郝赛,毛江玉. 2015. 西北太平洋与南海热带气旋活动季节变化的差异及可能原因 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 380-392. Hao Sai, Mao Jiangyu. 2015. Differences of the seasonal variations of tropical cyclone activities over the South China Sea and the western North Pacific and the possible causes [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 380-392, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14063.

西北太平洋与南海热带气旋活动季节变化的 差异及可能原因

郝赛^{1,2} 毛江玉¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029 2 中国科学院大学,北京 100049

摘 要 利用 1945~2011 年美国联合台风预警中心(JTWC)西北太平洋热带气旋资料,研究了南海(5°N~25°N, 110°E~120°E)与西北太平洋(5°N~25°N, 120°E~180°)热带气旋生成位置、生成频数、强度和持续时间的季节变化差异及其成因。从热带气旋路径穿越经度带频数的角度,探讨了 ENSO 对气旋活动年际变化的影响。结果表明,南海热带气旋活动显著地受季风调控。在南海冬季风作用下,1~4 月热带气旋生成于 10°N 以南且频数较少、强度较弱,这主要是低层气旋式相对涡度和弱东风切变区偏南造成的。相反,受夏季风影响,6~9 月是热带气旋生成最多、最频繁的季节,大都生成于南海北部 17°N 附近。在 5 月 (10 月)的季节转换期,生成位置大幅度北进(南撤)且生成频数显著增加(减少),取决于风速垂直切变及中层的相对湿度的急剧转变。11、12 月两海域热带气旋生成于 10°N 以南主要归因于其上空中层大气相对湿度较北部偏大。在西北太平洋,热带气旋生成的季节变化没有南海显著,只在 7 月有一次明显的变化,7~10 月是热带气旋活动的"盛期"。在强度上,西北太平洋大部分区域全年均为弱东风切变,因此热带气旋以台风为主且持续时间长;但南海多为热带风暴。ENSO 事件使得不同季节热带气旋生成区域和气旋路径地理位置发生显著变化。在 El Niño 事件期间,穿越南海所在经度带路径频数为负距平,而西北太平洋经度带为正距平;在 La Niña 事件期间,情况相反。

 文章编号
 1006-9585 (2015) 04-0380-13
 中图分类号
 P444
 文献标识码
 A

 doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14063

Differences of the Seasonal Variations of Tropical Cyclone Activities over the South China Sea and the Western North Pacific and the Possible Causes

HAO Sai^{1, 2} and MAO Jiangyu¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The characteristics and differences of seasonal changes of the tropical cyclone (TC) activities in terms of genesis location, genesis frequency, intensity, and duration are analyzed over the South China Sea (SCS) (5°N–25°N, 110°E–120°E) and the western North Pacific (WNP) (5°N–25°N, 120°E–180°) using the TC datasets for the period 1945–2011 from the Joint Typhoon Warning Center (JTWC). Further examined are the impacts of ENSO events on the

作者简介 郝赛, 女, 1987年出生, 博士, 主要从事天气动力学研究。E-mail: haosai@lasg.iap.ac.cn

收稿日期 2014-03-19; 网络预出版日期 2014-09-25

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2011CB403505、2014CB953902,国家自然科学基金项目 41175059、41375087

通讯作者 毛江玉, E-mail: mjy@lasg.iap.ac.cn

interannual variability of TC activities over the two areas from the perspective of TC longitude crossings. The results show that the TC genesis in the SCS is modulated significantly by the SCS monsoon, with a small number of weak TCs forming only south of 10°N during months of January to April when the SCS winter monsoon prevails, which results from favorable dynamical conditions confined to lower latitudes in terms of low-level cyclonic vorticity and weak vertical wind shear. In contrast, the period from June to September is the SCS TC season during which TCs generate most frequently under the impact of the SCS summer monsoon season, with majority of cyclogenesis forming around 17°N. Abrupt northward (southward) shift of TC genesis position accompanied by the apparent increase (decrease) in cyclogenesis frequency takes place in the seasonal transition of May (October), depending on the onset (retreat) of the SCS summer monsoon in relation to drastic changes of the weak vertical wind shear and mid-layer relative humidity higher than 40% in the SCS. With the higher relative humidity concentrating over southern SCS in the mid-layer, the TC genesis positions again return back south of 10°N during November-December. However, the TC genesis in the WNP exhibits a gradually seasonal variation with an evident change only appearing in July. Note that the period July-October is the dominant typhoon season in the WNP. Because weaker vertical easterly wind shear is present over the NWP in almost all months of the year, most TCs generated in this region can reach a stronger intensity and develop into typhoons. But over the SCS, the TC intensity is weaker than that over the NWP, with most TCs evolving into only tropical storms. ENSO events exert a significant impact on changes in regions favorable for TC genesis during different seasons and consequently on geographical variations in TC tracks. During an El Niño event for both developing phase and decaying phase, the departure from climatology of monthly TC longitude crossings is negative anomaly in the SCS and positive anomaly in the WNP. Opposite situation occurs during a La Niña event.

Keywords Western North Pacific, South China Sea, Tropical cyclone, Seasonal variation, ENSO

1 引言

作为暖池的主体区域,西北太平洋是全球热带 气旋生成及活动最频繁的海域(Grav, 1968; 陈联 寿和丁一汇, 1979; Zehr, 1992; Yumoto and Matsuura, 2001; 陈联寿和孟智勇, 2001)。南海作 为西北太平洋最大的边缘海,一方面受到西北太平 洋生成的某些台风西移的影响,另一方面也是热带 气旋生成的源地(陈世荣, 1990)。南海海域内局 地生成的热带气旋又称南海台风,以下简称为南海 热带气旋(吴迪生等, 2005; 蒋迪等, 2012)。由 于南海海域面积相对于其以东的西北太平洋偏小、 月西部和北部均紧邻大面积大陆,因而在南海生成 的热带气旋大多在沿岸登陆后减弱、消失,从而给 我国华南及其它国家沿海地区造成较大经济损失 及人员伤亡。然而,在吕宋岛以东的西北太平洋海 域,海域广阔且受周围陆地影响较小,上层海洋暖 水较南海也更为深厚 (Lin et al., 2008), 意味着包含 更多的上层海洋热含量 (Goni and Trinanes, 2003; Lin et al., 2009)。季风槽作为热带气旋生成的强大 动力因素,其空间尺度和强度在西北太平洋海域也 往往比南海区域更强大 (Harr and Elsberry, 1995; Mao and Wu, 2010)。因而,西北太平洋海域生成的 热带气旋与南海区域生成的热带气旋在频数、强 度、移动路径长度与方向、移动速度及持续时间等 方面均有不同(王东生和屈雅, 2007; Yuan et al., 2007; Wang, 2008; 郑文荣等, 2009; Wang and Pan, 2012;杨彩虹等, 2012;叶婷婷, 2013),影响它 们季节变化和年际变化的强迫因子也有差异 (Watterson et al., 1995; Ritchie and Holland, 1999; Maloney and Hartmann, 2001; Mao and Chan, 2005)。

李雪等(2010)将整个西北太平洋划分为南海 (5°N~25°N, 110°E~120°E)和西北太平洋(5°N~ 25°N,120°E~180°)两个区域,并利用中国气象局 1950~2007年资料,比较了两个区域热带气旋生成 频数的年际变化和季节变化。结果发现,西北太平 洋热带气旋生成频数明显多于南海。两海域热带气 旋生成频数在年际变化上相对独立, 在季节变化上 存在明显区域性差异。但对于上述差异的成因仅仅 讨论了季风槽和海温的作用。Gray (1968) 从全球视 野考察了热带气旋形成的季节依赖性气候特征,并 提出了热带气旋形成的 6 个海气热力、动力学必要 条件。作为伴有强烈海气相互作用的强对流系统, 热带气旋的强度变化同样受到这些大气、海洋气候 参数的影响(Wang and Wu, 2004)。此外, ENSO 事件 (陈光华和黄荣辉, 2006; 李春晖等, 2007; 白莉 娜和王元, 2009; 祝丽娟等, 2012; 冯涛等, 2013)、 南极涛动(王会军和范可,2006)、北太平洋涛动(王 会军等, 2007b; Zhou and Cui, 2014)、北太平洋海

冰面积指数(范可,2007a)以及 Hadley 环流 (Zhou and Cui, 2008)等与南海及西北太平洋热带气旋活动的年际变化密切相关,基于上述成果开展了台风的气候预测(王会军等,2006;范可,2007b;王会军等,2007a;Fan and Wang, 2009)。其中,ENSO对于南海与西北太平洋热带气旋生成频数 (Chan, 2000)、 生成位置 (Lander, 1994; Wang and Chan, 2002; Chen and Tam, 2010)及其他活动特征 (Wu et al., 2005) 年际变化的影响不完全一致。

因此,本文将基于李雪等(2010)的区域划分, 并利用美国联合台风预警中心 (JTWC)的热带气 旋资料及其对热带气旋生成的定义(根据 Saffir-Simpson标准,达到热带低压强度视为热带气旋生 成,即风速大于 17.5 m s⁻¹),综合热带气旋生成、加 强的大尺度热力和动力条件 (Gray, 1968; Emanuel, 2003),进一步揭示两个海域生成的热带气旋在生 成、强度、维持时间等方面的季节差异以及 ENSO 的影响,侧重分析造成差异的海气环境因子的相对 重要性。

2 资料

本文使用的热带气旋资料来自 JTWC 西北 太平洋热带气旋最优路径数据集(1945~2011 年),利用 1979~2010年 JRA-25 (Japanese 25-year ReAnalysis)再分析资料 (Onogi et al., 2007)对大 气环境因子进行诊断。所用要素场为标准等压面上 的月平均风场和水汽场,空间分辨率为 1.25°(纬 度)×1.25°(经度)。海温 (sea surface temperature, SST)资料来源于 NOAA 1982~2011年月平均最优 差值海温资料 (Reynolds et al., 2002),空间分辨率 为 1°(纬度)×1°(经度)。

文中对 ENSO 的定义来自于 NOAA 逐月海洋 Niño 指数 (Oceanic Niño Index, ONI),即 Niño 3.4 区 (5°N~5°S, 120°W~170°W) 3 个月滑动平均 海温距平大 (小)于 0.5 °C 则为一次 El Niño (La Niña)事件。根据上述定义,1950~2011 年共有 18 次 El Niño 事件,16 次 La Niña 事件,其余为中性 ENSO 事件影响时间 (表 1)。

3 南海与西北太平洋热带气旋活动 的季节差异

统计 JTWC 西北太平洋 1945~2011 年热带气

表 1 1950~2011 年 El Niño 及 La Niña 事件发生时段 Table 1 Time buckets of the El Niño and La Niña events during 1951-2011

发生时段	
El Niño 事件	La Niña 事件
1951年7月至1952年1月	1950年1月至1950年8月
1953年1月至1954年2月	1950年10月至1951年2月
1957年4月至1959年3月	1954年5月至1956年12月
1963年6月至1964年2月	1964年5月至1965年1月
1965年5月至1966年4月	1970年7月至1972年1月
1968年8月至1970年1月	1973年5月至1974年7月
1972年5月至1973年3月	1974年10月至1976年4月
1976年9月至1977年2月	1983年9月至1984年1月
1977年9月至1978年2月	1984年10月至1985年9月
1982年5月至1983年6月	1988年5月至1989年5月
1986年8月至1988年2月	1995年9月至1996年3月
1991年5月至1992年6月	1998年7月至2001年3月
1994年9月至1995年3月	2005年11月至2006年3月
1997年5月至1998年4月	2007年8月至2008年6月
2002年5月至2003年2月	2008年11月至2009年3月
2004年7月至2005年1月	2010年7月至2011年4月
2006年9月至2007年1月	
2009年7月至2010年4月	

旋资料, 南海与西北太平洋热带气旋逐月气候平均 生成位置如图1所示。在南海区域,1~4月,热带 气旋平均生成于 10°N 及其以南, 而 3 月没有热带 气旋生成。5月,生成位置大幅度向北跳跃至15°N 附近, 6~9月, 集中生成于 17°N 附近。这种夏季 南海台风生成位置的集聚性证实了李春晖等 (2007)所得结果。10月,生成位置显著地南撤至 14°N 以南。在11月和12月,气旋生成的纬度基本 与 4 月相同, 即 10°N 附近。值得注意的是, 南海 热带气旋气候平均生成位置分别在 5 月和 10 月有 一次大幅北进或南撤的"季节突变"现象,其中以 5月的向北跃进最为明显。但在 120°E 以东的西北 太平洋, 生成位置的季节变化主要表现为逐步推进 或撤退,只在7月有一次明显的北跳。7~10月热 带气旋平均生成于 12°N 以北,与之对应相反,其 他其它月份位于10°N以南。

图 2 给出了南海及西北太平洋热带气旋生成频数的季节变化。在南海,1~4 月热带气旋生成较少,这 4 个月生成频数总和仅占全年的 3%左右。而 5 月生成频数陡增至全年的 8%(图 2a),与生成位置的大幅北跳对应(图 1)。6~9 月南海生成的热带气旋逐渐增多,峰值出现在 8、9 月,约占全年的 38%(8、9 月之和),明显多于全年其他月份。10 月,与生成位置的突然南撤相对应,生成频数由9 月 19%以上迅速减少至 12%。南海热带气旋生成



图1 南海(圆点)与西北太平洋(三角)热带气旋逐月气候平均生成位置

Fig. 1 Climatological mean tropical cyclogenesis positions for different months in the South China Sea (circles) and in the western North Pacific (triangles)



图 2 (a) 南海与 (b) 西北太平洋热带气旋生成频数百分比 Fig. 2 Percentages of tropical cyclogenesis frequencies from Jan to Dec in (a) the South China Sea and (b) the western North Pacific

频数的季节变化与其生成位置的季节变化有很好的对应关系,即存在 5 月大幅增加和 10 月减少的 "季节突变"现象。

如图 2b 所示,在西北太平洋,热带气旋生成 频数在 7~10 月明显多于全年其他月份,为热带气 旋活动的"盛期",其中各月生成频数均大于 14% 且差异较小,最大值出现在 8 月。"盛期"之外其 余各月不足全年的 9%。这与 7~10 月气候平均生 成位置在 12°N 以北,其他月份在 10°N 以南的分类 相对应,说明西北太平洋热带气旋生成频数与生成 位置有一定关系。

为考察南海及西北太平洋热带气旋强度季节 变化的差异,根据 Saffir-Simpson 标准将热带气旋 划分为4级:中心附近最大风速大于17.5 m s⁻¹即 为热带低压 (Tropical Depression, TD); 风速在 17.5~32.4 m s⁻¹之间为热带风暴 (Tropical Storm, TS);风速在 32.9~69.5 m s⁻¹之间为台风 (Typhoon, TY);风速大于 69.5 m s⁻¹则定义为超级台风 (Super Typhoon, ST)。根据上述热带气旋分级标准,图 3 给出逐月不同强度热带气旋生成频数。如图 3a 所 示,南海以热带风暴生成为主,年平均热带风暴数 占热带气旋总数的 53.8%, 5~11 月热带风暴生成 频数均大于其它强度的热带气旋。5 月,不同强度 热带气旋均较前一月明显增多,其中以热带风暴生 成的数量增幅最大。6~8月,热带风暴生成频数不 断增多, 其中 7、8 月热带风暴生成频数是台风生 成频数两倍以上。9月,南海上空热带风暴生成减 少,而台风生成频数增加,达全年最大。10月各强 度热带气旋生成频数均显著减少。12 月则以热带低 压生成为主。然而在西北太平洋, 生成的台风较其 它强度的热带气旋多(图 3b),占生成热带气旋总 数的 49.1%。7~10 月也是西北太平洋台风生成 的"盛期",其生成频数远大于其他强度的热带气 旋。通过对比可知,两海域热带气旋强度的季节变 化与生成频数的季节变化特征一致,且西北太平洋 生成的热带气旋平均强于南海局地生成的热带气 旋。

从热带气旋首次达到热带低压强度(即风速大于 17.5 m s⁻¹) JTWC 开始对其进行编号至其强度弱



图 3 (a) 南海与(b) 西北太平洋不同强度热带气旋(热带低压 TD, 热带风暴 TS, 台风 TY, 超级台风 ST) 生成频数百分比 Fig. 3 Percentages of tropical cyclogenesis frequencies with different intensities for tropical depression (TD), tropical storm (TS), typhoon (TY), and super typhoon (ST) from Jan to Dec in (a) the South China Sea and (b) the western North Pacific



图 4 南海与西北太平洋热带气旋维持时间的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of tropical cyclone durations in (a) the South China Sea and (b) the western North Pacific

于热带低压 (风速小于 17.5 m s⁻¹), JTWC 取消对 其编号截止, 所经历的时间定义为热带气旋的持续 时间。为了考察两海域热带气旋维持时间的季节变 化,分别计算两海域逐月及全年热带气旋持续时间 的气候平均 (图 4)。由图 4 可知, 南海生成的热带 气旋的平均持续时间为 6 d, 而在西北太平洋生成 的热带气旋的平均持续时间为 8 d。因此,除了强 度弱于西北太平洋生成的热带气旋外,南海局地生 成的热带气旋的持续时间也较短。造成这种差异的 原因可能是南海是一个半开放海域且海盆尺度较 小,热带气旋生成后很快会登陆进而填塞消亡。此 外,无论是在南海还是西北太平洋生成的热带气 旋,其持续时间都没有显著的季节差异。

4 西北太平洋与南海热带气旋活动季 节变化差异的成因

通过上述对比可知,南海与120°E 以东的西北 太平洋局地生成的热带气旋在生成位置、频数及强 度的季节变化等方面存在明显差异。以下将通过低 层相对涡度、风速垂直切变、中层相对湿度及 SST 等大气、海洋动力热力气候参数的季节变化探讨造 成南海与西北太平洋热带气旋生成及强度差异的 原因及其相对重要性。

图 5 给出南海和西北太平洋 850 hPa 相对涡度

及水平风场的时间-纬度分布。北半球冬季,南海 位于强大的西伯利亚高压南侧(丁一汇,2005), 则如图 5a 所示, 1~4 月南海大部分区域盛行东北 季风。此时西北太平洋副热带高压(以下简称西太 副高)强度较弱,中心位于台湾海峡附近(丁一汇, 2005), 南海北部(11°N以北)对流层中低层受西 太副高控制为负涡度区;而南海南部(11°N以南) 受热带辐合带 (Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 影响,为正涡度区(图 5a)。因此热带气旋 主要生成于 10°N 以南 (图 1)。5 月,随着南海季 风的爆发,南海全海域风速迅速减小,并转为一致 的偏南风。季风槽在南海的建立和发展以及南海北 部副高的减弱东撤(丁一汇,2005)造成气旋性涡 度区由 10°N 以南迅速北跳, 于 6 月到达 8°N~ 20°N, 使得生成位置大幅北进。6~9月南海区域盛 行西南风,季风槽加强并向北跃进。因此 10°N~ 20°N 相对涡度大于 0.5×10⁻⁵ s⁻¹,热带气旋集中生 成于南海北部(图1)。其中,8月、9月南海中北 部(12°N~18°N之间)相对涡度大于 10⁻⁵ s⁻¹,与 之相对应,生成频数最多(图 2 a)。10 月,南海 10°N 以北基本转为东北偏东风,标志着由夏季西 南季风开始转为冬季东北季风,而相对涡度大值区 (大于 10⁻⁵ s⁻¹)随着 ITCZ 的南撤移至 7°N~12°N 之间,10月生成位置因此明显南撤(图1)。之后, 东北季风逐渐增强并向南扩展,相对涡度大值区回 到 10°N 以南。受低层相对涡度的影响,在夏(冬) 季风期热带气旋生成于南海北(南)部,与已有结 论一致(Wang et al., 2007; 李雪等, 2010)。

西北太平洋同样受到季风影响,主要体现为其 上空西太副高及 ITCZ 的季节性推进及撤退 (Wu and Wang, 2001; Li and Wang, 2005)。1~6月,10°N 以南受 ITCZ 控制,为正涡度区;10°N 以北,受西 太副高及 Hadley 环流下沉支的影响,为负涡度区 (图 5b)。因此,热带气旋主要生成于10°N 以南(图 1)。7月开始,西太副高加强并向北跃进,ITCZ 随 之北上至 10°N~15°N。因此,正相对涡度区向北 扩展,热带气旋生成位置北跳。7~10月,南半球 马斯克林高压的加强发展使得赤道附近(7°N 以南) 为负涡度控制;10°N~20°N 受 ITCZ 及低频活动的 影响,为正涡度区(范可,2007b);而脊线位于28°N 附近的西太副高是造成 20°N 以北为负涡度区(图 5b)的主要原因。因此,热带气旋在 10°N~20°N 期"(图1和图2b)。

综上,海陆热力差异的季节反转及海温的季节 变化造成南海及西北太平洋冬、夏季风行星尺度大 气环流系统 (如季风槽、西太副高)发生季节性变 化 (Wu and Wang, 2001; Li and Wang, 2005), 低层相 对涡度随之发生改变,进而影响热带气旋生成位置。 值得注意的是,11月、12月,南海中北部(10°N~ 18°N)及西北太平洋 10°N 以北仍为正相对涡度 区,但是热带气旋却主要生成于10°N以南(图1), 且南海上空气候平均低层相对涡度大于西北太 平洋, 而西北太平洋生成的热带气旋却平均强于 南海局地生成的热带气旋(图3)。由此可见,南海 及西北太平洋热带气旋的生成并不完全决定于 低层相对涡度这一大气动力参数。低层气旋式涡度 对夏季南海热带气旋生成有明显的调控作用,而对 于冬季特别是 11 月、12 月热带气旋活动并不是主 要贡献。

水平风速的垂直切变是影响热带气旋生成及 强度变化的另一重要的大气动力参数,本文采用 200 hPa与850 hPa水平风速差值的绝对值表征这一 动力参数。垂直切变在 $1.25 \sim 5 \text{ m s}^{-1}$ 最有利于热带 气旋生成,小于 1.25 m s^{-1} 或大于 10 m s^{-1} 均不利于 热带气旋生成;且东风切变较西风切变更有利于热 带气旋生成 (Goldenberg et al., 2001; Nolan and McGauley, 2012)。定义 200 hPa 与 850 hPa 纬向风 垂直切变大于 0 即为西风切变,小于 0 为东风切变 (Wang, 1990)。

图 6 给出了水平风速垂直切变及高低层水平风 场在两海域的时间-纬度分布。北半球冬季,南海 与西北太平洋较为一致,低层为副热带高压南侧的 偏东风控制;对流层上层副热带高压西部脊脊线位 于 12°N 附近,向极一侧为副热带西风急流,向赤 道一侧为较弱的热带东风急流(丁一汇,2005)。 因此,如图 6 所示,11 月至次年 4 月南海及西北太 平洋 15°N 以北高层均为副热带强西风控制,低层 则为较强的偏东风,形成大于 10 m s⁻¹的强西风切 变。这种强西风切变造成的"通风"作用会迅速带 走上升的暖湿空气产生的凝结潜热(Wang and Wu, 2004; Nolan and McGauley, 2012),非常不利于热带 气旋的生成及发展。因此,两区域热带气旋大多生 成于有弱东风切变的南部海域。

5 月,南亚高压位于中南半岛上空(丁一汇, 2005),南海中北部 10°N~20°N 位于高压东部,高



图 5 (a) 南海与(b) 西北太平洋 850 hPa 相对涡度(阴影) 及水平风场(箭头) 的时间-纬度分布

Fig. 5 Time-latitude distributions of the 850-hPa relative vorticity (shadings) and horizontal winds (vectors) over (a) the South China Sea and (b) the western North Pacific



图 6 (a) 南海与 (b) 西北太平洋 200 hPa 与 850 hPa 之间水平风速的垂直切变 (阴影)、850 hPa 水平风场 (黑色矢量箭头,单位: m s⁻¹) 及 200 hPa 水平风场 (蓝色矢量箭头,单位: m s⁻¹) 的时间一纬度分布

Fig. 6 Time-latitude distributions of the vertical wind shear between 200 hPa and 850 hPa (shadings), the 850-hPa horizontal winds (black vectors, units: $m s^{-1}$) and the 200-hPa horizontal winds (blue vectors, units: $m s^{-1}$) over (a) the South China Sea and (b) the western North Pacific

层西风减速并逐渐转为较弱的偏东风控制,低层为 较弱的西南风(图 6a)。因此南海中北部风速垂直 切变迅速减小,且 10°N~17°N 为最有利于热带气 旋生成的弱垂直切变(1.25~5 m s⁻¹)。随着南海上 空弱垂直切变(1.25~5 m s⁻¹)区的向北扩展至中 北部,热带气旋生成位置向北大幅跃进同时生成频 数显著增加,强度明显加强(图 1、图 2a、图 3a)。

6~9月夏季风期,由于青藏高原的加热作用, 南亚高压跳上高原并达到全年最强,其南侧的热带 东风急流加强,并与北侧副热带西风急流一起向北 推进(丁一汇,2005)。随着西风急流的北跳,南海北部对流层高层转为热带东风急流控制,且因低层盛行西南季风,则南海北部由冬季的强西风切变转为弱东风切变(王会军等,2007b;范可,2007b),热带气旋主要生成于北部(图1)。而西北太平洋高层,150°E以西受强大的南亚高压控制,25°N以南位于高压南侧,为东风;150°E以东受洋中槽影响,10°N以北均为偏西风,以南为偏东风。因此,纬向平均西北太平洋10°N以南为一致的偏东风,北部纬向风分量较小。低层盛行偏东信风,则受此高低

空配置影响,西北太平洋北半球夏季垂直切变较小,且 10°N 以北为最有利于热带气旋生成的弱垂 直切变区 (1.25~5 m s⁻¹)。因此,夏季为西北太平 洋热带气旋生成的"盛期"(图 2b),且集中生成于 北部海域 (图 1)。

10月,南海大部高层仍为东风控制,而由于南海夏季风的撤退及冬季风的向南推进,南海中北部(11°N~18°N)低层由西南风转为偏东风(图 6a)。因此,弱东风切变区向南扩展至南海中部(图 6a),热带气旋生成位置随之显著南撤(图 1)。

类似于涡度的季节变化,高低空季风系统的季 节演变造成垂直风切变发生季节变化,进而影响南 海及西北太平洋热带气旋活动。其中,南海上空风 速垂直切变在 5 月和 10 月的急剧转变对于热带气 旋生成位置及生成频数的"季节突变"起重要作 用。然而与低层相对涡度类似,风速垂直切变也 无法较好地解释 11 月、12 月南海热带气旋活动的 变化: 11 月、12 月,热带气旋集中生成于 10°N 以 南,而有利于热带气旋生成的弱东风切变却位于 7°N~15°N。此外,因高层热带东风急流在南海附 近更强,且南海低层夏季盛行西南季风。因此,南 海垂直切变较西北太平洋强。西北太平洋大部分区 域受较弱的东风切变控制,则热带气旋生成频数较 南海多,且强度大。

除了动力因子外, 热力参数也对热带气旋的生 成及加强起着重要作用。其中,湿润的中层大气可 以减少干冷空气卷入,有利于对流的发生及维持。 因此,利用图 7 中 500 hPa 相对湿度这一热力因子 进一步解释南海及西北太平洋热带气旋生成及其 强度季节变化的差异。500 hPa 相对湿度(RH)小 于 40%的区域不利于热带气旋的生成发展 (Gray, 1968)。如图 7a 所示, 11 月至次年 4 月南海冬季风 期,10°N 以北中层大气非常干燥,相对湿度小于 40%,不利于热带气旋的生成及加强,相应的热带 气旋集中生成于 10°N 以南且生成频数较少、强度 较弱。因此,利用中层相对湿度在冬季风期的分布 可以较好地解释 11 月、12 月南海热带气旋的生成 特征。而随着西南季风的爆发,5月整个南海上空 500 hPa 相对湿度迅速增大,反之,10 月夏季风的 撤退及冬季风的向南推进使得北部中层大气的相 对湿度骤降,热带气旋生成位置也因此发生两次 "季节突变"。

在西北太平洋,10°N以北500 hPa相对湿度7~

10 月均大于 40%, 其中最大值出现在 8 月(图 7b)。 相应地, 7~10 月 10°N 以北热带气旋大量生成并进 入"盛期", 且 8 月气候平均生成位置至最大纬度 (图 1)。注意到与 5 月南海整个海域(特别是南海 北部)上空 500 hPa 相对湿度骤然增大, 10 月显著 减小不同,西北太平洋 500 hPa 相对湿度的大值区 1~7 月逐步向北扩展, 8~12 月逐步向南收缩,这 也可以解释南海热带气旋生成有"季节突变",而 西北太平洋热带气旋生成只在 7 月有明显变化,其 他月份只是渐进式变化。

温暖的热带洋面是热带气旋生成发展的能量 来源,SST作为表征海洋热力状况的一个重要参数, 与热带气旋的生成及强度变化紧密相关。图 8 为南 海及西北太平洋 SST 时间一纬度分布图。由图 8a 可知,12月至次年2月,南海北部(15°N以北) SST 低于 26.5 ℃, 3 月开始增暖, 至 5 月南海季风 爆发期间南海海温迅速攀升至最大值(大于 29.5 °C),为热带气旋的大量生成提供了有利的海 洋热力条件。6~9月, 南海北部的海温高于 29°C, 而从 10 月南海夏季风撤退期开始, 南海北部迅速 降温。西北太平洋没有表现出南海海温急剧变化的 过程,10°N 以北的南海北部海温逐渐升高,7~10 月热带气旋活动"盛期"时达到最高值 29 ℃ 以上, 之后逐步降低,热带气旋生成位置则南移至 10°N 以南。通过上述分析发现,作为最大的热带暖池, 南海及西北太平洋均有较高的海温保证热带气旋 生成及加强过程中所需的热量。且海陆差异的季节 反转和海温的季节变化及由此造成海气相互作用 是南海及西北太平洋季风爆发及撤退的重要原因 (Wu and Wang, 2001; Li and Wang, 2005)。而季风的 变化又会通过大气海洋动力、热力因子调控两海域 热带气旋的活动。因此,海温变化与热带气旋生成 的季节演变基本一致,这与李雪等(2010)的结论 类似。但局地海温的季节变化不能具体解释两海域 热带气旋生成及强度变化的一些特征,如5月、6 月南海海温更高,但热带气旋强度平均仍弱于西北 太平洋; 7~9 月南海南、北部各有一个 SST 大值 区,为何热带气旋却只集中生成于南海北部。

5 ENSO 对西北太平洋及南海热带气 旋活动年际变化的影响

已有研究发现,西北太平洋及南海热带气旋活



图 7 (a) 南海与(b) 西北太平洋 500 hPa 相对湿度的时间-纬度分布





图 8 (a) 南海与 (b) 西北太平洋海表温度的时间-纬度分布

Fig. 8 Time-latitude distributions of the sea surface temperature over (a) the South China Sea and (b) the western North Pacific

动的年际变化与赤道东太平洋 SST 异常显著相关 (Chan and Liu, 2004), El Niño 年南海热带气旋生成 频数减少 (Chan, 2000),西北太平洋热带气旋生成 频数增加 (Chan, 2000)、强度增强 (Chan and Liu, 2004) 且平均生成位置东移 (Lander, 1994; Wang and Chan, 2002; Chen and Tam, 2010); La Niña 年时 情况相反。为了深入揭示 ENSO 事件对不同季节生 成的热带气旋年际差异的影响,本文采用 Kuleshov et al. (2008) 提出的热带气旋路径穿越经度带频数

(Tropical Cyclone longitude crossings,即某一经度 带有热带气旋经过的次数,若同一热带气旋多次经 过某一经度带,则均计入总数)这个新指数,分别 统计 El Niño 事件、La Niña 事件和中性 ENSO 事件 热带气旋在最活跃的季节(7~10月)和不活跃的 季节(12月至次年3月)热带气旋路径穿越经度带 频数相对于气候态的异常(图9)。以 El Niño 事件 热带气旋最活跃季节(7~10月)路径穿越经度带 频数相对于气候态的异常为例,具体统计方法为: 第2节所述的18次 El Niño 事件发生时段中若包含 热带气旋最活跃季节7~10月任一月份,则将该月 对应的路径穿越经度带频数计入总数,最后用总数 除以18次 El Niño 事件发生时段中包含的最活跃季 节总月份数,得到 El Niño 事件热带气旋最活跃季节 (7~10月)路径穿越经度带频数的平均值。之后与 1950~2011年(不区分 ENSO 事件)7~10月气候 平均路径穿越经度带频数作差,即得异常偏差。其 它几种情形以此类推。该指数可以同时较好地表征 某一经度带内热带气旋活动的密度及热带气旋生成 和路径地理位置的变化 (Hall and Jewson, 2007; Kuleshov et al., 2008)。注意到 ENSO 事件最强(成 熟)位相一般出现在冬季(张秋庆和黄荣辉, 1993), 所以热带气旋最活跃的夏秋季(7~10月)恰好属 于 ENSO 事件的发展位相,而气旋最不活跃的冬春 季(12月至次年3月)对应 ENSO 事件的成熟及衰 减位相。图9所示的热带气旋路径穿越经度带频数 距平图实际上清楚地反映了 El Niño和 La Niña 事件 不同发展位相对两个海域热带气旋活动的影响。

由图 9 a 可见,在 El Niño 发展期间,热带气旋路径穿越 110°E~130°E 经度带的频数为负距 平,即经过南海及吕宋岛的热带气旋较气候平均偏 少;而 130°E 以东的西北太平洋路径频数是显著的 正距平,而且正距平区扩展到日界线附近,意味着 热带气旋生成位置也较气候态偏东。相反,在 La Niña 发展期间(图 9c), 南海经度带(110°E~120°E) 的路径频数是正距平,但负距平主要集中在 135°E~170°E 经度带内。可见 ENSO 在南海与在西 北太平洋引起的热带气旋活动的异常是相反的。对 于中性 ENSO 年,在南海和西北太平洋东部路径频 数接近于气候平均值(图 9e)。El Niño 和 La Niña 事件在成熟及衰减位相对于冬春季(12月至次年3 月) 南海经度带内及西北太平洋经度带内热带气旋 活动影响的反向变化与在发展期类似(图 9b 和图 9d)。上述对比表明,无论是在"活跃期"还是"不活 跃期",南海及西北太平洋(尤其是其中东部)热 带气旋活动均显著地受到 ENSO 调控,两个海域热 带气旋路径穿越经度带频数在 El Niño 事件及 La Niña 事件中呈反向变化。这种反向变化的机制可以 基于 Chan (2000) 的结果得以解释: El Niño 事件从 发展至成熟位相,异常暖水区逐渐东移至赤道东太 平洋, Walker 环流上升支随之东移, 使得西北太平 洋中东部低层辐合带加强,有利于热带气旋生成, 然而异常下沉支出现在南海及西北太平洋西部所在



图 9 (a、b) El Niño、(c、d) La Niña、(e、f) 中性 ENSO 年发展位相(7~10月, 左列) 和成熟及衰减位相(12月至次年3月, 右列) 月平均热 带气旋路径穿越经度带频数距平

Fig. 9 Anomalous tropical cyclone (TC) longitude crossings as departures from climatology for active TC season and inactive season associated with developing phases (Jul–Oct, left panel) and mature–decaying phases (Dec–Mar, right panel) of (a, b) El Niño, (c, d) La Niña, and (e, f) neutral ENSO years

经度带,季风槽变浅,使得南海热带气旋活动减弱; 在 La Niña 事件发展过程中,Walker 环流上升支向 西移动,南海季风槽加深,有利于热带气旋生成。

6 总结与讨论

利用 JTWC 西北太平洋 1945~2011 年热带气 旋资料,对比了南海(5°N~25°N,110°E~120°E) 与 120°E 以东的西北太平洋(5°N~25°N,120°E~ 180°)热带气旋生成位置、生成频数、强度、持续 时间的季节变化及 ENSO 的影响之后发现如下活动 特征差异:

(1)南海热带气旋生成特征(生成位置及频数) 受南海季风影响显著,6~9月生成于南海北部(气 候平均生成位置聚集于17°N附近),11月至次年4 月生成于南海南部(10°N以南)且生成频数较小。 在5月和10月季节转换期,生成位置大幅北进或 南撤并伴有生成频数的显著增加或减少。而西北太 平洋热带气旋生成特征主要为渐进式季节演变,只 在7月有一次明显的变化。其中7~10月为西北太 平洋热带气旋活动的"盛期",生成频数明显多于 其他月份,同时平均生成位置较其他月份偏北。

(2)除了生成特征的差异外,南海局地生成的 热带气旋平均弱于西北太平洋热带气旋。南海以热 带风暴生成为主,而西北太平洋生成的台风较多, 且南海热带气旋持续时间也较西北太平洋短。

(3)低层相对涡度、风速垂直切变、中层相对 湿度、SST等大气、海洋气候参数的季节变化造成 南海与西北太平洋热带气旋生成及强度季节变化 差异的相对重要性不尽相同。低层气旋性相对涡度 及弱东风切变区偏南(北)是造成1~4月(6~9 月)热带气旋集中生成于10°N以南(北)且生成 频数较少(多)、强度较弱(强)的主要原因。而 南海上空弱垂直切变(1.25~5 m s⁻¹)区及500 hPa 相对湿度的急剧转变与5月和10月热带气旋生成 位置及生成频数的"季节突变"密切相关。此外, 11月、12月南海热带气旋生成频数较少、强度较 弱且生成于10°N以南则主要归因于南海北部 (10°N以北)干燥的中层大气(相对湿度小于40%) 不利于热带气旋的生成及加强。

(4)无论在夏、秋季的发展位相还是冬、春季 的成熟及衰减位相,ENSO引起的热带气旋路径穿 越经度带的频数异常在南海与在西北太平洋均是 相反的。在 El Niño 事件期间,穿越南海所在经度 带路径频数为负距平,而西北太平洋经度带为正距 平;在 La Niña 事件期间,情况相反。

前人的工作指出,深厚的混合层可以减少海表 蒸发及混合上翻引起的海表冷却,以及由此造成的 对热带气旋对流活动的抑制 (Gray, 1968),也是影 响热带气旋生成及强度变化的海洋热力因子之一。 但诊断发现两海域混合层深度的季节变化均无法 较好地与热带气旋生成及强度变化相对应,且热带 气旋倾向生成于混合层较浅的区域。可能的解释 为,得到同样的热量,混合层浅薄的区域混合层海 温可以迅速升高,进而有利于热带气旋的生成及加 强。因此需要进一步深入探讨混合层深度是如何影 响两海域热带气旋活动的。此外,是什么大气及海 洋动力、热力因素导致南海在3月没有热带气旋生 成,也是值得深入探讨的问题。

致谢 逐月 ONI (Oceanic Niño Index) 指数的定义及数 据来自于 NOAA (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/ analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml[2014-03-05])。 感谢审稿者的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 白莉娜, 王元. 2009. 南海源地热带气旋生成和登陆频数的气候变异 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 45 (6): 757-768. Bai Lina, Wang Yuan. 2009. Climatic variation of the occurring and landing frequencies of tropical cyclones initiated from South China Sea [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 45 (6): 757-768.
- Chan J C L. 2000. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events [J]. J. Climate, 13 (16): 2960–2972.
- Chan J C L, Liu K S. 2004. Global warming and western North Pacific typhoon activity from an observational perspective [J]. J. Climate, 17 (23): 4590–4602.
- 陈光华, 黄荣辉. 2006. 西北太平洋热带气旋和台风活动若干气候问题 的研究 [J]. 地球科学进展, 21 (6): 610–616. Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2006. Research on climatological problems of tropical cyclone and typhoon activity in western North Pacific [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 21 (6): 610–616.
- Chen G H, Tam C Y. 2010. Different impacts of two kinds of Pacific Ocean warming on tropical cyclone frequency over the western North Pacific [J]. Geophys. Res. Lett., 37 (1): L01803.
- 陈联寿, 丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 64–145. Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to Tropical Cyclones in the Western North Pacific (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 64–145.
- 陈联寿, 孟智勇. 2001. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. 大气科学, 25 (3): 420-432. Chen Lianshou, Meng Zhiyong. 2001. An overview on

tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3): 420–432.

- 陈世荣. 1990. 西北太平洋的热带风暴源地 [J]. 气象, 16 (2): 23-26. Chen Shirong. 1990. Source regions of tropical storms over northwest Pacific Ocean [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 16 (2): 23-26.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 194–267. Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 194–267.
- Emanuel K A. 2003. Tropical cyclones [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 31: 75–104.
- 范可. 2007a. 北太平洋海冰, 一个西北太平洋台风生成频次的预测因 子? [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 37 (6): 851-856. Fan Ke. 2007a. North Pacific sea ice cover, a predictor for the western North Pacific typhoon frequency? [J]. Science China (Ser. D: Earth Sciences) (in Chinese), 37 (6): 851-856.
- 范可. 2007b. 西北太平洋台风生成频次的新预测因子和新预测模型 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 37 (9): 1260–1266. Fan Ke. 2007b. New predictors and a new prediction model for the typhoon frequency over western Pacific [J]. Science China (Ser. D: Earth Sciences) (in Chinese), 37 (9): 1260–1266.
- Fan K, Wang H J. 2009. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific [J]. Wea. Forecasting, 24 (4): 974–986.
- 冯涛,黄荣辉,陈光华,等. 2013. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台 风活动的气候学研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 364–382. Feng Tao, Huang Ronghui, Chen Guanghua, et al. 2013. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 364–382.
- Goldenberg S B, Landsea C W, Mestas-Nunez A M, et al. 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications [J]. Science, 293 (5529): 474–479.
- Goni G J, Trinanes J A. 2003. Ocean thermal structure monitoring could aid in the intensity forecast of tropical cyclones [J]. Eos, Trans. Amer. Geophys. Union, 84 (51): 573–578.
- Gray W M. 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms [J]. Mon. Wea. Rev., 96 (10): 669–670.
- Hall T M, Jewson S. 2007. Statistical modelling of North Atlantic tropical cyclone tracks [J]. Tellus: Ser. A, 59 (4): 486–498.
- Harr P A, Elsberry R L. 1995. Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part I: Spatial patterns and tropical cyclone characteristics [J]. Mon. Wea. Rev., 123 (5): 1225–1246.
- 蒋迪,黄菲,郝光华,等. 2012. 南海土台风生成及发展过程海气热通量 交换特征 [J]. 热带气象学报, 28 (6): 888–896. Jiang Di, Huang Fei, Hao Guanghua, et al. 2012. The characteristics of air-sea heat flux exchange during the generation and development of the local typhoon over the South China Sea [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28 (6): 888–896.
- Kuleshov Y, Qi L, Fawcett R. 2008. On tropical cyclone activity in the Southern Hemisphere: Trends and the ENSO connection [J]. Geophys. Res. Lett., 35 (14): L14S08.
- Lander M A. 1994. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO [J]. Mon.

Wea. Rev., 122 (4): 636-651.

- 李春晖, 刘春霞, 程正泉. 2007. 近 50 年南海热带气旋时空分布特征及 其海洋影响因子 [J]. 热带气象学报, 23 (4): 341–347. Li Chunhui, Liu Chunxia, Cheng Zhengquan. 2007. The characteristics of temporal and spatial distribution of tropical cyclone frequencies over the South China Sea and its affecting oceanic factors in the past 50yrs [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (4): 341–347.
- Li T, Wang B. 2005. A review on the western North Pacific monsoon: Synoptic-to-interannual variabilities [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO), 16: 285–314.
- 李雪, 任福民, 杨修群, 等. 2010. 南海和西北太平洋热带气旋活动的区 域性差异分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 504–510. Li Xue, Ren Fumin, Yang Xiuqun, et al. 2010. A study of the regional differences of the tropical cyclone activities over the South China Sea and the western North Pacific [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 504–510.
- Lin I I, Wu C C, Pun I F, et al. 2008. Upper ocean thermal structure and the western North Pacific category-5 typhoons. Part I: Ocean features and category-5 typhoon's intensification [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (9): 3288– 3306.
- Lin I I, Pun I F, Wu C C. 2009. Upper ocean thermal structure and the western North Pacific category-5 typhoons. Part II: Dependence on translation speed [J]. Mon. Wea. Rev., 137 (11): 3744–3757.
- Maloney E D, Hartmann D L. 2001. The Madden-Julian oscillation, barotropic dynamics, and north Pacific tropical cyclone formation. Part I: Observations [J]. J. Atmos. Sci., 58 (17): 2545–2558.
- Mao J Y, Chan J C L. 2005. Intraseasonal variability of the South China Sea summer monsoon [J]. J. Climate, 18 (13): 2388–2402.
- Mao J Y, Wu G X. 2010. Intraseasonal modulation of tropical cyclogenesis in the western North Pacific: A case study [J]. Theor. Appl. Climatol., 100 (3–4): 397–411.
- Nolan D S, McGauley M G. 2012. Tropical cyclogenesis in wind shear: Climatological relationships and physical processes [M]// Oouchi K, Fudeyasu H. Cyclones: Formation, Triggers, and Control. Happauge, New York, NY, USA: Nova Science Publishers.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85 (3): 369–432.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. J. Climate, 15(13): 1609–1625.
- Ritchie E A, Holland G J. 1999. Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the Western Pacific [J]. Mon. Wea. Rev., 127 (9): 2027–2043.
- Wang L. 2008. Study of tropical cyclogenesis over the South China Sea [D]. Ph. D. dissertation, Hong Kong University of Science and Technology, 29–35.
- Wang B. 1990. On the asymmetry of baroclinic instability between easterly and westerly shear [J]. Tellus A, 42 (4): 463–468.
- Wang B, Chan J C L. 2002. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific [J]. J. Climate, 15 (13): 1643–1658.
- 王东生, 屈雅. 2007. 西北太平洋和南海热带气旋的气候特征分析 [J]. 气象, 33 (7): 67-74. Wang Dongsheng, Qu Ya. 2007. Climatic

characteristics of tropical cyclones over northwestern Pacific and South China Sea [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (7): 67–74.

- Wang G H, Su J L, Ding Y H, et al. 2007. Tropical cyclone genesis over the South China Sea [J]. J. Mar. Syst., 68 (3–4): 318–326.
- 王会军, 范可. 2006. 西北太平洋台风生成频次与南极涛动的关系 [J]. 科学通报, 51 (24): 2910–2914. Wang Huijun, Fan Ke. 2006. Relationship between the Antarctic oscillation and the western North Pacific typhoon frequency [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (24): 2910–2914.
- 王会军, 郎咸梅, 范可, 等. 2006. 关于 2006 年西太平洋台风活动频次 的气候预测试验 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 133–137. Wang Huijun, Lang Xianmei, Fan Ke, et al. 2006. Real-time climate prediction experiment for the typhoon frequency in the western North Pacific for 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 133–137.
- 王会军,范可,孙建奇,等. 2007a. 关于西太平洋台风气候变异和预测 的若干研究进展 [J]. 大气科学, 31 (6): 1076–1081. Wang Huijun, Fan Ke, Sun Jianqi, et al. 2007a. Some advances in the researches of the western North Pacific typhoon climate variability and prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1076–1081.
- 王会军,孙建奇,范可. 2007b. 北太平洋涛动与台风和飓风频次的关系 研究 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 37 (7): 966–973. Wang Huijun, Sun Jianqi, Fan Ke. 2007b. Relationship between the North Pacific oscillation and the typhoon/hurricane frequencies [J]. Science China (Ser. D: Earth Sciences) (in Chinese), 37 (7): 966–973.
- Wang L, Pan X M. 2012. Diagnosis of seasonal variations of tropical cyclogenesis over the South China Sea using a genesis potential index [J]. Journal of Ocean University of China, 11 (3): 267–278.
- Wang Y, Wu C C. 2004. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes — A review [J]. Meteor. Atmos. Phys., 87 (4): 257–278.
- Watterson I G, Evans J L, Ryan B F. 1995. Seasonal and interannual variability of tropical cyclogenesis: Diagnostics from large-scale fields [J]. J. Climate, 8 (12): 3052–3066.
- 吴迪生, 赵雪, 冯伟忠, 等. 2005. 南海灾害性土台风统计分析 [J]. 热 带气象学报, 21 (3): 309–314. Wu Disheng, Zhao Xue, Feng Weizhong, et al. 2005. The statistical analyse to the local harmful typhoon of South China Sea [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (3): 309–314.
- Wu L G, Wang B, Braun S A. 2005. Impacts of air-sea interaction on tropical cyclone track and intensity [J]. Mon. Wea. Rev., 133(11): 3299–3314.

- Wu R, Wang B. 2001. Multi-stage onset of the summer monsoon over the western North Pacific [J]. Climate Dyn., 17 (4): 277–289.
- 杨彩虹, 薛存金, 季民. 2012. 近 30 年西北太平洋热带气旋时空特征分 析 [J]. 地球信息科学学报, 14 (5): 611–617. Yang Caihong, Xue Cunjin, Ji Min. 2012. Spatio-temporal variability of typhoon in the recent 30 years in the Northwest Pacific [J]. Journal of Geo-Information Science (in Chinese), 14 (5): 611–617.
- 叶婷婷. 2013. 南海热带气旋的若干气候特征分析 [D]. 南京大学硕士 学位论文, 50pp. Ye Tingting. 2013. A study to several climatological characteristic of tropical cyclones from South China Sea [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University, 50pp.
- Yuan J, Wang D, Liu C, et al. 2007. The characteristic differences of tropical cyclones forming over the western North Pacific and the South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 26 (4): 29–43.
- Yumoto M, Matsuura T. 2001. Interdecadal variability of tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 79 (1): 23–35.
- Zehr R M. 1992. Tropical cyclogenesis in the Western North Pacific [R]. NOAA Tech. Rep. NESDIS, 181.
- 张秋庆, 黄荣辉. 1993. ENSO 事件发展的时空特征 [J]. 大气科学, 17 (4): 395–402. Zhang Qiuqing, Huang Ronghui. 1993. Temporal and spatial features in ENSO evolution [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 17 (4): 395–402.
- 郑文荣, 李江南, 蔡建春, 等. 2009. 西北太平洋超强台风时空分布特征 及其成因 [J]. 海洋预报, 26 (4): 19–24. Zheng Wenrong, Li Jiangnan, Cai Jianchun, et al. 2009. Spatio-temporal characteristics of super typhoons in the western North Pacific and related causes [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 26 (4): 19–24.
- Zhou B T, Cui X. 2008. Hadley circulation signal in the tropical cyclone frequency over the western North Pacific [J]. J. Geophys. Res., 113 (16): D16107, doi: 10.1029/2007JD009156.
- Zhou B T, Cui X. 2014. Interdecadal change of the linkage between the North Atlantic Oscillation and the tropical cyclone frequency over the western North Pacific [J]. Science China Earth Sciences, 57 (9): 2148–2155, doi: 10.1007/s11430-014-4862-z.
- 祝丽娟, 王亚非, 尹志聪. 2012. 热带 MJO 和 ENSO 对西北太平洋热带 气旋影响研究综述 [J]. 气象科技, 40 (1): 65–73. Zhu Lijuan, Wang Yafei, Yin Zhicong. 2012. Review of modulation impacts of Madden-Julian oscillation and ENSO on tropical cyclone activities over western North Pacific [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 40(1): 65–73.