

陶丽,靳甜甜,濮梅娟,等. 2013. 西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展[J]. 大气科学学报,36(4):504-512.

Tao Li, Jin Tian-tian, Pu Mei-juan, et al. 2013. Review of the researches on climatological variations of tropical cyclones over western North Pacific [J]. Trans Atmos Sci, 36(4):504-512. (in Chinese)

西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展

陶丽¹, 靳甜甜¹, 濮梅娟², 夏瑛²

(1. 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学), 江苏 南京 210044; 2. 江苏省气象局, 江苏 南京 210008)

摘要: 简要回顾了近年来国内外在西北太平洋热带气旋活动的季节、年际和年代际变化方面的研究, 涉及到热带低频振荡、厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern oscillation, ENSO)、印度洋海盆增暖、准两年振荡(quasi-biennial oscillation, QBO)等对西北太平洋热带气旋活动气候变化的影响, 以及 ENSO 与热带气旋活动年际相关的年代际变化, 展望了该领域的研究前景, 并提出当前此研究领域一些亟需研究的科学问题。

关键词: 西北太平洋; 热带气旋; 气候变化; 研究进展

中图分类号: P461 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7097(2013)04-0504-09

Review of the researches on climatological variations of tropical cyclones over western North Pacific

TAO Li¹, JIN Tian-tian¹, PU Mei-juan², XIA Ying²

(1. Key Labortory of Meteorological Disaster (NUIST), Ministry of Education, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008, China)

Abstract: This paper summarizes the achievements of recent researches on seasonal, interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over western North Pacific. It includes the effects of Madden-Julian Oscillation, ENSO (El Niño-Southern oscillation), the Indian Ocean warming or QBO (quasi-biennial oscillation) on the activity of tropical cyclone as well as the interdecadal variations of the relationship between the frequency of intense TCs and ENSO. Some prospects in this field and some further considerations are also proposed.

Key words: western North Pacific; tropical cyclone; climatological variation; review

0 引言

西北太平洋(西太)暖池全年平均海温达 28 °C 以上, 在北半球夏季(6—10 月), 其低层越赤道西风气流与东北信风相遇而形成热带辐合带(又称季风槽), 在这个沿着(150°E, 5°N)至(120°E, 20°N)的气旋性切变区域存在大范围的对流活动, 十分有利于热带气旋(tropical cyclone, TC)的生成, 使得西北太平洋成为世界上 TC 活动最频繁的海域。

西太 TC(这里指热带风暴及以上的 TC, 不包括热带低压)除了能带来充沛的雨量外, 也是影响我国的主要气象灾害的天气系统之一, 在其活动过程中, 常伴随有狂风、暴雨、巨浪和风暴潮, 对我国沿海地区的人畜造成生命威胁, 使财产和经济遭受严重损失。西太 TC 频数具有显著的年际变化, 自有连续的记录以来, 1964 年最多, 达 44 个, 2010 年最少, 只有 19 个, 从气候平均而言, 每年在西太约有 32 个 TC 生成(陈光华和黄荣辉, 2006)。不仅总

收稿日期: 2012-12-21; 改回日期: 2013-03-15

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC22B03); 江苏省气象科研开放基金项目(KM201103); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

通信作者: 陶丽, 博士, 副教授, 研究方向为台风气候学、低频振荡, taoli@nuist.edu.cn.

TC 频数有显著的年际变化,强 TC(4、5 级 TC, $V_{\max} \geq 211$ km/h) 年频数也有显著的年际变化,1964、2004 年最多,达 12 个,1985 年最少,只有 1 个(图 1)。

许多学者研究认为西太 TC 活动的年际变化与厄尔尼诺—南方涛动(El Niño—Southern oscillation, ENSO) 有密切的联系(Chan, 1985; Lander, 1994; Chen et al., 1998; Chia and Ropelewski, 2002; Wang and Chan, 2002; Camargo and Sobel, 2005; Zhao et al., 2010, 2011)。研究发现在 El Niño 发展年 TC 生成位置偏东偏南,强度偏强;而在 La Niña 发展年,TC 生成位置偏西偏北,强度偏弱。即在 El Niño 发展年,强 TC 频数偏多,La Niña 发展年,强 TC 频数偏少。然而总 TC 频数与 ENSO 相关不大。最近, Tao et al. (2012) 的研究发现强 TC 年频数与 Niño3.4 指数的年际相关有着年代际的差异,1949—1968 和 1989—2008 年期间两者相关系数分别为 0.69 和 0.70,而在 1969—1988 年期间两者相关系数只有 0.07。由 1949—2010 年西北太平洋强 TC(4、5 级 TC) 年频数与同期冬季(11 月—次年 1 月,简称 NDJ) Niño3.4 指数 11 a 滑动相关(图 2)可看出,强 TC 的年频数与 ENSO 的相关关系大约经历了两次改变,1968 年以前两者相关较好,1969—1988 年期间两者相关很弱,1990 年以后两者又有很好的正相关关系。

强 TC 频数和 ENSO 年际相关的不稳定性,制约着 TC 的季节预测,因此有必要研究强 TC 频数与 ENSO 在年际尺度上相关性的不稳定性及其可能机理。开展这方面的研究可以为西太强 TC 生成频数的预测提供科学依据,从而提高对这种突发性严重灾害性天气的防御能力,减少灾害所带来的损失。

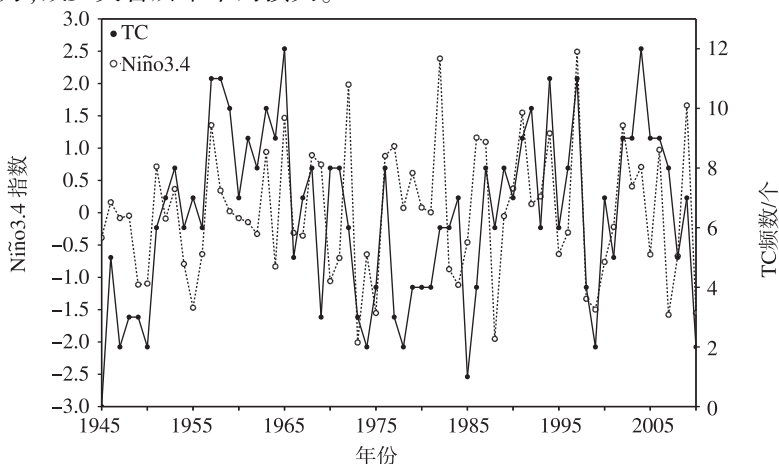


图 1 1945—2010 年西北太平洋强 TC(4、5 级 TC) 年频数与冬季 Niño3.4 指数的时间序列

Fig. 1 Time series of the annual number of category 4 + 5 TCs and that of the Niño3.4 SST index during NDJ (dotted line) in the period of 1945—2010

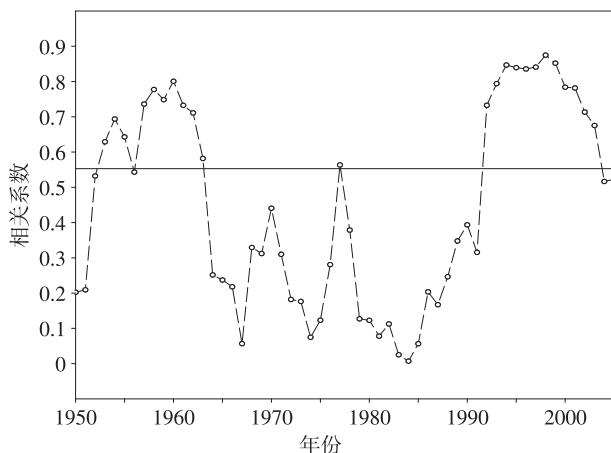


图 2 1945—2010 年西北太平洋强 TC(4、5 级 TC) 年频数与冬季 Niño3.4 指数的 11 a 滑动相关(实线表示 0.05 的信度检验线)

Fig. 2 An 11-year running correlation between the annual number of category 4 + 5 TCs and Niño3.4 SST index during NDJ in the period of 1945—2010 (The solid line denotes the significance at 95% confidence level)

1 国内外研究现状及发展动态

1.1 热带季节内振荡对西太 TC 活动季节变化的影响

一些研究发现大气季节内振荡(Madden-Julian oscillation, MJO)对 TC 生成有重要的调制作用。Gray (1979) 对全球热带气旋活动情况的统计表明,热带气旋活动在时间和空间上都有明显的群发性,即在全球范围内常常观察到有 5~15 个热带气旋在 1~2 周内集中发生,而紧接着的 2~3 周内却几乎

没有热带气旋活动。Mao and Wu(2009)指出西北太平洋上热带气旋倾向于发生在 MJO 对流活跃位相。MJO 不同位相时,西北太平洋低层上空存在强异常气旋和反气旋的交替变换,且分别伴有增强和减弱季风槽。Liebmann et al. (1994) 在研究 MJO 对 WNP 热带扰动的影响后指出,当 MJO 处于对流活跃位相时,热带扰动和 TC 数量都将增加;同时还发现:在 MJO 活跃期,台风活动的增加源于热带扰动的增加,而非 TC 在 MJO 对流活跃期更易于发展成为台风。Dickinson and Molinari(2002)研究发现与 MJO 相关联的 Rossby 重力混合波波包沿赤道东传,进入热带西太平洋区域后,2 300 ~ 3 000 km 波长的个别扰动脱离赤道向西北方向传播,表明 Rossby 重力混合波转变为热带低压型扰动(TD 型扰动),而 TD 型扰动可以为 TC 生成提供初始涡旋。Sobel and Maloney(2000)、Maloney and Dickinson(2003)从能量收支的角度分析表明,当西北太平洋处于 MJO 西风位相时,平均动能向扰动动能的正压转换以及扰动有效位能向扰动动能的转换远大于其在东风位相时的能量的转换。黄荣辉和陈光华(2007)、陈光华和黄荣辉(2009)指出沿赤道西传的混合 Rossby 重力波在西北太平洋通过季风槽的辐合作用,易于转变为波数较大、波长较短的热带低压型扰动,这种扰动在季风槽区通过平均运动动能向扰动动能的转换有利于发展成为 TC。Fu et al. (2007)则认为当西北太平洋处于 MJO 西风位相,低层的水汽辐合和西风气旋性切变为 TC 的形成提供了有利条件。

一些学者研究发现 MJO 对 TC 路径也有重要的调制作用。Ko and Hsu(2006,2009)研究发现,MJO 的西风位相与台湾附近的 TC 路径的北折有密切联系。田华等(2010)细化了西北太平洋的台风路径类型,指出不同 MJO 低频形势,对于 TC 路径类型的不同具有重要的指示作用。陶丽等(2012)研究发现在 MJO 东风位相中,西北太平洋 TC 在 140°E 以东转折的比例比较大;而在西风位相,在 140°E 以西转折类的 TC 比例则比较高。个例分析发现,当 MJO 气旋(反气旋)性环流中心与热带气旋中心重合时,热带气旋路径会发生突然的右折。

夏季 MJO 的年际变化与 ENSO 有一定的关系,Teng and Wang(2003)认为在 El Niño 发展年,赤道西太平洋的东风垂直切变增大,有利于低层 Rossby 波的增强和向西北方向的传播,则西太地区 MJO 的强度增强。然而 MJO 的年际变化、年代际改变是否

会调制 TC 活动的年际和年代际变化,迄今为止还未见有人研究,TC 活动的年际变化是否与 MJO 的年际变化密切相关,这是一个尚待研究的问题。

1.2 西太 TC 活动的年际变化

1.2.1 ENSO 对西太 TC 的影响

西太 TC 活动不仅有非常明显的季节内时间尺度的变化,而且具有 3 ~ 4 a 周期的年际变化。El Niño 事件是影响大气环流和气候异常的强信号,西太 TC 异常与热带大尺度环流异常密切相关,许多学者研究发现 ENSO 会对西太 TC 发生频数、强度、位置等活动特征产生影响。Chan(1985)利用谱方法分析了西北太平洋海域 TC 生成个数的时间序列,发现年 TC 生成个数存在明显的 3.5 a 周期的变化特征,这可能与 ENSO 的循环相联系。Lander(1994)对上述研究结论提出了质疑,他认为观测到的年 TC 生成个数与 ENSO 事件之间没有必然的相关性,在 ENSO 年 TC 生成个数并没有明显的变化,但在生成区域上,El Niño 年 TC 生成位置偏东,而 La Niña 年则正好相反。Wang and Chan(2002)更细致地考察了 TC 活动的季节变化后认为:在 ENSO 年 TC 生成总数没有明显的变化,但在 El Niño 年的夏秋季,西北太平洋东南海域 TC 活动频繁,而西太的西北海域 TC 活动活动减弱;并且,在 El Niño 年 TC 向北转向偏多,平均生命史也比 La Niña 年的长。Camargo and Sobel(2005)利用热带气旋累积动能(accumulated cyclone energy, ACE)指数研究 ENSO 对 TC 强度的影响,指出在 El Niño 发展年,ACE 指数偏高,在 La Niña 发展年,ACE 指数偏低,TC 的年平均生命史、强度和频数对 ACE 指数均有贡献,且 TC 的年平均生命史对 ACE 的贡献最大。Yeh et al. (2010)研究发现 7—11 月总 TC 频数和同期 Niño3 指数在 1979—1989 年期间负相关较好,而在 1990—2000 年期间,两者则没有相关,他分析认为在 1979—1989 年期间,是海洋影响西太 TC 频数,在 1990—2000 年期间,是大气影响西太 TC 频数。最近的研究表明 El Niño 现象可以分为两种类型,中太平洋 El Niño(CP-EN)和东太平洋 El Niño(EP-EN)(Kao and Yu,2009;Kug et al.,2009)。这两种类型的 El Niño 对西太 TC 频数有不同的影响,在西北太平洋,CP-EN 发展年 TC 频数大大高于 EP-EN 发展年 TC 频数(Chen and Tam,2010;Kim et al.,2011;Ha et al.,2012)。Chen and Tam(2010)进一步研究发现,这两种类型的 El Niño 对西太 TC 频数不同影响只在夏季 6—8 月有明显差

别,而在秋季9—11月的差别不明显;在CP-EN发展年的夏季,因为西移的El Niño增暖导致低层Gill型环流响应,赤道以北的气旋型环流加强了季风槽,这种大尺度环境场有利于TC的产生。Ha et al. (2012)研究了两类EP-EN(一类El Niño转为La Niña年,另一类El Niño转为正常年)和CP-EN对西太TC强度和生成位置的影响。哈瑶和钟中(2012)则研究了东太平洋La Niña事件期间西太TC频数的差异,结果发现,La Niña I型(由前一年的El Niño事件转入的La Niña年)TC峰期其生成频数低于正常年,而La Niña II型(由前一年正常位相或发展中的La Niña事件转入的La Niña年)TC频数与正常年相近。

在TC移动路径上,Wang and Chan(2002)发现,在El Niño发展年的秋季TC以向北转向偏多,转向越过35°N的TC是La Niña发展年的2.5倍之多,而在La Niña发展年,TC以西移路径为主。Liu and Chan(2003)和Wu et al.(2004)指出在强El Niño事件(La Niña事件)的10—11月,登陆中国华南沿海的TC偏少(偏多)。Hong et al.(2011)研究认为在CP-EN的秋季TC西北转向路径比EP-EN秋季转向路径更偏西,更容易影响东亚沿岸。

1.2.2 印度洋海盆增暖对西太TC活动的影响

热带印度洋增暖往往发生在El Niño的衰减年(赤道中东太平洋海温异常首先对印度洋进行充电,形成热带印度洋海表温度(sea surface temperature, SST)对太平洋ENSO的响应模态),在春季达到峰值,而且有很好的持续性,该暖模态使得夏季南亚高压偏强(Yang et al., 2007; Huang et al., 2011),西北太平洋副高偏强南压(袁媛和李崇银, 2009; 曾刚等, 2010)。Zhang et al.(1996)提出了El Niño事件与西北太平洋反气旋的联系。Wang et al.(2000)进一步指出了局地海气相互作用使得这个反气旋可以持续到夏季,对东亚夏季气候产生影响。而Xie et al.(2009)对Wang et al.(2000)指出的持续性提出了另一种解释,认为印度洋夏季海温增暖在西北太平洋反气旋维持中起了重要作用。Xie et al.(2009)认为热带印度洋海温异常增暖能激发开尔文波东传,在西太平洋由于边界层摩擦,从而导致热带西太平洋低层东风异常,在赤道外热带西太平洋引起边界层辐散,对流抑制,潜热释放减少,激发西北太平洋低层异常反气旋,所以印度洋异常偏暖年的7—9月西北太平洋低层异常反气旋的维持与印度洋的异常偏暖有密切关系,此时在赤道中东太

平洋El Niño事件已经衰弱减退,暖舌消失,西北太平洋反气旋抑制西太TC的生成。Tao et al.(2012)利用美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)60 a的最佳TC路径资料发现总TC数,尤其是弱TC的生成主要受印度洋海盆增暖的影响,而西太强TC的生成主要受ENSO的影响,与Zhan et al.(2011)利用中国气象局近30 a的TC资料的研究结果一致。Zhan et al.(2011)认为弱TC的生成频数与东印度洋增暖有很好的反相关关系,但Zhan et al.(2011)并没有指出热带印度洋海盆增暖与东印度洋增暖的关系。Du et al.(2011)也讨论了3次强ENSO事件的发展年与衰减年西北太平洋TC活动的特征,得到类似的结果。

1.2.3 QBO对TC活动的影响

平流层准两年振荡(quasi-biennial oscillation, QBO)是发生在赤道附近西风异常和东风异常交替出现的一种现象,周期约为28个月。Gray(1984a, 1984b)首先指出QBO对大西洋飓风有明显的影 响,当QBO处于西风位相时,飓风生成的频率是东风位相时候的3倍,他提出的解释是平流层西风位相使得热带对流层上层的垂直风切变减弱,从而有利于TC的生成。Camargo and Sobel(2010)则对此提出了质疑,认为QBO信号只局限于平流层底层,向下延伸到对流层上层的QBO信号已经非常弱了。而且,1983年以后,大西洋TC生成频数和QBO就没有相关关系了,这或许和ENSO、火山爆发、QBO的年代际振荡、太阳辐射强迫等因子有关,至今还没有一个满意的解释。Chan(1995)利用交叉功率谱分析认为QBO对西北太平洋TC频数也有调制作用,而在ENSO年,两者相关关系不显著。Ho et al.(2009)研究认为QBO对西北太平洋TC的路径有调制作用,而与西太TC的频数没有关系。在QBO西风位相年,到达中国东海的TC频数偏多,而在QBO东风位相年,到达日本东岸的频数偏多。

1.2.4 其他因子

除了ENSO、印度洋海盆增暖、QBO这3个因子对西太TC活动有调制外,陈光华和黄荣辉(2006)、黄荣辉和陈光华(2007)研究认为西太暖池热状态对TC移动路径及频数的年际变化有重要的调制作用。当西太平洋暖池处于暖状态,7—10月台风频数偏少,TC移动路径偏西,影响我国的台风个数偏多;相反,当西太平洋暖池处于冷状态,7—10月台风频数偏多,TC移动路径偏东,影响日本的台

风个数偏多,而影响我国的台风个数偏少。而暖池次表层海温与赤道中东太平洋海温存在明显的负相关关系,所以西太暖池次表层海温对 TC 的调制作用实际上也是 ENSO 对 TC 活动调制的一种反应。Xie et al. (2005) 研究发现青藏高原冬春季的积雪多时,当年夏秋季节影响我国的台风就少;相反,青藏高原冬春季的积雪偏少,当年夏秋季节影响我国的台风偏多。Xie et al. (2005) 认为由于雪融化要消耗热量,同时雪能反射太阳辐射,冬春季青藏高原积雪少的年份,当年夏天青藏高原对大气加热就强,结果上升的空气就多,在西太平洋下沉的空气就多,西太平洋副高就强,有利于台风西移,登陆我国的台风就会偏多。而冬春季青藏高原积雪多的年份,则正好相反。Ho et al. (2005)、王会军和范可(2006) 则研究了西太台风生成频次和南极涛动(Antarctic oscillation, AAO)的关系,发现 6—9 月 AAO 和西太台风生成频次具有显著的反相关关系。

1.3 西太 TC 活动的年代际变化

西太 TC 活动也存在一定的年代际变化, Yumoto and Matsuura (2001) 在年代际尺度上将西太 TC 的生成频数分为高频期和低频期。1951—1960、1973—1985 年平均 TC 生成频数分别为 24.6 和 25.3 个,为低频期,1961—1972、1986—1994 年平均 TC 生成频数分别为 30.2 和 29.8 个,为高频期。卢秋珍等(2007)、黄勇等(2008) 也发现了类似的西太 TC 生成频数的年代际变化特征。Matsuura et al. (2003) 指出季风槽处的西风异常与赤道中太平洋 SST 有正反馈作用使得西太 TC 有年代际变化。此外,申松林和江静(2010) 分析认为西太台风频数发生年代际变化则与副高、季风槽、越赤道气流及赤道中东太平洋的混合层海温密切相关。

西太 TC 不仅频数有年代际变化,其路径和强度也有年代际变化。王咏梅等(2007) 研究发现近 50 a 超强台风的频数减少显著;台风生成的源地有明显的年代际变化,1960—1970 年代生成台风位置偏东、偏南,1980 年代以后转为偏北、偏西。Liu and Chan(2008) 认为西太 TC 路径的年代际变化与太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)有一定的关系。李揖等(2011) 认为东亚盛夏北上转向台风个数与 PDO 关系密切,两者呈反位相关关系。Chen(2009) 认为 TC 路径的十年际变化与 TC 生成位置和副高的南北位移而导致的引导气流变化有关,而 TC 强度的年代际变化则与西太的 SST 有很好的相关。

在全球变暖背景下,强 TC 的数量也随全球变暖显著增加(Emanuel, 2005; Webster et al., 2005)。然而,Chan(2006) 指出这种强 TC 发生频率上升趋势实际上是 TC 发生频率年代际振荡的一部分。也有诸多学者从模拟未来气候的结果发现除大西洋外,TC 发生的频数存在减少趋势(Bengtsson et al., 1996; Sugi et al., 2002; Sugi and Yoshimura, 2004; Oouchi et al., 2006),但强 TC 的数目预计将略有增加(Knutson and Tuleya, 2004; Oouchi et al., 2006)。

上述研究表明全球增暖、年代际尺度的气候系统变化对西太 TC 活动具有一定的影响,而这种影响会进一步调制 TC 的年际变化。

2 讨论

综上所述,许多研究发现西北太平洋 TC 的活动的年际变化与 ENSO 有密切关系。Tao et al. (2012) 研究发现,强 TC 频数与 ENSO 的年际相关却有着年代际的改变。由图 3 可以看出,在 1949—1968 年(第一阶段)和 1989—2008 年(第三阶段)

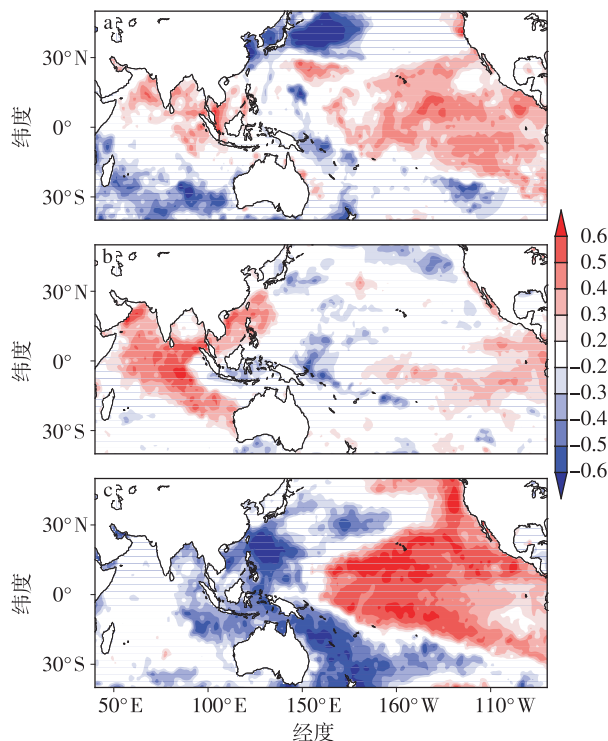


图 3 1949—1968 年(a)、1969—1988 年(b)、1989—2008 年(c)7—11 月西北太平洋强 TC 年频数与同期 SST 的相关系数分布

Fig. 3 Correlation between SST and category 4 + 5 TCs frequency during July—November in the periods of (a) 1949—1968, (b) 1969—1988, and (c) 1989—2008

7—11月强TC频数与同期热带中东太平洋SST有很好的正相关,即与ENSO有密切的联系,而且第三阶段的强TC年频数与同期局地SST有较好的负相关,而在1969—1988年(第二阶段)期间,7—11月强TC频数与同期热带中东太平洋的SST没有显著相关,只与部分印度洋SST有稍好的正相关。这种强TC频数和ENSO年际相关的不稳定性,制约着TC的季节预测,因此很有必要分析研究强TC频数与ENSO年际相关的不稳定性及其机理。

同时,第二阶段也正是强TC的低频期,年频数只有4.85个,而第一、三阶段强TC年频数分别为7.60和7.75,进一步由第一阶段、第二阶段、第三阶段西北太平洋强TC生成频数的季节演变(图4)可见,第一、三阶段在9月强TC生成频数达到峰值,分别为29和31个,其季节演变为单峰型,而第二阶段强TC生成频数在7、10月达到峰值(均为21个),其季节演变为双峰型,第二阶段强TC生成频数在8、9月总共为28个,只是第一、三阶段(均为55个)的一半,是什么原因抑制了第二阶段8、9月TC的加强?不仅强TC生成频数的季节演变在第二阶段发生转移,强TC生成位置和路径在第二阶段与第一、三阶段的路径也有差异(图5)。第二阶段,强TC主要生成在 160°E 以东, 20°N 以南,路径以西移为主。第一阶段,强TC主要生成范围偏大,向北扩展,路径以向北转向偏多。第三阶段,强TC主要生成范围向北向东扩展,路径亦以向北转向为主。由3个阶段的强TC路径密度异常场(图6)可以看出,第二阶段强TC在西太活动明显偏少,在南海活动偏多,而在第三阶段则反之,我国台湾以北以

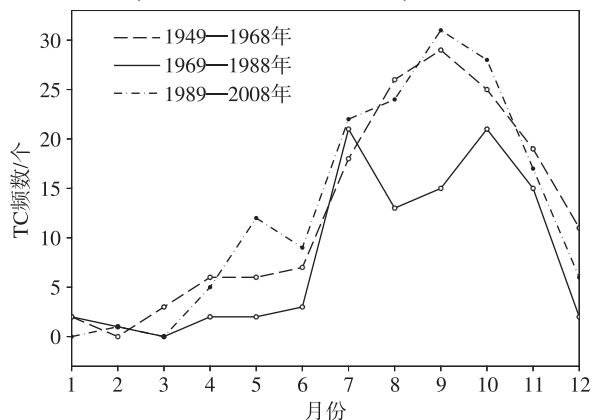


图4 1949—1968年、1969—1988年、1989—2008年期间西北太平洋强TC生成频数的季节变化

Fig. 4 Climatological monthly variation of the number of category 4 + 5 TCs during the periods of 1949—1968, 1969—1988, and 1989—2008

东、日本受强TC活动的影响明显偏多。是什么原因导致了强TC路径的这种年代际变化,这需要进一步细致深入的分析其大尺度引导气流的变化及其原因。

3 结论

近20a来,西太TC活动在季节、年际和年代际时间尺度上的研究已经取得若干研究成果。许多学者研究发现西北太平洋(西太)热带气旋(TC)的年际活动与ENSO有密切关系,El Niño发展年TC生成位置偏东偏南,强度偏强;La Niña发展年,TC生成位置偏西偏北,强度偏弱。然而最近研究(Tao et al., 2012)发现,1949—1968年(第一阶段)和1989—2008年(第三阶段)强TC频数与ENSO关系密切,而在1969—1988年(第二阶段)两者相关并不显著。而且在第二阶段,强TC频数偏少,平均每年只有4.85个,其活动在西太偏少,南海偏多,而第一、三阶段强TC频数偏多,年平均分别为7.60和7.75个,在西太活动偏多,南海偏少。第二阶段强TC频数的季节演变与第一、三阶段单峰型也显著不同,呈双峰型。因此很有必要研究ENSO与西太强TC频数的年际相关的年代际变化的可能机理,以及与之相关的西太强TC频数、生成区域、路径和季节演变的年代际变化规律及其机制。

参考文献:

- 陈光华,黄荣辉. 2006. 西北太平洋暖池热状态对热带气旋活动的影响[J]. 热带气象学报, 22(6): 527-532.
- 陈光华,黄荣辉. 2009. 西北太平洋低频振荡对热带气旋生成的动力作用及其物理机制[J]. 大气科学, 33(2): 207-214.
- 哈瑶,钟中. 2012. 两类La Niña事件期间西北太平洋热带气旋频数的差异[J]. 中国科学:地球科学, 42(9): 1346-1357.
- 黄荣辉,陈光华. 2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年代际变化及其机理研究[J]. 气象学报, 65(5): 683-694.
- 黄勇,李崇银,王颖. 2008. 西北太平洋生成热带气旋的年代际变化[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 9(5): 557-564.
- 李辑,李菲,林蓉,等. 2011. 东亚盛夏北上转向台风年代际变化及与PDO的关系[J]. 热带气象学报, 27(5): 731-737.
- 卢秋珍,胡邦辉,王学忠,等. 2007. 西北太平洋台风活动的年代际变化与大尺度环流因子的关系[J]. 热带气象学报, 23(6): 629-635.
- 申松林,江静. 2010. 西北太平洋台风频数异常年的气候背景分析[J]. 气象, 36(5): 64-70.
- 陶丽,李双君,韩艳,等. 2012. 热带大气季节内振荡对西北太平洋地区热带气旋路径的影响[J]. 热带气象学报, 28(5): 698-706.
- 田华,李崇银,杨辉. 2010. 大气季节内振荡对西北太平洋台风路径的影响研究[J]. 大气科学, 34(3): 559-579.

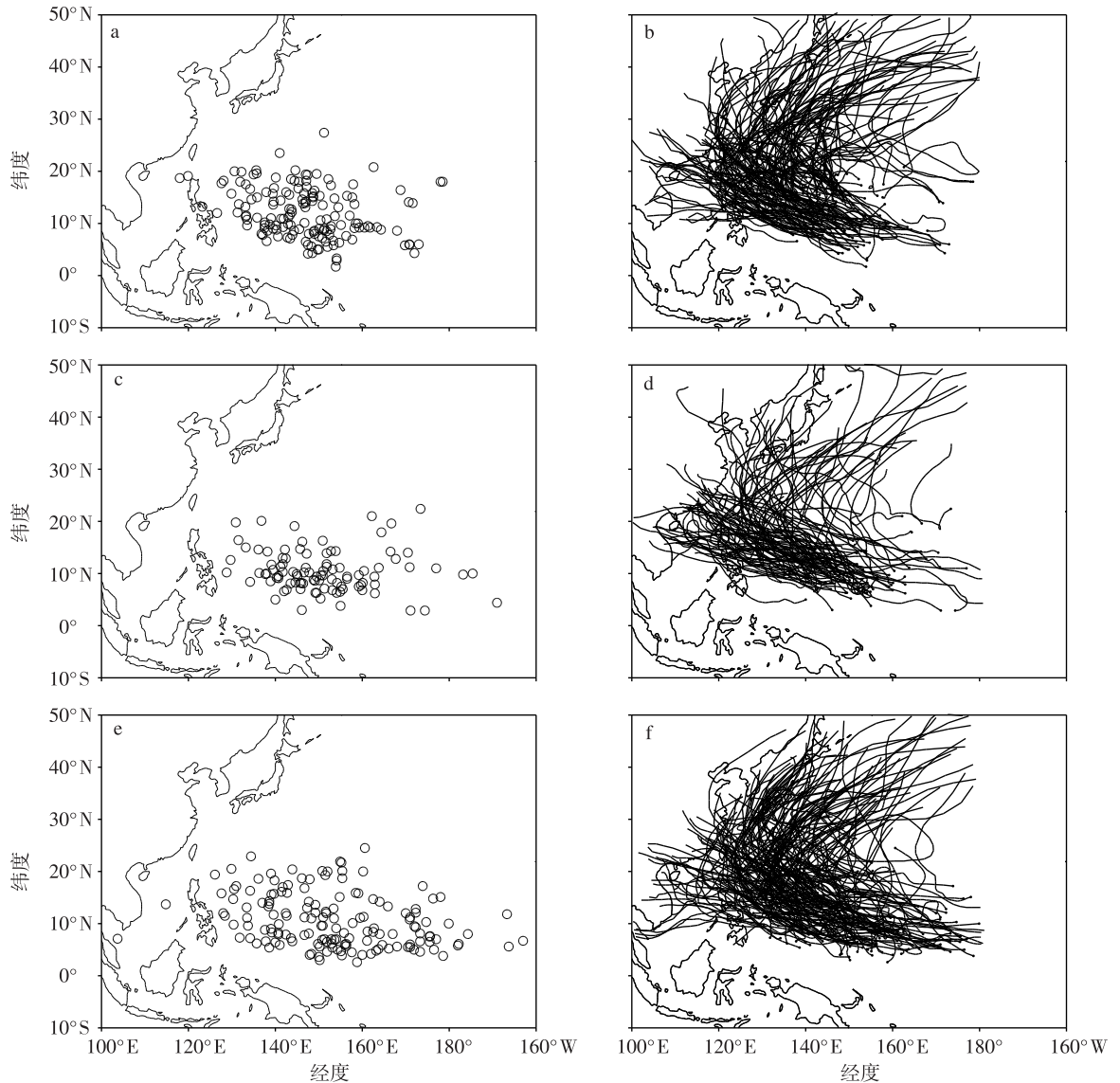


图5 1949—1968年(a,b)、1969—1988年(c,d)、1989—2008年(e,f)西北太平洋强TC的生成位置(a,c,e)和路径(b,d,f)

Fig. 5 (a, c, e) The formation location and (b, d, f) tracks for category 4 + 5 TCs in the periods of (a, b) 1949—1968, (c, d) 1969—1988, and (e, f) 1989—2008

王会军, 范可. 2006. 西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.

王咏梅, 李维京, 任福民, 等. 2007. 影响中国台风的气候特征及其与环境场关系的研究[J]. 热带气象学报, 23(6): 538-544.

袁媛, 李崇银. 2009. 热带印度洋海温异常不同模式对南海夏季风暴发的可能影响[J]. 大气科学, 33(2): 325-336.

曾刚, 孙照渤, 林朝晖, 等. 2010. 不同海域海表温度异常对西北太平洋副热带高压年代际变化影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 34(2): 307-322.

Bengtsson L, Botzet M, Esch M. 1996. Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes[J]. Tellus Ser A, Dyn Meteor Oceanogr, 48(1): 57-73.

Camargo S J, Sobel A H. 2005. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO[J]. J Climate, 18(15): 2996-3006.

Camargo S J, Sobel A H. 2010. Revisiting the influence of the quasi-biennial oscillation on tropical cyclone activity [J]. J Climate, 23(21): 5810-5825.

Chan J C L. 1985. Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to the El Niño—Southern oscillation phenomenon [J]. Mon Wea Rev, 113(4): 599-606.

Chan J C L. 1995. Tropical cyclone activity in the western North Pacific in relation to the stratospheric quasi-biennial oscillation [J]. Mon Wea Rev, 123(8): 2567-2571.

Chan J C L. 2006. Comment on “changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment” [J]. Science, 311(5768): 1713.

Chen G H. 2009. Interdecadal variation of tropical cyclone activity in association with summer monsoon, sea surface temperature over the western North Pacific [J]. Chin Sci Bull, 54(8): 1417-1421.

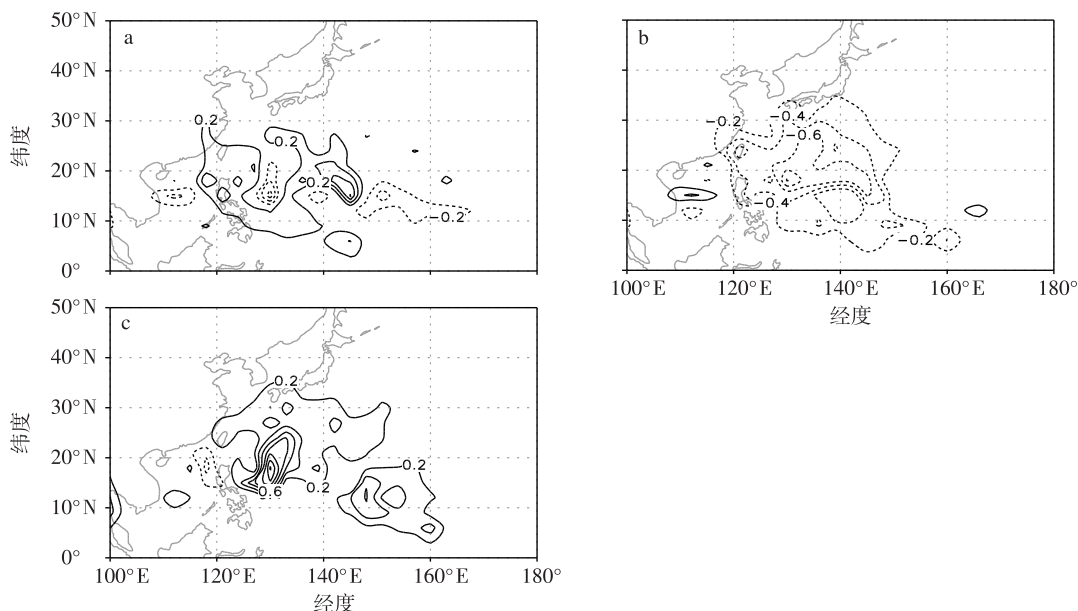


图6 1949—1968年(a)、1969—1988年(b)和1989—2008年(c)西北太平洋强TC路径密度与1949—2008年强TC路径密度气候场的差值分布

Fig. 6 The anomalous tracks density of category 4 + 5 TCs in the periods of (a) 1949—1968, (b) 1969—1988, and (c) 1989—2008

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. doi: 10.1029/2009GL041708.

Chen T C, Weng S, Yamazaki N, et al. 1998. Interannual variation in the tropical cyclone formation over the western North Pacific [J]. *Mon Wea Rev*, 126(4): 1080-1090.

Chia H H, Ropelewski C F. 2002. The interannual variability in the genesis location of tropical cyclones in the Northwest Pacific [J]. *J Climate*, 15(20): 2934-2944.

Dickinson M, Molinari J. 2002. Mixed Rossby-gravity waves and western Pacific tropical cyclogenesis. Part I: Synoptic evolution [J]. *J Atmos Sci*, 59(14): 2183-2196.

Du Y, Yang Y, Xie S P. 2011. Tropical Indian Ocean influence on Northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Niño [J]. *J Climate*, 24(1): 315-322.

Emanuel K A. 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years [J]. *Nature*, 436(7051): 686-688.

Fu B, Li T, Peng M S, et al. 2007. An observational analysis of tropical cyclogenesis in the western North Pacific [J]. *Wea Forecasting*, 22(4): 763-780.

Gray W M. 1979. Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation // Shaw D B. *Meteorology over the tropical oceans* [M]. London: Royal Meteorological Society; 155-218.

Gray W M. 1984a. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences [J]. *Mon Wea Rev*, 112(9): 1649-1668.

Gray W M. 1984b. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability [J]. *Mon Wea Rev*, 112(9): 1669-1683.

Ha K J, Yoon S J, Yun K S, et al. 2012. Dependency of typhoon intensi-

ty and genesis locations on El Niño phase and SST shift over the western North Pacific [J]. *Theor Appl Climatol*, 109(3/4): 383-395.

Ho C H, Kim J H, Kim H S, et al. 2005. Possible influence of the Antarctic oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. *J Geophys Res*, 110(D19), 104. doi: 10.1029/2005JD005766.

Ho C H, Kim H S, Jeong J H, et al. 2009. Influence of stratospheric quasi-biennial oscillation on tropical cyclone tracks in the western North Pacific [J]. *Geophys Res Lett*, 36(6), L06702. doi: 10.1029/2009GL037163.

Hong C C, Li Y H, Li T, et al. 2011. Impacts of central Pacific and eastern Pacific El Niños on tropical cyclone tracks over the western North Pacific [J]. *Geophys Res Lett*, 38(16), L16712. doi: 10.1029/2011GL048821.

Huang G, Qu X, Hu K M. 2011. The impact of the tropical Indian Ocean on South Asian high in boreal summer [J]. *Adv Atmos Sci*, 28(2): 421-432.

Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO [J]. *J Climate*, 22(3): 615-632.

Kim H M, Webster P J, Curry J A. 2011. Modulation of North Pacific tropical cyclone activity by three phases of ENSO [J]. *J Climate*, 24(6): 1839-1849.

Knutson T R, Tuleya R E. 2004. Impacts of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization [J]. *J Climate*, 17(18): 3477-3495.

Ko K C, Hsu H H. 2006. Sub-monthly circulation features associated with tropical cyclone tracks over the East Asian monsoon area during July—August season [J]. *J Meteor Soc Japan*, 84(5):

- 871-889.
- Ko K C, Hsu H H. 2009. ISO modulation on the sub-monthly wave pattern and recurring tropical cyclones in the tropical western North Pacific [J]. *J Climate*, 22(3):582-599.
- Kug J S, Jin F F, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño [J]. *J Climate*, 22(6):1499-1515.
- 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.
- Liebmann B, Hendon H H, Glick J D. 1994. The relationship between tropical cyclones of the western Pacific and Indian Oceans and the Madden Julian oscillation [J]. *J Meteor Soc Japan*, 72(3):401-412.
- Liu K S, Chan J C L. 2003. Climatological characteristics and seasonal forecasting of tropical cyclones making landfall along the South China coast [J]. *Mon Wea Rev*, 131(8):1650-1662.
- Liu K S, Chan J C L. 2008. Interdecadal variability of western North Pacific tropical cyclone tracks [J]. *J Climate*, 21(17):4464-4476.
- Maloney E D, Dickinson M J. 2003. The intraseasonal oscillation and the energetics of summer time tropical western North Pacific synoptic-scale disturbances [J]. *J Atmos Sci*, 60(17):2153-2168.
- Mao J Y, Wu G X. 2009. Intraseasonal modulation of tropical cyclone genesis in the western North Pacific: A case study [J]. *Theor Appl Climatol*, 100(3/4):397-411.
- Matsuura T, Yumoto M, Iizuka S. 2003. A mechanism of interdecadal variability of tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Climate Dyn*, 21(2):105-117.
- Oouchi K, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. 2006. Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model; Frequency and wind intensity analyses [J]. *J Meteor Soc Japan*, 84(2):259-276.
- Sobel A H, Maloney E D. 2000. Effect of ENSO and ISO on tropical depressions [J]. *Geophys Res Lett*, 27(12):1739-1742.
- Sugi M, Yoshimura J. 2004. A mechanism of tropical precipitation change due to CO₂ increase [J]. *J Climate*, 17(1):238-243.
- Sugi M, Noda A, Sato N. 2002. Influence of global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model [J]. *J Meteor Soc Japan*, 80(2):249-272.
- Tao L, Wu L G, Wang Y Q, et al. 2012. Influence of tropical Indian Ocean warming and ENSO on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *J Meteor Soc Japan*, 90(1):127-144.
- Teng H Y, Wang B. 2003. Interannual variations of the boreal summer intraseasonal oscillation in the Asian—Pacific Region [J]. *J Climate*, 16(22):3572-3584.
- 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.
- Wang B, Wu R, Fu X. 2000. Pacific—East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asia climate [J]. *J Climate*, 13(9):1517-1536.
- Webster P J, Holand G J, Cury J A, et al. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 309(5742):1844-1846.
- Wu M C, Chang W L, Leung W M. 2004. Impacts of El Niño—Southern oscillation events on tropical cyclone landfalling activity in the western North Pacific [J]. *J Climate*, 17(6):1419-1428.
- Xie L, Yan T, Pietrafesa L J, et al. 2005. Relationship between western North Pacific typhoon activity and Tibetan Plateau winter and spring snow cover [J]. *Geophys Res Lett*, 32(16):1-4.
- Xie S P, Hu K, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J Climate*, 22(3):730-747.
- Yang J L, Liu Q, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys Res Lett*, 34(2), L02708. doi:10.1029/2006GL028571.
- Yeh S W, Kang S K, Kirtman B P, et al. 2010. Decadal change in relationship between western North Pacific tropical cyclone frequency and the tropical Pacific SST [J]. *Meteor Atmos Phys*, 106(3/4):179-189.
- 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.
- Zhan R F, Wang Y Q, Lei X T. 2011. Contributions of ENSO and east Indian Ocean SSTA to the interannual variability of tropical cyclone frequency [J]. *J Climate*, 24(2):509-521.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87' and '91/92' events [J]. *J Meteor Soc Japan*, 74(1):49-62.
- Zhao H, Wu L, Zhou W. 2010. Assessing the influence of the ENSO on tropical cyclone prevailing tracks in the western North Pacific [J]. *Adv Atmos Sci*, 27(6):1361-1371.
- Zhao H, Wu L, Zhou W. 2011. Interannual changes of tropical cyclone intensity in the western North Pacific [J]. *J Meteor Soc Japan*, 89(3):245-255.