

基于CMIP6/HighResMIP的西北太平洋热带气旋路径分型及其向极迁移贡献

褚佳文, 许士斌*

中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年4月23日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

本研究基于1977~2023年西北太平洋热带气旋最佳路径资料, 利用质心坐标、路径方差、生成消亡位置及转向角度等多特征进行K-means聚类, 将热带气旋路径客观划分为远海转向型、近海西行型、近海转向型、偏东北型和远海西行型五类。通过对比三套CMIP6/HighResMIP模式在历史与未来情景下的模拟结果, 揭示了热带气旋向极迁移趋势具有显著的路径依赖性与非均匀特征。结果显示, 未来偏东北型与远海西行型路径的最大强度纬度与质心纬度呈现最显著的北移趋势, 两类转向型路径的系统性北移对整体向极迁移具有“放大器”效应, 而近海西行型路径趋势不确定性最强, 多数指标对向极迁移呈负贡献。物理机制分析表明, 全球变暖背景下经向温度梯度减弱导致Hadley环流向极扩张、强度减弱, 其上升支北移为副热带地区创造了更利于热带气旋生成的动力环境; 同时Hadley环流下沉支北扩与副热带高压“北抬西伸”耦合, 引导气流带及转向点相应北移, 共同驱动了热带气旋路径的向极迁移。

关键词

热带气旋, 路径分类, 向极迁移, CMIP6

Track Classification and Contributions to Poleward Migration of Western North Pacific Tropical Cyclones Based on CMIP6/HighResMIP

Jiawen Chu, Shibin Xu*

College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: April 23, 2026; accepted: May 22, 2026; published: May 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 褚佳文, 许士斌. 基于 CMIP6/HighResMIP 的西北太平洋热带气旋路径分型及其向极迁移贡献[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(3): 663-673. DOI: 10.12677/ccrl.2026.153071

Abstract

Based on the best track data of tropical cyclones (TCs) in the western North Pacific from 1977 to 2023, this study employs a K-means clustering method using multiple features—including centroid positions, track variance, genesis/lysis positions, and turning angles—to objectively classify TC tracks into five types: offshore recurring (OR), nearshore westward (NW), nearshore recurring (NR), northeastward (NE), and offshore westward (OW). By comparing simulations from three CMIP6/HighResMIP models under historical and future scenarios, we reveal that the poleward migration trend of TCs exhibits significant track dependence and non-uniform characteristics. The results show that NE and OW tracks display the most pronounced northward shift in latitude of maximum intensity and centroid latitude under future scenarios. The systematic northward migration of the two recurring types (OR and NR) acts as an “amplifier” for the overall poleward shift, whereas the NW track type shows the strongest uncertainty, with most of its indicators contributing negatively to poleward migration. Physical mechanism analysis indicates that under global warming, the weakened meridional temperature gradient leads to the poleward expansion and overall weakening of the Hadley circulation. The northward shift of its ascending branch creates a more favorable dynamic environment for TC genesis in subtropical regions. Meanwhile, the northward expansion of the descending branch couples with the “northward extension and westward expansion” of the subtropical high, resulting in a corresponding northward displacement of the steering flow and recurvature points, which jointly drive the poleward migration of TC tracks.

Keywords

Tropical Cyclone, Track Classification, Poleward Migration, CMIP6

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

热带气旋(Tropical Cyclone, TC)是发生在热带洋面上具有暖心结构的强烈涡旋[1]。在气候变化背景下, TC 是否存在活动范围向两极扩张并导致沿海风险带重构, 已成为重要议题。Kossin 等指出, 全球多海盆的 TC 生命期最大强度位置存在显著向极迁移, 其中西北太平洋(Western North Pacific, WNP)的贡献最为突出[2]。Daloz 和 Camargo、Song 和 Klotzbach 及 Zhao 等的研究分别从生成位置、强度分布及驱动因素等角度对此现象进行了补充说明[3]-[5]。研究普遍认为, 全球变暖背景下热带海洋热力结构变化、Hadley 环流扩展、副热带高压调整及年代际海气振荡共同影响了 TC 的发展环境, 从而导致了最大强度区域的向极迁移。

围绕 WNP TC 的向极迁移现象, 研究主要关注路径变化的物理机制。传统理论认为, TC 移动主要由环境引导气流和 β 漂移决定[6] [7]。ENSO、副热带高压、季风槽等大尺度环流系统的变化, 能显著改变引导气流, 从而影响 TC 路径[8] [9]。此外, 海表面温度、垂直风切变、潜在生成指数和潜在最大强度等热动力因子也会共同塑造不同路径类型的长期变化趋势[10]-[12]。

在探究未来 TC 向极迁移的趋势方面, 许多学者选择从数值模式入手, 通过模式模拟探究未来 TC 是否向极迁移及其背后的可能机制。多个模式预估显示, 在 WNP 观测到 TC 向极迁移将在未来继续[9] [13]-[15]。CMIP6/HighResMIP 对 TC 的模拟相较于其他模式有显著提升[16]-[18]。在 CMIP6 多模式预测下,

未来 TC 向极迁移主要由两大机制共同驱动：一是全球变暖背景下 Hadley 环流向极扩张与 Walker 环流增强，共同改变大尺度引导场[19]；二是副热带北太平洋海温异常增暖，持续推动 TC 生成环境向高纬转移[20]。

尽管前人在相关研究中取得了丰富的成果，但关于 WNP TC 向极迁移的讨论多停留于海盆平均意义，重点考察位置的整体北移，而缺乏对不同路径类型如何具体贡献于这一平均信号的分类型定量分析，且机制研究更多解释总体路径变化，缺乏对副热带高压西伸等具体过程如何改变转向海域、重构不同路径概率，并与分类型结果一一对应的证据链[3] [9]。

针对上述不足，本文将重点从路径分类着手，利用 CMIP6/HighResMIP 高分辨率模式资料揭示不同路径类型数量变化对 WNP TC 向极迁移的定量贡献，并阐释其背后的动力与热力机制。

2. 数据与方法

2.1. 数据资料

本研究基于多源数据开展热带气旋路径与环流背景的综合分析。热带气旋路径历史观测资料采用日本气象厅(Japanese Meteorological Agency)发布的 1977~2023 年的最佳路径数据集，选取其中达到热带风暴及以上强度的 1191 个样本，依据其首次达到热带风暴阈值、首次达到最大风速及最后达到热带风暴强度的时次，分别定义了生成、最大强度和消亡位置，用于多年际路径统计。

未来预估部分选取三套 CMIP6/HighResMIP 高分辨率模式资料：CNRM-CM6-1-HR、EC-Earth-HR 和 MRI-AGCM3-2-H。选择这些模式主要基于以下考虑：第一，已有 HighResMIP 评估表明，高分辨率大气或耦合试验在 TC 强度与生命周期峰值分布方面普遍优于低分辨率配置[17]；第二，三者均提供可用于 TC 检测和路径分类的高时间分辨率环流场，能够较好重现 WNP 主要路径簇[18]；第三，三者均能较好地重现副热带高压和 Hadley 环流的基本形态[21]-[23]。值得说明的是，CNRM-CM6-1-HR 与 EC-Earth-HR 在模拟未来环流响应时相对稳健，而 MRI-AGCM3-2-H 则常表现出更强的敏感性，是模式间不确定性的重要来源之一[23]。将三者结合分析，既可基于相对一致的信号把握稳健趋势，亦可通过涵盖差异较大的模拟结果来评估预估的不确定性范围。本研究核心在于比较三套模式对不同路径类别未来趋势方向的一致性与分歧，以辨析向极迁移信号中的确定性部分与模式依赖部分。

2.2. 模式 TC 识别与未来分类

本研究采用通用的 TC 检测算法 TempestExtremes，基于高分辨率(6 h 间隔)模式数据提取与历史观测可比的 TC 路径[24]。检测过程通过四步物理筛选：

- 1) 在 6° 范围内识别海平面气压局部极小值为候选点；
- 2) 在候选点 5.5° 范围内要求海平面气压至少升高 2 hPa，以确保闭合等压线；
- 3) 在 300~500 hPa 位势厚度场上，检验候选点 1° 范围内存在暖心结构(6.5° 圆距内位势厚度减少 ≥ 6 位势米)；
- 4) 筛选生命史 60 h 以上的 TC 轨迹，且单条路径间断时间不得大于 18 h，否则记录为两条轨迹。

基于此统一标准从三套高分辨率模式中获得路径样本后，采用与历史时期一致的 K-means 聚类框架进行分类，从而确保历史与未来同类路径在几何特征上可比，以可靠评估未来 TC 频数趋势及其不确定性。

2.3. 路径分类特征量与 K-Means 聚类

为更客观地描述路径形态，本研究使用如下四类特征量，第一类为 TC 质心：

$$x_c = \sum(w_i x_i) / \sum w_i \quad (1)$$

$$y_c = \sum(w_i y_i) / \sum w_i \quad (2)$$

其中, x_i 、 y_i 为第 i 个时次的经纬度, w_i 为对应时次最大风速。

第二类特征量为路径方差, 用于度量轨迹在主方向上的伸展程度和离散程度:

$$\sigma_x^2 = \sum [w_i (x_i - x_c)^2] / \sum w_i \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \sum [w_i (y_i - y_c)^2] / \sum w_i \quad (4)$$

$$\sigma_{45}^2 = \sum w_i [(x_i - x_c) \cos 45^\circ + (y_i - y_c) \sin 45^\circ]^2 / \sum w_i \quad (5)$$

第三类特征量为生成位置和消亡位置, 它们直接反映路径起止位置差异。

第四类特征量为转向角度。设从生成位置指向最大强度位置的向量为 r_1 , 从最大强度位置指向消亡位置的向量为 r_2 :

$$r_1 = \frac{\text{lat}(1) - \text{lat}(n_{\max})}{\text{lon}(1) - \text{lon}(n_{\max})} \quad (6)$$

$$r_2 = \frac{\text{lat}(n) - \text{lat}(n_{\max})}{\text{lon}(n) - \text{lon}(n_{\max})} \quad (7)$$

则转向角度 θ 定义为:

$$\theta = -\tan^{-1} \left(\frac{r_2 - r_1}{1 + r_1 r_2} \right) \quad (8)$$

结合聚类稳定性、路径形态可解释性和样本数量分布, 本文最终取 $K = 5$ 。

2.4. 质量流函数

本研究使用质量流函数(Mass Stream Function, MSF)用于诊断 WNP 区域 Hadley 环流的经圈环流结构及其年代际变化。MSF 定义为在经度范围内对纬向质量通量的积分, 其经向 - 垂直剖面可直观展示 Hadley 环流上升支、下沉支和极向输送的强度与范围变化, 其公式为:

$$\Psi(\phi, p) = \frac{2\pi a \cos \phi}{g} \int_0^p [v] dp' \quad (9)$$

其中, ϕ 为纬度, p 为气压层, a 为地球半径, g 为重力加速度, $[v]$ 为经向风的纬向平均。本研究使用 $100^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$ 范围平均作为 WNP 区域 MSF。

3. 路径分类结果与未来向极迁移趋势分析

3.1. 路径分类结果

基于 1977~2023 年日本气象厅最佳路径数据提取的质心坐标、路径方差、生成及消亡位置和转向角度等特征量, 利用多特征 K-means 聚类可将西北太平洋热带气旋稳定划分为五类路径(图 1 首行), 并将结果命名为: 远海转向型(Offshore Recurving, OR)、近海西行型(Nearshore Westward, NW)、近海转向型(Nearshore Recurving, NR)、偏东北型(Northeastward, NE)和远海西行型(Offshore Westward, OW), 并以此为框架基于高分辨率模式资料提取的 TC 路径分类结果见图 1 第二至四行。其中“近海/远海”并非人为

设定的经纬度阈值, 而是聚类特征空间中质心位置偏西或偏东的客观结果。

总体而言, 三个模式都能够识别出与历史资料相近的五类主要路径骨架: 开阔洋面的远海转向型、近海西行型、西部海盆的近海转向型、偏东北型以及远海西行型。这说明本文基于质心、路径方差、生成消亡位置和转向角度建立的分类框架不仅适用于历史最佳路径资料, 也具有跨模式的可迁移性。换句话说, 尽管不同模式对个例强度、频数和细节轨迹的模拟技巧存在差异, 但在“路径几何形态”这一层面, 五类 TC 的基本结构仍然是相对稳健的。

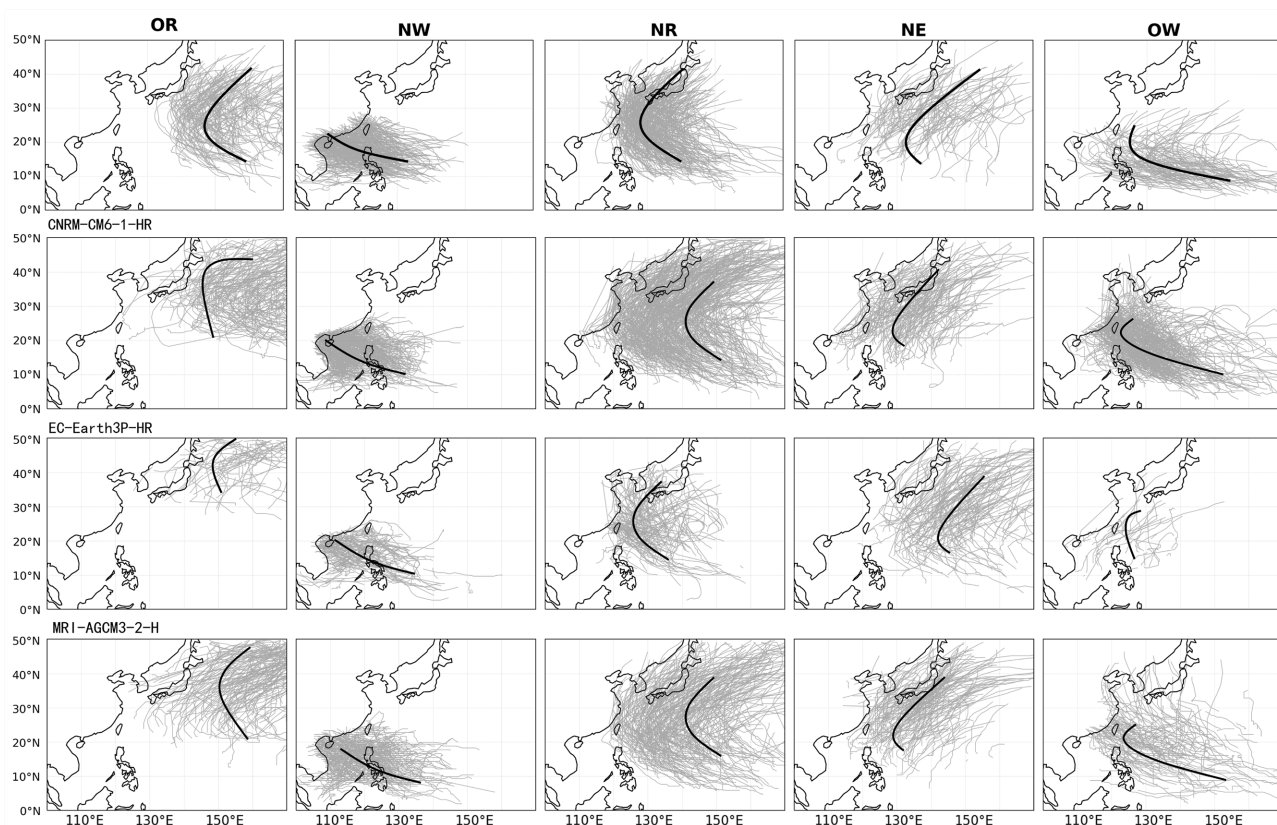


Figure 1. Classification results of five tropical cyclone (TC) track types over the Western North Pacific (WNP) from 1977 to 2023, based on historical observations (top row) and simulations by three high-resolution climate models (CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3P-HR, and MRI-AGCM3-2-H) for the historical (Present experiment, 1979~2014) and future (Future experiment, 2015~2023) periods

图 1. 1977~2023 年西北太平洋(Western North Pacific, WNP)热带气旋(tropical cyclone, TC)的五类路径分类结果, 基于历史观测(首行)及三套高分辨率模式(CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3P-HR, MRI-AGCM3-2-H)在历史时期(Present 试验, 1979~2014 年)和未来时期(Future 试验, 2015~2023 年)的模拟

3.2. 不同路径类型的未来趋势

图 2 对比了三个高分辨率模式对五类路径 TC 频数趋势的预估, 未来变化趋势具有显著的类别依赖性与模式依赖性, 且幅度较小。其中, 未来 NE 频数呈增长趋势, OW 倾向于减少, 可能进一步加强 WNP TC 平均位置向北扩展的趋势。NR 对副高边缘及转向通道变化敏感, 是向极迁移的关键类别之一, 但其未来趋势受模式间副高、季风槽模拟分歧影响, 稳健性低于 NE 和 OW。OR 和 NW 的未来趋势模式间一致性更低, 不确定性更大, 前者受中高纬环流影响显著, 后者则同时受低纬海温与副高西伸程度调控。因此, 未来 WNP TC 向极迁移是否增强, 主要取决于高纬偏转类增多能否抵消低纬西行类的变化, 而非总体数量变化。

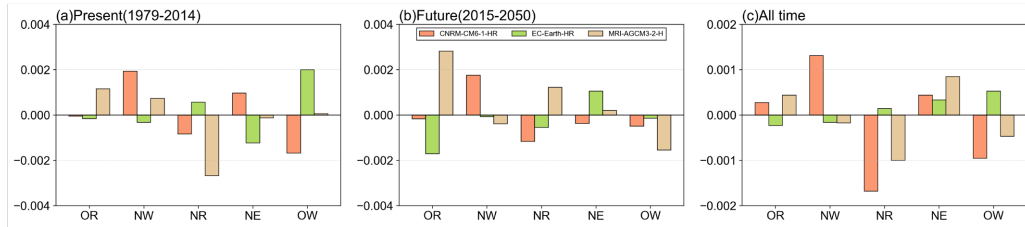


Figure 2. Long-term trends of TC frequency for the five track types under different models. The trend slope is given in $^{\circ}/\text{year}$
图 2. 不同模式下五类路径 TC 频数长期变化趋势, 趋势斜率单位为 $^{\circ}/\text{年}$



Figure 3. Long-term poleward migration trends of genesis, maximum intensity, dissipation, mean latitude and centroid latitude for TC of the five track types under different models. The trend slope is given in $^{\circ}/\text{year}$

图 3. 不同模式下五类路径 TC 生成、最大强度、消亡、平均纬度和质心纬度向极迁移长期趋势, 趋势斜率单位为 $^{\circ}/\text{年}$

综合分析所有路径类别的纬度指标(图 3), 可以发现三个气候模型在定性结论上高度一致: 所有五类路径的 TC 活动纬度(生成、峰值、消亡等)均呈现向极地迁移的趋势, 且 Future 试验时段的迁移速率普遍高于 Present 试验时段, 表明趋势正在加速。

在整个试验时段和 Future 试验时段中, NE 和 OW 这两类路径在最大强度纬度和质心纬度上均表现出最为强烈的北移趋势, 说明这两类路径本就活动在较高的纬度或具有向高纬度发展的倾向。气候变化如副热带高压的北抬西伸、中纬度西风带的变动等, 可能为它们创造了更有利的向极地发展的环境通道。NE 的路径可能更加偏北偏东, OW 的长西行路径可能在其生命后期更易北翘。

两类转向型 TC, OR 和 NR 的北向趋势整体偏弱, 且更加体现在平均和质心纬度的北移, 这很可能是由于转向型路径的关键是副热带高压脊线的位置。气候变暖导致副高北抬, 将使转向点和 TC 整体系统性北移。转向型 TC 作为 TC 占比中的重要部分, 其最大强度的北移对向极迁移的贡献具有较为显著的“放大器”效应。而 NW 在各模式数据中的趋势不确定性较强, 且多数指标呈现负值趋势, 在模式模拟中对未来的 TC 向极迁移起到副作用。

若将 Present 试验时段与 Future 试验时段对比, 可以发现模式间分歧在未来阶段普遍大于历史阶段, 这一现象在路径分类研究中并不意外。因为路径不仅受热力学背景影响, 还高度依赖环流场细节, 而不同模式在副热带高压、中纬度西风、季风槽和风切变分布上的微小偏差都会在长期积分中放大为路径差异。

4. 相关环流背景与物理机制

4.1. 500 hPa 位势高度场演变与副热带高压的北抬西伸

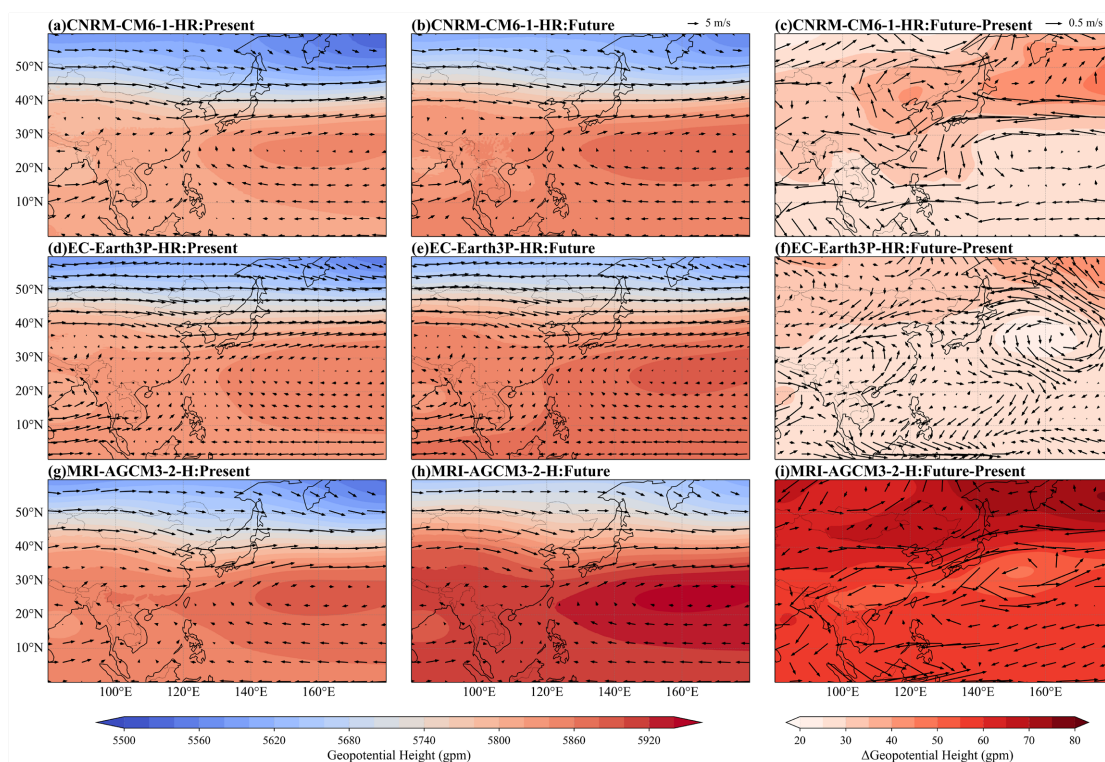


Figure 4. (a)~(c) CNRM-CM6-1-HR; (d)~(f) EC-Earth3P-HR and (g)~(i) MRI-AGCM3-2-H model simulations of 500 hPa geopotential height (shading) and wind field (vectors) in the WNP region, for the Present (1979~2014), Future (2015~2050) periods and the difference between the two periods

图 4. (a)~(c) CNRM-CM6-1-HR; (d)~(f) EC-Earth3P-HR 和 (g)~(i) MRI-AGCM3-2-H 模式数据在 WNP 区域 500 hPa 位势高度场(填色)和风场(矢量), 时段分别为 Present (1979~2014)、Future (2015~2050)及两个时段的差值

图 4 的位势高度场差值分析显示, 未来 6~10 月西太平洋副热带地区被大范围正异常覆盖, 其轴线沿西北-东南向倾斜, 位于北纬 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 附近, 对应副高脊线明显北抬与西侧脊加强, 呈现“北抬西伸”的特征。这一结构性调整对 TC 路径具有决定性影响: 副高脊线北抬使其南侧东风引导气流带北移, 既在 TC 生成与发展初期为各路径类型注入了系统性向北的背景分量, 使得各类 TC 路径生成位置都在未来有不同程度的北移, 也为转向型路径(OR, NR)进入更高纬度后的持续北向运动提供了更有利的大尺度流场条件。同时, 副高西侧脊形态变化使得 TC 转向点系统性北移, 这解释了各类 TC 路径平均纬度、质心纬度及消亡纬度的普遍北移, 尤其对 NE 和 OW 路径, 增强且北抬的副高西侧脊可在其中后期提供更持续偏北的引导, 促使其路径“更加偏北偏东”或“后期更易北翘”, 与路径分类统计结论一致。此外, 三个模式的 $25^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 附近均存在位势高度梯度增大或弱负异常区, 对应有气旋式涡度异常, 该异常可能局部削弱副高西南侧反气旋环流, 形成弱引导区或流场汇合, 一方面有利于 TC 在该区域徘徊或路径复杂化, 另一方面也可能提供额外的向北偏折扰动, 进一步增加转向型路径(OR, NR)和 NE 的北向分量, 从而协同放大整体向极迁移趋势。

4.2. WNP 区域 Hadley 环流的扩张与减弱

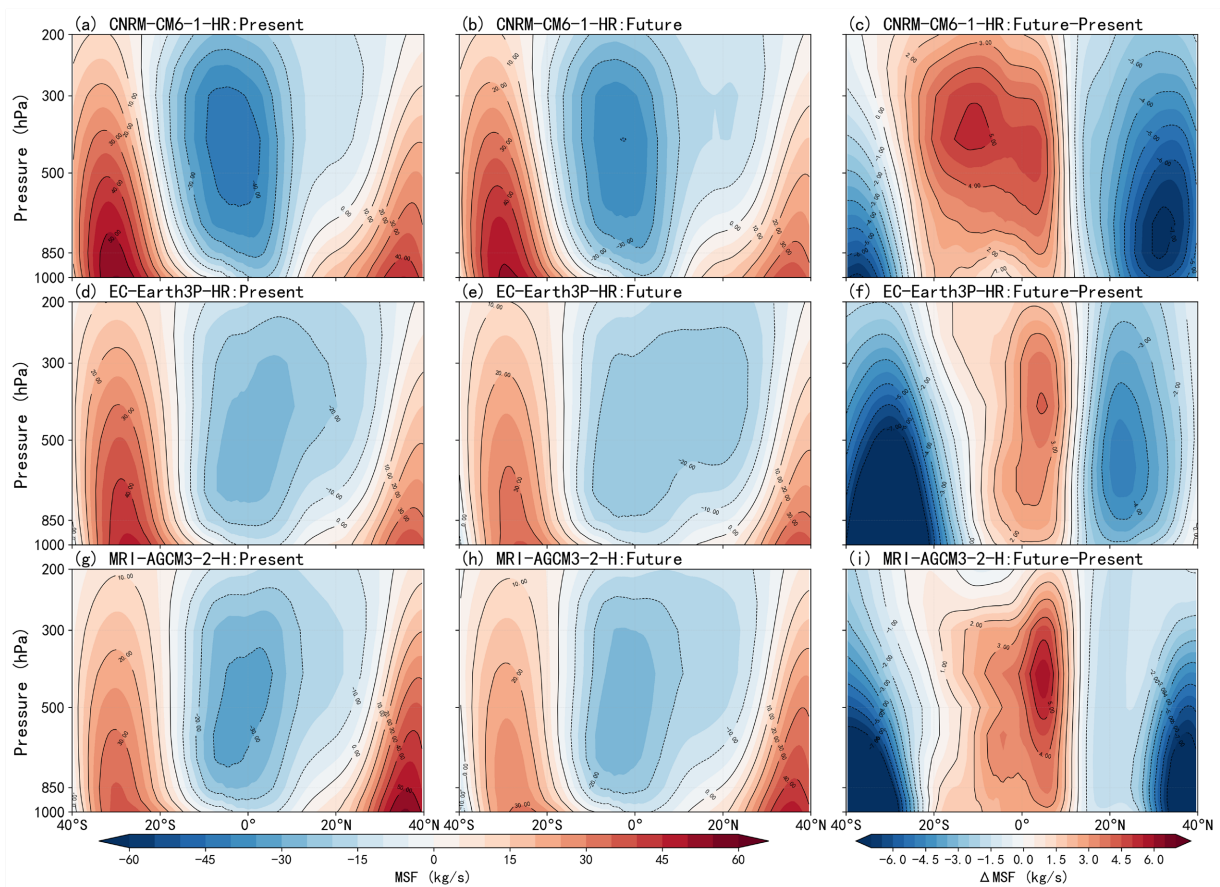


Figure 5. (a)~(c) CNRM-CM6-1-HR; (d)~(f) EC-Earth3P-HR and (g)~(i) MRI-AGCM3-2-H model simulations of the meridional mass stream function MSF vertical cross-section in the WNP region for the Present (1979~2014), Future (2015~2050) periods and the difference between the two periods. The positive values in the shading represent westward (eastward) motion
图 5. (a)~(c) CNRM-CM6-1-HR; (d)~(f) EC-Earth3P-HR 和 (g)~(i) MRI-AGCM3-2-H 模式数据在 WNP 区域 Hadley 环流的质量流函数 MSF 经向-垂直剖面图, 时段分别为 Present (1979~2014)、Future (2015~2050) 及两个时段的差值, 填色图中负(正)值代表西向(东向)运动

图 5 的经向质量流函数(MSF)剖面显示, 未来情景下 Hadley 环流呈现空间范围向极扩张与强度普遍减弱并存的特征。其下沉支与上升支边界均向高纬移动, 下沉支北移与图 4 中观测到的副高主体北抬直接同源, 构成了副高位置变化的深层环流背景。与此同时, 差值场(Future-Present)中上升支 MSF 极大值与下沉支 MSF 极小值均呈反相趋势, 表明 Hadley 环流强度减弱。这一变化主要归因于全球变暖背景下热带-极地经向温度梯度减弱, 从而削弱了驱动经圈环流的根本热力动力。三个模式在该未来变化模态上高度一致, 反映了全球变暖响应的核心特征。

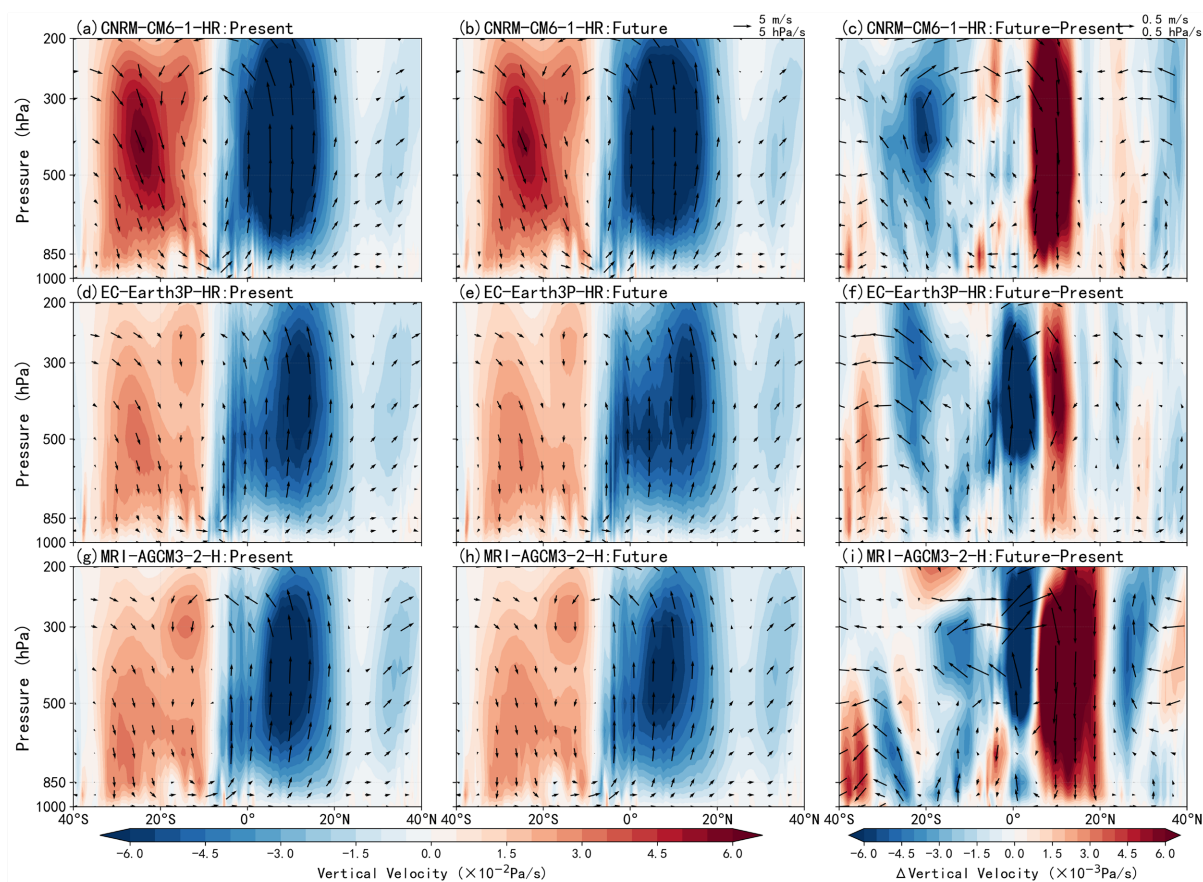


Figure 6. Zonal circulation structure of Hadley circulation in the WNP region. (a)~(c) CNRM-CM6-1-HR; (d)~(f) EC-Earth3P-HR and (g)~(i) MRI-AGCM3-2-H model data of the area-averaged zonal-mean divergent meridional wind ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, vectors) and vertical velocity ($10^{-2} \text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, vectors) in the WNP region for the Present (1979~2014), Future (2015~2050) periods and the difference between the two periods. The background shading represents the vertical air velocity in the same region, with negative (positive) values indicating upward (downward) motion

图 6. WNP 区域 Hadley 环流的经圈环流结构, (a)~(c) CNRM-CM6-1-HR; (d)~(f) EC-Earth3P-HR 和 (g)~(i) MRI-AGCM3-2-H 模式数据在 WNP 区域纬向平均散度风的经向分量($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 矢量)和垂直速度($10^{-2} \text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$, 矢量)的经向-垂直分布, 时段分别为 Present (1979~2014)、Future (2015~2050)及两个时段的差值。背景填色为同一区域的垂直气压速度。负(正)值代表上升(下沉)运动

图 6 的经向散度风与垂直速度合成分析显示, 未来 20°N 至 35°N 区域垂直上升运动普遍增强, 而 10°N 以南部分海域上升运动减弱或转为下沉增强, 构成垂直速度场的经向“偶极型”变化, 直接体现了 Hadley 环流上升支的北移。在北纬 20° ~ 35° 的中低对流层, 异常的低层辐合与高层辐散配置有利于正涡度集中与对流维持, 该环流中心恰好位于未来 TC 生成密度可能增加的纬度带, 配合减弱的垂直切变与辐合中心北移, 为偏北的 TC 初始涡旋生成提供了优越环境条件。Hadley 环流“扩张但减弱”的结构调

整对 TC 生成分布产生两方面影响：一方面，下沉支北向扩张使大尺度下沉区向赤道延伸，可能加强 5°N~15°N 近赤道西太平洋的下沉运动，抑制该区域深对流与 TC 生成，显著抑制了 NW、OW 等生成纬度较低、以西行为主路径类型的初始生成，并削弱其向西北方向持续发展的动力条件，从而在“减少低纬 TC 源”的层面上推动整体路径向极迁移；另一方面，上升支北移使北纬 15°~30°副热带洋面的大尺度下沉带北撤，转为受间歇性上升或中性层结影响，动力条件改善直接驱动 OR、NE、NR 等路径的生成位置系统性向高纬偏移。副高脊线的北抬与西伸进一步强化了其转向后的经向移动分量，形成了“转向点北移 + 经向移动增强”的双重驱动，最终在“增加中高纬 TC 汇”的维度上进一步推进了向极迁移。

5. 主要结论

本研究基于对 WNP TC 路径的客观分型及背景环流分析，揭示未来该区域 TC 路径总体呈现向极迁移趋势，但表现出显著的路径依赖性及非均匀性特征。需指出，上述结论主要基于所选用的三套高分辨率模式数据集，其稳健性受限于当前模式的物理参数化与模拟能力。

研究表明，未来向极迁移主要由 NE 与 OW 两类路径的强烈北移所驱动，其最大强度与质心纬度呈现最显著北移趋势，这与副热带高压北抬西伸、开辟更有利的高纬发展通道密切相关。其次，转向型路径(OR 与 NR)通过平均纬度与质心纬度的系统性北移起到协同增强作用，反映了副高脊线北抬导致转向点北移的气候背景，对整体迁移具有“放大器”效应。相比之下，路径数量变化对整体迁移的贡献相对有限，主要表现为 OW 占比减少、OR 占比增加，很可能源于 OW 向 OR 的路径转变。此外，NW 类路径的未来趋势在各模式中不确定性最强，多数指标呈负趋势或变化不显著，在模拟中对总体北移趋势起抵消作用。总体而言，未来向极迁移是由 NE 和 OW 的强烈北移驱动、转向型路径的系统性偏移协同、以及 NW 的弱响应或负贡献构成的复合结果，而非均匀变化。

未来试验中“向极迁移”现象的物理机制与大尺度环流的系统性调整紧密相关。一方面，在热力背景下，全球变暖导致经向温度梯度减弱，使得 Hadley 环流呈现“空间范围向极扩张、整体强度减弱”的特征。其上升支的北移直接为副热带地区创造了更利于 TC 初始涡旋生成的环境条件，从而驱动 TC 生成纬度的向极迁移。另一方面，在动力引导层面，Hadley 环流下沉支的北向扩张与副热带高压的“北抬西伸”相耦合。副高脊线及其西侧脊的北移，使其南侧的东风引导气流带和 TC 的转向点均相应北移，为 TC 生命史中后期的路径注入了持续的向北分量。这尤其对 NE 和 OW 路径型产生了放大效应，使其最大强度纬度与质心纬度呈现显著的北移趋势。

基金项目

本研究受到国家自然科学基金(41975061)的资助。

参考文献

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] Kossin, J.P., Emanuel, K.A. and Vecchi, G.A. (2014) The Poleward Migration of the Location of Tropical Cyclone Maximum Intensity. *Nature*, **509**, 349-352. <https://doi.org/10.1038/nature13278>
- [3] Daloz, A.S. and Camargo, S.J. (2018) Is the Poleward Migration of Tropical Cyclone Maximum Intensity Associated with a Poleward Migration of Tropical Cyclone Genesis? *Climate Dynamics*, **50**, 705-715. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3636-7>
- [4] Song, J. and Klotzbach, P.J. (2018) What Has Controlled the Poleward Migration of Annual Averaged Location of Tropical Cyclone Lifetime Maximum Intensity over the Western North Pacific since 1961? *Geophysical Research Letters*, **45**, 1148-1156. <https://doi.org/10.1002/2017gl076883>
- [5] Zhao, H., Zhao, K., Klotzbach, P.J., Wu, L. and Wang, C. (2022) Interannual and Interdecadal Drivers of Meridional Migration of Western North Pacific Tropical Cyclone Lifetime Maximum Intensity Location. *Journal of Climate*, **35**, 2709-

2722. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0797.1>
- [6] Wang, Y. and Holland, G.J. (1996) The Beta Drift of Baroclinic Vortices. Part II: Diabatic Vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53**, 3737-3756. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<3737:tbdobv>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<3737:tbdobv>2.0.co;2)
- [7] Wang, B., Elsberry, R., Wang, Y. and Wu, L. (1998) Dynamics in Tropical Cyclone Motion: A Review. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **22**, 535-547.
- [8] Wang, B. and Chan, J.C.L. (2002) How Strong ENSO Events Affect Tropical Storm Activity over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, **15**, 1643-1658. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1643:hseeat>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1643:hseeat>2.0.co;2)
- [9] Wu, L. and Wang, B. (2004) Assessing Impacts of Global Warming on Tropical Cyclone Tracks. *Journal of Climate*, **17**, 1686-1698. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1686:aigowo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1686:aigowo>2.0.co;2)
- [10] Hu, C., Zhang, C., Yang, S., Chen, D. and He, S. (2018) Perspective on the Northwestward Shift of Autumn Tropical Cyclogenesis Locations over the Western North Pacific from Shifting Enso. *Climate Dynamics*, **51**, 2455-2465. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4022-1>
- [11] 陶丽, 蓝玉峰, 孔承承. ENSO 与西北太平洋强 TC 相关关系的年代际变化研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(5): 596-607.
- [12] 陶丽, 张艺帆, 王学兵. 南海与西北太平洋地区夏季热带气旋潜在生成指数的改进[J]. 大气科学学报, 2020, 43(4): 603-616.
- [13] Kossin, J.P., Emanuel, K.A. and Camargo, S.J. (2016) Past and Projected Changes in Western North Pacific Tropical Cyclone Exposure. *Journal of Climate*, **29**, 5725-5739. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0076.1>
- [14] Lin, I., Camargo, S.J., Lien, C., Shi, C. and Kossin, J.P. (2023) Poleward Migration as Global Warming's Possible Self-Regulator to Restrain Future Western North Pacific Tropical Cyclone's Intensification. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, **6**, Article No. 34. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00329-y>
- [15] Cao, X., Watanabe, M., Wu, R., Chen, W., Sun, Y., Yan, Q., *et al.* (2024) The Projected Poleward Shift of Tropical Cyclogenesis at a Global Scale under Climate Change in MRI-AGCM3.2H. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2023GL107189. <https://doi.org/10.1029/2023gl107189>
- [16] Horn, M., Walsh, K., Zhao, M., Camargo, S.J., Scoccimarro, E., Murakami, H., *et al.* (2014) Tracking Scheme Dependence of Simulated Tropical Cyclone Response to Idealized Climate Simulations. *Journal of Climate*, **27**, 9197-9213. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00200.1>
- [17] Camargo, S.J. (2013) Global and Regional Aspects of Tropical Cyclone Activity in the CMIP5 Models. *Journal of Climate*, **26**, 9880-9902. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00549.1>
- [18] Tang, Y., Huangfu, J., Huang, R. and Chen, W. (2022) Simulation and Projection of Tropical Cyclone Activities over the Western North Pacific by CMIP6 Highresmp. *Journal of Climate*, **35**, 7771-7794. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0760.1>
- [19] Li, Z. and Zhou, W. (2024) Poleward Migration of Tropical Cyclones over the Western North Pacific in the Cmp6-Highresmp Models Constrained by Observations. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, **7**, Article No. 161. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00704-3>
- [20] Jian, D., Zhao, H., Klotzbach, P.J., Raga, G.B., Gao, J., Cao, J., *et al.* (2024) Projected Poleward Migration of Western North Pacific Tropical Cyclone Genesis. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2024GL109852. <https://doi.org/10.1029/2024gl110031>
- [21] Xia, Y., Hu, Y. and Liu, J. (2020) Comparison of Trends in the Hadley Circulation between CMIP6 and CMIP5. *Science Bulletin*, **65**, 1667-1674. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.06.011>
- [22] 闫佳宁, 黄菲, 许士斌. CMIP6 高分辨率模式中西北太平洋热带气旋未来活动时空变化特征[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(4): 896-906.
- [23] Yang, K., Ma, J., Chen, X. and Wang, L. (2024) The Source of the Uncertainties in CMIP6 Model's Projections of the Summertime Northwest Pacific Subtropical High. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **130**, e2024JD041854. <https://doi.org/10.1029/2024jd041854>
- [24] Ullrich, P.A. and Zarzycki, C.M. (2017) Tempestextremes: A Framework for Scale-Insensitive Pointwise Feature Tracking on Unstructured Grids. *Geoscientific Model Development*, **10**, 1069-1090. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1069-2017>