

王依然,袁媛,陈丽娟,等,2026. 2024 年西北太平洋夏季和秋季台风活动异常特征的差异对比[J]. 气象,52(7):769-783. Wang Y R, Yuan Y, Chen L J, et al, 2026. Comparative analysis of the anomalous typhoon activity features over western North Pacific during summer and autumn in 2024[J]. Meteor Mon, 52(7):769-783(in Chinese).

2024 年西北太平洋夏季和秋季台风 活动异常特征的差异对比^{*}

王依然 袁媛 陈丽娟 贾小龙

国家气候中心,中国气象局气候预测研究重点开放实验室,北京 100081

提 要: 利用 1979—2023 年中国气象局最佳台风路径资料、2024 年中央气象台台风路径和强度实时业务资料,以及欧洲中期天气预报中心的 ERA5 逐月再分析资料等,对 2024 年西北太平洋台风的特点进行了详细分析,并从台风生成、活动、登陆等 3 个方面揭示该年夏季和秋季台风特征的差异。结果表明,2024 年西北太平洋夏季台风生成个数偏少,生成源地偏北、偏东,极值强度偏弱;初夏的 6 月 1 日至 7 月 18 日无台风生成,盛夏台风频发,多为西北和北上路径;台风登陆个数偏少,登陆强度偏弱。然而,该年秋季台风活跃,生成个数为历史第三多,生成源地偏北、偏西,强度异常偏强;台风活动阶段性、群发性特征突出,多为西行和西北行路径;台风登陆个数偏多,登陆强度偏强。进一步研究表明,2024 年夏季和秋季台风的显著差异与厄尔尼诺次年海温滞后效应、西北太平洋副热带高压异常、热带大气季节内振荡位相转换、南海夏季风爆发和撤退等多种因素密切相关。

关键词: 台风生成,台风活动,台风登陆,台风特征差异,海气系统

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2025. 072803

Comparative Analysis of the Anomalous Typhoon Activity Features over Western North Pacific During Summer and Autumn in 2024

WANG Yiran YUAN Yuan CHEN Lijuan JIA Xiaolong

CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the optimal typhoon track data of China Meteorological Administration (CMA) in 1979—2023, the National Meteorological Centre (NMC) real-time typhoon track and intensity data in 2024 and the monthly ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), we analyze and reveal the different features of typhoons generated over western North Pacific in summer and autumn of 2024 from the following three aspects: their generation, activity and landfall. The results show that the number of typhoons formed in western North Pacific in the summer of 2024 was smaller than normal, their generation sources were more northward and eastward, and their maximum intensities were weaker. No typhoons were generated in the early summer from 1 June to 18 July, but typhoons occurred frequently in midsummer, mostly following northwest- and north-direction tracks. The

^{*} 国家重点研发计划(2024YFC3013100)和中国气象局气候预测研究重点开放实验室青年开放课题基金(26LCPS011)共同资助

2025 年 4 月 10 日收稿; 2025 年 12 月 31 日收修定稿

第一作者:王依然,主要从事台风气候学研究. E-mail: wangyr@cma. gov. cn

通讯作者:袁媛,主要从事气候监测诊断和短期气候预测研究. E-mail: yuany@cma. gov. cn

typhoons making landfall in China were fewer than usual, and their landfall intensities were relatively weak. However, they were more active in autumn. The number of the autumn typhoons ranked the third highest in history, their generation sources were more northward and westward, and their intensities were unusually strong. The autumn typhoon activities were characterized by distinct periodicity and clustering, with most following the westward or northwestward tracks. The number of landfall typhoons was significantly above the normal, and at the same time their landfall intensities were above the average. Further analysis suggests that the significant differences between the summer and autumn typhoons in 2024 were closely correlated to the multiple factors including the lag effect of sea surface temperature in the year following El Niño, the abnormal western North Pacific subtropical high, the phase transition of the Madden-Julian oscillation, the onset and withdrawal of summer monsoon in the South China Sea, and so on.

Key words: typhoon generation, typhoon activity, typhoon landfall, different characteristics of typhoons, air-sea system

引 言

台风是地球上最强大和最具破坏性的天气系统之一,其发生时常伴有狂风、暴雨、风暴潮等灾害性天气,给人类生命和国家财产安全构成威胁。西北太平洋是台风生成最为频繁的海域,全球每年约有三分之一的台风在此生成,也是全球唯一全年各月都有台风生成的海域(陈联寿和丁一汇,1979;赵海坤和吴立广,2015)。而中国位于西北太平洋沿岸,每年平均有 7~8 个台风登陆中国,给中国沿海地区造成数百亿甚至上千亿的直接经济损失。因此探究西北太平洋台风生成、移动和登陆的特点,总结回顾历年台风活动规律以及背后的物理机制有助于更好地预测台风活动特征,对防灾减灾具有重大意义。

在西北太平洋,超过 80% 的台风生成于夏季和秋季,已有研究表明,西北太平洋夏季和秋季台风特征存在显著的季节差异(Huangfu et al, 2017; Hu et al, 2018; Cao et al, 2020)。例如,1949—2016 年期间,西北太平洋夏季和秋季台风生成个数存在此消彼长的反位相关系(Yao et al, 2020);最近 40 年,西北太平洋台风生成个数在秋季呈减少趋势,而夏季台风个数无显著变化(Tan et al, 2024)。在台风生成源地方面,夏季台风在南海北部和菲律宾群岛东侧较为集中,而秋季台风生成源地位置向东南方向移动,在南海海域分布相对分散,在菲律宾群岛东侧存在一个二级聚集区,夏季相比于秋季台风生成源地位置偏北(秦丽娟等, 2015)。自 1998 年以来,西北太平洋台风平均生成位置在夏季和秋季均存在显著的西移,但仅在秋季观测到明显的向极移动

(Wu et al, 2021)。此外,秋季生成强台风和超强台风的比例远高于夏季(Hsu et al, 2014; Yao et al, 2020);夏季台风多为偏北路径,而秋季台风多为偏西路径;与夏季相比,秋季台风登陆点在纬度的跨度上更为集中,主要分布在中国东南沿海区域(姚秀萍和彭思越, 2023)。

台风生成需要有利的大尺度环境条件(Gray, 1968; Emanuel and Nolan, 2004),包括温暖的洋面、较强的低层相对涡度、较弱的垂直风切变、较为湿润的对流层中层等。对于西北太平洋而言,夏季和秋季台风活动主要受大气和海洋环流的影响,如厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、热带印度洋偶极子(IOD)等,可以通过改变大尺度环流场进而影响台风活动。ENSO 作为热带太平洋海温年际变率主模态,对西北太平洋台风活动有重要影响,包括改变沃克环流、西北太平洋副热带高压(WNPSH, 以下简称副高)、绝对涡度、相对湿度、垂直风切变和海温的空间分布等(Chan, 2006; Kim et al, 2011; Zhang et al, 2014; Choi et al, 2015; Wang and Wu, 2016; Huangfu et al, 2017)。研究表明,西北太平洋上空登陆的台风在秋季与赤道中东太平洋的海温异常有显著的相关性,而夏季相关性则较弱;台风源地的季节变化也受 ENSO 影响,厄尔尼诺(El Niño)年夏季台风源地以北移为主,秋季则东移。IOD 也可以通过产生罗斯贝波影响西北太平洋大气环流异常,间接对台风活动产生影响(Pradhan et al, 2011)。当 IOD 事件伴随 El Niño 同时发生时,热带西太平洋地区对流层低层的西风异常加强东扩,使季风槽位置均明显东伸,而季风槽可以提供有利于台风生成的动力和热力大尺度环境条件,包括气旋性涡度,较弱的垂直

风切变,较高的中层相对湿度等(Gray,1968;Zong and Wu,2015;Wang and Wu,2016),使得台风生成位置相较于纯 ENSO 事件偏东(周群和魏立新,2019)。此外,中部型 El Niño 会加强南海夏季热带气旋的活动,而 IOD 正位相若与中部型 El Niño 同时发生,该区域热带气旋活动会进一步加强(Pradhan et al,2011)。并且,相比于中部型 El Niño 事件,与 IOD 联合发生年份的秋季,西北太平洋台风生成位置明显偏东(朱赛智和孟祥风,2015)。

在全球变暖背景下,台风的活动规律也发生了变化,呈现出数量减少但强度增强、登陆比例增加、降水影响增强等特征。过去的研究主要集中对全年或者某个季节的台风活动特征进行分析(刘舸等,2007;董伟杰,2019;吕心艳等,2021;王海平等,2021;向纯怡等,2022;周冠博等,2022;钱奇峰等,2023;姚秀萍和彭思越,2023;聂高臻等,2024),但针对夏季和秋季台风活动的差异性研究仍显不足。2024年,西北太平洋(包括南海,下同)共有26个台风生成,较气候平均值(1991—2020年,25.1个)略偏多0.9个;其中夏季台风生成个数偏少、极值强度偏弱,而秋季台风活跃,强度异常偏强,两季台风活动差异明显,因此有必要研究台风在夏季和秋季变化的特征和成因。本文将详细分析2024年台风的主要特点,从台风生成、活动、登陆等多角度揭示夏季和秋季台风的特征差异,并对造成差异的原因给出初步解释。

1 资料和方法

1979年卫星观测资料开始普及,本文选取1979—2024年为主要研究时段,使用1979—2023年中国气象局(CMA)最佳台风路径资料、2024年中央气象台台风路径和强度实时业务资料。选取达到热带风暴强度以上(即中心最大风速达 $17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上)的热带气旋为研究对象并将其称为台风,台风生成频数的计算参照Wu and Wang(2004)提出的方法,将($0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)区域按格距进行划分,得到空间分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的共512个小网格,网格点上台风频数为该网格点内台风个数累加。本文将6—8月生成的台风定义为夏季台风,9—11月生成的台风定义为秋季台风,气候值取1991—2020年的平均。全文所用时间为北京时间。

使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的

ERA5逐月再分析资料(水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$;Hersbach et al,2020),以及美国国家海洋和大气局(NOAA)发布的月尺度全球海温数据(ERSST v5,水平分辨率为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$;Huang et al,2017)。

文中副高指数参照刘芸芸等(2012)的定义,南亚高压指数参照张琼等(2000)的定义。RMM指数(real-time multivariate Madden-Julian oscillation index)来自国家气候中心建立的热带大气季节内振荡(MJO)监测预测业务系统(吴捷等,2016)。

2 台风生成特征

2.1 夏季台风生成个数偏少,秋季异常偏多

2024年,西北太平洋共有26个台风生成,较常年同期(25.1个)略偏多0.9个(图1a)。其中夏季有8个台风生成,较常年同期(11.2个)偏少3.2个(图1b)。夏季生成的台风数占2024年全年台风生成总数的30.8%,较常年同期(44.6%)明显偏低。尤其6—7月仅2个台风生成,较常年(5.4个)偏少

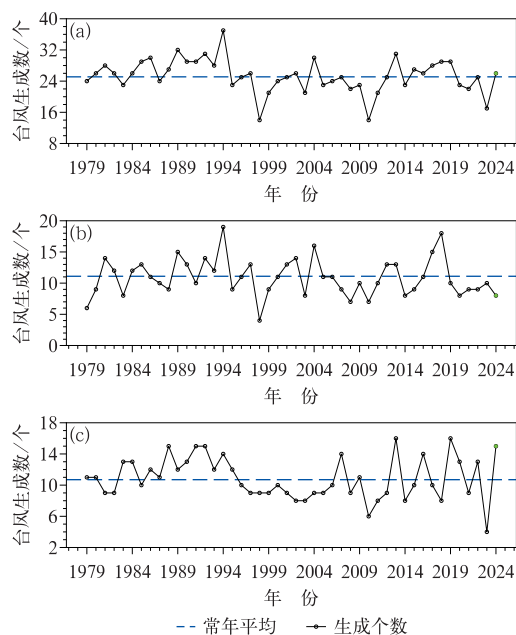


图1 1979—2024年(a)全年,(b)夏季和(c)秋季西北太平洋逐年台风生成个数

Fig. 1 Yearly number of typhoons generated in the western North Pacific in (a) the whole year, (b) summer and (c) autumn from 1979 to 2024

3.4 个,为 1979 年以来历史同期并列第二少。但是,2024 年秋季台风活动频繁,共有 15 个台风生成,为 1979 年以来历史同期并列第三多(图 1c),仅次于 2013 年和 2019 年的 16 个,较常年同期(10.6 个)偏多 4.4 个;其中,9 月生成 8 个(偏多 3.0 个),为 1979 年以来历史同期最多。秋季生成的台风数占全年台风生成总数的 57.7%,较常年同期(42.2%)明显偏高。这种西北太平洋生成台风数夏季少(多)、秋季多(少)的此消彼长的反位相关系在 1979—2024 年期间的发生概率超过 50%,而 2024 年夏季与秋季台风生成数量的差异在 1979—2024 年期间排名第二,仅次于 2018 年。

从常年台风生成个数的月变化(图 2)来看,西北太平洋在 2 月生成个数最少,6—7 月台风活动不断增多且增幅较大,8 月达到峰值,9 月台风生成个数开始减少。而 2024 年,台风在 6—7 月生成异常偏少,却在 9 月达到峰值。分析表明,这与副高的强度和位置以及 MJO 的位相密切相关。

一方面,副高异常偏强、偏西以及西北太平洋持续受到低层异常反气旋环流(WNPAC)控制是导致 2024 年初夏台风生成异常偏少的直接原因;而这样的环流异常与 El Niño 衰减年海温的滞后效应及南海夏季风爆发偏晚有关。监测显示,2024 年初夏,副高西伸脊点偏西特征为 1979 年以来历史同期第二,面积和强度都为历史同期第一(图 3);与此同时,WNPAC 一直持续控制西北太平洋地区,抑制了该地区对流活动的发展,导致台风生成异常偏少。自 2023 年 5 月开始的 El Niño 事件于 2024 年 5 月结束,但由于热带中东太平洋海温影响的滞后效应以及热带印度洋和热带大西洋的暖海温异常,共同

导致了 WNPAC 一直维持到 7 月(Xie et al, 2009; 2016; Yuan and Yang, 2012; Yuan et al, 2012; Lu et al, 2024)。此外,2024 年南海夏季风于 5 月第 6 候(5 月 26 日)爆发,较常年(5 月第 4 候)偏晚 2 候。通常在南海季风爆发前,南海及菲律宾以东洋面主要受高压控制,盛行下沉气流;但随着南海季风的爆发,副高会明显减弱、东退,南海区域开始盛行西南风,季风槽建立,对流活跃(黄菲和李元妮, 2010)。因此,2024 年南海夏季风爆发偏晚也使得季风槽建立偏晚,西北太平洋初夏台风生成数偏少。

另一方面,MJO 位相的调整以及副高强度和位置的变化使得 2024 年 9 月的台风转为异常活跃。Nakazawa(1988)研究表明,大气 MJO 活动对西北太平洋台风的生成有比较明显的调制作用,MJO 的对流增强位相与台风活动增多相对应,当 MJO 在第 2~3 位相时,各种因子均呈现出抑制西太平洋地区对流及台风发展的态势;而在第 5~6 位相则明显有利于对流活动的发展,并为台风生成和发展创造了有利的大尺度环流动力场(李崇银等, 2012)。2024 年 8—9 月,MJO 从第 2~3 位相转换到第 5~6 位相,9 月(图 4b)相比于 8 月(图 4a),为台风生成和发展创造了更为有利的大尺度环流动力场。同时,8 月西北太平洋副高西伸脊点位于 90°E ,强度为 $591.5 \times 10^6 \text{ gpm} \cdot \text{km}^2$,脊线位于 29.7°N ,台风生成源地被副高占据,不利于台风生成。9 月虽然副高西伸脊点仍位于 90°E ,但相比于 8 月副高脊线明显北抬,强度也较 8 月明显减弱(图 3g),有利于热带低纬度地区台风生成。因此,2024 年 9 月的大尺度环境场配置相比于 8 月更有利于台风的生成,导致 9 月台风生成个数比 8 月多。不仅如此,2024 年秋季 MJO 多处于第 4~7 位相,副高强度总体相比于夏季明显减弱,菲律宾反气旋也偏弱,秋季有利的环流场导致台风生成偏多。

2.2 夏季台风生成源地偏北、偏东,秋季生成源地偏北、偏西

2024 年,26 个台风的平均生成位置(18.9°N 、 134.3°E)较常年平均(16.1°N 、 136.3°E)偏北约 2.8° ,偏西约 2° (图 5a)。生成于 150°E 以东的台风仅有 3 个,较常年平均(5.5 个)偏少 2.5 个。有 9 个台风生成于 20°N 以北,较常年平均(5.7 个)偏多 3.3 个,其中 7 个生成于 25°N 以北,较常年平均(1.8 个)偏多 5.2 个,较为少见。

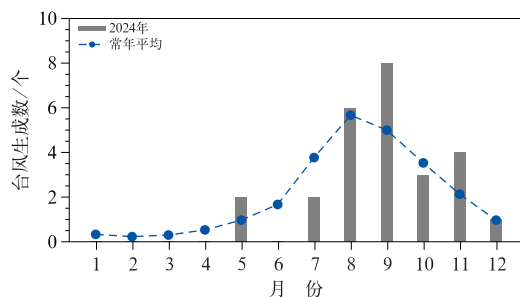
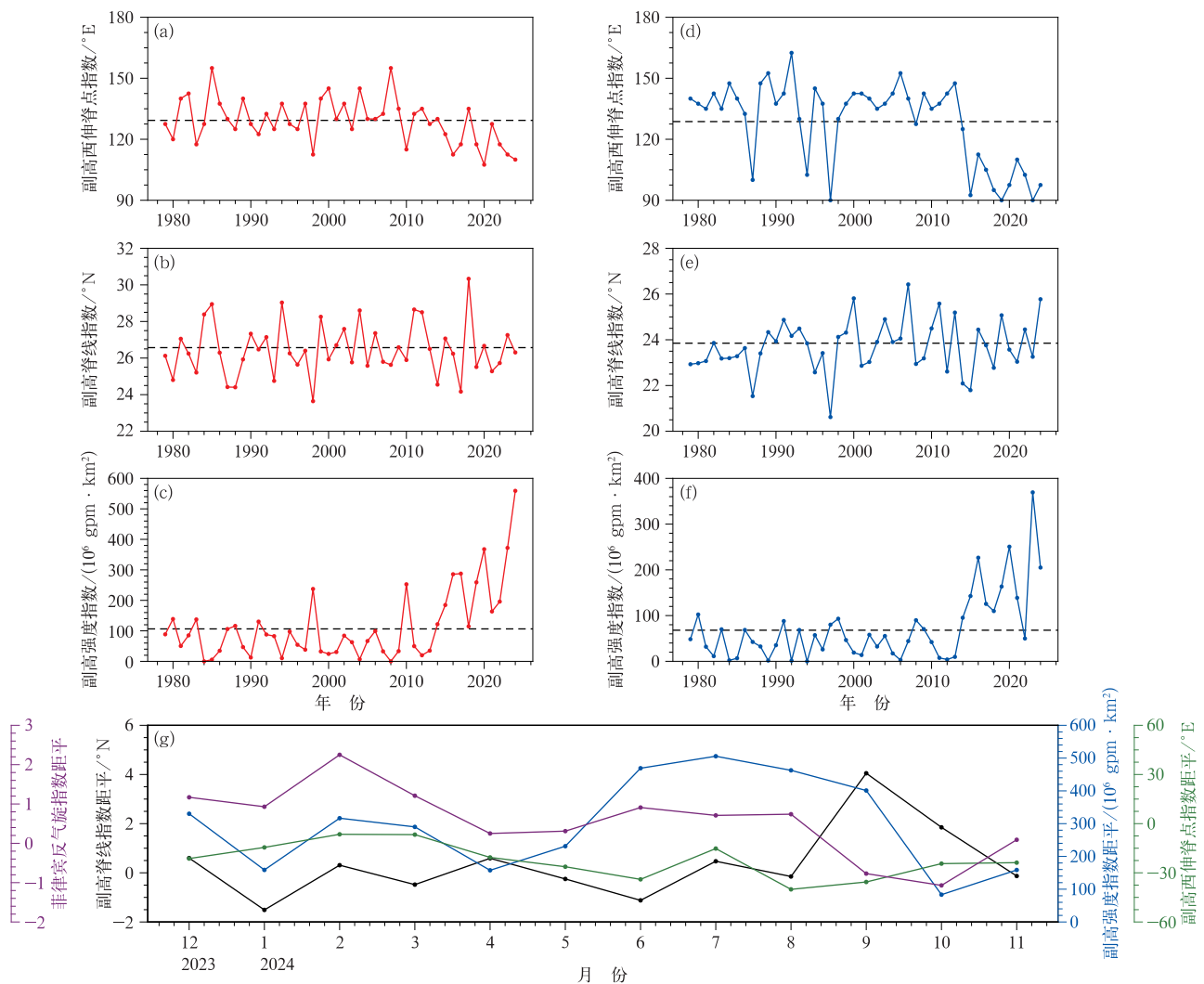


图 2 2024 年和常年平均的西北太平洋逐月台风生成个数

Fig. 2 Monthly number of typhoons generated in the western North Pacific in 2024 and averaged from 1991 to 2020



注:图 a~f 虚线为常年平均。

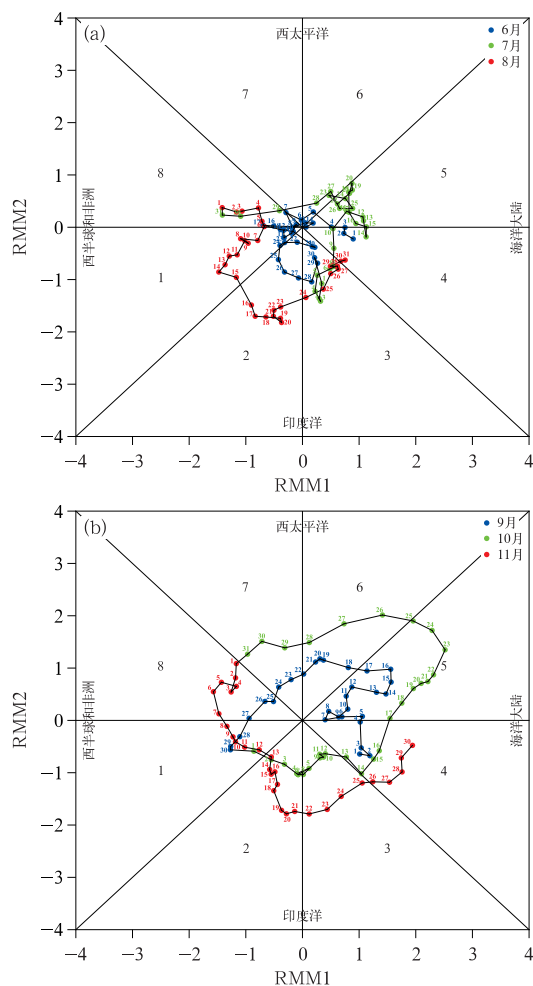
图3 2024年(a~c)初夏和(d~f)秋季副高指数变化,(g)2023年12月至2024年11月副高指数和菲律宾反气旋指数距平变化

Fig. 3 Variations of WNPSH index in (a—c) early summer and (d—f) autumn of 2024, and (g) WNPSH index anomaly and Philippines anticyclone index anomaly from December 2023 to November 2024

2024年夏季,台风生成位置存在2个大值中心,分别位于南海和菲律宾群岛附近。该年夏季的8个台风平均生成位置(22.6°N 、 136.6°E)较常年平均(18.3°N 、 135.9°E)偏北约 4.3° ,偏东约 0.7° (图5b),其中有5个台风生成于 20°N 以北海域且都集中在8月。由于8月副高强大且稳定地控制着西太平洋低纬度地区(图6c),台风大多只能在副高北侧生成,此时日本东南部季风槽的活跃,对应有异常的气旋式环流,减弱的垂直风切变、气旋性涡度、增强的上升运动和较高的相对湿度(图6),共同造成了8月有5个台风生成位置都偏北,夏季台风生成位置偏东。

2024年秋季,台风生成频数大值中心位于菲律

宾群岛附近及西北太平洋中部,15个台风平均生成位置(17.6°N 、 136.9°E)较常年平均(16.2°N 、 137.0°E)偏北约 1.4° ,偏西约 0.1° (图5c)。相比于夏季台风,秋季台风生成位置偏南、偏东。从大尺度环流场上可以看出,秋季有利于台风生成的位置主要位于 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$,该区域盛行气旋性涡度、上升运动偏强且相对湿度偏大,这些都为台风生成提供了良好的动力和热力条件,仅垂直风切变条件相对较差(图7)。2024年秋季,有3个台风生成于 20°N 以北海域,其中2412号台风“丽琵”为2024年生成位置最北(33.1°N)的台风;有3个台风生成位置十分接近,分别是2413号“贝碧嘉”、2414号“普拉桑”和2421号“康妮”。



注:彩色数字为日期。

图 4 2024 年(a)夏季和(b)秋季

RMM 指数空间位相图

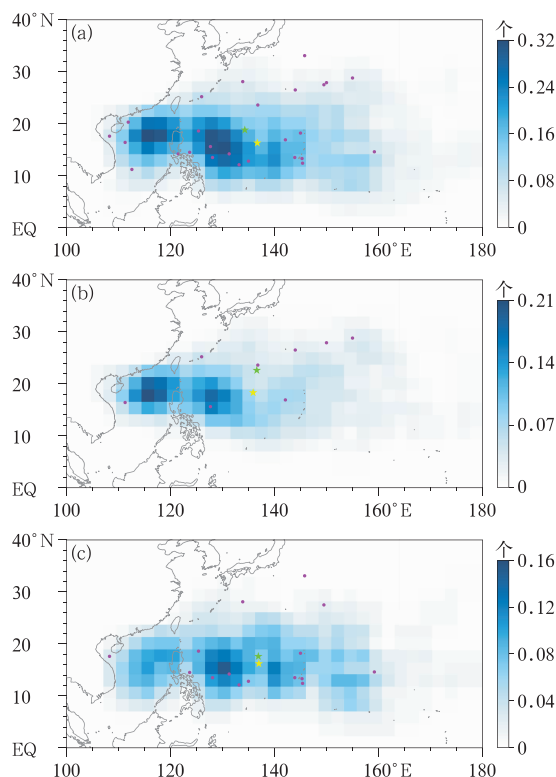
Fig. 4 Phase diagram of RMM index

in (a) summer and (b) autumn of 2024

夏季(2404 号“派比安”)和秋季(2415 号“苏力”)各有 1 个台风在南海生成,较常年平均分别偏少 1.7 个和 1.0 个,这可能是因为夏季和秋季南亚高压均较常年同期偏强,与南亚高压相对应的高层辐合导致南海地区受下沉运动和低层辐散控制,中层湿度和低层涡度均减弱,从而抑制了南海地区台风的生成。

2.3 夏季台风强度偏弱,秋季偏强

2024 年,西北太平洋台风极值强度(即生命期最大强度)整体偏弱,极值强度呈现两极化分布特征,热带风暴和超强台风级个数较常年平均偏多,其余级别台风均较常年同期偏少(图 8a)。26 个台风



注: $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 紫色圆点表示 2024 年生成的台风,蓝色阴影区表示常年平均台风生成频数,绿色和黄色五角星分别表示 2024 年和常年平均的台风生成位置。

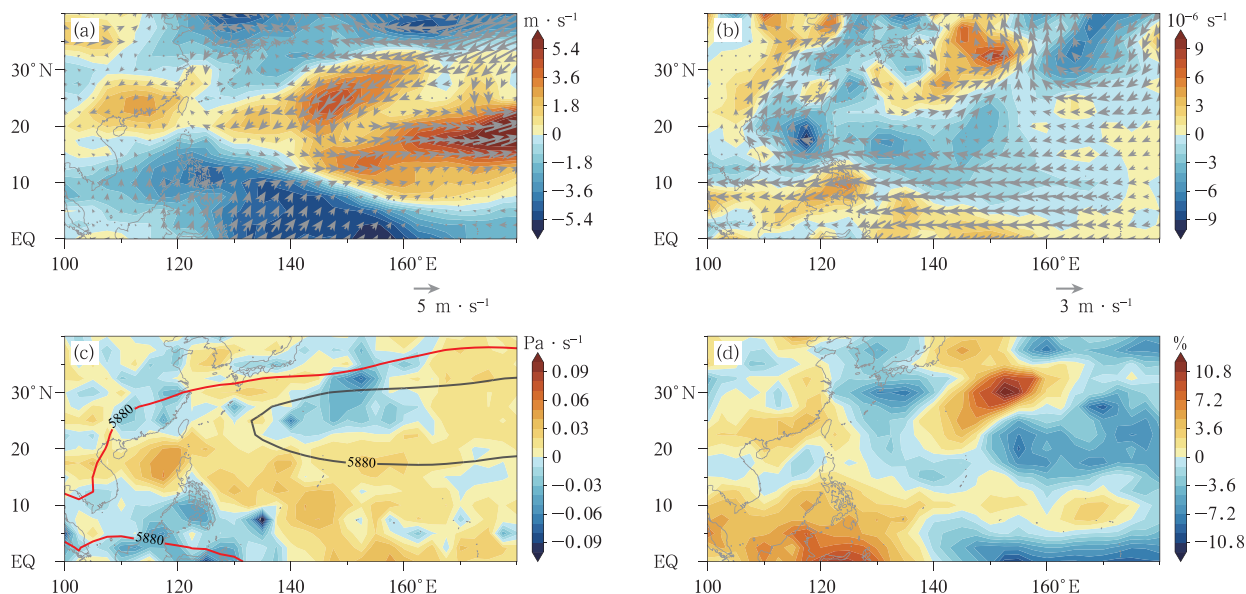
图 5 2024 年(a)全年,(b)夏季和(c)秋季台风生成位置分布以及常年(1991—2020 年)平均台风生成频数

Fig. 5 Spatial distribution of typhoons' generation locations in (a) the whole year, (b) summer and (c) autumn of 2024 with the frequency of average typhoons generated from 1991 to 2020

的平均极值强度为 $36.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级),较常年平均($37.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 13 级)偏弱 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (表略)。共有 8 个台风极值强度达到超强台风级,其中 2411 号台风“摩羯”为 2024 年最强台风($68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 17 级以上)。

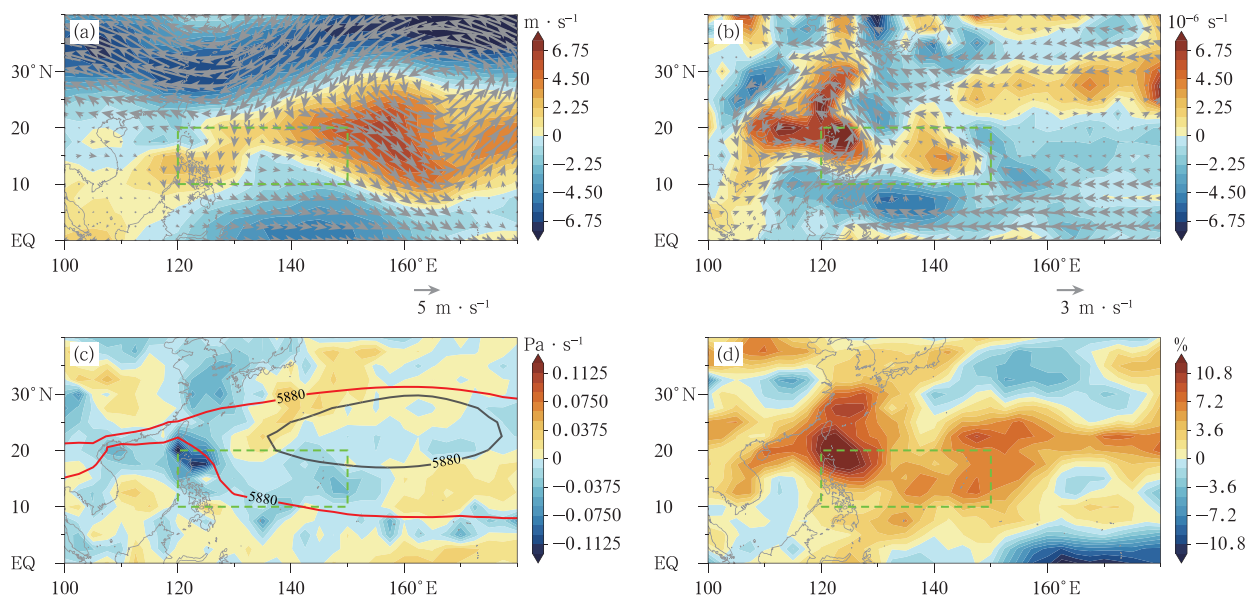
2024 年夏季,平均台风极值强度为 $34.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12 级),较常年平均($35.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 12 级)偏弱 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8b)。除热带风暴级和超强台风级分别较历史同期偏多 0.2 个和 0.4 个外,强热带风暴级偏少 0.7 个,台风级偏少 2.3 个,强台风级偏少 0.9 个。台风级以上的占比为 37.5%,较常年平均(51.3%)明显偏低,热带风暴级占比最高,达 37.5%,为 1979 年以来历史同期第六。

2024 年秋季,平均台风极值强度为 $40.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (13 级),较常年平均($39.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 13 级)偏强



注:图 c 中黑色和红色线分别表示 2024 年和常年平均的夏季 500 hPa 位势高度场上的 5880 gpm 等值线。

图 6 2024 年夏季(a)垂直风切变(填色)和 200 hPa 风场(风矢), (b)850 hPa 相对涡度(填色)和 850 hPa 风场(风矢), (c)500 hPa 垂直速度(填色), (d)600 hPa 相对湿度的异常场
Fig. 6 Anomalies of (a) vertical wind shear (colored) and 200 hPa wind (vector), (b) 850 hPa relative vorticity (colored) and wind (vector), (c) 500 hPa vertical velocity (colored) and (d) 600 hPa relative humidity in summer of 2024



注:绿色方框为有利于台风生成的区域;图 c 中黑色和红色线分别表示 2024 年和常年平均的秋季 500 hPa 位势高度场上的 5880 gpm 等值线。

图 7 2024 年秋季(a)垂直风切变(填色)和 200 hPa 风场(风矢), (b)850 hPa 相对涡度(填色)和 850 hPa 风场(风矢), (c)500 hPa 垂直速度(填色), (d)600 hPa 相对湿度的异常场
Fig. 7 Anomalies of (a) vertical wind shear (colored) and 200 hPa wind (vector), (b) 850 hPa relative vorticity (colored) and wind (vector), (c) 500 hPa vertical velocity (colored) and (d) 600 hPa relative humidity in autumn of 2024

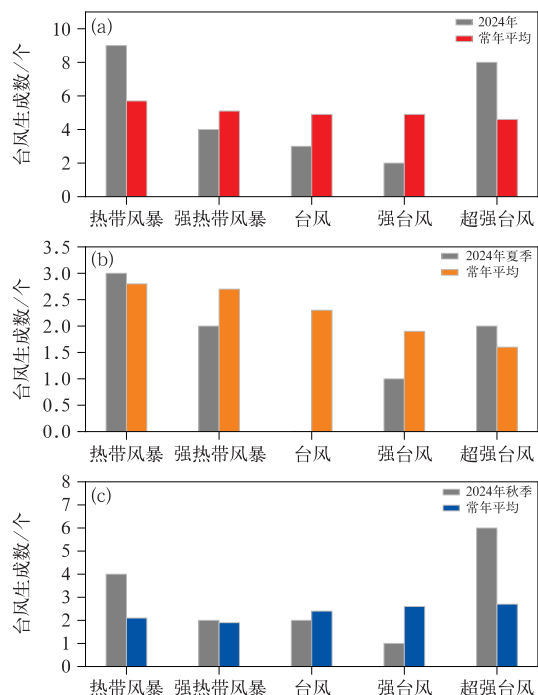


图 8 2024 年(a)全年、(b)夏季和(c)秋季不同强度台风生成个数与常年(1991—2020 年)平均对比

Fig. 8 Comparison between the numbers of different-intensity typhoons in (a) the whole year, (b) summer and (c) autumn of 2024 and averaged from 1991 to 2020

$0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8c)。其中,热带风暴级、强热带风暴级和超强台风级较历史同期偏多(分别为 1.9、0.1、3.3 个),而台风级和强台风级较历史同期偏少(分别为 0.4 个、1.6 个)。台风级以上的占比为 60.0%,较常年平均(65.8%)偏低,但强台风级以上占比为 46.7%,较常年平均(45.2%)偏高,有 6 个台风达到超强台风级,这导致秋季超强台风级占比最高,达 40%,为 1979 年以来历史同期第四。

秋季台风强度较强一方面是由于伴随前期赤道中东太平洋 El Niño 事件的衰减和冷海温的发展导致赤道西太平洋海温持续偏高,有利于台风生成和能量增强;另一方面是由于东亚冷空气开始活跃,且初秋冷空气强度相对较弱,冷暖空气结合会增强台风的对流活动,使台风内部结构更加稳定(Wang et al, 2018)。另外,由于秋季台风生成位置相较于夏季台风偏东,距离陆地相对较远,生命史较长,有利于秋季台风强度的发展。最后,秋季南海夏季风减弱南退,此时秋季台风受南海季风的影响较小,尽管秋季台风体积不大,但有较好的对称结构,也有利于台风的发展增强(姚秀萍和彭思越, 2023)。

3 台风活动特征

3.1 初夏无台风生成,盛夏和秋季台风群发

2024 年,西北太平洋台风活动的阶段性、群发性特征较为突出。由于西北太平洋洋面广阔,具备较大的暖海温区域,适宜的温度条件有利于多个台风同时生成,2024 年出现了 2 次双台风事件和 1 次四台风事件。

已有研究表明,台风扎堆现象最多出现在 8 月,其次为 9 月。西北太平洋热带气旋群发生成的天气型有四种,分别是季风槽型、汇合型、东风波型和季风环流型。季风槽型主要受副高与季风槽的相互作用,热带气旋群发在季风槽上及其两侧生成且多出现于秋季。汇合型受副高、南亚高压和季风槽的共同影响,热带气旋群发生成于西南气流和东南气流的汇合区。东风波型以东风气流影响为主,热带气旋群发生成于东风波中。季风环流型中的热带气旋群发出现在以强烈的西南气流为主的季风涡旋内(Gu et al, 2024)。

2024 年夏季台风活动主要呈现三个阶段:第一阶段是初夏,无台风生成,2024 年 6 月 1 日至 7 月 18 日共 48 d 无台风生成,是 1979 年以来的首次,这是由于 6 月和 7 月上旬副高偏西,并且副高西伸程度分别为 1979 年以来历史同期第一和第三, MJO 处于不利于台风生成的第 2~3 位相(图 4a);第二阶段是 7 月 20—21 日, 2403 号台风“格美”与 2404 号台风“派比安”形成 2024 年首个“双台共舞”局面,这与 7 月下旬副高减弱东退,南海夏季风强度较强有关;第三阶段是 8 月 8—22 日, 15 d 内生成了 6 个台风,平均 2.5 d 生成 1 个台风,群发特征明显,这与日本海以南的季风槽建立密切相关,属于受季风环流型影响而群发生成的台风。

2024 年秋季台风活动也呈现为三个阶段:第一阶段是由于 9 月中下旬 MJO 处于有利于台风生成的第 6~7 位相(图 4b),在 9 月 10—28 日的 19 d 内生成了 6 个台风,平均约 3.2 d 生成 1 个台风,属于受汇合区环流型影响而群发生成的台风;第二阶段是 2420 号台风“潭美”与 2421 号台风“康妮”形成“双台共舞”局面;第三阶段是 11 月副高较同期异常偏强,位置稳定且偏西,导致在 11 月 4—12 日, 2422 号台风“银杏”、2423 号台风“桃芝”、2424 号台风“万

宜”、2425号台风“天兔”相继生成,9 d内生成4个台风,平均约2.3 d生成1个台风,群发特征明显,属于受季风槽环流型影响而群发生成的台风。尤其,11月12日4个台风共存形成“四台共舞”,是自1949年有气象记录以来该月首次,过去仅在1959年和1968年的11月出现过“三台共舞”的情况。

3.2 夏季台风多西北和北上路径,秋季台风多西行和西北行路径

影响我国的台风典型移动路径包括西行路径、西北路径和转向路径。近年,西北太平洋台风活动呈现出持续向西和向极地方向移动的趋势(Kossin et al, 2016; Sun et al, 2019; Wu et al, 2005; Yokoi and Takayabu, 2013)。许多研究表明,在副热带西北太平洋,进入南海的西行路径以及140°E以东的向北路径均有所减少,而向西北方向移动,趋向东亚沿岸的路径则有所增多(He et al, 2015; Tu et al, 2009; Wu et al, 2005; Yokoi and Takayabu, 2013)。2024年,西北太平洋共有4个台风为西行路径,10个台风为西北行路径,2个台风为西转向路径(图9a)。从台风路径频数图上可以看出,2024年夏季台风多为西北和北上路径(图9b,图10b),这与台风的年代际变化规律基本一致;然而,该年秋季台风则多为西行和西北行路径(图9c,图10c),这种与台风路径年代际变化规律不一致的特征可能更多体现了台风年际或季节内变化的特征,还需要进一步分析。2024年共有7个台风移入南海,其中,在夏季生成的8个台风中,无台风移入南海(图9b);而在秋季生成的15个台风中,有7个进入我国南海东部海面(图9c),分别是9月生成的2个台风(“摩羯”“山陀儿”),10月下旬生成的台风(“谭美”)和11月中旬连续出现的4个台风(“银杏”“桃芝”“万宜”“天兔”),以上台风给菲律宾、越南、老挝等多国带来重创。其中“山陀儿”“天兔”进入南海后东折北上,给我国台湾省及华东沿海地区带来风雨影响。这是由于秋季副高强度较强且位置偏西,引导台风沿着其南侧的东风气流向西移动,从西北太平洋进入南海。

4 台风登陆特征

4.1 夏季登陆台风偏少,秋季登陆历史最多

2024年,共有8个台风(“马力斯”“格美”“派比

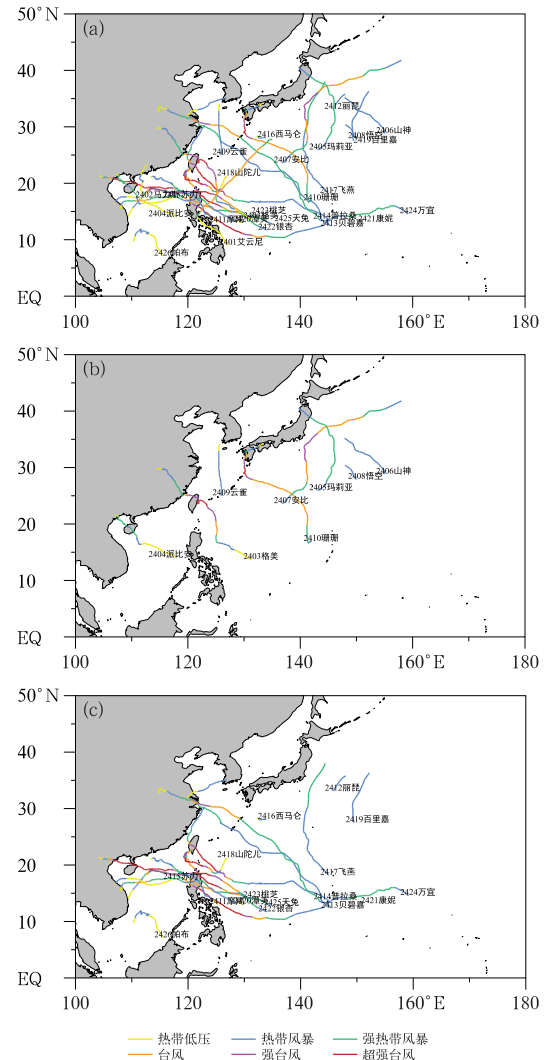
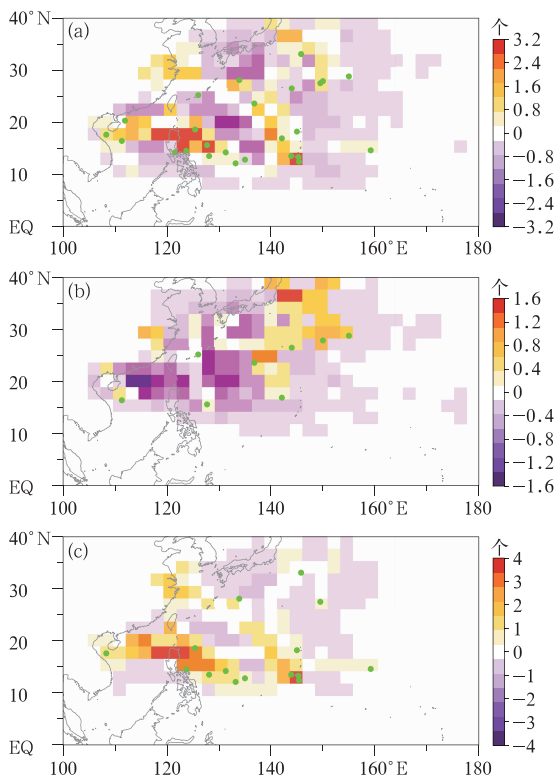


图9 2024年(a)全年,(b)夏季和(c)秋季西北太平洋生成台风活动路径
Fig. 9 Tracks of typhoons generated in western North Pacific in (a) the whole year, (b) summer and (c) autumn of 2024

安”“摩羯”“贝碧嘉”“普拉桑”“山陀儿”“康妮”)在我国沿海登陆,其中“格美”“摩羯”“普拉桑”出现了2次登陆(表1)。全年登陆台风个数(8.0个)较常年同期(7.2个)偏多0.8个(图11a),登陆比例为30.8%,较常年同期(28.5%)偏高,中断了自2019年以来连续5年登陆台风个数持续偏少的情况。其中,秋季登陆台风个数明显多于夏季,2024年夏季登陆台风数为3个,较常年同期(4.7个)偏少1.7个(图11b),登陆比例为37.5%;秋季登陆台风数为5个,与2010年并列为1979年以来历史同期最多,较常年同期(2.3个)偏多2.7个(图11c),登陆比例为33.3%。



注: $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 绿色圆点表示 2024 年生成的台风。

图 10 2024 年(a)全年,(b)夏季,
(c)秋季台风路径频数异常(填色)分布
Fig. 10 Spatial distribution of frequency anomalies
(colored) of typhoon tracks in (a) the whole year,
(b) summer and (c) autumn of 2024

从台风登陆个数的月变化来看,常年平均 8 月登陆的台风个数最多,其次是 7 月和 9 月(图 12)。但 2024 年夏季登陆的 3 个台风集中在 6 月和 7 月,8 月无台风登陆,是 1979 年以来第五个 8 月无台风登陆

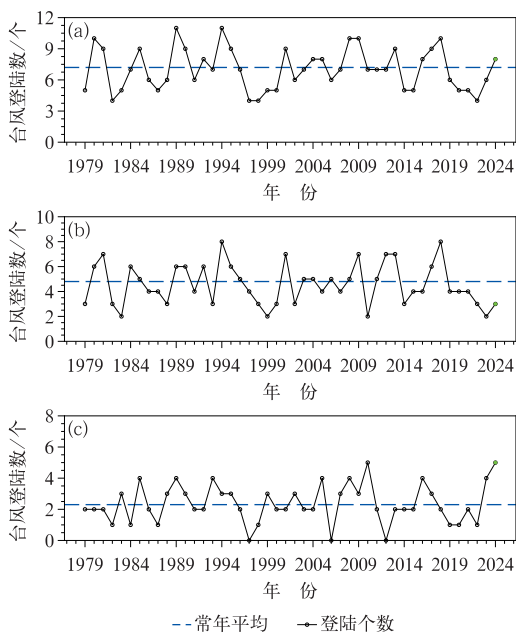


图 11 1979—2024 年(a)全年,(b)夏季
和(c)秋季西北太平洋台风逐年登陆个数
Fig. 11 Yearly number of landfall typhoons
from the western North Pacific in
(a) the whole year, (b) summer and
(c) autumn from 1979 to 2024

的年份(其余 4 年分别是:1983 年、2010 年、2014 年、2023 年),这是由于强大的副高盘踞,导致台风这一低压系统难以靠近并登陆我国。此外,2024 年秋季共 5 个台风登陆,其中 9 月 3 个、10 月 2 个。

4.2 秋季登陆位置异常偏北

从登陆地点的分布特征来看,登陆中国华东沿海的台风比登陆华南沿海的台风明显偏多。2024 年

表 1 2024 年登陆我国台风一览表
Table 1 List of landfall typhoons in China in 2024

编号	名称	登陆时间(BT)	登陆地点	登陆强度
2402	马力斯	6 月 1 日 00:55	广东阳江	$18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 8 级, 热带风暴级
2403	格美	7 月 25 日 00:55	台湾宜兰	$48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 15 级, 强台风级
		7 月 25 日 19:50	福建莆田	$33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 12 级, 台风级
2404	派比安	7 月 22 日 01:30	海南万宁	$28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 10 级, 强热带风暴级
2411	摩羯	9 月 6 日 16:20	海南文昌	$62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 17 级以上, 超强台风级
		9 月 6 日 22:20	广东徐闻	$58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 17 级以上, 超强台风级
2413	贝碧嘉	9 月 16 日 07:30	上海浦东临港新城	$42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 14 级, 强台风级
2414	普拉桑	9 月 19 日 18:50	浙江舟山	$25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 10 级, 强热带风暴级
		9 月 19 日 21:45	上海奉贤	$23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 9 级, 热带风暴级
2418	山陀儿	10 月 3 日 13:00	台湾高雄林园	$38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 13 级, 台风级
2421	康妮	10 月 31 日 14:00	台湾台东成功	$48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 15 级, 强台风级

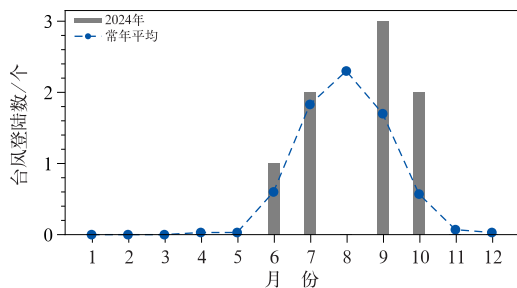


图12 2024年和常年平均的逐月登陆台风个数

Fig. 12 Monthly number of landfall typhoons in 2024 and averaged from 1991 to 2020

登陆的8个台风中,共有7个登陆华东沿海(包含2次登陆),其中3个登陆台湾(“格美”“山陀儿”“康妮”),2个登陆上海(“贝碧嘉”“普拉桑”),1个登陆福建(“格美”),1个登陆浙江(“普拉桑”);仅有4个登陆华南沿海,其中2个登陆广东(“马力斯”“摩羯”),2个登陆海南(“派比安”“摩羯”)(图13)。

2024年夏季,台风登陆广东、福建、台湾、海南各1次,接近常年同期。通常秋季台风在中国的登陆点主要集中在广东、海南、福建、台湾,在福建以北登陆的比例比较小。然而,2024年秋季,台风登陆台湾2次,登陆上海2次,登陆浙江、广东、海南各1次,总体登陆位置明显偏北。1979—2023年,秋季在上海登陆的台风仅有2个,分别为1416号台风“凤凰”和2212号台风“梅花”,而在2024年9月中旬,连续2个台风3d内接连登陆上海,较常年同期偏多1.9个,为1979年以来首次。

4.3 夏季台风登陆强度偏弱,秋季登陆强度偏强

从台风首次登陆强度来看,8个登陆台风的首次平均登陆强度为 $38.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (13级),较常年平均 $32.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12级)偏强 $5.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图14a),其中除首个台风(“马力斯”)外,其余登陆台风的首次登陆强度均达到了强热带风暴级及以上。其中,“格美”(48 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,15级)为2024年首个登陆的超强台风;“摩羯”(62 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,17级以上)刷新多项纪录,是1949年以来在北部湾海面活动的最强台风,也是登陆中国的第二强台风(仅次于1409号台风“威马逊”),还是秋季登陆中国的最强台风;“贝碧嘉”(42 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,14级)是1949年以来登陆上海的最强台风。

2024年夏季3个台风登陆时的强度平均值为 $31.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (11级),弱于常年平均登陆台风强度

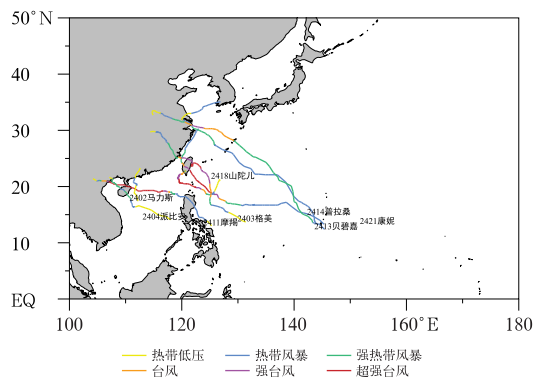


图13 2024年西北太平洋台风登陆路径

Fig. 13 Tracks of landfall typhoons from western North Pacific in 2024

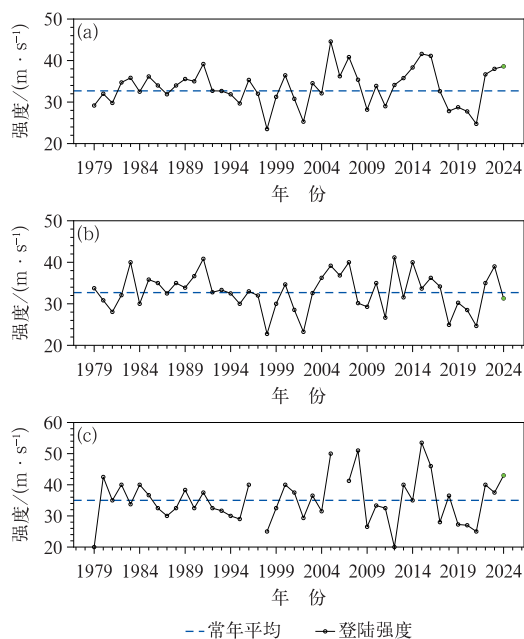


图14 1979—2024年(a)全年,(b)夏季和(c)秋季西北太平洋台风初次登陆平均强度
Fig. 14 Yearly averaged intensity of landfall typhoons from the western North Pacific in (a) the whole year, (b) summer and (c) autumn from 1979 to 2024

$32.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12级)(图14b)。然而,秋季台风登陆强度偏强,秋季登陆的5个台风平均强度为 $43.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (14级),强于常年平均登陆台风强度($35.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,12级)(图14c)。

5 结论与讨论

本文从台风生成、活动、登陆等多角度分析了

2024 年夏季和秋季台风的特征差异,并针对差异进行了初步的大尺度环流分析,主要结论如下。

(1)2024 年西北太平洋共有 26 个台风生成,较常年平均偏多 0.9 个;台风生成源地整体偏西、偏北,共有 7 个台风生成于 25°N 及以北,较常年同期偏多 5.2 个,十分罕见;台风极值强度整体偏弱,但热带风暴和超强台风级个数较常年平均偏多;台风活动阶段性,群发性特征较为突出,出现了 2 次双台风事件和 1 次四台风事件;台风多为西行和西北行路径,共有 8 个台风登陆我国,较常年同期偏多 0.8 个,中断了自 2019 年以来连续 5 年登陆台风个数偏少的情况;平均登陆强度偏强,“摩羯”“贝碧嘉”“康妮”3 个台风均以强台风及以上级别的强度登陆我国。其中,该年台风活动最重要的特征就是夏季和秋季台风在生成、活动、登陆等多方面都表现出了显著差异(表 2)。

(2)在台风生成特征方面,夏季台风生成数偏少,尤其初夏生成数为 1979 年以来历史同期并列第二少;而秋季台风生成数异常偏多,为 1979 年以来并列第三多;夏季与秋季台风生成数量的差异在 1979—2024 年期间排名第二,仅次于 2018 年。副高异常偏强、偏西,以及西北太平洋持续受到低层 WNPAC 环流控制是导致初夏台风生成异常偏少的直接原因,这样的环流异常与 El Niño 衰减年海温的滞后影响效应及南海夏季风爆发偏晚有关。9 月台风生成数为 1979 年以来历史同期最多,主要是受减弱的副高和处于第 4~7 位相的 MJO 影响。此外,夏季台风生成源地偏北、偏东,而秋季台风生成源地偏北、偏西;夏季台风极值强度偏弱,而秋季台风极值强度偏强,且超强台风级占比为 1979 年以来

历史同期第四。

(3)在台风活动特征方面,夏季台风活动呈现三个不同阶段,初夏 6 月 1 日至 7 月 18 日无台风生成,是 1979 年以来首次;7 月下旬发生“双台共舞”;8 月上中旬台风群发。秋季台风活动群发性特征更加显著,9 月中下旬,6 个台风生成;10 月下旬,“双台共舞”局面;11 月中旬,“四台共舞”为 1949 年以来 11 月首次。此外,夏季台风多为西北和北上路径,而秋季台风多西行和西北行路径,这明显不同于台风路径的年代际变化特征。

(4)在台风登陆特征方面,夏季登陆台风数为 3 个,较常年同期偏少;而秋季登陆台风数为 5 个,与 2010 年并列为 1979 年以来历史同期最多。夏季台风登陆位置接近常年同期;但秋季台风登陆明显偏北,尤其是 9 月中旬,连续 2 个台风 3 d 内接连登陆上海,为 1979 年以来首次。夏季台风登陆强度偏弱;而秋季台风登陆强度偏强,其中台风“摩羯”刷新多项纪录,“贝碧嘉”是 1949 年以来登陆上海的最强台风。基于本文研究可以发现,2024 年,相较于夏季,秋季台风呈现出一系列显著特点:生成和登陆个数较多,生成源地偏南、偏东,极值强度和登陆强度更强(表 2)。本文也初步分析了造成秋季台风活跃的大尺度环流,主要与减弱的副高和活跃的 MJO 活动有关。2024 年秋季台风活跃特征与年代际变化趋势有很大差异(Tan et al,2024),自 20 世纪 90 年代后期以来,秋季台风数呈显著减少趋势,且减少的台风主要源于 15°N 以南区域。然而 2024 年秋季台风数较常年同期异常偏多,且在 15°N 以南生成的台风也较常年同期偏多,造成这种差异特征的机理还需要进一步深入分析。

表 2 2024 年夏季和秋季台风活动特征总结

Table 2 Summary of activity characteristics of typhoons in summer and autumn of 2024

特征	指标	夏季	秋季
生成特征	生成个数	偏少	偏多
	生成源地	偏北、偏东	偏北、偏西
	极值强度	偏弱	偏强
活动特征	群发特征	初夏无台风生成,盛夏出现“双台共舞”	台风群发特征显著,晚秋出现“四台共舞”
	移动路径	西北和北	西和西北
登陆特征	登陆个数	偏少	偏多
	登陆位置	接近常年同期	偏北
	登陆强度	偏弱	偏强

台风潜在生成指数(GPI)是由影响台风生成的动力和热力学参数构成的经验函数,许多研究表明,GPI 可以用来较好地反映西北太平洋台风生成频数

的变化特征,如 GPIEN、GPIMW、GPITC、GPIZW、DGPI 等,为理解台风活动的气候变率提供了重要参考(Emanuel and Nolan, 2004; Murakami and

Wang, 2010; 2022; Wang and Murakami, 2020; Wang and Wang, 2019; Wang et al, 2021; 2023; 2024)。Wang et al (2023; 2024) 近期研究揭示了 DGPI 指数在表征西北太平洋台风生成频数气候态分布以及年际、年代际变率上都有较好的技巧, 通过进一步计算 DGPI 指数中 4 个分量在高低层中的贡献, 发现对流层低层的大尺度环流对台风生成的贡献约为 65%, 而对流层高层的贡献为 35%。下一步将在前期研究的基础上进一步分析 DGPI 指数重要分量在 2024 年夏季和秋季台风活动异常过程中的作用。

参考文献

- 陈联寿, 丁一汇, 1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社: 64-145. Chen L S, Ding Y H, 1979. Introduction to Typhoons in the Western Pacific[M]. Beijing: Science Press: 64-145 (in Chinese).
- 董伟杰, 2019. 1998—2017 年夏季西北太平洋台风活动特征研究[J]. 中国高科技, 1(1): 124-126. Dong Y J, 2019. Summer typhoon activity characteristics in the western North Pacific during 1998—2017[J]. China High and New Technology, 1(1): 124-126 (in Chinese).
- 黄菲, 李元妮, 2010. 南海夏季风爆发与西北太平洋热带气旋活动[J]. 中国海洋大学学报, 40(8): 1-10. Huang F, Li Y N, 2010. Relationship between the South China Sea summer monsoon onset and the tropical cyclone activity in the western North Pacific[J]. Period Ocean Univ China, 40(8): 1-10 (in Chinese).
- 李崇银, 潘静, 田华, 等, 2012. 西北太平洋台风活动与大气季节内振荡[J]. 气象, 38(1): 1-16. Li C Y, Pan J, Tian H, et al, 2012. Typhoon activities over the western North Pacific and atmospheric intraseasonal oscillation[J]. Meteor Mon, 38(1): 1-16 (in Chinese).
- 刘炯, 张庆云, 孙淑清, 2007. 2005 年夏季中国登陆台风的环流特征[J]. 大气科学, 31(5): 909-918. Liu G, Zhang Q Y, Sun S Q, 2007. The circulation characteristics of frequent activities of typhoons over eastern China during the summer of 2005[J]. Chin J Atmos Sci, 31(5): 909-918 (in Chinese).
- 刘芸芸, 李维京, 艾锐秀, 等, 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报, 23(4): 414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly western Pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 414-423 (in Chinese).
- 吕心艳, 许映龙, 董林, 等, 2021. 2018 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(3): 359-372. Lü X Y, Xu Y L, Dong L, et al, 2021. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs over northwestern Pacific in 2018[J]. Meteor Mon, 47(3): 359-372 (in Chinese).
- 聂高臻, 钱奇峰, 贾莉, 等, 2024. 2023 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报, 44(4): 101-111. Nie G Z, Qian Q F, Jia L, et al, 2024. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea in 2023[J]. J Marine Meteor, 44(4): 101-111 (in Chinese).
- 钱奇峰, 董林, 许映龙, 等, 2023. 2022 年西北太平洋和南海台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 49(10): 1254-1266. Qian Q F, Dong L, Xu Y L, et al, 2023. Analysis on the characteristics and forecast difficulties of the typhoons over the Northwest Pacific and the South China Sea in 2022[J]. Meteor Mon, 49(10): 1254-1266 (in Chinese).
- 秦丽娟, 董庆, 薛存金, 2015. 西北太平洋热带气旋源地 30 a 的季节和年代际变化[J]. 海洋环境科学, 34(5): 723-728. Qin L J, Dong Q, Xue C J, 2015. Seasonal to decadal variations of tropical cyclone genesis in northwestern Pacific in recent three decades[J]. Marine Environ Sci, 34(5): 723-728 (in Chinese).
- 王海平, 董林, 许映龙, 等, 2021. 2019 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(8): 1009-1020. Wang H P, Dong L, Xu Y L, et al, 2021. Analysis on the characteristics of typhoon activity and forecasting difficulties in western North Pacific in 2019[J]. Meteor Mon, 47(8): 1009-1020 (in Chinese).
- 吴捷, 任宏利, 赵崇博, 等, 2016. 国家气候中心 MJO 监测预测业务产品研发及应用[J]. 应用气象学报, 27(6): 641-653. Wu J, Ren H L, Zhao C B, et al, 2016. Research and application of operational MJO monitoring and prediction products in Beijing Climate Center[J]. J Appl Meteor Sci, 27(6): 641-653 (in Chinese).
- 向纯怡, 许映龙, 高拴柱, 等, 2022. 2021 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 48(9): 1195-1208. Xiang C Y, Xu Y L, Gao S Z, et al, 2022. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon over the western North Pacific in 2021[J]. Meteor Mon, 48(9): 1195-1208 (in Chinese).
- 姚秀萍, 彭思越, 2023. 秋季西北太平洋上热带气旋研究进展及展望[J]. 海洋气象学报, 43(3): 1-8. Yao X P, Peng S Y, 2023. Research progress and outlook of autumn tropical cyclones over western North Pacific[J]. J Marine Meteor, 43(3): 1-8 (in Chinese).
- 张琼, 钱永甫, 张学洪, 2000. 南亚高压的年际和年代际变化[J]. 大气科学, 24(1): 67-78. Zhang Q, Qian Y F, Zhang X H, 2000. Interannual and interdecadal variations of the South Asia high[J]. Chin J Atmos Sci, 24(1): 67-78 (in Chinese).
- 赵海坤, 吴立广, 2015. 西北太平洋热带气旋气候变化的若干研究进展[J]. 气象科学, 35(1): 108-118. Zhao H K, Wu L G, 2015. Review on climate change of tropical cyclone in the Northwest Pacific[J]. Trans Atmos Sci, 35(1): 108-118 (in Chinese).
- 周冠博, 柳龙生, 董林, 等, 2022. 2020 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 48(4): 504-515. Zhou G B, Liu L S, Dong L, et al, 2022. The analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs in western North Pacific in 2020[J]. Meteor Mon, 48(4): 504-515 (in Chinese).
- 周群, 魏立新, 2019. 两类 ENSO 与 IOD 对西北太平洋季风槽及热带气旋生成的影响[C]//中国海洋学会 2019 海洋学术(国际)双年会. 三亚: 中国海洋学会: 14-22. Zhou Q, Wei L X, 2019. Influences of two kinds of ENSO and IOD on the monsoon trough

- and tropical cyclone formation in the Northwest Pacific[C]. San-ya; Chinese Society for Oceanography; 14-22(in Chinese).
- 朱赛智, 孟祥凤, 2015. 两类 El Niño Modoki 事件时西北太平洋秋季热带气旋生成地的差异[J]. 海洋环境科学, 34(2): 255-260. Zhu S Z, Meng X F, 2015. Differences between the Northwest Pacific tropical cyclone genesis location of two kinds of El Niño Modoki in autumn[J]. Marine Environ Sci, 34(2): 255-260(in Chinese).
- Cao X, Liu Y, Wu R G, et al, 2020. Northwestwards shift of tropical cyclone genesis position during autumn over the western North Pacific after the late 1990s[J]. Int J Climatol, 40(3): 1885-1899.
- Chan J C L, 2006. Comment on “changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment”[J]. Science, 311(5768): 1713.
- Choi Y, Ha K J, Ho C H, et al, 2015. Interdecadal change in typhoon genesis condition over the western North Pacific[J]. Climate Dyn, 45(11): 3243-3255.
- Emanuel K, Nolan D S, 2004. Tropical cyclone activity and the global climate system[C]// 26th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. Miami; Bulletin of the American Meteorological Society; 240-241.
- Gray W M, 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. Mon Wea Rev, 96(10): 669-700.
- Gu Y N, Zhan R F, Li X M, 2024. Environmental conditions conducive to the formation of multiple tropical cyclones over the western North Pacific[J]. Adv Atmos Sci, 41(10): 2027-2042.
- He H Z, Yang J, Gong D Y, et al, 2015. Decadal changes in tropical cyclone activity over the western North Pacific in the late 1990s[J]. Climate Dyn, 45(11/12): 3317-3329.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global re-analysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.
- Hsu P C, Chu P S, Murakami H, et al, 2014. An abrupt decrease in the late-season typhoon activity over the western North Pacific[J]. J Climate, 27(11): 4296-4312.
- Hu C D, Zhang C Y, Yang S, et al, 2018. Perspective on the north-westward shift of autumn tropical cyclogenesis locations over the western North Pacific from shifting ENSO[J]. Climate Dyn, 51(7/8): 2455-2465.
- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al, 2017. Extended reconstructed Sea Surface temperature, Version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. J Climate, 30(20): 8179-8205.
- Huangfu J L, Huang R H, Chen W, et al, 2017. Interdecadal variation of tropical cyclone genesis and its relationship to the monsoon trough over the western North Pacific[J]. Int J Climatol, 37(9): 3587-3596.
- 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.
- Kossin J P, Emanuel K A, Camargo S J, 2016. Past and projected changes in western North Pacific tropical cyclone exposure[J]. J Climate, 29(16): 5725-5739.
- Lu Z Y, Dong L, Song F F, et al, 2024. Quantifying the relative contributions of three tropical oceans to the western North Pacific anomalous anticyclone[J]. Environ Res Lett, 19(10): 104016.
- Murakami H, Wang B, 2010. Future change of North Atlantic tropical cyclone tracks: projection by a 20-km-mesh global atmospheric model[J]. J Climate, 23(10): 2699-2721.
- Murakami H, Wang B, 2022. Patterns and frequency of projected future tropical cyclone genesis are governed by dynamic effects[J]. Commun Earth Environ, 3(1): 77.
- Nakazawa T, 1988. Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific[J]. J Meteor Soc Japan, Ser. II, 66(6): 823-839.
- Pradhan P K, Preethi B, Ashok K, et al, 2011. Modoki, Indian Ocean dipole, and western North Pacific typhoons: possible implications for extreme events[J]. J Geophys Res Atmos, 116(D18): D18108.
- Sun J, Wang D Q, Hu X M, et al, 2019. Ongoing poleward migration of tropical cyclone occurrence over the western North Pacific Ocean[J]. Geophys Res Lett, 46(15): 9110-9117.
- Tan C Y, Zhao H K, Klotzbach P J, et al, 2024. Interdecadal shifts in tropical sea surface temperature modulate autumn tropical cyclone genesis over the western North Pacific[J]. Atmos Res, 306: 107473.
- 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[J]. J Climate, 22(13): 3617-3628.
- Wang B, Murakami H, 2020. Dynamic genesis potential index for diagnosing present-day and future global tropical cyclone genesis[J]. Environ Res Lett, 15(11): 114008.
- Wang C, Wang B, 2019. Tropical cyclone predictability shaped by western Pacific subtropical high: integration of trans-basin sea surface temperature effects[J]. Climate Dyn, 53(5): 2697-2714.
- Wang C, Wang Y R, Wang B, et al, 2023. Opposite skills of ENGPI and DGPI in depicting decadal variability of tropical cyclone genesis over the western North Pacific[J]. J Climate, 36(24): 8713-8721.
- Wang C, Wu K, Wu L G, et al, 2021. What caused the unprecedented absence of western North Pacific tropical cyclones in July 2020? [J]. Geophys Res Lett, 48(9): e2020GL092282.
- Wang C, Wu L G, 2016. Interannual shift of the tropical upper-tropospheric trough and its influence on tropical cyclone formation over the western North Pacific[J]. J Climate, 29(11): 4203-4211.
- Wang Y P, Huang Y J, Cui X P, 2018. Impact of mid- and upper-level dry air on tropical cyclone genesis and intensification: a modeling study of Durian (2001)[J]. Adv Atmos Sci, 35(12): 1505-1521.
- Wang Y R, Wang C, Wu L G, et al, 2024. Synergic influence of lower and upper troposphere large-scale circulations on tropical cyclone genesis over the western North Pacific[J]. Climate Dyn, 62(9): 8403-8415.
- Wu L G, Wang B, 2004. Assessing impacts of global warming on

- tropical cyclone tracks[J]. *J Climate*, 17(8):1686-1698.
- Wu L G, Wang B, Geng S Q, 2005. Growing typhoon influence on East Asia[J]. *Geophys Res Lett*, 32(18):L18703.
- Wu Z M, Hu C D, Wang J B, et al, 2021. Distinct interdecadal change contrasts between summer and autumn in latitude-longitude co-variability of Northwest Pacific typhoon genesis locations[J]. *Geophys Res Lett*, 48(15):e2021GL093494.
- Xie S P, Hu K M, 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.
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al, 2016. Indo-Western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(4):411-432.
- Yao X P, Zhao D J, Li Y, 2020. Autumn tropical cyclones over the western North Pacific during 1949—2016: a statistical study[J]. *J Meteorol Res*, 34(1):150-162.
- Yokoi S, Takayabu Y N, 2013. Attribution of decadal variability in tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific: a new approach emphasizing the genesis location of cyclones[J]. *J Climate*, 26(3):973-987.
- Yuan Y, Yang S, 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: focus on ENSO cycles[J]. *J Climate*, 25(21):7702-7722.
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q, 2012. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the eastern and central Pacific El Niño: possible effects of Indian Ocean SST[J]. *J Climate*, 25(22):7867-7883.
- Zhang W J, Jin F F, Turner A, 2014. Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift[J]. *Geophys Res Lett*, 41(11):4020-4026.
- Zong H J, Wu L G, 2015. Re-examination of tropical cyclone formation in monsoon troughs over the western North Pacific[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(7):924-934.

(本文责编:何晓欢)