

姚秀萍,彭思越.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,2023,43(3):1-8.
YAO Xiuping, PENG Siyue. Research progress and outlook of autumn tropical cyclones over western North Pacific[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(3): 1-8. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.001. (in Chinese)

秋季西北太平洋上热带气旋研究进展及展望

姚秀萍^{1,2}, 彭思越^{3,1,2}

(1.中国气象局气象干部培训学院,北京 100081;2.中国气象局上海台风研究所,上海 200030;3.成都信息工程大学,四川 成都 610225)

摘要: 西北太平洋是全球热带气旋生成频数最多的区域,相较于夏季热带气旋,对于秋季热带气旋的研究相对较少。随着2000年后登陆我国的秋季热带气旋中超强台风的比例逐渐增多,并对我国造成严重的灾害,秋季热带气旋的研究受到越来越多的关注。对西北太平洋秋季热带气旋的研究进展进行回顾和总结,主要包括秋季西北太平洋上热带气旋的活动特征、影响因子以及登陆我国热带气旋的特征与影响等3方面,并对研究秋季热带气旋的未来方向进行了展望。

关键词: 秋季热带气旋;西北太平洋;研究进展

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)03-0001-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.03.001

Research progress and outlook of autumn tropical cyclones over western North Pacific

YAO Xiuping^{1,2}, PENG Siyue^{3,1,2}

(1. China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081, China; 2. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 3. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The western North Pacific (WNP) is the most active region of tropical cyclone (TC) genesis. Compared with summer TCs, there is relatively less research on autumn TCs. Since 2000, with the increase in the proportion of autumn landfalling super typhoons in China, which caused serious disasters to China, the research of autumn TCs has attracted more and more attention. The research progress of autumn TCs in the WNP is reviewed in the following three parts: the characteristics of autumn TC activities in the WNP, their influencing factors, and the characteristics and impacts of autumn landfalling TCs in China. An outlook for future research is also given here.

Keywords: autumn tropical cyclone; western North Pacific (WNP); research progress

引言

热带气旋(tropical cyclone, TC)是生成于热带或副热带洋面上,具有极强破坏力的气旋系统,是灾害

性天气之一,对TC的研究是热带气象学的重点关注问题之一^[1]。我国的国家标准《热带气旋等级:GB/T 19201—2006》^[2]将TC按照强度分为6个等级:热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风。

收稿日期:2023-02-05;修回日期:2023-06-07

基金项目:中国气象局上海台风研究所台风基金项目(TFJJ202006);国家自然科学基金项目(42175008,42275013)

第一作者简介:姚秀萍,女,博士,教授,主要从事中尺度天气动力学研究,yaoxp@cma.gov.cn。

西北太平洋是全球 TC 发生频数最多的区域,超过全球生成 TC 的 30%^[3]。西北太平洋上空的 TC 活动常常会对我国及邻近地区造成严重的破坏。强度较大的 TC 往往会带来破坏性大风、风暴潮、暴雨等灾害^[4-5]。过去的研究主要集中在夏季 TC 所造成的财产损失上,然而近几年的研究发现,部分登陆的秋季 TC 所产生的损失已经超过了夏季 TC^[6]。例如 2016 年全球海域内的最强台风“莫兰蒂”,造成的直接经济损失高达 102 亿元;2018 年第 22 号超强台风“山竹”登陆我国,对广东、广西、海南、湖南、贵州多省份都产生了严重的影响,造成近 300 万人受灾。

秋季 TC 在我国登陆时往往伴随着强风、暴雨等一系列气象灾害。秋季 TC 在我国沿海区域登陆引发的强降水过程,常常还伴随着洪涝、泥石流、瘟疫等次生灾害,会造成受影响地区严重的人员伤亡和财产损失。

相较于夏季 TC 而言,国内外对秋季 TC 的研究相对较少,研究秋季 TC 有利于更加全面地了解 TC 活动的季节特征,提高对 TC 的认识和预测。因此,研究西北太平洋秋季 TC,对我国沿海地区具有重大的研究价值及现实意义。本文对秋季 TC 研究进展进行回顾,重点关注西北太平洋秋季 TC 的活动特征、影响秋季 TC 的海气状况、秋季超强台风易发的原因和登陆我国秋季 TC 的影响等几个方面,并对秋季 TC 未来研究的方向进行展望,以期能够为后续的研究提供科学的依据和参考。

1 西北太平洋秋季 TC 活动特征

气象意义上,一般将 6—8 月生成的 TC 定义为

夏季 TC,9—11 月生成的 TC 定义为秋季 TC。研究表明,西北太平洋超过 80% 的 TC 都生成于夏季和秋季,不同季节 TC 的特征有明显的季节差异^[7]。由于秋季 TC 拥有独特的季节气候背景,因此,许多学者对秋季 TC 活动特征进行了单独的研究,并与夏季 TC 的特征进行对比^[8-9]。

1.1 秋季 TC 频数

20 世纪 90 年代中期以来,西北太平洋夏秋季 TC 的频数都呈现下降的趋势^[10-11]。Yao 等^[8]对 1949—2016 年西北太平洋上的夏秋季 TC 进行统计研究指出,在超过 70% 的年份中,秋季和夏季的 TC 频数间有此消彼长的反位相关关系。Zhou 等^[12]将登陆的秋季 TC 按照登陆位置分为南部登陆和北部登陆两类(以 25°N 为分界线),研究表明,两类登陆的秋季 TC 之间的相关性较弱。南部地区登陆的秋季 TC 频数主要受到厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的影响,预测难度相对较小,而北部地区则受副热带环流影响较大^[12]。

1.2 秋季 TC 强度

秋季北半球冷空气加强,到达热带地区,会对 TC 强度的增强产生有利影响^[13-14]。此外,TC 的强度往往会受到西太平洋副热带高压(以下简称“西太副高”)位置的影响,当秋季西太副高脊线位于偏北、偏西的位置时,TC 拥有更大的活动空间,再配合秋季偏强的越赤道气流,有利于秋季 TC 储备更多的能量,从而使得 TC 强度增强。因此,虽然在秋季生成各个强度的 TC 频次均少于夏季,但生成强台风(24.4%)和超强台风(29.9%)的比例却远高于夏季^[8,10],具体如表 1 所示。

表 1 1949—2016 年西北太平洋夏季和秋季不同强度 TC 登陆的平均频数^[8]

Table 1 Mean frequency of landfalling TCs at different intensities in summer and autumn over the WNP during 1949–2016^[8]

强度等级	夏季 TC			秋季 TC		
	总数量/个	年平均数量/个	所占比例/%	总数量/个	年平均数量/个	所占比例/%
热带风暴	46	0.7	13.2	15	0.2	9.1
强热带风暴	92	1.4	26.4	30	0.4	18.3
台风	90	1.3	25.9	40	0.6	24.4
强台风	51	0.8	14.7	30	0.4	18.3
超强台风	69	1.0	19.8	49	0.7	29.9

1.3 秋季 TC 移动路径

TC 移动路径主要受到 TC 生成位置和周围环境的影响,西北太平洋上的 TC 普遍按以下 3 种移

动路径运动,即直线移动(向西移动)、转折登陆和北上登陆^[15-17]。

TC 的轨迹密度能对 TC 生成位置和移动路径

进行较好的反映,因此许多学者都采用该方法来对 TC 的移动路径进行研究^[8,18]。秋季 TC 移动路径往往是西风带系统、西太副高、赤道辐合带等天气系统之间相互博弈的结果^[19-21],因此秋季 TC 移动路径往往较为复杂,预测难度较大。

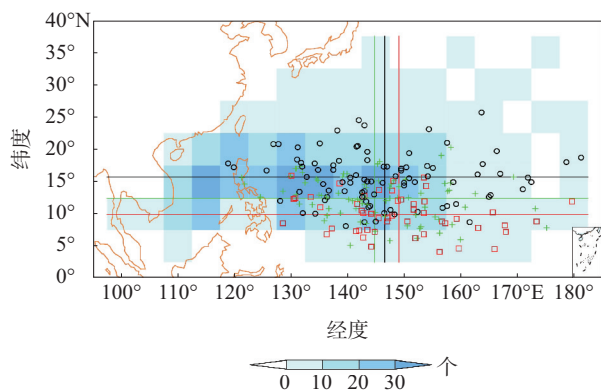
秋季与夏季在大尺度环流形势和强度上有差异,因此与夏季相比,秋季 TC 的活跃区域纬度偏低,主要出现在南海和热带太平洋洋面,移动路径大多属于偏西路径,而夏季 TC 的路径则以偏北路径居多^[8]。

1.4 秋季 TC 生成源地

夏季和秋季是西北太平洋 TC 的高发期,两个季节 TC 生成位置的空间分布一般会受到海面温度(以下简称“海温”)和季风槽的影响^[22],具有显著的季节差异^[23],呈现夏季北移、秋季南移的趋势^[24]。

西北太平洋秋季 TC 的生成位置主要集中在 3 个中心附近:(14°N, 115°E)、(14°N, 135°E)和(14°N, 145°E),如图 1 所示^[8];而夏季 TC 的生成位置主要分布在南海北部和菲律宾群岛东部,各有一个二级聚集区^[23]。

秋季登陆我国的 TC 生成位置相对偏西,高值中心位于南海东部和 130°E 附近。而秋季生成超强台风的位置则大多位于 15°N 以南的洋面上。受西太副高南退的影响,秋季 TC 向北移动的难度较大,因此,登陆我国的秋季 TC 大多在南部沿海^[7]。



黑色圆圈、绿色十字形和红色方形—9月、10月和11月生成的超强台风;黑线、绿线和红线—9月、10月和11月生成超强台风的平均位置。

图1 1949—2016年西北太平洋秋季 TC 生成位置的频数分布(色阶)^[8]

Fig.1 Spatial distribution of autumn TC genesis frequency (color scale) in the WNP from 1949 to 2016^[8]

2 西北太平洋秋季 TC 的影响因子

2.1 海气状况

2.1.1 厄尔尼诺-南方涛动

ENSO 作为对全球气候影响最为显著的海气相互作用现象,会使得大尺度环流发生变化,引发局地海温出现异常,研究表明 ENSO 事件对西北太平洋上的 TC 活动具有很强的调制作用^[25-26]。

西北太平洋 TC 的季节变化和暖洋流的活动有较好对应关系,西北太平洋上空登陆的 TC 在秋季与赤道中东太平洋的海温异常有显著的相关性,而在夏季相关性则较弱^[27]。ENSO 年秋季 TC 在西北太平洋的东南海域活动较为频繁,而在西北海域则相对较弱^[28]。Zhou 等^[12]研究指出,秋季 TC 在东亚南部地区登陆的频率与 ENSO 有较为密切的相关性,而在东亚北部地区的登陆频率则主要受欧亚大陆对流层上部遥相关的影响。石蓉蓉等^[29]研究发现,秋季 TC 的生成数量在拉尼娜(La Niña)开始年往往偏多,而在 La Niña 延续年生成数量则偏少。

Wang 等^[28]对秋季 TC 的移动路径研究中指出,在强 ENSO 年,TC 轨迹密度几乎可以达到强 La Niña 年的两倍,且西北太平洋上西北向的 TC 移动路径会呈现显著增加的趋势。此外,ENSO 事件还会对秋季 TC 的强度变化产生影响,学者们利用热带气旋累积能量(accumulated cyclone energy, ACE)来表征 TC 的平均强度。研究发现,西北太平洋上秋季 TC 的 ACE 指数呈现明显的年际变化,在 ENSO 的发展年 ACE 一般较高,而在 La Niña 衰减年的秋季 TC 强度则较低^[30-31]。但也有研究表明,ENSO 现象对西北太平洋 TC 的调节作用仅占年际变化方差的 40%^[32],且西北太平洋上生成的 TC 总数在 ENSO 年并不会出现显著的变化^[28,33]。

2.1.2 印度洋偶极子

在后续的研究中,学者们加强了对印度洋的关注,Saji 等^[34]基于热带印度洋海温异常的东西反向模态提出了印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)的概念。IOD 模态有显著的季节锁相特征,夏季为 IOD 的发展期,秋季达到成熟期^[34]。

IOD 模态可能会诱发西北太平洋的大气环流出现异常,并导致其他环境因素发生改变,从而促使秋

季 TC 的频数增加^[35]。虽然 IOD 是否发生对西北太平洋上 TC 频数的变化不会产生太大的影响^[36], 但与其厄尔尼诺 (El Niño) Modoki 事件同时发生时, 会使得季风槽东伸, 有利于 TC 生成的动力因子和热力因子随季风槽一起发生东移, 从而导致秋季 TC 的生成位置较仅 El Niño Modoki 事件时出现明显偏东的现象^[37]。

2.1.3 南海季风

南海季风的爆发与撤离和大气环流异常, 太平洋、南海海温变异都有着密切的关系^[38-39]。南海季风是秋季 TC 低层水汽和能量的主要输入者, 与南海季风的爆发相比, 南海季风的撤离通常有一个较长的过程, 该过程一般会对秋季 TC 的频数、强度以及生成位置产生影响, 因此, 许多学者对南海季风的撤离与西北太平洋 TC 之间的关系开展了研究^[40-41]。

相较于夏季 TC, 秋季 TC 受到南海季风的影响相对较小, 尽管秋季 TC 体积不大, 但有较好的对称结构, 有利于 TC 的发展^[42]。Hu 等^[40]研究表明, 南海季风的结束时间与秋季 TC 的数量存在正相关关系, 如果南海季风结束时间较常年偏迟, 则该年秋季 TC 的生成频数往往会较常年偏多, 这是由大气内部的动力作用和热力作用共同导致的。

较晚撤离的南海季风所出现的正海温异常, 会激发赤道罗斯贝 (Rossby) 波, 有助于季风槽的维持, 为秋季 TC 的生成提供有利的条件。季风槽可以促进平均动能转化为涡动动能, 使得同尺度的波得以加强。此外, 上层斜压能转换能力的提升也会促进涡动动能的发展, 从而有利于秋季 TC 的生成^[40]。然而, 目前对于 TC 的生成与南海季风撤离之间的关系仍然没有确切的说法, 也有学者认为两者之间可能有一种年代际的滞后效应^[41]。

南海季风还会对秋季 TC 的生成位置产生影响。南海季风撤离后, 西北太平洋上的热带辐合带会减弱南退, 上层的辐散中心也会向东南方向移动, 从而导致 TC 生成的平均位置也随着发生改变, 呈现向南向东的移动趋势^[41]。

2.2 秋季易发超强台风的原因

2.2.1 海温

夏季向秋季过渡时, 太阳的直射点由北向南移

动, 会导致海温偏高, 从而积攒更多的热量, 提供给 TC 的能量也有所增加。海温与 TC 的生成数量和发展强度都有一定的关系^[43], 秋季 TC 移动路径相对偏南, 低纬度的海温较高, 能够为 TC 的发展提供较大的热能供应^[24]。

Fujiwara 等^[44]对海温进行敏感性试验, 结果表明, 较暖的海温会增加大气行星边界层的等效位温, 使得大气次级环流增强, 绝对角动量向内辐合, 涡旋上升加强, 从而有利于 TC 强度的增强。还有学者指出, 夏秋季赤道东西向的海温场存在差异, 秋季异常的海温强迫会产生气压梯度, 增强低层的西风异常, 使得垂直风切变减弱, 气旋性涡度增强, 导致秋季对流活动旺盛, 从而使得秋季超强台风的发生频率增加^[3,9]。

2.2.2 季风槽

季风槽区域低层的涡度较大, 对流活动较为活跃, 因此, 季风槽的位置和强度对 TC 生成发展有重要影响。西北太平洋超过 70% 的 TC 发生发展与季风槽有关, 且与天气尺度的扰动之间也有着密切的关联^[45-47], 例如 Rossby 混合重力波向热带低压扰动的转换过程就会对 TC 的生成产生有利的影响^[48]。Wu 等^[49]发现多尺度的气候变异共同作用会导致西北太平洋上的季风槽增强, 从而使得 TC 活动出现异常活跃的现象。

西北太平洋上空有利于 TC 生成的大尺度环流形势大致分为 5 种: 季风切变 (monsoon shear, MS)、季风辐合 (monsoon confluence, MC)、反向季风槽 (reverse-oriented monsoon trough, RMT)、季风涡旋 (monsoon gyre, MG) 和偏东信风 (trade wind easterlies, TE)。其中, 夏季主要呈现为 MS 模态的特征, 而秋季则主要呈现 MC 模态的特征。两种模态下 TC 的生成和发展都与大气能量的转换有密切的相关性, MS 模态中主要是基本气流的水平切变为涡动动能的增长提供有利条件, 而 MC 模态中基本气流的水平切变和辐合对涡动动能的增长都起到了重要的作用, 为超强台风的产生提供了更为有利的动力条件^[46]。

2.2.3 大尺度环境

TC 的生成和发展往往与大气大尺度环境场的配置之间有着密切的关系。相较于夏季, 秋季 TC

的生成和发展在季风槽附近,低层更大的气旋性涡度和高层更强的气流辐散相配合,会产生强上升运动,有利于秋季 TC 强度增强。

此外,秋季中低层相对湿度的增加以及较弱垂直风切变都有利于深对流的发展^[50]。这种大尺度环境因子的变化可能与海温异常有关,但是目前对于影响大尺度环境因子的机制尚不明确,仍有待进一步研究^[36,50]。

3 登陆我国秋季 TC 的特征与影响

3.1 登陆我国的秋季 TC 强度和地理分布特征

Yao 等^[8]统计了 1949—2016 年西北太平洋上中心气压最低的前 20 个 TC(表 2),其中有 14 个 TC 属于秋季 TC,且研究发现在 2000 年后登陆我国的秋季超强台风的频数呈现明显增多的趋势。

表 2 1949—2016 年西北太平洋中心气压最低的前 20 个 TC^[8]

Table 2 Top 20 TCs with the minimum central pressure over the WNP during 1949–2016^[8]

历史排名	TC 生成时刻 (北京时)	最低气压 /hPa	TC 名称 (年份)
1	1979-10-05T02:00	870	Tip (1979)
2	1973-10-02T08:00	875	Nora (1973)
3	1975-11-16T08:00	875	June (1975)
4	1983-09-20T02:00	876	Forrest (1983)
5	1958-09-20T20:00	878	Ida (1958)
6	1978-10-17T14:00	878	Rita (1978)
7	1984-10-22T20:00	879	Vanessa (1984)
8	1971-11-08T08:00	884	Irma (1971)
9	1959-08-25T02:00	885	Joan (1959)
10	1951-08-10T20:00	886	Marge (1951)
11	1966-06-20T14:00	886	Kit (1966)
12	1961-09-08T02:00	888	Nancy (1961)
13	1969-09-19T02:00	888	Elsie (1969)
14	1983-08-04T14:00	888	Abby (1983)
15	2014-07-10T08:00	888	Rammasun (2014)
16	1954-08-24T08:00	890	Ida (1954)
17	1962-10-01T20:00	890	Emma (1962)
18	1980-10-03T02:00	890	Wynne (1980)
19	2013-11-03T14:00	890	Haiyan (2013)
20	2016-09-09T08:00	890	Meranti (2016)

西北太平洋上生成的 TC 在我国登陆点的季节性变化往往受到 TC 移动路径的影响。与夏季相比,秋季 TC 的登陆点在纬度的跨度上更加集中,主要分布在我国东南沿海区域。其中,在广东登陆的秋季 TC 频数最多,海南、台湾和福建次之,在我国的北部沿海城市则没有秋季 TC 登陆的记录^[8,51]。

3.2 登陆的秋季 TC 对我国的影响

3.2.1 冷空气活动对 TC 降水的影响

秋季是季节转换的时期,冷空气活动较为活跃,冷空气对 TC 强度有双重影响,太强的冷空气大多不利于 TC 的发展^[52],但由于初秋冷空气的强度往往较弱,因此,对 TC 强度的增强经常产生有利的影响。当冷空气与 TC 环流发生相互作用时,冷暖空气交汇还有利于强降雨的产生^[53]。卢小丹等^[54]对夏秋季 TC 引发的大暴雨进行对比研究表明,秋季 TC“海燕”(1407)引发的大暴雨主要受到冷空气的影响,而夏季 TC“威马逊”(1330)则受季风的影响更大。

在 TC 的自身条件和环境条件都较为相似的情况下,适当的冷空气侵入往往会对降水增强产生影响^[55]。因此,许多学者研究了冷空气对秋季 TC 引发暴雨的影响^[56–59]。张程明等^[60]指出当秋季冷空气侵入时,低层湿位涡的正值不稳定区与暴雨多发区往往有较好的对应关系,且对暴雨中心的落点有一定的指向作用。高安宁等^[57]指出冷空气的侵入与暖湿气流相配合,会导致温度梯度和湿度梯度增大,再加上较小的垂直风切变的作用,有利于对流云团的发展和凝结潜热的释放,从而对降水的增强产生正反馈作用。

3.2.2 远距离暴雨

秋季 TC 除了会在自身的暴雨区产生强降水之外,如果有较好的水汽条件和与之配合的天气系统的配置,还可能会引发远距离的强降水过程,从而扩大秋季 TC 的影响范围。远距离暴雨的产生是 TC 与中低纬度系统相互作用的结果^[61]。周淑玲等^[62]指出,TC 和中纬度系统发生相互作用形成具有斜压性结构的锋区及高空急流的增强都是导致远距离降水的原因。但是由于远距离降水的产生并非秋季 TC 登陆所带来的必然事件,且与 TC 发生相互作用的中纬度系统也存在不确定性,因此远距离降水过程仍然是 TC 暴雨预报的难点之一^[63]。此外,特殊的地形对于秋季 TC 引发的暴雨过程也有着较大影响^[64–66]。

目前对于秋季 TC 与暴雨之间机制的研究还主要停留在个例分析上,并没有形成完整的理论体系。不同 TC 个例所引发的暴雨机制和致灾方式往往有较大的差异。

4 小结与展望

本文对西北太平洋秋季 TC 的研究进行了回顾,主要集中在西北太平洋秋季 TC 活动特征、影响因素以及登陆我国秋季 TC 的特征与影响等 3 个方面,得到以下结论:

(1)西北太平洋上秋季 TC 和夏季 TC 的频数呈反位相特征;虽然秋季 TC 的生成频数均略小于夏季 TC,但秋季强台风和超强台风的比例却高于夏季;秋季 TC 的生成位置主要集中在(14°N,115°E)、(14°N,135°E)和(14°N,145°E)3 个中心附近,移动路径集中在低纬度地区,以偏西路径居多。

(2)西北太平洋上秋季 TC 的生成和发展常常会受到海气状况的影响,ENSO、IOD 和南海季风等都会对秋季 TC 的强度、频数以及生成位置产生影响。

(3)与夏季 TC 相比,秋季 TC 在发展过程中一般会受到较高的海温、偏东的季风槽以及更有利的大气大尺度环境场配置的影响,因此秋季 TC 更容易发展成超强台风。

(4)秋季 TC 在我国的登陆地点集中在东南沿海区域,由于受到冷空气等因素的影响,往往会对受影响的地区造成暴雨等一系列的灾害。

在过去的几十年间,TC 极端事件出现的频率大幅度增加^[67],但是,迄今的研究对于秋季 TC 的认知仍有着不足,许多问题有待于进一步研究^[68]。此外,相较于夏季 TC,对秋季 TC 结构、强度及演变过程的研究工作仍然较少。未来对秋季 TC 的研究可以加强以下方面:(1)秋季 TC 的强度演变过程以及环境特征研究。(2)秋季 TC 的活动特征及年代际变化的研究。(3)秋季 TC 暴雨的研究。

参考文献:

- [1] YOU L J, GAO J Y, LIN H, et al. Impact of the intra-seasonal oscillation on tropical cyclone genesis over the western North Pacific[J]. *Int J Climatol*, 2019, 39(4): 1969-1984.
- [2] 中国气象局国家气象中心. 热带气旋等级: GB/T 19201—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [3] CHAN J C L. Interannual and interdecadal variations of tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2005, 89(1/2/3/4): 143-152.
- [4] CORPORAL-LODANGCO I L, LESLIE L M, LAMB P J. Impacts of ENSO on Philippine tropical cyclone activity[J]. *J Climate*, 2016, 29(5): 1877-1897.
- [5] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. *大气科学*, 2001, 25(3): 420-432.
- [6] 高拴柱, 董林, 许映龙, 等. 2016 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. *气象*, 2018, 44(2): 284-293.
- [7] BASCONCILLO J, MOON I J. Increasing activity of tropical cyclones in East Asia during the mature boreal autumn linked to long-term climate variability[J]. *npj Clim Atmos Sci*, 2022, 5(1): 4.
- [8] YAO X P, ZHAO D J, LI Y. Autumn tropical cyclones over the western North Pacific during 1949–2016: a statistical study[J]. *J Meteorol Res*, 2020, 34(1): 150-162.
- [9] FAN T T, XU S B, HUANG F, et al. The phase differences of the interdecadal variabilities of tropical cyclone activity in the peak and late seasons over the western North Pacific[J]. *Theor Appl Climatol*, 2019, 136(1/2): 77-83.
- [10] 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.
- [11] CHOI Y, 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.
- [12] ZHOU X Y, LU R Y. Interannual variability of the tropical cyclone landfall frequency over the southern and northern regions of East Asia in autumn[J]. *J Climate*, 2019, 32(24): 8677-8686.
- [13] DONG M Y, CHEN L S, LI Y, et al. Numerical study of cold air impact on rainfall reinforcement associated with tropical cyclone Talim (2005): I. impact of different cold air intensity[J]. *J Trop Meteor*, 2013, 19(1): 87-96.
- [14] WANG Y P, HUANG Y J, CUI X P. Impact of mid- and upper-level dry air on tropical cyclone genesis and intensification: a modeling study of Durian (2001)[J]. *Adv Atmos Sci*, 2018, 35(12): 1505-1521.
- [15] 张倩影, 钟少波, 黄全义. 基于模糊 C 均值的广东省登陆热带气旋路径分类研究[J]. *灾害学*, 2015, 30(4): 187-193.
- [16] 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(11/12): 3317-3329.
- [17] MEI W, XIE S P. Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s[J]. *Nat Geosci*, 2016, 9(10): 753-757.
- [18] MEI W, XIE S P, ZHAO M, et al. Forced and internal variability of tropical cyclone track density in the western North Pacific[J]. *J Climate*, 2015, 28(1): 143-167.
- [19] 陈登俊. 浅析0116号台风“百合”路径异常的原因[J]. *中国航海*, 2003, 26(2): 52-56.
- [20] 唐文, 苏洵. 1621秋季台风“莎莉嘉”路径突变和暴雨成因分析[J]. *气象研究与应用*, 2017, 38(4): 32-38.
- [21] 黄滢, 潘一铭, 蒋静. 秋季台风“海燕”的特点及成因分析[J]. *气象研究与应用*, 2019, 40(3): 13-17.
- [22] MCBRIDE J L. Tropical cyclone formation[M]//Russel Elsberry. *Global perspectives on tropical cyclones*. Geneva: World Meteorological Organization, 1995: 63-105.
- [23] 秦丽娟, 董庆, 薛存金. 西北太平洋热带气旋源地30a的季节和年代际变化[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(5): 723-728.
- [24] CHEN T C, WANG S Y, YEN M C. Interannual variation of the tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *J Climate*, 2006, 19(21): 5709-5720.
- [25] PATRICOLA C M, CAMARGO S J, KLOTZBACH P J, et al. The influence of ENSO flavors on western North Pacific tropical cyclone activity[J]. *J Climate*, 2018, 31(14): 5395-5416.
- [26] ZHAO H K, WANG C Z. On the relationship between ENSO and tropical cyclones in the western North Pacific during the boreal summer[J]. *Climate Dyn*, 2019, 52(1/2): 275-288.
- [27] WU L G, WANG B. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. *J Climate*, 2004, 17(8): 1686-1698.
- [28] WANG B, CHAN J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. *J Climate*, 2002, 15(13): 1643-1658.
- [29] 石蓉蓉, 雷媛, 胡波. 西北太平洋秋季热带气旋发生规律分析[J]. *浙江气象*, 2008, 29(3): 6-8.
- [30] 吴彦洁, 黄菲, 许士斌, 等. 秋季西北太平洋热带气旋累积能量的年际变化及其预报[J]. *海洋气象学报*, 2018, 38(4): 19-27.
- [31] CAMARGO S J, SOBEL A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO[J]. *J Climate*, 2005, 18(15): 2996-3006.
- [32] CAMARGO S J, SOBEL A H. Revisiting the influence of the quasi-biennial oscillation on tropical cyclone activity[J]. *J Climate*, 2010, 23(21): 5810-5825.
- [33] CAMARGO S J, ROBERTSON A W, GAFFNEY S J, et al. Cluster analysis of typhoon tracks. Part II: large-scale circulation and ENSO[J]. *J Climate*, 2007, 20(14): 3654-3676.
- [34] SAJI N H, GOSWAMI B N, VINAYACHANDRAN P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean[J]. *Nature*, 1999, 401(6751): 360-363.
- [35] 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.
- [36] 周群, 魏立新. 两类 ENSO 与 IOD 对西北太平洋季风槽及热带气旋生成的影响[M]//中国海洋学会. *中国海洋学会 2019 海洋学术(国际) 双年会论文集*. 北京: 海洋出版社, 2019: 14-22.
- [37] 朱赛智, 孟祥凤. 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*, 2015, 34(2): 255-260.
- [38] 陈永利, 白学志, 赵永平. 南海夏季风爆发与热带海洋海温和大气环流异常变化关系的研究[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(4): 388-399.
- [39] 温之平, 吴乃庚, 陈桂兴. 南海夏季风爆发早晚的经向环流异常的机理研究[J]. *大气科学*, 2016, 40(1): 63-77.
- [40] HU P, HUANGFU J L, CHEN W, et al. Impacts of early/late South China Sea summer monsoon withdrawal on tropical cyclone genesis over the western North Pacific[J]. *Climate Dyn*, 2020, 55(5/6): 1507-1520.
- [41] HU P, CHEN W, CHEN S F. Interdecadal change in the South China Sea summer monsoon withdrawal around the mid-2000s[J]. *Climate Dyn*, 2019, 52(9): 6053-6064.
- [42] 卢山, 邓文剑. 源自东风波台风“灿都”发展过程的结构特征分析[J]. *热带气象学报*, 2013, 29(1): 93-98.
- [43] 柳伊, 范磊. 西北太平洋低空环流与海温异常关系的季节性差异[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(3): 36-42.
- [44] FUJIWARA K, KAWAMURA R. Active role of sea surface temperature changes over the Kuroshio in the development of distant tropical cyclones in boreal fall[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2021, 126(23): e2021JD035056.

- [45] WU L, WEN Z P, HUANG R H, et al. Possible linkage between the monsoon trough variability and the tropical cyclone activity over the western North Pacific[J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(1):140-150.
- [46] FENG T, CHEN G H, HUANG R H, et al. Large-scale circulation patterns favourable to tropical cyclogenesis over the western North Pacific and associated barotropic energy conversions[J]. *Int J Climatol*, 2014, 34(1):216-227.
- [47] 赵海坤, 吴立广. 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*, 2015, 35(1):108-118.
- [48] CHEN G H, HUANG R H. Interannual variations in mixed Rossby-gravity waves and their impacts on tropical cyclogenesis over the western North Pacific [J]. *J Climate*, 2009, 22(3):535-549.
- [49] WU L, ZHANG H J, FENG T, et al. Tropical cyclones and multiscale climate variability: the active western North Pacific typhoon season of 2018[J]. *Sci China Earth Sci*, 2020, 63(1):1-11.
- [50] SHI M Y, WANG S L, QI X X, et al. The influence of large-scale environment on the extremely active tropical cyclone activity in November 2019 over the western North Pacific[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(4):501.
- [51] 成晔, 高尧, 田敏, 等. 1949~2017年间西北太平洋热带气旋变化特征初探[J]. *海洋湖沼通报*, 2019(1):31-38.
- [52] 于玉斌. 冷空气影响热带气旋发生发展的研究进展[J]. *海洋学报*, 2012, 34(3):173-178.
- [53] 黄莉, 白龙, 李紫甜. 适当冷空气对秋季台风暴雨增幅作用研究[J]. *灾害学*, 2018, 33(2):38-44.
- [54] 卢小丹, 王黎娟, 刘国忠, 等. 两个不同季节台风引发广西特大暴雨的水汽和螺旋度对比分析[J]. *热带气象学报*, 2017, 33(3):375-385.
- [55] 黄滢, 许文龙, 郭亮, 等. 0917秋季台风“芭玛”移动特点和暴雨成因分析[J]. *气象研究与应用*, 2012, 33(增刊1):19-21.
- [56] 王远超, 梁祥毅, 林宝亭, 等. 秋季台风“纳沙”大范围暴雨的机制研究[J]. *气象研究与应用*, 2012, 33(增刊2):74-77.
- [57] 高安宁, 张瑞波. 2011年秋季强台风“纳沙”导致广西灾害成因分析[J]. *灾害学*, 2013, 28(1):54-58.
- [58] 周福, 钱燕珍, 朱宪春, 等. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析[J]. *气象*, 2014, 40(8):930-939.
- [59] 谢惠敏, 任福民, 李国平, 等. 超强台风丹娜丝对1323号强台风菲特极端降水的作用[J]. *气象*, 2016, 42(2):156-165.
- [60] 张程明, 曹艳艳, 姚秀萍. 一次秋季台风暴雨的物理量诊断分析[J]. *科技通报*, 2011, 27(4):495-502.
- [61] 蒋尚城, 谢安. 西太平洋台风与北方暴雨[M]//北方灾害性天气文集. 北京:气象出版社, 1981:6-10.
- [62] 周淑玲, 王科, 闫淑莲, 等. 山东半岛两次秋季台风远距离大暴雨的特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(2):84-93.
- [63] 丛春华, 陈联寿, 雷小途, 等. 台风远距离暴雨的研究进展[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(2):264-270.
- [64] 黄先伦, 张弘豪, 黄小丹, 等. 秋季台风“彩虹”引发阳江特大暴雨的成因分析[J]. *广东气象*, 2017, 39(3):17-21.
- [65] 李慧芹, 李江南, 于艳, 等. 一次海南秋季台风暴雨的特征和成因分析[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(1):133-144.
- [66] 章莹菁, 申屠行钟, 孟倩, 等. 秋季台风“莎莉嘉”和“海马”降水特征对比分析[J]. *浙江气象*, 2017, 38(4):33-37.
- [67] WU L, WEN Z P, HUANG R H. Tropical cyclones in a warming climate[J]. *Sci China Earth Sci*, 2020, 63(3):456-458.
- [68] EMANUEL K. 100 years of progress in tropical cyclone research[J]. *Meteor Monogr*, 2018, 59:15.1-15.68.