

吴泽铭,张冬娜,胡春迪,等.西北太平洋热带气旋频数及生成位置的气候变化研究进展[J].海洋气象学报,2020,40(4):1-10.

WU Zeming, ZHANG Dongna, HU Chundi, et al. Research progress on climate changes in frequency and genesis location of western North Pacific tropical cyclone[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(4): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.001. (in Chinese)

西北太平洋热带气旋频数及生成位置的气候变化研究进展

吴泽铭^{1,2,3},张冬娜²,胡春迪^{1,2,3},杨崧^{1,2,3}

(1.中山大学大气科学学院/广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室,广东 珠海 519082; 2.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东 珠海 519082; 3.热带大气-海洋系统科学教育部重点实验室,广东 珠海 519082)

摘要:自20世纪70年代末期以来,西北太平洋的热带气旋在全球变暖的背景下主要发生了两种宏观的气候变化:一个是热带气旋生成频数呈现年代际减少,尤其是在东南部海域;另一个则是其生成与活动位置等总体特征有向西北偏移的趋势。本文对这两个方面的研究进展进行了概述。近些年的研究表明,垂直风切变的增强可能是夏秋季热带气旋频数减少的最主要原因,这与太平洋-印度洋海面温度变化导致的大尺度环境变化有密切联系。同样有研究认为北大西洋海面温度的多年代际振荡对近期西北太平洋热带气旋生成频数的减少也非常重要。但西北太平洋西部强热带气旋的频数呈现出增加的趋势,这可能与东亚近海海面温度的显著升高有关,尽管这种变化是否可信仍有争议。近20年来,西北太平洋热带气旋活动普遍出现西北移倾向,包括生成位置和路径位置,这种变化可能受到了ENSO变异及20世纪90年代末期太平洋气候突变的调控。同时,热带环流的极向扩张又导致了热带气旋的有利环境向北扩张,因此西北太平洋热带气旋活动也出现极向迁移的趋势。

关键词:热带气旋;频数;生成位置;气候变化;西北太平洋

中图分类号: P444;P457.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)04-0001-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.04.001

Research progress on climate changes in frequency and genesis location of western North Pacific tropical cyclone

WU Zeming^{1,2,3}, ZHANG Dongna², HU Chundi^{1,2,3}, YANG Song^{1,2,3}

(1. School of Atmospheric Sciences/Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 3. Key Laboratory of Tropical Atmosphere-Ocean System (Sun Yat-sen University), Ministry of Education, Zhuhai 519082, China)

Abstract Since the late 1970s, there have been two mainly macroscopic climate changes in tropical cyclone (TC) over the western North Pacific (WNP) under global warming. One is the decadal decrease in the TC frequency, especially over the southeastern part of WNP, and the other is the trend of northwestward migration in TC genesis and activity location. This article summarizes the research progress on these two aspects as follows. Recent studies show the enhancement of vertical wind shear may be the main reason for the decrease of TC frequency in summer and autumn, which is closely linked to the large-

收稿日期:2020-09-17; 修订日期:2020-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(41975077,41705050);广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室项目(2020B1212060025)

第一作者:吴泽铭,男,硕士研究生,主要从事热带气旋气候变化研究,wuzm6@mail2.sysu.edu.cn。共同第一作者:张冬娜,女,助理工程师,主要从事台风气候研究,zhangdongna@sml-zhuhai.cn。

通信作者:胡春迪,男,博士,副教授,主要从事海洋-气候相互作用研究,huchd3@mail.sysu.edu.cn。

scale environmental changes induced by Indo-Pacific sea surface temperature (SST) anomalies. Some studies show the multi-decadal oscillation of North Atlantic SST is also important to the decrease of TC frequency in WNP. However, the frequency of intense TC is increasing over the western part of WNP, which is possibly related to the regional warming in the coastal waters of East Asia, though such change is still in debate. During the recent two decades, WNP TC activities are observed to shift westward, including the genesis location and track, which is probably controlled by the ENSO shift and the late-1990s Pacific climate shift. Besides, the northward expansion of tropical circulations induces TC favorable environment to shift northward, contributing to the poleward migration of WNP TC activities.

Key words tropical cyclone; frequency; genesis location; climate change; western North Pacific

引言

热带气旋是极具破坏力的自然灾害之一,其登陆能够带来狂风、暴雨、风暴潮等直接灾害和滑坡、泥石流等次生灾害。西北太平洋每年约生成占全球总数 1/3 的热带气旋,是全球热带气旋活动最为频繁的区域^[1]。中国东临西北太平洋、南接南海,夏秋季节易受到热带气旋的影响。我国东部和南部沿海地区经济发达、人口相对集中,热带气旋是影响这里最为严重的天气气候灾害^[2-4]。因此研究西北太平洋热带气旋活动的气候变化具有重要意义。

以往很多文献从天气学方面对热带气旋进行了研究与分析^[5],但近年来国内外学者对热带气旋的气候变化问题逐渐重视,有关热带气旋的气候学研究也逐步深入。本文主要从西北太平洋热带气旋的生成频数和活动位置出发,回顾和总结了热带气旋气候变化或者年代际变化的相关研究进展,并讨论了该领域研究中一些需要解决的科学问题。

1 热带气旋频数

1.1 热带气旋频数的减少及其原因

近年来西北太平洋夏秋季热带气旋频数呈现了显著减少的变化趋势(图 1)^[6-10]。有研究表明,年代际太平洋涛动(interdecadal Pacific oscillation, IPO)^[11-12]可以通过海面温度(sea surface temperature, SST)的变化调节西北太平洋大尺度环境场条件,从而影响热带气旋活动(图 2)^[13-18]。1997/1998年后 IPO 转为负相位,太平洋出现了类似拉尼娜的 SST 异常分布(图 2a),导致热带气旋主要生成区域($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)的海平面气压增加,低层相对涡度减小,中层相对湿度减小,以及垂直风切变(vertical wind shear, VWS)增大,从而不利于

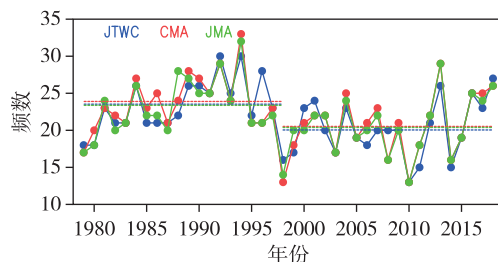


图 1 西北太平洋 1979—2018 年 6—11 月热带气旋频数 (蓝线数据来自美国联合台风警报中心, Joint Typhoon Warning Center, JTWC; 红线数据来自中国气象局, China Meteorological Administration, CMA; 绿线数据来自日本气象厅, Japan Meteorological Agency, JMA; 实线为每年热带气旋频数, 虚线为以 1997/1998 年为界划分的前后两个时期的平均热带气旋频数; 三个机构热带气旋频数的年代际差异均通过 95% 的置信度检验)

Fig. 1 Frequency of tropical cyclones in the western North Pacific during June and November from 1979 to 2018 (blue, red, and green line data are obtained from Joint Typhoon Warning Center (JTWC), China Meteorological Administration (CMA), and Japan Meteorological Agency (JMA), respectively; solid line for annual tropical cyclone frequency, dashed line for average frequency during pre-1998 and post-1998 periods; the interdecadal differences of tropical cyclone frequency from the three institutes all pass the significance test at 95% level)

热带气旋的生成。HU et al.^[6]通过分析区域环境场变量指出,垂直风切变的增大是导致夏秋季热带气旋频数减少的主要原因,而这种变化极有可能是由印度洋-太平洋地区的降水及 SST 的变化引起。而 HONG et al.^[18]认为垂直风切变增大的主要原因是太平洋 SST 出现了类似拉尼娜的异常。CHOI et al.^[7]进一步研究指出,垂直风切变的东向梯度(eastward gradient)是近几十年夏秋季热带气旋生成频数变化的最重要因素,且与局地 SST 的纬向不对称性密切相关。除了垂直风切变的变化,LIU and CHAN^[19]还认为西北太平洋副热带高压的增强也导

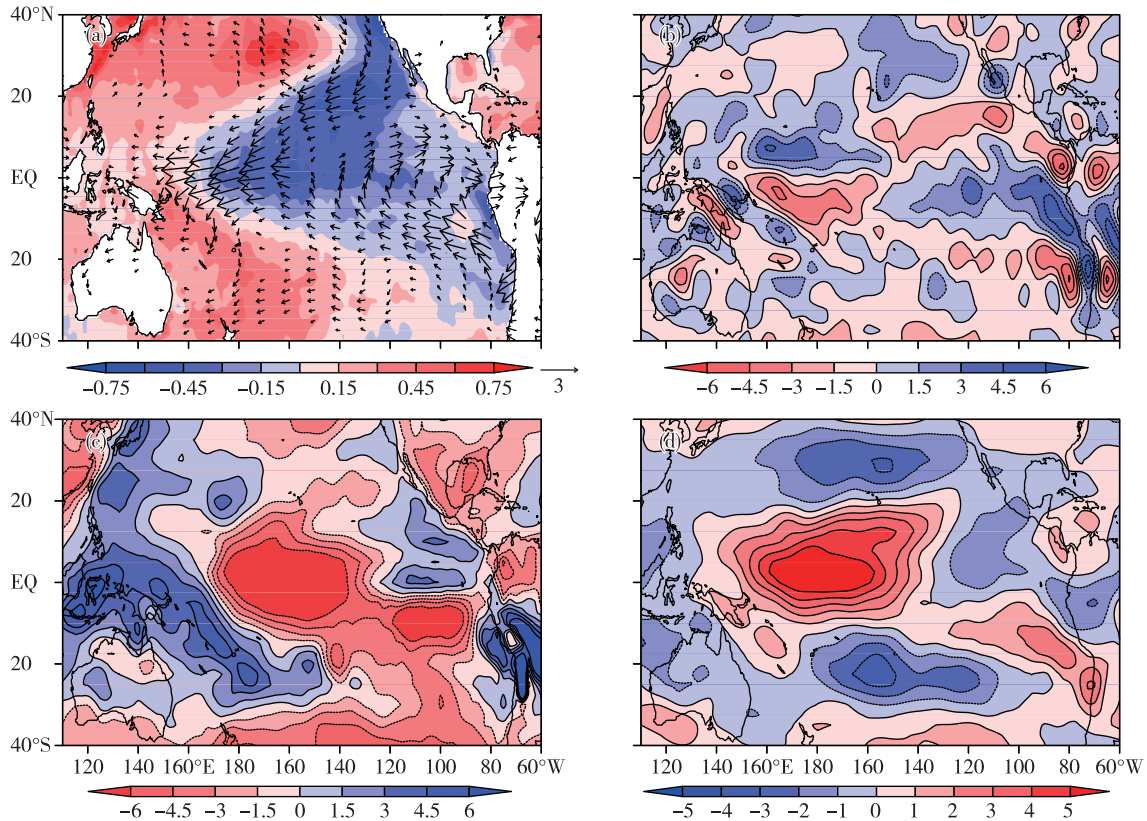


图2 20世纪90年代前(1986—1997年)后(1998—2009年)热带太平洋环境场的差异(后期-前期;a.海面温度和850 hPa风场,填色表示海面温度,单位:℃,箭头表示850 hPa风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;b.850 hPa涡度,填色,单位: 10^{-6}s^{-1} ;c.700 hPa相对湿度,填色,单位:%;d.纬向垂直风切变,填色,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;图片引自 HONG et al.^[18])

Fig.2 Background environment difference between the period of 1998–2009 and 1986–1997 over the tropical Pacific (a. SST and horizontal wind at 850 hPa, colored area for SST, units: $^{\circ}\text{C}$, arrow for horizontal wind at 850 hPa, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; b. vorticity at 850 hPa, colored area, units: 10^{-6}s^{-1} ; c. relative humidity at 700 hPa, colored area, units: %; d. vertical wind shear of zonal wind, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; figures cited from HONG et al.^[18])

致了1998年之后的大尺度环境不利于热带气旋活动。HSU et al.^[20]单独检验了10—12月的西北太平洋热带气旋频数变化,发现频数与SST在1995年都出现了显著的突变减少。通过数值试验,他们发现SST突变引起了西北太平洋大部分区域动力条件的变化,从而不利于1995年之后西北太平洋的热带气旋活动。

太平洋SST的年代际变化还通过调控ENSO事件的不对称性影响了热带气旋频数^[21]。同样是在20世纪90年代后期以后,太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)转为负相位,中部型ENSO事件出现的频数远多于东部型ENSO事件^[21-22],其中中部型拉尼娜又远多于中部型厄尔尼诺。在中部型拉尼娜年份,冷海温激发反气旋异常,导致西北太平洋热带气旋生成频数偏少。因此1998年后偏多的中部型拉尼娜事件导致了西北太平洋热带气旋生成频数的减少^[22]。而LIU and

CHEN^[23]还认为中部型ENSO事件自身的变化也导致了其影响的年代际增强。他们发现20世纪90年代早期以来中部型厄尔尼诺的持续时间增长、SST异常范围增大,因此更能够影响到西北太平洋夏季热带气旋频数。

西北太平洋夏秋季的热带气旋不仅受到太平洋SST异常的影响,大西洋SST变化的贡献同样不能忽略。ZHANG et al.^[24]发现大西洋经向模态(Atlantic meridional mode, AMM)与西北太平洋东南部热带气旋生成呈现负相关。大西洋增暖通过沃克环流的变化导致西北太平洋垂直风切变的增强,从而抑制西北太平洋热带气旋生成。因此近期的AMM正相位可能是西北太平洋热带气旋频数减少的原因之一。ZHANG et al.^[25]进一步研究指出大西洋多年代涛动(Atlantic multidecadal oscillation, AMO)对西北太平洋热带气旋频数减少的作用甚至大于太平洋的作用。通过观测与数值实验,他们发

现与 AMO 相关的大西洋增暖对西北太平洋垂直风切变增强的贡献更大,而太平洋 SST 的年代际变化与人类活动强迫的作用是次要的。

除了 SST 变化,与热带气旋紧密联系的天气系统的变化也直接影响了热带气旋活动。西北太平洋季风槽在 20 世纪 90 年代后期之后出现了减弱现象,这可能是夏秋季热带气旋频数减少的原因之一^[26-27]。季风槽的西退导致了西北太平洋东南部热带气旋生成所需要的扰动和能量减少,因此能使东南部区域的热带气旋生成频数减少^[26]。而 HSU et al.^[27]从季节内振荡(intraseasonal oscillation, ISO)与天气尺度涡旋(synoptic-scale eddy, SSE)的年代际变化角度讨论了秋季热带气旋生成所需能量的变化。他们指出,在 1998 年之前季节内振荡与天气尺度涡旋都偏强,热带气旋能够因更多的正压能量转换而获得更多动能,从而生成和发展。而在 1998 年以后,因季节内振荡与天气尺度涡旋的减弱,导致了热带气旋频数减少。HUANGFU et al.^[28]发现中太平洋的对流活动减弱也导致了西北太平洋夏秋热带气旋生成数量的年代际减少:20 世纪 90 年代后期之后,西北太平洋东南部(10°N~20°N, 150°E~180°)相对涡度减弱、低层辐合与高层辐散减小、低层相对湿度减小、垂直风切变增大、下沉气流异常;而中太平洋对流异常减弱又导致了西北太平洋东南部低纬度地区的热带低压型波动减少,所以在此区域热带气旋的生成频数减少。

此外热带气旋频数的减少还可以从气溶胶的角度进行解释。TAKAHASHI et al.^[29]利用模式发现气溶胶排放通过调控多年代际 SST 变化影响了垂直风切变与低层涡度,对夏秋季西北太平洋东南部热带气旋频数减少的贡献达到了 60%。他们进一步利用数值模拟指出,虽然当前气溶胶的影响十分重要,未来东亚气溶胶排放减少的情景下全球变暖的影响又会成为主要作用。

值得注意的是,西北太平洋热带气旋生成频数在 5 月出现了增加趋势(图 3)^[30-31]。5 月热带气旋多因南海夏季风活动在南海、菲律宾附近海域生成。南海夏季风在 1999 年之后变强且爆发日期变早^[31],南海夏季风爆发后季风槽在西太平洋的偏早建立也带来了有利的大尺度环境,导致 5 月南海和菲律宾海生成更多的热带气旋^[26]。

1.2 强热带气旋频数的增加及其原因

一些研究表明,夏秋季西北太平洋强热带气旋的频数呈现增加的趋势(图 4)^[32-34]。强热带气旋

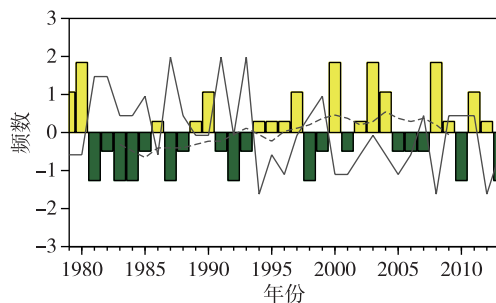


图 3 1979—2013 年 5 月西北太平洋热带气旋频数标准化时间序列(柱状图)及其 9 a 滑动平均(黑色虚线)(黑色实线代表南海夏季风爆发的日期;图片引自 HUANGFU et al.^[30])

Fig.3 Normalized time series (bar) of frequency of tropical cyclones in the western North Pacific in May from 1979 to 2013 and their 9-year moving average (black dashed line) (black solid line for onset date of the South China Sea summer monsoon; figure cited from HUANGFU et al.^[30])

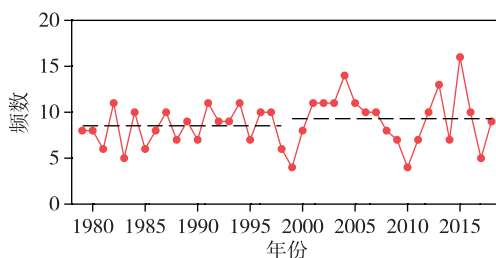


图 4 西北太平洋强台风(intense typhoon, ITY, $V_{\max} \geq 96$ kn)频数年变化(图片引自 SHAN and YU^[34])

Fig.4 Annual change in frequency of intense typhoons (ITY, $V_{\max} \geq 96$ knots) over the western North Pacific (figure cited from SHAN and YU^[34])

频数的增加可能与全球变暖有关。在全球变暖背景下,热带气旋导致的降水增加,从而降低了表层海水的盐度、减弱了强热带气旋中心附近的冷水上翻作用,因此热带气旋更易增强至较大强度^[32]。1998 年以后全球增暖出现了减缓的现象,但在增暖减缓期西北太平洋低纬度地区整体 SST 的增温仍是显著的^[33],且热带气旋附近的 SST 增暖也是显著的^[35],这有利于热带气旋的发展增强^[33]。自 20 世纪 70 年代末以来,夏秋季西北太平洋西部的强热带气旋频数比例几乎翻了一番,而西北太平洋东部强热带气旋的频数比例几乎没有发生任何变化^[36]。1998 年的太平洋气候突变之后^[18],太平洋 SST 出现了类似拉尼娜的异常分布,西北太平洋西部海面温度增高,东南部海面温度降低。在这样的 SST 分布驱动下,西北太平洋西部的低层涡度、相对湿度等环境条件变得有利于热带气旋活动,引导气流变

化更有利于热带气旋登陆,因此夏秋季东亚沿海地区变得更易受到强热带气旋的威胁^[36-37]。西北太平洋东部以垂直风切变为主的动力条件则变得不利于热带气旋活动。还有文章从 SST 变化原因的角度指出东部的 SST 增暖被拉尼娜型 SST 的降温作用抵消,因此强热带气旋的生成数量在西北太平洋东部变化不大^[38]。

然而强热带气旋频数是否增加仍有一些争论。例如 SOBEL et al.^[39]认为在观测中强热带气旋频数的变化趋势并不显著。其原因主要是近期的人为气溶胶排放对气候有冷却作用,抵消了全球增暖对强热带气旋频数的增加作用。他们指出这种抵消作用在未来增暖进一步加强的背景下将会变得不再重要,从而使得强热带气旋频数出现显著增加。而 BARCIKOWSKA et al.^[40]使用较长时间的热带气旋资料,在观测中没有发现西北太平洋强热带气旋年频数有增加的长期趋势。他们提出不同再分析资料及热带气旋最佳路径数据集之间存在着差异和不确定性,强热带气旋频数也存在着年代际变化,因此对热带气旋的研究还需要十分慎重。

2 热带气旋活动位置

2.1 西北迁移及西向迁移

太平洋气候模态在 20 世纪 90 年代中后期的突变^[18]不仅导致了西北太平洋夏秋季热带气旋频数

的减少^[6-7,14,16-23],还导致了热带气旋平均生成位置的西北迁移。如前文所述,20 世纪 90 年代之后在西北太平洋东南部区域,以垂直风切变为主的动力条件变得不适合热带气旋生成发展^[6-7,17-20],这是热带气旋平均活动位置出现西北迁移的原因之一。可以看出从大西洋、太平洋的多年代际变化,到全球变暖的影响,都是西北太平洋东南部环境变化的可能原因。

此外有研究直接考虑了西北太平洋热带气旋的年平均生成位置。例如秋季热带气旋的位置变化得到了较多关注(图 5)^[41-42]。HU et al.^[41]从 ENSO 多样性变化的角度探究了秋季热带气旋位置西北迁移的原因。中部型与东部型 ENSO 事件对西北太平洋季风槽与热带对流层高空槽(tropical upper-tropospheric trough, TUTT, 又称洋中槽)的相互关系有着显著不同的影响,即两者的东西进退在不同 ENSO 类型下差别显著,进而导致了热带气旋的生成位置也有显著差别。1998 年后更加频繁的中部型拉尼娜事件对秋季热带气旋的西北迁移起到了贡献。CAO et al.^[42]进一步研究这种西北迁移的可能影响机制,从而发现秋季西北太平洋热带气旋的西北迁移不仅受到了 20 世纪 90 年代太平洋气候突变的影响,还与季节内振荡在西北太平洋东南部的衰减有关。季节内振荡在近期活动位置更加偏西北方向,因此有利于热带气旋的年代际西北迁移变化。

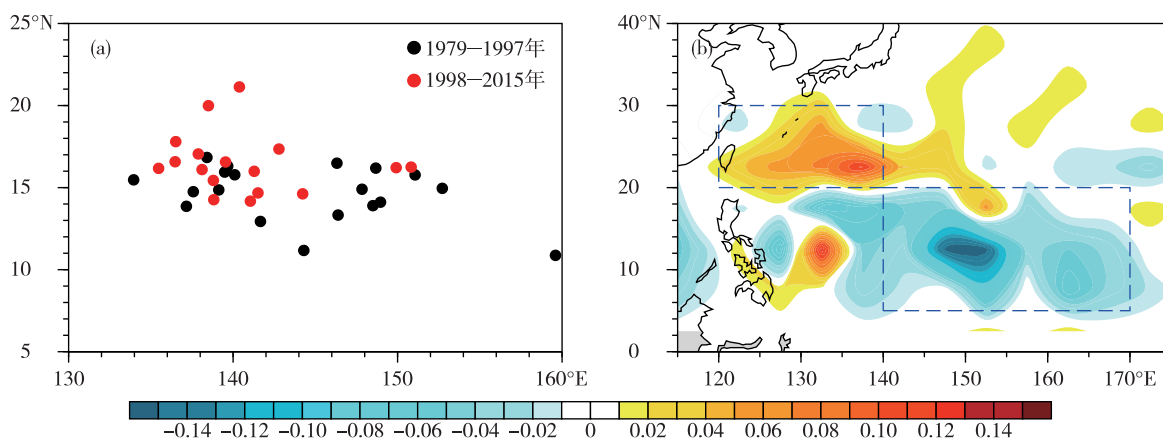


图 5 1979—2015 年平均秋季(9—11 月)热带气旋生成位置(a;黑点表示 1979—1997 年,红点表示 1998—2015 年)以及热带气旋生成频数年代际差异(填色)的空间分布(b;蓝色矩形框表示差异最显著的区域)(图片引自 CAO et al.^[42])

Fig.5 Distribution of average tropical cyclone genesis location in autumn (during September and November) from 1979 to 2015 (a; black and red dots for periods from 1979 to 1997 and from 1998 to 2015, respectively) and distribution of interdecadal difference (colored area) in tropical cyclone frequency between two periods (b; blue rectangle for the most significant area of difference) (figures cited from CAO et al.^[42])

少部分文献单独研究了热带气旋的西移变化。WU et al.^[43]发现太平洋洋中槽从1979年到2012年显著向西移动,导致夏秋季西北太平洋热带气旋的平均生成位置也出现西移,而洋中槽的这种变化可能在一定程度上受到了全球变暖的影响。洋中槽可以导致其下方出现偏强的垂直风切变,对西北太平洋东部的热带气旋生成不利,进而调控热带气旋的生成位置。WANG and WU^[44]进一步发现洋中槽的变化与 ENSO 的相位有关,即 El Niño 事件时洋中槽东移,而拉尼娜事件时洋中槽西移。1998年后中部型拉尼娜事件显著变多^[21-22,41],所以近期洋中槽的平均位置出现显著西移。

2.2 极向迁移及其原因

在全球变暖的背景下热带环流的变化是研究的热点,因此与热带环流扩张有关的热带气旋活动

极向迁移经常被单独讨论。西北太平洋热带气旋的年平均生成位置及其达到生命史最大强度 (lifetime maximum intensity, LMI) 时的位置均有极向迁移的趋势(图6)。KOSSIN et al.^[45]将此归因于夏秋季垂直风切变和潜在强度 (potential intensity, PI) 的变化、热带环流扩张和人类活动的共同影响。MOON et al.^[46]指出全球热带气旋的极向迁移受不同洋区热带气旋频数的影响,特别是北半球洋区。他们发现热带气旋频数变化对极向迁移的贡献与平均经向环流变化的贡献相当。西北太平洋热带气旋数量最多,因此对北半球 LMI 的极向迁移影响较大。凭借每年生成的热带气旋数量,西北太平洋区域热带气旋的极向迁移趋势主导了北半球的热带气旋趋势。他们还认为北半球一些多年代际振荡相位的转变可能会导致未来的极向迁移趋势出现逆转。

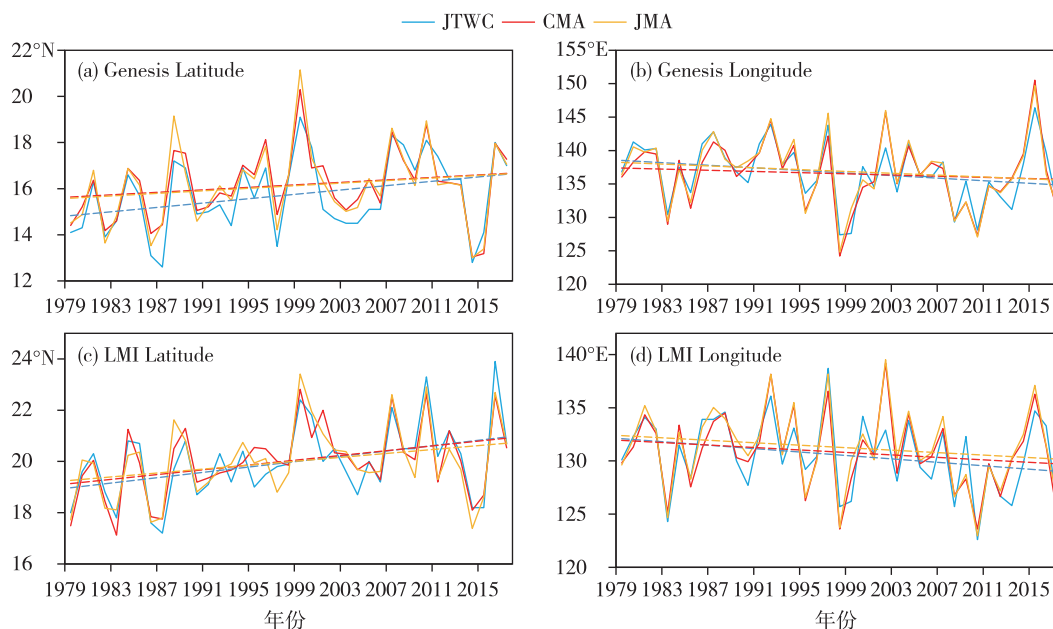


图6 1979—2017年6—11月西北太平洋热带气旋平均生成纬度(a)、平均生成经度(b)、平均LMI(生命史最大强度)纬度(c)和平均LMI经度(d)(直线为线性趋势;红色为CMA数据,蓝色为JTWC数据,橙色为JMA数据;这里使用了KOSSIN et al.^[45]的研究方法以找出热带气旋LMI位置)

Fig.6 Average genesis latitude (a), genesis longitude (b), LMI (lifetime maximum intensity) latitude (c), and LMI longitude (d) of tropical cyclone over the western North Pacific between June and November from 1979 to 2017 (straight line for linear trend; red, blue, and orange lines for data from CMA, JTWC, and JMA, respectively; here the LMI location of tropical cyclone is defined by KOSSIN et al.^[45])

热带气旋极向迁移可能与哈得来环流的扩张有关^[47-48]。STUDHOLME and GULEV^[47]将哈得来环流的极向迁移变化归结于拉尼娜型海面温度梯度,导致了热带垂直风切变的增加与副热带垂直风切变的减少。近期大多数洋区哈得来环流上升支的高层出现下沉异常,可能导致了低纬度地区垂直稳定度增加,从而不利于对流活动,抑制了夏秋季

低纬度热带气旋生成^[48]。哈得来环流的这种变化可能是其极向移动的信号,因此极向移动的有利环境导致热带气旋平均生成位置和LMI向极迁移。

LMI在西北太平洋的变化最为明显^[46]。DALOZ and CAMARGO^[49]认为有利条件的向北迁移导致了西北太平洋热带气旋生成位置和LMI的极向迁移。SONG and KLOTZBACH^[50]发现在1980

年后西北太平洋热带气旋 LMI 的极向迁移趋势显著,主要原因有两个:一是 IPO 导致的热带气旋生成位置变动,二是因西北太平洋 SST 变暖导致了热带气旋生成位置和 LMI 之间距离的增加。ZHAN and WANG^[51]发现弱的热带气旋的极向变化幅度明显大于强热带气旋的极向变化幅度。近期增强的沃克环流导致了西北太平洋东部的东风异常和反气旋环流异常,在该地区形成的热带气旋较少但较强,所以弱热带气旋主导了夏秋西北太平洋热带气旋极向迁移^[52]。

SUN et al.^[53]注意到在 1999 年之后的增暖减缓期,西北太平洋热带气旋的极向迁移趋势发生了逆转。SST 的变化可能影响了潜在强度和大尺度环流,继而逆转了热带气旋的极向迁移趋势。

3 影响我国的热带气旋活动变化

在太平洋气候突变对热带气旋频数产生影响的同时,热带气旋对东亚地区的影响也有变化。热带气旋生成位置偏西加上引导气流的变化使得热带气旋更加容易影响中国东南部地区^[9,18]。HE et al.^[9]将印度洋-太平洋 SST 的共同变化作为整体进行研究,发现它们的气候突变导致了 1998 年后西北太平洋热带气旋西北行路径的增加以及中国东南部热带气旋活动频数的增加。HONG et al.^[18]的模式结果表明太平洋的 SST 异常模态(太平洋西部类似 K 型的增暖异常)使得西北太平洋西部的热力条件变好,因此热带气旋生成频数在西北太平洋西部增加。同时这样的 SST 异常又使引导气流向西扩展,将热带气旋引导至中国东南部地区,使中国面临更大的热带气旋威胁。HSU et al.^[27]在研究季节内振荡与天气尺度涡旋年代际变化的同时也研究了热带气旋路径分布的变化。他们发现在 1998 年前更多的热带气旋会经过菲律宾海、南海或者转向日本,而登陆或者影响中国东南部的热带气旋频数则偏少。而在 1998 年后,这个关系出现反转,影响中国的热带气旋频数增加。通过一个能量诊断方程,他们指出这种变化与天气尺度涡旋在东海附近获得的动能多少有关。

前文已经提到,西北太平洋西部发生强热带气旋的几率相比上个世纪有所增加^[32-38],因此我国面临的热带气旋风险可能有所增加。YAO et al.^[54]利用中国气象局热带气旋最佳路径资料分析了登陆我国的强台风(最大风速大于 $41.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)频数是否有增加。结果显示 2004 年左右登陆强台风频数

出现突然增加(图 7)。在 2004 年之后的时期,中国大陆温度明显升高、近海海水热含量显著增加,既有利于热带气旋快速增强,又有利于气流引导热带气旋登陆中国。然而 ZHANG et al.^[55]发现登陆我国南方的台风(最大风速大于 $32.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)频数虽然有所增加,但趋势并不显著。这种差异可能是由于选取的热带气旋强度不同所导致。

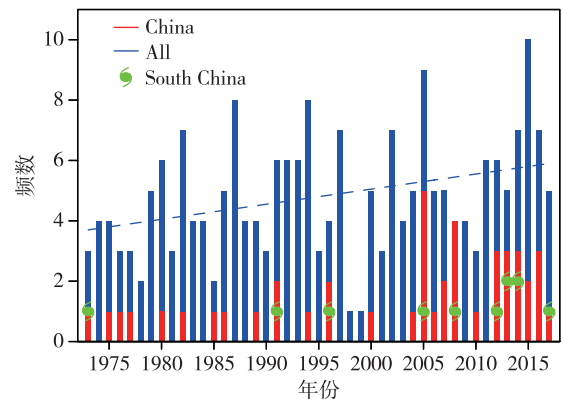


图 7 1973—2017 年 7—9 月西北太平洋强台风频数(蓝色柱)、登陆中国的强台风频数(红色柱)以及登陆中国南部的强台风频数(绿色标志)(图片引自 YAO et al.^[54])

Fig. 7 Frequency of western North Pacific severe typhoon (STY) (blue bar), frequency of landfalling STY in China (red bar), and frequency of landfalling STY in southern China (green symbol) between July and September from 1973 to 2017 (figure cited from YAO et al.^[54])

4 总结与讨论

目前学术界对西北太平洋热带气旋生成及路径的气候变化有较一致的描述:如图 8 所示,自 20 世纪 70 年代末期以来,全球变暖背景下西北太平洋夏秋季热带气旋生成频数呈年代际减少且热带气旋活动有西北偏移的趋势。在人类活动、自然变率以及其他未知因素的影响下,太平洋以及印度洋 SST 变化导致了大尺度环境的变化,其中垂直风切变(VWS)的增强可能是热带气旋频数减少的主要原因。但有研究表明北大西洋的 SST 增暖通过沃克环流的变化对西北太平洋热带气旋生成减少的影响也非常重要。因此太平洋、印度洋和大西洋对西北太平洋热带气旋活动的调控作用关系复杂,仍有诸多争议。与热带气旋有紧密联系的天气系统,如季风槽、洋中槽和副热带高压的变化,通过垂直风切变、能量转化等的改变对热带气旋的年代际变化也起到了直接作用。此外西北太平洋西部强热带

气旋的频数呈现增加的趋势且可能与全球变暖特别是东亚近海 SST 的增暖有关。但这种趋势在观测与未来模拟中的变化也存在许多不确定性。西北太平洋热带气旋生成位置以及路径均出现了西移、西北移的变化,而这种变化可能受到了 ENSO 变异的调控以及 20 世纪 90 年代中后期太平洋气候突变的影响。全球变暖的背景下,热带环流的向北扩张导致了热带气旋有利环境的北移,西北太平洋热带气旋活动也出现极向迁移的趋势。因此,未来中高纬度地区受热带气旋影响的风险可能会有所增加。

目前关于西北太平洋热带气旋生成及路径的气候学研究还存在一些问题亟待解决。第一,西北太平洋不同机构的热带气旋数据存在一定差异^[56-61],并且卫星观测前的数据的可靠性问题也不可忽视^[62-63]。因此,检验短期观测资料反映的变化是否可靠,不同机构数据反映的变化是否存在差异,都是未来改进的重要方向。第二,热带气旋的长期预测受限于观测资料的精度和长度,无法得到热带气旋与气候因子的变化关系。因此针对热带气旋的观测方法仍有很大的改进和发展空间^[64-65]。第三,学界对热带气旋发生发展的机制仍然认识有限,SST 变化究竟如何影响热带气旋还需要具体的理论解释,同时还缺乏季节内振荡对热带气旋激发作用的详细讨论。总之,热带气旋已有的变化和未来的变化仍有很大的不确定性,制作可靠均一的热带气旋数据库,建立有效的热带气旋预报模式,揭示热带气旋发生发展的理论规律是未来热带气旋活动气候学研究的工作重点。

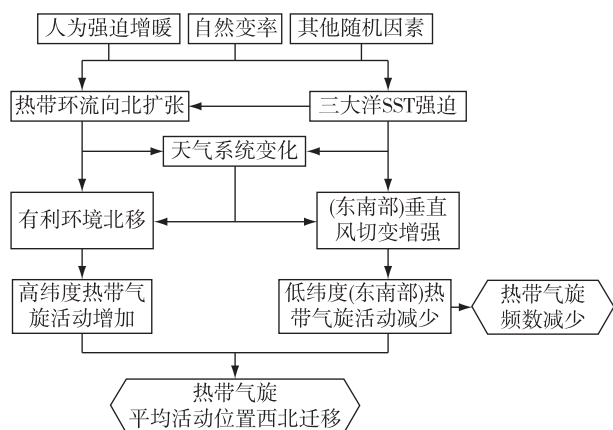


图 8 近几十年西北太平洋热带气旋活动气候变化原因示意图

Fig.8 Schematic diagram on causes of climate change in tropical cyclone activity in the western North Pacific in recent decades

参考文献:

- [1] CHAN J C L. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Meteor Atmos Phys, 2005, 89(1/2/3/4): 143-152.
- [2] ZHANG Q, WU L G, LIU Q F. Tropical cyclone damages in China 1983-2006 [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2009, 90(4): 489-495.
- [3] 张娇艳, 吴立广, 张强. 全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析 [J]. 热带气象学报, 2011, 27(4): 442-454.
- [4] 赵秀兰. 近 50 年登陆我国热带气旋时空特征及对农业影响研究综述 [J]. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 1-11.
- [5] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [6] HU F, LI T, LIU J, et al. Decrease of tropical cyclone genesis frequency in the western North Pacific since 1960s [J]. Dyn Atmos Oceans, 2018, 81: 42-50.
- [7] CHOI Y M, HA K J, HO C H, et al. Interdecadal change in typhoon genesis condition over the western North Pacific [J]. Climate Dyn, 2015, 45(11/12): 3243-3255.
- [8] YONG L, CHEN D. An interdecadal change in the interannual variability of boreal summer tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific around the early 1990s [J]. Theor Appl Climatol, 2018, 137(3/4): 1843-1853.
- [9] HE H Z, YANG J, GONG D Y, et al. Decadal changes in tropical cyclone activity over the western North Pacific in the late 1990s [J]. Climate Dyn, 2015, 45(11): 3317-3329.
- [10] LIU Y, HUANG P, CHEN G H. Impacts of the combined modes of the tropical Indo-Pacific sea surface temperature anomalies on the tropical cyclone genesis over the western North Pacific [J]. Int J Climatol, 2019, 39(4): 2108-2119.
- [11] MANTUA N J, HARE S R, ZHANG Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on Salmon production [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [12] SALINGER M J, RENWICK J A, MULLAN A B. Interdecadal Pacific Oscillation and South Pacific climate [J]. Int J Climatol, 2001, 21(14): 1705-1721.
- [13] TRENBERTH K E. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1990, 71(7): 988-993.
- [14] HONG C C, WU Y-K, LI T, et al. The climate regime shift over the Pacific during 1996/1997 [J]. Climate Dyn, 2014, 43(1/2): 435-446.

- [15] CAMARGO S J, ROBERTSON A W, BARNSTON A G, et al. Clustering of eastern North Pacific tropical cyclone tracks: ENSO and MJO effects [J]. *Geochem Geophys Geosy*, 2008, 9(6): 1-23.
- [16] WANG X D, LIU H L. PDO modulation of ENSO effect on tropical cyclone rapid intensification in the western North Pacific [J]. *Climate Dyn*, 2016, 46(1/2): 15-28.
- [17] ZHAO J W, ZHAN R F, WANG Y Q, et al. Contribution of the interdecadal Pacific oscillation to the recent abrupt decrease in tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific since 1998 [J]. *J Climate*, 2018, 31(20): 8211-8224.
- [18] HONG C C, WU Y K, LI T. Influence of climate regime shift on the interdecadal change in tropical cyclone activity over the Pacific Basin during the middle to late 1990s [J]. *Climate Dyn*, 2016, 47(7/8): 2587-2600.
- [19] LIU K S, CHAN J C L. Inactive period of western North Pacific tropical cyclone activity in 1998 - 2011 [J]. *J Climate*, 2013, 26(8): 2614-2630.
- [20] HSU P C, CHU P S, MURAKAMI H, et al. An abrupt decrease in the late-season typhoon activity over the western North Pacific [J]. *J Climate*, 2014, 27(11): 4296-4312.
- [21] KIM H K, SEO K H, YEH S W, et al. Asymmetric impact of Central Pacific ENSO on the reduction of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific since the late 1990s [J]. *Climate Dyn*, 2020, 54(1/2): 661-673.
- [22] AN S I. Impact of Pacific decadal oscillation on frequency asymmetry of El Niño and La Niña events [J]. *Adv Atmos Sci*, 2018, 35(5): 493-494.
- [23] LIU Y, CHEN G H. Intensified influence of the ENSO Modoki on boreal summer tropical cyclone genesis over the western North Pacific since the early 1990s [J]. *Int J Climatol*, 2018, 38(s1): e1258-e1265.
- [24] ZHANG W, VECCHI G A, VILLARINI G, et al. Modulation of western North Pacific tropical cyclone activity by the Atlantic Meridional Mode [J]. *Climate Dyn*, 2017, 48(1/2): 631-647.
- [25] ZHANG W, VECCHI G A, MURAKAMI H, et al. Dominant role of Atlantic multidecadal oscillation in the recent decadal changes in western North Pacific tropical cyclone activity [J]. *Geophys Res Lett*, 2018, 45(1): 354-362.
- [26] HUANGFU J L, HUANG R H, CHEN W, et al. Interdecadal variation of tropical cyclone genesis and its relationship to the monsoon trough over the western North Pacific [J]. *Int J Climatol*, 2017, 37(9): 3587-3596.
- [27] HSU P C, LEE T H, TSOU C H, et al. Role of scale interactions in the abrupt change of tropical cyclone in autumn over the Western North Pacific [J]. *Climate Dyn*, 2017, 49(9/10): 3175-3192.
- [28] HUANGFU J L, HUANG R H, CHEN W. Interdecadal variation of tropical cyclone genesis and its relationship to the convective activities over the central Pacific [J]. *Climate Dyn*, 2018, 50(7): 1439-1450.
- [29] TAKAHASHI C, WATANABE M, MORI M. Significant aerosol influence on the recent decadal decrease in tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(18): 9496-9504.
- [30] HUANGFU J L, HUANG R H, CHEN W. Interdecadal increase of tropical cyclone genesis frequency over the western north Pacific in May [J]. *Int J Climatol*, 2017, 37(2): 1127-1130.
- [31] XU S B, WANG B. Enhanced western North Pacific tropical cyclone activity in May in recent years [J]. *Climate Dyn*, 2014, 42(9/10): 2555-2563.
- [32] BALAGURU K, FOLTZ G R, LEUNG L R, et al. Global warming-induced upper-ocean freshening and the intensification of super typhoons [J]. *Nature Commun*, 2016, 7: 13670.
- [33] MEI W, XIE S P, PRIMEAU F, et al. Northwestern Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures [J]. *Sci Adv*, 2015, 1(4): e1500014.
- [34] SHAN K Y, YU X P. Interdecadal variability of tropical cyclone genesis frequency in western North Pacific and South Pacific ocean basins [J]. *Environ Res Lett*, 2020, 15: 0640030.
- [35] DEFFORGE C L, MERLIS T M. Observed warming trend in sea surface temperature at tropical cyclone genesis [J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(2): 1034-1040.
- [36] ZHAN R F, WANG Y Q, ZHAO J W. Intensified mega-ENSO has increased the proportion of intense tropical cyclones over the western Northwest Pacific since the late 1970s [J]. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(23): 11959-11966.
- [37] ZHAO J W, ZHAN R F, WANG Y Q. Global warming hiatus contributed to the increased occurrence of intense tropical cyclones in the coastal regions along East Asia [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 6023.
- [38] WANG B, LIU J, KIM H-J, et al. Northern Hemisphere summer monsoon intensified by mega-El Niño/southern oscillation and Atlantic multidecadal oscillation [J]. *PNAS*, 2013, 110(14): 5347-5352.
- [39] SOBEL A H, CAMARGO S J, HALL T M, et al. Human influence on tropical cyclone intensity [J]. *Science*, 2016, 353(6296): 242-246.

- [40] BARCIKOWSKA M, FESER F, ZHANG W, et al. Changes in intense tropical cyclone activity for the western North Pacific during the last decades derived from a regional climate model simulation [J]. *Climate Dyn*, 2017, 49(9/10):2931-2949.
- [41] HU C D, ZHANG C Y, YANG S, et al. Perspective on the northwestward shift of autumn tropical cyclogenesis locations over the western North Pacific from shifting ENSO [J]. *Climate Dyn*, 2018, 51(7/8):2455-2465.
- [42] CAO X, LIU Y, WU R G, et al. Northwestwards shift of tropical cyclone genesis position during autumn over the western North Pacific after the late 1990s [J]. *Int J Climatol*, 2020, 40(3):1885-1899.
- [43] WU L G, WANG C, WANG B. Westward shift of western North Pacific tropical cyclogenesis [J]. *Geophys Res Lett*, 2015, 42(5):1537-1542.
- [44] WANG C, WU L G. Interannual shift of the tropical upper-tropospheric trough and its influence on tropical cyclone formation over the western North Pacific [J]. *J Climate*, 2016, 29(11):4203-4211.
- [45] KOSSIN J P, EMANUEL K A, VECCHI G A. The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity [J]. *Nature*, 2014, 509(7500):349-352.
- [46] MOON I J, KIM S H, KLOTZBACH P, et al. Reply to comment on 'Roles of interbasin frequency changes in the poleward shifts of maximum intensity location of tropical cyclones' [J]. *Environ Res Lett*, 2016, 11(6):068002.
- [47] STUDHOLME J, GULEV S. Concurrent changes to Hadley Circulation and the meridional distribution of tropical cyclones [J]. *J Climate*, 2018, 31(11):4367-4389.
- [48] SHARMILA S, WALSH K J E. Recent poleward shift of tropical cyclone formation linked to Hadley cell expansion [J]. *Nat Climate Change*, 2018, 8(8):730-736.
- [49] DALOZ A S, CAMARGO S J. Is the poleward migration of tropical cyclone maximum intensity associated with a poleward migration of tropical cyclone genesis? [J]. *Climate Dyn*, 2018, 50(1/2):705-715.
- [50] SONG J J, KLOTZBACH P J. What has controlled the poleward migration of annual averaged location of tropical cyclone lifetime maximum intensity over the western North Pacific since 1961? [J]. *Geophys Res Lett*, 2018, 45(2):1148-1156.
- [51] ZHAN R F, WANG Y Q. Weak tropical cyclones dominate the poleward migration of the annual mean location of lifetime maximum intensity of Northwest Pacific tropical cyclones since 1980 [J]. *J Climate*, 2017, 30(17):6873-6882.
- [52] PARK D S R, HO C H, KIM J H, et al. Spatially inhomogeneous trends of tropical cyclone intensity over the western North Pacific for 1977-2010 [J]. *J Climate*, 2013, 26(14):5088-5101.
- [53] SUN Y, LI T, ZHONG Z, et al. A recent reversal in the poleward shift of western North Pacific tropical cyclones [J]. *Geophys Res Lett*, 2018, 45(18):9944-9952.
- [54] YAO C, XIAO Z X, YANG S, et al. Increased severe landfall typhoons in China since 2004 [J]. *Int J Climatol*, 2020, (2020-07-13) [2020-09-03]. DOI:10.1002/joc.6746.
- [55] ZHANG C Y, HU C D, HUANG G, et al. Perspective on landfalling frequency and genesis location variations of southern China typhoon during peak summer [J]. *Geophys Res Lett*, 2019, 46(12):6830-6838.
- [56] 张冬娜, 张翰, 程旭华, 等. 西北太平洋热带气旋活动的分布及变化特征 [J/OL]. *海洋学研究*, 2020, (2020-04-22) [2020-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1330.P.20200421.1633.004.html>.
- [57] YU H, HU C M, JIANG L Y. Comparison of three tropical cyclone intensity datasets [J]. *Acta Meteor Sinica*, 2007, 21(1):121-128.
- [58] 邹燕, 赵平. 几种台风资料的对比及台风年鉴数据的订正 [J]. *热带气象学报*, 2009, 25(3):295-299.
- [59] 梁进, 任福民, 杨修群. 中美两套西北太平洋热带气旋资料集的差异分析 [J]. *海洋学报*, 2010, 32(1):10-22.
- [60] REN F M, LIANG J, WU G X, et al. Reliability analysis of climate change of tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. *J Climate*, 2011, 24(22):5887-5898.
- [61] SONG J J, WANG Y, WU L G. Trend discrepancies among three best track data sets of western North Pacific tropical cyclones [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2010, 115(D12):D12128.
- [62] MOON I J, KIM S H, CHAN J C L. Climate change and tropical cyclone trend [J]. *Nature*, 2019, 570(7759):E3-E5.
- [63] LANDSEA C W, HARPER B A, HOARAU K, et al. Climate change: Can we detect trends in extreme tropical cyclones? [J]. *Science*, 2006, 313(5786):452-454.
- [64] DVORAK V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery [J]. *Mon Wea Rev*, 1975, 103(5):420-430.
- [65] 王新, 唐世浩, 曹治强. 风云气象卫星“一带一路”热带气旋监测能力与最新进展 [J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(2):10-18.