

La Niña 事件海温异常对 2022 年 9 月北太平洋热带气旋活动异常的影响

刘达^{1,2} 董林¹ 向纯怡¹

1. 国家气象中心, 北京 100081

2. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

摘要: 2020—2023 年连续发生的三次 La Niña 事件引起了广泛关注, “三重” La Niña 现象引起了全球天气和气候异常变化。利用中央气象台和美国国家飓风中心热带气旋数据集统计发现, 2022 年 9 月北太平洋活跃的热带气旋数量远超过历史同期平均水平, 其中东北太平洋热带气旋数量达到了近 70 年来的峰值。基于再分析数据, 利用热带气旋潜在生成指数分析发现对流层中层的垂直运动对北太平洋活跃的热带气旋数量增多有显著贡献。进一步研究发现, 在 La Niña 事件期间, 西北太平洋暖池持续增温, 菲律宾附近对流活动增强, 海洋性大陆附近西南风增强, 迫使副热带高压北抬, 西北太平洋热带气旋活跃区域对流层低层反气旋式环流转变为气旋式环流, 对流层中层上升运动增强, 为西北太平洋热带气旋的活动提供了有利的背景场。与此同时, La Niña 事件导致东北太平洋经向温度梯度不断增加, 经向哈得来环流增强, 中低纬度上升运动增强, 墨西哥西部副热带高压向东移动, 东北太平洋活跃的热带气旋数量增加。

关键词: 热带气旋, La Niña, 北太平洋, 大尺度环流

The Effects of La Niña related Sea Surface Temperature Anomalies on
the Abnormal Activities of Tropical Cyclone over the North Pacific

Ocean in September 2022

LIU Da¹ DONG Lin¹ XIANG Chunyi¹

1. National Meteorological Centre, Beijing 100081

国家自然科学基金项目(42205068)、国家重点研发计划(2023YFC3107092)、中国气象局气象能力提升联合研究专项(24NLTSZ004)和中国气象局上海台风研究所台风基金项目(TFJJ202407)共同资助

第一作者: 刘达, 主要从事台风与海洋气象预报工作, Email: liuda@cma.gov.cn.

通讯作者: 董林, 主要从事台风预报及研究, E-mail: donglin@cma.gov.cn.

Abstract: The three consecutive La Niña events occurred from 2020 to 2023 have been widespread concerned, which also led to various global weather and climate anomalies. By using the tropical cyclone datasets from the National Meteorological Center and the National Hurricane Center of the United States, the findings show that the number of tropical cyclones generated in the Northern Pacific in September 2022 is far more than the historical average over the same period, with the number of tropical cyclones in the Northeast Pacific reached the peak in the past 70 years. Based on the reanalysis datasets, this study analyzed the Dynamic Genesis Potential index and found that the vertical movement in the middle troposphere made a great contribution to the increased amount of tropical cyclones in the Northern Pacific. Further researches show that during the La Niña event, the temperature of warm pool in the Northwest Pacific continued to warm, convective activity near the Philippines enhanced and the southwesterlies over Maritime Continent strengthened, the subtropical high over the Northwest Pacific shifted northward. The emergence of low-level cyclonic circulation enhanced the ascending movement of the middle troposphere, which is favorable for the genesis of tropical cyclones. At the same time, the La Niña event led to an increase in the meridional temperature gradient over the Northeast Pacific, the meridional Hadley circulation being intensified, thus the upward movement over the middle and low latitudes strengthened. As the subtropical high located in western Mexico moves eastward, the number of active tropical cyclones in the Northeast Pacific increases.

Key Words: tropical cyclone, La Niña, Northern Pacific, large-scale circulation

引言

热带气旋 (tropical cyclone, TC) 是生成于热带或副热带洋面上, 有组织的对流和确定的气旋性环流的非锋面性涡旋的统称, 常伴有强烈的风雨、风暴潮等灾害性天气, 给途经的海域、船只、港口以及陆地带来破坏性影响, 因此 TC 相关研究一直是大气科学领域的热点课题。北太平洋是全球海域中 TC 活动最频繁的区域, 几乎全年每月都有 TC 生成, 其中西北太平洋是全球 TC 活动最活跃的海域, 东北太平洋活跃的气旋数量位居前三, 并且上述两个海域 TC 活动具有相似的季节性特征, 均表现为春季 TC 活动较少, 夏季进入活跃期, 随后秋季 TC 活动逐渐减弱 (Vincent and Fink, 2001)。TC 的生成、发展和移动均与不同尺度环流系统的相互作用密切相关, 因此在 El Niño、La Niña 等异常气候变化影响下, TC 活动有何变化以及这种变化由何原因引起已经成为公众和科学家们关注的热点问题。

TC 通常生成于海面温度 (sea surface temperature, SST) 适宜的海域, 这一基本条件已经得到了科学界的广泛认可 (Gray, 1968), 温暖的洋面为 TC 的生成和发展提供了有利的热力条件。海洋对 TC 生成的影响并不仅限于提供了有利的下垫面条件, 还可以通过海气相互作用影响其活动。恩索 (ENSO) 是热带太平洋乃至全球热带海洋最显著的异常信号, 可影响全球不同地区的天气和气候。已有研究考察了 ENSO 与 TC 生成频率之间的关系, Chan (1985) 和 Wu and Lau (1992) 等研究发现西北太平洋 TC 生成频数存在约 3.5 a 的年际变化, 并指出这一变化周期与 ENSO 循环 3~4 a 的周期密切相关, 同时统计发现 El Niño 年即 ENSO 的暖位相年, TC 生成频数偏少, 冷位相 La Niña 年则偏多。随后 Lander (1994) 研究指出 ENSO 不同位

相对应的 TC 活跃区域存在明显差异，El Niño 时期西北太平洋东部 TC 活跃，La Niña 期间 TC 活跃的区域向西偏移。热带太平洋 SST 气候态呈现西高东低的特征，在 ENSO 事件期间中东太平洋 SST 出现异常，其中 La Niña 事件中的东太平洋 SST 更冷，此时东北太平洋 TC 活动趋于减少（Vincent and Fink, 2001; Wang and Lee, 2009）。

ENSO 对 TC 活动的影响十分复杂，研究指出 ENSO 引起沃克环流上升支的经向移动，导致西北太平洋 TC 活动异常（Wu and Lau, 1992; Lander 1994; Chen et al,1998）。在 El Niño 时期，沃克环流上升支东移至赤道中太平洋，下沉支位于西北太平洋西侧，从而抑制了该区域 TC 活动；La Niña 期间则与之相反。东北太平洋 TC 多活跃于东南季风与信风辐合所形成的季风槽中，El Niño 期间季风加强，季风槽随之加深，东北太平洋 TC 活跃，对流层垂直风切变减弱并且水汽增加，均有利于 TC 强度的发展（Chu and Wang, 1997）。

自 2020 年 8 月至 2021 年 4 月，热带太平洋经历了一次 La Niña 事件，随后 2021 年 9 月，ENSO 再次进入 La Niña 位相，2022 年热带太平洋出现第三次 La Niña 事件并持续至 2023 年 3 月（国家气候中心, 2023）。罕见的“三重”La Niña 事件激发了科学界的热烈探讨，特别是关注此种异常气候背景下极端灾害性天气的发生及其影响（Geng et al, 2023）。2022 年热带太平洋第三次进入 La Niña 位相后，西北太平洋 TC 活动呈现阶段性活跃的特征，即 9—11 月生成的 TC 约占全年总数的 52%，其中 9 月中下旬有 7 个 TC 生成（钱奇峰等, 2023），东北太平洋也由 8 月 TC 生成数偏少转为 9 月生成数达历史极值。什么导致了上述两个海域 TC 活动由不活跃转为活跃？此时大尺度环流系统具有怎样的特征？上述环流系统的变化与 La Niña 事件

有何联系？通过分析 9 月环流系统的特征和异常探讨上述问题成因，从而为未来气候异常背景下判断 TC 活动变化提供参考。

使用 NCEP/DOE 再分析资料、中国气象局热带气旋最佳路径数据集、美国联合台风警报中心（JTWC）最佳路径数据集等数据，从不同尺度环流系统相互影响的角度出发，分析 2022 年 9 月西北太平洋和东北太平洋 TC 活动异常的大尺度环流背景特征及其异常。

1 数据与方法

1.1 数据

使用美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）再分析海面温度数据（ERSSTv5; Huang et al, 2017），NCEP/DOE 再分析资料中风场、垂直速度、气温等变量（<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>；Kanamitsu et al, 2002）对相关大尺度环流系统进行了分析。

利用 1949—2020 年中国气象局热带气旋最佳路径数据集（http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_sm.html；Ying et al, 2014；Lu et al, 2021）及 JTWC 热带气旋最佳路径数据集分别统计和分析了西北太平洋和东北太平洋的 TC 活动基本特征。根据中央气象台、美国国家飓风中心发布的西北太平洋和东北太平洋路径数据统计了 2022 年 TC 生成数量。

1.2 方法

为了统一分析西北太平洋和东北太平洋 TC 异常活动情况及其与 La Niña 事件的关系，使用 Wang and Murakami（2020）建立的适

用于全球 TC 生成预测的潜在生成指数（dynamic genesis potential index, DGPI）判断环流背景是否有利于 TC 活跃。该指数统计了 TC 生成相关的大尺度动力、热力因子，并与全球各个海域 TC 生成数量进行统计检验，确定了低层绝对涡度、对流层垂直速度和垂直风切变以及 500 hPa 纬向风的经向切变是对全球 TC 生成具有指示作用的因子，DGPI 计算如式（1）所示：

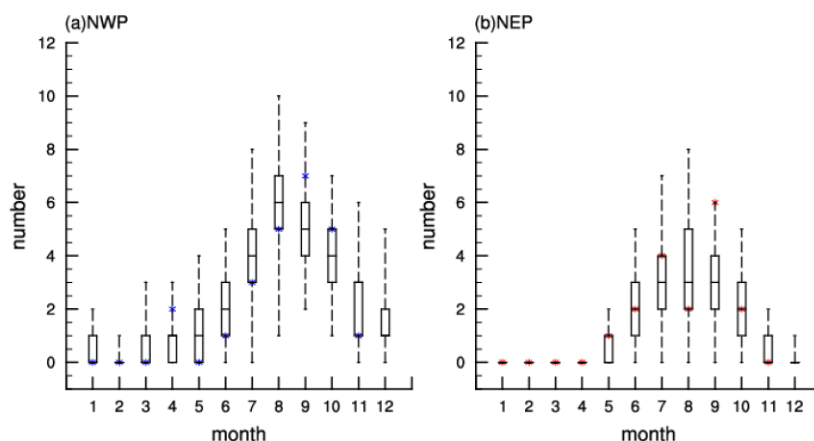
$$DGPI = (2 + 0.1V_s)^{-1.7} \left(5.5 - \frac{\partial u}{\partial y} 10^5\right)^{2.3} (5 - 20\omega)^{3.3} (5.5 + |10^5\eta|)^{2.4} e^{-11.8 - 1.0} \quad (1)$$

式中： V_s 代表 200~850 hPa 垂直风切变， u 为 500 hPa 纬向风速， ω 为 500 hPa 垂直速度， η 是 850 hPa 绝对涡度。使用 DGPI 分析影响西北太平洋和东北太平洋 TC 异常活动的关键环流因子。

2 北太平洋热带气旋概况

统计分析 1949—2020 西北太平洋和东北太平洋逐月 TC 生成情况，发现其呈现出明显的季节特征（图 1），夏秋季节为上述两个海域 TC 活跃的主要时段，其中 6—7 月 TC 生成数量逐渐增多，8 月为 TC 最显著活跃时期，9 月开始 TC 生成数量明显降低。回顾 2022 年 TC 活动情况，两个海域活跃的 TC 数量均在 9 月达到峰值，且远高于历史同期均值；西北太平洋夏季 TC 生成数量偏少，低于历史同期平均值，9 月开始 TC 生成增多，9—10 月共计生成 12 个 TC，较历史同期（8.5 个）偏多 3.5 个，使得总生成数量由夏季低于平均转为超过历史均值 1.1 个；东北太平洋生成的 TC 数量达到 17 个，远高于气候平均值（13.38 个），其中 9 月活跃的 TC 数量达到了历史极值，并且远高出同期均值 2.9 个。由 8 月进入 9 月后，西北太平洋和东北太平洋活跃的 TC 数量均从低于历史同期 25% 的年份转为远多于多数

年份。

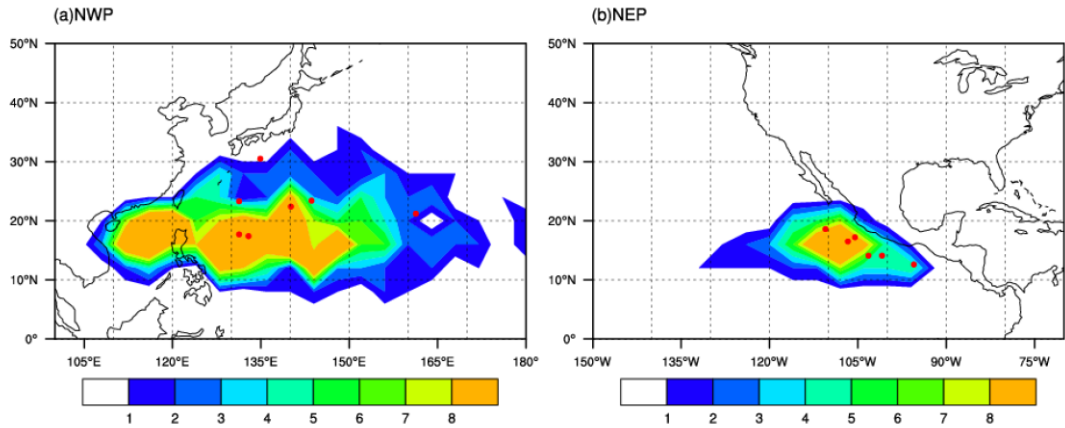


注：箱线图中虚线的上端和下端分别代表 TC 生成数量的最大值和最小值，箱体内部三条实线自下而上分别代表生成数量第 25%、50% 和 75% 分位值，“*” 为 2022 年 TC 数量。

图 1 1949—2020 年 (a) 西北太平洋, (b) 东北太平洋 TC 逐月生成数量 (单位: 个)

Fig.1 The averaged monthly number (1949-2020, unit: number) of TC genesis over (a) Northwest Pacific, (b) Northeast Pacific

TC 通常活跃在一定区域内,针对影响 TC 生成的重要环流系统,首先统计了东北太平洋和西北太平洋 TC 生成区域(图 2),上述两个海域热带气旋 9 月活跃的中心区域纬度范围相似,均处于 15° N 附近,西北太平洋作为全球 TC 生成数量最多的海域,其 TC 活跃范围更广,而东北太平洋 TC 活跃的范围相对集中。对比 2022 年 TC 生成位置,西北太平洋 TC 生成位置更偏向于历史同期的北侧,9 月活跃的 TC 均生成于 15° N 以北,而东北太平洋均偏向于 107° W 大值区的东侧。9 月,西北太平洋和东北太平洋不仅 TC 生成数量较历史同期异常偏多,且生成位置也出现一致的偏北、偏东特征。因此,大尺度环流背景的变化是影响 TC 生成显著异常的关键因素。



注：红色圆点为 2022 年 9 月 TC 生成位置。

图 2 (a) 西北太平洋, (b) 东北太平洋 1949—2020 年 9 月 TC 平均生成源地 (填色, 单位: 个)

Fig.2 The averaged location of TC genesis in September from 1949 to 2020 over (a) Northwest Pacific, (b) Northeast Pacific (contour, units: number)

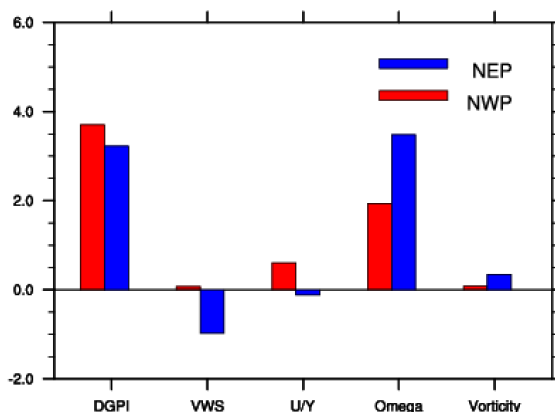
3 北太平洋大尺度环流背景

由上可见, 受大尺度环流系统变化的影响, 2022 年 9 月北太平洋 TC 生成数量较历史同期偏多, 且生成位置偏向于历史同期一侧。影响 TC 生成的大尺度环流系统十分复杂, 前人研究指出季风槽、副热带高压 (以下简称副高)、赤道辐合带等大尺度系统均可以影响东北太平洋和西北太平洋的 TC 活动 (张永宁等, 2001; 孙秀荣和端义宏, 2003; Wu and Chu, 2007)。为了探究此次 TC 异常活动中的关键环流系统, 利用式 (1) 中相较于气候态变化最为显著的要素, 用以筛选需要关注的环流系统。对于某一个气象变量, 如温度场 (T), 可将其写为:

$$T = \bar{T} + T' \quad (2)$$

式中: \bar{T} 代表气候态, T' 代表偏离气候态的距平变化, 那么式 (1) 中

某一项利用实时数据计算，其他则用气候态代替，考察该项目的变化对 DGPI 的影响 (Wang et al, 2021)，通过选取对 DGPI 影响最显著的要素，明确与 TC 异常活动相关的环流系统。利用上述方法比较 DGPI 的距平变化可以发现 (图 3)，2022 年 9 月东北太平洋和西北太平洋 DGPI 较历史同期偏高，相应的上述两个海域 TC 生成频数增加，表明该指数可以较好地表征大尺度环流背景是否有利于 TC 生成。进一步比较对流层垂直风切变、垂直速度、绝对涡度以及经向风切变变化可以发现，对流层垂直速度显著正异常变化是导致 9 月 DGPI 偏高的主要贡献项。



注：“VWS”、“U/Y”、“ w ”及“Vorticity”分别为式 (1) 中对流层垂直风切变、经向风切变、 w 以及绝对涡度。

图 3 2022 年 9 月西北太平洋 ($10^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{ N}$ 、 $105^{\circ} \sim 155^{\circ} \text{ E}$)，东北太平洋 ($10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{ N}$ 、 $90^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{ W}$) DGPI 及各项的变化

Fig. 3 The variations of DGPI and each item over Northwest Pacific (10° N - 30° N , 105° E - 155° E , red bars), Northeast Pacific (10° N - 20° N , 90° W - 130° W , blue bars) in September 2022

副高是北太平洋对流层 500 hPa 最具代表性的大尺度环流系统，

其影响的区域通常会出现强烈的下沉气流，因此对于 500 hPa 垂直运动的变化具有一定的指示作用。前人研究指出副高的强度和位置可以影响西北太平洋 TC 的生成，存在显著的负相关，即副高越强，西北太平洋 TC 生成数量越少（龚道溢和何学兆，2002）。此外，副高也影响东北太平洋 TC 活动，尤其是北大西洋跨越美洲大陆西伸的副高与北太平洋副高之间的相对位置对东北太平洋 TC 的活动具有显著影响（张永宁等，2001）。

利用刘芸芸等（2012）提出的副高强度和面积指数考察 2022 年西太平洋副高强度的变化（图 4），可以发现 6—8 月副高的强度和面积几乎均较历史呈现正距平，对应的西北太平洋 TC 生成数量偏少，进入 9 月随着副高强度及面积正距平明显减小，对应的活跃的 TC 数量增加。从气候态上看，西北太平洋、北大西洋副高脊线主要位于 26° N 附近（图 5），西伸脊点分别位于 130° E、 120° W 附近，对比副高与上述海域 TC 生成位置可见，多数 TC 生成于副高西南侧。2022 年 9 月，西北太平洋副高脊线位于 28° N 附近，较历史同期位置偏北，副高的位置与西北太平洋 TC 活动具有密切关系，随着副高的北抬其南侧的上升运动趋于活跃，从而有利于 TC 生成（朱晶晶等，2016；Li et al, 2019），受此影响月内活跃的 TC 一致出现在历史活跃区域北部。东北太平洋 TC 活动主要受北大西洋副高影响，副高西边界位于墨西哥加利福尼亚半岛附近，较历史均值偏东，副高的东退不仅有利于东北太平洋 TC 的活跃，同时使得 TC 的生成位置偏东。因此，副高的调整对北太平洋 TC 生成具有明显的影响。

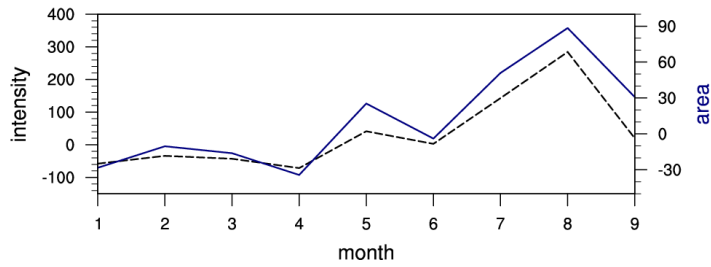
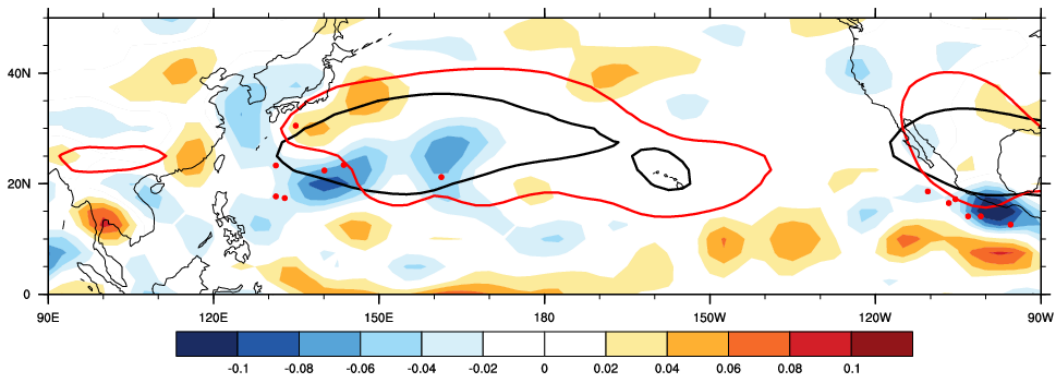


图 4 2022 年 1—9 月西太平洋副高强度（黑色虚线）和面积（蓝色实线）较相较于 1990—2020 年同期距平

Fig.4 The anomalies of intensity (dash black line) and area (solid blue line) of subtropical high from January to September in 2022 compared with the same period of 1990-2020.



注：红色圆点为 2022 年 9 月 TC 的生成位置。

图 5 1990—2020 年（黑线）和 2022 年 9 月（红线）北太平洋 588 dagpm 线，以及 2022 年 9 月较 1990—2020 年同期垂直速度距平（填色，单位： $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）

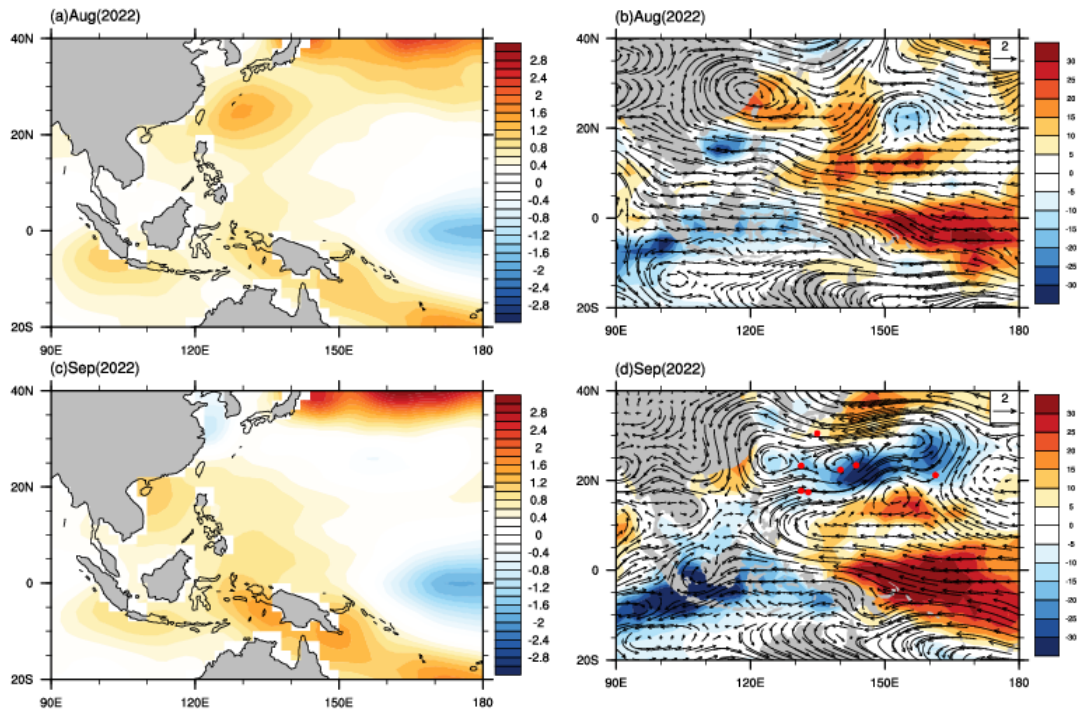
Fig. 5 588dagpm isolines over North Pacific in September (red line represent 2022, black line is climatological mean from 1991 to 2020), and the anomalous vertical wind speed in September 2022 compared to the same time of 1990-2020 (unit: Pa/s)

3.1 西北太平洋副高变化成因

副高的异常变化直接导致了 2022 年 9 月西北太平洋和东北太平洋 TC 生成异常偏多且生成位置较历史同期产生一致性的分布，SST

响副高强度和位置的重要因素，研究指出西太暖池 SST 异常可以通过影响菲律宾以东地区的对流活动改变副高的位置，SST 出现正异常时，菲律宾以东对流活动旺盛，导致副高偏北，反之则偏南（黄荣辉和孙凤英，1994；黄荣辉等，2005）。

随着 La Niña 事件的再次发展，赤道中东太平洋 SST 冷异常不断发展，同时西太暖池（ $0^{\circ} \sim 14^{\circ} \text{ N}$ 、 $130^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{ E}$ ）SST 暖异常逐渐增强（图 6c）。暖池增温可能会导致大气对流活跃，对外长波辐射（outgoing longwave radiation, OLR）可较好地表征对流的活跃情况，负异常越显著则对流活动越强，对比 2022 年 8 月、9 月西太平洋 SST 和 OLR 距平变化可见，随着暖池的增温，菲律宾区域对流活动趋向于活跃（图 6d）。9 月，海洋性大陆附近风场由东风转为变西南风，西南风的增强迫使副高北抬， $15^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{ N}$ 的 TC 生成区域的大气环流由反气旋式转变为气旋式，对流层上升运动增强，有利于 TC 的生成和发展。



注：图 d 中红点为 9 月 TC 生成位置。

图 6 2022 年 8 月和 9 月 (a, c) SST (单位: $^{\circ}\text{C}$), (b, d) 700 hPa 风场 (风矢, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 及 OLR (填色, 单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 较 1990—2020 年同期距平演变

Fig. 6 The anomalous variations of (a, c) sea surface temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) and (b, d) wind in 700hPa (unit: m/s) and OLR (unit: W/m^2) during August to September in 2022 compared to the same period of 1990 - 2020.

研究指出 ENSO 事件发生期间赤道中东太平洋 SST 异常变化可以通过驱动大气环流影响北太平洋中高纬的海气热量交换, 从而导致北太平洋中高纬出现环流、SST 异常变化, 经向大气环流起到了“大气桥”的作用, 使得赤道地区 SST 变化影响中高纬度地区 (Deser and Blackmon, 1995; Zhou et al, 2002)。La Niña 事件期间赤道太平洋信风持续偏强 (图 7a), 菲律宾以东洋面正的 SST 距平发展维持 (图 7b), 正的 SST 距平通过低纬度经向南风将赤道区域的水汽和热量输送到中高纬度, 影响上述区域的热力条件, 中纬度 SST 出现正距平

使得海洋成为大气的热源。利用潜热通量、感热通量以及长波辐射和短波辐射之和作为净热通量，考察海气热量交换变化，其中定义各项变量为正代表海洋加热大气（刘娜，2010），如图 8a 所示。与图 6c 中西北太平洋正 SST 距平相对应的是海洋对大气的热通量输送，大气吸收热量后温度升高，气压降低，从而有利于对流层上升运动的增强。此外，偏南风输送导致中高纬度湿度增加（图 8b），暖湿的不稳定层结有利于 TC 暖心结构的形成（陈联寿和丁一汇，1979）。

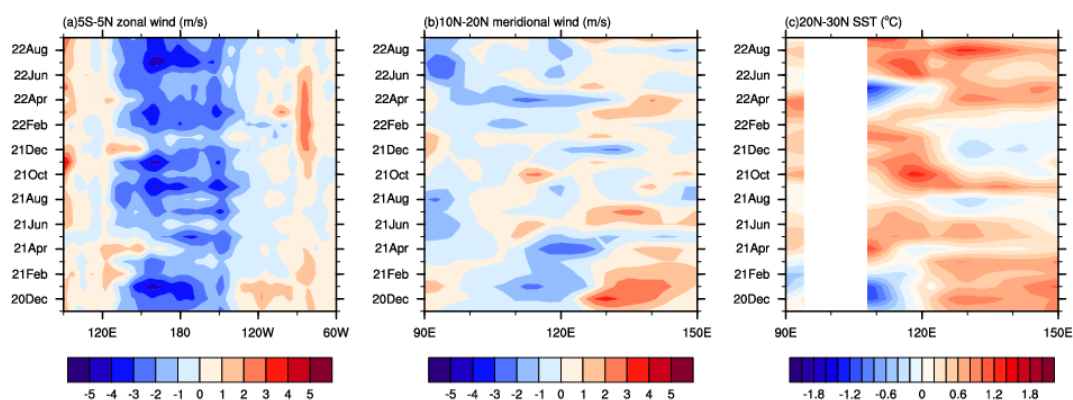
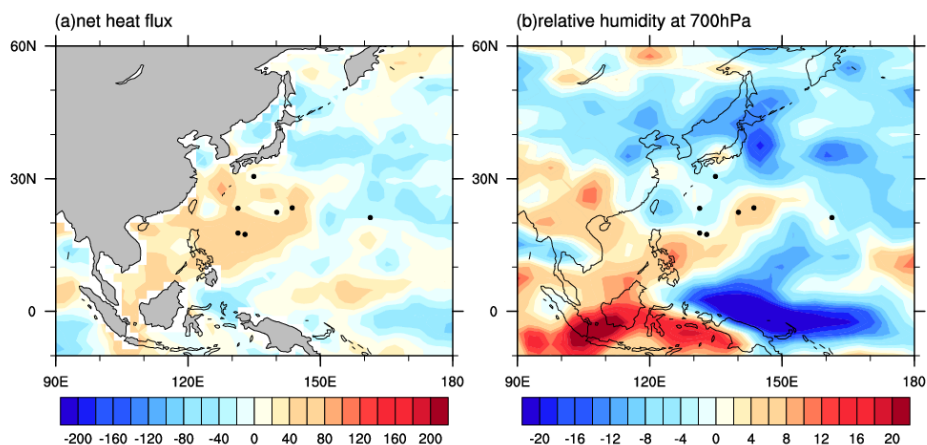


图 7 2020 年 11 月至 2022 年 9 月 (a) 赤道太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$) 1000 hPa 纬向风场距平 (单位: m/s), (b) 西北太平洋中高纬 ($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$) 1000 hPa 经向风场距平 (单位: m/s), 以及 (c) 太平洋 ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$) SST 距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 7 The variations of (a) anomalous zonal wind (unit: m/s) in 1000hPa over equatorial Pacific ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$), and (b) anomalous meridional wind (unit: m/s) in 1000hPa over Pacific ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$), and (c) sea surface temperature anomalies (unit: $^{\circ}\text{C}$) over Pacific ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$) from

November 2020 to September 2022.



注：黑色圆点为2022年9月TC生成位置。

图8 2022年9月西北太平洋(a)净热通量(单位: $W \cdot m^{-2}$)和(b)相对湿度(单位: %)

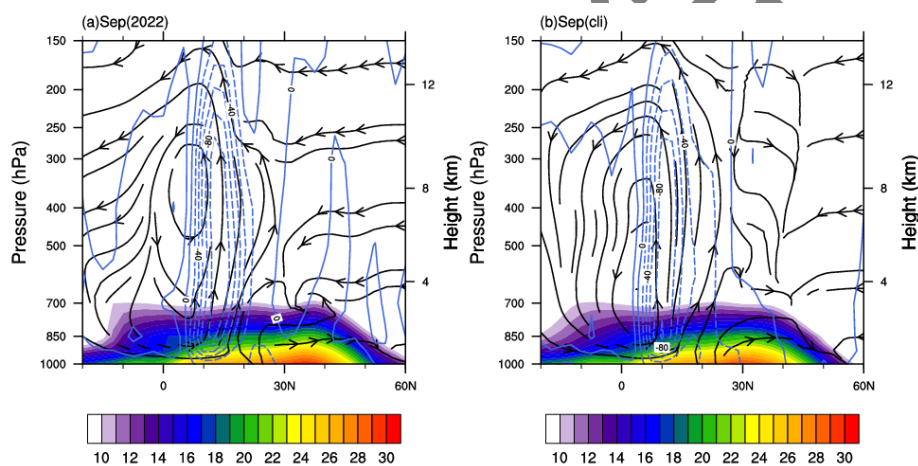
Fig. 8 The (a) net heat flux (unit: W/m^2) and (b) relative humidity (unit: %) over Northwest Pacific in September 2022.

综上所述，伴随着赤道太平洋 La Niña 事件的发生，西太平洋暖池区域的 SST 正距平不断加强。SST 变化一方面通过影响菲律宾附近的对流活动，使得西南风增强从而影响副高北抬；另一方面海洋对大气的加热输送增加，导致低层气流辐合，对流层上升运动增强，从而有利于 TC 的生成和发展。与此同时，低层高温高湿的环境场也有助于 TC 发展，因此 2022 年 9 月西北太平洋 TC 活动较为活跃。

3.2 东北太平洋副高变化成因

与西北太平洋相比，东北太平洋 TC 的生成范围比较集中，多生成于墨西哥湾附近，但在有限区域内 TC 生成数量为全球第二位(Zhao et al, 2021)，生成数量偏多且活跃区域集中使得东北太平洋 TC 的活动显著影响了墨西哥西部地区的降雨 (Collins and Mason, 2000)。ENSO 可以通过影响热带辐合带和哈得来环流调制东北太平洋 TC 活跃的区域 (Walker and Schneider, 2006; Friedman et al, 2013)。2022

年 9 月东北太平洋活跃的 TC 数量达到了历史极值，通过定量评估影响 TC 生成的环流因子，发现对流层中层垂直速度呈现正距平是引起东北太平洋 TC 生产偏多的重要因素（图 3），进一步对比 2022 年 9 月东北太平洋 500 hPa 环流系统较气候态的变化，发现环流经向度加大，北美洲西岸副高东退且强度减弱（图 5）。从墨西哥西部（110° ~ 90° W）经向环流可以发现（图 9），中低纬度对流层中层垂直运动加强，尤其是 10° N 附近上升运动显著增强且延伸至对流层高层，该区域上升运动的增强可以影响副高的强度和位置，从而更有利于热带扰动的发展增强。



注：填色为温度，单位：°C；箭头为风向；蓝色等值线为垂直速度，单位： $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 9 (a) 2022 年与 (b) 1990—2020 年 9 月东北太平洋经向环流

Fig.9 Meridional circulation over Northeast Pacific in September (a) 2022 and (b) from 1990 to 2020

经向环流是受热力作用直接驱动的大尺度环流（周波涛和王会军，2006），北半球气流在低纬度暖区上升，上升运动可延伸至 30° N 左右（图 9b）。La Niña 事件期间赤道区域温度降低（图略），对比气候

态与 2022 年 9 月对流层低层，2022 年 9 月其降温幅度达到了 4°C 以上，经向温度梯度增加导致低层北风加强，驱动中低纬度哈得来环流增强，使得 $10^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{N}$ 区域上升运动显著增强，从而有利于 TC 的生成和发展。与此同时，东北太平洋区域经向环流和低层气流辐合增强导致该区域热带辐合带随之增强，低层存在正的气旋性涡度也可以促进热带扰动的增强发展（图略）。

4 结论与讨论

继 2020 年和 2021 年后，2022 年赤道太平洋第三次发生了 La Niña 事件，出现了 21 世纪以来首次“三重” La Niña 事件，持续的气候异常给全球的天气和气候带来了显著影响，La Niña 事件中 SST 变化通过影响大尺度环流造成北太平洋 TC 活动异常活跃，2022 年 9 月东北太平洋活跃的 TC 数量达到了历史极值，西北太平洋生成的 TC 数量也远高于历史同期平均值。利用 TC 潜在生成指数评估发现 2022 年 9 月对流层中层垂直运动异常是影响北太平洋 TC 活动的重要因素，进一步分析发现热带地区海温异常通过影响菲律宾附近的对流活动、海气热量交换、经向温度梯度等引起中低纬度地区大气环流变化，从而导致对流层中层垂向运动发生变化，具体结论如下：

(1) 2022 年 9 月北太平洋活跃的 TC 数量较历史同期平均值显著偏多，并且东北太平洋和西北太平洋活跃的 TC 生成位置也分别出现在历史同期偏东及偏北一侧。利用 TC 潜在生成指数诊断发现对流层中层 500 hPa 垂直运动是影响北太平洋 TC 活动异常的关键因素，结合大尺度环流研究发现副高活动异常影响了北太平洋地区 TC 活动。

(2) 赤道太平洋 La Niña 事件的发生导致西北太平洋赤道暖池

区域的 SST 正距平不断发展, SST 变化一方面导致菲律宾附近对流活动活跃导致海洋性大陆西南风增强, 促使副高北抬; 另一方面通过低纬度南风将水汽和热量输送到中高纬度, 导致中纬度 SST 升高, 海洋成为大气热源使得低层气压降低, 对流层上升运动增强, 从而有利于西北太平洋 TC 生成和发展。

(3) La Niña 事件导致东北太平洋区域经向温度梯度增加, 经向哈得来环流增强, 中低纬度上升运动增强, 墨西哥西部副高向东移动, 与此同时低层气旋性涡度增加, 东北太平洋活跃的 TC 数量增加。

La Niña 事件给全球的天气和气候带来了重要影响, 本文主要关注 2022 年 La Niña 事件, 其通过影响大尺度环流对北太平洋 TC 生成数量产生影响, 黄勇等 (2009) 指出 ENSO 事件期间 SST 异常对 TC 的强度和路径也有重要影响, 相关研究有待于进一步开展。另外, 季节内振荡也可以影响北太平洋 TC 生成的环流系统, 有研究指出季节内振荡的湿位相期间, 低层的低频气旋性环流为西北太平洋地区 TC 的生成提供了有利条件 (孙长等, 2009; 祝丽娟等, 2012), 本文并未考察季节内尺度对 TC 生成的直接影响以及年际变化可能通过季节内尺度变率间接影响 TC 活动。此外, 利用再分析数据对 2022 年 9 月北太平洋 TC 活动异常活跃的成因进行了分析, 所得到的结论有待使用数值模拟手段进一步验证, 从而为预估未来极端气候背景下 TC 的活动提供理论支撑。

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. Chen L S, Ding Y H, 1979. Overview of typhoons in the Western Pacific [M]. Beijing: Science Press (in Chinese)
- 龚道溢, 何学兆, 2002. 西太平洋副热带高压的年代际变化及其气候影响[J]. 地理学报, 57(2): 185-193. Gong D Y, He X Z, 2002. Interdecadal change in Western Pacific Subtropical High and climatic effects[J]. Acta Geogr Sin, 57(2): 185-193 (in Chinese).

- 国家气候中心,2023. 2023年4月全球气候监测预测月报[R/OL].
http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_report_gmpb.php. National Climate Centre,2023. Impact assessment of April 2023 in China[R/OL]. http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_report_gmpb.php (in Chinese).
- 黄荣辉, 孙凤英, 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响[J]. 大气科学, 18(2): 141-151. Huang R H, Sun F Y, 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia[J]. Chin J Atmos Sci, 18(2): 141-151 (in Chinese).
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等, 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J]. 大气科学, 29(1): 20-36. Huang R H, Gu L, Xu Y H, et al, 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical Western Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 29(1): 20-36 (in Chinese).
- 黄勇, 李崇银, 王颖, 2009. 太平洋海气耦合经向模态和西北太平洋热带气旋生成频数的关系[J]. 热带气象学报, 25(2): 169-174. Huang Y, Li C Y, Wang Y, 2009. The Pacific Meridional Mode of coupled ocean-atmosphere and the connection with frequency of tropical cyclones activity over the Western North Pacific[J]. J Trop Meteor, 25(2): 169-174 (in Chinese).
- 刘娜, 2010. 东中国海热通量及热收支变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学. Liu N, 2010. Variations of heat flux and heat budget in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese).
- 刘芸芸, 李维京, 艾秀, 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).
- 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).
- 孙长, 毛江玉, 吴国雄, 2009. 大气季节内振荡对夏季西北太平洋热带气旋群发性的影响[J]. 大气科学, 33(5): 950-958. Sun C, Mao J Y, Wu G X, 2009. Influences of intraseasonal oscillations on the clustering of tropical cyclone activities over the Western North Pacific during boreal summer[J]. Chin J Atmos Sci, 33(5): 950-958 (in Chinese).
- 孙秀荣, 端义宏, 2003. 对东亚夏季风与西北太平洋热带气旋频数关系的初步分析[J]. 大气科学, 27(1): 67-74. Sun X R, Duan Y H, 2003. A study of the relationships between the East Asian summer monsoon and the tropical cyclone frequency in the Northwestern Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 27(1): 67-74 (in Chinese).
- 张永宁, 王辉, 张磊, 2001. 东北太平洋热带气旋活动特征分析[J]. 大连海事大学学报, 27(3): 7-9. Zhang Y N, Wang H, Zhang L, 2001. Analysis on active characteristics of tropical cyclone at Northeastern Pacific Ocean[J]. J Dalian Marit Univ, 27(3): 7-9 (in Chinese).
- 周波涛, 王会军, 2006. Hadley 环流的年际和年代际变化特征及其与热带海温的关系[J]. 地球物理学报, 49(5): 1271-1278. Zhou B T, Wang H J, 2006. Interannual and interdecadal variations of the Hadley

- circulation and its connection with tropical sea surface temperature[J]. *Chin J Geophys*, 49(5): 1271-1278 (in Chinese).
- 朱晶晶, 赵小平, 吴慧, 等, 2016. 2013 年影响海南热带气旋异常偏多成因分析[J]. *气象科学*, 36(2): 262-268.
- Zhu J J, Zhao X P, Wu H, et al, 2016. Abnormal abundant causes of tropical cyclone in Hainan Island in 2013[J]. *J Meteor Sci*, 36(2): 262-268 (in Chinese).
- 祝丽娟, 王亚非, 尹志聪, 2012. 热带 MJO 和 ENSO 对西北太平洋热带气旋影响研究综述[J]. *气象科技*, 40(1): 65-73. Zhu L J, Wang Y F, Yin Z C, 2012. Review of modulation impacts of Madden-Julian Oscillation and ENSO on tropical cyclone activities over western North Pacific[J]. *Meteor Sci Technol*, 40(1): 65-73 (in Chinese).
- Chan J C L, 1985. Tropical cyclone activity in the northwest Pacific in relation to the El Niño/Southern Oscillation phenomenon[J]. *Mon Wea Rev*, 113(4): 599-606.
- 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.
- Chu P S, Wang J X, 1997. Tropical cyclone occurrences in the vicinity of Hawaii: are the differences between El Niño and non-El Niño years significant?[J]. *J Climate*, 10(10): 2683-2689.
- Collins J M, Mason I M, 2000. Local environmental conditions related to seasonal tropical cyclone activity in the northeast Pacific Basin[J]. *Geophys Res Lett*, 27(23): 3881-3884.
- Deser C, Blackmon M L, 1995. On the relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations[J]. *J Climate*, 8(6): 1677-1680.
- Friedman A R, Hwang Y T, Chiang J C H, et al, 2013. Interhemispheric temperature asymmetry over the twentieth century and in future projections[J]. *J Climate*, 26(15): 5419-5433.
- Geng T, Jia F, Cai W J, et al, 2023. Increased occurrences of consecutive La Niña events under global warming[J]. *Nature*, 619(7971): 774-781.
- Gray W M, 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. *Mon Wea Rev*, 96(10): 669-700.
- 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.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al, 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2)[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(11): 1631-1644.
- Lander M A, 1994. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO[J]. *Mon Wea Rev*, 122(4): 636-651.
- Li H, Xu F H, Sun J R, et al, 2019. Subtropical high affects interdecadal variability of tropical cyclone genesis in the South China Sea[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 124(12): 6379-6392.
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. *Adv Atmos Sci*, 38(4): 690-699.
- Vincent D G, Fink A H, 2001. Tropical Cyclone Environments over the Northeastern and Northwestern Pacific

- based on ERA15 analyses[J]. *Mon Wea Rev*, 129(8):1928-1948.
- Walker C C, Schneider T, 2006. Eddy influences on Hadley circulations: simulations with an idealized GCM[J]. *J Atmos Sci*, 63(12): 3333-3350.
- 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, 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 Z, Lee S K, 2009. Co-variability of tropical cyclones in the North Atlantic and the eastern North Pacific[J]. *Geophys Res Lett*, 36(24): L24702.
- Wu G X, Lau N C, 1992. A GCM simulation of the relationship between tropical-storm formation and ENSO[J]. *Mon Wea Rev*, 120(6): 958-977.
- Wu P, Chu P S, 2007. Characteristics of tropical cyclone activity over the eastern North Pacific: the extremely active 1992 and the inactive 1977[J]. *Tellus A-Dyn Meteor Oceanogr*, 59(4): 444-454.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 31(2): 287-301.
- Zhao H K, Zhao K, Cao J, et al, 2021. Meridional migration of eastern North Pacific tropical cyclogenesis: joint contribution of interhemispheric temperature differential and ENSO[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 126(10): e2020JD034504.
- Zhou T J, Yu R C, Li Z X, 2002. ENSO-dependent and ENSO-independent variability over the mid-latitude North Pacific: observation and air-sea coupled model simulation[J]. *Adv Atmos Sci*, 19(6): 1127-1147.