

西太平洋暖池 1990s 中期的年代际扩张 对夏季登陆中国台风的影响*

杨宇星^{1, 2, 3} 郑建^{1, 2, 3}

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 青岛 266237)

摘要 应用美国联合预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的台风最佳路径资料、美国国家海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的扩展海表面温度资料以及美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气科学研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)的大气环流场资料,研究了 20 世纪 90 年代西太平洋暖池(简称暖池)年代际扩张对西北太平洋台风和登陆中国沿岸台风的影响。研究发现,相比于暖池扩张前期(1965—1992),后期(1993—2013)台风生成在西北太平洋中部区域(10° — 20° N, 135° — 145° E)显著减弱,在 10° — 20° N, 145° — 160° E 区域和南海北部区域则表现出增多的特点。台风移动路径变异特征呈现为移动进入南海和登陆中国东部沿岸的西行和西北行路径减少,登陆日本的转向型路径增多,同时登陆我国海南岛和东南部沿岸的台风增多。进一步探查这种影响的可能原因发现,与暖池扩张密切相关的太平洋年代际变化引起的纬向环流的变异是西北太平洋中部台风生成减少的主要原因;而南海北部台风生成增多则归因于南海区域局地环流特征的变异。同时,南海北部台风生成增多是登陆我国海南岛和东南沿岸台风增多的主要决定因素。

关键词 西太平洋暖池; 年代际变化; 台风生成; 移动路径

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20170600152

台风(本文所指的台风为广义的台风,包括热带风暴、台风、强台风和超强台风)作为影响人类生活最具破坏力的自然灾害之一,不仅造成了巨大的经济损失,更对人类生命构成威胁。2004 年仅台风“云娜”就使 1800 多万人受灾,74 万公顷农作物受损,直接经济损失达 181.28 亿元之巨。在中国,几乎有一半的自然灾害损失来自台风,每年有 7—8 个台风在我国东南沿海和华南地区登陆,最多可达 12 个,每年给我国东南沿海和华南地区造成上百亿的经济损失和数百人的人员伤亡(黄荣辉等, 2007, 2010),而随着东部沿海城市发达程度越来越高,台风造成的经济损失呈显著上升趋势,因此,台风研究一直是政府和

学者们关注的热点之一。

以往对于台风的研究多集中于天气学方面的探讨,直到 20 世纪 80 年代台风的气候效应才越来越多的受到学者们的重视(Kim *et al*, 2011; 冯涛等, 2014; 郑运霞等, 2014; Yang *et al*, 2014, 2016; 黄荣辉等, 2016)。西太平洋暖池(简称暖池)作为西北太平洋台风的主要生成源地对于台风气候效应的影响举足轻重。首先,暖池热状态的变化会引发暖池区有利于台风生成的热力和动力条件的改变,从而造成台风生成个数和生成位置的变异(秦曾灏等, 2001; 吴迪生等, 2003, 2010; Tu *et al*, 2009); 第二方面,暖池变异影响西太平洋副热带高压(简称西太副高)位置和强度的变

* 国家自然科学基金项目, 41676007 号, 41421005 号, 41606018 号; 国家重点研究计划专项项目, 2017YFA0604102 号; 中国科学院战略性先导科技专项项目, XDA11010102 号; 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目, U1406402 号; 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室开放项目, LTO1510 号。杨宇星, 副研究员, E-mail: yangyx@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-06-01, 收修改稿日期: 2017-07-28

动,进而引起台风移动路径偏移,改变台风活动分布,这对进入我国近海和登陆我国沿海城市的台风尤为重要(Ho *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006; 吴迪生等, 2010); 第三方面, 暖池对 ENSO 事件影响深远, 而 ENSO 则是对整个西北太平洋台风的生成、移动具有重要作用的气候事件(Chan, 1985, 2000; 李崇银, 1987; Wang *et al.*, 2002; Du *et al.*, 2011)。然而目前关于暖池对台风气候影响的探讨主要集中在暖池区表层、次表层海温对台风年际变化的影响上(秦增灏等, 2001; 吴迪生等, 2003; 陈光华等, 2006; Tu *et al.*, 2009; 吴迪生等, 2010), 但是暖池不仅存在年际、年代际变化(杨宇星等, 2007; 邱东晓等, 2007; Delcroix *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Gan *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012), 更存在年代际跃变(赵永平等, 2002)。对于暖池年代际跃变对台风气候的影响较少有人涉足。Yang 等(2012)研究指出, 暖池在 20 世纪 90 年代存在显著的年代际跃变, 相比于 20 世纪 90 年代前, 暖池面积、体积等诸方面存在显著的扩张现象。那么, 20 世纪 90 年代暖池在面积、体积等诸方面的显著跃变对于西北太平洋台风、中国近海台风和登陆台风存在怎样的影响? 目前, 尚未有文献论及。事实上, 这个问题是非常值得研究的, 不但有利于我们认识年代际时间尺度上暖池对台风生成和移动影响的物理过程和机制, 也可为防灾减灾提供部分可能的参考依据。因此, 本文关注暖池跃变对于西北太平洋台风活动和登陆我国沿海城市的台风个数和登陆位置存在怎样的影响, 以及这种影响的可能原因。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

本文所用的台风资料来自于美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)最佳路径资料。由于台风本身特性使得对它的观测一直存在较大难度, 所以对于现有台风资料的准确性备受质疑, 但是自卫星技术应用于台风观测后, 台风数据质量大大提高, 所以本文选用 20 世纪 60 年代以后有卫星矫正的数据作为本次研究的应用数据, 时间长度为 1965—2013, 共计 49 年。

环流场资料为美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气科学研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)提供的再分析资料。海表面温度资料则选用了美国国家海洋大气局(National Oceanic

and Atmospheric Administration, NOAA)增强重建的逐月平均海温资料(ERSST)。资料长度与台风资料相同, 大气环流场资料的分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 海表面温度资料的分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。另外, 本文同时选择了英国气象局哈德来资料中心的月平均海表面温度资料(HadISST)和美国马里兰大学的海洋同化资料(SODA)中的海表面温度数据用于检验暖池 20 世纪 90 年代变异特征的显著性。

1.2 研究变量定义

本文研究的台风为广义的台风, 包括了所有达到热带风暴(中心最大风速 $>17.2\text{m/s}$)强度的热带气旋。为了研究方便, 本文将台风的生成和移动做了格点化处理, 根据台风生成位置和移动路径将其插值到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点上, 以此来表征台风的生成和移动。对于台风的研究, 台风生成和移动是对其所经过区域天气和气候影响最重要的两个方面。生成个数的多少决定了受其影响区域可能受灾的频率; 而台风的移动路径最决定了其可能影响的区域。因此, 文章定义了台风生成个数和台风路径密度两个研究变量来研究西太台风对中国近海和沿岸的影响。其中, 台风生成个数是指, $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点内台风生成的数目, 而台风移动路径密度是指每个格点内台风路径经过的数目, 同一个台风多次经过同一个格点, 只记为一次。台风移动路径密度大则表明此格点将受到更多台风影响。另外, 本文用于标记台风生成个数的台风生成位置是指每个台风初次达到热带风暴的强度的位置, 这样可以避免因为数据观测中起始位置确定时人为因素的干扰。

1.3 资料预处理

本文关注的问题的时间尺度是在年代际上, Yang 等(2012)的研究指出暖池在去除全球增暖的影响后仍旧表现出了显著的增暖扩张的趋势, 所以为更清楚的看到暖池年代际变异对西北太平洋台风的影响, 本文所用数据(包括台风数据、海表温度数据和大气环流场数据)都经过了去除趋势变化的预处理。

2 结果分析

2.1 暖池年代际扩张对西北太平洋台风生成和移动的影响

本文所关注的暖池系指位于太平洋中、西部海域, 水温高于 28.5°C 的高温水体(杨宇星等, 2007), Yang 等(2012)的研究中指出其在 20 世纪 90 年代存在显著的扩张现象。本文首先检验了暖池的这种年代际变异

特征, 采用 SODA 资料、ERSST 资料、HadISST 资料分别定义暖池, 同样在 20 世纪 90 年代表现出显著的扩张现象(图略)。由此可知, 不同资料下暖池在 20 世纪 90 年代均表现出了显著的年代际扩张现象, 这表明这种年代际跃变是可靠的, 研究其对西太台风、中国近海台风的影响具有现实意义。采用的资料不同暖池年代际变异的的时间点略有不同(例如, SODA 资料显示的跃变在 1994 年前后, 而 ERSST 资料则显示为 1992 年前后), 由于研究年代际变异, 由资料引起的跃变点的细微差异暂可忽略。

为了叙述方便文章将暖池年代际扩张前(1965—1992, ERSST 资料)简称为前期, 扩张后(1993—2013)简称为后期。相比于前期, 后期台风生成在南海北部区域显著增多, 在西太平洋中部区域(135° — 145° E)台风的生成则明显减少, 150° E 附近又表现出生成增强的特点(图 1a)。同样, 台风的移动路径也在暖池扩张前后存在显著差异: 西北太平洋台风的西行路径进入南海和西北行登陆中国东部沿岸的台风路径在暖池扩张后期表现出显著的减弱趋势, 而转向型到达日本的台风路径则明显增多(图 1b)。

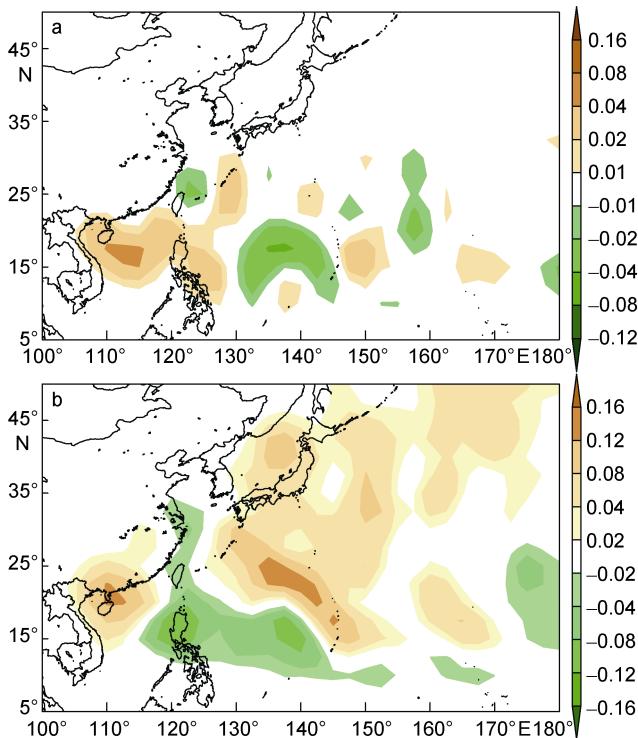


图 1 夏季(7、8、9月)台风生成位置(a)和移动路径(b)在暖池跃变前期(1965—1992)和后期(1993—2013)的差异(后期减去前期)

Fig.1 The difference of the genesis (a) and tracks (b) in summer (July-September) between the post-period and pre-period

为了更清楚的研究暖池年代际扩张前后中国沿岸登陆台风的变异特征, 我们根据台风移动路径的特点, 将中国出现台风登陆的沿岸地区划分为以下的 4 个区域: 海南岛(Re1), 东南部沿海(Re2), 台湾岛(Re3), 东部沿海(Re4)。海南岛区域常常受到南海“土台风”(生成于南海的台风)的影响, 因此被划分为第一个区域; 东南沿岸是我国受台风影响最显著的区域, 西行路径台风经常在此登陆, 所以被划分为第二个区域; 台湾岛受西行和北上型路径的共同影响, 为第三个区域; 东部沿岸主要受北上和转向型路径影响, 被划为第四个区域。下面通过格点填色的方法来进一步分析西太台风在两个时期登陆情况的变异特征。如图 2 所示, 暖池年代际变异前后台风的登陆位置存在显著差异, 相比于前期, 虽然从西北太平洋移动进入南海的台风显著减少, 但是登陆海南岛和东南沿岸的台风显著增多(Re1 和 Re2), 登陆台湾岛和东部沿岸的台风则显著减少。

2.2 暖池年代际变异对西北太平洋台风生成和移动影响的可能原因

进一步研究产生这种变化的可能原因, 本研究分别从对台风的生成和移动有重要的影响的海洋、气象要素进行了探讨。Gray(1979)研究中指出对于台风生成有重要影响的因子包括, 温暖的洋面、较小的垂直风切变、一定的涡度、高层较大的散度以及充足的水汽。Fu 等(2012)研究表明对于西北太平洋热带扰动发展成为台风的环境因素主要是 800hPa 最大相对涡度的所在、纬向风的经向切变、平均垂向散度和对流层中下层水汽含量(925—400hPa)。由此, 我们分析了包括海温、垂直风切变以及上述对台风生成有重要作用的影响因子。对于海表温度, 与前期相比, 后期西北太平洋海表温度均表现出增暖的特点, 其中, 北部地区增暖尤其显著, 这也正与暖池向北扩张的特征相吻合。与此正异常海温相匹配, 对流层中下层的水汽同时以正异常为主, 这与台风生成位置的异常变化并不十分吻合, 这可能表明海温和中低层湿度的变化不是台风生成位置变动的直接原因。图 3 显示了 800hPa 相对涡度在两个时期的分布和差异所在, 西北太平洋生成台风的主要区域(10° — 20° N), 正是 800hPa 相对涡度的大值中心位置。在两个时期的差值图上, 130° — 150° E 区域期间涡度中心值显著减小, 150° E 东部则出现小范围涡度值升高, 这成为在暖池扩张后 130° — 145° E 区域台风生成的不利因素之一, 而此区域的东侧则出现有利于台风生成环境特征。

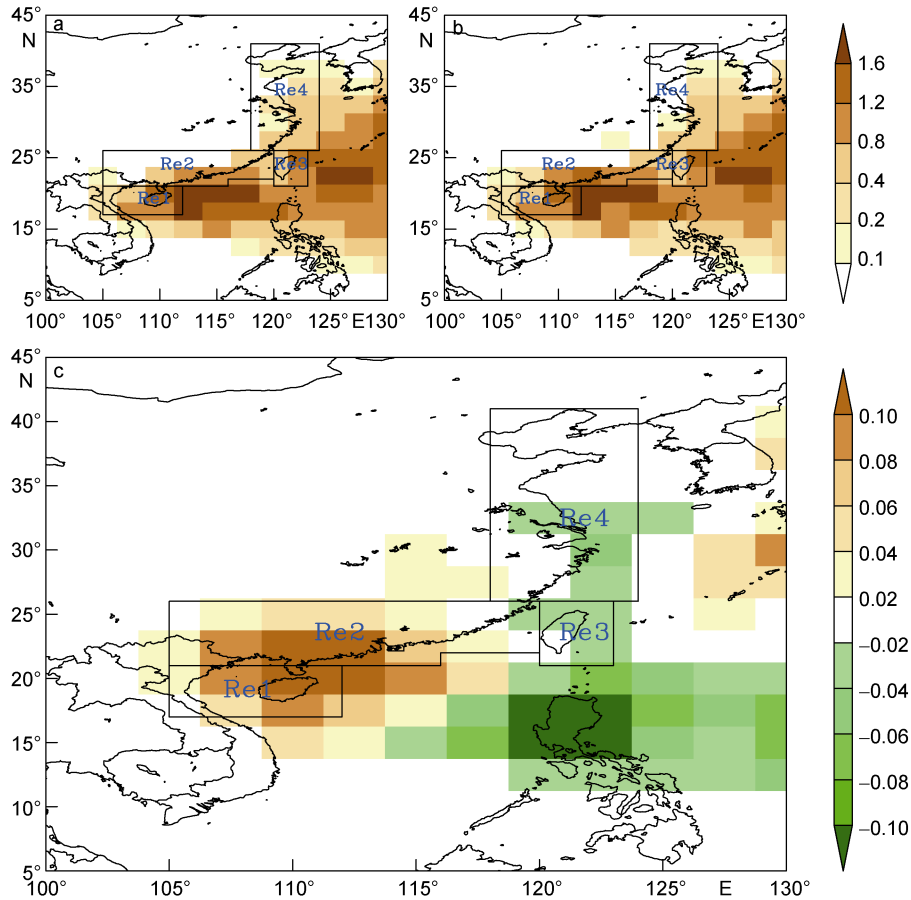


图2 夏季(七月、八月和九月)台风移动路径数量在暖池扩张前期(1965—1992)、后期(1993—2013)以及两个时期差值(c, 后期减去前期)

Fig.2 Composites of tracks going through the South China Sea or landing on the China coast in summer for the pre-period (a), the post-period (b), and the difference (c) between the post-period and pre-period

同时, 垂向平均散度和 850hPa 相对涡度在两个时期的变异特征也是 130° — 145° E 区域内台风生成减少、 150° E 附近台风生成增加的重要因素。如图 4 所示, 在 130° — 145° E 区域内, 暖池跃变后期 850hPa 风场为反气旋式切变, 相对涡度显著为负, 而垂直平均散度显著增加, 这都不利于台风在此区域的生成。而在此区域的东侧, 变异特征正好相反, 相对涡度差异为正, 垂直散度差异为负, 表现出有利于台风生成的环境因素, 因此, 150° E 以东区域台风生成在后期表现出增加的特点。同样, 在南海北部靠近海南岛的区域, 暖池扩张后期与前期的差异图上, 850hPa 相对涡度以正异常为主, 垂直散度则以负异常为主, 这正有利于此区域在暖池扩张后期有更多台风生成。

更进一步, 本文合成了两个时期垂直环流的异常变异特征。由于两个时期台风的变异特征主要集中在 10° — 20° N 之间, 所以本文对此区域作经向平均, 给出了太平洋在这两个时期的平均纬向环流的变异

场以及两个时期的差异场(如图 5 所示)。平均的纬向环流在两个时期表现出几近相反的变异特征。在我们所关注的区域内, 暖池后期, 150° E 以西直到 100° E 主要表现为异常下沉气流, 而在 150° — 160° E 则正是异常环流的上升支所在; 而在暖池扩张前期, 异常环流的上升支集中在 120° — 140° E 之间, 下沉支则正好位于 150° — 160° E。同时, 在 150° — 160° E 区域内, 暖池扩张前期中层环流相对湿度下降, 而暖池扩展后中层湿度则表现出增加的特点。这也是暖池扩张后期, 西北太平洋中部区域 130° — 140° E 台风生成减少, 而 150° — 160° E 台风生成增多的重要原因之一。

进一步探讨暖池跃变前后, 台风移动路径异常变化的可能原因, 本文给出了对台风移动路径有重要作用的引导气流的变化特征。500hPa 环流场可以作为引导气流, 研究台风移动路径的变化。由此, 本文给出 500hPa 环流场在两个时期的差异场, 来研究引导气流在两个时期的变异特征。正如 Yang 等(2012)

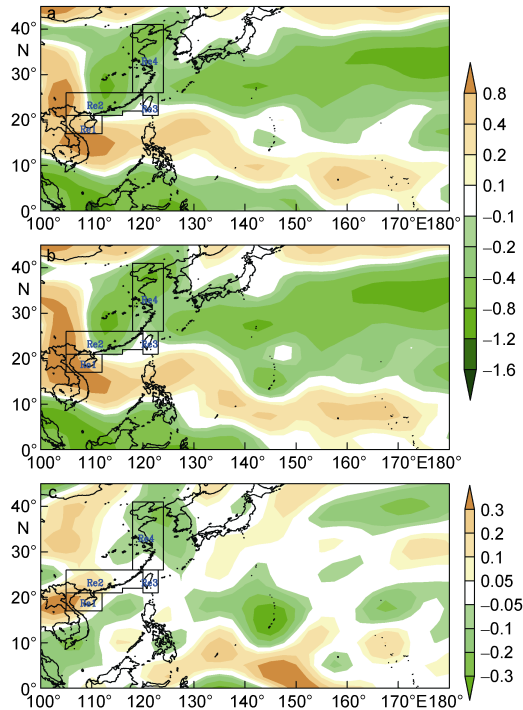


图3 夏季800hPa相对涡度(数值扩大了100000倍)在暖池跃变前期(a)、后期(b)和前后期差异场(后期减去前期,c)
Fig.3 Composites of relative vorticity at 800hPa (multiplied by the 100000) in the summer during the pre-period (a), during the post-period (b), and the difference (c) between the post-period and pre-period

所述, 西太暖池增暖扩张, 增温趋势在北部更为显著, 如图6所示, 相比于暖池扩张前期, 后期海温差异在整个太平洋的表现与太平洋年代际变化的海温分布较为一致。在整个西北太平洋上, 海温显著升高, 越往北升高幅度越大。位势高度场同样表现出增强的特征, 显著增强区域则主要集中在西北太平洋北部, 30°N以北最显著。因此, 副热带高压在前后两个时期变异并不显著。引导气流在热带区域(0°—10°N)表现为西向引导气流, 而在10°—20°N区域内西向引导气流却不显著, 但是在130°—160°E存在显著的反气旋式引导气流异常, 反气旋的东侧(150°E以东区域)为向西向南的引导气流, 其西侧则是向北指向日本的引导气流, 因为150°E附近区域台风生成呈现增多的特点, 引导气流亦有利于台风到达日本, 所以在暖池扩张后期, 日本的台风活动增强。另外, 由于台风主要的生成区域集中在10°—20°N之间, 所以10°N以南增强的西向引导气流并没有为南海带来更多的台风。

进一步考察登陆我国沿岸的台风可以发现, 虽然移动进入中国南海区域的台风在暖池扩张后期显著减少, 但是登陆我国海南和东南沿岸的台风却显著增多, 这其中的主要原因在于南海北部台风生成增加, 生成位置靠近东南沿岸, 多在东南沿岸登陆。

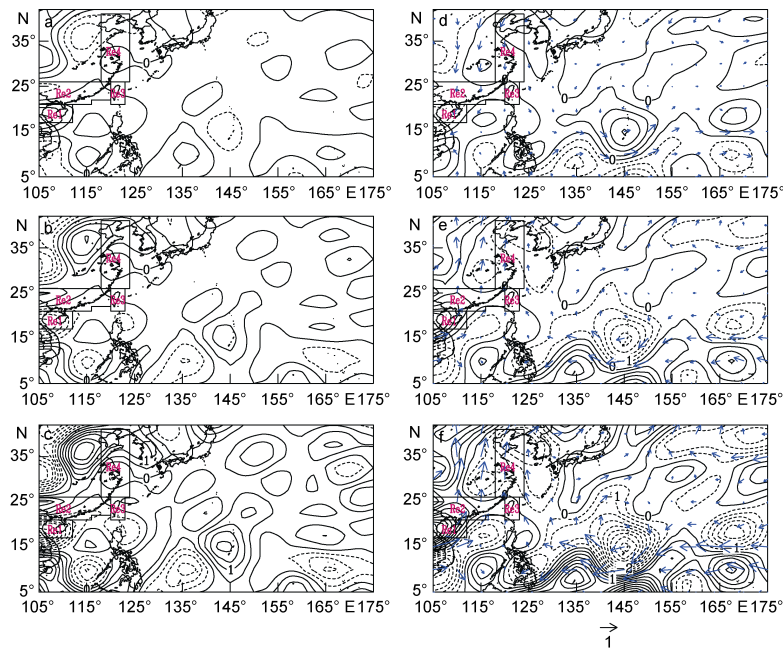


图4 夏季垂直平均散度(等值线, 数值扩大了10000000倍, 实线为正值, 虚线为负值, a, b, c)和850hPa相对涡度(等值线, 数值扩大了1000000倍, 实线为正值, 虚线为负值, d, e, f)和风场(蓝色箭头, m/s)在暖池跃变前期异常变异(a, d, 前期减去气候态)、后期异常变异(b, e, 后期减去气候态)和前后期差异场(后期减去前期, c, f)

Fig.4 Composites of the averaged divergence anomaly (multiplied by the 10000000, a, b, c), relative vorticity anomaly at 850hPa (multiplied by the 1000000, d, e, f) and wind anomaly at 850hPa (blue vector, m/s) in the summer for the pre-period (a, d), the post-period (b, e), and the difference (c, f) between the post-period and pre-period

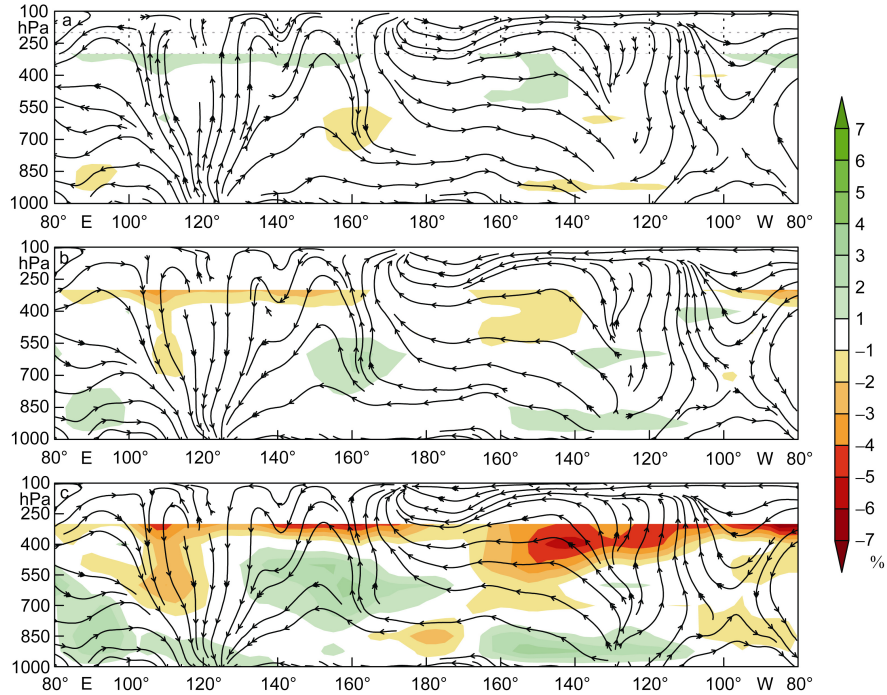


图 5 夏季 10°—20°N 经向平均的垂直纬向环流和相对湿度在前期(a)、后期(b)变异特征(减去气候平均)和前后期差异场(c), 后期减去前期

Fig.5 Composites of relative humidity anomaly (% , shading) and velocity anomaly (streamline, the vertical wind velocity is multiplied by the 100) averaged from 10°N to 20°N for the pre-period (a), the post-period (b) and the difference between the post-period and pre-period (c)

注: 其中, 流线为风场的纬向分量和垂直分量(垂直速度值扩大了 100 倍, 单位: m/s), 阴影为相对湿度(%)

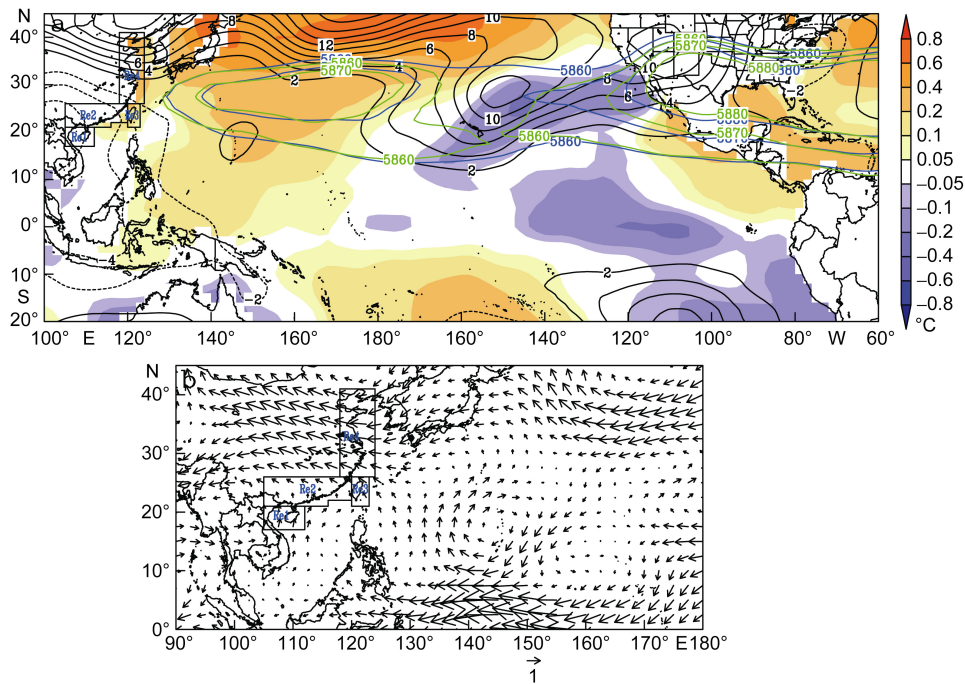


图 6 夏季海表面温度(°C, 阴影)、500hPa 位势高度场(gpm, 等值线)前后期差异场(a)和 500hPa 平均风场(矢量箭头, m/s) 前后期差异场(b)

Fig.6 The difference of the sea surface temperature (shading), geopotential height (gpm, contour) between pre-period and post-period (a) and that of the wind (vector, m/s) at 500hPa (b)

注: 其中, 图 a 中绿色粗等值线为前期 500hPa 平均位势高度, 蓝色粗等值线是后期 500hPa 平均位势高度

而东部沿岸尽管在暖池扩张后期存在更强的向岸的引导气流,但是增强的引导气流多和西太副高北部异常的高压有关,不能引导台风移动,而来自于南部的向北向西的引导气流则主要来自于 10° — 20° N, 130° — 140° E 区域。而根据上面的讨论可知,这个区域正是台风生成显著减少的区域,所以登陆中国东部和中国台湾(Re3 和 Re4)的台风表现出减弱的特点。

3 讨论

暖池在 20 世纪 90 年代存在扩张变暖的特征,这与太平洋年代际振荡密切相关,两个时期的海温差异在太平洋中西部的热带和副热带区域表现为负,负海温两侧区域差异为正。海温的这种变异,增强了太平洋海温的东西梯度,使得纬向环流增强,其异常上升支主要出现在 150° E 区域, 150° E 东西两侧各存在一个异常环流, 130° — 150° E 为显著的异常下沉支,使得此区域垂直辐散显著增强,低层涡度显著减小,尽管此区域海温升高,但是由于动力条件均不利于台风的生成,所以这个区域的台风生成显著减小。而在 150° E 东侧则是环流的异常上升支所在,垂直散度减弱,低层相对涡度增加,同时在这个区域相对湿度也增加,尽管不如 150° E 西侧的环流特征变化显著,但是也易于生成台风,使得这个区域的台风生成多于暖池扩张前。

而在南海北部台风生成活动增加的主要原因在于南海的局地环流因子,太平洋年代际的海温远程强迫则不显著。在南海的北部区域,低层相对涡度增加,垂直辐散减弱,有利于这个区域台风生成增多。

台风移动路径的变化则同时受到引导气流和台风生成位置的影响。暖池在 20 世纪 90 年代的增温扩张在北部更显著,同时,整个西北太平洋的增温都在北部区域表现的更显著,所以 500hPa 的环流场上西北太平洋北部在暖池扩张后期出现异常高压区,副热带区域位势高度场的变化并不十分明显。尽管引导气流在热带区域向西增强,但是此区域并不是台风的主要生成区,所以西行进入中国南海的台风并没有增多,反而减少。而转向到达日本的台风在暖池扩张后期显著增多则与西北太平洋中部引导气流的反气旋切变密切相关,这种引导气流更多的将 150° E 以东的台风引导登陆日本,而 150° E 东侧区域台风生成年代际增多更进一步增加了登陆日本的台风数目。

另外,尽管移动进入南海的台风显著减少,但是登陆海南岛和我国东南部沿海的台风却显著增多(Re1 和 Re2),这主要是因为南海北部区域台风生成

显著增多,使得在 Re1 和 Re2 区登陆的台风亦增多。而中国台湾和东部沿岸台风登陆减少则与 130° — 140° E, 10° — 20° N 台风生成减少密切相关。

4 结论

暖池在 20 世纪 90 年代存在显著的扩张现象,而这种扩张对西北太平洋台风和登陆我们沿岸台风存在显著的影响。由于暖池的年代际扩张与太平洋年代际振荡密切相关,两个时期海温差异的正负分布形态使得纬向环流在 150° — 160° E 区域出现异常上升支, 130° — 150° E 则出现环流的异常下沉支,进而引起了 10° — 20° N, 130° — 150° E 这个区域的动力场发生变异(低层相对涡度减小,垂直平均散度增加),这些变异特征显著地压抑了此区域的台风生成。而南海北部台风生成的增加则主要受制于南海的局地环流条件的变异。同时,南海台风生成的这种变异特征进一步导致了登陆我国海南岛和东南部沿岸台风增多。

至于暖池扩张和太平洋年代际变异的关系仍然是一个存在争议的问题,值得在以后的工作中更加深入的研究。

参 考 文 献

- 冯 涛, 沈新勇, 黄荣辉等, 2014. 热带西太平洋越赤道气流的年际变化对西北太平洋热带气旋生成的影响. 热带气象学报, 30(1): 11—22
- 李崇银, 1987. 厄尔尼诺影响西太平洋台风活动的研究. 气象学报, 45(2): 229—236
- 杨宇星, 黄 菲, 王东晓, 2007. 印度洋-太平洋暖池的变异研究. 海洋与湖沼, 38(4): 296—303
- 吴迪生, 白毅平, 张红梅等, 2003. 赤道西太平洋暖池次表层水温变化对热带气旋的影响. 热带气象学报, 19(3): 253—259
- 吴迪生, 张 娟, 刘增宏等, 2010. 赤道西太平洋暖池次表层水温与热带气旋的关系. 热带气象学报, 26(2): 242—249
- 邱东晓, 黄 菲, 杨宇星, 2007. 东印度洋-西太平洋暖池的年代际变化特征研究. 中国海洋大学学报, 37(4): 525—532
- 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. 热带气象学报, 22(6): 527—532
- 郑运霞, 应 明, 李永平, 2014. 影响广东省中部沿海热带气旋大风气候特征和重现期分析. 海洋与湖沼, 45(1): 157—165
- 赵永平, 吴爱明, 陈永利等, 2002. 西太平洋暖池的跃变及其气候效应. 热带气象学报, 18(4): 317—326
- 秦曾灏, 端义宏, 2001. 我国热带气旋强度变化研究的新进展. 见: 陈联寿, 徐祥德, 朱永祺等. 全国热带气旋科学讨论会论文集. 北京: 气象出版社, 25—30
- 黄荣辉, 王 磊, 2010. 台风在我国登陆地点的年际变化及其与夏季东亚/太平洋型遥相关的关系. 大气科学, 34(5): 853—864
- 黄荣辉, 陈光华, 2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际

- 变化及其机理研究. 气象学报, 65(5): 683—694
- 黄荣辉, 皇甫静亮, 武亮等, 2016. 关于西北太平洋季风槽年际和年代际变异及其对热带气旋生成影响和机理的研究. 热带气象学报, 32(6): 767—785
- Chan J C L, 1985. Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern oscillation phenomenon. *Monthly Weather Review*, 113(4): 599—606
- Chan J C L, 2000. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13(16): 2960—2972
- Delcroix T, Cravatte S, and Mcphaden M J, 2007. Decadal variations and trends in tropical Pacific sea surface salinity since 1970. *Journal Geophysical Research*, 112: 1—15
- Du Y, Yang L, Xie S P, 2011. Tropical Indian Ocean influence on Northwest Pacific tropical cyclones in summer following strong El Niño. *Journal of Climate*, 24(1): 315—322
- Fu B, Peng M S, Li T *et al*, 2012. Developing versus nondeveloping disturbances for tropical cyclone formation. Part II: Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 140(4): 1067—1080
- Gan B L, Wu L X, 2012. Possible origins of the western Pacific warm pool decadal variability. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(1): 169—176
- Gray W M, 1979. Hurricanes: their formation, structure and likely role in the tropical circulation. In: Shaw D B ed. *Meteorology Over Tropical Oceans*. London: Royal Meteorological Society, 155—218
- Ho C H, Baik J J, Kim J H *et al*, 2004. Interdecadal changes in summertime typhoon tracks. *Journal of Climate*, 17(9): 1767—1776
- Kim H M, Webster P J, Curry J A, 2011. Modulation of North Pacific tropical cyclone activity by three phases of ENSO. *Journal of Climate*, 24(6): 1839—1849
- Lee C S, Lin Y L, Cheung K K W, 2006. Tropical cyclone formations in the South China Sea associated with the Meiyu front. *Monthly Weather Review*, 134(10): 2670—2687
- Tu J Y, Chou C, Chu P S, 2009. The abrupt shift of typhoon activity in the vicinity of Taiwan and its association with western North Pacific—East Asian climate change. *Journal of Climate*, 22(13): 3617—3628
- Wang B, Chan J C L, 2002. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific. *Journal of Climate*, 15(13): 1643—1658
- Wang H, Mehta V M, 2008. Decadal variability of the Indo-Pacific warm pool and its association with atmospheric and oceanic variability in the NCEP-NCAR and SODA reanalyses. *Journal of Climate*, 21(21): 5545—5565
- Yang Y X, Huang F, Wang F M, 2014. Variability of tropical cyclone in high frequent occurrence regions over the western North Pacific. *Journal of Ocean University of China*, 13(3): 347—355
- Yang Y X, Wang F M, 2012. Northward expansion of the western Pacific Warm Pool in late 1990s and early 2000s. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 30(4): 684—689
- Yang Y X, Xie R H, Wang F M *et al*, 2016. Impacts of decaying eastern and central Pacific El Niños on tropical cyclone activities over the western North Pacific in summer. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(1—2): 175—185

THE IMPACT OF INTERDECAL SHIFT OF THE WESTERN PACIFIC WARM POOL IN 1990S ON SUMMER TYPHOON LANDING IN CHINA COAST

YANG Yu-Xing^{1,2,3}, ZHENG Jian^{1,2,3}

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;*

2. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;* 3. *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)*

Abstract The impact of the shift of the western Pacific warm pool (WPWP) in 1990s on typhoon genesis in the northwestern Pacific (NWP) in the summer (July—September) was studied based on the best typhoon track data from the U.S. Joint Typhoon Warning Center (JTWC), the extended sea-surface temperature from NOAA, and the atmospheric circulation data from NCEP/NCAR. The results show that in the post-period of the WPWP shift, typhoon genesis would be suppressed in the central region of 10°—20°N, 130°—145°E, but enhanced in the more eastern region of 10°—20°N, 145°—160°E, of the South China Sea (SCS). Typhoons entering the SCS or eastern coasts of China was decreased, while those that turned towards Japan or Hainan Island or southeastern coasts of China increased. In addition, we found that the suppressed typhoons genesis in the central region of NWP was related to the change of latitudinal circulation caused by the Interdecadal Pacific oscillation, which has close relationship with the WPWP shift in the 1990s. On the other hand, typhoons genesis in the northern SCS is associated with the change of local circulation. Therefore, typhoon genesis increase in the northern SCS is the main reason of typhoon landing increase in the Hainan Island and southeastern coastal regions of China.

Key words the western Pacific warm pool; interdecadal variation; typhoon genesis; track