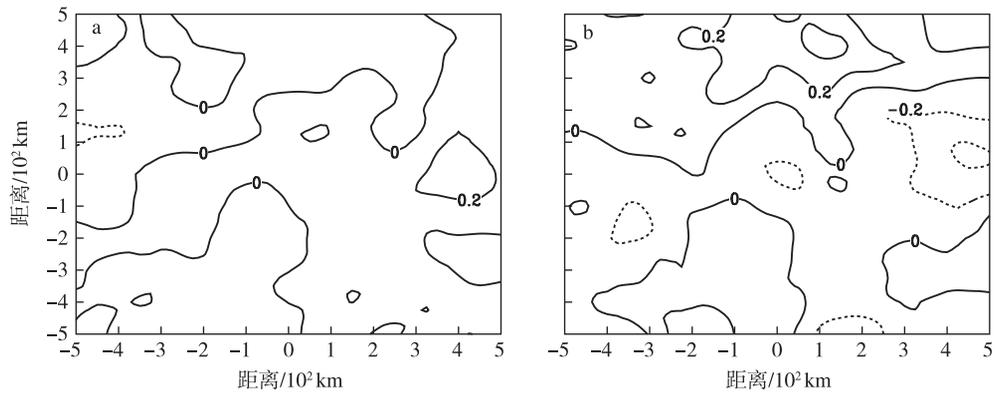


图 10 同心眼墙生成快(a)、慢(b)的热带气旋样本海温异常的比较(单位:K)

Fig.10 Comparison of sea surface temperature anomaly between tropical cyclone cases with (a) fast and (b) slow secondary eyewall formation(units ;K)

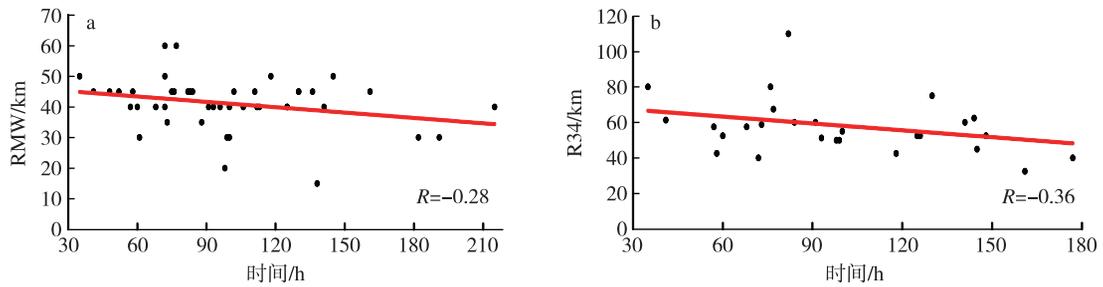


图 11 初始涡旋的 RMW(a)、R34(b)与同心眼墙生成时间的相关关系

Fig.11 Correlation between (a)RMW and (b)R34 of initial vortices and formation time of secondary eyewall

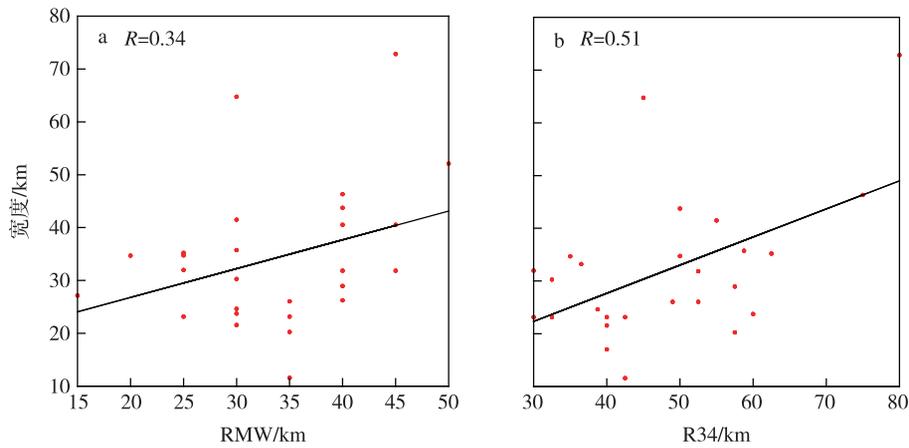


图 12 同心眼墙初始 RMW(a)、R34(b)与 moat 宽度的相关关系

Fig.12 Correlation between initial (a)RMW and (b)R34 of secondary eyewall and moat width

构越大,同心眼墙生成越快,外眼墙生成位置距离热带气旋中心越远,眼墙替换时间越长,眼墙替换前后强度变化越明显。

3)对于具有同心眼墙的风暴而言,对比其生成快、慢样本之间差异发现:大尺度环境场(相对湿度、SST)没有显著差异,但两者初始涡旋结构(RMW和R34)差异明显,即热带气旋初始涡旋尺度越大,同心眼墙则生成越快。这表明:对于具有同

心眼墙结构的台风而言,其基本处于有利的环境场中。因此,环境场/因子对其形成速度影响的差异并不显著,而自身结构存在显著的差异。综上所述,环境场要素对同心眼墙形成与否有重要的调制作用,而同心眼墙形成速率与自身结构存在密切的关系。

本工作仅限于对同心眼墙生成的影响因子进行统计对比分析,而对于其影响机制以及不同的同心眼墙结构及其强度变化尚未涉及,这值得进一步研

究。可以预见,不同的同心眼墙结构必然会影响到问题的开展有助于台风业务预报能力的提高。墙替换过程的快慢,进而影响强度变化幅度。这些

参考文献(References)

- Black M L, Willoughby H E, 1992. The concentric eyewall cycle of hurricane gilbert [J]. *Mon Wea Rev*, 120(6): 947-957.
- 蔡菁, 吴立广, 赖巧珍, 等, 2017. 台风“苏拉”登陆福建后降水的非对称成因分析 [J]. *大气科学学报*, 40(6): 814-822. Cai J, Wu L G, Lai Q Z, et al., 2017. Analysis of the precipitation asymmetries of typhoon saola after its landfall on Fujian Province [J]. *Trans Atmos Sci*, 40(6): 814-822. (in Chinese).
- Chan K T F, Chan J C L, 2014. Impacts of initial vortex size and planetary vorticity on tropical cyclone size [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(684): 2235-2248.
- 陈德花, 张玲, 张伟, 等, 2018. “莫兰蒂”台风致灾大风的结构特征及成因 [J]. *大气科学学报*, 41(5): 692-701. Chen D H, Zhang L, Zhang W, et al., 2018. Structure characteristics and cause analysis of catastrophic wind caused by super typhoon Meranti [J]. *Trans Atmos Sci*, 41(5): 692-701. (in Chinese).
- 陈光华, 裘国庆, 2005. 热带气旋强度与结构研究新进展 [J]. *气象科技*, 33(1): 1-6. Chen G H, Qiu G Q, 2005. PAGESS progress in researches on tropical cyclone intensity and structure [J]. *Meteorological Science and Technology*, 33(1): 1-6. (in Chinese).
- 陈善敏, 1986. 同心双眼台风结构和强度的初步分析 [J]. *大气科学*, 10(2): 183-188. Chen S M, 1986. Preliminary analysis of structure and intensity of concentric double-eye typhoons [J]. *Chin J Atmos Sci*, 10(2): 183-188. (in Chinese).
- 陈小宇, 吴立广, 李煜斌, 2019. 大涡技术对模拟台风眼墙替换过程的影响 [J]. *大气科学学报*, 42(2): 161-173. Chen X Y, Wu L G, Li Y B, 2019. The influences of large-eddy simulation on typhoon eyewall replacement [J]. *Trans Atmos Sci*, 42(2): 161-173. (in Chinese).
- Ge X Y, 2015. Impacts of environmental humidity on concentric eyewall structure [J]. *Atmos Sci Lett*, 16(3): 273-278.
- Ge X Y, Li T M, Peng S T, 2013. Tropical cyclone genesis efficiency: mid-level versus bottom vortex [J]. *J Trop Meteor*, 19(3): 197-213.
- Hawkins J D, Helveston M, Lee T F, et al., 2006. Tropical cyclone multiple eyewall configurations [C] // 27th conference on hurricanes and tropical meteorology. Monterey, CA: Amer Meteor Soc.
- Hill K A, Lackmann G M, 2009. Influence of environmental humidity on tropical cyclone size [J]. *Mon Wea Rev*, 137(10): 3294-3315.
- Houze R A, Chen S S, Smull B F, et al., 2007. Hurricane intensity and eyewall replacement [J]. *Science*, 315(5816): 1235-1239.
- 黄荣成, 雷小途, 2010. 环境场对近海热带气旋突然增强与突然减弱影响的对比分析 [J]. *热带气象学报*, 26(2): 129-137. Huang R C, Lei X T, 2010. Comparative analysis of the influence of environment field on rapid intensifying and weakening of tropical cyclones over offshore waters of China [J]. *J Trop Meteor*, 26(2): 129-137. (in Chinese).
- Huang Y H, Montgomery M T, Wu C C, 2012. Concentric eyewall formation in typhoon sinlaku (2008). part II: axisymmetric dynamical processes [J]. *J Atmos Sci*, 69(2): 662-674.
- Kaplan J, DeMaria M, 2003. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic Basin [J]. *Wea Forecasting*, 18(6): 1093-1108.
- Kossin J P, Sitkowski M, 2012. Predicting hurricane intensity and structure changes associated with eyewall replacement cycles [J]. *Wea Forecasting*, 27(2): 484-488.
- Kuo H C, Lin L Y, Chang C P, et al., 2004. The formation of concentric vorticity structures in typhoons [J]. *J Atmos Sci*, 61(22): 2722-2734.
- Kuo H C, Schubert W H, Tsai C L, et al., 2008. Vortex interactions and barotropic aspects of concentric eyewall formation [J]. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5183-5198.
- Kuo H C, Chang C P, Yang Y T, et al., 2009. Western North Pacific typhoons with concentric eyewalls [J]. *Mon Wea Rev*, 137(11): 3758-3770.
- 雷小途, 陈联寿, 2001. 大尺度环境场对热带气旋影响的动力分析 [J]. *气象学报*, 59(4): 429-439. Lei X T, Chen L S, 2001. Dynamical studies on the effect of large-scale environmental flow on tropical cyclones [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 59(4): 429-439. (in Chinese).
- 李英, 钱传海, 陈联寿, 2009. 台风 (0709) 登陆过程中眼放大现象研究 [J]. *气象学报*, 67(5): 799-810. Li Y, Qian C H, Chen L S, 2009. A study on the eyewall expansion of Typhoon Sepat (2009) during its landfall process [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(5): 799-810. (in Chinese).
- Montgomery M T, Kallenbach R J, 1997. A theory for vortex rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 123(538): 435-465.
- Nong S Y, Emanuel K, 2003. A numerical study of the genesis of concentric eyewalls in hurricanes [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129(595): 3323-3338.
- Qiu X, Tan Z M, Xiao Q N, 2010. The roles of vortex rossby waves in hurricane secondary eyewall formation [J]. *Mon Wea Rev*, 138(6): 2092-2109.
- Rozoff C M, Nolan D S, Kossin J P, et al., 2012. The roles of an expanding wind field and inertial stability in tropical cyclone secondary eyewall formation [J]. *J Atmos Sci*, 69(9): 2621-2643.
- Terwey W D, Montgomery M T, 2008. Secondary eyewall formation in two idealized, full-physics modeled hurricanes [J]. *J Geophys Res*, 113(D12): D12112.
- Wang H, Wu C C, Wang Y Q, 2016. Secondary eyewall formation in an idealized tropical cyclone simulation: balanced and unbalanced dynamics [J]. *J Atmos Sci*, 73(10): 3911-3930.
- 王晓峰, 许晓林, 杨续超, 等, 2017. 数值模式对强台风“菲特”登陆期间预报能力评述 [J]. *大气科学学报*, 40(5): 609-618. Wang X F, Xu X L, Yang X C, et al., 2017. The NWP models' evaluation of landfall processes of the strong typhoon Fitow [J]. *Trans Atmos Sci*, 40(5): 609-618. (in Chinese).
- Willoughby H E, Clos J A, Shoreibah M G, 1982. Concentric eye walls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex [J]. *J Atmos*

- Sci,39(2):395-411.
- Willoughby H E, Jin H L, Lord S J, et al., 1984. Hurricane structure and evolution as simulated by an axisymmetric, nonhydrostatic numerical model [J]. *J Atmos Sci*, 41(7):1169-1186.
- Wu C C, Huang Y H, Guo-Yuan L E, 2012. Concentric eyewall formation in typhoon sinlaku (2008). part I: assimilation of T-PARC data based on the ensemble kalman filter (EnKF) [J]. *Mon Wea Rev*, 140(2):506-527.
- 吴海英, 曾明剑, 王卫芳, 等, 2015. 1211号“海葵”台风登陆后引发两段大暴雨过程的对比分析[J]. *大气科学学报*, 38(5):670-677. Wu H Y, Zeng M J, Wang W F, et al., 2015. Comparative analysis on two rainstorm processes caused by typhoon Haikui (1211) after landfall [J]. *Trans Atmos Sci*, 38(5):670-677. (in Chinese).
- Xu J, Wang Y Q, 2010. Sensitivity of the simulated tropical cyclone inner-core size to the initial vortex size [J]. *Mon Wea Rev*, 138(11):4135-4157.
- Yang Y T, Kuo H C, Hendricks E A, et al., 2013. Structural and intensity changes of concentric eyewall typhoons in the western North Pacific Basin [J]. *Mon Wea Rev*, 141(8):2632-2648.
- Yang Y T, Hendricks E A, Kuo H C, et al., 2014. Long-lived concentric eyewalls in typhoon Soulik (2013) [J]. *Mon Wea Rev*, 142(9):3365-3371.
- 余晖, 吴国雄, 2001. 湿斜压性与热带气旋强度突变 [J]. *气象学报*, 59(4):440-449. Yu H, Wu G X, 2001. Moist baroclinity and abrupt intensity change of tropical cyclone [J]. *Acta Meteor Sinica*, 59(4):440-449. (in Chinese).
- Zeng Z H, Wang Y Q, Wu C C, 2007. Environmental dynamical control of tropical cyclone intensity: an observational study [J]. *Mon Wea Rev*, 135(1):38-59.
- Zhao X H, Chan J C L, 2017. Changes in tropical cyclone intensity with translation speed and mixed-layer depth: idealized WRF-ROMS coupled model simulations [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(702):152-163.
- 郑峰, 曾智华, 雷小途, 等, 2016. 中国近海突然增强台风统计分析 [J]. *高原气象*, 35(1):198-210. Zheng F, Zeng Z H, Lei X T, et al., 2016. A statistical study of rapid intensification of typhoons over coastal water of China [J]. *Plateau Meteor*, 35(1):198-210. (in Chinese).
- Zhou X Q, Wang B, 2011. Mechanism of concentric eyewall replacement cycles and associated intensity change [J]. *J Atmos Sci*, 68(5):972-988.
- Zhou X Q, Wang B, 2013. Large-scale influences on secondary eyewall size [J]. *J Geophys Res Atmos*, 118(19):11088-11097.
- Zhou X Q, Wang B, Ge X Y, et al., 2011. Impact of secondary eyewall heating on tropical cyclone intensity change [J]. *J Atmos Sci*, 68(3):450-456.

Preliminary analysis on influencing factors of secondary eyewall formation over Northwest Pacific

GUAN Liang^{1,2}, ZHANG Yuxin³, GE Xuyang², JIANG Youshan⁴

¹Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 200030, China;

²Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

³Zhenjiang Meteorological Bureau, Zhenjiang 212001, China;

⁴Nanjing Meteorological Observatory, Nanjing 210019, China

Based on the Morphed Integrated Microwave Imagery data from Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies of University of Wisconsin and the best track data from Joint Typhoon Warning Center, the tropical cyclones (TCs) with secondary eyewall over the Northwest Pacific are examined. During 2005—2014, 35 TCs with secondary eyewall are identified. The composited studies are performed to reveal the differences in environmental fields and initial structures between TCs with and without secondary eyewall (between fast and slow samples of secondary eyewall formation). Results show that both the environmental fields and initial structures can modulate the secondary eyewall formation. Specifically, the larger relative humidity of the environment field and the higher sea surface temperature, the easier the secondary eyewall will be formed. Furthermore, the formation rate of secondary eyewall is closely related to its own structure. A larger scale initial vortex leads to a faster secondary eyewall formation, farther location of outer eyewall from typhoon center, longer duration of eyewall, and more dramatic intensity change before and after eyewall replacement.

secondary eyewall; tropical cyclone; initial structure; environmental factor

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180316002

(责任编辑:张福颖)