

张宏杰, 武亮, 黄荣辉. 2018. 两类 El Niño 型对西北太平洋季风槽及热带气旋生成的可能影响 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 150–160. Zhang Hongjie, Wu Liang, Huang Ronghui. 2018. Possible impacts of two types of El Niño events on the western North Pacific monsoon trough and tropical cyclogenesis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 150–160, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17055.

两类 El Niño 型对西北太平洋季风槽及热带气旋生成的可能影响

张宏杰^{1,2} 武亮¹ 黄荣辉¹

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

2 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

摘 要 通过对 1948~2015 年不同 El Niño 事件下西北太平洋季风槽变化和热带气旋 (tropical cyclone, TC) 生成进行分析, 初步探讨了不同 El Niño 型事件对季风槽及其对 TC 的可能影响。分析结果表明, 较东太平洋增暖 (eastern Pacific warming, EPW) 年, 中太平洋增暖 (central Pacific warming, CPW) 年季风槽偏弱, 位置相对偏西、偏北。在 CPW 年, 中 (西和东) 太平洋海温增暖 (降低) 引起了从中到西太平洋热带地区的西风异常和中太平洋地区上升运动及对流活动加强, 使得季风槽加强东伸, 同时西太平洋副高偏弱、偏北, 季风槽向北推进; 而在 EPW 年, 赤道东 (西) 太平洋海温增暖 (降低) 使得赤道地区西风异常显著加强东扩, 异常 Walker 环流的上升支东移至东太平洋, 季风活动加强, 副高偏强、偏南, 这使得季风槽较 CPW 年相比更强、更偏东。利于 TC 生成的大尺度环境因子随季风槽强度和位置的变化而发生改变, 在 CPW 年, 低层气旋性涡度、高层辐散、高的中层相对湿度以及低垂直风切变区随着季风槽向北移动; 而在 EPW 年, 这些因子随季风槽向南、向东偏移。这些大尺度环境因子的变化使得西北太平洋 TC 生成的位置在 CPW 年比 EPW 年更加偏北、偏西。

关键词 中太平洋增暖 东太平洋增暖 西北太平洋 季风槽 热带气旋

文章编号 1006-9585 (2018) 02-0150-11

中图类分号 P425.4.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17055

Possible Impacts of Two Types of El Niño Events on the Western North Pacific Monsoon Trough and Tropical Cyclogenesis

ZHANG Hongjie^{1,2}, WU Liang¹, and HUANG Ronghui¹

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The present study analyzes the monsoon trough and tropical cyclone (TC) genesis over the western North Pacific to preliminarily investigate the anomalous monsoon trough and its possible effect on TCs during different types of El Niño events for the period of 1948–2015. It is shown that, compared with that in the eastern Pacific warming (EPW) years, the monsoon trough is weaker and its position leans toward the west and north during the central Pacific warming

收稿日期 2017-03-29; 网络预出版日期 2017-05-08

作者简介 张宏杰, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事 ENSO 与西北太平洋热带气旋的研究。E-mail: zhj@mail.iap.ac.cn

通讯作者 武亮, E-mail: wul@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金 41475077、41461164005、41375065, 国家重点基础研究发展规划项目 2014CB953900, 中国科学院青年创新促进会项目 2017106

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475077, 41461164005, and 41375065), National Basic Research Program of China (Grant 2014CB953900), the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (Grant 2017106)

(CPW) years. In these years, the warmer (cooler) sea surface temperature (SST) over the central (western and eastern) Pacific induces anomalous westerly winds from the central to western Pacific in the tropical region and stronger than normal ascending motions and convective activities over the central Pacific, which can induce a strengthened and eastward extending monsoon trough. Meanwhile, the western Pacific subtropical high is weaker than normal and shifted northward, which leads to the northward displacement of monsoon trough. During EPW years, however, warmer (cooler) SSTs occur over the eastern (western) equatorial Pacific; anomalous westerly winds significantly extend eastward in the tropics; the ascending branch of the anomalous Walker circulation shifts eastward to the eastern Pacific; the monsoon activity becomes stronger; the subtropical high intensifies and leans toward the south. All the above changes are favorable for a stronger monsoon trough that extends more eastward compared to that in CPW years. Further study reveals that large-scale environmental factors that are related to TCs genesis will change with variations in the intensity and position of the monsoon trough. During CPW years, the cyclonic vorticity in the lower troposphere, the divergence in the upper-level, the higher relative humidity in the middle troposphere and the lower vertical wind shear all move toward the north with the monsoon trough. In EPW years, the above factors follow the monsoon trough to move southward and westward. These changes prompt the location of TC genesis over the western North Pacific to lean northward and eastward compared to that in EPW years.

Keywords Central Pacific warming (CPW), Eastern Pacific warming (EPW), Western North Pacific, Monsoon trough, Tropical cyclone (TC)

1 引言

西北太平洋季风槽是西北太平洋上空对流层低层西南季风与赤道偏东信风的汇合形成的环流系统, 它位于西北太平洋副热带高压南沿。西北太平洋季风槽是亚洲季风环流系统的重要组成部分, 它的活动特征能够反映夏季季风区内大气环流的主要变化特征, 并对于夏季季风区强降水、台风等气象灾害具有重要指示意义。季风槽的移动和强度变化, 往往伴随着热带地区大尺度环境条件的改变, 而这些大尺度环境条件与热带气旋 (tropical cyclone, TC) 的活动有密切的关系 (Chan, 2000; Chia and Ropelewski, 2002; Chan and Liu, 2004; Camargo and Sobel, 2005; Chen et al., 2006; 黄荣辉和陈光华, 2007; 冯涛等, 2013; 黄荣辉等, 2016)。因此西北太平洋季风槽与 TC 生成之间关系密切, 已有研究表明超过 70% 的西北太平洋 TC 生成与季风槽有关 (Frank, 1987; McBride, 1995; 冯涛等, 2013; Molinari and Vollaro, 2013; Feng et al., 2014)。西北太平洋季风槽位置变化对西北太平洋上空的 TC 生成的空间分布有重要的影响 (Bjerknes, 1969; Chen et al., 1998; Chia and Ropelewski, 2002; Wu et al., 2012, 2014); 它的强弱和异常与 TC 生成密切相关 (王慧等, 2006; 高建芸等, 2008; 黄荣辉等, 2016; 张翔等, 2016)。

ENSO 是厄尔尼诺 (El Niño) 与南方涛动

(SO) 二者的统称, 是热带海气相互作用年际变化的主要模态, 它对全球大气环流和气候变化有重要的影响。研究指出 ENSO 循环与亚洲季风系统有很强的相互作用 (黄荣辉等, 1996; 黄荣辉和陈文, 2002)。传统的 El Niño 一般是指东太平洋海温异常持续偏暖的现象, 也可以称之为东太平洋增暖型 (eastern Pacific warming, EPW) 事件, 它通过改变大气环流对热带地区产生影响, 并通过大气遥相关影响到热带外地区, 进而对全球范围内的大气环流和气候的异常变化起到重要的影响, 因此受到了国内外学者的广泛关注。对于 EPW 事件, 从其发生发展的演变特征和机理上都有了较为深刻的理解。同时, 已有大量研究表明它与西北太平洋 TC 生成和活动的关系十分密切。在 El Niño 年, TC 生成位置存在显著的东南移, 台风的生命史变长, 强度增强 (Wu et al., 2011; Wang et al., 2013)。Wu et al. (2012) 研究指出异常发展的西北太平洋季风槽在联系 EPW 事件与 TC 二者关系中起到关键桥梁的作用。

近年来一种新型的 El Niño 现象的发生, 难以用现有的理论机制来解释, 对国内外学者的研究提出了新的挑战。这种新型的 El Niño 现象是指发生在中太平洋海温异常持续偏暖的现象, 称之为中太平洋增暖型 (central Pacific warming, CPW) 事件 (Ashok et al., 2007; Kim et al., 2009), 现有研究表明 CPW 事件对热带地区以及热带外地区的影响与 EPW 事件显著不同, 如在 CPW 年, Walker 环流的

上升支位于中太平洋, 下沉支位于东、西太平洋。自 20 世纪 80、90 年代起, CPW 事件发生的频率显著增加 (Ashok et al., 2007; Ashok and Yamagata, 2009), 其强度也显著增强 (Lee and McPhaden, 2010), 并且在全球变暖的背景下, CPW 事件出现频率将持续增长远超 EPW 型事件达到其的 5 倍 (Yeh et al., 2009)。因此对于 CPW 事件的影响研究有着十分重要意义。研究表明, CPW 事件对东亚季风系统和降水有重要的影响 (Feng et al., 2010; Huang et al., 2012)。此外, CPW 事件对 TC 的影响已经引起了研究者的关注。Chen and Tam (2010) 研究发现西北太平洋区域内 TC 生成的频数与 CPW 事件的指数有显著的正相关。Hong et al. (2011) 研究发现 CPW 事件对 TC 的移动路径的影响与 EPW 型不同。但 CPW 事件对于西北太平洋季风槽的影响及其与 EPW 之间的差异尚不清楚, 在 CPW 影响 TC 的过程中, 西北太平洋季风槽是否依然起到关键作用, 这些问题都值得我们进一步研究。

本研究针对上述两类 El Niño 型事件下, 西北太平洋季风槽的异常特征及可能物理机制进行分析, 进而分析了这种影响与西北太平洋地区 TC 活动的联系。本文包括了: 研究中使用的资料和所用分析方法的介绍, 在两类 El Niño 事件下西北太平洋季风槽的差异及其可能的物理机制, 两类 El Niño 事件下西北太平洋季风槽变化对 TC 的影响分析等。

2 资料和方法

本文的分析时段为 1948~2015 年, 使用的海表温度 (sea surface temperature, SST) 资料为英国气象局哈德莱中心 (Met Office Hadley Centre) 提供的月平均海表温度 (Rayner et al., 2003), 水平分辨率是 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度); 对流活动使用 NOAA 的月平均向外长波辐射资料 (Outgoing longwave radiation, OLR) 数据 (Liebmann and Smith, 1996), 水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度); 西北太平洋区域的 TC 资料为 International Best Tract Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) 数据 (Knapp et al., 2010); 其他物理量资料为 NCEP/NCAR 全球大气月平均再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。由于 OLR 和 TC 数据的时间长度限制, 文中有关对流合成选取的时间

段为 1974~2015 年; IBTrACS 资料在 1951 年之前使用的是 JTWC 数据, 而在 1951~2015 年使用的是 WMO 数据。

本文主要研究两类 El Niño 对西北太平洋季风槽和 TC 的同期影响, 故使用西北太平洋 TC 活跃季节 7~11 月平均的 Niño3 区 ($5^\circ\text{S}\sim 5^\circ\text{N}$, $150^\circ\text{W}\sim 90^\circ\text{W}$) 海表温度定义 EPW 事件 (图 1a), 当 Niño3 指数距平值大于 0.7°C 时定义为 EPW 事件 (1951 年、1957 年、1963 年、1965 年、1969 年、1972 年、1976 年、1982 年、1987 年、1997 年、2009 年、2015 年)。选取 EMI 指数 (记为 I_{EM}) (Ashok et al., 2007) 定义 CPW 事件 (图 1a), 定义如下:

$$I_{\text{EM}} = T_{\text{C}} - 0.5(T_{\text{W}} + T_{\text{E}}), \quad (1)$$

其中 T_{C} 、 T_{E} 和 T_{W} 分别表示 7~11 月区域 C ($10^\circ\text{S}\sim 10^\circ\text{N}$, $165^\circ\text{E}\sim 140^\circ\text{W}$)、E ($15^\circ\text{S}\sim 5^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{W}\sim 70^\circ\text{W}$) 和 W ($10^\circ\text{S}\sim 20^\circ\text{N}$, $125^\circ\text{E}\sim 145^\circ\text{E}$) 平均的 SST 距平。当 EMI 指数距平值大于 0.3°C 时可定义为 CPW 事件 (1966 年、1967 年、1977 年、1986 年、1990 年、1991 年、1992 年、1993 年、1994 年、2002 年、2004 年)。定义得到的 EPW 和 CPW 事件并无重复, 且 EMI 指数与 Niño3 指数之间的相关系数为 0.267, 未通过 90% 信度检验, 这说明了这两种指数可以很好地区分 CPW 事件与 EPW 事件。

3 两类增暖事件对西北太平洋季风槽的影响

3.1 两类 El Niño 的海温分布特征

为了分析两类增暖型事件的 SST 距平 (SSTA) 空间分布特征, 本研究分别对两类 El Niño 年 SSTA 进行合成 (见图 1)。从图 1b 可以看到, 在 CPW 年 SSTA 的分布, 表明沿纬向表现出三极型的分布特征, 即 “-+-” 模态。中太平洋区域是显著的暖异常, 最大值在 0.8°C 以上; 并且, 暖 SSTA 由中太平洋向西北方向延伸至北美南部沿岸海域, 在增暖中心两侧是冷异常, 尤其是西侧较为显著, 最小值在 -0.4°C 以下。而 EPW 年 SSTA 的分布 (图 1c) 表现为在东太平洋海域为显著的暖异常, 最大值可达 1.2°C 以上, 要比 CPW 年暖 SSTA 强得多; 并且, 暖 SSTA 的分布表现为东西向的纬向分布, 这与 CPW 年有明显的不同。在西太平洋海域表现为冷 SSTA, 其分布范围要大于 CPW 年。因此在 SSTA 的空间分布上, 这两种事件表现出明显不同

的特征。

3.2 两类 El Niño 对西北太平洋季风槽的影响

ENSO 事件对热带大气环流有直接的影响, 而不同增暖位置的 EPW 事件与 CPW 事件必然对热带大气环流场有不同的影响, 并进一步影响到西北太平洋季风槽。为此, 对不同事件的 850 hPa 风场和 OLR 场进行合成分析 (图 2), 结果表明: 从风场上来看, 在 CPW 年西北太平洋季风槽可以向东延伸到 165°E 附近, 而在 EPW 年西北太平洋季风槽可以延伸至 170°E; 并且, 由于季风槽是一个强对流活动带, 与 OLR 场的分布对应较好, 因此从 OLR 场上, 在 CPW 年西北太平洋季风槽内 OLR 活跃区向北移动到 18°N 附近, 而在 EPW 年季风槽内 OLR 活跃区位置则要明显偏南。此外, 从平均态上来看, 在两类增暖事件下西北太平洋季风槽的位置有所不同, 相对于 EPW 事件, 在 CPW 年位置更加偏北、偏西。从以上分析结果可以看到在不同 El Niño 型的年份, 西北太平洋季风槽的特征有明显的差别。

3.3 可能的影响机制

由于西北太平洋季风槽是热带季风环流系统中的重要组成部分, 它在不同 ENSO 事件中表现出来的位置上的变化必然与热带大气环流的变化密切相关, 因此以下将从中低层环流场以及经纬向环流等方面来共同探讨引起西北太平洋季风槽位置变化的可能原因。

图 3 是 CPW 事件和 EPW 事件下 850 hPa 距平风场、海平面气压距平场以及 OLR 距平场。由图 3 可见在不同类型的 El Niño 事件下, 低层大气环流距平场有显著的不同, 在 CPW 年 (图 3a), 在赤道中太平洋海温增强 (其两侧海温减弱), 其上空海平面气压减弱 (增强); 并且, 在赤道到 15°N 存在从西 (东) 太平洋到中太平洋的西 (东) 风异常, OLR 距平场中在 145°E~160°W 的赤道地区表现为负距平, 这说明在这一区域内有利于对流活动的发展, 这些变化与热带太平洋地区纬向的 Walker 环流异常密切相关 (图 4a)。图 4a 给出了 CPW 事件下 0°~5°N 平均的纬向距平环流剖面图, 由于在西太平洋区域被冷异常的海温控制, 对应在 135°E 附近有明显的异常下沉运动, 而中太平洋增暖幅度较小引起的异常上升运动不强, 对流层低层 140°E 到日界线附近为一致的风异常。这种 Walker 环流的异常变化, 导致了低层辐合辐散异常, 进而引起了对流活动的异常, 导致了 OLR 产生负距平; 同时,

经向 Hadley 环流 (135°E~170°E, 图 5a), 在 10°N~20°N 存在显著的异常上升支, 而下沉支位于两侧南半球的 10°S 以南和北半球 30°N 以北, 这支上升支与对流活动分布相一致, 较 EPW 年偏北, 从而有利于季风槽向北推进。这些大尺度环流的变化使得从西北太平洋到中太平洋被大范围的异常纬向西风控制, 并且由于在 15°N 以北存在明显异常的气旋性环流, 其东南侧的西南气流有利于季风西南气流向北推进。同时, 西北太平洋副热带高压的强度和位置也发生了相应的变化。图 6 给出了 CPW 和 EPW 事件 500 hPa 合成位势高度及差异场, 可以看到在 CPW 年副高主体位置与副高气候位置基本一致, 强度上略有增强, 其南侧存在显著西风异常。因此, 西北太平洋季风槽在 CPW 年强度增强, 位置偏东、偏北。

在 EPW 年 (图 3b), 由于赤道海温异常为偶极子型, 在东 (西) 太平洋海温异常增强 (降低), 其上空海平面气压加强 (减弱), 从而导致热带太平洋上空 (赤道至 15°N) 在对流层低层 850 hPa 存在显著西风异常, 但强度比 CPW 年显著增强; 而纬向气流异常辐合上升区向东移动, 使得相应异常对流区东移到赤道 170°E 以东至东太平洋上空, 但在 170°E 以西、20°N 以南 OLR 为正值, 不利于对流活动发展。从纬向垂直环流可以看到 (图 4b), 在 EPW 年, 由于东太平洋异常强的海温偏暖导致日界线以东的区域为显著的上升运动, 而在西太平洋海水异常偏冷, 形成下沉运动, 从而在对流层低层 500 hPa 以下表现一致的异常偏西气流, 强度要显著强于 CPW 年, 因而有利于季风槽整体的进一步东移。从图 4c 的差异场中也能看出从 150°E~160°W 范围有一个正环流差异场, 对流层低层的纬东风抑制了在 CPW 年季风槽的进一步东移, 因此 EPW 年季风槽位置要更偏东一些。在 EPW 年, Hadley 环流的异常的上升气流位于 5°N~15°N 之间, 而在 20°N~30°N 和赤道以南的大范围区域为异常的下沉气流, 这使得 EPW 年副高强度显著增强 (图 6b), 其主体位置明显偏南。与之相应 15°N 气旋性环流异常并不明显, 季风槽位置偏南。因此, 在 EPW 年季风槽较 CPW 年强度增强, 其位置更加偏南、偏东。

上述分析结果表明: 两类 El Niño 事件下大气环流场的变化使得在 CPW 年西北太平洋季风槽较气候态相对偏北、偏西, 而在 EPW 年西北太平洋

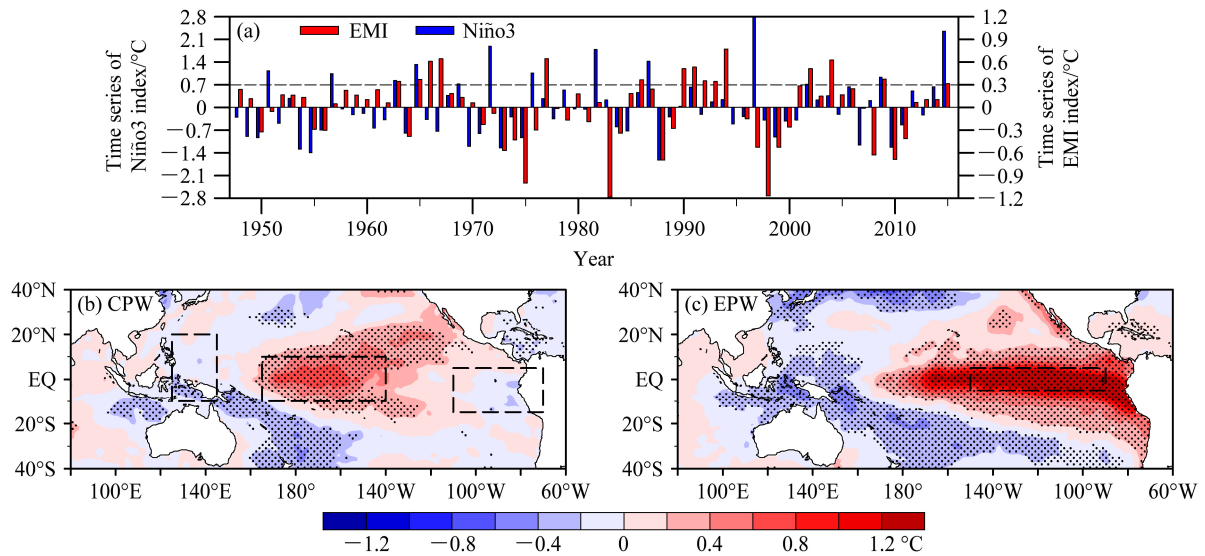


图1 (a) 1948~2015年7~11月EMI指数与Niño3指数的时间序列; (b) CPW事件和(c) EPW事件7~11月海表温度距平(SSTA)合成
Fig. 1 (a) Time series of EMI index and Niño3 index during Jul–Nov of 1948–2015 and composite SST anomaly (SSTA) during Jul–Nov of (b) central Pacific warming (CPW) episodes and (c) eastern Pacific warming (EPW) episodes

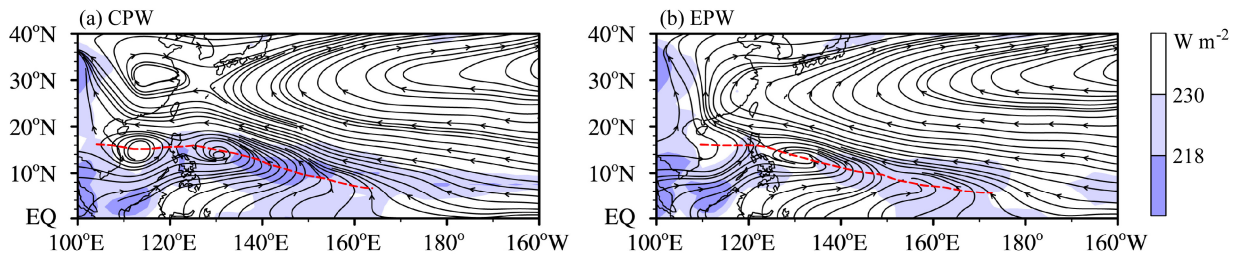


图2 CPW事件和EPW事件在7~11月850 hPa流场与OLR场合成(红色虚线表示西北太平洋季风槽的槽线)

Fig. 2 Composite 850-hPa streamlines and outgoing longwave radiation (OLR) during Jul–Nov of CPW episodes and EPW episodes [monsoon trough line over the Western North Pacific (WNP) is denoted by the red dashed line]

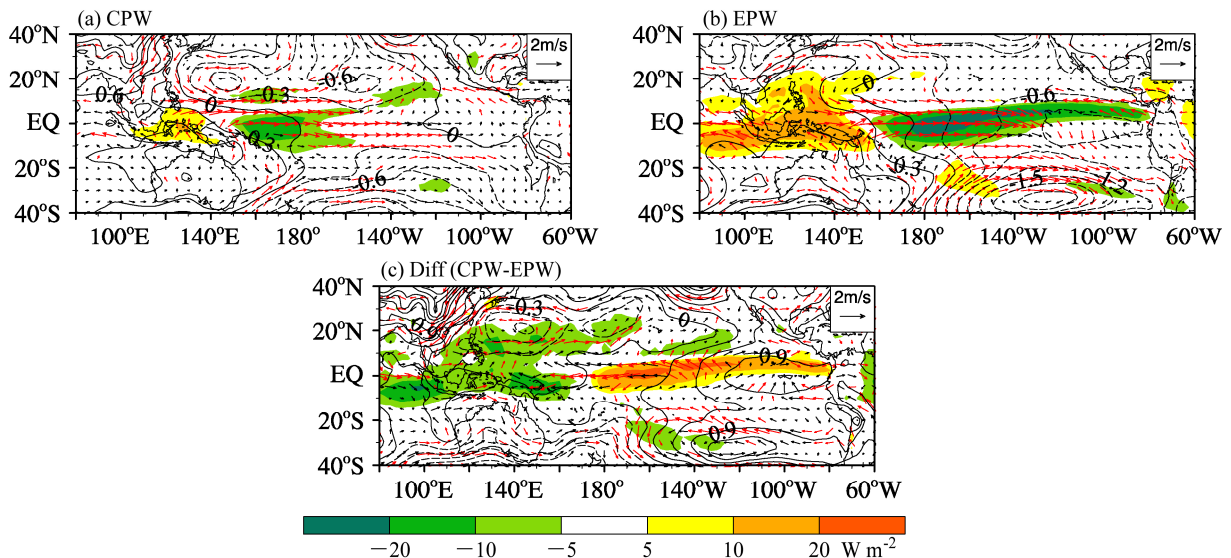


图3 (a) CPW事件和(b) EPW事件在7~11月平均850 hPa距平风场(箭头)、OLR距平场(填色)及海平面气压距平(等值线, 单位: hPa)合成; (c) CPW事件与EPW事件的差异场。红色风矢量表示通过90%信度水平

Fig. 3 Composite anomalies of 850-hPa winds, OLR (shadings) and sea level pressure (contours, units: hPa) during Jul–Nov of (a) CPW episodes and (b) EPW episodes; (c) the difference between CPW years and EPW years. Wind vectors in red indicate significance above the 90% confidence level

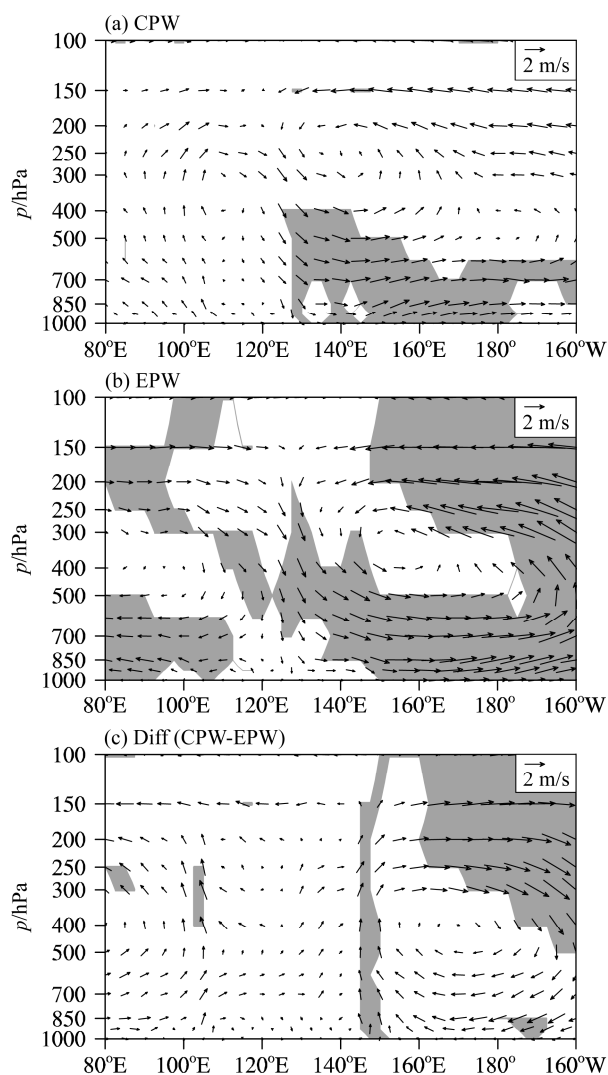


图4 (a) CPW 事件和 (b) EPW 事件在 7~11 月 0°~5°N 平均的纬向—垂直环流距平场的剖面; (c) CPW 事件与 EPW 事件的差异场 (阴影区通过 90% 的信度检验)

Fig. 4 Composite zonal-vertical circulation anomalies averaged over 0°~5°N during Jul–Nov of (a) CPW episodes and (b) EPW episodes; (c) the difference between CPW episodes and EPW episodes (shadings indicate the anomalies or differences significant above the 90% confidence level)

季风槽位置更加偏南、偏东。由于西北太平洋季风槽常常为 TC 生成提供有利的热力学条件和动力学条件, 因此它的变化也会引起 TC 生成的变化, 这一部分将在下一章节中详细说明。

4 两类太平洋增暖事件对 TC 生成的影响

4.1 对 TC 生成的影响

观测资料表明: 西北太平洋上 1948~2015 年

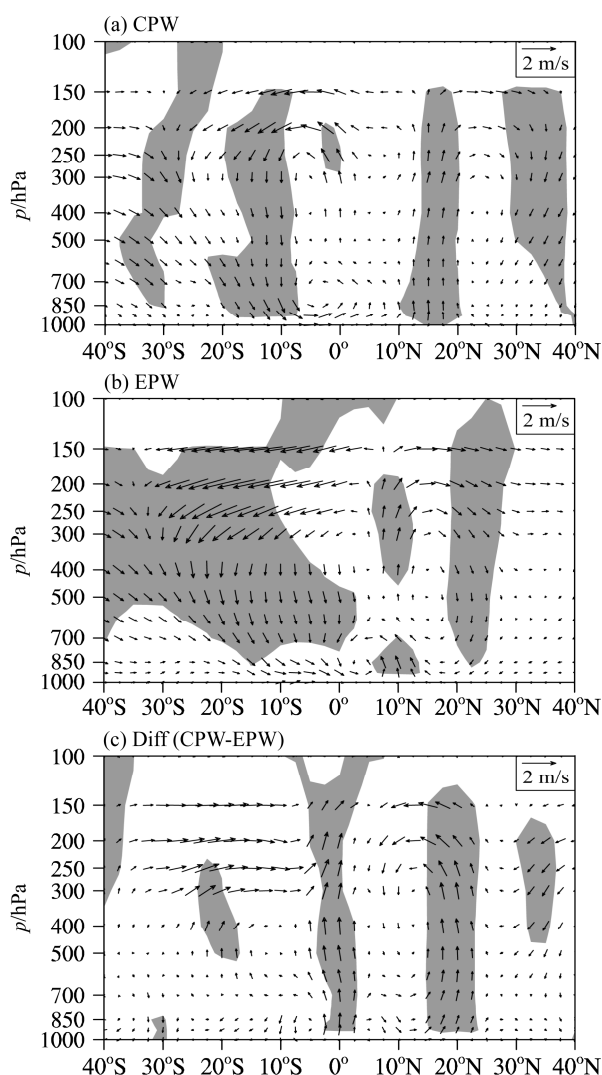


图5 同图4, 但为 135°E~170°E 平均经向环流剖面

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the meridional circulation anomalies averaged over 135°E~170°E

气候平均 7~11 月约有 20 个 TC 生成, 而在 EPW 年平均约有 16 个 TC 生成, CPW 年为 23 个。两类 El Niño 年 TC 总数有所差异, CPW 年 TC 数量更多。因此, 两类不同 El Niño 对西北太平洋 TC 生成有明显的影

响。两类太平洋增暖事件不仅影响西北太平洋 TC 生成数量, 而且影响 TC 的生成位置。在 CPW 年, TC 的生成平均位置为 (14.3°N, 144.3°E), 而 EPW 年为 (13.4°N, 142.8°E), CPW 年较 EPW 年更加偏西、偏北。这与 CPW 年, 大气环流背景场的变化使得西北太平洋季风槽位置相对偏北、偏西, 而在 EPW 年位置相对偏南、偏东的特征一致。图 7 给出了不同 El Niño 年季风槽和 TC 生成的位置分

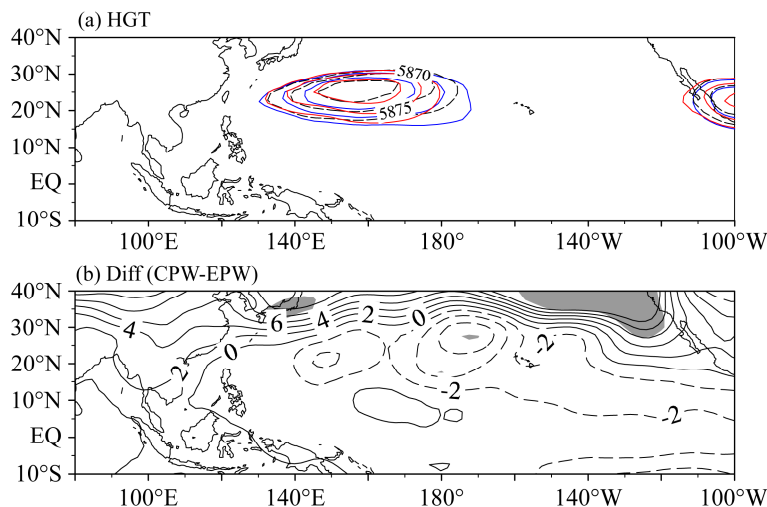


图6 (a) CPW 事件和 EPW 事件在 7~11 月平均 500 hPa 位势高度场 (5870 gpm、5875 gpm、5880 gpm) 合成 (单位: m, 红色实线、蓝色实线、黑色虚线等值线分别表示 CPW 年、EPW 年以及气候态下位势高度场的分布) 以及 (b) CPW 事件和 EPW 事件位势高度场的差异 (阴影区通过 90% 信度检验)
Fig. 6 (a) Composite 500-hPa geopotential height field (m) averaged over Jul–Nov of CPW episodes and EPW episodes (red lines, blue lines, and dotted lines denote the geopotential height fields (5870 gpm, 5875 gpm, and 5880 gpm) during CPW episodes, EPW episodes, and the climatological state, respectively); (b) the difference of 500-hPa geopotential height field between CPW episodes and EPW episodes (significant values above the 90% confidence level are shaded)

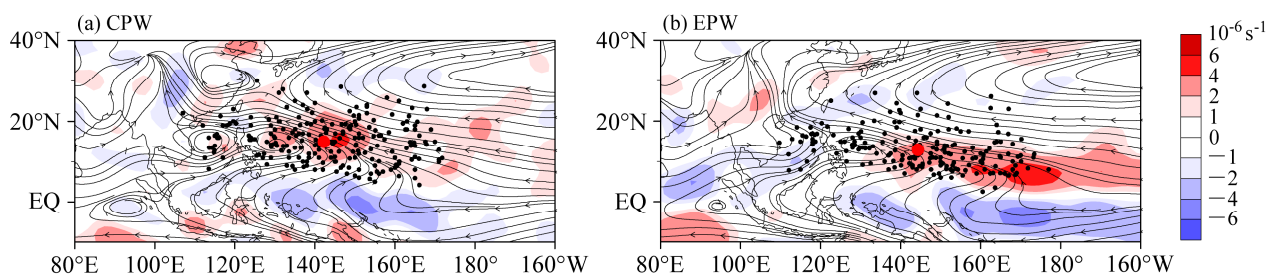


图7 CPW 事件和 EPW 事件在 7~11 月平均低层流场 (流线, 单位: m/s) 与 850 hPa 涡度距平场 (填色) 合成 (黑色点表示在 7~11 月生成的 TC 位置, 红色点表示 TC 生成的平均位置)
Fig. 7 Composite surface winds (streamlines, units: m/s) and 850-hPa relative vorticity anomalies (shadings) during Jul–Nov of CPW episodes and EPW episodes (black dots represent locations of TC genesis during Jul–Nov and red dot represents mean location of TC genesis)

布, 从图中可以看到在 CPW 年, 季风槽位置相对偏北、偏西, 低层西风距平的位置可以向北延伸 20°N 附近, 气旋性涡动向北扩展, 从而使得 TC 生成位置向北移动; 而在 EPW 年西风距平主要局限在赤道附近, 季风槽相对偏南、偏东, 气旋性异常向东发展, 更多的 TC 在季风槽的轴附近生成, 南北跨度不如 CPW 年明显。

4.2 对利于 TC 生成大尺度环境因子的影响

前人研究表明 (Gray, 1979; Chia and Ropelewski, 2002; Chan and Liu, 2004; Wu et al., 2012, 2014; 冯涛等, 2016; 黄荣辉等, 2016), TC 的生成主要受局地大尺度环境的热力和动力因素的影响, 主要有低层的相对涡度、高低层的垂直风切变、高层散度、

海表温度、中层的相对湿度。本文分别对这些大尺度环境因子进行合成分析。分析结果如下: 1) 从图 8a 可知, 两类 El Niño 年西北太平洋热带地区的海温都远高于 28 °C, 局地海温在二者差异中的作用不明显。2) 中层相对湿度 (图 8d、8e 为中层相对湿度场分布) 是 TC 生成的又一个重要的条件, 可以用 500~700 hPa 的平均近似表示 (Cheung, 2004)。较大的相对湿度有利于 TC 的暖心结构的建立, 并为 TC 的发展提供更多的潜热。由于季风槽是低层的辐合带, 其相对湿度含量较高, 其分布与季风槽的走向一致。在 CPW 年, 由于西北太平洋 SST 高于 EPW 年并伴随着较强的西南风的水汽输送, 因此在 CPW 年季风槽内的相对湿度的大值区

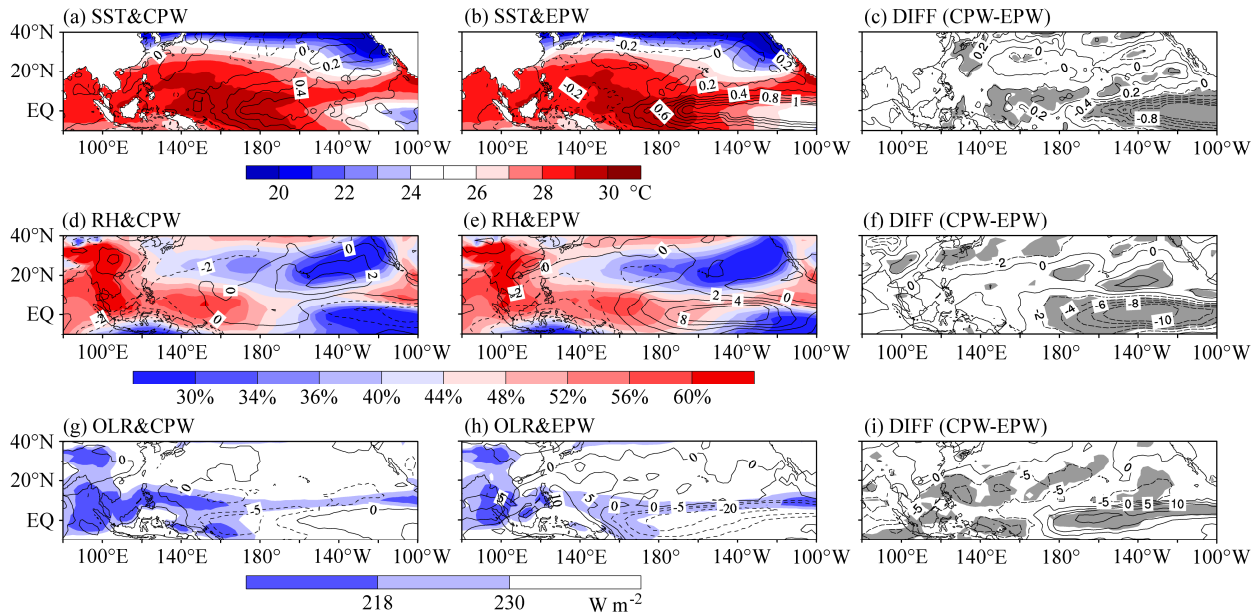


图 8 (a) CPW 事件和 (b) EPW 事件在 7~11 月平均 SST (填色) 和 SSTA 合成 (等值线) 以及 (c) 两者 SST 的差异场 (单位: $^{\circ}\text{C}$); (d) CPW 事件和 (e) EPW 事件在 7~11 月 500~700 hPa 相对湿度 (填色) 及其距平 (等值线) 合成以及 (f) 两者 500~700 hPa 相对湿度的差异场 (%); (g) CPW 事件和 (h) EPW 事件在 7~11 月平均 OLR 场 (填色) 和 OLR 距平场 (等值线) 合成以及 (i) 两者 OLR 的差异场 (单位: W/m^2)。灰色阴影区表示通过 90% 信度检验

Fig. 8 Composite mean (a) SST (shading) and (b) SSTA (contours) during Jul–Nov of CPW episodes and EPW episodes (units: $^{\circ}\text{C}$); (c) the difference in SST between CPW episodes and EPW episodes. The mean 500–700 hPa relative humidity and its anomalies (%) during Jul–Nov of (d) CPW episodes and (e) EPW episodes. (f) The difference in the relative humidity between CPW episodes and EPW episodes. The mean OLR and its anomalies (units: W/m^2) during (g) CPW episodes and (h) EPW episodes; (i) the difference in OLR between CPW episodes and EPW episodes. Significant values above the 90% confidence level are shaded

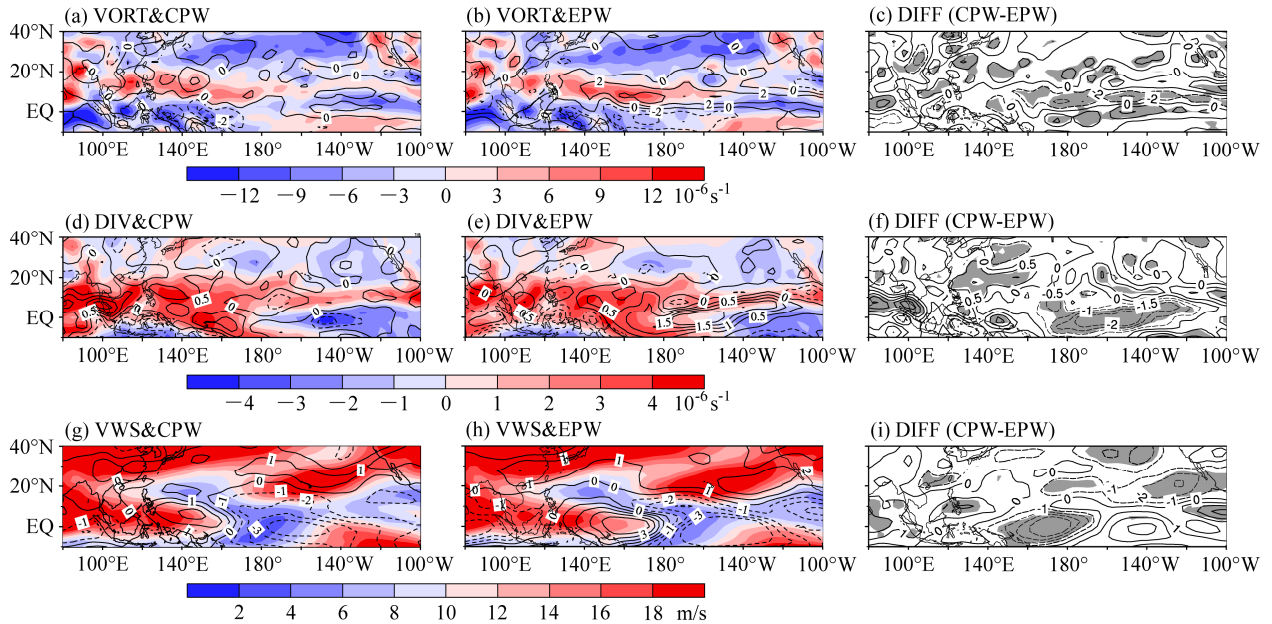


图 9 (a) CPW 事件和 (b) EPW 事件在 7~11 月 850 hPa 涡度场 (填色) 及其距平场 (等值线) 合成以及 (c) CPW 事件与 EPW 事件涡度场的差异场 (单位: 10^{-6}s^{-1}); (d) CPW 事件和 (e) EPW 事件在 7~11 月 200 hPa 散度场 (填色) 及其距平场 (等值线) 合成以及 (f) 散度的差异场 (单位: 10^{-6}s^{-1}); (g) CPW 事件和 (h) EPW 事件在 7~11 月 200~850 hPa 垂直风切变 (填色) 及其距平场 (等值线) 合成以及 (i) 垂直风切变的差异场 (单位: m/s)。灰色阴影区表示通过 90% 信度检验

Fig. 9 Composite mean 850-hPa vorticity (shading) and its anomalies (contours) during Jul–Nov of (a) CPW episodes and (b) EPW episodes; (c) the difference in vorticity between CPW episodes and EPW episodes (units: 10^{-6}s^{-1}). The mean 200-hPa divergence and its anomalies (units: 10^{-6}s^{-1}) during Jul–Nov of (d) CPW episodes and (e) EPW episodes; (f) the difference in the divergence. The mean 200–850 hPa vertical wind shear and its anomalies (units: m/s) during (g) CPW episodes and (h) EPW episodes; (i) the difference in the vertical wind shear. Significant values above the 90% confidence level are shaded

位置相对偏西,最大相对湿度可达 56%以上,而在 EPW 年相对湿度的最大值区位置相对偏东,最大相对湿度可达 52%以上。此外,从差异场上也表现出在 160°E 以东有显著的负值区,而正值区向东北方向延伸。这说明了在对流层中层的大的相对湿度分布是有利于在 CPW 年 TC 生成位置偏北、偏西,而在 EPW 年 TC 生成位置相对偏南、偏东。3) OLR (图 8g、8h 为 OLR 场的分布) 越小表示对流活动越强,而较强的对流活动是有助于 TC 的形成和发展。在 CPW 年 OLR 的小值区位置相对偏北、偏西,而 EPW 的小值区沿着季风槽向东延伸,从差异场上也能反映 OLR 场的分布特征。因此 OLR 场也是有利于 TC 生成位置在 CPW 年相对偏北、偏西,而在 EPW 年相对偏南、偏东。

本文还分析了对流层低层的涡度场和对流层高层的散度场分布,分析结果如下: 1) 从图 9a、9b 可以看出,正涡度区呈东西向的连续带状分布,与季风槽的走向一致。在 CPW 年,正涡度的大值区分布在 175°E 以西,而在 EPW 年,大值区位置可以向东延伸至 180°附近,最大值可达 $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 以上,而这与不同事件下季风槽的位置上差别一致。从二者的差异场上来看,在 20°N 附近以及以北区域有显著的正涡度值,而在 140°E 以东有显著的负涡度值,这说明了在 CPW 年,低层的相对涡度的分布是有利于 TC 生成位置相对偏北、偏西,而在 EPW 年使得 TC 生成位置相对向东、向南偏移; 2) 高层的辐散环流形成有利上升运动和对流活动的加强,从而有利于 TC 的生成。在高层,散度场 (图 9d、9e) 正值区表现为沿着季风槽表现东西向的分布,说明在高层有明显的辐散,对应低层辐合上升气流,从而建立起有利 TC 发展的深对流系统。从差异场上来看,其正负值分布与低层涡度的差异场分布对应一致,说明在 CPW 年,在季风槽东端以东位置,TC 活动受到抑制,而在季风槽北部更有利于 TC 的生成。

此外,本文还分析了对流层高低层的垂直风切。200~850 hPa 的风垂直切变(vertical wind shear, 记为 S_{vw})的定义如下:

$$S_{vw}=[(U_{200}-U_{850})^2+(V_{200}-V_{850})^2]^{1/2}, \quad (2)$$

其中 U 、 V 分别是 850 hPa 和 200 hPa 风场的纬向和经向分量。较小的垂直风切变有利于 TC 的暖心结构的建立,从而有利于 TC 的形成。在西北太平洋季风槽范围内及邻近区域有较小的垂直风切变的

分布。从图 9g、9h 发现,在 CPW 年季风槽位置相对偏西、偏北,垂直风切变的低值区也随之西移和向北推进,而在 EPW 年,垂直风切变的低值区位置则偏东、偏南。从差异场上也能反映这样的位置变化关系。因此,对流层高低层垂直风切变也是有利 TC 在 CPW 年生成位置相对偏西、偏北的,而在 EPW 年生成位置相对偏东、偏南。

上述分析结果表明了利于西北太平洋 TC 生成的大尺度环境因子与西北太平洋季风槽的位置关系密切,随着不同 El Niño 年季风槽位置的变化而变化。与 EPW 年相比,在 CPW 年季风槽位置相对偏西、偏北,相应的低层正涡度区、正的高层散度区、较大的中层相对湿度区以及较小的风垂直切变区位置也都相对偏西、偏北,从而使得 TC 生成的位置相对偏西、偏北。因此,西北太平洋季风槽的变化所引起利于 TC 生成的大尺度环境因子变化在两类 El Niño 影响西北太平洋 TC 生成位置的过程中都起到了关键作用。

5 总结与讨论

本文主要分析了 1948~2015 年 7~11 月不同类型 El Niño 事件下,大气环流的差异与西北太平洋季风槽的异常及这种变化对 TC 生成的影响。研究发现:与 EPW 年相比,在 CPW 年 7~11 月季风槽位置相对偏西、偏北。而这种位置上的差异与不同类型 El Niño 事件下大气背景场变化有密切的联系。在 CPW 年,赤道中太平洋海温增暖、西和东太平洋海温降低,由此导致了西太平洋到中太平洋低纬的西风异常,中太平洋上升气流及对流活动加强,导致西北太平洋季风槽向东发展,而副高偏弱位置偏北以及异常西风的北侧气旋性环流加强有利于季风槽的进一步向北推进;而在 EPW 年,赤道东太平洋海温增暖、西太平洋海温降低,赤道地区西风异常加强东扩、异常上升区东移到东太平洋上空,季风加强东扩,而副高略强位置偏南、西伸,从而导致西北太平洋季风槽位置较 CPW 年更偏东。

西北太平洋季风槽强度和位置变化往往伴随着大尺度环境条件的改变。在 CPW 年正的低层气旋性涡度区、正的高层散度、较大的中层相对湿度以及较小垂直风切变区位置随着季风槽一同向西向北移动;而在 EPW 年这些大尺度环境因子随季风槽的位置变化向南、向东偏移。这种变化使得

在 CPW 年平均 TC 的生成位置要比 EPW 年更为偏北、偏西。这种季风槽强度和位置变化能够很好解释两类 El Niño 事件下 TC 生成的数量和位置的差异。

参考文献 (References)

- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 112 (C11): C11007, doi: 10.1029/2006JC003798.
- Ashok K, Yamagata T. 2009. Climate change: The El Niño with a difference [J]. *Nature*, 461 (7263): 481–484, doi: 10.1038/461481a.
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the Equatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97 (3): 163–172, doi: 10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2.
- Camargo S J, Sobel A H. 2005. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO [J]. *J. Climate*, 18 (15): 2996–3006, doi: 10.1175/JCLI3457.1.
- 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, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<2960:TCAOTW>2.0.CO;2.
- 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, doi: 10.1175/3240.1.
- 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 P, 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, doi: 10.1175/1520-0493(1998)126<1080:IVITTC>2.0.CO;2.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C. 2006. Interannual variation of the tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *J. Climate*, 19 (21): 5709–5720, doi: 10.1175/JCLI3934.1.
- Cheung K K W. 2004. Large-scale environmental parameters associated with tropical cyclone formations in the western North Pacific [J]. *J. Climate*, 17 (3): 466–484, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<0466:LEPAWT>2.0.CO;2.
- 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, doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<2934:TIVITG>2.0.CO;2.
- Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 115 (D24): D24122, doi:10.1029/2010JD014761.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12307.
- Feng T, Chen G H, Huang R H, et al. 2014. Large-scale circulation patterns favourable to tropical cyclogenesis over the western North Pacific and associated barotropic energy conversions [J]. *International Journal of Climatology*, 34 (1): 216–227, doi: 10.1002/joc.3680.
- 冯涛, 黄荣辉, 杨修群, 等. 2016. 2004 年与 2006 年 7~9 月西北太平洋上空大尺度环流场与天气尺度波动的差别及其对热带气旋生成的影响 [J]. *大气科学*, 40 (1): 157–175. Feng Tao, Huang Ronghui, Yang Xiuqun, et al. 2016. Differences between the large-scale circulations and synoptic-scale waves in July–September 2004 and those in 2006 and their impacts on tropical cyclogenesis over the western North Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (1): 157–175, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.14162.
- Frank W M. 1987. Tropical cyclone formation. A global view of tropical cyclones [M]. Elberry R L, Ed., Office of Naval Research, 53–90.
- 高建芸, 张秀芝, 江志红, 等. 2008. 西北太平洋季风槽异常与热带气旋活动 [J]. *海洋学报*, 30 (3): 35–47. Gao Jianyun, Zhang Xiuzhi, Jiang Zhihong, et al. 2008. Anomalous western North Pacific monsoon trough and tropical cyclone activities [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 30 (3): 35–47.
- Gray W M. 1979. Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation [C]// *Meteorology over the Tropical Oceans*. Bracknell, UK: Royal Meteorological Society, 155–218.
- 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.
- 黄荣辉, 傅云飞, 臧晓云. 1996. 亚洲季风与 ENSO 循环的相互作用 [J]. *气候与环境研究*, 1 (1): 38–54. Huang Ronghui, Fu Yunfei, Zhan Xiaoyun. 1996. Asian monsoon and ENSO cycle interaction [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 1 (1): 38–54, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.1996.01.05.
- 黄荣辉, 陈文. 2002. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 146–159. Huang Ronghui, Chen Wen. 2002. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (2): 146–159, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2002.02.03.
- 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 [J]. *气象学报*, 65 (5): 683–694. Huang Ronghui, Chen Guanghua. 2007. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over Northwest Pacific and their physical mechanism [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (5): 683–694, doi: 10.11676/qxxb2007.064.
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (5): 910–942, doi: 10.1007/s00376-012-2015-x.
- 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 [J]. *热带气象学报*, 32 (6): 767–785. Huang Ronghui, Huangfu Jingliang, Wu Liang, et al. 2016. Research on the interannual and interdecadal variabilities of the monsoon trough and their impacts on tropical cyclone genesis over the western North Pacific [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*,

- 32 (6): 767–785.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kim H M, Webster P J, Curry J A. 2009. Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on North Atlantic tropical cyclones [J]. *Science*, 325 (5936): 77–80, doi: 10.1126/science.1174062.
- Knapp K R, Kruk M C, Levinson D H, et al. 2010. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS) unifying tropical cyclone data [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91 (3): 363–376, doi: 10.1175/2009BAMS2755.1.
- Lee T, McPhaden M J. 2010. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (14): L14603, doi:10.1029/2010GL044007.
- Liebmann B, Smith C A. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 1275–1277.
- McBride J L. 1995. Tropical cyclone formation [C]// *Global Perspectives on Tropical Cyclones*. World Meteorological Organization, 63–105.
- Molinari J, Vollaro D. 2013. What percentage of western North Pacific tropical cyclones form within the monsoon trough? [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (2): 499–505, doi: 10.1175/MWR-D-12-00165.1.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 108 (D14): 4407, doi:10.1029/2002JD002670.
- Wang C Z, Li C X, Mu M, et al. 2013. Seasonal modulations of different impacts of two types of ENSO events on tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 40 (11–12): 2887–2902, doi: 10.1007/s00382-012-1434-9.
- 王慧, 丁一汇, 何金海. 2006. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响 [J]. *气象学报*, 64 (3): 345–356. Wang Hui, Ding Yihui, He Jinhai. 2006. Influence of western North Pacific summer monsoon changes on typhoon genesis [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (3): 345–356, doi: 10.11676/qxxb2006.033.
- Wu L, Wen Z P, Huang R H. 2011. A primary study of the correlation between the net air–sea heat flux and the interannual variation of western North Pacific tropical cyclone track and intensity [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 30 (6): 27–35, doi: 10.1007/s13131-011-0158-8.
- Wu L, Wen Z P, Huang R H, et al. 2012. Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (1): 140–150, doi: 10.1175/MWR-D-11-00078.1.
- Wu L, Chou C, Chen C T, et al. 2014. Simulations of the present and late-twenty-first-century western North Pacific tropical cyclone activity using a regional model [J]. *J. Climate*, 27 (9): 3405–3424, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00830.1.
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate [J]. *Nature*, 461 (7263): 511–514, doi: 10.1038/nature08316.
- 张翔, 武亮, 皇甫静亮, 等. 2017. 西北太平洋季风槽的季节和年际变化特征及其与热带气旋生成大尺度环境因子的联系 [J]. *气候与环境研究*, 22 (4): 418–434. Zhang Xiang, Wu Liang, Huangfu Jingliang, et al. 2017. Seasonal and interannual variability of the western North Pacific monsoon trough and its relationship to large-scale environmental factors [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 22 (4): 418–434, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16065.